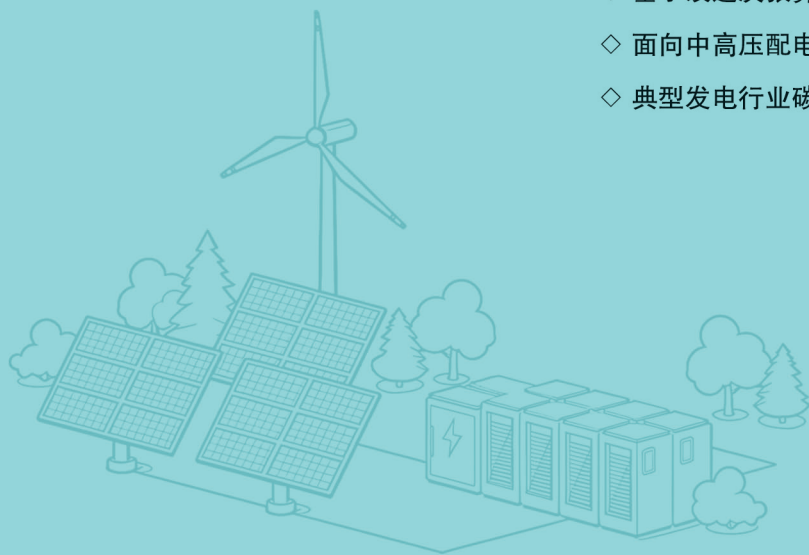


# 山东电力技术

SHANDONG ELECTRIC POWER

- ◇ 电动汽车 - 储能协同的配电网双向重过载分级治理策略
- ◇ 基于改进灰狼算法的海上风电场运维方案优化
- ◇ 面向中高压配电网安全的电采暖负荷最优调度
- ◇ 典型发电行业碳足迹评估综述



2026.3

第53卷  
2026年3月

ISSN 1007-9904



国网山东省电力公司主办

## 特约专栏主编简介



**刘含笑**，硕士，高级工程师，浙江菲达环保科技股份有限公司副总工、双碳办主任，浙江省环保集团生态环保研究院有限公司副总经理。全国青年岗位能手、浙江省“万人计划”青年拔尖人才，主要研究方向为减污降碳技术，主持或为主参与国家级课题4项、省部级课题7项，授权发明专利20余项，发表核心及以上论文50余篇，出版专著3部，牵头或参与制修订国标4项、行标5项、团体标准50余项。荣获湖北省科技进步一等奖等奖项10余项。



**李超**，博士、博士后，现为浙江大学专职研究员，杭州市浙大青山湖能源低碳利用概念验证中心碳排放管理分中心主任，长期从事能源低碳利用前沿技术开发、碳排放量化管理与“双碳”目标技术路径研究等方面的工作，先后主持或参与完成了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金、国家863项目、国家973课题、国际合作项目、中央高校科研发展专项及企业横向委托等四十余项科研项目。



**朱前林**，博士，副研究员，硕士生导师，中国矿业大学二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）研究所副所长、碳核查认证中心主任。主要研究方向为二氧化碳地质封存、渗流理论与测试、CCUS系统优化、碳减排管理等。先后主持国家自然科学基金、国家重点研发子课题及企业合作课题30余项，发表论文30余篇，以第一作者或通讯作者发表15篇，其中SCI检索8篇，主持或参编标准制定8项，授权国家发明专利4项，获绿色矿山科学技术一等奖1项。



**林青阳**，博士，浙江大学能源工程学院“百人计划”研究员，博导。能源高效清洁利用全国重点实验室固定成员，英国帝国理工学院（Imperial College London）访问学者。主要研究方向为能源系统生命周期技术经济分析、多孔介质跨尺度传热传质与多相流动等，主持和参与国家自然科学基金青年科学基金、浙江省“尖兵”研发攻关计划项目、中国工程院战略研究与咨询项目等科研项目。发表SCI论文60余篇，授权发明专利6项、参编并发布行业标准10项。

## 特约主编寄语

能源电力行业是国民经济核心命脉，也是我国最大碳排放源和首个纳入全国碳交易市场的关键行业，其低碳发展深刻影响“双碳”战略落地成效。当前行业低碳发展仍面临诸多堵点，如碳排放评估管理体系不健全、CCUS技术规模化应用不足、减排与电力保供协同难、全产业链低碳转型路径待明晰等挑战。为此，《山东电力技术》特设“能源电力行业碳排放、碳减排与碳资源化利用”专栏，聚焦碳排放评估与管控技术、低碳发电与能源结构优化、集成式管控、CCUS全链条技术创新四大核心维度，梳理行业关键技术研发进展与创新实践。专栏旨在搭建跨领域学术交流与技术合作平台，促进多方深度协同，为行业优化碳管理、加速低碳转型提供支撑，助力国家“双碳”目标实现。

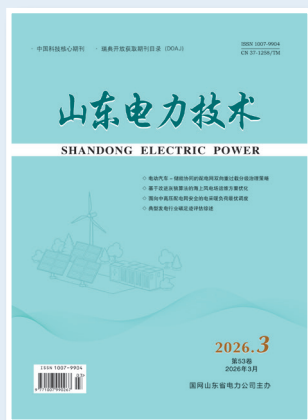
# 山东电力技术

## SHANDONG ELECTRIC POWER

### 收录情况

中国科技核心期刊  
中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊  
中国期刊全文数据库（CJFD）收录期刊  
中文科技期刊数据库收录期刊  
波兰 ICI World of Journals 数据库收录期刊  
美国《乌利希国际期刊指南》收录期刊  
瑞典开放获取期刊目录（DOAJ）收录期刊  
美国 EBSCO 学术数据库收录期刊

主管单位：国网山东省电力公司  
主办单位：国网山东省电力公司  
编辑出版：《山东电力技术》编辑部  
地 址：济南市市中区望岳路 2000 号  
邮政编码：250003  
电 话：（0531）67982997  
电子信箱：sddljs@sina.com  
网 址：sddljs.cbpt.cnki.net  
印 刷：济南浪宇印刷有限公司  
发 行：公开发行 自办征订  
定 价：18.00 元 / 册



## 山东电力技术

### SHANDONG DIANLI JISHU

（月刊）

1974 年创刊  
2026 年第 3 期  
第 53 卷（总第 340 期）  
2026 年 3 月 25 日出版

中国标准连续出版物号：

ISSN 1007-9904

CN 37-1258/TM

期刊基本参数：

CN 37-1258/TM\*1974\*m\*A4\*120\*zh\*P\* ¥18.00\*6000\*10\*2026-3\*n

# 《山东电力技术》编辑委员会

顾 问：陈维江 郑建华 侯保荣 雷清泉 王成山

主 任：孙 岗

副 主 任：王伟胜 吴文传 刘玉田 陈志勇 慕世友 田 健

委 员：（按姓氏笔画为序）

丁 磊 丁 勇 丁 涛 王 波 王 彬 王中冠 王建东 王士柏 牛 涛  
巨云涛 刘晓明 刘 新 孙 波 孙树敏 许 寅 严志国 苏 洲 吴秋伟  
沈欣炜 杨 越 李志刚 李知艺 李正烁 陈思捷 赵艳雷 钟海旺 姚 伟  
高 嵩 郭 锐 常馨月 董 泽 程新功 彭道刚 朱文兵 郑伟业 薛屹洵

青年委员：（按姓氏笔画为序）

王子轩 王亚杰 王丽馨 王 栋 王要强 王啸天 王鲁浩 王 骞 牛哲文  
仇梦林 卞一帆 邓 丰 田艳军 包铭磊 宁家兴 吐松江·卡日 吕 思  
吕 哲 吕超贤 乔文杰 乔 健 刘冬兰 刘彦华 刘 淇 刘鹏辉 刘瀚琛  
刘耀先 江 军 孙正龙 孙 鹏 贡韞韵 杜程茂 李亚辉 李 进 李泽宁  
李冠冠 杨 义 杨修宇 杨晓东 杨 博 余光正 张玉敏 张 宁 张 宏  
张 波 张 烁 张 峰 张海涛 张 银 张 逸 张 智 张慧媛 张 磊  
陈飞雄 陈 颀 邵 阳 苗安康 范 青 范贤浩 金 丽 周 南 周 涛  
赵 都 胡玉耀 胡银龙 钟俊杰 贺帅佳 袁 亮 夏晨阳 徐俊俊 高仕林  
高 扬 高 晗 郭东波 郭 威 黄婧杰 曹永吉 曹 彬 章 锐 梁永亮  
韩建沛 程乐峰 谢香敏 蔺晨晖 臧天磊 翟俊义 熊永新 薛 霖

主 编：吴文传 孟 瑜

执行主编：马 艳

责任编辑：郑天茹 姜婷婷 张丹丹 车永强

# 目次

## 能源电力行业碳排放、碳减排与碳资源化利用

- 典型发电行业碳足迹评估综述 ..... 袁电洪,吴刚,刘含笑,孙立,顾朋喜,殷浩然(1)
- 固体酸催化剂催化有机胺CO<sub>2</sub>吸收液解吸研究进展 ..... 周亚明,陈泰峰,冉初萌,刘含笑,陈俊道(16)
- 输变电工程建设多目标低碳优化路径分析 ..... 张峰,方靖宇,李超,方梦祥,陈晶(27)

## 新能源

- 基于改进灰狼算法的海上风电场运维方案优化 ..... 蒋习庆,王冰,陈玉全,张劲峰(36)
- 基于天鹰优化算法的海上风-光-波混合系统最大功率输出的阵列优化 ..... 邹毅军,郜登科,杨博(47)
- 考虑双馈风机调频控制和系统频率约束的风机最大接入规模评估  
..... 贾宇乔,张宁宇,李铮,刘与铮,丁涛(61)

## 配电网

- 电动汽车-储能协同的配电网双向重过载分级治理策略  
..... 李世春,衷传州,谢佳宏,李冷昕,余嘉宁,王秋杰(73)
- 基于改进D-S证据理论和CEEMD的配电网高阻故障选线方法 ..... 张明,陆恣,张鑫(85)

## 源网荷储协调互动

- 面向中高压配电网安全的电采暖负荷最优调度 ..... 崔晨瑜,张俊岭,于程,施啸寒(97)
- 面向光伏消纳率提升的建筑直流互联集群划分研究 ..... 王绪利,武澳丽,凌孺,张辉,邓其军(107)

# CONTENTS

## • Carbon Emissions, Carbon Reduction and Carbon Resource Utilization in Energy and Power Industry •

Overview of Carbon Footprint Assessment in Typical Electric Generation Industry

..... YUAN Dianhong, WU Gang, LIU Hanxiao, SUN Li, GU Pengxi, YIN Haoran(1)

Research Progress on Solid Acid Catalysts Used for CO<sub>2</sub> Desorption From Organic Amines Absorption Liquids

..... ZHOU Yaming, CHEN Taifeng, RAN Chumeng, LIU Hanxiao, CHEN Junxiao(16)

Analysis of Multi-objective Low-carbon Optimization Paths for Power Transmission and Transformation Project

Construction ..... ZHANG Feng, FANG Jingyu, LI Chao, FANG Mengxiang, CHEN Jing(27)

## • New Energy •

Maintenance Route Optimization for Offshore Wind Farms Using an Improved Grey Wolf Optimization Algorithm

..... JIANG Xiqing, WANG Bing, CHEN Yuquan, ZHANG Jinfeng(36)

Array Optimization for Maximum Power Output of Offshore Wind-solar-wave Hybrid Systems via Aquila

Optimization Algorithm ..... ZOU Yijun, GAO Dengke, YANG Bo(47)

Evaluation of Maximum Access Scale of Wind Turbine Considering Frequency Modulation Control of Doubly-fed

Wind Turbine and System Frequency Constraint

..... JIA Yuqiao, ZHANG Ningyu, LI Zheng, LIU Yuzheng, DING Tao(61)

## • Distribution Network •

Hierarchical Mitigation of Bidirectional Overload in Distribution Networks via Electric Vehicle-energy Storage

Coordination ..... LI Shichun, ZHONG Chuanzhou, XIE Jiahong, LI Lingxin, YU Jianing, WANG Qiuji(73)

Method for High-resistance Faulty Line Selection in Distribution Networks Based on Improved D-S Evidence

Theory and CEEMD ..... ZHANG Ming, LU Min, ZHANG Xin(85)

## • Source-Grid-Load-Storage Coordinated Interaction •

Optimized Dispatch of Electric Heating Loads for Medium-high Voltage Distribution Network Security

..... CUI Chenyu, ZHANG Junling, YU Cheng, SHI Xiaohan(97)

Research on the Division of Building DC Interconnection Clusters for Improving Photovoltaic Consumption Rate

..... WANG Xuli, WU Aoli, LIN Ru, ZHANG Hui, DENG Qijun(107)

## SHANDONG ELECTRIC POWER

(Monthly, Started in 1974)

**Administration** State Grid Shandong Electric Power Company

**Sponsor** State Grid Shandong Electric Power Company

**Edited by** Editorial Department of Shandong Electric Power

**Chief Editor** WU Wenchuan MENG Yu

**Address** No.2000, Wangyue Road, Jinan, China 250003

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250140 ·能源电力行业碳排放、碳减排与碳资源化利用·

## 典型发电行业碳足迹评估综述

袁电洪<sup>1</sup>, 吴刚<sup>2</sup>, 刘含笑<sup>2,3\*</sup>, 孙立<sup>2</sup>, 顾朋喜<sup>1</sup>, 殷浩然<sup>1</sup>

(1. 国家能源集团泰州发电有限公司, 江苏 泰州 221008;

2. 浙江菲达环保科技股份有限公司 浙江省燃煤烟气净化装备研究重点实验室, 浙江 诸暨 311800;

3. 浙江省环保集团生态环保研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

**摘要:**为应对全球气候变暖和国际贸易绿色壁垒挑战,构建科学化碳足迹评估体系已成为实现“双碳”战略目标的核心路径,尤其在碳排放占比超40%的电力行业更具紧迫性。电力碳足迹评估在我国仍处于起步阶段,本文针对我国发电行业碳足迹研究系统性不足的现状,基于对碳足迹现状和发展的研究,通过构建全生命周期碳足迹评估体系,系统解析了火力、新能源等典型发电模式的碳排放特征,提出涵盖原料获取、加工运输、运行维护、废弃物处置等全链条评估模式,并对比国内外发电行业碳排放现状,以此提出了国内发电行业的低碳发展方向和相应建议措施。最后在分析我国发电行业碳足迹现状的基础上,从标准互认体系的构建、新型发电技术的综合性碳足迹评估、碳足迹评估与信息技术的结合三方面提出建议,为推进电力行业减污降碳协同治理提供方法论支撑和技术路线指引。

**关键词:**生命周期;碳足迹;碳中和;发电行业;温室气体

中图分类号:TM 621;X82

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)03-0001-15

## Overview of Carbon Footprint Assessment in Typical Electric Generation Industry

YUAN Dianhong<sup>1</sup>, WU Gang<sup>2</sup>, LIU Hanxiao<sup>2,3\*</sup>, SUN Li<sup>2</sup>, GU Pengxi<sup>1</sup>, YIN Haoran<sup>1</sup>

(1. CHN Energy Taizhou Power Generation Co., Ltd., Taizhou 221008, China;

2. Feida Environmental Protection Technology Co., Ltd.,

Key Laboratory of Coal Fired Flue Gas Purification Equipment Research of Zhejiang Province, Zhuji 311800, China;

3. Zhejiang Environmental Protection Group Eco-Environmental Research Institute, Hangzhou 310030, China)

**Abstract:** In order to cope with the challenges of global warming and green barriers in international trade, the construction of a scientific carbon footprint assessment system has become the core path to realize the goal of the “dual carbon” strategy, especially in the electric power industry, which accounts for more than 40% of the carbon emissions, the urgency is even greater. Since the carbon footprint assessment of electric power is still in its infancy in China, this paper focuses on the current situation of insufficient systematic research on the carbon footprint of China’s power generation industry. Based on the knowledge of the current situation and development of the carbon footprint, this paper constructs a whole life cycle carbon footprint assessment system, systematically analyzes the carbon emission characteristics of typical power generation modes such as thermal power and new energy, and proposes a whole chain assessment model covering the acquisition of raw materials, processing and transportation, operation and maintenance, and disposal of wastes. It also proposes a whole chain assessment model covering raw material acquisition, processing and transportation, operation and maintenance, and waste disposal, and combines the current carbon emission status of the power generation industry at home and abroad to put forward the direction of low-carbon development of the power generation industry in China and the corresponding suggestions and measures. Finally, on the basis of analyzing the current situation of carbon footprint in China’s power generation industry, this paper puts forward some suggestions from the construction of a standard mutual recognition system, comprehensive carbon footprint assessment of new power generation technologies, and the combination of carbon footprint assessment and information technology, so as to provide methodological support and technical route guidance for the promotion of collaborative governance of pollution reduction and carbon reduction in the power industry.

**Keywords:** life cycle; carbon footprint; carbon neutrality; power industry; greenhouse gas**基金项目:**国家重点研发计划(2022YFC3701501);浙江省“尖兵”计划项目(2022C03030)。

National Key Research and Development Program of China (2022YFC3701501); “Vanguard” Plan of Zhejiang Province (2022C03030).

## 0 引言

近年来,碳排放引发的温室效应已成了全球关注的重点。根据国际上权威性的综合报告,目前的排放轨迹表明,在不到10年的时间里,全球气温较工业化前升高超过 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1-2]</sup>,且全球碳排放量仍在持续走高<sup>[3]</sup>。因此,近年来许多国家都陆续提出了限制二氧化碳排放的目标和减排行动规划<sup>[4-5]</sup>。我国也提出了碳达峰碳中和关键目标,为此,需要明确减排重点,聚焦碳排放集中行业<sup>[6]</sup>。能源行业是世界上最大的温室气体排放源之一,2023年,全世界与能源相关的碳排放量上涨了1.1%,达到374亿t的历史新高<sup>[7]</sup>。在我国,电力行业作为能源行业的主力军,碳排放问题更为严重。电力行业是我国最大的碳排放源,其在全国碳排放量中占据了40%以上的份额<sup>[8]</sup>,其中传统的燃煤发电碳排放占据电力行业总排放的60%<sup>[9]</sup>。作为实现“双碳”目标的责任主体和关键行业,我国电力行业的低碳化发展已成为社会共识,电力行业也成为首个被纳入碳交易系统的行业。电力碳足迹是对发电行业的生命周期进行温室气体排放量化和评估,对电力行业的碳排放管理和减碳工作具有十分重要的意义<sup>[10-11]</sup>。2024年5月22日,生态环境部国家发展改革委等十五个部门,统一发布了《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》,其中将电力行业作为需要优先发布重点产品碳足迹核算规则的行业<sup>[12]</sup>。而在国际上,欧盟将电力作为碳关税征收的六个重点行业之一。碳足迹作为碳标签的核心,是突破欧盟碳壁垒的关键所在。对发电行业进行全生命周期的碳足迹评估,不仅符合电力行业碳摸底和降碳减排需求,也符合国际发展新形势新要求。

本文基于生命周期评价(life cycle assessment, LCA)法,在国内外碳足迹相关文献的基础上,对各类发电方式进行全生命周期碳排放分析,了解碳足迹在电力行业的应用情况,据此提出我国电力行业降碳工作关键环节以及发展方向。

## 1 碳足迹

### 1.1 碳足迹概念

碳足迹主要以二氧化碳排放当量( $\text{CO}_2$  equivalent,

$\text{CO}_2\text{eq}$ )表示,一般表征人类生产或消费中所排放的与气候变化相关的温室气体总量,包括产品或服务全生命周期内直接和间接的温室气体排放,由生态足迹发展而来<sup>[13-14]</sup>。产品碳足迹评估是从全生命周期角度出发,分析某一产品生命周期中直接或间接生产的温室气体排放过程,主要用来衡量人类活动对环境的影响,同时用于评估环保性能及可持续性。碳足迹概念为正确理解和管理温室气体排放提供了一个可靠的工具,明确碳足迹概念是开展碳足迹评估的基础,从碳足迹入手,可挖掘产业链降碳减排潜力,助力绿色发展。

### 1.2 碳足迹评估方法

碳足迹评估方法可用来准确量化指定过程内产品、服务或生产过程的碳排放量,是一个复杂而重要的过程,不仅可以帮助企业、个人了解自身碳排放情况,还能为制定减排策略提供依据。目前主要有投入产出(input-output, I-O)法、LCA法和联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)法三种碳足迹评估方法<sup>[15-17]</sup>。

投入产出法是一种自上而下的模型<sup>[18]</sup>,该方法通过建立平衡方程来反映主体和被评价对象之间的对应关系。该方法可以将经济关系转化为物理关系,反映部门或地区之间的直接和间接排放关系,适用于全球、国家、区域和组织等尺度,而在具体产品等微观层面上碳足迹评估的效果受到限制<sup>[19]</sup>。IPCC法是一种应用范围广泛的碳足迹核算方法,其采用活动数据和排放因子相乘的方法来计算温室气体排放量,IPCC指南为世界各国评估温室气体排放提供了统一的框架基础,为各国温室气体排放清单的汇编提供技术指导<sup>[20]</sup>。

LCA法涵盖产品或服务的原料开采、加工运输、产品生产、使用和废弃处置全阶段,即从“摇篮到坟墓”的能源物资消耗及环境影响全流程追踪。该方法已经逐渐成为一套得到广泛应用和认可的评价体系,如图1所示,完整的LCA过程包括目标与范围的界定、清单分析、影响评价和结果解释四个步骤,可以从产品全生命周期全面评估碳足迹<sup>[21]</sup>。

1)目标与范围的界定。根据研究对象确定功能单位与研究边界,通过确定评估的基准确保不同方案的可行性。对于电力产品来说,往往选择1 kWh

发电量作为功能单位,系统边界则根据具体发电形式进行确定。

2)清单分析。收集研究对象现场数据以及背景数据,涵盖能源、材料输入及污染物输出。

3)影响评价。使用当量因子量化影响,将排放物转化为可比指标,例如使用 GWP100(100 年全球变暖潜势),燃煤电厂 CH<sub>4</sub>逸散的全球变暖潜势为 CO<sub>2</sub>的 25 倍。

4)结果解释。进行敏感性分析和不确定性评估,验证结果的可靠性;识别关键环境影响源(如燃煤发电 90% 碳排放来自煤炭燃烧),并提出优化建议。

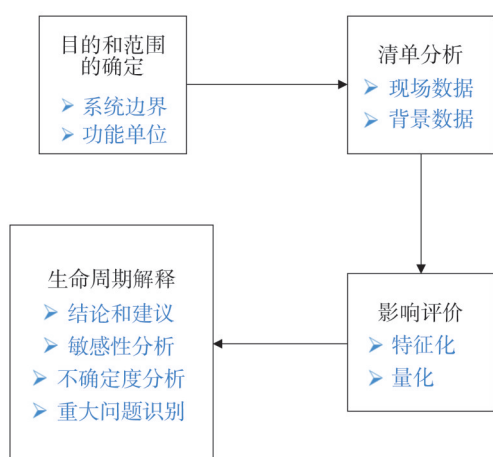


图1 生命周期评价体系

Fig.1 Life cycle assessment system

采用 LCA 法可以对电力产品全生命周期各环节包括原辅料开采获取、设备制造、加工运输、消费使用和废弃物处置等全流程碳排放量进行量化和评

估。LCA 法还可适用于多种类型发电方式,根据研究目标和范围进行调整,优化评估过程,可以更直观地了解电力生产对环境的影响,并为制定减排策略提供依据。

### 1.3 碳足迹标准

随着全球变暖问题的日益严峻,许多国家、组织和相关机构开展了标准推进工作。其中包括国际标准化组织、世界资源研究所、英国标准协会等,在推动全球碳足迹管理方面发挥着重要作用,推出了一系列标准如 ISO 14067、PAS 2050 和 GHG Protocol 等,如表 1 所示,为全球碳足迹评估体系的建立提供了参考指导,为国际间碳足迹交流提供了基础。国内的碳足迹标准体系尚待完善,目前已经出台了相关政策,根据《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》,我国提出了制定产品碳足迹标准的目标,并且按照团体标准先行先试、逐步转化为行业标准或国家标准的原则,强调了团体标准的重要性。除此之外,我国在 2024 年 8 月 23 日发布了 GB/T 24067—2024《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》,为国内编制具体产品碳足迹提供了统一指导。

目前,我国政府和企业实施了一系列举措来促进电力行业的碳减排,推动电力行业标准化体系的发展。为响应“十五五”电力发展规划研究,中电联牵头联合全国重要的电力能源企业进行了电力产品碳足迹核算方法及基础能力建设研究,旨在识别电力行业关键碳排放节点,构建电力行业标准化体系,促进“双碳”目标实现。此外,国内环保领域的部分先进企业,如浙江菲达环保等公司,在电力行业碳排放标准方面迈出了重要步伐,牵头制定了热电联产、

表1 国际国内碳足迹标准<sup>[22-24]</sup>

Table 1 International and domestic carbon footprint standards<sup>[22-24]</sup>

标准名称	标准号	年份	国家或组织
《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》	PAS 2050	2008	英国标准协会
《温室气体核算体系:产品生命周期核算与报告标准》	GHG Protocol	1998	世界资源研究所、世界可持续发展工商理事会
《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》	ISO 14067	2018	国际标准化组织
《环境管理 生命周期评价原则与框架》	GB/T 24040	2008	中国
《环境管理 生命周期评价要求与指南》	GB/T 24044	2008	中国
《环境管理 环境标志和声明 自我环境声明》	GB/T 24021	2008	中国
《温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南》	GB/T 24067	2024	中国

光伏发电、燃煤发电、垃圾焚烧发电等一系列产品碳足迹量化与评价标准,为电力行业碳减排提供了良好的示范作用。

#### 1.4 碳足迹研究现状

在全球变暖的背景下,从国际到国内,碳足迹工作正逐步成为促进可持续发展的关键举措。碳足迹评价体系早期研究以厘清温室气体排放的核算框架为核心任务,重点关注其内涵界定与环境关联。随着理论体系的发展,焦点转向方法论创新,包括排放因子库构建、核算模型优化等技术工具的突破性探索。例如瑞士的 Ecoinvent 数据库,涵盖了欧洲以及世界多国 7 000 多种产品的单元过程和汇总过程数据集,包含各种常见物质的 LCA 清单数据,是国际 LCA 领域使用最广泛的数据库之一。在市场监管总局和国家发展改革委等部门的推动下,我国也推出了一系列数据库供研究者参考,例如中国生命周期基础数据库(Chinese life cycle database, CLCD),是由四川大学建筑与环境学院和亿科环境共同开发的中国本地化的生命周期基础数据库,涵盖中国大宗能源、原材料、运输的 LCA 数据;天工数据库是国内首个开放透明的碳足迹数据库,汇聚了涵盖我国 55 个行业、4 000 多组单元过程的 70 000 多条公开数据。在此基础上,碳足迹扩展到了多领域应用。王兴来<sup>[25]</sup>借助了国际 Ecoinvent 数据库以及中国产品全生命周期温室气体排放系数库(China products carbon footprint factors database, CPCD)进行背景数据收集,对江苏省农业碳足迹进行了分析;陈珊<sup>[26]</sup>则以《IPCC 国家温室气体清单指南》等国内外权威机构所公布的数据库及资料对污水厂进行了碳足迹研究。此外碳足迹评估在 LCA 的方法学基础上也逐渐向着多技术融合的方向发展,大数据与人工智能技术被广泛应用于供应链数据追踪,借助先进工业互联网技术的发展,智能化碳足迹管理平台提高了结果的可靠性,推动了碳足迹评估技术的突破。杨明<sup>[27]</sup>通过用户管理、数据管理、本体处理、碳足迹管理四个功能模块,打造了一个产品碳足迹分析与计算平台,在对产品的碳足迹进行计算和分析的基础上,还可通过多个图表直观地展示碳足迹的分布情况。随着全球“双碳”目标的推进,碳足迹评估正向多维度、全生命周期、智能化的系统化评价方向

发展。

## 2 典型电力领域碳足迹评估

### 2.1 火力发电碳足迹

由于我国富煤、贫油、少气的能源国情,火力发电成为我国发电行业的中流砥柱,也是最大的碳排放行业之一,并且火力发电在未来很长一段时间内仍将在我国电力结构中占据较大的比重<sup>[28]</sup>。典型火力发电形式以燃煤和燃气为主,根据燃料类型以及能源利用方式进行划分,包括常见的燃煤发电、燃气发电、垃圾焚烧发电、热电联产等发电方式,其生命周期边界如图 2 所示。

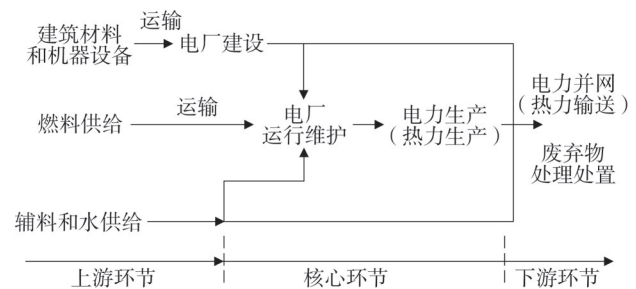


图2 火力发电生命周期碳足迹评估边界

Fig.2 Life cycle carbon footprint assessment boundary for fired power generation

目前普遍将火力发电生命周期系统边界按照上游、核心和下游环节进行划分<sup>[29]</sup>,具体如表 2 所示。

火电行业以燃煤发电为主,传统的燃煤发电碳排放占电力行业总排放的 60%。对于燃煤发电,煤燃烧等产生的大量直接碳排放可占全流程的 90% 以上。考虑到电站建设和退役阶段设计数据多样且对整体碳足迹影响较小,在我国碳排放数据库尚未完全成熟的情况下,为便利煤电企业对自身进行产品碳足迹核算,可将电站建设和退役阶段不纳入核算范围。目前国内对于燃煤电厂的生命周期碳排放开展了众多研究,Xu<sup>[30]</sup>提出了建立基于全生命周期分析的中国煤能源链碳排放测度模型,通过模型对比计算,得出燃煤电厂发电机组发电能力在煤能源链上的 CO<sub>2</sub> 当量排放总量为 990.72 g/kWh;刘含笑等<sup>[31]</sup>对河北省某燃煤电厂 300 MW 燃煤发电机组进行研究,得出该机组单位上网电量碳足迹为 932 g/kWh。

表2 典型火力发电边界划分  
Table 2 Typical thermal power generation boundary delineation

发电类型	上游	核心	下游
燃煤发电	燃料供给(煤炭开采、加工、运输),基础资源供给(辅料、水、能源、建材、设备)	电力生产及电厂运维(锅炉燃煤、脱硫脱硝等设施运行)	电力并网及废物处置(灰渣利用、烟气净化)
燃气发电	燃料供给(天然气开采、加工、净化),基础资源供给(辅料、水、能源、建材、设备)	电力生产及电厂运维(锅炉燃煤、脱硫脱硝等设施运行)	电力并网及废物处置(废水处理、烟气净化)
垃圾焚烧发电	燃料供给(垃圾运输、预处理),基础资源供给(辅料、水、能源、建材、设备)	电力生产及电厂运维(锅炉燃煤、脱硫脱硝等设施运行)	电力并网及废物处置(炉渣利用、渗滤液处理、烟气净化)
热电联产	燃料供给(煤炭/天然气开采、加工、运输),基础资源供给(辅料、水、能源、建材、设备)	电力与热力生产及运维(锅炉燃煤/燃气、脱硫脱硝等设施运行)	电力并网,热力输送,废物处置(灰渣利用、烟气净化)

燃气电厂全生命周期边界和燃煤发电类似,和同等规模燃煤发电相比,燃气发电往往占地面积更小,没有燃料废弃处置环节,且燃料燃烧效率更高,不会产生  $\text{SO}_2$  等污染物排放<sup>[32]</sup>,因此燃气电厂往往具有较低的碳足迹。有学者对应用开式循环燃气轮机和联合循环燃气轮机的燃气电厂进行研究,得出其碳足迹分别为 620.87 g/kWh 和 450.04 g/kWh<sup>[33]</sup>。与燃煤发电相比,燃气发电是一种环保、高效、灵活度高的发电方式,随着绿色低碳的要求越发严格,可通过优化气体净化方式提高燃气质量;优化系统运行参数提高发电系统效率;推进废气资源化回收利用等方式降低碳排放。

垃圾焚烧发电其生命周期边界一般不包含生活垃圾的获取过程产生的碳排放,由于垃圾热值普遍偏低,经常采用辅助措施,由此产生了大量的碳排放<sup>[34]</sup>。刘含笑等<sup>[35]</sup>对某垃圾焚烧发电厂采用 LCA 法进行碳足迹评估,结论表明该电厂 1—8 月份碳足迹为 0.916 kg/kWh。目前我国各大城市已经开始实施垃圾分类工作,因此未来垃圾焚烧发电可使用的干垃圾会得到集中处理,燃烧后产生的飞灰、炉渣等废弃物会减少,使垃圾焚烧发电变得更为有效。

热电联产系统是一种可将燃料燃烧产生的能量同时用于发电和供热的方式,可显著提高能源利用效率,是一种具有综合效益的发电方式<sup>[36]</sup>。热电联产碳足迹在核算过程中涉及热电分配方式,选择合适的分配方式是得到准确碳足迹核算结果的基础。在之前的研究中,文献<sup>[37]</sup>基于热电比、供热比、固定系数和单独生产效率四种分配方式,对

浙江省某热电机组进行研究,得出其碳足迹值为 0.50~1.02 kg/kWh,并且提出基于供热比的分配方式,在我国实际情况中具有良好的推广价值。

综合上述对典型火电碳足迹的分析,碳足迹差异主要源于边界划分、燃料质量、机组工艺、能源利用效率以及数据来源的差异。火力发电系统的碳排放核算范围在理论上可划分为上游原料获取、核心发电过程及下游排放处理三个阶段。然而从实践操作层面分析,生产建设环节、设施退役阶段以及下游环节的碳数据获取往往存在显著的技术障碍。总体来说,火力发电的碳足迹主要集中于核心生产阶段的燃烧直接排放,其次是上游的燃料获取环节。因此,火力发电的碳足迹评估重点关注燃料开采运输(上游)和发电转化(核心)两个阶段,从而挖掘碳减排路径。

在火电行业碳减排方面,厘清碳排放情况和机组运行过程科学降碳是关键。碳监测会大大降低温室气体排放数据质量管理难度,是未来国内碳排放量统计的必然趋势。火电厂碳监测主要通过烟气排放连续监测系统,实时、自动、精准获取  $\text{CO}_2$  浓度和烟气流量,提高碳排放数据可靠性、准确性,支撑电力行业完善碳排放统计核算基础;尾端  $\text{CO}_2$  捕集利用技术也是降低碳排放的重要手段。Jung 等<sup>[38]</sup>采用 LCA 法对泰安某电厂进行了有无碳捕集利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)装置下的碳足迹对比,结果发现采用 CCUS 装置下碳足迹为 230 g/kWh,明显低于无 CCUS 装置下的 1 040 g/kWh。目前国内大部分 CCUS 技术已达到

工业示范水平,其CO<sub>2</sub>捕集率大于90%。虽然采用CCUS技术前期需要较高的成本,但对于火电行业来说,该技术是促进低碳转型、实现净零排放的关键技术,在政策和技术进步推动下,有望在未来得到更广泛的应用。

### 2.2 清洁能源发电碳足迹

典型清洁能源发电是指利用可再生资源产生电能的方式,其核心目标是减少碳排放并实现可持续发展,主要包括光伏发电、风电、水电等形式。清洁能源发电碳足迹是衡量可再生能源全生命周期碳排放强度的重要指标,采用从“摇篮到坟墓”的划分方式进行生命周期边界划分,涵盖原材料获取、设备制造、运输、建设、运营维护到退役回收的全链条排放。边界划分如图3和表3所示。

清洁能源发电系统碳排放总量可以通过式(1)一式(2)表示。

$$E_c = E_{\text{yuan}} + E_{\text{tra}} + E_{\text{manu}} + E_{\text{con}} + E_{\text{op}} + E_{\text{dis}} \quad (1)$$

$$E = \sum_1^n M_i F_i \quad (2)$$

式中: $E_c$ 为碳排放总量,kg; $E_{\text{yuan}}$ 为原材料获取加工阶段碳排放量,kg; $E_{\text{tra}}$ 为运输阶段碳排放量,kg; $E_{\text{manu}}$ 为建造阶段碳排放量,kg; $E_{\text{op}}$ 为运营维护阶段碳排放量,kg; $E_{\text{dis}}$ 为废弃回收阶段碳排放量,kg; $n$ 为消耗的物料种类; $M_i$ 为某一生命周期内消耗第*i*项物料的质量,kg; $F_i$ 为某一生命周期内消耗的第*i*项物料的碳排放因子; $E_{\text{con}}$ 为设备制造阶段碳排放量,kg; $E$ 为具体阶段的碳排放,kg。

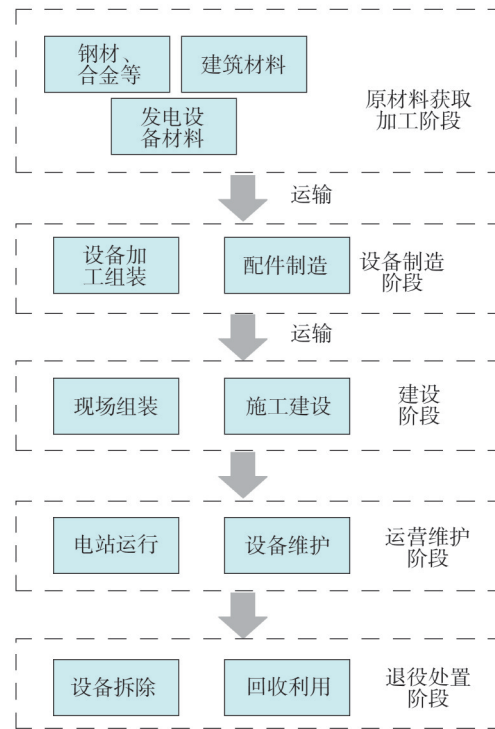


图3 清洁能源发电生命周期边界

Fig.3 Clean energy generation life cycle boundaries

#### 1) 光伏发电碳足迹。

光伏发电被认为是清洁高效的新能源,但从生命周期角度看,光伏系统的各个阶段都会造成能源消耗和产生碳排放<sup>[39-40]</sup>,因此研究光伏系统的全生命周期碳排放对大力推进光伏系统的广泛应用具有重大意义。与火力发电碳足迹构成不同,光伏发电系统碳足迹主要来自其上游环节光伏组件的生产过程。光伏组件是该系统的关键部件,根据赵若楠等

表3 清洁能源发电边界划分

Table 3 Clean energy generation boundary delineation

清洁能源发电	原材料获取加工	设备制造	运输	建设	运营维护	退役处置
光伏发电	发电基材、钢、合金、硅料、玻纤等获取加工	太阳能电池板、逆变器、控制器、电线电缆等	原材料运输、设备运输	光伏电站建设、配套设施建设	电站运行、设备维护更换	废弃组件拆卸处理、废弃物回收利用
风力发电	钢、铁、铜、铝、玻璃纤维等风机设备原材料,水泥等建筑材料	风机叶片、轮毂、发电机、塔筒等制造	原材料运输、设备运输	风电站建设、配套设施建设	电站运行、设备维护更换	废弃风机配套件拆卸处理、废弃物回收利用
水力发电	钢铁、水泥、混凝土、柴油、木材等建筑材料	发电机等机电设备制造	原材料运输、设备运输	大坝建设、配套设施建设	电站运行、设备维护更换	电站退役、废弃物回收利用
核能发电	铀矿开采、铀转化浓缩、水泥、钢材等	核燃料元件、核反应堆、压力容器等	原材料运输、设备运输	核电站、配套设施建设	电站运行、设备维护更换	非放射性部件拆解、回收利用,放射性原件去污处理、乏燃料后处理

人的研究<sup>[41]</sup>,光伏系统运行维护阶段产生的碳足迹约是全流程碳足迹的 1/20,占据的比例很小。目前常见的光伏组件有硅基光伏组件、薄膜组件和新型光伏组件<sup>[42]</sup>。由于我国硅储量丰富,硅基光伏组件是目前市场上应用最广泛的产品,常分为单晶硅和多晶硅两类。王怀斌<sup>[43]</sup>对西北某单晶硅双面组件为基础的光伏发电系统进行研究,研究范围从原材料获取到废弃回收,得到其全生命周期碳足迹为 21.4 g/kWh;Stylos 团队<sup>[44]</sup>对国外某多晶硅光伏系统进行研究,并结合其他研究案例,得出多晶硅光伏系统全生命周期碳足迹为 12.28~58.81 g/kWh。薄膜组件包括非晶硅组件、碲化镉组件、铜铟镓硒薄膜组件等,与硅基组件相比,具有相对更简单的制造工艺,且不涉及硅料高温处理环节,相对来说具有更低的碳排放。Kim 等<sup>[45]</sup>对其他学者的 109 项研究进行分析,综合考虑效率、辐照、性能比、系统平衡和使用寿命几项因素,得出以非晶硅、碲化镉、铜铟镓硒三种材料作为组件的光伏系统碳足迹分别为 20、14 和 26 g/kWh。新型光伏组件包括钙钛矿、染料敏化组件,其中钙钛矿是一种具有优异性能的新型半导体功能材料,于 2009 年初次在光伏领域应用。庄园等<sup>[46]</sup>在太阳辐照度为 1 000 W/m<sup>2</sup>、电池转换效率为 12% 情况下,对钙钛矿光伏组件进行研究,得出 1 m<sup>2</sup> 钙钛矿太阳能电池的碳足迹为 28.9 kg/kW。

除电池种类外,光伏系统生命周期碳足迹也会受到诸如生产工艺、太阳辐射、转化效率和回收方法等多种因素影响。因此通过优化产业链生产工艺、降低硅片厚度、提高硅片尺寸、提升组件效率,可以进一步减少光伏组件的碳足迹。除此之外,光伏电站寿命为 25~30 年<sup>[47]</sup>,在未来几年,我国将会迎来大批废弃组件的回收利用,因此改进之前存在的粉碎、填埋等处理方式,提高光伏组件回收技术的成熟度和效率,关注废旧组件的回收机制,制定统一管理标准与要求来进行光伏废弃组件的回收,并推动试行废旧组件回收市场交易平台,可有效降低光伏系统碳足迹。

## 2) 风力发电碳足迹。

风力发电借助自然风力吹动风机旋转产生机械能,进而驱动风机内发电机转子转动,从而将风的动能转化为电能<sup>[48]</sup>。风能蕴量大,且是清洁、安全和可

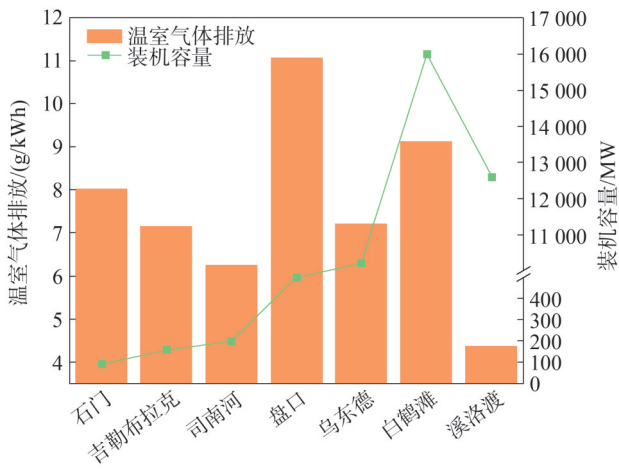
再生的能源,因此受到国家的重视。截至 2024 年底,中国风电装机容量约 5.2 亿 kW,我国风力发电集中在风能资源丰富的地区,主要是东北、华北、西北地区和沿海地区。

风力发电碳足迹在风机生产制造环节产生的碳排放最多,风机的主要部分叶片、塔筒等涉及大量的钢、铝、混凝土等高碳排放材料<sup>[49]</sup>。目前风力发电主要有陆上风电和海上风电两种形式,根据杨敬言等的研究<sup>[50]</sup>,陆上风电系统生命周期内碳足迹为 6.16~19.32 g/kWh;Kaldellis 等<sup>[51]</sup>研究了多篇参考文献和相关资料,认为海上和陆上平均风电碳足迹分别为 15.6 g/kWh 和 9 g/kWh。从全生命周期的角度分析,海上风电在制造阶段涉及更复杂的技术和设备,例如海底电缆敷设、海上变电站、电力输送装置,不仅如此,在退役回收阶段进行海底设施的拆除过程复杂、成本高、环境影响大,从而导致在这些环节产生比陆上风电更大的碳排放。然而相比陆地,海上具有更丰富的风力资源,因此在相同机组容量下,海上风电满载状态的发电量更高<sup>[52]</sup>,因此在选择风力发电形式时,应综合考虑地理环境和能源需求,以实现碳减排效益。在当前背景下,从优化风机产品设计、提高风机年发电量和发电小时数出发,实施降碳路径,风机制造大型化可降低机组数量,从而在降低基建材料总体投入的同时提高年发电量;研究新型材料,使风机材料轻量化、低碳化,改善风机性能、降低度电成本,从而实现整体降碳。

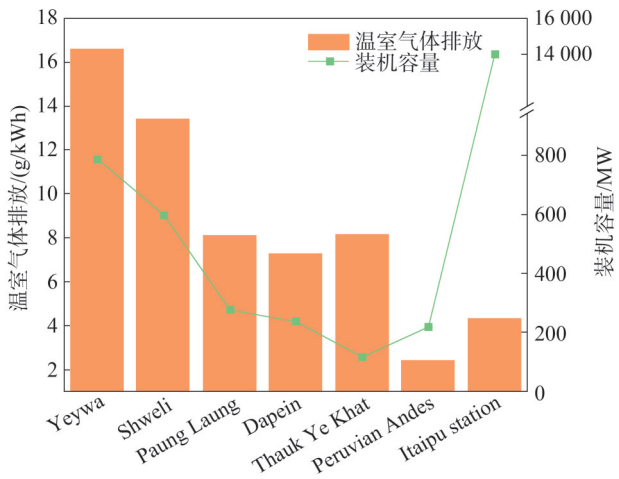
## 3) 水力发电碳足迹。

水力发电利用了水流产生的动能和势能,由于技术成熟、资源丰富、发电成本低等优点已成为构建新型电力系统的良好选择<sup>[53]</sup>。我国拥有世界上排名前二的水电站——三峡水电站和白鹤滩水电站,其总装机容量分别达到 22.50 GW、16.00 GW,水电在我国能源结构和经济发展中发挥了重要作用。

水力发电的发电形式是我国“碳达峰十大行动”中“能源绿色低碳转型行动”所倡议的清洁能源开发类型。水电站的建设过程往往会耗费大量的能源和物料,并且会对周边水域环境带来长久深远的影响。学者对国内外部分水电站进行研究,得出的生命周期碳足迹数据如图 4 所示。国内作为研究对象的七



(a)国内部分水电站碳足迹



(b)国外部分水电站碳足迹

图4 部分水电站全生命周期碳足迹

Fig.4 Life cycle carbon footprint of selected hydroelectric power plants

座水电站,其生命周期温室气体排放系数在 4.39~11.08 g/kWh;国外研究的水电站分布在缅甸、巴西、秘鲁等地,其生命周期温室气体排放系数在 2.42~16.62 g/kWh<sup>[54-60]</sup>。可以看出水电站之间的温室气体排放数据差异较大,这是由于水电站类型差异、水电站全生命周期涉及流程多且复杂。除此之外,由于水电站建设、运行、退役阶段都会涉及生物影响,例如水中藻类、沉积物、死亡浮游生物积累,该部分碳足迹核算具有较大的不确定性,有文献表明<sup>[61]</sup>若考虑生物对水电站产生的影响,其碳足迹可达 273 g/kWh,高出几十倍。相较于风电和光伏系统,水电全生命周期核算存在较大的难点,首先是水电站运行过程的碳足迹不可控,泄洪蓄水往往会对

碳核算产生较大的影响;其次难以准确量化生物因素对碳核算造成的影响;除此之外,缺乏水电站退役拆除阶段的经验,水电站退役必定会对周边环境带来重大的影响,该部分生态恢复产生的碳足迹也是难以估量的。

4)核能发电碳足迹。

核电利用核反应堆中核裂变所释放出的热能进行发电,具有稳定性高、发电成本相对较低的特点。我国于 1991 年首次投运自主设计并安装秦山核电站,此后我国核电技术取得了长足的进步。截至 2024 年底,我国并网运行的核电机组共有 58 台,总装机容量达到 6 088 万 kW,位居全球领先地位,在建核电项目规模也保持持续增长<sup>[62]</sup>。

核电建设过程相对复杂,由大批建筑材料和精密组件及设备构成。目前我国核反应堆正向第四代反应堆方向发展,相较于之前的核反应堆技术,同样数量的核燃料可提供更多能量,并可消耗掉现有的部分核废料进行发电,但由于技术的改进,其设计和结构更复杂,且部分核电站核心技术往往会涉及机密性数据,会对全生命周期内的碳足迹产生影响。核电站的退役阶段是核电全生命周期碳足迹不可忽视的部分,除常规的建筑设备拆除外,大量废弃燃料放射性物质的处置会造成较大的碳排放<sup>[63-64]</sup>。国际能源署 2050 年的净零转型路径突出了核电作为低碳电力来源的潜力,因此国内外相关学者对于核电全生命周期碳排放也做了相应的研究。根据 Gibon 等<sup>[65]</sup>的研究,目前核电全生命周期的温室气体排放差异较大,总体范围为 5.4~122 g/kWh,而 IPCC 报告为 3.7~110 g/kWh,这可能是由于对铀 235 的利用率不同而造成的;梁军等<sup>[66]</sup>对我国五个核反应堆进行研究,其生命周期温室气体排放为 10.86~14.03 g/kWh,具体结果如表 4 所示,其结果较为接近。

当前,全球能源结构加速转型,以风电、光伏为代表的清洁能源因其低碳排放特性成为核心发展方向,其碳足迹远低于传统化石能源发电碳足迹。其优势在于发电过程零碳排放,仅需要核算设备制造、运输、退役等环节的间接排放。但不同清洁能源类型间存在差异,由于水电、核电的建设阶段资源消耗大,碳足迹略高于风电和光伏发电。清洁能源碳足迹覆盖“设备制造—建设—运营—退役”全链条,其

中制造环节占主要部分,因此对于清洁能源碳减排来说,更加依赖于技术的进步,例如降低风电碳足迹依靠发电效率提升和材料轻量化;光伏发电则依靠硅片薄片化、电池效率提升等。此外退役回收阶段也是不可忽视的一部分,光伏回收技术不成熟导致退役环节碳排放升高;风机叶片材料退役环节填埋产生二次排放;铀矿放射性物质处理等均影响碳足迹。因此,清洁能源发电的低碳足迹需要通过技术创新、健全回收机制、全产业链协同等方法持续发展,转化为全球低碳治理的有效路径。

表4 我国部分反应堆生命周期温室气体排放<sup>[65]</sup>  
Table 4 Life cycle greenhouse gas emissions from selected nuclear reactors in China<sup>[65]</sup>

反应堆名称	应用机组	规模/ (10 <sup>4</sup> kW)	碳排放因子/(g/kWh)
CNP1000	秦山核电	871.2	11.83~14.03
华龙一号	福清核电	232.2	11.57~13.14
CNP650	昌江核电	370	15.41
AP1000	三门核电	500	10.86~10.87
VVER	田湾核电	400	11.34~12.59

### 3 不同发电形式碳足迹对比

未来新型电力系统需要具备低碳清洁的能源特征,根据特征不同,主要分为三类:1)风电、光伏等具有不确定性的可再生能源;2)水电、核电等可靠的清洁低碳零碳电力;3)仍旧处于利用中的传统化石能源发电机组<sup>[67]</sup>。根据资料调研得出不同发电形式的单位发电量碳足迹如表5所示<sup>[68-73]</sup>,火力发电作为传统的发电方式,其单位发电量碳足迹远远高于其余几种发电方式,普遍在1000 g/kWh左右,而清洁能源单位发电量碳足迹基本低于100 g/kWh。

光伏和风电将成为未来达成碳中和目标的重要手段。2024年,光伏和风电发电量占全球电力的15%,随着风能和太阳能产业的不断发展,未来几年电力碳排放量将会出现更大幅度的下降。相比风电和光伏发电,水电和核电都存在一定的不足。水力发电全生命周期除上述的水电站建设、运行、维护等常规阶段外,还需要进一步考虑水库中生物因素产生的温室气体排放。Levasseur等的研究<sup>[74]</sup>表明新建

水库中存在生物质的降解以及大坝建设后土地的洪水,通常会导致生物源性温室气体排放的增加,且这部分数据往往难以准确获取。核电相对于其他几种发电方式来说,具有更高的风险隐患,铀矿等核燃料的开采对于人体具有无法忽视的危害。不仅如此,核电站的放射性废物处理处置亦是一项难解决的问题,堆积的核废料越多,放射性物质对周边环境造成影响的风险就越大,不可避免地危害农作物、动物和人类生存健康<sup>[75-76]</sup>。

表5 不同发电形式单位发电量碳足迹对比  
Table 5 Comparison of carbon footprint per unit of electricity generated by different forms of power generation  
单位:g/kWh

来源	燃煤	风电	光伏	水电	核电
文献[68]	950~1250	43~73	43~73	1~34	2.8~24
文献[69]	740~910	7~35	26~63	5.6~28	3.7~110
文献[70]	1084	23	41	24	15
文献[71]	230~800(含CCUS)	7~17	15~34	17~22	9~70
文献[72]	838~839	7.1~8.6	15.9~29.2	40.6~44.4	10.9
文献[73]	820	11	48	24	12

### 4 中国电力碳排放评估

电力行业是工业社会发展的核心和基础,无论是经济建设、工业生产,还是民生保障,都与电力息息相关。为完成将全球升温控制在1.5℃的目标,电力行业要努力达到净零排放。2023年全世界几个主要碳排放国家或地区的电力碳排放强度如图5所示。全球电力碳排放强度平均值为480 g/kWh,印度和中国均超过了世界平均值,分别为713 g/kWh和581 g/kWh<sup>[77]</sup>,欧盟、加拿大、巴西等碳排放强度相对较低,均小于世界平均值。

为进一步论证中国电力碳排放强度和发电模式之间的关联,对2023年全球主要碳排放国家或地区化石能源和清洁能源发电占比进行了调研,结果如图6所示,可以看到欧盟化石燃料发电占比最小为33%,且只有欧盟的清洁能源发电占比超过了50%;我国化石能源发电占比65%,仅低于印度。传统的能源发电主要通过煤炭等化石燃料燃烧发电,这一过程会释放大量的温室气体,根据上述章节中的讨论,其碳排放是清洁能源的10倍以上。基于我国

近年来电力发电装机容量工业统计数据<sup>[78]</sup>,如表6所示,为加快实现净零排放的目标,我国清洁能源体系特别是风力和太阳能发电仍需要进一步加快发展速度<sup>[79-80]</sup>。

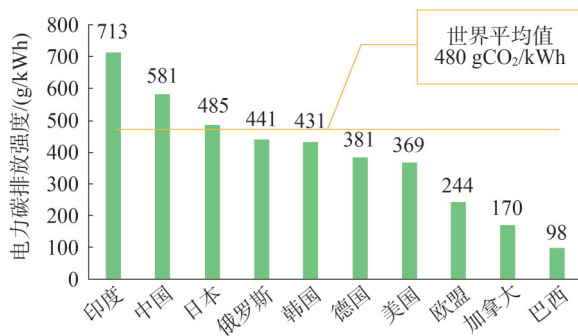


图5 全球部分国家或地区电力碳排放强度<sup>[77]</sup>

Fig.5 Carbon intensity of electricity emissions in selected countries around the world<sup>[77]</sup>

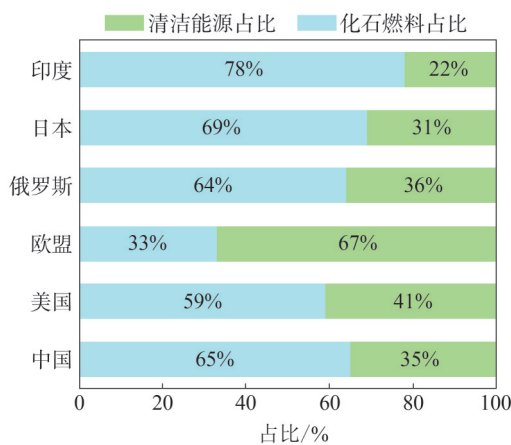


图6 全球主要碳排放国家或地区发电模式占比

Fig.6 The portion of power generation models in major carbon emitting countries around the world

表6 近年来我国电力工业统计数据

Table 6 Statistics on China's electric power industry in recent years 单位: /万 kW

装机类型	2020年	2021年	2022年	2023年	2024年
全国发电	220 058	237 692	256 405	291 965	334 862
水电	37 016	39 092	41 350	42 154	43 595
火电	124 517	129 678	133 239	139 032	144 445
核电	4 989	5 326	5 553	5 691	6 083
风电	28 153	32 848	36 544	44 134	52 068
太阳能发电	25 343	30 656	39 261	60 940	88 666

电力行业作为我国碳排放第一的行业,其低碳化发展对于实现减污降碳目标至关重要。基于现有发展现状和上述研究结果,对其低碳改造提出以下几点建议。

1)降低火力发电碳排放。火力发电的碳足迹主要集中在核心环节的燃烧发电阶段,降低煤炭燃烧排放是火力发电降低碳足迹的最有效手段。Liang等<sup>[81]</sup>对综合气化联合循环、亚临界、超临界和超超临界四种类型的燃煤机组进行LCA评估,其单位碳足迹结果分别为0.813、0.971、0.830、0.801 kg/kWh。因此电力行业应逐步应用超临界、超超临界等大容量机组替代小型火电机组,并采用先进技术对火电机组进行改造,使其尽可能降低能耗;在煤炭开采阶段,引入新型节能煤炭采掘设备,优化设备运行参数,减少能源消耗和碳排放;在选煤工艺技术方面,推进煤炭洗选数智化建设<sup>[82]</sup>,并且通过碳标签等方式,推进煤炭生产上游相关企业的降碳工作,可以减少上游环节碳排放,促进煤电全产业链降碳;在电厂运行阶段,引入CO<sub>2</sub>连续监测技术,实时、准确地计量碳排放量,精准摸清碳家底,同时尾端采用碳捕集利用与封存技术促进火电行业深度脱碳。

2)加快布局清洁能源全产业链。与火力发电不同,光伏、风电、水电和核电等清洁能源的主要碳排放集中在上游原材料制作阶段或者下游废弃物回收处置阶段。因此需要建立稳定的供应链和产业链合作关系,在原材料选取阶段,实施严格的供应商准入制度,确保所有参与供应链的企业都符合绿色低碳的标准;在回收阶段,促进废旧物资的回收利用,如废旧光伏电池板、风机支架的回收处理,建立与制造商、安装商和回收企业良性的合作关系,促进清洁能源发电全产业链的优化,协同达到资源的合理利用和低碳减排。

3)推动碳足迹管理数字化平台。基于目前人工智能、物联网、大数据等信息化技术手段的发展,碳足迹管理平台成为了一种新型的碳足迹核算工具。对于电力企业来说,可整合多个模块,例如组织碳核算系统、产品碳足迹系统、碳资产管理系统等,提供数据采集、分析、报告和决策支持等功能。通过数字平台,可实现电厂碳排放数据的集中管理,实现全生命周期全工艺过程的碳足迹精准量化,使火电厂对

碳足迹进行持续跟踪和监测,可针对分布结果找到关键减排点,助力电力行业设计低碳发展路径和减排方案。

## 5 结论

当前,我国电力领域碳足迹仍处于起步阶段,计量、标准、数据库建设等基础能力较为薄弱,相关标准覆盖领域和产品类型较少,亟须提高我国电力行业碳足迹核算和基础能力建设。通过研究国内外不同领域的电力产品碳足迹核算方法,探索电力行业碳足迹基础能力建设需求,有针对性地开展全生命周期重点电力行业碳足迹的核算工作,有助于识别电力产业关键碳排放节点,分析各类节能降耗措施对碳排放的影响,助力国家“十五五”电力碳排放双控发展规划,在实现我国“双碳”目标中发挥着重要的作用。本文对火电、光伏、风电、水电和核电几种发电系统的碳足迹研究现状、评价流程和生命周期边界进行了讨论,通过对文献的调研和总结,得出了以下结论。

1) 电力行业碳足迹评估体系亟待完善。电力行业作为能源生产和供应的基础行业,几乎所有行业都需要电力作为营运生产基础。因此,需要明确电力行业碳足迹核算方法,明晰各种发电方式全生命周期碳足迹评估方法。当前我国电力碳足迹核算缺乏统一标准,火电、光伏、风电等不同发电方式在系统边界、数据采集规则上存在显著差异。例如,燃煤发电碳足迹集中于燃烧阶段(约占总排放的90%),而光伏和风电则主要在上游制造环节(如光伏组件生产占60%~70%)。需要加快制定细分领域核算标准(如核电退役处理细则、水电生物质降解细则等)。

2) 数据质量与透明度制约。准确可靠的数据是进行可靠碳足迹评估的基础。但发电领域作为一个庞大且复杂的工业领域,其数据收集和管理面临诸多挑战。一方面是部分数据涉及企业机密信息,例如一些先进发电设备的原料、能耗相关数据,核电相关核燃料核反应堆数据,往往无法完整、准确获取;另一方面目前更多的还是采用核算法进行碳足迹研究,消耗人力物力,并且难以获得代表性数据,从而影响碳足迹评估的准确性和时效性。因此需要建立健全发电领域的数据监测、收集和管理体系,鼓励企

业采用先进的监测技术和设备,实现对碳排放数据的实时、精准监测,提高数据可靠性;推动建立发电领域统一公共数据平台,实现数据的集中存储和共享。

3) 清洁能源全生命周期减排潜力显著但挑战并存。清洁能源单位发电碳足迹普遍低于100 g/kWh,但各自存在瓶颈。例如,水电需要量化水库生物降解碳排放,核电退役阶段放射性废物处置成本高,光伏组件回收技术成熟度不足,需要建立全产业链协同机制。

4) 电力行业仍需要低碳化发展。2023年中国电力碳排放强度(581 g/kWh)高于全球均值(480 g/kWh),化石能源发电占比超60%。需要加速超超临界机组替代小型火电,推动清洁能源替代,为全球气候治理与绿色贸易竞争贡献中国力量。

## 6 展望

在全球能源结构低碳化转型加速的背景下,产品碳足迹扮演着越来越重要的角色。作为碳排放大户的电力产业,需要构建全链条的碳足迹评估体系,不仅是突破国际绿色贸易壁垒的战略选择,更是实现“双碳”目标的关键路径。结合目前电力行业仍存在标准体系不完善、数据质量不足等短板,未来需要从推动标准与数据库发展、拓展新型发电技术的综合性碳足迹评估、碳足迹评估与新型信息技术相结合等方面出发,推动碳足迹评估在电力行业以及其他领域的推广应用。

1) 推动标准与数据库发展与国际互认。针对欧盟CBAM碳关税等绿色贸易壁垒,需要加速核电、风电等细分领域的核算规则国际互认,例如光伏组件、风机叶片碳足迹。同时,需要建设本土化数据库,替代Ecoinvent等国际数据库的滞后数据,提高碳足迹数据的代表性,为产品出口提供可靠的电力碳足迹数据基础。

2) 拓展新型发电技术的综合性碳足迹评估。生物质掺烧、含碳捕集设备的火力发电、储能电池等新兴技术的碳足迹评估需要突破传统边界。例如生物质发电需要量化原料种植的碳汇效应、含碳捕集设备的火力发电应考虑捕获的CO<sub>2</sub>。此外,还可将绿证交易与碳足迹核算结合,促进电力碳市场的发展。

3)碳足迹评估与新型信息技术相结合。利用新型信息化技术对电力全流程碳排放进行全面整理,开展动态碳足迹评估,对实时数据进行分析和挖掘,将技术进步、能源结构调整、政策法规变化等因素归入碳排放模型,进行动态更新,掌握发电领域的碳足迹动态变化。

## 参考文献

- [1] Centre for Science and Environment. IPCC's Special Report on Global Warming of 1.5°C[R].2018.
- [2] MATTHEWS H D, WYNES S. Current global efforts are insufficient to limit warming to 1.5°C [J]. *Science*, 2022, 376(6600):1404-1409.
- [3] Global Carbon Atlas. Country emissions[EB/OL].(2022-03-16)[2025-02-24]. <http://www.globalcarbonatlas.org/cn/CO2-emissions>.
- [4] MOKHLES S, ACUTO M. Expanding the urban climate imagination: a review of mitigation actions across 800 local governments[J].*Journal of Cleaner Production*, 2024, 442:141055.
- [5] CHU H Q, HUANG Z, ZHANG Z K, et al. Integration of carbon emission reduction policies and technologies: research progress on carbon capture, utilization and storage technologies [J].*Separation and Purification Technology*, 2024, 343: 127153.
- [6] 郑国光. 支撑“双碳”目标实现的问题辨识与关键举措研究[J]. *中国电力*, 2023, 56(11):1-8.  
ZHENG Guoguang. Problem identification and key measures to support the achievement of carbon peak and carbon neutrality [J]. *Electric Power*, 2023, 56(11): 1-8.
- [7] AGENCY I E.CO2 Emissions in 2022[M].OECD, 2023.
- [8] 刘美玲,刘含笑,寿恬雨. 碳足迹评价体系探索燃煤电厂绿色低碳发展[J].*中国环保产业*, 2023(2): 50-54.  
LIU Meiling, LIU Hanxiao, SHOU Tianyu. Using carbon footprint evaluation system to explore green and low-carbon development of coal-fired power plants [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2023(2):50-54.
- [9] 周原冰,张士宁,侯方心,等. 电力行业碳达峰及促进全社会碳减排影响分析[J].*中国电力*, 2024, 57(9):1-9.  
ZHOU Yuanbing, ZHANG Shining, HOU Fangxin, et al. Analysis of carbon peaking in power sector and its impact on promoting whole-society carbon emissions reduction [J]. *Electric Power*, 2024, 57(9):1-9.
- [10] LI Y W, YANG X X, DU E S, et al. A review on carbon emission accounting approaches for the electricity power industry [J]. *Applied Energy*, 2024, 359:122681.
- [11] 李江,范袁铮,刘博. 计及水泥厂直接碳排放碳责任的源-荷低碳优化运行方法[J].*中国电力*, 2025, 58(1):141-152.  
LI Jiang, FAN Yuanzheng, LIU Bo. A source-load low carbon optimization methodology considering carbon responsibility for direct carbon emissions from cement plants [J]. *Electric Power*, 2025, 58(1):141-152.
- [12] 生态环境部,国家发展改革委,工业和信息化部,等. 关于建立碳足迹管理体系的实施方案[EB/OL].(2024-05-22)[2025-01-10].  
<https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202406/W020240604697785022042.pdf>.
- [13] 刘含笑,吴黎明,林青阳,等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用[J].*化工进展*, 2023, 42(5):2201-2218.  
LIU Hanxiao, WU Liming, LIN Qingyang, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(5): 2201-2218.
- [14] 杨传明. 碳足迹研究综述与展望[J].*管理现代化*, 2015, 35(3): 127-129.  
YANG Chuanming. Review and prospect of carbon footprint research [J]. *Modernization of Management*, 2015, 35(3): 127-129.
- [15] 王俊博,李鑫,田继军,等. 煤炭开发利用产业碳足迹计算方法及减排措施综述[J].*煤炭学报*, 2023, 48(增刊1):263-274.  
WANG Junbo, LI Xin, TIAN Jijun, et al. Summary of carbon footprint calculation methods and emission reduction measures for coal exploitation and utilization [J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(S1):263-274.
- [16] 王微,林剑艺,崔胜辉,等. 碳足迹分析方法研究综述[J].*环境科学与技术*, 2010, 33(7):71-78.  
WANG Wei, LIN Jianyi, CUI Shenghui, et al. An overview of carbon footprint analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(7):71-78.
- [17] MATTHEWS H S, HENDRICKSON C T, WEBER C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16):5839-5842.
- [18] LEONTIEF W. Air pollution and the economic structure: empirical results of input-output comparisons [J]. *Input-Output Economics Second Edition*, 1972.
- [19] 张娜,赵琳,商文颖,等. 基于STIRPAT模型的大连市全流程碳足迹溯源[J].*中国电力*, 2024, 57(1):133-139.  
ZHANG Na, ZHAO Lin, SHANG Wenying, et al. Whole process carbon footprint traceability of Dalian City based on STIRPAT model [J]. *Electric Power*, 2024, 57(1):133-139.
- [20] 王文美,陈颖,张宁,等. IPCC方法在区域温室气体清单编制中应用初探[J].*城市环境与城市生态*, 2013(1):13-15.  
WANG Wenmei, CHEN Ying, ZHANG Ning, et al. Discussion on application of IPCC guideline to regional greenhouse gas inventory [J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2013(1):13-15.
- [21] LENZEN M. Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4(4): 127-148.

- [22] GAO T, LIU Q, WANG J P. A comparative study of carbon footprint and assessment standards[J]. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2014, 9(3): 237-243.
- [23] LIANG Z Y, DENG H J, XIE H Y, et al. Rethinking the paper product carbon footprint accounting standard from a life-cycle perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 393: 136352.
- [24] 全国碳排放管理标准化技术委员会. 温室气体产品碳足迹量化要求和指南: GB/T 24067—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [25] 王兴来. 江苏省农业碳足迹解析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- [26] 陈珊. 基于LCA理论的污水厂碳足迹核算及碳平衡研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2023.
- [27] 杨明. 基于本体的产品碳足迹分析与计算平台研究与实现[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [28] TASSI F, KITTNER N. Repurposing coal plants—regional economic impacts from low carbon generation[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199: 114467.
- [29] 单思珂, 刘含笑, 刘美玲, 等. 我国火电行业碳足迹评估综述[J]. *发电技术*, 2024, 45(4): 575-589.  
SHAN Sike, LIU Hanxiao, LIU Meiling, et al. Review of carbon footprint for thermal power industry in China[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(4): 575-589.
- [30] XU J. Research on carbon emissions measurement of coal-energy chain based on life-cycle assessment method [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 367: 333-338.
- [31] 刘含笑, 单思珂, 魏书洲, 等. 基于生命周期法的煤电碳足迹评估[J]. *中国电力*, 2024, 57(7): 227-237.  
LIU Hanxiao, SHAN Sike, WEI Shuzhou, et al. Life-cycle carbon footprint assessment of coal-fired power generation [J]. *Electric Power*, 2024, 57(7): 227-237.
- [32] 樊慧, 段天宇, 朱博骐, 等. 燃气电厂与超低排放燃煤电厂环境及生态效应对比[J]. *天然气工业*, 2020, 40(7): 146-153.  
FAN Hui, DUAN Tianyu, ZHU Boqi, et al. Comparison of environmental and ecological effects between gas-fired and ultra-low emission coal-fired power generation plants [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(7): 146-153.
- [33] MATOS D, LASSIO J G, GARCIA K C, et al. The impact of retrofitting natural gas-fired power plants on carbon footprint: converting from open-cycle gas turbine to combined-cycle gas turbine[J]. *Gases*, 2024, 4(3): 310-326.
- [34] 黄婧杰, 刘镔志, 殷旭锋, 等. 碳循环利用的垃圾焚烧电厂-烟气处理-P2G协调优化运行[J]. *中国电力*, 2022, 55(3): 152-158.  
HUANG Jingjie, LIU Louzhi, YIN Xufeng, et al. Coordinated and optimized operation of waste incineration plant-flue gas treatment-P2G with carbon cycle[J]. *Electric Power*, 2022, 55(3): 152-158.
- [35] 刘含笑, 单思珂, 梁丁宏, 等. 生活垃圾焚烧发电碳足迹量化评估[J]. *能源环境保护*, 2024, 38(3): 125-134.  
LIU Hanxiao, SHAN Sike, LIANG Dinghong, et al. Research on the quantitative assessment of the carbon footprint of domestic waste incineration power generation [J]. *Energy Environmental Protection*, 2024, 38(3): 125-134.
- [36] VERBRUGGEN A, DEWALLEF P, QUOILIN S, et al. Unveiling the mystery of combined heat & power (cogeneration)[J]. *Energy*, 2013, 61: 575-582.
- [37] 刘含笑, 单思珂, 方建, 等. 热电联产的产品碳足迹量化与评价[J/OL]. *化工进展*: 1-11 [2025-02-14]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0792>.  
LIU Hanxiao, SHAN Sike, FANG Jian, et al. Quantification and evaluation of product carbon footprint of cogeneration [J/OL]. *Chemical Progress*: 1-11 [2025-02-14]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-0792>.
- [38] JUNG H S, RYOO S G, KANG Y T. Life cycle environmental impact assessment of Taean coal power plant with CO<sub>2</sub> capture module[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 357: 131663.
- [39] MAGRASSI F, ROCCO E, BARBERIS S, et al. Hybrid solar power system versus photovoltaic plant: a comparative analysis through a life cycle approach[J]. *Renewable Energy*, 2019, 130: 290-304.
- [40] 蔡立亚, 朱荣琦, 张诗悦, 等. 光伏产品碳足迹核算体系搭建、挑战与建议[J]. *中国能源*, 2023, 45(8): 5-14.  
CAI Liya, ZHU Rongqi, ZHANG Shiyue, et al. Construction, challenges and suggestions on carbon footprint accounting method for the photovoltaic products [J]. *Energy of China*, 2023, 45(8): 5-14.
- [41] 赵若楠, 董莉, 白璐, 等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(6): 2751-2757.  
ZHAO Ruonan, DONG Li, BAI Lu, et al. Inventory analysis on carbon emissions of photovoltaic industry [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(6): 2751-2757.
- [42] 王一波, 赵颖, 汪雷, 等. 2023年中国光伏技术进展综述[J]. *太阳能*, 2024(7): 8-19.  
WANG Yibo, ZHAO Ying, WANG Lei, et al. Overview of China's pv technology progress in 2023 [J]. *Solar Energy*, 2024(7): 8-19.
- [43] 王怀斌. 光伏发电全生命周期碳足迹及减排潜力研究[J]. *中国能源*, 2023, 45(8): 34-44.  
WANG Huaibin. Life cycle carbon footprint and carbon emission reduction potential of photovoltaic power generation [J]. *Energy of China*, 2023, 45(8): 34-44.
- [44] STYLOS N, KORONEOS C. Carbon footprint of polycrystalline photovoltaic systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 64: 639-645.
- [45] KIM H C, FTHENAKIS V, CHOI J K, et al. Life cycle greenhouse gas emissions of thin-film photovoltaic electricity generation: systematic review and harmonization [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(s1): S110-S121.
- [46] 庄园, 温金城, 卞与良, 等. 晶体硅和钙钛矿光伏组件碳足迹研

- 究[J].太阳能学报,2023,44(12):41-46.
- ZHUANG Yuan, WEN Jincheng, BIAN Yuliang, et al. Study on carbon footprint of crystalline silicon and perovskite photovoltaic modules[J].Acta Energetica Solaris Sinica, 2023,44(12):41-46.
- [47] 程临燕,冯艳虹,徐林,等.寿命周期内光伏电站收益最大化建设规模研究[J].电力勘测设计,2018(增刊2):256-260.
- CHENG Linyan, FENG Yanhong, XU Lin, et al. Research on the revenue maximization construction scale in life cycle of photovoltaic power station [J].Electric Power Survey & Design, 2018(S2):256-260.
- [48] 李磊.碳中和目标下风力发电技术的发展与挑战[J].电气技术与经济,2024(4):90-92.
- LI Lei. Development and challenge of wind power generation technology under the goal of carbon neutrality [J]. Electrical Equipment and Economy, 2024(4):90-92.
- [49] ARVESEN A, HERTWICH E G. Assessing the life cycle environmental impacts of wind power: a review of present knowledge and research needs [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8):5994-6006.
- [50] 杨敬言,阮梓纹,杨秀,等.陆上风电碳足迹动态变化的国际比较研究[J].中国工程科学,2024,26(4):152-163.
- YANG Jingyan, RUAN Ziwen, YANG Xiu, et al. International comparative study on dynamic change of onshore wind power carbon footprint [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26 (4) : 152-163.
- [51] KALDELLIS J K, APOSTOLOU D. Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy. Comparison with onshore counterpart[J].Renewable Energy, 2017, 108:72-84.
- [52] 向宁,王礼茂,屈秋实,等.基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比[J].资源科学,2021,43(4):745-755.
- XIANG Ning, WANG Limao, QU Qiushi, et al. Comparison of emissions from offshore and onshore wind power systems based on life cycle assessment [J]. Resources Science, 2021, 43 (4) : 745-755.
- [53] SINGH V K, SINGAL S K. Operation of hydro power plants—a review[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 610-619.
- [54] 闫妮,戎虎仁,王思敏,等.电力能源结构及水力发电建设趋势综述[J].电力学报,2022,37(4):295-301.
- YAN Ni, RONG Huren, WANG Simin, et al. Overview of energy structure and hydropower construction trends [J]. Journal of Electric Power, 2022, 37(4) : 295-301.
- [55] 刘宇,任品桥,郑焱,等.水力发电生命周期评价及碳足迹区域化分析[J].北京工业大学学报,2024,50(3):282-289.
- LIU Yu, REN Pinqiao, ZHENG Yan, et al. Life cycle assessment and regionalized carbon footprint analysis of hydropower generation [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2024, 50 (3) : 282-289.
- [56] 夏欣,钟权.水电站生命周期温室气体排放研究综述[J].中国农村水利水电,2020(11):188-192.
- XIA Xin, ZHONG Quan. Research overview of life cycle greenhouse gas emissions from hydropower plants [J].China Rural Water and Hydropower, 2020(11):188-192.
- [57] 杜海龙.金沙江大型水电站碳足迹的生命周期分析研究[D].重庆:中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院), 2017.
- [58] JIANG T, SHEN Z Z, LIU Y, et al. Carbon footprint assessment of four normal size hydropower stations in China [J].Sustainability, 2018, 10(6):2018.
- [59] AUNG T S, FISCHER T B, AZMI A S. Are large-scale dams environmentally detrimental? Life-cycle environmental consequences of mega-hydropower plants in Myanmar [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020, 25 (9) : 1749-1766.
- [60] VERÁN-LEIGH D, VÁZQUEZ-ROWE I. Life cycle assessment of run-of-river hydropower plants in the Peruvian Andes: a policy support perspective [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2019, 24(8) : 1376-1395.
- [61] SCHERER L, PFISTER S. Hydropower's biogenic carbon footprint [J].PLoS One, 2016, 11(9):e0161947.
- [62] 国家核安全局.2024我国大陆核电机组情况[EB/OL].(2025-01-07)[2025-02-10].  
[https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyxx/202501/t20250107\\_1100142.html](https://nnsa.mee.gov.cn/ywdt/hyxx/202501/t20250107_1100142.html).
- [63] WANG L K, WANG Y, DU H B, et al. A comparative life-cycle assessment of hydro-, nuclear and wind power: a China study[J]. Applied Energy, 2019, 249: 37-45.
- [64] LIU B J, PENG B B, LU F, et al. Critical review of nuclear power plant carbon emissions[J].Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1147016.
- [65] GIBON T, HAHN MENACHO Á. Parametric life cycle assessment of nuclear power for simplified models [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(38): 14194-14205.
- [66] 梁军,祁明亮,龙腾,等.我国主力堆型核电生命周期碳排放因子核算研究[J].设备管理与维修,2024(5):42-45.
- LIANG Jun, QI Mingliang, LONG Teng, et al. Study on carbon emission factor accounting of main reactor nuclear power life cycle in China[J].Plant Maintenance Engineering, 2024(5):42-45.
- [67] 朱继忠,周迦琳,张迪.清洁能源和电力系统碳足迹全生命周期核算综述[J].中国电机工程学报,2025,45(4):1323-1343.
- ZHU Jizhong, ZHOU Jialin, ZHANG Di. Review of full life-cycle carbon footprints accounting of clean energy and power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(4): 1323-1343.
- [68] WEISSER D. A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies [J]. Energy, 2007, 32 (9): 1543-1559.

- [69] IPCC, AR5 WG3 AnnexII (2014). Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014 [R/OL]. [2025-02-24]. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf).
- [70] 张莉,王俏丽,李伟,等. 电力行业温室气体排放情景分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(12): 2244-2251.  
ZHANG Li, WANG Qiaoli, LI Wei, et al. Scenario analysis on greenhouse gas emission of power sector [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(12): 2244-2251.
- [71] JACOBSON M Z. 100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2020.
- [72] 王彦哲,周胜,王宇,等. 中国核电和其他电力技术环境影响综合评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(4): 377-384.  
WANG Yanzhe, ZHOU Sheng, WANG Yu, et al. Comprehensive assessment of the environmental impact of China's nuclear and other power generation technologies [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(4): 377-384.
- [73] MACIEJ Z, JEREMY F, MATT E. Global Electricity Review 2022 [R/OL]. [2025-02-24]. <https://ember-climate.org/zh-hans/%E6%95%B0%E6%8D%AE/%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%8A%A5%E5%91%8A/global-electricity-review-2022/>.
- [74] LEVASSEUR A, MERCIER-BLAIS S, PRAIRIE Y T, et al. Improving the accuracy of electricity carbon footprint: estimation of hydroelectric reservoir greenhouse gas emissions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 136: 110433.
- [75] VERBRUGGEN A, YURCHENKO Y. Positioning nuclear power in the low-carbon electricity transition [J]. Sustainability, 2017, 9(1): 163.
- [76] AYOUB A, SORNETTE D. The power of precursors: an empirical assessment of nuclear power risks [J]. Progress in Nuclear Energy, 2023, 164: 104878.
- [77] MATGORZATA W, NICOLAS F, DAVE J. Global Electricity Review 2024 [R/OL]. [2025-02-24]. <https://ember-climate.org/zh-hans/%E6%95%B0%E6%8D%AE/%E7%A0%94%E7%A9%B6%E6%8A%A5%E5%91%8A/global-electricity-review-2024/>.
- [78] 国家能源局. 国家能源局发布2024年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2025-01-21) [2025-02-24]. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [79] TORRES J F, PETRAKOPOULOU F. A closer look at the environmental impact of solar and wind energy [J]. Global Challenges, 2022, 6(8): 2200016.
- [80] LACAL ARANTEGUI R, JÄGER-WALDAU A. Photovoltaics and wind status in the European union after the paris agreement [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2460-2471.
- [81] LIANG X Y, WANG Z H, ZHOU Z J, et al. Up-to-date life cycle assessment and comparison study of clean coal power generation technologies in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 39: 24-31.
- [82] 张晋波. 煤炭清洁高效利用简析及建议[J]. 煤炭加工与综合利用, 2024(6): 88-90.  
ZHANG Jinbo. Analysis and suggestion on clean and efficient utilization of coal [J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2024(6): 88-90.

收稿日期: 2025-02-24

修回日期: 2025-04-16

作者简介:

袁电洪(1974), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火电厂生产管理;

吴刚(1985), 男, 高级工程师, 主要研究方向为生态环境咨询;  
刘含笑(1987), 通信作者(gutounan@163.com), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染治理及“双碳”技术研发;

孙立(1997), 男, 硕士, 从事碳足迹咨询工作;

顾朋喜(1978), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电厂节能减排;

殷浩然(1990), 男, 工程师, 主要研究方向为火力发电厂节能减排。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250166

## 固体酸催化剂催化有机胺CO<sub>2</sub>吸收液解吸研究进展

周亚明<sup>1</sup>, 陈泰峰<sup>1</sup>, 冉初萌<sup>1</sup>, 刘含笑<sup>2,3,4</sup>, 陈俊逍<sup>2,5\*</sup>

(1. 国家能源集团泰州发电有限公司, 江苏 泰州 221008; 2. 浙江菲达环保科技股份有限公司, 浙江 诸暨 311800;  
3. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 4. 浙江省环保集团生态环保研究院有限公司, 浙江 杭州 310000;  
5. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** CO<sub>2</sub>大量排放引发的温室效应已成为全球性气候问题, 碳减排工作势在必行。碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术是降低碳排放的关键技术之一, 但碳捕集工艺中有机胺吸收液再生解吸CO<sub>2</sub>环节能源消耗严重, 限制了其进一步的应用。如何降低其解吸再生能耗是当前研究的重要方向, 其中引入催化剂实现再生能耗降低已成为研究热点。本文基于CO<sub>2</sub>捕集工艺中解吸过程高能耗的现状, 首先分析了解吸过程高能耗的来源和关键能耗因素, 并针对这些关键因素提出了相关的改进策略, 以此论证使用固体酸催化剂降低能耗的可行性。在此基础上, 对目前在研的各类固体酸催化剂进行了介绍和总结, 为低能耗CO<sub>2</sub>解吸固体酸催化剂的研发提供技术参考。

**关键词:** CO<sub>2</sub>解吸能耗; 固体酸催化剂; 质子转移; 氨基甲酸酯分解

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2026)03-0016-11

## Research Progress on Solid Acid Catalysts Used for CO<sub>2</sub> Desorption From Organic Amines Absorption Liquids

ZHOU Yaming<sup>1</sup>, CHEN Taifeng<sup>1</sup>, RAN Chumeng<sup>1</sup>, LIU Hanxiao<sup>2,3,4</sup>, CHEN Junxiao<sup>2,5\*</sup>

(1. CHN Energy Taizhou Power Generation Co., Ltd., Taizhou 221008, China;

2. Zhejiang Feida Environmental Science & Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, China;

3. College of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China University of Electric Power, Beijing 102206, China;

4. Zhejiang Environmental Protection Group Eco-Environmental Research Institute, Hangzhou 310000, China;

5. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** The greenhouse effect caused by the massive emission of CO<sub>2</sub> has become a global climate problem, and thus the reduction of carbon emission is imperative. Carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology is one of the key technologies to reduce carbon emissions, but the energy consumption for amine regeneration in carbon capture process is serious, which limits its further application. How to reduce the energy consumption for CO<sub>2</sub> desorption and amine regeneration is an important research direction at present, among which abundant studies have been conducted by introducing specific catalysts. In light of those circumstances, this paper firstly analyzes and identifies the sources of high energy consumption in the absorption process, and then proposes relevant strategies on the key factors and demonstrates the feasibility of using solid acid catalysts to reduce energy consumption. Based on that, this paper further introduces and summarizes various solid acid catalysts currently under research, and thus provides technical reference for the research on the development of low energy-consumption catalyst for CO<sub>2</sub> desorption.

**Keywords:** energy consumption for CO<sub>2</sub> desorption; solid acid catalysts; proton transfer; decomposition of carbamate

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3701501); 浙江省“领雁”计划项目(2023C03156)。

National Key Research and Development Plan of China (2022YFC3701501); Science and Technology Planning Project of Zhejiang (2023C03156).

## 0 引言

近年来, 伴随着社会发展水平的提高以及人类活动的增加, 以CO<sub>2</sub>为代表的温室气体排放量迅速增加, 温室效应问题日益突出。截至2024年, 全球

平均气温较工业化前(1850—1900年)已经上升1.55℃。据联合国环境规划署发布的《2024年排放差距报告》预测,在不采取更多温室气体减排的措施下,21世纪末全球平均气温较工业化前上升超过3℃,是2015年《巴黎协定》设定的全球气温上升幅度的两倍多。因此,碳减排工作势在必行。

碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术具有减少整体减排成本,以及增加温室气体减排灵活性的潜力,被国际社会广泛接受,已经成为碳减排的主力技术之一<sup>[1]</sup>。国际能源署(International Energy Agency, IEA)提出,CCUS技术是实现减排目标中唯一既能直接减少关键领域碳排放,又能降低已有CO<sub>2</sub>浓度以平衡无法避免的碳排放的技术<sup>[2]</sup>。在CCUS全流程工艺中,碳捕集环节是能耗较高的一环<sup>[3]</sup>,限制了CCUS技术的规模化应用。因此,如何降低碳捕集过程能耗是目前的研究热点。

在众多CO<sub>2</sub>捕集技术中,得益于工艺流程简单、吸收容量大、产品纯度高优点,化学吸收法是目前技术最成熟、应用最广泛的工艺<sup>[4]</sup>,也是目前实际规模化应用的首选。化学吸收剂以醇胺类为主,包括氨水溶液、单乙醇胺(monoethanolamine, MEA)、二乙醇胺(diethanolamine, DEA)、N-甲基二乙醇胺(N-methyldiethanolamine, MEDA)和二乙基乙醇胺(diethylethanolamine, DEEA)等<sup>[5]</sup>。醇胺在吸收塔中吸收CO<sub>2</sub>后,得到的富液转移至再生塔中进行解吸。由于CO<sub>2</sub>与胺分子之间较强的相互作用,解吸反应的反应焓较高。氨基甲酸酯等作为醇胺溶液吸收CO<sub>2</sub>的产物,其分解所需的反应热较高,一般需要外界升温至100℃以上以促进其分解。同时,这一过程伴随着大量水分蒸发,进一步加剧了能源消耗。解吸塔因此也成为使用醇胺作为吸收剂的化学吸收法捕集CO<sub>2</sub>工艺中耗能最大的设备,约占总能耗的40%~60%。为了实现CCUS的大规模化应用,降低CO<sub>2</sub>解吸能耗是目前必须解决的问题之一。

国内外针对降低解吸能耗技术也进行了众多的研究工作,可大致分为两类:一是开发新型吸收剂,包括开发非水溶剂醇胺和相变吸收剂等,如Bougie等人发现了非水溶液MEA体系中CO<sub>2</sub>更易解吸且具有更低的解吸热<sup>[6]</sup>。二是引入催化剂降低解吸反

应活化能,从而降低解吸温度并加速反应进行。例如,向典型醇胺溶液MEA中添加HZSM-5、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>可以显著提高解吸动力,解吸量最高可提高60%,热负荷降低10%~37%<sup>[7-8]</sup>。由于解吸用催化剂不能溶于水和胺,往往引入固体酸催化剂加速解吸反应。

本文从CO<sub>2</sub>捕集工艺中解吸过程高能耗的现状出发,首先分析了解吸过程高能耗的来源和关键能耗因素,针对关键因素提出相关的改进策略,以此论证使用固体酸催化剂降低能耗的可行性,接着对目前在研的各类固体酸催化剂进行了介绍和总结,为低能耗胺解吸催化剂的研发提供技术参考。

## 1 胺吸收剂解吸再生高能耗原因

深入胺吸收剂解吸再生机理是降低解吸能耗的重要前提。当前采用化学吸收法的碳捕集工艺如图1所示。以经典的MEA吸收剂为例,在吸收塔中,MEA可与CO<sub>2</sub>反应生成MEAH<sup>+</sup>和氨基甲酸酯(carbamate, MEACOO<sup>-</sup>)<sup>[9]</sup>,其中部分MEACOO<sup>-</sup>可进一步水解为MEA和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。相对应地,在再生塔中,胺吸收剂解吸再生过程主要发生MEAH<sup>+</sup>的去质子(H<sup>+</sup>)过程和氨基甲酸酯的分解过程。

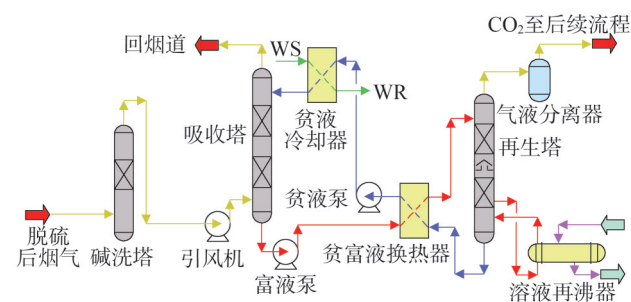
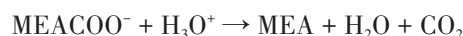
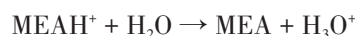


图1 使用化学吸收法的碳捕集工艺图

Fig.1 Diagram of carbon capture process using chemical absorption

解吸过程反应式<sup>[10]</sup>为



为了实现MEAH<sup>+</sup>的去质子(H<sup>+</sup>)过程和氨基甲酸酯的分解过程,需要分别实现H<sup>+</sup>从MEA上转移给H<sub>2</sub>O和MEACOO<sup>-</sup>中N-C键的断裂。对于前者来说,MEA的碱性要远强于H<sub>2</sub>O,因此在不施加外力的情

况下极难发生,导致解吸难以发生。根据 Shi 等人的研究结果,25 ℃时该过程自由能约为 73.4 kJ/mol,当温度提升至 90 ℃后进一步增加至 78.2 kJ/mol<sup>[11]</sup>。对于后者来说,打破稳定的 N-C 键需要克服较高的键能,一般需要温度达到 110~130 ℃,因此导致水分蒸发产生大量潜热。Sakwattanapong 等人对再生过程中的热负荷进行了研究,结果表明,在升温过程中,潜热耗能占解吸能耗的 85% 以上,是能耗损失的重要部分<sup>[12]</sup>。因此,胺吸收剂解吸再生能耗主要与质子转移难度和 MEACOO<sup>-</sup>中 N-C 键能及高温分解产生的潜热相关,为了降低能耗,需要降低反应质子转移难度和 MEACOO<sup>-</sup>的分解温度。

## 2 降低解吸再生能耗的途径

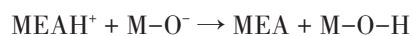
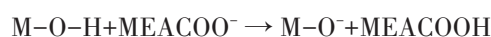
### 2.1 降低质子转移难度

解吸反应过程中质子转移的难度主要来源于 MEA 和 H<sub>2</sub>O 与 H<sup>+</sup>的结合优先度存在较大的差异,因此可通过寻找一种新的质子转移介质降低质子转移的活化能。在前期的报道中,许多研究发现 MEACOO<sup>-</sup>水解产生的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>可参与去质子化过程降低再生能耗。研究认为,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>在解吸过程中直接与质子反应释放 CO<sub>2</sub>的同时,由于 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的碱性介于 MEA 和 H<sub>2</sub>O 之间,可作为催化剂将 MEAH<sup>+</sup>质子转移给 H<sub>2</sub>O,即 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>接收来自 MEAH<sup>+</sup>的质子形成 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>,H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>再将质子转移给 H<sub>2</sub>O 形成 H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>。Shi 等人<sup>[11]</sup>对 MEA-DEAB 和 MEA-MDEA 混合体系解吸再生能耗进行了对比研究,发现在相同条件下,MEA-DEAB 混合体系的能耗较低,其原因在于该体系中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度更高,HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>作用于去质子化过程显著降低反应活化能。根据计算结果,对比纯 MEA 体系,MEA-DEAB(4-二乙基氨基-2-丁醇)体系 MEAH<sup>+</sup>去质子化所需的能量从 78.2 kJ/mol 降低至 21.9 kJ/mol<sup>[11]</sup>。HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的存在可以在一定程度上降低质子转移难度,但 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>作为 CO<sub>2</sub>吸收的副产物,在吸收 CO<sub>2</sub>的胺液中含量极低。根据相关研究,在 20 ℃的 MEA 溶液条件下,CO<sub>2</sub>负荷达到 0.42 mol/mol 时才会产生极少量的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。虽然也有通过引入叔胺增加胺液中的 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度的相关报道,但相较于伯胺和仲胺,叔胺会减缓 CO<sub>2</sub>吸附速率,因此,目前更多地采用引入新的质子供给途径降低质子转移难度,

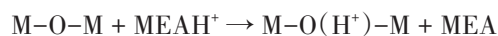
其中较为主流的做法是引入具有大量酸位点的固体酸催化剂。

固体酸催化剂,顾名思义,是指具有特定酸位点的固体材料。固体酸的酸位点包括具有接受电子的 Lewis 酸(L 酸)位点和具有提供质子能力的 Brønsted 酸(B 酸)位点。其中,通过加入具有 B 酸位点的固体酸催化剂可以直接给体系提供 H<sup>+</sup>与 MEACOO<sup>-</sup>反应<sup>[13]</sup>,降低了质子 H<sup>+</sup>从 MEAH<sup>+</sup>到 H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>与 MEACOO<sup>-</sup>反应的转移难度,显著提高 CO<sub>2</sub>解吸效率<sup>[14-15]</sup>。L 酸位点则需要先从 MEAH<sup>+</sup>获取 H<sup>+</sup>,再将获取的 H<sup>+</sup>转移给 H<sub>2</sub>O 形成 H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>。

B 酸位点方程式为

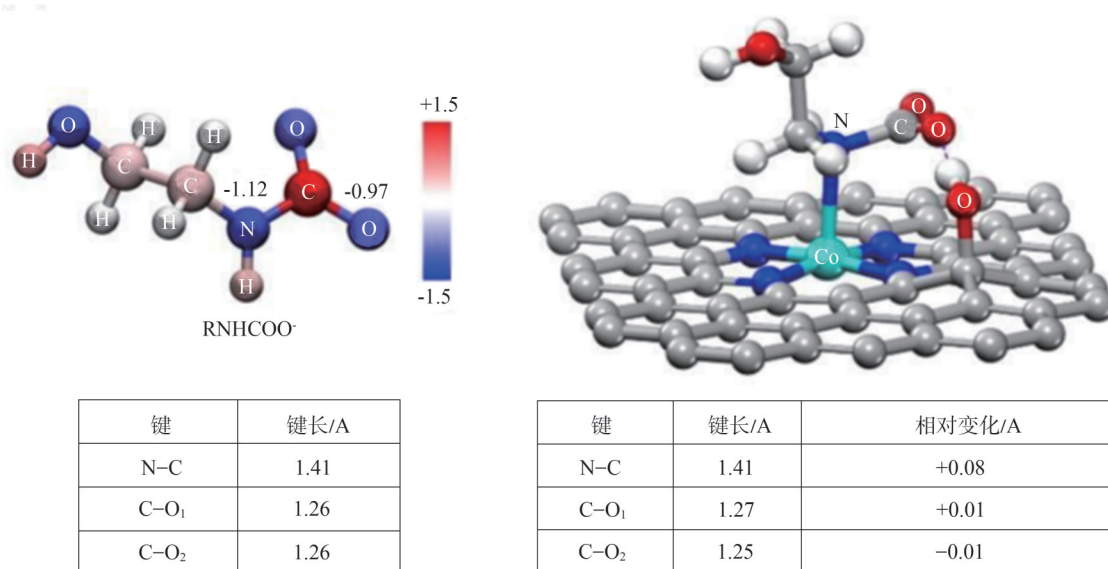


L 酸位点方程式为



### 2.2 降低 MEACOO<sup>-</sup>的分解温度

MEACOO<sup>-</sup>分解的关键在于 N-C 的断裂,降低 MEACOO<sup>-</sup>分解温度的关键在于削弱 N-C 键能,换言之,减弱 N-C 之间的强电子相互作用。从结构上来讲,对于 MEACOO<sup>-</sup>中的 N-C 键,N 和 C 均发生电子轨道杂化(一个 s 轨道和两个 p 轨道混合形成三个等价的杂化轨道),但不同的是,杂化后的 N 仍具有一对孤对电子。因此,通过与 N 的孤对电子相互作用减少 N-C 键中 N 的电子密度,从而降低共价键键能,在一定程度上是比较理想的做法。L 酸位点主要由不饱和配位的金属位点产生,具有接收电子的特性,引入具有 L 酸位点的固体酸催化剂后,表面的 L 酸位点可与 N 的孤对电子耦合,改变 N 的杂化形式及其电子密度分布,从而削弱 N-C 相互作用,导致 N-C 键能下降、更易断裂,实现 MEACOO<sup>-</sup>分解<sup>[16]</sup>。除 L 酸位点外,B 酸位点产生的 H<sup>+</sup>也会进攻 N 的孤对电子产生相似的作用。因此,B 酸位点提供的 H<sup>+</sup>可以同时提供反应所需的质子和促进 N-C 的断裂<sup>[11]</sup>,这也可能是 B 酸位点比 L 酸表现出更好地促进胺液解吸再生的原因<sup>[17-18]</sup>。如图 2 所示,在 L 酸和 B 酸的共同作用下,N-C 键的键长变大,其断裂难度减小,有助于降低 MEACOO<sup>-</sup>的分解温度。综上所述,固体酸中大量的 B 酸和 L 酸的存在使其理论

图2 催化剂L酸(Co)和B酸(O-H)共同作用下MEACOO<sup>-</sup>中N-C键长变化<sup>[19]</sup>Fig.2 Change of N-C bond length in MEACOO<sup>-</sup> under the co-action of L-acid (Co) and B-acid (O-H)<sup>[19]</sup>

上可以催化胺解吸再生,降低解吸能耗。

### 3 固体酸催化剂对胺解吸再生的应用

从Walter等人首次发现了单一金属氧化物V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>可以催化甲苯合成苯甲醛开始,固体酸催化剂在非均相反应中的研究迅速开展<sup>[20]</sup>。根据组成材料的不同,固体酸包括金属氧化物、硫化物、杂多酸、分子筛、天然黏土矿、金属有机骨架材料(metal organic framework, MOFs)和共价有机骨架化合物(covalent organic frameworks, COFs)、阳离子交换树脂以及其他复合材料等。在固体酸催化剂催化胺液解吸方面,不同材料的应用均得到了一定的研究。得益于固体酸催化剂丰富的L酸或B酸位点,其在胺解吸再生过程中也逐渐发挥越来越重要的作用。

#### 3.1 金属氧化物

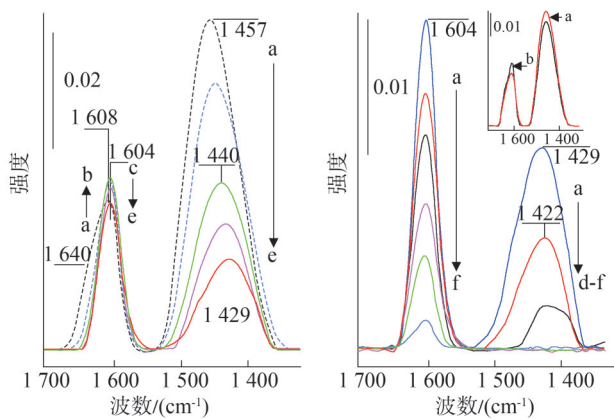
金属氧化物是一类研究较为广泛的固体酸催化剂,如MoO<sub>3</sub>、CeO<sub>2</sub>和Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等。金属氧化物普遍具有热稳定性好、酸性强、活性位点明确、不溶于水和胺等优点,可以直接引入胺再生体系中。同时,金属氧化物的酸性与金属-氧(metal-oxygen, M-O)键的电子偏移情况密切相关,影响因素包括金属的价态、配位方式和晶体结构等,如增加金属的价态和晶体结构的畸变程度一般可增强催化剂的酸性<sup>[21]</sup>。当金属位点的电子密度减少时,表现出更强的L酸强度,当其达到一定阈值后,在含水条件,可以解离水产生B

酸位点,例如,α-MoO<sub>3</sub>由于八面体结构的强烈畸变而具有较多的B酸位点。通过调节结构或者形成复合结构在一定程度上可以调节固体酸催化剂的酸性。

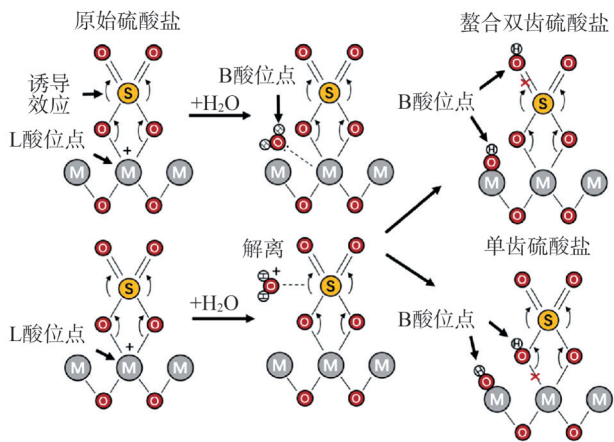
从单一金属氧化物在胺再生方向的应用来看,Wang等人对比了三种不同的纳米颗粒SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对MEA体系CO<sub>2</sub>吸收和解吸的影响,发现均遵循TiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>依次减小的规律。在相同的解吸程度下,与不含纳米颗粒的溶剂相比,含有0.1%质量百分数的TiO<sub>2</sub>纳米颗粒的溶剂节省了42%的解吸时间<sup>[8]</sup>。Bhatti等人对比了五种不同的过渡金属氧化物(V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、MoO<sub>3</sub>、WO<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>和Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在35~86℃温度范围内对胺再生的影响,发现其再生效率遵循MoO<sub>3</sub>、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、WO<sub>3</sub>、空白测试依次减小的规律<sup>[22]</sup>。该团队后续又进一步对比了市售金属氧化物催化剂Ag<sub>2</sub>O、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、NiO、CuO和MnO<sub>2</sub>的应用效果,发现使用的所有催化剂均改善了MEA的再生性能,其中Ag<sub>2</sub>O表现最佳,其次是Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sup>[23]</sup>。此外,该团队还探究了在40~86℃的温度下,ZrO<sub>2</sub>和ZnO作为催化剂对富含CO<sub>2</sub>的MEA溶液再生性能的影响,结果表明,两种催化剂均能使CO<sub>2</sub>解吸量增加32%,解吸率高达54%,溶剂循环效率提高至56%<sup>[24]</sup>。

总的来看,金属氧化物的催化效果与其酸性呈现一定的正相关关系,特别是具有大量B酸位点的

金属氧化物,如  $\text{MoO}_3$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Ag}_2\text{O}$  和  $\text{ZrO}_2$  等,表现出更为优异的催化性能,与 B 酸具有同时提供质子和促进 N-C 断裂的多功能性相一致。由于 B 酸的产生与 M-O 键中金属的电子密度有关,也有不少研究报道了通过构建复合金属氧化物形成 M-O-M<sub>2</sub>(如 Ti-O-Si)键改变 M 的电子密度,亦或引入具有强吸电子的功能基团(如  $\text{SO}_4^{2-}$ )等,增加金属氧化物的 B 酸位点,如图 3 所示。Buniazet 等人使用红外光谱法测定了  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  混合氧化物酸性位点的性质,发现在  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  混合氧化物的表面上具有大量的 L 酸和 B 酸位点,但在纯  $\text{TiO}_2$  和  $\text{SiO}_2$  的表面上没有检测到 B 酸位点<sup>[25]</sup>。Zhang 等人通过硫酸刻蚀  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  引入  $\text{SO}_4^{2-}$  显著提高催化剂表面 B 酸位点数量<sup>[26]</sup>。



(a)不同温度下  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  复合金属氧化物表面  $\text{NH}_3$  吸附红外图<sup>[25]</sup>



(b)  $\text{SO}_4^{2-}$  增强金属氧化物表面酸性机理示意图<sup>[27]</sup>

图3 金属氧化物酸性改进途径示意图

Fig.3 Schematic diagram of the improvement pathway of metal oxide acidity

具体应用方面, Liu 等人制备并比较了  $\text{CeO}_2$ 、 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CeO}_2$ - $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  的物化性能及其催化解吸性能。 $\text{NH}_3$ -TPD 测试结果表明,  $\text{CeO}_2$ - $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  的酸性要远优于纯  $\text{CeO}_2$  和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。相对应地,  $\text{CeO}_2$ - $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  表现出最佳的催化  $\text{CO}_2$  解吸性能, 解吸量达到 73%, 相较无催化剂的空白组提高了 30%, 同时解吸温度从 110 °C 下降至 100 °C<sup>[28]</sup>。Zhang 等人将  $\text{TiO}_2$  粉末在  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液中浸渍 4 h, 对  $\text{TiO}_2$  进行硫酸酸化处理, 并经过过滤、干燥以及 500 °C 焙烧实现  $\text{SO}_4^{2-}$  在  $\text{TiO}_2$  表面的负载。相较于空白对照组, 在相同条件下, 其  $\text{CO}_2$  解吸速率从  $3.50 \times 10^{-2} \text{ mol/min}$  上升至  $4.20 \times 10^{-2} \text{ mol/min}$ , 热负荷从 1 408.2 kJ/mol 下降至 1 167.8 kJ/mol<sup>[7]</sup>。该团队还通过改变 Zr/Al 比制备了一系列  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2$  负载的  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SZA) 催化剂, 并比较了在 5 种催化剂(3 种 SZA 催化剂和 2 种前体催化剂)分别作用、温度为 98 °C 且  $\text{CO}_2$  负荷为 0.5 mol/mol 的条件下 5 mol/L MEA 溶液的再生特性<sup>[13]</sup>。结果表明, 3 种 SZA 催化剂的催化活性均优于前体催化剂。其中, 混合比为 1:1、具有最多 B 酸位点和最高介孔表面积 of SZA 具有最高的催化性能, 与无催化剂运行相比, 降低了 36.9% 的热负荷。

### 3.2 分子筛催化剂

分子筛催化剂, 又称沸石催化剂, 是一种具有特定结构和孔道的固体材料。分子筛具有孔径均一、酸性强和离子交换性能强的特性, 并具有良好的热稳定性和水热稳定性, 使得分子筛催化剂能够针对许多反应展现出高活性和高选择性, 其中工业上用量最大的为分子筛裂化催化剂。分子筛的骨架通常由硅、铝、磷、钛等元素通过氧桥连而成, 形成三维网状结构, 其酸性主要来源于骨架上和孔隙中三配位的铝原子和铝离子。根据获取途径, 分子筛大致可分为天然沸石和人工合成分子筛。

天然沸石是一种具有独特晶体结构和优异性能的天然多孔矿物, 属于硅铝酸盐家族。天然沸石主要由硅、铝、氧等元素构成, 其中硅和铝以四面体的形式通过氧桥连接成三维骨架结构。这种结构不仅稳定而且多孔, 使得沸石能够吸附和容纳大量的气体、液体和离子。此外, 沸石表面羟基(-OH)基团的存在使其具有酸性, 从而增强了其催化性能。由

于天然沸石的结构多样,孔径不均一旦杂质较多,对于特定反应催化选择性不高,因而催化性能相对较差,目前在CO<sub>2</sub>解吸方面相关研究相对较少,但其分布广、价格低,有一定的应用前景,需要进行相应的改良探究。

与天然沸石不同,人工合成分子筛结构规整,通过调整前体物的种类和比例可以调节分子筛的结构以及相应的酸强度,且合成的分子筛具有合适的孔径和相对较大的比表面积因而更易与反应物接触反应<sup>[29]</sup>,可以高选择性、高吸附量地捕获目标物种。同时,其高热稳定性和强抗水性能保证了分子筛催化剂在CO<sub>2</sub>解吸过程中的稳定存在。目前研究较为广泛的合成分子筛催化剂主要包括HZSM-5、HY、SBA-15、MCM-41和KIT-6等。

ZSM-5分子筛是一种具有优异性能的沸石分子筛材料,以其独特的晶体结构和出色的催化性能在化学工业中占据重要地位,其最初由Mobil Oil Corporation的科学家在20世纪70年代合成。ZSM-5分子筛具有规则的十元环孔道结构,这些孔道在三维方向上相互贯通,形成了复杂的网络,使得ZSM-5具有高的比表面积和优异的物质传输性能。ZSM-5经过多次铵离子交换处理后,经550℃焙烧得到的HZSM-5分子筛是目前应用较广的商用B酸催化剂之一,具有大量的孔隙结构和酸位点。HZSM-5同时具有的大量B酸和L酸位点<sup>[30]</sup>,使其成为最优的CO<sub>2</sub>解吸催化剂之一,其催化CO<sub>2</sub>解吸的反应机理如图4所示<sup>[31]</sup>。

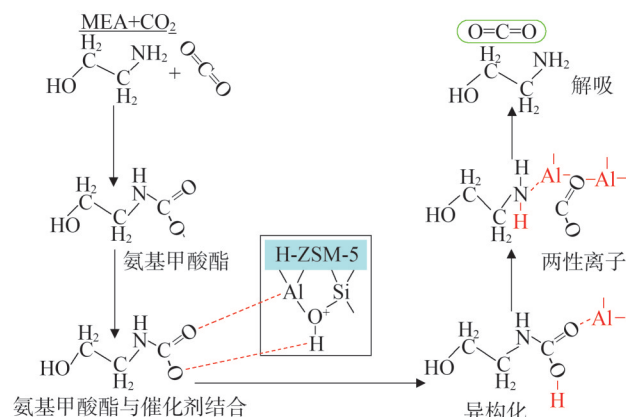


图4 胺溶剂再生过程中HZSM-5上L酸和B酸促进CO<sub>2</sub>解吸的反应机理<sup>[31]</sup>

Fig.4 Mechanism of CO<sub>2</sub> desorption promoted by Lewis and Brønsted acid sites on HZSM-5 in the process of amine solvent regeneration<sup>[31]</sup>

为了探究HZSM-5的催化解吸效果,Srisang等人研究了 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和HZSM-5的加入对于MEA和MDEA或DEAB体系CO<sub>2</sub>解吸效率和热负荷的影响。结果表明,在85℃下,HZSM-5比 $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>具有更佳的催化CO<sub>2</sub>解吸和降低热负荷的效果<sup>[32]</sup>。Akachuku等人对在5~95℃、CO<sub>2</sub>负荷为0.3~0.5 mol/mol条件下, $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和HZSM-5在5 mol/L MEA和7 mol/L MEA-MDEA体系中的催化解吸效果进行了对比,发现HZSM-5表现出更佳的催化效果。相较于无催化剂的对照组,HZSM-5催化下MEA体系的解吸率提高74%,MEA-MDEA体系则提高了85.2%,同时还显著降低了两个体系的热负荷<sup>[16]</sup>。

此外,为了进一步提高HZSM-5的催化效果,许多研究针对常规的HZSM-5进行了相应的改造。Sun等人通过NaOH脱硅刻蚀HZSM-5、表面活性剂诱导实现溶解物质重组的方法合成了一系列介孔HZSM-5催化剂,并评估了其催化CO<sub>2</sub>解吸的性能。实验结果表明,合成的催化剂显著提高了CO<sub>2</sub>在低温下的解吸率,解吸CO<sub>2</sub>总量提高了60%,热负荷降低了24%~37%<sup>[33]</sup>。Li等人通过双金属Mo和Mn的骨架掺杂改性提高HZSM-5的耐久性、表面化学活性和孔结构,Mo<sup>6+</sup>-O-Mn<sup>2+</sup>结构产生强烈诱导电子转移效应使得催化剂H<sup>+</sup>含量增加,从而使CO<sub>2</sub>解吸温度比传统HZSM-5催化剂降低8.27℃,能耗降低37%<sup>[34]</sup>。

相比于HZSM-5催化剂,其他分子筛催化剂在催化CO<sub>2</sub>解吸方面的研究相对较少。Liu等人探究了HZSM-5、MCM-41和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>对于MEA、MEA-DEEA(2-二乙氨基乙醇)、MEA-1DMA2P(1-二甲氨基-2-丙醇)和MEA-MDEA体系CO<sub>2</sub>解吸的催化效果,发现在CO<sub>2</sub>解吸量提升和热负荷下降性能方面HZSM-5的催化效果均优于MCM-41;其提出固体酸催化剂的催化效果与总酸量、中孔比表面积、B酸与L酸数量之比以及B酸位点数量相关,这四者越大,催化效果越好;MCM-41虽然具有较大的中孔比表面积,但B酸与L酸偏小,因此导致其催化效果较弱<sup>[35]</sup>。Bairq等人则合成了颗粒尺寸为10~100 nm的KIT-6,并探究了其在MEA-CO<sub>2</sub>再生体系中的催化效果。结果显示,在KIT-6催化下,解吸速率提高了150.25%,能量消耗下降了33.5%<sup>[36]</sup>。Liang

等人在 378 K、初始  $\text{CO}_2$  负荷为 0.5 mol/mol MEA 的条件下,对 HZSM-5 和 H-Y 以及一系列复合固体酸催化剂作用下  $\text{CO}_2$  释放速率和热负荷进行了比较,并通过改变催化剂用量的方式改变  $\text{CO}_2$  负载。其发现无论是在贫  $\text{CO}_2$  负载区还是在富  $\text{CO}_2$  负载区, HZSM-5 的催化性能均优于 H-Y<sup>[18]</sup>。总体而言,由于其他分子筛的酸性,特别是 B 酸强度弱于 HZSM-5,催化性能普遍较低,往往需要与其他成分,如与金属氧化物耦合进行优化。

### 3.3 金属氧化物-分子筛复合型催化剂

单一的金属氧化物和分子筛固体酸催化剂虽各有优点,但都存在一定的缺点与不足,限制了其进一步推广应用。金属氧化物存在比表面积小、表面双电层变化导致颗粒团聚等缺陷,而分子筛类催化剂虽然具有大量的 L 酸和 B 酸位点,但存在扩散慢和易团聚等问题,因此现今研究倾向于将金属氧化物和分子筛催化剂组合、改性从而构建性能更优异的复合型催化剂。复合型催化剂制备相对简单,在选定的分子筛催化剂上通过水热、沉淀和浸渍等方法实现金属氧化物或者改性金属氧化物的负载,经过干燥、焙烧等工序最终得到金属氧化物-分子筛复合型催化剂。Zhang 等人通过超声沉淀法制备了一系列具有不同  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 HZSM-5 比例的双功能  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HZSM-5}$  催化剂(Al-ZSM),并将其应用于  $\text{CO}_2$  解吸过程。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 HZSM-5 之间的电子相互作用增强了催化剂的 B 酸位点,同时  $\text{Al}_2\text{O}_3$  作为碱性位点加速去质子化过程,协同加速解吸过程。实验结果表明,该系列所有催化剂均提高了 MEA 体系  $\text{CO}_2$  的解吸性能,且优于单一催化剂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 HZSM-5。与无催化剂的空白对照组相比,Al-ZSM 催化下热负荷降低了 23.3%~34.2%,解吸性能提高 2~3 倍<sup>[14]</sup>。Sun 等人通过浸渍法将镍氧化物负载于 HZSM-5 上,该系列催化剂中镍负载量为 2.16%~9.80%。 $\text{NH}_3$ -TPD、吡啶吸附红外光谱和傅里叶变换红外光谱等证明了 Ni 氧化物的负载增强了 HZSM-5 的酸性。其中,负载量为 7.85% 的催化剂对  $\text{CO}_2$  解吸表现出最优异的催化活性, $\text{CO}_2$  解吸量增加了 36%,相对热负荷降低了 27.07%,且在五次循环测试中保持高稳定性。结合实验结果和理论计算,该研究证明了 Ni-HZSM-5 催化剂显著加速了  $\text{CO}_2$  解吸过程中的质子转移<sup>[37]</sup>。

Xing 等人通过离子交换法将  $\text{Zr}(\text{SO}_4)_2$  吸附在 HZSM-5 分子筛上,通过煅烧合成  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{HZSM-5}$ ,一步完成  $\text{Zr}^{4+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的同时负载。 $\text{Zr}^{4+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的同时负载进一步改善了 HZSM-5 表面的 L 酸和 B 酸丰度,使得  $\text{CO}_2$  解吸温度降至 98 °C 以下。对比不使用催化剂的空白对照组,使用  $\text{SO}_4^{2-}/\text{ZrO}_2/\text{HZSM-5}$  后二氧化碳解吸量和速率分别提高了 40% 和 37%,能源消耗减少了大约 31%,其理论计算也同样验证了酸位点的增多加速了反应过程中的质子转移<sup>[38]</sup>。

### 3.4 MOFs 和 COFs 材料

MOFs 是由金属离子或金属簇与有机配体通过配位键自组装形成的具有周期性网络结构的晶态多孔材料<sup>[39]</sup>,而 COFs 则是由元素通过共价键连接而成的多孔有机晶体材料。两者皆因极高的孔隙率、大的比表面积和可调的孔径大小而备受瞩目,在催化方面展现出独特优势和巨大潜力。MOFs 的酸性主要来源于其金属中心和有机配体的相互作用以及结构中存在的缺陷产生可接受电子能力的位点,酸位点以 L 酸为主。COFs 的酸性则更多地与其有机构筑单元和共价键的性质有关,但考虑到其主要由 H、B、C、N、O 等轻元素组成<sup>[40]</sup>,电荷差异较小,酸性相对较差。在胺解吸再生反应中,B 酸位点的数量和比表面积等都是重要的性能指标。因此在实际应用中,MOFs 和 COFs 多作为载体进一步负载酸性组分以实现高效解吸  $\text{CO}_2$ 。Wei 等人将高酸性磷钨酸负载在 Ce 基 MOFs 载体上,磷钨酸上的强 B 酸位点和 Ce 基 MOFs 上的 L 酸位点协同作用显著增强  $\text{CO}_2$  解吸性能。在 88 °C 下,与非催化体系相比,在催化剂作用下, $\text{CO}_2$  解吸能力和解吸速率可分别提高约 38.1% 和 166%,热负荷减少约 29.4%<sup>[41]</sup>。Alivand 等人在功能化纳米团簇  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -COOH 与 MOF 的自组装过程中诱导缺陷和介孔的产生,并引入螯合硫酸盐产生超酸性位点,形成极高的质子供给性能。性能探究实验发现,仅使用 0.1% 的纳米催化剂,二氧化碳捕获的能耗大幅降低 44.7%,与非均相催化剂相比,效率提高了 10 倍<sup>[42]</sup>。Li 等人将  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  锚定在 COF 上,形成的复合材料在  $\text{CO}_2$ -MEA 体系中表现出良好的催化效果,原因在于界面处 B 酸位点的产生、比表面积增大等。在 88 °C 下, $\text{CO}_2$  解吸速率高达 290.1 mmol/(min·g),与传统的热解吸相比,增加了

540%, 能量消耗减少了约 58%<sup>[43]</sup>。Xing 等人利用 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/TiO<sub>2</sub> 与 MOF 材料 (Co 基 ZIF-67) 合成核-壳结构催化剂 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZIF-67-C@TiO<sub>2</sub> (SZC@TiO<sub>2</sub>), 使得 CO<sub>2</sub> 解吸量和速率分别提高了 64.5% 和 153%, 能耗下降约 36%, 其合成方法和催化解吸原理如图 5 所示<sup>[44]</sup>。

### 3.5 其他材料

除常见的上述材料外, 当前研究的适用于胺解吸再生的固体酸催化剂还包括黏土矿物、离子交换树脂、工业固体废物和碳基材料等。

黏土矿物通常由硅铝酸盐构成, 常见的黏土矿物包括蒙脱石 (montmorillonite, MMT)、凹凸棒 (attapulgite, ATP) 和海泡石 (sepiolite, SEP) 等。MMT 的夹层结构以及 SEP 的狭缝介孔结构均可以促进传质过程<sup>[45]</sup>, 但黏土矿物普遍酸性较低, 一般需要额外

负载酸性组分提供质子, 辅之以黏土矿物的质子传质作用加速胺解吸过程。Zhang 等人评估了 SEP 上负载金属氧化物 (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 或 CuO) 形成的复合催化剂在 100 °C 下从富含 CO<sub>2</sub> 的 MEA 溶液中解吸 CO<sub>2</sub> 的催化性能。结果表明, 与非催化 MEA 溶液相比, 所测试的催化剂可以加速 CO<sub>2</sub> 的释放和减少热消耗, 相对热负荷从大到小排序依次为: 空白 (100%)、SEP (66.4%)、CuO-SEP (58.8%)、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SEP (54.0%)<sup>[46]</sup>。

离子交换树脂是指带有官能团 (有离子交换性能的活性基团)、具有网状结构、不溶性的高分子化合物, 通常是球形颗粒物, 能够通过离子交换性能实现溶液中离子的分离、纯化或浓缩。Sun 等人发现阳离子交换树脂 Amberlyst-15 具有良好的比表面积和酸强度, 作为催化剂可以显著提高胺的再生率并增加 21% 的 CO<sub>2</sub> 解吸量<sup>[47]</sup>。但 Amberlyst-15 的热稳定性

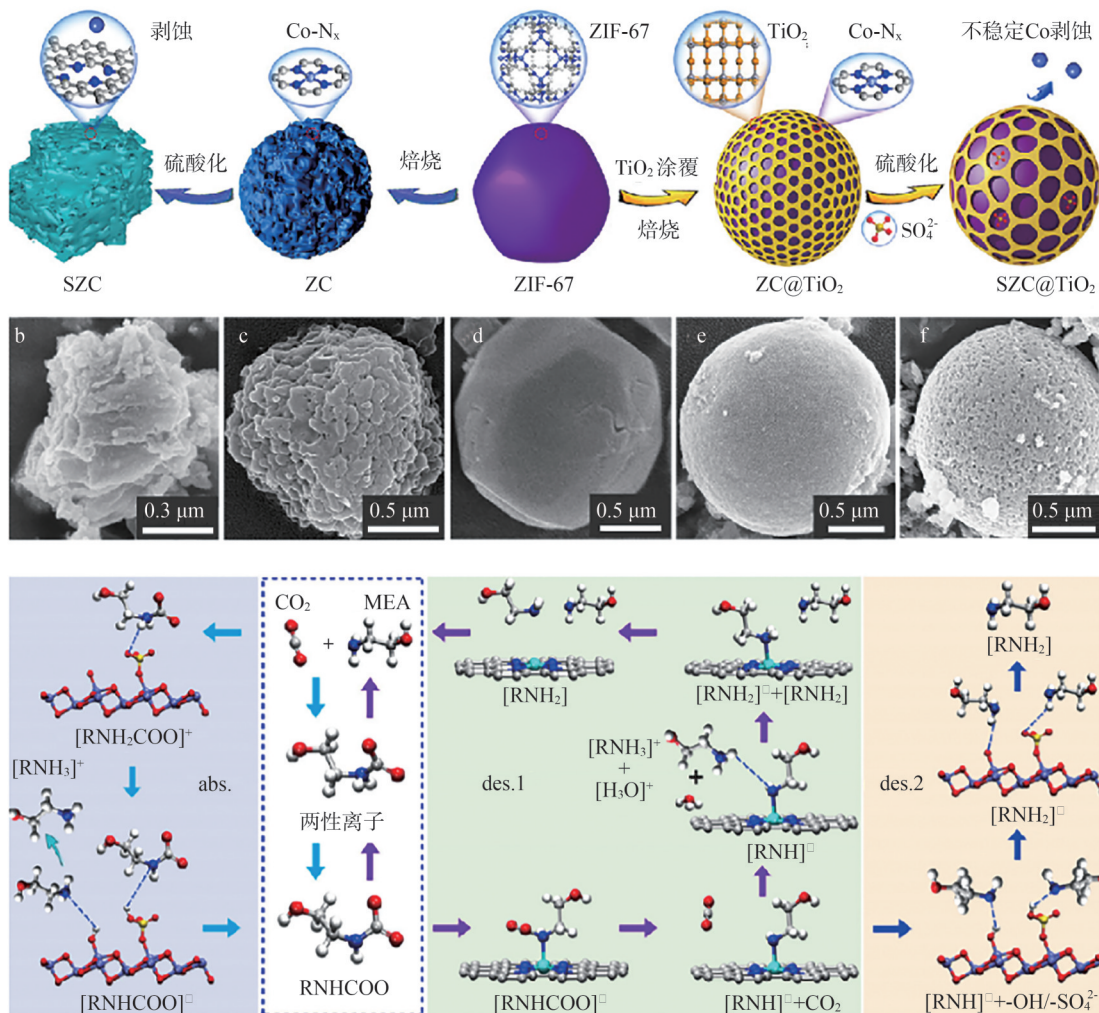


图5 SZC@TiO<sub>2</sub> 催化剂合成策略及催化 RNH<sub>2</sub>COO<sup>-</sup> 分解机理示意图<sup>[44]</sup>

Fig.5 Synthesis strategy of SZC@TiO<sub>2</sub> and its catalytic mechanism on the decomposition of RNH<sub>2</sub>COO<sup>-</sup><sup>[44]</sup>

较差,无法在高于 100 °C 的条件下稳定存在。此外,区别于其他固体酸催化剂,离子交换树脂在胺解吸过程中由于质子交换导致酸性逐渐下降,需要在一定时间后进行酸性再生,因此其应用受到极大的限制。

部分工业固体废物中含有一定含量的金属矿物元素,在有机胺吸收液催化解吸中可作为天然多金属催化剂,如我国火电厂粉煤灰的主要氧化物包括  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$  等,制铝工业赤泥主要成分为  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等,因此具有较高的回收利用价值。Li 等人研究了赤泥颗粒对  $\text{CO}_2$  吸收和解吸的影响。赤泥中的复合金属氧化物产生丰富的酸碱活性位点促进质子转移,加速氨基甲酸酯分解。相同条件下,相较于不加赤泥的 MEA 解吸体系,添加 2.5%~5% 的赤泥颗粒后,最大解吸速率增加了 289%,相对热负荷降低了 16.3%<sup>[48]</sup>。

碳基材料是以碳元素为主体的材料,具有无恒定的结构及性质。它们通常具有比表面积大、表面形态均一、孔隙结构发达等特点,且表面存在的丰富的弱酸位点,可直接应用于  $\text{CO}_2$  解吸,亦或负载金属氧化物、分子筛等进一步加强酸性再应用。Li 等人研究了不同类型的多壁碳纳米管(MWCNT, MWCNT-OH 和 MWCNT-COOH)对于 2(2-氨基乙醇)-乙醇(AEE)水溶液中  $\text{CO}_2$  解吸的催化作用。与空白试验相比,在 30 min 内,MWCNT、MWCNT-OH 和 MWCNT-COOH 催化下平均解吸速率分别提高了 26.7%、32.4% 和 29.5%<sup>[49]</sup>。Bairq 等人合成了三种改性的非均相介孔催化剂 CMK-3- $\text{SiO}_2$ 、CMK-3-MCM-41 和 CMK-3-SBA-15,在 97 °C 和  $\text{CO}_2$  负荷为  $(0.5 \pm 0.02)$  mol/mol MEA 的条件下,CMK-3 改性催化剂显著降低了  $\text{CO}_2$  解吸能耗,其中性能最佳的为 CMK-3- $\text{SiO}_2$ ,与空白试验相比,其解吸速率提高了 195%,能量需求降低了 37.41%<sup>[50]</sup>。

## 4 总结与展望

在  $\text{CO}_2$  捕集工艺中,解吸再生过程是其主要能耗环节,以目前技术较为成熟的 MEA 体系为例,其难点在于  $\text{MEAH}^+$  上质子难以转移至  $\text{H}_2\text{O}$  上形成  $\text{H}_3\text{O}^+$  以及  $\text{MEACOO}^-$  结构稳定需要在 100 °C 以上发生,因此导致大量水汽蒸发加剧能耗。固体酸通过表面 L 酸和 B 酸位点促进  $\text{H}^+$  的转移和  $\text{MEACOO}^-$  中

N-C 断裂的性能使其作为解吸催化剂得到了广泛研究。目前从总体研究结果来看,固体酸催化剂中各类材料,如金属氧化物、分子筛和 MOFs 以及各类复合材料,都能在一定程度上提高  $\text{CO}_2$  解吸速率和解吸量,同时降低热负荷,有望实现低温解吸,降低  $\text{CO}_2$  捕集成本。然而,固体酸催化  $\text{CO}_2$  解吸技术仍存在一些有待解决的问题,其应用仍面临诸多挑战。

1) 不同条件下固体酸催化剂的催化机理需进一步明确。目前主流的观点,固体酸催化剂主要是通过大的比表面积以及多酸位点,特别是 B 酸位点加速质子转移和 N-C 键断裂。相关实验结果也验证了这一点,但采用的多为高  $\text{CO}_2$  负荷的胺液。近年来,也有相关报道认为碱性位点作为  $\text{MEAH}^+$  中  $\text{H}^+$  的捕获位点也可以促进解吸过程的发生,如低  $\text{CO}_2$  负荷下, $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  的催化性能要优于 HZSM-5<sup>[51]</sup>。因此,需进一步开展碱性位点乃至酸-碱双功能位点的催化机理研究,从而针对性地设计高效解吸催化剂。

2) 固体酸催化剂的性能、成本和稳定性仍有待提高。例如,金属氧化物比表面积较小且随  $\text{CO}_2$  负荷变化可能由于表面电荷变化发生团聚,人工合成分子筛虽性能优越但价格昂贵,MOFs 材料在高温碱性条件下易发生结构变形乃至分解等。因此,寻找新的高效、稳定且低成本的催化材料是未来重要的研究方向,包括现有材料通过离子掺杂或基团引入等手段进行改进、不同材料之间的组合和改进等。

3) 缺乏实际工程应用探究。当前,固体酸催化剂的研发停留在实验室研究阶段,复杂工况下的应用效果探究不足。因此,后续需要进一步开展相应的工程示范应用,挖掘可能存在的问题,以此指导高效催化剂的研发。

## 参考文献

- [1] LIANG Z W, FU K Y, IDEM R, et al. Review on current advances, future challenges and consideration issues for post-combustion  $\text{CO}_2$  capture using amine-based absorbents[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(2): 278-288.
- [2] 陆诗建, 刘苗苗, 刘玲, 等. 烟气胺法  $\text{CO}_2$  捕集技术进展与未来发展趋势[J]. 化工进展, 2023, 42(1): 435-444.  
LU Shijian, LIU Miaomiao, LIU Ling, et al. Progress and future development trend of amine method of  $\text{CO}_2$  capture technology from flue gas [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(1): 435-444.
- [3] MANZOLINI G, SANCHEZ FERNANDEZ E, REZVANI S, et al.

- Economic assessment of novel amine based CO<sub>2</sub> capture technologies integrated in power plants based on European Benchmarking Task Force methodology[J]. *Applied Energy*, 2015, 138:546–558.
- [4] ZHANG W F, XU Y L, DENG Z X, et al. Experiments on continuous chemical desorption of CO<sub>2</sub>-rich solutions[J]. *Energy*, 2022, 239:122354.
- [5] ZHANG S, SHEN Y, SHAO P, et al. Kinetics, thermodynamics, and mechanism of a novel biphasic solvent for CO<sub>2</sub> capture from flue gas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6):3660–3668.
- [6] BOUGIE F, POKRAS D, FAN X F. Novel non-aqueous MEA solutions for CO<sub>2</sub> capture[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2019, 86:34–42.
- [7] ZHANG X W, ZHANG X, LIU H L, et al. Reduction of energy requirement of CO<sub>2</sub> desorption from a rich CO<sub>2</sub>-loaded MEA solution by using solid acid catalysts[J]. *Applied Energy*, 2017, 202:673–684.
- [8] WANG T, YU W, LIU F, et al. Enhanced CO<sub>2</sub> absorption and desorption by monoethanolamine (MEA) - based nanoparticle suspensions[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2016, 55(28):7830–7838.
- [9] LITTEL R J, VERSTEEG G F, VAN SWAAIJ W P M. Kinetics of CO<sub>2</sub> with primary and secondary amines in aqueous solutions—I. Zwitterion deprotonation kinetics for DEA and DIPA in aqueous blends of alkanolamines[J]. *Chemical Engineering Science*, 1992, 47(8):2027–2035.
- [10] SRISANG W, POURYOUSEFI F, OSEI P A, et al. Evaluation of the heat duty of catalyst-aided amine-based post combustion CO<sub>2</sub> capture[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 170:48–57.
- [11] SHI H C, NAAMI A, IDEM R, et al. Catalytic and non catalytic solvent regeneration during absorption-based CO<sub>2</sub> capture with single and blended reactive amine solvents[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2014, 26:39–50.
- [12] SAKWATTANAPONG R, AROONWILAS A, VEA W A. Behavior of reboiler heat duty for CO<sub>2</sub> capture plants using regenerable single and blended alkanolamines[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(12):4465–4473.
- [13] ZHANG X W, HONG J L, LIU H L, et al. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub> supported on  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a catalyst for CO<sub>2</sub> desorption from CO<sub>2</sub>-loaded monoethanolamine solutions[J]. *AIChE Journal*, 2018, 64(11):3988–4001.
- [14] ZHANG X W, LIU H L, LIANG Z W, et al. Reducing energy consumption of CO<sub>2</sub> desorption in CO<sub>2</sub>-loaded aqueous amine solution using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/HZSM-5 bifunctional catalysts[J]. *Applied Energy*, 2018, 229:562–576.
- [15] ALI SALEH BAIRQ Z, GAO H X, HUANG Y F, et al. Enhancing CO<sub>2</sub> desorption performance in rich MEA solution by addition of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> bifunctional catalyst[J]. *Applied Energy*, 2019, 252:113440.
- [16] AKACHUKU A, OSEI P A, DECARDI-NELSON B, et al. Experimental and kinetic study of the catalytic desorption of CO<sub>2</sub> from CO<sub>2</sub>-loaded monoethanolamine (MEA) and blended monoethanolamine -Methyl-diethanolamine (MEA-MDEA) solutions[J]. *Energy*, 2019, 179:475–489.
- [17] GENG Z B, YANG Y, WANG Y X, et al. Catalytic regeneration of amine-based absorbents for CO<sub>2</sub> capture: the effect of acidic sites and accessibility[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 327:124889.
- [18] LIANG Z W, IDEM R, TONTIWACHWUTHIKUL P, et al. Experimental study on the solvent regeneration of a CO<sub>2</sub>-loaded MEA solution using single and hybrid solid acid catalysts[J]. *AIChE Journal*, 2016, 62(3):753–765.
- [19] XING L, LI M, LI M, et al. MOF-derived robust and synergetic acid sites inducing C - N bond disruption for energy-efficient CO<sub>2</sub> desorption[J]. *Environ Sci Technol*, 2022, 56(24):17936–17945.
- [20] 张宇, 张睿, 王子健, 等. 固体酸催化剂的研究进展[J]. *化学学报*, 2025, 83(2):152–169.
- ZHANG Yu, ZHANG Rui, WANG Zijian, et al. Current advances of solid acid catalysts[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2025, 83(2):152–169.
- [21] KATAOKA T, DUMESIC J A. Acidity of unsupported and silica-supported vanadia, molybdena, and titania as studied by pyridine adsorption[J]. *Journal of Catalysis*, 1988, 112(1):66–79.
- [22] BHATTI U H, SHAH A K, KIM J N, et al. Effects of transition metal oxide catalysts on MEA solvent regeneration for the post-combustion carbon capture process[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(7):5862–5868.
- [23] BHATTI U H, SIVANESAN D, LIM D H, et al. Metal oxide catalyst-aided solvent regeneration: a promising method to economize post-combustion CO<sub>2</sub> capture process[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2018, 93:150–157.
- [24] BHATTI U H, NAM S, PARK S, et al. Performance and mechanism of metal oxide catalyst-aided amine solvent regeneration[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(9):12079–12087.
- [25] BUNIAZET Z, COUBLE J, MAURY S, et al. Acidity of SiO<sub>2</sub>-supported metal oxides in the presence of H<sub>2</sub>O using the AEIR method: 2. adsorption and coadsorption of NH<sub>3</sub> and H<sub>2</sub>O on TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> catalysts[J]. *Langmuir*, 2020, 36(45):13383–13395.
- [26] ZHANG J, HUANG Z W, DU Y Y, et al. Identification of active sites over Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based architecture: the promotion effect of H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> erosion synthetic protocol[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2018, 1(6):2385–2391.
- [27] XIE R Y, MA L, LI Z H, et al. Review of sulfur promotion effects on metal oxide catalysts for NO<sub>x</sub> emission control[J]. *ACS Catalysis*, 2021, 11(21):13119–13139.
- [28] LIU S H, MAO X D, CHEN H, et al. Catalytic-CO<sub>2</sub>-desorption studies of BZA-AEP mixed absorbent by the lewis acid catalyst CeO<sub>2</sub>- $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. *Molecules*, 2023, 28(11):4438.
- [29] 魏可馨. 固体酸催化剂降低CO<sub>2</sub>解吸能耗的实验研究[D]. 北

- 京:华北电力大学,2022.
- [30] SCHREIBER M W, PLAISANCE C P, BAUMGÄRTL M, et al. Lewis-Brønsted acid pairs in Ga/H-ZSM-5 to catalyze dehydrogenation of light alkanes [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2018, 140(14):4849-4859.
- [31] BHATTI U H, SHAH A K, HUSSAIN A, et al. Catalytic activity of facilely synthesized mesoporous HZSM-5 catalysts for optimizing the CO<sub>2</sub> desorption rate from CO<sub>2</sub>-rich amine solutions [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 389:123439.
- [32] SRISANG W, POURYOUSEFI F, OSEI P A, et al. CO<sub>2</sub> capture efficiency and heat duty of solid acid catalyst-aided CO<sub>2</sub> desorption using blends of primary-tertiary amines [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2018, 69:52-59.
- [33] SUN Q, GAO H X, SEMA T, et al. Enhanced CO<sub>2</sub> desorption rate for rich amine solution regeneration over hierarchical HZSM-5 catalyst [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469:143871.
- [34] LI M, XING L, XU Z, et al. Embedded Mo/Mn atomic regulation for durable acidity-reinforced HZSM-5 catalyst toward energy-efficient amine regeneration [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(41):15465-15474.
- [35] LIU H L, ZHANG X, GAO H X, et al. Investigation of CO<sub>2</sub> regeneration in single and blended amine solvents with and without catalyst [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(27):7656-7664.
- [36] BAIRQ Z, PANG Y, LI J, et al. Reducing energy requirements and enhancing MEA-CO<sub>2</sub> desorption rates in amine solutions with KIT-6 nanostructures [J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 346:127536.
- [37] SUN Q, GAO H X, MAO Y, et al. Efficient nickel-based catalysts for amine regeneration of CO<sub>2</sub> capture: from experimental to calculations verifications [J]. *AIChE Journal*, 2022, 68(8):e17706.
- [38] XING L, WEI K X, LI Q W, et al. One-step synthesized SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/ZrO<sub>2</sub>-HZSM-5 solid acid catalyst for carbamate decomposition in CO<sub>2</sub> capture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(21):13944-13952.
- [39] CUI W R, ZHANG C R, XU R H, et al. Rational design of covalent organic frameworks as a groundbreaking uranium capture platform through three synergistic mechanisms [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2021, 294:120250.
- [40] DING H M, LI J, XIE G H, et al. An AIEgen-based 3D covalent organic framework for white light-emitting diodes [J]. *Nature Communications*, 2018, 9:5234.
- [41] WEI K X, XING L, LI Y C, et al. Heteropolyacid modified Cerium-based MOFs catalyst for amine solution regeneration in CO<sub>2</sub> capture [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 293:121144.
- [42] ALIVAND M S, MAZAHERI O, WU Y, et al. Engineered assembly of water-dispersible nanocatalysts enables low-cost and green CO<sub>2</sub> capture [J]. *Nature Communications*, 2022, 13:1249.
- [43] LI Y C, CHEN Z, ZHAN G X, et al. Inducing efficient proton transfer through Fe/Ni@COF to promote amine-based solvent regeneration for achieving low-cost capture of CO<sub>2</sub> from industrial flue gas [J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 298:121676.
- [44] XING L, WEI K, LI Y, et al. TiO<sub>2</sub> coating strategy for robust catalysis of the metal-organic framework toward energy-efficient CO<sub>2</sub> capture [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(16):11216-11224.
- [45] BHATTI U H, KAZMI W W, MUHAMMAD H A, et al. Practical and inexpensive acid-activated montmorillonite catalysts for energy-efficient CO<sub>2</sub> capture [J]. *Green Chemistry*, 2020, 22(19):6328-6333.
- [46] ZHANG R, LI Y F, ZHANG Y M, et al. Energy-saving effect of low-cost and environmentally friendly sepiolite as an efficient catalyst carrier for CO<sub>2</sub> capture [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(11):4353-4363.
- [47] SUN Q, XIONG J, GAO H X, et al. Evaluation of hybrid amines and alcohol solvent with ion-exchange resin catalysts for energy-efficient CO<sub>2</sub> capture [J]. *Green Chemistry*, 2023, 25(12):4647-4655.
- [48] LI Y C, CHEN Z, YUAN B L, et al. Synergistic promotion for CO<sub>2</sub> absorption and solvent regeneration by fine waste red mud particles on in amine-based carbon capture: performance and mechanism [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 304:122380.
- [49] LI X J, ZHANG Y C, CHEN S Y. Enhancement of CO<sub>2</sub> desorption from reinforced 2-(2-aminoethylamine) ethanol aqueous solution by multi-walled carbon nanotubes [J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(7):6577-6584.
- [50] BAIRQ Z A S, GAO H X, MURSHED F A M, et al. Modified heterogeneous catalyst-aided regeneration of CO<sub>2</sub> capture amines: a promising perspective for a drastic reduction in energy consumption [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(25):9526-9536.
- [51] ZHANG X W, ZHANG R, LIU H L, et al. Evaluating CO<sub>2</sub> desorption performance in CO<sub>2</sub>-loaded aqueous tri-solvent blend amines with and without solid acid catalysts [J]. *Applied Energy*, 2018, 218:417-429.

收稿日期:2025-03-05

修回日期:2025-05-06

作者简介:

周亚明(1983),男,高级工程师,主要研究方向为燃煤发电技术;  
陈泰峰(1989),男,工程师,主要研究方向为火电厂环化设备管理;  
冉初萌(1982),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为火力发电厂;  
刘含笑(1987),男,硕士,高级工程师,从事大气污染治理及“双碳”技术研究;

陈俊道(1995),通信作者(cjx1604@163.com),男,博士,工程师,主要研究方向为“双碳”、脱硝等环保技术研发。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250507

## 输变电工程建设多目标低碳优化路径分析

张峰<sup>1</sup>, 方靖宇<sup>1</sup>, 李超<sup>2\*</sup>, 方梦祥<sup>2</sup>, 陈晶<sup>3</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司建设分公司, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027;

3. 国网北京电力经济技术研究院有限公司, 北京 100055)

**摘要:** 输变电工程建设低碳实施是电力建设领域绿色低碳转型的关键, 本文从材料减排与技术减排出发, 针对输变电工程建设碳排放关键环节, 从材料低碳化、布置集成化、部件预制化与能源低碳化四个方面构建输变电工程建设低碳优化路径。以某500 kV输变电工程建设为例, 通过输变电工程建设碳排放多层级量化模型与多目标遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II), 围绕减排水平与减排成本两方面, 对基于这些低碳措施的输变电工程建设低碳优化路径进行综合评价, 识别输变电工程建设低碳路径的减排潜力与最具成本效益的减排机会。研究结果表明, 筛选获得15项输变电工程建设低碳优化路径, 这些优化路径的碳减排率为0.72%~39.95%, 减排成本为-1 350.74~280.22元/t, 可为输变电工程建设低碳实施与电力建设领域绿色低碳转型提供方案选择与实践参考。

**关键词:** 输变电工程建设; 低碳优化; NSGA-II; 减排效果; 成本增量

中图分类号: TM723

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2026)03-0027-09

## Analysis of Multi-objective Low-carbon Optimization Paths for Power Transmission and Transformation Project Construction

ZHANG Feng<sup>1</sup>, FANG Jingyu<sup>1</sup>, LI Chao<sup>2\*</sup>, FANG Mengxiang<sup>2</sup>, CHEN Jing<sup>3</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. Construction Branch, Hangzhou 310020, China;

2. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. State Grid Beijing Electric Power Economics and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

**Abstract:** Low-carbon implementation of power transmission and transformation project construction is a key enabler of green and low-carbon transformation in the field of power construction. Focusing on material and technical emission reduction, this paper develops a low-carbon optimization framework for power transmission and transformation project construction from four aspects: Low-carbon materials, low-carbon energy, integrated layouts, and prefabricated components. Taking the construction of a 500 kV power transmission and transformation project as an example, through a quantitative carbon emission model of power transmission and transformation project construction and non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II), a comprehensive evaluation is conducted on the low-carbon optimization path for power transmission and transformation project construction based on these low-carbon measures, focusing on the emission reduction level and emission reduction cost, to identify the emission reduction potential and the most cost-effective emission reduction opportunities of the low-carbon path for power transmission and transformation project construction. The research results show that 15 low-carbon optimization paths for power transmission and transformation project construction can be identified. The carbon emission reduction rates of these optimization paths range from 0.72% to 39.95%, and the emission reduction costs range from -1 350.74 to 280.22 yuan per ton. These low-carbon optimization paths can provide solution selection and practical reference for the low-carbon implementation of power transmission and transformation project construction and the low-carbon transformation in the field of power construction.

**Keywords:** construction of power transmission and transformation projects; low-carbon optimization; NSGA-II; emission reduction effect; incremental cost

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目(5200-202319152A-1-1-ZN)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5200-202319152A-1-1-ZN).

## 0 引言

输变电工程建设低碳实施是“双碳”目标背景下电力建设领域实现绿色低碳转型、推进电力行业实现高质量发展的关键。当前,针对公路建设<sup>[1-4]</sup>、隧道工程建设<sup>[5]</sup>、园林工程建设<sup>[6]</sup>与油气田地面工程建设<sup>[7]</sup>等工程领域建设过程的低碳优化进行了广泛的研究,这些低碳优化的措施主要围绕建设施工所涉及的消耗性材料与机械台班能耗两方面,具体包括低碳水泥、可再生钢铁、机械台班用能低碳化、固体废弃物资源化利用、创新施工方法,以减少资源浪费。但上述大部分研究仅对这些低碳措施的减排水平进行了定性或半定量分析,导致相当数量的低碳措施以及基于这些措施构建的工程建设低碳路径的减碳效果缺少系统性量化分析,难以为输变电工程建设低碳优化路径构建提供有效参考。目前,缺乏针对输变电工程建设低碳优化措施减排效果的量化分析研究,已成为释放输变电工程建设减排潜力的关键制约因素。

另一方面,目前工程建设相关低碳优化研究普遍聚焦于碳减排效果方面,虽对减排成本进行了一定程度研究,但在“双碳”目标背景下,这些碳减排成本分析研究主要集中于能源行业等宏观层面<sup>[8-10]</sup>,对基于输变电工程等工程建设层面减排措施的低碳优化路径的经济性缺乏必要的分析,导致输变电工程建设减排成本与最具成本效益的低碳优化路径难以得到有效识别,这在实践层面严重制约了输变电工程低碳优化方案的设计与实施。因此,基于上述现状,亟须开展针对输变电工程建设低碳优化路径减排效果与减排成本综合评价分析。

本文基于输变电工程碳排放多层级量化分析模型并采用多目标遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II),对基于输变电工程建设材料减排、能源减排与建设技术减排等多类低碳措施的低碳优化路径进行多目标减排效果综合分析,围绕减排效果与减排成本两个维度,对输变电工程建设低碳优化路径进行综合评价,得到适用于不同减排目标场景的输变电工程建设低碳优化路径,为输变电工程建设的低碳实施以及电力建设领域低碳转型提供理论参考与实践依据。

## 1 研究方法

### 1.1 技术路径

研究显示,输变电工程建设过程水泥及其制品类与钢材类消耗性材料碳排放量占其碳排放总量的70%左右,能源碳排放占输变电工程建设碳排放总量的10%左右,主要由机械台班柴油消耗导致<sup>[11]</sup>。可见,选用绿色低碳建筑材料、优化施工工艺与采用可再生能源是降低输变电工程建设碳排放的关键。通过选用可再生钢材以及在混凝土中使用一定比例的辅助性凝胶材料与可再生骨料,可有效降低水泥及其制品类与钢材类消耗性材料的单位碳排放水平;同时还可对建设工程构筑物进行集成化设计以实现合理节约材料用量,并且对构筑物部件进行预制,实现精准下料,减少材料浪费,可有效减少输变电工程建设碳排放;此外,通过可再生能源替代传统能源,降低机械台班能源消耗所引起的碳排放。基于上述各类低碳优化措施,本文将从材料低碳化、布置集成化、部件预制化、能源低碳化四个方面对输变电工程建设进行低碳优化,如图1所示。

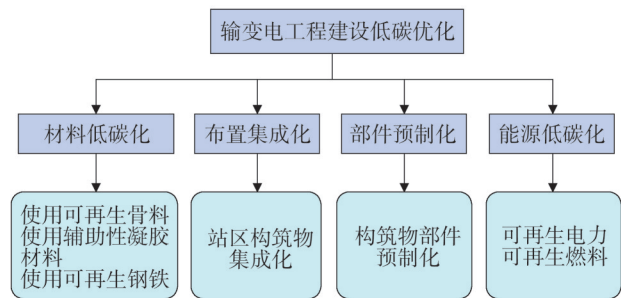


图1 输变电工程建设低碳优化技术路径

Fig.1 Low-carbon optimization technology pathways for power transmission and transformation project construction

### 1.2 优化方法

基于上述四种技术路径方向,对每种技术路径下的子类技术进行筛选。各子类技术下的碳排放水平采用基于温室气体核算体系(greenhouse gas protocol, GHGP)标准体系的输变电工程建设碳排放量化模型计算获取<sup>[11]</sup>,该模型可对输变电工程建设过程的分部分项工程各类物质流与能量流活动的碳

排放进行量化计算。采用 NSGA-II 对不同低碳技术路径及其子类技术的减排效果和进行经济性进行比较分析,相较于传统遗传算法仅可进行单目标优化,该算法通过利用快速非支配排序法与拥挤度距离策略来进行多目标优化,具有收敛性高、鲁棒性强的优点,广泛应用于电力与建设等领域多目标优化研究<sup>[12-16]</sup>。本文基于输变电工程建设碳排放量化模型与 NSGA-II,构建输变电工程建设低碳优化路径,构建过程包括碳排放关键环节识别、低碳技术筛选、低碳技术优化与综合评估,如图 2 所示。

首先,利用基于 GHGP 标准体系的输变电工程建设碳排放量化模型对输变电工程建设碳排放分布特性量化分析,识别关键碳排放源,针对这些碳排放关键环节确定低碳优化方向,并进行相关低碳措施筛选。

其次,利用输变电工程建设碳排放量化模型对筛选获取的低碳措施的减排水平进行量化分析,同时对这些减排措施的减排成本进行量化分析,并利用 NSGA-II,从减排效果与减排成本两个方面对基于减排措施构建的输变电工程建设低碳优化路径进行多目标优化分析,获得对应的帕累托 (Pareto) 解集。

最后,对获得的输变电工程低碳优化路径进行综合评价,即对 NSGA-II 的解集进行非支配排序,获取帕累托前沿,进而获得最优帕累托解集,并对最优解集所对应的低碳优化路径的减排成本和减排效果进行综合分析,获得满足不同减排场景目标偏好的输变电工程建设低碳优化路径。

本文经济性评价采用单位减排成本、成本增量等指标进行评估,其中,单位减排成本为不同技术路径下实现单位减排量所需的成本,成本增量为实现该路径下减排水平所需的成本。减排效果使用减排总量、减排率等指标进行评估,其中减排总量为该技术路径所能实现的减排量的总和,减排率为低碳优化路径的减排量与不采用低碳优化路径的排放量的比值。

## 2 研究案例

### 2.1 工程建设基准情景与碳排放分析

工程建设基准情景以某 500 kV 变电站建设工程为例,该工程建设采用普通混凝土,钢材类消耗性材料采用长流程钢铁,电力与燃料等能源分别来自化石电力与化石燃料。利用输变电工程建设碳排放量化模型对该工程建设消耗性材料碳排放占比进行量化分析,水泥及其制品类与钢材类消耗性材料碳排放占比合计高达约 70%。水泥及其制品类消耗性材料包括 C15 ~ C60 混凝土、水泥砂浆等,其中 C30 混凝土的使用量最大,约占混凝土使用总量的 78%,远远高于其他标号类型的混凝土;钢铁类消耗性材料主要包括钢丝、钢板以及各类型钢,其中圆钢的使用量最大,约占钢材使用总量的 91%。能量流方面,机械台班能源消耗包括电力与燃油(柴油与汽油),燃料消耗与电力消耗的油电比约为 7。

### 2.2 碳排放影响因素分析

该工程在建设过程中水泥及其制品类消耗性材

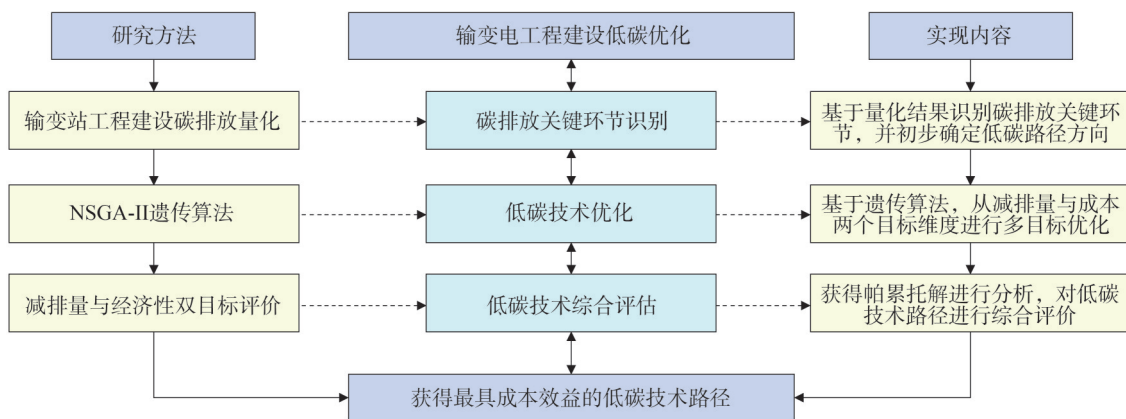


图2 输变电工程建设低碳优化思路

Fig.2 Low-carbon optimization ideas for power transmission and transformation project construction

料、钢材类消耗性材料与能源消耗的碳排放分布特性如图3、图4所示,各类混凝土碳排放量累计可达5 285 t,其中最高的是C30-40混凝土的碳排放量达4 663 t,其次为C15-40混凝土。钢材类消耗性材料中,圆钢 $\Phi$ 10以外的碳排放量最高,为2 273 t;其次为 $\Phi$ 10以内的圆钢碳排放,为778 t;然后为铁件型钢、钢油算子与铁件钢筋,碳排放量分别为174 t、45 t与43 t。

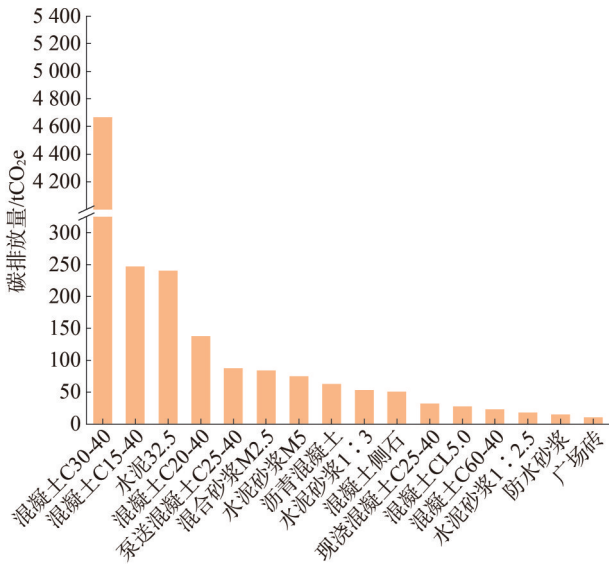


图3 主要水泥制品类材料碳排放分布

Fig.3 Carbon emission distribution of major cement-based materials

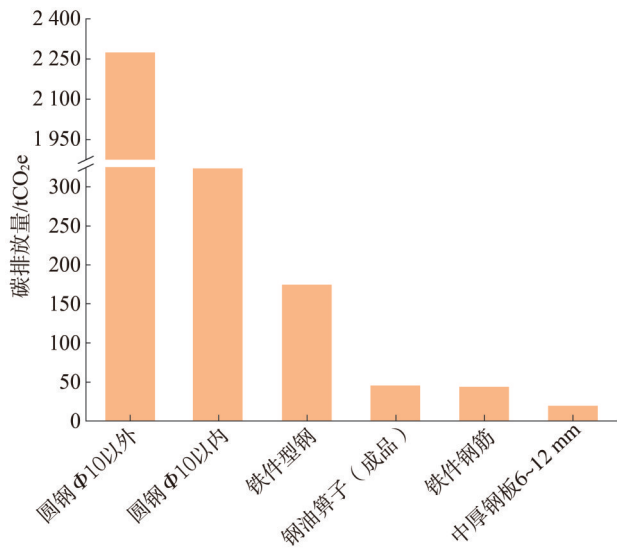


图4 主要钢材类材料的碳排放分布

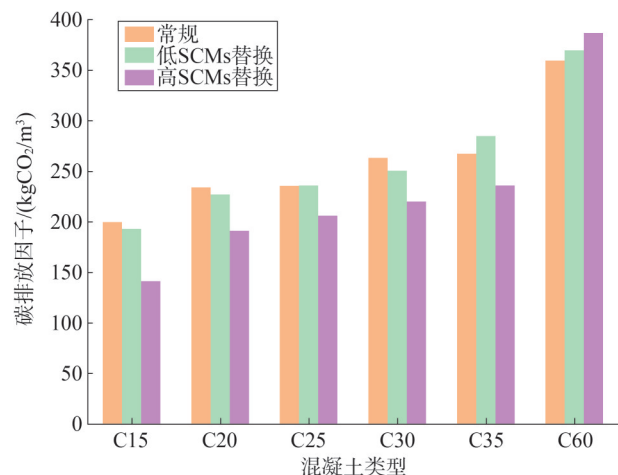
Fig.4 Carbon emission distribution of major steel materials

### 2.3 低碳技术路径构建

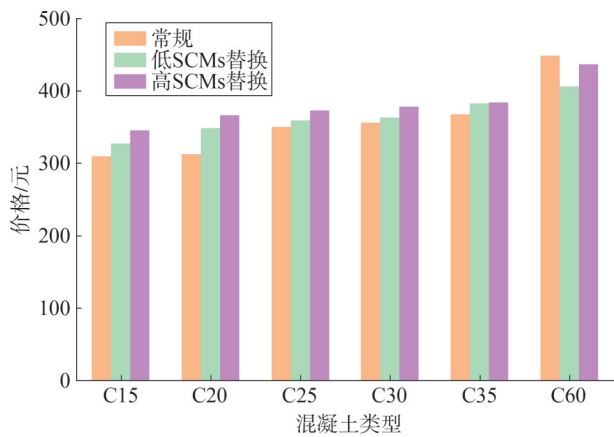
在材料低碳化方面,针对低碳混凝土制备,根据JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》,基于不同外加剂(分别为聚羧酸与Point-400S),分别采用飞灰与灰渣为辅助性凝胶材料(supplementary cementitious materials, SCMs)与标号42.5水泥<sup>[17]</sup>,配制不同SCMs含量的各类预拌混凝土材料<sup>[18]</sup>,本文对高含量SCMs混凝土、低含量SCMs混凝土与常规混凝土的碳排放因子及其各组分的碳排放特性进行量化分析,结果如图5所示。

对于标号C15—C35混凝土,SCMs含量越高,混凝土的碳排放因子越低。对于C60混凝土,由于常规C60混凝土使用标号62.5的水泥,而SCMs混凝土使用标号42.5水泥,此时混凝土中使用更多的凝胶材料,导致其碳排放因子高于常规混凝土。

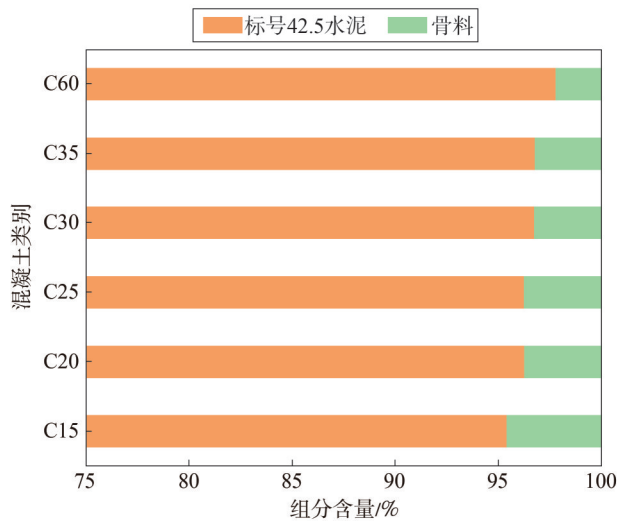
虽然将废弃混凝土加工成骨料与加工天然骨料的碳排放相似<sup>[19]</sup>,导致可再生骨料混凝土与天然骨料混凝土的碳排放因子水平相当<sup>[20]</sup>,但使用可再生骨料成本低于天然骨料<sup>[21-22]</sup>,在降低混凝土成本方面具有较好的优势。研究显示,可再生混凝土中可再生骨料的替换比例一般在30%~50%<sup>[23]</sup>。由于使用可再生骨料,混凝土的力学性能会降低,当可再生骨料替换率为20%时,混凝土的各项力学性能下降约10%<sup>[24]</sup>,需要在混凝土中增加一定比例的水泥,来补偿力学性能。基于上述分析,本文设定混凝土中的可再生骨料最高比例20%,同时将混凝土的水泥用量增加5%。



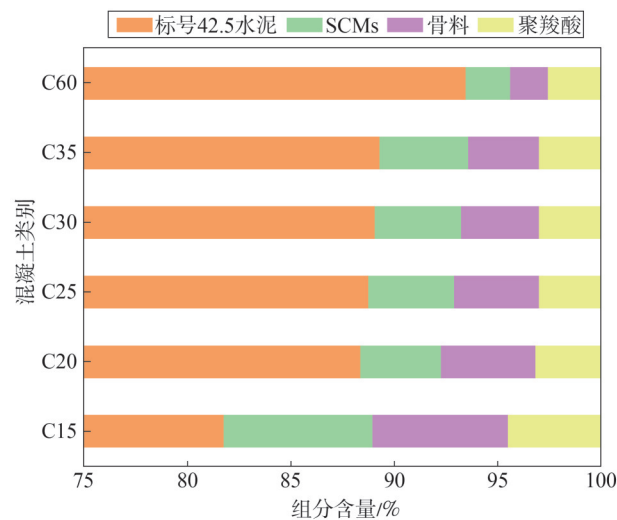
(a)不同规格混凝土碳排放因子



(b) 混凝土价格



(c) 单位常规混凝土



(d) 高SCMs混凝土

图5 混凝土及其组分碳排放因子分布特性

Fig.5 Distribution characteristics of carbon emission factors for concrete and its components

针对低碳钢材,调研发现,当前短流程炼制的可再生钢铁碳排放因子较长流程常规钢铁低 $1.5 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}^{[25-26]}$ ,成本较长流程常规钢铁高 $150 \sim 200 \text{ 元/t}$ 。本文中可再生钢材类消耗性材料的碳排放因子较常规钢材类均下降 $1.5 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$ ,成本较常规钢铁增加 $150 \text{ 元/t}$ 。

在能源低碳化方面,使用可再生电力与可再生柴油对当前输变电工程建设典型场景下的常规化石电力与化石柴油进行替代,该措施虽然具有显著的减排效果,但是减排成本较常规电力与常规柴油,减排成本增加较为显著。

在布置集成化方面,通过将排水系统集成一体化,减少地下排水管道长度 $15\%$ 及 $80\%$ 井位,降低材料使用量。在部件预制化方面,对预制构件进行建筑信息模型(building information modeling, BIM)精细深化,依托智慧工程技术精准下料,可将材料损耗率降低 $18\%$ 。不同参数具体设置如表1所示。

表1 低碳优化技术措施

Table 1 Low-carbon optimization technical measures

优化方向	低碳技术措施	技术参数	成本
使用辅助性凝 胶材料	措施 1:使用低比例辅助性凝 胶(SCMs)混凝土	低比例辅助性凝 胶材料 (24% ~ 40%)	9 元/m <sup>3</sup>
	措施 2:使用高比例辅助性凝 胶材料(SCMs)混凝土	高比例辅助性凝 胶材料 (40% ~ 60%)	25 元/m <sup>3</sup>
可再生 骨料	措施 1:天然骨料替代 水平 1	可再生骨料替代 率 5%	-1.08 元/m <sup>3</sup>
	措施 2:天然骨料替代 水平 2	可再生骨料替代 率 10%	-7.58 元/m <sup>3</sup>
	措施 3:天然骨料替代 水平 3	可再生骨料替代 率 15%	-14.07 元/m <sup>3</sup>
	措施 4:天然骨料替代 水平 4	可再生骨料替代 率 20%	-20.57 元/m <sup>3</sup>
可再生 钢材	措施 1:钢材替代水平 1	可再生钢材占比 30%	45 元/t
	措施 2:钢材替代水平 2	可再生钢材占比 50%	75 元/t
	措施 3:钢材替代水平 3	可再生钢材占比 70%	105 元/t
	措施 4:钢材替代水平 4	可再生钢材占比 100%	150 元/t

表1 (续)

优化方向	低碳技术措施	技术参数	成本
排水系统集成一体化	措施 1:有	材料节省率 15%~80%	-1.37万元
	措施 2:无		~-1.48万元
部件预制化	措施 1:有	预制件材料损耗率下降 18%	-4.38万元
	措施 2:无		~-4.75万元
可再生能源	措施 1:有	替代率 100%	0.15 元/kWh
	措施 2:无		
可再生能源柴油	措施 1:有	替代率 100%	1.53 元/kg
	措施 2:无		

### 3 减排效果评估

#### 3.1 多目标寻优结果

基于上述参数设置,采用输变电工程建设碳排放量化模型与 NSGA-II,从减排效果与减排成本两个方面,对采用辅助性凝胶材料、可再生骨料、可再生钢材、可再生能源、布置一体化与构件预制化等措施的综合减排效果进行量化对比分析,获得成本

增量-碳排放帕累托散点图,如图 6 所示。对获得的解集进行非支配排序,根据其散点拥挤距离分析获得帕累托前沿,依据帕累托前沿分布特性,可得到 15 个帕累托最优解,即得到 15 项针对输变电工程建设的低碳优化路径方案,具体路径构成如表 2 所示。

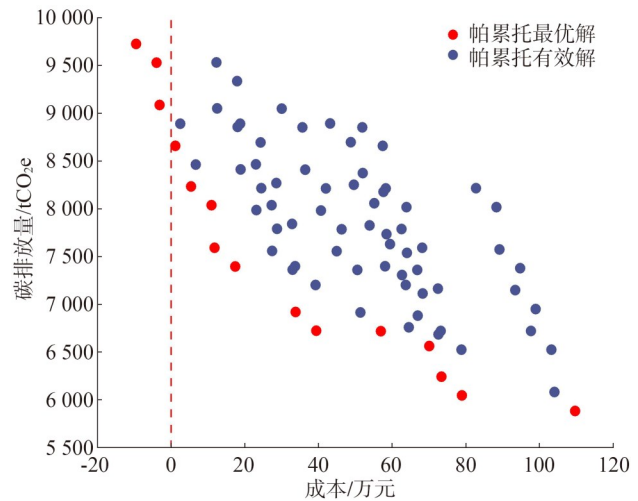


图6 成本增量-碳排放帕累托散点图

Fig.6 Cost increment-carbon emission Pareto scatter plot

表2 基于帕累托解集的低碳优化路径组合

Table 2 Low-carbon optimization path combinations based on Pareto solution set

方案	SCMs 替代类型	骨料替代率	可再生钢材替代率	可再生燃料	可再生能源	排水系统集成	部件预制化	总减排量/t	成本增量/万元
1	低比例替代	0.2	0	无	无	有	有	70.80	-9.56
2	低比例替代	0.2	0	有	无	有	有	266.68	-3.98
3	低比例替代	0.2	0.3	无	无	有	有	710.90	-3.16
4	低比例替代	0.2	0.5	无	无	有	有	1 137.64	1.11
5	低比例替代	0.2	0.7	无	无	有	有	1 564.38	5.37
6	低比例替代	0.2	0.7	有	无	有	有	1 760.25	10.95
7	低比例替代	0.2	1	无	无	有	有	2 204.48	11.77
8	低比例替代	0.2	1	有	无	有	有	2 400.36	17.35
9	高比例替代	0.2	1	无	无	有	有	2 878.39	33.79
10	高比例替代	0.2	1	有	无	有	有	3 074.27	39.37
11	低比例替代	0.2	1	有	有	有	有	3 077.92	56.92
12	高比例替代	0	1	有	无	有	有	3 233.83	70.08
13	高比例替代	0.2	1	无	有	有	有	3 555.95	73.36
14	高比例替代	0.2	1	有	有	有	有	3 751.83	78.94
15	高比例替代	0	1	有	有	有	有	3 913.07	109.65

### 3.2 减排水平与经济性评估

各方案的碳减排量如图 7 所示,方案 15 的减排量最高,达 3 913.07 t,该路径下的技术组合包括:使用高比例 SCMs 替代、不采用可再生骨料替代天然骨料、可再生钢材替代率 100%、使用可再生燃料与电力、采纳排水系统集成一体化与部件预制化等措施。在所有 15 项方案中,减排水平的范围为 70.80~3 913.07 t,减排率最高可达 39.95%,减排效果显著。

方案 15 的减排成本最高,达 109.65 万元,单位减排成本为 280.22 元/t。15 个减排方案的单位成本范围为-1 350.74~280.22 元/t,其中方案 1、方案 2、方案 3 均为负成本减排,即通过采用方案 1、方案 2 与方案 3 中的低碳措施在实现碳减排时,还能节约成本,具有一定的经济效益,其余减排方案均会产生成本增加,方案 15 成本最高,达到 280.22 元/t。在增加的单位成本中,方案 4 的减排成本最低,是最具成本效益的减排路径。

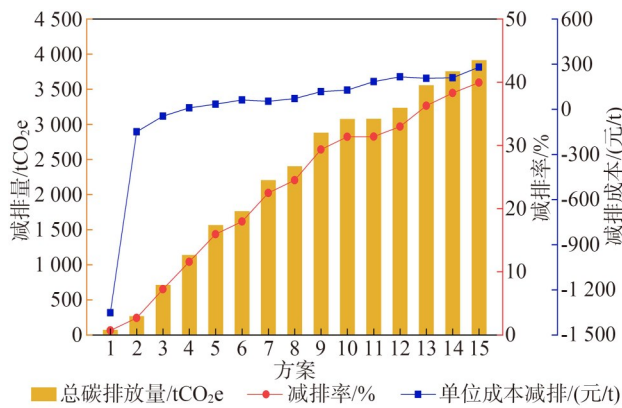


图 7 不同方案减碳效果

Fig.7 Carbon reduction effects of different schemes

### 3.3 低碳路径综合评价

基于上述减排效果与减排经济性分析,根据不同场景下减排偏好需求,可将上述 15 项最优减排路径归纳为 3 种技术路径,供输变电工程建设过程不同低碳优化目标进行选择,具体如表 3 所示。最佳经济效益减排路径(方案 1)的减排率为 0.72%,减排效果较弱,但该路径具有较好的经济收益,可实现负成本减排,应在所有减排路径中优先实施。最具成本效益减排路径(方案 4)的减排率为 11.61%,减排成本为 9.71 元/t,可以在较低的成本代价下获得较高的碳减排效果,为输变电工程建设提供了低成本减排机会。为实现更高水平的减排,可以采用最大减排效果路径(方案 15),该路径的减排率可达 39.95%,可实现深度减排,但该路径减排成本也极高,达到 280.22 元/t。

## 4 结论

本文通过采用基于 GHGP 标准的输变电工程建设量化模型与 NSGA-II,对输变电工程建设低碳措施优化路径进行构建,并对其减排效果与减排成本进行了综合评估,为输变电工程建设低碳实施提供参考,结论如下:

1) 提出了一种输变电工程建设低碳优化方法,以此为基础构建输变电工程建设低碳优化路径,并对其进行综合评价,获得了 15 条最优低碳优化路径。

2) 输变电工程建设低碳技术路径碳减排率为 0.72%~39.95%,减排潜力巨大,减排增量成本为-1 350.74~280.22 元/t,存在负成本减排机会,该结果可为兼顾减排量与减排成本的输变电工程建设多目标优化提供有力指导与支撑。

表 3 输变电工程建设不同低碳优化目标路径

Table 3 Different low-carbon optimization target paths for power transmission and transformation project construction

类型	方案	路径构成	减排率/%	减排成本/(元/t)
最大减排效果路径	15	高比例 SCMs 替代;无可再生骨料替代;100% 可再生钢材替代率;可再生燃料替代;可再生电力;排水系统集成一体化;部件预制化	39.95	280.22
最具成本效益减排路径	4	低比例 SCMs 替代;20% 可再生骨料替代;50% 可再生钢材替代率;无可再生燃料替代;无可再生电力;排水系统集成一体化;部件预制化	11.61	9.71
最佳经济效益减排路径	1	低比例 SCMs 替代;20% 可再生骨料替代;无可再生钢材替代率;无可再生燃料替代;无可再生电力;排水系统集成一体化;部件预制化	0.72	-1 350.74

3)本文总结出了3种偏向性的输变电工程建设低碳路径,分别为最大减排效果路径、最具成本效益减排路径、最具经济效益减排路径,可实现不同减排目标场景的需求。

## 参考文献

- [1] 杨金慧.基于低碳理念的公路工程建设关键技术研究[J].运输经理世界,2021(30):22-24.  
YANG Jinhui. Research on key technologies of highway engineering construction based on low-carbon concept [J]. Transport Business China, 2021(30): 22-24.
- [2] 包含,王耿,晏长根,等.公路建设碳排放核算与岩土工程低碳措施及碳补偿研究综述[J].中国公路学报,2025,38(1):46-72.  
BAO Han, WANG Geng, YAN Changgen, et al. Highway construction carbon emission assessment and low-carbon measures and carbon compensation for geotechnical engineering: a review [J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(1): 46-72.
- [3] 龙伟,苟珈源,熊模友.高速公路建设期低碳实施路径研究[J].价值工程,2024,43(30):32-34.  
LONG Wei, GOU Jiayuan, XIONG Moyou. Research on the low-carbon implementation path during the construction period of highways [J]. Value Engineering, 2024, 43(30): 32-34.
- [4] 张金喜,苏词,王超,等.道路基础设施建设中的节能减排问题及技术综述[J].北京工业大学学报,2022,48(3):243-260.  
ZHANG Jinxi, SU Ci, WANG Chao, et al. Review of energy-saving and emission-reduction issues and technologies in the construction of road infrastructure [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(3): 243-260.
- [5] 陈飞,翁辉,高硕晗,等.隧道工程建设碳排放特征与减碳潜力分析[J].公路工程,2024,49(3):186-194.  
CHEN Fei, WENG Hui, GAO Shuohan, et al. Research on carbon emission characteristics and reduction potentials of tunnel construction [J]. Highway Engineering, 2024, 49(3): 186-194.
- [6] 钱思祺,秦安华,蔺阿琳.园林工程建设阶段碳排放量化及减碳策略研究——以北塘河公园为例[J].建设科技,2022(20):47-50.  
QIAN Siqi, QIN Anhua, LIN Alin. Research on carbon emission quantification and carbon reduction strategy in the construction stage of landscape engineering—taking Beitang riverside park as an example [J]. Construction Science and Technology, 2022(20): 47-50.
- [7] 仇放.油气田地面工程建设设备安装碳排放优化控制[J].石油工程建设,2022,48(5):59-66.  
QIU Fang. Optimal control of carbon emissions for equipment installation in oil and gas field construction [J]. Petroleum Engineering Construction, 2022, 48(5): 59-66.
- [8] 朱继忠,谢楚楚,张迪,等.电碳耦合市场研究综述:现状、挑战与可持续发展[J].电力建设,2025,46(1):158-173.  
ZHU Jizhong, XIE Chuchu, ZHANG Di, et al. Review of electric-carbon coupling market studies: status, challenges, and sustainability perspectives [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(1): 158-173.
- [9] 郭婷婷,曹蕃.低碳能源系统发展趋势与应用实践[J].分布式能源,2025,10(1):1-13.  
GUO Tingting, CAO Fan. Development Trend and Application of low-carbon energy system [J]. Distributed Energy Resources, 2025, 10(1): 1-13.
- [10] 张柏杨,刘佳颖,朱睿博,等.中国碳减排成本测算、成效评估与路径优化[J].金融发展评论,2023(11):30-46.  
ZHANG Baiyang, LIU Jiaying, ZHU Ruibo, et al. Cost estimation, effectiveness evaluation and path optimization of carbon emission reduction in China [J]. Financial Development Review, 2023(11): 30-46.
- [11] 张峰,姜继双,李超,等.基于GHGP标准体系的输变电工程建设碳排放量化分析[J].中国电力,2025,58(4):205-215.  
ZHANG Feng, JIANG Jishuang, LI Chao, et al. Quantitative analysis of carbon emission from power transmission and transformation projects based on GHGP standard system [J]. Electric Power, 2025, 58(4): 205-215.
- [12] 雷宇立,周承君,幸爱玲,等.基于改进遗传算法的交直流混联电网的无功优化方法[J].山东电力技术,2025,52(1):28-37.  
LEI Yuli, ZHOU Chengjun, XING Ailing, et al. Reactive power optimization method for AC/DC hybrid power grids based on improved genetic algorithms [J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(1): 28-37.
- [13] 黄洽翰,汪晗,李启迪,等.基于改进遗传算法的主动配电网经济优化调度[J].山东电力技术,2021,48(10):12-16.  
HUANG Zhihan, WANG Han, LI Qidi, et al. Economic optimal dispatch of active distribution network based on improved genetic algorithm [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(10): 12-16.
- [14] 林光育.低碳目标下遗传算法的多目标节能减排研究[J].电力设备管理,2024(17):252-254.  
LIN Guangyu. Research on multi-objective energy conservation and emission reduction based on genetic algorithm under low-carbon target [J]. Electric Power Equipment Management, 2024(17): 252-254.
- [15] 卜康正,赵勇,郑先昌.基于NSGA2遗传算法的地铁隧道上方基坑工程优化设计[J].铁道科学与工程学报,2021,18(2):459-467.  
BU Kangzheng, ZHAO Yong, ZHENG Xianchang. Optimization design for foundation pit above metro tunnel based on NSGA2 genetic algorithm [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(2): 459-467.
- [16] 余志刚,孙仁发,刘洋,等.基于响应面法和遗传算法的混凝土

- 配合比多目标优化设计[J/OL]. 建筑材料学报, 2025: 1-15. (2025-06-10). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JZCX2025060900P&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- YU Zhigang, SUN Renfa, LIU Yang, et al. Multi-objective optimization design of concrete mix proportion based on response surface method and genetic algorithm[J/OL]. Journal of Building Materials, 2025: 1-15. (2025-06-10). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=JZCX2025060900P&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [17] RHAOUTI Y, TAHA Y, BENZAAZOUA M. Assessment of the environmental performance of blended cements from a life cycle perspective: a systematic review [J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 36: 32-48.
- [18] 住房和城乡建设部科技与产业化发展中心, 中国建材检验认证集团股份有限公司. 碳足迹与绿色建材[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [19] VISINTIN P, DADD L, ALAM M U, et al. Flexural performance and life-cycle assessment of multi-generation recycled aggregate concrete beams [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 360: 132214.
- [20] DING T, XIAO J Z, TAM V W Y. A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregate concrete utilization in China[J]. Waste Management, 2016, 56: 367-375.
- [21] WANG B, YAN L B, FU Q N, et al. A comprehensive review on recycled aggregate and recycled aggregate concrete[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 171: 105565.
- [22] HASHEMINEZHAD A, KING D, CEYLAN H, et al. Comparative life cycle assessment of natural and recycled aggregate concrete: a review[J]. Science of The Total Environment, 2024, 950: 175310.
- [23] XING W Q, TAM V W, LE K N, et al. Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: a critical review [J]. Construction and Building Materials, 2022, 317: 125950.
- [24] BAMPANIS I, VASILATOS C. Recycling concrete to aggregates. implications on CO<sub>2</sub> footprint [J]. Materials Proceedings, 2023, 15(1): 28.
- [25] HAO H, WU H L, WEI F F, et al. Scrap steel recycling: a carbon emission reduction index for China [J]. Sustainability, 2024, 16(10): 4250.
- [26] 王云杉. 短流程炼钢, 节能降碳潜力大[N]. 人民日报, 2024-08-07(17).

收稿日期: 2025-06-19

修回日期: 2025-07-17

作者简介:

张 峰(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输变电工程绿色建造研究;

方靖宇(1980), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输变电工程绿色建造研究;

李 超(1984), 通信作者(lichaozjuer@zju.edu.cn), 男, 博士, 专职研究员, 从事碳排放管理与低碳路径研究;

方梦祥(1965), 男, 博士, 教授, 从事低碳技术与开发;

陈 晶(1987), 女, 高级工程师, 从事输变电工程绿色建造研究。

(责任编辑 车永强)

# 基于改进灰狼算法的海上风电场运维方案优化

蒋习庆\*, 王冰, 陈玉全, 张劲峰

( 河海大学人工智能与自动化学院, 江苏 常州 213251)

**摘要:** 由于海上风电高昂的运维成本, 设计合理的运维方案对保障海上风电的经济效益、提高发电量稳定性具有重要意义。本文结合海上风电巡检维护、预防性维护和事后维护策略, 考虑短时间尺度的多机组维护需求, 组成当日待维护机组计划集合; 并根据运维资源配置的不同, 设计了串行维护和并行维护两种维护方式, 以运维成本最低为优化目标构建了海上风电运维方案优化模型; 然后采用混合策略的改进灰狼算法(improved grey wolf optimizer, IGWO)进行运维方案的优化。结果表明, 在串行维护和并行维护方案优化中, 相较于遗传算法等传统算法, IGWO均具有更快的收敛速度和更强的寻优能力, 验证了所提算法在不同优化问题中的适用性和经济性, 同时表明并行方案相比于串行方案更具降成本潜力, 但对运维资源的要求更高。

**关键词:** 海上风电; 维护方案; 改进灰狼算法; 串行维护; 并行维护

中图分类号: TP18; TM315

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2026)03-0036-11

## Maintenance Route Optimization for Offshore Wind Farms Using an Improved Grey Wolf Optimization Algorithm

JIANG Xiqing\*, WANG Bing, CHEN Yuquan, ZHANG Jinfeng

(College of Artificial Intelligence and Automation, Hohai University, Changzhou 213251, China)

**Abstract:** The high operational and maintenance (O&M) costs of offshore wind farms necessitate the implementation of cost-effective strategies to ensure economic viability and stable power output. This paper addresses daily maintenance scheduling by integrating inspection, preventive, and corrective strategies. Two execution modes—serial and parallel maintenance—are proposed based on limited resource allocation. A cost-minimization optimization model is established, and an improved grey wolf optimizer (IGWO) with hybrid strategies is developed for efficient problem-solving. Simulations show that IGWO outperforms conventional algorithms, such as the Genetic Algorithm, in terms of convergence speed and optimization capability under both modes. Additionally, the parallel strategy exhibits greater cost-saving potential compared to the serial approach, although it requires more resources. These results validate the effectiveness and adaptability of IGWO in addressing complex O&M scheduling problems.

**Keywords:** offshore wind power; maintenance strategy; improved grey wolf optimizer (IGWO); serial maintenance; parallel maintenance

## 0 引言

全球风电总装机容量已超 906 GW<sup>[1]</sup>, 2024 年环比增长 16%<sup>[2]</sup>。尽管海上风电有风速较高、风能资源丰富等诸多优势<sup>[3]</sup>, 但其利润低于陆地风电项目。因此应用数字化等手段是提升海上风机故障处理效率、降低运维成本的必经之路<sup>[4]</sup>。

当前运维策略主要包含巡检维护、事后维护、预

防性维护和机会维护<sup>[5-6]</sup>。事后维护主要是由海浪、雷击等不可预见因素导致, 故障发生后先进行远程重启, 重启不成功需要进行现场原因确认; 预防性维护主要针对达到维护阈值的机组部件, 单个机组维护时间基于小修、大修持续数小时至数天; 机会维护往往借助预防性维护和事后维护时机执行; 而巡检维护主要依赖维护计划, 维护频率最高, 维护机组数目多。

同时, 海上风电的运维优化涉及维护策略优化、运维路径规划、优化方法应用等多个层次, 是一个复杂的问题。谢鲁冰等<sup>[7]</sup>通过设计机组维护任务的分

基金项目: 国家自然科学基金(62303158)。

National Natural Science Foundation of China(62303158)。

组策略,实现了海上风电机组维护策略的优化。董文康等<sup>[8]</sup>考虑机组维护状态与维护备件库存的联系,应用深度强化学习方法实现了机组状态与备件库的联合优化。文献[9-10]根据风电机组不同运行状态,分别设计了状态自适应和非完美维修决策。文献[11-13]考虑机组信息的动态特性设计了机组维护方案的动态优化策略。文献[14-15]考虑海上风电运维的天气因素对运维的影响分别进行了海上风电运维经济效益模型的构建和维护策略的研究。同时文献[16]综合考虑海上风电运维的环境因素并进行环境分类,在此基础上结合机组部件维护阈值和预测部件剩余寿命确定维护时刻,设计了机组动态预防性维护策略。以上研究都是针对维护前海上风电维护策略和数学模型的设计与优化,而没有涉及实际工程中船只维护任务执行的具体方案。郭慧东等<sup>[17]</sup>考虑运维中的各项成本进行了海上风电机组维护的日期排程与路径规划,但是其主要针对维修耗时长的部件进行维护。张君乾等<sup>[18]</sup>和王永等<sup>[19]</sup>考虑机会维护引入了时间窗概念。基于机组可靠度模型,文献[20-21]考虑预防性维护中机组部件的最佳维护时间窗,并采用智能算法进行了运维船只的路径规划。冯立杰等<sup>[22]</sup>着眼于运维船型的组合设计了结合维护策略与船型的海上风电多目标运维方案优化。

综上,目前海上风电运维方案的研究主要存在以下问题:1)更多研究关注的是上层的维护策略优化,而针对运维船只路径规划的研究较少;2)对于维护路径规划的研究,大多关注的是长时间尺度的预防性维护且机组维护数目少,而针对维护耗时少、维护数目多的巡检、预防性小修和故障现场确认研究较少;3)虽然遗传算法等优化算法已经应用到求解海上风电运维路径规划中<sup>[23-24]</sup>,但由于海上环境限制导致优化问题复杂度高,优化算法的性能仍需要进一步提升。

因此,本文首先关注海上风电远程监控系统中达到预防性小修阈值的告警机组部件以及需要现场确认故障原因的故障机组,再结合计划内巡检机组共同组成当日待维护机组集合,并考虑维护船只和维护人员资源,建立了串行维护和并行维护模型;然后,为设计具有更高性能的优化算法以求解两种模型,本文基于灰狼算法(grey wolf optimization, GWO)

引入了混沌初始化以提高初始种群多样性、加快收敛速度;接着,采用自适应概率选择机制对GWO中头狼采取自适应强度的混合扰动位置更新策略,同时创新性地引入分段非线性收敛因子以提高算法兼具全局和局部的寻优能力。本研究对于提高海上风电场经济效益、提高运维策略可行性具有一定的理论价值和参考意义。

## 1 问题描述

考虑海上风电巡检、预防性小修和故障现场确认维护方案的规划,可以归结成一个物流配送优化调度问题(vehicle routing problem, VRP)<sup>[25]</sup>。基础的VRP将岸上港口作为配送中心,机组作为顾客,维修任务可描述为对待维修机组,在满足船只载重、人员、工作时长等约束条件下,确定适当的船只数量和行驶路线,使其从港口出发有序完成维护任务,然后返回港口,最终使得成本最低。依据维护人员组数 $p$ 和运维船只数目 $m$ ,本文提出以下两种维护策略。

如图1(a)所示,当 $p \leq m$ 时采用串行维护策略,各台机组的维护任务依次执行,其特点是上一个机组维护完成后才能去往下一个机组开展维护,DP表示维护过程需要船只等待。

如图1(b)所示,当 $p > m$ 时采用并行维护策略,其特点是先将维护人员依次运送至待维护机组而无需等待维护完成,直至送至最后一个机组并在此处等待,使得各个机组能够在同一时间段并行维护,待维修完成后按原路径将维护人员接回。D表示将维护人员和设备运至机组后驶离,P表示将维护人员和设备搭载至船只。

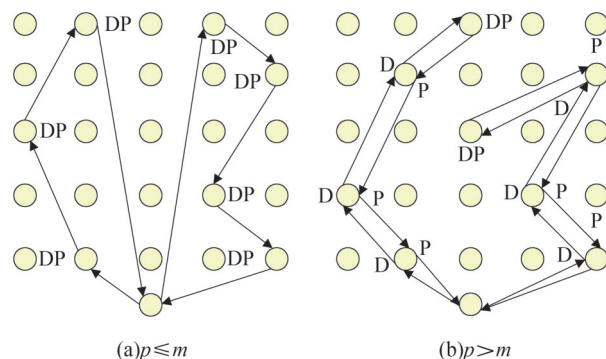


图1 维护策略示意图

Fig.1 Schematic diagram of maintenance strategies

## 2 海上风电场维护路径优化模型

### 2.1 基本假设

考虑预防性小修、巡检和故障现场确认的机组维护需求耗时较短,所需备件重量小,为简化模型,进行以下假设:

- 1) 运维船只类型、航行速度相同,且满足设备承载要求,不限制航行距离。
- 2) 维护过程中默认风速和浪高满足出航条件,不考虑突发状况。
- 3) 每台机组每次仅有一项维护任务。

### 2.2 串行维修数学模型

机组维护的设备费用取决于维护计划的制定,本文假设维护计划已确定,则机组所需备件固定,停机时间也可视为确定,故设备费用与停机损失不变,优化模型中仅考虑了可变成本,包括维护人员工资、船只租赁费用、路径交通费用。

#### 1) 目标函数。

$$\min z = \sum_{i \in Z_0} \sum_{j \in Z_0} \sum_{k \in K} (C_0 p_k t_{1,k} + C_1 t_{2,k} + C_2 g_{ij} x_{ij,k}) \quad (1)$$

式中: $z$ 为运维总成本; $C_0$ 为单位时间维护人员工资,按小时计; $p_k$ 为船只 $k$ 从港口出发时所携带维护人员的组数; $t_{1,k}$ 为船只 $k$ 所携带维护人员的工作时长; $C_1$ 为船只 $k$ 单位时间租赁费用,按小时计; $t_{2,k}$ 为船只 $k$ 的工作时长; $C_2$ 为单位距离船只运输成本; $g_{ij}$ 为机组 $i$ 至机组 $j$ 的距离; $x_{ij,k}$ 为0/1变量,当船只 $k$ 从机组 $i$ 行驶至机组 $j$ 时, $x_{ij,k} = 1$ ,其他情况则 $x_{ij,k} = 0$ ;  $Z_0$ 为待维护机组集合; $K$ 为所用船只集合。

#### 2) 约束条件。

$$N_K \leq m \quad (2)$$

$$(t_{i,k} + T_i + t_{ij} - t_{j,k}) x_{ij,k} \leq 0, i, j \in Z_0; k \in K \quad (3)$$

$$t_{i0,k} \leq T_{\max}, i \in Z_0, k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i,j \in Z_0} \sum_{k \in K} x_{ij,k} = 1 \quad (5)$$

$$\sum_{j \in Z_0} x_{0j,k} = 1, k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in Z_0} x_{i0,k} = 1 \quad (7)$$

式中: $N_K$ 为所用船只集合 $K$ 中船只的数目; $t_{i,k}$ 为船只 $k$ 到达机组 $i$ 的时间; $T_i$ 为机组 $i$ 的维护耗时; $t_{ij}$ 为

从机组 $i$ 行驶至机组 $j$ 的时间; $t_{j,k}$ 为船只 $k$ 到达机组 $j$ 的时间; $t_{i0,k}$ 为船只 $k$ 对机组 $i$ 完成维护后返回港口的时间; $T_{\max}$ 为船只每天最长工作时长。因此,式(2)表示船只最大使用数目约束;式(3)表示机组维护时序约束;式(4)表示船只日工作时间约束;式(5)表示每台机组每天仅由一艘船只提供维护;式(6)、式(7)表示船只每天从港口出发,完成任务后再返回港口。

### 2.3 并行维修数学模型

本文设计的并行维护策略在优化模型中复杂度远高于串行维护,主要体现在以下两点。

1) 运维船只需要回到之前服务过的风电机组接回维护人员和设备,使得问题扩展为需要交付和提取的具有时间窗以及承载量限制的VRP问题。

2) 传统的考虑交付和提取的VRP问题是交付和提取同时进行,基于风电运维实际情况,需要将传统的考虑交付和提取的VRP问题改进为考虑先交付后提取的VRP问题;同时交付阶段维护不耗时,但由于各节点维护时间不同,提取阶段需要船只在未完成维护机组处等待。即每艘船只需要先将所有维护人员送至机组,然后原路返回将已完成维护的维护人员接回。因此,需要基于串行维护模型增加以下约束条件。

$$\sum_{i \in Z^-} x_{0i,k} = 1, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in Z^+} x_{i0,k} = 1, k \in K \quad (9)$$

$$0 \leq \sum_{k_1 \in K} p_{k_1} n_p = \sum_{k_2 \in K} p_{k_2} n_p \leq P_{\max} \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i,j \in Z^-} x_{ij,k} = \sum_{k \in K} \sum_{i,j \in Z^+} x_{ij,k} \quad (11)$$

$$t_{(n+i),k} - t_{i,k} \geq T_i, i \in Z^-, k \in K \quad (12)$$

式中: $Z^-$ 为用于交付的机组节点集合,定义为 $\{1, 2, \dots, n\}$ ,  $n$ 为待维护机组数量; $Z^+$ 为用于提取的机组节点集合,定义为 $\{n+1, n+2, \dots, 2n\}$ ,与交付机组节点为同一批且一一对应; $p_{k_1}$ 为船只 $k_1$ 离开港口时所携带维护人员的组数; $p_{k_2}$ 为船只 $k_2$ 返回港口时所携带维护人员的组数; $n_p$ 为每组维护人员数量; $P_{\max}$ 为最多维护人员组数; $t_{i,k}$ 为船只 $k$ 离开机组 $i$ 的时间。因此,式(8)、式(9)表示所有船只都从港口出发到达待维护机组,最后从已完成维护的机组返回港口;式(10)表示船只出发时的维护人员数等于返回港口的维护人员数,且不大于船只最多搭载维护

人员数;式(11)表示针对 $Z^+$ 的风电机组,船只将返回之前维护过的风电机组接回维护人员和设备;式(12)表示船只必须等待维护人员对机组 $i$ 的维护工作完成后,再将其与维护设备接回。

### 3 基于混沌初始化和混合自适应扰动的改进灰狼算法

GWO是S.Mirjalili提出的模拟灰狼狩猎行为的群智能优化算法<sup>[26]</sup>,其结构简单、参数量少,但是具有易陷入局部最优和收敛速度慢的缺陷。在包围猎物阶段,灰狼按照式(13)所示包围方式不断靠近猎物。

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (13)$$

式中: $D$ 为灰狼与猎物间的距离; $X_p(t)$ 为第 $t$ 次迭代时猎物的位置; $X(t)$ 为第 $t$ 次迭代时灰狼个体位置; $C$ 为系数。

$$C = 2r_2 \quad (14)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (15)$$

$$A = 2ar_1 - a \quad (16)$$

$$a = 2 - 2 \cdot \frac{t}{T} \quad (17)$$

式中: $r_1, r_2$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数; $A$ 为系数; $a$ 为收敛因子,随着迭代次数增加,从2线性递减到0; $T$ 为最大迭代次数。

在围捕猎物阶段,根据距离猎物最近的头狼 $\alpha, \beta, \delta$ 的位置,按照式(18)和式(19)所示围捕方式来更新其余狼的位置。

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_\alpha \cdot X_\alpha(t) - X(t)| \\ D_\beta = |C_\beta \cdot X_\beta(t) - X(t)| \\ D_\delta = |C_\delta \cdot X_\delta(t) - X(t)| \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} X_1(t+1) = X_\alpha(t) - A_\alpha \cdot D_\alpha \\ X_2(t+1) = X_\beta(t) - A_\beta \cdot D_\beta \\ X_3(t+1) = X_\delta(t) - A_\delta \cdot D_\delta \end{cases} \quad (19)$$

$$X_p(t+1) = \frac{X_1(t+1) + X_2(t+1) + X_3(t+1)}{3} \quad (20)$$

式中: $D_\alpha, D_\beta, D_\delta$ 分别为头狼 $\alpha, \beta, \delta$ 与猎物间的距离; $C_\alpha, C_\beta, C_\delta$ 分别为头狼 $\alpha, \beta, \delta$ 所对应的系数; $X_\alpha(t), X_\beta(t), X_\delta(t)$ 分别为头狼 $\alpha, \beta, \delta$ 第 $t$ 次迭代时的位置; $X_1(t+1), X_2(t+1), X_3(t+1)$ 分别为由头狼 $\alpha, \beta, \delta$ 引导的第 $t+1$ 次迭代时灰狼的位置; $A_\alpha, A_\beta, A_\delta$ 分别为头狼 $\alpha, \beta, \delta$ 所对应的

系数; $X_p(t+1)$ 为最终位置,由头狼 $\alpha, \beta, \delta$ 引导的三个位置加权平均得到。

本文提出的改进灰狼算法(improved grey wolf optimizer, IGWO)针对GWO的缺陷做了如下改进:1)引入整数编解码机制以使GWO适用于离散问题;2)引入Skew Tent映射的混沌初始化方法替代随机初始化,获得初始种群位置;3)引入分段非线性收敛因子 $a$ ,使得步长随时间自适应衰减,以实现算法初期偏重探索能力而后期偏重局部寻优能力;4)针对头狼 $\alpha, \beta, \delta$ 设计了自适应概率扰动调节机制,并融合了莱维飞行、差分进化策略对头狼位置进行扰动,同时扰动强度也随迭代次数自适应变化,以进一步提高算法跳出局部最优的能力。

#### 3.1 整数编解码方式

为使灰狼种群位置与解一一对应,采用整数编码。假设待维护机组数目为 $c$ ,运维船只数目为 $m$ ,则解的长度为 $c + m - 1$ 。令港口编码为1,待维护机组集合为 $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ ,运维船只集合为 $\{11, 12, 13\}$ ,则运维路径编解码方式如图2所示。

运维路径编码为一个包含机组编号和运维船只班次,且以运维船只班次结尾的序列;可将如图2所示序列解码为3条运维路径:11号船只维护2、3、4号机组,12号船只维护5、6、7号机组,13号船只维护8、9、10号机组。

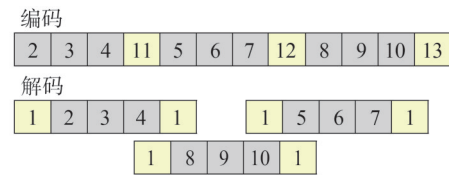


图2 路径编解码示意图

Fig.2 Schematic diagram of path encoding and decoding

#### 3.2 基于混沌映射的初始化种群

种群初始化效果极大影响算法收敛能力和求解效率,当种群初始位置取样小时,可能会导致算法性能过差;当取样过大时,甚至会导致寻优失败。混沌初始化是由数学规律控制的一类可以产生随机性和不可预测性时间序列的非线性动态系统,利用该特性替代随机初始化可以避免上述缺点。为使初始种群个体尽可能地利用解空间的信息,本文采用Skew

Tent 映射产生混沌序列进行种群初始化,其数学模型为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i/\varphi, & 0 < x_i \leq \varphi \\ x_{i+1} = (1-x_i)/(1-\varphi), & \varphi < x_i < 1 \end{cases} \quad (21)$$

式中: $x_i$ 为第 $t$ 次迭代的映射值; $\varphi$ 为偏斜参数。当 $\varphi \in (0,1)$ 且 $x_i \in [0,1]$ 时,式(21)所示系统处于混沌状态。

### 3.3 分段非线性收敛因子

GWO 中的收敛因子  $a$  随迭代次数增加而线性递减,但这种方式并不能很好地模拟狼群在狩猎过程中先包围猎物后围捕猎物的情形,这使得 GWO 的全局搜索和跳出局部最优的能力都受到了限制,因此本文采用分段非线性机制使算法收敛因子非线性衰减,以克服这一不足。

$$a(t) = \begin{cases} 2 - 1.5 \times \frac{t}{T}, & \frac{t}{T} < \phi \\ \left(1 - \frac{t}{T}\right)^{\frac{1}{2}}, & \frac{t}{T} \geq \phi \end{cases} \quad (22)$$

式中: $a(t)$ 为第 $t$ 次迭代时的收敛因子取值; $\phi$ 为收敛因子分段切换点,本文经过反复实验调优取0.3。通过该分段非线性收敛因子可控制算法搜索范围,使得算法前期快速探索、中期稳定收敛、后期细致寻优,提升全局搜索与局部开发的平衡性,改善收敛精度。

### 3.4 基于混合自适应扰动机制的位置更新方式

本文引入混合自适应扰动机制更新灰狼位置,以进一步改进 GWO 求解精度不足以及容易陷入局部最优的问题。

首先,GWO 的灰狼种群位置更新仅由头狼  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  引导,在搜索过程中,所有的灰狼个体都会朝向头狼靠拢,因此设计混合扰动策略对头狼进行位置更新,同时为避免扰动过于影响当前最优解,设计了自适应概率选择机制,每次仅对一只头狼进行扰动。头狼自适应扰动概率设计为

$$\begin{cases} P_\alpha(t) = \frac{1}{3} + \frac{1}{3} \cdot \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \\ P_\beta(t) = \frac{1}{3} \\ P_\delta(t) = 1 - P_\alpha(t) - P_\beta(t) \end{cases} \quad (23)$$

式中: $P_\alpha(t)$ 、 $P_\beta(t)$ 、 $P_\delta(t)$ 分别为头狼  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  第 $t$ 次迭代时的扰动概率。

混合扰动策略采用 Levy 飞行融合差分扰动的

方式。Levy 飞行是一种具有“重尾”特性的概率分布,具有大多数步长较小、偶尔出现极大的跳跃的特点,引入 Levy 飞行策略旨在提高算法随机搜索能力。本文 Levy 飞行策略形式为

$$\text{Levy}(\beta) = 0.01 \frac{u}{|v|^{1/\beta}} (X(t) - X_{\text{best}}) \quad (24)$$

式中: $\beta$ 为 Levy 飞行策略的形状参数,决定了长步长出现的概率,其值越小,长跳跃概率越大,结合相关文献并经过反复实验调优, $\beta$ 值取1.5; $X_{\text{best}}$ 为最优狼的位置; $u, v$ 为服从正态分布的随机变量, $u \sim N(0, \sigma_u^2)$ ,  $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ ;  $\sigma_u, \sigma_v$ 为正态分布的标准差。

$$\sigma_u = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \sin\left(\frac{\pi\beta}{2}\right)}{\beta \Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) 2^{\frac{\beta-1}{2}}} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (25)$$

$$\sigma_v = 1 \quad (26)$$

式中: $\Gamma$ 为 Gamma 函数。

此外,为进一步防止灰狼种群陷入局部最优,引入差分进化中的差分扰动策略。通过随机选择两个个体之间的差分变量,引导当前个体局部更新。

$$X(t+1) = X(t) + F \cdot (X_{r_1}(t) - X_{r_2}(t)) \quad (27)$$

式中: $F$ 为缩放因子,结合相关文献并经过反复实验调优,取1.0; $X_{r_1}(t), X_{r_2}(t)$ 为随机选取的两个第 $t$ 次迭代个体。该策略利用个体间的差异信息,有效促进种群在局部空间的探索,提升搜索精度。混合扰动的扰动强度设置为

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (28)$$

式中: $\epsilon(t)$ 为第 $t$ 次迭代时的扰动强度; $\epsilon_0$ 为扰动因子,经过调优取0.1。

综合上述混合自适应扰动机制,本文 IGWO 最终位置更新公式为

$$X_p(t+1) = \frac{X'_1 + X'_2 + X'_3}{3} \quad (29)$$

式中: $X'_1, X'_2, X'_3$ 为由头狼  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$  引导的结果,如式(30)式所示。

$$\begin{cases} X'_1 = X_1(t+1) + \epsilon(t+1) \cdot [\Delta_{\text{DE}} + \Delta_{\text{Levy}}] \\ X'_2 = X_2(t+1) + \epsilon(t+1) \cdot [\Delta_{\text{DE}} + \Delta_{\text{Levy}}] \\ X'_3 = X_3(t+1) + \epsilon(t+1) \cdot [\Delta_{\text{DE}} + \Delta_{\text{Levy}}] \\ \Delta_{\text{DE}} = F \cdot (X_{r_1}(t+1) - X_{r_2}(t+1)) \\ \Delta_{\text{Levy}} \sim \text{Levy}(\beta) \end{cases} \quad (30)$$

式中: $\Delta_{DE}$  为差分扰动项; $\Delta_{Levy}$  为 Levy 飞行扰动项。

$$\begin{cases} X_1(t+1) = X_\alpha(t) - A_\alpha \cdot D_\alpha \\ X_2(t+1) = X_\beta(t) - A_\beta \cdot D_\beta \\ X_3(t+1) = X_\delta(t) - A_\delta \cdot D_\delta \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_\alpha \cdot X_\alpha(t) - X(t)| \\ D_\beta = |C_\beta \cdot X_\beta(t) - X(t)| \\ D_\delta = |C_\delta \cdot X_\delta(t) - X(t)| \end{cases} \quad (32)$$

## 4 算例分析

### 4.1 参数设置

某海上风电场有 80 台风电机组,风电机组编号和布局如图 3 所示,记运维港口为 0,实心代表机组需要维护,空心则不需要。其中相邻两机组间横向距离为 1 km,纵向距离为 3 km,运维港口与风电场之间的直线距离为 30 km,单机容量为 3 MW。该风电场运维船只平均航速为 30 km/h,最大承载维护人员数为 18 人(6 组),船只单位时间租赁费用为 850 元/(只·h),船只航行成本为 100 元/km。维护人员单位时间工资为 75 元/(组·h),船只租赁时间和维护人员工作时间均计为船只从出海至船只返回港口的时间,日工作最大时长为 12 h,串行维护每艘船只仅载一组维护人员,并行维护每艘船只最多载 6 组维护人员。

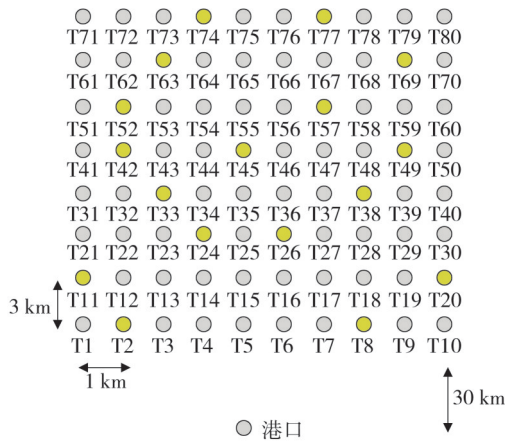


图3 海上风电场待维修机组分布图

Fig.3 Spatial distribution of offshore wind turbines scheduled for maintenance

参考国内外海上风电运维的文献,并根据对海上风电运维情况的调研,本算例机组维护需求及维

修耗时如表 1 所示。本文设置遗传算法(genetic algorithm, GA)、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)、GWO 与 IGWO 四种算法进行对比实验,其中种群数量设置为 100,迭代次数设置为 250,经过反复实验调优后其他参数如表 2 所示。

表 1 机组待维护计划

Table 1 Wind turbine maintenance plan

零部件	编号	维修方式	维修耗时/h
主轴	2	巡检	2
	23	清理碳粉	3
	49	加油注脂	1
	74	巡检	2
齿轮箱	20	添加齿轮油	4
	26	更换转子断路器	3
	42	调整油管接头	4
	57	添加齿轮油	3
	77	添加齿轮油	4
发电机	33	力矩维修	2
	45	故障现场确认	2
	52	发电机对中	3
液压	8	巡检	1
	11	故障现场确认	1
	38	电气维修	2
	63	巡检	1
	69	力矩维修	2

表 2 算法参数设置

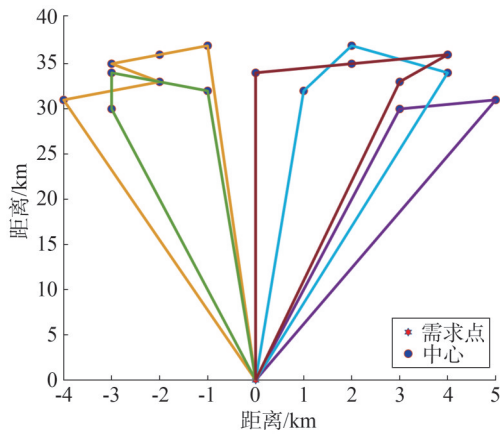
Table 2 Algorithm parameter settings

算法	参数 1	参数 2
GA	交叉概率 0.8	变异概率 0.01
PSO	惯性权重 0.8	个体学习因子 $c_1$ : 1.5
		个体学习因子 $c_2$ : 1.5

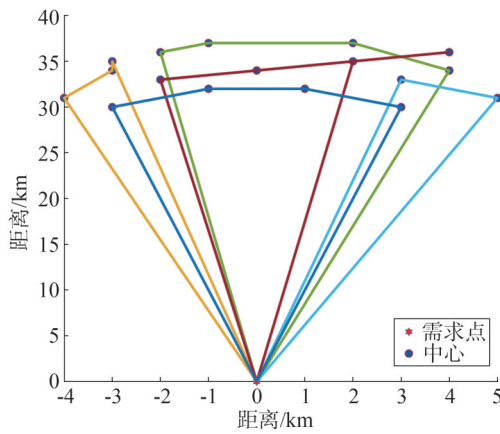
### 4.2 仿真结果分析

图 4 显示了串行维护方案下,四种算法求解出的运维方案。四种算法所求具体运维成本、船只返回港口时间以及船只行驶里程如表 3 所示。假设船只数量足够,四种算法均求得最优解为 5 条运维船只时,能够完成全部维护需求,并且满足每艘运维船

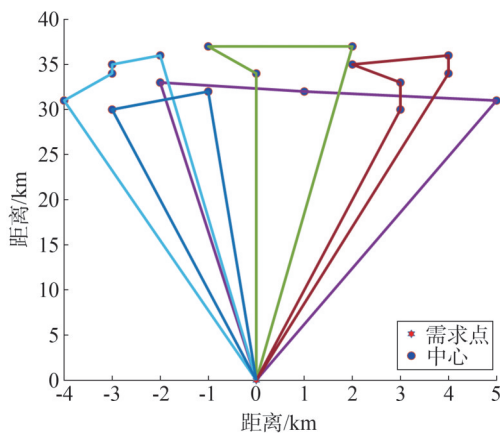
只返回港口时间均不超过每日最长工作时长。分析表3可见,四种算法的船只工作总时长和总行驶里程分别为:53 h、53.05 h、53.02 h、52.87 h和359.74 km、361.25 km、360.72 km、355.93 km,IGWO优化后运维方案具有更短的工作时长和更短的行驶里程;同时IGWO优化后方案在运维路径成本、船只租赁费用、维护人员工资方面都要优于其他三种算法。



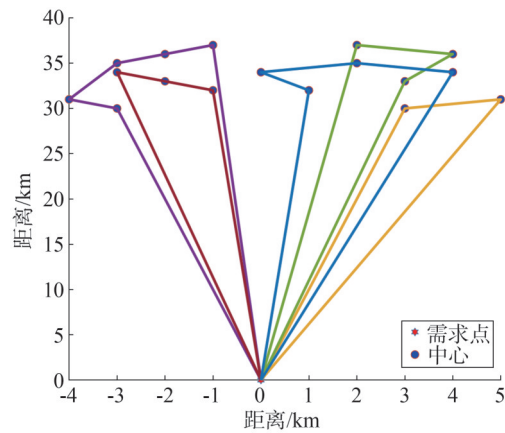
(a)GA优化最优路径



(b)PSO优化最优路径



(c)GWO优化最优路径



(d)IGWO优化最优路径

图4 各算法优化后路线图

Fig.4 Optimized routing diagrams of different algorithms

表3 串行方案下各算法优化结果

Table 3 Optimization results of different algorithms in the serial scheme

参数	GA	PSO	GWO	IGWO
路径成本/元	35 867	36 124	36 070	35 593
返回港口时间/h	11.54	10.35	11.39	11.40
	11.50	11.61	11.57	11.30
行驶里程/km	7.13	8.25	11.43	11.50
	11.49	11.57	11.46	11.54
	11.30	11.27	7.17	7.13
	76.16	70.55	71.75	71.96
	74.95	78.31	77.22	69.15
船只租赁费/元	63.79	67.37	72.89	74.97
	74.77	77.06	73.86	76.06
	69.00	67.96	65.00	63.79
人员工资/元	45 012	45 085	45 070	44 935
	3 972	3 978	3 977	3 965
运维总成本/元	84 851	85 187	85 117	84 493

图5显示了四种算法求解串行维护方案的算法迭代曲线。从图5可以看出,在处理串行维护优化问题时,本文所设计的IGWO在收敛速度、最优值方面对比其他三种算法均具有显著的优势,为海上风电的运维方案提供了更加经济可靠的方法保障。

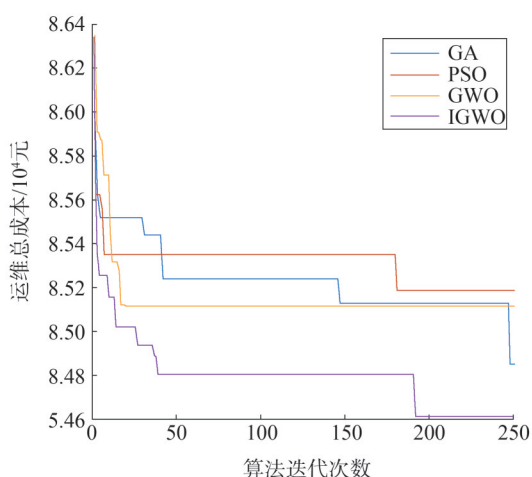
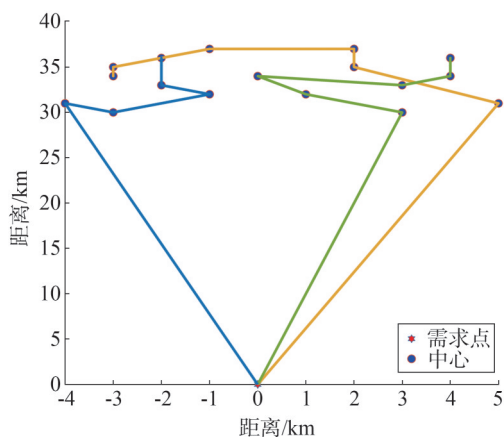


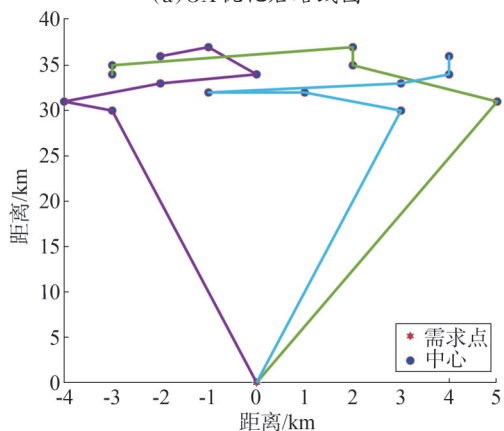
图5 串行方案下各算法迭代曲线

Fig.5 Iteration curves of different algorithms under the serial scheme

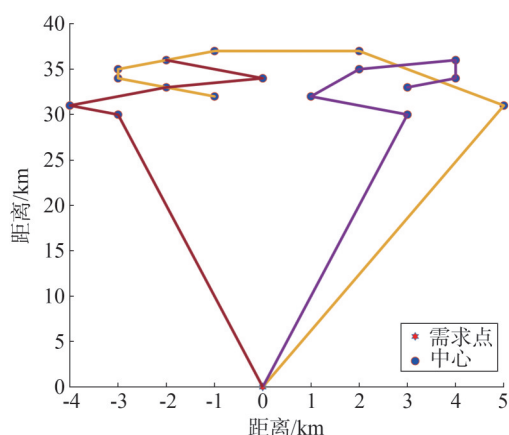
图6显示了本文设计的考虑并行维护的海上风电场运维方案示意图。表4具体显示了在并行维护策略下每条船只的运维成本、返回港口的时间以及行驶里程。首先,分析表4数据可见,并行维护相比于串行维护具有以下几方面的优点。



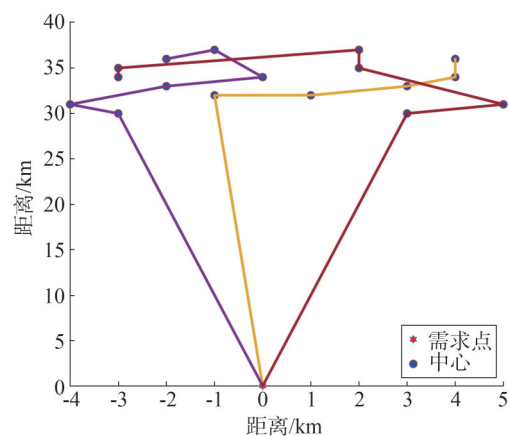
(a)GA 优化后路线图



(b)PSO 优化后路线图



(c)GWO 优化后路线图



(d)IGWO 优化后路线图

图6 并行方案各算法优化后路线图

Fig.6 Optimized routing diagrams of different algorithms in the parallel scheme

1)各个机组并行维护,使得总维护时间相较于串行维护大大缩减。相较于串行维护方案船只接近每日最大工作时长情况,并行维护船只返回港口时间削减至5~7 h。一方面,海上天气多变,长时间的运维天气时间窗口不易获得,缩短在海上的停留时间既可以增加运维效率,又对于运维计划的实际实现具有重要意义;另一方面,海上天气多变使得维护人员安全风险增加,缩短运维时间对于保障维护人员和设备的安全具有重要意义。

2)并行维护大幅度削减了运维时间,使得船只在满足承载量约束下能够在最大日工作时长内维护更多机组,因此相同维护需求下运维船只的使用数目从5艘减少到3艘,这大大降低了海上风电运维的配套资源要求;同时,以IGWO优化方案为例,船只租赁费用随之从44 935元降至14 914元,降幅达

66.81%。可见并行维护方案可以在减轻运维资源需求的同时,大幅降低运维成本、提高运维效率。

3)由于船只需求数目的减少,单次运维中船只在海上航行的总距离也随之缩短,分析数据可以得知,IGWO 优化后的并行维护路径成本相比串行维护路径成本降低了 28.83%。

表 4 并行方案下各算法优化结果

Table 4 Optimization results of different algorithms in the parallel scheme

参数	GA	PSO	GWO	IGWO
路径成本/元	25 387	25 701	25 803	25 328
	7.56	4.65	7.54	5.27
返回港口时间/h	5.20	7.56	5.41	4.65
	5.37	5.33	4.44	7.63
	90.46	82.41	95.53	79.33
行驶里程/km	83.58	89.57	83.58	82.41
	79.83	85.03	78.91	91.54
船只租赁费/元	15 406	14 913	14 783	14 914
人员工资/元	15 508	14 656	14 986	15 001
运维总成本/元	56 301	55 270	55 572	55 243

同时,由于并行维护多机组同时维护的特性,本算例维护需求下维护人员组数相对串行维护从 5 组上升至 17 组,对维护人员需求量也提出了更高的要求;IGWO 优化后方案中维护人员工资也由 3 965 元提高到 15 001 元,但并行维护运维总成本相较于串行维护降低了 34.62%,这意味着在运维配套资源充足的情况下,并行维护比串行维护更具经济效益。

图 7 显示了在并行维护方案下,四种算法的迭代曲线,可见 GWO 前期收敛能力差,后期跳出局部最优能力不足。但本文采用混沌初始化、引入分段非线性收敛因子并采用混合自适应机制的 IGWO 在解决上述收敛速度不足基础上,将 GWO 的全局寻优能力进一步增强,使得 IGWO 表现出了最快的迭代速度和最优的寻优能力。

### 4.3 消融实验

为进一步阐述本文混沌初始化、非线性收敛因子和混合自适应扰动机制对 IGWO 的影响,本文以

并行维护为例展开了消融对比实验,结果如图 8、表 5 所示。消融实验采用依次叠加的对比方式,可见混沌初始化方法主要提高算法的前期收敛性能,结合非线性控制因子前期增强全局搜索能力,后期侧重局部寻优能力,使得算法在加速迭代的同时取得了优于 GWO 的最优值,而混合扰动策略的加入进一步提升了算法迭代速度和跳出局部最优的性能,由此可验证各改进策略的有效性和 IGWO 的优越性。

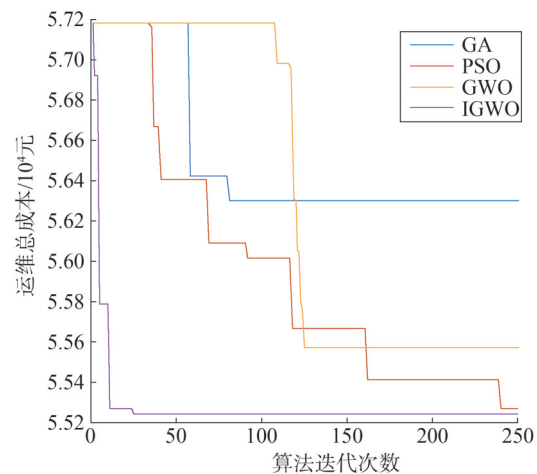


图 7 并行方案下各算法迭代曲线

Fig.7 Iteration curves of different algorithms in the parallel scheme

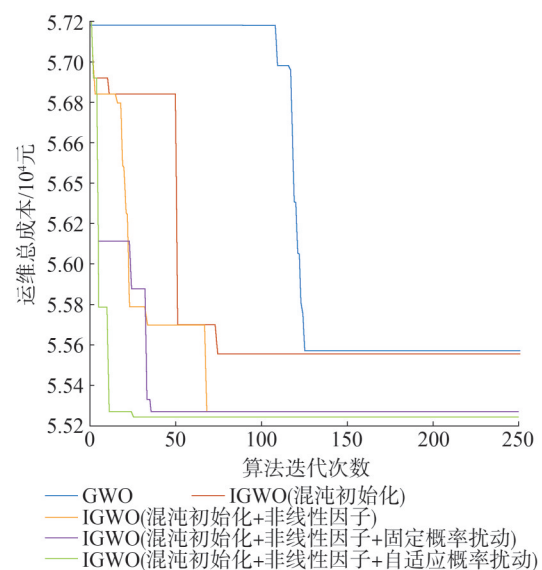


图 8 并行方案下算法消融实验

Fig.8 Ablation study of the algorithm under the parallel scheme

表5 消融实验优化对比

Table 5 Ablation study and optimization comparison

算法	最优值	平均值	标准差	收敛代数
GWO	55 572	55 581	0.002 3	126
IGWO(混沌初始化)	55 558	55 567	0.001 8	75
IGWO(混沌初始化+非线性因子)	55 270	55 280	0.001 5	68
IGWO(混沌初始化+非线性因子+固定概率扰动)	55 270	55 276	0.001 2	38
IGWO(混沌初始化+非线性因子+自适应概率扰动)	55 243	55 246	0.000 9	25

## 5 结论

本文针对海上风电运维策略中短时间尺度的巡检维护、预防性小修和现场故障确认联合制定了当日待维护机组计划,并采用串行维护和并行维护两种策略,以成本最低为目标设计了IGWO。通过对比试验发现:

1)本研究中并行维护策略相对于串行维护策略在降低运维成本、缩短运维时间方面更具优势,但同时对于维护人员和运维船只等配套资源要求更高;

2)通过与GA、PSO、GWO在两种优化问题中的对比以及消融实验的验证,本文所提IGWO大幅提升了算法收敛速度以及跳出局部最优的能力,混沌初始化、非线性收敛因子以及混合自适应扰动策略有效提升了算法性能;

3)所提IGWO在两种维护方案中都展现出了最优的性能,在工程应用方面具有较好的适用性。

## 参考文献

- [1] DA FONSECA SANTIAGO R A, BARBOSA N B, MERGULHÃO H G, et al. Data-driven models applied to predictive and prescriptive maintenance of wind turbine: a systematic review of approaches based on failure detection, diagnosis, and prognosis[J]. Energies, 2024, 17(5): 1010.
- [2] LEE J. The status of wind in africa report 2023 [R]. Brussels, Belgium: Global Wind Energy Council, 2023.
- [3] 安妮,王跃强,章广清,等.基于数据驱动的海上风电集电网无功功率分配优化策略研究[J].智慧电力,2024,52(8):81-88. AN Ni, WANG Yueqiang, ZHANG Guangqing, et al. Optimization strategy of reactive power distribution in offshore wind power

- collector network based on data-driven[J]. Smart Power, 2024, 52(8):81-88.
- [4] 张尉.江苏中部沿海海上风电运维方案研究[D].南京:南京理工大学,2018.
- [5] 葛畅,阎洁,刘永前,等.海上风电场运行控制维护关键技术综述[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4278-4292. GE Chang, YAN Jie, LIU Yongqian, et al. Review of key technologies for operation control and maintenance of offshore wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4278-4292.
- [6] 刘国伟,吴杰康,马楠,等.考虑“风-荷”不确定性的海上“风-储”协同调峰优化模型[J].电网与清洁能源,2024,40(7):1-10. LIU Guowei, WU Jiekang, MA Nan, et al. A collaborative peak shaving optimization model for offshore “wind-storage” considering the uncertainties of “wind-load”[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(7): 1-10.
- [7] 谢鲁冰.海上风电机组动态机会成组维修策略的研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [8] 董文康,吴雨芯,姚琦,等.基于深度强化学习的海上风电机组状态维护与备件库存联合优化[J].太阳能学报,2023,44(12):190-199. DONG Wenkang, WU Yuxin, YAO Qi, et al. Joint optimization of state maintenance and spare parts inventory of offshore wind turbines based on deep reinforcement learning[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(12): 190-199.
- [9] 张晓红,张剑飞,何于港,等.基于多状态空间划分的风电机组非完美维修决策[J].太阳能学报,2022,43(11):203-214. ZHANG Xiaohong, ZHANG Jianfei, HE Yugang, et al. Imperfect maintenance decision of wind turbine based on multi-state space partitioning [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(11): 203-214.
- [10] 符杨,黄璐遥,刘璐洁,等.基于状态自适应评估的海上风电机组预防性维护策略[J].电力自动化设备,2022,42(1):1-9. FU Yang, HUANG Luyao, LIU Lujie, et al. Preventive maintenance strategy for offshore wind turbine based on state adaptive assessment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 1-9.
- [11] 符杨,张耀楠,刘璐洁,等.海上风电场维护任务动态调度策略[J].电力系统自动化,2021,45(21):48-56. FU Yang, ZHANG Yaonan, LIU Lujie, et al. Dynamic dispatching strategy for maintenance tasks of offshore wind farm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 48-56.
- [12] 符杨,应飞祥,黄玲玲,等.基于维护信息更新的海上风电场预测性机会维护策略[J].中国电机工程学报,2025,45(10):3836-3848. FU Yang, YING Feixiang, HUANG Lingling, et al. Predictive opportunity maintenance strategy for offshore wind farm based on maintenance information update [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(10): 3836-3848.

- [13] 黄玲玲,马永杰,应飞祥,等.基于剩余寿命预测信息的风电场动态成组维护策略研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(16):178-187.  
HUANG Lingling, MA Yongjie, YING Feixiang, et al. Dynamic group maintenance strategy for a wind farm based on residual life prediction information [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 178-187.
- [14] 陈述,周露,李智,等.计及气象可达性的海上风电运维效益仿真方法[J].太阳能学报,2023,44(3):104-110.  
CHEN Shu, ZHOU Lu, LI Zhi, et al. Simulation method of offshore wind power operation and maintenance benefits considering weather accessibility [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(3): 104-110.
- [15] 芮晓明,谢鲁冰,李帅,等.面向可及度的海上风电机组维修策略研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(5):92-99.  
RUI Xiaoming, XIE Lubing, LI Shuai, et al. Research on maintenance of offshore wind turbines from accessibility evaluation [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(5): 92-99.
- [16] 王金贺,麻敬,甘婕,等.考虑运维环境影响的风电系统维修决策建模[J].中国电机工程学报,2024,44(21):8507-8518.  
WANG Jinhe, MA Jing, GAN Jie, et al. Maintenance decision modeling for wind power system considering operation and maintenance environmental impacts [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8507-8518.
- [17] 郭慧东,王玮,夏明超.海上风电机组群维修排程在线多目标决策模型[J].中国电机工程学报,2017,37(7):1993-2001.  
GUO Huidong, WANG Wei, XIA Mingchao. On-line multi-objective decision model for the maintenance scheduling of offshore wind turbine group [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1993-2001.
- [18] ZHANG J Q, CHOWDHURY S, ZHANG J, et al. Optimal selection of time windows for preventive maintenance of offshore wind farms subject to wake losses [J]. Wind Energy, 2023, 26(11): 1103-1122.
- [19] WANG Y, DENG Q R. Optimization of maintenance scheme for offshore wind turbines considering time windows based on hybrid ant colony algorithm [J]. Ocean Engineering, 2022, 263: 112357.
- [20] 吕致为,王永,邓奇蓉.考虑时间窗约束的海上风电机组运维方案优化[J].太阳能学报,2022,43(10):177-185.  
LYU Zhiwei, WANG Yong, DENG Qirong. Optimization of maintenance scheme for offshore wind turbines considering time window [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(10): 177-185.
- [21] 屈冲,闫建国,覃涛,等.最佳运维时间窗的海上风电场维护优化策略[J/OL].太阳能学报:1-9[2025-05-20].<https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0672>.
- QU Chong, YAN Jianguo, QIN Tao, et al. Optimal maintenance strategy for offshore wind farms based on best operation and maintenance time window [J/OL]. Acta Energetica Solaris Sinica: 1-9 [2025-05-20]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2024-0672>.
- [22] 冯立杰,谭龙,肖世昌,等.考虑维护策略与运维船型组合的海上风电机组多目标运维优化[J/OL].电网技术:1-10[2025-06-25].<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0994>.  
FENG Lijie, TAN Long, XIAO Shichang, et al. Multi-objective operation and maintenance optimization of offshore wind turbines considering maintenance strategy and O&M vessel type combinations [J/OL]. Power System Technology: 1-10 [2025-06-25]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0994>.
- [23] 胡同宇,杨德健,钱敏慧,等.基于惯量同步的构网型永磁直驱风电机组频率支撑及转速恢复策略[J].智慧电力,2024,52(7):72-79.  
HU Tongyu, YANG Dejian, QIAN Minhui, et al. Frequency support and speed recovery strategy of grid-forming PMSGs based on inertia synchronization [J]. Smart Power, 2024, 52(7): 72-79.
- [24] 张磊,姜贞强,倪佳华,等.基于二阶锥凸松弛的海上风电场内部无功优化[J].电力建设,2024,45(1):92-101.  
ZHANG Lei, JIANG Zhenqiang, NI Jiahua, et al. Internal reactive power optimization of offshore wind farms using second-order cone convex relaxation [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 92-101.
- [25] 唐宏芬,王丽杰,吴春,等.考虑出航时间窗的海上风电场运维调度建模研究[J].电工技术,2022(3):145-148.  
TANG Hongfen, WANG Lijie, WU Chun, et al. Research on modeling of offshore wind farm operation and maintenance scheduling considering sailing time window [J]. Electric Engineering, 2022(3): 145-148.
- [26] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.

收稿日期:2025-05-22

修回日期:2025-07-10

作者简介:

蒋习庆(2000),通信作者(1591212618@qq.com),男,硕士在读,主要研究方向为海上风电场的智能决策;

王冰(1975),男,博士,教授,主要研究方向为新能源系统优化与控制、人工智能与区块链;

陈玉全(1992),男,博士,副教授,主要研究方向为新能源优化与控制、无人系统理论与应用;

张劲峰(1995),男,硕士,工程师,主要研究方向为配电网规划、配电网自动化、配电网运行管理。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250054

# 基于天鹰优化算法的海上风-光-波混合系统最大功率输出的阵列优化

邹毅军<sup>1</sup>, 郜登科<sup>1</sup>, 杨博<sup>2\*</sup>

(1.上海科梁信息科技股份有限公司, 上海 201103; 2.昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**在“双碳”目标的背景下,以波浪能、海上风电和海上光伏等技术为代表的海上可再生能源备受瞩目,将波浪能转换器、海上风电与海上光伏相结合形成海上风-光-波混合系统成为新兴趋势。该系统可充分发挥多能互补优势,增强电力供应的稳定性与可靠性,对沿海地区的电力供应具有重要意义。为充分发挥混合系统之间的协同效应,提高混合系统的发电效率,提出一种基于天鹰优化算法(aquila optimization, AO)的海上风-光-波混合系统最大功率输出的阵列优化策略。为验证AO在优化阵列最大功率输出的有效性,使用MATLAB和SimuNPS软件,分别对由5、8和11个混合系统组成的阵列进行了案例研究,并与城市优化算法(city grid optimization, CGO)、灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)和Q学习算法进行了对比。仿真结果表明,与其他四种对比算法相比,AO能够实现最大的总功率输出。相较于CGO、GWO、PSO和Q学习四种算法,5个阵列规模的最大功率输出分别提高18 kW、15 kW、53 kW和57 kW,8个阵列规模的最大功率输出分别提高32 kW、29 kW、54 kW和127 kW,11个阵列规模的最大功率输出分别提高53 kW、23 kW、115 kW和121 kW,证明了AO的优越性。

**关键词:**波浪能转换器;漂浮式光伏;漂浮式风机;阵列优化;SimuNPS

中图分类号:TM612

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)03-0047-14

## Array Optimization for Maximum Power Output of Offshore Wind-solar-wave Hybrid Systems via Aquila Optimization Algorithm

ZOU Yijun<sup>1</sup>, GAO Dengke<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>2\*</sup>

(1.Shanghai Keliang Information Technology Co., Ltd., Shanghai 201103, China;

2.Faculty of Electrical Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In the context of the ‘dual carbon’ goals, offshore renewable energy technologies, such as wave energy, floating wind power, and floating photovoltaic systems, have garnered significant attention. The integration of wave energy converters, floating wind power, and floating photovoltaics into an offshore wind-solar-wave hybrid system has emerged as a new trend. This system leverages the complementary advantages of multiple energy sources to enhance the stability and reliability of power supply, which is particularly significant for coastal regions. An array optimization strategy based on the aquila optimization (AO) algorithm is proposed to fully exploit the synergistic effects among hybrid systems, improve power generation efficiency, and maximize the power output of offshore wind-solar-wave hybrid systems. To validate the effectiveness of the AO in optimizing the maximum power output of arrays, case studies were conducted using MATLAB and SimuNPS software for arrays consisting of 5, 8, and 11 hybrid systems. The results were compared with those obtained from the city grid optimization (CGO), grey wolf optimization (GWO), particle swarm optimization (PSO) algorithms and Q-learning algorithms. Simulation results demonstrate that the AO achieves the highest total power output compared to the other three algorithms. Specifically, compared to CGO, GWO, PSO, and Q-learning, the maximum power output of 5 array is increased by 18 kW, 15 kW, 53 kW and 57 kW respectively, and the maximum power output of 8 array is increased by 32 kW, 29 kW, 54 kW and 127 kW respectively. The maximum power output of 11 array was increased by 53 kW, 23 kW, 115 kW and 121 kW, respectively. These results highlight the superiority of the AO algorithm.

**Keywords:** wave energy converter; floating photovoltaic; floating wind turbine; array optimization; SimuNPS

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(62263014);云南省自然科学基金资助项目(202401AT070344)。

National Natural Science Foundation of China (62263014); Natural Science Foundation of Yunnan Province (202401AT070344).

## 0 引言

随着全球化石能源的消耗速度日益加快,地球环境面临着前所未有的挑战。在这一背景下,开发新型清洁能源来缓解能源危机、减轻环境负担已成为全球共识<sup>[1]</sup>。海洋蕴藏着丰富的能源资源,如波浪能、潮汐能、海上太阳能及风能等,这些能源的开发利用对于实现可持续发展具有重要意义<sup>[2]</sup>。我国拥有超过 1.8 万 km 的海岸线和超过 300 万 km<sup>2</sup> 的可利用海域面积,在海洋能源的开发利用上具有得天独厚的优势。为实现“双碳”目标,我国沿海省份积极响应国家号召,推动海上能源的开发与利用。2024 年,我国海上风电装机规模达 4 132 万 kW,稳居全球首位。海上光伏装机容量达 1 600 万 kW,据估算,我国海上光伏装机规模潜力超过 7 000 万 kW。此外,我国首台自主研发的“南鲲”号兆瓦级漂浮式波浪能发电装置在广东试运营,标志着我国兆瓦级波浪能发电技术正式进入工程应用阶段<sup>[3]</sup>。

近年来,新能源发电技术快速发展,推动相关技术向海上延伸,更加贴近沿海负荷中心,为能源的高效利用提供了有力保障<sup>[4]</sup>。在众多海洋能源中,海上风能因其资源稳定、不受地形限制以及对居民生活影响小等优点而备受青睐<sup>[5]</sup>。与此同时,光伏发电技术也逐渐向海上拓展,利用水面反射的太阳光能够增加光的接收量,提高发电效率。此外,水面还能为光伏板提供自然冷却,进一步降低工作温度,提升发电性能。除了海面上的太阳能和风能,海水中的波浪能同样具有巨大的开发潜力<sup>[6]</sup>。波浪能因其能量密度高、资源丰富等特点而受到广泛关注<sup>[7]</sup>。虽然多种海洋能源都得到了飞快发展,但单一的能源发电具有发电不稳定、装置成本高等问题。为了解决上述问题,国际上针对海洋可再生能源的利用呈现出多种能源互补发电的趋势。例如,将波浪能与风能、太阳能等相结合,构建海上风波发电系统、海上光波发电系统等<sup>[8]</sup>,以实现能源的多元化利用和高效转换。这种多能互补的发电方式不仅可以提高能源的利用率,还能增强系统的稳定性和可靠性<sup>[9]</sup>。

在海上风-光-波混合系统中,不同波浪能装置

之间的协同效应会降低系统的发电效率,这种复杂的协同作用主要与阵列中波浪能转换器(wave energy converter, WEC)的位置、海况等因素有关,因此通过优化阵列的布局位置从而提高系统的发电能力和稳定性至关重要。目前,解决含波浪能的混合发电系统阵列优化问题的方法主要可以分为数学方法、机器学习方法和元启发式算法三大类<sup>[10]</sup>。数学方法如抛物线交叉法<sup>[11]</sup>、蒙特卡洛方法<sup>[12]</sup>等会随着问题的复杂性和规模的增加,其计算量和难度也随之增大。随着人工智能技术的快速发展,元启发式算法因其强大的全局搜索能力和鲁棒性而被广泛应用于阵列优化领域。文献[13]采用遗传算法对多个浮子式波浪能发电装置的位置进行排列优化,试验结果表明了遗传算法优化后的阵列可以有效提高发电效率。文献[14]通过改进的蜜獾算法优化三系波浪能转换器的阵列,与另外 3 个算法相比,改进的蜜獾算法所得阵列的因子最高,优化效果最好。此外,元启发式算法在混合发电系统的阵列优化中也取得了较好的表现。文献[15]采用改进秃鹰算法对海上混合光伏-波浪能系统进行阵列布局优化,仿真结果表明了改进秃鹰算法可实现最大功率输出并具有良好的收敛性。文献[16]提出了基于指数黏菌算法的风-光-波混合系统的阵列优化方法,分别对 3 个、7 个和 13 个规模下的阵列进行优化,试验结果验证了指数黏菌算法的有效性,并表明随着系统规模的扩大,该算法在最大功率输出方面的提升更为突出。以上研究均说明了元启发式算法在解决海上风-光-波混合系统阵列优化问题的巨大潜力。

天鹰算法(aquila optimizer, AO)是一种新兴的群体智能优化算法,其灵感来源于北美天鹰捕猎时的行为策略,通过模拟天鹰的捕食行为来搜索最优解<sup>[17]</sup>。为了验证 AO 在海上风-光-波混合系统最大功率输出的阵列优化中的有效性和优越性,本文进行了深入的实例研究。通过与城市优化算法(city grid optimization, CGO)、灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO)、粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)和 Q 学习算法进行对比分析,本文对由 5、8 和 11 个混合系统组成的阵列进行了模拟仿真。

## 1 海上风-光-波混合系统模型

### 1.1 波浪能系统建模

在海洋环境中,假设海水是不可压缩、非粘性和非旋转的,可以利用势流理论和线性波理论来简化模型。在这种情况下,混合系统阵列中 WEC 的运动方程可以描述为

$$\mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{x}}_i(t) = \mathbf{F}_{\text{exc},m}(t) + \mathbf{F}_{\text{rad},m}(t) + \mathbf{F}_{\text{pto},m}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}_i$ 为第*i*个浮标的质量矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}_i(t)$ 为第*i*个浮标在激波、摆动和翻腾时的加速度矢量; $\mathbf{F}_{\text{exc},m}(t)$ 、 $\mathbf{F}_{\text{rad},m}(t)$ 和 $\mathbf{F}_{\text{pto},m}(t)$ 分别为激振力、辐射力和动力输出在第*m*个波浪能取力器(power take off, PTO)力。

波浪能转换器中单个浮标吸收的能量表达式为

$$P_m = \sum_{j=1}^3 \frac{1}{2} B_{\text{pto},m} \omega^2 H^2 |\hat{l}_{i,j}|^2 \quad (2)$$

式中: $B_{\text{pto},m}$ 为第*m*个 PTO 的阻尼系数; $H$ 为浪高; $|\hat{l}_{i,j}|$ 为系绳*j*侧浮标*i*的运动幅度; $\omega$ 为波浪频率。

由*i*个浮标的组成的 WEC 阵列所吸收的能量表达式为<sup>[18]</sup>

$$P_{\text{WEC},\Sigma} = \frac{1}{4} (\hat{\mathbf{F}}_{\text{exc},\Sigma}^* \dot{\mathbf{x}}_{\Sigma} + \dot{\mathbf{x}}_{\Sigma}^* \hat{\mathbf{F}}_{\text{exc},\Sigma}) - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{x}}_{\Sigma}^* B_{\text{pto},\Sigma} \dot{\mathbf{x}}_{\Sigma} \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{F}}_{\text{exc},\Sigma}$ 为总激振力的复数向量; $\dot{\mathbf{x}}_{\Sigma}$ 为所有浮标在频域中的速度响应; $B_{\text{pto},\Sigma}$ 为所有 PTO 的总阻尼系数;符号\*表示共轭转置。

### 1.2 漂浮式风机系统建模

在混合系统中,不同的子系统可能会受到不同的载荷影响。漂浮式风机(floating wind turbine, FWT)主要受到传递的空气动力载荷、波浪载荷以及 PTO 系统的作用力。因此,FWT 的运动方程可以表示为

$$\mathbf{F}_n^{\text{FWT}} = \mathbf{F}_{\text{FWT},\text{wind},n} + \mathbf{F}_{\text{FWT},\text{wave},n} + \mathbf{F}_{\text{FWT},\text{pto},n} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{F}_n^{\text{FWT}}$ 为第*n*个 FWT 所受的力; $\mathbf{F}_{\text{FWT},\text{wind},n}$ 为风作用在第*n*个 FWT 的载荷; $\mathbf{F}_{\text{FWT},\text{wave},n}$ 为波浪作用在第*n*个 FWT 的载荷; $\mathbf{F}_{\text{FWT},\text{pto},n}$ 为 PTO 系统对第*n*个 FWT 的作用力<sup>[19]</sup>。

FWT 系统选用了 Vestas V27-225 kW 型号,其转子直径为 27 m,塔架高度为 32.1 m。FWT 的功率输出则依据特定的功率曲线确定,其功率表达式<sup>[20-21]</sup>为

$$P(v) = \begin{cases} 0, v < V_{\text{cut\_in}} \\ P_{\text{rated}} R(v), V_{\text{cut\_in}} \leq v < V_{\text{rated}} \\ P_{\text{rated}}, V_{\text{rated}} \leq v < V_{\text{cut\_out}} \\ 0, V_{\text{cut\_out}} \leq v \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P(v)$ 为 FWT 的输出功率, $v$ 为 FWT 的风速; $V_{\text{cut\_in}}$ 、 $V_{\text{rated}}$ 和 $V_{\text{cut\_out}}$ 分别为 FWT 的切入速度、额定速度和切出速度; $P_{\text{rated}}$ 为 FWT 的额定功率; $R(v)$ 为风速*v*下 FWT 功率。针对本混合系统所选定的 FWT, $R(v)$ 可表示为

$$R(v) = \left[ a_2 + \frac{a_1 - a_2}{1 + \exp\left(\frac{v - a_3}{a_4}\right)} \right] \quad (6)$$

式中: $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 和 $a_4$ 均为 FWT 曲线的回归常数。

### 1.3 漂浮式光伏系统建模

漂浮式光伏(floating photovoltaic, FPV)主要受风载荷、波浪载荷和系绳系统的作用力。因此,FPV 的运动方程可以表示为

$$\mathbf{F}_l^{\text{FPV}} = \mathbf{F}_{\text{FPV},\text{wave},l} + \mathbf{F}_{\text{FPV},\text{wind},l} + \mathbf{F}_{\text{FPV},\text{mo},l} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{F}_l^{\text{FPV}}$ 为第*l*个 FPV 所受的力; $\mathbf{F}_{\text{FPV},\text{wave},l}$ 为波浪作用在第*l*个 FPV 的载荷; $\mathbf{F}_{\text{FPV},\text{wind},l}$ 为风作用在第*l*个 FPV 的载荷; $\mathbf{F}_{\text{FPV},\text{mo},l}$ 为系绳系统对第*l*个 FPV 载荷的作用力。

FPV 系统的实际输出功率考虑了阴影区和非阴影区的影响,其中阴影区的输出功率被设为正常输出功率的 20%。因此,FPV 的总输出功率表示为<sup>[22-24]</sup>

$$P_{\text{FPV},\Sigma} = P_{\text{FPV},\text{normal}} + P_{\text{FPV},\text{shadow}} \quad (8)$$

$$P_{\text{FPV},\text{normal}} = \sum P_{\text{STC}} f\left(\frac{G_{\text{AC}}}{G_{\text{STC}}}\right) [1 + \alpha_p (T_c - T_{\text{STC}})] \quad (9)$$

式中: $P_{\text{FPV},\Sigma}$ 为 FPV 的总输出功率; $P_{\text{FPV},\text{normal}}$ 和 $P_{\text{FPV},\text{shadow}}$ 分别为非阴影区和阴影区的输出功率; $P_{\text{STC}}$ 为 FPV 的额定容量; $f(\cdot)$ 为降额比例函数; $G_{\text{AC}}$ 为入射的太阳辐照度; $G_{\text{STC}}$ 为标称工作条件下(nominal operating cell temperature, NOCT)的太阳辐射; $\alpha_p$ 为温度系数; $T_c$ 和 $T_{\text{STC}}$ 分别为 FPV 所处环境的实际温度与标准测试条件(standard test conditions, STC)下温度的测量值。

FPV 表面的温度随着太阳辐射强度的增加而升高,可表示为

$$T_c = T_{amb} + T_{cell,NOCT} - T_{amb,NOCT} \left( \frac{G_{AC}}{G_{AC,NOCT}} \right) \left( 1 - \frac{\eta_{max,P}}{\beta\tau} \right) \quad (10)$$

式中:  $T_{amb}$ 、 $T_{cell,NOCT}$  和  $T_{amb,NOCT}$  分别为 FPV 的实际环境温度、标准工作温度和额定工作温度条件下的环境温度;  $G_{AC,NOCT}$  为额定工作温度条件下的太阳辐射;  $\eta_{max,P}$  为 MPPT 的效率;  $\beta$  为 FPV 的吸收率;  $\tau$  为太阳透射率。

### 1.4 混合系统建模

混合系统的实体图如图 1 所示。该混合系统结合了 FWT、FPV 和 WEC, 整个混合系统的布局为: WEC 系统位于海平面以下 6 m, FPV 为海平面以上, FWT 和 FPV 架设在一个半径为 60 m 的圆形漂浮式结构上, 并且 FWT 位于 FPV 的中心位置。这三个发电系统通过共享系泊点节省制造成本以提高经济性。

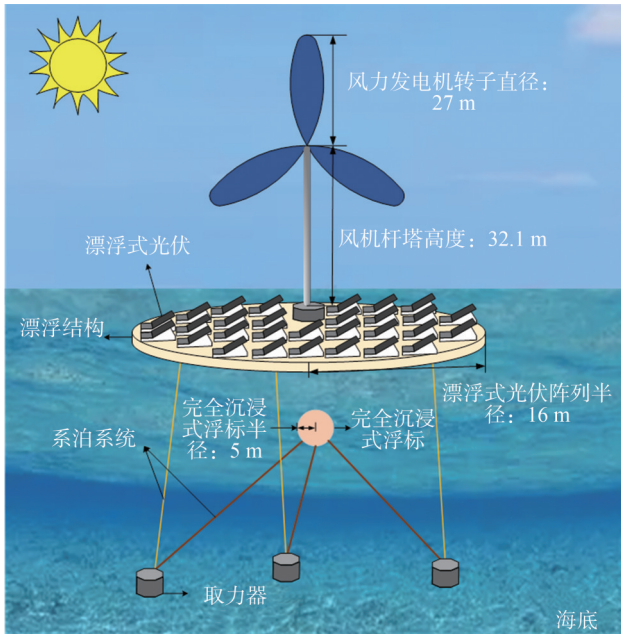


图 1 混合系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the hybrid system

混合系统建模需要考虑多种外部载荷的影响。这些载荷主要包括风载荷、波载荷以及 PTO 通过系绳作用于系统的载荷<sup>[25-26]</sup>。为了准确描述系统的运动行为, 采用频域分析方法, 建立相应的运动方程为:

$$-\omega^2 \{ \mathbf{M}_{HSWWS} + \mathbf{A}(\omega) \} \mathbf{X}(\omega) + i\omega \mathbf{B}(\omega) \mathbf{X}(\omega) + \mathbf{R}_{HSWWS} \mathbf{X}(\omega) = \mathbf{F}_{\Sigma}(\omega) \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_{\Sigma}(\omega) = \mathbf{F}_{wave}(\omega) + \mathbf{F}_{pto}(\omega) + \mathbf{F}_{wind}(\omega) + \mathbf{F}_m(\omega) \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{F}_{\Sigma}(\omega)$  为频率  $\omega$  下的总外力;  $\mathbf{M}_{HSWWS}$  为混合系统的结构质量;  $\mathbf{A}(\omega)$  为频率  $\omega$  下的附加质量矩阵;  $\mathbf{X}(\omega)$  为频率  $\omega$  下的频域位移矢量矩阵;  $\mathbf{B}(\omega)$  为频率  $\omega$  下的阻尼系数;  $\mathbf{R}_{HSWWS}$  为恢复系数;  $\mathbf{F}_{wind}(\omega)$ 、 $\mathbf{F}_{wave}(\omega)$ 、 $\mathbf{F}_{pto}(\omega)$  和  $\mathbf{F}_m(\omega)$  分别为频率  $\omega$  下的风、波浪、PTO 系统和系绳系统作用于混合系统的载荷。

混合系统吸收的总功率  $P_{\Sigma}$  由 WEC 阵列吸收的功率、FPV 阵列吸收功率和 FWT 阵列吸收功率三部分组成, 其数学表达式为

$$P_{\Sigma} = P_{WEC,\Sigma} + P_{FPV,\Sigma} + P_{FWT,\Sigma} \quad (13)$$

式中:  $P_{WEC,\Sigma}$ 、 $P_{FPV,\Sigma}$  和  $P_{FWT,\Sigma}$  分别为 WEC、FPV 和 FWT 的功率。

### 1.5 漂浮式风机对漂浮式光伏阵列的阴影模型

FWT 的阴影会对 FPV 的输出功率产生显著影响。为了准确评估这种阴影损失, 需要计算 FWT 在不同太阳位置下投下的阴影面积。以下是计算阴影面积的关键假设:

- 1) FWT 杆塔投下的阴影在整个长度上具有一致的宽度;
- 2) FWT 叶片的掠过区域被视为一个实心圆盘;
- 3) 太阳始终位于旋转叶片的后方, 而非侧面;
- 4) FPV 水平安装, 无倾斜角度;
- 5) 仅考虑 FWT 对 FPV 面板的阴影影响, 忽略其他因素的影响;
- 6) 与无阴影的电池板相比, 有阴影的电池板输出功率降低 80%。

FWT 杆塔的阴影如图 2(a) 所示。根据上述假设, 太阳始终位于 FWT 的后方。因此, FWT 杆塔的阴影区域形成长宽尺寸一致的矩形。以 FWT 杆塔为中心建立坐标系, 可分别计算出该矩形在  $x$  轴和  $y$  轴上的投影长度  $L_x$  和宽度  $L_y$ <sup>[27]</sup>, 根据假定条件 FWT 相对于 FPV 面板的角度  $\alpha = 90^\circ$ , 可简化为:

$$L_x = H \sin c \cdot \cot b \quad (14)$$

$$L_y = H \cos c \cdot \cot b \quad (15)$$

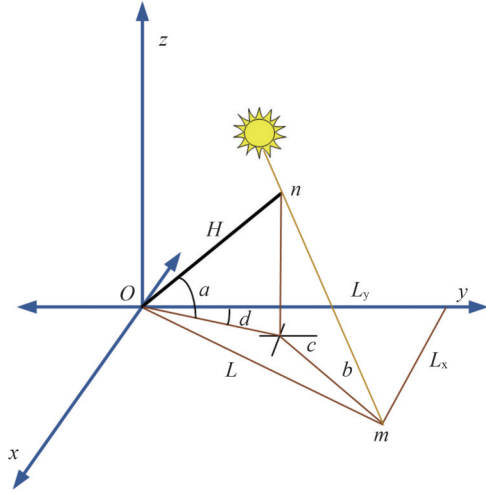
式中:  $b$  为太阳仰角;  $c$  为太阳方位角;  $H$  为 FWT 的高度。

FWT 杆塔的阴影面积  $S_{lower}$  可表示为<sup>[27]</sup>

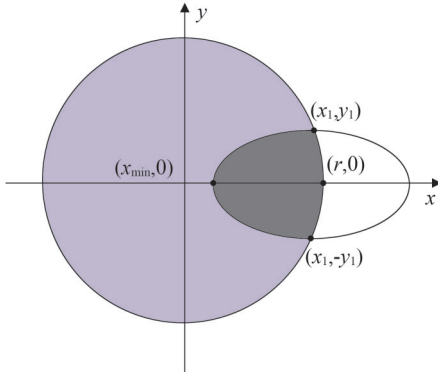
$$S_{lower} = L_x L_y \quad (16)$$

在评估 FWT 叶片阴影对 FPV 的影响时, 叶片阴影通常近似为椭圆形, 如图 2(b) 所示。根据阴影与

光伏阵列的相对位置关系,面积计算可分为三种情况。情况 1 为椭圆形阴影完全位于光伏阵列内;情况 2 为部分椭圆阴影覆盖光伏阵列;情况 3 为椭圆阴影区域未覆盖光伏阵列。



(a)标准电杆的阴影部分



(b)椭圆阴影面积计算图

图2 阴影面积计算示意图

Fig.2 Diagram illustrating shadow area calculations

假定沿  $y$  轴的椭圆长度  $S_y$  是固定的,代表 FWT 转子的直径,即

$$S_y = d_{WT} \quad (17)$$

式中: $d_{WT}$  为 FWT 转子直径。

同时,沿  $x$  轴的长度  $S_x$  随太阳仰角的变化而变化,其计算公式为

$$S_x = \frac{d_{WT}}{\tan b} \quad (18)$$

针对情况 1,阴影面积  $S_{blades}$  [21]为

$$S_{blades} = \frac{\pi S_x S_y}{4} \quad (19)$$

情况 2 涉及椭圆形阴影部分位于圆形光伏阵列内部,阴影区域由椭圆和圆形光伏阵列的重叠部分组成。首先,确定椭圆与矩形的交点,这些交点定义了阴影重叠区的边界。随后,采用积分法计算曲线下的面积,即交点面积[27]。

最终,综合考虑塔架和风力涡轮机叶片的阴影面积,总阴影面积  $S_{shadow}$  为

$$S_{shadow} = S_{tower} + S_{blades} \quad (20)$$

情况 3 为光伏阵列未覆盖椭圆阴影区域,即总的阴影面积仅为 FWT 的杆塔在 FPV 上所形成的阴影,即可用式(16)计算。

## 1.6 性能评价指标

为了评估混合系统的效率,采用了  $q$  因子和最大输出功率作为评价指标。 $q$  因子定义为混合系统组成的整个阵列吸收功率与同等数量混合系统单独的吸收功率的比值[28],即为

$$q = \frac{P_s}{NP_0} \quad (21)$$

式中: $P_s$  为整个阵列吸收的总能量; $P_0$  为单个混合系统独立运行时的输出功率; $N$  为混合系统的总数。

## 2 天鹰优化算法

AO 模拟了天鹰在捕猎过程中的狩猎策略。该算法将优化过程划分为扩展勘探—全域布局初探、狭窄勘探—局部布局精探、扩展开发—局部区域深度开发、缩小开发范围—全域最优布局锁定 4 个阶段,以有效探索和开发搜索空间。

### 2.1 扩展勘探—全域布局初探

在解空间内随机生成多样化的风-光-波混合系统布局方案,模拟天鹰对潜在猎物区域进行广泛搜索,识别并探索可能优化的布局区域,避免算法陷入局部最优解。这一阶段的数学模型可通过式(22)进行描述。

$$X_1(t+1) = X_{best}(t) \times (1 - \frac{t}{T}) + (X_M(t) - X_{best}(t) \times r) \quad (22)$$

式中: $X_1(t+1)$  为  $t+1$  次迭代的解; $X_{best}(t)$  为  $t$  次迭代的最优解; $X_M(t)$  为  $t$  次迭代中当前解的平均位置值; $r$  为  $[0, 1]$  区间的随机数; $t$  和  $T$  分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

$$X_M(t) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S X_s(t), \forall s = 1, 2, \dots, D \quad (23)$$

式中:  $D$  为问题的维度;  $S$  为候选解的个数;  $X_s(t)$  为第  $t$  次迭代时第  $s$  个候选解的位置。

## 2.2 狭窄勘探—局部布局精探

模拟天鹰在目标猎物选定的区域内进行狭窄的探索,在当前较优解附近进行精细探索,调整风-光-波混合系统的位置,逐步优化布局,为最终的优化布局做准备。

$$X_2(t+1) = X_{\text{best}}(t) L_{\text{evy}}(D) + X_R(t) + (y-x)r \quad (24)$$

式中:  $X_2(t+1)$  为第二阶段生成的下一次迭代的解;  $X_R(t)$  为  $[1, S]$  区间内的随机解;  $L_{\text{evy}}(\cdot)$  为飞行分布函数;  $x$  和  $y$  模拟搜索轨迹中的螺旋形状。

$$L_{\text{evy}}(D) = b \times \frac{u \times \sigma}{|v|^{\frac{1}{\zeta}}} \quad (25)$$

$$\begin{cases} y = r \cos \theta \\ x = r \sin \theta \\ r = r_1 + UD_1 \\ \theta = -wD_1 + \theta_1 \\ \theta_1 = \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $b$  为常数,此处取 0.01;  $u$  和  $v$  是  $[0, 1]$  区间的随机数;  $\sigma$  为尺度参数;  $r_1$  为用于确定搜索循环的次数;  $U$  为常数,此处取 0.005 65;  $D_1$  为  $[1, D]$  区间内的整数;  $w$  为常数,此处取 0.005;  $\zeta$  为常数,此处取 1.5。

$$\sigma = \left( \frac{\Gamma(1+\zeta) \sin(\frac{\pi\zeta}{2})}{\Gamma(\frac{1+\zeta}{2}) \zeta \times 2^{\frac{(\zeta-1)}{2}}} \right) \quad (27)$$

式中:  $\Gamma(\cdot)$  为伽马函数。

## 2.3 扩展开发—局部区域深度开发

模拟天鹰利用目标选定区域接近猎物,进行初步试探攻击。针对当前最优布局的局部区域进行深度开发,调整风-光-波混合系统的位置,降低设备间的相互影响,实现最大功率输出,这一行为由式(28)描述。

$$X_3(t+1) = (X_{\text{best}}(t) - X_M(t)) \times \alpha - r + ((\eta_{\text{UB}} - \eta_{\text{LB}}) \times r + \eta_{\text{LB}}) \times \delta \quad (28)$$

式中:  $X_3(t+1)$  为第三阶段生成的下一次迭代的解;  $\alpha$  和  $\delta$  为开发调整参数,取固定值;  $\eta_{\text{UB}}$  和  $\eta_{\text{LB}}$  分别为

问题的上限和下限。

## 2.4 缩小开发范围—全域最优布局锁定

模拟天鹰通过根据猎物的随机运动接近猎物,并对其进行攻击。结合历史最优解和全局信息,快速收敛锁定到风-光-波混合系统的最优布置方案,此行为通过式(29)在数学上表示。

$$X_4(t+1) = F_Q(t) \times X_{\text{best}}(t) - (G_1 \times X(t) \times r) - G_2 \times L_{\text{evy}}(D) + r \times G_1 \quad (29)$$

式中:  $X_4(t+1)$  为第四阶段生成的下一次迭代的解;  $F_Q(t)$  为平衡搜索策略的质量函数;  $G_1$  为追捕猎物的动作;  $G_2$  为跟踪猎物的飞行斜率;  $X(t)$  为第  $t$  次迭代的当前解。

$$F_Q(t) = t^{\frac{2 \times r - 1}{(1-r)^2}} \quad (30)$$

$$G_1 = 2 \times r - 1 \quad (31)$$

$$G_2 = 2 \times (1 - \frac{t}{T}) \quad (32)$$

## 3 基于天鹰优化算法的海上风-光-波混合系统阵列优化设计

### 3.1 目标函数

针对海上风-光-波混合系统的阵列优化,主要是基于最大功率输出,寻找在规定海域内装置的布局位置。因此,目标函数为

$$\max f = P_{\Sigma, \text{best}}[(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i)] \quad (33)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  代表第  $i$  个阵列的位置坐标。

### 3.2 基于AO的海上风-光-波混合系统阵列优化框架

基于AO的海上风-光-波混合系统阵列优化框架如图3所示。

## 4 算例分析

为验证AO在风-光-波混合系统布点优化的性能,以CGO、GWO、PSO和Q学习四种算法为对比算法,分别以5、8、11个混合系统组成的阵列在  $500 \times 500 \text{ m}^2$ 、 $800 \times 800 \text{ m}^2$  和  $1\ 100 \times 1\ 100 \text{ m}^2$  的海域内进行优化。海洋的条件统一模拟为:海浪入射角为  $0^\circ$ ,浪高为 1.9 m,波频为 0.7 rad/s,海上平均风速为 9 m/s,太阳辐照度为  $1\ 000 \text{ W/m}^2$ ,FPV 所处环境的实际温度为  $29.675\ 9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。考虑到计算成本,所有算法均独立运行 10 次,种群规模大小为 60,迭代次数

为 400 次。所有仿真试验都是在配置为 13 th Gen Intel (R) Core (TM) i5-13400 2.50 GHz CPU, 64.0 GB RAM, 64 位 Windows10 的计算机上通过 MATLAB2019b 环境运行。

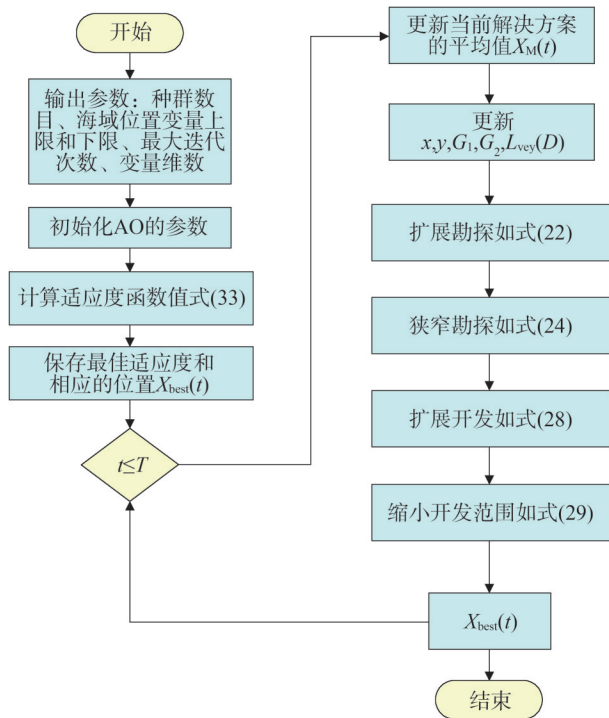


图3 基于AO的海上风-光-波混合系统阵列优化框架  
Fig.3 Framework of optimizing offshore wind-PV-wave hybrid system array based on AO

#### 4.1 小规模5个混合系统阵列

在 5 个混合系统阵列中,采用 5 种算法分别进行 10 次运行,得到了最佳  $q$  因子结果和每个混合系统的最优功率输出,相关数据见表 1。从表 1 可以看出,经过 AO 优化后的  $q$  因子效果最佳,达到了 1.046 6,相比于 CGO、GWO、PSO 和 Q 学习分别提高了 0.43%、0.35%、1.26% 和 1.36%。

图 4 展示了 5 种算法在 10 次运行中的最佳  $q$  因子收敛曲线。AO 算法经过 371 次迭代后收敛至最大值,而 Q 学习经过 1 次迭代后便陷入了局部最优解。从图 5 可以看出,5 种算法的 10 次运行结果的总输出功率的盒须图,表明 PSO 的输出数据集中性最好,其次依次是 CGO、AO、GWO 和 Q 学习。图 6 则可视化展示了在 AO、CGO、GWO、PSO 和 Q 学习 5 种算法优化下,每个混合系统的最佳输出位置和相应的功率。

表 1 5 种算法优化后的 5 个混合系统阵列结果  
Table 1 Experimental results of five hybrid systems array obtained by five algorithms

算法	编号	X/m	Y/m	$P_i/kW$	$P_{\Sigma}/MW$	$q$
AO	1	207	309	889.238		
	2	231	431	829.751		
	3	279	178	826.025	4.283	1.046 6
	4	159	30	880.685		
	5	94	151	857.091		
CGO	1	214	40	833.062		
	2	144	309	839.802		
	3	400	364	824.461	4.265	1.042 1
	4	191	157	909.402		
	5	337	497	857.771		
GWO	1	461	15	426.801		
	2	192	225	426.801		
	3	249	500	426.801	4.268	1.043 0
	4	71	37	837.674		
	5	295	379	818.892		
PSO	1	277	493	826.101		
	2	331	363	832.841		
	3	190	69	817.500	4.230	1.033 6
	4	327	246	902.441		
	5	148	200	850.810		
Q 学习	1	404	90	800.460		
	2	288	264	795.374		
	3	129	390	705.261	4.226	1.032 6
	4	265	394	790.924		
	5	483	308	821.840		

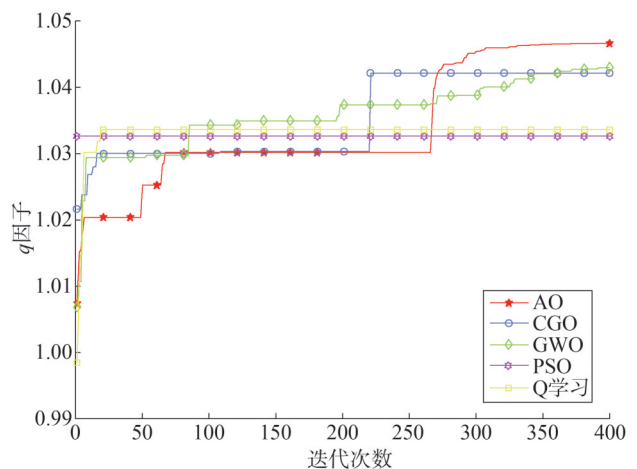


图4 5种算法优化下的5个混合系统阵列  $q$  因子收敛曲线  
Fig.4 The  $q$ -factor convergence curves of 5 hybrid systems array optimized by 5 algorithms

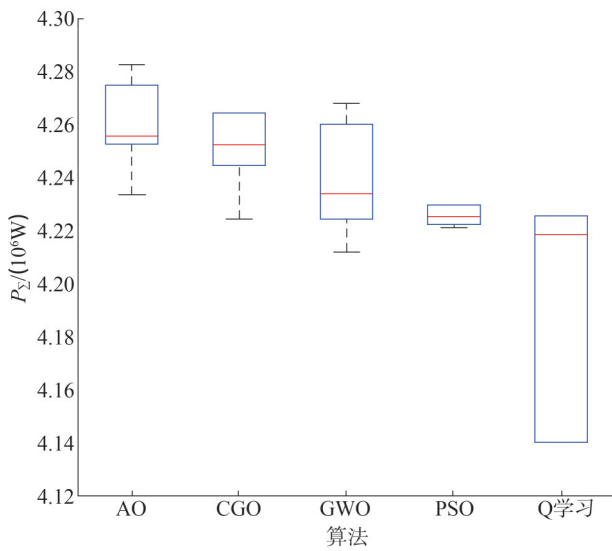


图5 5种算法优化下的5个混合系统阵列盒须图  
Fig.5 Box-and-whisker chart of 5 hybrid systems array optimized by 5 algorithms

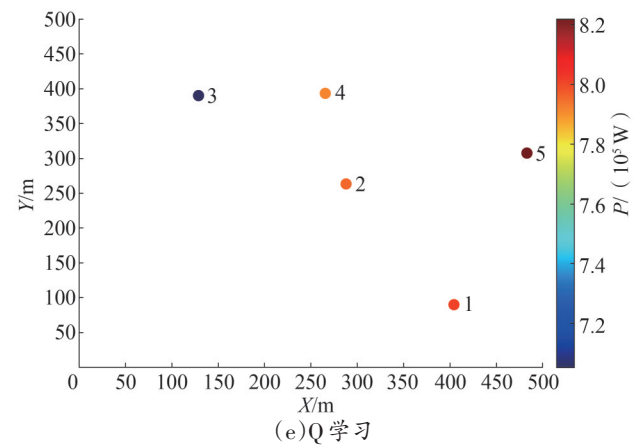
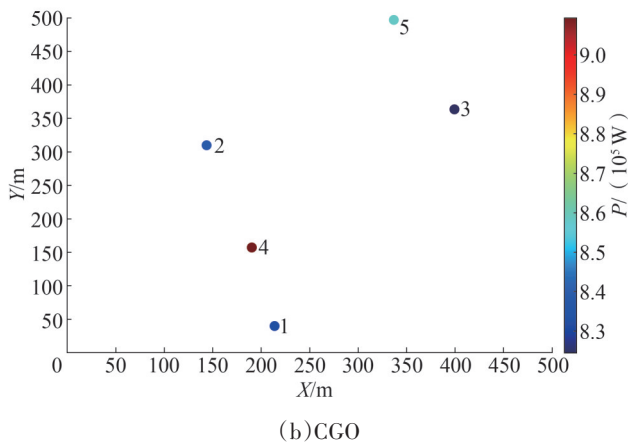
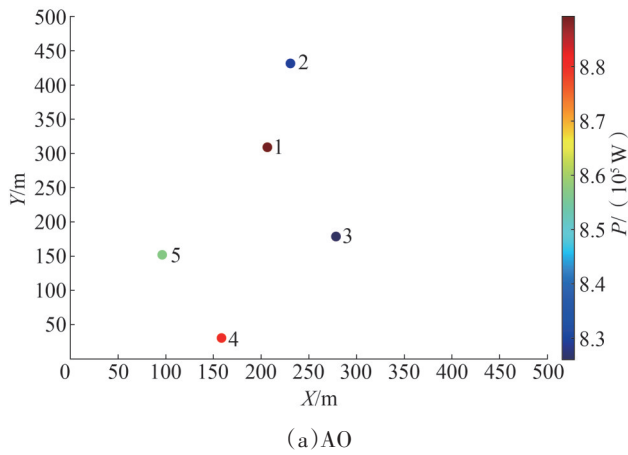
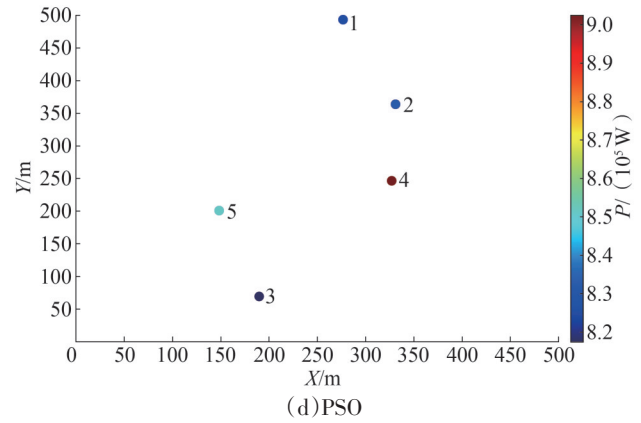
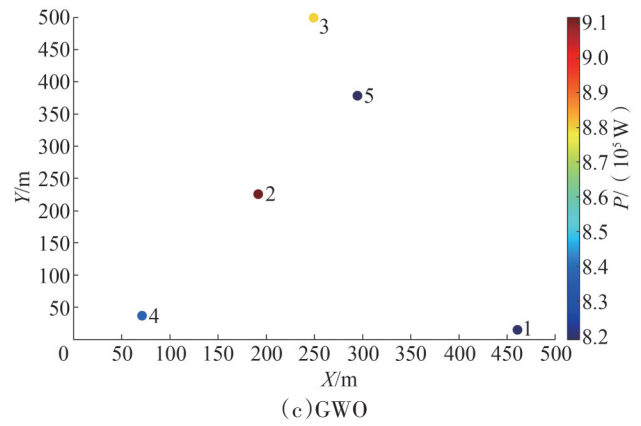


图6 5种算法优化后的5个混合系统阵列最优布局  
Fig.6 Best-layouts of 5 hybrid systems array optimized by 5 algorithms

#### 4.2 中规模8个混合系统阵列

在规定的 800 m×800 m 海域范围内,采用 AO、CGO、GWO、PSO 和 Q 学习 5 种算法,对每个混合系统进行位置优化,以实现输出功率的最大化。表 2 列出了经过 10 次运行后的最佳  $q$  因子和最大输出功率,可以看出,AO 算法在 4 种算法中获得了最高的最佳  $q$  因子,相比于 CGO、GWO、PSO 和 Q 学习分别提高了 0.48%、0.42%、0.80% 和 1.91%。

表2 5种算法优化后的8个混合系统阵列结果  
Table 2 Experimental results of eight hybrid systems array obtained by five algorithms

算法	编号	X/m	Y/m	$P_i/kW$	$P_{\Sigma}/MW$	$q$
AO	1	662	31	819.740	6.761	1.032 6
	2	395	8	856.219		
	3	564	454	857.298		
	4	511	616	839.162		
	5	86	722	861.852		
	6	611	192	814.785		
	7	390	460	844.075		
	8	520	313	867.648		
CGO	1	178	776	876.212	6.729	1.027 7
	2	192	447	854.068		
	3	39	11	827.446		
	4	118	270	794.350		
	5	70	634	841.693		
	6	489	219	822.750		
	7	255	620	822.862		
	8	3	118	889.433		
GWO	1	651	778	847.069	6.732	1.028 3
	2	244	402	780.091		
	3	258	496	879.361		
	4	558	260	845.311		
	5	147	264	899.889		
	6	766	602	822.931		
	7	192	0	808.282		
	8	366	77	849.414		
PSO	1	494	688	845.128	6.707	1.024 4
	2	584	30	834.155		
	3	591	103	847.438		
	4	428	591	837.467		
	5	558	295	815.619		
	6	320	92	799.317		
	7	22	342	839.931		
	8	390	490	888.084		
Q学习	1	248	51	760.000	6.634	1.013 2
	2	383	690	845.972		
	3	647	283	800.136		
	4	247	377	768.383		
	5	291	214	809.500		
	6	652	7	806.258		
	7	293	174	643.989		
	8	522	43	739.503		

图7展示了5种算法在10次运行中的最佳 $q$ 因子收敛曲线。AO算法在进行377次迭代后收敛至最大值。图8为5种算法10次运行结果的总输出功率盒须图,可以看出,AO的输出功率中位数高于其他算法的上限,说明AO算法可实现混合系统最优的功率输出。尽管Q学习的优化效果最差,但其功率输出最为稳定。最后,图9可视化展示了在AO、CGO、GWO、PSO和Q学习5种算法优化下,每个混合系统的最佳位置及其相应的最大输出功率。

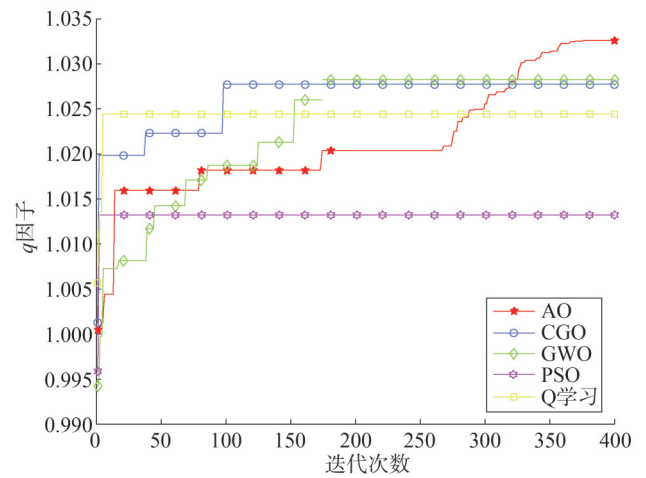


图7 5种算法优化下的8个混合系统阵列 $q$ 因子收敛曲线

Fig.7 The  $q$ -factor convergence curves of 8 hybrid systems array optimized by 5 algorithms

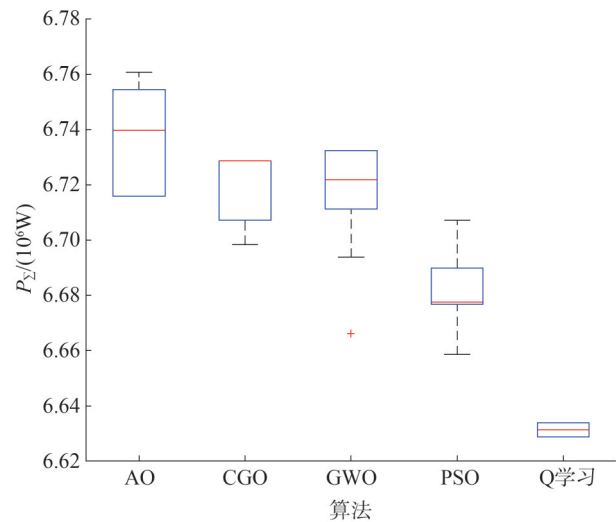
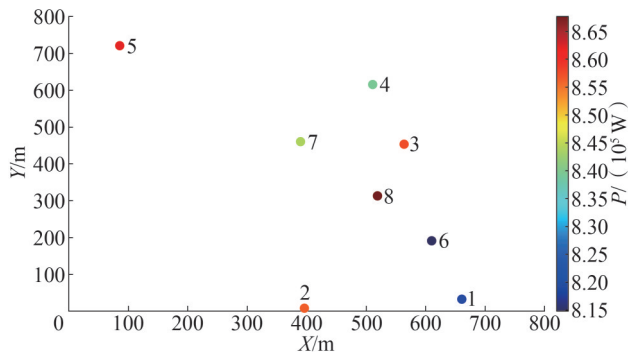
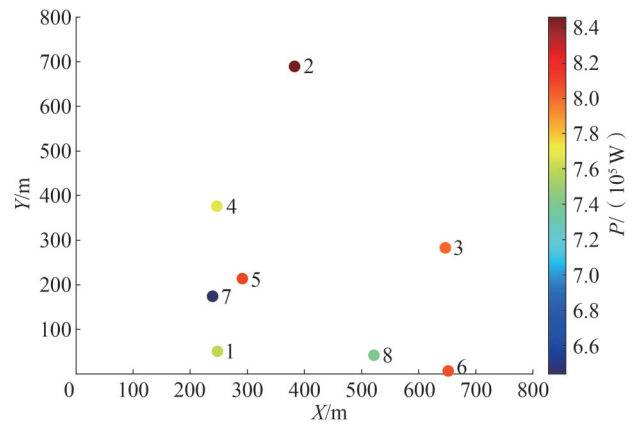


图8 5种算法优化下的8个混合系统阵列盒须图

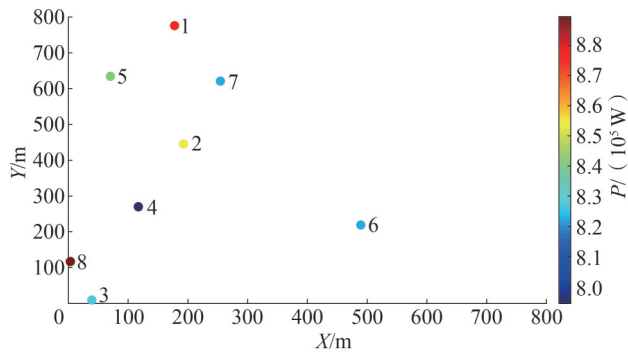
Fig.8 Box-and-whisker chart of 8 hybrid systems array optimized by 5 algorithms



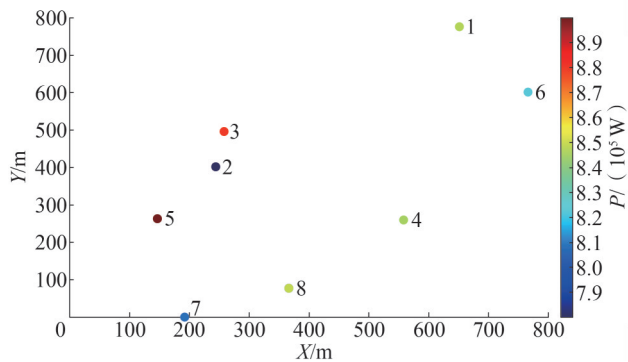
(a)AO



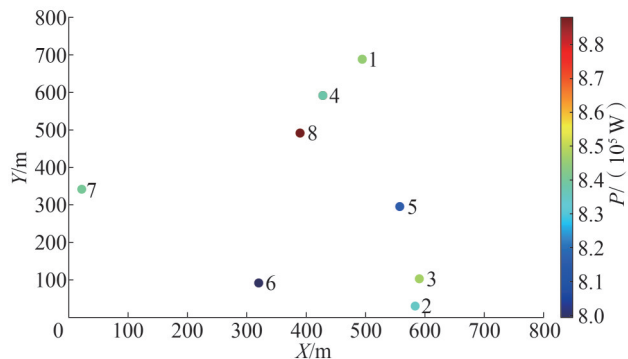
(e)Q学习



(b)CGO



(c)GWO



(d)PSO

图9 5种算法优化后的8个浮标阵列最优布局  
Fig.9 Best-layouts of 8 hybrid systems array optimized by 5 algorithms

### 4.3 大规模11个混合系统阵列

对于大规模11个混合系统阵列的优化,5种算法的最佳输出结果如表3所示。从表3可以看出, AO优化下的最佳 $q$ 因子是5种算法中最大的,相比于CGO、GWO、PSO和Q学习算法分别提高了0.58%、0.24%、1.26%和1.32%。此外,从最佳总输出功率来看,AO优化后的总输出功率为9.260 MW,比CGO、GWO、PSO和Q学习算法分别提高了53 kW、23 kW、115 kW和121 kW。

表3 5种算法优化后的11个混合系统阵列结果

Table 3 Experimental results of eleven hybrid systems array obtained by five algorithms

算法	编号	X/m	Y/m	$P_i/kW$	$P_{\Sigma}/MW$	$q$
	1	473	578	755.917		
	2	453	332	831.708		
	3	1 051	411	818.737		
	4	531	1 081	868.654		
	5	470	953	937.719		
AO	6	655	780	807.864	9.260	1.028 6
	7	751	10	842.151		
	8	18	57	826.030		
	9	185	375	820.013		
	10	604	157	872.016		
	11	587	649	878.991		

表3 (续)

算法	编号	X/m	Y/m	$P_i/kW$	$P_{\Sigma}/MW$	$q$
CGO	1	418	290	727.345	9.207	1.022 7
	2	259	730	928.376		
	3	214	484	815.590		
	4	523	523	884.463		
	5	257	1 038	829.128		
	6	466	248	823.769		
	7	353	440	814.692		
	8	231	49	844.002		
	9	786	758	827.159		
	10	42	19	866.703		
	11	721	1 026	845.713		
GWO	1	4	364	835.359	9.237	1.026 1
	2	978	0	842.939		
	3	704	15	845.910		
	4	1	918	800.336		
	5	2	726	815.114		
	6	590	718	809.853		
	7	1 004	242	816.345		
	8	822	454	901.995		
	9	129	1045	902.787		
	10	1 057	647	832.342		
	11	0	1051	834.215		
PSO	1	32	1 100	864.067	9.145	1.015 8
	2	482	331	859.416		
	3	172	124	901.362		
	4	260	0	789.661		
	5	1 100	1 100	815.242		
	6	604	595	820.643		
	7	388	307	763.693		
	8	284	545	838.126		
	9	603	137	815.438		
	10	636	775	853.965		
	11	1 062	0	823.121		
Q学习	1	271	967	761.648	9.139	1.015 2
	2	453	609	758.336		
	3	703	43	802.036		
	4	1 062	686	820.297		
	5	384	456	864.479		
	6	731	814	776.258		
	7	537	634	839.274		
	8	40	896	764.472		
	9	366	663	668.638		
	10	315	539	712.229		
	11	284	804	838.463		

从图 10 中可以清晰地看到各算法的最佳  $q$  因子收敛情况。AO 算法在经过 388 次迭代后收敛到最大值,而 Q 学习算法则在经过 1 次迭代后便陷入了局部最优解,并且其优化效果最差。图 11 展示了 5 种算法在 10 次运行中的总输出功率的盒须图。可以看出,AO 算法在输出功率方面表现优越,并且功率输出稳定性较好。图 12 展示了 AO、CGO、GWO、PSO 和 Q 学习 5 种算法优化下每个混合系统的最佳输出位置及其对应的功率,便于更直观地观察优化后的布局情况。

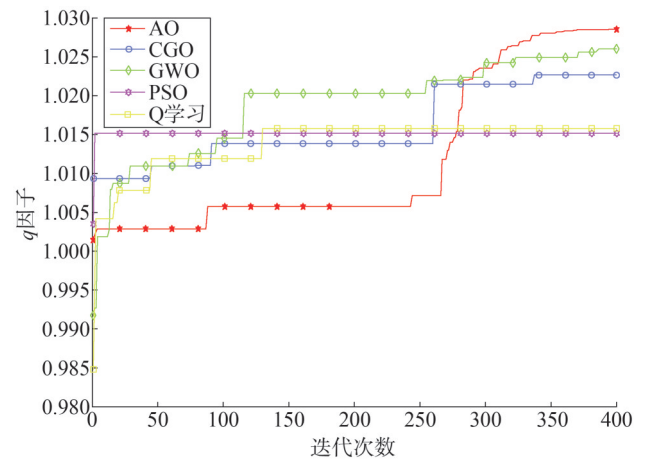


图 10 5种算法优化下的11个混合系统阵列  $q$  因子收敛曲线  
Fig.10 The  $q$ -factor convergence curves of 11 hybrid system arrays optimized by 5 algorithms

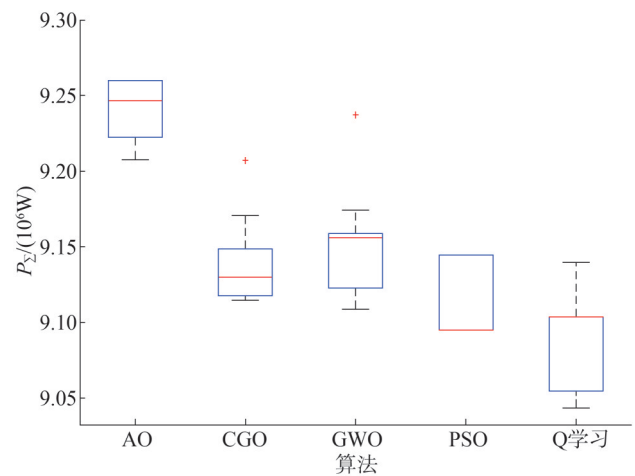
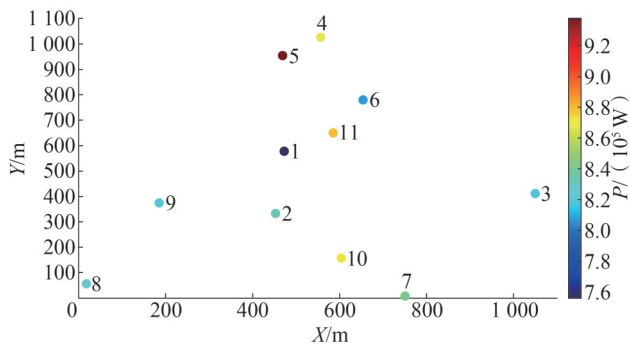
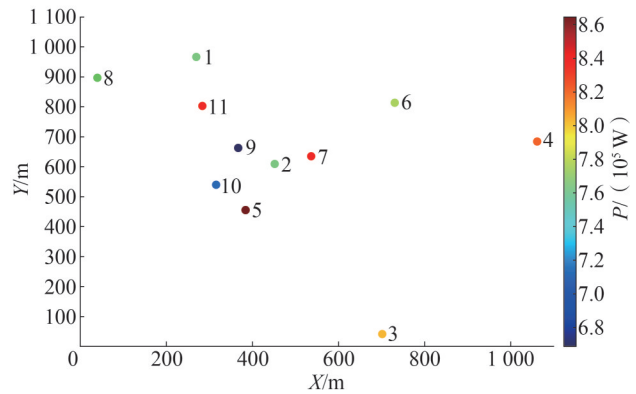


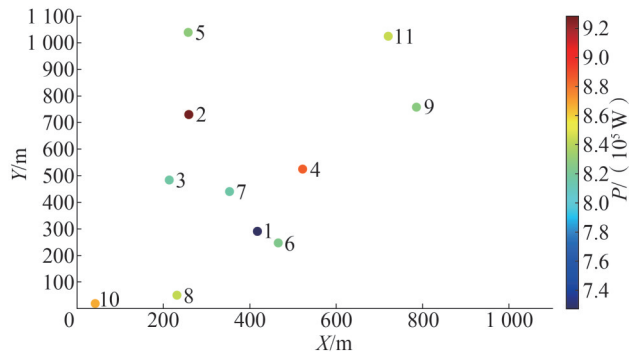
图 11 5种算法优化下的11个混合系统阵列盒须图  
Fig.11 Box-and-whisker chart of 11 hybrid system arrays optimized by 5 algorithms



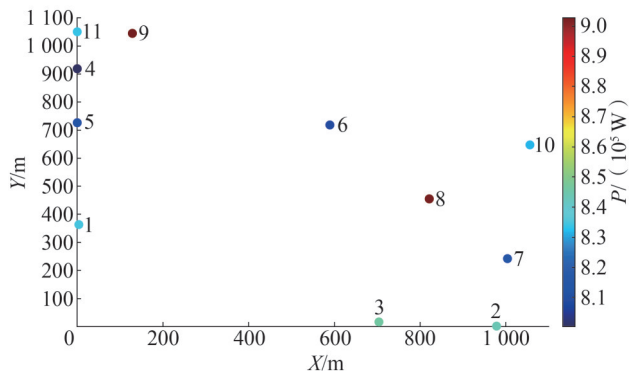
(a)AO



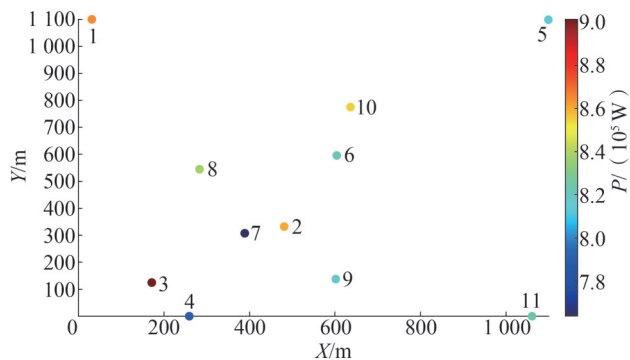
(e)Q学习



(b)CGO



(c)GWO



(d)PSO

图12 5种算法优化后的11个混合系统阵列最优布局  
Fig.12 Best-layouts of 11 hybrid system arrays optimized by 5 algorithms

#### 4.4 适用性分析

3种不同规模的混合系统阵列经过5种算法的优化后,  $q$  因子值均大于1,表明本文所搭建的海上风-光-波混合系统在不同的规模下,均可通过布局优化,充分发挥浮标间的积极作用,实现更高的功率输出。

随着系统的规模不断扩大,对系统优化布局的难度和复杂度也随之提升。在收敛速度方面,AO算法的收敛速度并未随着规模的扩大而明显降低,基本上迭代380次左右就趋于收敛。反观在小规模阵列中快速收敛的PSO和CGO在处理大规模的混合系统阵列布局优化时,收敛速度明显下降。Q学习算法极易陷入局部最优解。AO算法的快速收敛特性使其在实际工程应用中具有显著优势。在输出功率方面,AO算法在优化3个不同规模的阵列时,阵列输出功率均为最大,且随着系统规模的扩大,输出功率的稳定性也随之升高,中大型阵列输出功率的中位数明显高于其他算法的上限。此外,随着系统规模的扩大,AO算法在提升输出功率方面的优越性也逐渐增强。AO算法的鲁棒性使其在复杂多变的海洋环境中仍能保持稳定的性能表现。

#### 5 结论

通过运用人工智能算法对海上风-光-波混合系统进行阵列优化,能够提高阵列的发电功率。

1)采用了FWT、FPV和WEC3个系统结合成混

合系统,将多个这样集成 FWT、FPV 和 WEC3 个系统的混合系统以阵列式布局。经过 5 种算法优化后的大中小型规模阵列的  $q$  因子均大于 1,其中 AO 的  $q$  因子分别达到了 1.046 6、1.032 6 和 1.028 6,表明这种集成方式促进 3 种发电系统之间的能量互补,减少了单一系统输出的不稳定性,从而实现了更高效、稳定的电力输出。

2)仿真结果表明,AO 在 3 种规模下的优化效果均为最佳:相较于 CGO、GWO、PSO 和 Q 学习,在 5 个混合系统阵列中,经 AO 优化的  $q$  因子分别提高了 0.43%、0.35%、1.26% 和 1.36%。在 8 个混合系统阵列中,经 AO 优化的  $q$  因子分别提高了 0.48%、0.42%、0.80% 和 1.91%。在 11 个混合系统阵列中,经 AO 优化的  $q$  因子分别提高了 0.58%、0.24%、1.26% 和 1.32%。此外,AO 算法稳定的收敛性和鲁棒性均证明了其在实际工程中大规模阵列布局优化的适用性。

3)相较于元启发式算法,Q 学习算法的初期适应度值高、收敛速度快,但由于 Q 学习算法采用贪婪机制进行动作选取,易陷入局部最优解,导致最终的优化效果较差。

未来研究可集中在以下两个方面:

1)可以考虑对元启发式算法进行改进,通过引入混沌策略、莱维飞行等改进机制或者将元启发式算法与强化学习算法相融合来提高收敛性和其对大规模阵列优化的适用性;

2)对于未来的研究工作可能会战略性地调整,以探索 FPV 和 FWT 的环境影响,以及混合系统三个主要组成部分之间的互联性和协同作用,以及它们与支撑浮动平台的动态关系。这将能够进一步探索环境因素对混合动力系统输出功率的影响,深入研究其强耦合特性。此外,为了全面评估系统的性能,也可以考虑引入针对整个系统的评估指标,考虑 FPV、FWT 和 WEC 对系统的总体影响。

## 参考文献

- [1] YANG B, DUAN J H, CHEN Y, et al. A critical survey of power take-off systems based wave energy converters: summaries, advances, and perspectives [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 298: 117149.
- [2] YANG B, DUAN J H, LI M W, et al. Optimal placement of hybrid solar-wind-wave systems for maximum energy harvesting via chaotic artificial rabbits algorithm [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 322: 119143.
- [3] 蔡希鹏,邹常跃,彭发喜,等.超大规模海上风电海陆一体直流输电技术探讨[J].*电网技术*, 2024, 48(7):2895-2901.  
CAI Xipeng, ZOU Changyue, PENG Faxi, et al. Discussion on HVDC transmission technology for super-large scale offshore wind power under offshore-onshore integration [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(7):2895-2901.
- [4] 司广全,赵勇,童博,等.海上风电水下资产质量缺陷及检测方法[J].*热力发电*, 2024, 53(12):77-85.  
SI Guangquan, ZHAO Yong, TONG Bo, et al. Quality defects of underwater assets in offshore wind power and the detecting methods [J]. *Thermal Power Generation*, 2024, 53(12):77-85.
- [5] 黄永生,黄玲玲.大型海上风电场风机微观选址与集电系统联合优化[J].*电测与仪表*, 2023, 60(12):71-76, 89.  
HUANG Yongsheng, HUANG Lingling. Joint optimization of wind turbine micro-location and power collection system in offshore wind farm [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12):71-76, 89.
- [6] 林泽川,黄宣睿,肖曦.阵列式直驱波浪发电系统集中式模型预测控制方法[J].*电力系统自动化*, 2024, 48(22):191-198.  
LIN Zechuan, HUANG Xuanrui, XIAO Xi. Centralized model predictive control method for arrays of direct-drive wave energy converters [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(22):191-198.
- [7] YANG B, ZHOU Y M, LIU B Q, et al. Optimal array layout design of wave energy converter via honey badger algorithm [J]. *Renewable Energy*, 2024, 234: 121182.
- [8] YANG B, LI M W, QIN R S, et al. Extracted power optimization of hybrid wind-wave energy converters array layout via enhanced snake optimizer [J]. *Energy*, 2024, 293: 130529.
- [9] 寇凌峰,季宇,曲雪原,等.含海洋能发电的海岛微网源荷容量优化配置研究[J/OL].*电测与仪表*, 2022: 1-13 (2022-05-20) [2025-01-15]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspxfilename=DCYQ20220519003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.  
KOU Lingfeng, JI Yu, QU Xueyuan, et al. Study on optimal allocation of source and load storage capacity of island microgrid with ocean energy generation [J/OL]. *China Industrial Economics*, 2022: 1-13 (2022-05-20) [2025-01-15]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspxfilename=DCYQ20220519003&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [10] YANG B, WU S C, ZHANG H, et al. Wave energy converter array layout optimization: a critical and comprehensive overview [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 167: 112668.
- [11] CHILD B F M, VENUGOPAL V. Optimal configurations of wave energy device arrays [J]. *Ocean Engineering*, 2010, 37(16): 1402-1417.

- [12] SARKAR D, CONTAL E, VAYATIS N, et al. Prediction and optimization of wave energy converter arrays using a machine learning approach[J]. *Renewable Energy*, 2016, 97: 504–517.
- [13] 马宏达, 邓义斌, 郭强波. 基于遗传算法的二自由度波浪能装置阵列优化[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(6): 264–269.  
MA Hongda, DENG Yibin, GUO Qiangbo. Optimization of 2-dof wave energy converters array based on genetic algorithm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(6): 264–269.
- [14] 杨博, 刘炳强, 陈义军, 等. 基于改进蜜獾算法的波能转换器阵列优化[J]. *上海交通大学学报*, 2024, 58(9): 1465–1478.  
YANG Bo, LIU Bingqiang, CHEN Yijun, et al. Array optimization of wave energy converters via improved honey badger algorithm[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2024, 58(9): 1465–1478.
- [15] 杨博, 段金航, 李密维, 等. 基于改进秃鹰优化算法的海上混合光伏-波浪能转换器阵列优化[J]. *电网技术*, 2024, 48(6): 2480–2489.  
YANG Bo, DUAN Jinhang, LI Miwei, et al. Optimization of offshore hybrid photovoltaic - wave energy converter array based on improved bald eagle optimization algorithm [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(6): 2480–2489.
- [16] LI M W, YANG B, DUAN J H, et al. Exponential slime mould algorithm based spatial arrays optimization of hybrid wind-wave-PV systems for power enhancement [J]. *Applied Energy*, 2024, 373: 123905.
- [17] ABUALIGAH L, YOUSRI D, ABD ELAZIZ M, et al. Aquila Optimizer: a novel meta-heuristic optimization algorithm [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 157: 107250.
- [18] WU J H, SHEKH S, SERGIENKO N Y, et al. Fast and effective optimisation of arrays of submerged wave energy converters [C]// *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2016*. ACM, 2016: 1045–1052.
- [19] ZHOU B Z, HU J J, WANG Y, et al. Coupled dynamic and power generation characteristics of a hybrid system consisting of a semi-submersible wind turbine and an array of heaving wave energy converters[J]. *Renewable Energy*, 2023, 214: 23–38.
- [20] CHANG T J, WU Y T, HSU H Y, et al. Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan [J]. *Renewable Energy*, 2003, 28(6): 851–871.
- [21] JARAMILLO O A, BORJA M A. Bimodal versus Weibull wind speed distributions: an analysis of wind energy potential in La Venta, Mexico[J]. *Wind Engineering*, 2004, 28(2): 225–234.
- [22] JAHANGIR M H, SHAHSAVARI A, VAZIRI RAD M A. Feasibility study of a zero emission PV/Wind turbine/Wave energy converter hybrid system for stand-alone power supply: a case study [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121250.
- [23] RAVICHANDRAN N, RAVICHANDRAN N, PANNEERSELVAM B. Comparative assessment of offshore floating photovoltaic systems using thin film modules for Maldives islands [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2022, 53: 102490.
- [24] BI C, LAW A W. Co-locating offshore wind and floating solar farms -Effect of high wind and wave conditions on solar power performance[J]. *Energy*, 2023, 266: 126437.
- [25] SHARP C, DUPONT B. Wave energy converter array optimization: a genetic algorithm approach and minimum separation distance study[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 163: 148–156.
- [26] RONY J S, KARMAKAR D. Coupled dynamic analysis of hybrid offshore wind turbine and wave energy converter [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2022, 144(3): 032002.
- [27] ARA S R, PAUL S, RATHER Z H. Two-level planning approach to analyze techno-economic feasibility of hybrid offshore wind-solar pv power plants [J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, 47: 101509.
- [28] BUDAL K. Theory for absorption of wave power by a system of interacting bodies [J]. *Journal of Ship Research*, 1977, 21(4): 248–254.

收稿日期: 2025-01-15

修回日期: 2025-06-17

作者简介:

邹毅军(1975), 男, 研究方向为电力系统控制、电力电子控制和实时仿真技术;

郜登科(1984), 男, 硕士, 研究方向为新型电力系统仿真和稳定性分析;

杨博(1988), 通信作者(yangbo\_ac@outlook.com), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为基于人工智能的新能源系统优化与控制。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250362

# 考虑双馈风机调频控制和系统频率约束的风机最大接入规模评估

贾宇乔<sup>1</sup>, 张宁宇<sup>1</sup>, 李 铮<sup>1</sup>, 刘与铮<sup>2</sup>, 丁 涛<sup>2\*</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211100; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对大规模双馈风机并网导致电力系统惯量下降、频率稳定性减弱的问题, 提出一种准确评估电力系统可接纳双馈风机最大规模的方法, 为保障高比例可再生能源电力系统的频率安全提供理论依据和技术支撑。构建包含机械系统、电机与换流器、控制系统的双馈风机频率响应简化模型。结合该模型与系统一次调频特性, 建立含双馈风机的系统一次调频分析模型, 并推导出影响系统频率的关键因素。在此基础上, 考虑频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)和稳态频率偏差(steady-state frequency deviation, SFD)两项关键安全约束, 提出了一种双馈风机最大接入规模的评估方法。在IEEE 9节点、IEEE 39节点测试系统以及华东地区实际电网算例上进行了仿真验证。结果表明, 所提出的方法能够验证关键参数对系统一次调频能力的影响, 并准确、有效地计算出不同系统在频率安全约束下的最大风机接入容量。

**关键词:** 双馈风机; 频率约束; 主动频率支撑; 一次调频

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2026)03-0061-12

## Evaluation of Maximum Access Scale of Wind Turbine Considering Frequency Modulation Control of Doubly-fed Wind Turbine and System Frequency Constraint

JIA Yuqiao<sup>1</sup>, ZHANG Ningyu<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>, LIU Yuzheng<sup>2</sup>, DING Tao<sup>2\*</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211100, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The large-scale integration of doubly-fed induction generators (DFIGs) into power systems has led to reduced system inertia and weakened frequency stability. To address this challenge, an accurate method for assessing the maximum hosting capacity of DFIGs is proposed, providing theoretical guidance and technical support for ensuring the frequency security of power systems with high penetration of renewable energy. First, a simplified frequency response model for DFIGs is developed, encompassing the mechanical system, the induction motor and its converter, and the control system. Subsequently, by integrating this model with the system's primary frequency regulation characteristics, an analytical model for the primary frequency regulation of a system with DFIGs is established, revealing the key factors influencing system frequency. Building upon this analysis, and considering two critical security constraints—the Rate of Change of Frequency (RoCoF) and the steady-state frequency deviation (SFD)—an assessment method for the maximum DFIG hosting capacity is proposed. The method's effectiveness is validated through simulations on the modified IEEE 9-bus and 39-bus standard test systems, as well as a practical case study based on the East China Power Grid. The results demonstrate that the proposed method can not only verify the impact of key parameters on the system's primary frequency regulation capability but also accurately and effectively calculate the maximum DFIG hosting capacity for different systems under these frequency security constraints.

**Keywords:** doubly-fed induction generator; frequency constraint; active frequency support; primary frequency modulation

**基金项目:** 国家电网有限公司科技项目“深远海风电柔直并网频率/电压支撑技术研究”(4000-202318465A-3-2-ZN)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research on Frequency and Voltage Support for Deep-sea Wind Power Integrated Through VSC-HVDC System” (4000-202318465A-3-2-ZN).

## 0 引言

为缓解全球性的能源紧缺问题,并积极落实国家关于“双碳”的战略部署,降低电力生产环节的碳排放,加速可再生能源的开发与应用已成为全社会的普遍共识,其在电网中的渗透率正持续攀升<sup>[1-3]</sup>。在众多可再生能源中,风能、太阳能、地热能及生物质能凭借储量巨大、可持续性强、发电经济性好以及清洁环保等显著优势而备受青睐<sup>[4]</sup>。特别是风力发电,因具备高效清洁、运维成本低以及建设周期短等特质,在新能源领域占据了核心地位,大规模风机并网已成为当前技术最成熟且最具潜力的能源利用模式<sup>[5-6]</sup>。

在当前主流的风力发电拓扑结构中,双馈风机凭借其结构紧凑、经济性优越以及变速恒频控制灵活等显著特性,已成为全球商业化风电场的主导机型<sup>[7]</sup>。然而,随着双馈风机在电网中的渗透率持续攀升,电力系统的安全稳定运行面临着前所未有的风险与挑战<sup>[8-9]</sup>。首先,双馈风机通过电力电子变流器与电网接口,这种连接方式切断了转子转速与电网频率之间的物理刚性耦合;加之其通常运行于最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式,且采用电压定向矢量控制,使得转子动能被“隐藏”,无法自然响应系统频率变化。这种解耦机制导致系统总等效惯量显著削减,进而放大了频率波动的幅度<sup>[10]</sup>。当高占比新能源电网遭遇频率扰动时,频率的剧烈偏移极易触发布局内的频率保护装置,引发连锁脱网事故,严重影响电网的频率稳定性<sup>[11-12]</sup>。其次,常规同步发电机组通常是承担电网中有功功率动态与稳态调节的中坚力量。当这些具备高惯性和强阻尼特性的常规机组被大规模替代后,双馈风机在暂态有功支撑方面的先天不足,会导致系统有功调节品质恶化,整体抗扰动能力大幅衰退<sup>[13-14]</sup>。再者,风能资源的间歇性与波动性特征,使得电源侧出力难以精确预测。这标志着电力系统的频率调节难题,已从传统的单一负荷侧随机波动,演变为“源-荷”双侧均存在高度不确定性的复杂局面<sup>[15-16]</sup>。虽然传统电网调度通过预留旋转备用来应对频率偏差,但在可再生能源装机容量激增的背景下,维持频率稳定所需要的备用容量呈非线性增

长,使现有的备用配置策略面临严峻考验<sup>[17-18]</sup>。故而,科学量化并评估电力系统对双馈风机的极限接纳边界,对指导电网规划与保障运行安全具有决定性意义。

就目前的评价体系而言,国内研究多聚焦于扰动后的稳态频率偏差(steady-state frequency deviation, SFD)这一单一指标<sup>[19-20]</sup>。现有文献常基于此单一约束反推风机的最大渗透率,这种简化处理使得评估结果缺乏普适性,忽略了在特定工况下其他关键动态指标越限的风险,从而低估了潜在的频率安全隐患。随着系统惯量水平的持续走低,由扰动引发的频率变化率(rate of change of frequency, RoCoF)过大问题愈发突出。过高的RoCoF不仅威胁发电机组轴系等机械部件的完整性,更可能诱发分布式电源的防孤岛保护误动脱网,进一步冲击主网安全<sup>[12]</sup>。同时,若频率跌落速度过快,可能导致系统在一次调频机制尚未完全响应前便已发生频率崩溃。此外,目前关于风电接纳能力的研究,往往忽视了风电机组自身通过控制策略参与一次调频的潜力,未能全面覆盖频率响应的全过程动态特征,致使计算出的接入规模限值存在偏差。鉴于此,本研究拟将风机参与一次调频的支撑效应纳入考量,耦合多重频率稳定约束,构建更为精准、高效的风机极限接入规模评估方法。

本文基于双馈风力发电系统模型,建立风机一次调频简化模型,并在此基础上构建适用于频率分析的双馈风机简化模型,并提出风机最大接入规模的评估方法,以仿真验证模型和评估方法的有效性。本文贡献总结如下:

- 1) 构建参与调频的双馈风机、火电机组和储能装置的全系统频率响应模型,综合风机控制参数、系统惯量、储能控制系数等因素,精细刻画系统频率变化与负荷扰动关系;

- 2) 提出系统风机最大接入规模的评估方法,基于RoCoF与SFD约束,构建系统最大风机接入规模及综合评估体系,实现负荷扰动下系统风机最大接入规模的量化计算。

## 1 双馈风机建模

双馈风电机组的定子直接并网,转子以AC/AC

换流器与电网相连,转子逆变器通过控制手段改变转子输入电流的频率从而保证定子输出与电网频率同步,实现变速恒频控制。其系统结构如图1所示,包括机械系统、感应发电机及换流器以及控制系统。下面对这四部分进行建模。

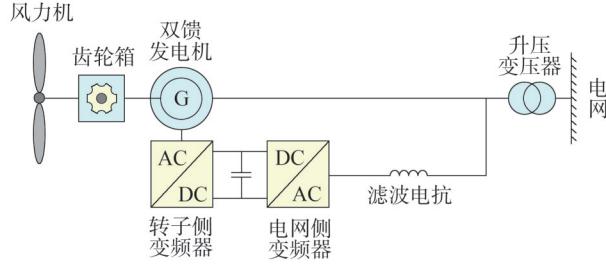


图1 双馈风电机组工作原理

Fig.1 Operating principle of double-fed wind turbine

### 1.1 机械系统

双馈风机的机械系统模型由风力机模型与轴系模型组成。其中,风力机捕获风能,将其转换为转子动能后经过机械传动结构传导给感应发电机。双馈风机风轮捕捉到的气流的动能可由式(1)给出<sup>[21]</sup>。

$$P_{wt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\beta, \lambda) v_w^3 \quad (1)$$

式中: $P_{wt}$ 为风力机捕获的功率; $C_p$ 为风能利用系数,代表风力机从气流动能中转换能量的大小程度,是桨距角 $\beta$ 与叶尖速比 $\lambda$ 的函数,当桨距角不变时,风能利用系数 $C_p$ 与叶尖速比 $\lambda$ 的关系可由式(2)给出; $\rho$ 为气体密度; $R$ 为风轮半径; $v_w$ 为当前风速。

$$C_p(\beta, \lambda) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda}} + C_6 \lambda \quad (2)$$

式中: $C_1$ — $C_6$ 为与双馈风机物理特性有关的常数; $\lambda = \omega_r R / v_w$ ,即风轮叶片的叶尖圆周速度转速与风速的比值, $\omega_r$ 为风机转子角速度。

$\lambda$ 与 $C_p$ 的关系通常由一簇表征风力机特性的曲线表示,如图2所示。由图2可以看出,随着桨距角的减小, $C_p$ 逐渐增大。一般在发电机转速不超过上限1.3倍额定值时,桨距角 $\beta$ 控制不动作,此时 $\beta = 0^\circ$ ,风力机所捕获到的功率最大。双馈风机的轴系结构如图3所示。双馈风机的机械传动部分由低速轴、齿轮箱与高速轴组成。低速轴与风轮相连,高速轴直接与感应电机转子相连。风力机即为双馈风机的原动机,为感应电机提供机械能。

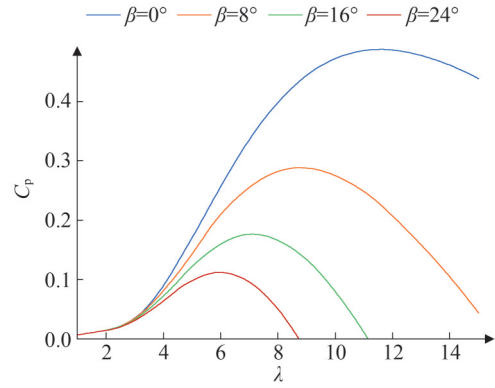


图2  $C_p$ 与 $\lambda$ 函数关系

Fig.2 Functional relationship between  $C_p$  and  $\lambda$

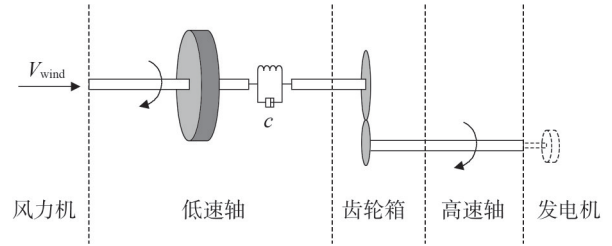


图3 双馈风机轴系模型

Fig.3 Shafting model of doubly-fed wind turbine

本研究重点在于双馈风机的有功功率响应特点,因此采用单质块模型,该模型适用于暂态稳定分析和控制,如式(3)所示<sup>[22]</sup>。双馈型异步感应电机与普通异步发电机类似,模型直接由式(4)给出。

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P_m - P_e}{2H_{wind} \omega_r} \quad (3)$$

式中: $P_m$ 为机械功率; $P_e$ 为电磁功率; $H_{wind}$ 为风机惯性时间常数。

$$\begin{cases} \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qs}}{dt} = v_{qs} + R_s i_{qs} - \psi_{ds} \\ \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{ds}}{dt} = v_{ds} + R_s i_{ds} + \psi_{qs} \\ \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{qr}}{dt} = v_{qr} - R_r i_{qr} - s_0 \psi_{dr} \\ \frac{1}{\omega_s} \frac{d\psi_{dr}}{dt} = v_{dr} - R_r i_{dr} + s_0 \psi_{qr} \\ \psi_{qs} = -X_s i_{qs} + X_m i_{qr} \\ \psi_{ds} = -X_s i_{ds} + X_m i_{dr} \\ \psi_{qr} = X_r i_{qr} - X_m i_{qs} \\ \psi_{dr} = X_r i_{dr} - X_m i_{ds} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $v_{ds}$ 、 $v_{qs}$ 分别为定子侧电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量标么值; $v_{dr}$ 、 $v_{qr}$ 分别为转子侧电压的 $d$ 、 $q$ 轴分量标么值; $i_{ds}$ 、 $i_{qs}$ 分别为定子侧电流的 $d$ 、 $q$ 分量标么值; $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$ 分别为转子侧电流的 $d$ 、 $q$ 分量标么值; $\psi_{ds}$ 、 $\psi_{qs}$ 、 $\psi_{dr}$ 、 $\psi_{qr}$ 分别为定子侧与转子侧磁链的 $d$ 、 $q$ 分量标么值; $R_s$ 与 $R_r$ 分别为定子侧与转子侧电阻; $X_m$ 、 $X_s$ 和 $X_r$ 分别为双馈风机感应电机的励磁电抗与定子、转子电抗; $\omega_s$ 为定子磁场旋转角速度; $s_0$ 为转差率。

### 1.2 换流器

双馈风机的定子与电网直接相连,转子则通过AC-DC-AC线路与电网相连。两个换流器中,与风机转子较近的换流器称为转子侧换流器(rotor side converter, RSC),输入控制变量为定子侧有功与无功,负责控制风机输出的有功功率与无功功率。与风机并网点较近的换流器被称为网侧换流器(grid side converter, GSC),输入控制变量为直流母线电压与并网点无功,负责维持直流母线电压,保证风机多发有功。两个换流器的结构如图4所示,可见风机定转子、RSC、GSC、直流母线、滤波电感与电网之间的连接关系。图中 $P_s$ 、 $Q_s$ 为定子汇入电网的有功与无功功率, $P_r$ 、 $Q_r$ 为转子输出的有功与无功功率, $P_g$ 、 $Q_g$ 为转子经换流器汇入电网的实际有功与无功功率。

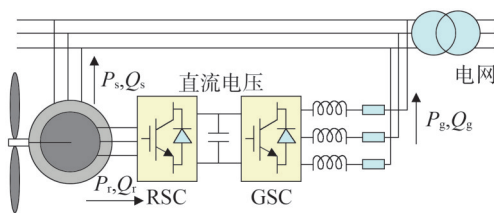


图4 换流器电路结构

Fig.4 Converter circuit structure

换流器通过PWM波控制桥臂电力电子器件开关,以达到整流与逆变的作用,由于其电磁暂态过程完成时间在微秒级,而频率暂态过程时间尺度在秒级以上,故在本研究中可忽略其触发、熄弧过程,将其看为理想开关。同时,由于本文的分析只考虑频率暂态过程,且已有相关研究<sup>[23]</sup>表明与网侧换流器及其控制器相关的特征根均远离虚轴,故忽略换流器电磁暂态过程,基于换流器模型<sup>[22]</sup>将 $d$ 轴与定子磁链方向重合,并推导得到通用模型如式(5)和式

(6)所示。

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = v_d - v_{dg} - ri_d + \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} = v_q - v_{qg} - ri_q - \omega Li_d \\ v_{dc} C_w \frac{dv_{dc}}{dt} = P_r - P_g - \frac{v_{dc}^2}{r_{loss}} \end{cases} \quad (5)$$

$$P_g = v_d i_d + v_q i_q \quad (6)$$

式中: $v_{dc}$ 为直流电容电压; $r$ 和 $L$ 分别为GSC滤波器的电阻和电抗; $i_d$ 、 $i_q$ 分别为GSC输出电流的 $d$ 轴、 $q$ 轴分量; $v_d$ 、 $v_q$ 分别为GSC输出电压的 $d$ 轴、 $q$ 轴分量; $v_{dg}$ 、 $v_{qg}$ 分别为并网电压的 $d$ 轴、 $q$ 轴分量; $C_w$ 为直流电容器; $P_g$ 为GSC输出的有功功率; $P_r$ 为风机转子输出的有功功率; $r_{loss}$ 为GSC的等效电阻; $\omega$ 为转差频率。

### 1.3 控制系统

双馈风机最常见的控制方式为MPPT。其最大功率跟踪曲线可大致分为如图5所示的5个控制区间。A点之前的区间内,发电机转矩维持为0,此时因为风速太小,阻尼过大导致能量转换效率低或风轮未加速到并网转速,双馈风机未并网运行,风机转子卡死;BC段为最大功率跟踪区间,此时风机并网通过调整转子转速以风能利用系数曲线最大点运行,风机转矩与转速近似呈3次方关系,桨距角维持在 $0^\circ$ 以实现最大风能的捕捉,风机有功功率如式(7)所示<sup>[24]</sup>。

$$P_{e\_MPPT} = k_{opt} \omega_r^3 \quad (7)$$

式中: $k_{opt}$ 为最大功率点控制增益, $k_{opt} = 0.5\rho\pi R^5 C_{pmax}/\lambda^3$ ,其中 $C_{pmax}$ 为最大风能利用系数。

D点之后的区间为恒功率阶段,此时双馈风机输出功率受换流器电力电子器件容量的限制,需要增大桨距角以维持输出有功功率不变。AB段为机组未并网状态到最大功率跟踪状态的线性过渡阶段,CD段为最大功率跟踪状态与恒功率状态间的线性过渡阶段,这两个阶段用于平滑3种控制状态转换带来的转矩阶跃波动,减小状态转换时风机受到的冲击电流,满足实时稳态控制的需求。

对RSC和GSC控制进行建模。RSC采用定子磁链定向控制以实现定子有功功率和无功功率的解耦。在定子磁链定向控制中,往往通过 $dq$ 变换转化采样得到的三相电流以实现有功与无功的解耦控制,可以独立控制风机有功功率输出与无功功率输出,以便根据运行场景灵活调节,这也是双馈风机相

对于功率控制无法解耦的同步机的优点。RSC 的双环控制如图 6 所示,  $P_s$ 、 $Q_s$  分别为定子有功与无功功率的测量值,  $P_s^*$ 、 $Q_s^*$  分别为定子有功与无功功率的给定值,  $i_{abc}$  为转子 abc 三相电流,  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  为 dq 坐标系下的转子 d 轴与 q 轴电流,  $i_{dr}^*$ 、 $i_{qr}^*$  为 dq 坐标系下的转子 d 轴与 q 轴电流参考值,  $v_{dr1}$ 、 $v_{qr1}$  为 PI 控制器输出的 d 轴与 q 轴电压,  $v_{dr2}$ 、 $v_{qr2}$  分别为 d 轴与 q 轴的解耦补偿电压。转子端三相电流进行 dq 分解后, 与有功无功设定值相比较, 生成电压调节偏差信号, 最后经 PWM 调制后输入 RSC 电力电子开关中。传统控制方式中, 期望风机充分发挥其发电能力, 期望其输出的无功为 0。

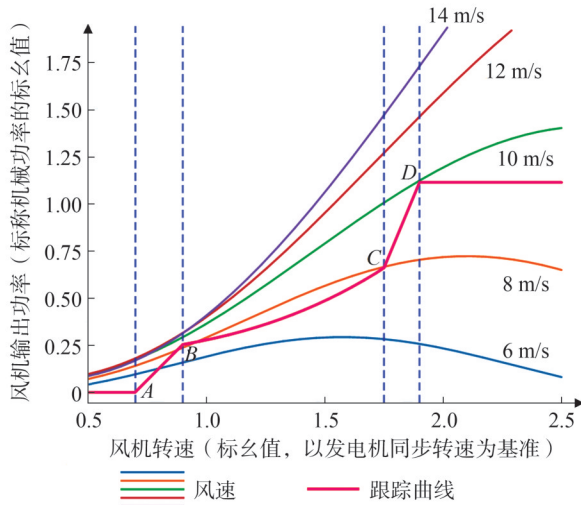


图5 双馈风机最大功率跟踪曲线

Fig.5 Maximum power point tracking curve of doubly-fed wind turbine

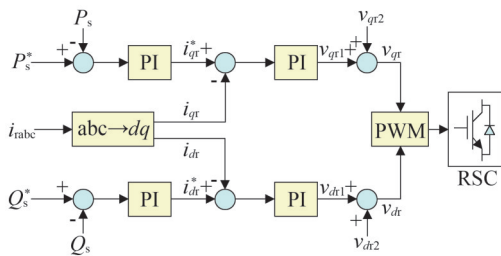


图6 RSC 控制

Fig.6 RSC control

与 RSC 类似, GSC 也采取双环 PI 控制。首先采样并网电压, 将其 dq 分解后, 与直流母线电压偏差信号、注入并网点的无功功率偏差信号作差, 得到

并网电压的 d 轴、q 轴调节信号。GSC 的双环控制如图 7 所示。图中,  $v_{dc}^*$  为直流电压参考值,  $v_{dc}$  为直流电压测量值,  $v_{dg1}$  与  $v_{qg1}$  分别为 PI 控制器输出的 d 轴、q 轴电压,  $v_{dg}$  与  $v_{qg}$  分别为 d 轴、q 轴最终输出电压,  $i_{gabc}$  为网侧 abc 三相电压,  $i_{dg}$  与  $i_{qg}$  分别为网侧 d 轴、q 轴电流,  $i_{dg}^*$  与  $i_{qg}^*$  分别为网侧 d 轴、q 轴电流参考值,  $Q_g^*$  为网侧无功功率参考值,  $L_g$  为网侧滤波器电感。同样地, 期望充分发挥换流器容量, 将换流器容量全部用来传输有功, 一般也期望 GSC 注入电网的无功功率为 0。

采用上述控制后, 双馈风机可以更加灵活的调整其有功出力, 这为双馈风机参与抑制电网频率波动创造了基本条件。但是, 双向变流器的结构和控制也比同步电机复杂, 这给其参与频率控制带来了新的问题。

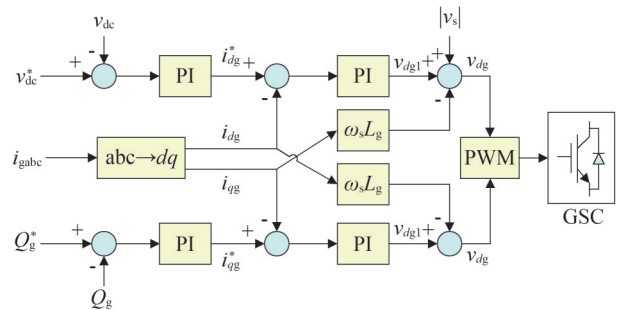


图7 GSC 控制

Fig.7 GSC control

## 2 含双馈风机的电力系统一次调频模型

### 2.1 风机一次调频模型

电力系统的惯量特征, 体现了旋转元件利用动能的吞吐来缓冲功率不平衡的能力。由于双馈风机的输出功率受控于 MPPT 策略, 且其转速与系统频率呈解耦状态, 因此风机本身并不具备天然的惯性响应特性。不过, 通过引入额外的辅助控制环节, 可以在系统频率波动时引导风机转子释放或吸收动能, 从而实现模拟惯性响应控制 (inertial response control, IRC)。当前, 双馈风机实现 IRC 的途径主要有两种: 调整最大功率跟踪曲线以模拟惯性行为, 或利用比例微分 (proportional derivative, PD) 控制器引入频率反馈信号。这些控制器的输出信号会叠加在 MPPT 生成的有功参考值之上。在基于 PD 控制的

方案中,微分环节用于模拟惯性响应,而比例环节则实质上模拟了一次调频功能。与传统同步机的一次调频机制不同,双馈风机始终维持在MPPT运行模式下,其频率支撑能量源于转子的旋转动能而非调速器调节的机械功率,因此,双馈风机提供的一次调频支撑具有明显的暂态性和短时性。

IRC结构如图8所示,图中, $f$ 为系统频率, $f_{ref}$ 为参考系统频率, $v_w$ 取决于MPPT的有功功率参考值 $P_{ref}$ , $k_d$ 为模拟传统发电机惯性响应的导数增益, $k_p$ 为惯量响应控制中支持一次调频的比例增益。具体的数学模型如式(8)所示。

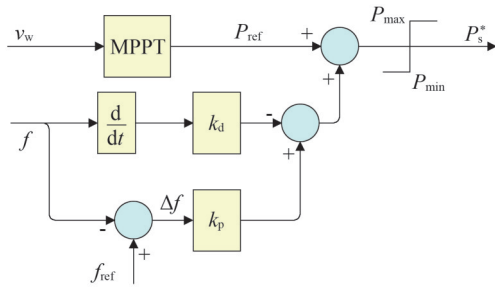


图8 IRC结构

Fig.8 IRC structure

$$\begin{cases} P_s^* = P_{ref} + P_{IRC} \\ P_{IRC} = k_p(f_{ref} - f) - k_d \frac{df}{dt} + P_{ref} \end{cases} \quad (8)$$

双馈风电机组的数学模型涵盖了风轮机、机械传动链、双馈感应电机、背靠背功率变换器以及相应的控制单元。基于系统整体模型的特征值分析结果显示,与转子转速相关的特征根主要分布在虚轴附近,而其余特征根则位于远离虚轴的区域。这一分布特性表明,当系统面临频率扰动时,转子转速的动态变化将起到决定性的主导作用。因此,当仅考虑频率动态响应特性时,可以得到双馈风机的简化模型如式(9)所示。

$$\begin{cases} \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{P_m - P_e}{2H_{wind}\omega_r} \\ P_m = 0.5\rho\pi R^2 C_p \frac{v_w^3}{P_n} \\ P_e = (1-d) \frac{k_{opt}\omega_r^3}{P_n} - (f - f_{ref})k_p - \frac{df}{dt}k_d \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_n$ 为双馈变流器的额定功率; $d$ 为脱载系数,将双馈风机的最大有功功率乘以 $(1-d)$ ,以保留一定的备用容量参与一次调频。此时 $P_e$ 和 $\omega_r$ 近似为三

次关系,桨距角维持在 $0^\circ$ 以捕获最大风能。

考虑一般的非线性系统满足

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = g(X, U) \\ Y = h(X, U) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $g$ 和 $h$ 为非线性函数; $X$ 为状态变量矩阵; $Y$ 为输入变量矩阵; $U$ 为输出变量矩阵。利用泰勒级数展开,可以得到式(10)在初始平衡点的一阶近似线性化增量方程为

$$\begin{cases} \Delta\dot{X} = A\Delta X + B\Delta U \\ \Delta Y = C\Delta X + D\Delta U \end{cases} \quad (11)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 均为系数矩阵,满足 $A=\partial g/\partial X$ , $B=\partial g/\partial U$ , $C=\partial h/\partial X$ , $D=\partial h/\partial U$ 。

再对式(11)进行拉普拉斯变换可得

$$\Delta Y = [C(sI - A)^{-1}B + D]\Delta U \quad (12)$$

式中: $I$ 为单位矩阵。

选取转子转速为状态变量 $X = [\omega_r]$ ,频率与频率的变化量为输入变量 $U = [f, df/dt]$ ,风机有功功率为输出变量 $Y = [P_e]$ ,可得

$$\begin{cases} A = [(k_m - k_e)/2H_{wind}\omega_r] \\ B = [k_p/2H_{wind}\omega_r, k_d/2H_{wind}\omega_r] \\ C = [k_e] \\ D = [-k_p, -k_d] \\ k_m = \partial P_m/\partial\omega_r = 0.5\rho\pi R^2 v_w^3 \partial C_p/\partial\omega_r \\ k_e = \partial P_e/\partial\omega_r = 3(1-d)k_{opt}\omega_r^2 \end{cases} \quad (13)$$

可得一次调频期间双馈风机有功功率偏差 $\Delta P_e$ 与系统频率偏差 $\Delta f$ 之间的关系为

$$\frac{\Delta P_e}{\Delta f} = \frac{2H_{wind}\omega_r s - k_m}{2H_{wind}\omega_r s - (k_m - k_e)} (k_p + k_d s) \quad (14)$$

## 2.2 全电力系统频率响应模型

针对高比例双馈风机接入下的电力系统频率响应问题,在进行频率稳定性评估时,常规做法是聚焦于全网有功功率的平衡,忽略有功功率在网络中的分布细节。基于此简化思路,得到一次调频模型及数学表达分别如图9和式(15)所示<sup>[25]</sup>。

$$\begin{cases} 2(1-K)H_{sys}\Delta f s = (1-K)\Delta P_G + K\Delta P_e + \Delta P_{ess} + \Delta P_d - K_D\Delta f \\ \frac{\Delta P_G}{\Delta f} = \frac{K_{mg}(1 + F_H T_R s)}{(1 + T_R s)} K_g \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\Delta P_G$ 为常规发电机有功功率变化量; $\Delta P_{ess}$ 为储

能出力变化量; $\Delta P_d$ 为扰动引起的不平衡功率; $K$ 为双馈风机接入容量占比; $H_{sys}$ 为系统惯性时间常数; $K_D$ 为系统阻尼; $K_{mg}$ 为机械功率增益系数; $T_R$ 为汽轮机再热器时间常数; $F_H$ 为高压缸增益; $K_g$ 为同步发电机的频率偏差系数。

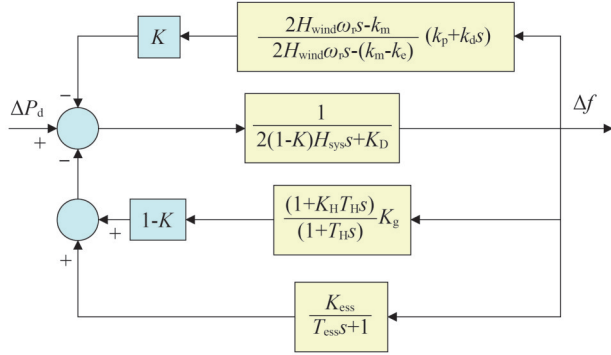


图9 系统一次调频模型

Fig.9 System primary frequency modulation model

在实际系统当中,由于风机出力的不确定性,一般需要结合储能设备进行调控。在一次调频过程中,同样也需要考虑储能设备的调频特性。当只关注频率调节时,重点考虑系统的一次调频能力评估(10~30 s 内的惯性响应阶段),此时储能荷电状态变化较小,因此忽略储能充放电约束、荷电状态约束,用一阶滞后和比例增益的乘积来描述其频率调节时的特性,如图 10 所示。储能频率响应模型可简化为

$$\frac{\Delta P_{ess}}{\Delta f} = \frac{K_{ess}}{T_{ess}s + 1} \quad (16)$$

式中: $K_{ess}$ 为储能控制增益; $T_{ess}$ 为控制时延。

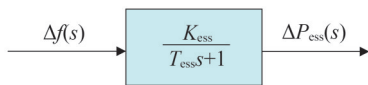


图10 储能调频传递函数示意图

Fig.10 Schematic diagram of energy storage frequency modulation transfer function

综上,可得到全系统频率响应的表达式为

$$\Delta f = \Delta P_d / [(1 - K) \frac{K_{mg}(1 + F_H T_R s)}{(1 + T_R s)} K_g + K \frac{2H_{wind}\omega_r s - k_m}{2H_{wind}\omega_r s - (k_m - k_e)} (k_p + k_d s) + \frac{K_{ess}}{T_{ess}s + 1} - K_D - 2(1 - K)H_{sys}s] \quad (17)$$

### 3 考虑频率约束的风机最大接入规模评估方法

基于建立的全系统频率响应数学模型,本文综合 RoCoF 及 SFD 两个维度的约束条件,推导风机的极限接入比例,从而确定电网可接纳的风机最大容量。图 11 展示了 RoCoF 与 SFD 的作用机制,二者分别限定了扰动初期和稳态阶段的频率波动。衡量系统受扰后暂态稳定性的一个重要指标便是频率的变化幅度。扰动伊始,由于受调频死区限制,同步机的调速器无法立即响应,而负荷功率与频率正相关且维持在最大值,此时系统仅由惯量维持平衡,使得 RoCoF 在此时刻最大。因此,分析时通常直接采用扰动触发时刻的 RoCoF 来衡量系统的暂态频率稳定性。依据 GB/T 14285—2023《继电保护和安全自动装置技术规程》,国内通常将 RoCoF 继电器的动作限值设定在 $\pm(0.05\sim 0.1)$  Hz/s 范围内。在实际应用中,具体的整定值还需依据系统的具体运行条件、保障大型火电机组安全的需求、装置性能及保护定值等因素综合确定。

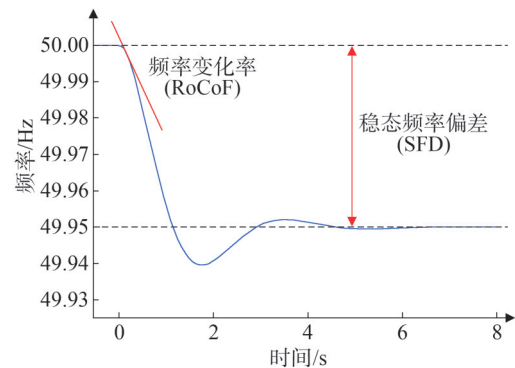


图11 RoCoF 与 SFD

Fig.11 RoCoF and SFD

假设系统发生幅度为  $P_D$  的有功功率阶跃扰动,根据拉普拉斯初值定理,即  $\Delta P_d / \Delta f = P_D / s$  时,可以得到式(18)。

$$\begin{aligned} R_{max} &= \lim_{t \rightarrow +0} \frac{df}{dt} = \lim_{t \rightarrow +0} \frac{d\Delta f}{dt} \\ &= \lim_{s \rightarrow \infty} s(s\Delta f) = \frac{P_D}{2H_{sys} + K(k_d - 2H_{sys})} \end{aligned} \quad (18)$$

当取系统最大 RoCoF 为  $\delta$  时,考虑最大 RoCoF 的系统最大风机接入规模如式(19)所示。

$$K_{\max, \text{RoCoF}} = \frac{2H_{\text{sys}} - \frac{P_D}{\delta}}{2H_{\text{sys}} - k_d} \quad (19)$$

式中： $K_{\max, \text{RoCoF}}$ 为考虑 RoCoF 限制的系统最大风机接入规模。分析可知，在引入 RoCoF 限制条件后，风机的极限接入能力与系统总惯量及频率扰动幅度存在显著的相关性。系统惯量水平越高，该约束条件下允许接入的最大风机规模受频率扰动变化率的影响越小。

SFD 定义为扰动平息后系统恢复的稳态频率与初始频率之差，该指标直接体现了系统一次调频能力的优劣。依据国家标准 GB/T 15945—2008《电能质量电力系统频率偏差》，在冲击负荷作用下，系统频率的偏差限值被规定为±0.2 Hz。在实际设定 SFD 阈值时，需统筹兼顾源、荷两侧设备的功能特性、安全性以及全系统的运行安全。

同样地，当系统遭受大小为  $P_D$  的功率阶跃扰动，即  $\Delta P_d/\Delta f = P_D/s$  时，根据拉普拉斯终值定理可以得到式(20)。

$$R_{\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Delta f = \lim_{s \rightarrow 0} \Delta f = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta f$$

$$= \frac{P_D}{(K_{\text{ess}} + K_D + K_g K_{\text{mg}} (1 - K)) + \frac{K k_m k_p}{(k_m - k_e)}} \quad (20)$$

当取系统最大 SFD 为  $\varepsilon$  时，考虑最大 SFD 的系统最大风机接入规模可由式(21)给出。

$$K_{\max, \text{SFD}} = \frac{K_{\text{ess}} + K_D + K_g K_{\text{mg}} - \frac{P_D}{\varepsilon}}{K_g K_{\text{mg}} - \frac{k_m k_p}{k_m - k_e}} \quad (21)$$

从式(21)可看出，考虑 SFD 下的最大风机接入规模与系统一次调频过程当中各个设备的控制系数、风机减载水平密切相关，而与系统惯量的关系较小。综合考虑上述两种约束，取二者中的最小值作为风机最大接入规模，即

$$K_{\max} = \min(K_{\max, \text{RoCoF}}, K_{\max, \text{SFD}}) \quad (22)$$

综上，本章建立综合评估系统最大风机接入规模的量化指标，该指标兼顾了稳态平衡与系统惯量对风机接入的支撑作用，可为风机最大接入规模评估提供有效依据。

#### 4 算例分析

为验证上述评估指标的有效性，并分析不同负

载扰动与风机控制参数对系统风机接入规模的影响，分别针对 IEEE 9 节点系统与 IEEE 39 节点系统进行仿真分析，按照 RoCoF 与 SFD 约束计算不同参数下最大风机接入规模，并针对华东电网分析双馈风机控制参数的变化对系统频率的影响。

##### 4.1 IEEE 9 节点系统测试与分析

测试系统的结构如图 12 所示，该系统以 IEEE 9 节点典型算例为基础，在 Bus 3 端并入了一个 150 MW 风电场和一个 50 MW 储能电站。在建模过程中，风电场被简化为由若干台同参数双馈风机组成的聚合模型，其中单台机组额定功率为 1.5 MW，具体模型参数调用自 MATLAB/Simulink R2020a 标准库。为模拟 MPPT 工况，稳态风速置为 9 m/s。此外，设定阻尼系数  $K_D=0.1$ ，RoCoF 及 SFD 的限制指标分别为 0.05 Hz/s 和 0.2 Hz。仿真中，储能调频增益为  $K_{\text{ess}} = 0.04$ ，并将 Bus 5 作为扰动施加位置。

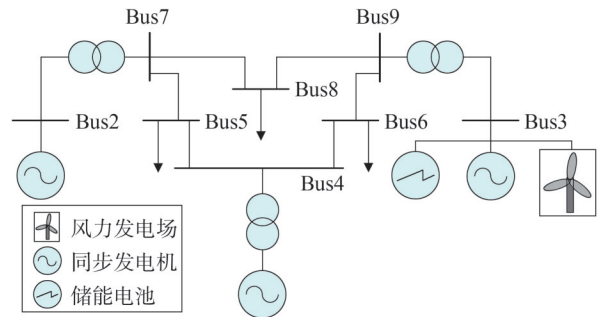


图 12 测试系统结构图

Fig.12 Test system structure diagram

具体地，设置场景如下。

场景 1：固定惯性控制环节中的比例和微分(导数)增益常数，通过改变外部负载扰动的幅度来监测系统频率的动态变化。基于文献[26]提及的灵敏度分析策略以及现网设备的典型参数，选取  $k_d = 1$ ， $k_p = 10$  作为基准参数。改变负载扰动  $P_D$  分别为 8%、10% 和 12%。

场景 2：锁定惯性响应控制中的比例增益及负载扰动量，单一变量调节导数增益常数，以探究其对频率稳定性的作用。具体实施方案为：设定系统负载扰动  $P_d$  为系统负载的 10% 不变。 $k_d = 1$ ， $k_p$  分别设为 0.5 和 10。

在场景 1 中，根据式(18)一式(20)计算出  $K_{\max}$

分别为 22.07%、21.56% 和 19.58%,详细数据如表 1 所示。从表 1 中可以看出,由于受到 RoCoF 和 SFD 的限制,负载扰动规模越大, $K_{max}$  就越小。此外,当负载扰动较小(8%)时, $K_{max,RoCoF}$  的值略大于  $K_{max,SFD}$ ,风机接入规模由  $K_{max,SFD}$  主导;而当负载扰动增大时, $K_{max,SFD}$  显著增大,风机接入规模由  $K_{max,RoCoF}$  主导。可以看出,扰动较小时,系统达到平衡时的稳态精度约束限制了系统风机规模;而当扰动较大时,系统功率缺额更加明显,RoCoF 约束快速收紧,暂态安全风险成为瓶颈。分别对应修改双馈风机的个数,记录系统在负载扰动下的频率响应,频率响应曲线如图 13 所示。可以看出,在不同的  $P_D$  下 SFD 在 0.2 Hz 左右,RoCoF 小于 0.05 Hz/s。时域仿真结果证明了所提模型的有效性。

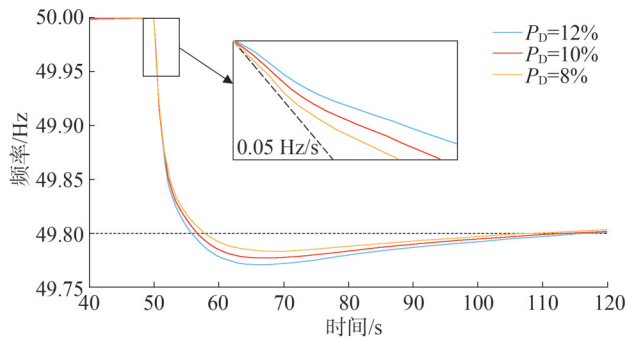


图 13 不同  $P_D$  下的频率响应曲线

Fig.13 Frequency response curves under different  $P_D$

表 1 不同场景下的  $K_{max}$  计算结果

Table1 Calculation results of  $K_{max}$  under different scenarios

场景	参数配置	$K_{max,RoCoF}/\%$	$K_{max,SFD}/\%$	$K_{max}/\%$
1	$P_D=8\%$	23.54	22.07	22.07
	$P_D=10\%$	21.56	21.80	21.56
	$P_D=12\%$	19.58	20.50	19.58
2	$k_p = 0$	20.10	17.93	17.93
	$k_p = 5$	19.58	23.70	19.58
	$k_p = 10$	21.56	28.90	21.56

在场景 2 中,同理可得  $K_{max}$  分别为 17.93%、19.58% 和 21.56%,详细数据如表 1 所示。从表 1 中可知,随着  $k_p$  增大, $K_{max,SFD}$  从 17.93% 显著增大至 28.90%,可以看出  $k_p$  能够直接提升系统调频能力。

而  $K_{max,RoCoF}$  随参数变化不大,这是因为 RoCoF 的大小与系统惯量和积分控制系数  $k_i$  相关,而与  $k_p$  无关。将双馈风机的投运数量分别设定为 51 台、57 台及 64 台,并监测系统在遭受扰动后的频率动态轨迹。如图 14 所示,RoCoF 始终维持在 0.05 Hz/s 的阈值范围内,而 SFD 则逼近其约束边界。此外,数据表明  $K_{max}$  随参数  $k_p$  的增加而呈现上升趋势,这证实了双馈风机对系统的频率支撑强度得到了显著提升。

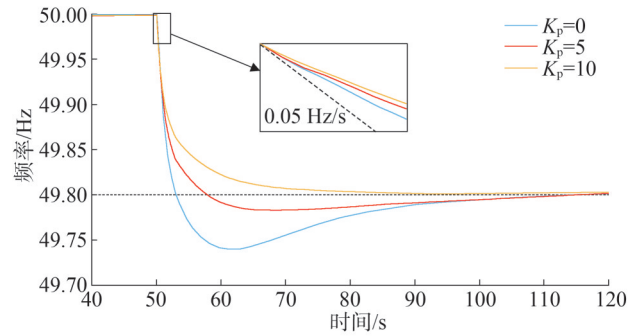


图 14 不同  $k_p$  下的频率响应曲线

Fig.14 Frequency response curves at different  $k_p$

实验结果表明,双馈风机的主动调频对改善 RoCoF 及 SFD 具有显著作用。此外,负载变化的剧烈程度、频率控制参数的设定值以及系统惯性常数的大小,被确认为影响频率稳定性的核心要素。相比仅考虑单一约束,两种约束的风机接入规模综合评估能够有效综合负载变化水平、风机控制参数、系统惯量等因素,为系统频率稳定与新能源消纳提供更安全稳定的参考依据。时域仿真验证了所提模型和风机最大接入规模评估方法的有效性。

#### 4.2 IEEE 39 节点系统测试与分析

进一步地,采用 IEEE 39 节点系统进行仿真测试与结果分析。该系统基于 IEEE 39 节点标准系统,将节点 30 处火电机组替换为 800 MW 风电场,并设定风速为 12 m/s;节点 34 处设定为 200 MW 储能电站,并保留其余火电机组,双馈风机与储能模型及其参数与 9 节点系统保持一致,负载扰动设置在 39 节点。基于实际电网当中双馈风机与储能的典型调频参数配置,选取  $k_i = 1, k_p = 10$ 。改变负载扰动  $P_D$  分别为 8%、10%、12% 和 14% 进行仿真测试,设定系统 RoCoF 最大为 0.05 Hz/s,频率稳态偏差最大为 0.2 Hz,计算  $K_{max}$  结果如表 2 所示。

表2 不同负荷扰动下 $K_{\max}$ 计算结果  
Table2 Calculation results of  $K_{\max}$  under different disturbances 单位:%

指标	$P_D = 8$	$P_D = 10$	$P_D = 12$	$P_D = 14$
$K_{\max, \text{RoCoF}}$	43.28	35.30	27.33	19.35
$K_{\max, \text{SFD}}$	38.07	32.89	27.71	22.53
$K_{\max}$	38.07	32.89	27.33	19.35

由表2可以看出,当负荷扰动从8%增加到14%时, $K_{\max}$ 从38.07%减小到19.35%, $K_{\max, \text{RoCoF}}$ 与 $K_{\max, \text{SFD}}$ 都呈线性减少趋势,并且在负荷扰动较小时SFD对系统风机接入规模占主导作用,在扰动较大时由RoCoF约束生效。可以看出,RoCoF对系统扰动相对更加敏感,与9节点算例当中得到的结论一致。此外,仿真结果都满足SFD不大于0.2 Hz, RoCoF小于0.05 Hz/s,体现了提出模型的有效性。

#### 4.3 华东电网算例分析

使用华东电网实际算例,分析不同控制参数变化对系统频率的影响,并验证模型的有效性。选择华东新能源大发场景,在电力系统仿真软件PSD-BPA当中设置故障类型为直流线路闭锁,分别修改双馈风机的下垂控制系数 $k_f$ 与虚拟惯量控制系数 $k_i$ ,选择某一节点频率作为系统频率,观察频率变化情况。

首先,针对双馈风机是否参与调频进行仿真,验证双馈风机参与调频对频率支撑的作用,仿真得到的频率响应曲线如图15所示。从图15中可以看出,在双馈风机不参与调频的情况下,频率响应曲线下降速率更大,在15s左右达到最大频率偏差,最大频率偏差甚至超过了0.6 Hz。相比之下,参与调频情况下的频率下降速率更慢,RoCoF与SFD的值显著小于不参与调频的情况。这说明将双馈风机的惯量纳入系统调频控制,能够有效起到频率支撑的作用。

在双馈风机参与调频的条件下,保持故障类型不变,分别设置故障发生时的下垂控制系数为10、20、30,得到频率响应曲线如图16所示。可以看出当故障发生时,3条曲线走向没有太大区别,而当 $t=3$ s左右时曲线有了较为明显的差异。 $k_f=10$ 的曲线在 $t=10$ s时达到频率偏差最大值,而另外两条曲

线在 $t=8$ s时的频率偏差开始减小。可以看出,随下垂控制系数减小,RoCoF与SFD的值会显著增大,下垂控制系数的增大有利于提高系统的频率支撑能力。

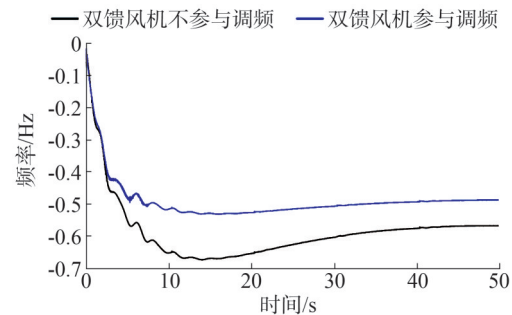


图15 双馈风机参与调频对比频率响应曲线

Fig.15 Comparison of frequency response curves for DFIG participating in frequency regulation

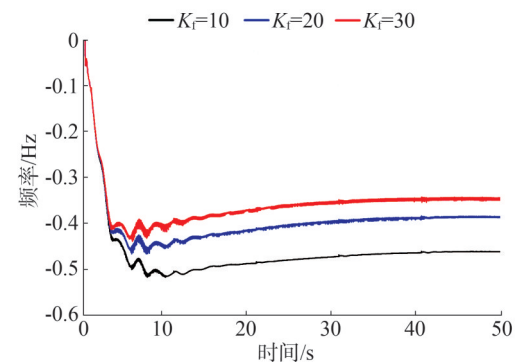


图16 不同下垂控制系数下的频率响应曲线

Fig.16 Frequency response curves under different  $k_f$

此外,调整故障不变时的虚拟惯量控制系数,得到频率响应曲线如图17所示。从图17中可以看出, $k_i=10$ 的情况下,在 $t=15$ s左右时达到最大频率偏差,存在显著的超调;另外两条曲线的频率偏差增大速率更为平缓,3条曲线最终收束于同一稳态频率。可以看出,虚拟惯量控制系数的增大能够有效减小RoCoF,而在相同故障下,虚拟惯量控制系数不会影响SFD的值。根据上述仿真结果可以看出,风机频率响应控制参数能够有效影响系统频率稳定性,并且不同控制系数对RoCoF和SFD的影响各有侧重与区别。

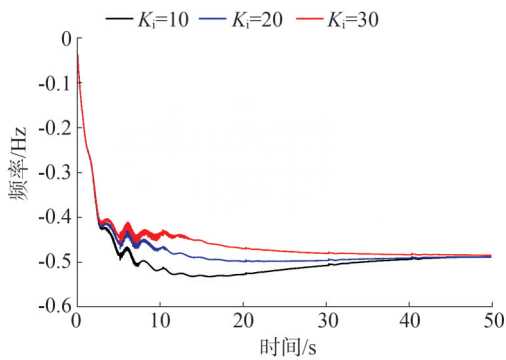


图 17 不同虚拟惯量控制系数下的频率响应曲线

Fig.17 Frequency response curves under different  $k_i$

## 5 结束语

针对双馈风机大规模接入电网场景,构建含双馈风机的电力系统一次调频模型,提出基于 RoCoF 和 SFD 约束的风机最大接入规模评估方法。通过建立考虑风机惯性响应的系统频率响应模型,验证所提方法能有效评估不同工况下的风机接入上限,并揭示系统惯性、负载扰动及控制参数对频率稳定性的支撑作用。在 IEEE 9 节点与 IEEE 39 节点系统上的测试结果表明,双馈风机参与系统一次调频能够改善 RoCoF 和 SFD。后续可对随机风速变化、多级交互等场景进行系统风电接入规模评估的进一步研究。

## 参考文献

[1] 李璐,张泽端,毕贵红,等.“双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J].电力系统保护与控制,2024,52(12):69-81.  
LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69-81.

[2] 肖杨,丁涛,黄海煜,等.基于仿射可调鲁棒的非预期全场景可行机组组合[J].中国电机工程学报,2024,44(16):6278-6294.  
XIAO Yang, DING Tao, HUANG Haiyu, et al. Non-anticipative all-scenario-feasible unit commitment based on affinely adjustable robust model [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6278-6294.

[3] 刘与铨,丁涛,肖杨,等.基于拉格朗日松弛及子问题解耦动态规划的周机组组合快速求解方法[J].电力自动化设备,2025,45(6):173-181.  
LIU Yuzheng, DING Tao, XIAO Yang, et al. Fast solving method for weekly unit commitment based on Lagrangian relaxation and subproblem decoupling dynamic programming [J]. Electric Power

Automation Equipment, 2025, 45(6): 173-181.

[4] 刘奕辰,肖红谊,刘晓宏,等.考虑绿证交易及碳排放约束的含风光储微网低碳优化调度[J].浙江电力,2024,43(8):66-73.  
LIU Yichen, XIAO Hongyi, LIU Xiaohong, et al. Low-carbon optimal scheduling for hybrid wind / PV / storage microgrids considering GEC trading and carbon emission constraints [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(8): 66-73.

[5] 李鲁阳,王方政,陈磊,等.双馈风机对电网频率扰动的动态响应建模与分析[J].电力系统自动化,2024,48(9):75-85.  
LI Luyang, WANG Fangzheng, CHEN Lei, et al. Modeling and analysis of dynamic response to frequency disturbance in power grid from doubly-fed wind turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(9): 75-85.

[6] 施星宇,傅俊诚,李泽文,等.基于数据驱动鲁棒控制的双馈风机区间振荡附加阻尼控制方法[J].中国电机工程学报,2025,45(7):2633-2645.  
SHI Xingyu, FU Juncheng, LI Zewen, et al. An inter-area oscillation supplementary damping control for DFIG wind farm based on data-driven robust control [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(7): 2633-2645.

[7] DU K J, MA X P, ZHENG Z X, et al. LVRT capability improvement of DFIG-based wind turbines with a modified bridge-resistive-type SFCL [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 5603005.

[8] 程静,苏乐,岳雷.双馈风电并网系统的宽频振荡机理分析与抑制[J].电力系统保护与控制,2023,51(12):1-13.  
CHENG Jing, SU Le, YUE Lei. Mechanism analysis and suppression of broadband oscillation in a DFIG wind power grid-connected system [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(12): 1-13.

[9] 周涛,向永建,杜可可,等.风机与储能参与电网调频协调控制技术综述[J].浙江电力,2024,43(7):45-55.  
ZHOU Tao, XIANG Yongjian, DU Keke, et al. An overview of a coordinated control technique for wind turbines and energy storage participating grid frequency regulation [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 45-55.

[10] MA J, SHEN Y Q. Stability assessment of DFIG subsynchronous oscillation based on energy dissipation intensity analysis [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(8): 8074-8087.

[11] 李腾辉,李卫东,申家锴,等.双馈风电机组利用转子动能进行一次调频能力动态估计[J].电力系统自动化,2024,48(10):109-117.  
LI Tenghui, LI Weidong, SHEN Jiakai, et al. Dynamic estimation of primary frequency regulation capability of doubly-fed wind turbines using rotor kinetic energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(10): 109-117.

[12] 王若谷,李恒毅,高欣,等.基于输入-状态稳定性理论的双馈风机稳定性分析[J].电力工程技术,2022,41(2):83-89.

- WANG Ruogu, LI Hengyi, GAO Xin, et al. Stability analysis of DFIG-based wind turbine via input to state stability theory [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 83-89.
- [13] 李颖颖, 王德林, 范林源, 等. 双馈风电机组限功率运行下频率稳定的变系数控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2910-2917. LI Yingying, WANG Delin, FAN Linyuan, et al. Variable coefficient control strategy for frequency stability of DFIG under power-limited operation [J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2910-2917.
- [14] 李梦杰, 谢震, 高翔, 等. 弱电网下双馈风电机组混合功率同步控制策略及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8388-8400. LI Mengjie, XIE Zhen, GAO Xiang, et al. Hybrid power synchronization control strategy of DFIG-based wind turbines and its stability analysis under weak grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8388-8400.
- [15] 崔森, 颜湘武, 王雅婷, 等. 考虑源-荷功率随机波动特性的双馈风力发电机一次频率平滑调节方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊1): 143-154. CUI Sen, YAN Xiangwu, WANG Yating, et al. A smooth adjustment method for primary frequency of doubly-fed wind generators considering random fluctuation characteristics of source-load power [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 143-154.
- [16] 黎静华, 宋诚鑫, 兰飞. 基于参数模糊推理的风机虚拟惯量优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 125-133. LI Jinghua, SONG Chengxin, LAN Fei. Optimal control strategy of virtual inertia for wind turbine based on fuzzy inference of parameters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 125-133.
- [17] 沈雅琦, 马静. 含虚拟惯量的双馈风电机组动态能量模型及振荡稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5506-5523. SHEN Yaqi, MA Jing. Study on dynamic energy model of DFIG with virtual inertia control and oscillation stability analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5506-5523.
- [18] 韩金龙, 袁泉添, 江晗, 等. 基于状态反馈精确线性化的双馈异步风机最优控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3508-3518. HAN Jinlong, YUAN Xiaotian, JIANG Han, et al. Optimal control of doubly fed induction generator based on feedback linearization [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3508-3518.
- [19] 李少林, 王伟胜, 张兴, 等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 64-70. LI Shaolin, WANG Weisheng, ZHANG Xing, et al. Impact of wind power on power system frequency and combined virtual inertia control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 64-70.
- [20] 刘志坚, 刘杰, 李鹏程, 等. 基于虚拟电阻的双馈风机次同步振荡分数阶PI控制[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 12-20. LIU Zhijian, LIU Jie, LI Pengcheng, et al. Virtual resistance-based fractional-order PI control strategy for sub-synchronous oscillation in doubly-fed wind turbines [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 12-20.
- [21] 秦世耀, 代林旺, 王瑞明, 等. 考虑风电机组功率跌落和机械载荷优化的虚拟惯量控制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1665-1672. QIN Shiyao, DAI Linwang, WANG Ruiming, et al. Virtual inertia control method considering wind turbine power drop and mechanical load optimization [J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1665-1672.
- [22] 宋君喆. 双馈风机结构化建模与短路电流解析计算研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2024.
- [23] 王也, 徐茂达, 郝文波, 等. 双馈感应风机控制环节对电力系统机电小干扰稳定的影响分析[J]. 电气技术, 2019, 20(9): 31-38. WANG Ye, XU Maoda, HAO Wenbo, et al. Analysis of electromechanical small-signal stability of power system as affected by control-links of doubly fed induction generator [J]. Electrical Engineering, 2019, 20(9): 31-38.
- [24] 刘忠义. 含直驱风电机组的电力系统暂态稳定问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [25] 龚浩岳, 周勤勇, 郭强, 等. 高比例新能源接入场景电力系统频率分析模型改进与应用[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4603-4612. GONG Haoyue, ZHOU Qinyong, GUO Qiang, et al. Improvement and application of frequency analysis modules for power system in high proportion of renewable energy situation [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4603-4612.
- [26] 赵书强, 曲瀚辰, 王慧, 等. 基于转速调节的储能型双馈调相机自适应虚拟惯量控制策略[J/OL]. 电网技术, 1-13 [2025-06-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0369>. ZHAO Shuqiang, QU Hanchen, WANG Hui et al. Adaptive virtual inertia control strategy of energy storage doubly-fed condenser based on rotor speed regulation [J/OL]. Power System Technology, 1-13 [2025-06-29]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0369>.

收稿日期: 2025-04-28

修回日期: 2025-07-08

作者简介:

贾宇乔(1994), 女, 硕士, 工程师, 长期从事电力系统运行分析、大电网安全稳定控制相关技术研究工作;

张宁宇(1985), 男, 博士, 正高级工程师, 长期从事灵活潮流控制技术、海上风电并网运行技术及电网无功电压控制技术研究工作;

李 铮(1995), 男, 硕士, 高级工程师, 长期从事电力系统安全稳定分析研究工作;

刘与铮(2001), 男, 博士研究生, 从事电力系统经济运行、频率稳定控制方向研究工作;

丁 涛(1986), 通信作者(tdting15@mail.xjtu.edu.cn), 男, 博士, 教授, 从事电力系统经济运行、电力市场、能源经济等方向研究工作。

(责任编辑 娄婷婷)

# 电动汽车-储能协同的配电网双向重过载分级治理策略

李世春<sup>1,2</sup>, 袁传州<sup>1,2\*</sup>, 谢佳宏<sup>1,2</sup>, 李泠昕<sup>1,2</sup>, 余嘉宁<sup>1,2</sup>, 王秋杰<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**针对分布式光伏及电动汽车规模化接入配电网引起的变压器/线路正反向重过载问题,提出一种电动汽车-储能协同优化治理配电网重过载的策略。首先,基于蒙特卡洛法生成电动汽车无序充电场景,并建立分时电价引导的电动汽车有序充电模型,同时为充分描述现实中车主无序/有序充电的选择意愿差异,搭建综合两种充电模式的负荷优化模型;构建“0.4 kV 馈线—0.4 kV 配电变压器—10 kV 馈线—10 kV 变电站”设备双向重过载逐级治理框架;基于该框架,从低电压等级至高电压等级逐步筛查异常设备并求解电化学储能配置信息;最后,以改进的IEEE 33节点配电网系统为算例,验证了所提配电网设备重过载逐级治理策略的有效性。

**关键词:**变压器重过载;线路重过载;分布式光伏;电动汽车;充电优化;虚拟增容

中图分类号:TM727

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)03-0073-12

## Hierarchical Mitigation of Bidirectional Overload in Distribution Networks via Electric Vehicle-energy Storage Coordination

LI Shichun<sup>1,2</sup>, ZHONG Chuanzhou<sup>1,2\*</sup>, XIE Jiahong<sup>1,2</sup>, LI Lingxin<sup>1,2</sup>, YU Jianing<sup>1,2</sup>, WANG Qiujie<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** To address bidirectional overload issues in transformers and lines caused by the large-scale integration of distributed photovoltaic (PV) systems and electric vehicles (EVs) into distribution networks. A coordinated optimization strategy utilizing EV-storage synergy is proposed to mitigate network overloading. First, an electric vehicle disordered charging scenario is generated using the Monte Carlo method, and a time-of-use electricity price-guided ordered charging model is established. To comprehensively characterize the real-world diversity in user willingness toward disordered/ordered charging modes, a load optimization model integrating both charging patterns is developed. A hierarchical governance framework for bidirectional overload across "0.4 kV feeder - 0.4 kV distribution transformer - 10 kV feeder - 10 kV substation" equipment is constructed. Based on this framework, abnormal equipment is progressively identified from lower to higher voltage levels while determining electrochemical energy storage configuration parameters. Finally, case studies on a modified IEEE 33-node distribution network verify the effectiveness of the proposed hierarchical overload governance strategy for distribution network equipment.

**Keywords:** transformer overload; line overload; distributed photovoltaic; electric vehicles; charging optimization; virtual capacity expansion

## 0 引言

近年来,在以推动能源绿色低碳转型为导向的国家政策及技术驱动下,新型电力系统的建设如火

如荼。城市配电网的一个显著特征是分布式光伏和电动汽车的大量接入<sup>[1-2]</sup>。这容易引起配电网传输反向和正向重过载问题:一方面,分布式光伏的出力受到气象因素影响,光伏出力较大时,负荷侧不能完全消纳,多余的有功将向电网侧倒送,极易造成配电网短时段反向重过载<sup>[3-4]</sup>;另一方面,电动汽

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52307109)。  
National Natural Science Foundation of China(52307109)。

车(electric vehicle, EV)大量接入,其聚集性充电会引起配电网的部分时段过负荷问题,导致变压器及线路短时正向重过载现象的发生<sup>[5-6]</sup>。基于以上分析,亟须对当下配电网存在的变压器及线路短时双向传输重过载问题进行识别与治理。

当前针对配电网短时双向重过载问题识别与治理的研究较少,多数集中于配电网重过载的预测及风险评估方面。文献[3,7-10]通过深度学习、不确定性建模及多指标评估体系等方法,实现了配电网重过载风险的精准预警。例如,文献[3]对高比例光伏接入的配电网进行反向重过载风险评估,综合考虑多重反向重过载指标,提出一种及时反映当前配电网反向重过载问题严重程度的方法;文献[7]基于深度学习算法建立预警模型,以实现配电变压器安全隐患的预判,对重过载配电变压器进行风险防范。然而,此类研究多聚焦于问题评估与预警上,缺乏针对性的有效治理策略。

而在治理手段的研究中,现有解决方法大致分为硬件扩容和储能调控两种。对于前者来说,如文献[11]提出的配电变压器调换策略,通过采取调换变压器(扩容)的应急手段解决在春节前后期间配电变压器发生短期重过载运行的情况。此举虽能快速缓解重过载,但易导致设备长期轻载运行,引发资源浪费与经济性不足等问题。文献[12]对配电变压器重过载现状及其治理措施进行了分析,指出新增配电变压器和配电变压器扩容的方法虽然有效且彻底,但该措施需要较大的前期投资,工程量也较大,工期较长,投产时间晚,往往难以及时解决配电变压器重过载问题。对于后者,文献[13-14]验证了储能在配电变压器负载率优化中的潜力,但其策略多局限于单一设备/电压层级,且未考虑源荷时空耦合特性。例如,文献[14]提出的移动储能调度方法忽略了光伏出力与负荷的随机波动,并且响应速度受限于储能运输时间(小时级)等,应对设备重过载不够及时,导致实际应用适应性不足。

综上所述,既有治理方法普遍存在两大缺陷:其一,传统的新建(增)设备和扩容改造等手段虽能有效消除重过载风险,但设备的重过载现象往往具备季节性、时段性、阶段性等特征,这就导致新建(增)或改造的设备在非重过载时段形成冗余备用容量,

产生高损耗、低利用率的“大马拉小车”运行状态,造成资源浪费与成本效益失衡,此外,城市用地日益紧张,新建配电变压器或馈线愈发困难;其二,现有储能策略缺乏跨层级协同机制,难以应对多电压等级重过载传播问题。在现有配电网规模基础上针对性的配置储能为设备虚拟增容<sup>[15-17]</sup>变得更为切实可行。

鉴于此,提出一种电动汽车-储能协同优化治理配电网重过载的策略,来应对大量分布式光伏及EV接入配电网带来的变压器/线路短时双向重过载问题。首先,建立考虑用户选择意愿的EV无序充电与有序充电的负荷优化模型,通过分时电价引导EV充电负荷时空转移;其次,创新性地构建“0.4 kV 馈线—0.4 kV 配电变压器—10 kV 馈线—10 kV 变电站”逐级筛查与动态配储机制;然后,基于该机制,逐步检查各层级异常线路及变压器,对重过载设备部署储能系统,进行双向功率调节,实现设备负载率的动态均衡。该方法有望在解决配电网设备短时重过载问题的同时,规避因传统粗放式设备增容改造引发的技术冗余及工程经济性失衡问题,延缓电网的基建升级,为电力公司解决此类问题提供一种技术参考。

## 1 融合用户选择意愿的EV无序-有序充电负荷优化模型

### 1.1 基于有限理性理论的EV负荷优化度指标构建

EV的充电策略整体上分为无序充电、有序充电和有序充放电3种。在无序充电模式下,用户充电习惯与居民生活用电习惯大致吻合,EV充电高峰时段与基础负荷峰值时段重叠,出现“峰上加峰”的现象,此时极易导致邻近线路或变压器产生正向重过载问题<sup>[18]</sup>。其他两种充电模式理论上可以避免或改善上述问题,但现有研究多数过于理想化,并未充分考虑用户选择偏好对需求响应弹性的约束作用,用户参与度对所提策略的影响被弱化或忽视,不够贴近现实情况。此外,有序充电与无序充电在当下并非是非此即彼的关系,在一系列需求侧响应政策引导下,EV的充用电正处于无、有序并存的混合充电模式阶段。倘若仍然采用单一充电模式建模,将不能有效表征实际电网中混合充电模式

的演化特征。

因此,本文引入行为经济学中的有限理性理论,构建反映用户选择意愿的EV无序-有序充电负荷优化模型。为量化用户对经济性和便利性的权衡,充电模式选择的效用函数表示为

$$\begin{cases} f_n = \beta_1 \cdot \Delta P_{\text{rice},n} + \beta_2 \cdot \Delta t_n^{\text{wait}} + \zeta_n \\ \Delta P_{\text{rice},n} = \sum_{t=1}^{T_n} \Delta \rho_t \cdot P_{n,t} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n$ 为台区内第 $n$ 个EV用户,即第 $n$ 辆车; $\Delta P_{\text{rice},n}$ 为电价差收益; $T_n$ 为第 $n$ 辆车充满电需要的时间; $\Delta \rho_t$ 为 $t$ 时刻有序与无序充电的电价差; $P_{n,t}$ 为第 $n$ 辆车在 $t$ 时刻的充电功率; $\Delta t$ 为时间间隔,本文取1 min; $\Delta t_n^{\text{wait}}$ 为用户 $n$ 因有序充电增加的等待时间; $\zeta_n$ 为用户 $n$ 的随机偏好误差,反映偏好异质性; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 分别为经济敏感系数、等待时间敏感系数,均采用极大似然估计法标定。

进一步得到用户 $n$ 选择有序充电的概率为

$$F_n^{\text{order}} = \frac{e^{f_n}}{e^{f_n} + 1} \quad (2)$$

式中: $e^{f_n}$ 为有序充电对用户 $n$ 的吸引力;1为用户选择无序充电的基准效用。

则定义全体用户的平均选择概率为充电负荷优化度 $\varepsilon$ 为

$$\varepsilon = \frac{1}{N_{\text{EV}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{EV}}} F_n^{\text{order}} \quad (3)$$

式中: $N_{\text{EV}}$ 为台区内EV总数。

$\varepsilon$ 受分时电价策略和用户偏好共同影响,可量化用户的选择意愿,不同的 $\varepsilon$ 值对应不同的EV充电负荷形态。

## 1.2 EV无序充电负荷模型

EV按用途不同大体分为公交车、公务车、出租车、私家车四类,其中电动私家车在数量上远远多于其他三种类型,2021年至今,更是以电动私家车为主体开始大量普及,这使得EV充电负荷快速上升。碍于篇幅及文章侧重点,在EV方面仅选择电动私家车为研究对象,文中所提车辆均指电动私家车。此外,本文仅考虑EV的常规充电和快速充电,其充电功率 $P$ 均近似于恒定<sup>[19]</sup>。

在无序充电方面,常采用蒙特卡洛法随机模拟充电负荷<sup>[19-20]</sup>,模拟流程如图1所示,具体计算方法参考文献[5]。

最终得到总的EV日无序充电功率为

$$L_{\text{EV1},t} = \sum_{n=1}^{N_{\text{EV1}}} P_{n,t} \quad (4)$$

式中: $L_{\text{EV1},t}$ 为 $t$ 时刻总的私家车无序充电功率; $N_{\text{EV1}}$ 为无序充电车辆数。

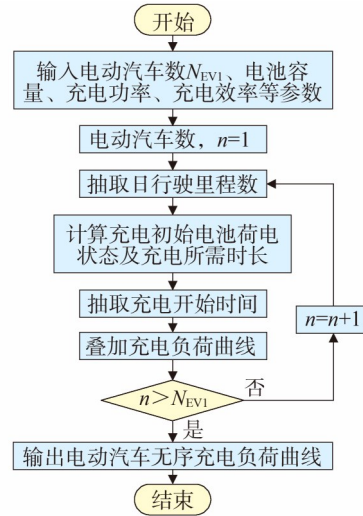


图1 基于蒙特卡洛法的EV无序充电流程

Fig.1 Flowchart of uncontrolled EV charging based on the Monte Carlo method

## 1.3 EV有序充电负荷模型

在有序充电方面,建立分时电价引导的有序充电模型。文章采用某城市发布的分时电价信息,如表1所示。

1)目标函数。

在分时电价机制下,确定用户侧日充电成本最低为目标为

$$\min F = \sum_{n=1}^{N_{\text{EV2}}} \sum_{t=1}^{1440} \rho_t P_{n,t} \Delta t \quad (5)$$

式中: $N_{\text{EV2}}$ 为有序充电车辆数; $\rho_t$ 为 $t$ 时刻对应的充电电价。

2)约束条件。

对任意公共连接点来说,节点的净功率不应超过邻近线路的功率限值,以确保线路不重过载运行(此内容在第2章进一步展开说明),即线路功率容量约束为

$$\left| P_{\text{PV},t} - \sum_{n=1}^{N_{\text{EV2}}} P_{n,t} - \sum_{n=1}^{N_{\text{EV1}}} P_{n,t} - P_{\text{load},t} \right| \leq 0.8 P_{\text{max}} \quad (6)$$

式中:  $P_{PV,t}$ 、 $\sum_{n=1}^{N_{EV2}} P_{n,t}$ 、 $\sum_{n=1}^{N_{EV1}} P_{n,t}$ 、 $P_{load,t}$  分别为任意一个公共连接点在  $t$  时刻接入的分布式光伏有功功率、EV 有序及无序充电功率、常规负荷功率;  $P_{max}$  为相应线路有功功率限值。

此外,用户可自由设定动力电池的目标荷电状态  $S_{target,n}^{oc}$  (如 80% 或 100%),然后在用户指定的时间窗口内完成  $S_{target,n}^{oc}$ ,故电池充电约束为

$$\begin{cases} S_{end,n}^{oc} \geq S_{target,n}^{oc} \\ t_{start,n} \leq t_{end,n} \leq t_{deadline,n} \\ S_{end,n}^{oc} = S_{start,n}^{oc} + \frac{1}{C_n} \sum_{t=t_{start,n}}^{t_{end,n}} \eta P_{n,t} \Delta t \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $S_{end,n}^{oc}$  为第  $n$  辆车充电结束时的荷电状态;  $t_{start,n}$  和  $t_{deadline,n}$  分别为用户  $n$  设定的充电开始时刻和截止时刻;  $t_{end,n}$  为用户  $n$  充电完成时刻;  $S_{start,n}^{oc}$  为第  $n$  辆车充电开始时的荷电状态;  $C_n$  为第  $n$  辆车的动力电池容量;  $\eta$  为充电桩充电效率。

最后,采用粒子群优化算法对上述模型进行求解,最终得到 EV 有序充电负荷功率  $L_{EV2,t}$ 。

表1 某市电动汽车用户分时电价

Table1 Time-of-use electricity price of EV users in a city

分时	时段	电价/(元/kWh)
尖峰时段	20:00—22:00	0.77
高峰时段	17:00—20:00, 22:00—23:00	0.67
平常时段	07:00—17:00	0.57
低谷时段	23:00—07:00	0.42

## 2 考虑EV充电负荷优化的电化学储能分级治理策略

### 2.1 电动汽车-储能协同治理机理

分布式光伏规模化并网与 EV 集群化充电的共同作用,显著改变了配电网的潮流分布特性。光伏出力的强波动性与 EV 无序充电的时空聚集性叠加,导致系统呈现“源-荷双随机”的复杂运行态势:光伏反向功率倒送易引发设备反向重过载,EV 充电负荷与原本的负荷曲线“峰上加峰”则加剧正向重过载风险。含分布式光伏及 EV 的配电台区典型结构如图 2 所示。

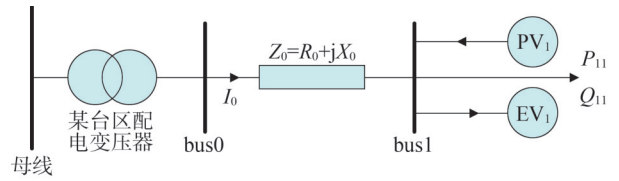


图2 含分布式光伏及EV的配电台区简化拓扑

Fig.2 Simplified topology of distribution substation area containing distributed photovoltaic and EV

图 2 中, bus1 为分布式光伏 PV1、EV1 及常规负荷 ( $P_{11}$ 、 $Q_{11}$ ) 的公共连接点,图中箭头指向记为正方向。相较于光伏出力为 0 时,光伏出力增加会使线路电流  $I_0$  正向减小;当光伏出力等于台区的总负荷量时,理论上台区达到“源荷平衡”,  $I_0$  减小至 0;倘若光伏出力继续增加,即大于台区的总负荷量时,  $I_0$  开始反向增大,功率开始逆流,随后可能导致线路及台区配电变压器反向重过载运行(设备正向重过载的情况分析类似)。即光伏出力减去台区总负荷量(包含常规负荷和 EV 充电负荷)会得到一个功率输入,该功率的大小直接影响邻近线路的电流流向及流动功率的大小,现记该功率为净功率。可以计算任意公共连接点  $i$  在  $t$  时刻的净功率为

$$P_{PV-Load,t}^j = P_{PV,t}^i - P_{EV,t}^i - P_{load,t}^i \quad (8)$$

式中:  $P_{PV,t}^i$ 、 $P_{EV,t}^i$ 、 $P_{load,t}^i$  分别为节点  $i$  在  $t$  时刻接入的分布式光伏有功功率、EV 充电负荷功率、常规负荷有功功率。

净功率为 0 时,意味着线路功率为 0,台区内“源荷平衡”;净功率大于 0 时,线路流过反向功率,其值大到一定程度时,会使线路或台区变压器反向重过载;类似地,净功率小于 0 时,可能会使设备正向重过载。因此,使净功率介于限值之间即可消除重过载问题,结合式(8)及前文分析可知,可以通过优化 EV 充电负荷,使净功率绝对值尽可能减小,倘若净功率仍然超出限值,则可部署储能装置进一步调控。

此外,无论是功率倒送对应的设备反向重过载还是功率正向流动对应的设备正向重过载,均是由公共连接点的净功率引发的,即公共连接点的净功率是导致设备双向重过载的源头。而分布式光伏和 EV 接入配电网的电压等级并不唯一,前者根据单点并网容量的不同有接入配电网任意电压等级的可能;后者则主要从 220 V 和 380 V 电压等级接入。因

此,配电网内的公共连接点将遍布各个电压等级。

为直观反映设备双向重过载问题的波及范围,全面筛查并有针对性地解决问题。如图3所示,将整个配电网按电压等级及设备的不同划分为4层区域:0.4 kV 馈线、0.4 kV 配电变压器、10 kV 馈线和10 kV 变电站。针对不同电压等级下公共连接点的净功率引发的配电网设备双向重过载,构建“0.4 kV 馈线—0.4 kV 配电变压器—10 kV 馈线—10 kV 变电站”设备双向重过载逐级治理框架。基于该框架,从低电压等级至高电压等级逐步配置电化学储能装置治理线路及变压器重过载问题。此举亦是考虑到系统潮流的整体性,分区域逐级进行储能信息的确定,以提高储能配置的准确性。本文将 220 V 电压等级的设备划入相应 0.4 kV 层级中,不再细分。

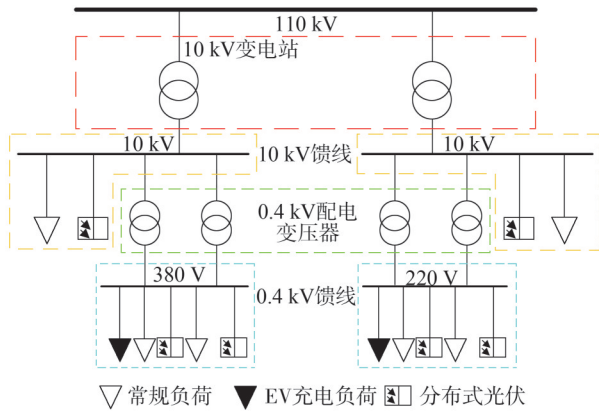


图3 配电网层级区域划分示意图

Fig.3 Schematic diagram of hierarchical zoning in distribution network

## 2.2 基于负载率约束判据的储能动态选址

结合 DL/T 2041—2019《分布式电源接入电网承载力评估导则》，节点  $i$  和  $j$  组成的线路  $ij$  在  $t$  时刻的负载率定义为

$$\lambda_{ij}^t = \frac{P_{PV-Load,t}^{ij}}{P_{max}^{ij}} \times 100\% \quad (9)$$

式中： $P_{max}^{ij}$  为线路  $ij$  的实际有功运行限值； $\lambda_{ij}^t$  为正值时记为反向负载率，负值则为正向负载率。

根据相关国家标准<sup>[21-22]</sup>，线路  $ij$  的负载率应该满足式(10)。

$$|\lambda_{ij}^t| = \frac{|P_{PV-Load,t}^{ij}|}{P_{max}^{ij}} \times 100\% \leq 80\% \quad (10)$$

遍历网络中所有公共连接点求解其邻近线路的负载率,若满足式(10)则线路可正常运行;若负载率持续 2 h 突破式(10)约束,则判定该公共连接点为储能安装节点。“2 小时原则”考虑了线路短时重过载耐受裕度,可有效区分短时波动与结构性重过载,避免储能装置的冗余配置。

配电变压器  $b$  在  $t$  时刻的负载率定义为

$$\lambda_t^b = \frac{P_{PV-Load,t}^b}{P_{max}^b} \times 100\% \quad (11)$$

式中： $P_{PV-Load,t}^b$ 、 $P_{max}^b$  分别为变压器  $b$  在  $t$  时刻的净功率、实际有功运行限值。

根据相关国家标准<sup>[22-23]</sup>，配电变压器  $b$  的负载率应该满足

$$-85\% \leq \lambda_t^b \leq 80\% \quad (12)$$

据此,遍历网络中所有配电变压器求解其负载率,若满足式(12)则无须安装储能;否则再根据该变压器可承受自身重过载运行的时间裕度进一步判断是否应当配置储能。由电力变压器负载导则<sup>[24-25]</sup>可知,当配电变压器负载率高于 100% 时,说明配电变压器发生过载问题,过载 10% 时,变压器可持续运行 180 min;过载 20% 时,变压器可持续运行 150 min;过载 30% 时,变压器可持续运行 120 min。

值得注意的是,配电网中任意一节点配置储能装置势必会重构网络的潮流,尤其是安装节点邻近区域的功率大小,从而影响线路或变压器的负载率计算结果。因此,本文提出动态协同配储机制,结合前述治理框架,建立迭代优化流程。即首先针对 0.4 kV 馈线层进行潮流计算,基于负载率约束识别重过载线路,确定储能安装节点及容量需求;完成此层级储能配置后,更新网络拓扑参数,继而进行 0.4 kV 配电变压器层的负载率评估及针对性配置储能;另外两个层级操作同理。全流程遵循“馈线层→配电变压器层→馈线层→变电站层”的调控顺序,逐级消除各电压等级设备的重过载风险。

该机制通过分层递进、动态修正的优化逻辑,避免了下层设备重过载向上层传播,可提升设备重过载风险评估与配置储能治理的准确性。例如,馈线层储能部署后,其功率补偿效应可降低上层配电变压器层净功率峰值。

### 2.3 考虑电力设备运行功率阈值的储能参数优化方法

1) 储能额定参数的确定。

安装储能是为了防止邻近线路或台区配电变压器发生重过载问题,储能装置应当吸收或者释放相应能量以使设备负载率维持在合理范围内。因此,储能的容量应该至少等于净功率曲线越过功率阈值所围成的面积,而功率阈值即由设备负载率约束反解求得。

故对于线路  $ij$  而言,记防止其功率反、正向重过载的储能装置  $a$  容量分别为  $S_{ESS,a}^+$ 、 $S_{ESS,a}^-$ ,则满足式(13)。

$$\begin{cases} S_{ESS,a}^+ = \sum_{m=1}^M (P_{PV-Load,t_m}^{ij} - 0.8P_{max}^{ij}) \cdot \Delta t' \\ S_{ESS,a}^- = \sum_{k=1}^K (-0.8P_{max}^{ij} - P_{PV-Load,t_k}^{ij}) \cdot \Delta t' \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\Delta t'$  为功率数据更新时间间隔;  $M$ 、 $K$  分别为研究时间尺度内线路反、正向重过载运行的有效时间段含  $\Delta t'$  的总个数。

最终储能装置  $a$  的容量为

$$S_{ESS,a} = \max(S_{ESS,a}^+, S_{ESS,a}^-) \quad (14)$$

储能的额定功率是其单位时间内能够提供或接受电能的上限,则储能装置  $a$  的额定功率设置为

$$P_{ESS,a} = |P_{PV-Load,t}^{ij}|_{max} / (1 - d) \quad (15)$$

式中:  $d$  为储能功率裕度。

同理,对配电变压器  $b$  而言,其对应储能装置记为  $b'$ 。根据配电变压器负载率的相关规定反推出配电台区应当安装储能的容量大小  $S_{ESS,b'}$  为

$$\begin{cases} S_{ESS,b'}^+ = \sum_{m=1}^{M'} (P_{PV-Load,t_m}^b - 0.8P_{max}^b) \cdot \Delta t' \\ S_{ESS,b'}^- = \sum_{k=1}^{K'} (-0.85P_{max}^b - P_{PV-Load,t_k}^b) \cdot \Delta t' \\ S_{ESS,b'} = \max(S_{ESS,b'}^+, S_{ESS,b'}^-) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $S_{ESS,b'}^+$ 、 $S_{ESS,b'}^-$  分别为防止配电变压器  $b$  功率反、正向重过载的储能容量;  $M'$ 、 $K'$  分别为研究时间尺度内配电变压器反、正向重过载运行的有效时间段含  $\Delta t'$  的总个数。

储能装置  $b'$  的额定功率设置为

$$P_{ESS,b'} = |P_{PV-Load,t}^b|_{max} / (1 - d) \quad (17)$$

2) 基于净功率反馈的储能调控策略。

储能出力反向跟随安装位置处的净功率值即可最大程度实现“源荷”的就地平衡。因此,在净功率越过功率阈值时,为有效地治理设备重过载等问题,储能的实时出力应该满足式(18)。

$$\begin{cases} P_{ESS,a}(t) = -P_{PV-Load,t}^{ij} \\ P_{ESS,b}(t) = -P_{PV-Load,t}^b \end{cases} \quad (18)$$

### 2.4 EV 负荷优化下的储能分级治理流程

所提治理策略的重点在于筛查出网络中发生设备重过载的位置,并有针对性地确定储能安装地点、容量及其实时出力。具体的治理流程如图4所示。

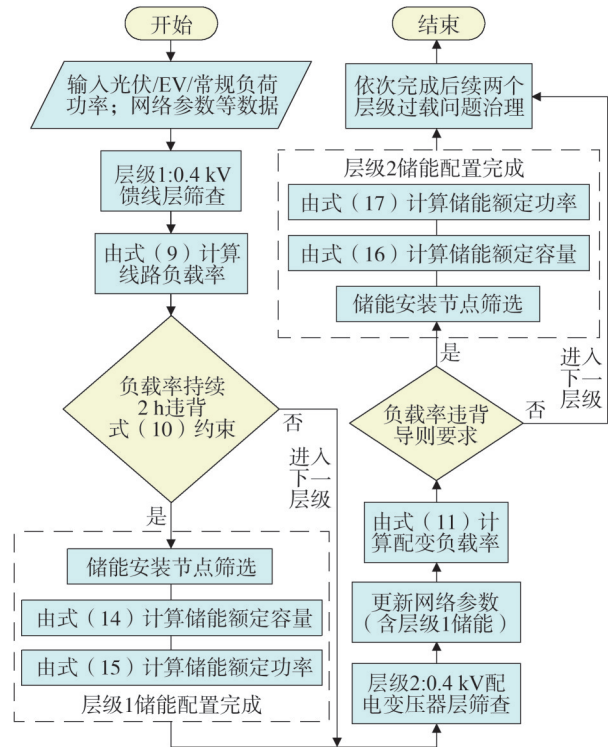


图4 EV-储能协同治理设备重过载流程

Fig.4 Coordinated governance process of EV and energy storage for equipment overload mitigation

基于某城市配电网历史数据及EV的充电负荷优化得到能够反映“源荷”波动性的分布式光伏出力、常规负荷及EV充电负荷功率等数据。首先以“0.4 kV 馈线”为对象,计算该层级内的线路负载率及累积越限时间,排查出重过载的馈线,再进一步针对该异常馈线进行储能信息的计算及储能的安装;待“0.4 kV 馈线”层级的储能配置完成后,再进行下一层级即“0.4 kV 配电变压器”的变压器重过

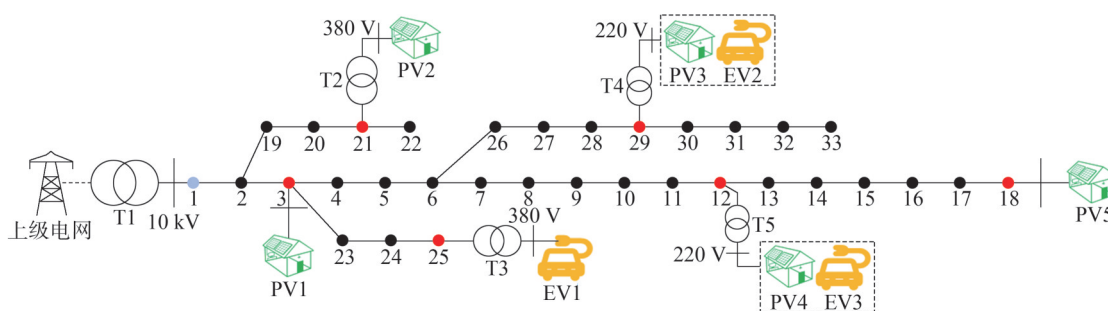


图5 修改后的IEEE 33节点配电网系统

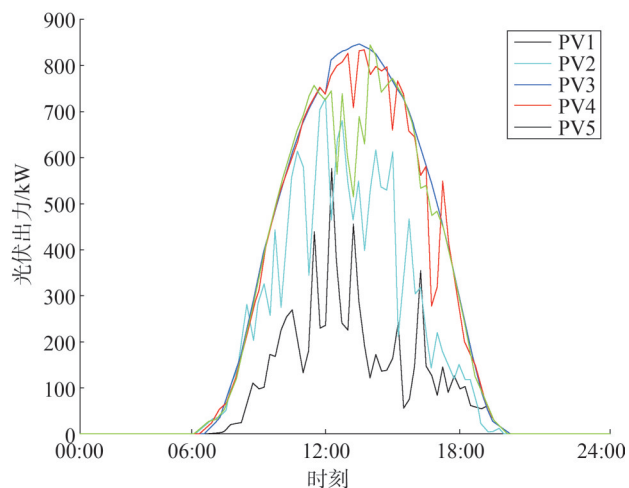
Fig.5 Modified IEEE 33-node distribution network system

载风险排查与治理;后续两个层级的设备重过载风险亦依次逐级进行筛查与排除。

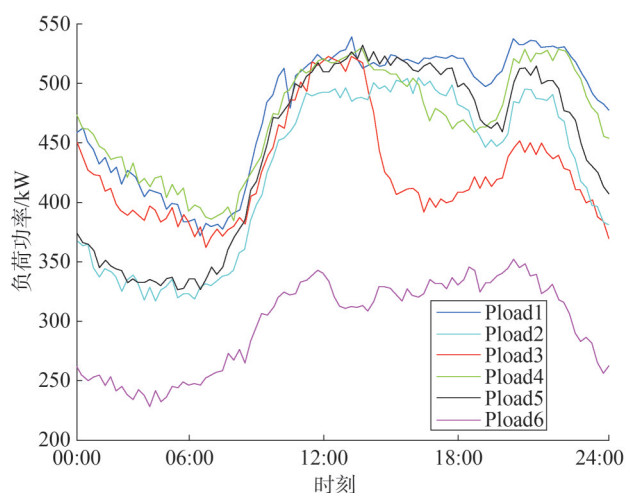
### 3 算例分析

#### 3.1 算例系统和参数设置

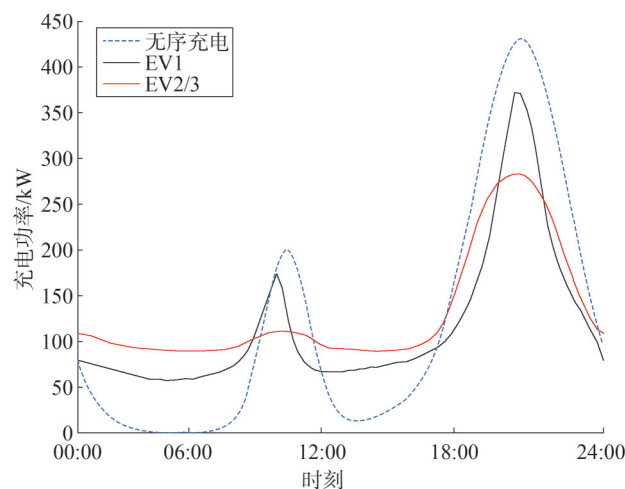
仿真采用的算例为IEEE 33节点配电网系统改进而来,其结构如图5所示,1—33号节点为10 kV线路节点,T1—T5为配电变压器。系统节点电压允许范围为0.93~1.07 pu。选择某典型日作为研究时间尺度,分布式光伏及常规负荷的功率数据均来自某城市配电网历史数据,EV充电负荷数据则为根据前文理论模拟而来。系统中接入分布式光伏、EV的情况如图5所示,各公共连接点通过线路与各自台区变压器低压侧相连并网,分布式光伏并网电压等级有220 V、380 V及10 kV;EV接入电压等级有220 V和380 V,分别对应于EV的常规充电和快速充电,具体功率信息如图6所示。仿真计算涉及的其他参数如表2所示。



(a)分布式光伏出力曲线



(b)常规负荷功率曲线



(c)EV充电功率曲线

图6 接入的日功率信息

Fig.6 Daily integrated power information

为更好地考虑“源荷”的波动性,在接入分布式光伏PV<sub>q</sub>的同时配套接入常规负荷Pload<sub>q</sub>( $q=1、2、3、4、5$ );Pload<sub>6</sub>与EV1配套接入。分布式光伏、

EV充电桩、常规负荷的功率因数分别为0.95、0.98、0.90。

表2 主要仿真计算参数  
Table 2 Key simulation parameters

参数	数值
电动汽车无序充电车辆数 $N_{EV1}$ /辆	400
电动汽车有序充电车辆数 $N_{EV2}$ /辆	600
电动汽车最大续航里程 $s_{max}$ /km	300
电动汽车常规充电功率 $P/kW$	7.8
电动汽车快速充电功率 $P/kW$	60
充电桩充电效率 $\eta$	0.90
储能功率裕度 $d$	0.02

### 3.2 考虑EV充电优化的储能配置结果

基于本文提出的电动汽车-储能协同优化逐级治理策略,对改进后的IEEE 33节点系统进行仿真验证。通过分层筛查机制,识别出三个关键重过载节点:T3、T4 低压侧及 T1 节点。图7分别展示了这些节点的净功率时域特性曲线,具体表现为:变压器 T3 在晚间时段(19:30—22:30)发生约 180 min 的正向重过载现象,最大负载率达 114%;变压器 T4 在午间时段(12:00—15:20)发生约 200 min 的反向重过载现象,最大负载率为 94%,在晚间时段(19:30—22:40)发生约 190 min 的正向重过载现象,最大负载率为 98%。变压器 T1 的情况最为恶劣,在午间时段发生约 230 min 的反向重过载现象,最大负载率达 128%,此外还发生长达近 14 h 的正向重过载现象,最大负载率高达 186%。上述情况均已严重影响对应变压器设备的安全运行。因此在本例中选择上述 3 个节点为储能安装节点,储能配置参数如表3所示。

EV全部为无序充电模式下(即EV充电负荷优化度  $\varepsilon \approx 0$ )的储能配置结果如表4所示。对比表3、表4可知,当没有进行EV充电优化时,网络中会有更多的设备发生重过载现象,导致储能的配置数目也相应增加,并且无论是整体上还是对同一设备而言,EV的充电优化都可以在一定程度上减小储能配置容量,从而降低储能配置成本。

表3 储能配置信息( $\varepsilon=0.6$ )

Table3 Energy storage configuration parameters ( $\varepsilon=0.6$ )

储能名称	安装位置	额定容量/kWh	额定功率/kW
ESS-T3	T3 低压侧	350	220
ESS-T4	T4 低压侧	300	110
ESS-T1	T1 低压侧	8 000	1 100
储能容量合计		8 650	

表4 储能配置信息( $\varepsilon \approx 0$ )

Table4 Energy storage configuration parameters ( $\varepsilon \approx 0$ )

储能名称	安装位置	额定容量/kWh	额定功率/kW
ESS-T5	T5 低压侧	1 000	400
ESS-T3	T3 低压侧	600	200
ESS-T4	T4 低压侧	400	320
ESS-T1	T1 低压侧	9 600	1 200
储能容量合计		11 600	

### 3.3 电动汽车-储能日内治理结果分析

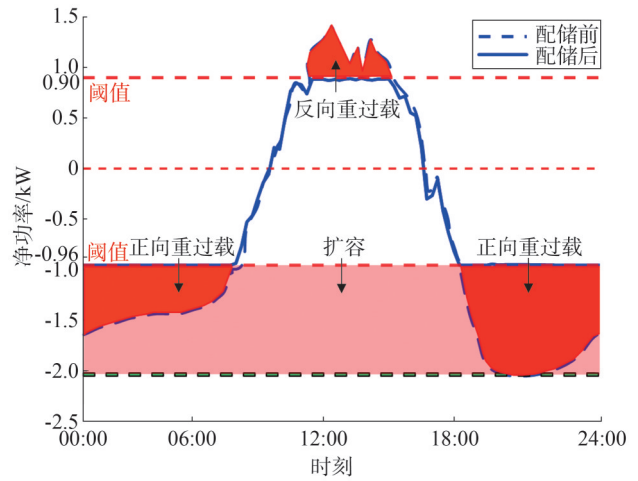
部署3.2节确定的储能系统,对改进后的IEEE 33节点系统进行潮流计算,评估策略的治理效果。图7展示了前述重过载节点在储能介入后的净功率时域特性曲线,同时还给出采用设备扩容方法下的扩容情况。图8则对比治理前后系统10 kV节点电压的变化情况。

图7表明,部署储能后,目标节点的净功率均基本限制在功率阈值以内,设备基本可以保证在功率运行限值约束内工作,即不会有设备双向重过载情况的发生。例如,变压器 T3 晚高峰时段的正向负载率最大值从 114% 降至 85%,变压器 T1 午间反向负载率峰值由 128% 降至 79%,设备负载率重新满足安全约束。原本午间光伏出力高峰潮流逆流导致的反向重过载和晚间负荷充用电高峰导致的严重过负荷运行均得到了很大改善。仿真结果验证了储能对设备双向重过载的抑制能力。EV充电优化的协同下,储能的安装成功避免了以往系统设备重载或过载运行情况的发生,策略调控效果达到预期目标。

此外,若采用变压器扩容的方法,变压器闲置容

量如图7中阴影标注部分所示。值得注意的是,设备扩容只能有效解决设备正向重过载的情况,而设备反向重过载的本质是分布式光伏出力过剩,消纳不足,设备扩容只是提高了自身可以承受反向功率流过的限值,并不能消纳倒送的电能。因此图7中仅给出了设备正向重过载场景下的扩容情况。可以看出,扩容后的变压器在该典型日中长时间没有得到有效利用,大量时间处于闲置备用状态,设备利用率低下。

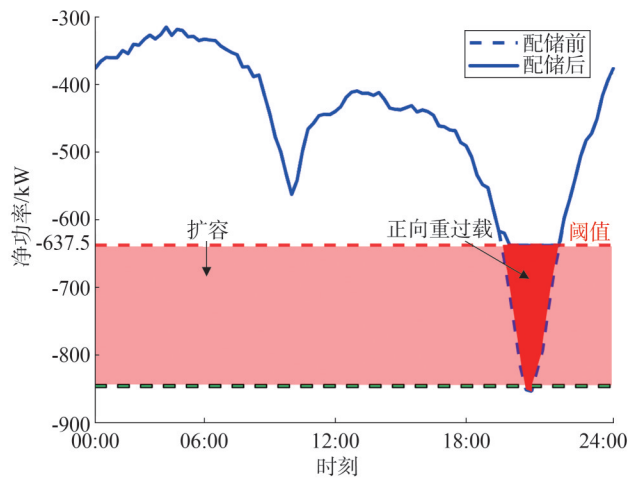
图8表明,储能的安装有效调整了网络的潮流分布,对网络节点电压越限问题的解决亦有一定帮助。安装储能后,网络节点电压控制在电压限值内,无论是潮流逆流导致的节点电压越上限还是重负荷导致的节点电压越下限均得到了改善,佐证了所提策略对系统稳定性的提升作用。



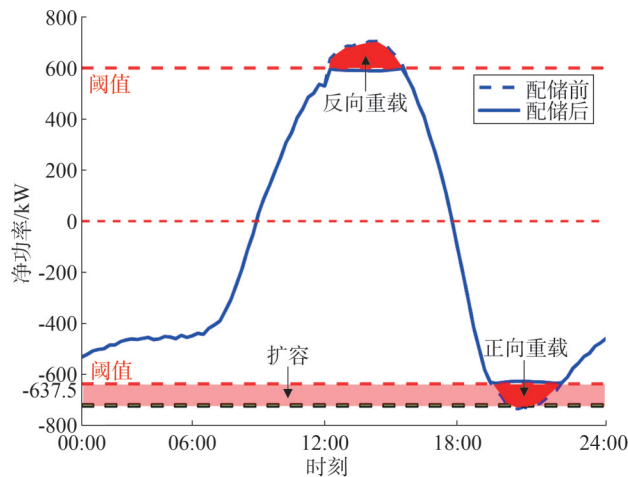
(c) T1 低压侧日净功率曲线

图7 配储前后节点净功率曲线

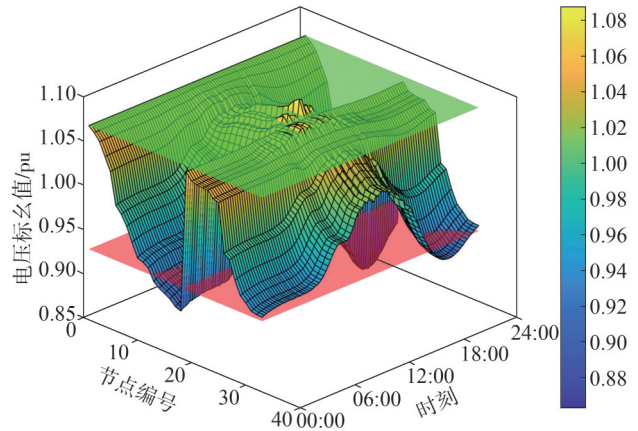
Fig.7 Node net power curves before and after energy storage deployment



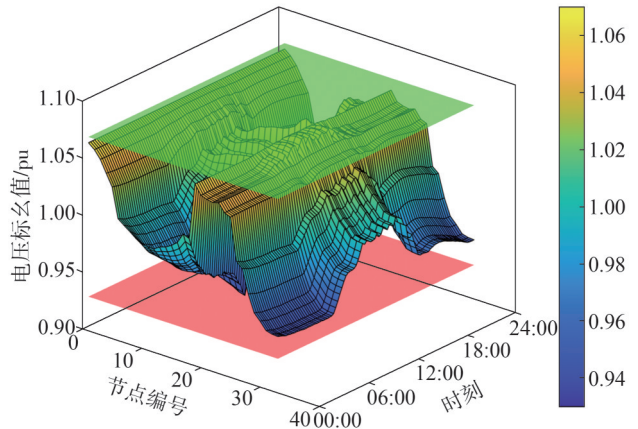
(a) T3 低压侧日净功率曲线



(b) T4 低压侧日净功率曲线



(a) 无电化学储能逐级治理策略



(b) 采用电化学储能逐级治理策略

图8 配电网24 h节点电压情况

Fig.8 24 h node voltage profile of distribution network

### 3.4 EV充电负荷优化度对配储结果的敏感性分析

为探究EV用户对有序充电策略的响应程度(即充电负荷优化度 $\varepsilon$ )对储能配置结果的影响,验证EV有序充电与储能协同治理的经济性,本节基于算例系统,通过改变 $\varepsilon$ 值( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ,  $\varepsilon=0$ 表示完全无序充电,  $\varepsilon=1$ 表示完全有序充电),计算不同场景下的储能总容量,并绘制 $\varepsilon$ 与储能总容量的敏感性曲线,如图9所示。

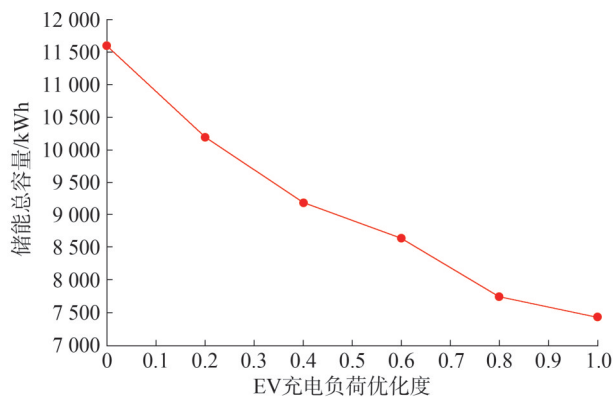


图9 EV充电负荷优化度与储能容量的关系曲线

Fig.9 Relationship between optimization degree of EV charging load and energy storage capacity

由图9可知, EV充电负荷优化度与储能总容量呈非线性负相关关系。 $\varepsilon < 0.8$ 时, 储能容量快速下降, 边际效益显著, 当 $\varepsilon$ 从0增至0.8时, 储能总容量从11 600 kWh降至7 750 kWh, 降幅达33.19%。此阶段曲线斜率较大, 说明用户响应度的提升对减少储能配置的效果明显。有序充电通过分时电价引导, 将EV充电负荷从常规负荷高峰时段转移至低谷时段, 避免了“峰上加峰”现象, 降低了配电网设备的净功率峰值, 从而减少了储能需要补偿的容量。

$\varepsilon \geq 0.8$ 时, 储能容量趋于稳定, 边际效益递减, 当 $\varepsilon$ 从0.8增至1.0时, 储能总容量仅从7 750 kWh降至7 450 kWh, 降幅仅3.87%。此阶段曲线斜率趋缓, 说明继续提高用户响应度对储能减容的作用甚微。其原因在于: 当 $\varepsilon \geq 0.8$ 时, EV充电负荷已基本优化至理想状态, 负荷曲线趋于平缓, 净功率峰值变化较小。此时, 进一步提高 $\varepsilon$ 无法显著改变净功率峰值, 因此储能容量不再明显减少。

## 4 结论

针对目前大量分布式光伏、EV接入配电网引起

的设备短时双向重过载问题, 综合考虑电网中“源荷”波动性及EV的有序充电调节手段, 提出一种电动汽车-储能协同优化治理配电网重过载的策略。在筛查治理各层级设备双向重过载的问题中, 通过考虑EV的有序充电优化了策略的经济性。通过理论分析与算例验证, 得出如下结论:

1) 相较于EV完全采用无序充电模式, 在EV无序-有序充电优化协同下, 可有效避免或减少EV充电负荷与常规负荷高峰的叠加, 从而减小储能配置的数目或容量。在本文算例中, 相较于无序充电场景( $\varepsilon \approx 0$ ), 优化场景( $\varepsilon = 0.6$ )的储能总容量从11 600 kWh降低至8 650 kWh, 降幅达25.4%, 表明EV有序充电显著缓解了局部负荷压力, 降低储能配置成本, 提高了所提策略的经济性。

2) 采用本文策略后, 设备原先发生重过载时段的净功率限制在阈值内, 设备满足负载率安全约束, 双向重过载问题得到解决。此外, 施加策略后, 网络节点电压越限现象也得到一定改善, 系统稳定性得到提升。

储能的安装相当于为容量不足的设备进行短时增容处理, 使其具备动态增容的功能, 以解决自身短时重过载运行的情况, 此举措不会有设备物理增容带来的利用率低、工期长等负面效果。本文方法适用于处在建设过渡期的配电网(即设备双向重过载工况已经发生, 但仍然处于短时紧急重过载的范畴, 还不足以进行大面积常规配电网设备退役改造)解决短时性、季节性设备容量不足的问题及延缓设备进行新建或改造升级。

## 参考文献

- [1] 国家能源局. 国家能源局2025年一季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2025-01-23)[2025-06-20]. <https://www.nea.gov.cn/20250123/544b9af2b6aa4590a60945e81e0d8ee1/c.html>.
- [2] 中华人民共和国公安部. 全国机动车保有量达4.53亿辆 驾驶人达5.42亿人[EB/OL]. (2025-01-18)[2025-06-20]. <https://www.mps.gov.cn/n2254314/n6409334/c9939035/content.html>.
- [3] 于雨彤, 王灿, 李勇, 等. 高比例光伏接入的配电网多层级反向重过载风险评估[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4540-4549. YU Yutong, WANG Can, LI Yong, et al. Multi-level reverse heavy overload risk assessment for distribution system with high percentage of photovoltaic access [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4540-4549.

- [4] 欧奕昊,姜彤,张一航,等.考虑变流器无功调节特性的含高比例分布式光伏配电网电压控制方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(20):105-118.  
OU Yihao,JIANG Tong,ZHANG Yihang, et al.Voltage regulation method for a distribution network with high-penetration of distributed photovoltaic energy considering a converter's reactive power regulation characteristics [J].Power System Protection and Control,2024,52(20):105-118.
- [5] 陈鹏,刘友波,袁川,等.考虑电动汽车充电模式的配电网可开放容量提升改造策略[J].电网技术,2025,49(1):177-186.  
CHEN Peng,LIU Youbo,YUAN Chuan, et al.Strategy for enhancing the available capacity of distribution networks considering electric vehicle charging modes [J].Power System Technology,2025,49(1):177-186.
- [6] 陈佳琦,胡俊杰,马文帅.计及变压器寿命的电动汽车分布式控制策略[J].电力自动化设备,2025,45(4):92-100.  
CHEN Jiaqi,HU Junjie,MA Wenshuai.Distributed control strategy of electric vehicles considering transformer life [J].Electric Power Automation Equipment,2025,45(4):92-100.
- [7] 童光华,董亮,任永平,等.基于DBN和K-means聚类的配变重过载预警方法[J].现代电力,2021,38(5):492-501.  
TONG Guanghua,DONG Liang,REN Yongping, et al.Overload warning for distribution transformer based on DBN and K-means [J].Modern Electric Power,2021,38(5):492-501.
- [8] 黄园芳,刘云凯,郑世明,等.计及负荷不确定性的配电变压器重过载风险预警[J].电网与清洁能源,2021,37(10):17-24.  
HUANG Yuanfang,LIU Yunkai,ZHENG Shiming, et al.Heavy overload risk early warning of distribution transformers considering load uncertainty [J].Power System and Clean Energy,2021,37(10):17-24.
- [9] 郭胤成.配电变压器状态评估与运行维护方法研究[D].西安:西安理工大学,2021.
- [10] 郭挺,杨梓晴,徐良德,等.考虑新能源随机波动和T接线的城市电网连锁故障风险评估[J].电力系统保护与控制,2024,52(13):59-68.  
GUO Ting,YANG Ziqing,XU Liangde, et al.Risk assessment for cascading failures in urban power grids considering the random fluctuation of renewable energy and T-connected lines [J].Power System Protection and Control,2024,52(13):59-68.
- [11] 蔡建逸,雷金勇,高永键,等.基于春节负荷预测的配电变压器调换策略[J].南方电网技术,2021,15(7):96-101.  
CAI Jianyi,LEI Jinyong,GAO Yongjian, et al.Distribution transformer switching strategy based on spring festival load forecasting [J].Southern Power System Technology,2021,15(7):96-101.
- [12] 周念成,王鹏,池源,等.面向季节性短时高峰负荷的虚拟配电网馈线功能架构及协同配置[J].电力系统自动化,2024,48(14):79-90.  
ZHOU Niancheng,WANG Peng,CHI Yuan, et al.Functional architecture and collaborative configuration of virtual distribution feeder for seasonal short-term peak load [J].Automation of Electric Power Systems,2024,48(14):79-90.
- [13] 彭伟亮,梁细恒,邓才波,等.基于电池储能装置的配电变压器重过载治理与功率因数提升方法[J].广东电力,2022,35(2):36-43.  
PENG Weiliang,LIANG Xiheng,DENG Caibo, et al.Heavy overload control and power factor improvement method of distribution transformer based on battery energy storage device [J].Guangdong Electric Power,2022,35(2):36-43.
- [14] 孙义豪,李科,许长清,等.低压配电台区移动储能系统优化调度方法[J].电力系统及其自动化学报,2024,36(12):37-44.  
SUN Yihao,LI Ke,XU Changqing, et al.Optimal scheduling method for mobile energy storage systems in low-voltage distribution transformer stations [J].Proceedings of the CSU-EPSA,2024,36(12):37-44.
- [15] 郭莹霏,池源,王强钢,等.面向多元负荷和优质供电的虚拟增容配电变压器:概念、应用与展望[J].电工技术学报,2024,39(21):6666-6686.  
GUO Yingfei,CHI Yuan,WANG Qianggang, et al.Virtual capacity-enhanced distribution transformer for diverse loads and quality power supply: concepts, applications, and prospects [J].Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(21):6666-6686.
- [16] 池源,郭莹霏,孟庆昊,等.主动配电网储能应用新形态:虚拟配电网馈线与馈线[J].电力系统自动化,2023,47(12):163-175.  
CHI Yuan,GUO Yingfei,MENG Qinghao, et al.New form of energy storage application in active distribution network: virtual distribution transformers and feeders [J].Automation of Electric Power Systems,2023,47(12):163-175.
- [17] 贾东梨,杨晓雨,叶学顺.平抑负荷峰谷差的配电网协同控制技术[J].山东电力技术,2025,52(4):49-57.  
JIA Dongli,YANG Xiaoyu,YE Xueshun.Research on collaborative control technology of distribution network to reduce load peak-valley difference [J].Shandong Electric Power,2025,52(4):49-57.
- [18] 林思瑶,马晓,贺坤,等.不确定环境下基于动态税和电动汽车时空灵活性的配电网阻塞管理方法[J].山东电力技术,2025,52(1):12-27.  
LIN Siyao,MA Xiao,HE Kun, et al.Distribution networks congestion management based on dynamic tariff and temporal-spatial flexibility of electric vehicles under uncertainty [J].Shandong Electric Power,2025,52(1):12-27.
- [19] 董鑫坤,刘永慧.基于主从博弈的考虑无线充电道规划的电网调度策略[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):91-101.  
DONG Xinkun,LIU Yonghui.Grid dispatching strategy for wireless charging road planning based on Stackelberg game [J].Journal of

- Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5):91-101.
- [20] 常小强,宋政湘,王建华.基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J].高压电器,2020,56(8):1-5.  
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on Monte Carlo algorithm[J].High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 1-5.
- [21] 中国电力企业联合会.配电网规划设计技术导则:DL/T 5729—2023[S].北京:中国电力出版社,2023.
- [22] 全国微电网与分布式电源并网标准化技术委员会(SAC/TC 564).分布式电源接入电网承载力评估导则:DL/T 2041—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑电气设计标准(共二册):GB 51348—2019[S].北京:中国建筑出版社,2019.
- [24] 全国变压器标准化技术委员会.电力变压器 第12部分:干式电力变压器负载导则:GB/T 1094.12—2013[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [25] 全国变压器标准化技术委员会.电力变压器 第7部分:油浸式

电力变压器负载导则:GB/T 1094.7—2024[S].北京:中国标准出版社,2024.

收稿日期:2025-06-24

修回日期:2025-10-24

作者简介:

李世春(1984),男,博士,副教授,研究方向为含新能源电力系统运行与控制;

袁传州(2001),通信作者(3054222305@qq.com),男,硕士在读,研究方向为含新能源电力系统运行与控制;

谢佳宏(2001),男,硕士在读,研究方向为含新能源电力系统运行与控制;

李泠昕(2001),女,硕士在读,研究方向为含新能源电力系统运行与控制;

余嘉宁(1999),女,硕士在读,研究方向为含新能源电力系统运行与控制;

王秋杰(1988),男,博士,副教授,研究方向为综合能源系统优化运行与规划、弹性配电网。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250092

# 基于改进D-S证据理论和CEEMD的配电网 高阻故障选线方法

张明\*, 陆恣, 张鑫

(国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 江苏 南京 210008)

**摘要:**谐振接地系统发生高阻故障时,系统背景噪声和互感器测量误差的干扰使故障电流信号难以捕捉,单一判据的准确率受限,为此,提出一种基于改进D-S证据理论的故障测度处理方法,该方法包含三个核心环节。首先,采用完全集成经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)去除故障零序电流中的噪声。然后,根据本文提出的判据占比系数和馈线间拟合系数对故障测度进行处理,生成基本概率赋值。最后,运用改进D-S证据理论融合多判据信息,得出最终的故障概率值。仿真结果表明,该方法在-2.8 dB强噪声干扰下仍能准确提取信号特征,且相较于传统方法,该方法能够有效地凸显故障馈线的概率特征,提升诊断结果的可靠性。

**关键词:**高阻故障;噪声干扰;故障馈线检测;D-S证据理论

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)03-0085-12

## Method for High-resistance Faulty Line Selection in Distribution Networks Based on Improved D-S Evidence Theory and CEEMD

ZHANG Ming\*, LU Min, ZHANG Xin

(Nanjing Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Corporation, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** During high-resistance faults in resonant grounding systems, the system background noise and measurement errors from transformers can interfere with the acquisition of fault current signals, making it challenging to capture and subsequently limiting the accuracy of single criteria. Therefore, this paper proposes a novel method for processing fault measurements based on the D-S evidence theory, which encompasses three core steps: Firstly, the Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition is utilized to eliminate noise from the fault zero-sequence current; Secondly, the processing of the fault measurements is performed using the criteria proportion coefficient and feeder fitting coefficient proposed in this paper, which facilitates the generation of basic probability assignments; Finally, the D-S evidence theory is employed to fuse information from multiple criteria, thereby deriving the final fault probability value. The simulation results show that this method can accurately extract signal features even under conditions of -2.8dB noise interference. Compared to traditional methods, it effectively accentuates the probability characteristics of the faulty feeder, thereby enhancing the reliability of the diagnostic results.

**Keywords:** high-resistance fault; noise interference; faulty feeder detection; D-S evidence theory

## 0 引言

配电网作为电能传输的“最后一公里”,因线路临近地表,易受树木、积水等非导电介质影响<sup>[1-2]</sup>,易引发高阻接地故障。此类故障因过渡电阻大,电气

特征微弱<sup>[3]</sup>,易与负荷波动与电容投切等正常工况混淆<sup>[4]</sup>,导致传统零序电流保护难以有效检测<sup>[5-6]</sup>。

电流互感器检测到的高阻故障电流信号信噪比低,须除噪以提取故障特征。常用除噪方法包括滤波<sup>[7-8]</sup>、多项式拟合<sup>[9-10]</sup>、信号变换<sup>[11-12]</sup>、多模态分解和神经网络去噪<sup>[13-14]</sup>等。文献[15]采用连续小波变换从零序电流提取时频频谱,但存在小波函数选择影响除噪效果的问题。文献[16]采用变分模态分解除噪故障瞬态电流,但存在模态分解数选择不当可

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2022YFB3205700);国网江苏省电力有限公司重点科技项目(J2024064)。

National Key Research and Development Program of China (2022YFB3205700); Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Corporation(J2024064).

能导致模态混叠的问题。

近年来,深度学习与数据驱动技术逐步运用于高阻故障检测<sup>[17-20]</sup>,但其依赖大量标注数据,而高阻故障样本稀缺,因此模型泛化能力受限,且缺乏明确的物理解释。目前,传统方法主要依赖于对电压和电流信号在时域、频域、时频域以及能量特征的分析,以实现高阻抗故障检测。如,基于稳态特征的方法(如谐波法<sup>[21]</sup>、负序分量法<sup>[22]</sup>)易受消弧线圈补偿作用影响,当过渡电阻超过1 kΩ时谐波特征显著衰减,且负序分量易受三相不平衡干扰。暂态特征方法(如首半波法<sup>[23]</sup>、暂态能量法<sup>[24]</sup>)虽能规避消弧线圈影响,但存在故障初相角敏感性和固有零序分量干扰问题。行波法<sup>[25]</sup>抗过渡电阻能力强,但在故障初相角接近零度时存在波头辨识困难,导致检测可靠性下降。这些传统方法极度依赖电压电流信号提取的准确性。在高阻故障情况下,电压电流信号较弱,测量误差与噪声污染较大,单一判据易造成判断失误,而多判据融合充分利用了各判据的优点,克服了单一判据的局限性<sup>[26]</sup>。其中,D-S证据理论因具备融合多源信息的优势而得到广泛应用<sup>[27]</sup>。然而,现有方法未充分考虑判据间相关性及馈线间特征趋同性,导致基本概率分配权重分配不合理,融合结果可信度受限。

针对上述问题,提出一种基于D-S证据理论的故障测度处理方法。首先,使用完全集成经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)对含噪声的馈线零序电流进行除噪;接着,使用馈线暂态能量、欧式距离、夹角余弦判据对故障特征进行特征提取;然后,基于模糊理论,引入判据间差异系数和馈线间拟合系数,重新分配权重和衡量判断趋同性;最后,使用D-S证据理论进行多判据融合,得到故障馈线概率值。仿真结果表明,该方法在强噪声干扰下能准确提取故障电流,得到的故障馈线概率值高于传统方法,不确定度更低,具有更高的可信度。

### 1 高阻故障暂态过程机理分析

若短路点存在较大过渡电阻,传统等值电路则无法匹配故障信号特征,因此须建立符合高阻故障特征的等值电路<sup>[6]</sup>,如图1所示。

图1中, $u_f = -U\sin(\omega t + \theta)$ 为故障相虚拟电压, $U$ 为故障相虚拟电压幅值, $\omega$ 为工频角频率, $\theta$ 为故障初相角。 $R \approx 3R_f$ 为等值电阻, $R_f$ 为过渡电阻, $i_{of}$ 为故障点零序电流, $i_{oL}$ 为消弧线圈零序电流, $u_{obf}$ 为母

线零序电压, $C_{0j}$ 为馈线 $j$ 的对地零序电容, $C = \sum_{j=1}^n C_{0j}$ 为所有线路对地零序分布电容之和, $i_{0j}$ 为馈线 $j$ 出口的零序电流, $j=1,2,\dots,n$ ,假设馈线编号为 $n$ 的馈线发生短路,则 $i_{0n}$ 为故障馈线出口处的零序电流。

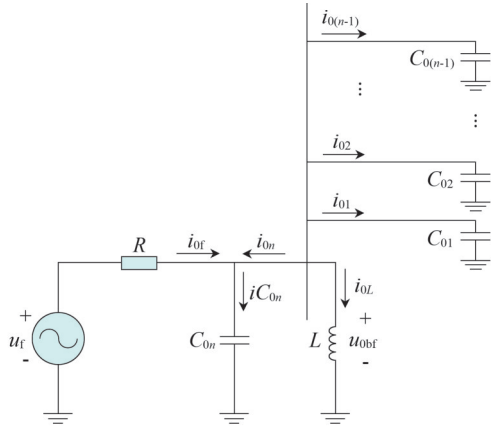


图1 符合高阻故障特征的等值电路

Fig.1 Equivalent circuit adapted to high impedance fault characteristics

根据图1所示的等值电路,代入零状态故障初始条件,可得一个二阶微分方程为

$$RLC \frac{d^2 i_{oL}}{dt^2} + L \frac{di_{oL}}{dt} + R i_{oL} = -U \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

解式(1)给出的微分方程,可以得2个特征根 $p_1, p_2$ 为

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (2)$$

由于在高阻接地故障中 $R_f$ 一般为几百到上千欧姆,系统一般运行在欠阻尼工况下,从而有 $R > \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ,因此式(2)变为

$$p_{1,2} = -\lambda \pm j\omega_f \quad (3)$$

式中: $\lambda = \frac{1}{2RC}$ 为衰减因子; $\omega_f = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2RC}\right)^2}$ 为暂态谐振频率。

进一步解式(1)给出的微分方程,最终得出消弧线圈零序电流为

$$\begin{cases} i_{oL} = i_{oL-F} + i_{oL-T} \\ i_{oL-F} = -\frac{U}{Z} \sin(\omega t + \theta - \varphi) \\ i_{oL-T} = e^{-\lambda t} [M_1 \sin(\omega_f t) + N_1 \cos(\omega_f t)] \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} M_1 = -\frac{U}{Z\omega_f}[-\lambda\sin(\theta - \varphi) - \omega\cos(\theta - \varphi)] \\ N_1 = \frac{U}{Z}\sin(\theta - \varphi) \\ Z = \sqrt{(-RLC\omega^2 + R)^2 + (\omega L)^2} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{\omega L}{-RLC\omega^2 + R}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式(4)表明,消弧线圈的零序电流由两部分组成:一是按工频 $\omega$ 等幅振荡的周期分量 $i_{0L\_F}$ ,二是按角频率 $\omega_f$ 震荡衰减的暂态分量 $i_{0L\_T}$ 。

根据式(4)中消弧线圈的零序电流,可以得出母线零序电压 $u_0$ 为

$$\begin{cases} u_0 = u_{0\_F} + u_{0\_T} \\ u_{0\_F} = \frac{\omega LU}{Z}\sin(\omega t + \theta - \varphi - \frac{\pi}{2}) \\ u_{0\_T} = Le^{-\lambda t} \left[ \begin{aligned} &(-\lambda M_1 - \omega_f N_1) \sin(\omega_f t) + \\ &(-\lambda N_1 + \omega_f M_1) \cos(\omega_f t) \end{aligned} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式(6)表明,母线零序电压由两部分组成:一是按工频 $\omega$ 等幅振荡的周期分量 $u_{0\_F}$ ,二是按角频率 $\omega_f$ 震荡衰减的暂态分量 $u_{0\_T}$ 。

由式(6)可得健全馈线 $j$ 的零序电流为

$$\begin{cases} i_{0j} = i_{0j\_F} + i_{0j\_T} \\ i_{0j\_F} = \frac{\omega^2 UC_{0j} L}{Z}\sin(\omega t + \theta - \varphi) \\ i_{0j\_T} = C_{0j} Le^{-\lambda t} \left[ \begin{aligned} &((\lambda^2 - \omega_f^2) M_1 + 2\lambda\omega_f N_1) \sin(\omega_f t) + \\ &((\lambda^2 - \omega_f^2) N_1 - 2\lambda\omega_f M_1) \cos(\omega_f t) \end{aligned} \right] \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表明,健全馈线 $j$ 的零序电流由两部分组成:一是按工频 $\omega$ 等幅振荡的周期分量 $i_{0j\_F}$ ,二是按角频率 $\omega_f$ 震荡衰减的暂态分量 $i_{0j\_T}$ 。

由式(4)和式(7)可得故障馈线 $n$ 的零序电流为

$$\begin{cases} i_{0n} = -i_{0L} - \sum_{j=1}^{n-1} i_{0j} = i_{0n\_F} + i_{0n\_T} \\ i_{0n\_F} = [1 - (C - C_{0n})\omega^2 L] \frac{U}{Z} \sin(\omega t + \theta - \varphi) \\ i_{0n\_T} = e^{-\lambda t} \left[ \begin{aligned} &[M_1 + L(C - C_{0n})(\lambda^2 - \omega_f^2) M_1 + 2\lambda\omega_f N_1] \sin(\omega_f t) + \\ &[N_1 + L(C - C_{0n})(\lambda^2 - \omega_f^2) N_1 - 2\lambda\omega_f M_1] \cos(\omega_f t) \end{aligned} \right] \end{cases} \quad (8)$$

式(8)表明,故障馈线 $n$ 的零序电流由两部分组成:一是按工频 $\omega$ 等幅振荡的周期分量 $i_{0n\_F}$ ,二是按角频率 $\omega_f$ 震荡衰减的暂态分量 $i_{0n\_T}$ 。

显然,式(6)一式(8)的结构与式(4)相同。

根据式(7)和式(8),有:

$$\frac{i_{0j\_F}}{i_{0n\_F}} = \frac{\omega^2 UC_{0j} L}{1 - (C - C_{0n})\omega^2 L} \quad (9)$$

又因为消弧线圈过补偿, $\omega^2 L(C - C_{0n}) < 1$ , $i_{0j\_F}/i_{0n\_F} > 0$ 。因此健全馈线和故障馈线的工频零序分量极性一致,且由于消弧线圈的过补偿,健全馈线和故障馈线的工频零序电流幅值也无法区分。因此,在中性点不接地系统中,利用零序电流的工频分量极性和幅值进行选线的方法在谐振接地系统中不适用。

由式(3)可得,当 $R_f$ 逐渐增大时系统的暂态谐振频率 $\omega_f$ 逐渐增大,其最大值为

$$\omega_{f\max} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (10)$$

当消弧线圈补偿度取8%时,可得暂态谐振频率最大值 $\omega_{f\max} = 326.32$  rad/s,换算成频率则为51.96 Hz。因此,暂态谐振频率的最大值略高于工频,为后续的除噪步骤提供了理论支持。

## 2 基于CEEMD的除噪方法

在多模态分解信号除噪中,完全集成经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition, CEEMD),是在经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)的基础上发展而来的。它通过引入噪声并进行多次分解,能够克服传统EMD方法的模态混叠问题。

为了验证CEEMD在谐振接地系统高阻故障信号除噪中的有效性,通过PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件,在某谐振接地系统中的某一馈线A相距母线2 km处,发生了相接地短路故障,故障发生时初相角为 $45^\circ$ ,过渡电阻为1 800  $\Omega$ ,所测得的馈线出口处的零序电流如图2橙色波形所示,故障信号取5个工频周期,即0.1 s。为了更贴近于工程实际,故将原始信号中加入信噪比为-2.5 dB的高斯白噪声,如图2蓝色波形所示。

如图2所示,噪声覆盖了原始信号,仅能辨识大致轮廓,无法精确识别信号特征,无法满足谐振系统高阻故障选线需求,故需预处理除噪。

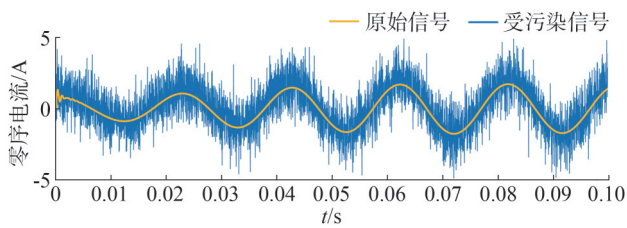


图2 原始信号与受噪声污染信号对比  
Fig.2 Comparison of original signal and noise-contaminated signal

对于图2中的受噪声污染信号,噪声标准差设为0.3,平均次数为60,EMD最大迭代次数为800,通过CEEMD分解得到8个本征模函数(intrinsic mode function, IMF)和残差(residual, Res),如图3所示。

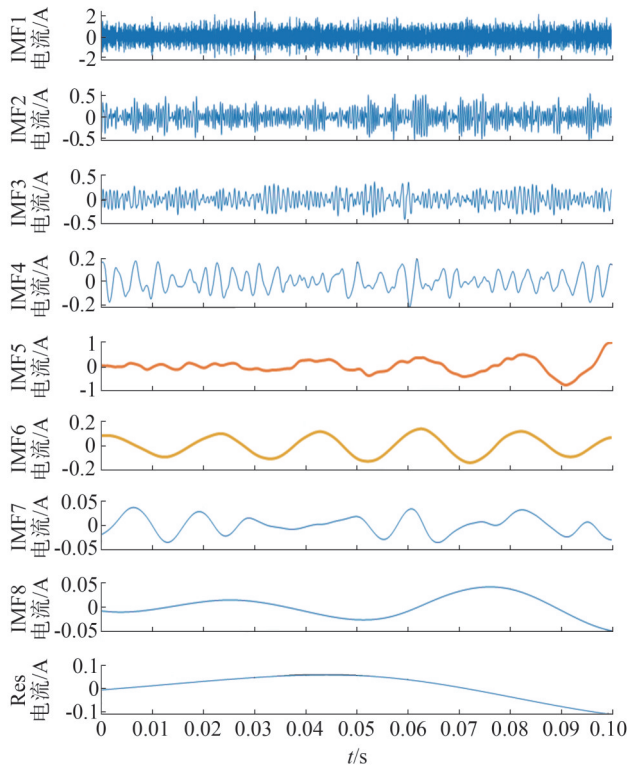
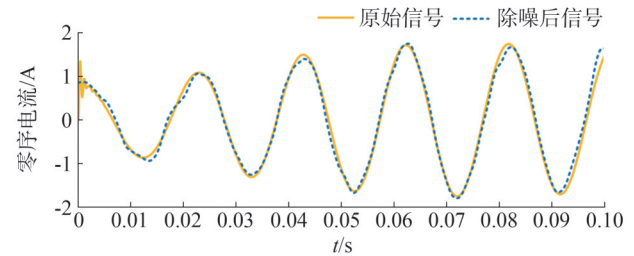


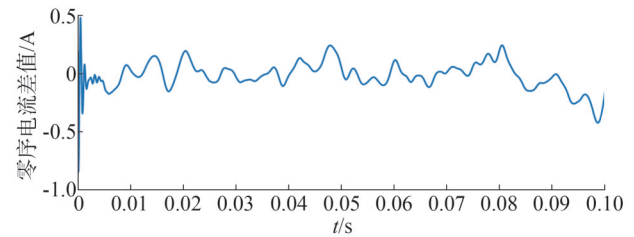
图3 分解后的各IMF和Res  
Fig.3 Pecomposed IMF and Res

对于分解后模式的筛选,根据式(10)及其衍生结论,零序电流信号在结构上应该对应于2个频率,分别为工频和暂态谐振频率。并且暂态谐振频率的最大值略超工频,因此零序电流的能量也应集中在上述两个频率附近。在图3中,除IMF5和IMF6之外,其他IMF在振幅和频率中皆至少有一个不符合要求,

因此舍去。通过将IMF5与IMF6在时域上相加,可以得到除噪信号,如图4(a)中蓝色虚线波形所示。



(a)原始信号与除噪信号时域对比



(b)原始信号与除噪信号作差

图4 原始信号与除噪信号对比

Fig.4 Comparison between original signal and denoised signal

由图4所示,除噪后的信号在时域上具有较高的重合度,且除噪后信号与原始信号的差值在可接受范围内。因此,CEEMD应用于谐振系统高阻故障信号除噪具有良好的效果,在极低信噪比下仍然可以较为准确地分离出故障信号,有利于信号特征的提取。

### 3 基于D-S证据理论的改进故障选线方法

#### 3.1 故障判据的构建

##### 3.1.1 基于馈线暂态能量的判据

在故障发生起始至零序电流衰减至稳态的过程中,故障馈线流过的暂态能量为各健全馈线流过的暂态能量和消弧线圈中流过的暂态能量之和,即:

$$\int_0^{+\infty} u_{0,T} \cdot i_{0n,T} dt = - \sum_{j=1}^{n-1} \int_0^{+\infty} u_{0,T} \cdot i_{0j,T} dt - \int_0^{+\infty} u_{0,T} \cdot i_{0L,T} dt \quad (11)$$

由于在馈线始端安装的测量元件具有方向性,因此故障馈线与健全馈线流过的暂态能量极性相反,且满足:

$$|w_{0n,T}| > \left| \sum_{j=1}^{n-1} w_{0j,T} \right| \gg |w_{0L,T}| \quad (12)$$

式中: $w_{0n,T}$ 为故障线路n流过的暂态能量; $w_{0j,T}$ 为

健全线路 $j$ 流过的暂态能量。

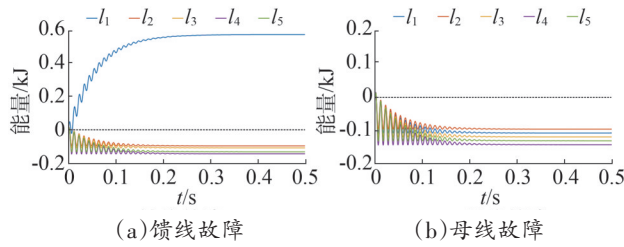


图5 不同情况下的馈线暂态能量

Fig.5 Transient energy of feeders in different scenarios

因此,当所有馈线流过的暂态能量极性相同时,则判断为母线故障;若有一条馈线流过的暂态能量极性与其他馈线相反,且能量值远远大于其馈线,则判断该馈线为故障馈线。

### 3.1.2 基于欧式距离的判据

欧氏距离是指在多维空间中两点之间的直线距离,其基于勾股定理进行计算。对于 $y$ 维空间中的两点 $E(e_1, e_2, \dots, e_y)$ 和 $G(g_1, g_2, \dots, g_y)$ ,其欧氏距离 $d(E, G)$ 的计算公式为

$$d(E, G) = \sqrt{\sum_{i=1}^y (e_i - g_i)^2} \quad (13)$$

当母线发生故障时,各馈线的零序电流在多维空间上距离相近,欧式空间距离相差不大。当馈线发生故障时,故障馈线与健全馈线的零序电流波形在多维空间上有较大距离,而健全馈线之间的零序电流波形的多维空间距离较小。而越靠近故障发生初期,这种差异性会越明显,因此,取故障发生后的1个工频周期作为比较零序电流波形的样本。根据图6两种不同情况下的零序电流波形,分别进行欧式空间距离比较,结果如表1、表2所示。其中, $l_j$ 为各馈线编号 $j = 1, 2, 3, 4, 5$ 。

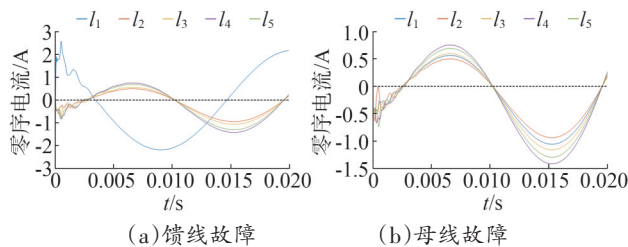


图6 不同情况下馈线零状态响应零序电流

Fig.6 Zero-sequence current of feeders' zero-state response in different scenarios

表1 馈线故障情况下的欧式距离

Table 1 Euclidean distance under feeder fault conditions

$l_j$	$d(l_1, l_j)$	$d(l_2, l_j)$	$d(l_3, l_j)$	$d(l_4, l_j)$	$d(l_5, l_j)$
$l_1$	0	102.136	104.635	112.265	109.675
$l_2$	102.136	0	4.601	15.657	11.988
$l_3$	104.635	4.601	0	11.719	8.129
$l_4$	112.265	15.657	11.719	0	4.033
$l_5$	109.675	11.988	8.129	4.033	0

表2 母线故障情况下的欧式距离

Table 2 Euclidean distance under busbar fault condition

$l_j$	$d(l_1, l_j)$	$d(l_2, l_j)$	$d(l_3, l_j)$	$d(l_4, l_j)$	$d(l_5, l_j)$
$l_1$	0	4.671	0	11.480	7.850
$l_2$	4.671	0	4.671	15.507	11.932
$l_3$	0	4.671	0	11.480	7.850
$l_4$	11.480	15.507	11.480	0	3.976
$l_5$	7.850	11.932	7.850	3.976	0

### 3.1.3 基于夹角余弦的判据

在多维空间中,向量之间的夹角余弦值可以用来衡量它们方向上的相似程度。

对于两个 $z$ 维向量 $\mathbf{h} = (h_1, h_2, \dots, h_z)$ 和 $\boldsymbol{\delta} = (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_z)$ ,它们之间的夹角余弦值 $\cos \theta$ 的计算为

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{h} \cdot \boldsymbol{\delta}}{\|\mathbf{h}\| \cdot \|\boldsymbol{\delta}\|} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{h} \cdot \boldsymbol{\delta} = \sum_{m=1}^z h_m \delta_m$ 为向量 $\mathbf{h}$ 和 $\boldsymbol{\delta}$ 的点积; $\|\mathbf{h}\| = \sqrt{\sum_{m=1}^z h_m^2}$ 和 $\|\boldsymbol{\delta}\| = \sqrt{\sum_{m=1}^z \delta_m^2}$ 分别为向量 $\mathbf{h}$ 和 $\boldsymbol{\delta}$ 的模。

夹角余弦值的取值范围为 $[-1, 1]$ 。当 $\cos \theta = 1$ 时,表示两个向量完全相同;当 $\cos \theta = -1$ 时,表示两个向量完全相反;当 $\cos \theta = 0$ 时,表示两个向量互相垂直。

各馈线零序电流波形也可以通过夹角余弦值进行波形相似度分析。根据图6的两种不同情况下的零序电流波形,分别进行夹角余弦值计算,结果如表3、表4所示。

各馈线零序电流波形也可以通过夹角余弦值进行波形相似度分析。根据图6的两种不同情况下的零序电流波形,分别进行夹角余弦值计算,结果如表3、表4所示。

### 3.2 故障测度处理方法

故障测度在使用本方法前首先要进行Min-Max归一化至0.2~0.8:

$$X_{\text{normal}} = 0.2 + \frac{0.6(X - X_{\min})}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (15)$$

式中: $X_{\text{normal}}$ 为归一化后的样本序列; $X$ 为归一化前的样本序列; $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为 $X$ 中的最大值和最小值。

表3 馈线故障情况下的夹角余弦值  
Table 3 The cosine value of the angle under feeder fault conditions

$l_j$	$d(l_1, l_j)$	$d(l_2, l_j)$	$d(l_3, l_j)$	$d(l_4, l_j)$	$d(l_5, l_j)$
$l_1$	1.000 0	-0.365 8	-0.370 1	-0.372 1	-0.371 8
$l_2$	-0.365 8	1.000 0	0.996 9	0.995 4	0.995 2
$l_3$	-0.370 1	0.996 9	1.000 0	0.997 6	0.997 2
$l_4$	-0.372 1	0.995 4	0.997 6	1.000 0	0.999 5
$l_5$	-0.371 8	0.995 2	0.997 2	0.999 5	1.000 0

表4 母线故障情况下的夹角余弦值  
Table 4 Cosine value of the angle under busbar fault conditions

$l_j$	$d(l_1, l_j)$	$d(l_2, l_j)$	$d(l_3, l_j)$	$d(l_4, l_j)$	$d(l_5, l_j)$
$l_1$	1.000 0	0.996 0	0.998 9	0.999 0	0.998 6
$l_2$	0.996 0	1.000 0	0.996 0	0.995 0	0.994 3
$l_3$	0.998 9	0.996 0	1.000 0	0.999 0	0.998 6
$l_4$	0.999 0	0.995 0	0.999 0	1.000 0	0.999 5
$l_5$	0.998 6	0.994 3	0.998 6	0.999 5	1.000 0

本方法涉及3种故障判据,各故障判据编号为 $p, p=1, 2, 3$ ;选线对象包括母线与 $N$ 条馈线,馈线编号为 $l_k, k=0, 1, 2, \dots, N, l_0$ 表示母线。对于 $p$ 判据 $k$ 馈线的故障测度值为 $M_p(l_k) \in [0.2, 0.8]$ 。

### 3.2.1 故障判据占比系数的计算

在模糊理论中,隶度函数曲线采用正则三角模糊数,即:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & 0 \leq a \leq x \leq b \\ 1, & x = b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $a, b, c$ 均为常数; $x$ 为模糊数。记 $\bar{A} = (a, b, c; 1)$ ,每个故障判据对应的标准模糊数为 $\bar{A}_p = (a_p, b_p, c_p; 1)$ ,则有:

$$a_p = \frac{\sum_{\beta \in R = \{k | M_p(l_k) < b_p\}} M_p(l_\beta)}{r} \quad (17)$$

$$b_p = \frac{\sum_{\beta=0}^N M_p(l_\beta)}{N+1} \quad (18)$$

$$c_p = \frac{\sum_{\beta \in S = \{k | M_p(l_k) \geq b_p\}} M_p(l_\beta)}{s} \quad (19)$$

式中: $r$ 为集合 $R$ 中元素的个数; $s$ 为集合 $S$ 中元素的个数。

取两个基准模糊数 $\bar{A}_{\text{basis0}} = (0, 0, 0; 1)$ ,  $\bar{A}_{\text{basis1}} = (1, 1, 1; 1)$ 。设标准模糊数 $\bar{A}_p$ 左半侧隶度函数曲线为 $g_1(x)$ ,设右半侧隶度函数曲线为 $g_2(x)$ 。则记 $\bar{A}_{\text{basis0}}$ 与 $g_1(x)$ 围成的面积为左邻面积 $S_{\text{LN}}$ ,与 $g_2(x)$ 围成的面积为左远面积 $S_{\text{LF}}$ ;记 $\bar{A}_{\text{basis1}}$ 与 $g_2(x)$ 围成的面积为右邻面积 $S_{\text{RN}}$ ,与 $g_1(x)$ 围成的面积为右远面积 $S_{\text{RF}}$ ,如图7所示。

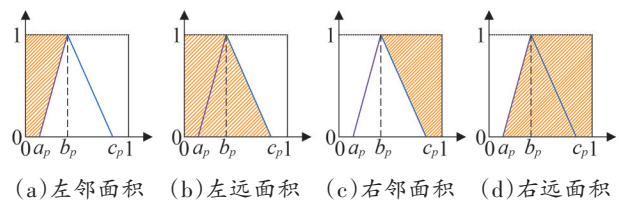


图7 隶度函数曲线围成面积

Fig.7 Area enclosed by the membership function curve

定义两个不同故障判据 $u, v$ 之间的相互差异系数为 $d_{is}(u, v) = |S_L(u) - S_L(v)| + |S_R(u) - S_R(v)|$  (20) 式中: $S_L$ 为左边平均面积; $S_R$ 为右边平均面积。

相互差异系数越小,说明两个判据的判断结果越接近,可信度越高。因此,对于馈线的任一故障判据,则定义故障判据 $u$ 的占比系数为

$$a_{cc}(u) = 1 - \sum_{v=1, v \neq u}^3 d_{is}(u, v) / 2 \quad (21)$$

根据判据占比系数对故障测度值进行修正,得到故障测度值的修正值为

$$M'_p(l_k) = M_p(l_k) \cdot a_{cc}(p) \quad (22)$$

### 3.2.2 馈线间拟合系数的计算

利用每条馈线修正后的故障测度值,得到第 $k$ 条馈线的线路向量 $H(k)$ ,即 $H(k) = (M'_1(l_k), M'_2(l_k), M'_3(l_k))$ ,则不同馈线之间的拟合程度为

$$f_{it}'(k, k') = \frac{H(k) \cdot H(k')}{|H(k)| \times |H(k')|}, k \neq k' \quad (23)$$

拟合程度越大,说明两条馈线之间故障判断的趋同性越强。根据不同馈线间的拟合程度与向量模值加权得到第 $k$ 条馈线的拟合系数为

$$f_{it}(k) = \frac{\sum_{k'=0, k' \neq k}^N f_{it}'(k, k') \cdot |H(i)|}{N \cdot \sum_{k=0}^N |H(k)|} \quad (24)$$

拟合系数衡量了本馈线与其他馈线之间故障测度的差异程度。根据拟合系数对馈线  $k$  的故障测度进行拟合,得到最终的故障测度为

$$M_p''(l_k) = M_p'(l_k) \cdot f_{it}(k) \quad (25)$$

根据馈线的故障测度,构建基本概率赋值计算公式为

$$\begin{cases} m_p(l_k) = \frac{a_{cc}(p) \cdot M_p''(l_k)}{(0.8 - \max_{k=0,1,2,\dots,N} M_p''(l_k)) + \sum_{k=0}^N M_p''(l_k)} \\ m_p(\Theta) = 1 - \sum_{k=0}^N m_p(l_k) \end{cases} \quad (26)$$

式中: $m_p(l_k)$  为  $p$  判据下  $l_k$  的基本概率值; $m_p(\Theta)$  为判据  $p$  的不确定度, $m_p(\Theta)$  越大,表明该判据不确定性越高。

### 3.2.3 故障测度的融合

根据 D-S 证据理论,融合后馈线  $l_k$  的信度值为

$$m(l_k) = \frac{\sum_{A \cap B \cap C = l_k} m_1(A) m_2(B) m_3(C)}{1 - K} \quad (27)$$

其中,

$$\begin{cases} m(\Theta) = 1 - \sum_{k=0}^N m(l_k) \\ K = \sum_{A \cap B \cap C = \emptyset} m_1(A) m_2(B) m_3(C) \\ A, B, C \in \{l_k | k = 0, 1, 2, \dots, N\} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $m(\Theta)$  为融合后的不确定度; $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为判据 1、判据 2、判据 3 的各馈线编号集合; $m_1(A)$ 、 $m_2(B)$ 、 $m_3(C)$  为各判据满足约束条件的所有基本概率值。

信度值最大的馈线,即  $\max(m(l_k))$  所对应的馈线被判断为故障馈线。

### 3.3 故障选线流程

基于上述 CEEMD 除噪、故障判据构建以及故障测度的处理方法,本文提出一种基于改进 D-S 证据理论和 CEEMD 的配电网高阻故障选线方法,其具体流程如图 8 所示。

## 4 仿真测试

为了验证本方法的可行性,本文使用 PSCAD/

EMTDC 进行仿真测试,建立的径向配电网如图 9 所示。其中,110 kV 系统通过变比为 110 kV/10.5 kV 的变压器与配电网相连,变压器的高压侧采用星形接线方式,中性点采用经消弧线圈接地方式过补偿,补偿度为 8%,电感  $L=0.72$  H。配电网馈线采用电缆与架空线路混合连接方式,馈线总长度为 68 km,其中,电缆采用 YJV22-3×400,总长度为 34 km,架空线路采用 JKLYJ-150,总长度为 34 km。配电网馈线末端采用 10 kV/0.4 kV 变压器与 1 MW 负荷连接,另外,在  $l_2$  与  $l_4$  末端采用 10 kV/0.69 kV 变压器与光伏发电系统  $DG_1$ 、 $DG_2$  相连。

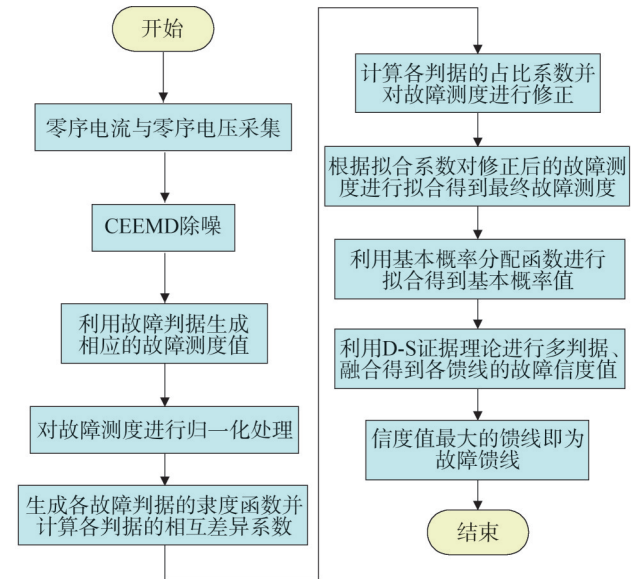


图 8 故障选线流程

Fig.8 Faulty feeder selection process

### 4.1 算例验证

在距馈线  $l_1$  始端 4 km(a) 处, A 相发生了故障初相角  $\theta = 90^\circ$ , 过渡电阻  $R_f = 2800 \Omega$  的单相接地故障。

在各馈线始端测得的零序电流中加入信噪比为 -2.8 dB 的噪声, 得到含噪声的零序电流, 如图 10 所示。

如图 10 所示, 故障信号完全被噪声淹没, 无法进行故障特征的提取, 需进行除噪预处理。通过本文所提出的 CEEMD 除噪方法对含噪声信号进行除噪, 结果如图 11 所示。

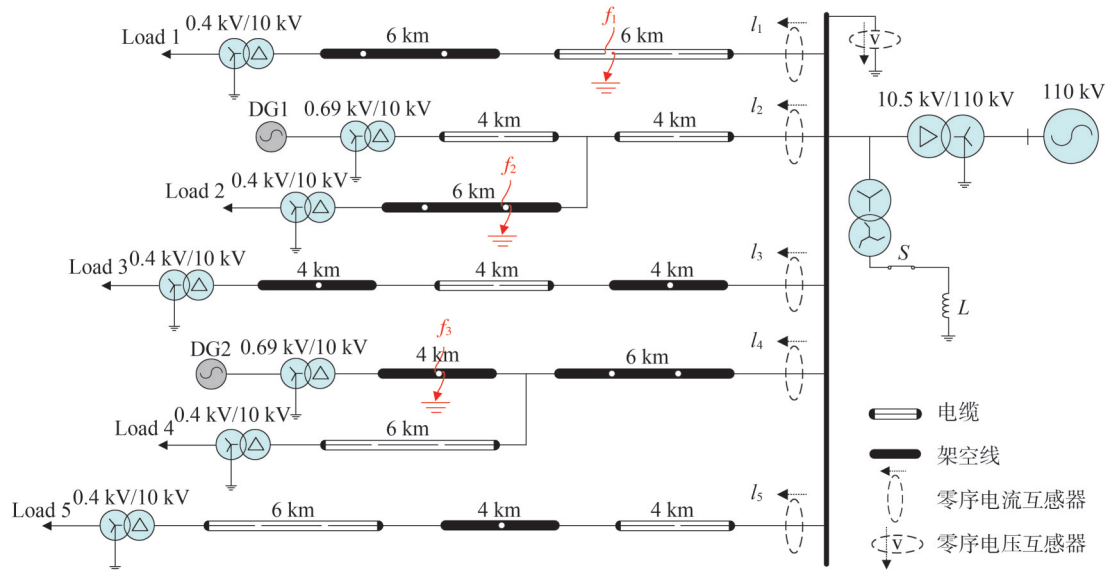


图9 基于PSCAD/EMTDC的配电网径向仿真模型

Fig.9 Radial simulation model of distribution network based on PSCAD/EMTDC

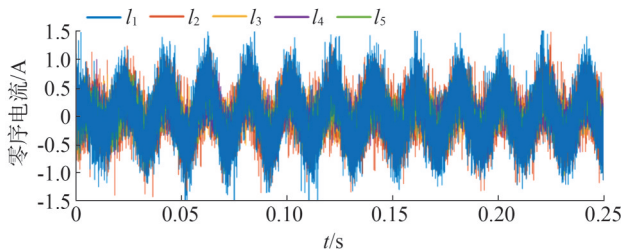


图10 各馈线含噪声零序电流

Fig.10 Zero-sequence current with noise for each feeder

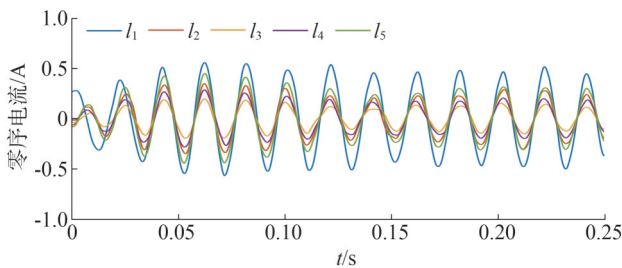


图11 除噪后的各馈线零序电流

Fig.11 Zero-sequence current of each feeder after noise reduction

经除噪后的各馈线零序电流信号已清晰可见,相比于图10的混乱波形,图11中的零序电流波形已满足正常提取信号特征的要求,可以进行故障测度的生成。

选取故障判据为:1)FC1,基于馈线暂态能量的判据;2)FC2,基于欧式距离的判据;3)FC3,基于余

弦相似度的判据。将上述3个判据的故障测度归一化后,得到的测度值如表5所示。

表5 归一化后的故障测度值

Table 5 Normalized fault measure values

故障判据	$M_p(l_0)$	$M_p(l_1)$	$M_p(l_2)$	$M_p(l_3)$	$M_p(l_4)$	$M_p(l_5)$
FC1	0.224 7	0.800 0	0.239 5	0.224 7	0.200 0	0.209 0
FC2	0.324 2	0.800 0	0.203 5	0.203 0	0.200 0	0.202 7
FC3	0.223 6	0.800 0	0.230 3	0.221 1	0.200 0	0.210 1

根据归一化后的故障测度值,根据式(17)一式(19),分别构建每个测度的隶度函数曲线,如图12所示。

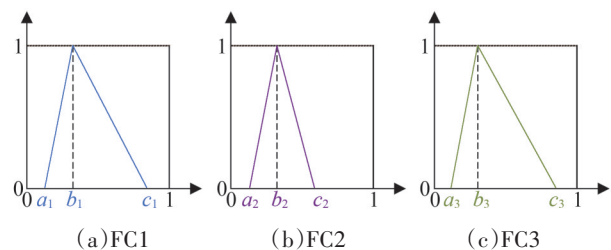


图12 各判据隶度函数曲线

Fig.12 Membership function curves for each criterion

由图12所示,判据1与判据3的隶度函数曲线较为相似,而判据2的隶度函数曲线与判据1和判

据3差异较大。由此可知,判据1与判据3的判断结果接近,可信度较高。由各判据的隶度函数曲线可以得到左边与右边的平均面积,如图13所示。如图13所示,判据2与其他两个判据在平均面积上具有差异性。

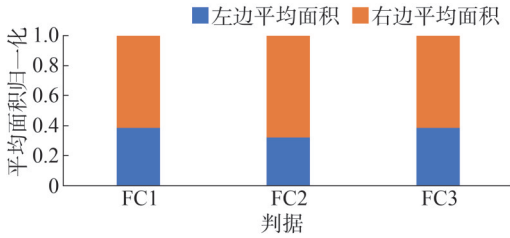


图13 左边平均面积与右边平均面积

Fig.13 Average area on the left and average area on the right

由图13所示的平均面积,根据式(20)、式(21),可以得到各判据的相互差异系数和占比系数,如表6所示。

表6 各判据的相互差异系数与占比系数

Table 6 Mutual difference coefficients and proportion coefficients of each criterion

判据 $p$	$d_{is}(FC1,p)$	$d_{is}(FC2,p)$	$d_{is}(FC3,p)$	$a_{cc}(p)$
FC1	0	0.133 3	0.003 6	0.931 6
FC2	0.133 3	0	0.129 7	0.868 5
FC3	0.003 6	0.129 7	0	0.933 4

根据式(22),对各判据的测度进行修正,得到的修正后的测度值如表7所示。

表7 修正后的故障测度值

Table 7 Corrected fault measure values

故障判据	$M'_p(l_0)$	$M'_p(l_1)$	$M'_p(l_2)$	$M'_p(l_3)$	$M'_p(l_4)$	$M'_p(l_5)$
FC1	0.209 3	0.745 3	0.223 1	0.209 3	0.186 3	0.194 7
FC2	0.281 5	0.694 8	0.176 7	0.176 3	0.173 7	0.176 1
FC3	0.208 7	0.746 7	0.215 0	0.206 3	0.186 7	0.196 1

表7中的每一列即  $k$  馈线的线路向量  $H(k)$ 。根据式(23)一式(25),可以得到经过线路拟合后的故障测度,如表8所示。

表8 拟合后的故障测度值

Table 8 Fault measure values after fitting

故障判据	$M''_p(l_0)$	$M''_p(l_1)$	$M''_p(l_2)$	$M''_p(l_3)$	$M''_p(l_4)$	$M''_p(l_5)$
FC1	0.027 7	0.311 1	0.026 2	0.023 7	0.019 4	0.021 1
FC2	0.037 3	0.290 1	0.020 8	0.019 9	0.018 1	0.019 1
FC3	0.027 7	0.311 7	0.025 3	0.023 3	0.019 5	0.021 2

根据式(26)计算基本概率分配,如表9所示。馈线  $l_1$  的基本概率值已与其余馈线有很大差异,到此基本可以确定是馈线  $l_1$  发生了故障,但还需经D-S证据理论进行综合决策。另外  $m_2(\Theta)$  也明显高于  $m_1(\Theta)$  和  $m_3(\Theta)$ ,表明判据2的可信度较低,这为之后的综合决策提供了有价值的信息。

表9 基本概率分配表

Table 9 Basic probability assignment table

故障判据	$m_p(l_0)$	$m_p(l_1)$	$m_p(l_2)$	$m_p(l_3)$	$m_p(l_4)$	$m_p(l_5)$	$m_p(\Theta)$
FC1	0.060 0	0.672 4	0.056 6	0.051 1	0.042 0	0.045 6	0.072 3
FC2	0.079 0	0.614 1	0.044 0	0.042 2	0.038 4	0.040 4	0.141 9
FC3	0.060 0	0.675 8	0.054 8	0.050 6	0.042 2	0.046 0	0.070 5

根据D-S证据理论,由式(27),可以得到各馈线的合成信度值  $m(l_i)$ ,如表10所示。

表10 各馈线合成信度值

Table 10 Composite belief values for each feeder

$l_k$	$m(l_k)$	$l_k$	$m(l_k)$
$l_0$	0.007 2	$l_4$	0.003 7
$l_1$	0.973 3	$l_5$	0.004 1
$l_2$	0.005 3	$m(\Theta)$	0.001 7
$l_3$	0.004 7		

如表10所示,  $l_1$  的合成信度值远大于其他馈线,且  $m(\Theta)$  远小于合成之前的  $m_p(\Theta)$ ,因此可以确定  $l_1$  为故障馈线,这与仿真设置的馈线编号一致,因此故障选线成功。

#### 4.2 方法性能对比

为了表明该方法相对于传统D-S证据理论合成信度值的方法的优势,直接将故障测度生成基本信

度分配表,跳过本方法对故障测度的处理,使用D-S证据理论计算各馈线合成信度值,如表11所示。

表11 传统方法生成的各馈线合成信度值  
Table 11 Composite belief values for each feeder generated by traditional methods

$l_k$	$m(l_k)$	$l_k$	$m(l_k)$
$l_0$	0.063 4	$l_4$	0.041 0
$l_1$	0.742 5	$l_5$	0.043 6
$l_2$	0.050 2	$m(\Theta)$	0.002 4
$l_3$	0.056 0		

将表10与表11中的数据以柱状图形式进行对比,如图14所示。

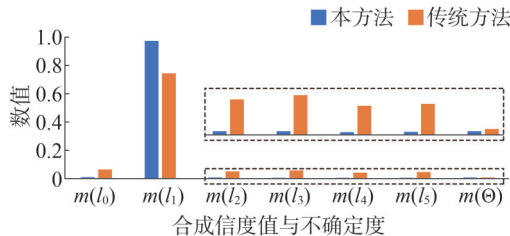


图14 不同方法生成的各馈线合成信度值对比

Fig.14 Comparison between the proposed method and traditional methods

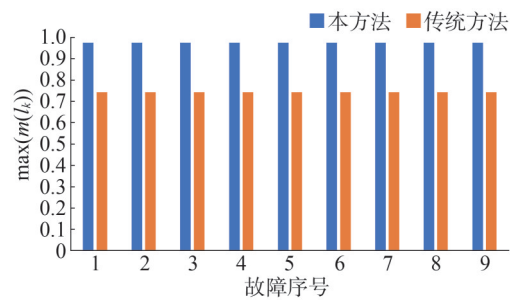
由图14所示,本方法 $l_1$ 的合成信度值明显大于传统方法,并且其他馈线的信度值明显小于传统方法。对于不确定度 $m(\Theta)$ ,本方法小于传统方法,说明本方法得出的结果更加可信。

为了评估该方法对不同馈线,不同过渡电阻,不同故障初相角的适应性,在图9所示的仿真模型中设置了 $f_1, f_2, f_3$ 三个故障点,每个故障点分别设置不同的过渡电阻和故障初相角,共9组不同的故障工况,在每种故障工况的电流波形中加入-2.8 dB的噪声并使用CEEMD除噪。每一种故障工况取最大的合成信度值 $\max(m(l_k))$ 和不确定度 $m(\Theta)$ 进行对比,结果如表12和图15所示。

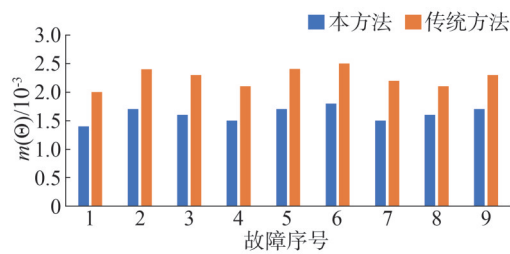
如图15所示,本方法最大的合成信度值 $\max(m(l_k))$ 明显大于传统方法,而不确定度 $m(\Theta)$ 皆小于传统方法。说明本方法可以使D-S证据理论更加聚焦于故障馈线,并且具有更高的可信度。

表12 不同故障工况下的本方法与传统方法对比  
Table 12 Comparison between the proposed method and traditional method in different faulty conditions

故障地点	故障序号	$R_f/\Omega$	$\theta/(^\circ)$	$\max(m(l_k))$		$m(\Theta)$	
				本方法	传统方法	本方法	传统方法
$f_1$	1	1 200	30	0.974 4	0.743 4	0.001 4	0.002 0
	2	2 800	90	0.973 3	0.742 5	0.001 7	0.002 4
	3	2 500	135	0.973 5	0.742 7	0.001 6	0.002 3
$f_2$	4	1 500	0	0.974 1	0.743 0	0.001 5	0.002 1
	5	2 000	60	0.973 7	0.742 8	0.001 7	0.002 4
	6	2 600	90	0.973 4	0.742 6	0.001 8	0.002 5
$f_3$	7	1 300	30	0.974 2	0.743 2	0.001 5	0.002 2
	8	1 800	120	0.974 0	0.742 9	0.001 6	0.002 1
	9	2 400	150	0.973 6	0.742 9	0.001 7	0.002 3



(a) $\max(m(l_k))$ 比较



(b) $m(\Theta)$

图15 不同故障工况下的本方法与传统方法参数对比  
Fig.15 Comparison between the proposed method and traditional methods in different faulty conditions

## 5 结束语

本文首先通过对高阻故障机理的分析,指出了高阻故障情况下暂态零序电流分量振荡频率最大值略超工频,并利用此特点通过CEEMD对含噪声信号进行模态分解,挑选出符合要求的模态进行合成得到除噪后的信号。

然后,提出了一种基于改进D-S证据理论的故

障测度处理方法,通过引入故障判据的占比系数和线路之间的相互差异系数,对原本的故障测度进行处理。

最后,通过构建配电网径向仿真模型,对本方法进行仿真验证。仿真结果表明,该方法具有一定的适应性。相比于传统的方法,该方法可以使D-S证据理论的选线结果更加聚焦于故障馈线,并且不确定度更低,使结果更加可信。

所提出的改进D-S证据理论采用数学方法,通过深入挖掘各故障测度之间的内在联系,以提升其可信度。然而,故障测度的计算依旧依赖于故障判据,而故障判据的计算前提则须对零序电流波形进行去噪处理。因此,选择合适的去噪方法和构建更为鲁棒的故障判据,成为未来研究的关键方向之一。此外,尽管所提方法在仿真测试中表现良好,但实际配电网的运行环境极为复杂多变,可能受到各种未知因素的干扰。因此,在将该方法应用于实际配电网之前,仍需进行进一步的验证和优化。

## 参考文献

- [1] 张永东,陶伟叶,常欣丽,等.基于数学形态学与希尔伯特-黄变换的线路故障测距方法研究[J].山东电力技术,2024,51(12):78-83.  
ZHANG Yongdong, TAO Weiye, CHANG Xinli, et al. Research on line fault ranging method based on the mathematical morphology and Hilbert-Huang transform [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(12):78-83.
- [2] 李成钢,刘亚东,杨雪凤,等.基于变分模态分解与空洞卷积神经网络的配电网故障选线方法[J].电网与清洁能源,2024,40(2):110-118.  
LI Chenggang, LIU Yadong, YANG Xuefeng, et al. A method of fault line selection for distribution networks based on variational mode decomposition and dilated convolutional neural network [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(2):110-118.
- [3] 季鹏,陈芳芳,徐天奇,等.基于Spearman相关系数法与有功分量法的高阻接地故障选线方法研究[J].山东电力技术,2022,49(12):8-13.  
JI Peng, CHEN Fangfang, XU Tianqi, et al. Research on high-resistance grounding fault line selection method based on spearman correlation coefficient and active component [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(12):8-13.
- [4] 盖午阳,张心怡,钟世民,等.基于频域加权量的直流配电网单极接地故障工况辨识方法[J].智慧电力,2024,52(11):106-113.  
GAI Wuyang, ZHANG Xinyi, ZHONG Shimin, et al. Pole-to-ground fault condition identification method for DC distribution lines based on frequency-domain weighting [J]. Smart Power, 2024, 52(11):106-113.
- [5] 徐丙垠.现代配电网继电保护技术及其发展[J].供用电,2024,41(8):65-74.  
XU Bingyin. Modern distribution systems relay protection technology and its development [J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(8):65-74.
- [6] 薛永端,李娟,陈筱蕾,等.谐振接地系统高阻接地故障暂态选线与过渡电阻辨识[J].中国电机工程学报,2017,37(17):5037-5048.  
XUE Yongduan, LI Juan, CHEN Xiaoru, et al. Faulty feeder selection and transition resistance identification of high impedance fault in a resonant grounding system using transient signals [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17):5037-5048.
- [7] 葛兴来,邹丹.多层降噪技术及Hilbert变换的轴承故障诊断方法[J].电机与控制学报,2020,24(8):9-17.  
GE Xinglai, ZOU Dan. Bearing fault diagnosis method of multi-layer denoising technologies and Hilbert transformation [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8):9-17.
- [8] 刘琛,吕世轩,刘宗沛,等.模块化多电平有源电力滤波器误差反馈模型预测控制策略[J].电力建设,2024,45(3):107-115.  
LIU Chen, LYU Shuan, LIU Zongpei, et al. Modular multilevel active power filter error feedback model predictive control strategy [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3):107-115.
- [9] 孙会娇,代煜,张建勋,等.直流电源激励下的电路高分辨率应变信号处理[J].仪器仪表学报,2019,40(8):184-190.  
SUN Huijiao, DAI Yu, ZHANG Jianxun, et al. High resolution strain signal processing for the circuit under DC source excitation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8):184-190.
- [10] 徐舒蓉,刘君,李堃,等.基于GWO-VMD与SOM神经网络的变压器振动信号特征提取与状态识别方法研究[J].电力大数据,2025,28(4):30-40.  
XU Shurong, LIU Jun, LI Kun, et al. Research on feature extraction and condition identification method for transformer vibration signals based on GWO-VMD and SOM neural network [J]. Power Systems and Big Data, 2025, 28(4):30-40.
- [11] 胡伟,李勇,曹一家,等.基于LOF和SVM的智能配电网故障辨识方法[J].电力自动化设备,2016,36(6):7-12.  
HU Wei, LI Yong, CAO Yijia, et al. Fault identification based on LOF and SVM for smart distribution network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):7-12.
- [12] 童宁,余梦琪,林湘宁,等.基于相电流高频特征识别的配电网故障指示器原理[J].电工技术学报,2015,30(12):465-471.  
TONG Ning, YU Mengqi, LIN Xiangning, et al. Study for fault indicator based on the faulty phase current feature recognition for the distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2015, 30(12):465-471.
- [13] 李佳玮, 王小君, 和敬涵, 等. 基于图注意力网络的配电网故障定位方法[J]. 电网技术, 2021, 45(6):2113-2121.  
LI Jiawei, WANG Xiaojun, HE Jinghan, et al. Distribution network fault location based on graph attention network [J]. Power System Technology, 2021, 45(6):2113-2121.
- [14] 朱壮华, 张卫平, 王文彦, 等. 基于图神经网络的光伏组串故障诊断[J]. 分布式能源, 2024, 9(4):78-85.  
ZHU Zhuanghua, ZHANG Weiping, WANG Wenyan, et al. Fault diagnosis of photovoltaic string based on graph neural network [J]. Distributed Energy, 2024, 9(4):78-85.
- [15] BAI H, GAO J H, LI W, et al. Detection of high-impedance fault in distribution networks using frequency-band energy curve [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(1):427-436.
- [16] YIN Z H, ZHENG Y P, WEI Z N, et al. High-impedance fault section location for distribution networks based on t-distributed stochastic neighbor embedding and variable mode decomposition [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(5):1495-1505.
- [17] 白浩, 李鹏, 袁智勇, 等. 人工智能在配电网高阻接地故障检测中的应用及展望[J]. 南方电网技术, 2019, 13(2):34-44.  
BAI Hao, LI Peng, YUAN Zhiyong, et al. Application and prospect of artificial intelligence in high impedance fault detection of distribution network [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(2):34-44.
- [18] 王宇杉, 王晨, 王淑侠, 等. 基于IWOA的配电网故障定位方法[J]. 智慧电力, 2024, 52(11):98-105.  
WANG Yushan, WANG Chen, WANG Shuxia, et al. Fault location method for distribution network based on improved IWOA [J]. Smart Power, 2024, 52(11):98-105.
- [19] 罗国敏, 杨雪凤, 尚博阳, 等. 基于改进堆叠降噪自编码器的配电网高阻接地故障检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(24):149-160.  
LUO Guomin, YANG Xuefeng, SHANG Boyang, et al. High impedance grounding fault detection method of a distribution network based on an improved stacked denoised autoencoder [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24):149-160.
- [20] 官宇, 张莲, 杨洪杰, 等. 基于自适应遗传量子粒子群算法的配电网故障定位[J]. 浙江电力, 2021, 40(6):1-7.  
GONG Yu, ZHANG Lian, YANG Hongjie, et al. Fault location of distribution network based on adaptive genetic quantum particle swarm optimization algorithm [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(6):1-7.
- [21] 韦明杰, 张恒旭, 石访, 等. 基于谐波能量和波形畸变的配电网弧光接地故障辨识[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(16):148-154.  
WEI Mingjie, ZHANG Hengxu, SHI Fang, et al. Identification of arcing grounded fault in distribution network based on harmonic energy and waveform distortion [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16):148-154.
- [22] 董俊, 李一凡, 束洪春, 等. 配电网馈出线单相永久性接地故障性质辨识方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21):4576-4585.  
DONG Jun, LI Yifan, SHU Hongchun, et al. Study on identification method of single phase permanent ground fault in distribution network feedout line [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21):4576-4585.
- [23] 刘伟生, 徐丙垠, 刘远龙, 等. 基于暂态电流的小电流接地故障分界方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24):157-162.  
LIU Weisheng, XU Bingyin, LIU Yuanlong, et al. Transient current based demarcation method of small current grounding fault [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(24):157-162.
- [24] 王尊贤, 武守远, 栾晓明. 基于虚拟能量变化率的谐振接地系统高阻接地故障选线方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3):137-146.  
WANG Zunxian, WU Shouyuan, LUAN Xiaoming. Fault line selection method for high-impedance grounding fault of resonant grounded system based on change rate of virtual energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3):137-146.
- [25] 赵宇洋, 徐慧慧, 田云飞, 等. 基于融合注意力机制自编码器的配电网光伏逆变器故障检测[J]. 智慧电力, 2024, 52(11):1-7.  
ZHAO Yuyang, XU Huihui, TIAN Yunfei, et al. Fault detection in grid-connected photovoltaic inverters using an autoencoder integrated with attention mechanism [J]. Smart Power, 2024, 52(11):1-7.
- [26] 赵维兴, 熊楠, 宁楠, 等. 基于多源信息融合的电网多层智能故障诊断方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9):9-15.  
ZHAO Weixing, XIONG Nan, NING Nan, et al. Multi-layer intelligent fault diagnosis method of power grid based on multi-source information fusion [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9):9-15.
- [27] 王鹤, 韦搏, 李石强, 等. 基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5):61-72.  
WANG He, WEI Bo, LI Shiqiang, et al. Fault diagnosis of a DC distribution network based on Bayesian network information fusion [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5):61-72.

收稿日期:2025-02-09

修回日期:2025-03-26

作者简介:

张明(1976), 通信作者(6886619@qq.com), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为信息通信和电网调控;

陆恣(1983), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网和电力信息通信;

张鑫(1996), 男, 硕士, 工程师, 从事配电网运营检修工作。

(责任编辑 张丹丹)

# 面向中高压配电网安全的电采暖负荷最优调度

崔晨瑜<sup>1</sup>, 张俊岭<sup>2</sup>, 于程<sup>1</sup>, 施啸寒<sup>1\*</sup>

(1. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061;

2. 山东鲁软数字科技有限公司, 山东 济南 250001)

**摘要:**以电采暖为代表的新兴负荷灵活运行能力强,利用其可调能力提升中高压配电网运行安全水平成为“源荷互动”在配电网场景下的重要需求。面对中高压配电网安全运行中网络参数辨识困难与源荷协同复杂度高双重挑战,提出一种基于数据挖掘的电采暖负荷优化调度方法。首先,建立融合设备热动态特性和用户舒适度约束的电采暖负荷精细化调节模型,量化分析其调控成本;其次,构建计及光伏出力时序特性和网络潮流安全约束的多时段协同优化模型,实现源荷双侧资源的动态匹配;进而,提出基于历史运行数据挖掘的功率转移分布因子(power transfer distribution factor, PTDF)矩阵在线辨识算法,突破传统物理建模对网络参数精度的依赖;最后,设计基于二次规划的高效求解策略,生成兼顾电网安全和用户需求的最优调控方案。基于IEEE 30系统的仿真结果表明:所提方法可有效避免关键线路和变压器重过载,同时可在不影响用户供暖情况下尽量降低调节代价,实现源网荷高效互动协同。

**关键词:**配电网安全;电采暖负荷;优化调度;数据驱动;功率转移分布因子

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2026)03-0097-10

## Optimized Dispatch of Electric Heating Loads for Medium-high Voltage Distribution Network Security

CUI Chenyu<sup>1</sup>, ZHANG Junling<sup>2</sup>, YU Cheng<sup>1</sup>, SHI Xiaohan<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education

(Shandong University), Jinan 250061, China;

2. Shandong Luneng Software Technology Co., Ltd., Jinan 250001, China)

**Abstract:** Emerging loads, represented by electric heating, possess strong operational flexibility, and utilizing their adjustable capabilities to enhance the operational security level of medium-high voltage distribution networks has become a key demand for "source-load interaction" in distribution network scenarios. To address the dual challenges of network parameter identification difficulties and high complexity of source-load coordination in the safe operation of medium-high voltage distribution networks, this paper proposes a data mining-based optimized dispatch method for electric heating loads. First, a refined regulation model for electric heating loads is established, integrating thermal dynamic characteristics of equipment and user comfort constraints, to quantify and analyse their regulation costs. Second, a multi-period collaborative optimization model is constructed, considering the temporal characteristics of photovoltaic output and network power flow security constraints, enabling dynamic matching of resources from both the source and load sides. Furthermore, an online identification algorithm for power transfer distribution factor (PTDF) matrices based on historical operational data mining is proposed, breaking through the dependence on traditional physical modeling for network parameter accuracy. Finally, a quadratic programming-based efficient solving strategy is designed to generate optimal regulation schemes that balance grid security and user demands. Simulation results based on the IEEE 30-bus system demonstrate that the proposed method can effectively prevent overloading of critical lines and transformers while minimizing regulation costs without affecting user heating, achieving efficient interaction and coordination among sources, networks, and loads.

**Keywords:** distribution network security; electric heating load; optimized dispatch; data-driven; power transfer distribution factor

基金项目:山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2021QE146)。

Shandong Provincial Natural Science Foundation of China (ZR2021QE146).

## 0 引言

在“清洁替代”和“电能替代”能源政策推动下,分布式光伏等分布式电源和以电采暖、电动汽车为代表的新型负荷大量接入配电网<sup>[1]</sup>。分布式光伏大规模接入可能导致配电网潮流反向,还可能导致线路或变压器在中午光伏出力高峰时段出现重过载<sup>[2]</sup>。同时,部分负荷如电采暖负荷为变化显著的季节性负荷,容易在冬季低温天气引发线路过载等安全问题<sup>[3]</sup>。分布式电源与新兴负荷大量接入将显著改变配电网潮流,导致光伏大发和高峰负荷期间潮流重过载风险增加,严重威胁配电网安全运行。

电采暖等新兴负荷具有可观的响应速度以及较大的可控能力<sup>[4]</sup>,蕴含着不可忽视的灵活调节潜力,可在降低高峰负荷压力和促进可再生能源的高效消纳等方面发挥显著作用。利用电采暖负荷的可调能力促进新能源消纳、削峰填谷,进而提升中高压配电网运行性能,成为配电网场景下“源荷互动”的研究热点。

目前,人们主要从电采暖负荷建模、参与配电网调节的优化调度算法等领域进行研究。在特性建模研究领域,不同学者针对电采暖系统的热力学特性与用户行为特征提出了多维度建模方法。文献[5]基于热平衡原理构建一阶差分方程模型,以制热空间温度和蓄热体能量为状态变量,表征蓄热式电采暖动态特性;文献[6]针对蓄热水箱热分层现象,创新性提出双节点建模架构,通过划分上下水体区域提升热力学过程表征精度;文献[7]进一步采用偏微分方程构建一维连续体物理模型,实现了水箱温度分布梯度的精细化模拟;文献[8]则突破单体建模局限,通过用户特征分类与聚合技术建立负荷集群模型,有效刻画区域“煤改电”采暖模式异质性特征。

风电消纳控制领域的研究呈现多方向技术路线。文献[9]提出源荷协同多目标优化框架,通过协同优化风电消纳量最大化和系统运行成本最小化双目标,利用高载能负荷时空灵活性优化其运行时序;文献[10-11]开发了蓄热式电采暖与风电联合运行模型,建立多时间尺度连续调控策略,通过电采暖负荷功率的柔性调节实现风电功率波动平抑;文献[12]在此基础上构建风电-电储能-蓄热式电锅炉多

能耦合系统,设计考虑弃风成本量化的能量分层优化模型,通过分别安排各单元的出力情况降低弃风成本。

调峰互动控制研究聚焦差异化技术路径。文献[13]开发计及停电热保障约束的蓄热式电采暖日前优化调度框架,通过建立最小用热量约束函数,确保停电场景下的持续供暖能力;文献[14]融合线性规划与动态规划方法论优势,创新性构建基于列生成算法的电采暖负荷削峰控制模型,实现大规模优化问题的高效求解;文献[15]针对负荷峰谷调节需求,提出基于功耗分布聚类的电热水器动态调控策略,通过负荷模式识别与分类优化降低峰值功率需求;文献[16]进一步引入近似动态规划理论,构建考虑实时电价信号的电采暖需求响应动态优化框架,有效平抑负荷峰谷差。

综上所述,现有新兴负荷优化调度研究主要集中在提高经济性<sup>[9]</sup>、满足用户舒适度需求<sup>[13]</sup>、调峰<sup>[14-16]</sup>和风电消纳<sup>[9-12]</sup>等领域,主要考虑集中于单一节点的风电、光伏-电采暖的运行优化,未研究通过电采暖负荷用电方案调整提高配电网运行安全性的调度方法。此外,部分研究考虑了网络约束,但假设网络参数已知,而实际复杂环境下,配电网参数常常因数据维护不及时或时变性而难以准确获取,这给电采暖负荷优化调度实际应用带来困难。

针对上述问题,本文提出一种面向中高压配电网安全的电采暖负荷最优调度方法,通过调整电采暖负荷用电方案,避免光伏大发和高峰负荷导致配电网元件重过载。首先,综合考虑电采暖设备物理特性与用户供热需求,构建电采暖调节特性与调节成本模型;然后,以配电网线路潮流安全为约束,构建计及负荷及光伏出力时序变化的电采暖负荷多时段优化调度模型;进一步,提出一种基于历史运行数据挖掘的功率转移分布因子(power transfer distribution factor, PTDF)矩阵在线辨识方法,以数据驱动方式获取配电网网络特征参数;最后,以商用求解器为工具,实现优化模型高效求解,给出电采暖负荷优化用电方案。

## 1 蓄热式电采暖负荷模型

电采暖负荷包含直热式和蓄热式两种<sup>[17]</sup>,蓄热

式电采暖具有更大蓄能量且可调能力更强,故本文选用蓄热式电锅炉作为研究对象。

### 1.1 基本原理

图1为水蓄热式电采暖系统的典型结构,系统主要包括电锅炉、储热水泵、蓄热水箱、供热水泵、板式换热器等设备<sup>[18]</sup>。其工作原理为电锅炉利用电阻通电发热对水进行加热,并通过储热水泵存储在蓄热水箱中;用户根据采暖需求通过供热水泵从蓄热水箱中取出预热好的水;电锅炉对回流的冷水进行再次加热。

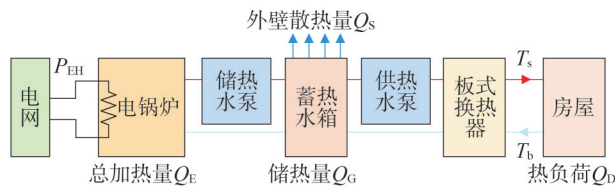


图1 蓄热式电采暖系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of a thermal storage electric heating system

为构建蓄热式电采暖负荷模型,对上述系统做如下假设:电锅炉加热水的过程为均匀加热;热水进出水流量相等,流速均匀;蓄热水箱内各点温度均匀分布,各点温度相等;蓄热水箱内各点水的比热容为定值。当持续供热且主要关注电采暖负荷外特性时,上述假设通常是满足的。

电采暖负荷建模的关键在于准确描述加热和散热过程对水温动态变化的影响。首先综合考虑用户热负荷和蓄热水箱的散热特性以及电锅炉的加热特性,通过热平衡方程构建电采暖调节特性模型。然后结合用户边际收益与用电变化量的关系,构建电采暖调节成本模型。

### 1.2 调节特性模型

由图1电采暖系统结构可知,电采暖系统热量变化主要有加热和散热两大过程,最终表现为蓄热水箱中热水的温度变化。

加热过程为电锅炉电阻消耗电能转化为热能的过程。

$$dQ_E = \eta P_{EH} dt \quad (1)$$

式中: $Q_E$ 为总加热量; $\eta$ 为热效率; $P_{EH}$ 为加热功率。式(1)表示单位时间内电锅炉电阻消耗电能转化为

热能。

散热过程一方面为蓄热水箱壁面向外部环境散热。

$$dQ_S = dQ_a + dQ_g \quad (2)$$

$$dQ_a = \frac{T - T_a}{R_a} dt \quad (3)$$

$$dQ_g = \frac{T - T_g}{R_g} dt \quad (4)$$

式中: $Q_S$ 为水箱外壁的总散热量; $Q_a$ 和 $Q_g$ 分别为水箱与空气和与地面接触的外壁面的散热量; $T_a$ 和 $T_g$ 分别为空气温度和地面温度; $R_a$ 和 $R_g$ 分别为水箱与空气和与地面接触的壁面热阻; $T$ 为水箱内的平均水温。

散热过程另一方面为用户通过交换器用水产生热负荷。

$$dQ_D = cf(T_s - T_b) dt \quad (5)$$

式中: $Q_D$ 为用户热负荷; $f$ 为循环水流量; $T_s$ 和 $T_b$ 分别为供、回水温度; $c$ 为水的比热容。

电采暖调节特性实际上是蓄热水箱内水温与加热量和散热量的函数关系。水温变化而产生的热量与加热量和散热量的关系用热平衡方程<sup>[5]</sup>可表示为

$$dQ_G = dQ_E - dQ_D - dQ_S \quad (6)$$

蓄热水箱的储热量变化可由水箱内水的总质量和水温变化表示:

$$dQ_G = mcdT \quad (7)$$

式中: $Q_G$ 为蓄热水箱的储热量; $m$ 为蓄热水箱中水的总质量。

联立式(1)一式(7)可得电采暖调节特性模型为

$$mcdT = \eta P_{EH} dt - cf(T_s - T_b) dt - dQ_S \quad (8)$$

对该模型进行离散化分析可得

$$T_{n,t+1} = \frac{\left[ \eta P_{EH,n,t} - cf_i(T_s - T_b) - \frac{T_{n,t} - T_a}{R_a} - \frac{T_{n,t} - T_g}{R_g} \right] \Delta t}{mc} + T_{n,t} \quad (9)$$

式中: $T_{n,t}$ 为电采暖 $n$ 在 $t$ 时刻的水温; $P_{EH,n,t}$ 为电采暖 $n$ 在 $t$ 时刻的加热功率; $\Delta t$ 为加热时长; $f_i$ 为 $t$ 时刻的循环水流量。

### 1.3 调节成本模型

在对电采暖负荷进行调度时,负荷变化量会改变用户用能成本,还可能会影响用户舒适度。综合考虑上述因素可采用边际收益予以衡量,并基于用



配电网运行时满足潮流约束,由潮流方程表示为

$$P_{1,i,t} + jQ_{1,i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in i} Y_{ij} U_{j,t} e^{-j\theta_{ij}} \quad (17)$$

式中: $P_{1,i,t}$ 和 $Q_{1,i,t}$ 分别为节点 $i$ 在 $t$ 时刻的有功和无功注入功率; $Y_{ij}$ 为节点导纳矩阵 $Y$ 的元素; $\theta_{ij}$ 为节点 $i$ 与节点 $j$ 的电压相角差; $U_{j,t}$ 为节点 $j$ 在 $t$ 时刻的电压幅值; $j \in i$ 为与节点 $i$ 相连接的所有节点的集合。

节点注入有功由电采暖负荷、不可调负荷、分布式光伏和发电机功率共同构成。

$$P_{1,i,t} = P_{PV,i,t} + P_{G,i,t} - P_{NC,i,t} - \sum_{n \in i} P_{EH,n,t} \quad (18)$$

式中: $P_{PV,i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时刻的光伏功率; $P_{G,i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时刻的常规发电机功率; $P_{NC,i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时刻的不可调负荷。

### 3 基于网络参数在线辨识的优化模型求解

潮流约束和电压幅值要求电采暖负荷多时段优化模型呈现非线性特征,属于交流潮流模型。交流潮流模型采用非线性关系描述节点电压幅值、相角与注入有功功率及无功功率的关联特性,从而使优化问题复杂性提升,需要使用启发式算法或二阶锥松弛法进行求解<sup>[20-22]</sup>。为降低优化决策难度,通过调整电采暖负荷各时段功率,实现在不影响供暖的前提下避免配电网元件重过载,进而形成一种工程上简单可用的算法,本文假设电网各节点无功配置充足,聚焦有功控制而采用直流潮流表示潮流约束,此时电网能够通过无功补偿将节点电压维持在允许范围内,故可忽略式(16)电压约束,且线路功率可表示为电采暖功率变化量的线性函数,实现化简。

#### 3.1 基于直流潮流的模型化简

采用直流潮流模型后,线路功率和节点注入功率可表示为初始功率与功率变化量之和。

$$P_{L,k,t} = P_{lb,k,t} + \Delta P_{L,k,t} \quad (19)$$

$$P_{1,i,t} = P_{lb,i,t} + \Delta P_{1,i,t} \quad (20)$$

式中: $P_{lb,k,t}$ 为第 $k$ 条线路在 $t$ 时刻的初始功率; $\Delta P_{L,k,t}$ 为电采暖功率调整导致的第 $k$ 条线路在 $t$ 时刻的功率变化量; $P_{lb,i,t}$ 为节点 $i$ 在 $t$ 时刻的初始注入功率; $\Delta P_{1,i,t}$ 为电采暖功率调整导致的节点 $i$ 在 $t$ 时刻的注入功率变化量。

线路功率变化量进一步表示为节点注入功率变

化量的线性组合,组合系数可用PTDF描述<sup>[23]</sup>。

$$\Delta P_{L,k,t} = \sum_{i=1}^{n_b} h_{ik} \Delta P_{1,i,t} \quad (21)$$

式中: $h_{ik}$ 为功率转移分布因子,即节点 $i$ 注入功率变化量对线路 $k$ 功率变化量的影响; $n_b$ 为节点总个数。

进一步,所有线路功率变化量与节点注入功率变化量关系可写成矩阵形式。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{L,1,t} \\ \Delta P_{L,2,t} \\ \vdots \\ \Delta P_{L,n_l,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_b1} & \cdots & h_{n_b n_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{1,1,t} \\ \Delta P_{1,2,t} \\ \vdots \\ \Delta P_{1,n_1,t} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$H$

式中: $H$ 为PTDF矩阵; $n_1$ 为线路总条数。

经过上述两步,电采暖负荷多时段优化模型可简化为

$$\begin{aligned} & \min \sum_{t=1}^{n_t} \sum_{n=1}^{n_b} e_n (\Delta P_{EH,n,t})^2 \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \text{式(9)} \\ \text{式(12)一式(15)} \\ \text{式(18)一式(21)} \end{cases} \end{aligned} \quad (23)$$

#### 3.2 功率转移分布因子矩阵在线辨识

功率转移分布因子可以根据网络元件参数进行计算<sup>[24]</sup>。

$$H = \tilde{B}_t B_{dc}^{-1} \quad (24)$$

式中: $\tilde{B}_t$ 为去掉平衡节点后的支路导纳矩阵; $B_{dc}$ 为去掉平衡节点后的节点导纳矩阵。

式(24)说明只要获取网络各元件阻抗参数即可计算 $H$ 。然而,准确获知配电网各元件参数并非易事,一方面因为配电网比输电网有着更多种类和数量的元件与设备,维护工作量大,人工维护可能会因工作疏忽导致数据错误;另一方面当设备进行替换或升级时,可能会因缺乏及时记录和更新,导致新设备的参数未能及时录入配电信息系统中;同时配电网数据可能因运行环境差异而与设备手册参数不一致<sup>[25]</sup>。

针对上述问题,本文提出一种利用历史运行数据辨识PTDF矩阵的方法,通过数据驱动方法挖掘历史数据中包含的配电网元件特征,有效弥补传统物理模型的不足,为电力系统的参数辨识、运行优化和潮流分析等提供全新的解决方案<sup>[26]</sup>。

PTDF矩阵表征节点注入功率与线路功率间关

系,基于注入功率和线路功率变化量历史数据可使用最小二乘法估计出PTDF矩阵对应元素。

首先,记录配电网不同时刻目标线路和各节点注入功率值,计算相邻时刻功率变化量。

$$\Delta P_{L, \text{history}} = \begin{bmatrix} \Delta P_{L,1-1} & \Delta P_{L,2-1} & \cdots & \Delta P_{L,n_1-1} \\ \Delta P_{L,1-2} & \Delta P_{L,2-2} & \cdots & \Delta P_{L,n_1-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta P_{L,1-x} & \Delta P_{L,2-x} & \cdots & \Delta P_{L,n_1-x} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\Delta P_{L, \text{history}} = \begin{bmatrix} \Delta P_{L,1-1} & \Delta P_{L,2-1} & \cdots & \Delta P_{L,n_1-1} \\ \Delta P_{L,1-2} & \Delta P_{L,2-2} & \cdots & \Delta P_{L,n_1-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta P_{L,1-x} & \Delta P_{L,2-x} & \cdots & \Delta P_{L,n_1-x} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中: $\Delta P_{L, \text{history}}$ 为线路功率变化量矩阵; $\Delta P_{L, \text{history}}$ 为节点功率变化量矩阵; $x$ 为采样总时刻数。

然后,分别以 $\Delta P_{L, \text{history}}$ 为自变量矩阵,以 $\Delta P_{L, \text{history}}$ 矩阵第 $k$ 列为因变量,则 $H$ 矩阵的第 $k$ 列可基于最小二乘法理论进行计算。

$$h_k = (\Delta P_{L, \text{history}}^T \Delta P_{L, \text{history}})^{-1} \Delta P_{L, \text{history}}^T \Delta P_{L, k} \quad (27)$$

式中: $h_k$ 为PTDF矩阵 $H$ 的第 $k$ 列; $\Delta P_{L, k}$ 为 $\Delta P_{L, \text{history}}$ 矩阵的第 $k$ 列。

重复上述步骤,依次计算矩阵 $H$ 的第1,2, ...,  $n_1$ 列取值,按列组合即得PTDF矩阵 $H$ 。

$$H = [h_1 \quad h_2 \quad \cdots \quad h_{n_1}] \quad (28)$$

### 3.3 在线调度流程

基于上述模型,通过调整电采暖负荷用电方案避免配电网重过载。利用电采暖调度系统采集电采暖历史用电曲线,进而综合历史用电数据、铭牌数据和用户用电行为,预测次日电采暖负荷用电情况,同时获取配电网分布式电源、不可控负荷和电采暖负荷功率预测曲线。进一步进行时序潮流计算,判断是否存在元件重过载风险。若存在重过载时段,则先基于历史数据进行功率转移分布因子矩阵在线辨识,然后构建电采暖负荷多时段优化模型,进一步使用商用求解器实现高效求解。最后基于电采暖负荷调整后用电方案再次进行潮流计算,校验过载风险是否消除。具体流程如图3所示。

## 4 算例

以IEEE 30系统为例,验证所提方法应用效果。系统拓扑如图4所示,原型为包括两个电压等级的

美国中西部中高压配电网系统,基础参数可参考文献[27]。本文进行两方面修改:一是增加了130 MW光伏,二是增加了57.6 MW电采暖负荷,详细接入位置如图4所示,相关参数如表1所示。

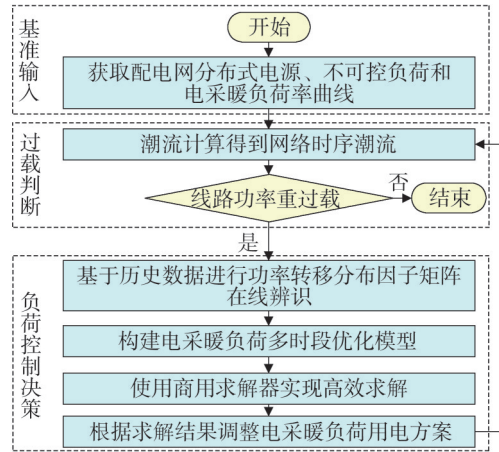


图3 优化求解流程

Fig.3 Optimization solution process

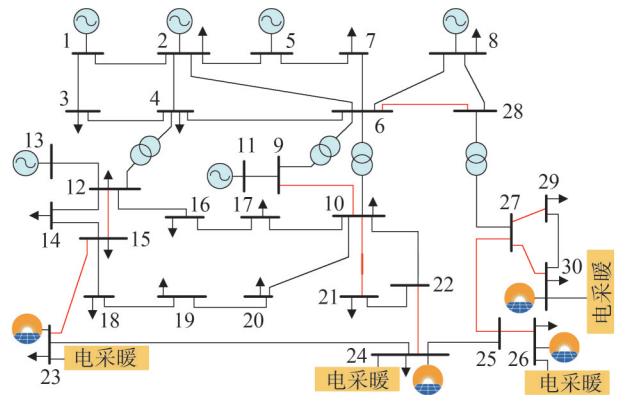


图4 IEEE 30节点电力系统线路图

Fig.4 IEEE 30-bus power system line diagram

表1 电采暖和光伏参数

Table 1 Parameters of electric heating and photovoltaic

节点	电采暖接入数量	光伏接入量/MW
23	3	35
24	2	25
26	4	35
30	3	35

假定所有电锅炉参数相近,个体参数基于平

均值上下波动随机生成。平均参数为:额定功率 4.8 MW,热效率 0.9,水箱储水量 600 t,供回水温度分别为 70 °C和 20 °C,基准室外温度曲线和水流量如图 5 所示。同时假定电锅炉均采用低谷电价制热方式控制,在 21:00 至次日 06:00 谷电价时段开启电锅炉加热<sup>[13]</sup>。

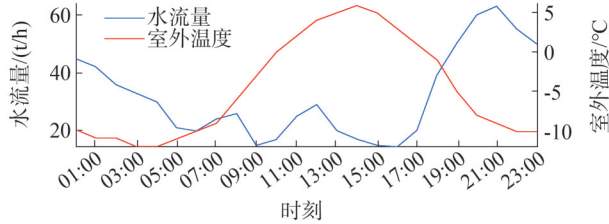


图5 基准水流量及室外温度曲线  
Fig.5 Baseline water flow and outdoor temperature curve

各节点不可控负荷和光伏出力典型曲线如图 6 所示。基于 MATPOWER 开发时序潮流计算程序,计算上述负荷和发电曲线状态下各时刻线路潮流,线路负载率如图 7 所示。由图 7 可见,线路 6、线路 18、线路 38、线路 41 在晚间谷电价时段负载率因电采暖负荷量开启而进入重载状态,线路 30、线路 31、线路 34 则在晚间和正午时段均会出现过载状态,配电网安全运行出现问题。

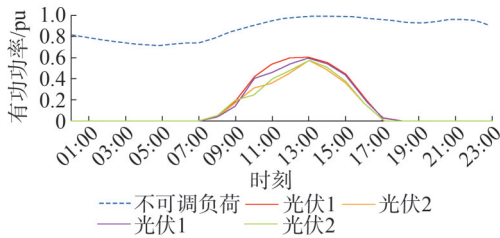


图6 不可控负荷和光伏出力典型曲线  
Fig.6 Typical curves of uncontrollable load and photovoltaic output

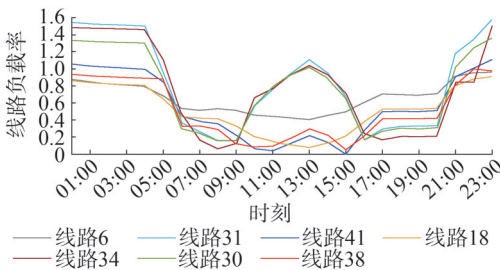


图7 线路负载率  
Fig.7 Line load factor

#### 4.1 PTDF在线辨识效果

为实现电采暖负荷优化调度,首先基于 3.2 节方法,辨识 PTDF 矩阵关键元素。在负荷曲线基础上添加随机扰动,模拟负荷变化并形成线路和节点注入功率变量,共生成 500 组数据,按照式(27)计算功率转移分布因子矩阵  $H$  相关元素。

为验证辨识精度,对比采用式(24)基于准确元件参数的计算结果与数据驱动边界结果差异。图 8 给出了部分过载线路(线路 30、线路 31、线路 41)对应强相关节点的元素值计算结果,图 9 进一步给出了  $H$  所有元素计算相对误差统计。由图 9 可见,两种方法求得的 PTDF 矩阵对应元素较为接近,94% 的元素相对误差小于 5%,99% 的元素相对误差小于 10%,证明数据驱动在线辨识的 PTDF 矩阵正确。

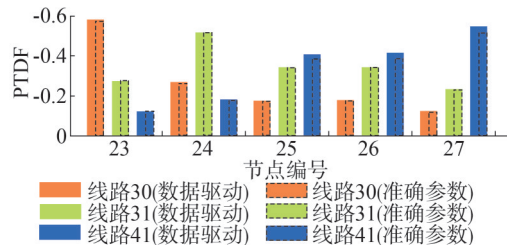


图8 PTDF矩阵元素比较  
Fig.8 Comparison of PTDF matrix elements

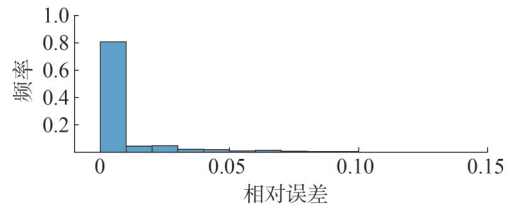


图9 PTDF相对误差分布图  
Fig.9 PTDF relative error distribution plot

辨识精度由辨识用数据集和辨识方法综合决定,数据集覆盖不足或参数辨识方法不当均可能导致 PTDF 结果出现误差。积累更多数据或采用支持向量回归等更复杂的参数辨识方法,可降低数据驱动模型求解 PTDF 的误差。

#### 4.2 优化调度效果

采用前述策略对电采暖负荷进行优化求解。在本次算例分析中,成本系数均设为 1,线路负载率限制为 0.8,以负荷变化总成本最小为目标函数,由数据驱动得到功率转移因子矩阵  $H$ ,根据网络约束和温度约束,通过 yalmip 将其数学化,再使用 cplex 求

解器进行求解,可得到各电采暖负荷用电方案优化调整结果。根据负荷调整结果,利用 MATPOWER 的交流潮流模型,计算得到线路的负载率,优化调整后过载线路负载率曲线如图 10 所示。由图 10 可见,优化后的线路负载曲线在晚间谷电价时段以及午间光伏大发时段均未出现重、过载现象,00:00—06:00 时段最大负载率在 0.622~0.791 内变化,11:00—15:00 时段最大负载率在 0.696~0.773 内变化,17:00—23:00 时段最大负载率在 0.643~0.796 内变化,说明通过调整电采暖负荷的用电时段可将线路负载率控制在目标值以下,同时由于采用直流潮流模型,控制结果具有保守性,导致部分线路负载率限制结果低于预期值。

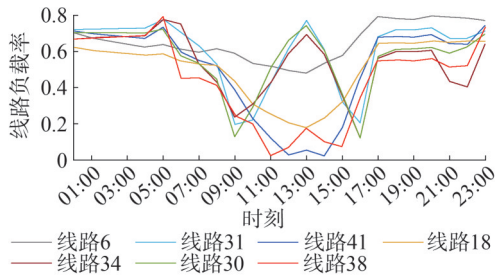


图 10 重/过载线路优化后负载率曲线

Fig.10 Load factor curve of overloaded lines after optimization

图 11、图 12 进一步给出了部分负荷调整前后功率曲线和水温曲线。由图 11 和图 12 可见,优化后的电采暖负荷用电高峰时段得以分散,不再集中在晚间谷电价时段,从而降低了线路过载的风险。同时,水温由优化前的先升温后降温的两段单调变化调整为全时段波动变化,并且均能满足用户舒适度需求。

为验证上述电采暖负荷调整方式的最优性,进行了两组对比实验,一是与所设计的规则式控制方法对比,二是与不同可控范围下电采暖优化调度结果的对比。

所设计的规则式控制方法为:将初始在 21:00 至次日 06:00 谷电价时段电锅炉加热功率平均分配到全天 24 h 加热。该调度方法得到的部分负载较大线路的负载率曲线和电采暖节点水温曲线如图 13 和图 14 所示。由图 13 和图 14 可见,线路负载率最大达到 0.81,仍可保证线路安全运行,且各电采暖水温均满足约束,说明平均加热调度方法也可达到控制效果。

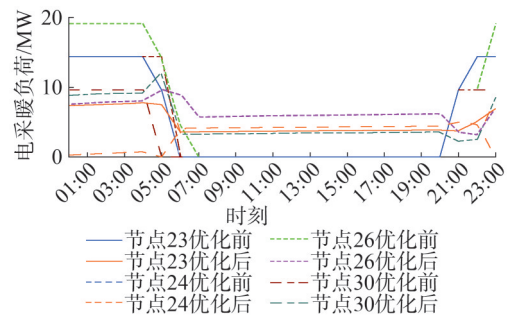


图 11 电采暖负荷节点优化前后负荷曲线

Fig.11 Load curve of electric heating load nodes before and after optimization

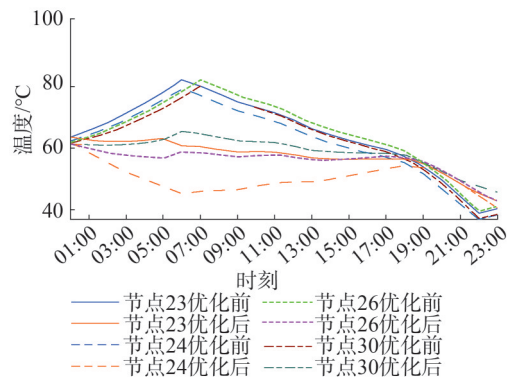


图 12 电采暖负荷节点优化前后水温曲线

Fig.12 Water temperature curve of electric heating load nodes before and after optimization

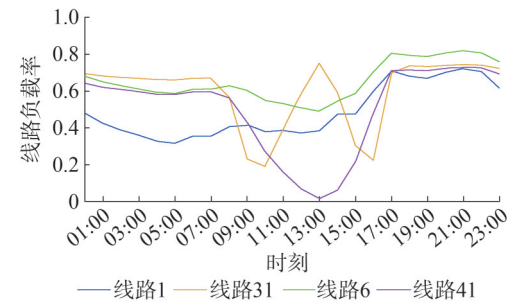


图 13 规则式控制方法线路负载率曲线

Fig.13 Line load factor curve of rule-based control method

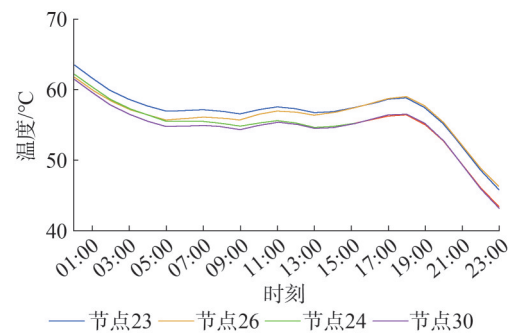


图 14 规则式控制方法节点水温曲线

Fig.14 Node water temperature curve of rule-based control method

进一步分别将节点 23、节点 24 上电采暖负荷设置为不可调,仍可以将线路负载调整到安全水平(0.8),此时总调整成本如表 2 所示。由表 2 可见,相比全优化方案,规则式控制方法调整成本增加了 25%,缩小可调范围后优化调整成本分别增加了 21%、55%、7.5%、5.3%,表明了所提优化调度方法能够以最小调整成本生成电采暖用电方案。

表 2 多种优化方案的调整成本

Table 2 Adjustment costs of multiple optimization schemes

单位:元

优化方案	调整成本
全优化	1 190.7
规则式控制	1 492.8
节点 23 不可调	1 440.6
节点 24 不可调	1 843.8
节点 26 不可调	1 279.9
节点 30 不可调	1 253.7

## 5 结束语

针对中高压配电网安全运行中网络参数辨识困难与源荷协同复杂度高度的问题,本文提出一种基于数据挖掘的电采暖负荷优化调度方法。通过构建电采暖负荷调节特性与成本模型,量化负荷调节潜力及调节成本,构建了多时段优化调度模型,并采用数据驱动辨识方法获取 PTDF 矩阵关联元素,摆脱了对精确线路参数的依赖,提高了求解效率和适应性。基于 IEEE 30 系统的仿真结果表明,数据驱动方法在线辨识 PTDF 矩阵精度高,通过对电采暖负荷的优化调度能有效避免关键线路和变压器重过载,同时可在满足用户舒适度的前提下最小化调整成本,实现源网荷高效互动协同。

本文研究主要关注电采暖调度,通过调整电采暖有功功率消耗,避免线路等配电网元件重过载。随着配电网侧灵活性资源日益丰富,如何综合考虑有功、无功可控手段协同,实现配电网综合指标优化需求更加迫切,后续研究将聚焦电采暖与光伏、储能、电动汽车等可调资源的配合,基于交流潮流约束进行面向负载率、电压偏移、损耗多电能质量指标的有功无功综合优化调度研究。

## 参考文献

- [1] 刘永奇,陈龙翔,韩小琪.能源转型下我国新能源替代的关键问题分析[J].中国电机工程学报,2022,42(2):515-524.  
LIU Yongqi, CHEN Longxiang, HAN Xiaoqi. The key problem analysis on the alternative new energy under the energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 515-524.
- [2] 陈卓,郭寅远,温彦军,等.基于广义 Benders 分解的分布式光伏接入容量规划方法[J].浙江电力,2024,43(6):31-40.  
CHEN Zhuo, GUO Yinyuan, WEN Yanjun, et al. An integration capacity planning method for distributed photovoltaic sources based on generalized Benders decomposition [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 31-40.
- [3] 刘艳茹,杨卫红,王基,等.“煤改电”工程实施前后农网负荷特性分析[J].电气技术,2017,18(4):110-115.  
LIU Yanru, YANG Weihong, WANG Ji, et al. Load characteristic analysis of rural network before and after the coal-to-electricity project [J]. Electrical Engineering, 2017, 18(4): 110-115.
- [4] KONDOH J, LU N, HAMMERSTROM D J. An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service [C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011:1-8.
- [5] 张利伟,王华润,严干贵,等.考虑传热不一致性的蓄热式电锅炉负荷建模[J].电力系统自动化,2023,47(13):40-46.  
ZHANG Liwei, WANG Huarun, YAN Gangui, et al. Load modeling of regenerative electric boiler considering inconsistency of heat transfer [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(13): 40-46.
- [6] NEL P J C, BOOYSEN M J, VAN DER MERWE B. A computationally inexpensive energy model for horizontal electric water heaters with scheduling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1):48-56.
- [7] XU Z J, DIAO R S, LU S, et al. Modeling of electric water heaters for demand response: a baseline PDE model [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2203-2210.
- [8] 王志强,王珊,张馨月,等.计及用户响应行为差异性的区域电采暖负荷特性建模[J].电力系统自动化,2019,43(7):67-73.  
WANG Zhiqiang, WANG Shan, ZHANG Xinyue, et al. Load characteristics modeling of regional electric heating system considering difference of users response behaviors [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 67-73.
- [9] 朱丹丹,贾勇勇,周前.考虑负荷聚合商资源灵活度的荷源协调优化调度方法[J].浙江电力,2024,43(4):12-20.  
ZHU Dandan, JIA Yongyong, ZHOU Qian. A load-source coordinated scheduling method based on resource flexibility of load aggregators [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(4): 12-20.
- [10] 宋卓然,李剑峰,范宇航,等.“双碳”目标下电热-电蓄热接入配电网拓扑多目标规划[J].电力建设,2024,45(4):57-65.  
SONG Zhuoran, LI Jianfeng, FAN Yuhang, et al. Multiobjective planning of electric heating-electric heat storage device access to

- distribution network topology under dual carbon target [J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(4): 57-65.
- [11] 宋杰, 张卫国, 李树鹏, 等. 蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(3): 80-87.  
SONG Jie, ZHANG Weiguo, LI Shupeng, et al. Research on operational strategy for regenerative electric heating load participating in wind power consumption [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(3): 80-87.
- [12] 王振浩, 杨璐, 田春光, 等. 考虑风电消纳的风电-电储能-蓄热式电锅炉联合系统能量优化[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(增刊1): 137-143.  
WANG Zhenhao, YANG Lu, TIAN Chunguang, et al. Energy optimization for combined system of wind-electric energy storage-regenerative electric boiler considering wind consumption [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(S1): 137-143.
- [13] 张嘉睿, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑停电时段用户热需求的蓄热式电采暖日前优化调度方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(21): 15-22.  
ZHANG Jiarui, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Day-ahead optimal scheduling method for regenerative electric heating considering thermal demand of users during power outage [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21): 15-22.
- [14] LAURENT J C, DESAULNIERS G, MALHAME R P, et al. A column generation method for optimal load management via control of electric water heaters [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, 10(3): 1389-1400.
- [15] ALVAREZ M A Z, AGBOSSOU K, CARDENAS A, et al. Demand response strategy applied to residential electric water heaters using dynamic programming and K-means clustering [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2020, 11(1): 524-533.
- [16] AL-JABERY K, XU Z Z, YU W J, et al. Demand-side management of domestic electric water heaters using approximate dynamic programming [J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2017, 36(5): 775-788.
- [17] 傅旭, 李富春, 杨欣, 等. 清洁供暖电能替代方案经济性分析[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(5): 5-9.  
FU Xu, LI Fuchun, YANG Xin, et al. Economic analysis of alternative electricity for clean heating [J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(5): 5-9.
- [18] 曲子清, 辛洁晴, 吴亮, 等. 商业用户电能采暖替代技术选型的边界条件论证[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 48-54.  
QU Ziqing, XIN Jieqing, WU Liang, et al. Argument on boundary conditions of selection electric energy substitution technologies with electric heating for commercial customers [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 48-54.
- [19] FAHRIOGLU M, ALVARADO F L. Using utility information to calibrate customer demand management behavior models [C]// 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings. IEEE, 2002: 26vol.1.
- [20] 姜涛, 张东辉, 李雪, 等. 含分布式光伏的主动配电网电压分布式优化控制[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 102-109.  
JIANG Tao, ZHANG Donghui, LI Xue, et al. Distributed optimal control of voltage in active distribution network with distributed photovoltaic [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 102-109.
- [21] 尤毅, 刘东, 钟清, 等. 主动配电网优化调度策略研究[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(9): 177-183.  
YOU Yi, LIU Dong, ZHONG Qing, et al. Research on optimal schedule strategy for active distribution network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(9): 177-183.
- [22] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(16): 2575-2583.  
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [23] CHENG X, OVERBYE T J. PTFDF-based power system equivalents [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(4): 1868-1876.
- [24] ZIMMERMAN R D, MURILLO-SÁNCHEZ C E, THOMAS R J. MATPOWER: steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(1): 12-19.
- [25] WANG H L, JIAO H, CHEN J M, et al. Parameter identification for a power distribution network based on MCMC algorithm [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 104154-104161.
- [26] LI Y Z, YU C F, SHAHIDEHPOUR M, et al. Deep reinforcement learning for smart grid operations: algorithms, applications, and prospects [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2023, 111(9): 1055-1096.
- [27] ALSAC O, STOTT B. Optimal load flow with steady-state security [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1974, PAS-93(3): 745-751.

收稿日期: 2025-01-21

修回日期: 2025-03-05

作者简介:

崔晨瑜(2003), 男, 硕士在读, 主要研究方向为虚拟电厂运行调度优化控制;

张俊岭(1979), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力信息化、人工智能、现场作业安全管控;

于程(2002), 男, 硕士在读, 主要研究方向为虚拟电厂运行调度优化控制;

施啸寒(1986), 通信作者(shixh@sdu.edu.cn), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为虚拟电厂与电网互动分析与控制。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250063

# 面向光伏消纳率提升的建筑直流互联集群划分研究

王绪利<sup>1</sup>, 武澳丽<sup>2</sup>, 凌 孺<sup>1</sup>, 张 辉<sup>1</sup>, 邓其军<sup>2\*</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司经济技术研究院, 安徽 合肥 230022; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 光伏建筑一体化背景下, 不同类型建筑之间的净负荷曲线差异显著, 存在通过直流互联实现功率互济以提升光伏消纳率的巨大潜力。为此, 提出一种面向光伏消纳率提升的建筑直流互联的集群划分方法, 将某一区域范围内由交流配电网供电的多个建筑划分为不同集群, 群间独立而群内功率互济以提升光伏消纳率。不同的集群划分与群内互联方案对应的净收益存在差异, 存在优化的必要。考虑建筑直流互联得到的光伏消纳率提升收益及互联建设成本, 建立以净收益为指标的集群划分优化模型, 并采用双层优化算法发掘能获得最大净收益的集群划分方案。其中外层采用粒子群框架生成集群划分方案及进化方向, 内层采用改进拓扑排序算法计算群内互联最小成本。以随机生成的30个建筑为例, 对所提最优集群划分方法的有效性与合理性进行验证, 算例表明所提方法能够显著增加建筑光伏消纳水平, 在合理调度储能后能够实现集群内部光伏发电100%就地消纳, 同时建筑最大负荷尖峰至少降低5.5%, 具有显著的经济和社会效益。

**关键词:** 光伏建筑一体化; 集群划分; 建筑直流互联; 新能源消纳率; 粒子群算法; 改进拓扑排序算法

中图分类号: TN102

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2026)03-0107-14

## Research on the Division of Building DC Interconnection Clusters for Improving Photovoltaic Consumption Rate

WANG Xuli, WU Aoli<sup>2</sup>, LING Ru<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>1</sup>, DENG Qijun<sup>2\*</sup>

(1. State Grid Anhui Economic Research Institute, Hefei 230022, China;

2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China.)

**Abstract:** In the context of building-integrated photovoltaics, the net load curves of different types exhibit significant variability, presenting substantial potential for enhancing PV self-consumption through power exchange via direct current (DC) interconnection. This paper proposes a clustering method for DC-interconnected buildings aimed at improving PV self-consumption. The method categorizes multiple buildings within a specific area, originally powered by an alternating current (AC) distribution network, into distinct clusters. Power exchange is permitted within each cluster but not between clusters, thereby enhancing PV self-consumption. Different clustering and intra-cluster interconnection schemes yield varying net benefits, necessitating optimization. Therefore, this paper establishes an optimization model for clustering based on net benefits, considering the gains from increased PV self-consumption enabled by DC interconnection and the costs of interconnection infrastructure. A bi-level optimization algorithm is adopted to determine the clustering scheme that maximizes net benefits. The outer layer employs a particle swarm optimization (PSO) framework to generate and evolve clustering schemes, while the inner layer utilizes an improved topological sorting algorithm to determine the minimum-cost intra-cluster interconnection. A case study with 30 randomly generated buildings is conducted to validate the effectiveness and rationality of the proposed clustering method. The results demonstrate that the proposed approach significantly enhances PV utilization, achieving 100% local consumption of PV generation within clusters following optimal energy storage scheduling. Moreover, it reduces peak building loads by at least 5.5%, yielding substantial economic and social benefits.

**Keywords:** photovoltaic (PV) building-integrated design; cluster division; building direct current (DC) interconnection; consumption rate of new energy; particle swarm optimization (PSO) algorithm; modified topologic queue algorithm

**基金项目:** 国网安徽省电力有限公司科技项目(B31209230003); 国家自然科学基金项目(51977151)。

Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Company (B31209230003); National Natural Science Foundation of China (51977151).

## 0 引言

分布式光伏作为新能源领域的重要分支,正迎来前所未有的发展机遇,光伏建筑一体化逐渐成为城市发展太阳能的重要趋势。随着光伏设备的引入,建筑出现不同程度的光伏溢出现象。但商业建筑、居民建筑、工业园区建筑等不同类型的建筑间净负荷曲线差异显著,通过直流互联实现功率互济、减少跨电压等级的功率倒送模式具有巨大潜力。因此,将一定区域内的建筑划分为若干集群,群间独立运行、群内直流互联功率互济,能提高集群整体的光伏消纳率。

在配电网集群划分及应用方面,文献[1]和文献[2]从电源侧和负荷侧出发,结合储能,提出分布式电源并网的优化调度方式,并采用需求响应的方式调节需求资源,结合遗传算法对分布式电源进行集群划分。文献[3]从网络结构的角度出发,提出一种动态重构与集群划分的双层划分模型,提升配电网中光伏资源的规划配置水平,提高配电侧对光伏消纳水平。文献[4]则考虑5G基站可调度潜力进行配电网集群划分降低储能配置容量。文献[5]建立了双层交互迭代模型,上层规划模型以年综合成本最小为目标,下层构建常规配电网集群划分模型,对上层规划结果进行集群划分,并采用改进混合遗传算法求解。文献[6]考虑集群内部节点间功率互补特性,建立兼顾集群结构性和源荷储资源匹配性的综合性能指标,实现集群划分,并采用同步交替方向乘子法进行集群优化调度。文献[7]对低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式进行了分析,文献[8]提出一种基于改进下垂算法的自适应控制策略,通过引入传输因子和换向/修正因子,实现台区在输出功率和接收功率的状态间平滑切换,并通过引入分配系数,实现功率在台区间的按需分配,实现跨台区功率互济。文献[9]建立了基于换流器的互联系统运行功率平衡约束,提出台区互联需求指标和可联性分析方法,构建台区柔性互联双层规划模型,通过优化互联方案和台区间的功率交互,实现分布式光伏的跨区消纳和负荷实时转供,达到提升光伏消纳率和配电网运行经济性的目的。文献[10]提出了一种基于低压交直流混合配电网的时-空协调优化方法以提升高比例光伏消纳率。文献[11]根据光伏电源接入充电桩的配电系统互联结构,制定多台区光

伏消纳分区管理模式,充分考虑能源转换设备运行约束,构建火电-光伏-用电设备出力模型,通过对火电机组运行成本、光伏未消纳、负荷需求响应补偿成本等因素的调控实现削峰填谷。文献[12]采用惯性权重动态递减策略改进二进制粒子群优化算法,优化粒子位置和速度的更新进程,提高粒子群优化算法的寻优效率,对集群划分优化模型进行寻优。文献[13]主要从系统无功优化对高渗透率分布式电源集群划分方面进行研究。文献[14]从灵活性资源可调节容量和响应速度出发对集群划分进行优化。

目前尚没有对面向光伏消纳率提升的建筑互联集群最优划分的研究,特别是缺少从经济性指标角度出发,指导集群划分的优化模型和求解方法。针对这一问题,综合考虑建筑直流互联光伏消纳率提升的收益及建筑直流互联建设成本,建立以净收益为指标的集群划分优化模型。并采用双层优化算法<sup>[15]</sup>对模型进行求解,发掘面向建筑消纳率提升的最优集群划分方法。

储能系统通过储存和释电能来平衡建筑群内的电力需求波动,从而能在建筑群中协同运行时进一步提升光伏消纳能力,减少对外部电网尖峰负荷冲击。因此,在集群划分过程中,分析不同储能配比条件下建筑集群划分及光伏消纳率提升水平的差异,进一步提高集群划分的经济性和新能源消纳能力。本文的主要创新点包括:

- 1)构建建筑直流互联集群划分模型,综合考虑直流互联成本、光伏收益和储能效应,量化直流互联带来的净收益。

- 2)提出基于双层优化的模型求解算法,发掘净收益最大化的集群划分及集群内互联方案。

## 1 集群划分优化模型

在与配电网的交流连接之外,多个光伏建筑间再额外通过直流线路互联,可以实现光伏的互济与群内就地消纳,进而提升整体光伏消纳率并减少对配电网尖峰负荷需求。建筑直流互联必然涉及线路建设成本,因此将某个区域内全部建筑互联在一起虽然能增加光伏消纳率,但并非净收益最优的方案。为此,可以将全部建筑划分为群间独立、群内互联的若干个集群以实现净收益最大化。为求解最优集群划分方案,在考虑集群互联成本及收益的基础上对

集群净收益进行建模,为集群优化划分提供依据。

### 1.1 单个集群内部建筑互联成本

互联成本主要来源于建筑之间直流线路的铺设成本及换流器设备成本。假定某区域内的建筑被划分为  $m$  个集群,第  $k(1 \leq k \leq m)$  个集群中的建筑数量为  $N_k$ ,当集群  $k$  中的建筑  $i$  与建筑  $j$  互联时,其直流线路的建设成本  $C_{dc(i,j,k)}$  为

$$C_{dc(i,j,k)} = P_{\max}(i,j,k) \cdot p_{dc} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

式中: $P_{\max}(i,j,k)$  为集群  $k$  中建筑  $i$  和建筑  $j$  之间线路的最大传输功率; $p_{dc}$  为单位载流功率的铜电缆单位长度建设成本; $(x_i, x_j)$  和  $(y_i, y_j)$  分别为建筑  $i$  与建筑  $j$  的地理坐标。

在考虑建筑直流互联的建设成本时,主要包括电缆购买成本、换流器设备及安装成本、电缆铺设施工成本等。其中,电缆购买成本取决于电缆横截面积及电缆长度,电缆横截面积取决于电缆最大传输功率。换流器成本取决于互联线路中最大功率;施工成本受电缆横截面积、施工环境等多种因素影响,难以精确量化。为简化计算,本文给出如下假设:

1) 单位长度电缆购买成本与电缆的横截面积近似成正比。

2) 电缆的横截面积与电缆可传输的最大功率近似成正比关系,采用电缆最大传输功率来近似计算电缆购买成本。

3) 电缆的施工难度与电缆的粗细成正相关,互联换流器成本与功率成正相关。为不失一般性,假定施工成本加上换流器成本与电缆购买成本近似相同,即建设总成本是电缆购买成本的 2 倍。

经查询,当前国内两芯铠装铜电缆的价格近似为  $1.6 \text{ 元}/(\text{m} \times \text{mm}^2)$ 。同时,取两芯电缆允许的载流量  $8 \text{ A}/\text{mm}^2$ ,建筑低压直流互联电压  $400 \text{ V}$ ,计算得到单位载流功率的单位长度铜电缆的建设成本<sup>[16]</sup>近似为

$$p_{dc} = 2 \times \frac{1.6}{8 \times 0.4} = 1 (\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{m})) \quad (2)$$

集群  $k$  内部建筑互联时的直流线路建设总成本  $C_{dc}(k)$  计算公式为

$$C_{dc}(k) = \sum_{i=1, j=1}^{N_k} C_{dc(i,j,k)} \quad (3)$$

约定建筑  $i$  与建筑  $j$  不直接互联时的建设成本为 0。

鉴于本文考虑的建筑负荷曲线、净收益等均是按日来计算,需要将线路建设成本折算到每天,则集群  $k$  的日互联成本  $C_{\text{perd}}(k)$  计算方式为

$$C_{\text{perd}}(k) = \frac{C_{dc}(k) \times c \times (1+c)^n}{30((1+c)^n - 1)} \quad (4)$$

式中: $c$  为投资借款月利率(年利率除以 12); $n$  为折旧期的总月数。

### 1.2 单个集群内部建筑互联收益

互联收益是通过直流互联网络将光伏发电量在集群内部的建筑之间互济从而增加光伏消纳量而得到的,即光伏的额外消纳量产生的收益。当建筑之间相互独立时,建筑在光伏发电过剩时将未被消纳的光伏电量出售给电网或弃光;当建筑之间存在直流互联网络时,光伏发电功率可以在直流互联的建筑间互济。直流功率互济不经过配电变压器,节省了交流网损及额外配置配电变压器与交流线路建设成本,这部分成本可视为建筑互联带来的收益。该收益可近似用建筑向电网的购电价格和光伏上网价格的差值  $\lambda_{\text{trade}}(t)$  来计算,从而第  $k$  个集群的总收益  $C_{\text{trade}}(k)$  为每天 48 个时间段(以  $0.5 \text{ h}$  为 1 个时段)下的收益之和,如式(5)所示。

$$C_{\text{trade}}(k) = \sum_{t=1}^{48} P_{\text{trade}}(t,k) \times \lambda_{\text{trade}}(t) \quad (5)$$

式中: $P_{\text{trade}}(t,k)$  为在  $t$  时刻集群  $k$  的互济电量,即群内所有光伏发电功率大于负荷功率的建筑向直流互联线路馈送的光伏电量之和(也是所有光伏发电功率小于负荷功率的建筑从直流互联线路馈入的电量之和)。

### 1.3 考虑储能条件下单个集群光伏消纳量优化建模

在上述计算互联收益时,忽略了储能因素对集群划分和光伏消纳的影响。但在实际应用中,这些建筑往往会配置一定比例的储能设施,可以在建筑互联消纳光伏的基础之上进一步提升光伏消纳率。因此,在 1.2 节单个集群互联收益中进一步考虑建筑自配置储能对集群整体光伏消纳量的影响。储能的调度会影响光伏的消纳水平及付出的成本,为求解这个最优化子问题,对其目标函数和约束条件进行建模。

#### 1.3.1 单个集群内部储能充放电时序优化目标函数

储能因素作为变量会影响集群的光伏消纳量,储能系统的建设涉及成本进而影响集群净收益。因

此,建立式(6)所示的目标函数。该目标函数采用间接的方法计算光伏的额外消纳量,主要是通过建筑自消纳之后的剩余负荷总量与电网供给电量的差值决定,这部分的差值代表建筑通过互联和储能改变充放电时序的方式转移光伏能量填补的负荷,亦即额外消纳的光伏能量。

$$\max(W_{pv\_digest}^{ess}(k)) \quad (6)$$

$$W_{pv\_digest}^{ess}(k) = \sum_{t=1}^{48} \sum_{q=0}^{N_i} (\max(P_{q,t}^{pv} - P_{q,t}^{load}, 0) - \max(P_{q,t}^{grid\_feed}, 0)) \quad (7)$$

式中: $W_{pv\_digest}^{ess}(k)$ 为增加储能之后一天之内集群 $k$ 整体增加的光伏消纳总量; $P_{q,t}^{pv}$ 为集群 $k$ 在 $t$ 时刻第 $q$ 个建筑的光伏发电功率; $P_{q,t}^{load}$ 为集群 $k$ 在 $t$ 时刻第 $q$ 个建筑负荷功率; $P_{q,t}^{grid\_feed}$ 为 $t$ 时刻第 $q$ 个建筑与电网交易电量,正值代表电网向建筑供电,负值代表建筑向电网馈电; $\max(P_{q,t}^{pv} - P_{q,t}^{load}, 0)$ 表示取建筑净负荷坐标轴以上为正的部分,即剩余负荷的量; $\max(P_{q,t}^{grid\_feed}, 0)$ 表示取电网交易电量为正的那一部分,即电网供电量。

### 1.3.2 单个集群内部储能充放电约束条件

单个集群内部储能充放电主要考虑群内各建筑储能的能量平衡约束、储能系统状态约束及功率传输平衡约束。

1)能量平衡约束如式(8)所示。

$$P_{q,t}^{pv} + \sum_{p=1}^{N_i} P_{p,q,t}^{trans} + W_q^{storage\_capacity} \cdot R_{q,t}^{discharge} = P_{q,t}^{grid\_feed} + W_q^{storage\_capacity} \cdot R_{q,t}^{charge} + P_{q,t}^{load} \quad (8)$$

式中: $P_{p,q,t}^{trans}$ 为在第 $k$ 个集群中第 $p$ 个建筑在 $t$ 时刻对第 $q$ 个建筑传输的功率; $\sum_{p=1}^{N_i} P_{p,q,t}^{trans}$ 为集群中第 $q$ 个建筑在 $t$ 时刻接收到的其他建筑供给功率之和; $W_q^{storage\_capacity}$ 为第 $q$ 个建筑的实际储能容量; $R_{q,t}^{discharge}$ 为第 $q$ 个建筑的储能在 $t$ 时刻放电的速率; $R_{q,t}^{charge}$ 为第 $q$ 个建筑在 $t$ 时刻充电的速率。

2)储能系统状态约束如式(9)所示。

$$\begin{cases} E_{q,t+1}^{SOC} = E_{q,t}^{SOC} + W_q^{storage\_capacity} \cdot R_{q,t}^{charge} - W_q^{storage\_capacity} \cdot R_{q,t}^{discharge} \\ 0.1 \times W_q^{storage\_capacity} \leq E_{q,t}^{SOC} \leq 0.9 \times W_q^{storage\_capacity} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $E_{q,t}^{soc}$ 为第 $q$ 个建筑的储能系统在 $t$ 时刻的电量。

3)功率传输平衡约束。

在每个集群中,每个时刻都有建筑作为能量供

给方,将多余光伏电能传递到直流母线,同时有建筑作为需求方从直流母线获取能量。每个时刻母线上能量的供给和需求需要满足平衡的关系,用功率传输矩阵 $P^{trans}$ 描述,其元素为 $P_{p,q,t}^{trans}$ 。因此,该矩阵满足对角线上的元素全部为0,对角元素互补,每行元素要么非正,要么非负的条件,如式(10)所示。

$$\begin{cases} P_{p,q,t}^{trans} + P_{q,p,t}^{trans} = 0 \\ \forall q = 1, \dots, N_k (P_{q,p,t}^{trans} \geq 0, \forall p = 1, \dots, N_k) \\ \forall (P_{q,p,t}^{trans} \leq 0, \forall p = 1, \dots, N_k) \end{cases} \quad (10)$$

### 1.4 总目标函数

建立净收益最大化目标函数,该函数为全部的 $m$ 个集群的互联收益减去互联成本,如式(11)所示。

$$F = \sum_{k=1}^m (C_{trade}(k) - C_{perd}(k) - C_s(k)) \quad (11)$$

式中: $C_s(k)$ 为第 $k$ 个集群的储能系统成本,可简单地按储能度电成本与储能放电量的乘积来计算,如式(12)所示。

$$C_s(k) = \sum_{t=1}^{48} \sum_{q=1}^{N_i} (W_q^{storage\_capacity} \cdot R_{q,t}^{discharge}) \quad (12)$$

## 2 基于双层优化的集群最优划分求解

由式(5)可知,集群互联收益决定于划分得到的集群数量、集群包含的建筑及群内建筑互联方式等因素。为此,提出双层优化的集群最优划分求解方案。其中,外层采用粒子群框架,基于粒子质心位置生成集群划分方案并确定其更新方向;内层采用改进拓扑排序算法计算群内互联最小成本。针对所有可能的集群数量,先采用双层优化方法求解给定集群数量下的互联收益,再进行比较求取最大收益的集群数量。

### 2.1 基于粒子群框架的外层集群划分方法

#### 2.1.1 粒子设计方法

粒子群算法是一种群体智能算法,通过模拟鸟群的集体行为来解决优化问题,在配电网的多目标优化分析中也是常用的方法之一<sup>[17]</sup>。本文需要将不同坐标位置的建筑划分到若干集群,因此可以给定若干质心,全部建筑节点按照K-means聚类的方法,就近划分给这些质心代表的不同集群<sup>[18-19]</sup>。在给定的质心数量(即集群数量)下,这些质心在坐标平面移动时,各个集群所按照K-means聚类方法划分得到的建筑相应发生变化。因此,可以设计粒子群算

法的粒子为一个平面坐标数组:

$$\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_k, \dots, h_m] \quad (13)$$

式中: $h_k$ 为第 $k$ 个集群的质心。

粒子的速度表示其在解空间中的移动速度和方向。每个粒子的适应度(即集群划分得到的净收益)根据其位置(即当前的集群划分方案)进行评估。粒子根据自己的历史最佳位置(个体最优)和整个群体的历史最佳位置(全局最优)来更新其速度和位置。这使得粒子可以向更优的解决方案移动。粒子的速度和位置根据当前速度、向个体最优和全局最优共同更新。

上述过程重复进行,通过多次迭代更新粒子的位置和速度,从而找到多组不同的集群质心,即集群划分方案。计算每种划分方案的适应度,逐步优化集群划分方案,直到达到最大迭代次数或适应度值不再显著改善。粒子群算法因具有灵活性和通用性,可以并行计算且收敛速度快,可以有效处理非线性和多峰的复杂问题而被广泛使用。

### 2.1.2 基于粒子群框架的集群划分

根据上述粒子设计方法,需要先确定粒子所代表的平面质心的数量(即集群划分的个数),再采用粒子群算法计算出最高适应度。为此,采用遍历的方式,对每一种可能的集群数量,使用粒子群算法求解不同划分情况下的最佳适应度。所有可能的集群数量下,具有最大的最佳适应度的划分方案即是最优集群划分方案。图1是针对给定集群数量下的集群划分算法流程图。

首先对粒子的初始状态进行初始化,设置最大迭代次数、种群规模(即拟划分的集群数量);定义粒子群算法中的惯性权重、学习因子以及粒子速度的限制;在给定的建筑平面坐标范围内,随机生成粒子所代表的一组质心的初始位置,初始速度也随机生成,并将初始位置及初始速度作为每个粒子的历史最佳位置(个体最佳)和整个粒子群的最佳位置(全局最优)的初始值。

接着开始粒子群算法的迭代。根据每个粒子所代表的质心数组,将全部建筑节点按照K-means聚类的方法,就近划分给这些质心代表的不同集群,并检查集群的有效性(比如集群是否孤立或重叠过小)。

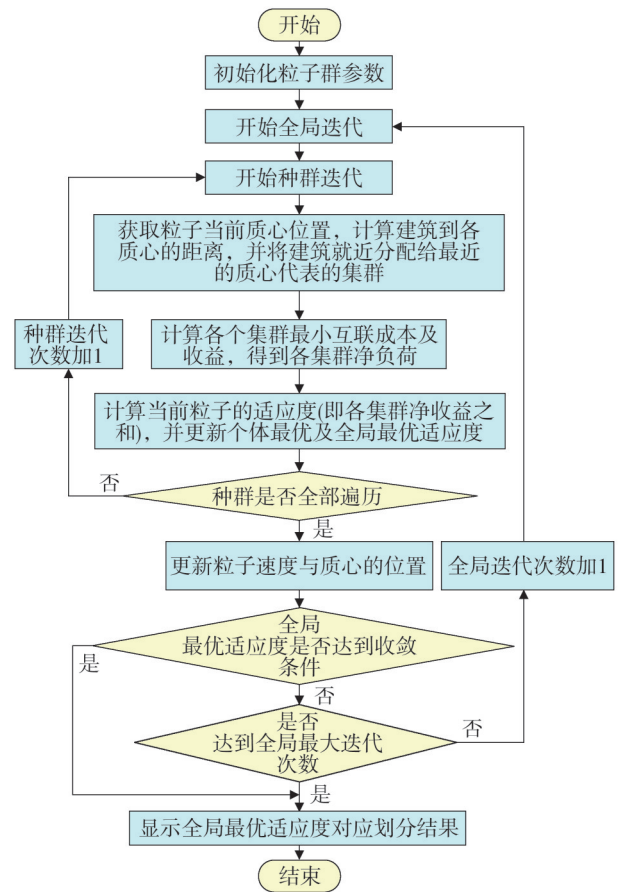


图1 集群划分流程图

Fig.1 Flowchart of cluster division process

然后计算划分得到的各个集群的最小互联成本及互联后增加的光伏消纳获得的收益,得到各个集群的净收益(具体算法在2.2节介绍)。再采用式(7)计算每种划分方案下全部集群净收益之和作为当前粒子的适应度。如果当前粒子的适应度比之前的个体最优适应度更好,则更新个体最优。将该粒子的适应度与全局最优解比较,若更优则更新全局最优。接着更新质心的位置与粒子的速度,其中粒子速度的更新方式为

$$V(s) = w \times V(s) + C_1 \times R \times (h_{p\_best}(s) - h(s)) - C_2 \times R \times (h_{g\_best}(s) - h(s)) \quad (14)$$

式中: $w$ 为惯性系数,本文中 $w$ 为0.5; $V(s)$ 为粒子当前的速度; $C_1$ 为个体学习因子, $C_2$ 为社会学习因子,在本文中 $C_1$ 和 $C_2$ 均为1.5; $R$ 为0~1之间的随机数; $h(s)$ 为质心迭代第 $s$ 步的位置; $h_{p\_best}(s)$ 为粒子的个体最优位置; $h_{g\_best}(s)$ 为粒子的全局最优位置。

基于更新后的粒子速度,对质心位置进行更

新为

$$h(s) = h(s - 1) + V(s - 1) \quad (15)$$

程序在达到最大迭代次数或全局最优适应度低于某一阈值时停止,显示该规定数目集群下最优的集群划分。此时将规定集群数目加1,重新进行一次集群划分;一直重复上述步骤直到最大集群数目为建筑个数的三分之一,输出最终的最优方案下的集群划分结果。

### 2.2 基于改进拓扑排序的内层群内互联线路功率计算

计算粒子适应度时,需要考虑各建筑集群内部的互联成本,即群内全部互联线路建设成本之和。由式(1)可知线路单位长度建设成本取决于互联线路流过的最大功率。为此,首先需要确定集群中建筑之间的最小生成树以最小化互联线路总长度,再计算树中各个互联的线路的最大功率及其成本。

最小生成树已经有比较成熟的算法,例如普里姆或克鲁斯卡尔算法等,本文不再详述。针对最小生成树中各个边传输的最大功率,设计一种基于改进拓扑排序的功率及成本计算方法。区别于传统的拓扑排序算法,本方法在进行拓扑排序时同步计算排序节点对应的边的功率。在单个集群中,建筑按照最小生成树的形式连接,将建筑节点视为叶子节点,建筑与建筑之间的连接视为树的边。该方法的核心思想是选择树中某个叶子节点,将该最小生成树分成两部分(即该叶子节点和其余全部节点)。将除该叶子节点之外的全部节点的净负荷累加,计算其与叶子节点净负荷的最大功率互济,即得到该互联线路的最大功率。再将该节点的净负荷合并吸收到相应互联系节点,并删除叶子节点和相应互联线路,从而减少枝的节点和边,再进入下一条互联线路的功率计算。其流程如图2所示。

第1步,将集群k的最小生成树中度为1的所有叶子节点放入队列Q中;

第2步,从队列Q中出队一个叶子节点,记为i(对应建筑节点);

第3步,查找与叶子节点i相连的节点j和边L<sub>ij</sub>;

第4步,计算连接i和j的边L<sub>ij</sub>流过的最大功率P<sub>max</sub>(i,j,k),其基本思想是将边L<sub>ij</sub>截断,拆分整个树(不包括删除的节点)为两部分(其中一部分为i),计

算这两部分的最大可能的功率交互。其算法为:

$$P_{\max}(i,j,k) = \max(P_{L_{ij}}^1, P_{L_{ij}}^2, P_{L_{ij}}^3, \dots, P_{L_{ij}}^{48}) \quad (16)$$

$$P_{L_{ij}}^t = \max(|P_{i,1,t}^{\text{trans}}|, |P_{i,2,t}^{\text{trans}}|, \dots, |P_{i,N_i,t}^{\text{trans}}|) \quad (17)$$

式中:P<sub>L<sub>ij</sub></sub><sup>t</sup>为边L<sub>ij</sub>在t时刻的最大功率交互值。

第5步,将节点i的净负荷曲线累加到节点j,删除节点i和边L<sub>ij</sub>,计算节点j的度,如果为1则将j放入队列Q;

第6步,判断队列Q是否为空,如果为空则表示全部的边的最大交互功率都已经计算完成,如果不为空则转到第2步进行新一次循环。

计算得到集群k的最小生成枝各条互联的边的最大交互功率P<sub>max</sub>(i,j,k),再将其代入式(1),即可计算每条直流互联线路的建设成本。

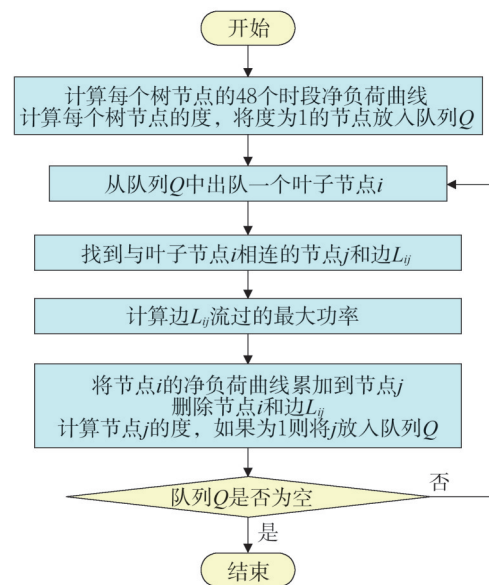


图2 群内互联成本计算流程图

Fig.2 Intra-cluster interconnection cost calculation flowchart

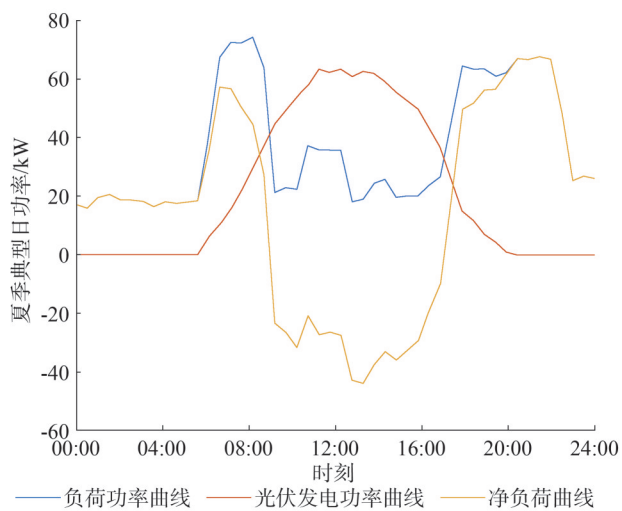
## 3 算例分析

### 3.1 建筑类型及源荷储参数选取

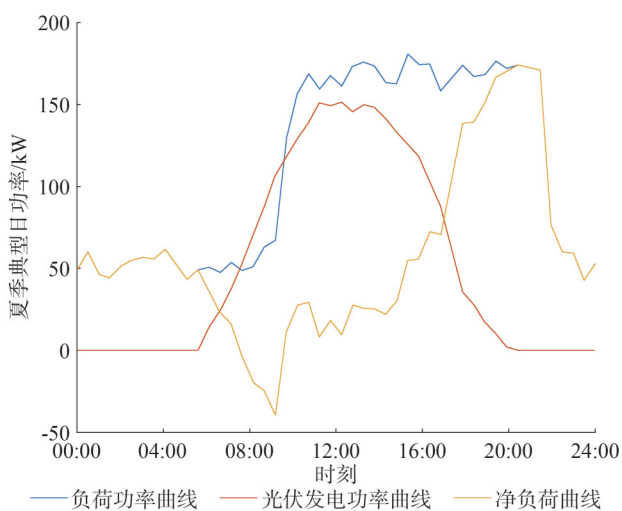
在优化建筑集群划分时,建筑间的能量互补性对光伏消纳率提升至关重要。只有在不同建筑的负荷特性、光伏出力、储能配置等方面差异显著时,才具有群内互联互济的经济性。因此,根据负荷特性,光伏出力特性与储能配置对建筑进行分类,以提高计算效率并增强集群内部能量交互的合理性。基于这3个因素,将建筑划分为住宅、商业、文化、办公、

工业园区5类,以降低优化复杂度,提升集群内部能量互补性和互联可行性,从而提高光伏消纳率,实现更优的集群优化方案。

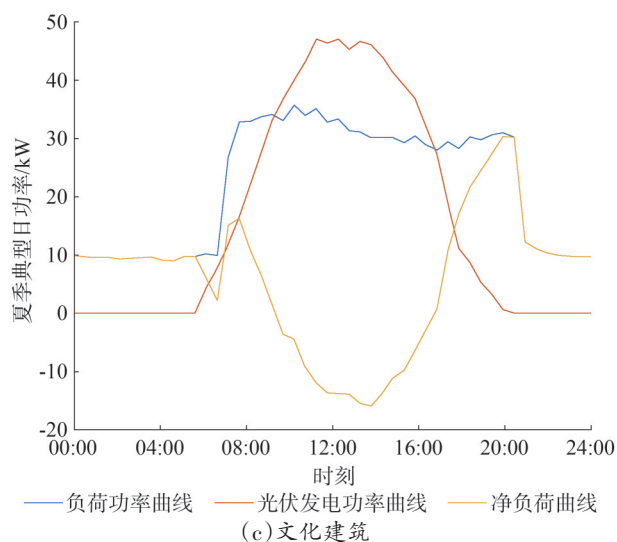
其中,住宅建筑负荷较稳定,晚间达峰;办公建筑高峰出现在白天;商业建筑负荷集中于营业时段;工业建筑负荷规模大且持续;文化建筑负荷相对稳定。建筑负荷规模也因类型不同而变化,不失一般性,设置典型住宅建筑、商业建筑、文化建筑、办公建筑、工业园区的日负荷分别为1 773.8 kWh、5 316.7 kWh、1 051.6 kWh、2 832 kWh、5 162.9 kWh。同时,不同建筑的负荷曲线也存在差异,典型曲线如图3所示。



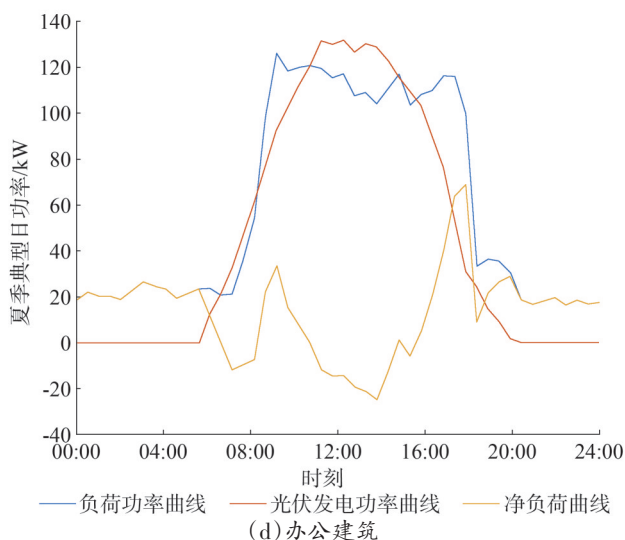
(a)住宅建筑



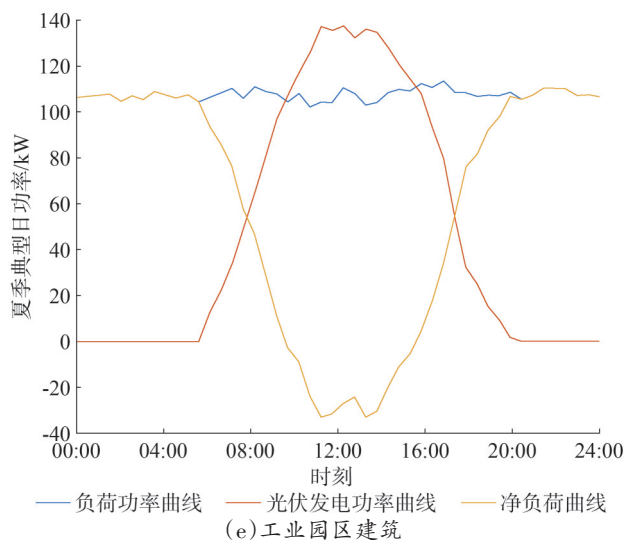
(b)商业建筑



(c)文化建筑



(d)办公建筑



(e)工业园区建筑

图3 不同建筑类型典型光伏发电与负荷曲线

Fig.3 Curves of photovoltaic power generation and load under various type of buildings

为优化光伏消纳策略,本研究假设所有建筑均安装分布式光伏系统,且光伏出力特性曲线相似。光伏装机容量由可用屋顶面积、安装条件及技术经济可行性决定,并按建筑负荷总量成比例调整。假设光伏系统仅在白天(06:00—18:00)出力,夜间出力为零,忽略极端天气影响,采用某地区典型日光伏出力曲线作为基准。单位面积光伏日发电量 $Y$ 设为 $2\text{ kWh/m}^2$ ,建筑日光伏总量 $E_{pv}$ 由式(18)计算。

$$E_{pv} = A \times Y \quad (18)$$

式中: $A$ 为光伏可接入面积, $\text{m}^2$ 。

以某典型中等规模住宅建筑为例,总光伏可利用面积通常为 $500\sim 560\text{ m}^2$ ,取一个区间值 $530\text{ m}^2$ ,因此其住宅建筑的日光伏发电总量在 $1\ 060\text{ kWh}$ 左右;同理取典型商业建筑、文化建筑、办公建筑、工业园区的日光伏总量规模分别为 $2\ 540\text{ kWh}$ 、 $800\text{ kWh}$ 、 $2\ 200\text{ kWh}$ 、 $2\ 320\text{ kWh}$ 。

为优化光伏消纳并提高建筑间能量互补能力,本研究假设所有建筑均配置独立的锂离子电池储能系统,参数基于现有技术水平设定。储能容量按建筑负荷需求比例设置,同类建筑容量相近,不同类型建筑根据其负荷特性有所区分:住宅建筑约 $45.7\text{ kWh}$ ,商业建筑约 $152.8\text{ kWh}$ ,文化建筑约 $67.7\text{ kWh}$ ,办公建筑约 $104.8\text{ kWh}$ ,工业园区约 $313.9\text{ kWh}$ 。住宅建筑,商业建筑,办公建筑,文化建筑和工业园区等5种建筑类型的典型日负荷曲线见图3。以住宅建筑与办公建筑为例,数据分配的依据是住宅建筑的负荷是明显的早晨和晚上高峰,办公建筑的负荷是白天特别是工作时间内负荷较高,因为办公设备和照明等在使用,而早晚的负荷较低。住宅建筑与办公建筑的光伏特点都是从上午到傍晚有明显的发电量,峰值在中午时分,这与日照强度最高时段相匹配。5种建筑类型的典型日净负荷曲线在 $07:00\text{—}10:30$ 和 $16:00\text{—}17:00$ 存在明显的功率互补特征,这为建筑之间通过直流互联的方式实现光伏额外消纳提供可能。

上述5类典型建筑的源荷储配置如表1中编号2、3、11、16、24的5栋建筑所示。在上述5栋典型建筑源荷配置的基础上,采用随机数方法生成其余25栋建筑的负荷与光伏曲线,其中负荷曲线的生成函数为

$$P_{\text{load}}(j,t) = (0.5 + r_{\text{and}}) \times P_{\text{load}}(t) \quad (19)$$

式中: $P_{\text{load}}(j,t)$ 为第 $j$ 个建筑在 $t$ 时刻的负荷; $r_{\text{and}}$ 为0

到1的随机数; $P_{\text{load}}(t)$ 为图3中与建筑 $j$ 同类型的典型建筑(编号为2、3、11、16、24中的某一个)在 $t$ 时刻的负荷。通过 $(0.5 + r_{\text{and}})$ 这个浮动因子,在典型负荷基础曲线上下浮动 $50\%\sim 150\%$ ,模拟出同类型的其余建筑负荷差异性。这些建筑的光伏出力曲线与储能配置,也采用类似的方法来个性化处理。最终30栋建筑的源荷储配置如表1所示。

表1 30个建筑的参数  
Table 1 Parameters of 30 buildings

建筑类型	建筑编号	横坐标/m	纵坐标/m	储能容量/kWh	光伏总量/kWh	负荷总量/kWh	储能规模浮动因子	光伏规模浮动因子	负荷规模浮动因子
住宅建筑	1	2 919.2	688.43	63.799	506.56	1 276.9	1.4	0.5	0.7
	5	1 027.3	4 843.1	39.538	957.63	1 847.1	0.9	0.9	1.0
	12	4 796.5	5 237.2	87.076	893.39	1 455.8	1.9	0.8	0.8
	13	1 431.2	1 963.1	39.705	1 400.2	1 412.8	0.9	1.3	0.8
	16	4 693.3	3 135.3	45.649	1 061.2	1 773.8	1.0	1.0	1.0
商业建筑	9	2 777.4	128.02	160.98	2 493.5	4 140.0	1.1	1.0	0.8
	11	2 934.4	6 922.0	152.76	2 536.5	5 316.7	1.0	1.0	1.0
	14	6 146.8	5 525.0	95.695	3 426.3	3 145.1	0.6	1.4	0.6
	17	2 921.1	6 360.2	99.048	2 597.5	2 878.9	0.6	1.0	0.5
	21	5 605.2	135.57	161.1	1 333.0	3 930.4	1.1	0.5	0.7
文化建筑	26	6 262.2	373.54	226.67	1 608.0	4 639.5	1.5	0.6	0.9
	28	273.38	1 027.1	256.65	2 146.4	3 964.6	1.7	0.8	0.7
	3	0.8	6 705.2	67.672	789.3	1 051.6	1.0	1.0	1.0
	7	1 303.8	4 805.5	39.91	1 128.9	824.79	0.6	1.4	0.8
	19	982.71	2 014.4	81.323	912.88	999.15	1.2	1.2	1.0
办公建筑	20	1 386.7	910.2	50.592	528.05	1 156.3	0.7	0.7	1.1
	22	6 777.8	4 751.8	69.108	941.72	1 311.3	1.0	1.2	1.2
	23	2 194.0	1 481.4	35.626	630.74	1 937.0	0.5	0.8	1.8
	29	1 188.8	4 125.1	87.208	1 070.7	1 209.6	1.3	1.4	1.2
	30	6 147.0	4 898.3	87.208	1 070.7	1 209.6	1.3	1.4	1.2
工业园区	15	191.71	722.58	168.15	1 081.6	1 708.6	1.6	0.5	0.7
	18	3 910.8	2 055.3	94.164	1 795.3	3 391.7	0.9	0.8	1.2
	24	4 846.3	1 858.8	104.82	2 207.5	2 832.0	1.0	1.0	1.0
	25	6 134.7	3 441.0	157.98	2 215.1	2 615.7	1.5	1.0	0.9
	2	5 042.3	2 947.8	313.93	2 304.0	5 162.9	1.0	1.0	1.0
工业园区	4	2 116.3	3 732.2	360.51	2 812.4	3 559.8	1.1	1.2	0.7
	6	646.3	2 208.6	167.32	1 568.5	5 639.1	0.5	0.7	1.1
	8	2 418.9	5 842.4	196.83	2 358.1	4 040.7	0.6	1.0	0.8
	10	3 771.7	5 251.0	336.79	2 996.8	7 256.8	1.1	1.3	1.4
	27	5 95.31	4 018.8	397.85	2 895.0	7 284.6	1.3	1.3	1.4

### 3.2 建筑空间分布

为确保所提方法的普适性,在建筑群地理范围为  $7\,000\text{ m} \times 7\,000\text{ m}$  的区域内,随机生成上述 30 个包含住宅、商业、办公、文化、工业园区等 5 种类型的建筑地理位置坐标,如图 4 所示。

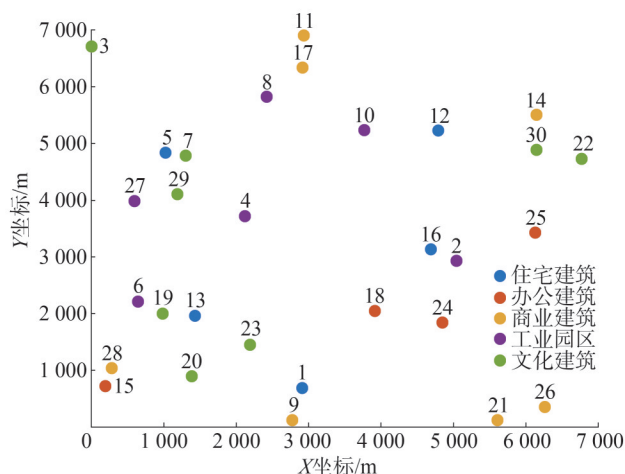


图4 建筑地理分布图

Fig.4 Geographical distribution of buildings

在进行集群互联功率互济之前,每个建筑采用交流配电方式独立地与电网进行电能交易,光伏采取“发自自用,余电上网”的运行模式。集群互联后,群内建筑采用直流方式互联,群间独立。

### 3.3 集群划分及群内直流互联优化结果

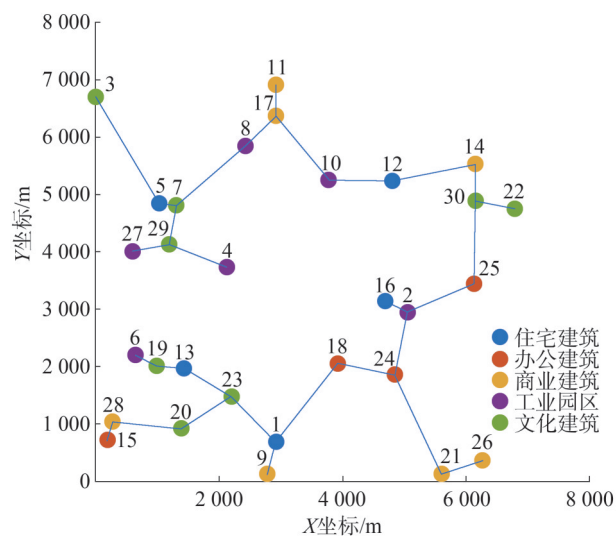
在上述 30 个建筑的地理位置和源荷日曲线及储能配置的基础上,采用 MATLAB 2022a 仿真平台开展集群划分研究。粒子群算法选用粒子数为 100,最大迭代次数为 50,新增光伏消纳度电收益按  $0.25\text{ 元/kWh}$  计算。

#### 3.3.1 未配置储能时的建筑互联集群划分

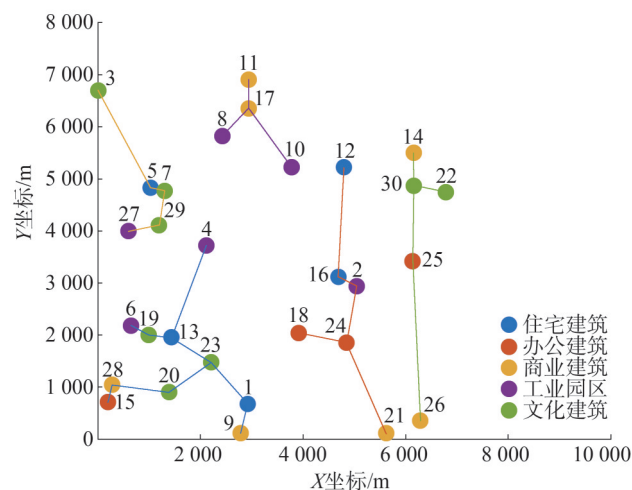
在折旧年限为 20 年,利率 2.5%,全部建筑均未配置储能的条件下,利用所提双层优化的集群划分方法,对该区域的 30 个建筑进行集群划分优化仿真。首先给定集群数量为 1,采用所提群内互联优化方法进行评。其中直流线路建设成本采用式(1)和式(2)计算。公式中涉及的单位载流功率的铜电缆单位长度成本依据当前国内两芯铠装铜电缆价格(约  $1.6\text{ 元}/(\text{m} \times \text{mm}^2)$ ),允许载流量取  $8\text{ A}/\text{mm}^2$ ,低压直流互联电压按  $400\text{ V}$ ;通过式(3)得到单位建设成本。所有建筑间的互联成本按式(3)累加,得到总建设成本;依据式(4)将总建设成本折算为日成本,其中参数  $c$  为月利率(年利率 2.5% 除以 12), $n$  为折旧期总月数(240 个

月)。互联收益计算采用式(5)。采用改进的拓扑排序算法计算集群内各建筑间互联线路的最大传输功率。该方法通过依次选择最小生成树中的叶子节点,利用式(16)一式(17)计算每条互联线路的最大功率交互值,再将该值代入式(1)计算对应的线路建设成本。

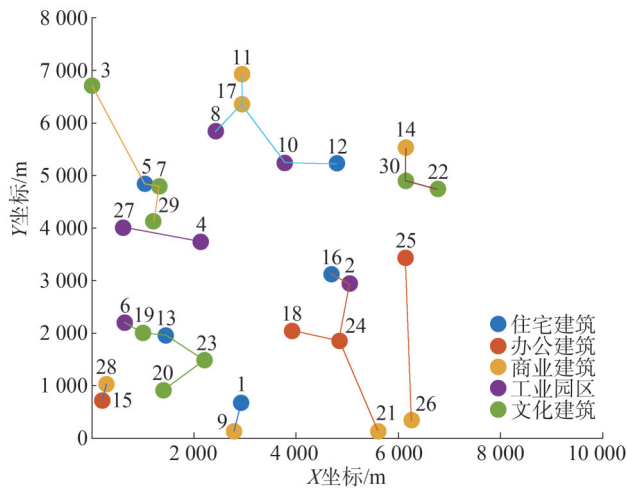
其次,给定其他数量的集群数进行仿真计算,发现在集群最大适应度通常出现在集群数量为 5~11。在给定集群数量分别为 1 和 5~11 时,计算得到的净收益等参数如表 2 所示,其中最大净收益为 217.2 元,对应的最优集群划分数量为 9 个。另外,建筑尖峰负荷平均消减是将各个建筑尖峰负荷消减率累加后按建筑数量进行简单平均得到。给定集群数量分别为 1、5、9、11 下的集群划分结果如图 5 所示。同时,不同集群数量下,收益/成本曲线如图 6 所示,可以看出,集群数量为 8 时取得最高的收益/成本比。



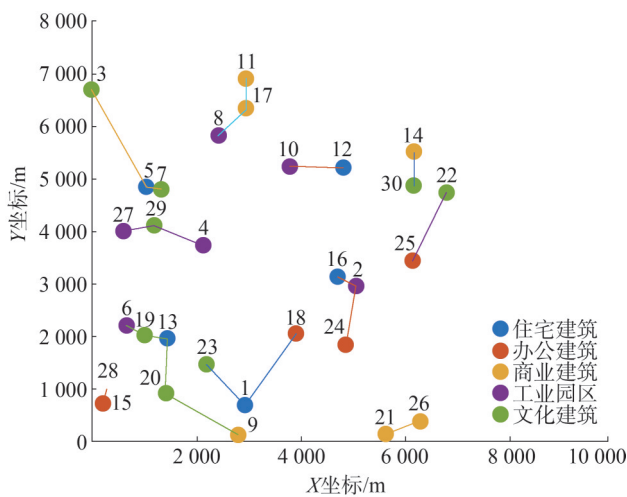
(a) 给定集群数量为 1



(b) 给定集群数量为 5



(c)给定集群数量为9



(d)给定集群数量为11

图5 未配置储能时典型集群数量下的集群划分及内部互联结果图

Fig.5 Cluster partitioning and internal interconnection results under typical cluster numbers without energy storage

表2 未配置储能时不同集群数量下最优集群划分

Table 2 Optimized cluster division under various numbers of clusters without energy storage

集群划分数量	净收益/(元/天)	集群总成本/(元/天)	总收益/成本	新增光伏本地消纳量/(kWh/天)	光伏本地总消纳率/%	新增光伏本地消纳率/%	建筑尖峰负荷平均消减/%
1	-889.9	2 084.8	0.57	4 779.3	90.8	9.6	15.2
5	95.5	996.5	1.10	4 367.8	90.0	8.8	8.1
6	98.2	630.5	1.16	2 914.6	87.1	5.8	7.9

表2(续)

集群划分数量	净收益/(元/天)	集群总成本/(元/天)	总收益/成本	新增光伏本地消纳量/(kWh/天)	光伏本地总消纳率/%	新增光伏本地消纳率/%	建筑尖峰负荷平均消减/%
7	173.0	724.7	1.24	3 590.7	88.4	7.2	7.5
8	215.1	517.8	1.42	2 931.5	87.1	5.9	6.3
9	217.2	590.3	1.37	3 230.2	87.7	6.5	5.5
10	121.9	462.3	1.26	2 336.7	85.9	4.7	5.4
11	107.0	406.1	1.26	2 052.2	85.4	4.1	5.1

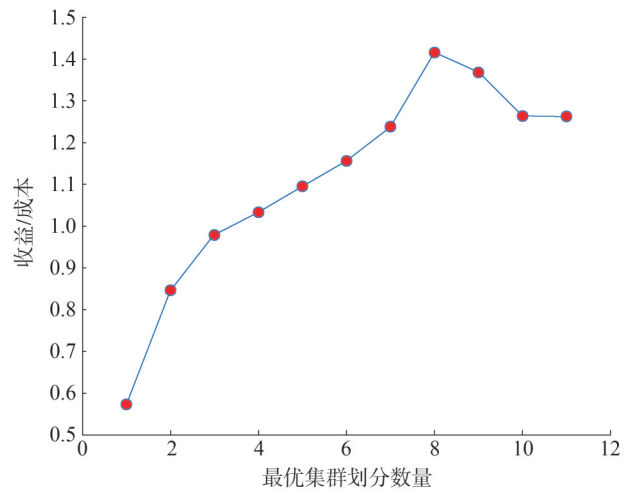


图6 未配置储能时集群收益/成本比的变化曲线

Fig.6 Benefit-cost ratio variation curve of clusters without energy storage

上述各指标中,净收益计算方式见式(11)。新增光伏本地消纳量表示建筑通过互联实现的额外光伏消纳量,计算公式为

$$E_{add} = E_{pv}^{net} - E_{self} \quad (20)$$

式中: $E_{add}$ 为通过建筑间互联互济而新增消纳的光伏发电量; $E_{pv}^{net}$ 为互联后建筑实际消纳的光伏发电量; $E_{self}$ 为在无互联情况下,建筑自身直接消纳的光伏发电量。

光伏本地总消纳率 $\eta_{total}$ 表示建筑整体就地消纳光伏发电量占总光伏发电量的比例,计算公式为

$$\eta_{total} = \frac{E_{self} + E_{add}}{E_{pv}} \times 100\% \quad (21)$$

新增光伏本地消纳率表示仅通过互联互济新增消纳的光伏电量占总光伏发电量的比例,计算公

式为

$$\eta_{\text{add}} = \frac{E_{\text{add}}}{E_{\text{pv}}} \times 100\% \quad (22)$$

建筑尖峰负荷平均消减率的计算方式为

$$\frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{peak,orig}}^i - P_{\text{peak,net}}^i)}{\sum_{i=1}^n P_{\text{peak,orig}}^i} \times 100\% \quad (23)$$

式中: $P_{\text{peak,orig}}^i$ 为第*i*个建筑在无互联时的峰值负荷; $n$ 为建筑总数; $P_{\text{peak,net}}^i$ 为第*i*个建筑在互联后的峰值负荷。

从图4可见,在给定集群数量为1时,能够最大限度提升整体的光伏本地消纳率,但是互联成本较高,净收益为负。因此需要针对每种可能的划分数量进行优化计算,查找净收益最大的集群划分数量及群内互联方法。在上述几种给定的集群数量下进行集群划分得到的集群都未出现孤立的节点,各集群内部节点连接紧密、相互之间距离相对较近,而不同集群之间的关联性弱,在网架结构上满足结构性要求。以集群数量为5时为例,互联带来的净收益173.3元/天,集群新增的光伏消纳量为3853.2kWh/天,光伏的总消纳率为89.0%,其中建筑光伏本地自消纳率为81.3%,通过建筑之间直流互联产生的额外消纳率为7.7%。从结果中可以看出,通过建筑集群划分及群内直流互联,能够提升光伏本地消纳量。

考察表2所示不同集群数量下的优化划分结果,可知随着集群划分数量的升高,光伏消纳降低,净收益变化趋势无明显规律。说明集群数量升高会导致集群互联度降低。另外,群内功率互济减少,光伏本地消纳率比集群数量较少时有所降低。

以给定集群数量为5时的集群划分及内部互联(图4(b))图中左上角的集群(群中包含建筑编号3,5,7,27,29)为例,这5个建筑的负荷曲线如图7所示。

由图7可知,在08:00—10:00和15:00—18:00这两个时段,划分到同一个集群中的这5个建筑存在明显的功率互补特性,存在功率互济的潜能。

### 3.3.2 配置储能时的建筑互联集群划分

光伏建筑配置一定的储能容量,能够在一定程度上消减净负荷,实现削峰填谷的作用。在建筑互联集群同步配置储能,能够进一步提升光伏消纳率。

储能系统的度电成本会对集群划分的净收益造成影响。当前建筑储能采用的新型液流电池的度电成本0.215元/kWh左右<sup>[15]</sup>,随着储能技术的进步和突破,储能的寿命、能效会进一步提高,在可预见的将来,储能成本将会进一步降低。为此,分析不同储能配比下的集群划分问题。

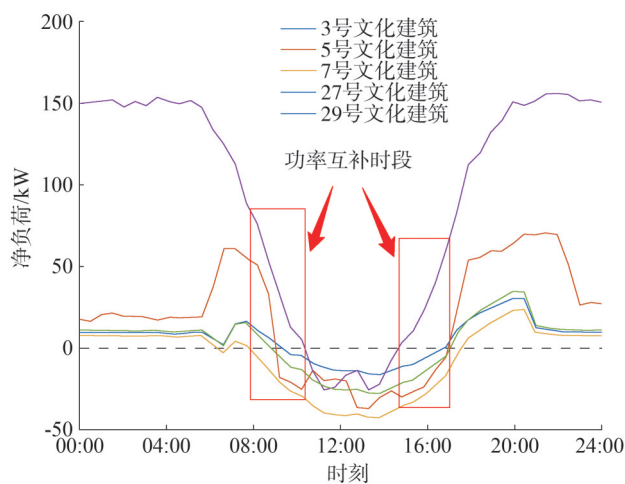


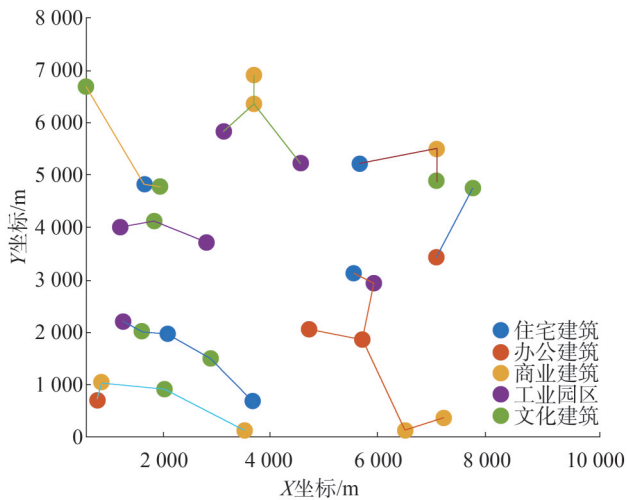
图7 建筑净负荷对比图

Fig.7 Building net load comparison diagram

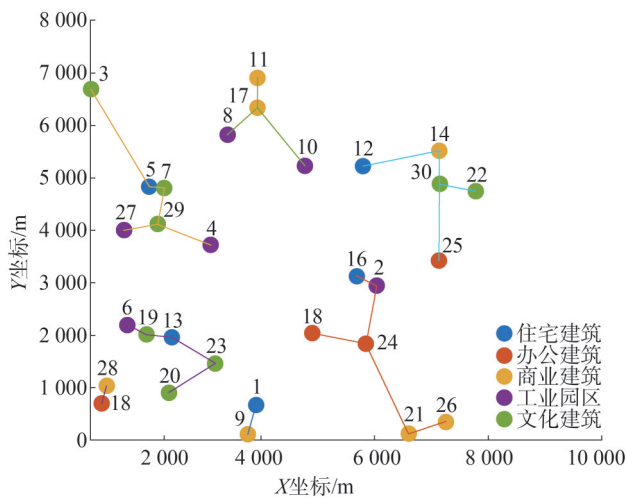
当建筑群配置储能系统时,额外考虑储能对光伏消纳量的提升,目标函数由式(6)和式(7)构建。式(8)确保每个建筑在各时刻满足能量平衡,式(9)限制储能系统在任一时刻的充放电状态,式(10)保证集群内各建筑间通过直流母线的能量传输平衡。模型最终以式(11)构建净收益目标函数,储能成本根据式(12)计算。

储能配比系数*S*为储能总容量与建筑日负荷总量的比值,同时本文约定最大充放电速率为0.25*C*。在年利率为2.5%,折旧年限为20年的条件下,改变储能配比分别为0.01,0.05,0.1,储能度电成本0.215元/kWh<sup>[20]</sup>,利用所提集群划分方法对该区域内建筑进行集群划分。其中储能配比0.01时得到的最优集群划分与群内互联结果如图8所示。不同储能配比下的最优集群划分数量等数据如表3所示,收益/成本比受集群划分数量影响曲线如图9所示。

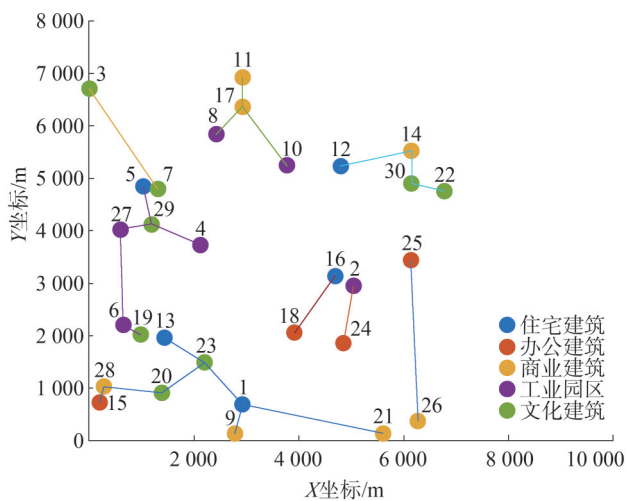
对比表2和表3可知,随着配置储能的引入及其配比的提升,净收益和光伏本地消纳率都有进一



(a)给定储能系数为0.01



(b)给定储能系数为0.05



(c)给定储能系数为0.1

图8 配置储能时典型集群数量下的集群划分及内部互联结果图

Fig.8 Cluster partitioning and internal interconnection results under typical cluster numbers with energy storage

步的提升。在储能配比大于0.05后,即能实现100%光伏在集群内部就地消纳。以储能配比0.05为例,最优集群划分数量为7个,与没有配置储能时集群划分数量上升,群内互联带来的净收益378.3元/天,集群新增的光伏消纳量为10350.1 kWh/天,其中建筑光伏本地自消纳率为81.2%,通过建筑之间直流互联产生的额外消纳率为18.8%。同时,图9表明,随着储能配比的增加,收益/成本曲线随集群划分数量而变化,同时整体呈现出先上升后下降的趋势。另外,集群划分数量在9个以内时,储能配比较大时的收益/成本比相对较高。

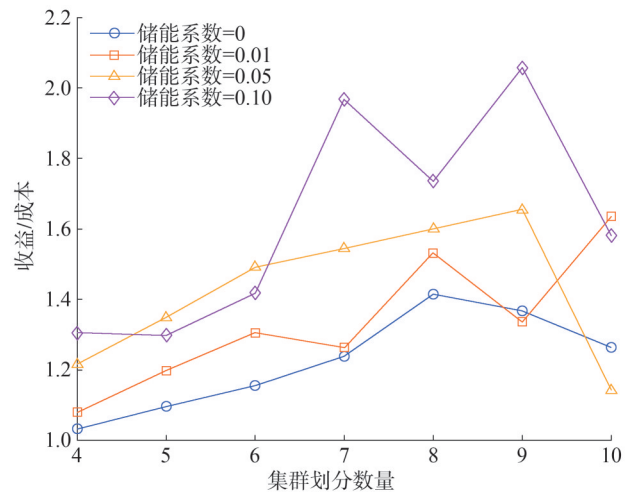


图9 不同储能系数下的收益/成本与集群划分数量的关系  
Fig.9 Relationship between benefit-cost ratio and cluster quantity under various energy storage coefficients

表3 配置储能时不同集群数量下最优集群划分  
Table 3 Optimized cluster division under various numbers of clusters without energy storage

储能配比	最优集群划分数量	净收益/(元/天)	新增光伏本地消纳量/(kWh/天)	光伏本地总消纳率/%	新增光伏本地消纳率/%	建筑尖峰负荷平均消减/%
0.00	9	217.2	3230.2	87.7	6.5	5.5
0.01	8	283.5	9357.8	94.8	16.7	8.1
0.05	7	378.3	10350.1	100.0	18.8	11.2
0.10	8	463.0	10350.1	100.0	18.8	11.2

#### 4 结束语

针对光伏建筑直流互联功率互济问题,提出面向光伏消纳率提升的集群划分优化算法,发掘最大

净收益的集群划分方案。综合考虑互联成本和光伏消纳收益,建立了集群划分净收益模型,并采用双层优化方法对最优划分方案进行求解。外层粒子层框架定义以质心数组为元素的粒子,采用k-means算法将建筑划分到最近质心所代表的集群实现集群划分定义,并以净收益作为集群划分过程中的适应度函数;内层采用改进拓扑排序算法对各个集群的群内互联成本进行优化计算。

针对不同储能配比下的7 000 m×7 000 m区域内的30个典型建筑组合场景进行了集群优化划分仿真分析。仿真结果表明集群互联能够提高净收益,提升光伏在集群内部的消纳量;另外,随着储能配比的上升,最优集群划分数量也随之增加。表明储能能够在一定程度上平抑了光伏溢出,减少互联需求。在给定的算例参数中,当储能配比0.05以上时,按求解到的最优集群划分方案和互联结果,集群都能实现光伏消纳率接近100%目标,所有建筑尖峰负荷至少降低5.5%,表明本文所提集群划分方法能够有效削减建筑负荷尖峰。

## 参考文献

- [1] 李琰.考虑需求响应的分布式电源集群优化调度研究[D].北京:华北电力大学,2023.
- [2] 张宇.考虑需求响应和集群动态划分的配电系统网源协调规划研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- [3] 李诗颖,杨晓辉.基于双向动态重构与集群划分的光伏储能选址定容[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):51-58.  
LI Shiyong, YANG Xiaohui. Capacity and location optimization of photovoltaic and energy storage based on bidirectional dynamic reconfiguration and cluster division [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 51-58.
- [4] 李金雨,宋福龙,马俊杰,等.基于5G基站可调度潜力与配电网集群划分的储能选址定容方法[J].电力系统自动化,2023,47(18):151-160.  
LI Jinyu, SONG Fulong, MA Junjie, et al. Siting and sizing method for energy storage based on dispatchable potential of 5G base station and cluster partition of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 151-160.
- [5] 陈保瑞,刘天琪,何川,等.考虑需求响应的源网荷协调分布鲁棒长期扩展规划[J].中国电机工程学报,2021,41(20):6886-6900.  
CHEN Baorui, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Distributionally robust coordinated expansion planning for generation and transmission systems with demand response [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6886-6900.
- [6] 陈楚靓,李晓露,纪坤华,等.考虑源荷储匹配的配电网集群划分与优化运行[J].电力建设,2023,44(9):80-93.  
CHEN Chujing, LI Xiaolu, JI Kunhua, et al. Distribution network cluster partition and optimal operation considering source-load-storage matching [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 80-93.
- [7] 徐旖旎,刘海涛,熊雄,等.低压配电台区柔性互联关键技术与发展模式[J].中国电机工程学报,2022,42(11):3986-4001.  
XU Yini, LIU Haitao, XIONG Xiong, et al. Key technologies and development modes of flexible interconnection of low-voltage distribution station area [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 3986-4001.
- [8] 曹昉,郑金钊,郑怡馨.基于VSC的优质光伏资源区配电台区柔性互联规划方法[J].南方电网技术,2023,17(1):14-25.  
CAO Fang, ZHENG Jinzhao, ZHENG Yixin. VSC-based flexible interconnection planning method for distribution station areas of high-quality photovoltaic resource [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 14-25.
- [9] 郑金钊.整县光伏背景下提升光伏消纳能力的台区柔性互联策略研究[D].北京:华北电力大学,2023.
- [10] 郑国权,祝恩国,张海龙,等.基于主从博弈的高比例光伏配电台区柔性互联规划[J].电力建设,2024,45(4):100-110.  
ZHENG Guoquan, ZHU Enguo, ZHANG Hailong, et al. Flexible interconnection planning for distribution station areas of high-ratio photovoltaic based on master-slave game [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4): 100-110.
- [11] 付宇,白浩,李跃,等.面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时空协调优化方法[J].南方电网技术,2023,17(1):84-93.  
FU Yu, BAI Hao, LI Yue, et al. Spatial-temporal coordinated optimization method of low voltage hybrid AC/DC distribution network for accommodation of high-proportion PVs [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 84-93.
- [12] 陈婧华,张琳娟,卢丹,等.基于改进粒子群优化算法的分布式电源集群划分方法[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(5):77-85.  
CHEN Jinghua, ZHANG Linjuan, LU Dan, et al. Cluster partition method of distributed power supply based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(5): 77-85.
- [13] 葛津铭,刘英儒,庞丹,等.含高渗透率光伏电网的集群划分电压控制策略[J].高电压技术,2024,50(1):74-82.  
GE Jinming, LIU Yingru, PANG Dan, et al. Cluster division voltage control strategy of photovoltaic distribution network with high permeability [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 74-82.
- [14] 吕文琪,刘子文,董晓霄,等.考虑灵活性资源可调容量和响应速度的集群划分方法[J].电力工程技术,2024,43(5):37-47.

- LYU Wenqi, LIU Ziwen, DONG Xiaoxiao, et al. A cluster partitioning method considering adjustable capacity and response speed of flexible resources [J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(5): 37-47.
- [15] 傅长熠, 杨镜非, 顾家辉. 基于双层动态时段划分的配电网重构[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(6): 30-36.
- FU Changyi, YANG Jingfei, GU Jiahui. Reconfiguration of distribution network based on bi-level dynamic time division [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(6): 30-36.
- [16] 范蓝心, 赵淑媛, 陈衡, 等. 采用节能导线的输电线路全生命周期成本分析[J]. *广东电力*, 2024, 37(4): 80-89.
- FAN Lanxin, ZHAO Shuyuan, CHEN Heng, et al. Life cycle cost analysis of transmission lines using energy-saving conductors [J]. *Guangdong Electric Power*, 2024, 37(4): 80-89.
- [17] 黄冬梅, 杨凯, 余京朋, 等. 考虑净负荷均衡的分布式光伏集群电压调控策略研究[J]. *电网技术*, 2024, 48(10): 4275-4285.
- HUANG Dongmei, YANG Kai, YU Jingpeng, et al. Research on voltage regulation strategy of distributed photovoltaic cluster considering the payload balancing [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(10): 4275-4285.
- [18] 黄剑, 章剑光, 章鑫, 等. 基于灰色定权聚类的变电站光伏发电利用优化[J]. *电网与清洁能源*, 2024, 40(8): 121-127.
- HUANG Jian, ZHANG Jianguang, ZHANG Xin, et al. Optimization of photovoltaic power generation utilization in substations based on grey fixed-weight clustering [J]. *Power System and Clean Energy*, 2024, 40(8): 121-127.
- [19] 戴志辉, 张艺宏, 于礼瑞, 等. 适用于新型配电网的改进型电流保护[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2024, 51(1): 1-9.
- DAI Zhihui, ZHANG Yihong, YU Lirui, et al. Improved current protection suitable for new distribution network [J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2024, 51(1): 1-9.
- [20] 徐若晨, 张江涛, 刘明义, 等. 电化学储能及抽水蓄能全生命周期度电成本分析[J]. *电工电能新技术*, 2021, 40(12): 10-18.
- XU Ruochen, ZHANG Jiangtao, LIU Mingyi, et al. Analysis of life cycle cost of electrochemical energy storage and pumped storage [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2021, 40(12): 10-18.

收稿日期: 2025-01-19

修回日期: 2025-04-28

作者简介:

王绪利(1984), 男, 高级工程师, 研究方向为配电网规划、输电网规划及新能源相关技术;

武澳丽(1999), 女, 硕士在读, 研究方向为交直流配电网;

凌 孺(1996), 男, 硕士, 工程师, 从事直流配电网相关工作;

张 辉(1991), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为直流配电网;

邓其军(1975), 通信作者(DQJ@whu.edu.cn), 男, 博士, 教授, 研究方向为交直流配电系统、新能源发电控制、无线电能传输。

(责任编辑 娄婷婷)

## ◀ 征稿启事 ▶

2025年4月28日发生的伊比利亚半岛大停电事故，为全球能源转型中的电力系统安全稳定运行敲响了警钟。此次事故并非由单一的传统故障引发，而是在高比例新能源接入的背景下，多重稳定性问题深度耦合、连锁演化的典型例证。事故发生前系统呈现鲜明的高比例新能源出力特征，扰动触发后电压/无功支撑、功角同步与频率动态、保护动作与潮流重分布等环节相互耦合并级联放大，最终演化为系统性崩溃。这表明在新型电力系统中，稳定性风险已从传统的“单一机理、单一时间尺度”问题，演变为多时间尺度、多机理交互作用的复杂稳定性问题。此外，新型电力系统还呈现出物理机理与控制策略的深度耦合、信息—物理系统的交互耦合，以及源—网—荷—储多主体协同与相互制约等特征。上述耦合关系重塑了扰动传播路径与稳定裕度边界，使稳定性评估与控制防御亟须从传统的单环节优化，转向跨层级、跨尺度的系统性协同。

为了应对高比例新能源接入背景下多重耦合引发的稳定性新挑战，解决技术研究和应用中的难题和热点问题，推动技术创新和交流，**诚邀请香港理工大学卜思齐教授、国网江苏电科院张宁宇高级专家和南京理工大学周涛讲师担任特约主编**，拟针对“多重耦合下新型电力系统稳定性分析与控制”开设专栏，欢迎国内外相关领域的专家学者踊跃投稿！

### 一、征稿方向（包括但不限于）

- 1、多时间尺度、多机理耦合稳定性机理与统一分析框架
- 2、多重耦合稳定性的演化路径与风险防控
- 3、高比例新能源/逆变器主导电网的小扰动稳定与振荡机理
- 4、新型电力系统暂态稳定与功角/同步稳定
- 5、电压稳定与无功电压支撑能力评估及控制
- 6、频率稳定与惯量/一次调频等效支撑技术
- 7、信息—物理耦合与网络化控制对稳定性的影响
- 8、源—网—荷—储协同运行对稳定性的影响与控制策略
- 9、保护—控制—稳定协同与连锁故障传播机理
- 10、稳定性评估与仿真技术：建模、验证与高效计算

### 二、投稿要求

1、请从山东电力技术网站投稿，请在题名后标注“多重耦合下新型电力系统稳定性分析与控制”，网址：<http://sddljs.cbpt.cnki.net>

2、稿件详细要求请参照《山东电力技术》投稿须知及论文写作模版，投稿须知及论文写作模版请在山东电力技术网站下载。

3、稿件一经采用，本刊将按照《山东电力技术》期刊稿费发放标准向作者发放稿费，稿酬优厚。

4、征文截止时间2026年12月31日，其他不明事宜，请联系《山东电力技术》编辑部。电话：

0531-67982997。



关注《山东电力技术》