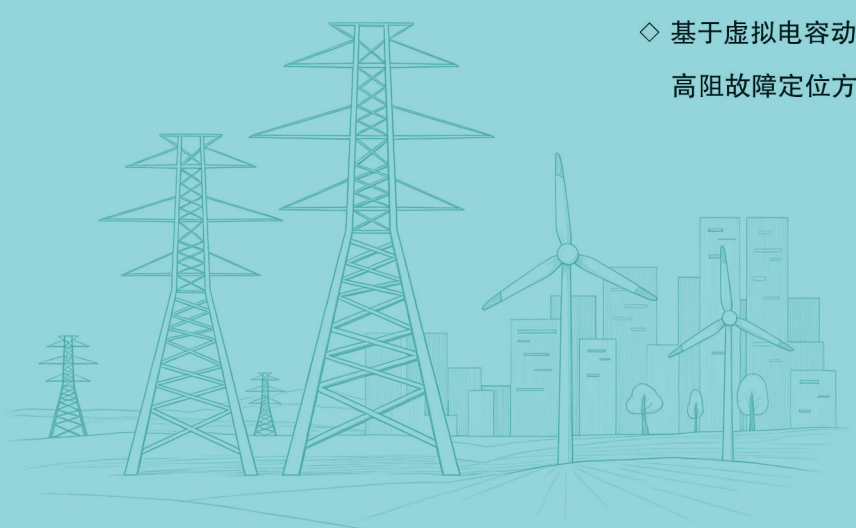
· 中国科技核心期刊
· 中国应用型核心期刊
· 瑞典开放获取期刊目录（DOAJ）

ISSN 1007-9904
CN 37-1258/TM

山东电力技术

SHANDONG ELECTRIC POWER

◇ 基于改进 Shapley 值法的社区综合能源系统收益分配与协同优化
◇ 考虑柔性负荷资源参与调控的农牧园区经济运行策略
◇ 基于虚拟电容动态极性判据与 FIR 滤波器的谐振接地系统高阻故障定位方法



2026.4
第53卷
2026年4月

国网山东省电力公司主办

ISSN 1007-9904
9 771007 990267 04>

山东电力技术

2026 年 第 53 卷 第 4 期（总第 341 期）

《山东电力技术》连续入选

中国科技核心期刊

中国科技核心期刊

（中国科技论文统计源期刊）

收录证书

CERTIFICATE OF SOURCE JOURNAL
FOR CHINESE SCIENTIFIC AND TECHNICAL PAPERS AND CITATIONS

山东电力技术

经过多项学术指标综合评定及同行专家评议推荐，贵刊被收录为“中国科技核心期刊”（中国科技论文统计源期刊）。

特颁发此证书。

中国科学技术信息研究所
Institute of Scientific and Technical Information of China
北京复兴路 15 号 100038　www.istic.ac.cn

2025年10月

证书编号：2024-RA02-1534
有效期至：2026年12月

广告

山东电力技术
SHANDONG ELECTRIC POWER

收录情况

中国科技核心期刊

中国应用型核心期刊

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

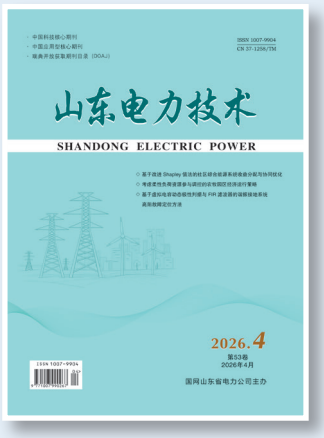
波兰 ICI World of Journals 数据库收录期刊

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 4 期
第 53 卷（总第 341 期）
2026 年 4 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*116*zh*P* ￥18.00*6000*10*2026-4*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
仉梦林　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　员韫韵　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　颉　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　娄婷婷　张丹丹　车永强

目 次

综合能源

基于改进Shapley值法的社区综合能源系统收益分配与协同优化
…… 董梦阳,滕新亮,徐建军,彭 程,赵书琪(1)
考虑柔性负荷资源参与调控的农牧园区经济运行策略 …… 张海龙,王建伟,牛 涛,吴洛菲,白保华(14)
考虑用户差异化的园区综合能源系统多主体博弈方法 …… 娄 伟,张征凯,赵学理,孙立成,刘 蔚(26)

配电网

基于虚拟电容动态极性判据与FIR滤波器的谐振接地系统高阻故障定位方法
…… 张 明,陆 恣,张 鑫,赵晨昕(41)
考虑光储充放电站的配电网电压应急优化方法 …… 赵 鑫,刘汉民,薄 博,杨 坡,夏 华(55)

数字新基建

基于知识映射生成式对抗网络的远动点表智能构建技术研究
…… 周华锋,张宏斌,刘科孟,徐 浩,崔万州,李甘源(66)
电网技改与检修工程造价文本的信息抽取与知识图谱构建 … 张丽萍,吴莉琳,李志翔,庞圣养,舒胜文(76)
基于博弈的电力工控网络APT攻击溯源图分析方法 …… 刘 新,王 睿,张朋丰,张 昊,刘 涵(87)

发电技术

基于IPO-XGBoost混合模型的汽轮机热耗率软测量方法 …… 宫喜鹏,王丹雅,王慧凯,陈小涛(97)
基于Simulink的H级重型燃气轮机数学模型建立与特性分析… 韩 悦,巩志强,刘馨颖,齐建荟,郭俊山(108)

SHANDONG ELECTRIC POWER
2026 No.4
ser.341

CONTENTS

· Integrated Energy ·

Community Integrated Energy System Revenue Distribution and Collaborative Optimization Based on Improved Shapley Value Method ····· DONG Mengyang, TENG Xinliang, XU Jianjun, PENG Cheng, ZHAO Shuqi(1)

Economic Operation Strategy of Agricultural and Animal Husbandry Parks Considering Flexible Load Resources Participating in Regulation ····· ZHANG Hailong, WANG Jianwei, NIU Tao, WU Luofei, BAI Baohua(14)

Multi-agent Game Method for Park Integrated Energy System Considering Differentiated Characteristics of Users ····· LOU Wei, ZHANG Zhengkai, ZHAO Xueli, SUN Licheng, LIU Wei(26)

· Distribution Network ·

Resonant Grounding System High Impedance Fault Location Method Based on Virtual Capacitance Dynamic Polarity Criterion and FIR Filter ····· ZHANG Ming, LU Min, ZHANG Xin, ZHAO Chenxin(41)

Contingency Optimization Method for Distribution Network Voltage Considering Photovoltaic-storage-charging and Discharging Stations ····· ZHAO Xin, LIU Hanmin, BO Bo, YANG Po, XIA Hua(55)

· Digital New Infrastructure ·

Research on the Intelligent Construction Technology of Remote Point Tables Based on Knowledge-mapping Generative Adversarial Networks ····· ZHOU Huafeng, ZHANG Hongbin, LIU Kemeng, XU Hao, CUI Wanzhou, LI Ganyuan(66)

Information Extraction and Knowledge Graph Construction for Cost Documents of Technical Reform and Maintenance Projects in Power Grid ····· ZHANG Liping, WU Lilin, LI Zhixiang, PANG Shengyang, SHU Shengwen(76)

A Game Theory-based Approach for APT Attack Provenance Graph Analysis in Electric Power Industrial Control Networks ····· LIU Xin, WANG Rui, ZHANG Pengfeng, ZHANG Hao, LIU Han(87)

· Power Generation Technology ·

Soft Measurement of Turbine Heat Consumption Rate by Integrating Chaotic Optimization and Integrated Learning ····· GONG Xipeng, WANG Danya, WANG Huikai, CHEN Xiaotao(97)

Mathematical Modeling and Characteristic Analysis of H-Class Heavy Duty Gas Turbines Based on Simulink ····· HAN Yue, GONG Zhiqiang, LIU Xinying, QI Jianhui, GUO Junshan(108)

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.issn1007-9904.250638

·综合能源·

基于改进Shapley值法的社区综合能源系统收益分配与协同优化

董梦阳,滕新亮,徐建军*,彭 程,赵书琪
(东北石油大学电气信息工程学院,黑龙江 大庆 163318)

摘要:针对社区综合能源系统中多方主体协作过程中存在收益分配不均和求解效率低下的问题,提出一种基于加权分层Shapley值法的能源系统协同优化与高效分配方法。首先,建立社区综合能源系统的协同运行框架,分析了微网运营商与各产消者之间的博弈关系。然后,针对传统Shapley值法在大规模系统下计算复杂度高、分配激励不足的问题,设计结合光伏发电盈余量加权的分层Shapley值分配机制,实现对绿色能源贡献者的有效激励,同时保障各参与方的基础收益。所提模型通过主从博弈与合作博弈相结合,优化了社区内能量互济和共享储能的利用效率。最后,通过算例仿真,验证了本文方法在提升分配效率、公平性和经济激励方面的优越性,并展现了在多产消者不断扩展和共享储能协同场景下的良好推广价值。

关键词:社区综合能源系统;共享储能;混合博弈;改进Shapley值;收益分配
中图分类号:TM73 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-9904(2026)04-0001-13

Community Integrated Energy System Revenue Distribution and Collaborative Optimization Based on Improved Shapley Value Method

DONG Mengyang, TENG Xinliang, XU Jianjun*, PENG Cheng, ZHAO Shuqi
(School of Electrical Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: To address the issues of uneven benefit distribution and low computational efficiency arising from multi-party collaboration in community integrated energy systems, this paper proposes an energy system collaborative optimization and efficient distribution method based on a weighted hierarchical Shapley value approach. First, a cooperative operation framework for community integrated energy systems is established, analyzing the game relationship among microgrid operators, producers, and consumers. Secondly, addressing the high computational complexity and insufficient incentive distribution associated with the traditional Shapley value method in large-scale systems, a hierarchical Shapley value distribution mechanism combined with the weighted surplus of photovoltaic power generation is designed. This mechanism effectively incentivizes green energy contributors while ensuring the basic income of all participants. The proposed model combines master-slave games with cooperative games to optimize the efficiency of energy mutual assistance and shared energy storage within the community. Finally, case simulations validate the superiority of this method in improving distribution efficiency, fairness, and economic incentives, demonstrating its strong potential for application in scenarios involving the continuous expansion of multiple producers and consumers sharing energy storage collaboratively.

Keywords: community integrated energy systems; shared energy storage; hybrid games; improved Shapley value; benefit distribution

0 引言

随着碳达峰碳中和战略目标的提出,社区综合能源系统(community integrated energy system, CIES)成为推动城市能源结构向低碳、可持续方向转型的重要载体[1]。CIES通过多能互补、分布式能源接入与多主体参与,实现了区域内能源的高效协同与综合利用[2]。然而,由于参与的产消者(producers and consumers, P&C)不断增加,社区层面的能源系统收益分配与协同优化问题日益突出,对管理与运行机

基金项目:黑龙江省重点研发计划项目(2024ZXJ01A04)。
Provincial Key Research and Development Program of Heilongjiang Province of China (2024ZXJ01A04).

制提出了更高要求。因此,如何设计合理的交易策略,实现各主体利益最大化,并保证各产消者间具有公平、公正的利益分配机制,是当前CIES研究的关键问题。

博弈论作为研究多方决策与利益分配的重要理论工具[3],近年来,在综合能源系统中得到广泛应用[4-6]。综合能源系统通常由多类主体共同参与,涉及资源分配、能量交易、价格制定与协同运行等复杂决策问题[7-8]。由于各参与方在目标、行为和资源占有上的差异,系统运行不可避免地呈现多主体互动与利益冲突的特征。因此,博弈论为分析和解决综合能源系统中各主体之间的竞合关系提供了有力的方法支撑。文献[9-13]采用主从博弈理论刻画系统运营商与其他利益主体之间的互动关系,构建了多能流协同与多主体分布式优化模型。文献[14-15]为了提高用户侧的整体收益,通过建立合作博弈模型来实现并进行利益分配。但在利益分配时,上述文献未能同时考虑微网运营商与多用户的利益,导致分配结果不能使所有主体均满意,无法充分激励所有主体积极参与。文献[16-18]均以Shapley值法为核心,针对多园区或多供能主体的综合能源系统联盟,通过成员边际贡献的精确计算,实现了联盟收益或成本的合理分摊。通过Shapley值的公平分配机制,有效协调了多方主体间的合作关系,提升了联盟的整体经济性和运行积极性。文献[19-21]进一步针对传统Shapley值在实际应用中的不足进行了方法改进,通过引入权重、修正因子或多元指标,增强了分配模型对风险、投入、环保等多维度贡献的区分能力。改进后的Shapley值分配机制在提升分配公平性的同时,更能激励多类型能源主体的深度协作,推动综合能源系统向高效、低碳、灵活方向发展。然而随着参与者的大幅增加,运用Shapley值法进行利益分配难以满足大规模系统计算需求。

储能系统(energy storage system,ESS)在综合能源系统中起到调节能量供需、提升系统灵活性和促进可再生能源高效利用的关键作用。文献[22-24]充分论证了储能技术在楼宇、社区、园区等多场景下的价值。储能系统不仅通过光伏、风电等可再生能源配合储能设备,实现了削峰填谷、提升能源利用效率,还优化了系统的运行成本和经济性,增强了负荷调节的灵活性和系统运行的安全性。文献[25]聚焦于共享储能在多级市场中通过容量租赁和电能服务实现收益最大化,采用主从博弈方法兼顾运营商和用户的经济效益,强调储能运营模式与市场机制的结合。文献[26]关注共享储能的动态容量分配,基于主从博弈理论优化容量分配,突出储能与分布式可再生能源的高效协同、动态响应和双方互利共赢。文献[27]聚焦社区内光伏产消者与共享储能电站的合作运营,利用合作博弈和纳什谈判实现收益分配,强调分布式主体间的能源互补、信息安全和整体效率提升。

综上所述,针对社区综合能源系统利益分配问题,本文提出一种基于混合博弈及共享储能的社区综合能源系统协同优化运行方法。构建了社区综合能源系统的混合博弈模型,其中上层以微网运营商作为主导,下层则包括由各产消者和共享储能电站组成的参与方。各方均以收益最大化为目标,通过纵向的主从博弈与横向的合作博弈相结合,实现系统的协同优化。其次,针对传统Shapley值法在大规模系统中存在的计算复杂、效率低、可推广性弱等问题,采用分层Shapley值法对合作博弈所得利益进行分配,并对分层Shapley值法进行改进,增加光伏盈余量更多的产消者的权重,实现更高效的利益分配机制。最后,结合某分布式光伏社区综合能源系统的算例分析,验证了所提方法在提升系统运行效率和未来可扩展性方面的优势。

1　社区综合能源系统基本框架

CIES框架如图1所示。CIES以微网运营商、产消者和共享储能电站为核心交易主体,形成多元协同运行模式。微网运营商(microgrid operator,MGO)内部配置热电联产机组,能够同时为能源社区中的产消者提供电能和热能。能源社区内的各产消者均配备有电制热设备和光伏发电装置。共享储能电站的电能可直接供给产消者使用,产消者的光伏发电盈余可存储至共享储能电站,也可以与其他产消者进行交易,实现能源的灵活调度与协同优化。微网运营商通过热电联产机组为产消者提供电能与热能,微网运营商根据用户的用能需求并结合自身利益向用户报价。共享储能电站则为能源社区内产消

者提供储能服务，并对其存储和取用过程收取相应的服务费用。假设微网运营商的售电价低于外部电网售电价，产消者仅向微网运营商进行购电。

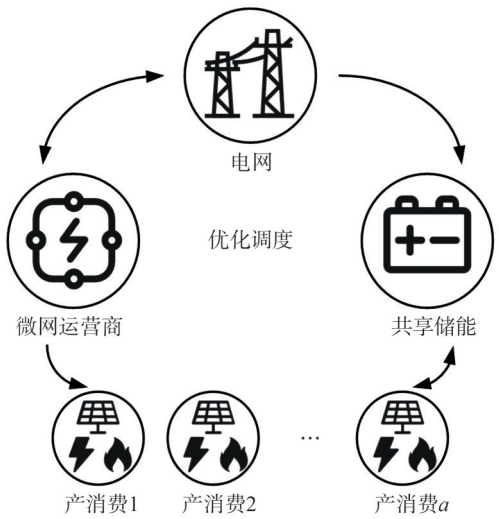


图1　CIES框架示意图

Fig.1 Schematic diagram of the CIES framework

2　社区混合博弈协调优化框架

构建社区综合能源系统的混合博弈模型，将微网运营商与产消者之间的主从博弈和产消者内部的合作博弈相结合，促进各方利益的平衡与协调。

整体模型采用两层结构：上层为微网运营商与各产消者的主从博弈，微网运营商依据日前市场行情和下层的电热需求，制定电热价格，旨在实现供需平衡、多能协同优化、经济效益最大化及可持续运行，并将定价结果传递至下层。下层为产消者之间的合作博弈模型，并包含与共享储能电站的交互。产消者根据上层确定的电热价格，优化自身负荷用能、共享储能充放电和与运营商的交易，以提升整体收益，并将结果反馈上层。整体混合博弈框架如图2所示。

微网运营商在一天内制定电价和热价策略，产消者则根据微网运营商的定价和共享储能服务费用，实时优化各时段的电负荷和热负荷，并合理调配共享储能服务的使用。当微网运营商调整价格后，若电价或热价过高或过低，产消者将相应改变自身的购电与购热需求；反之，产消者的用能选择及其购能量也会反馈至运营商，推动其持续优化定价，最终实现系统的最优状态。整个过程构成了一个主从博弈模型，其中上层的微网运营商为领导者，下层的各产消者则为跟随者。在合作博弈阶段，能源社区内各产消者间进行协作使所有参与者都能从中获益，并根据各自对系统的贡献合理分配收益。共享储能电站则作为重要的能量调节资源，为能源社区内部产消者提供灵活的电能支持，帮助用户在电价较高时段减少对微网运营商的购电需求，而在电价较低时段存储电能以备后用。将主从博弈与合作博弈相结合构成的混合博弈机制，其能有效促进多方共赢，提升系统的经济性和灵活性，推动了社区能源系统向高效、低碳和智能方向发展。

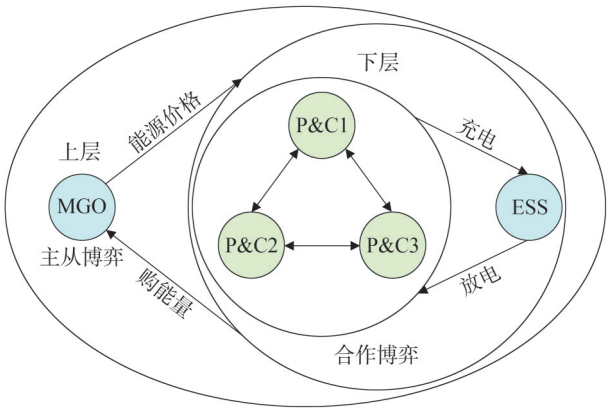


图2　博弈模型框架

Fig.2 Game model framework

2.1　领导者微网运营商模型

微网运营商依托热电联产机组，以天然气为主要燃料，向产消者供应电能和热能获取利润。与传统燃煤机组相比，热电联产机组有害物质排放较低，基本不产生硫化物，环保性能更优。同时，热电联产机组具备较快的启停和调节能力，保障关键负荷的供能可靠性。热电联产机组的耗气成本与输出功率的关系为：

$$P_t^{\mathrm{CHP,e}} = V_t^{\mathrm{CHP}} \eta_{\mathrm{e}}^{\mathrm{CHP}} Q_{\mathrm{LHV}} \tag{1}$$

$$P_t^{\mathrm{CHP,h}} = \gamma_{\mathrm{h}}^{\mathrm{CHP}} P_t^{\mathrm{CHP,e}} \tag{2}$$

式中：$P_t^{\mathrm{CHP,e}}$ 为 t 时段 CHP 机组的输出电功率；$P_t^{\mathrm{CHP,h}}$ 为 t 时段 CHP 机组的输出热功率；$\eta_{\mathrm{e}}^{\mathrm{CHP}}$ 为 CHP 机组的发电效率；$\gamma_{\mathrm{h}}^{\mathrm{CHP}}$ 为 CHP 机组的热电比系数；Q_{LHV} 为天然气的低热值；V_t^{CHP} 为 t 时段注入 CHP 机组的天然气气量。

考虑到热功率的供需平衡关系有：

$$P_t^{\mathrm{CHP,h}} = L_t^{\mathrm{MGO,h}} \tag{3}$$

式中：$L_t^{\mathrm{MGO,h}}$ 为 t 时段产消者从微网运营商购买的热功率。

微网运营商向产消者售能的价格约束为：

$$\lambda_t^{\mathrm{EG,b}} \leqslant \lambda_t^{\mathrm{MGO,s}} \leqslant \lambda_t^{\mathrm{EG,s}} \tag{4}$$

$$\mu_{\min}^{\mathrm{MGO,s}} \leqslant \mu_t^{\mathrm{MGO,s}} \leqslant \mu_{\max}^{\mathrm{MGO,s}} \tag{5}$$

式中：$\lambda_t^{\mathrm{MGO,s}}$ 为微网运营商制定的 t 时段售电价；$\lambda_t^{\mathrm{EG,b}}$、$\lambda_t^{\mathrm{EG,s}}$ 分别为微网运营商向电网的 t 时段购电价、售电价；$\mu_t^{\mathrm{MGO,s}}$ 为微网运营商制定的 t 时段售热价；$\mu_{\min}^{\mathrm{MGO,s}}$、$\mu_{\max}^{\mathrm{MGO,s}}$ 分别为微网运营商售热价下、上限。

为避免作为领导者的微网运营商将售能价格定为最高，增加产消者的购能费用，需要对一天内售能价格进行平均值约束：

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{24} \dfrac{\lambda_t^{\mathrm{MGO,s}}}{24} \leqslant \lambda_{\mathrm{av}}^{\mathrm{MGO,s}} \\ \sum_{t=1}^{24} \dfrac{\mu_t^{\mathrm{MGO,s}}}{24} \leqslant \mu_{\mathrm{av}}^{\mathrm{MGO,s}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$\lambda_{\mathrm{av}}^{\mathrm{MGO,s}}$ 和 $\mu_{\mathrm{av}}^{\mathrm{MGO,s}}$ 分别为微网运营商向产消者出售电能、热能平均价格。时序平均价格反映分时交易价格在整个周期内的平均水平，平均价格用于控制运营商的整体定价策略。通过该约束，保证了平均电价、热价与实际时序平均价格保持一致，从而使运营商的定价既符合优化目标，又保证整体合理性。

2.2　跟随者产消用户模型

产消者侧除了固有负荷外，还拥有大量需求响应负荷，包括可削减负荷、可转移负荷以及可替代负荷。需求响应负荷可以根据上层领导者制定的售能价格灵活调整自身用能时段，实现削峰填谷，提升系统运行效率。由此可得，产消者在一天内 t 时段的电负荷为：

$$L_t^{\mathrm{e}} = L_t^{\mathrm{f}} + L_t^{\mathrm{r}} + \Delta L_t^{\mathrm{e}} \tag{7}$$

$$L_t^{\mathrm{r}} = L_t^{\mathrm{cl}} + L_t^{\mathrm{sl}} \tag{8}$$

$$L_{\min}^{\mathrm{r}} \leqslant L_t^{\mathrm{r}} \leqslant L_{\max}^{\mathrm{r}} \tag{9}$$

$$\Delta L_{\min}^{\mathrm{e}} \leqslant \Delta L_t^{\mathrm{e}} \leqslant \Delta L_{\max}^{\mathrm{e}} \tag{10}$$

式中：L_t^{e} 为产消者在时段 t 需求响应后的电负荷；L_t^{f} 为产消者在时段 t 固有的电负荷；L_t^{r} 为产消者在时段 t 的柔性负荷，包含可削减负荷 L_t^{cl} 和可转移负荷 L_t^{sl}；ΔL_t^{e} 为产消者在时段 t 电制热设备所消耗的电负荷；$\Delta L_{\max}^{\mathrm{e}}$、$\Delta L_{\min}^{\mathrm{e}}$ 分别为产消者电制热设备所消耗的电负荷可替代上、下限；$L_{\max}^{\mathrm{r}}$、$L_{\min}^{\mathrm{r}}$ 分别为产消者进行需求响应时柔性负荷的上、下限。

产消者根据微网运营商提供的电热价与自身需求向微网运营商购买电热能。t 时段的电功率平衡方程为：

$$L_t^{\mathrm{MGO,e}} = L_t^{\mathrm{f}} + \bar{L}_t^{\mathrm{r}} + \Delta L_t^{\mathrm{e}} - L_t^{\mathrm{g}} + L_t^{\mathrm{ESS}} \tag{11}$$

$$\frac{\sum_{t=1}^{24} \left| L_t^{\mathrm{r}} - \bar{L}_t^{\mathrm{r}} \right|}{\sum_{t=1}^{24} (L_t^{\mathrm{f}} + L_t^{\mathrm{r}})} = \delta \tag{12}$$

式中：$L_t^{\mathrm{MGO,e}}$ 为 t 时段产消者从微网运营商购买的电功率；$\bar{L}_t^{\mathrm{r}}$ 为产消者在一天内 t 时段需求响应后的柔性电负荷；L_t^{g} 为光伏预测出力；L_t^{ESS} 为产消者一天内 t 时段向共享储能电站储存和取用的电能；δ 为一天内产消者电负荷调整占比。

供热方面产消者在电价较低时，利用电制热设备产热，产消者在一天内的热负荷 L_t^{h} 为：

$$L_t^{\mathrm{h}} = L_t^{\mathrm{MGO,h}} + L_t^{\mathrm{eh}} - \Delta L_t^{\mathrm{h}} \tag{13}$$

$$L_t^{\mathrm{eh}} = \eta_{\mathrm{h}} \Delta L_t^{\mathrm{e}} \tag{14}$$

$$0 \leqslant L_t^{\mathrm{eh}} \leqslant L_{\max}^{\mathrm{eh}} \tag{15}$$

$$0 \leqslant \Delta L_t^{\mathrm{h}} \leqslant \Delta L_{\max}^{\mathrm{h}} \tag{16}$$

式中：L_t^{eh}、$L_{\max}^{\mathrm{eh}}$ 分别为 t 时段电制热设备的产热功率与最大出力；ΔL_t^{h}、$\Delta L_{\max}^{\mathrm{h}}$ 分别为可削减热负荷与允许削减的最大热负荷；η_{h} 为电制热系数。

2.3　共享储能模型

共享储能电站作为独立的运营主体，由共享储能运营商建设运营，其目标是通过收取容量租赁费用实现收益最大化。共享储能运营商通过设定租赁费用影响产消者使用意愿，产消者在微网运营商电热价格和共享储能租赁费的共同作用下优化负荷与用能策略。共享储能电站与产消者进行实时电力交易，在电价低谷时储能、在高价时释放，增强了热电系统的稳定性和效益。

共享储能电站的充放电约束条件为

$$E_{t+1}^{\mathrm{ESS}} = E_t^{\mathrm{ESS}} + \left(\eta_{\mathrm{cd}}^{\mathrm{ESS}} P_{n,t}^{\mathrm{cd}} - \frac{P_{n,t}^{\mathrm{fd}}}{\eta_{\mathrm{fd}}^{\mathrm{ESS}}} \right) \Delta t \tag{17}$$

式中：E_{t+1}^{ESS} 为共享储能电站在 $t+1$ 时段的容量；$\eta_{\mathrm{cd}}^{\mathrm{ESS}}$、$\eta_{\mathrm{fd}}^{\mathrm{ESS}}$ 分别为产消者在充电和放电过程中的传输效率；$P_{n,t}^{\mathrm{cd}}$ 和 $P_{n,t}^{\mathrm{fd}}$ 分别为 t 时段产消者 n 向共享储能电站充入、取用的电功率；Δt 为单位时段长度，本文取 1 h。

为确保共享储能系统能够持续工作，假定共享

储能电站在一个周期内的充、放电功率相等：

$$\sum_{t=1}^{24} P_{n,t}^{\mathrm{cd}} \eta_{\mathrm{cd}}^{\mathrm{ESS}} = \sum_{t=1}^{24} \frac{P_{n,t}^{\mathrm{fd}}}{\eta_{\mathrm{fd}}^{\mathrm{ESS}}} \tag{18}$$

一天内，产消者在任意时间充、放电的总功率不能超过共享储能电站的容量极限：

$$E_{\min}^{\mathrm{ESS}} \leqslant E_t^{\mathrm{ESS}} \leqslant E_{\max}^{\mathrm{ESS}} \tag{19}$$

式中：$E_{\min}^{\mathrm{ESS}}$ 和 $E_{\max}^{\mathrm{ESS}}$ 分别为共享储能电站允许容量的最小值、最大值。

对于产消者在某一时段的充、放电功率受共享储能电站的允许功率影响，则有如下约束：

$$\left| \frac{E_{t+1}^{\mathrm{ESS}} - E_t^{\mathrm{ESS}}}{\Delta t} \right| \leqslant P_{\max}^{\mathrm{ESS,cd}} \left(P_{n,t}^{\mathrm{cd}} \leqslant P_{n,t}^{\mathrm{fd}} \right) \tag{20}$$

$$\left| \frac{E_{t+1}^{\mathrm{ESS}} - E_t^{\mathrm{ESS}}}{\Delta t} \right| \leqslant P_{\max}^{\mathrm{ESS,fd}} \left(P_{n,t}^{\mathrm{fd}} \leqslant P_{n,t}^{\mathrm{cd}} \right) \tag{21}$$

式中：$P_{\max}^{\mathrm{ESS,cd}}$、$P_{\max}^{\mathrm{ESS,fd}}$ 分别为共享储能电站允许的最大充、放电功率。

2.4 目标函数

领导者微网运营商在一天内的净收益最大可表示为：

$$\max C_{\mathrm{MGO}} = C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{G,e}} + C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{l,e}} + C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{l,h}} - \sum_{t=1}^{T} C_t^{\mathrm{CHP}} \tag{22}$$

$$C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{G,e}} = \begin{cases} \sum_{t=1}^{24} -\lambda_t^{\mathrm{EG,b}} \left(P_t^{\mathrm{CHP,e}} - L_t^{\mathrm{MGO,e}} \right), P_t^{\mathrm{CHP,e}} \leqslant L_t^{\mathrm{MGO,e}} \\ \sum_{t=1}^{24} -\lambda_t^{\mathrm{EG,s}} \left(P_t^{\mathrm{CHP,e}} - L_t^{\mathrm{MGO,e}} \right), P_t^{\mathrm{CHP,e}} > L_t^{\mathrm{MGO,e}} \end{cases} \tag{23}$$

$$C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{l,e}} = \sum_{t=1}^{24} \lambda_t^{\mathrm{MGO,s}} L_t^{\mathrm{MGO,e}} \tag{24}$$

$$C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{l,h}} = \sum_{t=1}^{24} \mu_t^{\mathrm{MGO,s}} L_t^{\mathrm{MGO,h}} \tag{25}$$

$$C_t^{\mathrm{CHP}} = \nu V_t^{\mathrm{CHP}} \tag{26}$$

式中：$C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{G,e}}$ 为微网运营商与电网侧进行能源交易所获得的利润；$C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{l,e}}$、$C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{l,h}}$ 分别为微网运营商向产消者出售电能和热能的利润；$L_t^{\mathrm{MGO,e}}$、$L_t^{\mathrm{MGO,h}}$ 分别为产消者向微网运营商购买的电、热量；C_t^{CHP}、ν 分别为微网运营商在 t 时段的燃气成本与天然气单价。

跟随者产消用户一天的收益为：

$$C_{\mathrm{P\&C}} = C_{\mathrm{P\&C}}^{\mathrm{e}} + C_{\mathrm{P\&C}}^{\mathrm{h}} - C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{l,e}} - C_{\mathrm{MGO}}^{\mathrm{l,h}} - C_{\mathrm{ESS}}^{\mathrm{zl}} \tag{27}$$

$$C_{\mathrm{P\&C}}^{\mathrm{e}} = \sum_{t=1}^{24} \left(x \left(L_t^{\mathrm{MGO,e}} + L_t^{\mathrm{g}} \right)^2 + y \left(L_t^{\mathrm{MGO,e}} + L_t^{\mathrm{g}} \right) \right) \tag{28}$$

$$C_{\mathrm{P\&C}}^{\mathrm{h}} = \sum_{t=1}^{24} \left(x \left(L_t^{\mathrm{MGO,h}} \right)^2 + y L_t^{\mathrm{MGO,h}} \right) \tag{29}$$

式中：$C_{\mathrm{P\&C}}^{\mathrm{e}}$、$C_{\mathrm{P\&C}}^{\mathrm{h}}$ 分别为产消者的用电效用函数和用热效用函数；$C_{\mathrm{ESS}}^{\mathrm{zl}}$ 为一天内共享储能电站向产消者收取的租赁费用；x、y 为用能效用函数的参数。

共享储能电站一天的收益为：

$$C_{\mathrm{ESS}} = C_{\mathrm{ESS}}^{\mathrm{zl}} - C_{\mathrm{ESS}}^{\mathrm{cd}} \tag{30}$$

$$C_t^{\mathrm{zl}} = \sum_{n=1}^{N} \left(\alpha_t^{\mathrm{fd}} P_{n,t}^{\mathrm{fd}} - \alpha_t^{\mathrm{cd}} P_{n,t}^{\mathrm{cd}} \right) \Delta t \tag{31}$$

$$C_t^{\mathrm{cd}} = \sum_{n=1}^{N} \left(\alpha^{\mathrm{cd}} P_{n,t}^{\mathrm{cd}} + \alpha^{\mathrm{fd}} P_{n,t}^{\mathrm{fd}} \right) \Delta t \tag{32}$$

式中：α_t^{fd}、α_t^{cd} 分别为 t 时段产消者租赁共享储能电站缴纳的单位放电功率费用和收取的单位充电费用，其中，$\alpha_t^{\mathrm{fd}} \leqslant \lambda_t^{\mathrm{MGO,s}}$；$\alpha^{\mathrm{cd}}$、$\alpha^{\mathrm{fd}}$ 分别为共享储能电站的单位充、放电成本系数；N 为产消者数量；C_{ESS} 为一天内共享储能电站的总收益；$C_{\mathrm{ESS}}^{\mathrm{cd}}$ 为一天内共享储能电站充放电时需要的成本；C_t^{zl}、C_t^{cd} 分别为 t 时段产消者支付的租赁费用与共享储能电站充放电成本。

3 混合博弈模型求解

针对本文构建的微网运营商与各产消者的主从博弈模型以及各产消者间的合作博弈模型，主从博弈的求解采用二分法，合作博弈模型的收益分配采用改进的 Shapley 值法，其具体步骤如图 3 所示。图 3 中，$a_{\max}^{(k)}$、$a_{\min}^{(k)}$ 分别为第 k 次迭代中售能价格上下限。

3.1 主从博弈模型求解

采用二分法对主从博弈进行求解，以微网运营商面向产消者的售能价格作为主要迭代变量。通过不断调整价格的取值区间，快速逼近最优价格。该区间在整个迭代过程中始终包含最优解。若连续两次迭代得到的结果一致，则采用边界处理直至收敛。以 a 代表售能价格，初始值为售能价格的上下限。具体步骤如下：

1）设定售能价格上下限 $a_{\max}$、$a_{\min}$，初始化当前区间 $\left[a_{\min}^{(k)}, a_{\max}^{(k)} \right]$，并设置收敛精度为 ε。

2）计算当前区间中点，则售能价格 $a_{\mathrm{m}}^{(k)} = (a_{\min}^{(k)} + a_{\max}^{(k)})/2$，将其带入双层模型，求解下层最优响应。

3）根据下层模型的反馈与系统约束，判断最优解应位于当前区间的左半区间 $\left[a_{\min}^{(k)}, a_{\mathrm{m}}^{(k)} \right]$ 或右半区间 $\left[a_{\mathrm{m}}^{(k)}, a_{\max}^{(k)} \right]$，并据此更新区间边界。

4）若两次迭代结果相同，可进一步缩小边界以保证收敛。

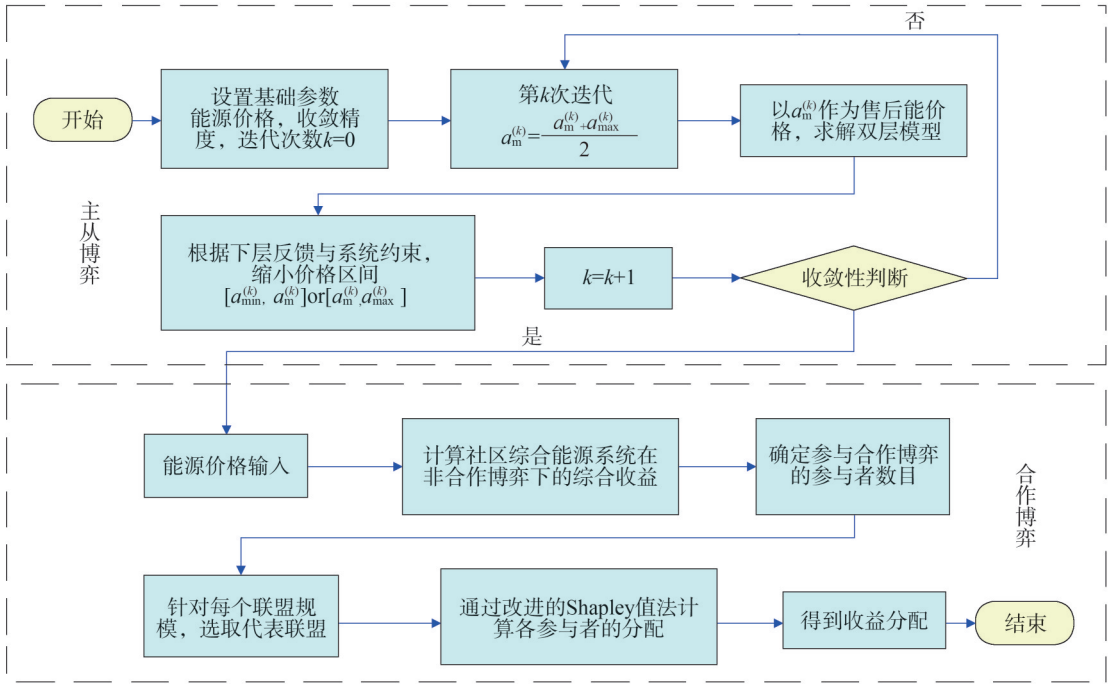


图3　混合博弈模型求解流程图

Fig.3 Mixed game model solving process

5)重复以上步骤,逐步收敛至最优解。

上述约束条件有助于在迭代过程中迅速收缩计算区间,从而提升算法的求解效率。二分法的收敛判据为:

$$\left|\lambda_{t,k+1}^{MGO,s}-\lambda_{t,k}^{MGO,s}\right|/\lambda_{t,k}^{MGO,s}\leqslant\varepsilon \tag{33}$$

$$\left|\mu_{t,k+1}^{MGO,s}-\mu_{t,k}^{MGO,s}\right|/\mu_{t,k}^{MGO,s}\leqslant\varepsilon \tag{34}$$

3.2　合作博弈模型求解

对于合作博弈模型,采用改进Shapley值法对合作博弈所得利益进行分配,并利用Matlab-Yalmip求解器进行合作博弈的求解,得到最终的收益分配。常规Shapley值的定义是对所有可能排列或子联盟的边际贡献取平均[28];分层Shapley值则将子联盟按规模分层,先求每层的期望边际贡献再加权平均,数学上与常规方法等价。分层Shapley值法的核心思想是:将所有可能的联盟按照联盟规模进行分层,对每个参与者,其分配值等于其在每一联盟规模下,对该层内所有子联盟的实际贡献的加权平均,再对所有层次归一取平均。其数学表达为

$$\phi_i(v)=\frac{1}{m}\sum_{j=0}^{m-1}\sum_{S\subseteq M\{i\},|S|=j}\frac{j!(m-1-j)!}{(m-1)!}\left[v(S\cup\{i\})-v(S)\right] \tag{35}$$

式中:i为某一参与者;m为参与者总数;M为所有参与者构成的集合;$S\subseteq M\backslash\{i\}$表示不包含参与者$i$的任意子联盟,且$|S|=j$表示子联盟$S$的规模为$j$;$v(S)$为子联盟$S$合作博弈产生的收益;$v(S\cup\{i\})-v(S)$为参与者$i$加入子联盟$S$后所产生的边际贡献;$\phi_i(v)$为博弈参与者$i$所得收益。

从式(35)可以看出,该方法计算Shapley值须遍历所有可能的子联盟,随着参与者数量呈指数增长,无法应用于大规模合作博弈场景。因此,针对该问题提出一种分层近似Shapley值法,仅在每个联盟规模下选择一个代表联盟进行边际贡献计算,而不是枚举所有子集。其表达式如下:

$$\hat{\phi}_i(v)=\frac{1}{m}\sum_{j=0}^{m-1}[v(\{1,...,j\}\cup\{i\})-v(\{1,...,j\})] \tag{36}$$

式中:$v(\{1,...,j\}\cup\{i\})-v(\{1,...,j\})]$为博弈参与者$i$对这个代表联盟的边际贡献。该方法仅关注参与者对联盟的边际贡献,未能反映各参与者的个体差异。实际上,不同产消者由于自身光伏出力能力不同,尤其是在满足本地用电需求后,光伏发电盈余量存在明显差异。盈余量越多的主体,对共享储能和整个能源系统的贡献越大。因此,在成本节约或收

益分配过程中，应将各参与者的盈余量纳入考虑，以更好地反映其对联盟的实际贡献。每个产消者在整个周期内能送出的光伏盈余量为

$$E_i^{\mathrm{g}}=\sum_{t=1}^{T}\max\left(G_{i,t}-L_{i,t}^{\mathrm{e}},0\right) \tag{37}$$

式中：$G_{i,t}$为产消者 a 在时刻 t 的光伏发电量；$L_{i,t}^{\mathrm{e}}$为参与者 i 在时段 t 的需求响应后的电负荷。为了兼顾公平与激励，保证产消者的基础收益，避免极端零分配，同时光伏盈余量多的成员获得额外收益，更好地激励光伏铺设，增设权重为

$$\omega_i=\lambda\frac{1}{m}+(1-\lambda)\frac{E_i^{\mathrm{g}}}{\sum_{i=1}^{m}E_i^{\mathrm{g}}} \tag{38}$$

式中：ω_i为参与者 i 的分配权重；λ 为基线权重比例。

则加权后的收益分配结果为

$$\hat{\phi}_i(v)^{*}=\omega_i\hat{\phi}_i(v) \tag{39}$$

通过这一改进，利用分层近似将计算复杂度从指数级降至多项式级，极大降低了计算资源消耗，能够有效进行大规模的合作博弈收益分配。同时可以让分配机制公平灵活，既能反映联盟成员的真实贡献，又能通过权重显式激励光伏投资和绿色参与，确保联盟长期、稳定、高效运行。

4　算例分析

4.1　仿真设置

本文算例模型采用某分布式光伏社区综合能源系统，其中包含微网运营商、产消者和共享储能电站。热电联产机组参数如表 1 所示；外部配电网上网电价，售电价格及共享储能电站具体参数参考文献[29]；微网运营商售热价上下限为 0.17 元/kWh 和 0.58 元/kWh；天然气价为 3.2 元/m^3；用能效用参数 x 和 y 分别为−0.05 和 4[30]。本文以三个产消者为例，其电、热负荷及光伏出力预测曲线如图 4 和图 5 所示。

表 1　热电联产机组参数

Table 1 Combined heat and power unit parameters

参数	取值
$P_{\max}^{\mathrm{CHP}}$/kW	3 000
$P_{\min}^{\mathrm{CHP}}$/kW	300
$\eta_{\mathrm{e}}^{\mathrm{CHP}}$	0.38
$\gamma_{\mathrm{h}}^{\mathrm{CHP}}$	1.1
Q_{LHV}/(MJ/m^3)	35.2

4.2　混合博弈系统运行分析

为验证本文所提模型的有效性，通过设置不同方案，对社区综合能源系统运行进行分析对比，具体设置如下。

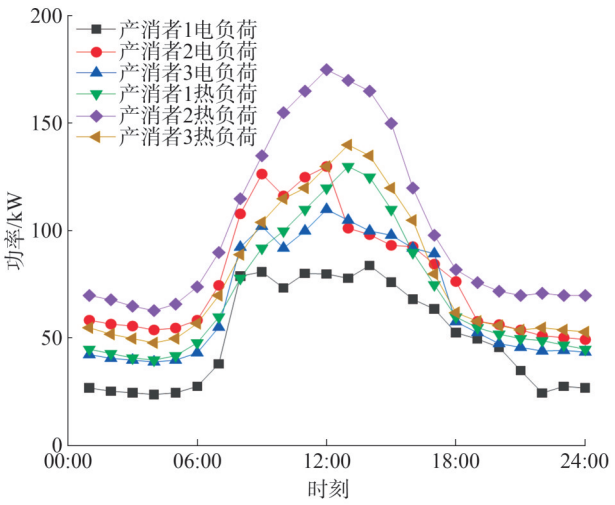


图 4　各产消者电热负荷曲线图

Fig.4 Electric and heat load curves of each prosumer

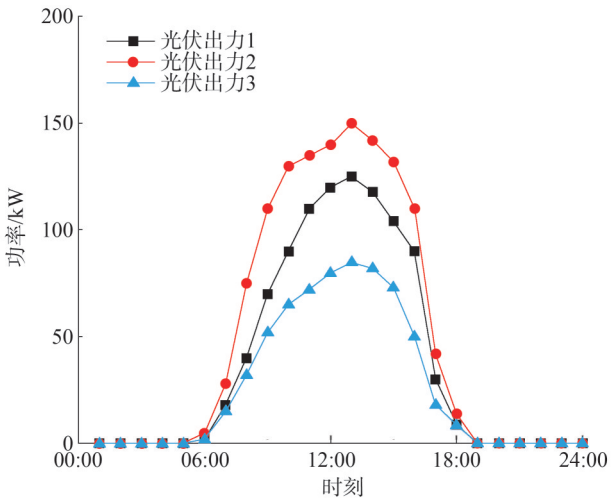


图 5　各产消者光伏出力曲线图

Fig.5 PV output curves of each prosumer

场景 1：仅考虑各产消者与微网运营商的主从博弈，不考虑共享储能。

场景 2：考虑主从博弈和合作博弈，不考虑共享储能。

场景3:考虑各产消者与微网运营商的主从博弈及共享储能。

场景4:考虑共享储能及主从博弈和合作博弈。

不同场景下的运行结果如表2所示。

表2　不同场景下的运行结果

Table 2 Operation results in different scenarios

场景	微网运营商收益/元	产消者编号	各产消者收益/元	产消者总收益/元	共享储能收益/元
场景1	1 363.72	1	2 127.65	7 222.54	0
		2	2 628.41		
		3	2 466.48		
场景2	1 217.03	1	2 187.91	7 388.63	0
		2	2 701.84		
		3	2 498.88		
场景3	992.58	1	2 261.39	7 538.46	304.26
		2	2 753.85		
		3	2 523.22		
场景4	938.47	1	2 306.52	7 647.87	297.52
		2	2 794.78		
		3	2 546.57		

从表2可以得出,场景2比场景1的产消者总收益高出166.09元,微网运营商收益比场景1降低了146.69元。这是因为场景2相较于场景1增加了各产消者之间的合作博弈,各产消者之间可以通过能源交互满足自身负荷需求,同时降低对微网运营商的购能依赖。对比场景3和场景1,产消者总收益高出315.92元,微网运营商的收益降低了371.14元。这是因为场景3相较于场景1增加了共享储能,产消者可以与共享储能电站进行能源交互,降低购能支出,削弱了对微网运营商的依赖。对比场景4和场景1,产消者总收益提高425.33元,微网运营商的收益降低了425.25元。这是因为场景4采用了混合博弈及共享储能机制。不仅考虑了主从博弈,还考虑了各产消者间的合作博弈及共享储能。这增加了各产消者及共享储能之间的能源交互机制,大大减少了对微网运营商的购能需求。对比场景4和场景3,产消者总收益提高109.41元,微网运营商的收益降低了54.11元。场景4相较于场景3,在各产消者合作博弈的基础上,加入了共享储能进一步提升了系统的经济性。对比4种场景,产消者总收益从场景1的7 222.54元逐步升至场景4的7 647.87元,累计升高425.33元;微网运营商收益则从1 363.72元降至938.47元,减少425.25元。主从博弈机制使微网运营商与产消者间形成利益博弈,保障了系统稳定运行;引入合作博弈和共享储能后,产消者可以通过能量互助和储能优化进一步提高收益,提高资源利用率;采用Shapley值法则确保了各方在合作中获得公平、合理的收益分配。这些机制的叠加显著提升了系统整体经济性和参与者积极性,推动了各方的高效协同与利益共享。针对场景4,优化后微网运营商的售电价和售热价如图6和图7所示。

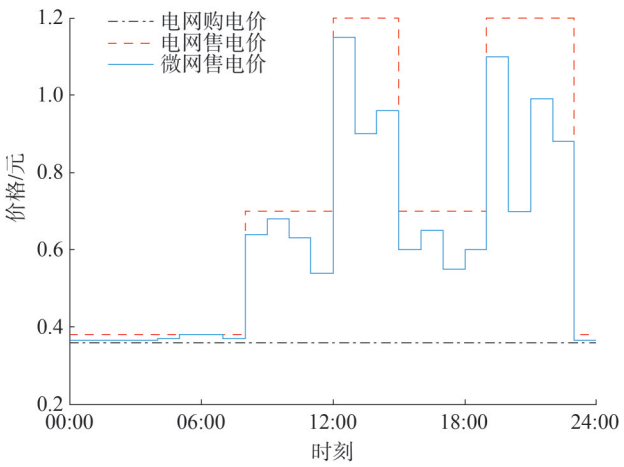


图6　优化后微网运营商电价

Fig.6 Optimized microgrid operator electricity prices

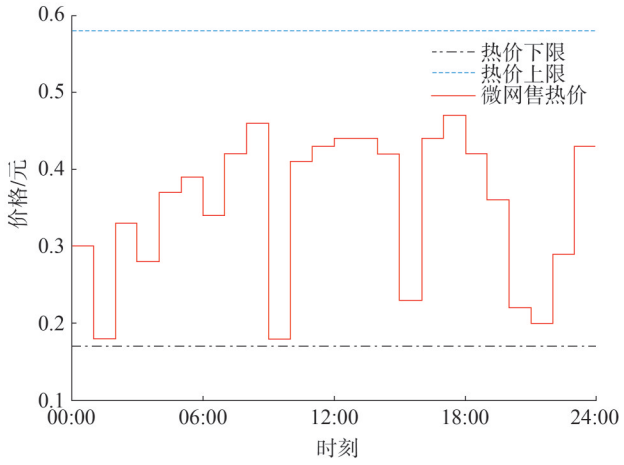


图7　优化后微网运营商热价

Fig.7 Optimized microgrid operator heat price

从图6和图7可以得出,通过引入主从博弈与

合作博弈机制，所优化得到的分时电价和分时热价能够更加合理地反映负荷的时序变化特征，以及共享储能和产消者的灵活调节能力。这种多方参与下的分时定价不仅体现了各主体在能源供需平衡中的动态作用，也深刻揭示了共享储能、产消者行为响应与多方协同优化的经济学本质。在优化分时价格信号的引导下，产消者能够根据实际需求主动进行负荷调整，积极参与多余能量的交易与共享储能的调度，提高了储能资源的利用效率。同时，主从与合作博弈的机制设计也为多能协同优化提供了有效的利益分配方式，进一步激励各方协作，提升了系统整体的经济性和产消者、运营商等多方的收益水平。场景 4 下，各产消者电平衡结果分别如图 8—图 10 所示。

在共享储能及混合博弈机制下，三个产消者的电平衡调度表现出明显的协同优化特征。从图 8—图 10 可以看出，产消者在光伏出力较高时段优先满足自身负荷，并将富余电量存入共享储能或与其他用户进行交易。电价高峰时段，产消者通过合作机制按需从共享储能中获取电量，有效削减了高价购电需求，降低了用能成本。具体来看，产消者 1 在白天光伏出力充足时与共享储能及其他产消者进行能源交互，夜间及电价高峰时段释放储能补充负荷，形成“低谷充、高峰放”的典型调度模式；产消者 2 由于

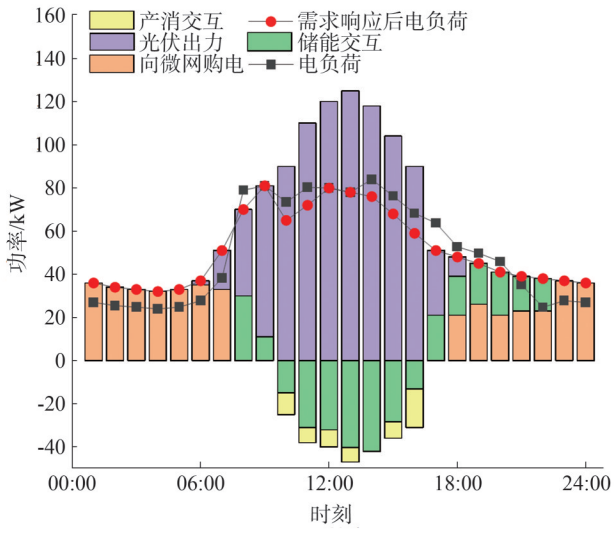


图 8　产消者 1 电平衡

Fig.8 Electricity balance of prosumer 1

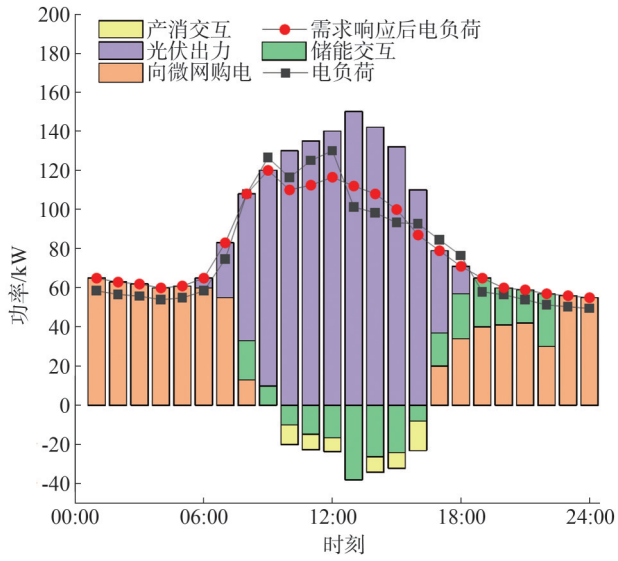


图 9　产消者 2 电平衡

Fig.9 Electricity balance of prosumer 2

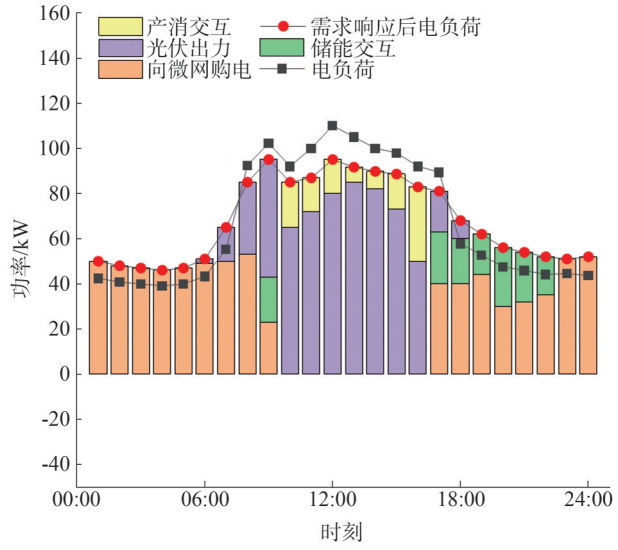


图 10　产消者 3 电平衡

Fig.10 Electricity balance of prosumer 3

自身负荷波动大，在用能高峰更依赖储能放电和外部购电，经济性提升尤为显著；产消者 3 在负荷高峰时段光伏出力无法满足自身负荷，因此优先与其他产消者交互，以更低的价格获取电能，实现了电能的多路径流动与收益最大化。整体上，三个产消者通过与共享储能的协同互动及需求响应，实现了用能的时空优化分配，不仅平滑了各自的电力负荷曲线，也提升了多方的经济性和系统综合效益，充分验证

了混合博弈模型下多产消者协作调度的有效性和共享储能机制的优势。

4.3　算法对比分析

随着社区综合能源系统的不断发展,采用更加高效的计算方法来应对日益复杂的多产消者协同下的利益分配问题显得尤为重要。为验证所提出的改进 Shapley 值法在多个产消者综合能源系统合作博弈中的分配效率及推广性,本文在特定设定下对合作博弈的利益分配进行了计算,并与传统 Shapley 值法进行了对比分析。分别选取产消者数量为 1、3、10 和 50 作为不同系统规模,测算各规模下的具体求解时间如表 3 所示。

表 3　常规 Shapley 值法与改进 Shapley 值法求解速率比较

Table 3 Comparison of the solution speed of the conventional Shapley method and the improved Shapley method

产消数量	求解速率/s	
	常规 Shapley 值法	改进 Shapley 值法
1	2.08	4.52
3	25.41	51.47
10	10 650.29	1 253.36
50	不可行	5 017.37

如表 3 所示,随着产消者数量的增加,常规 Shapley 值法的求解速率急剧下降。当产消者数量为 1 和 3 时,改进 Shapley 值法与常规 Shapley 值法的计算时间相差不大,分别为 4.52 s 与 2.08 s,以及 51.47 s 与 25.41 s,显示出在小规模系统下,两种方法的效率差别不大。然而,随着产消者数量进一步增多,常规 Shapley 值法的计算复杂度迅速增加。例如,产消者数量为 10 时,常规方法需要 10 650.29 s,而改进 Shapley 值法仅需 1 253.36 s,显示出明显的计算加速优势。当产消者数量达到 50 时,常规 Shapley 值法已经无法完成求解,而改进 Shapley 值法仍能在 5 017.37 s 内完成全部计算,展现出良好的可扩展性。这一差异的根本原因在于,常规 Shapley 值法需对所有可能的参与者排列进行遍历,计算量随参与者数量呈指数级增长。而改进 Shapley 值法通过考虑各层的期望边际贡献,显著减少了所需的组合数量,将复杂的枚举问题转化为更高效的平均计算,其复杂度随参与者数量呈多项式增长。因此,改进 Shapley 值法在大规模多主体合作博弈中的优势愈发突出,尤其适合实际大规模能源社区的利益分配场景。在场景 4 下,各方法下产消者的收益分配结果如图 11 所示。

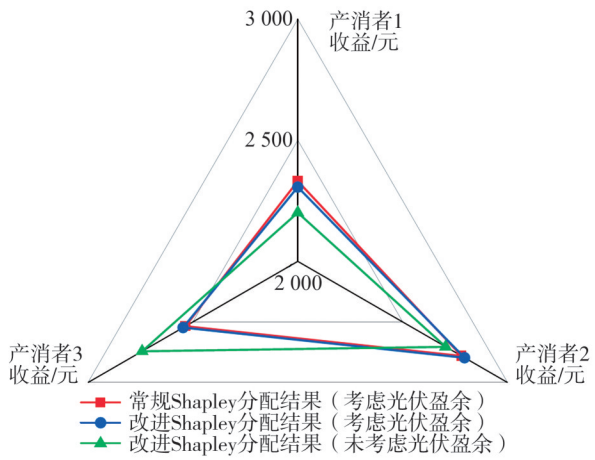


图 11　利益分配结果对比图

Fig.11 Comparison chart of profit distribution results

从图 11 可以看出,常规 Shapley 值法与改进 Shapley 值法在分配结果上基本一致。这一现象表明,改进 Shapley 值法在显著提升计算效率的同时,仍然能够保持与常规 Shapley 值法一致的分配逻辑,体现了各产消者的边际贡献,具有较好的公平性和合理性。考虑光伏盈余量和未考虑光伏盈余量的分配结果则呈现出不同的趋势,这是因为产消者 1 与产消者 2 具有较多光伏盈余量,在引入盈余量加权后分配结果更为有利,体现了其额外贡献得到合理回报;而产消者 3 由于没有光伏盈余量,导致其收益相对降低。该现象表明,考虑光伏盈余差异的分配机制不仅能够提升分配的公平性与合理性,而且能够为拥有较高盈余量的个体提供更大收益,从而在机制层面形成对产消者铺设和扩大光伏的正向激励,促进更多个体主动参与分布式能源建设。

综上,采用改进 Shapley 值法可以显著提升 Shapley 值分配的计算效率和可扩展性,使得大规模综合能源系统或能源社区中的利益分配问题更加高效、实用,并具备良好的应用前景和推广价值。同时,引入光伏盈余量作为权重进行再分配,不仅能够更准确地体现各产消者的真实边际贡献,提升分配

结果的公平性与合理性，还能够为拥有较多光伏盈余的个体带来更大收益，从而在机制层面形成对产消者加大光伏投资和铺设的正向激励，这对于推动分布式能源的推广和能源社区的可持续发展具有重要意义。

5 结论

本文建立了混合博弈机制下的社区综合能源系统，针对多产消者综合能源系统运行及利益分配和计算效率问题展开研究，主要结论如下：

1）针对多产消者微电网利益分配中的Shapley值法计算复杂性问题，提出了改进Shapley值高效分配方法。仿真结果表明，随着产消者数量增加，传统Shapley值法的计算时间呈指数级增长，而改进Shapley值法在计算效率上具有明显优势。以50个产消者为例，传统方法已无法完成求解，而改进Shapley值法依然可在合理时间内获得分配结果，验证了该方法在大规模群体中的可行性与推广价值。

2）通过对不同博弈场景的仿真对比，发现引入改进Shapley值法下的合作博弈模型，不仅保障了微电网运营商和产消者的收益，还能合理反映各方对整体经济效益的边际贡献。结果显示，合作联盟与共享储能机制的引入显著提升了系统整体收益，降低了各产消者的购电成本，有效兼顾了多方利益。尤其在产消者数量较多、共享储能充分参与时，产消者与共享储能间的能量互济带来了更多经济优化空间。

3）所提出的光伏发电盈余加权分配方法，不仅充分考虑了各产消者在联盟中的绿色能源贡献，还在分配时合理兼顾了分配公平性与激励性。该方法能够在保证联盟成员均可获得基础收益的同时，对光伏发电盈余量多的产消者给予更高的收益分配权重，有效激励成员积极利用和输出清洁能源。

参考文献

[1] 林德力，周莉.园区综合能源系统低碳发展路径与评价研究[J].电气技术与经济，2023(7)：34-36.
LIN Deli，ZHOU Li.Study on low-carbon development path and evaluation of comprehensive energy system in park[J].Electrical Equipment and Economy，2023(7)：34-36.

[2] 魏长祺，周源，金莺，等.基于建筑光伏的社区综合能源系统热电交互优化[J].太阳能学报，2025，46(1)：480-490.
WEI Changqi，ZHOU Yuan，JIN Ying，et al. Optimization of thermoelectric interaction strategy of community integrated energy system based on building photovoltaic[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2025，46(1)：480-490.

[3] 程乐峰，刘奕杭，邹涛.博弈论视角下智能电网需求响应研究综述[J].综合智慧能源，2025，47(4)：1-22.
CHENG Lefeng，LIU Yihang，ZOU Tao. Review of demand response in smart grids from the perspective of game theory[J]. Integrated Intelligent Energy，2025，47(4)：1-22.

[4] 陈鑫，王娟.基于博弈论的风光氢能源系统容量优化[J].分布式能源，2024，9(1)：26-34.
CHEN Xin，WANG Juan. Capacity optimization of wind-solar-hydrogen energy system based on game theory[J]. Distributed Energy，2024，9(1)：26-34.

[5] 王辉，夏玉琦，李欣，等.基于多主体三层博弈的区域综合能源系统低碳运行策略[J].中国电力，2025，58(8)：69-83.
WANG Hui，XIA Yuqi，LI Xin，et al. Research on low-carbon operation strategies for regional integrated energy systems based on multi-agent three-level game[J]. Electric Power，2025，58(8)：69-83.

[6] 王云龙，何山，艾纯玉，等.考虑云储能的综合能源运营商-负荷聚合商联盟混合博弈定价策略[J].电网与清洁能源，2024，40(6)：11-19.
WANG Yunlong，HE Shan，AI Chunyu，et al. The hybrid game pricing Strategy for integrated energy operator-load aggregator alliance considering cloud energy storage[J]. Power System and Clean Energy，2024，40(6)：11-19.

[7] 董军，方琳怡，姚文璐，等.基于主从博弈的综合能源系统多能定价及调度优化[J].浙江电力，2024，43(9)：19-28.
DONG Jun，FANG Linyi，YAO Wenlu，et al. Stackelberg game-based multi-energy pricing and dispatch optimization for integrated energy systems[J]. Zhejiang Electric Power，2024，43(9)：19-28.

[8] 彭寒梅，张玲，谭貌，等.重构与抢修协同下电-气区域综合能源系统多阶段博弈故障恢复方法[J].电力建设，2024，45(12)：27-38.
PENG Hanmei，ZHANG Ling，TAN Mao，et al.Multi-stage game fault recovery method for electricity-gas regional integrated energy system under reconfiguration and repair coordination[J]. Electric Power Construction，2024，45(12)：27-38.

[9] 殷晨旭，孙永辉，谢东亮，等.博弈视角下电-气互联综合能源系统多目标协同优化[J].电力系统自动化，2024，48(11)：173-183.
YIN Chenxu，SUN Yonghui，XIE Dongliang，et al.Multi-objective cooperative optimization of electricity-gas interconnected integrated energy system from game perspective[J]. Automation of Electric Power Systems，2024，48(11)：173-183.

[10] 伍宇铜，刘洋，许立雄，等.储能辅助下基于多重博弈的社区光伏用户电能交易模型[J].电力建设，2024，45(7)：167-178.
WU Yutong，LIU Yang，XU Lixiong，et al.Energy trading model for community photovoltaic users based on multi-game theory with energy storage support[J].Electric Power Construction，2024，45(7)：167-178.

[11] 谭玲玲，汤伟，楚冬青，等.基于主从博弈的电热氢综合能源系统优化运行[J].中国电力，2024，57(9)：136-145.
TAN Lingling，TANG Wei，CHU Dongqing，et al. Optimal dispatching of electric-heat-hydrogen integrated energy system based on Stackelberg game [J]. Electric Power，2024，57 (9)：136-145.

[12] 吴迪凡，徐婷婷，张楠，等.基于碳交易和主从博弈的园区综合能源系统多主体双层优化调度方法[J].电力大数据，2024，27(5)：9-18.
WU Difan，XU Tingting，ZHANG Nan，et al.Multi-agent bi-level optimal scheduling method for park integrated energy systems based on carbon trading and leader-follower game theory [J]. Power Systems and Big Data，2024，27(5)：9-18.

[13] 刘铠诚，王关涛，白星振，等.基于主从博弈的园区级综合能源系统动态定价与低碳经济调度[J].高电压技术，2024，50(4)：1436-1445.
LIU Kaicheng，WANG Guantao，BAI Xingzhen，et al. Dynamic pricing and low-carbon economic dispatch of integrated energy system based on Stackelberg game[J].High Voltage Engineering，2024，50(4)：1436-1445.

[14] 高鑫，魏立保，梁岩.基于主从博弈的配电网-多微网双层优化调度[J].电网与清洁能源，2025，41(4)：12-17.
GAO Xin，WEI Libao，LIANG Yan. Hierarchical optimization dispatching of distribution network-multi microgrid based on master-slave game theory [J]. Power System and Clean Energy，2025，41(4)：12-17.

[15] 段佳南，谢俊，冯丽娜，等.基于合作博弈论的风-光-水-氢多主体能源系统增益分配策略[J].电网技术，2022，46(5)：1703-1712.
DUAN Jianan，XIE Jun，FENG Lina，et al. Synergistic gains allocation for multi-stakeholder wind-solar-hydro-hydrogen energy system based on cooperative game theory[J].Power System Technology，2022，46(5)：1703-1712.

[16] 梁刚，黄家凯，马世乾，等.基于多主体博弈的园区综合能源系统优化方法[J].电力系统及其自动化学报，2023，35(5)：95-103.
LIANG Gang，HUANG Jiakai，MA Shiqian，et al. Optimization method for park integrated energy system based on multi-agent game[J].Proceedings of the CSU-EPSA，2023，35(5)：95-103.

[17] 闫庆友，于振华.基于Shapley值的园区分布式综合能源系统利益分配研究[J].山东电力技术，2020，47(9)：25-30.
YAN Qingyou，YU Zhenhua. Research on benefit distribution of park distributed integrated energy system based on shapley value [J].Shandong Electric Power，2020，47(9)：25-30.

[18] 潘华，高旭，姚正，等.计及储能效益的综合能源系统利益分配机制研究[J].智慧电力，2022，50(5)：25-32.
PAN Hua，GAO Xu，YAO Zheng，et al. Benefit allocation of integrated energy system considering energy storage benefit [J]. Smart Power，2022，50(5)：25-32.

[19] 刘涛，王瑞琪，刘松，等.考虑碳-绿证交易与需求响应的综合能源系统合作博弈调度[J].电力需求侧管理，2024，26(6)：8-15.
LIU Tao，WANG Ruiqi，LIU Song，et al. Collaborative game scheduling of integrated energy systems considering carbon-green certificate trading and demand response [J]. Power Demand Side Management，2024，26(6)：8-15.

[20] 史伟平，莫峻，杨辉，等.碳交易机制下基于合作博弈的综合能源系统经济性分析[J].南方电网技术，2025，19(7)：182-194.
SHI Weiping，MO Jun，YANG Hui，et al. Economic analysis of integrated energy system based on cooperative game under carbon trading mechanism[J].Southern Power System Technology，2025，19(7)：182-194.

[21] 邢家维，程艳，于芃，等.基于合作博弈的多园区互联综合能源系统低碳经济调度[J].山东电力技术，2024，51(5)：19-29.
XING Jiawei，CHENG Yan，YU Peng，et al.Low-carbon economic scheduling of multiple interconnected park-level integrated energy systems based on cooperative game[J].Shandong Electric Power，2024，51(5)：19-29.

[22] 高晋，王雪文，陈凯鹏，等.考虑光储柔的楼宇综合能源系统优化调度[J].电力需求侧管理，2025，27(1)：33-39.
GAO Jin，WANG Xuewen，CHEN Kaipeng，et al.Optimal dispatch of building integrated energy systems in buildings considering optical storage flexibility [J]. Power Demand Side Management，2025，27(1)：33-39.

[23] 刘钊，郭子豪，申安，等.考虑冷热电灵活性负荷需求响应的区域综合能源系统运行优化[J].南方能源建设，2024，11(6)：153-163.DOI：10.16516/j.ceec.2024.6.16.
LIU Zhao，GUO Zihao，SHEN An，et al.Optimization of regional integrated energy system operation considering flexible load demand response for cooling，heating and power [J]. Southern energy construction，2024，11(6)：153-163.

[24] 郑新，于浩，郭霄宇，等.液流电池冷热电储综合能源系统优化设计[J].储能科学与技术，2023，12(3)：870-877.
ZHENG Xin，YU Hao，GUO Xiaoyu，et al.Design optimization of integrated energy system using liquid flow battery and heating and cooling storage energy system [J]. Energy Storage Science and Technology，2023，12(3)：870-877.

[25] 房广义，孙欣，杨珉.基于双服务模式的共享储能多级市场优化策略[J].上海电力大学学报，2025，41(4)：367-373.
FANG Guangyi，SUN Xin，YANG Min. Optimized strategy for shared energy storage in multi-level markets based on dual-

service provision [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2025, 41(4): 367-373.

[26] 徐晓，刘世林，林浩. 基于主从博弈的台区共享储能容量动态分配方法[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版)，2025：1-10 [2025-07-09]. https://link-cnki-net-s.webvpn.nepu.edu.cn/urlid/50.1155.N.20250424.1400.004.

XU Xiao, LIU Shilin, LIN Hao. Dynamic allocation method of shared energy storage capacity in substation based on master-slave game [J / OL]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025: 1-10 [2025-07-09]. https://link - cnki - net - s. webvpn. nepu. edu. cn / urlid / 50.1155. N.20250424.1400.004.

[27] 魏港庆，曹楚楚，张瀚超. 考虑光伏产消者和共享储能电站的社区能源合作运行[J]. 黑龙江电力，2025，47(3)：267-275.

WEI Gangqing, CAO Chuchu, ZHANG Hanchao. Community energy cooperative operation considering photovoltaic prosumers and shared energy storage power stations [J]. Heilongjiang Electric Power, 2025, 47(3): 267-275.

[28] 朱祖祥，朱革兰，秦飞翔. 基于博弈的多综合能源微网系统优化运行策略[J]. 广东电力，2023，36(2)：52-65.

ZHU Zuxiang, ZHU Gelan, QIN Feixiang. Optimal operation strategy of multi-integrated energy microgrid system based on game [J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(2): 52-65.

[29] 帅轩越，马志程，王秀丽，等. 基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J]. 电网技术，2023，47(2)：679-690.

SHUAI Xuanyue, MA Zhicheng, WANG Xiuli, et al. Optimal operation of shared energy storage and integrated energy microgrid based on leader - follower game theory [J]. Power System Technology, 2023, 47(2): 679-690.

[30] 王义，靳梓康，王要强，等. 基于混合博弈与电动汽车共享储能特性的园区综合能源系统协调优化运行[J]. 高电压技术，2025，51(1)：135-145.

WANG Yi, JIN Zikang, WANG Yaoqiang, et al. Coordinated and optimized operation of park integrated energy systems based on hybrid gaming and electric vehicle shared energy storage characteristics [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51 (1): 135-145.

收稿日期：2025-08-20

修回日期：2025-11-19

作者简介：

董梦阳(2000)，男，硕士在读，主要研究方向为综合能源系统；

滕新亮(1986)，男，博士在读，主要研究方向为电力系统及其自动化；

徐建军(1971)，通信作者(2219263536@qq.com)，男，博士，教授，主要研究方向为电力系统自动化、能源变换与控制技术；

彭　程(1999)，男，博士在读，主要研究方向为综合能源系统、微电网；

赵书琪(1999)，女，博士在读，主要研究方向为综合能源系统、碳排放流、配电网。

（责任编辑　张丹丹）

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250505

考虑柔性负荷资源参与调控的农牧园区经济运行策略

张海龙[1,3],王建伟[2],牛 涛[1*],吴洛菲[2],白保华[2]
(1.重庆大学电气工程学院,重庆 400044;2.国网综合能源服务集团有限公司,北京 100032;
3.国网甘肃省电力公司,甘肃 兰州 730000)

摘要:在全球低碳经济转型背景下,农牧业作为重要的温室气体排放源,其传统能源利用模式正面临效率低下与运营成本偏高等挑战,严重制约农牧园区的可持续发展。因此,本文提出一种考虑柔性负荷资源参与调控的农牧园区综合能源系统(integrated energy system,IES)优化调度策略。首先,基于农牧园区能源结构特征,建立涵盖生物质发电、有机废弃物循环利用的农牧园区综合能源系统模型;其次,引入碳配额交易机制,构建碳-能联合成本模型,量化系统碳排放经济成本;最后,考虑系统运行成本与碳交易成本,提出以总成本最低为目标的农牧园区综合能源系统优化调度策略。通过某农牧园区综合能源系统仿真分析,本文所提优化策略可有效提高农牧园区综合能源系统能源利用率,园区运行总成本降低1.07%,热净负荷峰谷差减少41.51%,有效提高经济环境综合效益。

关键词:农牧园区;柔性资源;经济运行;碳交易
中图分类号:TM744;TM721.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-9904(2026)04-0014-12

Economic Operation Strategy of Agricultural and Animal Husbandry Parks Considering Flexible Load Resources Participating in Regulation

ZHANG Hailong[1,3], WANG Jianwei[2], NIU Tao[1*], WU Luofei[2], BAI Baohua[2]
(1.School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2.State Grid Integrated Energy Service Group Co., Ltd., Beijing 100032, China;
3.State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In the context of global low-carbon economic transformation, agriculture and animal husbandry, as important sources of greenhouse gas emissions, are facing challenges in their traditional energy utilization model, including low efficiency and high operating costs, which seriously limits the sustainable development of agricultural and animal husbandry parks. Therefore, the paper proposes an optimized scheduling strategy for the integrated energy system (IES) of agricultural and animal husbandry parks considering flexible load resources participating in regulation. Firstly, based on the energy structure characteristics of agricultural and animal husbandry parks, an IES model is established that includes biomass power generation and organic waste recycling; Secondly, a carbon quota trading mechanism is introduced to construct a carbon-energy joint cost model that quantifies the economic cost of system carbon emissions; Finally, considering both system operating costs and carbon trading costs, an IES optimization scheduling strategy for agricultural and animal husbandry parks is proposed with the goal of minimizing the total cost. Through simulation analysis of an IES of agricultural and animal husbandry park, the optimization strategy proposed in this article can effectively improve the energy utilization efficiency of the IES, reduce the total operating cost of the park by 1.07%, and reduce the peak-valley difference of heat net load by 41.51%, effectively improving the comprehensive economic and environmental benefits.

Keywords: agricultural and animal husbandry parks; flexible resources; economic operation; carbon trade

0 引言

作为国民经济的重要组成部分,农牧业在保障粮食安全的同时,其温室气体排放问题日益凸显[1-2]。联合国粮农组织及世界资源研究所指出,畜牧业造成15%的全球温室气体排放量。其中,牧场牲畜的肠道发酵活动与化肥施用共同构成农牧业温室气体的主要来源,这两类来源总计占比40%以上。因此,深入开展农牧园区节能降碳技术研究已

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5400-202333587A-3-2-ZN)。
Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5400-202333587A-3-2-ZN).

成为推动全球碳中和目标实现的关键路径[3-4]。

目前已有大量学者针对传统综合能源系统进行了研究，文献[5]提出了考虑电转气（power to gas，PTG）和冷藏集装箱的港口综合能源系统的优化策略，建立了冷藏集装箱温度变化模型，通过控制冷藏集装箱启停，改变负荷曲线，以达到增大风电消纳的目的；在此基础上，以系统运行成本最低为目标，建立了考虑PTG和冷藏集装箱的港口综合能源系统优化模型，结果表明所提方法有效降低了港口系统运行总成本和碳排放。文献[6]面向综合能源系统，设计了一种结合阶梯式碳交易机制及供需双向响应策略，建立包含奖惩机制的阶梯碳交易模型；通过多情景案例研究，分析该策略与碳交易机制对系统运行的综合影响，仿真结果证实了该策略的有效性。文献[7]以园区多能源系统为对象，考虑电力与碳交易市场的价格传导机制，进而设计综合需求侧响应方案；结果表明，该方案能有效提升多能源系统的运行可靠性并降低运行成本。

已有较为成熟的多能协同方法应用于传统综合能源系统，这为农牧园区综合能源系统（integrated energy system，IES）的研究提供了可借鉴的经验[8-9]。相较于传统能源，农牧园区综合能源最大的特点在于生物质发电，生物质发电设备具有以下特点：1）通常设计有高效的启动和停机机制。这意味着它们可以在短时间内从静止状态迅速启动，并达到稳定的发电状态。同样地，当需要停止发电时，这些设备也能够快速响应并安全地停机。这种快速的启停特性使得生物质发电设备能够更灵活地适应电网负荷的变化，特别是在电力需求波动较大的情况下[10]；2）生物质发电设备还具备快速调整发电出力的能力。这主要是通过调整生物质燃料的投入量、改变发电设备的运行参数以及利用储能设备来实现。这种能力使得生物质发电设备能够在电力系统突发故障或其他设备停运时，快速补充电力输出，从而维持电网的稳定运行；3）此外，生物质发电设备还可以与其他能源系统进行联动调节，通过多能协同手段参与电网的调峰调频服务。这种协同作用可以进一步提高电力系统的稳定性和可靠性，减轻电网的运行压力[11]。

针对农牧综合能源系统应用的研究仍然相对匮乏，大多研究集中在沼气的生成与利用方面。文献[12]提出农牧综合能源系统优化策略，考虑到沼气生产跨越多个发酵周期的特点，以及乡村综合能源系统日前调度所涉及的多时间尺度特性和外界温度的不确定性，提出了一种光-沼协同下的乡村综合能源运行优化策略；仿真实验结果表明，所提模型与方法在稳定乡村配电网各节点电压幅值方面表现出色，同时通过光-沼互补的方式有效降低了系统的运行经济成本和碳排放量，成功实现了乡村能源的绿色利用与高效转换。文献[13]构建了一个能够映射生物质热电联产机组内部能量转换过程与其外输出特性之间动态关系的仿真框架，研究结果表明通过生物质发电优化调度可有效提升系统经济效益。

综上所述，农牧园区综合能源系统涵盖多种类型且特性迥异的能源网络，电-热-气多能流网络形成强时空耦合关系，生产用能与生活用能负荷呈现显著差异。而生物质原料季节性波动与生产生活负荷随机性叠加，进一步加剧了源-荷双侧不确定性对系统稳定性的影响，不仅造成运行成本增加，更制约了低碳减排目标与综合效益的协同实现。

因此，基于以上问题，本文提出一种考虑柔性负荷资源参与调控的农牧园区综合能源系统优化调度策略。首先，基于农牧园区能源结构特征，建立涵盖生物质发电、有机废弃物循环利用的农牧园区综合能源系统模型；其次，引入碳配额交易机制，构建碳-能联合成本模型，量化系统碳排放经济成本；最后，考虑系统运行成本与碳交易成本，提出以总成本最低为目标的农牧园区综合能源系统优化调度策略。

1　农牧园区综合能源系统运行架构及模型

农牧园区综合能源系统是指以农牧园区为特定地理范围，整合电力、热力、冷力、天然气等多种能源子系统，实现能源的协同互补和优化利用的一体化系统，更注重可再生能源及生物质能源的利用，如太阳能、风能、农作物废弃物、动物粪便等，能源转换和储存、能源供应更加灵活多样，以满足农牧园区不同季节和天气条件下的能源需求，其基本结构如图1所示。而传统综合能源系统，能源结构更加多样化，能源供应相对稳定，但其更加依赖于化石燃料等传统能源[14-15]。

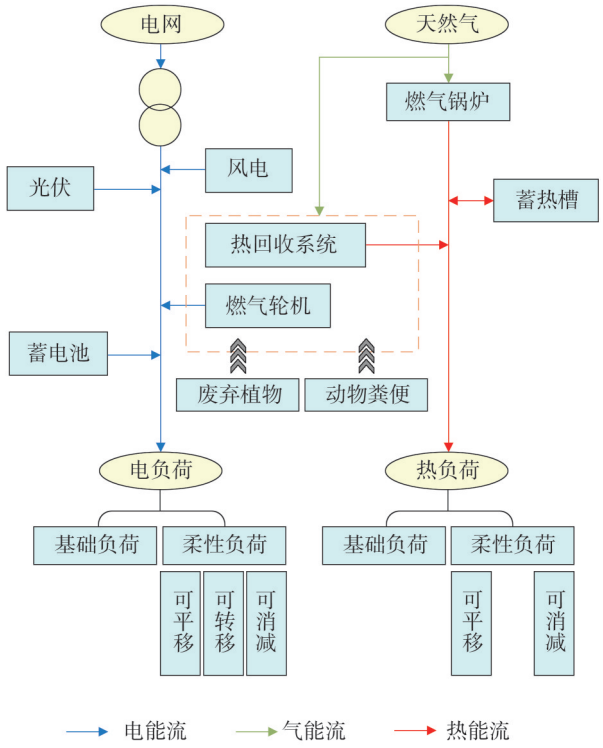


图1　农牧园区综合能源图

Fig.1 Integrated energy diagram for agricultural and animal husbandry parks

农牧园区综合能源系统包括能源供应系统、能源转换与储存系统、能源分配与利用系统、能源管理与控制系统等。能源供应系统包括可再生能源发电、生物质能发电以及上级电网传统能源供应系统；能源转换与储存系统包括电储能系统、热储能系统以及热电联产系统；能源分配与利用系统包括智能微电网系统和农业灌溉、畜牧业饲养、农牧产品加工等不可控负荷和可控的柔性负荷；能源管理与控制系统包括智能监控系统和智能优化调度系统[16]。

1.1　柔性负荷模型

按农牧园区负荷参与综合能源系统需求响应方式，将用户负荷分为基础负荷、可平移负荷、可削减负荷以及可转移负荷四类。基础负荷作为系统最低需求基准(约占日负荷总量30%)，由连续生产设备及基本生活用电构成，需要保障其稳定供电；而可平移负荷具有时序可调特性，通过时移调度实现供需匹配优化，可降低电网运行成本。可平移负荷与可转移负荷具有相似的响应特性，都包含供电计划可变的设备，但二者之间存在明显差异：可平移负荷(如挤奶流水线、乳罐巴氏消毒设备)要求作业时段完整迁移，运行过程不可分段且时长固定，所需功率恒定；相比之下，可转移负荷(如饲料粉碎机组、温室蓄热系统)适应性更强，其单次运行能量可变化，允许作业分段进行且时长不固定，仅需要确保周期内总能耗需求满足。两类负荷协同作用共同支撑系统经济性与稳定性目标的实现[17]。因此，本文对三类负荷进行数学建模及补偿机制分析，农牧园区可平移负荷、可削减负荷与可转移负荷的协同调度过程如图2所示。

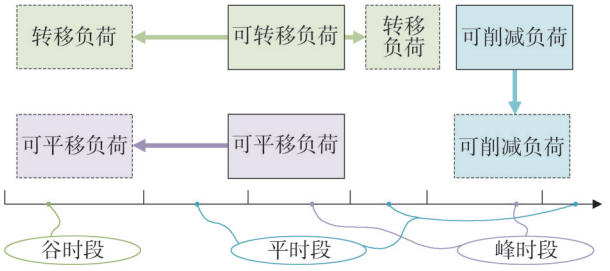


图2　农牧园区柔性负荷协同调度示意图

Fig.2 Schematic diagram of flexible load co-dispatch in agricultural and animal husbandry parks

设单位调度时段为1 h，对于某个可平移负荷P_k，其参与调度前的功率分布向量$\hat{\boldsymbol{P}}_k$模型为

$$\hat{\boldsymbol{P}}_k=(0,\cdots,P_{k,t_s},P_{k,t_s+1},\cdots,P_{k,t_d},\cdots,0) \tag{1}$$

式中：t_s为初始时间；t_d为持续时间；P_{k,t_s}为时刻t_s的负荷功率。

假设可平移时段区间为$[t_a,t_b]$，由于需要整体平移，要考虑P_k的起始和持续时间，用二进制0-1变量s表示某一段时间g的平移状态，s为1时表示P_k从时间段g开始平移；s为0时表示负荷P_k不平移，则起始时段的集合S_k模型为

$$S_k=[t_a,t_b,-t_d+1]\cup\{t_s\} \tag{2}$$

若$g=t_s$，则负荷未改变；若$g\in[t_a,t_b,-t_d+1]$且$g\neq t_s$，则$\hat{\boldsymbol{P}}_k$从起始时间t_s平移到起始时间为g的$\boldsymbol{P}_k$功率分布向量，$\boldsymbol{P}_k$可表示为

$$\boldsymbol{P}_k=(0,\cdots,P_{k,g},P_{k,g+1},\cdots,P_{k,g+t_d-t_s},\cdots,0) \tag{3}$$

式中：$P_{k,g}$为时刻g的负荷功率。

平移后补偿园区的费用Q_k模型为

$$Q_k=Q_k^c P_k^z\sum_{t=t_a}^{t_b-t_d+1}s_t \tag{4}$$

式中：Q_k^c为负荷单位功率负荷平移的补偿价格；P_k^z为用电功率总和；s_t为t时刻可平移负荷的平移状态。

可削减负荷是指可按照计划对其进行削减的负荷。通过实施需求响应措施，可以引导其主动将用电量进行削减，从而缓解电网压力，提高电网运行效率[14]。

二进制0-1变量j为可削减负荷P在时间段g的削减状态，j为1时表示可削减负荷在该时段内被削减。

$$P_g = (1 - \partial j) \hat{P_g} \tag{5}$$

式中：∂为负荷削减相关的系数；$\hat{P_g}$为该负荷在时段g前的功率；P_g为时段g内的削减功率。

考虑园区内用户及负荷端满意度，建立削减约束模型为：

$$\sum_{t-1}^{t+t^{\min}-1} j_t \geqslant t^{\min}(j_t - j_{t-1}) \tag{6}$$

$$\sum_{t-1}^{t+t^{\max}+1} (1 - j_t) \geqslant 1 \tag{7}$$

$$\sum_{t=1}^{24} j_t \leqslant N_{\max} \tag{8}$$

$$Q = Q^c \sum_{t=1}^{T_1} j_t (P_t - \hat{P_t}) \tag{9}$$

式中：$t^{\min}$为最短连续削减时间；$t^{\max}$为最长连续削减时间；j_t为t时刻可削减负荷的削减状态；$N_{\max}$为最大削减次数；Q^c为削减负荷单位功率补偿价格；T_1为负荷削减时间段；P_t为t时刻的削减功率；$\hat{P_t}$为t时刻前的削减功率；Q为可削减负荷的优化补偿费用。式(6)为最短连续削减时间约束，式(7)为最长连续削减时间约束，式(8)与式(9)为削减次数约束。

可转移负荷是指功耗可以在时间间隔内转移，且总功耗稳定的负荷类型。可转移负荷的特点在于其用电时段和用电量均可以灵活调整，这使得电力系统可以通过优化其用电时段和用电量来降低电网运行成本，提高电网的经济性[18]。

设可转移负荷P_z转移时间段为$[t_e, t_f]$，二进制0-1变量h为可转移负荷在时间段g的转移状态，h为1时表示可转移负荷在该时段内被转移，对应功率约束模型为

$$h_t P_z^{\min} \leqslant P_{z,t} \leqslant h_t P_z^{\max} \tag{10}$$

式中：$P_z^{\max}$、$P_z^{\min}$分别为最大、最小可转移负荷功率；$P_{z,t}$为t时刻可转移负荷的功率；h_t为t时刻可转移负荷的转移状态。

为避免转移负荷出现频繁启停现象，建立转移负荷持续运行最短时间约束模型为

$$\sum_{t=1}^{t+t_z^{\min}-1} h_t \geqslant t_z^{\min}(h_t - h_{t-1}) \tag{11}$$

式中：$t_z^{\min}$为连续运行最短时间。

同样，考虑园区内用户及负荷端满意度，建立转移补偿模型Q_z为

$$Q_z = Q_z^c \sum_{t=t_e}^{t_f} (h_t P_{z,t}) \tag{12}$$

式中：Q_z^c为转移负荷单位功率补偿价格。

1.2 生物质发电模型

生物质发电是利用废弃植物及动物粪便等燃料的化学能产出电能的过程，常见的发电模式有直接燃烧、混合燃烧、沼气发电等。沼气发电模型为

$$P_{t,sw} = L_{HV} G_{t,sw} \eta_{sw} \tag{13}$$

式中：$P_{t,sw}$为t时刻沼气发电功率；L_{HV}为沼气热值；$G_{t,sw}$为t时刻发电所用沼气量；η_{sw}为沼气发电效率。

建立所用沼气量约束模型为

$$G_{sw}^{\min} \leqslant G_{t,sw} \leqslant G_{sw}^{\max} \tag{14}$$

式中：$G_{sw}^{\max}$、$G_{sw}^{\min}$分别为最大、最小用气量。

建立沼气发电爬坡约束为：

$$-P_{t,sw} \tan\beta \leqslant W_{t,sw} \leqslant P_{t,sw} \tan\beta \tag{15}$$

$$\sqrt{P_{t,sw}^2 + W_{t,sw}^2} \leqslant S_{t,sw} \tag{16}$$

$$|P_{t,sw} - P_{t-1,sw}| \leqslant P_{r,sw}^{\max} \tag{17}$$

式中：β为沼气发电机运行功率因数角；$W_{t,sw}$为t时刻沼气发电机无功功率；$S_{t,sw}$为t时刻沼气发电机容量；$P_{r,sw}^{\max}$为沼气发电机最大爬坡功率。

在沼气发电过程中，燃气内燃机会释放可观热能，若未有效回收利用，这些热量将直接排放到大气中，引发资源浪费与环境负担双重问题。因此，可采用热回收利用技术将冷却水及废水中热量进行回收，用于供暖、热水供应等生活热能供应[19]，从而进一步提高能源利用效率。建立其产热模型为：

$$R_{t,sw} = \chi_{t,sw} \delta_{t,sw} L_{HV} G_{t,sw} \Delta t \tag{18}$$

$$|G_{t+1,sw} - G_{t,sw}| \leqslant G_{r,sw}^{\max} \tag{19}$$

式中：$R_{t,sw}$为t时刻沼气锅炉产热功率；$\chi_{t,sw}$为t时刻沼气锅炉启停变量；$\delta_{t,sw}$为t时刻沼气锅炉效率；$G_{r,sw}^{\max}$

为沼气最大爬坡量;Δt 为产热时间段。

2　农牧园区综合能源系统阶梯式碳交易机制

2.1　碳交易原理

农牧园区碳交易机制是指通过实施一系列低碳农牧业实践(如改善土壤管理、推广有机耕作、增加植被覆盖等),减少碳排放量或增加碳吸收量,这些减少的排放量或增加的吸收量经过科学测量和认证后转化为碳信用,进而在市场上进行交易的一种机制[20-21]。

农牧园区综合能源系统中的温室气体主要来源于上级电网输入电力、天然气热电联产装置以及生物质能驱动的热电设备。依照全国碳交易管理框架对碳排放总量设定与分配的相关规范,纯生物质发电的年度配额可免于统计。因此,本文将生物质热电单元的碳分配量视为零,仅考虑化石燃料直接燃烧产生的二氧化碳以及外部供电对应的间接排放量,园区综合能源无偿碳配额计算公式为

$$L_{\mathrm{pe}}=\sum_{i=B}e_iP_i+e_gP_{\mathrm{net}} \tag{20}$$

式中:P_{net} 为园区与电网交换功率,其值为正表示园区向电网购电;B 为农牧园区能源设备集合;e_i 为第 i 台设备的单位碳排放配额;P_i 为第 i 台设备的用电功率;e_g 为单位无偿碳排放分配系数;L_{pe} 为碳排放总配额。

农牧园区实际碳排放量为

$$L_{\mathrm{cp}}=\sum_{i=B}(l_{i,\mathrm{sy}}+l_{i,\mathrm{s}})P_i \tag{21}$$

式中:$l_{i,\mathrm{sy}}$ 为第 i 台设备对应能源生产运输阶段碳排放系数;$l_{i,\mathrm{s}}$ 为第 i 台设备使用阶段碳排放系数;L_{cp} 为碳排放总量。

因此,实际参与碳交易市场的碳交易量 L_{cc} 为

$$L_{\mathrm{cc}}=L_{\mathrm{cp}}-L_{\mathrm{pe}} \tag{22}$$

2.2　阶梯式碳排放交易模型

我国碳排放交易模式有两种:传统碳排放交易模式和阶梯式碳排放交易模式。在阶梯式碳排放交易模式下,设置不同的碳排放量区间,且不同区间对应不同的碳排放交易价格,具体模式如图3所示。

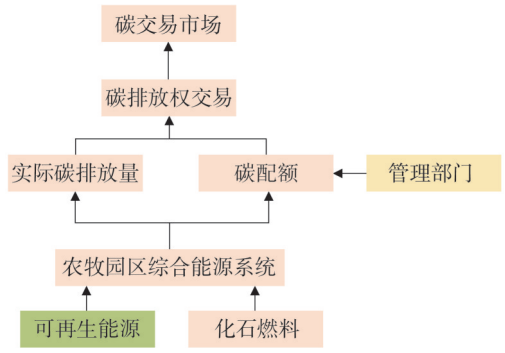


图3　农牧园区阶梯式碳交易机制

Fig.3 Stepped carbon trading mechanism for agricultural and animal husbandry parks

随着购入的碳排放配额增加,相应碳排放交易价格随之提升,以此削减园区碳排放量。阶梯式碳排放交易成本为

$$Q_{\mathrm{cc}}=\begin{cases}-c(1+\lambda)d-c(1+2\lambda)d+c(1+3\lambda)(L_{\mathrm{cc}}-2d), & L_{\mathrm{cc}}\leqslant -2d\\ -c(1+\lambda)d+c(1+2\lambda)(L_{\mathrm{cc}}-d), & -2d<L_{\mathrm{cc}}\leqslant -d\\ c(1+\lambda)L_{\mathrm{cc}}, & -d<L_{\mathrm{cc}}\leqslant 0\\ cL_{\mathrm{cc}}, & 0<L_{\mathrm{cc}}\leqslant d\\ cd+c(1+\lambda)(L_{\mathrm{cc}}-d), & d<L_{\mathrm{cc}}\leqslant 2d\\ c(2+\lambda)d+c(1+2\lambda)(L_{\mathrm{cc}}-2d), & 2d<L_{\mathrm{cc}}\leqslant 3d\\ c(3+3\lambda)d+c(1+3\lambda)(L_{\mathrm{cc}}-3d), & L_{\mathrm{cc}}>3d\end{cases} \tag{23}$$

式中:Q_{cc} 为碳交易总成本,其值为正时表示碳排放量超额,须购买碳排放额度,其值为负时表示售出碳排放额度获取收益;c 为碳排放交易基础价格;λ 为碳排放交易价格增长速度;d 为碳排放量的区间长度。

3　考虑生物质发电的农牧园区综合能源系统优化调度策略

3.1　目标函数

本文以农牧园区综合能源系统运行总成本最低为目标函数,建立模型为

$$\min Q_{\mathrm{Z}}=Q_{\mathrm{DG}}+Q_{\mathrm{net}}+Q_{\mathrm{HST}}+Q_{\mathrm{bat}}+Q_{\mathrm{sw}}+Q_{\mathrm{L}} \tag{24}$$

式中:Q_{Z} 为农牧园区综合能源系统总运行成本;Q_{DG} 为分布式电源运行成本;Q_{net} 为电网购电成本;Q_{sw} 为

沼气锅炉运行成本；Q_{HST}、Q_{bat} 分别为储热槽和蓄电池折旧成本；Q_L 为园区调度柔性负荷的优化补偿费用。

$$Q_{DG}=\sum_{t=1}^{T}(V_w P_{t,w}+V_{pv}P_{t,pv}) \tag{25}$$

$$Q_{net}=\sum_{t=1}^{T}V_b P_{t,net} \tag{26}$$

$$Q_{sw}=\sum_{t=1}^{T}V_{sw}P_{t,sw} \tag{27}$$

$$Q_{HST}=\sum_{t=1}^{T}V_{HST}|P_{t,HST}| \tag{28}$$

$$Q_{bat}=\sum_{t=1}^{T}V_{bat}|P_{t,bat}| \tag{29}$$

$$Q_L=Q_k+Q+Q_z \tag{30}$$

式中：T 为日前优化调度周期；V_w、V_{pv} 和 V_{sw} 分别为风力发电、光伏发电和沼气锅炉运行成本系数；V_b 为园区向上级电网购电电价；V_{HST}、V_{bat} 分别为储热槽和蓄电池折旧系数；$P_{t,w}$、$P_{t,pv}$ 分别为 t 时刻风力发电和光伏发电功率；$P_{t,net}$ 为 t 时刻园区与电网交换功率，其值为正表示园区向电网购电；$P_{t,HST}$ 为 t 时刻储热槽热功率，其值为正表示吸热；$P_{t,bat}$ 为 t 时刻蓄电池功率，其值为正表示充电。

3.2 约束条件

3.2.1 电网络约束

1）电功率约束。

$$P_w+P_{pv}+P_{net}+P_{sw}=P_f+P_{bat} \tag{31}$$

$$P_f=P_{base}+P_L \tag{32}$$

式中：P_w、P_{pv} 分别为风力发电和光伏发电功率；P_{net} 为园区与电网交换功率；P_{sw} 为沼气锅炉发电功率；P_{bat} 为蓄电池功率；P_f 为农牧园区总负荷；P_{base} 为农牧园区基础负荷，不参与调度；P_L 为农牧园区柔性负荷总和。

2）功率边界约束。

$$0\leqslant P_w\leqslant P_w^{max} \tag{33}$$

$$0\leqslant P_{pv}\leqslant P_{pv}^{max} \tag{34}$$

$$P_{net}^{min}\leqslant P_{net}\leqslant P_{net}^{max} \tag{35}$$

$$0\leqslant P_{sw}\leqslant P_{sw}^{max} \tag{36}$$

$$P_{bat}^{min}\leqslant P_{bat}\leqslant P_{bat}^{max} \tag{37}$$

式中：P_w^{max}、P_{pv}^{max} 分别为风电、光伏预测出力；P_{net}^{min}、P_{net}^{max} 分别为园区与电网最小、最大交换功率；P_{sw}^{max} 为沼气锅炉的额定输出功率；P_{bat}^{min}、P_{bat}^{max} 分别为蓄电池最小、最大充放电功率。

3）蓄电池约束。

储能系统荷电状态不能超出其边界，为了系统可持续性运行，调度周期前后其荷电状态保持一致，建立约束模型为：

$$S_{oc}^{min}\leqslant S_{oc,t}\leqslant S_{oc}^{max} \tag{38}$$

$$S_{oc}^{0}=S_{oc}^{end} \tag{39}$$

式中：$S_{oc,t}$ 为储能系统 t 时刻的荷电状态；S_{oc}^{0} 为储能系统初始时刻的荷电状态；S_{oc}^{end} 为储能系统最终时刻的荷电状态；S_{oc}^{min} 为储能系统最小荷电状态；S_{oc}^{max} 为储能系统最大荷电状态。

3.2.2 热网络约束

1）热功率约束。

$$R_{sw}=R_f+R_{HST} \tag{40}$$

$$R_f=R_{base}+R_L \tag{41}$$

式中：R_{sw} 为沼气产热功率；R_{HST} 为储热槽功率；R_f 为农牧园区总的热负荷；R_{base} 为园区基础热负荷，不参与调度；R_L 为园区柔性热负荷总和。

2）热功率边界约束。

$$0\leqslant R_{sw}\leqslant R_{sw}^{max} \tag{42}$$

$$R_{HST}^{min}\leqslant R_{HST}\leqslant R_{HST}^{max} \tag{43}$$

式中：R_{sw}^{max} 为沼气锅炉额定热功率；R_{HST}^{min}、R_{HST}^{max} 分别为储热槽最小、最大充放热功率。

3）储热槽约束。

同样地，为了系统可持续性运行，调度周期前后储热槽热量保持一致，建立约束模型为

$$C_{HST}^{0}=C_{HST}^{end} \tag{44}$$

式中：C_{HST}^{0} 为储热槽初始时刻热量；C_{HST}^{end} 为储热槽最终时刻热量。

3.3 基于布谷鸟寻优算法的求解算法

布谷鸟算法源于该鸟类特有的寄生繁殖行为，是一种群体智能优化方法。其核心搜索机制包含以下关键要素。

1）布谷鸟的寄生繁殖行为。该鸟类的繁殖策略显著区别于其他鸟类。它们不会自行筑巢孵卵，而是将卵产在其他鸟类的巢中，利用宿主鸟类为其孵化后代。这种行为伴随风险：若宿主识别出外来卵，可能会将其遗弃，或弃巢并转移自己的卵至新巢重新孵化。为提高后代存活率，布谷鸟演化出了相应的适应性繁殖策略。

2）列维飞行机制。算法采用基于特定步长参数的列维飞行模式，这是一种具有重尾特征的随机移

动方式。

布谷鸟算法基于以下假设。

1)每只布谷鸟每次仅在一个随机选择的宿主鸟巢中产一枚卵。

2)表现最优(繁衍成功率最高)的鸟巢作为精英巢将被保留,并在下一代中继续作为繁殖目标。

3)设定固定数量的宿主鸟巢,宿主发现布谷鸟卵的概率服从一个定义在[0,1]区间内的概率分布P_a。一旦卵被发现,宿主有一定概率将其遗弃,或选择放弃该巢并在新址重建。

在上述理想化条件的框架下,布谷鸟搜索新巢位置的过程可由式(45)进行建模和更新。

$$\begin{cases} D_{l+1}(t+1) = D_l(t) + m \oplus \text{levy}(n) \\ \text{levy}(n) \sim n = t^{-F},\ 1 < F < 3 \end{cases} \tag{45}$$

式中:$D_l(t)$为第l个解在第t个迭代时的位置;m为每次迭代的步长因子;$\oplus$为点乘运算;levy(n)为符合特定分布的随机步长。

该位置更新机制可类比动物的随机游走行为:个体下一步的位置取决于其当前状态(位置、速度、方向)。经过位置更新后,算法会计算宿主发现异卵的概率P_a,并与一个在[0,1]区间均匀抽取的随机数r进行比较,若P_a小,则该解的位置维持不变;否则,将对其施加一个随机扰动。布谷鸟优化算法的具体实施流程如图4所示。

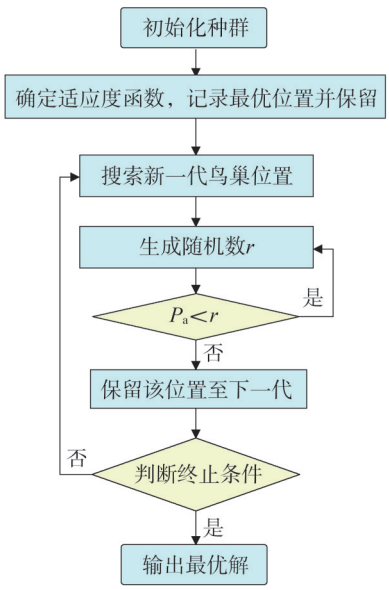


图4　求解流程

Fig.4 Flow chart of the solution

4　算例分析

4.1　算例系统描述

本文以某农牧园区综合能源系统为研究对象,如图1所示,优化调度周期为1 d,时间间隔为1 h;为了研究柔性电、热负荷对园区综合能源系统的影响,设置四种场景进行对比分析。场景1:考虑园区柔性电、热负荷参与的多能协同优化;场景2:仅考虑园区柔性电负荷参与的多能协同优化;场景3:仅考虑柔性热负荷参与的多能协同优化;场景4:不考虑园区柔性电、热负荷参与的多能协同优化。园区主要设备参数如表1所示,柔性负荷主要参数如表2所示,分时电价如表3所示;风、光发电及园区电、热负荷预测如图5所示,分时电价曲线如图6所示,优化调度前柔性电、热负荷分别如图7、图8所示。可转移负荷最短持续时间为2 h,功率范围为8~29 kW,转移时段为04:00—22:00,补偿价格为0.31元/kWh;可削减电、热负荷最短持续时间为2 h,最长持续时间为5 h,最大削减次数为8次,补偿价格分别为0.42、0.22元/kWh。储能系统SOC边界为0.4~0.95,自放电损耗系数为0.001,充放电次数约束为8次。

表1　农牧园区主要设备参数

Table 1 Equipment parameters for agricultural and animal husbandry parks

类型	功率/kW		运行成本/(元/kWh)
	下限	上限	
大电网	0	320	0.30
风电机组	0	预测值	0.40
光伏发电	0	预测值	0.11
沼气发电	0	120	0.27
沼气产热	0	175	0.27

表2　农牧园区柔性负荷主要参数

Table 2 Main parameters of flexible load in agricultural and animal husbandry parks

类型	t_s	t_d/h	[t_a,t_b]	Q_k^c/(元/kWh)
可平移电负荷1	19:00	3	05:00—21:00	0.21
可平移电负荷2	11:00	2	07:00—23:00	0.21
可平移热负荷1	17:00	4	05:00—21:00	0.12

表3　分时电价

Table 3 Time of use electricity price

类别	时段	用电价格/(元/kWh)
谷	00:00—07:00	0.22
	07:00—10:00	
平	15:00—18:00	0.42
	21:00—24:00	
峰	10:00—15:00	0.67
	18:00—21:00	

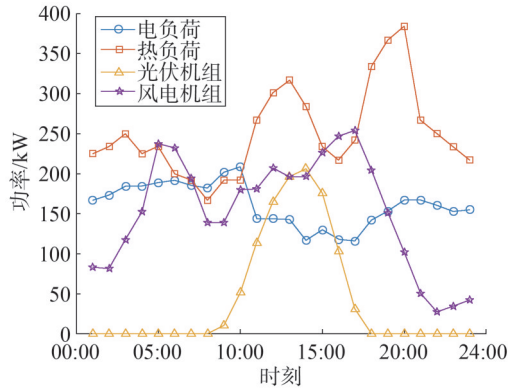


图5　农牧园区风光出力及电热负荷预测

Fig.5 Wind and photovoltaic power output and electric heating load prediction in agricultural and animal husbandry parks

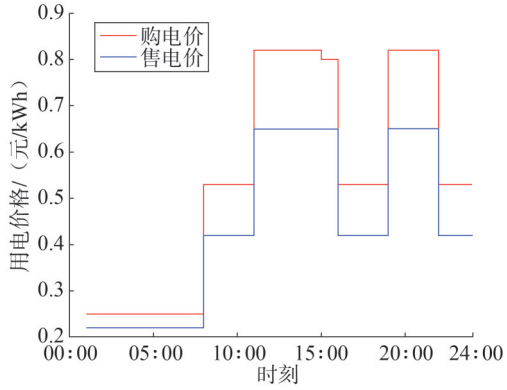


图6　分时电价曲线

Fig.6 Time-of-use electricity price curve

4.2　协同优化结果

经求解器求解,可以得到上述四种场景下农牧园区综合能源系统的调度优化结果。四种场景下农牧园区综合能源系统成本如表4所示。由表4可知,相比于场景2,场景1园区运行总成本降低了0.73%,热净负荷峰谷差减少41.51%;相比于场景3,

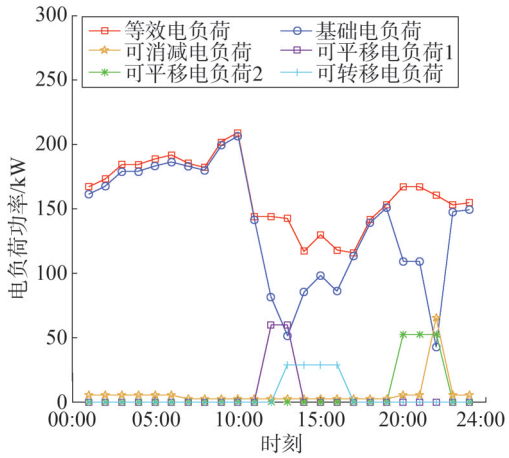


图7　优化前园区柔性电负荷分布

Fig.7 Distribution of flexible electrical load in the park before optimization

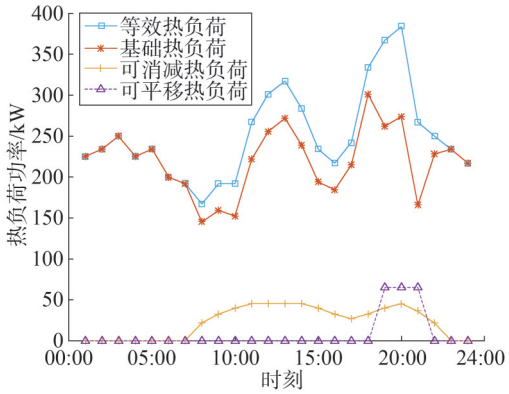


图8　优化前园区柔性热负荷分布

Fig.8 Distribution of flexible heat load in the park before optimization

场景1园区运行总成本降低了0.43%,热净负荷峰谷差减少16.37%;相比于场景4,场景1园区运行总成本降低了1.07%,热净负荷峰谷差减少了41.51%。本文所提农牧园区优化调度策略,有效降低系统运行成本,实现负荷时段转移,缓解园区能源系统压力。

表4　各场景运行情况

Table 4 Operation status of each scenario

场景	总成本/元	净负荷峰谷差/kW	
		电	热
1	2 069.81	175.30	127.22
2	2 084.92	167.61	217.50
3	2 078.61	113.32	152.12
4	2 092.12	113.32	217.50

农牧园区四种场景电能、热能负荷对比分布如图9、图10所示。观察图9可以发现,考虑柔性电负荷的调度后,场景1、2中谷时段的电负荷显著增加了,相对的峰时段和平时段的负荷都大幅度降低;观察图10可以发现,场景2、4的热负荷曲线重合,而场景1中热负荷参与优化调度,其负荷峰谷差由217.50 kW降低到127.22 kW。由此可见,相较于优化前的系统电热负荷状况,采用协同优化技术后,系统成功地将高价时段的负荷转移至低电价时段,从而令负荷曲线变得更加平缓,有效发挥了削峰填谷的调节作用。

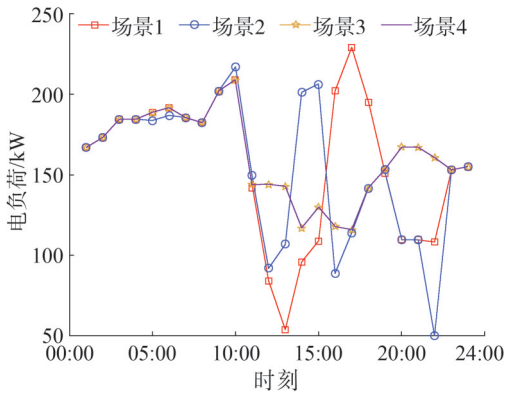


图9　不同场景电负荷对比

Fig.9 Comparison of electrical loads in different scenarios

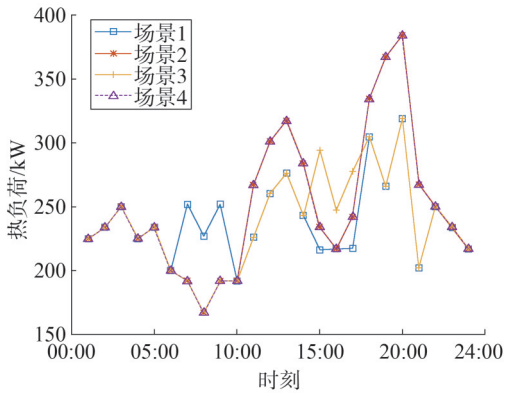


图10　不同场景热负荷对比

Fig.10 Comparison of heat load in different scenarios

场景1园区电、热能源出力情况如图11、图12所示。可以看出,系统电负荷主要由新能源和沼气发供电,辅以电网购电补充。在风光资源丰富的时段,蓄电池充电提升新能源利用率;而在用电高峰,蓄电池放电减轻供电压力。沼气发电不仅助力减排,还减少了电网在风光不足及用电高峰时的功率冲击。

热负荷方面,系统优先利用锅炉热回收单元出力,辅以蓄热槽和沼气锅炉。热负荷低谷时段,蓄热槽蓄存多余热能,高峰时释放,实现削峰填谷。

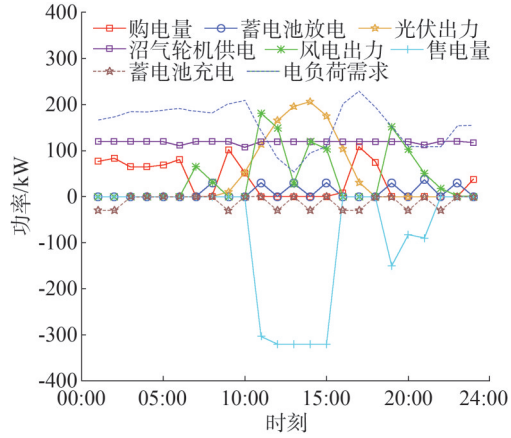


图11　场景1电能出力

Fig.11 Electric energy output in scenario 1

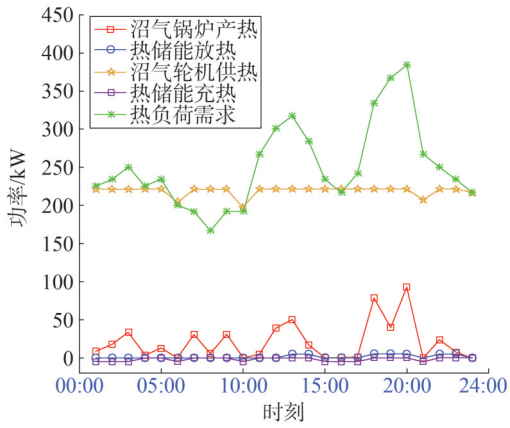


图12　场景1热能出力

Fig.12 Heat energy output in scenario 1

图13和图14分别呈现了场景1优化后的柔性电负荷与热负荷出力分布。通过对比图7与图13可以发现,可平移电负荷1、2的运行时段由电价高峰时段(11:00—14:00和19:00—23:00)分别转移至电价低谷时段(15:00—18:00和14:00—18:00);

可转移电负荷运行区间从12：00—17：00转移至11：00—17：00；负荷削减主要发生于高电价时段，如11：00—15：00、19：00—21：00。表5进一步揭示，在时段转移过程中，可平移负荷的持续时间与输出功率维持不变；而可转移负荷的持续时间与用电功率均发生调整。这表明可转移负荷在出力调节方面具备更高的灵活性。

对于柔性热负荷，对比图8与图14可以发现，其优化模式与电负荷呈现相似特性：可平移热负荷从晚高峰时段转移至电价较低的平时段，有效实现削峰。该负荷转移与削减措施共同作用，促成了整体热负荷水平的降低。

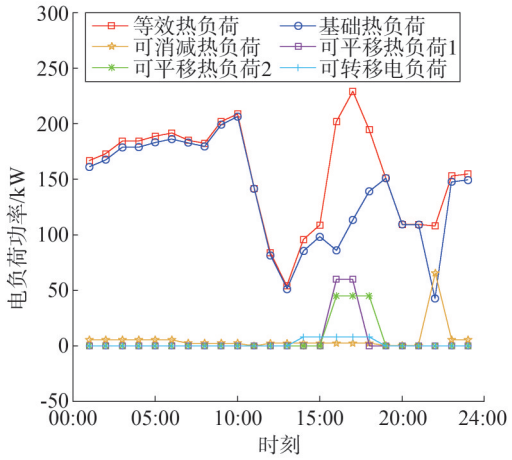


图13　优化后园区柔性电负荷分布

Fig.13 Distribution of flexible electrical loads in the park after optimization

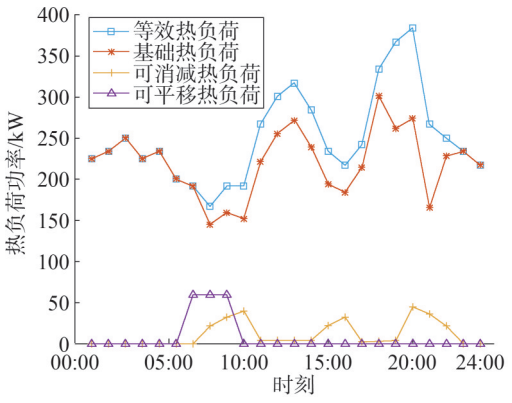


图14　优化后园区柔性热负荷分布

Fig.14 Distribution of flexible heat load in the park after optimization

表5　三种柔性负荷优化前后出力对比

Table 5 Comparison of output before and after optimization of three flexible loads

柔性负荷	参数	负荷优化前情况	负荷优化后情况
可平移电负荷1	时段	11：00—14：00	15：00—18：00
	功率/kW	60.00	60.00
可平移电负荷2	时段	19：00—23：00	14：00—18：00
	功率/kW	52.40	52.40
可平移热负荷	时段	17：00—21：00	07：00—11：00
	功率/kW	60.00	60.00
可转移电负荷	时段	12：00—17：00	11：00—17：00
	功率/kW	29.00	20.52
可削减电负荷	时段	11：00—15：00 19：00—21：00	11：00—15：00 19：00—21：00
	功率/kW	65.50	60.14
可削减热负荷	时段	11：00—15：00 19：00—21：00	11：00—15：00 19：00—21：00
	功率/kW	45.20	5.50

5　结论

针对农牧业园区能源利用模式存在效率低下、成本偏高等问题，本文提出了考虑柔性负荷资源参与调控的农牧园区综合能源系统优化调度策略，并基于四种典型场景进行对比，得出以下结论：

1）相较于传统优化模式，本文所提策略可使农牧园区运行总成本降低1.07%，有效实现生物质发电节能降碳作用，还减少了电网在风光不足及用电高峰时的功率冲击。

2）采用本文所提农牧园区优化调度策略，园区热净负荷峰谷差减少41.51%，有效降低系统运行成本，实现负荷时段转移，缓解园区能源系统压力。

3）柔性电、热负荷参与综合能源系统的优化调度，不仅可以在满足需求侧用电的同时起到优化负荷曲线的作用，还能够减少综合能源系统的运行成本。

参考文献

[1]　刘建华，闫静，王慧扬，等.黄河流域农业科技创新对农业碳排放强度影响研究[J].生态经济，2024，40(12)：118-127.
LIU Jianhua，YAN Jing，WANG Huiyang，et al.The influence of agricultural technological innovation on agricultural carbon

emission intensity in the Yellow River Basin [J]. Ecological Economy,2024,40(12):118-127.

[2] 卢泓钢,王益如,吴伟光.中国农业减污降碳协同增效的水平测度及其时空收敛性研究——基于"减污、降碳、扩绿、增长"的四维分析[J].生态经济,2024,40(12):186-195.
LU Honggang, WANG Yiru, WU Weiguang.Environment pollution and carbon emission of agriculture in China: based on the four-dimensional analysis of "pollution reduction, carbon reduction, green expansion and growth" [J]. Ecological Economy, 2024, 40(12):186-195.

[3] 秦博,范国华.甘肃省农业绿色全要素生产率测算及影响因素研究[J].国土与自然资源研究,2025(1):59-65.
QIN Bo, FAN Guohua.Study on the measurement and influencing factors of agricultural green total factor productivity in Gansu Province [J]. Territory & Natural Resources Study, 2025(1): 59-65.

[4] FU X Q, YE W, LI X, et al. Revolutionising agri-energy: a comprehensive survey on the applications of artificial intelligence in agricultural energy Internet [J]. Energy Internet, 2025, 2(1): 13-27.

[5] 张紫阳,周雪松,李佳琪,等.考虑电转气和冷藏集装箱的港口综合能源系统优化运行[J/OL].天津理工大学学报,2024:1-8[2025-06-17].https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx filename=TEAR20241204001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
ZHANG Ziyang, ZHOU Xuesong, LI Jiaqi, et al. Optimization operation of port integrated energy system considering power to gas and refrigerated containers[J/OL].Journal of Tianjin University of Technology,2024:1-8[2025-06-17].https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx filename=TEAR20241204001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[6] 李艺丰,黄曲粲,闫朝阳,等.基于奖惩机制碳交易的综合能源系统供需双响应低碳调控[J].可再生能源,2024,42(8):1111-1119.
LI Yifeng, HUANG Qucan, YAN Zhaoyang, et al. Low carbon regulation of integrated energy system with double response of supply and demand based on reward and punishment mechanism carbon trading [J]. Renewable Energy Resources, 2024, 42(8): 1111-1119.

[7] 陈锦涛,杨苹,陈滢,等.基于综合需求侧响应策略的园区多能源系统优化运行[J].可再生能源,2021,39(2):222-228.
CHEN Jintao, YANG Ping, CHEN Ying, et al.Optimized operation of multi-energy system in the industrial park based on integrated demand response strategy[J].Renewable Energy Resources, 2021, 39(2):222-228.

[8] 王爽,葛淑娜,张彩玲,等.计及源荷灵活响应和CCPP-P2G联合运行的综合能源系统低碳优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2025,37(6):129-138.
WANG Shuang, GE Shuna, ZHANG Cailing, et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated energy system with source-load flexible response and joint operation of CCPP-P2G [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(6): 129-138.

[9] 束娜,江山,刘春伶,等.计及灵活性资源多时间尺度协调互济的电-气-热综合能源系统优化调度[J].电力建设,2024,45(12):3-15.
SHU Na, JIANG Shan, LIU Chunling, et al.Optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system with flexible resources in multiple time scales[J].Electric Power Construction, 2024, 45(12):3-15

[10] 张涵,张艺缤,朱锐.生物质气化发电对电网运行特性的影响规律研究[J].四川电力技术,2025,48(3):9-15.
Zhang Han, Zhang Yibin, Zhu Rui.Research on the influence law of biomass gasification power generation on the operating characteristics of power grid [J]. Sichuan Electric Power Technology,2025,48(3):9-15.

[11] 罗清局,朱继忠.基于改进交替方向乘子法的电-气综合能源系统优化调度[J].电工技术学报,2024,39(9):2797-2809.
LUO Qingju, ZHU Jizhong. Optimal dispatch of integrated electricity and gas system based on modified alternating direction method of multipliers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2024,39(9):2797-2809.

[12] 黄宏旭,梁睿,李嘉翔,等.光-沼协同下的乡村综合能源系统运行优化[J/OL].中国电机工程学报,2024:1-15[2025-06-17].https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx filename=ZGDC20240909008&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
HUANG Hongxu, LIANG Rui, LI Jiaxiang, et al. Optimal scheduling of PV-biogas coordinated rural integrated energy system[J/OL].Proceedings of the CSEE, 2024:1-15[2025-06-17].https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx filename=ZGDC20240909008&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.

[13] ZHANG Q, FENG Y Q, XU K J, et al. Dynamic behaviour and performance evaluation of a biomass-fired organic Rankine cycle combined heat and power (ORC-CHP) system under different control strategies [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 248: 123236.

[14] 夏佳伟,张一帆,雷浩,等.考虑高效氢能利用和碳捕集的综合能源系统低碳优化调度[J].电力建设,2024,45(12):100-111.
XIA Jiawei, ZHANG Yifan, LEI Hao, et al.Low-carbon economic dispatch of integrated energy system considering efficient hydrogen utilization and carbon capture equipment [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(12):100-111.

[15] 程定一,马欢,杨冬,等.计及碳排放和空调负荷的源网荷协同调度技术研究[J].山东电力技术,2022,49(11):20-24.
CHENG Dingyi, MA Huan, YANG Dong, et al. Co-dispatch of source-grid-load considering carbon emission and air conditioning loads[J].Shandong Electric Power,2022,49(11):20-24.

[16] 史伟平.基于合作博弈的综合能源系统优化调度及成本分摊策

略研究[D].南宁：广西大学，2024.
Shi Weiping. Research on optimal scheduling and cost allocation strategy of integrated energy system based on cooperative game [D].Nanning：Guangxi University，2024.

[17] 柳思贤，丁坤，董海鹰.考虑碳捕集和电转气的零碳园区综合能源系统经济调度[J].太阳能学报，2024，45(9)：188-196.
LIU Sixian，DING Kun，DONG Haiying. Zero－carbon economic dispatch of park integrated energy system considering carbon capture and power to gas[J].Acta Energiae Solaris Sinica，2024，45(9)：188-196.

[18] 赵佩尧，李正烁，高晗，等.电-气-热综合能源系统协同调度优化研究综述[J].山东电力技术，2024，51(4)：1-11.
ZHAO Peiyao，LI Zhengshuo，GAO Han，et al. Review on collaborative scheduling optimization of electricity-gas－heat integrated energy system[J]. Shandong Electric Power，2024，51(4)：1-11.

[19] KUMAR A，SINGH A R，DENG Y，et al.A novel methodological framework for the design of sustainable rural microgrid for developing nations[J].IEEE Access，2018，6：24925-24951.

[20] WU J X，WANG J Y. Efficient flexible load microgrid system，EFLM[J].Energy Internet，2025，2(1)：55-73.

[21] 刘蓉晖，李子林，杨秀，等.考虑用户侧柔性负荷的社区综合能源系统日前优化调度[J].太阳能学报，2019，40(10)：2842-2850.
LIU Ronghui，LI Zilin，YANG Xiu，et al. Optimal dispatch of community integrated energy system considering user-side flexible load[J].Acta Energiae Solaris Sinica，2019，40(10)：2842-2850.

收稿日期：2025-06-18
修回日期：2025-08-11

作者简介：

张海龙(1993)，男，博士在读，工程师，主要研究方向为电力系统与综合能源技术；

王建伟(1983)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向为综合能源服务；

牛　涛(1992)，通信作者(niutthu@qq.com)，男，博士，特聘研究员，主要研究方向为综合能源系统优化；

吴洛菲(1996)，女，硕士，经济师，主要研究方向为综合能源、多能互补、技术经济；

白保华(1978)，男，博士在读，主要研究方向为综合能源服务、氢能。

（责任编辑　车永强）

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250564

考虑用户差异化的园区综合能源系统多主体博弈方法

娄 伟[1*],张征凯[2],赵学理[3],孙立成[1,3],刘 蔚[1]
(1.国网安徽省电力有限公司电力科学研究院,安徽 合肥 230601;2.国网安徽省电力有限公司,安徽 合肥 230061;
3.合肥工业大学电气与自动化工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要:在园区用户差异化不断加深的背景下,为推动园区电、热、碳协调交互,本文提出了一种考虑用户差异化和奖惩阶梯型碳交易机制的园区综合能源系统(park integrated energy system,PIES)多主体博弈协同优化方法。首先,针对不同用户的差异化特征,考虑了包括用户用电特性以及柔性资源的拥有情况等差异性,建立了PIES内3种不同属性用户模型;引入奖惩阶梯型碳交易机制从而加入碳市场,激励PIES进行碳减排,同时建立含多种能源设备的PIES管理员(park integrated energy system administrator,PIA)模型统筹园区电-热-碳交易市场。其次,基于Stackelberg博弈理论,建立了以PIA为领导者,差异化用户为跟随者的交互机制,构建了含需求响应、多能互补的多主体主从博弈决策模型。最后,采用具有交互作用的分布式优化算法来达到Stackelberg博弈均衡。算例仿真证明了所提方法能够实现PIES多主体之间的双赢。

关键词:园区综合能源系统;差异化特征;主从博弈;多能交互;Stackelberg均衡;需求响应
中图分类号:TM73 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-9904(2026)04-0026-15

Multi-agent Game Method for Park Integrated Energy System Considering Differentiated Characteristics of Users

LOU Wei[1*],ZHANG Zhengkai[2],ZHAO Xueli[3],SUN Licheng[1,3],LIU Wei[1]
(1.State Grid Anhui Electric Power Co.,Ltd.,Electric Power Research Institute,Hefei 230601,China;
2.State Grid Anhui Electric Power Co.,Ltd.,Hefei 230061,China;
3.School of Electric Engineering and Automation,Hefei University of Technology,Hefei 230009,China)

Abstract: In the context of increasing differentiation among park users, a multi-agent game-based collaborative optimization method for the park integrated energy system (PIES) is proposed to promote the coordinated interaction of electricity, heat, and carbon.First, considering the diverse characteristics of users, such as electricity consumption patterns and the availability of flexible resources, models for three distinct types of users within PIES were established.A tiered reward-penalty carbon trading mechanism was introduced to incorporate PIES into the carbon market, thereby incentivizing carbon reduction. Additionally, a PIES administrator (PIA) model, equipped with multiple energy devices, was developed to manage the electricity-heat-carbon trading market.Second, based on Stackelberg game theory, an interactive mechanism was constructed with the PIA as the leader and differentiated users as followers, forming a multi-agent leader-follower game decision model that integrates demand response and multi-energy complementarity. Finally, a distributed optimization algorithm with interaction mechanisms was employed to achieve Stackelberg game equilibrium. Simulation results demonstrate that the proposed method effectively achieves a win-win outcome for multiple PIES stakeholders.

Keywords: park integrated energy system; differentiated characteristics; leader-follower game; multi-agent game; Stackelberg equilibrium; demand response

0 引言

随着能源需求的持续增长和环境污染问题的日益加剧,安全经济、低碳环保逐渐成为能源发展的核心目标[1-2]。在这一背景下,耦合多种能源与协同调度的园区综合能源系统(park integrated energy system,PIES),以实现能源的高效利用为目标,已成为当前研究的热点与重点方向[3-5]。

现有研究中,园区用户建模多采用同质化处理

基金项目:国网安徽省电力有限公司科技项目(52120524000R)。Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd.(52120524000R).

方式[6-7]，即将不同类型用户简化为相同行为特征的负荷单元，未能充分识别其在资源响应能力和能源消费特征上的本质差异[8]。然而，不同类型用户在响应能源种类、能源流向以及参与协同调度等方面展现出显著差异化的行为模式[8-10]。从用户角度来看，这种差异主要体现在用电时间分布、用电量变化以及峰值负荷等方面[11]，将产品差异化特征引入电力系统，不仅能有效诱导用户优化用能行为，还能实现彼此之间的合作共赢[12-13]。文献[14]根据所在区域的农业产业负荷情况以及投资运营方的不同划分了多种村庄运营商，利用纳什谈判理论实现不同乡村之间资源的协调和互补。但是，当前对用户种类的差异化研究仍较为有限[15]，难以支撑日益增长的园区用户多元化发展需求及其在多能系统中的精细化调控需求。

为实现不同用户多元化用能需求，实现用户差异化调度，提升PIES供能侧的能源结构多样性与调控能力是一种有效途径。文献[16]提出了含可再生能源、储能设备和热电联供型光热系统的综合能源系统（integrated energy system，IES）经济调度模型及其求解方法，有效降低系统运行成本并提高用户供给率。文献[17]则充分考虑了不同能源之间的依赖性，提出了含燃气锅炉、热电联供机组和电转气设备的IES博弈调度模型。然而，随着多类可调设备的接入，PIES中的供能机制日益复杂，多利益主体之间的资源竞争与收益分配矛盾逐步凸显。如何在保障PIES运行效率的同时协调各参与方的利益，成为当前PIES运行优化所面临的重要挑战。博弈论作为解决市场主体利益冲突的有效工具[18]，在能源系统优化研究中应用广泛。文献[19]构建了住宅聚合商与住宅用户之间的Stackelberg博弈模型，分别在不同时间尺度下进行双方的最佳响应分析。文献[20]基于Stackelberg博弈，提出多目标鲁棒动态定价和运营策略优化进一步提高综合能源系统的经济性和鲁棒性。文献[21]考虑了能源供需平衡，建立了以电力交易代理商为领导者，分布式电源代理商和负荷代理商为追随者的交易决策博弈模型；文献[22]建立了多代理商博弈框架，模拟不同主体之间的非合作博弈行为，确保利益均衡。文献[23]则采用主从博弈模型探讨了运营商与供能侧的互动，提出了社区综合能源系统的分布式协同优化运行模型。然而，该模型未将储能装置与热电联供机组等关键设备纳入市场交易框架，从而导致能源销售商在直接与电网交互时收益下降。由此可见，目前针对PIES多利益主体，尤其在供需双方差异化需求与能量耦合协同优化方面难以在公平性与激励有效性之间取得良好平衡。

随着PIES中燃气设备的增加，碳排放问题变得日益严重，可能与当前的“双碳”政策目标相冲突。碳交易机制凭借将碳排放商品化的优势，在实现“双碳”目标中发挥着重要作用。文献[24]引入碳排放配额和碳排放因子，引导电厂设备在高用能情况下提高使用效率。文献[25-26]探讨了含惩罚参数的碳交易机制对PIES运行低碳特性的影响，文献[27]分析了传统碳交易机制和阶梯式碳交易机制的区别，比较不同碳交易机制下综合能源系统的低碳性和经济性。文献[28]建立主从博弈低碳经济调度模型，在上下层模之间引入碳排放交易机制促进双端碳减排。此外，《碳排放权交易管理办法（试行）》核心目标是通过市场机制激励企业减少碳排放，然而，当前的研究在PIES博弈互动中，主要关注各主体自身的利益优化，却忽视了碳交易市场中的收益，造成利益损失的同时，对环境造成了极大威胁。因此，在多利益主体博弈模型中纳入碳排放等环境因素尤为必要。这将有助于实现经济利益与环境效益的协同优化，从而推动PIES系统经济性与环保性的双赢目标。

为解决以上问题，本文提出了一种考虑用户差异化和奖惩阶梯型碳交易机制的PIES多主体博弈优化方法。首先，针对不同用户的差异化特征，考虑了包括用户用电特性以及柔性资源的拥有情况等差异性，建立了PIES内3种典型类型的用户模型；引入奖惩阶梯型碳交易机制从而加入碳市场，激励PIES进行碳减排，同时建立含多种能源设备的PIES管理员（park integrated energy system administrator，PIA）模型统筹园区电-热-碳交易市场。其次，基于Stackelberg博弈理论，建立了以PIA为领导者，差异化用户为跟随者的主从博弈交互机制。最后，采用一种分布式交互算法结合GUROBI工具箱对所提Stackelberg博弈模型进行求解。算例仿真证明了所提方法能够实现PIES多主体之间

的双赢。

1　考虑电-热-碳交易的PIES运行框架

图1为PIES电-热-碳联合市场的框架。在多主体之间的交易中,经济效益、能源设备调度、可再生能源消耗等因素会受到交易策略的显著影响。此外,由于资源分布和主体特征的差异,不同主体采用了各自独特的交互策略,这些特点可以归为用户的差异化特性。本文考虑园区服务中心(park service center,PSC)、智能自动化企业(automated production enterprises,APE)、传统企业(traditional enterprises,TE)3种不同用户类型进行差异化特征建模。

1)用户:是由包括光伏(photovoltaic,PV)系统、电锅炉(electric boiler,EB)、柔性负荷等资源整合而成的聚合体。作为一个资源聚合体,其主要目标是在自身利益驱动下优化内部资源的调度,以实现收益最大化。不同用户因资源结构与需求的差异,表现出生产与消费特性的部分互补性。为揭示这类差异化特征,本文第2章将对不同类型用户进行建模,重点分析其内部资源的独特性及其对PIES的优化作用。

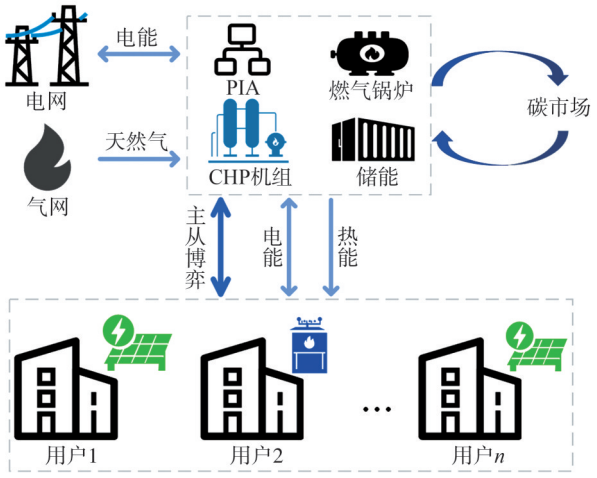


图1　PIES电-热-碳联合市场的框架

Fig.1　Framework of electric,heat,and carbon joint market for PIES

2)园区管理员:PIES通过PIA的共享平台连接多个具有不同特征和能力的用户,实现公平的能源交互和高效运行。PIA作为系统核心,负责管理储能电池(energy storage system,ESS)、热电联供(combined heat and power,CHP)机组、燃气锅炉(gas boiler,GB)等关键设备,并承担相关投资与维护成本。其多重角色包括碳管理员、设备运营商和能源交互中间商。为激励低碳生产,PIA引入阶梯碳交易机制,通过碳排放配额交易获取收益,同时优化能源利用效率。用户通过调整能源消费行为积极参与市场交易,而PIA则通过制定设备调度策略与定价机制,实现能源和碳市场的效益最大化,促进系统稳定性并减少可再生能源浪费。此外,PIA通过电网与用户之间的能量流动以及灵活的买卖定价策略,平衡用户的能源需求与市场收益,最终推动PIES的经济性与环保性双赢。

2　考虑差异化的用户模型

本文深入分析了用户的差异化特征,重点考虑了柔性资源分布和用户种类的异构性。在此基础上,构建了多种典型用户类型,参与园区能源市场交易,并通过差异化建模揭示不同用户在动态价格机制下的优化行为与策略调整规律。

本章构建包括PSC、APE、TE的3种不同用户类型。建立的典型用户类型内部含有资源总结如下:PSC包括电能、热能固定负荷与柔性负荷,柔性负荷又可以分为可削减负荷、可转移负荷以及可替代负荷,源侧则可利用PV发电;APE仅包括电能负荷,其具有功率大以及可转移的特点,源侧具有高比例的PV;TE包括电能、热能固定负荷与柔性负荷,由于生产设备不能轻易改变,因此柔性负荷仅包括可替代负荷,此外含有EB,在电价较低或电量充足时通过电制热获取热能。

2.1　园区服务中心

PSC是服务型综合机构,承担园区内行政办公、商务服务及生活保障等功能,负荷类型多样,涵盖电能与热能需求。与APE不同,PSC负荷弹性更高,具有可削减负荷、可转移负荷以及具备能量替代特性等多种柔性资源。

其能源结构为电热并重,通常搭配中小型光伏系统以提供部分电力支撑。优化目标在于响应能源价格信号实现电热协同调控,通过调整不同能源在不同时段的使用比例,降低整体用能成本并提升运

行灵活性。PSC在PIES互动中可主动参与能源结构调整,体现出更强的柔性与协同能力。其净负荷[29]为

$$P_{\mathrm{PSC},k}^{t}=P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{s},t}+P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{r},t}+P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t}+P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{c},t}-P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{pv},t} \tag{1}$$

式中:k为负荷类型,$k\in\{\mathrm{e},\mathrm{h}\}$,e、h分别表示电能、热能;$P_{\mathrm{PSC},k}^{t}$为负荷$k$在$t$时段的净负荷值;$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{s},t}$为负荷$k$在$t$时段的固定型负荷;$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{r},t}$为负荷$k$在$t$时段的可削减负荷;$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t}$为负荷$k$在$t$时段的可转移负荷;$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{c},t}$为负荷$k$在$t$时段的可替代负荷;$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{pv},t}$为$t$时段的光伏发电功率,若$k$为h,则为0。

1)固定负荷$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{s},t}$。电、热负荷的固定型负荷均不变化。

2)可削减负荷$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{r},t}$。可削减负荷可以根据需要在一定程度上切削减一些负荷,如下所示:

$$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{r},t}=\left(1-\theta_{\mathrm{cut}}(t)\gamma_{t}\right)P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{r},0,t} \tag{2}$$

$$\theta_{\min}\leqslant\sum_{t=1}^{T}\theta_{\mathrm{cut}}(t)\leqslant\theta_{\max} \tag{3}$$

$$0\leqslant\sum_{t=n}^{n+N_{\max}-1}\theta_{\mathrm{cut}}(t)\leqslant N_{\max} \tag{4}$$

式中:$\theta_{\mathrm{cut}}(t)$为0-1变量;γ_{t}为削减系数;$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{r},0,t}$为削减前负荷功率大小;$\theta_{\min}$和$\theta_{\max}$为负荷最小最大削减次数;$T$为一天内的总时段;$n$为削减开始时刻;$N_{\max}$为持续削减的最大次数限制。

3)可转移负荷$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t}$。可转移负荷可以在调度周期内进行时间维度上的转移,如下所示:

$$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t}=P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},0,t}+\zeta_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{in}}P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{in}}-\zeta_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{out}}P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{out}} \tag{5}$$

$$\zeta_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{in}}+\zeta_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{out}}=1 \tag{6}$$

$$\sum_{t=1}^{T}\zeta_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{in}}P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{in}}-\zeta_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{out}}P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{out}}=0 \tag{7}$$

$$\tau_{k}^{\min}\leqslant P_{k,\mathrm{Load}}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{in}},P_{k,\mathrm{Load}}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{out}}\leqslant\tau_{k}^{\max} \tag{8}$$

式中:$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},0,t}$为负荷$k$在$t$时段可转移负荷调控前功率;$\zeta_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{in}}$、$\zeta_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{out}}$分别为负荷$k$在$t$时段可转移型负荷的转入、转出参数;$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{in}}$、$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{tr},t,\mathrm{out}}$分别为负荷$k$在$t$时段可转移型负荷的转入、转出功率;$\tau_{k}^{\max}$、$\tau_{k}^{\min}$分别为可转移型负荷$k$在各时段参与互动量的上、下限值,该约束用于保证用户的用能质量需求。其中,式(7)表示各种可转移型负荷在一个调度周期内的总量均不变。

4)可替代负荷$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{c},t}$。在供热方面,PSC可在PIA提供的电价较低或自身电能充足时将电能转换为热能,电价较高时从PIA购买热能,进而实现电能和热能的相互转换,如下所示:

$$\begin{cases}P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t}=P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},0,t}+\zeta_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}-\zeta_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}\\P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t}=P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},0,t}+\zeta_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}-\zeta_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}\end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases}\zeta_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}+\zeta_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}=1\\\zeta_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}+\zeta_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}=1\end{cases} \tag{10}$$

$$\zeta_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}-\zeta_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}+\zeta_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}-\zeta_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}=0 \tag{11}$$

式中:$P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t}$、$P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t}$分别为互动后的电、热替代型负荷值;$P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},0,t}$、$P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},0,t}$分别为互动前的电、热替代型负荷功率;$\zeta_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}$、$\zeta_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}$、$\zeta_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}$、$\zeta_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}$分别为电、热替代型负荷$t$时段的转入、转出参数,均为二进制变量;$P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}$、$P_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}$、$P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{in}}$、$P_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{c},t,\mathrm{out}}$分别为电、热替代型负荷$t$时段的转入、转出功率。

5)光伏$P_{\mathrm{PSC},k}^{\mathrm{pv},t}$。随着清洁能源的大力推广,在大多数用户中都存在一定比例的可再生光伏。

综上,PSC的收益目标E_{PSC}可表示为:

$$E_{\mathrm{PSC}}=E_{\mathrm{PSC,e}}-E_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{PIA}}-E_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{PIA}} \tag{12}$$

$$E_{\mathrm{PSC,e}}=\sum_{t=1}^{T}a_{1}(P_{\mathrm{PSC,e}}^{t})^{2}+b_{1}P_{\mathrm{PSC,e}}^{t}+c_{1} \tag{13}$$

$$E_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{PIA}}=\sum_{t=1}^{T}\left(\nu_{\mathrm{PIA,s}}^{t}\max\left\{P_{\mathrm{PSC,e}}^{t},0\right\}+\nu_{\mathrm{PIA,b}}^{t}\min\left\{P_{\mathrm{PSC,e}}^{t},0\right\}\right) \tag{14}$$

$$E_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{PIA}}=\sum_{t=1}^{T}\mu_{\mathrm{PIA}}^{t}P_{\mathrm{PSC,h}}^{t} \tag{15}$$

式中:$E_{\mathrm{PSC,e}}$为PSC的用电效用函数;$E_{\mathrm{PSC,e}}^{\mathrm{PIA}}$、$E_{\mathrm{PSC,h}}^{\mathrm{PIA}}$分别为PSC的购电、购热成本;$a_{1}$、$b_{1}$、$c_{1}$均为用电效用函数参数;$P_{\mathrm{PSC,e}}^{t}$、$P_{\mathrm{PSC,h}}^{t}$分别为PSC电、热负荷在$t$时段的值$\nu_{\mathrm{PIA,b}}^{t}$、$\nu_{\mathrm{PIA,s}}^{t}$、$\mu_{\mathrm{PIA}}^{t}$分别为PIA经过主从博弈后发布的售电价格、购电价格与售热价格。

2.2　智能自动化企业

APE是园区内以自动化生产为核心的主体,主要承担高强度、连续性的生产任务。其负荷以高功率密度的自动化设备为主,构成极高比例的基础刚性负荷,几乎不可削减,一旦中断将严重影响生产进程和经济效益。其能耗结构以电能为主,热能需求较低、用途明确且相对独立。APE具备一定的用能灵活性,但仅限于非核心辅助系统或可通过生产计划调整实现负荷时间转移。

APE通常配置大容量光伏发电系统,其优化目标聚焦于电能自给自足与成本最小化,通过在时间维度上调节可转移负荷,使其尽可能匹配光伏出力时段,从而降低电网购电依赖,规避峰时高电价影

响。由于缺乏电热联动能力,其优化空间主要体现在电能负荷的时间调度上。其净负荷为

$$P^{t}_{\mathrm{APE,e}} = P^{\mathrm{s},t}_{\mathrm{APE,e}} + P^{\mathrm{tr},t}_{\mathrm{APE,e}} - P^{\mathrm{pv},t}_{\mathrm{APE,e}} \tag{16}$$

式中:$P^{t}_{\mathrm{APE,e}}$为APE在t时段的电负荷;$P^{\mathrm{s},t}_{\mathrm{APE,e}}$为APE在$t$时段的固定型负荷;$P^{\mathrm{tr},t}_{\mathrm{APE,e}}$为APE在$t$时段的可转移负荷;$P^{\mathrm{pv},t}_{\mathrm{APE,e}}$为APE在$t$时段的光伏发电功率。

对APE中也含有的可转移负荷、PV模型可参照PSC模型所示。因此,APE的收益目标E_{APE}可表示为:

$$E_{\mathrm{APE}} = E_{\mathrm{APE,e}} - E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{APE,e}} \tag{17}$$

$$E_{\mathrm{APE,e}} = \sum_{t=1}^{T} a_1 (P^{t}_{\mathrm{APE,e}})^2 + b_1 P^{t}_{\mathrm{APE,e}} + c_1 \tag{18}$$

$$E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{APE,e}} = \sum_{t=1}^{T} (\nu^{t}_{\mathrm{PIA,s}} \max\{P^{t}_{\mathrm{APE,e}}, 0\} + \nu^{t}_{\mathrm{PIA,b}} \min\{P^{t}_{\mathrm{APE,e}}, 0\}) \tag{19}$$

式中:$E^{t}_{\mathrm{APE,e}}$为APE的用电效用函数;$E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{APE,e}}$为APE的购电成本。

2.3 传统企业

园区中的传统企业通常依赖单一的化石能源结构,可再生能源使用比例较低,导致对外部能源供应的依赖性较强;其生产工艺和运营模式固定,用能模式较为稳定,难以灵活应对市场变化或能源价格波动。此外,受生产任务和工艺安排限制,传统企业在特定时段(如早晚高峰)会出现用能集中现象,从而增加能源成本。为降低该企业对化石能源的依赖,加入EB加强与电网的调节能力。其净负荷为

$$P^{t}_{\mathrm{TE},k} = P^{\mathrm{s},t}_{\mathrm{TE},k} + P^{\mathrm{c},t}_{\mathrm{TE},k} + P^{\mathrm{EB},t}_{\mathrm{TE},k} \tag{20}$$

式中:$P^{t}_{\mathrm{TE},k}$为负荷k在t时段的值;$P^{\mathrm{s},t}_{\mathrm{TE},k}$为负荷$k$在$t$时段的固定型负荷;$P^{\mathrm{c},t}_{\mathrm{TE},k}$为负荷$k$在$t$时段的可替代负荷;$P^{\mathrm{EB},t}_{\mathrm{TE},k}$为$t$时段的EB功率,若$k$为e则为耗电功率,若$k$为h则为产热功率。

EB通过电加热元件将锅炉内的水或有机液体加热到指定温度和压力后向外输出热能。其数学模型为

$$P^{\mathrm{EB},t}_{\mathrm{TE,h}} = \eta_{\mathrm{EB}} P^{\mathrm{EB},t}_{\mathrm{TE,e}} \tag{21}$$

式中:$P^{\mathrm{EB},t}_{\mathrm{TE,e}}$、$P^{\mathrm{EB},t}_{\mathrm{TE,h}}$为EB在$t$时段的输入电能功率和输出热能功率;$\eta_{\mathrm{EB}}$为EB的电热转换系数。

对TE中含有的可替代负荷模型可参照PSC模型所示。因此,TE的收益目标E_{TE}可表示为:

$$E_{\mathrm{TE}} = E_{\mathrm{TE,e}} - E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{TE,e}} - E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{TE,h}} \tag{22}$$

$$E_{\mathrm{TE,e}} = \sum_{t=1}^{T} a_1 (P^{t}_{\mathrm{TE,e}})^2 + b_1 P^{t}_{\mathrm{TE,e}} + c_1 \tag{23}$$

$$E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{TE,e}} = \sum_{t=1}^{T} \nu^{t}_{\mathrm{PIA,s}} P^{t}_{\mathrm{TE,e}} \tag{24}$$

$$E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{TE,h}} = \sum_{t=1}^{T} \mu^{t}_{\mathrm{PIA}} P^{t}_{\mathrm{TE,h}} \tag{25}$$

式中:$E_{\mathrm{TE,e}}$为TE的用电效用函数;$E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{TE,e}}$、$E^{\mathrm{PIA}}_{\mathrm{TE,h}}$分别为TE的购电、热成本;$P^{t}_{\mathrm{TE,e}}$、$P^{t}_{\mathrm{TE,h}}$分别为TE电、热负荷在$t$时段的值。

3 园区管理员模型

PIA作为PIES的核心管理者,承担ESS、CHP机组和GB等关键设备的管理与维护,发挥碳管理员、设备运营商和能源交互中间商的多重角色。通过引入阶梯碳交易机制和灵活的定价策略,PIA优化能源利用效率,平衡用户需求与市场收益,实现能源和碳市场的效益最大化。其包含的CHP机组、GB、ESS设备建模如下。

1)PIA侧的CHP机组包括燃气轮机(gas turbine, GT)和余热锅炉(waste heat boiler, WHB)。GT通过燃烧天然气进行发电,产生的余热则被WHB回收并用于供热,其通过GT输出电功率与耗气量关系可表示为:

$$P^{t}_{\mathrm{CHP,e}} = \eta_{\mathrm{e}} H_{\mathrm{L}} G^{t}_{\mathrm{CHP,g}} \tag{26}$$

$$0 \leqslant P^{t}_{\mathrm{CHP,e}} \leqslant P^{t,\max}_{\mathrm{CHP,e}} \tag{27}$$

式中:$P^{t}_{\mathrm{CHP,e}}$为t时段GT的发电功率;H_{L}为天然气低热值;η_{e}为GT的发电效率;$G^{t}_{\mathrm{CHP,g}}$为t时段GT消耗的天然气;$P^{t,\max}_{\mathrm{CHP,e}}$为$t$时段CHP机组发电上限值。

其通过WHB回收余热用于供热模型可表示为:

$$Q^{t}_{\mathrm{GT}} = P^{t}_{\mathrm{CHP,e}} (1 - \eta_{\mathrm{e}} - \eta_{\mathrm{loss}}) / \eta_{\mathrm{e}} \tag{28}$$

$$P^{t}_{\mathrm{CHP,h}} = \eta_{\mathrm{h}} C_{\mathrm{OP,h}} Q^{t}_{\mathrm{GT}} \tag{29}$$

式中:Q^{t}_{GT}为t时段GT的排气余热量;η_{loss}为散热损失率;$P^{t}_{\mathrm{CHP,h}}$为t时段WHB的制热功率;η_{h}为余热回收效率;$C_{\mathrm{OP,h}}$为WHB的烟气回收率。

2)为了优化PIA设备运行以及灵活供热,引入制热效率更高的GB,其供热模型为:

$$H^{t}_{\mathrm{GB}} = \eta_{\mathrm{GB,h}} H_{\mathrm{L}} G^{t}_{\mathrm{GB,g}} \tag{30}$$

$$H^{\min}_{\mathrm{GB}} \leqslant H^{t}_{\mathrm{GB}} \leqslant H^{\max}_{\mathrm{GB}} \tag{31}$$

式中:H^{t}_{GB}为t时段GB制热功率;$\eta_{\mathrm{GB,h}}$为GB的制热效率;$G^{t}_{\mathrm{GB,g}}$为t时段GB消耗的天然气;$H^{\max}_{\mathrm{GB}}$、$H^{\min}_{\mathrm{GB}}$分别为GB的供热功率上、下限值。

3)PIA 中加入 ESS,能够实现用户之间的高效能源共享。考虑到充电和放电过程中产生的能量损失,荷电状态与充放电功率的关系可定义为:

$$S_{\mathrm{ESS}}^{t}=S_{\mathrm{ESS}}^{t-1}+P_{\mathrm{ESS}}^{t}\cdot\eta_{\mathrm{ESS,chg}},P_{\mathrm{ESS}}^{t}\geqslant 0 \tag{32}$$

$$S_{\mathrm{ESS}}^{t}=S_{\mathrm{ESS}}^{t-1}+P_{\mathrm{ESS}}^{t}/\eta_{\mathrm{ESS,dis}},P_{\mathrm{ESS}}^{t}<0 \tag{33}$$

式中:S_{ESS}^{t} 为 t 时段 BT 的荷电状态;P_{ESS}^{t} 为 t 时段 BT 的充、放电功率;$\eta_{\mathrm{ESS,chg}}$、$\eta_{\mathrm{ESS,dis}}$ 分别为 t 时段 ESS 的充、放电效率。

在任意给定时间段内,ESS 的荷电状态与充放电功率应处于一定范围内。它可以定义为:

$$S_{\mathrm{ESS}}^{\min}\leqslant S_{\mathrm{ESS}}^{t}\leqslant S_{\mathrm{ESS}}^{\max} \tag{34}$$

$$P_{\mathrm{ESS,dis}}^{\max}\leqslant P_{\mathrm{ESS}}^{t}\leqslant P_{\mathrm{ESS,chg}}^{\max} \tag{35}$$

式中:$S_{\mathrm{ESS}}^{\min}$、$S_{\mathrm{ESS}}^{\max}$ 分别为 ESS 荷电状态上、下限值;$P_{\mathrm{ESS,chg}}^{\max}$、$P_{\mathrm{ESS,dis}}^{\max}$ 分别为 ESS 的充、放能功率上限值。

在电-热市场中,PIA 利用主从博弈求出最优的价格策略集,包括出售给用户的热能价格与电能价格,以及收购用户多余光伏发电的电能价格。PIA 制定的电价与热价约束为[30]:

$$\nu_{\mathrm{EG,b}}^{t}\leqslant\nu_{\mathrm{PIA,b}}^{t}\leqslant\nu_{\mathrm{PIA,s}}^{t}\leqslant\nu_{\mathrm{EG,s}}^{t} \tag{36}$$

$$\mu_{\min}^{t}\leqslant\mu_{\mathrm{PIA}}^{t}\leqslant\mu_{\max}^{t} \tag{37}$$

式中:$\nu_{\mathrm{EG,b}}^{t}$、$\nu_{\mathrm{EG,s}}^{t}$ 分别为 t 时段电网的购电价格与售电价格;$\mu_{\max}^{t}$、$\mu_{\min}^{t}$ 分别为 t 时段基于用户购热的历史数据得出的热价上、下限。

本文引入的奖惩阶梯型碳交易机制旨在双向激励园区的碳减排行为。其核心在于:不仅对超出初始配额的碳排放实施阶梯递增的惩罚性购买成本,更对低于初始配额的减排量给予基于阶梯递增系数的经济奖励[31]。碳交易成本为碳交易机制的主体内容,其由碳排放权的初始配额和实际碳排放量决定。

1) 碳排放权初始配额。

国内的配额方式主要采用无偿分配[32]。PIES 中的碳排放源主要有:上级电网的煤电机组、CHP 机组、GB。初始配额模型如式(38)所示。

$$\begin{cases}E_{\mathrm{a}}=\chi_{\mathrm{e}}\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{e,buy}}^{t}+\chi_{\mathrm{g}}\left(\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{CHP}}^{t}+\sum_{t=1}^{T}H_{\mathrm{GB}}^{t}\right)\\ P_{\mathrm{CHP}}^{t}=P_{\mathrm{CHP,h}}^{t}+\chi_{\mathrm{e}}P_{\mathrm{CHP,e}}^{t}\end{cases} \tag{38}$$

式中:χ_{e}、χ_{g} 分别为单位供电、供热出力碳配额系数;$P_{\mathrm{e,buy}}^{t}$ 为 t 时段园区外购电功率;H_{GB}^{t} 为 t 时段 GB 的供热功率;$P_{\mathrm{CHP,h}}^{t}$、$P_{\mathrm{CHP,e}}^{t}$ 分别为 t 时段 CHP 机组的供热、供电功率。

2) 实际碳排放。

实际碳排放模型如式(39)所示。

$$\begin{cases}E_{\mathrm{P}}=E_{\mathrm{e,buy}}+E_{\mathrm{total}}\\ E_{\mathrm{e,buy}}=\sum_{t=1}^{T}\left(a_2+b_2P_{\mathrm{e,buy}}^{t}+c_2\left(P_{\mathrm{e,buy}}^{t}\right)^2\right)\\ E_{\mathrm{total}}=\sum_{t=1}^{T}\left(a_3+b_3P_{\mathrm{total}}^{t}+c_3\left(P_{\mathrm{total}}^{t}\right)^2\right)\\ P_{\mathrm{total}}^{t}=P_{\mathrm{CHP,e}}^{t}+P_{\mathrm{CHP,h}}^{t}+H_{\mathrm{GB}}^{t}\end{cases} \tag{39}$$

式中:$E_{\mathrm{e,buy}}$ 为上级购电实际碳排放量;E_{total} 为 CHP 机组、GB 总的实际碳排放量;P_{total}^{t} 为 t 时段 CHP 机组、GB 的等效输出功率;a_2、b_2、c_2 均为上级购电的碳排放计算参数;a_3、b_3、c_3 均为耗天然气型机组的碳排放计算参数。

3) 碳交易成本。

现有阶梯式碳交易机制多针对购买区间进行碳排放区间划分,为进一步约束园区碳排放量,引入补偿系数 α,即实际碳排放量低于初始配额时,市场给予一定的补贴作为补偿。基于此,构建含补偿系数的阶梯式碳交易模型,如式(40)所示。

$$E_{\mathrm{CET}}=\begin{cases}-l(1+2\alpha)(-E_{\mathrm{IES}}-d),E_{\mathrm{IES}}\leqslant -d\\ -l(1+2\alpha)d-l(1+\alpha)(-E_{\mathrm{IES}}),-d<E_{\mathrm{IES}}\leqslant 0\\ lE_{\mathrm{IES}},0<E_{\mathrm{IES}}\leqslant d\\ ld+l(1+\beta)(E_{\mathrm{IES}}-d),d<E_{\mathrm{IES}}\leqslant 2d\\ l(2+\beta)d+l(1+2\beta)(E_{\mathrm{IES}}-2d),2d<E_{\mathrm{IES}}\leqslant 3d\\ l(3+3\beta)d+l(1+3\beta)(E_{\mathrm{IES}}-3d),3d<E_{\mathrm{IES}}\leqslant 4d\end{cases} \tag{40}$$

$$E_{\mathrm{IES}}=E_{\mathrm{P}}-E_{\mathrm{a}} \tag{41}$$

式中:E_{IES} 为园区的实际碳排放量 E_{P} 与初始碳配额 E_{a} 的差值;E_{CET} 为 t 时段系统的碳交易成本,为正表示购买额度,为负表示利用剩余额度获得补贴;l 为当日碳交易基价;α 为补偿系数;β 为价格增长幅度;d 为每个阶梯对应的碳排放量区间长度;E_{a} 为系统的初始碳配额;E_{P} 为 PIES 的实际碳排放量。

该交易成本通过设置价格增长幅度 β,随着碳排放的增多,园区需要购买更多的碳排放配额来匹配自身碳排需求,用经济手段限制园区碳排放;并进一步设置补偿系数 α,从而强化了 PIA 主动减排的内在动力。

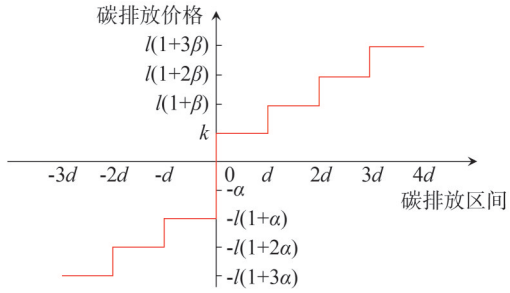


图2　碳排放价格趋势图

Fig.2 Trend chart of carbon emission price

奖惩阶梯型碳交易机制的实际操作需结合园区碳排放实时监测系统与碳市场交易平台。具体流程如下。

步骤1)配额分配与核查。PIES每日初始配额E_a由地方生态环境部门基于历史排放强度核定,并通过区块链技术实现配额分配透明化。

步骤2)实际排放监测。通过智能电表、燃气流量计实时采集并结合碳排放参数得到E_P,并上传至碳管理云平台。

步骤3)碳交易触发规则。

当$E_{IES}>0$时,PIES自动按阶梯价格(式40)计算需购额度,并通过对接区域碳交易市场即时采购;当$E_{IES}<0$时,PIES自动按阶梯价格(式40)计算售卖额度,并通过对接区域碳交易市场即时出售。

电-热-碳联合交易市场中,PIA的收益函数E_{PIA}可以包含4个部分:与用户进行电热交易的收益、与上级能源网络交易的成本、ESS的等效寿命损失成本、CET机制产生的成本。

$$E_{PIA}=E^{PIA}_{PSC,e}+E^{PIA}_{PSC,h}+E^{PIA}_{APE,e}+E^{PIA}_{TE,e}+E^{PIA}_{TE,h}-E^{G}_{PIA,e}-E^{G}_{PIA,h}-E_{SSD}-E_{CET} \tag{42}$$

$$E^{G}_{PIA,e}=\sum_{t=1}^{T}\left(\nu^{t}_{EG,s}\max\left\{P^{t}_{e,buy},0\right\}+\nu^{t}_{EG,b}\min\left\{P^{t}_{e,buy},0\right\}\right) \tag{43}$$

$$P^{t}_{e,buy}=P^{t}_{PSC,e}+P^{t}_{APE,e}+P^{t}_{TE,e}+P^{t}_{ESS}-P^{t}_{CHP,e} \tag{44}$$

$$E^{G}_{PIA,h}=\sum_{t=1}^{T}\mu_g\left(G^{t}_{CHP,g}+G^{t}_{GB,g}\right) \tag{45}$$

$$E_{SSD}=\sum_{t=1}^{T}\lambda_{ESS}\left|P^{t}_{ESS}\right|+\lambda_{CHP}P^{t}_{CHP,e}+\lambda_{GB}H^{t}_{GB} \tag{46}$$

式中:$E^{G}_{PIA,e}$为PIA从电网购电成本;$P^{t}_{e,buy}$为PIA从电网购电量;$E^{G}_{PIA,h}$为PIA从气网购气成本;μ_g为购气价;E_{SSD}为PIA源侧设备运营成本;λ_{ESS}、λ_{CHP}、λ_{GB}分别为PIA的ESS、CHP机组、GB运营成本系数。

4　主从博弈模型及求解策略

4.1　基于Stackelberg的博弈模型

在本文中,PIA与用户属于不同的主体。ESS、CHP机组、GB的调度策略和PIA的动态交互价格对用户的柔性负荷动作产生显著影响。同时,用户的柔性负荷动作会影响PIA的优化策略。然后,PIA和用户的策略集和利润都相互影响。为刻画这种双向互动关系,可以将PIA和用户之间的电-热共享描述为Stackelberg博弈,PIA是领导者,而差异化用户是追随者。

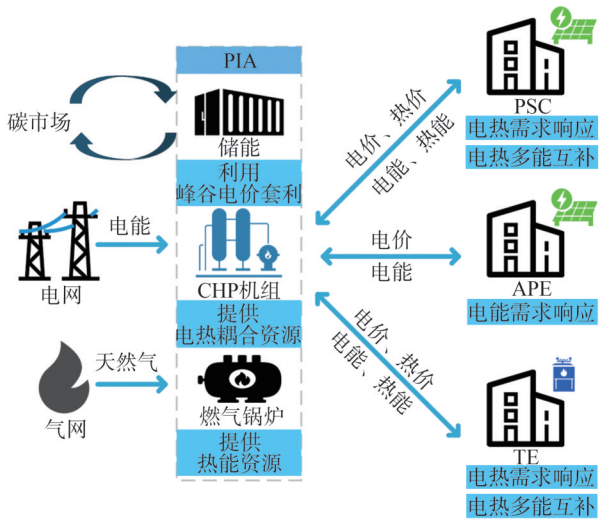


图3　多主体博弈框架

Fig.3 Multi-agent game framework

PIES中多主体博弈框架如图3所示。在此博弈中,PIA作为领导者为更高的利益而定制动态价格策略以及ESS、CHP机组和GB的调度策略,并将这些信息发布给用户,激励用户积极参与需求响应、多能互补。用户作为追随者(Follower),在收到PIA的策略后,结合自身的运行约束和优化目标,通过GUROBI优化其需求响应动作,进行多能互补,优化电-热能源利用率,以最大化收益,并将反馈结果提交至PIA。结合用户的策略,PIA调整包括ESS、CHP机组和GB的调度策略,并调整含售电价格、购电价格、售热价格在内的策略,参与碳市场以最大化其收益。PIA和用户进行迭代交互,不断调整策略,直到收敛到Stackelberg博弈均衡。

Stackelberg 博弈的部分组成可定义为

$$G_{PU}=\begin{Bmatrix}(N\cup P);P^{t}_{PSC,k},P^{t}_{APE,k}P^{t}_{TE,k};\\E_{PSC},E_{APE},E_{TE};D^{t}_{PIA};E_{PIA}\end{Bmatrix} \tag{47}$$

式中:N 为差异化用户集合;P 为 PIA 集合;E_{PIA}、E_{PSC}、E_{APE}、E_{TE} 为各主体的目标函数,表示各参与者的收益;D^{t}_{PIA} 为 PIA 的交互策略集合,包括各个供能设备输出功率和能源价格;$P^{t}_{PSC,k}$、$P^{t}_{APE,k}$、$P^{t}_{TE,k}$ 为用户的电、热净负荷集合。

4.2　Stackelberg 博弈模型求解策略

当一组策略集(D^{t}_{PIA}、$P^{t*}_{PSC,k}$、$P^{t*}_{APE,k}$、$P^{t*}_{TE,k}$)构成 Stackelberg 博弈均衡时,博弈中的任何参与者都不能通过单独改变自己的策略集来增加自己的利益,其需要满足如下条件[33]。

$$\begin{cases}E_{PIA}(D^{t*}_{PIA},P^{t*}_{PSC,k},P^{t*}_{APE,k}P^{t*}_{TE,k})\geqslant E_{PIA}(D^{t}_{PIA},P^{t*}_{PSC,k},P^{t*}_{APE,k}P^{t*}_{TE,k})\\E_{PSC}(D^{t*}_{PIA},P^{t*}_{PSC,k},P^{t*}_{APE,k}P^{t*}_{TE,k})\geqslant E_{PSC}(D^{t*}_{PIA},P^{t}_{PSC,k},P^{t*}_{APE,k}P^{t*}_{TE,k})\\E_{APE}(D^{t*}_{PIA},P^{t*}_{PSC,k},P^{t*}_{APE,k}P^{t*}_{TE,k})\geqslant E_{APE}(D^{t*}_{PIA},P^{t*}_{PSC,k},P^{t}_{APE,k}P^{t*}_{TE,k})\\E_{TE}(D^{t*}_{PIA},P^{t*}_{PSC,k},P^{t*}_{APE,k}P^{t*}_{TE,k})\geqslant E_{TE}(D^{t*}_{PIA},P^{t*}_{PSC,k},P^{t*}_{APE,k}P^{t}_{TE,k})\end{cases} \tag{48}$$

式中:D^{t*}_{PIA} 为 PIA 的最优交互策略集合,包括各个供能设备输出功率和能源价格;$P^{t*}_{PSC,k}$,$P^{t*}_{APE,k}P^{t*}_{TE,k}$ 为各用户的最优电、热净负荷集合。

为进一步保护用户隐私信息、实现博弈模型的高效求解,设计了一种基于自适应差分进化算法(adaptive differential evolution,ADE)的分布式迭代方法。该算法能够在保障用户隐私的前提下,协调 PIA 与用户之间的信息交互。ADE 方法迭代流程如图 4 所示。图 4 上层步骤说明 PIA 进行的优化,而图 4 下层步骤说明对用户的局部优化。所描述的优化过程反映动态价格策略以及 ESS、CHP 机组和 GB 的调度策略(由 PIA 决定)和需求响应动作策略(由用户决定)之间的迭代动态相互作用。

具体而言,PIA 基于 ADE 方法,通过生成、突变、交叉和选择过程,不断生成供能设备输出功率 P^{t}_{ESS}、$P^{t}_{CHP,e}$、$P^{t}_{CHP,h}$、H^{t}_{GB}、能源价格 $\nu^{t}_{PIA,s}$、$\nu^{t}_{PIA,b}$、μ^{t}_{PIA} 组成的策略种群 D^{t}_{PIA},发布给用户引导其优化其能源消费方案;用户根据 PIA 提供的策略集,通过局部求解工具(如 GUROBI)最大化自身收益,获得最佳的需求响应动作集$\{P^{t}_{PSC,k},P^{t}_{APE,k},P^{t}_{TE,k}\}$;PIA 根据用户反馈的需

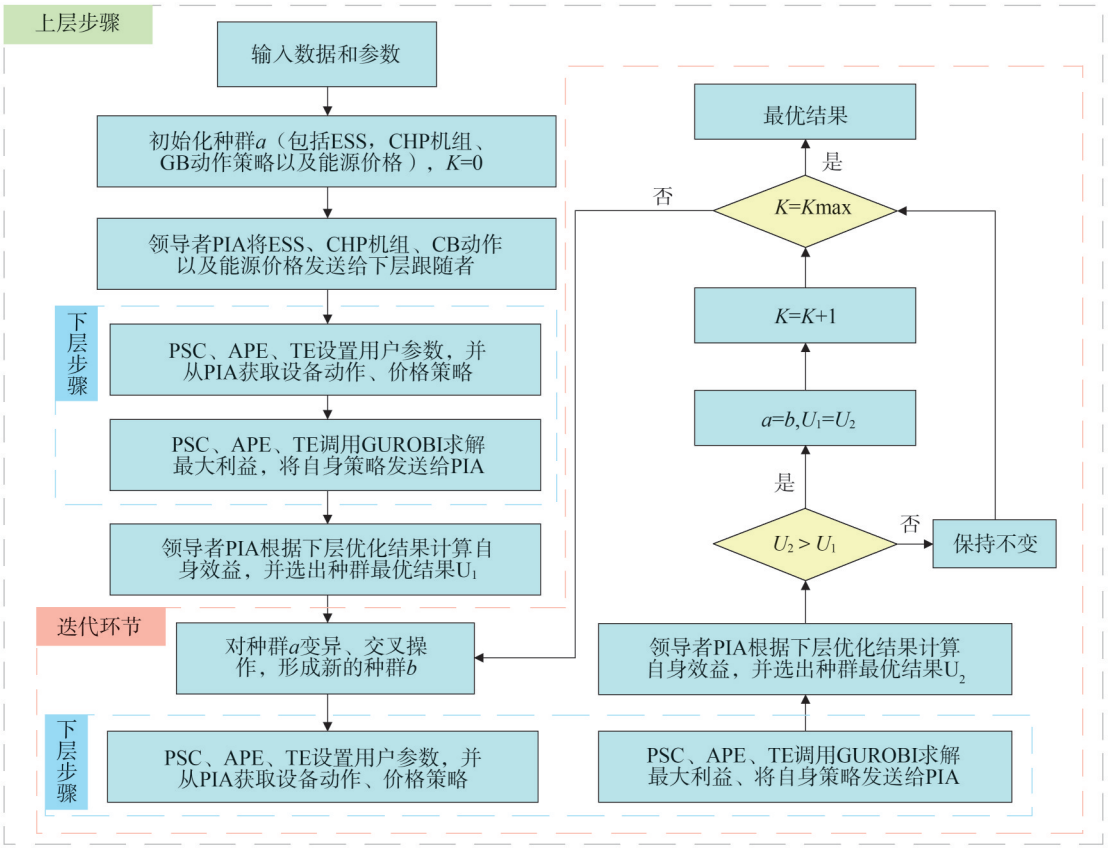


图4　博弈流程图

Fig.4 Game flow diagram

求响应动作计算自身效益,并在所有策略种群中选出最优策略。上述交互过程不断迭代,并在每一次迭代中比较最优策略目标,保留较好的目标进入下一次迭代,直至满足迭代次数收敛至Stackelberg均衡点。

5　算例仿真

通过一个包含3类不同属性用户的PIES算例,对本文基于PIA的电-热-碳联合市场进行了算例分析。所有负载数据均来自安徽某园区实际统计,如图5所示。算例研究中有ESS、CHP机组、GB,由PIA管理和运营。ESS的容量设置为1 200 kWh,充放电上限设置为600 kW,ESS的初始状态设置为0.2,最小和最大储能状态分别设置为0.2和0.9。CHP机组出力上限为400 kW,电效率为0.45,热效率为0.35。GB出力上限为200 kW,效率为0.95。奖惩阶梯型碳交易相关参数可参考文献[23]。分时电价和购气价如表1所示。$\nu^{t}_{\mathrm{EG,b}}$设置为0.35元/kWh,$\mu^{t}_{\max}$、$\mu^{t}_{\min}$根据历史价格设置分别为0.5元/kWh、0.15元/kWh。用户侧柔性资源占比上限为15%,EB处理上限为100 kW。

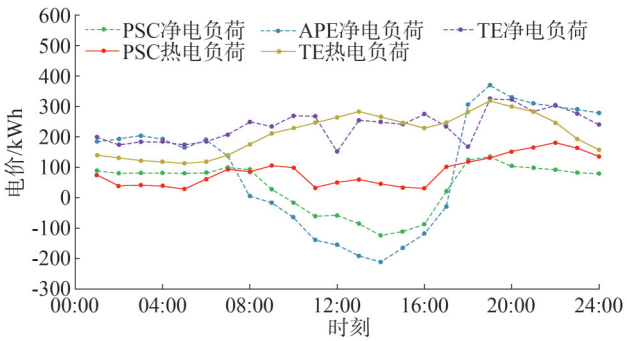


图5　用户负荷数据

Fig.5　User load data

表1　分时电价与购气价

Table 1　Time-of-Use electricity prices and gas purchase prices

价格类型	谷段	平段	峰段
	00:00—08:00、24:00	08:00—11:00、15:00—19:00、22:00—24:00	11:00—15:00、19:00—22:00
电价/(元/kWh)	0.4	0.8	1.3
购气价/(元/m³)	2.65		

5.1　动态交互分析

图6和图7分别为PIA在电市场和热市场的动态价格变化趋势。为增强用户从PIA购买电能的意愿,PIA设定的电能销售价格低于其从电网购电的价格。这一策略既有效降低了用户的能源成本,也保障了PIA的收益目标。此外,PIA设定的电能购买价格略高于其从电网购电的价格。这一策略通过提高用户的售电收益,减少了用户将多余电能直接反馈至电网的动机,从而在牺牲PIA部分经济利益的情况下,进一步促进了电网的安全稳定运行。

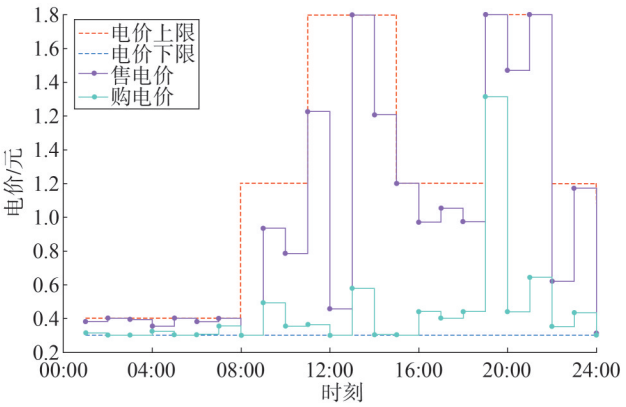


图6　PIA动态电能价格

Fig.6 Dynamic electricity prices of PIA

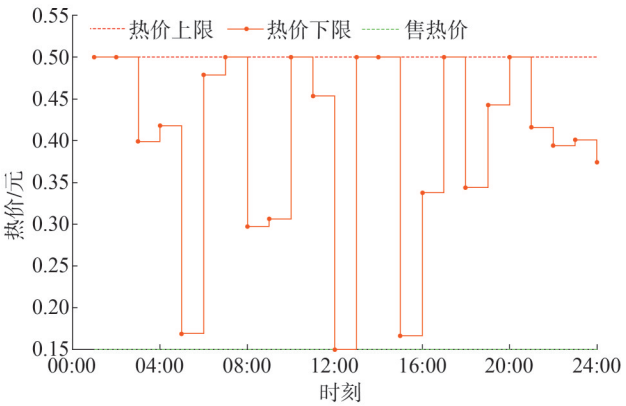


图7　PIA动态热能价格

Fig.7　Dynamic heat prices of PIA

热能价格的动态调整基于历史销售价格范围,当热能需求较高时,价格适当上调;当需求较低时,价格相应下调。此动态定价策略不仅符合市场供需规律,同时也保障了PIA在热能市场中的经济效益。最终结果显示,电能和热能的价格策略均实现了PIA与用户的双赢效果。这表明,动态定价机制在

优化 PIES 内部能源交互方面具有显著的积极作用。

此外,将本文算法与常见的差分进化算法(differential evolution, DE)和遗传算法(genetic algorithm,GA)计算性能进行对比,其结果如表 2 所示。通过分析表 2 可知,本文算法在迭代次数和收敛时间两个维度上均显著优于 DE 和 GA,表现出更快的收敛速度与更高的求解效率,充分验证了本文方法在求解效率和计算稳定性方面的优势。

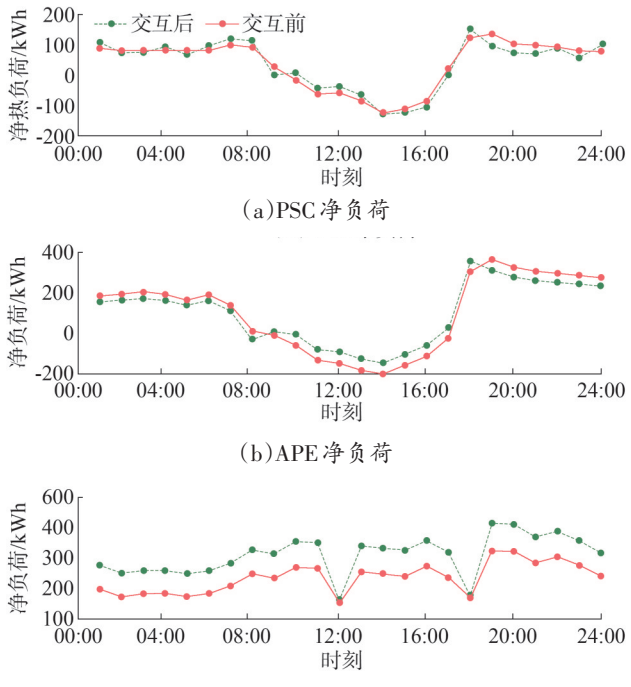
表 2　算法迭代对比

Table 2 Algorithm iteration comparison

算法	迭代次数	收敛时间/s
DE	97	276
GA	111	311
本文算法	56	148

5.2　用户差异化分析

图 8、图 9 分别为 PIEA 用户的电、热能源调度情况。用户通过需求响应对能量市场买卖的影响可归纳为三个主要方面。分析用户行为可知,PSC 将可转移负荷集中于 06:00—08:00 时段,同时在 17:00—21:00 时段削减负荷;TE 则选择在 01:00—07:00 和 16:00—18:00 时段调整可替代负荷,这表明用户倾向于将柔性负荷调整至价格较低的时段,并削减价格较高时段的能源使用,以实现成本的最小化。



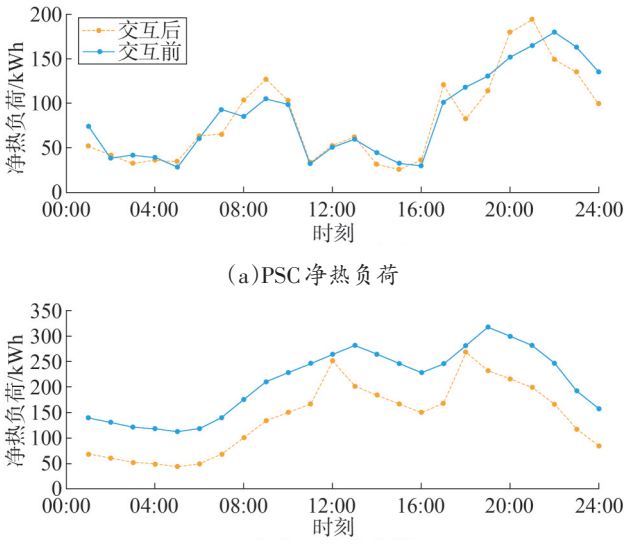
(a)PSC 净负荷

(b)APE 净负荷

(c)TE 净负荷

图 8　PIES 用户电能调度

Fig.8 PIES user electric energy scheduling



(a)PSC 净热负荷

(b)TE 净热负荷

图 9　PIES 用户热能调度

Fig.9 PIES user heat energy scheduling

其次,PSC 将可转移负荷集中于 12:00—14:00,而 APE 则在 10:00—18:00 时段扩大电力负荷消耗,充分利用光伏发电,这是因为在光伏能源充足的情况下,用户通过增加能源消耗提高新能源消纳。最后,PSC 和 TE 均在 03:00—07:00 时段将部分热负荷转换为电负荷,而 PSC 还在 09:00—10:00、17:00、20:00—21:00 时段将电负荷转为热负荷,这也能够说明用户积极响应动态价格并促进能源交互,通过灵活调整电、热负荷的分配来权衡使用收益。

尽管 PSC、APE、TE 在需求响应的三个方面均表现出相似的调整策略,但细化分析可以发现其显著的差异性。PSC 作为 PIES 中的用户,既可消耗能源,又能利用分布式光伏发电供能,其用能行为会因动态价格而转变(如在 09:00 时刻由买方变为卖方)。同时,结合热负荷的动态调整,PSC 能够通过电、热负荷的灵活变换提高用能经济性和灵活性。APE 作为智能化企业,其全天候生产特性使电负荷波动较小,但高强度用电需求导致购电成本较高。为缓解这一问题,APE 配置了大功率光伏发电系统,使中午时段净负荷显著降低,甚至出现溢出。在动态价格机制的指导下,APE 将部分负荷转移至光伏高产出的时间段,显

著提升光伏电力的自消纳能力,降低对外部购电的依赖。相比之下,TE作为传统企业,负荷调控能力相对较弱,仅配备少量可替代负荷和EB以满足热能需求。然而,TE也通过动态价格调整电、热负荷的分配。在电价较高的19:00—20:00时段,由于热价过高,TE选择让EB满额出力,显著减少从PIA购买的净热负荷,从而实现购能成本的降低。

经过以上分析可知,PSC、APE、TE作为PIES中具有不同属性和运行需求的用户,其用能行为因动态价格机制、自身实际情况而展现出显著的差异性。PSC通过电、热负荷的灵活调整,在买方与卖方角色间切换,提升了经济性;APE利用光伏发电的时段特性优化用电行为,增强了光伏的自消纳能力;而TE通过权衡负荷分配,适应市场价格波动以降低总体用能成本。这表明,差异化模型在分析园区不同用户的灵活用能与优化资源配置方面具有重要意义,为未来园区能源系统的设计与优化提供了关键参考。

5.3　电-热耦合分析

图10、图11分别为PIA所拥有能源设备的出力情况。CHP机组能够同时产出电能和热能,联合GB动作策略,通过优化PIA购能策略提高经济效益。具体而言,在电价较低的01:00—07:00时段,PIA优先从电网购入电能,配合CHP机组热电联产特性,同时满足电、热负荷需求;而在电价较高或者负荷需求较高的19:00—21:00时段,CHP机组满发出力仍不能满足热能需求,此时则需要GB出力不足热能缺额。此外,电能负荷较低的12:00—14:00时段,PIA利用CHP机组产生电能足以满足电能需求,此时较

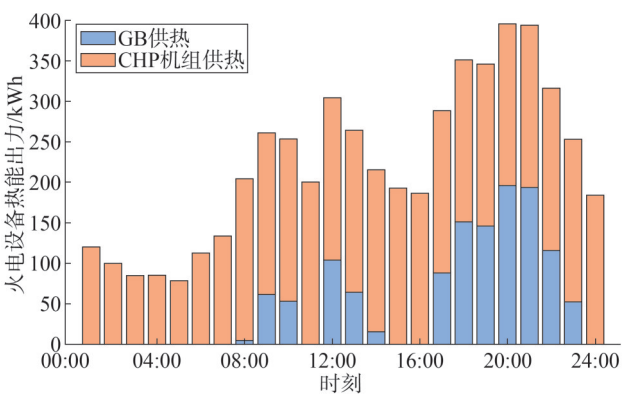


图10　PIA中燃气机组交互策略

Fig.10 Interaction strategies of gas-fired units in PIA

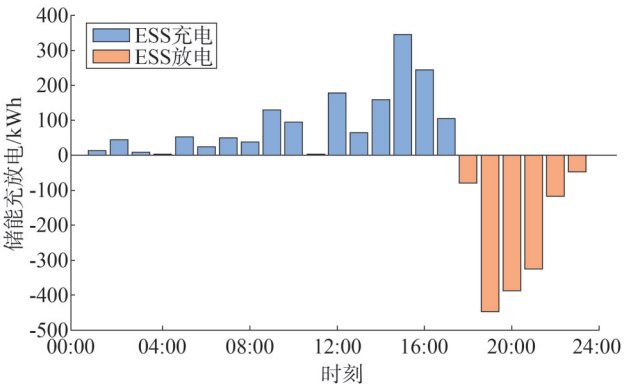


图11　PIA中ESS的交互策略

Fig.11 Interaction strategies of ESS in PIA

高的热能需求仍需要GB补充。CHP机组的引入加强了PIES中电能与热能的耦合,而GB的加入弥补了PIES电、热能负荷趋势不同的情况,为PIES设备的运行优化提供了更高的灵活性,进一步提升了电-热联合市场的调度效率。

从图11的ESS交互策略可知,在01:00—07:00时段,当电网提供的销售电价相对较低时,PIA从电网购买电力为其ESS充电。在08:00—11:00时段,当电网销售电价较高时,PIA减少从电网购买电力为ESS充电,转而利用CHP机组进行充电。在12:00—17:00时段,当光伏电力充足时,PIA以较低的动态电价从具有富余光伏发电的用户购买电量,以及利用CHP机组供热之时将其多余电力产出给予ESS充电,然后在后续时段以更高的电碳耦合价格出售给用户。经过分析可知,ESS充电能量主要来源于三个方面:1)电价低谷时段从电网购买的电量;2)CHP机组发电的电量;3)从具有富余光伏发电的用户购买的电量。而传统的能源共享方式中,如果在买卖双方直接交易后,集群中光伏和PIA的CHP机组发电量过剩,则将多余的电力反送回电网,与之相比,加入ESS后有利于PIA获取更多经济收益。由此可见,ESS的加入使得PIES调度手段更加灵活,利用差价从交易中能够获取更多收益。

5.4　案例对比分析

为验证本文所提电-热-碳联合市场以及博弈模型的优越性,设置3组案例进行对比分析。

案例Ⅰ:考虑电-热-碳联合市场的PIES多主体博弈模型,使用ADE算法求解博弈模型。

案例Ⅱ:考虑电-热联合市场的PIES多主体博弈模型,不考虑奖惩阶梯型碳交易机制[34],使用ADE算法求解博弈模型。

案例Ⅲ:考虑电-热-碳联合市场的PIES多主体博弈模型,使用集中式算法求解[25]。

表3为PIES中有无碳交易优化结果对比,电-热联合市场中,PIES的电-热市场收益为1 606.92元,能效为0.678 3,相较于电-热-碳联合市场中电-热市场收益提高约36%,能效提高约9%,这是由于前者提高了效率更高的GB使用率,减小了天然气的购买,并且在电价低谷时期,从电网大量购买电能储存于ESS中,以便在电价高昂时出售给用户实现盈利。但这些举动无疑会大大提高PIES的碳排放量,从电网购电量明显增加,减少了园区设备动作,从而增加大量实际碳排放额,图12为碳排放量对比,不难看出在03:00时刻和05:00—06:00时段,碳排放量明显增多,总碳排放量相差2倍之多,远远高于考虑电-热-碳联合市场的场景。同时,由于考虑碳市场的情况,从电网购电更加均衡,减小了电网供电压力,并且PIES碳排放配额高于实际碳排放量,在碳市场出售碳排放权实现盈利,最后总盈利收益是大于仅考虑电-热联合市场的场景,证明了电-热-碳联合市场在降低PIES碳排放的同时,能够实现盈利。

表3　有无碳交易优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results with and without carbon trading

案例	电-热市场收益/元	能效	碳市场收益/元	碳排放/t
I	1 021.47	0.616 0	867.57	10.02
II	1 606.92	0.678 3		28.33

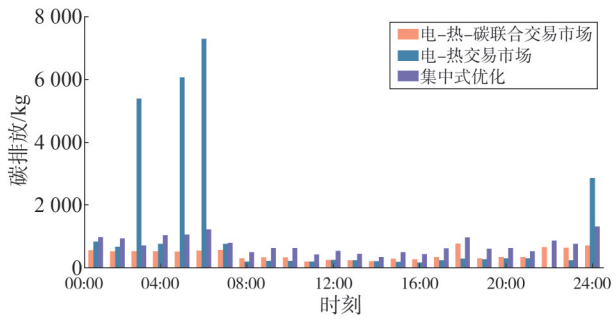


图12　碳排放量对比

Fig.12 Comparison of carbon emissions

此外,针对集中式算法和本文提出的分布式算法进行了PIES优化结果对比,如表4所示。

表4　不同算法优化结果对比

Table 4 Comparison of optimization results of different algorithms

案例	电-热市场收益/元	碳市场收益/元	碳排放/t	计算时间/s
I	1 021.47	867.57	10.02	148
Ⅲ	1 293.52	273.59	17.24	37

尽管案例Ⅲ所采用的集中式优化算法在计算时间上优于案例I,并在电-热市场中获得更高的收益,但其仅依赖于GUROBI求解器进行一次性集中计算,缺乏模型层次性与交互反馈机制。相比之下,案例I所采用的分布式算法结合了博弈模型与双层迭代机制,通过上下层的多轮博弈优化实现更具针对性的协同调度,尽管计算时间略有增加,但反映了算法在计算复杂度与系统适应性方面的提升。因此,由图12和表4不难看出,使用案例I计算的碳减排效果提升41.2%,在综合市场收益高出321.93元,并且分布式方法可并行运行、具备良好的扩展性与隐私保护能力,其在大规模、多用户PIES应用中的适用性更强。因此,基于PIA和差异化用户博弈模型的分布式算法,具有更好的效果。

6　结论

基于奖惩阶梯型碳交易机制建立电-热-碳交易市场,构建了以耦合多种能源的PIA为领导者、差异化特征用户为跟随者的Stackelberg博弈交互机制,实现了PIES低碳运行和多主体互动交易。通过研究,主要得出以下结论:

1)考虑了园区用户的典型差异化特征,各类型用户都可以结合自身特性与PIA动态价格积极参与电-热-碳市场来提高自身经济效益,提高了用户的决策自主权,实现了多能源多主体最大化收益。

2)在博弈模型中,CHP机组的动作策略加强了园区内电、热之间的耦合联系,并与ESS和GB的联合调度共同促进了园区电、热市场的灵活、高效交易。

3)通过引入奖惩阶梯型碳交易机制,园区能够

更加有效地参与碳市场交易,进一步挖掘其碳减排潜力,推动低碳经济目标的实现。

下一步将深入研究用户侧用能负荷、光伏发电的随机性在电-热-碳交易市场交互过程中的影响,进一步深化本文的研究,提高本文所提方法的实用性与有效性。

参考文献

[1] 葛磊蛟,李京京,李昌禄,等.面向零碳园区的综合能源系统优化运行技术综述[J].电网技术,2024,48(5):1821-1835.
GE Leijiao, LI Jingjing, LI Changlu, et al. Overview of integrated energy system optimal operation technology for zero-carbon parks [J].Power System Technology,2024,48(5):1821-1835.

[2] 陈勇, 芮俊, 肖雷鸣, 等.基于动态主从博弈模型的综合能源系统碳交易方法[J].浙江电力, 2024, 43(4):51-62.
CHEN Yong, RUI Jun, XIAO Leiming, et al. A carbon trading method for integrated energy systems based on a dynamic master-slave game model [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(4): 51-62.

[3] 张姝,江洪辉,臧天磊,等.考虑热储扩展碳排放流的多园区综合能源系统低碳经济调度[J].电力系统保护与控制,2025,53(19):13-24.
ZHANG Shu, JIANG Honghui, ZANG Tianlei, et al.Low-carbon economic dispatch of multi-park integrated energy systems considering augmented carbon emission flow of thermal storage[J]. Power System Protection and Control,2025,53(19):13-24.

[4] 赵佩尧,李正烁,高晗,等.电-气-热综合能源系统协同调度优化研究综述[J].山东电力技术,2024,51(4):1-11.
ZHAO Peiyao, LI Zhengshuo, GAO Han, et al. Review on collaborative scheduling optimization of electricity - gas -heat integrated energy system [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(4):1-11.

[5] 赵琛,叶金池,和萍,等.考虑源荷多重不确定性的园区综合能源系统优化策略[J].电力系统保护与控制,2025,53(4):148-164.
ZHAO Chen, YE Jinchi, HE Ping, et al. A PIES optimization strategy considering multiple uncertainties in source and load[J]. Power System Protection and Control,2025,53(4):148-164.

[6] 王义,靳梓康,王要强,等.考虑电动汽车共享储能特性的园区综合能源系统低碳运行[J].电力系统自动化,2024,48(5):21-29.
WANG Yi, JIN Zikang, WANG Yaoqiang, et al. Low-carbon operation of park-level integrated energy system considering shared energy storage features of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(5):21-29.

[7] 王怡,王小君,孙庆凯,等.基于能量共享的综合能源系统群多主体实时协同优化策略[J].电力系统自动化,2022,46(4):56-65.
WANG Yi, WANG Xiaojun, SUN Qingkai, et al.Multi-agent real-time collaborative optimization strategy for integrated energy system group based on energy sharing[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(4):56-65.

[8] 郭斯琦,楼劲,郑凌蔚.考虑热网特性的综合能源系统混合时间尺度调度方法[J].电力建设,2024,45(12):16-26.
GUO Siqi, LOU Jin, ZHENG Lingwei. Hybrid time scale scheduling method for integrated energy systems considering the characteristics of heating networks [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(12):16-26.

[9] 高红均,张凡,刘俊勇,等.考虑多产消者差异化特征的社区微网系统P2P交易机制设计[J].中国电机工程学报,2022,42(4):1455-1469.
GAO Hongjun, ZHANG Fan, LIU Junyong, et al. Design of P2P transaction mechanism considering differentiation characteristics of multiple prosumers in community microgrid system [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(4):1455-1469.

[10] 李佳欣, 王智伟.基于模型预测控制的风光储综合能源系统优化调度[J].分布式能源, 2024,9(1):43-53.
LI Jiaxin, WANG Zhiwei. Optimal dispatching of wind-solar-storage integrated energy system based on model predictive control [J].Distributed Energy, 2024,9(1):43-53.

[11] LAI G M, SYCARA K.A generic framework for automated multi-attribute negotiation[J].Group Decision and Negotiation, 2009, 18(2):169-187.

[12] HEISKANEN E, JOHNSON M, ROBINSON S, et al. Low-carbon communities as a context for individual behavioural change [J]. Energy Policy,2010,38(12):7586-7595.

[13] WOO C K, SREEDHARAN P, HARGREAVES J, et al.A review of electricity product differentiation[J]. Applied Energy, 2014, 114: 262-272.

[14] 雷杨,雷泽雨,杭俊,等.考虑生物质交易的乡村能源系统多主体协同规划[J].电力系统保护与控制,2025,53(12):13-23.
LEI Yang, LEI Zeyu, HANG Jun, et al. Multi-agent collaborative planning of rural energy system considering biomass trading [J]. Power System Protection and Control,2025,53(12):13-23.

[15] CHEN S J, LIU C C.From demand response to transactive energy: state of the art [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2017,5(1):10-19.

[16] 张晓英,陈宝奇,马志程,等.基于主从博弈理论的热电联供型太阳能热发电站冬季优化运行研究[J].太阳能学报,2023,44(11):155-165.
ZHANG Xiaoying, CHEN Baoqi, MA Zhicheng, et al. Study on optimal operation of solar thermal power plant based on leader-follower game theory in winter [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,

2023,44(11):155-165.

[17] WANG Y D, HU J J, LIU N. Energy management in integrated energy system using energy-carbon integrated pricing method[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(4): 1992-2005.

[18] 刘晓峰,高丙团,李扬.博弈论在电力需求侧的应用研究综述[J].电网技术,2018,42(8):2704-2711.
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LI Yang. Review on application of game theory in power demand side[J]. Power System Technology, 2018,42(8):2704-2711.

[19] TAVAKKOLI M, FATTAHEIAN-DEHKORDI S, POURAKBARI-KASMAEI M, et al. Bonus-based demand response using Stackelberg game approach for residential end-users equipped with HVAC system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021,12(1):234-249.

[20] ZHAO Y Y, WEI Y F, TANG Y F, et al. Multi-objective robust dynamic pricing and operation strategy optimization for integrated energy system based on Stackelberg game[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024,83:826-841.

[21] 马苗苗,王浩,董利鹏,等.基于主从博弈的微电网分布式能量管理策略[J].系统仿真学报,2024,36(4):834-843.
MA Miaomiao, WANG Hao, DONG Lipeng, et al. Distributed energy management strategy of microgrid based on master-slave game[J]. Journal of System Simulation, 2024,36(4):834-843.

[22] 庞超,霍现旭,王智爽,等.考虑用户行为耦合的园区综合能源系统聚合灵活性建模与定价博弈[J/OL].电力系统及其自动化学报,2025:1-11[2025-07-08].https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001634.
PANG Chao, HUO Xianxu, WANG Zhishuang, et al. Aggregation flexibility modeling and pricing game of park comprehensive energy system considering user behavior coupling[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2025:1-11[2025-07-08]. https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001634.

[23] 王海洋,李珂,张承慧,等.基于主从博弈的社区综合能源系统分布式协同优化运行策略[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5435-5444.
WANG Haiyang, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Distributed coordinative optimal operation of community integrated energy system based on Stackelberg game[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(17):5435-5444.

[24] 熊军华,李润南,李灵秀,等.考虑动态碳配额的灵活碳捕集电厂-广义储能系统低碳经济调度[J].太阳能学报,2025,46(5):696-705.
XIONG Junhua, LI Runnan, LI Lingxiu, et al. Low-carbon economic scheduling of flexible carbon capture power plants and generalized energy storage systems considering dynamic carbon quotas[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025,46(5):696-705.

[25] 袁世琦,潘鹏程,魏业文,等.园区综合能源系统低碳经济优化调度模型研究[J].太阳能学报,2024,45(3):347-356.
YUAN Shiqi, PAN Pengcheng, WEI Yewen, et al. Study on low-carbon economic optimal scheduling model of community integrated energy system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024,45(3):347-356.

[26] 邢家维,赵帅,杨颂,等.计及阶梯碳交易机制的热电氢联供型综合能源系统多目标优化调度[J].山东电力技术,2025,52(3):21-31.
XING Jiawei, ZHAO Shuai, YANG Song, et al. Multi-objective optimal scheduling of combined heat, power, and hydrogen integrated energy system considering the stepped carbon trading mechanism[J]. Shandong Electric Power, 2025,52(3):21-31.

[27] 崔杨,曾鹏,仲悟之,等.考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J].电力自动化设备,2021,41(3):10-17.
CUI Yang, ZENG Peng, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(3):10-17.

[28] 邓旭,冯劼然,南君培,等.考虑双端碳交易的含CCUS新能源电力系统主从博弈低碳经济调度[J/OL].电力自动化设备,2025:1-18[2025-07-08].https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1318.TM.20250707.1441.003.html.
DENG Xu, FENG Jieran, NAN Junpei, et al. Low-carbon economic dispatch of master-slave game in power system with CCUS new energy considering two-terminal carbon trading[J/OL]. Electric Power Automation Equipment, 2025:1-18.[2025-07-08]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1318.TM.20250707.1441.003.html.

[29] 陈锦鹏,胡志坚,陈嘉滨,等.考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J].高电压技术,2021,47(9):3094-3106.
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand[J]. High Voltage Engineering, 2021,47(9):3094-3106.

[30] 帅轩越,马志程,王秀丽,等.基于主从博弈理论的共享储能与综合能源微网优化运行研究[J].电网技术,2023,47(2):679-690.
SHUAI Xuanyue, MA Zhicheng, WANG Xiuli, et al. Optimal operation of shared energy storage and integrated energy microgrid based on leader-follower game theory[J]. Power System Technology, 2023,47(2):679-690.

[31] 晋旭东,孙磊,丁明,等.考虑用户响应不确定性的园区综合能源系统分布鲁棒低碳调度[J].电力系统自动化,2023,47(16):10-21.
JIN Xudong, SUN Lei, DING Ming, et al. Distributionally robust low-carbon dispatch of park-level integrated energy system

considering uncertainty of customer response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 10-21.

[32] 李军,李鑫.考虑碳交易的社区综合能源主从博弈运行优化策略[J].电力需求侧管理,2023,25(6):28-34.
LI Jun, LI Xin. Operation optimal strategy of community integrated energy Stackelberg game considering carbon trading [J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(6): 28-34.

[33] WANG J, JIN X L, JIA H J, et al. Joint electricity and carbon sharing with PV and energy storage: a low-carbon DR-based game theoretic approach [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(4): 2703-2717.

[34] 范宏,王镇高宇.考虑综合需求响应及主从博弈的RIES优化调度[J].上海电力大学学报,2025,41(6):512-520.
FAN Hong, WANG Zhenggaoyu. RIES optimization scheduling considering comprehensive demand response and stackelberg game [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2025, 41(6): 512-520.

收稿日期:2025-07-08
修回日期:2026-01-04

作者简介:

娄　伟(1987),通信作者(louw0411@ah.sgcc.com.cn),男,博士,高级工程师,主要研究方向为配电自动化与分布式智能电网;

张征凯(1979),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为配电自动化与配网数字化;

赵学理(2000),男,博士,主要研究方向为新型配电系统优化运行、能源交互。

孙立成(1993),男,博士,高级工程师,主要研究方向为智能配电网技术;

刘　蔚(1996),女,硕士,工程师,主要研究方向为智能配电网与配电自动化。

(责任编辑　郑天茹)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250409

·配电网·

基于虚拟电容动态极性判据与FIR滤波器的谐振接地系统高阻故障定位方法

张 明[1],陆 忞[1],张 鑫[1],赵晨昕[2*]
(1.国网江苏省电力有限公司南京供电分公司,江苏 南京 210008;
2.河海大学电气与动力工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:针对谐振接地系统高阻故障定位易受不平衡分量与测量噪声干扰的难题,提出一种基于虚拟电容动态极性判据与有限脉冲响应滤波器的故障定位方法。该方法通过理论分析高阻故障暂态机理,揭示零序网络并联谐振主导的暂态过程,构建故障点上下游虚拟电容的极性-幅值双判据,利用其符号差异实现故障区段初筛。结合差分滤波器与滑动累加滤波器,分别提取零序电压与电流的故障分量,抑制工频不平衡分量与高频噪声干扰,并通过动态极性判据融合特征,增强故障信号鲁棒性。进一步设计递推定位算法,结合自适应阈值剔除机制,实现复杂工况下的精准定位。仿真结果表明,所提方法在不同过渡电阻、故障初相角及强噪声环境下均能准确定位,且对不平衡分量具有完全鲁棒性。

关键词:谐振接地系统;高阻故障;零序故障特征;虚拟电容动态极性;故障定位
中图分类号:TM73 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-9904(2026)04-0041-14

Resonant Grounding System High Impedance Fault Location Method Based on Virtual Capacitance Dynamic Polarity Criterion and FIR Filter

ZHANG Ming[1], LU Min[1], ZHANG Xin[1], ZHAO Chenxin[2]
(1.State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China;
2.College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: To address the challenge of locating high-impedance fault in resonant grounding systems, which are susceptible to unbalanced components and measurement noise interference, a fault location method based on virtual capacitance dynamic polarity criteria and Finite Impulse Response (FIR) filters is proposed.Through a theoretical analysis of high-impedance fault transient mechanisms, the method reveals a transient process dominated by zero-sequence network parallel resonance. It establishes dual polarity-amplitude criteria for virtual capacitance at upstream/downstream fault points, utilizing their sign differences for preliminary fault section screening.By combining differential filters with sliding accumulation filters, the method extracts fault components of zero-sequence voltage and current, respectively, suppressing power-frequency imbalance and high-frequency noise. The dynamic polarity criterion enhances signal robustness through feature fusion. A recursive location algorithm with an adaptive threshold elimination mechanism is further designed to achieve precise positioning under complex operating conditions. Simulation results demonstrate that the proposed method achieves accurate location across various transition resistances, fault inception angles, and strong noise environments, while maintaining complete robustness against unbalanced components.

Keywords: resonant grounding system; high impedance fault; zero-sequence fault characteristics; virtual capacitance dynamic polarity; fault location

0 引言

配电网作为电力系统与用户侧的直接连接枢

基金项目:国网江苏省电力有限公司重点科技项目(J2024064)。
Key Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Company(J2024064)

纽,其安全稳定运行对供电可靠性至关重要。中性点谐振接地系统凭借其优异的灭弧能力与低故障电流特性,在我国中压配电网中广泛应用[1]。然而,高阻故障(high impedance fault,HIF)因其过渡电阻高(数百至数千欧姆)、故障电流微弱且伴随非线性电弧特征,成为配电网故障检测与定位的难点[2]。据统计,高阻故障占配电网接地故障总数的10%以上[3],常由树木接触、绝缘老化或地表介质(如沙土、水泥)引发,若不及时定位隔离,可能引发火灾或演变为相间短路,严重威胁电网安全[4]。尤其在新能源高渗透的背景下,分布式电源接入导致三相电流分布复杂化[5],进一步加剧了高阻故障定位的挑战[6]。

现有高阻故障定位方法主要基于稳态分量、暂态分量与行波信号3类。基于稳态分量的方法(如谐波法[7-9]、负序电流法[10-11])依赖故障后的工频特征,但消弧线圈的补偿作用会显著抑制零序电流幅值,导致其在过渡电阻超过1 kΩ时灵敏度急剧下降。例如,5次谐波法[12-13]受限于谐波含量低且易受背景干扰,而负序电流法则对系统三相不平衡度敏感,误判率较高。基于暂态分量的方法通过捕捉故障初始阶段的暂态谐振特征实现定位,如首半波法[14-15]、暂态能量法[16]等。然而,暂态信号衰减快、频带宽,且受线路分布参数与故障初相角影响显著,现有方法在强噪声或不平衡分量干扰下易失效。文献[17]提出利用相电流突变方向进行选线,但未解决高阻故障暂态能量微弱导致的特征提取难题。行波法[18-19]虽具有高抗阻能力,但依赖高频信号采集设备与精确时间同步,成本高且难以适应复杂分支网络。此外,人工智能方法(如神经网络[20]、支持向量机[21-22])虽在模式识别中表现优异,但其泛化能力受训练样本限制,且算法复杂度高,难以满足边缘设备的实时性需求。

针对上述问题,提出一种基于虚拟电容动态极性判据与有限脉冲响应滤波器的谐振接地系统高阻故障定位方法。首先,通过理论分析高阻故障暂态机理,揭示零序网络中并联谐振主导的暂态过程,构建故障点上下游虚拟电容的极性-幅值双判据,利用其符号差异实现故障区段初筛。其次,设计差分滤波器与滑动累加滤波器组合的有限长单位冲激响应(finite impulse response,FIR)滤波架构,分别提取零序电压与电流的故障分量,抑制工频不平衡与高频噪声干扰,并通过虚拟电容动态极性判据融合故障特征和滑动累加滤波器增强故障特征鲁棒性。进一步地,提出基于符号-幅值双判据的递推定位算法,结合故障测度计算与阈值自适应剔除机制,实现复杂工况下的精准定位。

1　理论分析

1.1　高阻故障暂态机理分析

图1为一种包含分布式电源(distributed generation,DG)的谐振接地系统网络结构。高压侧通过110 kV/10.5 kV的降压变压器T_1连接至配电网,母线侧通过馈线l_1—l_n连接△/Y降压变压器与用户侧相连,消弧线圈则通过接地变压器T_2连接至母线。由于与DG连接的降压变压器高压侧为△接线,DG产生的零序电流会在△侧形成环流,并不会流入配电网,因此DG的接入并不会改变配电网零序电流分布[23]。

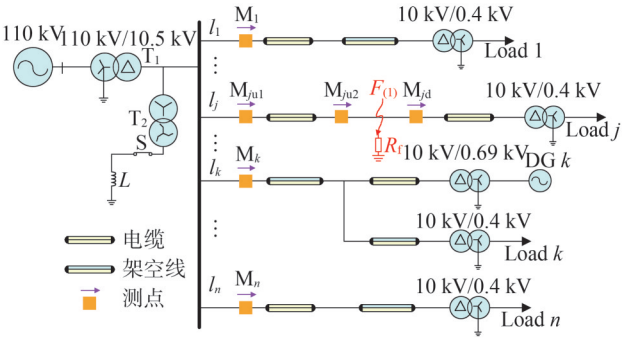


图1　含有分布式电源的谐振接地系统配电网拓扑

Fig.1 Distribution network topology of resonant grounding system with distributed generation

在馈线l_j的F处发生了HIF,过渡电阻为R_f。为更好地讨论在HIF发生后配电网中的电气量分布,在健全馈线l_k首端安放测点,记为M_k,在故障馈线首端、故障点上游和故障点下游分别安放测点,记为M_{ju1},M_{ju2},M_{jd}。

对于低阻故障来说,其主谐振过程被认为是三序网之间的串联谐振[24],其谐振频率在350 Hz以上,远高于工频,因此消弧线圈的零序电流被抑制,可视为开路。然而在HIF发生时,三序网中串联了3倍过渡电阻$3R_f$,三序网之间串联谐振被抑制,此时

的暂态过程则以零序网络中消弧线圈电感与馈线对地电容之间的并联谐振为主导[1]。因此，HIF条件下馈线的零序电阻与电感可以忽略不计，故障点等效为虚拟电压源与$3R_f$串联后接入零序网络，而正/负序阻抗因远小于$3R_f$可忽略。

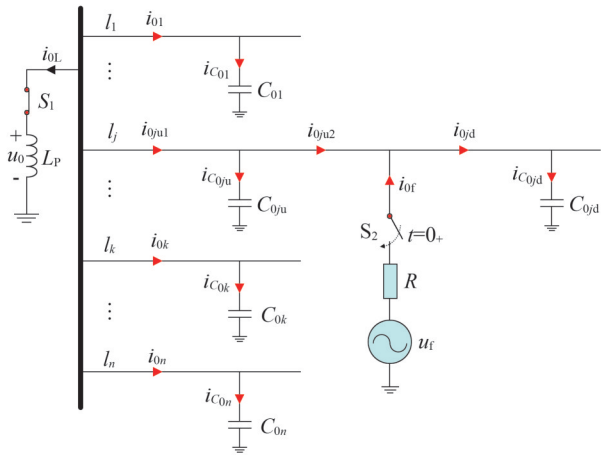


图2　谐振接地系统零序等效网络

Fig.2 Zero-sequence equivalent network of resonant grounding system

HIF发生后，图1对应的零序等效网络如图2所示。图中，$u_f=-U_m\sin(\omega_0 t+\theta)$为故障相虚拟电压，$U_m$为故障相虚拟电压幅值，$\omega_0$为工频角频率，$\theta$为故障初相角。$R\approx 3R_f$为等值电阻，$L_p$为消弧线圈零序电感，$C_{0k}$为健全馈线$l_k$对地电容，$C_{0j}$和$C_{0jd}$分别为故障馈线故障点上游和下游对地电容，则故障馈线l_j的对地电容为$C_{0j}=C_{0ju}+C_{0jd}$，$C_0=\sum_{i=1}^{n}C_{0i}$为所有馈线对地电容之和。u_0为母线零序电压，i_{0L}为消弧线圈零序电流，i_{0f}为故障点零序电流，i_{0k}为健全馈线l_k零序电流，i_{0ju1}，i_{0ju2}，i_{0jd}分别为故障馈线l_j首端、故障点上游和故障点下游的零序电流。

在$t=0_+$时刻发生了HIF，S_2闭合，系统发生了由独立源u_f激励引发的零状态响应，消弧线圈的零序电流和馈线对地电容电压在$t=0_+$时刻不能突变。因此可得由零序网络结构建立的微分方程和初始条件为

$$\begin{cases} RL_pC_0\dfrac{d^2i_{0L}}{dt^2}+L_p\dfrac{di_{0L}}{dt}+Ri_{0L}=-u_f \\ i_{0L}(0_+)=0 \\ \dfrac{di_{0L}}{dt}\Big|_{t=0_+}=0 \end{cases} \tag{1}$$

解式(1)给出的微分方程，可得两个特征根p_1，p_2为

$$p_{1,2}=-\frac{1}{2RC_0}\pm\sqrt{\left(\frac{1}{2RC_0}\right)^2-\frac{1}{L_pC_0}} \tag{2}$$

根据R取值的不同，系统会呈现出过阻尼、临界阻尼、欠阻尼3种状态，HIF的过渡电阻R_f阻值通常为几百到上千欧姆，系统一般呈现为欠阻尼状态。对处于欠阻尼状态下的系统，其满足

$$R>\frac{1}{2}\sqrt{\frac{L_p}{C_0}} \tag{3}$$

因此式(2)的特征根可表示为

$$p_{1,2}=-\frac{1}{2RC_0}\pm j\sqrt{\frac{1}{L_pC_0}-\left(\frac{1}{2RC_0}\right)^2}=-\lambda\pm j\omega_f \tag{4}$$

式中：λ为衰减因子；ω_f为系统的暂态谐振频率。

在欠阻尼条件下，解式(1)给出的微分方程，可得到消弧线圈零序电流如式(5)所示。

$$\begin{aligned} i_{0L}=&-\frac{U_m}{Z}\sin(\omega_0 t+\theta-\varphi)+ \\ &e^{-\lambda t}\left[M_1\sin(\omega_f t)+N_1\cos(\omega_f t)\right] \end{aligned} \tag{5}$$

其中，

$$\begin{cases} M_1=-\dfrac{U_m}{Z\omega_f}\left[-\lambda\sin(\theta-\varphi)-\omega_f\cos(\theta-\varphi)\right] \\ N_1=\dfrac{U_m}{Z}\sin(\theta-\varphi) \\ Z=\sqrt{(-RL_pC_0\omega_0^2+R)^2+(\omega_0L_p)^2} \\ \varphi=\arctan\left(\dfrac{\omega_0L_p}{R-RL_pC_0\omega_0^2}\right) \end{cases} \tag{6}$$

母线零序电压为

$$\begin{aligned} u_0=L_p\frac{di_{0L}}{dt}=&\frac{\omega_0L_pU_m}{Z}\sin\left(\omega_0 t+\theta-\varphi-\frac{\pi}{2}\right)+ \\ &L_pe^{-\lambda t}\begin{bmatrix}(-\lambda M_1-\omega_f N_1)\sin(\omega_f t)+\\(-\lambda N_1+\omega_f M_1)\cos(\omega_f t)\end{bmatrix} \end{aligned} \tag{7}$$

健全馈线l_k首端零序电流为

$$\begin{aligned} i_{0k}=&\frac{C_{0k}}{C_0}\cdot C_0\frac{du_0}{dt} \\ =&\frac{\omega_0^2U_mC_{0k}L_p}{Z}\sin(\omega_0 t+\theta-\varphi)+ \\ &C_{0k}L_pe^{-\lambda t}\begin{bmatrix}((\lambda^2-\omega_f^2)M_1+2\lambda\omega_fN_1)\sin(\omega_f t)+\\((\lambda^2-\omega_f^2)N_1-2\lambda\omega_fM_1)\cos(\omega_f t)\end{bmatrix} \end{aligned} \tag{8}$$

故障馈线l_j始端零序电流为

$$i_{0ju1} = -\frac{C_0 - C_{0j}}{C_{0k}} i_{0k} - i_{0L} \tag{9}$$

故障点上游零序电流为

$$i_{0ju2} = -\frac{C_0 - C_{0jd}}{C_{0k}} i_{0k} - i_{0L} \tag{10}$$

故障点下游零序电流为

$$i_{0jd} = \frac{C_{0jd}}{C_{0k}} i_{0k} \tag{11}$$

从以上的分析中可得出以下结论：

1)健全馈线 l_k 首端零序电流为馈线本身对地电容电流；故障点下游零序电流为故障点下游馈线对地电容电流。两者皆只含有容性分量。

2)故障馈线 l_j 首端零序电流为各健全馈线对地电容电流与消弧线圈电感电流之和；故障点上游零序电流为故障馈线 l_j 首端零序电流与故障点上游对地电容电流之和。两者除了含有容性分量外还含有感性分量。

1.2　基于虚拟电容动态极性的判据

电容 C 两端电压 u_C 与流过电流 i_C 之间满足式(12)所示微分方程。

$$i_C = C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} \tag{12}$$

对式(12)等式两端积分并移项，可得

$$C = \frac{\int i_C \mathrm{d}t}{\int \mathrm{d}u_C} \tag{13}$$

式(13)表明了 u_C 与 i_C 之间的积分关系。

定义测点 M_s 处的虚拟电容为

$$V_s^{\mathrm{M}} = \frac{\int i_s^{\mathrm{M}} \mathrm{d}t}{\int \mathrm{d}u_s^{\mathrm{M}}} \tag{14}$$

式中：上标 M 表示测点；下标 s 为测点下标；u_s^{M}，i_s^{M} 分别为测点 M_s 所测得的零序电压和零序电流。

表 1 总结了各测点虚拟的电容动态极性。对于测点 M_s 来说，$V_s^{\mathrm{M}}\big|_{\tau\to+\infty}$ 的值都为正，数值上也无法显示差异性，而 $V_s^{\mathrm{M}}\big|_{\tau\to 0_+}$ 在健全馈线和故障点下游为正，在故障馈线首端和故障点上游为负，表现出符号上的差异。在数值关系上，满足式(15)。

$$\begin{aligned} V_{ju2}^{\mathrm{M}}\big|_{\tau\to 0_+} &= V_{ju1}^{\mathrm{M}}\big|_{\tau\to 0_+} - \frac{C_{0ju}}{C_{0jd}} V_{jd}^{\mathrm{M}} \\ &= -\sum\nolimits_{k=1,k\neq j}^{n} V_k^{\mathrm{M}} - \frac{C_{0ju}}{C_{0jd}} V_{jd}^{\mathrm{M}} \end{aligned} \tag{15}$$

在幅值关系上则满足式(16)。

$$\left|V_{ju2}^{\mathrm{M}}\big|_{\tau\to 0_+}\right| > \left|V_{ju1}^{\mathrm{M}}\big|_{\tau\to 0_+}\right| \gg \left\{\left|V_k^{\mathrm{M}}\right|, \left|V_{jd}^{\mathrm{M}}\right|\right\} \tag{16}$$

表1　各测点虚拟电容动态极性

Table 1 Dynamic polarity of virtual capacitance at each measurement point

V_s^{M}	值	符号
V_k^{M}	C_{0k}	+
V_{jd}^{M}	C_{0jd}	+
V_{ju1}^{M}	$-(C_0 - C_{0jd}), \tau\to 0_+$	$-, \tau\to 0_+$
	$\left[1-(C_0 - C_{0j})L_p\omega_0{}^2\right]/L_p\omega_0{}^2, \tau\to+\infty$	$+, \tau\to+\infty$
V_{ju2}^{M}	$-(C_0 - C_{0j}), \tau\to 0_+$	$-, \tau\to 0_+$
	$\left[1-(C_0 - C_{0jd})L_p\omega_0{}^2\right]/L_p\omega_0{}^2, \tau\to+\infty$	$+, \tau\to+\infty$

基于上述分析，在 $\tau\to 0_+$ 附近的 V_s^{M} 可作为判别故障馈线与健全馈线、故障点上游区段与下游区段的核心判据。通过系统分析 V_s^{M} 在 $\tau\to 0_+$ 时呈现的幅值分布规律与极性变化特征，能够系统性地表征故障位置的空间关联特性，这为构建精确的故障区段辨识算法奠定了坚实的理论支撑。

该结论也可用物理学原理来解释：即在 HIF 发生的瞬间($t = 0_+$)，消弧线圈电感电流不能突变($i_{0L}\big|_{\tau\to 0_+} = 0$)，各馈线在故障初始时刻附近的零序电压与零序电流之间近似呈容性约束。而在各电气量进入稳态后($\tau\to+\infty$)，由于消弧线圈过补偿，故障馈线首端至故障点上游的零序电流与健全馈线的零序电流之间在幅值和相位上无明显差异，因此不能用作选线和定位的判据。

值得注意的是，高阻故障后故障点的电阻阻值往往是非线性变化，而故障初始时刻零序电压与零序电流之间存在的容性关系不变，因此该判据不受过渡电阻变化的影响。

虚拟电容实质上为测点处零序电压与零序电流之间的容性耦合特性，其幅值和极性反映了测点处容性零序电流的大小和方向，而非传统物理意义上的电容。

2　基于有限脉冲响应滤波器的故障特征提取

2.1　叠加定理的运用

在配电网运行过程中，系统中长期存在的不平

衡零序电压和零序电流与故障特征的混叠现象会对信号特征的提取造成干扰，进而提高误判率。这些不平衡的零序电压和零序电流主要由线路阻抗和导纳参数的三相不对称性引起，导致中性点电压偏移和不平衡零序电流的产生，其稳态震荡周期与工频同步。当HIF发生时，系统会经历由独立源 u_{f} 激发的零状态响应，此时的不平衡零序电压和零序电流由各馈线对地电容和消弧线圈并联谐振及工频震荡产生，从而忽略馈线零序阻抗的影响。根据叠加定理，由线路阻抗三相参数不对称产生的零序电压和零序电流与HIF发生后产生的零序故障信号之间相互独立，两者间存在线性叠加关系。

HIF产生的零序故障信号微弱，易被测量噪声掩盖。而零序测量噪声由互感器的三相测量误差产生，与零序电压和零序电流的真实值之间并无直接关系。因此，可认为零序测量噪声与零序电气量的真实值之间相互独立，两者间存在线性叠加关系。

综上所述，HIF产生的零序电气量与系统不对称产生的零序电气量以及零序测量噪声三者之间相互独立，呈线性叠加关系。

零序电压测量值为

$$u_0^{\mathrm{m}} = u_0^{\mathrm{f}} + u_0^{\mathrm{ib}} + u_0^{\mathrm{noise}} \tag{17}$$

式中：u_0^{m} 为零序电压测量值；u_0^{f} 为零序电压故障分量真实值；u_0^{ib} 为零序电压不平衡分量真实值；u_0^{noise} 为零序电压测量噪声。

零序电流测量值为

$$i_0^{\mathrm{m}} = i_0^{\mathrm{f}} + i_0^{\mathrm{ib}} + i_0^{\mathrm{noise}} \tag{18}$$

式中：i_0^{m} 为零序电流测量值；i_0^{f} 为零序电流故障分量真实值；i_0^{ib} 为零序电流不平衡分量真实值；i_0^{noise} 为零序电流测量噪声。

2.2　基于差分滤波器的零序电压故障分量特征提取

零序电压中存在的不平衡分量会影响故障起始时刻的判别和故障特征提取的准确性，因此需要剔除。

差分滤波器是一种特殊的FIR滤波器，对于离散采样序列 $x(r)$，其输出公式为

$$X_{\mathrm{D}}(r) = x(r) - x(r-N) \tag{19}$$

式中：r 为离散序列编号；N 为窗口长度；$X_{\mathrm{D}}(r)$ 为差分滤波器输出值。

若窗口长度 N 在连续时间序列中为一个工频周期 $T_{\mathrm{nor}} = 2\pi/\omega_{\mathrm{nor}} = 1/f_{\mathrm{nor}}$，则 $N = f_{\mathrm{s}}/f_{\mathrm{nor}}$，$f_{\mathrm{s}}$ 为采样频率，f_{nor} 为工频。关于实际频率 f 的幅频特性为

$$\left|H_{\mathrm{D}}(f)\right| = 2\left|\sin\left(\pi f/f_{\mathrm{nor}}\right)\right| \tag{20}$$

图3展示了差分滤波器的幅频特性曲线。由式(20)可知 $\left|H_{\mathrm{D}}(f)\right|$ 在 $f_0 = k_1 f_{\mathrm{nor}}(k_1 = 0,1,...,N-1)$ 处存在零点，意味着频率为 $k_1 f_{\mathrm{nor}}$ 的信号被完全抑制。

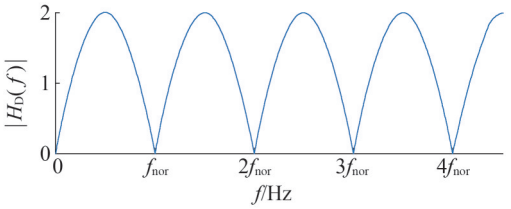


图3　差分滤波器幅频特性曲线

Fig.3 Amplitude-frequency characteristic curve of differential filter

对零序电压测量值 u_0^{m} 使用实际窗口长度为一个工频周期 T_{nor} 的差分滤波器，则其输出值 $u^{\mathrm{out}}(r)$ 为

$$\begin{aligned} u^{\mathrm{out}}(r) &= u_0^{\mathrm{m}}(r) - u_0^{\mathrm{m}}(r-N) \\ &= \left[u_0^{\mathrm{f}}(r) - u_0^{\mathrm{f}}(r-N)\right] + \\ &\quad \left[u_0^{\mathrm{noise}}(r) - u_0^{\mathrm{noise}}(r-N)\right] \end{aligned} \tag{21}$$

由式(21)可知，零序电压输出值已没有不平衡电流及其高次谐波的影响，但仍然无法分离测量噪声。若故障时刻采样点设为 r_{start}，且忽略测量噪声的影响，则差分滤波器输出值 $u^{\mathrm{out}}(r)$ 为

$$u^{\mathrm{out}}(r) \approx \begin{cases} 0 & ,r < r_{\mathrm{start}} \\ u_0^{\mathrm{f}}(r) & ,r_{\mathrm{start}} \leqslant r \leqslant r_{\mathrm{start}} + N \end{cases} \tag{22}$$

由式(22)可知，通过差分滤波器的处理，尽管无法分离测量噪声，但不平衡电压及其高次谐波已被有效剔除，从而成功提取了故障后一个工频周期 T_{nor} 内的零序电压故障分量 u_0^{f}。

2.3　基于滑动累加滤波器的零序电流故障分量特征提取

在零序电流中，不平衡分量与测量噪声的存在将显著影响故障特征的提取。因此，需设计一种滤波器以排除这些不平衡分量并抑制测量噪声的影响。

滑动累加滤波器是一种基本的FIR滤波器，通常用于平滑信号、去除噪声或抑制高频成分。对于

离散采样序列$x(r)$,其输出公式为

$$X_1(r)=\sum_{k_1=0}^{N-1}x(r-k_1) \tag{23}$$

式中:$X_1(r)$为滑动累加滤波器输出值。

若窗口间隔数N在连续时间序列中为一个工频周期$T_{nor}=2\pi/\omega_0=1/f_{nor}$,则$N=f_s/f_{nor}$。关于实际频率$f$的幅频特性为

$$\left|H_1(f)\right|=\left|\frac{\sin\left(\pi f/f_{nor}\right)}{\sin\left(\pi f/f_s\right)}\right| \tag{24}$$

图4展示了滑动累加滤波器的幅频特性曲线。与差分滤波器相同,$\left|H_1(f)\right|$也在$f_0=k_1f_{nor}$处存在零点,但不同的是,对于低频信号,滑动累加滤波器有接近N倍的增益,随着频率的增加,增益快速降低,从而达到提取低频信号特征,消除固定频率影响,抑制高频噪声的目的。

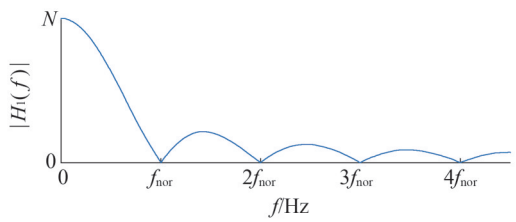


图4　滑动累加滤波器幅频特性曲线

Fig.4 Amplitude-frequency characteristic curve of sliding accumulative filter

对零序电流测量值i_0^m使用实际窗口长度为一个工频周期T_n的差分滤波器,则其输出值$I^{sum}(r)$为

$$\begin{aligned}I^{sum}(r)&=\sum_{k_1=0}^{N-1}i_0^m(r-k_1)\\&=\sum_{k_1=0}^{N-1}i_0^f(r-k_1)+\sum_{k_1=0}^{N-1}i_0^{noise}(r-k_1)\end{aligned} \tag{25}$$

根据式(25)的分析,经过滑动累加滤波器的处理,输出值$I^{sum}(r)$已经消除了不平衡电流及其高次谐波的干扰。测量噪声分量i_0^{noise},其频率分布覆盖了整个频带,经滑动累加滤波器处理后,由于滑动累加滤波器增益随频率的衰减特性,其高频部分被有效抑制,从而与低频特征信号之间形成了显著的幅值差异。假设故障时刻的采样点为r_{start},并且在忽略测量噪声影响的前提下,滑动累加滤波器的输出值$I^{sum}(r)$可表示为

$$I^{sum}(r)\approx\begin{cases}0 & ,r<r_{start}\\ \sum\limits_{k_1=r_{start}}^{r}i_0^f(k_1) & ,r_{start}\leqslant r\leqslant r_{start}+N\end{cases} \tag{26}$$

本环节通过滑动累加滤波器处理零序电流测量值i_0^m,对故障后一个工频周期内的零序电流故障分量i_0^f进行了特征的提取,同时抑制了测量噪声i_0^{noise},消除了不平衡电流i_0^{ib}的影响。

3　基于虚拟电容动态极性的故障特征融合

在第2章中,通过差分滤波器提取零序电压故障分量u_0^f得到输出值$u^{out}(r)$;通过滑动累加滤波器得到零序电流故障分量i_0^f的累加值,从而得到输出值$I^{sum}(r)$。由式(14)可得各测点在$0\leqslant\tau\leqslant T_{nor}$时的虚拟电容为

$$V_s^M(\tau)=\frac{\int_0^\tau i_s^M\mathrm{d}t}{u_s^M(\tau)} \tag{27}$$

因此得到离散采样下的虚拟电容$V'(r)$为

$$V'(r)=\frac{I^{sum}(r)}{u^{out}(r)},r_{start}\leqslant r\leqslant r_{start}+N \tag{28}$$

考虑到离散采样以及测量噪声影响的数值准确性,除法会产生大数除以极小数的数值问题,同时$r<r_{start}$的滤波结果并未利用,因此将式(28)结果中的除法改为乘法,并将i的取值范围扩展到$r<r_{start}$,得到改进后的虚拟电容$V^{imp}(r)$为

$$\begin{aligned}V^{imp}(r)&=u^{out}(r)I^{sum}(r)\\&\approx\begin{cases}0 & ,r<r_{start}\\ u_0^f(r)\sum\limits_{k_1=i_{start}}^{r}i_0^f(k_1) & ,r_{start}\leqslant r\leqslant r_{start}+N\end{cases}\end{aligned} \tag{29}$$

由于$u^{out}(r)$的值对于各测点近似相等,而$V'(r)$幅值大小取决于$I^{sum}(r)$的大小,因此除法变乘法并不改变原有的符号和幅值特征,1.2节中的结论仍然适用。

鉴于在$u^{out}(r)$中仅消除了不平衡电流的干扰,而未排除测量噪声的影响,$V(r)$中依然存在由$u^{out}(r)$引起的噪声污染。而在HIF的早期阶段,故障信号较为微弱,需要对$V^{imp}(r)$的特征进行强化。因此,$V^{imp}(r)$须借助滑动累加滤波器以滤除噪声并强化信号特征,进而获得输出值$V^{out}(r)$为

$$V^{out}(r)=\sum_{k_1=0}^{N-1}V^{imp}(r-k_1) \tag{30}$$

4　故障测度提取与故障定位

4.1　故障测度的计算

零序电压测量值通过差分处理后，得到的输出值 u^{out} 中已无不平衡分量影响，可以作为故障测度计算的启动条件。启动条件为

$$u^{\text{out}} > \gamma U_{\text{p}} \tag{31}$$

式中：γ 为可靠系数，一般取 0.05；U_{p} 为额定相电压。

当 u^{out} 满足式(31)的电压越限条件时，算法启动并向前回溯故障发生时刻所对应的采样点 r_{start}，然后判断 V^{out} 在故障初始时刻的极性，采用试探法进行判断，获得试探值 P 为

$$P = \sum_{r_{\text{start}} \leqslant r \leqslant r_{\text{start}} + N/4} V^{\text{out}}(r) \tag{32}$$

若 $P > 0$，则计算故障后一个工频周期内 $V^{\text{out}}(r)$ 所有正值的和，得到故障测度 D 为

$$D = \sum_{\substack{V^{\text{out}}(r) > 0 \\ r_{\text{start}} \leqslant r \leqslant r_{\text{start}} + N}} V^{\text{out}}(r) \tag{33}$$

若 $P \leqslant 0$，则计算故障后一个工频周期内 V^{out} 所有负值的和，得到故障测度 D 为

$$D = \sum_{\substack{V^{\text{out}}(r) < 0 \\ r_{\text{start}} \leqslant r \leqslant r_{\text{start}} + N}} V^{\text{out}}(r) \tag{34}$$

故障测度的幅值反映了故障特征信号的强度，其符号则指示了故障特征的极性，其幅度-极性双重特性与虚拟电容动态极性判定标准相吻合。通过综合评估故障测度的幅值与极性，并结合虚拟电容动态极性判定标准，可以构建相应的定位算法，以实现对故障区段的准确判定。

图 5 为故障测度的计算流程。

4.2　定位算法

故障测度值 D 由 V^{out} 计算而来，显然在符号上满足：在故障馈线首端和故障点上游的测点故障测度 $D < 0$，在健全馈线和故障点下游的测点故障测度 $D > 0$。考虑到健全馈线和故障点下游的测点零序电流相对较小，受测量噪声的影响可能会存在试探值 $P < 0$ 的情况，因此通过以符号为主的判据可靠性不足，需要通过幅值判据进行辅助。由式(16)可知，故障点上游的测点越靠近故障点 V^{out} 的幅值越大，且远远大于健全馈线和故障点下游的测点。尽管噪声干扰导致健全馈线及故障点下游的测量点出现极性提取错误的情况，但由于健全馈线及故障点下游测量点虚拟电容固有的符号属性，V^{out} 的波形在短暂的负值后迅速转变为正值。因此，在此情形下故障测度的符号虽为负，但其幅值相对较小，通过设定特定阈值即可有效排除异常值。

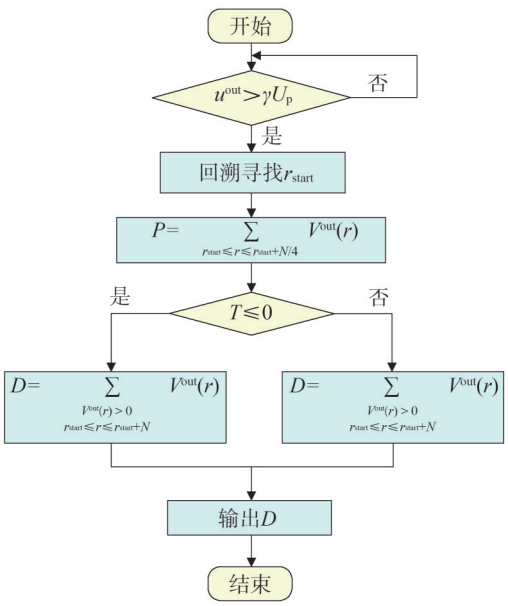


图 5　故障测度计算流程

Fig.5 Fault Measurement Calculation Process

综合以上分析，提出以故障测度 D 的符号为主，幅值为辅的故障定位算法：

步骤 1)：判断各馈线首端故障测度 D 是否符号都为正。若都为正，则判断为母线故障，若存在负值，则判断为馈线故障。

步骤 2)：选取 $\min\{D_k\}$ 测点所在的馈线直接判定为故障馈线，并与该测点下游的测点依次比较，若 $D_\gamma > 0.5 \min\{D_k\}$，则判断该测点为故障点下游，故障位置则判定为该测点与上游相邻测点之间。若馈线末端的测点仍然有 $D_\gamma < 0.5 \min\{D_k\}$，则判断故障位置在该测点下游至馈线末端之间。

5　仿真验证

利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建 10.5 kV 谐振接地系统仿真模型，如图 6 所示。电缆线路采用 YJV22-3×400 型号，架空线路采用 JKLYJ-150 型号。消弧线圈过补偿 5%，消弧线圈电感 L=

0.58 H。不同的单相接地短路故障点分别记为 F_1—F_3。在馈线 l_1 和 l_2 首端分别设置测点 M_1 和 M_4,用于故障选线;在馈线 l_1 分支馈线首端设置测点 M_2 和 M_3,用于故障定位。仿真采样频率为 10 kHz,因此窗口长度 N=200。

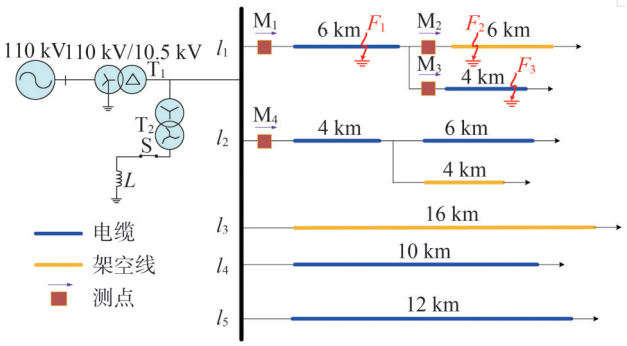


图6　10 kV配电网仿真模型

Fig.6 10 kV distribution network simulation model

5.1　虚拟电容动态极性判据验证

在图 6 故障点 F_2 处 A 相发生了过渡电阻为 1 000 Ω,故障初相角为 90°的单相接地短路故障,故障时刻为 0.225 s。各测点采集零序电压 u_0^m 和零序电流 i_0^m 经图 5 所示算法处理后的输出 V^{out} 波形如图 7 所示。

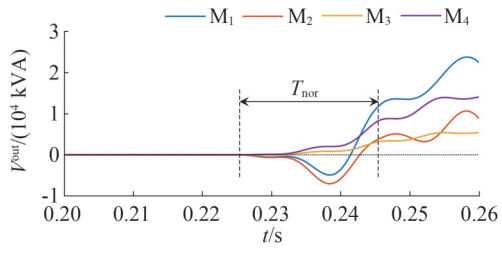


图7　V^{out} 波形

Fig.7 Waveform of V^{out}

如图 7 所示,在故障发生前,各测点的 V^{out} 值为 0;在故障发生后一段时间内,M_3 和 M_4 的 V^{out} 的值为正,M_1 和 M_2 的 V^{out} 值为负。随着故障的进一步发展,各测点的 V^{out} 值都为正,无法辨别差异性。分别计算各测点的故障测度,如图 8 所示,M_1 和 M_2 所对应的故障测度为负,且 $D_2 > D_1$,符合表 1 和式(16)的结论;M_3 和 M_4 所对应的故障测度为正,由选线与定位算法判断故障位置在 M_2 下游。

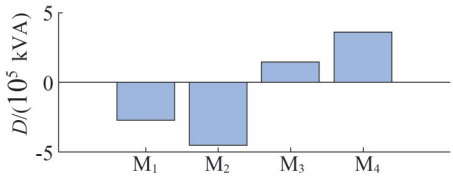


图8　各测点的故障测度

Fig.8 Fault measurement at each measurement point

表2　不同故障工况下的定位结果

Table 2 Positioning results under different fault conditions

故障位置	R_f/Ω	θ/(°)	D/×10⁴kVA				定位结果
			M_1	M_2	M_3	M_4	
	1 200	135	−21.6	0.53	11.0	27.7	M_1–M_2
F_1	2 000	45	−4.4	0.32	6.1	15.4	M_1–M_2
	3 000	90	−3.8	0.13	2.0	5.1	M_1–M_2
	1 000	90	−27.0	−45.1	14.5	36.1	M_2下游
F_2	1 500	0	−13.7	−16.8	10.7	26.9	M_2下游
	2 500	45	−2.9	−6.0	4.1	10.3	M_2下游
	800	0	−41.3	1.5	−47.4	75.9	M_3下游
F_3	1800	90	−9.8	0.36	−13.5	13.1	M_3下游
	3 500	135	−3.0	0.08	−3.4	4.0	M_3下游

在 F_1—F_3 三个故障点设置不同的故障工况,包括不同的过渡电阻 R_f 和故障初相角 θ,以验证本文所提方法的性能,如表 2 所示。随着过渡电阻值的增加,故障测度 D 的幅值逐渐降低,且在故障点上游为负,在故障点下游和健全馈线均为正,这与式(15)和式(16)的理论分析结论一致。在排除不平衡分量和测量噪声干扰的条件下,本研究提出的方法在不同故障位置、不同过渡电阻和故障初相角下均能实现准确的故障定位,且故障测度的极性与幅值分布与表 1 结果完全一致。

5.2　不平衡分量影响验证

为探究不平衡分量对本文所提方法的影响,通过调整馈线的三相参数,人为制造三相参数的不平衡状态。在图 6 故障点 F_1 处,A 相发生了过渡电阻为 3 500 Ω 和故障初相角为 90°的单相接地短路故障,故障时刻为 3.016 s。如图 9(a)—图 9(b)所示,

在故障发生前，零序电压和各馈线的零序电流均表现出显著的不平衡分量。在故障发生时刻，由于不平衡分量的影响，故障分量的特征被不平衡分量掩盖，导致仅凭零序电压难以辨识故障发生时刻；零序电流不平衡分量幅值也大于故障分量，导致仅凭零序电流也难以准确辨识故障。如图9(a)所示，通过差分滤波器对零序电压处理后，不平衡电压被滤除，零序电压故障分量清晰展现。如图9(c)所示，不平衡零序电流被滑动累加滤波器滤除，成功提取了零序电流故障分量的累加值波形。图9(f)展示了各测点的故障测度，故障点上游测点的故障测度为负，故障点下游以及健全馈线测点的故障测度均为正，通过故障定位算法判断故障位置位于测点 M_1 和 M_2 之间，定位正确。

上述实验结果表明，本文方法对不平衡分量具有较强的鲁棒性。通过利用差分滤波器和滑动累加滤波器的幅频特性成功消除了不平衡分量的影响，即便在存在强不平衡分量的条件下，该方法依然能够准确提取故障特征，并成功实现故障定位。

5.3　耐测量噪声性能验证

为探究本研究方法对测量噪声的耐受能力，进行如下实验：在图6故障点 F_1 处，A相发生了过渡电阻为3 000 Ω和故障初相角为90°的单相接地短路故障，故障时刻为0.205 s。由于测量噪声对零序电压的影响较小，因此在零序电压中加入故障初始时刻一个工频周期内信噪比为45 dB的白噪声，如图10(a)所示；由于零序电流的测量噪声由三相负荷电流大小和互感器测量误差决定，而发生高阻故障时零序电流故障分量起振幅值很小，易被测量噪声掩盖，因此在各测点的零序电流中加入单位采样点噪声平均能量为1.05 A^2 的白噪声，各测点中，测点 M_1 信噪比最大，为4.04 dB。如图10(b)所示，各测点故

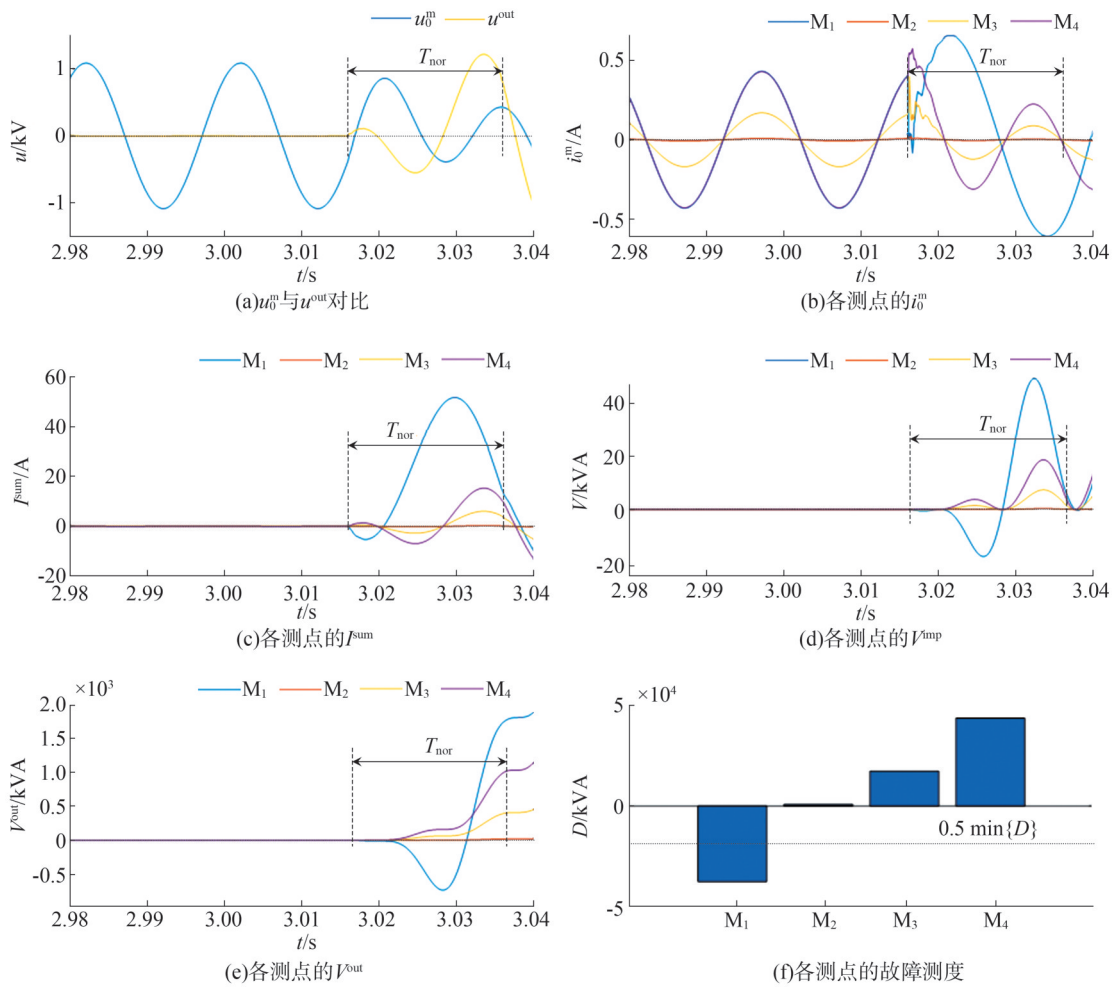


图9　不平衡分量对本方法的影响

Fig.9 The impact of the unbalanced components on this method

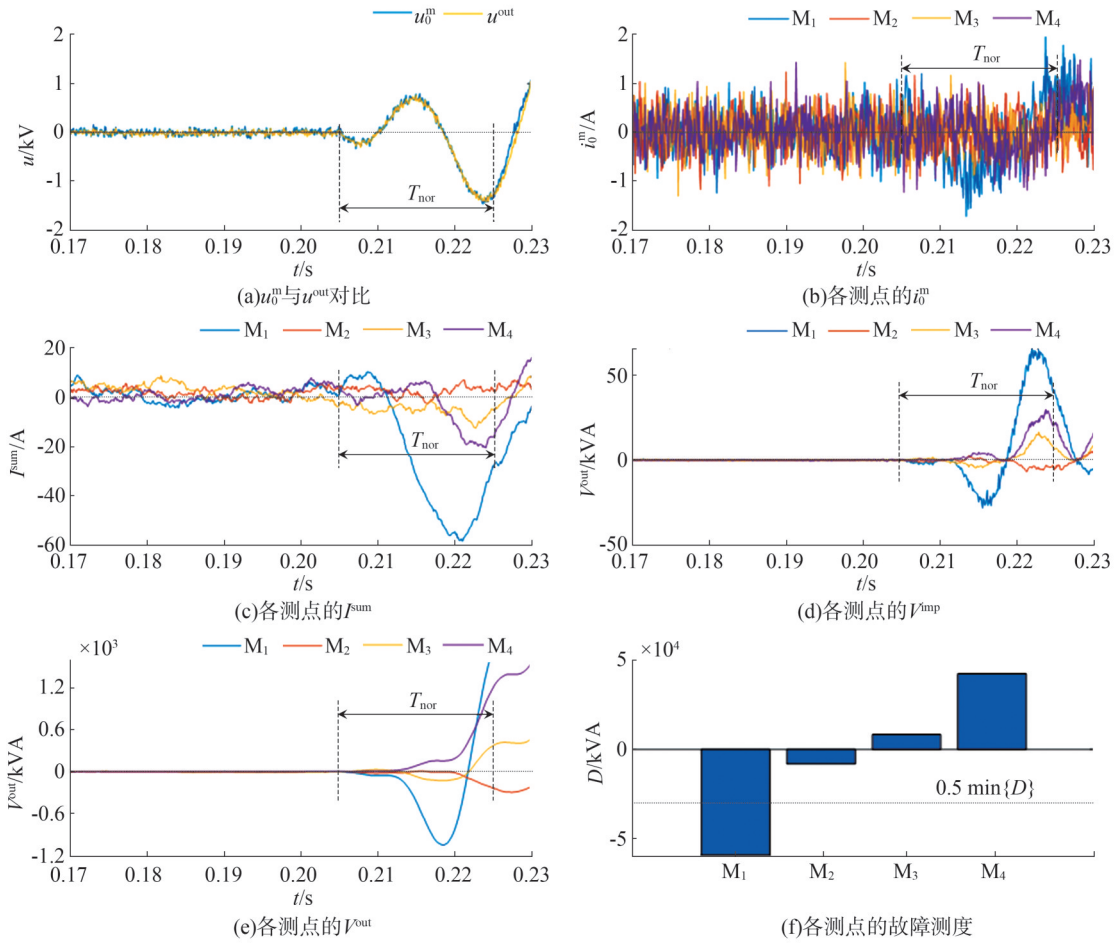


图10　测量噪声对本方法的影响

Fig.10 The impact of measurement noise on this method

障分量完全被测量噪声掩盖。

通过本文所提算法对测量值进行处理,最后输出的V^{out}波形如图10所示,由于测点M_1在故障点上游,零序电流故障分量幅值较大,信噪比较高,受测量噪声的影响相对较小,能够保持负极性。而故障点下游线路长度较短,零序电流幅值较小,因此在测量噪声的影响下可能无法保持正极性。如图10(f)所示,由于测点M_2的$P<0$,因此M_2的故障测度为负,但是其值仍然大于0.5 min{D},被定位算法阈值剔除,定位结果在测点M_1和M_2之间,定位正确。

在表2所示的故障工况的各测点零序电流中加入单位采样点噪声平均能量为1.05 A²的白噪声,取各测点零序电流信噪比最大值,将不同工况的各测点故障测度和定位结果展示在表3中。如表3所示,当过渡电阻小于3 500 Ω时,各含噪工况下的故障定位结果均正确,在过渡电阻为5 000 Ω,信噪比为1.84 dB的故障工况下仍能准确定位;当过渡电阻为6 000 Ω时,信噪比为−0.23 dB,此时噪声能量远大于信号能量,定位错误。因此本方法耐过渡电阻能力为5 000 Ω,抗噪声干扰能力为1.84 dB。

表3　测量噪声影响下不同故障工况的定位结果

Table 3 Localization results under different fault conditions with noise impact measurement

故障位置	R_f/Ω	θ/(°)	信噪比最大值/dB	D/×10⁴ kVA				定位结果
				M_1	M_2	M_3	M_4	
F_1	1 200	135	25.83	−22.5	−0.45	16.0	37.1	M_1-M_2
	2 000	45	12.15	−3.7	−0.04	−0.11	19.3	M_1-M_2
	3 000	90	4.04	−5.6	−0.63	0.74	4.2	M_1-M_2
F_2	1 000	90	30.5	−25.3	−49.5	13.7	34.1	M_2下游
	1 500	0	21.8	−14.4	−18.0	−0.18	35.2	M_2下游

续表

故障位置	R_f/Ω	θ/(°)	信噪比最大值/dB	D/×10⁴ kVA				定位结果
				M_1	M_2	M_3	M_4	
	2 500	45	11.03	−2.3	−9.1	7.6	4.2	M_2下游
	800	0	31.47	−41.3	2.1	−50.4	85.9	M_3下游
	1 800	90	17.8	−9.8	−0.30	−12.5	13.2	M_3下游
F_3	3 500	135	3.98	−2.6	1.2	−3.3	4.3	M_3下游
	5 000	45	1.84	−2.1	−1.5	−1.4	2.3	M_3下游
	6 000	0	−0.23	−1.3	−1.5	−0.9	1.4	M_2下游(×)

表4提供了本文方法在不同采样频率及不同噪声类别下的测试结果，可以看出：本文方法能够有效免疫高斯分布、指数分布和均匀分布等不同类型的噪声干扰，且本文方法对采样率下限要求较低，3 kHz采样率即可满足故障暂态分析技术要求。

表4　不同采样频率和不同噪声类型的测试结果

Table 4 Test results under different sampling frequencies and noise types

采样频率/kHz	噪声分布（R_f=3 000 Ω，3 dB）			
	高斯分布	指数分布	均匀分布	脉冲噪声+高斯噪声
0.5	×	×	×	×
1	×	×	×	×
3	√	√	√	√
5	√	√	√	√
10	√	√	√	√

5.4　不平衡分量与测量噪声综合测试

为探究本方法在既存在不平衡分量和测量噪声情况下的鲁棒性，以5.2节的故障工况为测试对

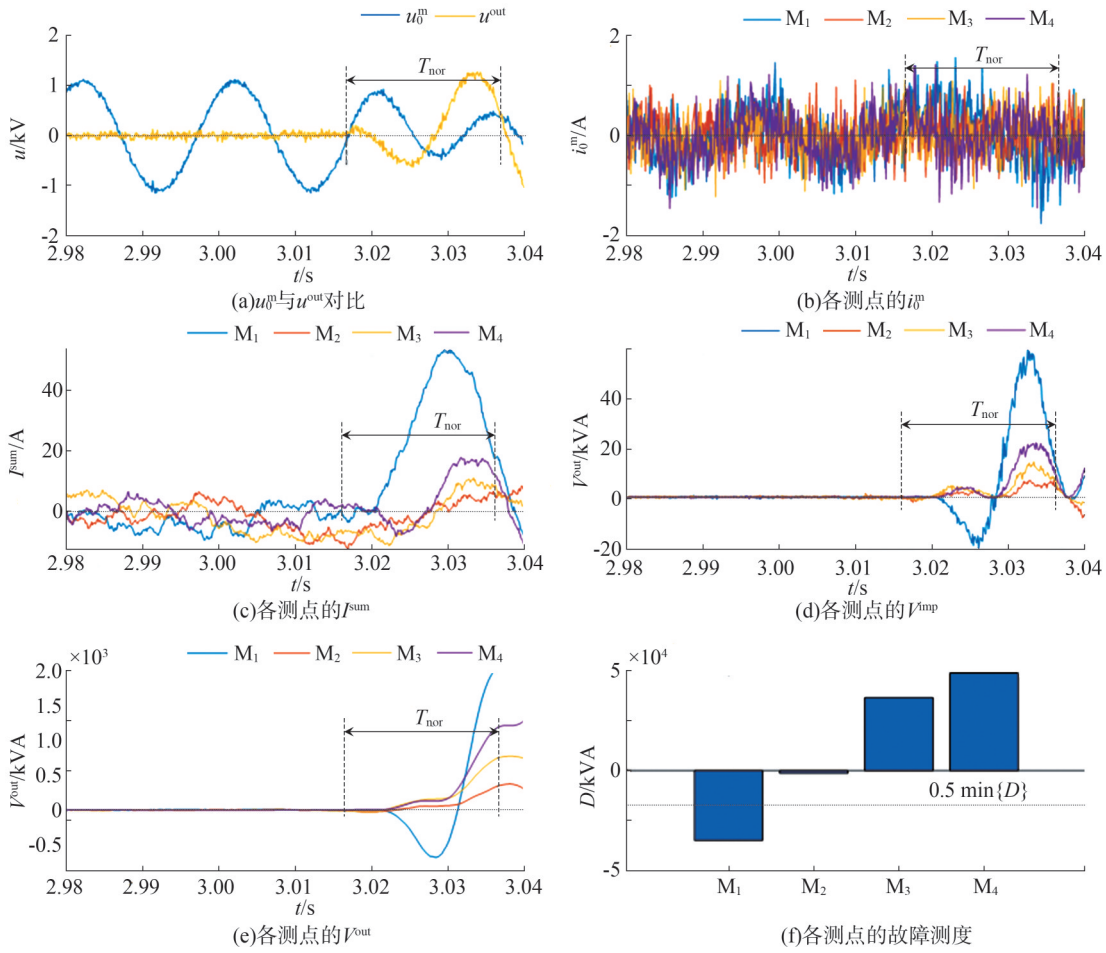


图11　不平衡分量与测量噪声对本方法的影响

Fig.11 The impact of unbalanced components and measurement noise on this method

象,零序电压中加入故障初始时刻一个工频周期内信噪比为53.7 dB的白噪声,如图11(a)所示;零序电流中加入单位采样点噪声平均能量为1.05 A^2的白噪声,如图11(b)所示,各测点中,测点M_1信噪比最大,为1.99 dB。根据图11(f)中各测点的故障测度,最终判断定位结果在测点M_1和M_2之间,定位正确。

以上测试结果表明,即使在不平衡分量幅值大于故障分量、信噪比低至1.99 dB的极端故障环境下,本方法仍然能够免疫干扰,准确实现故障定位,进一步验证了本方法在复杂环境下的适用性。

6　对比测试

文献[25]基于零序电压和电流的获取,提出了基于零序突变量的计算和修正方法,算法具有一定的抗噪声和不平衡分量的能力。

以5.4节的故障环境进行测试,依据文献内将故障后半个工频周期内的零序突变量幅值最大值作为代表,将各测点零序突变量展示在表5中。

表5　各测点的零序突变量

Table 4 Zero-sequence sudden variation at each measurement point

指标	M_1	M_2	M_3	M_4
零序突变量Y_0/×10^{-8}	−1.22	−0.31	0.42	−1.03

基于零序突变量的故障定位方法与本方法相似,即:零序突变量值为正,则故障点在该测点反方向;零序突变量为负,则故障点在该测点正方向。由表5所示,馈线l_1和l_2的首端测点M_1和M_4都为负,且幅值相近,无法进行故障选线和定位。该算法在不平衡分量较大和信噪比较低的情况下鲁棒性不佳的原因是,尽管算法采用最小二乘法对零序突变量进行数值逼近,但是零序突变量的计算方式为数值除法,这导致存在强噪声时数值稳定性不足;另外尽管该算法采用附加向量的方式减小故障前不平衡分量的影响,但是同时也会减弱故障特征,因此无法适应极端故障环境。而本方法在算法设计时就考虑了不平衡分量和测量噪声的影响,并且在计算虚拟电容时采用数值乘法而非数值除法,故障定位算法采用以极性为主、幅值为辅的综合判断,因此在极端故障环境下仍然有较高的数值稳定性和故障定位精度。

7　结束语

针对谐振接地系统高阻故障定位受不平衡分量与噪声干扰的难题,提出一种基于虚拟电容动态极性判据与FIR滤波器的故障定位方法。通过理论分析揭示了高阻故障暂态过程中零序网络并联谐振的主导特性,构建虚拟电容的极性-幅值双判据,结合差分滤波器与滑动累加滤波器有效分离故障分量,并通过递推定位算法与自适应阈值机制实现了复杂工况下的精准定位。仿真实验表明,该方法在过渡电阻(800~5 000 Ω)、不同故障初相角及强噪声(信噪比低至1.84 dB)环境下均能准确定位,且对不平衡分量具有完全鲁棒性。

但是,高阻故障信号特征微弱,仅凭单一判据可靠性仍然无法保证,为进一步提升定位精度与抗扰能力,未来可探索多判据深度融合机制,进一步扩展判据维度,为多源异构数据的融合提供支撑,推动故障定位技术向智能化、协同化方向演进。

参考文献

[1] 曾超,喻锟,曾祥君,等.并阻尼谐振接地系统对地参数测量与高阻故障选线新方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(4):67-76.
ZENG Chao, YU Kun, ZENG Xiangjun, et al.A new method for measuring ground parameters and selecting high resistance fault lines in parallel damping resonant grounding systems [J]. Power System Protection and Control,2024,52(4):67-76.

[2] 吴江雄,郑茂然,王欣,等.基于暂态零序导纳值的谐振接地系统单相接地故障选线方法[J].南方电网技术,2024,18(11):58-66.
WU Jiangxiong,ZHENG Maoran,WANG Xin,et al.Single-phase grounding fault line selection method for resonant grounding system based on transient zero-sequence admittance value [J]. Southern Power System Technology,2024,18(11):58-66.

[3] 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.

[4] 徐鑫森,徐习东,陈金玉,等.考虑三次谐波调制的柔直系统交流侧单相接地保护研究[J].浙江电力,2024,43(10):114-123.

XU Xinsen, XU Xidong, CHEN Jinyu, et al. Research on single-phase grounding fault protection on the AC side of VSC-HVDC systems considering third harmonic modulation [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(10): 114-123.

[5] 黄强,李宽,丁敬明,等.含分布式光伏接入的有源配电网故障区段定位新方法[J].山东电力技术,2023,50(11):68-74.
HUANG Qiang, LI Kuan, DING Jingming, et al. A novel fault section location method of active distribution network with the integration of distributed photovoltaic [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(11): 68-74.

[6] 韦明杰,余越,梁英,等.宽频信号在谐振接地有源配电网高阻故障选线中的应用[J].电力系统自动化,2023,47(19):166-176.
WEI Mingjie, YU Yue, LIANG Ying, et al. Application of broadband signal in high-resistance fault line selection of resonant grounded active distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 166-176.

[7] 刘渝根,王建南,马晋佩,等.结合小波包变换和5次谐波法的谐振接地系统综合故障选线方法[J].高电压技术,2015(5):1519-1525.
LIU Yugen, WANG Jiannan, MA Jinpei, et al. Comprehensive fault line selection method for resonant grounded system combining wavelet packet transform with fifth harmonic method [J]. High Voltage Engineering, 2015(5): 1519-1525.

[8] 韦明杰,石访,张恒旭,等.基于同步零序电流谐波群体比相的谐振接地系统高阻故障选线及区段定位方法[J].中国电机工程学报,2021,41(24):8358-8372.
WEI Mingjie, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Feeder selection and section location of high impedance fault at resonant networks based on the phase differences between the synchronous harmonics of the zero sequence currents [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8358-8372.

[9] LEE C J, PARK J B, SHIN J R, et al. A new two-terminal numerical algorithm for fault location, distance protection, and arcing fault recognition [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1460-1462.

[10] 郭谋发,林妙玉,杨耿杰.谐振接地系统暂稳态信息智能融合选线方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(7):60-66.
GUO Moufa, LIN Miaoyu, YANG Gengjie. The transient and steady-state information fusion method for single phase grounding line detection in resonant grounding system [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 60-66.

[11] 董俊,李一凡,束洪春,等.配电网馈出线路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.

[12] MANGUEIRA LIMA É, BRITO N S D, DE SOUZA B A, et al. Analysis of the influence of the window used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault detection [C]// 2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP). IEEE, 2016: 350-355.

[13] MACEDO J R, RESENDE J W, BISSOCHI C A Jr, et al. Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(16): 2593-2601.

[14] 牛纯春,陆晓东,章琦,等.基于波形特征的小电阻接地配电网高阻接地故障分析[J].浙江电力,2020,39(11):112-118.
NIU Chunchun, LU Xiaodong, ZHANG Qi, et al. Analysis of high resistance grounding fault of small resistance grounding distribution network based on waveform features [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(11): 112-118.

[15] 宋国兵,陈 锐,常仲学,等.边界主动构建式低压交流串联电弧故障检测方法[J].电力系统保护与控制,2025,53(22):65-76.
SONG Guobing, CHEN Rui, CHANG Zhongxue, et al. Boundary-active construction method for low-voltage AC series arc fault detection [J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(22): 65-76.

[16] 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.

[17] 白浩,庄清涛,顾育滨,等.基于相电流突变量积分系数的高阻接地故障选线新方法[J].制造业自动化,2023,45(9):5-10.
BAI Hao, ZHUANG Qingtao, GU Yubin, et al. A new integral coefficient method about high resistance grounding fault line selection based on the mutation of phase current [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(9): 5-10.

[18] 张惠娟,郑文龙,冯垚,等.基于行波法的谐振接地电网单相接地故障定位方法[J].电气应用,2015,34(15):68-71.
ZHANG Huijuan, ZHENG Wenlong, FENG Yao, et al. Single-phase grounding fault location method for resonant grounding power grid based on traveling wave method [J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(15): 68-71.

[19] 王建元,朱永涛,秦思远.基于方向行波能量的小电流接地系统故障选线方法[J].电工技术学报,2021,36(19):4085-4096.
WANG Jianyuan, ZHU Yongtao, QIN Siyuan. Fault line selection method for small current grounding system based on directional traveling wave energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4085-4096.

[20] 石鑫,刘奇央,高峰.深度神经网络在新型能源系统中的应用及

展望[J].综合智慧能源, 2025,47(2):88-101.
SHI Xin, LIU Qiyang, GAO Feng. Application and prospects of deep neural network in new energy systems [J]. Integrated Intelligent Energy, 2025,47(2):88-101.

[21] 邓丰,陈依林,曾哲,等.数据-知识联合驱动的配电网高阻接地故障检测方法[J].中国电机工程学报,2024,44(24):9618-9633.
DENG Feng, CHEN Yilin, ZENG Zhe, et al. Combined data-knowledge driven detection method for high impedance faults in distribution networks[J].Proceedings of the CSEE,2024,44(24):9618-9633.

[22] 王彬,赵来军,宋晓燕,等.利用暂态频段信息的谐振接地系统故障选线方法[J].机电工程技术,2023,52(11):240-245.
WANG Bin, ZHAO Laijun, SONG Xiaoyan, et al. Fault line selection method of resonant grounding system using transient frequency band information [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology,2023,52(11):240-245.

[23] 秦苏亚,薛永端,刘砾钲,等.有源配电网小电流接地故障暂态特征及其影响分析[J].电工技术学报,2022,37(3):655-666.
QIN Suya, XUE Yongduan, LIU Lizheng, et al. Transient characteristics and influence of small current grounding faults in active distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2022,37(3):655-666.

[24] 薛永端,薛文君,李娟,等.小电流接地故障暂态过程的LC谐振机理[J].电力系统自动化,2016,40(24):137-145.
XUE Yongduan, XUE Wenjun, LI Juan, et al. LC resonance mechanism of transient process of earth fault in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24):137-145.

[25] 李林,高厚磊,袁通,等.基于零序突变量的配电网单相接地故障检测与定位方法[J/OL].电力系统自动化,2025:1-13[2025-05-18]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=GWCpWhBv_VPMc-yxqAzII4_XDDH6DAYGrR_ueIh3WfVZhzQZm6OFDi2BwE58xhYVZPcx6VGTU2rKEpEHEaXwOAl7X7TD_-4DbQP5axoqsJRZH052Qia1Ccpk1GcKaEDHQ3kVRtVR7prYd8wbncQf-_MNAhr-Esw6OJsNRxsVcNQcVVTRsheReg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
LI Lin, GAO Houlei, YUAN Tong, et al. Detection and location method of single-phase-to-ground fault in distribution network based on zero-sequence transient fault component[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025:1-13[2025-05-18].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=GWCpWhBv_VPMc-yxqAzII4_XDDH6DAYGrR_ueIh3WfVZhzQZm6OFDi2BwE58xhYVZPcx6VGTU2rKEpEHEaXwOAl7X7TD_-4DbQP5axoqsJRZH052Qia1Ccpk1GcKaEDHQ3kVRtVR7prYd8wbncQf-_MNAhr-Esw6OJsNRxsVcNQcVVTRsheReg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

收稿日期:2025-05-20
修回日期:2025-08-22

作者简介:

张　明(1976),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,从事配网运营检修工作;

赵晨昕(2002),通信作者(865451413@qq.com),男,硕士在读,主要研究方向为配电网故障诊断。

(责任编辑　娄婷婷)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250515

考虑光储充放电站的配电网电压应急优化方法

赵 鑫[1],刘汉民[2],薄 博[3],杨 坡[3*],夏 华[4]
(1.国网冀北电力有限公司承德供电公司,河北 承德 067000;2.国网冀北清洁能源汽车服务(北京)有限公司,北京 100053;
3.国网冀北电力有限公司,北京 100054;4.国电南瑞南京控制系统有限公司,江苏 南京 211106)

摘要:新型电力系统背景下,电动汽车光储充放一体化电站的规模化接入使得配电网电压失稳风险显著加剧,尤其在失去主网供电的应急场景下,光伏出力与充放电站负荷功率的强不确定性进一步威胁系统安全。为此,本文面向失去主网供电的孤岛运行场景,提出一种考虑光储充放电站不确定性的配电网电压应急优化方法。首先,分别构建光储充放一体化电站光伏出力及负荷功率的概率模型。其次,基于协方差分析的全局灵敏度方法量化评估不确定性变量独立作用与相关作用对静态电压稳定性的影响,并采用自适应稀疏多项式混沌展开模型降低计算复杂度。然后,建立以静态电压稳定L指标为目标、融合储能与无功补偿装置协同调控的多约束应急优化模型,通过关键变量筛选实现可调设备容量的高效配置。最后,基于改进的IEEE 33节点配电网算例仿真,验证了所提配电网电压优化方法在应急场景下的可行性与优越性。

关键词:配电网;光储充放电站;全局灵敏度分析;相关性;电压优化;应急控制
中图分类号:TM732 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-9904(2026)04-0055-11

Contingency Optimization Method for Distribution Network Voltage Considering Photovoltaic-storage-charging and Discharging Stations

ZHAO Xin[1], LIU Hanmin[2], BO Bo[3], YANG Po[3*], XIA Hua[4]
(1.Chengde Power Supply Company of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Chengde 067000, China;
2.State Grid Jibei Clean Energy Vehicle Service (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100053, China;
3.State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China;
4.NARI Nanjing Control System Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: In the context of the new power system, the scale access of integrated electric vehicle (EV)- photovoltaic (PV)-storage-charging and discharging power stations makes the risk of distribution network voltage instability significantly aggravated, especially in the emergency scenario of losing main grid power supply, the strong uncertainty of PV output and charging and discharging station load power further threatens the system security. For this reason, a contingency optimization method for distribution network voltage considering the uncertainty of photovoltaic-storage-charging and discharging station is proposed for the islanded operation scenario of losing main grid power supply. First, the probability model of PV output and load power of the integrated photovoltaic-storage-charging and discharging station is constructed respectively. Second, a global sensitivity method based on covariance analysis quantitatively evaluates the impact of independent and correlated effects of uncertainty variables on static voltage stability, and an adaptive sparse polynomial chaos expansion model is used to reduce the computational complexity. Then, a multi-constraint contingency optimization model is established with the static voltage stability L-index as the objective, integrating coordinated control of energy storage and reactive power compensation devices, and the efficient allocation of adjustable equipment capacity is achieved by screening key variables. Finally, the feasibility and superiority of the proposed distribution network voltage optimization method in emergency scenarios are verified based on the improved IEEE 33-node distribution network example simulation.

Keywords: distribution network; photovoltaic-storage-charging and discharging station; global sensitivity analysis; correlation; voltage optimization; contingency control

基金项目:国家电网有限公司科技项目(B30106240006)。
Slience and Technology project of State Grid Corporation of China(B30106240006).

0　引言

在新型电力系统发展背景下,高比例可再生能源与多元化负荷的广泛接入使得配电网运行特性愈发复杂[1-3]。光储充放一体化电站作为新型电力电子化设备集群,其光伏出力与负荷功率的强不确定性对配电网电压稳定性形成显著冲击,二者的耦合作用更加剧了配电网电压失稳风险,尤其在失去主网供电的孤岛应急场景下,传统确定性优化方法难以应对多源不确定性的协同影响。因此,如何量化评估光储充放电站不确定性的影响并构建高效的应急电压稳定控制策略,已成为当前配电网安全运行领域亟待解决的关键问题[4-6]。

现有优化方法普遍采用资源动态调配机制实现运行参数稳定[7-8],文献[9]将改进粒子群优化算法与模型预测控制相结合,构建了基于储能电站的电力平衡优化框架,形成了多储能系统的实时功率联合调度策略。文献[10]建立了基于动态一致性算法的光伏-储能协调电压控制框架,研究显示该模型不仅实现有功与无功的协同优化,还能显著抑制节点电压越限风险。文献[11]提出了一种融合新能源动态特性的双层鲁棒调控架构,不仅能适配可再生能源的出力波动,还可深度挖掘并网逆变器的无功调节潜力,在降低网络损耗与电压调节装置操作成本方面具有突出优势。文献[12]计及需求侧资源,针对电力-交通系统协同负荷恢复问题提出了随机优化方法,并以建筑用能为例进行了研究,为相关系统在应对不确定性时的优化控制提供了有益参考。

上述研究均针对正常运行态势下的配电网优化问题展开研究,且未考虑不确定性因素间相关性对系统稳定性的影响,在应对失去主网供电等极端场景时,难以实现多源不确定性量化、关键变量辨识与动态优化的有机统一[13]。因此,针对突发失去主网供电的孤岛运行场景下配电网的源荷不确定性问题,本文引入灵敏度分析方法量化评估系统不确定因素对电压稳定性的影响程度,从而为配电网稳定性调控提供支撑。现有的灵敏度分析方法通常分为局部灵敏度分析(local sensitivity analysis,LSA)[14-15]以及全局灵敏度分析(global sensitivity analysis,GSA)[16-18],其中LSA虽在线性系统中具有概念清晰直观、运算简单的优势,但其单变量扰动机制无法量化多变量交互作用对电压稳定性的协同影响[14],GSA允许所有因素依照概率分布函数同时变化,多用于分析非线性复杂模型,如实际配电网存在光储充放电多源强耦合的场景等。Sobol法作为当前广为使用的GSA方法能够突破LSA的线性限制[19],在此基础上演化出基于协方差分析(analysis of covariance,ANCOVA)的全局灵敏度指标,采用方差-协方差联合分解技术实现了系统输出响应对各输入变量独立影响与相互影响的精确量化[20]。基于蒙特卡洛抽样的计算复杂度随变量维度增加呈指数级增长,因此在实际工程应用中通常构建稀疏多项式混沌展开(sparse polynomial chaos expansion,SPCE)代理模型以提升计算效率[21-23]。

综上,本文提出一种考虑光储充放电站不确定性的配电网电压应急优化方法。首先,对光储充放一体化电站进行不确定性概率建模;其次,基于考虑相关性的ANCOVA全局灵敏度方法量化分析输入变量独立与相关作用对电压稳定性的影响,利用自适应稀疏多项式混沌展开(basis-adaptive sparse polynomial chaos expansion,BASPCE)模型降低系统计算复杂度;接着,建立以静态电压稳定L指标为优化目标的多约束配电网电压应急控制模型,通过全局灵敏度关键节点筛选实现储能与无功补偿装置的协同优化配置;最后,通过改进的IEEE 33节点配电网算例验证了本文所提电压应急优化控制方法的有效性与优越性。

1　光储充放一体化电站不确定性建模

1.1　光伏发电装置

光伏机组的输出功率与光照强度的数学关系可表述为具有临界点的非线性分段函数形式,其具体表达式为

$$P_{\mathrm{PV}}=\begin{cases}\dfrac{P_{\mathrm{e}}G_{\mathrm{PV}}^{2}}{G_{\mathrm{std}}G_{\mathrm{c}}}, & 0\leqslant G_{\mathrm{PV}}\leqslant G_{\mathrm{c}}\\ \dfrac{P_{\mathrm{e}}G_{\mathrm{PV}}}{G_{\mathrm{std}}}, & G_{\mathrm{c}}\leqslant G_{\mathrm{PV}}\leqslant G_{\mathrm{std}}\\ P_{\mathrm{e}}, & G_{\mathrm{PV}}\geqslant G_{\mathrm{std}}\end{cases}\tag{1}$$

式中:P_{PV}为光伏机组出力功率;P_{e}为额定功率;G_{PV}为实时光照强度;G_{std}为基准光照强度;G_{c}为非线性

效应临界光照强度。

光照强度的随机分布特性可采用 Beta 概率密度函数进行描述，即为

$$f_{\mathrm{PV}}(x)=\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\left(\frac{x}{G_{\max}}\right)^{\alpha-1}\left(1-\frac{x}{G_{\max}}\right)^{\beta-1} \tag{2}$$

式中：$\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数；$G_{\max}$ 为区域最大理论光照强度；α 与 β 均为 Beta 分布函数的形状参数。

该分布因与归一化光照强度[0，1]取值范围匹配而具有高准确度，中低光照区间拟合误差小于5%。其 α、β 参数可基于区域近 3 年 15 min 间隔光照数据，通过矩估计法求解与拟合得到，并经 K-S 检验（p=0.05）验证有效[9,20]。

1.2　电动汽车充放电站负荷需求

电动汽车充放电站的负荷功率主要取决于充电功率、充电时间、电池容量以及荷电状态等关键指标，可通过车辆充电负荷信息的叠加获得充放电站的总体负荷功率。

电动汽车电池荷电状态的数学表达式为

$$Q^{\mathrm{soc}}=\left(Q_{\mathrm{ini}}^{\mathrm{soc}}-\frac{s}{s_{\max}}\right)\times 100\% \tag{3}$$

式中：Q^{soc} 为充电开始时的荷电状态；$Q_{\mathrm{ini}}^{\mathrm{soc}}$ 为出行前的荷电状态；s 为电动汽车行驶里程；$s_{\max}$ 为最大行驶里程。

电动汽车充电时间 T_{EV} 的数学表达式为

$$T_{\mathrm{EV}}=\frac{(1-Q^{\mathrm{soc}})\times C_{\mathrm{bat}}}{P_{\mathrm{EV}}\times\eta_{\mathrm{EV}}} \tag{4}$$

式中：P_{EV} 为电动汽车充电功率；C_{bat} 为电池容量；η_{EV} 为充电效率。

由于车辆往返的时序特征呈现显著的高斯分布特性，因此可构建正态概率密度函数对充电起止时间的概率分布进行描述，其数学表达式为

$$f_{\mathrm{EV}}(x)=\begin{cases}\dfrac{1}{\sigma_{\mathrm{s}}\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu_{\mathrm{s}})^2}{2\sigma_{\mathrm{s}}^2}}, & (\mu_{\mathrm{s}}-12)<x\leqslant 24\\ \dfrac{1}{\sigma_{\mathrm{s}}\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{(x+24-\mu_{\mathrm{s}})^2}{2\sigma_{\mathrm{s}}^2}}, & 0<x\leqslant(\mu_{\mathrm{s}}-12)\end{cases} \tag{5}$$

式中：μ_{s} 为充电行为的时间集中特性，即车辆离开的最高峰时段；σ_{s} 为需求波动的时间离散程度，即离开车辆数量变化速率。

根据每个时刻电动汽车的充电数量，充放电站的总体负荷功率可通过充电功率叠加计算获得，其数学表达式为

$$P_{\mathrm{EVCS},t}=n_t\times P_{\mathrm{EV},t} \tag{6}$$

式中：$P_{\mathrm{EVCS},t}$ 为 t 时刻该充放电站的总体负荷功率；$P_{\mathrm{EV},t}$ 为 t 时刻电动汽车充电功率；n_t 为 t 时刻处于充电状态的电动汽车数量。

该假设因通勤高峰的时间集中性符合正态分布特征，与文献[7]一致，某区域 1 000 辆车充电记录的拟合优度 R^2=0.92。式（6）中 n_t 由正态分布积分得 t 时刻充电占比，乘以日均充电总数（源自当地充电平台数据）计算，与实际误差小于 8%。

2　配电网全局灵敏度分析

2.1　配电网电压稳定性分析模型

为评估光储充放一体化电站带来的不确定性及其对配电网电压稳定性的影响程度，本文构建了以光伏及充放电站负荷功率为输入变量、电压稳定性 L 指标为输出变量的配电网静态电压稳定性分析潮流模型。

L 指标作为表征系统基准运行状态与电压失稳临界点偏离程度的特征参数，当且仅当该配电系统存在可行电压解时其理论取值在区间[0，1]范围内，则此时负荷节点 $k\in F$ 的静态电压稳定性指标 L_k 的数学表达为[13]

$$L_k=\left|1-\sum_{g\in G}\frac{-Y_{\mathrm{LL}}^{-1}Y_{\mathrm{LG}}\dot{U}_g}{\dot{U}_k}\right| \tag{7}$$

式中：F、G 分别为系统负荷节点集合、发电机节点集合；Y_{LL} 为负荷节点的自导纳；Y_{LG} 为负荷节点与发电机节点间的互导纳；$\dot{U}_k$ 为第 k 个负荷节点处的电压相量；$\dot{U}_g$ 为第 g 个发电机节点处的电压相量。则该配电网总体的电压稳定性 L 指标为

$$L=\max L_k \tag{8}$$

L 指标作为电压稳定性量化评估指标，该数值到 1 之间的距离可在一定程度上映射出系统运行的稳定程度：当 $0<L\leqslant 1$ 时系统处于安全稳定运行状态，且 L 指标趋近于 0 时系统具有最大电压稳定性；当 $L=1$ 时系统电压处于临界稳态状态；当 $L>1$ 时系统失稳。

2.2　考虑变量相关性的全局灵敏度指标

在电力系统不确定性研究方法中，全局灵敏度

分析方法不仅能精确评估单一参数对系统输出的独立作用,更能有效解析具有相关性的多变量协同作用机理。

针对配电网电压稳定性全局灵敏度分析问题,可构建系统函数为

$$Y = g(\boldsymbol{\eta}) = g(\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_m) \tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{\eta} = [\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_m]$为 m 个系统输入变量,为接入光储充放一体化电站节点处的光伏及负荷有功功率;Y 为系统输出变量,本文具体以 L 指标的形式量化配电网的电压稳定性。

根据概率统计方差定理,可得到该系统输出 Y 方差的数学表达式为

$$D(Y) = D_{\eta_i}\left(E\left(Y \middle| \eta_i\right)\right) + E_{\eta_i}\left(D\left(Y \middle| \eta_i\right)\right) \tag{10}$$

式中:η_i 为第 i 个系统输入变量;$E(\cdot)$ 为期望算子;$D(\cdot)$ 为方差算子;$E\left(Y \middle| \eta_i\right)$ 为 Y 关于 η_i 的条件期望;$D\left(Y \middle| \eta_i\right)$ 为 Y 关于 η_i 的条件方差;$E_{\eta_i}(\cdot)$ 为关于 η_i 的内部函数的期望;$D_{\eta_i}(\cdot)$ 为关于 η_i 的内部函数的方差。

对式(10)等号两边同时除以 $D(Y)$ 可得

$$1 = \frac{D_{\eta_i}\left(E\left(Y \middle| \eta_i\right)\right)}{D(Y)} + \frac{E_{\eta_i}\left(D\left(Y \middle| \eta_i\right)\right)}{D(Y)} \tag{11}$$

定义 $\boldsymbol{\eta}_{\sim i}$ 为除去随机变量 η_i 后剩下的 $m-1$ 个随机输入变量向量,即 $\boldsymbol{\eta}_{\sim i} = [\eta_1, \cdots, \eta_{i-1}, \eta_{i+1}, \cdots, \eta_m]$。则根据式(11)右侧两项可获得 $\boldsymbol{\eta}_i$ 的一阶灵敏度指标(first-order sensitivity index,FSI)与 $\boldsymbol{\eta}_{\sim i}$ 的总灵敏度指标(total sensitivity index,TSI)分别为:

$$S_i = \frac{D_{\eta_i}\left(E\left(Y \middle| \eta_i\right)\right)}{D(Y)} \tag{12}$$

$$\delta_{\sim i}^{\mathrm{ST}} = \frac{E_{\eta_i}\left(D\left(Y \middle| \eta_i\right)\right)}{D(Y)} \tag{13}$$

式中:S_i 为第 i 个系统输入变量的 FSI,表示变量 η_i 对系统输出产生的独立影响;$\delta_{\sim i}^{\mathrm{ST}}$ 为 $\boldsymbol{\eta}_{\sim i}$ 的 TSI。将式(13)转化为 η_i 的 TSI 形式为

$$\delta_i^{\mathrm{ST}} = \frac{E_{\boldsymbol{\eta}_{\sim i}}\left(D\left(Y \middle| \boldsymbol{\eta}_{\sim i}\right)\right)}{D(Y)} = 1 - \frac{D_{\boldsymbol{\eta}_{\sim i}}\left(E\left(Y \middle| \boldsymbol{\eta}_{\sim i}\right)\right)}{D(Y)} = 1 - S_{\sim i} \tag{14}$$

式中:δ_i^{ST} 为 η_i 的 TSI,表示变量 η_i 由于和其他变量交互作用而产生的影响;$S_{\sim i}$ 为 $\boldsymbol{\eta}_{\sim i}$ 的 FSI。

在配电网运行环境中虽然光储充放一体化电站接入位置存在差异,但分布式光伏受区域气象条件的影响其出力特性呈现显著的空间耦合特征。充放电站负荷侧的功率波动主要受人类活动模式的影响,区域内电动汽车充电行为也通常具有时空关联性。因此,本文运用 Pearson 相关系数法对变量间的相关性程度进行量化描述。

$$\rho_{ij} = \frac{\mathrm{Cov}(\eta_i, \eta_j)}{\sqrt{D(\eta_i)} \cdot \sqrt{D(\eta_j)}} \quad i,j = 1,2,\cdots,m \tag{15}$$

式中:$\mathrm{Cov}(\cdot)$ 为协方差算子,即满足 $\mathrm{Cov}(\eta_i, \eta_j) = E\left[\left(\eta_i - E(\eta_i)\right)\left(\eta_j - E(\eta_j)\right)\right]$;$\rho_{ij}$ 为随机变量 η_i 与 η_j 间的 Pearson 相关系数,当 $\rho_{ij}>0$ 时为正相关,当 $\rho_{ij}<0$ 时为负相关,当且仅当 $\rho_{ij}=0$ 时无相关性。

其在非线性系统中的转化逻辑为:先通过 Pearson 系数构建相关矩阵识别线性关联;再用 ANCOVA 法分解独立一阶灵敏度指标(independent first-order sensitivity index,UFSI)与相关一阶灵敏度指标(correlated first-order sensitivity index,CFSI);最后结合 BASPCE 模型拟合非线性特性。

m 个系统输入变量的相关系数矩阵 $\boldsymbol{M}_{\mathrm{corr}}$ 数学表达式为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{corr}} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1m} \\ \rho_{21} & 1 & \cdots & \rho_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1} & \rho_{m2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \tag{16}$$

式(16)中主对角线元素对应的自相关系数等于1。

在考虑输入变量间存在统计相关性的情况下,Li 等人提出了基于 ANCOVA 的全局灵敏度分析指标[19]。该方法突破独立变量假设的限制,将输入相关变量对系统输出方差的影响分解为独立作用项和相关作用项,可视为 Sobol 方法在多相关变量条件下的扩展。

通过构建增维模型,可将系统函数 $Y = g(\boldsymbol{\eta})$ 扩展为

$$\begin{aligned} g(\boldsymbol{\eta}) &= g_0 + \sum_{u \subseteq \{1,2,\cdots,m\}} g_u(\boldsymbol{\eta}_u) \\ &= g_0 + g_i(\eta_i) + \sum_{\substack{v \subseteq \{1,2,\cdots,m\} \\ v \neq i}} g_v(\boldsymbol{\eta}_v) \end{aligned} \tag{17}$$

系统输出 Y 方差的数学表达式为

$$D(Y)=E\left[\left(Y-E(Y)\right)^2\right]=\mathrm{Cov}\left[Y,\left(Y-g_0\right)\right] \tag{18}$$

通过拆分可转化为

$$D(Y)=\sum_{u\subseteq\{1,2,\cdots,m\}}\mathrm{Cov}\left[Y,g_u\left(\boldsymbol{\eta}_u\right)\right] \tag{19}$$

对式(19)等号两边同时除以 $D(Y)$，计算可得基于 ANCOVA 的 FSI，且由独立分量和相关分量部分构成，即为

$$S_i=\frac{\mathrm{Cov}\left[g_i\left(\eta_i\right),Y\right]}{D(Y)}=S_i^{\mathrm{U}}+S_i^{\mathrm{C}} \tag{20}$$

式中：S_i^{U} 为第 i 个随机变量的独立一阶灵敏度指标；S_i^{C} 为第 i 个随机变量的相关一阶灵敏度指标。

$$S_i^{\mathrm{U}}=\frac{D\left[g_i\left(\eta_i\right)\right]}{D(Y)} \tag{21}$$

$$S_i^{\mathrm{C}}=\frac{\mathrm{Cov}\left[g_i\left(\eta_i\right),\sum\limits_{\substack{v\subseteq\{1,2,\cdots,m\}\\ v\neq i}}g_v\left(\boldsymbol{\eta}_v\right)\right]}{D(Y)} \tag{22}$$

在输入变量间存在相关性的场景下，基于 ANCOVA 全局灵敏度计算所得的 UFSI 始终满足非负性；而 CFSI 的数值符号则取决于相关性关系；当且仅当输入变量造成影响的独立分量和相关分量可相互抵消时 FSI 取值为 0。

2.3　基于BASPCE的配电网全局灵敏度分析

蒙特卡洛抽样(Monte Carlo sampling，MCS)是不确定性量化研究领域的经典数值方法[24]，然而由于计算量问题该方法难以实际应用于配电网这类高维非线性系统中，因此本文提出一种基于 BASPCE 模型的全局灵敏度高效计算方法。

将式(9)所示的系统函数以正交多项式的形式进行混沌展开得

$$Y=g(\boldsymbol{\eta})\approx g^{\mathrm{PCE}}(\boldsymbol{\eta})=\sum_{\boldsymbol{\alpha}\in\Theta}\gamma_{\boldsymbol{\alpha}}\Psi_{\boldsymbol{\alpha}}(\boldsymbol{\eta}) \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{\Theta}$ 为截断方案的集合；$\Psi_{\boldsymbol{\alpha}}(\cdot)$ 为以 $\boldsymbol{\alpha}$ 为识别指标向量的正交多项式基函数；$\boldsymbol{\gamma}_{\boldsymbol{\alpha}}$ 为 $\Psi_{\boldsymbol{\alpha}}(\cdot)$ 对应的混沌多项式展开系数。

正交多项式基函数 $\Psi_{\boldsymbol{\alpha}}(\boldsymbol{\eta})$ 由一元正交多项式的张量积构成，其数学表达式为

$$\Psi_{\boldsymbol{\alpha}}(\boldsymbol{\eta})=\prod_{i=1}^{m}\phi_{\alpha_i}^{(i)}\left(\eta_i\right) \tag{24}$$

式中：$\phi_{\alpha_i}^{(i)}\left(\eta_i\right)$ 为变量 η_i 对应的第 α_i 阶正交多项式，随机输入变量的正交多项式基函数由变量分布特性决定[25]。

由于在电力系统工程应用中稀疏特性普遍存在，且系统输出响应往往仅与少数输入参数及其低阶展开项呈现显著关联性，本文引入了一种能够自适应调节截断标准参数 p 的双曲截断方案[26]，即为

$$\boldsymbol{\Theta}_q^{m,p}=\left\{\boldsymbol{\alpha}\in\boldsymbol{\Theta}^{m,p}:\ \|\boldsymbol{\alpha}\|_q=\left(\sum_{i=1}^{m}\left(\alpha_i\right)^q\right)^{\frac{1}{q}}\leqslant p,q\in(0,1]\right\} \tag{25}$$

式中：q 为控制稀疏性的截断范数，q 值越小则高阶交叉项被剔除得越彻底；$\boldsymbol{\Theta}_q^{m,p}$ 为以 q 为截断范数、以 p 为截断标准参数的 m 个输入变量的截断方案。

此时混沌展开式的总项数为

$$N^{m,p}=\frac{(m+p)!}{m!p!}+1 \tag{26}$$

式中：$N^{m,p}$ 为以 p 为截断标准参数的 m 个输入变量的混沌展开式总项数。

截断标准参数 p 基于留一法(leave-one-out，LOO)自适应计算获得，通过对交叉验证误差 e_{LOO} 进行计算，并与给定的误差阈值 ε 进行比较，即为

$$e_{\mathrm{LOO}}=\frac{\sum\limits_{r=1}^{N_{\mathrm{ED}}}\left[g\left(x_r\right)-g^{\mathrm{PCE}(\sim r)}\left(x_r\right)\right]^2}{\sum\limits_{r=1}^{N_{\mathrm{ED}}}\left[g\left(x_r\right)-\dfrac{1}{N_{\mathrm{ED}}}\sum\limits_{r=1}^{N_{\mathrm{ED}}}g\left(x_r\right)\right]^2}\leqslant\varepsilon \tag{27}$$

式中：N_{ED} 为输入实验设计样本数量；x_r 为第 r 个实验设计样本值；$g^{\mathrm{PCE}(\sim r)}(\cdot)$ 为剔除第 r 个实验设计样本后的 SPCE 模型。

设实验设计样本集合为 $\boldsymbol{\chi}=\left\{x_1,x_2,\cdots,x_{N_{\mathrm{ED}}}\right\}$，对应输出集合为 $G_{\mathrm{g}}=\left\{g\left(x_1\right),g\left(x_2\right),\cdots,g\left(x_{N_{\mathrm{ED}}}\right)\right\}$。基于最小二乘法对混沌多项式展开系数 $\boldsymbol{\gamma}_{\boldsymbol{\alpha}}$ 进行求解，通过增加惩罚项可以进一步减少展开式中的高阶项个数，其数学表达式为

$$\min\left\{\sum_{r=1}^{N_{\mathrm{ED}}}\left[g\left(x_r\right)-\boldsymbol{\gamma}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\left(x_r\right)\right]^2+\lambda\sum_{\boldsymbol{\alpha}\in\boldsymbol{\Theta}_q^{m,p}}\left|\boldsymbol{\gamma}_{\boldsymbol{\alpha}}\right|\right\} \tag{28}$$

式中：$\boldsymbol{\gamma}=\left[\gamma_0,\gamma_1,\cdots,\gamma_{N_q^{m,p}}\right]$ 为截断方案下的展开系数集合；$\boldsymbol{A}\left(\boldsymbol{\chi}_r\right)=\left[\Psi_0\left(x_r\right),\Psi_1\left(x_r\right),\cdots,\Psi_{N_q^{m,p}}\left(x_r\right)\right]$ 为实验设计样本点 $\boldsymbol{\chi}_r$ 对应的多项式基函数集合；λ 为惩罚因

子,本文采用最小角度回归法(least angle regression,LAR)对惩罚最小化问题进行求解。

通过式(28)可求解获得展开系数 $\boldsymbol{\gamma}_\alpha$ 的估计值 $\hat{\boldsymbol{\gamma}}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{\gamma}} = \left(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\gamma} \tag{29}$$

综上,将基于BASPCE方法构建的系统函数带入式(21)与式(22),即可求得ANCOVA全局灵敏度指标。

3　基于全局灵敏度的电压应急优化

3.1　目标函数及约束条件

选取系统安全稳定性 L 指标表征电网运行点与静态稳定边界的相对距离,并以此作为电压应急优化的单一优化目标,其数学表达式为

$$\min L = \min\left(\max L_k\right) \tag{30}$$

电力系统中的主要调控设备包括储能系统(energy storage system,ESS)、无功补偿电容器组(capacitor bank,CB)及新能源机组调节单元等。本文选取其中的ESS与CB作为核心调控装置,通过有功/无功功率的协同调度形成动态功率缓冲机制,可在突发应急场景下的孤岛运行中有效平抑功率波动并维持系统安全稳定。

系统约束条件表述如下。

1)等式约束。

$$\begin{cases} P_i = V_i\sum\limits_{j=1}^{n} V_j\left(G_{ij}\cos\theta_{ij} + B_{ij}\sin\theta_{ij}\right) \\ Q_i = V_i\sum\limits_{j=1}^{n} V_j\left(G_{ij}\sin\theta_{ij} - B_{ij}\cos\theta_{ij}\right) \end{cases} \tag{31}$$

式中:i、j 均为系统节点编号,满足 $i,j = 1,2,\cdots,n$(n 为系统节点数);P_i 与 Q_i 分别为节点 i 的注入有功功率与注入无功功率;G_{ij} 与 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导与电纳;V_i 与 V_j 分别为节点 i 与节点 j 的电压幅值;θ_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的电压相角。

2)不等式约束。

分布式电源出力约束条件为

$$\begin{cases} P_{a,\mathrm{G}}^{\min} \leqslant P_{a,\mathrm{G}} \leqslant P_{a,\mathrm{G}}^{\max} \\ Q_{a,\mathrm{G}}^{\min} \leqslant Q_{a,\mathrm{G}} \leqslant Q_{a,\mathrm{G}}^{\max} \end{cases} \tag{32}$$

式中:$P_{a,\mathrm{G}}$ 与 $Q_{a,\mathrm{G}}$ 分别为节点 a 处分布式电源的有功出力与无功出力;$P_{a,\mathrm{G}}^{\min}$、$P_{a,\mathrm{G}}^{\max}$ 分别为节点 a 处分布式电源有功出力的最小值、最大值;$Q_{a,\mathrm{G}}^{\min}$、$Q_{a,\mathrm{G}}^{\max}$ 分别为节点 a 处分布式电源无功出力的最小值、最大值。

负荷节点功率约束条件为

$$\begin{cases} P_{b,\mathrm{L}}^{\min} \leqslant P_{b,\mathrm{L}} \leqslant P_{b,\mathrm{L}}^{\max} \\ Q_{b,\mathrm{L}}^{\min} \leqslant Q_{b,\mathrm{L}} \leqslant Q_{b,\mathrm{L}}^{\max} \end{cases} \tag{33}$$

式中:$P_{b,\mathrm{L}}$ 与 $Q_{b,\mathrm{L}}$ 分别为节点 b 处负荷节点的有功功率与无功功率;$P_{b,\mathrm{L}}^{\max}$、$P_{b,\mathrm{L}}^{\min}$ 分别为节点 b 处负荷节点有功功率的最大值、最小值;$Q_{b,\mathrm{L}}^{\max}$、$Q_{b,\mathrm{L}}^{\min}$ 分别为节点 b 处负荷节点无功功率的最大值、最小值。

ESS约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leqslant P_{k,\mathrm{ch},t} \leqslant \mu_{k,\mathrm{ch},t}P_{k,\mathrm{ch}}^{\max} \\ 0 \leqslant P_{k,\mathrm{dis},t} \leqslant \mu_{k,\mathrm{dis},t}P_{k,\mathrm{dis}}^{\max} \\ \mu_{k,\mathrm{ch},t} + \mu_{k,\mathrm{dis},t} \leqslant 1 \end{cases} \tag{34}$$

$$E_{k,\mathrm{SOC},t+1} = E_{k,\mathrm{SOC},t} + P_{k,\mathrm{ch},t}\eta_{\mathrm{ch}} - \frac{P_{k,\mathrm{dis},t}}{\eta_{\mathrm{dis}}} \tag{35}$$

$$L_{\mathrm{SOC}}^{\min}E_{k,\mathrm{SOC}}^{\max} \leqslant E_{k,\mathrm{SOC},t} \leqslant L_{\mathrm{SOC}}^{\max}E_{k,\mathrm{SOC}}^{\max} \tag{36}$$

式中:$P_{k,\mathrm{ch},t}$ 与 $P_{k,\mathrm{dis},t}$ 分别为第 t 个时刻节点 k 处储能装置的充电功率与放电功率;$P_{k,\mathrm{ch}}^{\max}$ 与 $P_{k,\mathrm{dis}}^{\max}$ 分别为节点 k 处储能装置的充电与放电最大功率;$\mu_{k,\mathrm{ch},t}$ 与 $\mu_{k,\mathrm{dis},t}$ 分别为第 t 个时刻节点 k 处储能装置的充放电状态,取值为1或0时表示该时刻是否处于对应状态,其中 $\mu_{k,\mathrm{ch},t}$ 和 $\mu_{k,\mathrm{dis},t}$ 为二进制决策变量,$\mu_{k,\mathrm{ch},t} = 1$ 且 $\mu_{k,\mathrm{dis},t} = 0$ 时储能充电,$\mu_{k,\mathrm{dis},t} = 1$ 且 $\mu_{k,\mathrm{ch},t} = 0$ 时储能放电,两者均为0时处于待机状态;η_{ch} 与 η_{dis} 分别为充放电效率;$E_{k,\mathrm{SOC},t}$ 为第 t 个时刻节点 k 处储能装置的电池电量;$E_{k,\mathrm{SOC}}^{\max}$ 为节点 k 处储能装置的最大电池电量;$L_{\mathrm{SOC}}^{\min}$ 与 $L_{\mathrm{SOC}}^{\max}$ 分别为储能荷电状态的最小值、最大值。

CB约束条件为

$$Q_{r,\mathrm{CB}}^{\min} \leqslant Q_{r,\mathrm{CB}} \leqslant Q_{r,\mathrm{CB}}^{\max} \tag{37}$$

式中:$Q_{r,\mathrm{CB}}$ 为节点 r 处无功补偿电容器组的出力;$Q_{r,\mathrm{CB}}^{\min}$ 与 $Q_{r,\mathrm{CB}}^{\max}$ 分别为节点 r 处无功补偿电容器组出力的最小值、最大值。

在失去主网供电的孤岛运行场景中,光伏出力与充放电站负荷功率的强不确定性对系统安全的影响具体表现为:光伏出力骤降或负荷突增会导致节点电压偏离额定范围,极端情况触发电压崩溃(L 指标大于1);孤岛系统无主网支撑,光伏出力与负荷的强波动会打破有功/无功平衡,导致频率波动,甚至引发分布式电源脱网;负荷功率的不确定性可能导致储能充电不足或放电过量,违反荷电状态约束,缩短电池寿命或失去功率缓冲能力;若电压/频率失稳

持续，配电网可能触发保护装置动作，导致电动汽车充放电站、居民负荷等关键负荷断电，扩大应急场景的影响范围。这些影响的核心机制是“不确定性耦合放大效应”，即光伏出力的随机性与充电负荷的时序波动性叠加，使系统潮流分布剧烈变化，传统确定性调控方法难以实时跟踪，最终导致电压稳定裕度降低。

3.2　配电网电压应急优化模型

提出了一种考虑光储充放电站不确定性的配电网电压应急优化方法。基于考虑相关性的全局灵敏度分析方法对配电网光储充放电站带来的不确定性因素进行定量评估，并根据重要性程度排序进行等级划分以筛选关键决策变量，通过对关键变量的筛选机制能够有效提升可调设备的资源配置效率，从而通过优化手段实现失去主网供电的孤岛运行场景下的精准化容量分配与系统稳定性调控。该方法具体实施步骤如下，算法流程如图 1 所示。

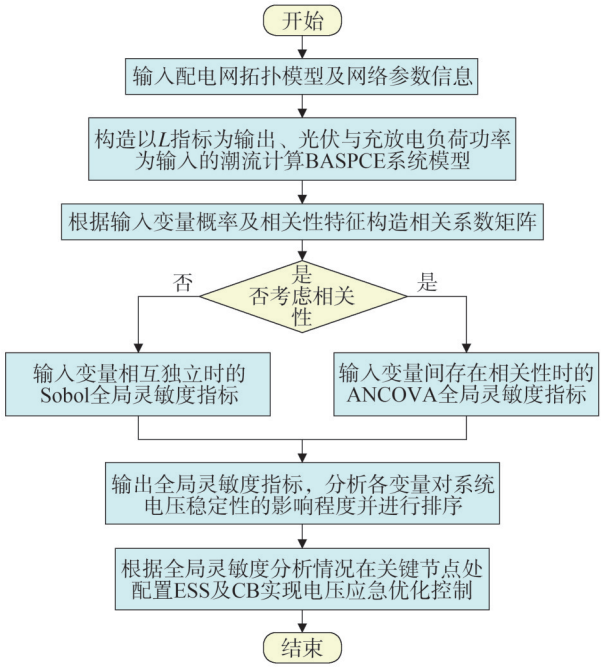


图 1　考虑光储充放电站不确定性的配电网电压应急优化算法流程图

Fig.1 Flow chart of voltage emergency optimization algorithm for distribution network considering uncertainties of photovoltaic-storage-charging and discharging power stations

1）输入失去主网供电突发场景下含光储充放一体化电站的配电网拓扑模型与网络参数；

2）以静态电压稳定性 L 指标为输出变量，以光伏出力与充放电电站负荷功率为输入变量，构造基于潮流计算的系统函数 $Y = g(\eta)$；

3）构造输入不确定性变量概率模型及其相关系数矩阵；

4）基于全局灵敏度指标量化分析各变量对系统电压稳定性的影响，根据分析结果进行排序并筛选关键变量因素；

5）引入 ESS 以及 CB 作为功率调控设备，从而实现突发场景下的配电网电压应急优化控制；

6）通过多场景验证机制对比各优化方案下的系统电压稳定性水平。

4　算例分析

4.1　算例设置

选用修改后的 IEEE 33 节点配电网进行算例仿真，在失去主网供电的孤岛运行场景下，配电网节点 1 处启用最大出力可达到 1 000 kW 的分布式柴油发电机，光储充放一体化电站分别随机接入 4 处节点，具体网络结构如图 2 所示。该配电网基准电压为 12.66 kV，基准容量为 10 MVA，其他系统线路和负荷等参数信息均参考文献[13]。

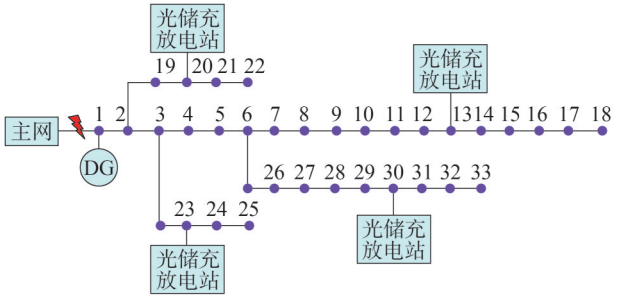


图 2　改进的 IEEE 33 节点配电网结构

Fig.2 Structure of the improved IEEE 33-node distribution network

由于光储充放一体化电站的光伏出力受天气及地理环境影响，充放电功率受用户社会行为影响，因此输入不确定性因素之间存在一定相关性[27]，设定光伏出力间的 Pearson 相关系数为 0.8，负荷间的

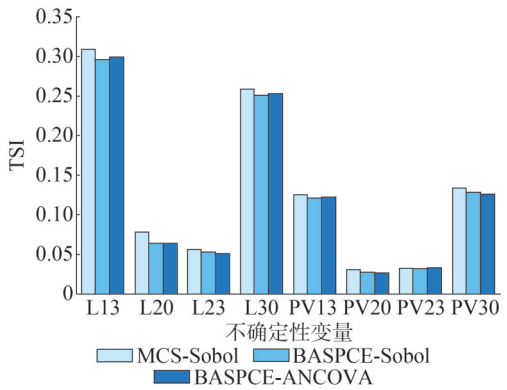
Pearson 相关系数为 0.5,光伏及负荷功率波动区间范围均满足真值的 ±10%。接入光伏的出力预测功率与充放电站负荷功率数据均取自江苏某地级市配电网,由于在实际应用中负荷及光伏功率预测值的变化对整体配电网全局灵敏度的排序影响很小,因此本文选取了某一典型时间断面下的全局灵敏度结果进行计算分析。

算例仿真使用的计算机硬件配置为 Intel Core i7-10700 CPU、NVDIA RTX 2080Ti GPU 11GB,基于 MATLAB 2022b 平台,采用 Matpower 实现潮流计算,分别调用 UQLab 与 Yalmip 工具箱实现全局灵敏度与电压稳定性优化的求解。其中设置截断标准参数 $p \in [1,4]$,截断范数 $q = 0.8$,全局灵敏度计算采样样本规模取 $N = 10\,000$,构建 BASPCE 模型的设计样本规模取 $N_{ED} = 1\,000$[28]。

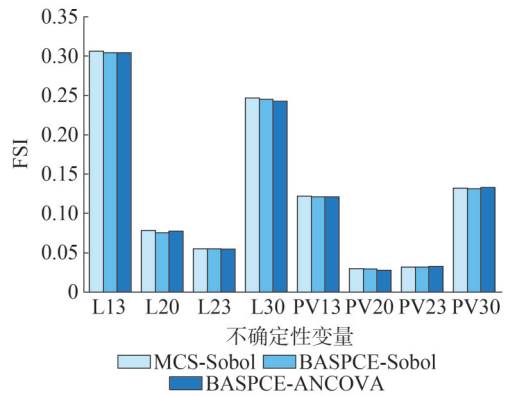
4.2　不考虑相关性的全局灵敏度分析

为验证本文关于光储充放不确定性的配电网全局灵敏度分析方法的有效性,本算例在输入变量相互独立条件下,以电网静态电压稳定 L 指标作为输出变量,以一体化电站的光伏发电出力和负荷功率作为输入变量,建立了三组对比实验:采用传统 MCS 法计算 Sobol 全局灵敏度指标、基于 BASPCE 模型计算 Sobol 全局灵敏度指标、基于 BASPCE 模型计算 ANCOVA 全局灵敏度指标进行仿真实验,从而对各方法的计算结果进行对比分析。本算例考虑的随机性节点为光储充放电站接入节点 13、20、23、30,考虑的不确定性因素包括负荷功率与光伏出力不确定性,则各变量全局灵敏度指标计算结果如图 3 所示,不同算法的计算耗时对比如表 1 所示。

由图 3 与表 1 的实验结果对比分析可知,基于 BASPCE 法计算得到全局敏感度结果与基于传统 MCS 法得到的计算结果基本保持一致,但在计算效率方面实现了突破性提升,因此,本文全局灵敏度计算方法能够在保证结果可靠性的前提下显著优化计算效率。在输入变量间相互独立的条件下,各光储充放一体化电站接入节点的 FSI 始终低于 TSI,满足理论研究预期。基于 BASPCE 模型法与 MCS 法相比所得全局灵敏度指标略低,这源于代理模型构建过程中对弱效应高阶交互项的策略性筛除,但这种系统误差控制在工程应用容许范围内,且通过代理模型架构的简化处理使计算复杂度大幅降低,因此对大规模系统的全局灵敏度计算具有重要实践价值。



(a)TSI 结果分析



(b)FSI 结果分析

图3　全局灵敏度计算结果分析

Fig.3 Analysis of global sensitivity calculation results

表1　全局灵敏度计算效率对比

Table 1 Comparison of global sensitivity calculation efficiency

全局灵敏度分析方法	计算时间/s
MCS-Sobol	934.32
BASPCE-Sobol	7.65
BASPCE-ANCOVA	8.29

此外,基于 BASPCE-ANCOVA 的全局灵敏度分析体系虽能在独立变量条件下保持基本精度,但其综合性能指标较 BASPCE-Sobol 法仍存在一定差距。这是由于 ANCOVA 法在变量独立的场景中仍需要执行冗余的协变量约束运算,不仅增加了计算量更

可能引入变量间相关项的统计干扰。然而当系统存在变量间相关性关系时，ANCOVA 法展现出 Sobol 法无法替代的优势，这将在下一小节进行论证。

4.3　考虑相关性的全局灵敏度分析

为验证本文基于 ANCOVA 全局灵敏度分析方法的优越性，本算例在输入变量间存在相关性关系的条件下，基于 BASPCE 模型对上述两种全局灵敏度分析法进行仿真实验，计算所得的一阶灵敏度指标对比如图 4 所示。

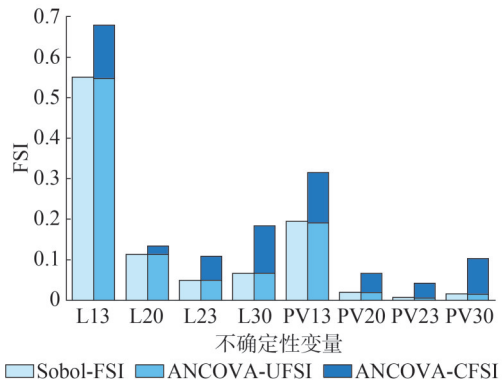


图 4　考虑相关性的一阶灵敏度指标对比

Fig.4 Comparison of first-order sensitivity indices considering correlation

由图 4 分析可知，采用 ANCOVA 法计算获得 UFSI 与采用 Sobol 法获得的 FSI 数值结果相近且均满足非负特征。这是由于在输入变量间无相关性关系条件下，二者在理论定义层面均表征单个输入变量对系统输出产生的独立影响；当加入相关分量 CFSI 时，ANCOVA-FSI 与 Sobol-FSI 在数值上产生显著偏差，这是由于 CFSI 反映了变量间存在的相互作用关系对系统输出产生的相关影响。当输入变量间存在的影响相互补偿抵消时，ANCOVA 法的计算所得的 FSI 将呈现非正值特征，其正负情况与其数学模型中考虑协方差影响的特性直接相关。

4.4　电压应急优化控制方法对比

本文采用考虑相关性的全局灵敏度分析方法筛选关键控制节点，从而实现失去主网供电场景下的配电网电压应急优化控制。针对系统普遍存在的控制设备配置不完整性特征，本算例首先基于电压稳定性 L 指标筛选出具有显著影响的光储充放关键节点，然后在关键节点处安装 ESS 及 CB 调控设备进行优化调控，通过该策略可有效实现分析变量的维度压缩与优化问题的规模简化，进而降低系统控制变量复杂度。

本算例基于修改后的 IEEE 33 节点配电网模型，分别基于不考虑相关性的 Sobol 算法选取关键节点进行功率调控、基于考虑相关性的 ANCOVA 算法选取关键节点进行功率调控、采用遗传算法对全部光储充放电站接入节点进行优化。其中遗传算法参数设置为：初始种群规模为 800，迭代次数为 200，选择、交叉、变异算子分别为 0.85、0.85、0.1。未配置功率调控设备时的初始 L 指标为 0.185 7。在图 2 所示配电网失去主网供电的孤岛运行场景下，不同电压应急控制策略的效果对比结果如表 2 所示。

表 2　配电网电压应急优化控制方法效果对比

Table 2 Comparison of effects of voltage emergency optimization control methods for distribution network

算法	优化节点编号	ESS/CB 设备容量	L 指标
不考虑相关性的 Sobol 法	13，20	17.27 MVA，−1.37 MW，4.83 MVA，0.31 MW	0.043 6
本文考虑相关性的 ANCOVA 法	13，30	8.82 MVA，−0.64 MW，5.68 MVA，−0.07 MW	0.038 6
遗传算法	13，20，23，30	3.94 MVA，−2.47 MW，17.51 MVA，−0.04 MW，−6.14 MVA，−6.08 MW，9.33 MVA，−5.83 MW	0.011 5

由表 2 分析可知，三种方法所得结果相较于初始 L 指标均大幅降低，都能够有效实现配电网电压应急优化控制。其中，本文考虑相关性的 ANCOVA 法的 L 指标优于不考虑相关性的 Sobol 算法，而基于遗传算法的全变量优化结果则好于前两种算法，所得优化后的系统最为稳定。但本文基于 ANCOVA 全局灵敏度分析的电压优化算法所需设备容量相较于其他两种算法更低，使系统能在有限调节能力下同步实现电压稳定性提升与运行成本控制，更为适配极端应急场景下的调控需求，验证了本文配电网电压应急优化策略的有效性与优越性。

5 结论

本文针对失去主网供电场景下光储充放电站不确定性对配电网电压稳定的影响展开研究,提出一种基于全局灵敏度分析的电压应急优化策略。通过构建考虑变量相关性的ANCOVA-BASPCE分析框架,筛选关键调控节点并优化储能与无功补偿装置容量配置。算例结果表明,所提方法能够准确量化分析输入不确定性变量随机性与相关性的影响,从而在降低设备投资成本的同时实现高效配电网电压应急调控。主要结论如下:

1)基于ANCOVA的全局灵敏度方法相较于传统Sobol法可精确量化输入变量独立与相关作用的影响,在变量存在相关性关系的场景中更具工程适用性。

2)基于BASPCE的代理模型在保证计算精度的前提下,大大降低了运算复杂度,为高维配电网不确定性分析的应用场景提供了支撑。

3)通过关键变量的筛选以简化优化模型,基于全局灵敏度分析的电压优化策略所需设备容量需求低,对资源受限的应急场景更具适配性。

在后续的研究工作中,还需要深入研究多类型调控设备的动态响应特性,同时将时间序列与时空序列相结合实现配电网的多目标优化,进一步探索面向更多类别极端场景的应对体系。

参考文献

[1] 蔡黎,杨晨曦,李俊霆,等.电动汽车接入主动配电网协同储能研究应用综述[J].重庆理工大学学报,2024,38(19):212-220.
CAI Li, YANG Chenxi, LI Junting, et al. Review of research and application on collaborative energy storage for electric vehicles accessed to active distribution network [J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2024, 38(19): 212-220.

[2] 尚博文,徐铭铭,张金帅,等.高比例分布式光伏接入背景下配电网电压调控方法研究综述[J].智慧电力,2024,52(12):1-11.
SHANG Bowen, XU Mingming, ZHANG Jinshuai, et al. A review of voltage regulation methods for distribution networks in the context of high proportion of distributed photovoltaic integration [J]. Smart Power, 2024, 52(12): 1-11.

[3] MENG L, YANG X Y, ZHU J, et al. Network partition and distributed voltage coordination control strategy of active distribution network system considering photovoltaic uncertainty [J]. Applied Energy, 2024, 362: 122846.

[4] 蒋宇,吕干云,贾德香,等.考虑用户充电行为和光伏不确定性的光储充电站储能容量优化配置[J].浙江电力,2024,43(5):10-17.
JIANG Yu, LYU Ganyun, JIA Dexiang, et al. Optimal allocation of energy storage capacity for photovoltaic energy storage charging stations considering EV user behavior and photovoltaic uncertainty [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(5): 10-17.

[5] 南斌,董树锋,唐坤杰,等.考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J].电网技术,2023,47(4):1340-1349.
NAN Bin, DONG Shufeng, TANG Kunjie, et al. Optimal configuration of energy storage in PV - storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load [J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1340-1349.

[6] 杨晓辉,王晓鹏,邓叶恒.含电动汽车的主动配电网多目标分层优化调度[J].电力工程技术,2024,43(4):156-165.
YANG Xiaohui, WANG Xiaopeng, DENG Yeheng. Multi-objective hierarchical optimization dispatch of active distribution network with electric vehicles [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 156-165.

[7] YI J H, CHERKAOUI R, PAOLONE M, et al. Expansion planning of active distribution networks achieving their dispatchability via energy storage systems [J]. Applied Energy, 2022, 326: 119942.

[8] 程杉,刘延光,刘炜炜,等.计及经济性和低碳性的光储充一体化电站多目标优化配置[J].电力工程技术,2024,43(4):147-155.
CHENG Shan, LIU Yanguang, LIU Weiwei, et al. Multi-objective optimization based capacity accommodation of PIS considering its economic construction and low - carbon operation [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 147-155.

[9] 汪杨俊,张百甫,吴小波,等.电网调度中基于储能电站的电力平衡优化研究[J].自动化应用,2025,66(7):135-137.
WANG Yangjun, ZHANG Baifu, WU Xiaobo, et al. Research on power balance optimization based on energy storage power station in power grid dispatching [J]. Automation Application, 2025, 66(7): 135-137.

[10] 姜飞,林政阳,何桂雄,等.基于动态一致性算法的光伏-储能分布式协调电压控制[J].天津大学学报,2021,54(12):1299-1308.
JIANG Fei, LIN Zhengyang, HE Guixiong, et al. Coordinated voltage control of distributed photovoltaic-energy-storage systems based on a dynamic consensus algorithm [J]. Journal of Tianjin University, 2021, 54(12): 1299-1308.

[11] 张静忠,蒙飞,孙阳,等.考虑有功不确定性的配电网新能源无功优化控制[J].中国电力,2024,57(3):51-59.
ZHANG Jingzhong, MENG Fei, SUN Yang, et al. Reactive power optimization control for renewable energy in distribution networks considering active power uncertainties [J]. Electric Power, 2024, 57(3): 51-59.

[12] 李泽宁,孙宏斌,薛屹洵,等.计及需求侧资源的电力-交通系统协同负荷恢复随机优化方法:以建筑用能为例[J].中国电机工程学报,2025,45(20):8024-8039.
LI Zening, SUN Hongbin, XUE Yixun, et al. A stochastic optimization method for coordinated restoration of electricity - transportation systems considering demand-side resources: a case study of building energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45

(20):8024-8039.

[13] 陈中,顾叮咚,郭庆.考虑全局相关性的主动配电网电压安全优化控制[J].电力系统自动化,2023,47(21):99-107.
CHEN Zhong, GU Dingdong, GUO Qing. Optimization and control of voltage security in active distribution network considering global correlation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21):99-107.

[14] 徐岩,郅静,樊世通.基于功率灵敏度和经济补偿最小化的线路过负荷紧急控制方法[J].电力自动化设备,2017,37(1):118-123.
XU Yan, ZHI Jing, FAN Shitong. Line overload emergency control based on power sensitivity and minimized economic compensation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1):118-123.

[15] 马睿聪,邹世豪,曹永吉,等.基于灵敏度分析的同步调相机及其励磁系统参数分类辨识方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(4):26-37.
MA Ruicong, ZOU Shihao, CAO Yongji, et al. Sensitivity analysis-based classification and identification method of a synchronous condenser and its excitation system parameter [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4):26-37.

[16] 张浩崇,李培强,杨鸽星.配电网分布式电源最大承载力计算修正方法[J].浙江电力,2025,44(7):126-136.
ZHANG Haochong, LI Peiqiang, YANG Gexing. A calculation revision method for maximum DG hosting capacity in distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(7):126-136.

[17] 乐健,廖小兵,李奔,等.基于扩展仿射模型的不确定性静态电压稳定性全局灵敏度分析[J].电工技术学报,2021,36(13):2821-2831.
LE Jian, LIAO Xiaobing, LI Ben, et al. Global sensitivity analysis of uncertain static voltage stability based on extended affine model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13):2821-2831.

[18] 方晓涛,严正,王晗,等.考虑“路-车-源-荷”多重不确定性的交通网与配电网概率联合流分析[J].电力系统自动化,2022,46(12):76-87.
FANG Xiaotao, YAN Zheng, WANG Han, et al. Analysis on probabilistic joint flow for transportation network and distribution network considering multiple uncertainties of road - vehicle - source - load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12):76-87.

[19] 王丰华,王劭菁,苏磊,等.采用Sobol'算法分析变电站接地网关键参数的灵敏度[J].高电压技术,2017,43(1):300-306.
WANG Fenghua, WANG Shaojing, SU Lei, et al. Sensitivity analysis of substation grounding grid parameters based on SobolêMethod [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1):300-306.

[20] LI G Y, RABITZ H, YELVINGTON P E, et al. Global sensitivity analysis for systems with independent and/or correlated inputs [J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2010, 114(19):6022-6032.

[21] 董晓阳,梁琛,马喜平,等.基于偏最小二乘多项式稀疏展开的含风电电力系统概率潮流计算[J].太阳能学报,2023,44(6):351-359.
DONG Xiaoyang, LIANG Chen, MA Xiping, et al. Probabilistic flow calculation of power system considering wind power based on sparse polynomial chaos expansion with partial least squares method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(6):351-359.

[22] NI F, NIJHUIS M, NGUYEN P H, et al. Variance-based global sensitivity analysis for power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):1670-1682.

[23] 胡潇云,赵霞,冯欣欣.基于稀疏多项式混沌展开的区域电-气联合系统全局灵敏度分析[J].电工技术学报,2020,35(13):2805-2816.
HU Xiaoyun, ZHAO Xia, FENG Xinxin. Global sensitivity analysis for regional integrated electricity and gas system based on sparse polynomial chaos expansion [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13):2805-2816.

[24] 麻灿皓,陈丽娟,吴志.考虑多元灵活性资源协同的配电网韧性提升策略[J].电力工程技术,2025,44(1):115-125.
MA Canhao, CHEN Lijuan, WU Zhi. Resilience enhancement strategy for distribution networks considering multiple flexibility resources collaboration [J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(1):115-125.

[25] XIU D B. Numerical Methods for Stochastic Computations: A Spectral Method Approach [M]. Princeton: Princeton University Press, 2010.

[26] 郭振东,李豪杰,宋立明,等.基于自适应稀疏混沌多项式的鲁棒性优化方法[J].航空学报,2024,45(19):630273.
GUO Zhendong, LI Haojie, SONG Liming, et al. Robust optimization method based on adaptive sparse polynomial chaos [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(19):630273.

[27] 孙鑫,王博,陈金富,等.基于稀疏多项式混沌展开的可用输电能力不确定性量化分析[J].中国电机工程学报,2019,39(10):2904-2913.
SUN Xin, WANG Bo, CHEN Jinfu, et al. Sparse polynomial chaos expansion based uncertainty quantification for available transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10):2904-2913.

[28] MARELLI S, LAMAS C, KONAKLI K, et al. UQLab user manual—Sensitivity analysis [M]. ETH Zurich, Switzerland: Chair of Risk, Safety and Uncertainty Quantification, 2021:59-68.

收稿日期:2025-06-21
修回日期:2025-12-15

赵　鑫(1996),男,硕士,工程师,主要研究方向为电动汽车与电力营销;

刘汉民(1975),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为电动汽车与综合能源;

薄　博(1979),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为电力营销与电动汽车;

杨　坡(1985),通信作者(15301062804@163.com),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电动汽车与电力营销;

夏　华(1989),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电动汽车与客户侧储能。

(责任编辑　郑天茹)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250118

·数字新基建·

基于知识映射生成式对抗网络的远动点表智能构建技术研究

周华锋[1],张宏斌[1],刘科孟[1],徐 浩[2*],崔万州[2],李甘源[2]
(1.南方电网电力调度控制中心,广东 广州 510000;2.长园深瑞继保自动化有限公司,广东 深圳 518000)

摘要:随着智能电网的发展,变电站监控系统的复杂度显著增加,传统人工编制点表的方式已难以满足工程需求。本文提出了一种基于知识映射生成式对抗网络的远动点表自动生成方法,旨在解决变电站监控系统中远动点表生成的动态适配与合规性问题。方法分为三部分:首先,采用DeepSets框架处理变电站中不定维度的信号集合,通过置换不变性聚合提取全局特征;其次,构建了多调度机构、多电压等级的知识模板库并采用TransH算法将调度规范约束嵌入为低维向量,显式建模变电站间隔、信号和调度规范间的复杂关系;最后,设计生成式对抗网络,生成器通过知识引导的动态筛选生成候选点表,判别器通过多尺度验证机制确保生成质量。实验结果表明,本文方法生成点表的合规率达99.6%,约束满足率达98.3%,相比传统方法分别提升5.4%和16.75%。

关键词:点表生成;知识映射;生成式对抗网络;DeepSets;TransH
中图分类号:TP29 **文献标志码:**B **文章编号:**1007-9904(2026)04-0066-10

Research on the Intelligent Construction Technology of Remote Point Tables Based on Knowledge-mapping Generative Adversarial Networks

ZHOU Huafeng[1],ZHANG Hongbin[1],LIU Kemeng[1],XU Hao[2*],CUI Wanzhou[2],LI Ganyuan[2]
(1.CSG Power Dispatching Control Center,Guangzhou 510000,China;
2.CYG Sunri Corporation,Shenzhen 518000,China)

Abstract: With the development of smart grids, the complexity of substation monitoring systems has significantly increased, making traditional manual point tables compilation methods increasingly insufficient to meet engineering requirements. A knowledge-mapping-based generative adversarial network (GAN) method is proposed for the automatic generation of remote telemetry point tables, aiming to address the dynamic adaptability and compliance issues in the generation of remote telemetry point tables within substation monitoring systems.The proposed method consists of three main components: First, the DeepSets framework is employed to process the variable-dimensional signal sets in substations, extracting global features through permutation-invariant aggregation. Second, a knowledge template library is constructed to encompass multiple dispatching agencies and voltage levels. The TransH algorithm is used to embed dispatching specifications as low-dimensional vectors, explicitly modeling the complex relationships among substation intervals, signals, and dispatching specifications. Finally, a generative adversarial network is designed. Its generator employs knowledge-guided dynamic filtering to produce candidate point tables, while the discriminator ensures generation quality through a multi-scale verification mechanism. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves a compliance rate of 99.6% and a constraint satisfaction rate of 98.3% for generated point tables, representing improvements of 5.4% and 16.75%, respectively, compared to traditional methods.

Keywords: point tables generation; knowledge mapping; GAN; DeepSets; TransH

0 引言

随着智能电网的建设,变电站监控系统的复杂度呈指数级增长。作为监控系统的核心接口,远动承担着信号映射、协议转换等关键功能,对变电站监控系统与远程调度监控主站之间的监控数据传输和通信至关重要[1-3]。其中,远动点表作为数据交换的基础单元[4],其自动生成技术研究,旨在提高变电站监控系统的智能化水平,减少人工干预,提高监控信

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(000005KC23120001)。Science and Technology Project of China Southern Power Grid (000005KC23120001).

息点表的制作效率和准确性,降低变电站调试和维护成本。传统点表编制依赖人工收集设备配置、信号类型等信息,需要经过多轮人工输入与校验,存在效率低、易出错等问题。据统计,典型220 kV变电站的信息模型包含超过5万个原始信号。在实际电网运行中,单个变电站需要对接2~4个调度中心,每个调度中心需要从全站信号中筛选出1 000~4 000个关键信号构建专用点表。传统人工编制模式下,完成一套完整点表的创建、校验流程平均需要投入7人·天的工作量,严重制约了智能电网的快速部署。

随着智能电网调度控制系统的深化应用,传统点表管理模式已无法满足新型设备快速接入需求。为此,基于运行管理系统(operation management system,OMS)系统的点表管理模块通过典型库构建和流程规范化,首次实现了点表全生命周期管理[5]。后续研究者们提出了多种方法以提升点表生成的能力。早期基于规则驱动型方法的研究中,张心洁等[6]通过基于语义分析的D5000遥信信息生成框架显著提高了规则显式化程度,但依赖预设的字符分解规则,难以处理复杂语义场景。此外,一系列研究通过结合模型解析与模板匹配实现点表自动生成方法,提升了配置效率[7-8],但其对人工经验依赖性强,难以适应新型设备接入场景。随着运维需求升级,李娜等[9]将厂站图模解析与模板匹配技术相结合,通过远动配置描述文件提升了点表信息校核的效率,但该方法在点表自动生成环节仍未取得实质性突破。现有方法普遍面临两大技术瓶颈:规则固化和动态适应性差,难以适应不同变电站信号的动态变化与多个调度机构的差异化规范。这些问题的存在,使得现有自动化工具在新型设备接入场景下的点表合规率不足,且需要专业运维人员持续维护规则库,扩展性较差。如何实现自适应的智能化点表生成,成为破解智能电网“最后一公里”接入难题的关键。

随着深度学习在电力领域的应用,生成式模型为点表自动化生成提供了可能性。当前主流的生成式方法包括变分自编码器(variational auto-encoder,VAE)、扩散模型和生成式对抗网络(generative adversarial network,GAN)等。VAE通过概率隐变量建模实现数据生成[10],但其隐空间平滑性导致离散规则(如调度规范)的嵌入能力不足;扩散模型依赖多步迭代去噪生成数据[11],虽在图像生成任务中表现优异,但其在结构化数据生成中对离散符号化数据的生成效果显著弱于连续数据[12]。GAN在电力领域数据生成中展现强大潜力,如负荷预测[13]和源网荷储协同优化[14]。然而,GAN在点表生成场景中面临一个问题,即数据驱动的随机性难以与知识驱动的确定性协同。这个问题不仅导致调度规范语义一致性的缺失,也难以适应多个变电站的动态配置需求。所以,亟须探索知识嵌入与动态信号特征的融合机制,以实现既能学习信号分布规律、又能满足多调度机构的差异化规范。

近年来,知识推理技术的突破为处理复杂语义关系提供了新思路[15]。基于神经网络的推理方法通过深度建模知识图谱特征实现语义关联挖掘,其中基于实体语义描述的卷积网络方法[16]和图神经网络模型[17-19]分别在文本特征建模与拓扑结构学习方面取得进展。尽管神经网络在关系建模中表现优异[20-21],但其依赖大规模标注数据与复杂拓扑结构的特点,在电力领域小样本、强规则约束的场景下适应性不足。相比之下,Trans系列算法通过将实体投影到关系超平面进行建模,既保留低计算复杂度,又能有效表征关系[22-23]。同时,由于不同变电站的设备和信号都存在差异,在动态信号集合处理方面,传统方法(如循环神经网络)依赖序列顺序且难以适应变长输入,而简单池化操作易丢失信号间的拓扑关联性。DeepSets作为一种置换不变性神经网络架构[24-25],通过元素级特征提取与集合级聚合,支持无序、变长集合的特征学习,为变电站信号的全局表征提供了理论保障。已有研究表明,DeepSets在集合数据处理任务中显著优于其他机器学习方法[26],其置换不变性设计更贴合实际工程场景中信号集合的动态特性。

本文提出一种知识映射生成式对抗网络,首次实现电力领域知识与数据驱动方法的深度融合。通过构建基于TransH的知识嵌入模块,显式建模变电站间隔、信号和调度规范间的复杂语义关系。针对各个变电站设备信号数量不一致的集合特性,使用DeepSets框架通过置换不变性设计,为变长信号的特征聚合提供了理论保障,并设计知识映射嵌入机

制确保生成点表的规范合规性。实验表明,该方法在点表生成合规率和约束满足率有了明显提升,能大幅提高作业效率,为智能变电站的点表生成提供了新的技术范式。

1　基础知识与建模

1.1　生成式对抗网络原理

生成式对抗网络是由Goodfellow等人于2014年提出的一种深度学习模型,主要用于生成与真实数据分布相似的新数据。GAN的核心思想是通过两个神经网络的对抗训练实现数据生成:一个是生成器,另一个是判别器。生成器的目标是生成尽可能逼真的数据,而判别器的目标是区分生成的数据和真实数据。两者通过不断的对抗训练,最终达到一种平衡,使得生成器能够生成与真实数据分布高度相似的数据。

生成器G和判别器D的对抗过程可以看作是一个极小极大博弈。两者的目标函数可以表示为

$$\min_G \max_D V(D,G) = \mathrm{E}_{\boldsymbol{x}\sim p_{\mathrm{data}}(\boldsymbol{x})}[\ln D(\boldsymbol{x})] + \mathrm{E}_{z\sim p_z(z)}[\ln(1-D(G(z)))] \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{x}$为来自真实数据分布$p_{\mathrm{data}}(\boldsymbol{x})$的样本向量;$z$为来自噪声分布$p_z(z)$的随机向量;$G(z)$为生成器生成的样本;$D(\boldsymbol{x})$为判别器对真实样本的判别概率;$D(G(z))$为判别器对生成样本的判别概率;E为期望值运算符;$V(D,G)$为价值函数,反映判别器与生成器的博弈均衡状态。

生成器G是一个神经网络,输入为随机噪声z,输出为生成的数据样本$G(z)$。生成器的目标是通过学习真实数据的分布,生成与真实数据相似的样本。在训练过程中,生成器不断调整其参数,使得生成的样本能够欺骗判别器,即让判别器认为生成的样本是真实的。判别器D通常也是一个神经网络,输入为数据样本(可以是真实数据$\boldsymbol{x}$或生成数据$G(z)$),输出为一个标量,表示该样本是真实数据的概率。判别器的目标是通过学习真实数据和生成数据的差异,尽可能准确地区分两者。在训练过程中,判别器不断调整其参数,以提高对生成样本的判别能力。

1.2　点表及需求建模

远动点表包含厂站二次系统所需上传给调度主站的所有关键数据点,包括遥测、遥信、遥控和遥调四类信号,每类信号存在着多个数据点,主要由五个要素构成(Device, Type, Addr, Attri, Desc)。其中,Device表示设备唯一标识符,例如“Bay01_LineProtection”;Type是参数类型,如“遥测”“遥信”和“遥控”等;Addr表示数据地址,如IEC 61850节点路径;Attri表示数据属性,如数据类型、量纲、死区阈值等;Desc是点表信号的中文描述。

点表数据源为变电站配置描述(substation configuration description,SCD)文件,该文件基于IEC 61850标准定义了全站设备的拓扑结构与信号映射关系。参照电力系统对变电站监控信息的标准化编制要求,可采用大数据建模方式来针对不同电压等级的变电站建立多份最大化的标准监控信息点表模板库,在模板库中将涵盖不同电压等级的变电站所有间隔四遥(遥测、遥信、遥控、遥调)信号点集合,各个模板库的每类信号点按照变电站所属电压等级、间隔所属电压等级、间隔类型进行分类存储。图1列举了220 kV电压等级变电站监控点表知识模板库,其他电压等级变电站模板库按照类似方式建立。按调度机构和电压等级分类存储(如“南网总调-220 kV线路间隔模板库”)。每类模板库包含该场景下最大化的标准信号点集合与调度规范约束。其形式化表示为

$$\mathcal{K} = \{K_{c,v}\}_{c\in C, v\in V}, K_{c,v} = (\mathcal{P}_{\mathrm{std}}, \mathcal{R}_{c,v}) \tag{2}$$

式中:C为所有调度的集合;V为所有电压等级的集合;$K_{c,v}$为特定调度机构和电压等级对应的知识模板(c为调度机构索引,v为电压等级索引);$\mathcal{P}_{\mathrm{std}}$为标准信号点集合,涵盖所有可能的四遥信号;$\mathcal{R}_{c,v}$为调度规范约束集(如“某调度要求220 kV线路间隔必须包含主变压器保护动作信号”)。

基于电力系统对变电站监控信息的标准化编制要求,点表生成任务可形式化为一个知识映射下的动态优化问题。其核心是通过知识建模方式,针对不同调度不同电压等级的变电站建立多份最大化的标准监控信息点表模板库,并结合深度学习技术实现自动化生成。

其输入为来自目标变电站的SCD文件的信号集合$\mathcal{S}_{\mathrm{SCD}}$和知识模板$\mathcal{K}$。其输出为

$$\mathcal{P}_{\text{out}} = \{q_l\}_{l=1}^{L} \tag{3}$$

式中：q_l 为输出点表中的第 l 个信号；L 为总信号数。式(3)满足 $\mathcal{P}_{\text{out}} \subseteq \mathcal{S}_{\text{SCD}} \cap \mathcal{P}_{\text{std}}$ 且 $\mathcal{P}_{\text{out}}$ 满足 $\mathcal{R}_{c,s}$。

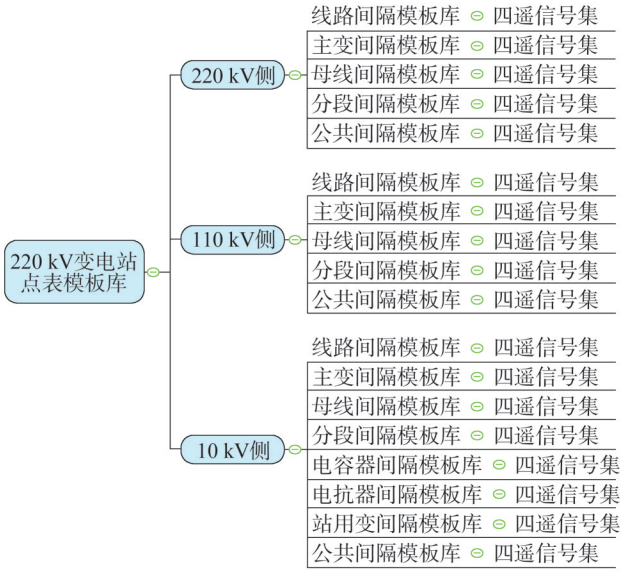


图1　典型220 kV电压等级点表知识模板库

Fig.1 Table knowledge template library of typical 220 kV voltage class points

2　知识映射生成对抗模型

2.1　整体架构设计

本文提出的知识映射生成对抗模型(knowledge-mapping generation adversarial network，KMGAN)采用三级协同架构，如图2所示，包含信号特征提取层、知识映射嵌入层和生成对抗层，旨在实现动态信号集合与静态知识模板库的深度融合。

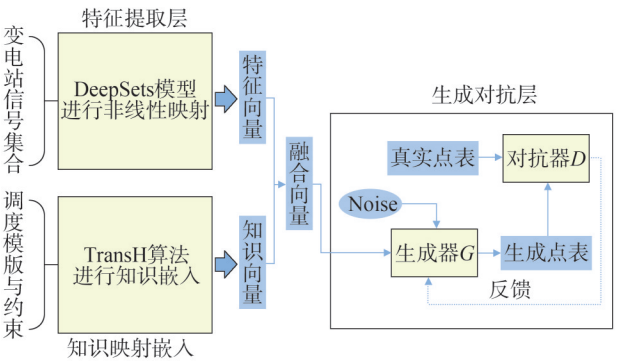


图2　KMGAN协同架构

Fig.2 Collaborative architecture diagram of the KMGAN

2.2　信号特征提取

基于DeepSets理论构建信号特征提取模块，处理变电站特有的动态信号集合。DeepSets是一种处理集合数据的神经网络架构，其核心思想是通过置换不变性实现对无序集合的特征提取。对于任意集合 $X=\{\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n\}$，DeepSets的映射形式为

$$\boldsymbol{h}_{\text{set}} = \rho\left(\sum_{\boldsymbol{x}_i \in X} \phi\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right) \tag{4}$$

式中：$\phi(\cdot)$ 为元素级特征提取器，将每个元素映射到高维特征空间；$\rho(\cdot)$ 为集合级特征提取器，将聚合后的特征映射到最终输出空间 $\boldsymbol{h}_{\text{set}}$。

该方法的关键优势在于，信号集合的顺序不会影响生成结果，符合实际工程需求，并支持变长输入，能够适应不同规模的变电站。信号特征提取的核心流程如下。

1)设备信号编码。通过多层感知机(multi-layer perceptron，MLP)对每个信号点进行特征映射，生成信号级嵌入 $\boldsymbol{h}_i=\phi(\boldsymbol{s}_i)$，其中 $\boldsymbol{s}_i$ 是属于 S_{SCD} 的第 i 个信号。

2)集合特征聚合。采用置换不变性的求和操作，聚合所有信号点特征为

$$\boldsymbol{h}_{\text{agg}} = \sum \boldsymbol{h}_i \tag{5}$$

3)集合级映射。通过非线性变换 $\rho(\cdot)$ 提取全局特征为

$$\boldsymbol{h}_{\text{set}} = \rho(\boldsymbol{h}_{\text{agg}}) \tag{6}$$

模块输出集合 $\boldsymbol{h}_{\text{set}}$ 表征变电站信号的整体分布与拓扑关联性，为后续的点表生成提供特征支持。

2.3　知识映射表示

在点表生成任务中，知识映射涉及大量多对多关系，因此知识嵌入方法的选择直接影响点表生成的准确性和扩展性。本文采用TransH算法进行知识嵌入，主要考虑以下因素：首先，TransH适用于多对多关系建模，通过在特定投影平面内对关系进行建模，能够更好地表示不同维度间的复杂关系；其次，TransH具有较低的计算复杂度，使得其能够更高效地与深度学习模型结合，便于在机器学习或神经网络架构中进行优化。

TransH通过映射变电站的间隔、信号和调度规范之间的关系，使得这些实体和它们之间的关系能被有效地表示在一个低维的空间中。其映射形式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{h}_{\perp} = \boldsymbol{h} - \boldsymbol{w}_r^{\mathrm{T}} \boldsymbol{h} \boldsymbol{w}_r \\ \boldsymbol{t}_{\perp} = \boldsymbol{t} - \boldsymbol{w}_r^{\mathrm{T}} \boldsymbol{t} \boldsymbol{w}_r \end{cases} \tag{7}$$

式中:h 和 t 分别为头实体和尾实体的原始嵌入向量;$\boldsymbol{w}_r$ 为关系 r(如“必须包含”“需要监视”等关系语义)的投影超平面法向量;$\boldsymbol{w}_r^{\mathrm{T}}$ 为 $\boldsymbol{w}_r$ 的转置;$\boldsymbol{h}_{\perp}$ 和 $\boldsymbol{t}_{\perp}$ 分别为头实体和尾实体投影后的实体向量。然后,得到关系评分函数为

$$f_r(\boldsymbol{h},\boldsymbol{t}) = \left\| \boldsymbol{h}_{\perp} + \boldsymbol{r} - \boldsymbol{t}_{\perp} \right\|_2^2 \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{r}$ 为关系 r 的平移向量。其期望的结果为:如果三元组关系是正确的,则结果数值较小,反之则结果数值较大。

远动点表生成需要结合调度规范对设备信号的解读与约束,采用知识图谱的方法可以将调度规范转换为三元组表示,并通过 TransH 算法对其进行嵌入。这种方法能建模不同信号与变电站间隔之间的关系,从而为点表的智能生成提供精准的约束。将知识嵌入后,建立以下三维结构来表示实体与实体间的关系,如表1所示。

表1　点表实体与关系示例

Table 1 Examples of point table entities and relationships

名称	类型	例子
220 kV 线路间隔	实体	<LineBay220 kV>
差动保护动作信号	实体	<DiffProtectionYX>
深圳调度	实体	<SZDD>
间隔必须包含信号	关系	<LineBay220 kV, requires, DiffProtectionYX>
间隔可以存在信号	关系	<LineBay220 kV, exsits, DiffProtectionYX>
调度需要监视间隔	关系	<SZDD, monitors, LineBay220 kV>

为了将知识嵌入引入点表生成过程中,通过计算每个三元组的加权值来获取知识映射的影响因子。加权过程为

$$\boldsymbol{h}_{\mathrm{kg}} = \sum_{(\boldsymbol{h},\boldsymbol{r},\boldsymbol{t}) \in \mathcal{R}_{\mathrm{sr}}} \alpha_{(\boldsymbol{h},\boldsymbol{r},\boldsymbol{t})} \left(\boldsymbol{h}_{\perp} + \boldsymbol{r} - \boldsymbol{t}_{\perp} \right) \tag{9}$$

式中:$\alpha_{(\boldsymbol{h},\boldsymbol{r},\boldsymbol{t})}$ 为三元组的权重,可通过注意力机制计算为

$$\alpha_{(\boldsymbol{h},\boldsymbol{r},\boldsymbol{t})} = \frac{\exp\left(f_r(\boldsymbol{h},\boldsymbol{t}) \right)}{\sum \exp\left(f_r(\boldsymbol{h}',\boldsymbol{t}') \right)} \tag{10}$$

式中:$\boldsymbol{h}'$、$\boldsymbol{t}'$ 分别为知识模板库中某一个三元组的头实体和尾实体,通过遍历这些实体及其关系计算注意力权重可以将知识映射有效地引入点表生成过程中,确保生成的点表符合电力调度规范。

2.4　生成对抗模型

生成器的目标是从信号集合中筛选符合条件的信号点,并通过知识映射嵌入确保生成的点表符合模型规范。其设计流程如下。

1)生成器首先将 DeepSets 提取的集合特征与 TransH 编码的知识特征融合,生成联合特征作为输入到生成器中,即为

$$\boldsymbol{h}_{\mathrm{joint}} = \mathrm{MLP}([\boldsymbol{h}_{\mathrm{set}}; \boldsymbol{h}_{\mathrm{kg}}]) \tag{11}$$

式中:MLP(·)为多层全连接网络,包含 ReLU 函数激活的隐藏层和线性输出层。

2)对信号集合中的每个信号点,计算其生成概率,即为

$$p_i = \sigma\left(\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}} \cdot [\boldsymbol{h}_i; \boldsymbol{h}_{\mathrm{joint}}] + \boldsymbol{b}_{\mathrm{p}} \right) \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{W}_{\mathrm{p}}$ 为生成概率计算层的权重矩阵;$\boldsymbol{b}_{\mathrm{p}}$ 为生成概率计算层的偏置项;$\sigma(\cdot)$ 为 Sigmoid 函数,将输出映射到[0,1]区间,表示信号点被选中的概率。

3)知识映射嵌入机制通过知识门控调整生成概率,确保生成信号点符合知识模板库的规范。基于知识向量,计算门控权重:

$$g = \sigma\left(\boldsymbol{W}_{\mathrm{g}} \cdot \boldsymbol{h}_{\mathrm{kg}} + \boldsymbol{b}_{\mathrm{g}} \right) \tag{13}$$

式中:$\boldsymbol{W}_{\mathrm{g}}$ 为知识门控层的权重矩阵;$\boldsymbol{b}_{\mathrm{g}}$ 为知识门控层的偏置项。

4)使用门控权重调整原始生成概率为

$$\hat{p}_i = p_i \cdot g + (1 - g) \cdot I(\boldsymbol{s}_i \in \mathcal{P}_{\mathrm{std}}) \tag{14}$$

式中:$I(\boldsymbol{s}_i \in \mathcal{P}_{\mathrm{std}})$ 为指示函数,当信号点属于模板库时取值为1,否则为0;g 为控制生成概率。g 的调整强度为:当 $g \to 1$ 时,生成器主要依赖数据驱动生成,即 $\hat{p}_i \approx p_i$;当 $g \to 0$ 时,生成器强制选择模板库中的信号点,即 $\hat{p}_i \approx I(\boldsymbol{s}_i \in \mathcal{P}_{\mathrm{std}})$。

5)根据调整后的概率筛选信号点,生成点表为

$$\mathcal{P}_{\mathrm{out}} = \{ \boldsymbol{s}_i | \hat{p}_i > \tau \} \tag{15}$$

式中:τ 为概率阈值。

判别器的任务是评估生成的点表是否符合 SCD 拓扑结构和调度规范要求。可以从信号一致性评估和调度规范覆盖度评估两个方面进行,具体设计如下。

1）判别器需要评估生成点表中的每个信号是否与 SCD 中的信号一致，确保生成的点表在信号映射方面符合实际的设备配置要求。信号一致性得分为

$$S_{\text{signal}} = \frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L} I\left(q_l \in \mathcal{S}_{\text{SCD}}\right) \tag{16}$$

2）判别器需要检查生成点表是否满足所有调度规范的约束要求。对于每个调度规范约，判别器评估生成点表中是否存在满足该约束的信号点。规范覆盖度得分为

$$S_{\text{cover}} = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} I\left(\exists q_l \in \mathcal{P}_{\text{out}}, q_l\text{满足}r_j\right) \tag{17}$$

式中：r_j 为 $\mathcal{R}_{c,v}$ 调度规范约束集中的第 j 条约束；m 为是调度规范约束的总条数。

生成式对抗网络的损失函数结合了生成器和判别器的目标，通过对抗训练优化整体效果。生成器损失函数和判别器损失函数整合为一个整体优化目标，最终共同优化生成过程。生成器损失函数为

$$\mathcal{L}_G = -\mathrm{E}\left[\ln D(\mathcal{P}_{\text{out}})\right] + \lambda \cdot \frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L} I\left(q_l \notin \mathcal{P}_{\text{std}}\right) \tag{18}$$

式中：λ 为平衡对抗损失与信号一致性损失的缩放系数。

判别器损失函数由两部分构成，分别如式（19）和式（20）所示。

$$\mathcal{L}_{D1} = -\mathrm{E}\left[\ln D(\mathcal{P}_{\text{real}})\right] - \mathrm{E}\left[\ln(1 - D(\mathcal{P}_{\text{out}}))\right] \tag{19}$$

$$\mathcal{L}_{D2} = \eta \cdot (1 - (\alpha \cdot S_{\text{signal}} + \beta \cdot S_{\text{cover}})) \tag{20}$$

式中：$\mathcal{P}_{\text{real}}$ 为真实点表；α 和 β 分别为信号一致性得分和规范覆盖度得分的权重，其和为 1；η 为平衡对抗损失与约束损失的缩放系数。总的判别器损失函数为

$$\mathcal{L}_D = \mathcal{L}_{D1} + \mathcal{L}_{D2} \tag{21}$$

在生成式对抗网络的训练过程中，生成器和判别器通过对抗训练不断优化。生成器的目标是生成符合信号规范和调度要求的点表，而判别器则评估生成的点表是否符合 SCD 和调度规范的要求。最终，通过生成器和判别器的博弈，生成式对抗网络能够生成高质量的点表，确保信号约束和调度要求得到满足。其训练流程如图 3 所示。

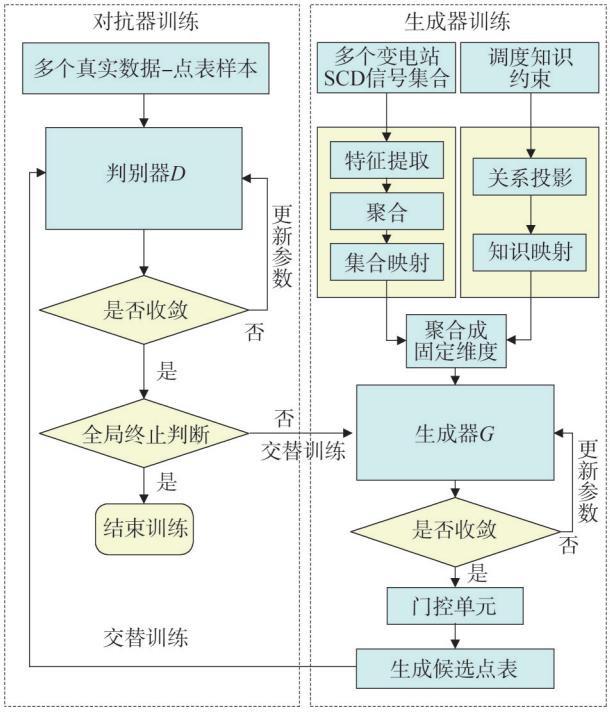


图 3　KMGAN 训练流程

Fig.3 Flowchart of the KMGAN training process

3　实验验证与工程分析

3.1　测试环境与对比方法

训练数据为南方电网公司提供的实际运行 SCD 和点表数据集，涵盖 2018—2024 年期间 236 座变电站的 SCD 文件和历史点表记录。数据集的信号点涵盖了 10～220 kV 电压等级的设备信号点。历史点表包含了来自南方电网总调和深圳调度两个调度机构的差异化调度规范，共计 2 385 条调度规范，涉及最大四遥信号模板和必传信号等条件。训练及测试所用的服务器配置如下：采用 1 颗海光 C86 5380 16 核处理器，主频为 2.5 GHz；配备 64GB DDR4 ECC 内存；GPU 加速卡为 1 张寒武纪的 MLU370-S4，显存 24 GB，最大 FP16 运算性能达 72 TFLOPS。训练所用的软件包括 pyTorch 2.0 框架和 Python 3.9 版本。通过基于 IEC 61850-6 规范的 SCD 解析工具链提取 236 座变电站的 SCD 文件，生成结构化信号模型，耗时 2.5 h。将 2385 条调度规则映射为知识，耗时 1.2 h。训练生成式对抗网络时通过调整神经网络的层数和神经元数量，使其占用的显存平均在 20 GB 左右，总训练轮数设定为 50，总训练时长为 14.2 h。

本文的核心关注点在于推理阶段的点表生成效果。为了评估所提方法的有效性，使用两个评价指标来衡量方法的准确率。其中，合规率（compliance rate，CR）是衡量生成点表中属于 SCD 文件中的信号

且满足调度标准模板要求的信号点占比的指标,计算公式为

$$Q_{\mathrm{CR}}=\frac{\left|\mathcal{P}_{\mathrm{out}}\cap\mathcal{S}_{\mathrm{SCD}}\cap\mathcal{P}_{\mathrm{std}}\right|}{\left|\mathcal{P}_{\mathrm{out}}\right|} \tag{22}$$

约束满足率(constraint satisfaction rate,CSR)表示生成点表与调度约束条件之间的交集占调度约束条件总数的比例,计算公式为

$$Q_{\mathrm{CSR}}=\frac{\left|\mathcal{P}_{\mathrm{out}}\cap\mathcal{R}_{c,v}\right|}{\left|\mathcal{R}_{c,v}\right|} \tag{23}$$

3.2　生成有效性对比结果

为了和现有两种方法进行了对比,参考文献[6]所提的规则驱动方法和文献[7]所提的模板匹配方法分别实现,通过使用信号量规模在5万的SCD文件生成深圳调度要求的点表,比较了不同方法在合规率和约束满足率上的表现。表2展示了不同方法在合规率和约束满足率上的对比结果。传统模板引擎方法的合规率为90.3%,约束满足率为85%。虽然该方法能够生成符合基本信号规范的点表,但在处理复杂的调度规范时,其效果有所不足,导致约束满足率略低。规则驱动生成方法的合规率为98.1%,约束满足率为78.1%。相比传统模板引擎,规则驱动生成方法在合规率上有所提高,但在满足复杂约束方面的表现仍然有限,导致其约束满足率不如本文方法。本文提出的生成式对抗网络方法在合规率和约束满足率上均取得了最佳表现,合规率达到99.5%,平均提升5.4%;约束满足率为98.3%,平均提升16.75%。未满足的1.7%约束条件主要涉及一些调度规范要求存在,但实际SCD模型不具备的信号点。这些未满足的约束条件不会对点表的整体功能和实际应用产生较大影响。这一结果表明,本方法能够在保证信号点合规性的同时,显著提高调度规范的满足程度,表现出优异的综合性能。

表2　实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results

方法	CR/%	CSR/%
传统模板引擎	90.3	85.0
规则驱动生成	98.1	78.1
本文方法	99.6	98.3

3.3　模块消融实验

为验证各模块的贡献,本文设计了4种不同的实验设置,并对比了合规率、约束满足率和生成时间。图4展示了不同模型模块在点表生成中的贡献情况。在没有DeepSets模块的情况下,模型的合规率下降至39.6%,但约束满足率仍较高,为91.9%。这表明,尽管去除了DeepSets模块,模型仍能满足大部分约束要求,但在合规性方面存在显著不足,导致生成的点表无法满足完整的信号规范。在去除TransH知识嵌入的情况下,合规率提高至93.5%,但约束满足率大幅下降至53.5%。去除TransH导致模型无法充分利用知识映射,虽然信号合规性有所改善,但调度规范的满足度显著下降。动态门控注入进一步提升了合规率和约束满足率,并且其效率没有降低太多。具体来说,动态门控注入模块通过控制生成过程中的约束权重,使模型能够更好地平衡合规性与调度规范的满足度,从而提升了模型在复杂任务中的适应性,这证明了动态门控注入模块在效率和效果之间的良好平衡。

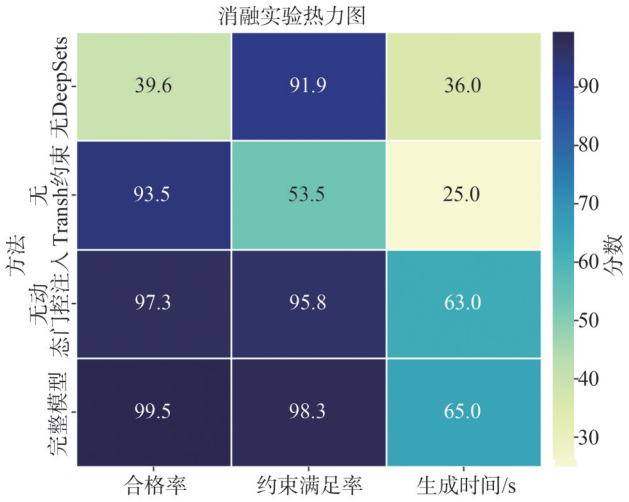


图4　模型模块贡献热力图

Fig.4 Heatmap of different model module contributions

3.4　跨生成模型对比分析

为进一步验证本文方法在点表生成任务中的优势,选取VAE、扩散模型和本文提出的KMGAN进行对比实验。在VAE和扩散模型的对比实验中保留DeepSets和TransH两个模块,以隔离模型架构差异对对比结果的影响。为在训练效率、模型性能与电

力应用场景之间实现平衡，实验选定 10～50 轮作为训练轮次范围。所有实验采用与 3.1 节相同的测试环境与评估指标进行对比分析，其结果如图 5 所示。

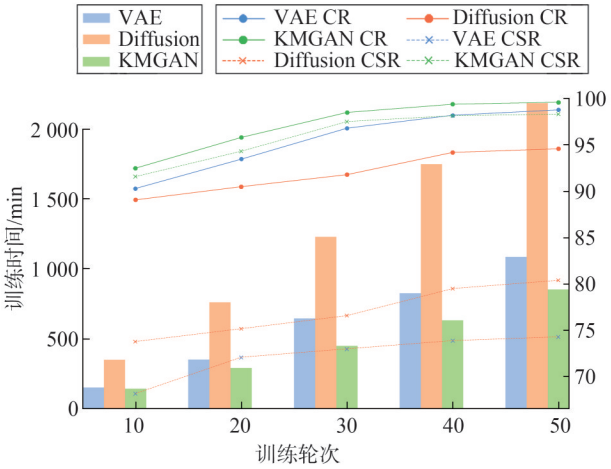


图 5　各轮次中的训练时间与生成效果

Fig.5 Training time and performance convergence across epochs

实验结果表明，扩散模型的训练时间远高于其他两类模型，这主要归因于其训练方式需要逐步去噪，每一步都必须进行复杂的概率计算和梯度更新，导致计算复杂度较高。此外，扩散模型在生成离散点表数据方面的能力相对较弱，生成精度不足。相比之下，VAE 通过单步优化隐变量分布来实现数据生成，计算复杂度较低，因此训练时间更短。然而，VAE 的隐空间平滑性使其在处理离散规则时表现较差，导致其生成结果的约束满足率和合规率均低于扩散模型和 KMGAN。KMGAN 通过对抗训练和动态门控机制显著提升了训练效率，其中对抗训练通过梯度引导加速隐变量优化，动态门控机制则有效减少了无效迭代。KMGAN 在合规率和约束满足率上表现最佳，说明其能够更好地与 DeepSets 和 TransH 模块相匹配，从而实现更高的生成效果和更优的性能表现。

3.5　工程案例

以深圳 220 kV 梨园站为例，展示了所提方法在实际工程中的应用效果。该变电站的信号规模总计 15 万条，涵盖了多种设备信号和调度的约束需求。在生成点表时，系统耗时约 5 min，成功生成了针对深圳调度的点表，最终结果包含了 3 865 个信号。只有 8 个信号生成错误，其中有 3 个信号是调度要求有但是 SCD 模型不存在的信号。其他几个信号经过人工简单修改后即可迅速投入使用。与传统人工生成方法相比，如表 3 所示，传统方法的总耗时通常为 56 h，而本文方法将总耗时缩短至 35 min，效率提升了约 96 倍。

表 3　220 kV 变电站点表生成效率对比

Table 3 Comparisons of point table generation performance of the 220 kV substation

指标	传统方法	本文方法
生成时间	40 h	约 5 min
核对并修改	16 h	约 30 min
训练成本		一台服务器运行几十小时
复用能力	难复用	一次训练，适用整个地区

在复用能力方面，传统方法因规则固化严重，难以适配新型设备模型，需要依赖人工频繁调整模板或重构规则库。而本文方法通过知识映射与门控机制，实现了模型的泛化能力。具体而言，对于某一地区内后续点表生成任务，无须重新进行大规模的模型训练或人工标注，仅需要少量人工核对即可完成。以一个地区平均每年新增 20 个变电站为例，若采用传统方法，每年人工成本将累积高达几十万元，而本文方法仅需要少量人工干预，人工成本几乎可以忽略不计，进一步放大了本文方法的经济性。该案例证明了本文方法在大规模变电站的应用潜力，为进一步推广和应用提供了强有力的支持。

4　结束语

本文提出了一种基于知识映射生成式对抗网络的点表自动生成方法，通过融合电力领域知识与深度学习技术，解决了传统方法在灵活性、合规性及跨变电站适配性上的不足。实验结果表明，该方法在合规率和约束满足率上均显著优于传统规则引擎与数据驱动方法。同时相比于其他生成模型，在离散规则嵌入与动态信号处理方面展现了明显优势。工程应用证明，该方法可有效降低人工编制工作量，为智能变电站的即插即用提供了可靠的技术支撑。未来工作将聚焦于增量学习机制与可解释性增强，进

一步提升模型在动态电网环境中的实用性。

参考文献

[1] 龚立,田猛,董政呈,等.计及次生灾害影响的电力信息物理系统恢复方法研究[J].电力系统保护与控制,2025,53(1):59-70.
GONG Li, TIAN Meng, DONG Zhengcheng, et al. A recovery method of cyber physical power system considering secondary disasters[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(1): 59-70.

[2] 刘刚,许艾,徐延明,等.调度与变电站通信安全防护技术[J].南方电网技术,2021,15(5):64-71.
LIU Gang, XU Ai, XU Yanming, et al. Communication security protection technology between dispatching and substation [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(5): 64-71.

[3] 郭凯,王兴财,左越,等.电力远动传输数据在线自动校验技术研究[J].电力信息与通信技术,2024,22(12):7-15.
GUO Kai, WANG Xingcai, ZUO Yue, et al. Research on online automatic check technology for power remote control transmission data [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(12): 7-15.

[4] 韩伟,石光,李斌,等.智能变电站远动快速对点系统模块化设计[J].电网与清洁能源,2017,33(5):57-62.
HAN Wei, SHI Guang, LI Bin, et al. Modular design of intelligent substation telecontrol counter point system [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(5): 57-62.

[5] 伏睿,马琳薇,高绚.基于OMS系统的变电站监控信息点表管理模块的设计[C]//首届国际信息化建设学术研讨会论文集(三).美国纽约,2016:65-66.

[6] 张心洁,王建.基于语义分析的D5000遥信信息生成与校核方法[J].中国电力,2019,52(5):134-141.
ZHANG Xinjie, WANG Jian. A method for generating and checking D5000 alarm information based on semantic analysis [J]. Electric Power, 2019, 52(5): 134-141.

[7] 贺延峰,杨贤明,齐加恩,等.一种智能变电站设备监控信息点表自动配置方法的研究与实现[J].自动化应用,2019,60(11):78-81.
HE Yanfeng, YANG Xianming, QI Jiaen, et al. Research on an automatic configuration method for monitoring information point table of intelligent substation equipment [J]. Automation Application, 2019, 60(11): 78-81.

[8] 曹德发,陈诚伟,张伟渊.一种调度监控信息点表自动规范及校验的系统和方法[J].通讯世界,2019,26(12):233-234.
CAO Defa, CHEN Chengwei, ZHANG Weiyuan. System and method for automatically standardizing and checking scheduling monitoring information point table [J]. Telecom World, 2019, 26(12): 233-234.

[9] 李娜,李宽,李玉敦,等.厂站图模和点表自动生成及信息校核方法[J].山东电力技术,2023,50(1):34-39.
LI Na, LI Kuan, LI Yudun, et al. Method of automatic generation and information checking of station drawing module and point table [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(1): 34-39.

[10] KINGMA D P, WELLING M. Auto-encoding variational Bayes[EB/OL].[2025-02-16]. https://arxiv.org/abs/1312.6114.

[11] HO J, JAIN A, ABBEEL P. Denoising diffusion probabilistic models [J]. Advances in neural information processing systems, 2020, 33: 6840-6851.

[12] AUSTIN J, JOHNSON D D, HO J, et al. Structured denoising diffusion models in discrete state-spaces. In Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), 2021.

[13] ZHANG Y H, DENG X T, ZHANG Y. Generation of load profile based on GAN and LSTM network in smart grid [C] // 2023 ASHRAE Winter Conference. ASHRAE, 2023.

[14] 谢桦,李凯,郤靖彪,等.基于生成对抗网络修正的源网荷储协同优化调度[J/OL].中国电机工程学报,2025:1-14 [2025-02-16]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20250124.0829.002.html.
XIE Hua, LI Kai, QIE Jingbiao, et al. Cooperative optimal scheduling of load and storage in source network based on generation countermeasure network modification [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2025: 1-14 [2025-02-16]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20250124.0829.002.html.

[15] SHAH H, VILLMOW J, ULGES A, et al. An open-world extension to knowledge graph completion models [J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2019, 33(1): 3044-3051.

[16] HALASCHEK-WIENER C, PARSIA B, SIRIN E, et al. Description logic reasoning for dynamic ABoxes [J]. CEUR Workshop Proceedings, 2006, 189: 200-207.

[17] SCHLICHTKRULL M, KIPF T N, BLOEM P, et al. Modeling relational data with graph convolutional networks [C] // The Semantic Web. Cham: Springer, 2018: 593-607.

[18] ZHANG Z, ZHUANG F Z, ZHU H S, et al. Relational graph neural network with hierarchical attention for knowledge graph completion [J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2020, 34(5): 9612-9619.

[19] WANG Q, JI Y D, HAO Y S, et al. GRL: knowledge graph completion with GAN-based reinforcement learning [J]. Knowledge-Based Systems, 2020, 209: 106421.

[20] DAS R, DHULIAWALA S, ZAHEER M, et al. Go for a walk and arrive at the answer: reasoning over paths in knowledge bases using reinforcement learning[J]. 2017.

[21] TIWARI P, ZHU H Y, PANDEY H M. DAPath: distance-aware knowledge graph reasoning based on deep reinforcement learning [J]. Neural Networks, 2021, 135: 1-12.

[22] 白浩,齐林海,王红.融合知识图谱与卷积神经网络的电压暂降分类识别[J].电力信息与通信技术,2021,19(11):131-139.

BAI Hao，QI Linhai，WANG Hong.Classification and recognition of voltage sag based on knowledge graph and convolution neural network［J］. Electric Power Information and Communication Technology，2021，19(11)：131-139.

［23］ 杜晓娟，陶以政，李龚亮.Trans系列知识表示方法发展研究[J].计算机与数字工程，2023，51(11)：2515-2517.
DU Xiaojuan，TAO Yizheng，LI Gongliang. Research on development of TransX knowledge representation methods［J］. Computer & Digital Engineering，2023，51(11)：2515-2517.

［24］ ZAHEER M，KOTTUR S，RAVANBAKHSH S，et al.Deep sets[C]//Advances in Neural Information Processing Systems.2017.

［25］ LEE J，LEE Y，KIM J，et al. Set transformer：a framework for attention - based permutation-invariant neural networks［C］// International Conference on Machine Learning，2019.

［26］ JANISCH J，PEVNÝ T，LISÝ V.Classification with costly features in hierarchical deep sets[J].Machine Learning，2024，113(7)：4487-4522.

收稿日期：2025-02-17

修回日期：2025-06-03

作者简介：

周华锋(1977)，男，硕士，高级工程师，主要研究方向为电力系统自动化技术及管理；

张宏斌(1972)，男，工程师，主要研究方向为电网调度自动化系统相关技术；

刘科孟(1995)，男，硕士，工程师，主要研究方向为电力系统自动化、大数据技术；

徐　浩(1988)，通信作者(xhao@cyg.com)，男，硕士，工程师，主要研究方向为电力系统自动化、人工智能；

崔万州(1982)，男，高级工程师，主要研究方向为电力系统自动化、知识图谱；

李甘源(1989)，男，工程师，主要研究方向为电力系统自动化、特征工程。

（责任编辑　郑天茹）

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250120

电网技改与检修工程造价文本的信息抽取与知识图谱构建

张丽萍[1*],吴莉琳[2],李志翔[2],庞圣养[2],舒胜文[3]
(1.广东电网有限责任公司,广东 广州 510000;2.广东电网有限责任公司湛江供电局,广东 湛江 524000;
3.福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350000)

摘要:针对电网工程造价资料的海量数据格式不一、非结构化特征显著、难以有效挖掘利用的问题,设计格式转换方法对半结构化表格进行预处理,并通过人工制定相关规则抽取造价信息;结合双向长短期记忆网络、基于Transformers的双向编码器表征与条件随机场,提出一种BERT-Bi-LSTM-CRF模型对非结构化的段落文本进行命名实体识别,生成结构化的造价知识三元组,并将其导入Neo4j图数据库,构建电网技改与检修工程造价知识图谱。实验结果表明,本文方法对工程造价资料段落文本中的各类命名实体识别精确率可达89.52%以上,所构建的知识图谱可将不同造价资料中的表格与文本数据转化为节点、实体和属性关系,实现造价信息的智能检索,可为电网工程造价测算与分析决策提供结构化的数据支撑。

关键词:工程造价;信息抽取;三元组;命名实体识别;知识图谱
中图分类号:TP391.1;F407.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1007-9904(2026)04-0076-11

Information Extraction and Knowledge Graph Construction for Cost Documents of Technical Reform and Maintenance Projects in Power Grid

ZHANG Liping[1*], WU Lilin[2], LI Zhixiang[2], PANG Shengyang[2], SHU Shengwen[3]
(1.Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
2.Zhanjiang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhanjiang 524000, China;
3.College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350000, China)

Abstract: To address the challenges of massive, various data formats, prominent unstructured characteristics, and difficulties in effective mining and utilization of power grid engineering cost documents, this paper designs a format conversion method to preprocess semi-structured tables and extract the cost information by manually defined rules. A BERT-Bi-LSTM-CRF model integrates bidirectional long short-term memory (Bi-LSTM), bidirectional encoder representations from transformers (BERT), and conditional random field (CRF). It is developed to perform named entity recognition (NER) on unstructured textual paragraphs and generate structured cost knowledge triplets. Then, these triplets are imported into the Neo4j graph database to construct a knowledge graph for power grid technical reform and maintenance engineering costs. Experimental results demonstrate that the proposed method achieves a precision rate of over 89.52% in recognizing diverse named entities from engineering cost paragraphs. The constructed knowledge graph effectively transforms tabular and textual data from various cost documents into nodes, entities, and attribute relationships, enabling intelligent retrieval of cost information. This study provides structured data support for engineering cost estimation, analysis, and decision-making in power grid.

Keywords: engineering cost; information extraction; triplet; named entity recognition; knowledge graph

0 引言

电网工程具有投资金额大、项目数量多、建设周期长的显著特点,对工程造价的测算与管控具有更高的要求,实现造价体系的数字化转型已成为必然的趋势[1-2]。目前,电网生产项目的技术经济审核通常依赖第三方造价测算,结合各类智能算法以实现工程造价预测[3-6]。由于电力定额与历史造价资料通常格式不一,且多以非结构化形式进行存储,通过人工查询资料、手动套用定额进行造价测算难以充

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目"生产项目造价智能分析技术研究及辅助造价系统开发"(030800KC23040012)。
Science and Technology Foundation of Guangdong Power Grid Co., Ltd. "Research on Intelligent Analysis Technology of Production Project Cost and Development of Auxiliary Cost System" (030800KC23040012).

分挖掘数据价值[7]，因此亟须开发智能化的辅助造价系统用于开展造价文本资料的结构化处理与智能识别研究，提升造价测算效率。

在电网工程立项、采购、施工、竣工、结算的全过程生产项目资料中，包含丰富的造价数据信息，由于涉及规划、物资、基建、财务等众多相关方，造价文件分散存储，数据格式复杂多样、存在数据壁垒[7]，难以被有效挖掘利用。对于历史造价数据，目前主要采用人工检索或借助搜索引擎进行关键词匹配，在海量文本数据中筛选获得有价值的造价信息，其搜索效率较低，无法满足电力工程日益复杂的造价管理需求[8]。

从大规模的电网工程造价资料数据中提取有效信息，多采用命名实体识别[9-10]与关系抽取[11-12]技术，对于抽取得到的大量数据，可以采用知识图谱[13]对其进行有效的组织与检索。目前，知识图谱技术在电力领域已有相关应用。蒋玮等人[14]针对电网基建工程的说明书、清册等数据资料，应用机器学习技术进行信息抽取，构建了基建工程知识图谱；李刚等人[15]介绍了知识图谱应用于电力设备状态评估与健康管理的典型场景；朱晓荣等人[16]从配电网供电能力评估导则与规划设计技术导则等文本中抽取相关知识，构建了应用于配电网综合评价的知识图谱；张晓华等人[17]采用自顶而下的模式设计了大电网运行态势知识图谱软件架构，在省级电网进行了测试与应用；余元[18]研究了工程造价领域的命名实体识别与知识抽取技术，并设计了基于知识图谱的造价信息检索系统。目前在电网工程造价领域，知识图谱技术的研究与应用尚处于起步阶段，从历史资料中挖掘有效的知识，用于辅助工程造价测算，对数字造价体系的建设具有重要意义。

本文针对电网技改与检修工程造价资料，提出一种格式转换方法对其中的半结构化表格进行预处理，设计了相关规则进行表格数据信息抽取；同时对段落文本构建基于 BERT-Bi-LSTM-CRF 的命名实体识别模型，用于抽取其中的有效信息，并生成结构化的三元组；基于 Neo4j 图数据库构建了电网工程造价知识图谱，可用于智能检索预算定额与造价相关信息。

1　电网工程造价资料及预处理

1.1　电网技改与检修工程造价资料

电网工程造价资料可以通过多种来源获得，包括历史工程造价资料、电网工程预算定额资料等。历史工程造价资料涵盖立项管理、采购及合同管理、开工和竣工签证管理、结算管理等多个阶段。其中，可研报告通常包含该工程的子项目、预期使用的材料与机械等详细内容，其造价信息可为其他类似工程项目提供参考。

本文选用电网技术改造工程预算定额[19]、电网检修工程预算定额[20]以及南方电网公司生产项目预算相关标准、部分历史工程造价资料作为文本数据集进行信息抽取。其中，电网技术改造工程预算定额涵盖了设备更新、技术升级等方面的标准，本文选取“电气工程”分册，包括变压器、配电装置、绝缘子、母线、控制保护屏、自动化系统、交直流系统与低压电器、充电桩、电缆、接地、换流站等设备的安装造价信息。电网检修工程预算定额涉及日常维护、大修等方面的预算标准，本文选取“架空线路工程”分册，包括基础检修、杆塔检修、导线及避雷线检修、防雷措施及接地装置检修、附件检修、杆上设备检修等多方面的造价信息。历史造价资料选自某地市供电局 2022—2023 年部分输电线路技改与检修工程。

在预算定额与历史造价资料中含有格式类似的表格，每个表格又囊括了工程中各个项目的定额编号、单位、基价以及使用的人工、计价材料与设备等信息。此外，定额资料、生产项目预算相关标准、历史造价资料还存在大量的段落文本数据，从这些文本数据中可以提取工程项目造价的地形影响因素和使用的未计价材料等造价信息，为工程造价测算提供数据支撑。

1.2　造价资料文本格式转换

电网工程造价资料通常以扫描型 PDF 格式进行存储，其本质上是图像文件，数据难以直接选中或编辑，在信息抽取之前需要对其进行格式转换。采用格式转换软件将 PDF 转换为 Word 格式，能够有效识别段落文本。但由于其中的表格格式较为复杂，部分数据之间未用表格线进行分隔，转换后的表格数据会发生错位，影响信息抽取的准确性。因此，针

对表格数据进行单独处理,并将其转换为Excel文件,具体步骤如下:

1)利用Python读取并解析PDF文件,通过分析文档结构和布局,识别出其中包含的表格页面并对其进行整合。对每个识别出的表格页面进行光学字符识别(optical character recognition,OCR)。将PDF中的表格转换为Word字符串时,均以文本框形式实现图文混排,典型案例如图1所示,转换后的文本框位置与文本原位置相同。

2)对图文混排的Word文档进行处理,采用Python解析文档的可扩展置标语言(extensible markup language,XML)内容,以每个文本框的左上角为基点,提取其水平和垂直位置信息,并利用XPath函数查询并提取每个文本框中的内容。

3)对于文本框,根据其水平和垂直位置,设置阈值k进行分组。统计所有文本框左上角的横纵坐标,并将其从小到大进行排列,计算相邻数据的差值序列,取所有差值的中位数作为基准尺度,将其乘以一个经验系数,即可得到动态阈值k。遍历从小到大排列好的横纵坐标数据,当相邻差值超过该阈值时创建新的分组,否则将当前数据归入上一组。依据每一组中的最小坐标值,按照从小到大的顺序对组进行编号。

4)将文本框与Excel的单元格进行匹配,每个文本框的水平位置与垂直位置的组编号分别对应Excel的列号与行号,将文本框内容填入单元格中,生成Excel表格。

定额编号			XYX1-1	XYX1-2
项目			10 kV	35 kV
单位			每基一腿	每基一腿
基价(元)			19.90	30.50
其中	人工费(元)		4.29	8.26
	材料费(元)		11.19	14.70
	机械费(元)		4.42	7.54
名称		单位	数量	
人工	普通工	工日	0.037 3	0.070 4
	输电技术工	工日	0.012 4	0.024 8
计价材料	镀锌铁丝	kg	0.284 9	0.367 3
	木模板	m^3	0.005 7	0.007 4
	草袋	个	0.142 5	0.293 9
	其他材料费	元	0.220 0	0.290 0

图1　文本框排列的Word文档

Fig.1 Word document arranged with text boxes

对于图1所示的文档,采用上述步骤转换后的效果如图2所示。可见,对于未用表格线分隔的数据,如图1所示表格中第5行的"人工费(元)""材料费(元)""机械费(元)"等,经过处理后均以边框线进行了分隔,可以取得良好的转换效果。

	定额编号		XYX1-1	XYX1-2
	项目		10 kV	35 kV
	单位		每基一腿	每基一腿
	基价(元)		19.9	30.5
其中	人工费(元)		4.28	8.26
	材料费(元)		11.19	14.7
	机械费(元)		4.42	7.54
	名称	单位	数量	
人工	普通工	工日	0.037 3	0.070 4
	输电技术工	工日	0.012 4	0.024 8
计价材料	镀锌铁丝	kg	0.284 9	0.367 3
	木模板	m^3	0.005 7	0.007 4
	草袋	个	0.142 5	0.293 9
	其他材料费	元	0.220 0	0.290 0

图2　表格格式转换结果

Fig.2 Table format conversion results

1.3　段落文本触发词构建

电网工程预算定额书与生产项目预算相关标准中包含大量的段落文本,为了从中获取有关的造价信息,可构建对特定数据项抽取起着识别、标志作用的触发词。通过对上述资料的文本结构特征和行业表述规范进行分析,选取"工程""项目内容""地形条件""未计价材料"4类数据项,筛选出可定位造价信息的关键标识,构建触发词表如表1所示。以"工程"类数据项为例,"一、""(一)"等序号能够精准定位工程分项,这些触发词可以快速、准确地从海量段落文本中锁定关键造价数据。

表1　触发词表

Table 1 Trigger word list

待抽取数据项	触发词内容
工程	"一、""(一)""1."等序号
项目内容	本章内容、工作范围
地形	地形使用说明、自然条件
未计价材料	注、未计价材料

将触发词用作段落文本分块的边界标记,通过

搜索并比对某个段落文本中是否包含触发词，从中筛选提取包含特定造价信息的有效文本。以《电网检修工程预算定额—架空线路工程》分册中“基础检修”部分的一段文本为例，经处理得到的典型非结构化文本如表2所示，对于“工程”“项目内容”等4类数据项，可分别提取出与造价信息相关的文本。对于本文构建的造价资料文本数据集，通过触发词以及正则表达式匹配，共获取562条有效文本。

表2　段落文本典型提取结果

Table 2 Typical extraction results of paragraph text

数据项	文本提取结果
工程	基础检修包含基础保护帽修缮，塔基抹面
项目内容	塔基抹面的项目内容：场地清理、选料、砂浆配拌、养护
地形	丘陵的地形增加系数为10%
未计价材料	塔基治理的未计价材料包括水泥、砂、碎石、水、钢筋

2　造价资料信息抽取

2.1　表格数据信息抽取

电网工程造价资料中的算量格式较为统一，大多与图2相近，对预处理获得的Excel文件，设计如下规则进行表格数据信息抽取。

1）规则1：将表头作为项目实体，检索表格的列标签，选择定额编号、项目、单位、基价、人工、计价材料、机械作为实体类型，其中前4类实体的属性为本身，实体的属性值为同行的数据。

2）规则2：对于人工、计价材料、机械3类实体，添加名称属性、单位属性和数量属性，这3类实体之间的各行实体均隶属于排列在前的实体类型，各个实体的属性值为与该实体同行和与属性同列的数据。

3）规则3：定义各类实体之间的关系，如果某对实体的属性值出现在表格的同一列中，那么这对实体之间存在对应关系。

根据上述规则检索各类实体、属性、属性值的位置参数，运用位置参数准确获取每一个单元格内的数据，并根据规则3将其组合生成三元组数据。以图2所示的表格为例，根据规则1可以抽取实体类型为“定额编号”、属性为“定额编号”、属性值为“XYX1-1”的实体；根据规则2可以抽取实体类型为“计价材料”，属性值中名称值为“镀锌铁丝”、单位值为“kg”、数量值为“0.0373”的实体；根据规则3可以得到（XYX1-1，计价材料配置，镀锌铁丝）三元组数据。将各类三元组进行联立，可以得到图3所示的表格抽取结果。

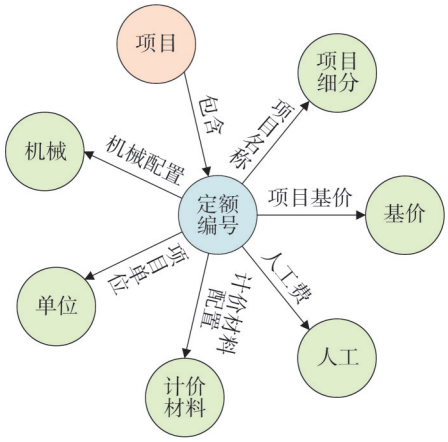


图3　表格三元组抽取结果

Fig.3 Extraction results of table triplet

图3中以圆圈表示实体名称，连接两个实体的线段代表关系名称，总共涵盖定额编号、项目、项目细分、单位、基价、人工、计价材料、机械等8类实体，以及两两实体之间的7类关系边。经由两两实体组合，总共生成了7类造价三元组。根据上述方法，对于本文构建的电网技改与检修工程造价资料文本数据集，共抽取了102个半结构化表格中的知识节点与属性关系，过滤掉重复的实体节点，得到上述8类实体共13 142个、7类关系边共14 990条，形成了14 990个造价知识三元组。

2.2　段落文本信息抽取

在双向长短期记忆网络（bi-directional long short-term memory，Bi-LSTM）的基础上，结合基于Transformers的双向编码器表征（bidirectional encoder representations from transformers，BERT）和条件随机场（conditional random field，CRF），构建BERT-Bi-LSTM-CRF模型对造价资料段落文本进行命名实体识别，以实现信息抽取。

2.2.1　BERT-Bi-LSTM-CRF模型

Bi-LSTM[21]是一种先进的循环神经网络架构，通过引入双向处理机制，实现对文本上下文信息的

全面捕捉,其结合了前向LSTM和后向LSTM两个网络,分别对文本进行从左到右处理和从右到左处理。LSTM的模型结构如图4所示,包含遗忘门、输入门与候选记忆单元、记忆单元更新、输出门等门控单元,通过其实现对信息的更新和利用。图4中,σ为Sigmoid激活函数,f_t表示当前t时间步的遗忘门,i_t为输入门激活值,$\tilde{c}_t$为当前时间步的候选记忆单元状态,tanh为双曲正切激活函数;c_{t-1}、c_t分别表示前一时间步和当前记忆步的记忆单元状态;o_t为输出门激活值,h_{t-1}、h_t分别表示前一时间步和当前时间步的隐藏状态。

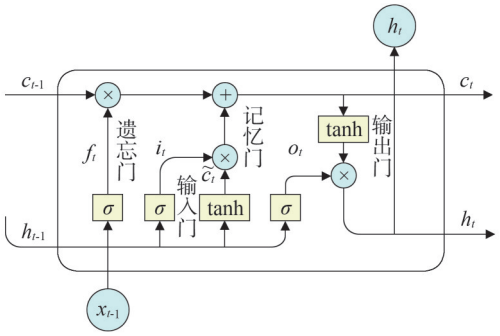


图4　LSTM模型结构

Fig.4 Structure of LSTM model

Bi-LSTM的双向处理方式使其能够同时参考一个词汇的左侧和右侧文本内容,从而更准确地理解词汇在句子中的语义角色和上下文关系。此外,Bi-LSTM通过独特的门控机制,有效缓解了传统循环神经网络在处理长文本时容易出现的梯度消失和梯度爆炸问题,使得模型能够更好地处理复杂语言结构和长距离依赖关系。

BERT[22-23]是一个预训练深度双向模型,其结构如图5所示。输入层由$\boldsymbol{E}_1$至$\boldsymbol{E}_N$组成(N为输入序列的最大长度),包含了待处理文本的原始词向量及位置向量等关键信息。模型中的第二层与第三层均采用了Transformer结构,这些结构由多个精心堆叠的编码器构成,旨在深度挖掘文本的语义特征;输出层由$\boldsymbol{T}_1$至$\boldsymbol{T}_N$组成,输出经深度语义融合后的向量表示,这些向量可以准确反映电力工程造价资料文本的核心信息。在解析一个词汇时,BERT能够同时参考其左侧与右侧的文本内容,这种双向理解机制使其能够更精准地把握语言的深层语义特征。此外,BERT利用注意力机制,将文本中任意两个词汇之间的距离在概念上缩减,极大提升模型在处理复杂语言结构和长文本时的表现能力。

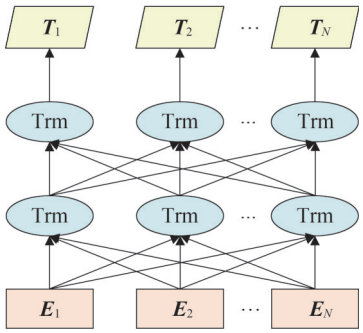


图5　BERT模型结构

Fig.5 Structure of BERT model

CRF[24-25]是一种判别式无向图模型,能够捕捉标注序列中的上下文信息,利用丰富的特征函数和状态转移特征建立输入序列和标签之间的关系,且可以自然地处理多个标签之间的依赖关系。与Bi-LSTM和BERT相比,CRF更侧重于序列标注问题的全局优化,通过计算全局归一化因子得到条件概率分布,采用动态规划算法进行高效解码,实现对序列数据的有效建模和推断。

为了从造价资料段落文本中识别出工程(ENG)、项目(PRO)、地形(TER)、项目内容(CON)、未计价材料(MAT)等各类实体,本文采用BERT-Bi-LSTM-CRF模型进行命名实体识别,其结构如图6所示。模型的架构包括输入层、BERT编码层、Bi-LSTM特征增强层、CRF标注解码层。输入层负责向模型输入标注好的原始序列数据;BERT层用于对输入文本进行深度双向编码,捕捉词汇的上下文信息,生成包含丰富语义特征的词向量;Bi-LSTM层将BERT输出的序列向量输入双向LSTM网络进行深层特征学习,分别按正反两个方向处理序列,通过门控机制建模长距离依赖关系,将两个方向的隐藏状态拼接形成增强后的特征表示;CRF层对Bi-LSTM输出的隐藏状态进行序列标注,通过引入状态转移特征和全局归一化因子,优化标签序列的预测结果。

此外,模型训练时采用交叉熵损失和Viterbi算法进行端到端优化,通过反向传播同步更新BERT的语义编码能力、Bi-LSTM的序列建模能力和CRF

的标签转移规则,使三者形成有机整体,最终实现从字符级输入到实体级输出的精准映射。

在对原始文本数据序列标注的基础上,BERT-Bi-LSTM-CRF 模型通过 BERT 编码、Bi-LSTM 文本特征提取、CRF 词汇标签预测三阶段协同的数据处理流程实现准确的实体识别。以图 6 中的文本为例,首先,输入“杆塔校正的……”原始文本,BERT 层对每个字符进行深度编码,生成包含专业领域语义的上下文相关向量,使“杆”“塔”等文字能够准确表征其在电力专业术语中的特定含义。然后,Bi-LSTM 层对 BERT 输出进行双向特征提取,前向 LSTM 捕获“杆→塔→校→正”的序列演进规律,后向 LSTM 发现“正”与“校”的逆向依赖关系,形成融合双向语义的特征表示。最后,CRF 层基于这些特征进行全局优化解码,在严格遵守 BIO 标注约束的前提下,通过动态规划算法输出最优标签序列:将“杆”标为 B-PRO,“塔”“校”“正”标为 I-PRO,“的”标为 O,完整识别出“杆塔校正”实体。

2.2.2 命名实体识别结果

为提升 BERT-Bi-LSTM-CRF 模型的训练效果,对于上文 1.3 节获取到的 562 条有效段落文本进行数据扩充,通过随机替换与插入、句式重组等文本增强技术,扩充至 1 350 条文本。例如,对于一段有效文本:“基础检修包含基础保护帽修缮,塔基抹面”,可以扩充为“基础结构检修需完成保护帽修缮工作,以及对塔基进行砂浆抹面处理”,或者“塔基抹面与基础保护帽修缮属于基础检修”。数据扩充可以增加相关术语和不同表达方式的出现频率,使模型更好地覆盖工程领域的语言特点。

对扩充后的段落文本,按 8∶2 的比例划分为训练集与测试集,采用 Label Studio 专业数据标注平台、基于 BIO(Begin-Inside- Outside)标注体系进行命名实体标注。其中,B-XXX 表示实体起始位置、I-XXX 表示实体内部成分、O 表示非实体部分。针对造价资料段落文本定义了以下 5 类实体:工程(B-ENG/I-ENG)、项目(B-PRO/I-PRO)、地形(B-TER/I-TER)、项目内容(B-CON/I-CON)、未计价材料(B-MAT/I-MAT)。以表 2 中的典型段落文本为例,命名实体标注情况如表 3 所示。

如图 6 所示,将已标注的段落文本作为输入数据,利用 BERT 模型对输入语句中的各个字符进行编码,生成匹配的字向量与位置向量,挖掘并提取其中的语义特征。然后,将经过编码的向量输入至 Bi-LSTM 层,对向量信息进行双向编码处理,进一步解析并提炼出与上下文紧密相关的语义内容。最后,将富含上下文信息的语义向量传递至 CRF 层进行处理,采用 Viterbi 算法执行解码任务,以期输出一个最优的标签序列,该序列可以准确反映语句中各个

表 3 命名实体标注结果

Table 3 Named entity annotation results

字	标签	字	标签	字	标签	字	标签	字	标签	字	标签	字	标签
基	B-ENG	缮	I-PRO	增	O	的	O	料	I-CON	治	I-PRO	、	I-MAT
础	I-ENG	,	O	加	O	工	O	、	I-CON	理	I-PRO	砂	I-MAT
检	I-ENG	塔	B-PRO	系	O	作	O	砂	I-CON	的	O	、	I-MAT
修	I-ENG	基	I-PRO	数	O	内	O	浆	I-CON	未	O	碎	I-MAT
包	O	抹	I-PRO	为	O	容	O	配	I-CON	计	O	石	I-MAT
含	O	面	I-PRO	10	O	:	O	拌	I-CON	价	O	、	I-MAT
基	B-PRO	。	O	%	O	场	B-CON	、	I-CON	材	O	水	I-MAT
础	I-PRO	丘	B-TER	。	O	地	I-CON	养	I-CON	料	O	、	I-MAT
保	I-PRO	陵	I-TER	塔	B-PRO	清	I-CON	护	I-CON	包	O	钢	I-MAT
护	I-PRO	的	O	基	I-PRO	理	I-CON	。	O	括	O	筋	I-MAT
帽	I-PRO	地	O	抹	I-PRO	、	I-CON	塔	B-PRO	水	B-MAT	。	O
修	I-PRO	形	O	面	I-PRO	选	I-CON	基	I-PRO	泥	I-MAT		

字符对应的实体类别。命名识别的内容即为造价资料段落文本中的“工程”“项目”“地形”“项目内容”“未计价材料”五类专业实体。例如,“工程”类实体的典型识别结果可以是“杆塔检修”“导线及避雷线检修”“变压器安装”“变电站二次系统单体调试”“配电装置安装”等。

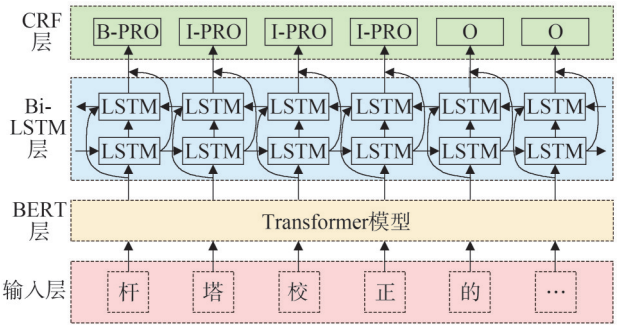


图6　BERT-Bi-LSTM-CRF模型结构

Fig.6 Structure of BERT-Bi-LSTM-CRF mode

利用训练集对BERT-Bi-LSTM-CRF模型进行训练,并对测试集段落文本开展命名实体识别。实验在Windows操作系统上进行,CPU为i5-12490F,GPU为GTX 3060,开发语言为Python3.8,采用Tensorflow深度学习框架。采用精确率P、召回率R、F_1分数作为模型评价指标,其计算公式为

$$\begin{cases} P = \dfrac{T_P}{T_P + F_P} \times 100\% \\ R = \dfrac{T_P}{T_P + F_N} \times 100\% \\ F_1 = \dfrac{2PR}{P + R} \end{cases} \tag{1}$$

式中:T_P为模型正确预测为正类的样本数量;F_P为错误预测为正类的样本数量;F_N为错误预测为负类的样本数量。以“工程”类实体为例,若“杆塔检修”(实际属于“工程”实体)被模型正确识别为“工程”,此情况记为T_P;若其他非“工程”实体被误判为“工程”,则记为F_P;若“杆塔检修”被错误识别为其他实体类别,则记为F_N。

针对“工程”“项目”“地形”“项目内容”“未计价材料”5类实体,分别构建二分类混淆矩阵。基于混淆矩阵中的T_P、F_P和F_N数值,分别计算每类实体的精确率、召回率以及F_1分数,以此评估模型对各类实体的分类性能,所得结果如表4所示。

从表4可以看出,BERT-Bi-LSTM-CRF模型对于5类实体均能取得较好的识别效果,精确率、召回率和F_1分数分别可达89.52%、88.24%、88.86%以上。进一步地,以精确率和F_1分数为例,将本文模型与Bi-LSTM、Bi-LSTM-CRF的识别效果进行对比,结果如图7所示。可见,本文模型对5类不同实体的识别效果均有所提升,结合BERT、Bi-LSTM和CRF模型的优势,有助于提高段落文本命名实体识别性能。

表4　命名实体识别结果

Table 4 Named entity recognition results

标签	精确率P/%	召回率R/%	F_1分数/%
工程	93.24	92.32	92.78
项目	91.45	90.72	91.08
地形	94.47	92.89	93.67
项目内容	89.52	88.24	88.86
未计价材料	92.12	90.23	91.16

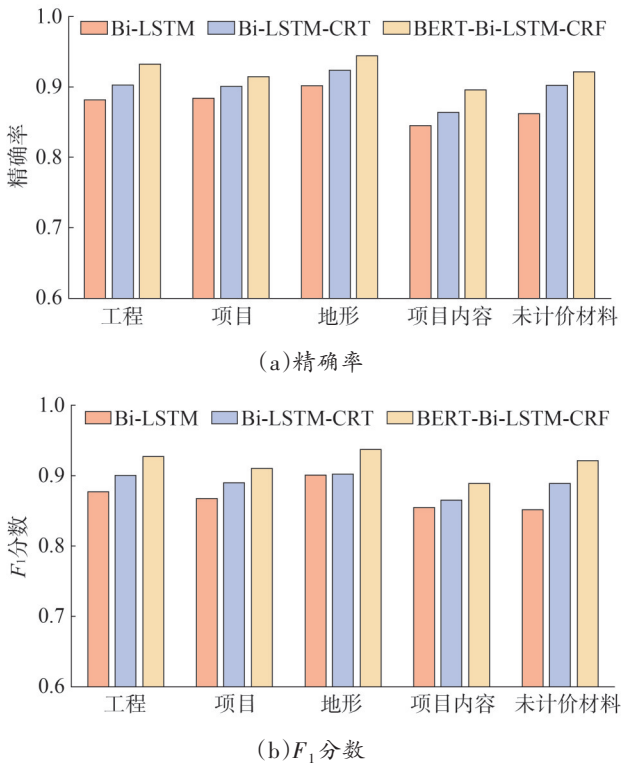


图7　不同模型的识别结果对比

Fig.7 Comparison of recognition results from different models

2.2.3　段落文本信息抽取结果

段落文本信息抽取包括实体识别、属性抽取、关系构建三个阶段。对上文1.3节根据触发词提取到的造价文本数据进行结构化处理,在实体识别阶段,首先采用BERT- Bi-LSTM-CRF模型从段落文本中识别出工程、项目、地形、项目内容、未计价材料等5类实体共计584个。在属性抽取阶段,设计正则表达式"(:\d+\.\d+|\d+%)"抽取"地形"实体相关联的地形增加系数属性值,该表达式可以有效匹配百分比或小数形式的系数值。在关系构建阶段,将各类实体进行组合,生成4类三元组。

以表2中提取到的段落文本数据为例,对其进行信息抽取所得到的三元组如表5所示。从本文构建的段落文本数据集中提取实体与关系信息,得到工程、项目、地形、项目内容、未计价材料等共584个实体、798条属性关系,形成了798个三元组。

表5　段落文本三元组抽取结果

Table 5 Extraction results of triples in paragraph text

三元组类型	抽取的三元组
(工程,包含,项目)	("基础检修""包含""基础保护帽修缮"),("基础检修""包含""塔基抹面")
(项目,项目内容,项目内容)	("塔基抹面""项目内容""场地清理、选料、砂浆配拌、养护")
(地形,地形因素,地形增加系数)	("丘陵""地形因素""10%")
(工程,额外影响因素,未计价材料)	("塔基治理""额外影响因素""水泥、砂、碎石、水、钢筋")

3　知识图谱的构建与应用

3.1　电网技改与检修工程造价知识图谱

知识图谱的构建包括数据预处理、知识抽取与融合、知识存储与可视化三个步骤。其中,数据预处理与知识抽取在上文已经介绍。对于从电网技改与检修工程造价资料中抽取的表格数据和段落文本信息三元组,首先对其进行数据清洗,解决部分数据值异常、数据重复等问题。从非结构化的段落文本中抽取的三元组,其主体可能与表格中抽取到的工程、项目名称不同,例如,"避雷线"与"架空地线"名称不同,但本意相同,因此须进行统一命名,将不同数据源获取的三元组联系起来。经过知识融合,从表格数据和段落文本中抽取到12类实体节点共13 476个,实体之间的11类属性关系共16 692条,三元组共15 692个。

对三元组进行预处理后,将其批量导入Neo4j图数据库,具体过程如下:首先,读取三元组数据,并对实体节点进行编号,使用自动生成的编号定位三元组的起始节点和结束节点,并处理可能重复的节点,确保每个实体都有唯一的编号;然后,生成标准CSV格式的实体文件和关系文件,在节点文件中,每行表示一个实体,包含"ID"(节点编号)、"name"(实体名称)和"attribute"(实体属性);在关系文件中,每行表示两个实体之间的属性关系,包括起始节点编号、结束节点编号、关系名称和类型;最后,通过Python语句将实体和关系CSV文件导入Neo4j图数据库。

需要指出的是,在构建知识图谱过程中,难以保证表格数据与段落文本识别内容全部正确。在表格数据处理时,若数据格式不规范,可能造成数据提取偏差;对于语义模糊、语法结构复杂的段落文本,也可能存在实体抽取错误或关系识别不准确的情况。为了保障知识图谱的准确性,采取自动校验与人工核对相结合的质量保障及核对机制。其中以自动校验为主,通过编写自动校验脚本,检查抽取的三元组中实体属性值的有效范围和数据类型、识别孤立实体和异常关系;人工核对则由数据标注人员完成,随机抽取一定比例的三元组进行审核,重点关注关键实体和复杂关系,对于无法识别的内容,若为少量数据,对整体知识图谱的影响有限,但可能导致某些局部查询结果不完整,此时标注人员需要查询原始数据进行修正,以确保知识图谱的准确性。

在Neo4j图数据库中,用户通过点击节点或关系的标签,可以直观查看以可视化形式呈现的电网技改与检修工程造价数据,用于决策支持和资源优化配置。以架空线路检修工程中的"跳线引流线更换"项目为例,用户可以便捷查询其中涉及的造价信息,如图8所示。其中,"跳线引流线更换"作为"项目"实体处于整个知识体系的核心位置,并通过线条与多个不同类别的实体产生关联。例如,其与"导线及避雷线检修"这一"工程"实体相连,形成("导线及避雷线检修""包含""跳线引流线更换")三元组;其

还与多个“定额编号”实体相连接,构成(“跳线引流线更换”“包含”“XYX4-62”)这类三元组。而“定额编号”实体又进一步延伸出“项目基价”“项目单位”“人工费”“计价材料配置”“机械配置”等一系列关键信息,展示了该项目在人力、材料和机械等方面的配置情况,可为理解与控制工程造价提供关键数据和知识基础。

3.2　知识图谱的应用

现有的电网工程造价测算平台是一个高度集成的系统,能够提供精准的成本估算和项目管理服务。然而,该系统的各个定额参数通常需要人工手动录入,不仅耗费大量时间与人力,还极易因人为因素产生差错,显著影响了造价测算工作的效率与准确性。

通过构建电网技改与检修工程造价资料知识图谱,可以实现数据的自动化批量导入,大幅提升系统效率和准确性,同时为各部门间的数据交互提供公共信息平台。利用Neo4j图数据库的查询功能,基于已经建立的多维数据模型和关系映射,可以快速获取所需的定额参数。针对查询获取的数据,系统会自动进行数据格式调整和规范化处理,并通过API接口,将调整后的数据批量导入至造价测算平台,使数据传输过程更加安全高效,从而为工程造价测算与分析决策提供可靠的数据支撑。

针对图8所示的架空线路检修工程场景中的“跳线引流线更换”项目,借助知识图谱数据库能够快速检索出该项目所涉及的定额编号、基价、项目内容,以及所需要使用的材料和机械等关键信息。基于这些数据,造价测算平台能够快速精准计算出项

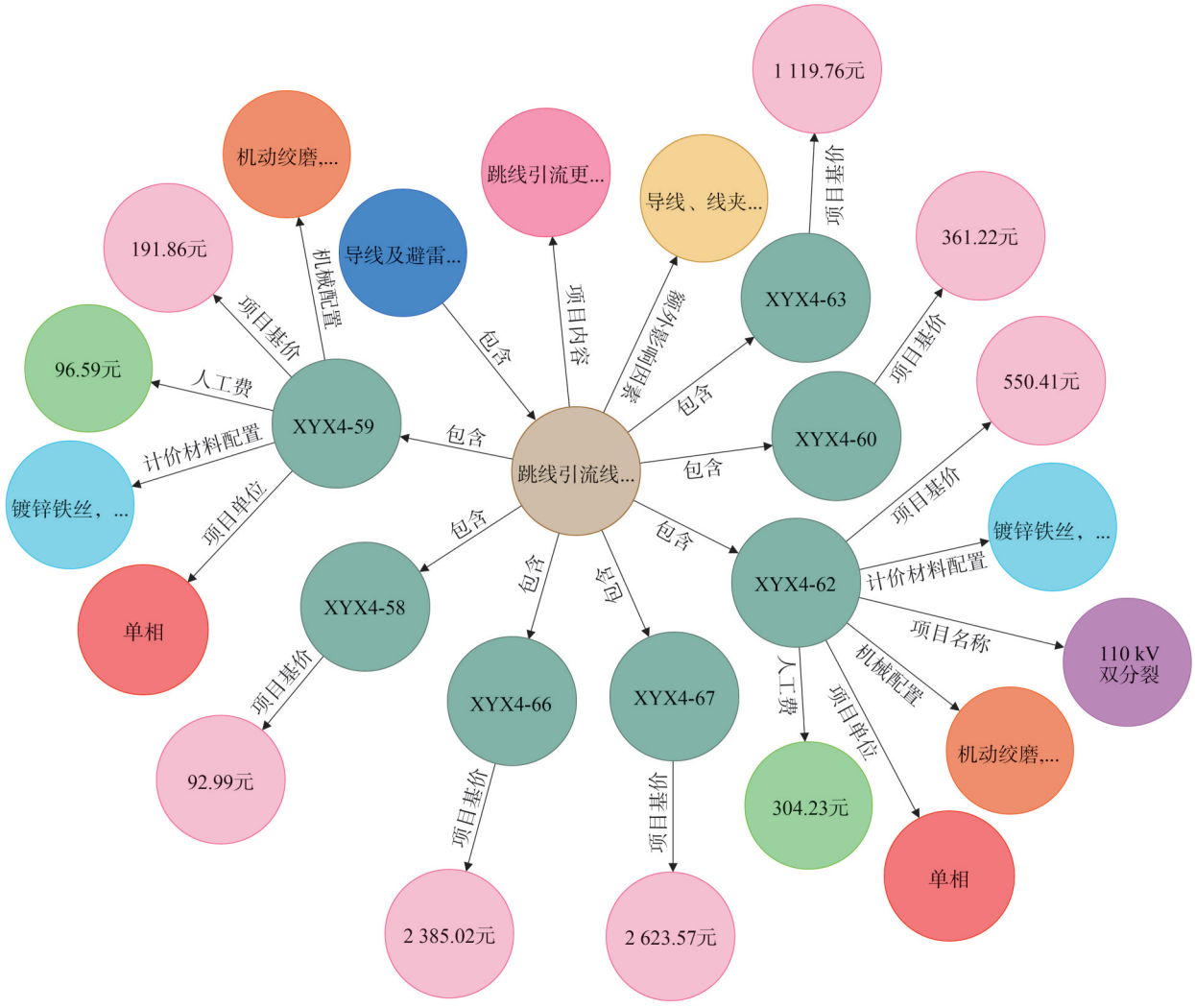


图8　Neo4j图数据库查询结果

Fig.8 Neo4j graph database query results

目的直接工程费用。

4 结束语

电网工程造价资料中的半结构化表格和非结构化文本中包含丰富的数据信息，由于数据格式不一、人工检索效率低下，难以充分挖掘其中的数据价值。为此，本文研究了造价资料信息抽取技术，构建了造价知识图谱。基于单元格空间位置信息的PDF表格格式转换方法，可以提高半结构化表格格式转换准确度，利用相关规则可抽取表格数据中的三元组信息。采用BERT-Bi-LSTM-CRF模型对造价资料段落文本进行命名实体识别，各类实体的识别精确率可达89.52%以上，结合正则表达式进行信息抽取，可以生成造价知识三元组。将所提取的表格与文本信息导入Neo4j图数据库，构建了电网技改与检修工程造价知识图谱，实现了对复杂造价资料的可视化分析与海量造价数据的智能检索，可为工程造价测算与知识共享提供数据平台，有助于推动数字造价体系的构建。

随着电力工程的大规模建设，工程造价资料将呈现爆发式增长，未来研究需要进一步完善造价信息智能抽取技术，丰富和扩展现有的知识图谱，以此实现对复杂工程情况的全面解析。

参考文献

[1] 陆汉东，方明，刘刚刚，等.基于传播模型与神经网络的输变电工程造价分析与预测方法研究[J].综合智慧能源，2025，47(4)：33-40.
LU Handong，FANG Ming，LIU Ganggang，et al.Research on cost analysis and prediction methods for power transmission and transformation projects based on propagation models and neural networks [J].Integrated Intelligent Energy，2025，47(4)：33-40.

[2] 罗运宝.电力工程建设全过程造价数字赋能体系研究[J].建筑经济，2023，44(12)：87-92.
LUO Yunbao. Research on digital empowerment system for the whole process of power engineering construction [J]. Construction Economy，2023，44(12)：87-92.

[3] LIU X，ZHENG L Y，YANG Y，et al. Cost management of transmission and transformation project based on GIM technology [C]// 2021 International Conference on Big Data Analytics for Cyber-Physical System in Smart City. SingaporeSpringer Singapore2022：407-415.

[4] 王冬超，周波，李维嘉，等.融合蒙特卡洛算法的电力工程造价预测分析[J].沈阳工业大学学报，2023，45(6)：607-611.
WANG Dongchao，ZHOU Bo，LI Weijia，et al. Analysis of power engineering cost prediction based on Monte Carlo algorithm [J]. Journal of Shenyang University of Technology，2023，45 (6)：607-611.

[5] 邓怡卿，孙斌，李晓兵，等.基于大数据的输变电工程造价趋势预测[J].湖南电力，2023，43(2)：108-111.
DENG Yiqing，SUN Bin，LI Xiaobing，et al. Prediction of power transmission project cost trend based on big data [J]. Hunan Electric Power，2023，43(2)：108-111.

[6] 刘云，李维嘉，赵子豪，等.基于改进SVM的电力工程造价预测[J].沈阳工业大学学报，2024，46(4)：367-372.
LIU Yun，LI Weijia，ZHAO Zihao，et al. Power engineering cost prediction based on improved SVM [J]. Journal of Shenyang University of Technology，2024，46(4)：367-372.

[7] 万正东，吴良峥，黄琰，等.电网工程数字造价体系的概念、内涵及实现路径研究[J].建筑经济，2022，43(8)：65-70.
WAN Zhengdong，WU Liangzheng，HUANG Yan，et al. Research on the concept，connotation and practical approach of digital cost system for power grid engineering [J]. Construction Economy，2022，43(8)：65-70.

[8] 王正，白杨，任建峰，等.基于区块链的电网工程造价数据可靠性评估及差异化管理[J].武汉大学学报(工学版)，2024，57(5)：683-690.
WANG Zheng，BAI Yang，REN Jianfeng，et al. Reliability evaluation and differential management of power grid project cost data based on block chain [J]. Engineering Journal of Wuhan University，2024，57(5)：683-690.

[9] LI J，SUN A X，HAN J L，et al. A survey on deep learning for named entity recognition[J].IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering，2022，34(1)：50-70.

[10] 赵继贵，钱育蓉，王魁，等.中文命名实体识别研究综述[J].计算机工程与应用，2024，60(1)：15-27.
ZHAO Jigui，QIAN Yurong，WANG Kui，et al. Survey of Chinese named entity recognition research [J]. Computer Engineering and Applications，2024，60(1)：15-27.

[11] SMIRNOVA A，CUDRÉ-MAUROUX P. Relation extraction using distant supervision：a survey [J]. ACM Computing Surveys，2019，51(5)：1-35.

[12] 姜磊，刘琦，赵肆江，等.面向知识图谱的信息抽取技术综述[J].计算机系统应用，2022，31(7)：46-54.
JIANG Lei，LIU Qi，ZHAO Yijiang，et al. Review on information extraction techniques for knowledge graph [J]. Computer Systems and Applications，2022，31(7)：46-54.

[13] 张吉祥，张祥森，武长旭，等.知识图谱构建技术综述[J].计算机工程，2022，48(3)：23-37.
ZHANG Jixiang，ZHANG Xiangsen，WU Changxu，et al. Survey of knowledge graph construction techniques [J]. Computer

Engineering,2022,48(3):23-37.

[14] 蒋玮,周颖,陈舒淇,等.电网基建工程数据挖掘及知识图谱构建技术研究[J].电力信息与通信技术,2021,19(2):15-22.
JIANG Wei, ZHOU Ying, CHEN Shuqi, et al. Research on the power grid project data mining and knowledge graph construction technologies [J]. Electric Power Information and Communication Technology,2021,19(2):15-22.

[15] 李刚,李银强,王洪涛,等.电力设备健康管理知识图谱:基本概念、关键技术及研究进展[J].电力系统自动化,2022,46(3):1-13.
LI Gang, LI Yinqiang, WANG Hongtao, et al. Knowledge graph of power equipment health management: basic concepts, key technologies and research progress [J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(3):1-13.

[16] 朱晓荣,彭柏,司羽,等.基于知识图谱的配电网综合评价[J].现代电力,2022,39(6):677-684.
ZHU Xiaorong, PENG Bai, SI Yu, et al. Comprehensive evaluation of distribution network based on knowledge graph [J]. Modern Electric Power,2022,39(6):677-684.

[17] 张晓华,刘道伟,李柏青,等.信息驱动的大电网运行态势知识图谱框架及构建模式研究[J].中国电机工程学报,2024,44(11):4167-4180.
ZHANG Xiaohua, LIU Daowei, LI Boqing, et al. Research on information-driven operation situation knowledge graph framework and construction mode of large power grid [J]. Proceedings of the CSEE,2024,44(11):4167-4180.

[18] 余元.面向工程造价领域的知识图谱构建技术研究及检索系统实现[D].成都:西南交通大学,2023.

[19] 国家能源局.电网技术改造工程预算定额-第二册-电气工程——2020年版[M].北京:中国电力出版社,2021.

[20] 国家能源局.电网检修工程预算定额-第二册-架空线路工程——2020年版[M].北京:中国电力出版社,2021.

[21] 陈鹏,郜彬,石英,等.融合BERT、双向长短记忆网络和条件随机场的电力设备缺陷文本实体抽取[J].电网技术,2023,47(10):4367-4375.
CHEN Peng, TAI Bin, SHI Ying, et al. Text entity extraction of power equipment defects based on BERT - BI - LSTM - CRF algorithm [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4367-4375.

[22] DU J F, GRAVE E, GUNEL B, et al. Self-training improves pre-training for natural language understanding [C]// Proceedings of the 2021 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies. Stroudsburg, PA, USA: ACL, 2021: 5408-5418.

[23] 王子牛,姜猛,高建瓴,等.基于BERT的中文命名实体识别方法[J].计算机科学,2019,46(增刊2):138-142.
WANG Ziniu, JIANG Meng, GAO Jianling, et al. Chinese named entity recognition method based on BERT [J]. Computer Science, 2019,46(S2):138-142.

[24] YANG Q Y, JIANG J, FENG X Y, et al. Named entity recognition of power substation knowledge based on transformer-BiLSTM-CRF network [C]// 2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES). IEEE, 2020: 952-956.

[25] 李冬梅,罗斯斯,张小平,等.命名实体识别方法研究综述[J].计算机科学与探索,2022,16(9):1954-1968.
LI Dongmei, LUO Sisi, ZHANG Xiaoping, et al. Review on named entity recognition [J]. Journal of Frontiers of Computer Science & Technology,2022,16(9):1954-1968.

收稿日期:2025-02-11
修回日期:2025-05-07

作者简介:

张丽萍(1987),通信作者(1987298984@qq.com),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为知识图谱、输配电生产技术管理;

吴莉琳(1980),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为变电管理、输电线路运行、配网自愈;

李志翔(1993),男,硕士,主要研究方向为电网规划、电力投资;

庞圣养(1991),男,硕士,工程师,主要研究方向为输电线路、电力电缆等电力设备运维;

舒胜文(1987),男,博士,教授,主要研究方向为高压绝缘与放电,电网防灾减灾。

(责任编辑 张丹丹)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250078

基于博弈的电力工控网络APT攻击溯源图分析方法

刘 新[1,2],王 睿[1,2*],张朋丰[3],张 昊[1,2],刘 涵[4]
(1.国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250003;
2.山东省能源工业互联网大数据技术重点实验室,山东 济南 250003;3.国网山东省电力公司,山东 济南 250001;
4.西安交通大学网络空间安全学院,陕西 西安 710049)

摘要:在电力工控网络安全中,高级持续性威胁(advanced persistent threat,APT)攻击具有隐蔽性强、持续性长的特点,而现有利用图神经网络对溯源图中的子图进行匹配和分析,以判断是否存在恶意攻击行为的APT攻击检测手段,存在子图识别窗口大小不当,从而影响检测效果的问题。为此,提出一种基于Stackelberg博弈的动态子图识别窗口调整机制。该机制通过构建防守者与攻击者的效用函数模型,以博弈方式动态优化识别窗口大小:防守者作为博弈领导者,选择窗口大小以提高检测成功率并降低检测成本;攻击者则根据防守策略调整APT子图规模以逃避检测。博弈求解得到防守者的最优窗口调整策略及攻击者的响应策略。仿真结果表明,该机制相比固定窗口方法,检测准确率平均提升约16%,计算资源效率提高约25%,有效降低了漏报率和误报率。

关键词:APT攻击;溯源图;子图识别;电力工控网络;Stackelberg博弈
中图分类号:TP393.081 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-9904(2026)04-0087-10

A Game Theory-based Approach for APT Attack Provenance Graph Analysis in Electric Power Industrial Control Networks

LIU Xin[1,2],WANG Rui[1,2*],ZHANG Pengfeng[3],ZHANG Hao[1,2],LIU Han[4]
(1.State Grid Shandong Electric Power Research Institute,Jinan 250003,China;
2.Shandong Key Laboratory of Big Data Technology for Energy Industry Internet,Jinan 250003,China;
3.State Grid Shandong Electric Power Company,Jinan 250001,China;
4.School of Cyber Science and Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract:Advanced persistent threat (APT) attacks electric power industrial control networks exhibit strong concealment and long-term persistence .However, existing APT detection methods relaying on graph neural networks to match and analyze subgraphs within provenance graphs for malicious behavior identification often suffers from suboptimal subgraph recognition window sizes, which degrades detection performance.To address this, a dynamic subgraph recognition window adjustment mechanism based on the Stackelberg game is proposed.This mechanism constructs utility function models for both the defender and the attacker, dynamically optimizing the recognition window size in a game theory approach.In which the defender, as the game leader, optimizes the window size to improve the detection success rate and reduce detection costs.The attacker, on the other hand, adjusts the scale of the APT subgraph according to the defense strategy to evade detection.The game solution yields the optimal window adjustment strategy for the defender and the response strategy for the attacker.Simulation results indicate that, compared to the fixed window method, this mechanism improves detection accuracy by approximately 16% on average, enhances computational resource efficiency by about 25%, and effectively reduces both false negatives and false positives.

Keywords:APT attack;provenance graph;subgraph recognition;electric power industrial control networks;Stackelberg game

基金项目:国网山东省电力公司科技项目"跨区跨界隐蔽攻击检测与防护技术研究项目"(520626230019)。
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company"Research on Detection and Protection Technologies for Cross-Regional and Cross-Domain Stealth Attacks"(520626230019).

0 引言

高级持续性威胁(advanced persistent threat, APT)是一类极具针对性、隐蔽性和复杂性的网络攻击,可针对电力工控网络等关键基础设施进行持续性攻击,导致大规模停电、设备损坏甚至安全事故,对国家安全和社会经济造成重大影响[1]。APT攻击具有多个阶段,包括初始渗透、横向扩展、数据窃取等。攻击者通过精心策划的长期潜伏和持续攻击,旨在获取高价值的机密信息或造成系统破坏[2-3]。APT攻击的隐蔽性和持久性使其难以被传统的网络安全防御技术有效检测和阻止。

近年来,溯源图技术在APT检测中发挥了关键作用[4]。该技术通过操作系统钩子、系统调用拦截、审计日志和内核级监控等机制,实时记录和监控数据操作及系统事件,以实现对数据和行为的追踪和溯源[5]。通过分析系统中的文件、进程、网络连接等实体之间的因果关系,溯源图能够重构攻击者的行为路径,精确识别APT攻击的各个阶段[6]。该技术不仅具备捕捉长时间跨度攻击链的能力,还能够通过深入分析实体间的交互关系,有效追踪攻击者的活动轨迹,从而为电力工控网络中的APT检测提供细粒度支持[7]。然而,电力系统中APT攻击链的复杂性及溯源图数据的巨大规模给现有分析方法带来了显著挑战,特别是在实时APT检测中,如何从庞大的溯源图中高效提取和分析相关子图,成为研究的重点问题之一[8]。

针对APT攻击的溯源图检测,现有研究提出了多种解决方案。SLEUTH系统[9]通过依赖图构建和标签传播技术,能够实时重建攻击场景,减少了冗余事件并提高了溯源分析的效率。Chen等人[10]提出采用基于异构溯源图学习和威胁知识的APT检测方法,通过异构图嵌入与局部图采样,在新进入系统实体的实时检测中展现出较好的性能。Datta等人提出[11]采用ALASTOR通过全局数据溯源图来重建无服务器环境中的入侵行为路径,能够精确跟踪服务器无状态环境中的可疑事件,显著提升对入侵行为的取证能力,并展示了在OpenFaaS平台中的应用。Dong等人[12]提出的DISTDET检测系统结合轻量级客户端模型与全局模型,显著减少APT检测中的计算和存储开销。Liu等人[13]提出基于运行时攻击自免疫技术的电网数据安全防御技术,通过实时监测和预警,显著提升了电网数据防御能力。Han等人[14]提出的一种基于运行时溯源的APT检测系统,通过使用图素描和时间加权的溯源编码,有效压缩了长期系统执行的溯源图数据,显著提高了对长期APT攻击的检测效率。Xu等人[15]的研究指出,电厂侧储能系统的新增网络交互可引发APT攻击,攻击者通过伪装合法信号隐藏恶意行为,逐步渗透系统,威胁核心功能和数据完整性,导致控制系统瘫痪。Goyal等人[16]提出模仿攻击对基于溯源图的入侵检测系统的威胁,攻击者可以通过嵌入合法行为的子结构来隐藏恶意活动,从而绕过检测系统。Liu等人[17]提出了基于RASP的电力系统账户安全防御方法,通过数据中台架构实现HTTP请求与数据库的精准关联和用户行为异常检测,从而提升了对暴力破解及新型数据攻击的防御能力。Liu等人[18]提出的PRIOTRACKER通过优先处理异常因果关系来加速APT攻击的因果分析,利用事件的罕见性和拓扑特征来评估优先级,并显著减少了攻击调查的时间。

尽管现有研究方法在APT检测中取得了重要进展,但仍存在以下问题亟待解决:现有方案在分析恶意子图前依赖固定大小的子图识别窗口,无法适应电力系统中APT攻击中各阶段的动态变化,过大的窗口会增加系统负担,而过小的窗口则可能导致关键攻击信息的遗漏。现有方案缺少溯源子图识别窗口的动态调整,无法平衡检测精度和检测效率。

本文提出一种基于Stackelberg博弈的电力工控网络动态子图识别窗口调整机制。在防守者与攻击者策略互动的基础上,系统能够根据电力系统APT攻击阶段的变化动态调整溯源子图识别窗口的大小,从而在提升检测精度的同时,降低计算成本。

1 系统模型

溯源图是一种用于表示系统中实体(如进程、文件、网络连接等)之间依赖关系的有向图结构,能够通过记录系统审计日志中的事件,帮助分析员追踪系统中的因果链,尤其在高级持续性威胁攻击的检测与分析中发挥重要作用。溯源图中的每个节点表示系统中的实体,边则表示实体之间的依赖关系,如进程间的通信、文件访问或网络连接等。通过分析这些依赖

关系，可以还原攻击路径并识别攻击者的活动轨迹。电力工控系统溯源图子图识别窗口如图1所示。图1中，电力工控网络溯源图的不同图形元素对应不同的系统实体。矩形表示进程，展示系统中运行的进程实例；椭圆形表示文件，代表系统中的文件资源；平行四边形表示网络套接字，展示进程与外部网络的连接。

由于电力工控系统中整个溯源图通常规模庞大且结构复杂，直接对完整溯源图进行分析会导致计算成本过大，影响检测效率。因此，通过设置子图识别窗口，分割溯源图的局部区域，使得攻击检测在可控的计算资源下进行。如图1所示，子图识别窗口的大小决定了从溯源图中提取的子图规模，窗口内的节点表示系统实体，边表示实体之间的依赖关系。例如，窗口内可以捕获攻击过程中的某个阶段，如进程启动、文件操作或网络连接等操作。通过这些子图，检测系统能够识别出特定攻击行为相关的依赖路径，并在图神经网络中进行分析。

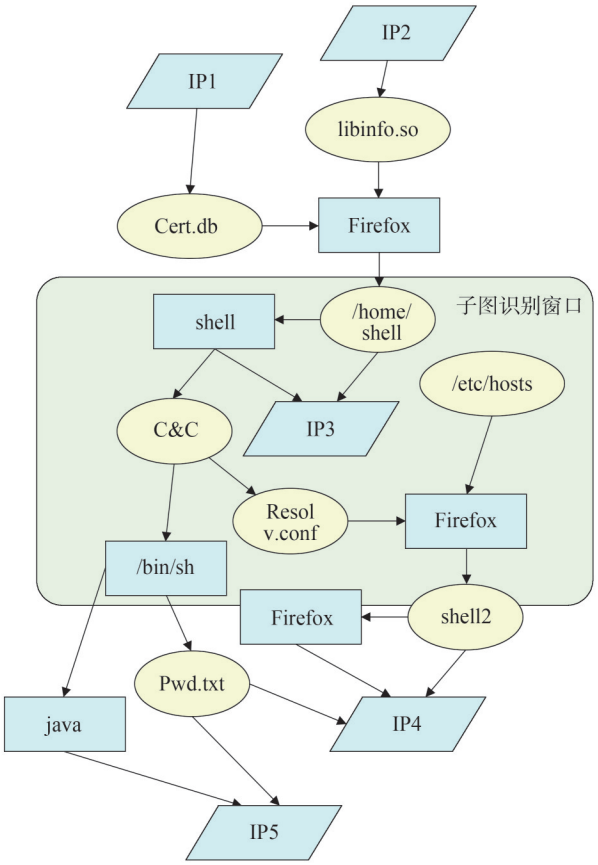


图1　电力工控系统溯源图子图识别窗口

Fig.1 Subgraph recognition window in electric power industrial control networks

2　电力工控网络动态子图识别窗口调整机制

在电力工控网络APT攻击检测中，子图识别窗口的大小直接影响现有基于溯源子图匹配的检测系统对APT攻击各个阶段行为的识别准确性和检测性能。如果在检测分析前系统使用的窗口过大，虽能覆盖更多的攻击信息，但会导致计算负担增加；窗口过小，则可能漏掉关键的攻击行为。为了兼顾系统的检测效率和检测准确性，本文提出一种基于Stackelberg博弈的电力工控网络动态子图识别窗口调整机制，如图2所示。

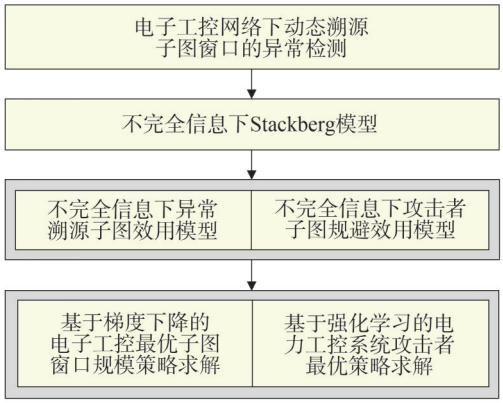


图2　电力工控网络下动态溯源子图窗口分析方法

Fig.2 Dynamic subgraph window analysis method for provenance graph in power industrial control networks

2.1　电力工控网络攻防博弈模型

Stackelberg博弈是一种主从博弈模型[19-21]，本文中防守者作为领导者，在电力工控网络系统投入使用前应首先选择其子图识别窗口大小 W_d，以最大化其检测收益并最小化计算成本。攻击者作为跟随者，根据防守者的策略调整其攻击子图的规模 W_a，以规避检测。双方的策略互动决定了博弈的均衡点。

2.2　防御者效用函数

鉴于攻防博弈双方的信息不对称性，电力工控系统中的防守者无法完全知道攻击者的初次策略或攻击子图规模 W_a，防守者的目标是通过选择子图识别窗口大小 W_d，最大化其效用函数，即最大化检测成功率，同时最小化计算成本和漏报惩罚。防守者的效用函数 $U_d(W_d, W_a)$ 由以下几部分构成。

1)检测成功率 $P_d(W_d,W_a)$。该函数表示防守者待选子图识别窗口 W_d 和攻击者待选子图规模 W_a 对检测成功率的影响。通常,窗口越大,成功率越高,但会带来计算开销增加。检测成功率可以表示为

$$P_d(W_d,W_a)=\frac{W_d^{\alpha}}{W_a+W_d^{\alpha}} \tag{1}$$

式中:α 为调节因子,其取值大小可表示所选窗口大小对检测成功率的影响程度。

2)检测成本 $C_d(W_d)$。当窗口过小时,导致防守者未能检测到 APT 完整的攻击子图,从而产生漏报。检测成本则可以表示为

$$C_d(W_d)=\gamma\cdot W_d \tag{2}$$

式中:γ 为系统资源的消耗系数。

3)漏报惩罚 $R_d(W_a)$。当窗口过小,导致电网防守者未能检测到完整的 APT 攻击子图,产生漏报。漏报惩罚则可表示为

$$R_d(W_a)=\frac{1}{W_d^{\beta}} \tag{3}$$

式中:β 为调节因子,其取值大小可表示窗口大小对漏报率影响。

防守者对攻击者的子图规模 W_a 在初次不完全信息博弈中有先验分布 $p(W_a)$,因此,防守者效用函数的期望定义为

$$\begin{aligned}E_{W_a}(U_d(W_d,W_a))=&\sum_{1}^{W_a}p(W_a)\cdot\\&\left(P_d(W_d,W_a)\cdot G_d-C_d(W_d)-\lambda R_d(W_a)\right)\end{aligned} \tag{4}$$

式中:G_d 为防守者成功检测 APT 攻击的收益;λ 为漏报惩罚的权重系数,在随后的多轮博弈中,防守者已知攻击者子图规模 W_a,则 $p(W_a)$ 取值为 1。

2.3　攻击者效用函数

电力工控系统中的攻击者目标是通过调整其子图规模 W_a 以尽量规避检测,同时最大化其效用函数。因此效用函数 $U_a(W_d,W_a)$ 由两部分构成:逃避成功率与攻击成本。

1)逃避成功率 $P_a(W_d,W_a)$。该函数表示攻击者成功逃避检测的概率,与防守者检测成功率成反比。逃避成功率表示为

$$P_a(W_d,W_a)=1-P_d(W_d,W_a)=\frac{W_a}{W_a+W_d^{\alpha}} \tag{5}$$

2)攻击成本 $C_a(W_a)$。攻击者调整其子图规模所需成本,可表示为

$$C_a(W_a)=\delta\cdot W_a \tag{6}$$

式中:δ 为攻击者成本系数。攻击者对于防守者的子图识别窗口大小在初次博弈中,为不完全信息下的博弈,有先验分布 $q(W_d)$,其效用函数的期望为

$$\begin{aligned}E_{W_d}\left(U_a(W_d,W_a)\right)=&\sum_{1}^{W_d}q(W_d)\cdot\\&\left(P_a(W_d,W_a)\cdot G_a-C_a(W_a)\right)\end{aligned} \tag{7}$$

式中:G_a 为攻击者成功逃避检测后所得收益,与防守者类似,在随后的多轮博弈中,攻击者已知防守者子图识别窗口规模 W_d,则 $q(W_d)$ 取值为 1。

3　电力工控网络检测窗口调整攻防博弈求解

3.1　电力工控系统防守者最优策略求解

为求解电力工控系统中防守者的最优策略,需要对效用函数进行优化。首先,对效用函数 $U_d(W_d,W_a)$ 中 W_d 求导:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial W_d}E_{W_a}\left(U_d(W_d,W_a)\right)&=\sum_{1}^{W_a}p(W_a)\frac{\partial U_d(W_d,W_a)}{\partial W_d}\\&=\sum_{1}^{W_a}p(W_a)\left(\alpha W_d^{\alpha-1}\frac{G_d}{W_a+W_d^{\alpha}}-\gamma-\lambda\beta W_d^{-\beta-1}\right)\end{aligned} \tag{8}$$

将该导数设为 0,得到防守者最优窗口 W_d^* 满足的条件为

$$\sum_{W_a}p\left(W_a\right)\left(\alpha W_d^{\alpha-1}\cdot\frac{G_d}{W_a+W_d^{\alpha}}\right)=\gamma+\lambda\beta W_d^{-\beta-1} \tag{9}$$

防守者的最优策略取决于子图识别窗口大小 W_d 和攻击者子图规模 W_a,并且需要通过观察攻击行为逐步调整。由于防守者初次为不完全信息博弈,防守者无法直接获得 W_a,而在之后的攻防博弈过程中,双方已知晓彼此的策略,因此需要通过历史数据进行估计和策略调整。

在随后的过程中,防守者可以采用梯度下降法迭代地调整其子图识别窗口大小,以逼近最优值 W_d^*。具体过程如下。

1)初始化策略:设定防守者的初始窗口大小 $W_d^{(0)}$。

2)计算效用函数的梯度:对于每轮迭代 t,计算防守者效用函数 $U_d(W_d,W_a)$ 对窗口 W_d 的梯度为

$$\frac{\partial U_d}{\partial W_d}=\frac{\alpha\cdot W_d^{\alpha-1}\cdot G_d}{\left(W_a+W_d^{\alpha}\right)}-\gamma-\lambda\cdot\beta\cdot W_d^{-\beta-1} \tag{10}$$

3)更新策略:根据梯度下降法的更新规则,防守

者在每轮迭代时通过步长 η_d 更新其窗口大小为

$$W_d^{(t+1)} = W_d^{(t)} - \eta_d \cdot \frac{\partial U_d}{\partial W_d} \tag{11}$$

式中：步长 η_d 为预设学习率，用于控制窗口大小的调整幅度。

4）判断收敛：当 $W_d^{(t+1)} - W_d^{(t)}$ 小于预设的阈值时，认为防守者的策略已收敛，即已逼近最优子图识别窗口 W_d^*。

防守者最优策略调整算法的步骤如图3所示。

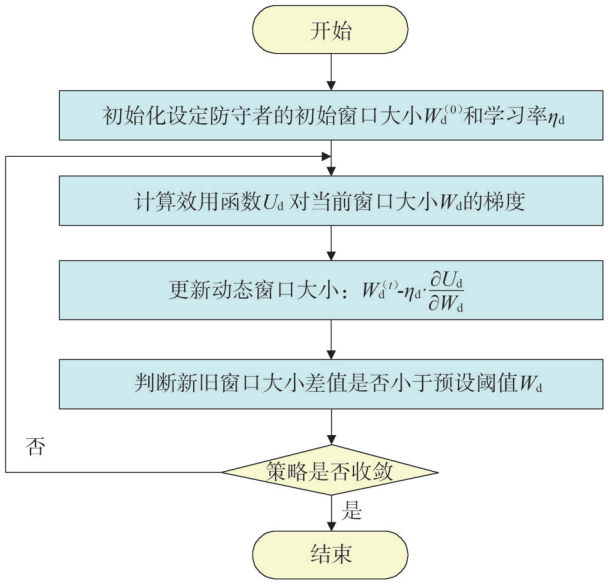


图3　防守者最优策略调整

Fig.3 Optimal strategy adjustment for the defender

对任意固定的攻击子图规模 W_a，防守者效用函数 $U_d(W_d, W_a)$ 关于 W_d 为连续单峰，其梯度满足Lipschitz条件：

$$\left| \frac{\partial U_d(W_d, W_a)}{\partial W_d} - \frac{\partial U_d(W_d', W_a)}{\partial W_d} \right| \leqslant L \left| W_d - W_d' \right| \tag{12}$$

其步长满足 $0 < \eta < \frac{2}{L}$，具备收敛性，即 $\left| W_d^{(t)} - W_d^* \right| \leqslant p(W_a)^{(t)} \left| W_d^{(0)} - W_d^* \right|$，$0 < p(W_a)^{(t)} < 1$，达到精度 ϵ_d 所需迭代次数为 $O(\lg(1/\epsilon_d))$，总体时间成本亦为 $O(\lg(1/\epsilon_d))$。

3.2　基于强化学习的电力工控系统攻击者最优策略求解

在不完全信息条件下，针对电力工控系统的攻击者无法直接知晓防守者的初次子图识别窗口大小 W_d，因此攻击者需要通过不断调整其子图规模 W_a，以最大化效用函数 $U_a(W_d, W_a)$。策略爬山算法[22-23]是一种基于局部搜索进行优化的策略更新方法，攻击者可以通过该算法逐步提升效用函数值，并逼近最优子图规模 W_a^*。算法搜索中，攻击者通过对当前策略（即子图规模 W_a）进行小幅调整，观察效用函数的变化，决定是否继续调整。详细过程如下。

1）初始化策略：攻击者首先设定一个初始的攻击子图规模 $W_a^{(0)}$，并选择一个初始的调整步长 η_a，初始子图规模可以是一个随机值或预设的攻击起始规模。步长 η_a 是每次调整子图规模时的增量或减量。

2）计算效用函数：在每轮迭代中，攻击者根据当前子图规模 $W_a^{(t)}$ 计算效用函数 $U_a(W_d, W_a)$，效用函数计算公式为

$$E_{W_d}(U_a(W_d, W_a)) = \sum_{1}^{W_d} q(W_d)\left((P_a(W_d, W_a) \cdot G_a - C_a(W_a)\right) \tag{13}$$

3）策略调整规则：攻击者通过效用函数值的变化来决定子图规模 W_a 的调整方向和大小。

若效用函数在当前迭代后增加（即 $U_a\left(W_d, W_a^{(t+1)}\right) > U_a\left(W_d, W_a^{(t)}\right)$），则攻击者继续沿相同的方向增大或减小子图规模 W_a，具体更新规则为

$$W_a^{(t+1)} = W_a^{(t)} + \eta_a \tag{14}$$

4）判断收敛条件：在每一轮迭代后，攻击者检查其子图规模的调整是否趋于稳定，即 $\left| W_a^{(t+1)} - W_a^{(t)} \right|$ 是否小于预设的收敛阈值 ϵ。如果满足该条件，则认为攻击者的策略已收敛，当前子图规模 W_a 即为最优解 W_a^*。具体的收敛条件为

$$\left| W_a^{(t+1)} - W_a^{(t)} \right| < \epsilon_a \tag{15}$$

式中：ϵ_a 为一个足够小数值，在数值仿真中取较小的正数。

通过上述迭代过程，攻击者能够逐步逼近最优子图规模 W_a^*，实现最大化其效用函数。

攻击者通过策略爬山算法不断调整其攻击子图规模 W_a，其效用函数 $U_a\left(W_d, W_a\right)$ 对 W_a 具有Lipschitz连续性：

$$\left| \frac{\partial U_a(W_d, W_a)}{\partial W_a} - \frac{\partial U_a(W_d, W_a)}{\partial W_a'} \right| \leqslant L \left| W_a - W_a' \right| \tag{16}$$

通过Lipschitz条件和步长约束 $0 < \eta_a < \frac{2}{L}$，攻击

者的子图规模 W_a,将满足收敛性质:

$$\left|W_a^{(t)}-W_a^*\right|\leqslant q\left(W_d\right)^{(t)}\left|W_a^{(0)}-W_a^*\right|,0<q\left(W_d\right)^{(t)}<1 \quad (17)$$

为了达到精度 ϵ_a,即满足 $\left|W_a^{(t)}-W_a^*\right|\leqslant\epsilon_a$,所需的迭代次数为 $O(\lg(1/\epsilon_a))$,总体时间复杂度为 $O(\lg(1/\epsilon_a))$。

基于策略爬山的攻击者策略更新算法流程总结如下:设定初始子图规模 $W_a^{(0)}$ 和步长 η_a;在每一轮迭代中,计算效用函数 $U_a\left(W_d,W_a\right)$;若效用函数增加,继续沿相同方向调整子图规模;若效用函数减小,则反转调整方向并缩小步长;重复该过程,直至子图规模的变化值 $\left|W_a^{(t+1)}-W_a^{(t)}\right|$ 小于收敛阈值 ϵ,即视为策略收敛。通过该算法,攻击者能够不断调整其攻击策略,逐步逼近最优攻击子图规模 W_a^*。

4　实验结果分析

为评估基于 Stackelberg 博弈的电力工控网络动态子图识别窗口调整机制在电力系统中 APT 攻击检测中的有效性,实验设计了涵盖 10 种不同类型的 APT 攻击手段,分别参考了 ATT&CK 框架中的攻击类型。实验模拟了每种攻击的多个阶段,确保实验场景的复杂性与实际应用环境一致,充分展现不同攻击手段在系统中的表现。

4.1　实验设置

实验在具备通用电力高性能计算能力的服务器上进行,配置如下,CPU:Intel Xeon E5-2680 v4,2.4 GHz,28 核心;GPU:NVIDIA Tesla V100,32 GB 显存;内存:128 GB;操作系统:Ubuntu 20.04 LTS。实验平台基于 Docker 容器部署,确保在不同实验场景中具有良好的复现性和性能表现。

4.2　数据集与攻击类型

本研究使用 DARPA Transparent Computing (DARPA TC)溯源图数据集[24],并借助 ComFlow[25]本地化部署工具进行实时溯源图捕获。DARPA TC 数据集提供了多种 APT 攻击场景下的完整溯源信息,可用于评估不同攻击类型下的检测效果。通过 ComFlow 监测电力工控系统的网络流量与系统调用,复现数据集并生成动态溯源图,以验证所提方法的有效性。

本实验在 DARPA TC 数据集中选取了 10 种最常用的 APT 攻击数据,并根据 ATT&CK[26]框架将每种攻击类型根据其特点拓展成不同的子图规模,并在实验中测试了固定窗口和动态窗口方法的表现。如表 1 所示,实验覆盖了不同的子图规模。具体攻击类型和子图规模如下。

内核提权攻击:利用电力工控系统操作系统内核漏洞,提升自身权限,从普通用户权限提升为系统管理员权限。这类攻击通常涉及复杂的系统调用和内核态进程操作,能够获取对整个系统的控制权,涉及大量系统调用和内核态进程操作。该攻击的子图规模较大,设置为 200~500 节点。

恶意存储:通过将恶意文件写入电力系统磁盘,修改电力系统关键配置文件或隐藏恶意程序,以便后续操作。这类攻击主要影响系统的文件系统,可能导致重要数据被篡改或删除。子图规模为 50~200 节点。

后门维持:在电力工控系统中建立持久的后门,以便在未来继续访问和控制系统。后门通常难以被常规安全措施检测到,攻击者能够长期潜伏,随时执行恶意操作。子图规模较小,为 30~100 节点。

内存注入:通过向合法进程的电力工控系统内存中注入恶意代码,从而劫持该进程的执行流。子图规模为 10~50 节点。

横向移动:攻击者在进入一个网络后,通过利用电力工控网络中的漏洞和权限扩展,逐步在多个主机之间传播,以进一步扩大对网络的控制。子图规模为 100~300 节点。

凭证窃取:通过从电力系统中窃取用户的登录凭证(如密码、哈希值或密钥),进而获取对其他工控系统的访问权限。子图规模为 50~150 节点。

命令与控制:通过与电力系统中受控设备建立远程通信渠道,以发送指令和收集数据。C2 攻击通常通过 HTTP、DNS 等协议隐藏通信行为。子图规模为 30~100 节点。

数据窃取:从电力工控系统中窃取敏感数据,可能包括财务信息、客户数据或知识产权。子图规模为 50~200 节点。

恶意持久化:通过注册恶意服务、修改启动脚本或篡改电力工控系统设置,确保恶意程序在系统重新启动后依然保持活动。子图规模为 40~150 节点。

逃避防御:通过混淆、代码加密或使用合法程序执行恶意代码等技术,隐藏其攻击行为,绕过安全防御机制。子图规模为 20~100 节点。

4.3　参数设置

为评估不同攻击类型下的子图识别窗口调整机制，实验参数设置如下。

防守者子图识别窗口大小 W_d：取值为10~1 000个节点，依据系统资源和攻击复杂性动态调整。攻击者子图规模 W_a：根据攻击类型不同，设置为10~500节点，反映攻击复杂性和规模。博弈策略的学习率 η_d、η_a：防守者和攻击者的学习率分别设置为 $\eta_d = 0.01$ 和 $\eta_a = 0.01$，以保证策略更新的稳定性和收敛性。收敛阈值 ϵ_d，ϵ_a：防守者和攻击者的收敛阈值分别设定为 $\epsilon_d = 10^{-4}$ 和 $\epsilon_a = 10^{-4}$，确保策略在多轮博弈中逐渐收敛。

4.4　实验结果与分析

实验通过多轮博弈逐步调整防守者和攻击者的策略，系统的检测成功率、计算成本、资源利用率等指标得到了全面量化。

4.4.1　检测成功率、漏报率和误报率对比

在进行不同类型攻击的检测实验前，本研究对式(1)和式(3)中的调节因子 α 与 β 进行了敏感性分析，分析结果如图4所示。图4显示，在调节因子值低于0.7时，Max-Min归一化处理后的防守者效用随因子数值增加而上升：当 α 约为0.6、β 约为0.7时，防守者效用分别达到峰值；但随着调节因子进一步增大，由于资源消耗显著增加，防守者效用开始下降。基于此分析，后续实验中设定 α 与 β 均取值于[0.6，0.7]，以在避免检测窗口过小引发漏报风险与防止资源消耗过大的前提下，验证所提方法在不同攻防场景下的检测性能与鲁棒性。

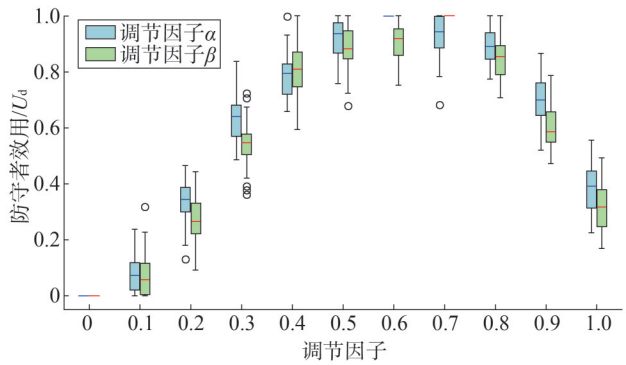


图4　调节因子对防守者效用敏感性分析

Fig.4　Sensitivity analysis of tuning factors on defender utility

在不同攻击类型下，固定窗口方法与动态调整窗口方法的检测成功率、漏报率和误报率对比如表1所示。

表1　不同攻击类型下的平均检测成功率比较

Table 1　Comparison of detection success rates under different attack types　　单位：%

攻击类型	固定窗口	Wu[27]	Song[28]	本文方法
内核提权	78.5	88.3	80.9	89.7
恶意存储	73.6	86.6	77.3	85.9
后门维持	64.8	78.7	75.3	81.5
内存注入	59.7	74.7	74.0	79.8
横向移动	72.1	80.3	84.8	87.4
凭证窃取	67.9	84.9	68.4	84.7
命令与控制	65.4	81.9	79.3	82.9
数据窃取	69.3	84.7	81.5	86.5
持久化	66.8	76.2	73.8	83.6
逃避防御	61.7	77.4	69.0	80.8

如表1所示的实验结果，可以看出本研究所提出的动态调整窗口方法在所有攻击类型下的平均检测成功率均高于固定窗口方法，尤其是在复杂的APT攻击类型中（如内核提权、横向移动），检测成功率提升幅度尤为显著。

漏报率和误报率均有所降低，这表明动态调整窗口机制能够在保持高效检测的同时，减少关键攻击信息的遗漏，并且提升了系统对误报的处理能力。在相同硬件测试条件下，与现有动态窗口方法[27]相比本文在各类攻击的平均检测成功率方面均有所提升。例如，内核提权的检测率达89.7%，后门维持、内存注入等关键场景也呈现更高水平。

结果表明本文方法在面对多样化攻击手段时具备较好的检测性能和适用性。

实验结果表明：由于窗口大小固定，无法适应不同攻击类型和子图规模的变化，导致固定窗口方法的检测效果较差。而动态调整窗口方法能够根据攻击场景调整窗口大小，显著提升了检测成功率，同时减少了误报率和漏报率。

4.4.2　不同窗口大小下的时间成本分析

在电力工控系统APT攻击检测中，子图识别窗

口大小不仅影响检测的准确性,也直接决定了系统的计算成本。随着窗口大小的增加,系统需要处理的溯源图实体数量和复杂度也随之增加,因此会导致计算时间的上升。通过动态调整窗口大小,系统能够自适应地平衡计算成本和检测效率。实验比较了不同攻击类型和不同窗口大小下,固定窗口方法与动态调整窗口方法的时间计算成本。

表2展示了动态窗口方法相对于固定窗口时间成本的归一化相对百分比结果。实验表明,本文所提动态调整窗口方法在较大窗口大小下能够有效减少计算成本,平均降低了23.93%以上的时间成本,尤其是在处理复杂APT攻击类型(如内核提权、内存注入)时,计算成本相较于固定窗口显著降低。此外,与现有动态窗口方法[27-28]相比,也有较大提升,时间成本平均减少了8.9%以上。

表2　不同动态窗口方法下的计算成本比较

Table 2 Comparison of computational costs under different dynamic window methods　单位:%

W_d	攻击类型	Wu[27]	Song[28]	本文方法
50	内核提权	84.14	86.64	77.05
100	内核提权	86.40	88.90	78.00
200	内核提权	87.13	89.63	77.14
500	内核提权	83.91	86.41	74.61
50	内存注入	86.25	88.75	74.49
100	内存注入	82.40	84.90	71.96
200	内存注入	81.97	84.47	74.10
500	内存注入	87.22	89.72	73.35
50	持久化	81.81	84.31	77.44
100	持久化	82.73	85.23	79.00
200	持久化	89.90	92.40	76.66
500	持久化	85.51	88.01	71.99

4.4.3　攻击资源分配和性能分析

在APT攻击检测过程中,系统资源的利用率与性能表现是评价检测方法有效性的重要指标,各攻击类型下的资源分配和性能提升分析如表3所示。通过动态调整子图识别窗口,防守者能够在保障检测准确性的前提下,合理优化系统的资源分配,进而提升整体性能表现。具体而言,动态调整机制使得系统在不同的攻击场景下能够自适应调整计算资源,避免了由于资源分配不合理导致的性能瓶颈问题。实验进一步分析了在多种APT攻击类型下,动态调整窗口机制对资源分配和性能优化的影响。如表3结果显示,该机制在复杂攻击场景中(如内存注入和横向移动)能够显著提高资源利用率,尤其在计算成本方面的节省尤为显著。动态调整窗口机制通过合理分配和调度CPU及内存资源,在不影响检测效果的前提下,有效减少了系统的计算开销。此外,实验结果还表明,动态调整机制在降低误报率和漏报率方面也发挥了重要作用。系统整体性能在应用该机制后得到大幅提升,不仅能够准确识别复杂攻击行为,还能确保在高效利用计算资源的同时,实现快速响应和高精度的APT检测。这种机制为APT检测提供了更高效、智能的解决方案,特别是在复杂网络环境中展现了较强的适应性和鲁棒性。

表3　各攻击类型下的资源分配和性能提升分析

Table 3 Analysis of resource allocation and performance improvement under different attack types　单位:%

攻击类型	节省成本	性能提升	误报减少率	漏报减少率
内核提权	18.2	12.4	4.2	5.9
恶意存储	15.7	10.3	3.1	6.7
后门维持	19.6	17.3	4.8	8.1
内存注入	22.3	20.5	5.9	10.3
横向移动	18.9	16.1	3.6	7.3
凭证窃取	14.9	13.6	4.9	8.7
命令控制	17.2	12.8	4.3	8.2
数据窃取	17.8	15.5	4.4	7.1
持久化	15.3	13.9	4.7	8.4
逃避防御	20.4	18.2	5.1	9.4

实验结果表明,基于Stackelberg博弈的电力工控网络动态子图识别窗口调整机制在电力系统APT检测中相较于固定窗口方法具有显著优势。通过对10种不同APT攻击类型的检测分析,动态调整机制在检测成功率、漏报率、误报率、计算成本及资源分配等多个方面展现出优异性能。

1)动态调整机制能够根据攻击行为自适应调整窗口大小,尤其在复杂APT攻击场景中(如内核提权

和横向移动），动态调整机制通过优化子图识别窗口，有效提升了检测成功率。例如，在内核提权攻击中，检测成功率从固定窗口的78.5%提升至89.7%。

2）动态调整机制显著降低了计算成本。在处理复杂攻击场景（如内存注入和数据窃取）时，固定窗口方法的计算时间和资源消耗随窗口大小呈指数级增长，而动态调整机制通过博弈过程选择最优窗口大小，降低了20%以上的计算成本，资源利用效率得到显著提升。动态调整机制还有效减少了漏报率和误报率。

3）动态调整机制的自适应性和快速收敛特性增强了其实时性和操作性。实验表明，防守者在多轮博弈中能够迅速找到均衡点，系统在实际应用中具有较高的适用性。

5　结论

1）提出一种基于Stackelberg博弈的电力工控网络动态子图识别窗口调整机制，用于高效检测电力系统中的APT攻击。防守者根据资源限制和攻击威胁，动态选择最优的子图识别窗口大小，并在博弈中调整其检测策略。攻击者根据防守者的窗口选择策略，动态调整APT子图的规模以逃避检测。博弈过程不断重复，直至达到Stackelberg均衡，确保检测系统能够在不同攻击阶段下高效应对。

2）推导出不完全信息情境下的纯策略Stackelberg均衡方案，针对实际电力系统中APT攻击检测环境中存在的信息不对称、攻击行为的动态变化以及防守者与攻击者策略调整的复杂性，设计了一种自适应策略优化算法。该算法能够在动态环境下，通过序贯博弈更新防守者的检测策略与攻击者的逃避策略，逐步逼近博弈的近似均衡点，优化检测效果。

3）通过仿真实验验证了所提方法的有效性。仿真结果表明，相较于传统固定窗口检测方法，本文提出的机制在不同规模的APT攻击检测中表现出更高的检测准确性和计算效率，并有效减少了子图识别窗口调整过程中的资源消耗。

尽管如此，本研究仍存在一些局限性。首先，博弈模型的复杂度在大规模电力网络环境中可能导致计算成本较高，尤其在高频攻击和大规模电力溯源图的场景下，如何优化计算效率是未来研究的重要方向。针对如何结合机器学习算法与博弈策略优化，避免攻击者主动干扰溯源图构建、多阶段动态伪装，以及分散化攻击路径等更具挑战性的APT攻击场景，从而提升电力工控系统安全检测的整体性能，以及对复杂电力网络环境中动态、实时的电力工控系统APT检测系统的优化将是未来研究的重点方向。

参考文献

[1] 庞清乐，韩松易，周泰，等.基于ASRUKF和IMC算法的电力信息物理系统虚假数据注入攻击检测[J].智慧电力，2024，52(7)：111-118.
Pang Qingle，Han Songyi，Zhou Tai，et al.False data injection attack detection of cyber-physical power system based on ASRUKF and IMC algorithms[J].Smart Power，2024，52(7)：111-118.

[2] ZENG H，SU Z，XU Q C，et al.USV fleet-assisted collaborative data backup in marine Internet of Things[J].IEEE Internet of Things Journal，2024，11(22)：36308-36321.

[3] 韩一宁，张程彬，郭敏嘉，等.基于深度强化学习面向虚假拓扑攻击和拓扑优化的电网调度方法[J].智慧电力，2024，52(3)：25-31.
Han Yining，Zhang Chengbin，Guo Minjia，et al. Deep reinforcement learning based dispatching method for power grid facing false topology attack and topology optimization[J].Smart Power，2024，52(3)：25-31.

[4] WANG Y T，LIU H，LI Z D，et al.Combating advanced persistent threats：challenges and solutions[J].IEEE Network，2024，38(6)：324-333.

[5] TATAM M，SHANMUGAM B，AZAM S，et al.A review of threat modelling approaches for APT-style attacks[J].Heliyon，2021，7(1)：e05969.

[6] 李元诚，罗昊，王欣煜，等.基于溯源图和注意力机制的APT攻击检测模型构建[J].通信学报，2024，45(3)：117-130.
LI Yuancheng，LUO Hao，WANG Xinyu，et al. Construction of advanced persistent threat attack detection model based on provenance graph and attention mechanism[J]. Journal on Communications，2024，45(3)：117-130.

[7] 仇晶，陈荣融，朱浩瑾，等.基于溯源图的网络攻击调查研究综述[J].电子学报，2024，52(7)：2529-2556.
QIU Jing，CHEN Rongrong，ZHU Haojin，et al.A survey of network attack investigation based on provenance graph[J]. Acta Electronica Sinica，2024，52(7)：2529-2556.

[8] 吴尚远，申国伟，郭春，等.威胁情报驱动的动态威胁狩猎方法[J].信息网络安全，2023，23(6)：91-103.
WU Shangyuan，SHEN Guowei，GUO Chun，et al. Threat intelligence - driven dynamic threat hunting method[J].Netinfo

Security,2023,23(6):91-103.

[9] HOSSAIN M N, MILAJERDI S M, WANG J, et al.{SLEUTH}: Real-time attack scenario reconstruction from {COTS} audit data [C]// 26th USENIX Security Symposium (USENIX Security 17).2017:487-504.

[10] CHEN T M, DONG C Y, LV M Q, et al.APT-KGL: an intelligent APT detection system based on threat knowledge and heterogeneous provenance graph learning[J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing,2024:1-15.

[11] DATTA P, POLINSKY I, INAM M A, et al. {ALASTOR}: Reconstructing the provenance of serverless intrusions[C]// 31st USENIX Security Symposium (USENIX Security 22).2022:2443-2460.

[12] DONG F, WANG L, NIE X, et al.{DISTDET}: A {Cost-Effective} Distributed Cyber Threat Detection System[C]// 32nd USENIX Security Symposium (USENIX Security 23).2023:6575-6592.

[13] 刘祥国,张营,王中龙,等.运行时攻击自免疫技术在电网数据安全防御系统的应用[J].山东电力技术,2023,50(8):74-80.
LIU Xiangguo,ZHANG Ying,WANG Zhonglong,et al.Application of runtime attack autoimmunity technology in power grid data security defense platform[J].Shandong Electric Power, 2023, 50(8):74-80.

[14] HAN X Y, PASQUIER T, BATES A, et al. UNICORN: runtime provenance-based detector for advanced persistent threats[EB/OL].[2025-04-08].https://arxiv.org/abs/2001.01525.

[15] 徐兴宪.电厂侧储能系统网络安全防护研究[J].山东电力技术,2023,50(6):6-12.
XU Xingxian. Research on network security protection of energy storage system of power plant[J].Shandong Electric Power,2023,50(6):6-12.

[16] GOYAL A,HAN X Y,WANG G,et al.Sometimes,you aren't what you do: mimicry attacks against provenance graph host intrusion detection systems[C]//Proceedings 2023 Network and Distributed System Security Symposium.Internet Society,2023:1-18.

[17] 刘冬兰,张昊,王睿,等.基于RASP技术的电力应用系统账户安全防御技术研究[J].山东电力技术,2023,50(6):1-5.
LIU Donglan,ZHANG Hao,WANG Rui,et al.Research on account security defense technology of power application system based on runtime application self - protection technology [J]. Shandong Electric Power,2023,50(6):1-5.

[18] LIU Y S, ZHANG M, LI D, et al. Towards a timely causality analysis for enterprise security[C]// Proceedings 2018 Network and Distributed System Security Symposium. Internet Society, 2018:1-15.

[19] WANG Y T, SU Z, XU Q C, et al. A secure and intelligent data sharing scheme for UAV-assisted disaster rescue [J]. ACM Transactions on Networking,2023,31(6):2422-2438.

[20] 王云涛,苏洲,许其超,等.基于审计博弈的安全协作频谱感知方案[J].通信学报,2023,44(12):1-14.
WANG Yuntao, SU Zhou, XU Qichao, et al. Secure and collaborative spectrum sensing scheme based on audit game[J]. Journal on Communications,2023,44(12):1-14.

[21] WANG Y T,SU Z,BENSLIMANE A,et al.Collaborative honeypot defense in UAV networks: a learning-based game approach[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2024, 19:1963-1978.

[22] 闵明慧,杨爽,胥俊怀,等.三维空间位置服务中智能语义位置隐私保护方法[J].电子与信息学报,2024,46(6):2627-2637.
MIN Minghui, YANG Shuang, XU Junhuai, et al. Intelligent semantic location privacy protection method for location based services in three-dimensional spaces[J].Journal of Electronics & Information Technology,2024,46(6):2627-2637.

[23] 孔鹏飞.融合爬山策略的改进粒子群混合路径规划算法[J].电光与控制,2024,31(9):6-11.
KONG Pengfei.An improved particle swarm hybrid path planning algorithm with hill climbing strategy [J]. Electronics Optics & Control,2024,31(9):6-11.

[24] DARPA.Transparent Computing[EB/OL].[2025-04-08].http://www.darpa.mil/program/transparent-computing.

[25] PASQUIER T, HAN X Y, GOLDSTEIN M, et al.Practical whole-system provenance capture [C] // Proceedings of the 2017 Symposium on Cloud Computing.ACM,2017:405-418.

[26] AL-SHAER R, SPRING J M, CHRISTOU E. Learning the associations of MITRE ATT & CK adversarial techniques[C]// 2020 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS).IEEE,2020:1-9.

[27] WU W F, HUANG Y Z, KURACHI R, et al. Sliding window optimized information entropy analysis method for intrusion detection on in-vehicle networks [J]. IEEE Access, 2018, 6:45233-45245.

[28] SONG B, XU L, QIU X L, et al. Adaptive variable length sliding window network coding for low latency transmission in FANETs via deep reinforcement learning[J]. IEEE Wireless Communications Letters,2025,14(5):1441-1445.

收稿日期:2025-01-23
修回日期:2025-04-14

作者简介:

刘 新(1981),女,硕士,正高级工程师,主要研究方向为电力物联网安全、电力数据应用;

王 睿(1991),通信作者(wangrui_dky@163.com),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电力物联网安全、电力数据安全;

张朋丰(1986),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力监控系统安全工作;

张 昊(1990),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力物联网安全、电力网络攻防;

刘 涵(1997),男,博士在读,主要研究方向为网络攻防。

(责任编辑 张丹丹)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250397

·发电技术·

基于IPO-XGBoost混合模型的汽轮机热耗率软测量方法

宫喜鹏[1,3],王丹雅[1,3],王慧凯[1,3*],陈小涛[2]
(1.国能智深控制技术有限公司,北京 102211;2.华北电力大学,北京 100096;
3.北京市电站自动化工程技术研究中心,北京 102200)

摘要:针对火电机组热耗率在线监测精度不足导致的能效优化困境,本文提出一种融合改进鹦鹉优化(improved parrot optimization,IPO)算法与极端梯度提升(extreme gradient boosting,XGBoost)的混合建模框架。该框架通过三重策略对基础鹦鹉优化(parrot optimizer,PO)算法进行增强,引入混沌映射与反向学习机制提升种群多样性,设计自适应惯性权重切换因子平衡全局勘探与局部开发能力,并创新混合高斯-柯西变异算子增强跳出局部最优解的概率。为验证算法有效性,本文在IEEE CEC 2022标准测试函数库中选取单峰、单峰病态、多峰-高震荡及多峰-梯度平坦四类典型函数进行基准测试。实验结果表明:相较于原始PO算法,IPO在收敛代数上明显减少,全局最优解定位精度提升显著,展现出优异的优化性能。然后,本文创新性地将其应用于极端梯度提升树模型的超参数优化过程,构建了IPO-XGBoost预测模型,实现了对模型复杂参数空间的全局寻优。实验结果表明,优化后的模型能更精准地捕捉热力系统非线性特征,其预测结果为机组能效优化提供了可靠的数据支撑,减排效益显著。本文创新性地将混沌优化理论与集成学习模型结合,为复杂能源系统的智能建模提供了新方法学框架。

关键词:汽轮机热耗率;鹦鹉优化算法;极端梯度提升;自适应切换因子;混合高斯-柯西变异
中图分类号:TP181 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-9904(2026)04-0097-11

Soft Measurement of Turbine Heat Consumption Rate by Integrating Chaotic Optimization and Integrated Learning

GONG Xipeng[1,3],WANG Danya[1,3],WANG Huikai[1,3*],CHEN Xiaotao[2]
(1.CHN Energy Zhishen Control Technology Co.,Ltd.,Beijing 102211,China;
2.North China Electric Power University,Beijing 100096,China;
3.Beijing Engineering Research Center of Power Station Automation,Beijing 102200,China)

Abstract: Aiming at the energy efficiency optimization dilemma caused by the insufficient accuracy of the thermal unit heat consumption rate online monitoring, this study proposes a hybrid modeling framework integrating the improved parrot optimization algorithm (IPO) and extreme gradient boosting tree (XGBoost). The framework enhances the basic parrot optimization algorithm through a triple strategy: introducing chaotic mapping and inverse learning mechanisms to enhance population diversity, designing adaptive inertia weight switching factors to balance global exploration and local exploitation capabilities, and innovating hybrid Gauss-Cauchy variation operators to enhance the probability of jumping out of the local optimal solution.In order to verify the effectiveness of the algorithm, four typical functions, single-peak (sphere), single-peak pathological (rosenbrock), multi-peak (rastrigin) and multi-peak (ackley), are selected from the IEEE CEC standard test function library for benchmarking. The experimental results show that, compared with the original PO algorithm, the IPO significantly reduces the number of convergent generations, and the global optimal solution improves the localization accuracy significantly, showing excellent optimization performance. Following this, this study innovatively applies it to the hyper-parameter optimization process of extreme gradient boosted tree model, and constructs the IPO-XGBoost prediction model, which realizes the global optimization search for the complex parameter space of the model.The experimental results show that the optimized model can capture the nonlinear characteristics of the thermal system more accurately, and its prediction results

基金项目:国家能源投资集团有限责任公司科技项目(GJNY-24-68)。
Science and Technology Project of China National Energy Investment Group Co.,Ltd.(GJNY-24-68).

provide reliable data support for the optimization of the unit's energy efficiency, with significant emission reduction benefits. This study innovatively combines chaos optimization theory with integrated learning models to provide a new methodological framework for intelligent modeling of complex energy systems.

Keywords: turbine heat consumption rate; parrot optimization algorithm; extreme gradient boosting; adaptive switching factor; hybrid Gaussian Cauchy variation

0 引言

汽轮机的热耗率是用来衡量每生产1 kWh电力所需要消耗的热量,它是评估电厂热经济性能的一个关键指标[1-2]。随着更多高参数的机组被用于调峰和调频工作,如何使得这些机组在经济性方面表现更佳,已经变成了一个重要的研究领域[3]。因此降低热耗率、提升机组的运行效率对于电厂实现节能减排目标具有重要意义[4]。

研究表明,有多种因素影响汽轮机热耗率,多个因素之间存在强耦合性,并且各个因素与热耗率之间有着极为复杂的非线性关系,这种特性使得传统的建模方法在构建准确的热耗率预测模型时面临困难[5]。然而,准确计算热耗率对于评估机组的热经济性能和优化汽轮机组的主汽压力提供了重要的理论支持[6],因此,一些研究人员开始利用神经网络技术和机器学习中的回归方法来预测和计算热耗率。文献[7-10]通过最小二乘支持向量机(least squares support vector machine,LSSVM)建立了热耗率预测模型,并使用混沌粒子群(chaotic particle swarm optimization,CPSO)、引力搜索(gravitational search algorithm,GSA)等优化算法对LSSVM模型超参数进行寻优,使模型具有较高的预测精度。其中牛培峰等[8]使用LSSVM模型实现对汽轮机的初压运行优化,并取得了令人满意的结果。文献[11-15]使用了快速学习网络(fast learning algorithm,FLN)、广义回归神经网络(general regression neural network,GRNN)等模型来构建热耗率预测模型,使用大量历史数据进行训练,保证了模型的精度以及泛化能力。以上模型均具有较高的预测精度。然而,最小二乘支持向量机模型因将特征映射到高维空间中,需要大内存空间存取矩阵向量,故无法使用海量历史数据训练以保证模型泛化能力。同时,神经网络模型在进行大数据训练时,具有训练速度较慢的特性。

针对上述缺陷,本文提出一种基于改进的鹦鹉优化[16](improved parrot optimization algorithm,IPO)算法和极端梯度提升[17](extreme gradient boosting,XGBoost)的热耗率软测量模型。XGBoost模型提供了一种非常快速的树构建算法,能够在较短的时间内处理大规模数据,能够有效地从电厂DCS的海量历史数据中提取出有效的信息,从而保证模型的泛化能力,其广泛应用于预测领域[17-18]。但其模型参数众多,很难人为设定最优参数组合[19],故使用IPO算法寻找XGBoost模型最优参数组合,建立IPO-XGBoost模型。为验证IPO算法的优越性,从23个标准测试函数中,随机挑选两个单峰特性的函数和两个多峰特性的函数对IPO和鹦鹉优化(parrot optimizer,PO)进行性能实验。结果表明,IPO算法在收敛速度上显著优于PO算法,在跳出局部最优解方面性能更强。为验证模型的准确性,将该模型与未改进的XGBoost模型进行对比,发现其有更好的预测精度和泛化能力。

1 极端梯度提升模型

XGBoost算法原理是将多个识别准确率较低的弱学习器融合为一个准确的强学习器[20]。

XGBoost运用了梯度提升策略[21],在之前树的结果上逐步引入一棵新树,并迭代优化之前树的结果,其算法流程如图1所示。

XGBoost中分类与回归树(classification and regression tree,CART)的集成模型如式(1)所示。

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^{K} f_k(\boldsymbol{x}_i), f_k \in F \tag{1}$$

式中:$\hat{y}_i$为第i个样本的预测值;K为CART决策树数量;$\boldsymbol{x}_i$为第i个样本的特征向量(其维度是数据特征的数量);$f_k(\boldsymbol{x}_i)$为第k棵树在样本$\boldsymbol{x}_i$上的预测值;F为整个集成模型所有弱学习器(CART树)的集合空间。

模型的目标函数L如式(2)所示。

$$\mathcal{L}\left(y_i,\hat{y}_i\right)=\sum L\left(y_i,\hat{y}_i\right)+\sum\Omega\left(f_k\right) \tag{2}$$

式中：$\mathcal{L}(\cdot)$为模型损失函数；$L(\cdot)$为预测值$\hat{y}_i$和真实值y_i的误差，即单个样本的损失函数；$\Omega(\cdot)$为树的复杂度之和，实现对模型复杂度的控制。

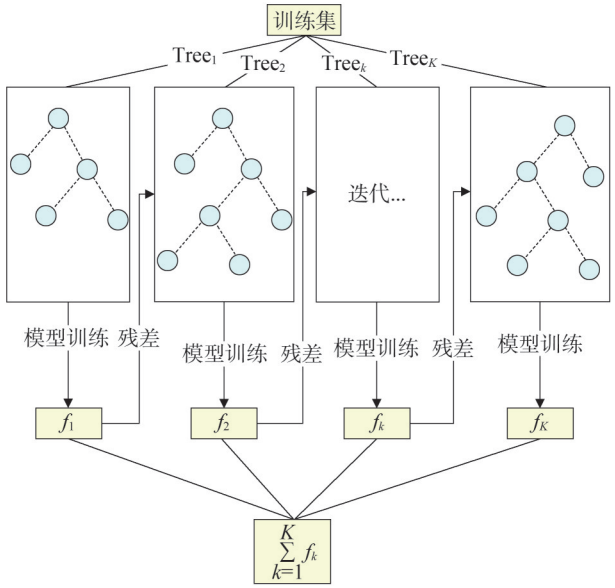


图1　XGBoost算法

Fig.1 XGBoost algorithm

$$\Omega\left(f_k\right)=\gamma T_{\text{node}}+\frac{1}{2}\lambda\sum_{j=1}^{T_{\text{node}}}\omega_j^2 \tag{3}$$

式中：γ和λ为模型的惩罚系数；T_{node}为叶子节点总数；ω_j为第j个叶子的输出权重。

式(2)在迭代过程中，第t轮的目标函数为

$$\mathcal{L}^{(t)}\approx\sum_{i=1}^{N_{\text{sample}}}\left[L\left(y_i,\hat{y}_i^{(t-1)}\right)+g_if_t\left(\boldsymbol{x}_i\right)+\frac{1}{2}h_if_t^2\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right]+\Omega\left(f_t\right) \tag{4}$$

式中：$\mathcal{L}^{(t)}$为第t轮的目标函数，它是通过对损失函数进行二阶泰勒展开近似得到的；N_{sample}为训练样本的数量；$\hat{y}_i^{(t-1)}$为第i个样本在前$t-1$轮的累积预测值；$f_t(\boldsymbol{x}_i)$为第t轮训练时新拟合的树对样本特征向量$\boldsymbol{x}_i$的预测值；g_i和h_i为损失函数$L(\cdot)$关于$\hat{y}_i^{(t-1)}$的一、二阶导数；t为迭代轮数。

$$\begin{cases}g_i=\partial_{\hat{y}_i^{(t-1)}}L\left(y_i,\hat{y}_i^{(t-1)}\right)\\h_i=\partial^2_{\hat{y}_i^{(t-1)}}L\left(y_i,\hat{y}^{(t-1)}\right)\end{cases} \tag{5}$$

式中：∂为求偏导。

定义$G_j=\sum_{i\in I_j}g_i$、$H_j=\sum_{i\in I_j}h_i$，代入式(4)，可得

$$\mathcal{L}^{(t)}\approx\sum_{j=1}^{T_{\text{node}}}\left[G_j\omega_j+\frac{1}{2}\left(H_j+\lambda\right)\omega_j^2\right]+\gamma T_{\text{node}} \tag{6}$$

式中：G_j为第j个叶子中的一阶导数之和；H_j为第j个叶子中的二阶导数之和；I_j为第j个叶子中的样本集合。

对ω_j求偏导，得到最优输出权重。

$$\omega_j^*=-\frac{G_j}{H_j+\lambda} \tag{7}$$

式中：ω_j^*为第j个叶子的最优输出权重。

将式(7)代入式(6)，得

$$\mathcal{L}^{(t)}\left(\omega_j^*\right)=-\frac{1}{2}\sum_{j=1}^{T_{\text{node}}}\frac{G_j^2}{H_j+\lambda}+\gamma T_{\text{node}} \tag{8}$$

式中：$\mathcal{L}^{(t)}\left(\omega_j^*\right)$为最优输出权重$\omega_j^*$对应的第$t$轮目标函数值。

损失函数值越小代表模型精度越高，使用贪心算法划分子树，计算模型的最大增益。最大增益计算方式如式(9)所示。

$$G_{\text{ain}}=\frac{1}{2}\left[\frac{G_{\text{L}}^2}{H_{\text{L}}+\lambda}+\frac{G_{\text{R}}^2}{H_{\text{R}}+\lambda}-\frac{G^2}{H+\lambda}\right]-\gamma \tag{9}$$

式中：G_{ain}为分裂增益；G_{L}和H_{L}分别为左子叶中的一、二阶导数之和；G_{R}和H_{R}分别为右子叶中的一、二阶导数之和；G和H分别为父叶中的一、二阶导数之和。

2　基于IPO的XGBoost参数优化

2.1　鹦鹉优化算法

PO算法是由Lian等人于2024年提出的一种高效的元启发式算法，该算法从驯养鹦鹉时观察到的觅食、停留、交流和对陌生人行为的恐惧中汲取灵感[22]。PO的计算过程如下。

1)种群初始化。根据种群大小、迭代次数、解空间上下限，PO的初始化公式如式(10)所示。

$$\boldsymbol{x}_i^0=\boldsymbol{x}_{\min}+\text{rand}(0,1)\cdot\left(\boldsymbol{x}_{\max}-\boldsymbol{x}_{\min}\right) \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{x}_i^0$为第i只鹦鹉的初始位置向量；$\boldsymbol{x}_{\max}$为解空间上限向量；$\boldsymbol{x}_{\min}$为解空间下限向量；rand(0,1)为[0,1]之间的随机数。

2)觅食行为。它们首先是观察食物的位置，然后考虑主人的位置，以此来估计食物的大致位置，然后向各自的位置飞去。位置运动遵循式(11)。

$$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t+1)}=\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}+\frac{\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}-\boldsymbol{x}_{\text{avg}}^{(t)}}{\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}-\boldsymbol{x}_{\text{avg}}^{(t)}}\cdot\alpha\cdot\text{Levy}(\beta)\cdot\left|\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}-\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{*}\right|\cdot\text{rand}(0,1)\cdot\frac{t}{T_{\max}}\tag{11}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t+1)}$为第$\underline{i}$只鹦鹉在第$t+1$轮更新的位置向量；$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}$为第$\underline{i}$只鹦鹉在第$t$轮的位置向量；$\boldsymbol{x}_{\text{avg}}^{(t)}$为第$t$轮种群内部的平均位置向量；$\alpha$为鹦鹉当前位置与食物(目标位置)之间的距离尺度；Levy(·)为Levy分布，用来描述鹦鹉的飞行；β为Levy分布的稳定性参数；$\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{*}$为从初始化到当前搜索的全局最佳位置向量；$T_{\max}$为最大迭代数。

$$\boldsymbol{x}_{\text{avg}}^{(t)}=\frac{1}{N_{\text{pop}}}\sum_{\underline{i}=1}^{N_{\text{pop}}}\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}\tag{12}$$

式中：N_{pop}为种群规模，即种群中个体的数量。

Levy分布的规则如式(13)所示，其中β取1.5。

$$\text{Levy}(\beta)=\frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}}\tag{13}$$

式中：u和v为两个服从正态分布的随机变量。

3)停留行为。鹦鹉是一种社会性极强的生物，其停留行为主要表现为突然飞向主人身体的任何部位，并在一定时间内保持静止状态。这一过程可以表示为

$$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t+1)}=\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}\cdot\text{ones}(1,d)\cdot\exp\left(-\frac{t}{T_{\max}}\right)\tag{14}$$

式中：ones(1,d)为维数d的全1变量。

4)交流行为。鹦鹉是一种与生俱来的社会性动物，其特点是群内交流密切。这种传播行为包括飞向种群和不飞向种群。在PO中，假设两种行为都以相等的概率发生，并使用当前种群的平均位置来表征种群的中心。这一过程可以表示为

$$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t+1)}=\begin{cases}\boldsymbol{x}_{\text{avg}}^{(t)}+\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}\cdot\dfrac{t}{T_{\max}}\cdot\text{rand}(0,1), r_{\text{p}}\geqslant P_{\text{switch}}\\ \boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}+\boldsymbol{x}_{\text{avg}}^{(t)}\cdot\dfrac{t}{T_{\max}}\cdot\text{rand}(0,1), r_{\text{p}}<P_{\text{switch}}\end{cases}\tag{15}$$

式中：r_{p}为随机概率；P_{switch}为切换概率控制参数，用于在两种不同的更新策略之间进行随机切换，在原始PO中，这是一个固定的常数，通常设定为0.5。

5)恐惧行为。一般而言，鸟类对陌生事物表现出天然的恐惧。它们倾向于与陌生个体保持距离，并主动向主人靠拢以寻求庇护，如式(16)所示。

$$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t+1)}=\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{*}+\left(\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(t)}-\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{*}\right)\cdot\text{rand}(0,1)\tag{16}$$

2.2　改进的鹦鹉优化算法

文献[22]中使用23个经典的基准测试函数，将鹦鹉优化算法与哈里斯鹰优化算法(harris hawks optimization，HHO)、鲸鱼优化算法(whale optimization algorithm，WOA)、鲣鱼优化算法(remora optimization algorithm，ROA)、火鹰优化算法(fire hawk optimizer，FHO)、算术优化算法(arithmetic optimization algorithm，AOA)、正弦余弦算法(sine cosine algorithm，SCA)、多元宇宙优化(multi-verse optimization，MVO)、蝙蝠算法(bat algorithm，BA)进行测试对比，其优化能力以及性能排名靠前。但PO算法也依赖于初始种群的选择，并且可能面临过早收敛的问题，容易陷入局部最优解，而且在处理复杂函数优化问题时，可能无法找到全局最优解。针对以上问题，为提高其全局搜索能力、增快其收敛速度以及加强其跳出局部最优的能力，本文提出了三种策略对其进行改进。

2.2.1　基于Cat映射+反向学习的种群初始化策略

为了提高算法的全局探索能力和优化初始种群的品质，本文提出结合Cat混沌映射与反向学习技术来初始化种群的方法。Cat映射作为一种二维可逆的混沌映射，具备产生随机性、分散性和复杂性种群分布的能力，这使得算法能够同时从多个起始点进行搜索，提高算法全局搜索能力。其表达形式如式(17)所示。

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\underline{i},d_1}^{(0,\text{new})}\\ \boldsymbol{x}_{\underline{i},d_2}^{(0,\text{new})}\end{bmatrix}=\text{mod}\left(\begin{bmatrix}1&1\\1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_{\underline{i},d_1}^{(0)}\\ \boldsymbol{x}_{\underline{i},d_2}^{(0)}\end{bmatrix},1\right)\tag{17}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\underline{i},d_1}^{(0)}$和$\boldsymbol{x}_{\underline{i},d_2}^{(0)}$为第$\underline{i}$只鹦鹉初始位置向量$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(0)}$中维度$d_1$和$d_2$的分量值；$\boldsymbol{x}_{\underline{i},d_1}^{(0,\text{new})}$和$\boldsymbol{x}_{\underline{i},d_2}^{(0,\text{new})}$为第$\underline{i}$只鹦鹉在初始阶段，经过Cat映射后得到的维度$d_1$和$d_2$的新分量值(上标new)；mod(·,1)为取模运算函数，对矩阵乘积的结果按元素取模1，即只取结果的小数部分。

将式(17)中产生的多个初始解按照式(18)进行反向学习，得到相对应的反向解。

$$\boldsymbol{x}_{\text{opp},\underline{i}}^{(0)}=\boldsymbol{x}_{\min}^{(d)}+\boldsymbol{x}_{\max}^{(d)}-\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(0)}\tag{18}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\text{opp},\underline{i}}^{(0)}$为第$\underline{i}$只鹦鹉的初始位置$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(0)}$对应的反向解向量；$\boldsymbol{x}_{\min}^{(d)}$为初始解种群中第$d$维向量的最小值；$\boldsymbol{x}_{\max}^{(d)}$为初始解种群中第$d$维向量的最大值；$\boldsymbol{x}_{\underline{i}}^{(0)}$为第$\underline{i}$

只鹦鹉的初始位置向量。

2.2.2　自适应切换因子策略

在鹦鹉的交流行为中，其有两种行为，分别是飞向种群中进行交流的行为和交流后离开种群的行为。在原有的PO算法中，假设两种行为发生的概率一样，由 P 因子确定。其中交流后离开种群的行为变异力度较小，为防止算法陷入局部最优，本文提出自适应切换因子策略，提高鹦鹉在迭代后期进行种群交流行为的概率，增强算法跳出局部最优的能力，自适应切换因子的表达式为

$$P_{\text{switch}} = \frac{1}{1 + \exp\left(-2\left(2t/T_{\max} - 1\right)\right)} \tag{19}$$

式中：P_{switch} 为切换概率控制参数，在IPO中，它由自适应函数计算得到，与式(15)都代表着控制鹦鹉交流行为中两种策略切换的概率，只是在PO算法中为一个固定常数。

2.2.3　混合柯西和高斯变异策略

柯西变异来源于柯西分布，柯西分布原理如式(20)所示。

$$f(x,x_0,\xi) = \frac{1}{\pi\xi\left[1 + \left(\dfrac{x - x_0}{\xi}\right)^2\right]} \tag{20}$$

式中：$f(x,x_0,\xi)$ 为概率密度函数；x 为自变量，表示随机变量的取值；x_0 为位置参数；ξ 为尺度参数，决定分布的“宽度”。

算子通过增加种群的多样性，从而扩大算法的搜索范围，增强算法全局搜索的性能。当算法陷入局部最优时，柯西算子通过增大鹦鹉的行为步长，使其跳出局部最优。

高斯变异的数学模型为

$$f(x,\mu,\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma}\exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{21}$$

式中：$f(x,\mu,\sigma)$ 为概率密度函数；μ 为期望；σ 为标准差。

与柯西算子相比，高斯算子提供了更精细的调节能力。当算法处于局部最优解时，高斯变异可以通过微调最优个体的坐标，推动搜索过程向未探索的邻域发展，从而提高算法跳出局部最优解的能力。

将柯西变异与高斯变异进行混合加入鹦鹉优化算法中，平衡全局探索和局部搜索的需求，提高算法在复杂优化问题中的适应性和收敛速度，具体公式为

$$\boldsymbol{x}_{i,\text{new}} = \boldsymbol{x}_i^{(t)}\left(1 + \boldsymbol{r}_{\text{cau}} \cdot \text{rand}(0,1) + \boldsymbol{r}_{\text{gau}} \cdot \text{rand}(0,1)\right) \tag{22}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{i,\text{new}}$ 为混合柯西和高斯变异后的第 i 只鹦鹉在第 t 轮的新位置向量；$\boldsymbol{r}_{\text{cau}}$ 为满足柯西分布的随机变量向量；$\boldsymbol{r}_{\text{gau}}$ 为满足高斯分布的随机变量向量。

变异操作可能会导致最优个体位置的性能下降，因此，在应用混合变异位置扰动后，需要引入一个保优策略。该策略通过比较变异后的最优个体与原始最优个体的适应度来决定哪个个体更优，即选择适应度值最小的位置作为当前代的最优解。判断公式可以表示为

$$\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{(t+1)} = \begin{cases} \boldsymbol{x}_{\text{best}}^{(t)}, f_{\text{fit}}(\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{(t)}) < f_{\text{fit}}(\boldsymbol{x}_{i,\text{new}}) \\ \boldsymbol{x}_{i,\text{new}}, f_{\text{fit}}(\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{(t)}) \geqslant f_{\text{fit}}(\boldsymbol{x}_{i,\text{new}}) \end{cases} \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{(t+1)}$ 为保优策略后第 i 只鹦鹉在第 $t+1$ 轮最优的位置向量；$\boldsymbol{x}_{\text{best}}^{(t)}$ 为第 i 只鹦鹉在第 t 轮最优的位置向量；$f_{\text{fit}}(\cdot)$ 为适应度函数。IPO算法流程如图2所示。

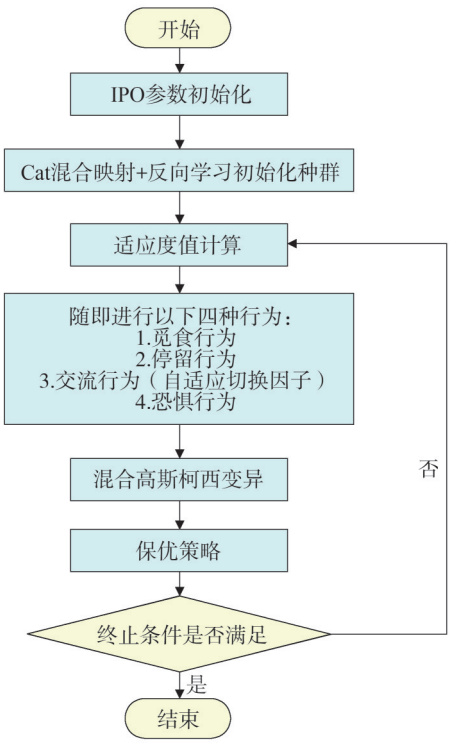


图2　IPO算法流程图

Fig.2 The flow chart of the IPO algorithm

2.3　IPO优化XGBoost模型参数

XGBoost模型性能很大程度上受到模型参数的影

响,本文在XGBoost模型弱学习器中选择使用决策树模型(gbtree),影响该模型性能的主要参数如表1所示。

表1　XGBoost模型参数

Table 1 XGBoost model parameters

参数名称	参数介绍	取值范围
eta	学习率	(0,1]
max_depth	树的最大深度	[0,∞)
gamma	正则化参数	[0,∞)
subsample	树对样本的采样率	(0,1]
min_child_weight	分裂节点样本权重阈值	[0,∞)
colsample_bytree	特征采样率	(0,1]
n_estimators	迭代次数/树的棵树	[0,∞)

为避免人工盲目选择参数,本文使用改进的鹦鹉优化算法对极端梯度提升模型的超参数进行寻优。其中,XGBoost目标函数为式(2),结合式(3)与式(5),IPO优化后的XGBoost正则化形式为

$$\mathcal{L}^{(t)}=\sum_{i=1}^{N_{\text{sample}}}\left[L\left(y_i,\hat{y}_i^{(t-1)}\right)+g_i f_t\left(\boldsymbol{x}_i\right)+\frac{1}{2}h_i f_t^2\left(\boldsymbol{x}_i\right)\right]+\gamma T_{\text{node}}+\frac{1}{2}\lambda\sum_{j\in I_j}\omega_j^2 \tag{24}$$

将均方根误差作为适应度函数,适应度计算公式为

$$F_{\text{fit}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{sample}}}(y_{\text{act},i}-y_i)^2}{N_{\text{sample}}}} \tag{25}$$

式中:F_{fit}为适应度;$y_{\text{act},i}$为第i个样本热耗率的实际值;y_i为第i个样本的热耗率预测值。

图3为IPO算法优化XGBoost模型参数,并建立IPO-XGBoost模型的流程图。

3　热耗率软测量实验

3.1　IPO算法实验

为验证IPO算法性能,将其与PO算法进行性能比对。随机从CEC2022基准测试集中的23个测试函数中选取两个单峰函数(F_1、F_3)、两个多峰函数(F_8、F_{12})进行测试。单峰函数由于只有一个全局最优解,被用来评估算法的寻优能力和收敛速度。而多峰函数拥有多个局部最优解,用于检验算法是否能够跳出局部最优解,并防止过早收敛的问题[23]。具体测试函数如表2所示[22]。

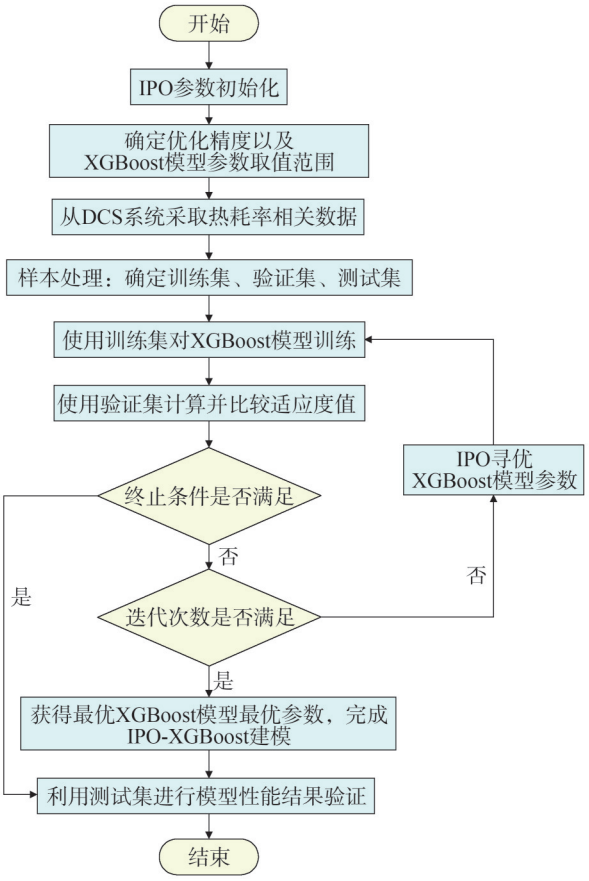


图3　IPO-XGBoost模型流程图

Fig.3 The flow chart of IPO-XGBoost model

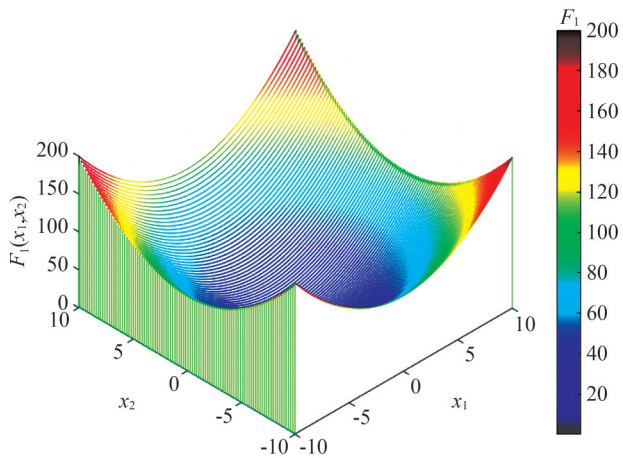
表2　测试函数表

Table 2 Table of test functions

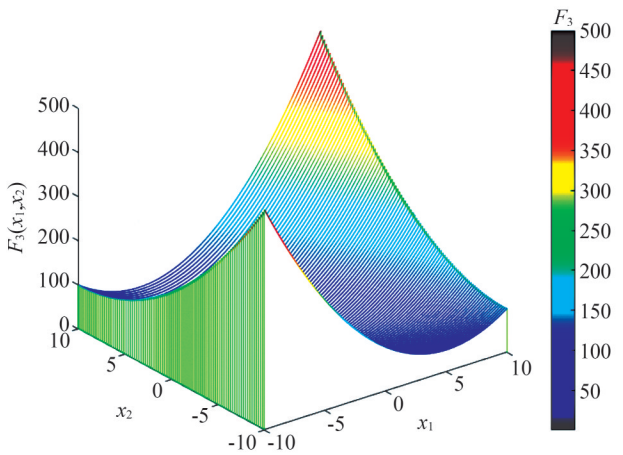
函数	函数表达式	最优值
F_1	$F_1(x)=\sum_{i=1}^{n}x_i^2$	0
F_3	$F_3(x)=\sum_{i=1}^{n}(\sum_{j=1}^{i}x_j)^2$	0
F_8	$F_8(x)=\sum_{i=1}^{n}-x_i\sin(\sqrt{\lvert x_i\rvert})$	−12 569.5
F_{12}	$F_{12}(x)=\frac{n}{n}\{10\sin(\pi y_1)+\sum_{i=1}^{n}(y_i-1)^2[1+10\sin^2(\pi y_{i+1})]^2\}+\sum_{i=1}^{n}u(x_i,10,100,4)$，$y_i=1+\frac{x_i+1}{4}$，$u(x_i,a,k,m)=\begin{cases}k(x_i-a)^m, & x_i>a\\ 0, & a\geqslant x_i\geqslant -a\\ k(-x_i-a)^m, & x_i<-a\end{cases}$	0

每个测试函数的维度全部为30，将PO和IPO算法的种群数量均设置为30，迭代次数均设置为2 000，寻优空间设置为相同的寻优空间，即CEC2022基准下每个函数对应的寻优空间。为保证实验的公平，两种算法均在相同配置的计算机中进行寻优测试，通过MATLAB R2021b进行仿真。其中，最优值为基准函数的理论最优值，Lian等人[22]在各算法中使用经典基准函数独立运行30次得到的统计结果用于算法收敛性与鲁棒性评估等方面。

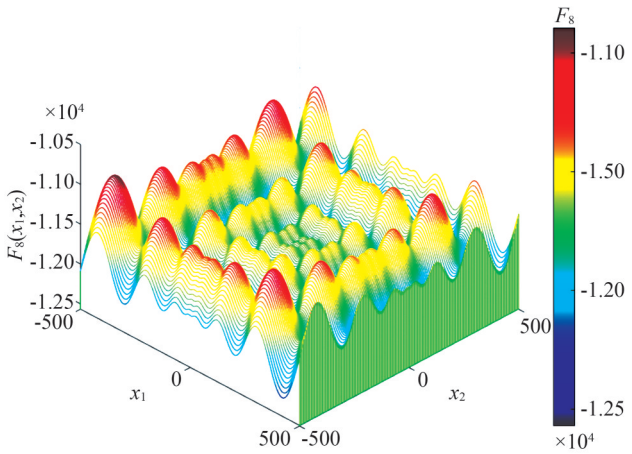
每个测试函数对应的几何图以及两种寻优方式对应的迭代曲线如图4、图5所示。其中，测试函数的x_1、x_2为无量纲的数值变量，代表着决策变量；坐标轴与色谱表示算法在搜索空间中进行探索的决策变量的取值范围；$F(x_1,x_2)$为函数的结果。



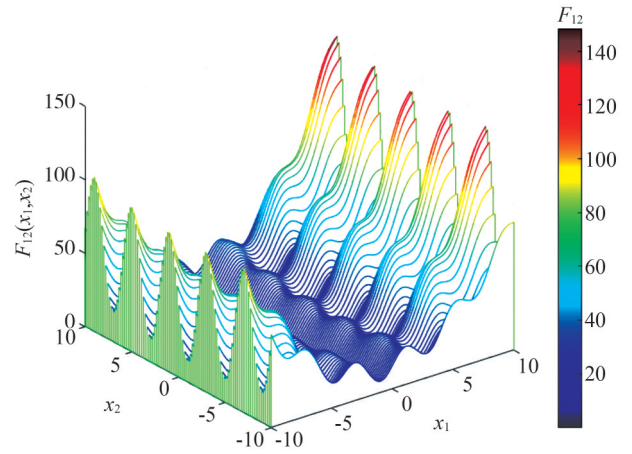
(a)F_1单峰函数图



(b)F_3单峰函数图



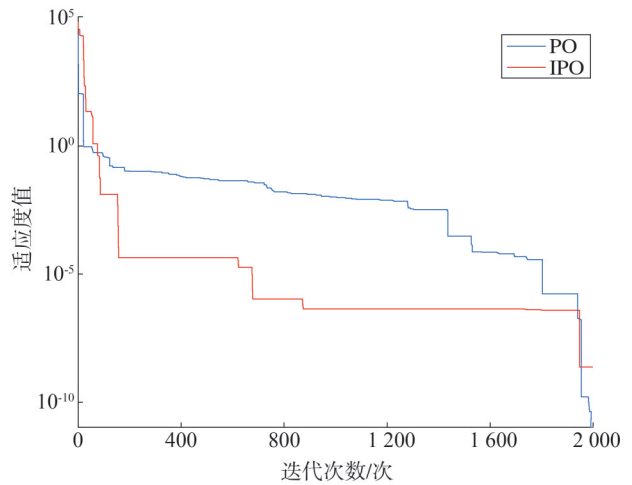
(c)F_8多峰函数图



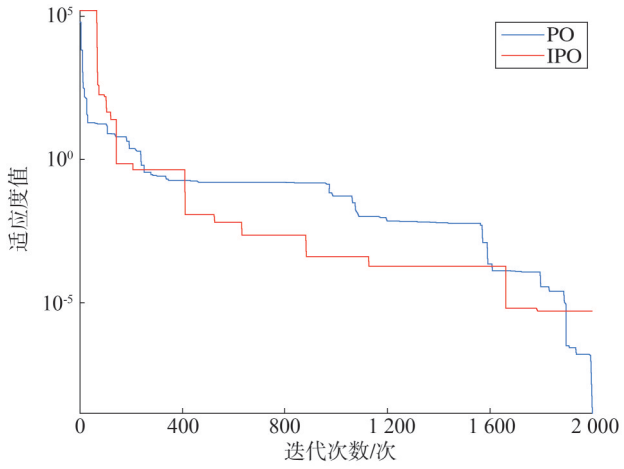
(d)F_{12}多峰函数图

图4　测试函数几何图

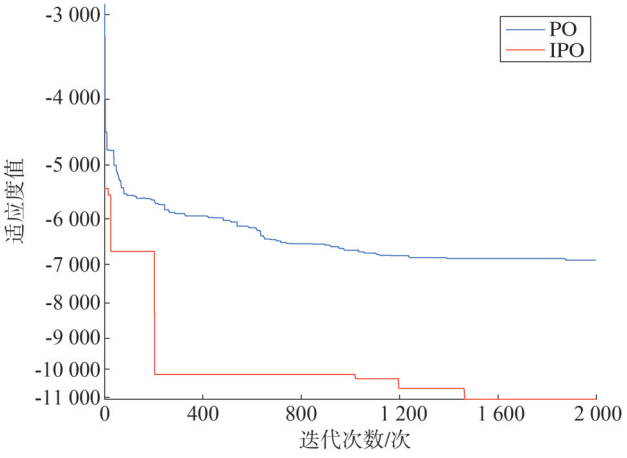
Fig.4 Test function geometry



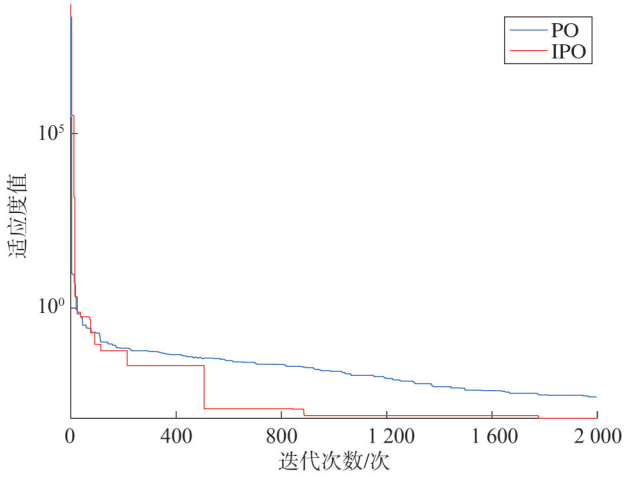
(a)F_1函数迭代寻优收敛图



(b)F_3函数迭代寻优收敛图



(c)F_8函数迭代寻优收敛图



(d)F_{12}函数迭代寻优收敛图

图5　测试函数寻优迭代曲线

Fig.5 Iteration curves of test function optimization

由图5(a)、(b)可知,IPO优化算法相比于PO算法在寻优能力以及迭代速度上均有所提高。由图5(c)、(d)可知,改进的鹦鹉优化算法在解决陷入局部最优的问题上,有显著的提升。

3.2　热耗率预测实验

使用某电厂660 MW机组进行研究,为保证XGBoost模型的精度及其泛化能力,从电厂DCS系统中选取一年的历史数据,采样时间为1 min。筛除因机组停机等原因导致的不健康数据,最终采集到440 972组数据,负荷区间为260MW ~660 MW,包含机组正常运行的所有工况。

根据文献[24-25],选取与热耗率强相关的19个可控热力参数[26]作为XGBoost模型输入变量,分别为主给水温度、背压、主汽压力、再热器出口温度、主蒸汽流量、再热器出口压力、再热器冷端蒸汽流量、主蒸汽温度、过热减温水流量、负荷、凝结水流量、主给水压力、再热器热端蒸汽流量、高压缸排汽压力、高压缸排汽温度、主给水流量、再热减温水压力、再热减温水温度、再热减温水流量,将热耗率作为模型输出变量。

IPO优化XGBoost模型参数如表3所示。

表3　IPO_XGBoost模型参数寻优表

Table 3 IPO_XGBoost model parameter optimization table

参数名称	参数值
eta	0.2
max_depth	10
gamma	10
subsample	0.9
min_child_weight	0.8
colsample_bytree	0.9
n_estimators	300

为验证IPO-XGBoost模型的性能,将其预测结果与原始XGBoost模型的预测结果进行了对比,两种模型的训练样本、测试样本均相同。将440 972组数据随机划分为训练集、验证集以及测试集,其中IPO-XGBoost模型中使用训练集以及验证集实现对参数的调优,XGBoost模型直接使用训练集进行训练,两种模型同样使用测试集进行测试,旨在验证模型精度与泛化能力。因数据量过大,为精确展示模型的效果,热耗率预测图将会选取部分片段,而相对误差图将会展示全部数据,以上述两种方式来展示模

型的精度及泛化能力。同时，表4记录了两种模型的评估指标，包括均方根误差（root mean squared error，RMSE）、平均绝对误差（mean absolute error，MAE）以及决定系数（coefficient of determination，R^2）。

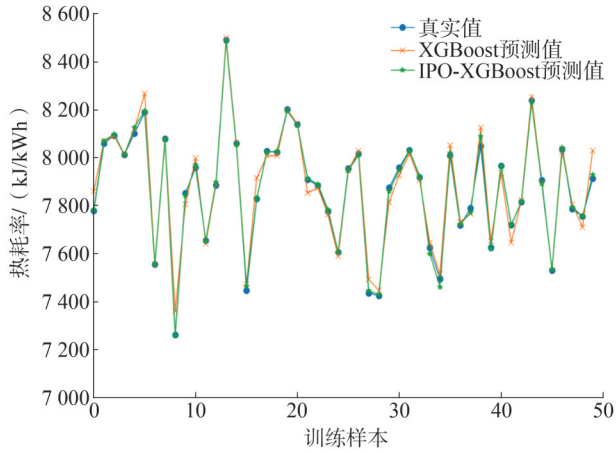
表4　测试集的性能指标对比

Table 4 Comparison of performance metrics on the test set

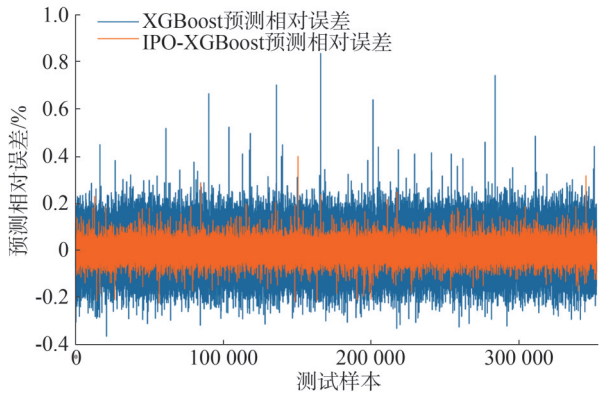
模型	RMSE	MAE	R^2
IPO-XGBoost	14.004 7	9.876 5	0.998 4
XGBoost	45.091 8	32.895 3	0.983 6

由表4可以看出RMSE由45.091 8降低到14.004 7，MAE由35.895 3降低到9.876 5，能够证实IPO-XGBoost模型更为可靠。R^2由0.983 6提高到0.998 4，证实IPO-XGBoost模型拟合能力更强。综上所述，IPO-XGBoost热耗率软测量模型具有较高的预测精度以及较强的泛化能力，可以作为汽轮机热耗率计算的一种有效措施。

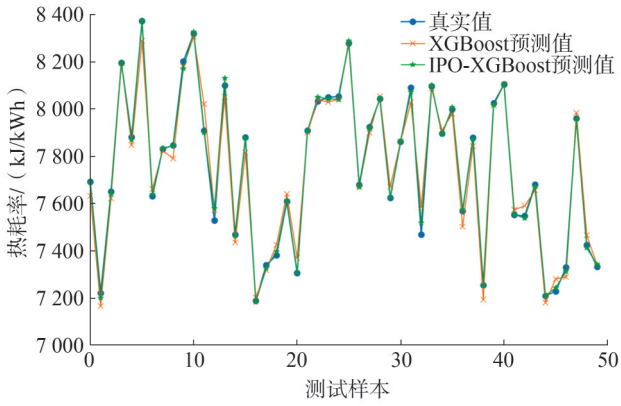
图6（a）、（b）分别为训练集和测试集的部分预测输出值与真实值的比对结果，可以看出IPO-XGBoost模型在精度上优于XGBoost模型，两图中IPO-XGBoost模型预测结果与真实值接近重合，证明IPO-XGBoost模型可以准确预测热耗率。图6（c）、（d）分别为训练集和测试集整体数据的相对预测误差，IPO-XGBoost模型最大误差均不超过0.4%，而XGBoost模型在训练集中，最大相对误差在0.8%左右，而测试集中的最大相对误差达到了1%，由此可以看出IPO-XGBoost模型泛化能力更强。



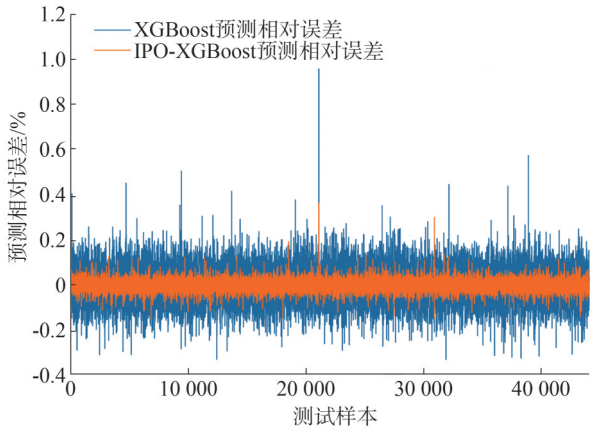
（a）训练集预测结果对比



（b）训练集相对误差对比



（c）测试集预测结果对比



（d）测试集相对误差对比

图6　预测结果

Fig.6 Forecast values

4　结论

综上所述，本文的主要工作以及实验的结论如下：

1）经过Cat映射+反向学习、自适应切换因子、混合高斯和柯西变异三种策略改进的IPO算法，在

23个标准测试函数中随机挑选的2个单峰函数和2个多峰函数测试中,收敛速度显著优于原PO算法,且在跳出局部最优解及全局搜索能力上表现更强。

2)利用IPO算法优化XGBoost模型参数,成功获取最优参数组合,为模型性能提升奠定了基础。

3)将IPO-XGBoost软测量模型应用于某电厂660 MW机组,在训练样本和测试样本中,相对误差均不超过0.4%,表明该模型误差低且各项指标优异,具有较高的拟合能力、精度及泛化能力。

4)将XGBoost模型应用于热耗率软测量领域,并通过改进鹦鹉优化算法构建IPO-XGBoost模型,为该领域提供了全新方法与思路。

参考文献

[1] 乔海升,赵文升.基于支持向量回归和聚类算法的主蒸汽压力优化[J].广东电力,2022,35(7):72-78.
QIAO Haisheng, ZHAO Wensheng. Main steam pressure optimization based on SVR and K-means algorithm[J].Guangdong Electric Power,2022,35(7):72-78.

[2] 王子杰,陆树银,赵梓良,等.供热改造对火电机组性能的影响分析[J].化工进展,2023,42(5):2325-2331.
WANG Zijie, LU Shuyin, ZHAO Ziliang, et al. Analysis of the influence of heating transformation on the performance of thermal power unit[J].Chemical Industry and Engineering Progress,2023,42(5):2325-2331.

[3] 左智科,陈国彬,刘超,等.反馈精英鲸鱼优化算法优化LSSVM的热耗率软测量建模[J].计量学报,2019,40(2):259-265.
ZUO Zhike, CHEN Guobin, LIU Chao, et al.Soft sensor model of heat rate based on optimized LSSVM by FEWOA [J]. Acta Metrologica Sinica,2019,40(2):259-265.

[4] 张彦鹏,郑威,祝令凯,等.背压对抽凝机组热耗率的修正计算[J].中国电机工程学报,2021,41(增刊1):229-235.
ZHANG Yanpeng, ZHENG Wei, ZHU Lingkai, et al. Correction calculation of heat rate of extraction condensing steam turbine by modified back pressure [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1):229-235.

[5] 汪婵婵.基于改进狮群算法的汽轮机热耗率模型预测[J].计量学报,2021,42(7):853-860.
WANG Chanchan. Prediction of steam turbine heat consumption rate based on improvement lion swarm optimization [J]. Acta Metrologica Sinica,2021,42(7):853-860.

[6] 胡坚,刘超.CPSO-FLN模型在汽轮机热耗率预测中的应用研究[J].中国电力,2019,52(8):179-184.
HU Jian, LIU Chao.Application study on CPSO-FLN model in the steam turbine heat rate forecast[J].Electric Power,2019,52(8):179-184.

[7] 吴瑞康,刘迪,郑建平,等.基于IGWO-SVM的汽轮机低负荷下主蒸汽压力优化研究[J].动力工程学报,2024,44(7):1042-1050.
WU Ruikang, LIU Di, ZHENG Jianping, et al. Optimization on main steam pressure of a steam turbine under low loads based on IGWO-SVM[J].Journal of Chinese Society of Power Engineering,2024,44(7):1042-1050.

[8] 牛培峰,刘超,李国强,等.基于双层聚类与GSA-LSSVM的汽轮机热耗率多模型预测[J].电机与控制学报,2016(3):90-95.
NIU Peifeng, LIU Chao, LI Guoqiang, et al.Multi-model for turbine heat rate forecasting based on double layer clustering algorithm and GSA-LSSVM[J].Electric Machines and Control,2016(3):90-95.

[9] 胡坚,刘超.基于引力搜索算法与LSSVM的机组初压优化[J].中国电力,2019,52(6):160-165.
HU Jian, LIU Chao. Unit initial pressure optimization based on gravity search algorithm and LSSVM[J].Electric Power,2019,52(6):160-165.

[10] 夏祥礼,陈国彬,刘超.基于反学习飞蛾火焰算法优化的LSSVM模型及其软测量应用[J].计算机应用与软件,2019,36(5):322-326.
XIA Xiangli, CHEN Guobin, LIU Chao. Optimized lssvm and its soft sensing application based on opposition-based learning moth flame algorithm[J].Computer Applications and Software,2019,36(5):322-326.

[11] 耿娜,夏志,王春玲,等.基于卷积神经网络的火电机组初压实时优化[J].控制工程,2020,27(7):1223-1230.
GENG Na, XIA Zhi, WANG Chunling, et al.Real time optimization of initial pressure of thermal power unit based on convolution neural network [J]. Control Engineering of China, 2020, 27(7):1223-1230.

[12] 汪婵婵,匡泰.基于改进原子算法的核极限学习机热耗率预测[J].数学的实践与认识,2021,51(18):162-177.
WANG Chanchan, KUANG Tai. Prediction of steam turbine heat consumption rate based on improvement atom search optimization [J].Mathematics in Practice and Theory,2021,51(18):162-177.

[13] 钟震,童小忠,司风琪,等.基于MFOA-GRNN的汽轮机热耗率预测模型[J].热能动力工程,2020,35(2):63-69.
ZHONG Zhen, TONG Xiaozhong, SI Fengqi, et al.Prediction model of steam turbine heat rate based on MFOA-GRNN[J].Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(2):63-69.

[14] 马良玉,王永军.基于Savitzky-Golay滤波的双向门控循环单元神经网络汽轮机热耗率预测[J].科学技术与工程,2020,20(9):3623-3628.
MA Liangyu, WANG Yongjun. Steam turbine heat rate prediction based on savitzky-golay filter and bidirectional gated recurrent unit neural network [J]. Science Technology and Engineering,

2020，20(9)：3623-3628.

[15] 孙良海，郭建，李永利，等.基于神经网络的汽轮机运行初压优化研究[J].热力透平，2023，52(3)：194-198.
SUN Lianghai，GUO Jian，LI Yongli，et al.Optimization of initial pressure in steam turbine operation based on neural network[J].Thermal Turbine，2023，52(3)：194-198.

[16] 夏鹞轩，吴丽红，夏侯元，等.基于IPO算法的配电网储能优化配置[J].智慧电力，2025，53(9)：91-98.
Xia Yaoxuan，Wu Lihong，Xiahou Yuan，et al.Optimal energy storage allocation in distribution networks based on IPO algorithm[J].Smart Power，2025，53(9)：91-98.

[17] 路宽，杨兴森，张绪辉，等.基于可解释关系模型的SCR入口气温预测[J].山东电力技术，2024，51(5)：63-72.
LU Kuan，YANG Xingsen，ZHANG Xuhui，et al.Prediction of SCR inlet gas temperature based on interpretable relationship model[J].Shandong Electric Power，2024，51(5)：63-72.

[18] 侯慧，吴文杰，魏瑞增，等.基于注意力机制的CNN-LSTM-XGBoost台风暴雨电力气象混合预测模型[J].智慧电力，2024，52(10)：96-102.
Hou Hui，Wu Wenjie，Wei Ruizeng，et al.Attention mechanism based CNN-LSTM-XGBoost electric power meteorological hybrid forecasting model of typhoon rainstorm[J].Smart Power，2024，52(10)：96-102.

[19] CHEN Z M，PU Y X.Prediction of emissions from gas turbine power generation on GWO-XGBoost-Sobol [J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2024，38(3)：1547-1556.

[20] 商立群，李朝彪，邓力文，等.基于ISSA-XGBoost的电能质量扰动识别方法研究[J].电力系统保护与控制，2024，52(13)：115-124.
SHANG Liqun，LI Chaobiao，DENG Liwen，et al.A power quality disturbance identification method based on ISSA-XGBoost[J].Power System Protection and Control，2024，52(13)：115-124.

[21] 唐贤伦，陈洪旭，熊德意，等.基于极端梯度提升和时间卷积网络的短期电力负荷预测[J].高电压技术，2022，48(8)：3059-3067.
TANG Xianlun，CHEN Hongxu，XIONG Deyi，et al.Short-term power load forecasting based on extreme gradient boosting and temporal convolutional network[J].High Voltage Engineering，2022，48(8)：3059-3067.

[22] LIAN J B，HUI G H，MA L，et al.Parrot optimizer：algorithm and applications to medical problems[J].Computers in Biology and Medicine，2024，172：108064.

[23] 毛雪迪，王冰，夏煌智，等.嵌入Cat映射的混合变异探路者算法及其应用[J].计算机技术与发展，2024，34(2)：171-179.
MAO Xuedi，WANG Bing，XIA Huangzhi，et al.Hybrid mutation pathfinder algorithm embedded with cat mapping and its application[J].Computer Technology and Development，2024，34(2)：171-179.

[24] 李凯丽.基于最小二乘支持向量机的汽轮机热耗率预测与运行初压优化[D].北京：中国石油大学(北京)，2022.

[25] 董竹林.适应火电机组灵活运行滑压曲线的优化研究[D].北京：华北电力大学，2020.

[26] 刘维，任少君，司风琪.火电机组变负荷过程热耗率特性分析与修正方法研究[J].热能动力工程，2024，39(12)：67-74.
LIU Wei，REN Shaojun，SI Fengqi.Research on analysis and correction methods for thermal rate characteristics of thermal power units during variable load process[J].Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2024，39(12)：67-74.

收稿日期：2025-05-16

修回日期：2025-11-26

作者简介：

宫喜鹏(1991)，男，硕士，工程师，主要研究方向为电力生产大数据分析、自动控制系统及热力系统性能优化；

王丹雅(1996)，女，硕士，主要研究方向为火电智能优化；

王慧凯(1999)，通信作者(20100702@chnenergy.com.cn)，男，硕士，主要研究方向为电力生产大数据分析、可视化与可视分析、智能控制优化；

陈小涛(2000)，男，硕士，主要研究方向为火电机组控制优化。

(责任编辑　车永强)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.250039

基于Simulink的H级重型燃气轮机数学模型建立与特性分析

韩 悦[1*],巩志强[1],刘馨颖[2],齐建荟[2],郭俊山[1]
(1.国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250001;2.山东大学核科学与能源动力学院,山东 济南 250061)

摘要:燃气轮机机组清洁高效、供电效率高、调峰性能好,与风光协调互补发电,能够有效解决目前风光发电中产生的波动性、随机性、不可控性等问题。压气机是燃气轮机中的关键部件,且压气机入口导叶(inlet guide vane,IGV)可以改善压气机喘振特性,其开度对燃机特性具有重要影响。本文首先基于MATLAB/Simulink仿真模拟平台,采用机理分析法建立H级重型燃气轮机的数学模型,对比分析了燃机的仿真结果与设计参数,两者误差控制在0.5%以内,表明所建模型满足仿真要求;其次,将不同负荷下燃机输出功率等参数的响应情况与实际运行的实测值进行对比,最大误差为1.29%,可见仿真模型具有一定的准确性。最后,通过该模型研究压气机IGV开度变化对压气机特性的影响,以探究燃气轮机的工作特性。

关键词:H级重型燃气轮机;Simulink;数学模型;特性分析;IGV开度
中图分类号:TK472 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-9904(2026)04-0108-09

Mathematical Modeling and Characteristic Analysis of H-Class Heavy Duty Gas Turbines Based on Simulink

HAN Yue[1*],GONG Zhiqiang[1],LIU Xinying[2],QI Jianhui[2],GUO Junshan[1]
(1.State Grid Shandong Electric Power Research Institute,Jinan 250001,China;
2.School of Nuclear Science,Energy and Power Engineering,Shandong University,Jinan 250061,China)

Abstract:Gas turbine units are clean and efficient,with high efficiency of power supply,good peak shaving performance,and complementary coordination of power generation with wind and solar power. Thus the current problems of volatility,randomness,and uncontrollability that arise in the wind and solar power generation can be solved effectively by gas turbine units. The compressor is a key component in the gas turbine,and the inlet guide vane (IGV) can improve the surge characteristics of the compressor.The opening degree of IGV has important influence on the characteristics of gas turbines.The mathematical model of the H-class heavy duty gas turbine was first established.This was done by using the MATLAB/Simulink simulation platform and mechanism analysis.The simulation results of the gas turbine were compared and analyzed with the design parameters. The error between the two was controlled within 0.5%,which indicated that the established simulation model met the simulation design requirements.Next,the response of parameters,such as the output power of the gas turbine at different loads,was compared with the actual measured values during operation.A maximum error of 1.29% was observed,which indicated that the simulation model had a certain degree of accuracy.Finally,the model was used to study the effect of the variable IGV opening on the characteristics of the compressor,which was to explore the operating characteristics of the gas turbine.

Keywords:H-class heavy duty gas turbine;Simulink;mathematical model;characteristic analysis;IGV opening

0 引言

我国自主研制的300 MW级F级重型燃气轮机首台样机已在上海临港总装下线。而与F级燃气轮机相比,如图1所示的H级燃气轮机技术更先进、出力更大、效率更高,且在低负荷工况下具有更好的排放特性和安全特性,但国内在H级重型燃气轮机的研究和制造方面仍显不足。因此,迫切需要加强对H级燃气轮机的研究与开发,以推动我国能源结构的优化和可持续发展。

基金项目:国网山东省电力公司电力科学研究院自主研发项目(ZY-2024-12)。
Independent Research and Development Project of State Grid Shandong Electric Power Research Institute(ZY-2024-12).

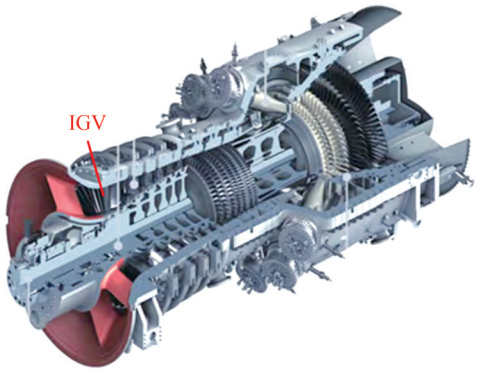


图1　某H级重型燃气轮机示意图

Fig.1 Schematic diagram of an H-class heavy duty gas turbine

国内外对燃气轮机的数学模型以及不同入口导叶（inlet guide vane，IGV）开度下机组的性能进行了大量研究，对于燃气轮机整体模型建立，刘尚明[1]、李忠义[2]等人在研究中采用面向对象的模块化建模方法，对西门子V64.3型燃气轮机各部件的热动力学特性进行分析。朱志劼等人[3]以GE9HA.02型燃机为研究对象，给出H级燃气各级冷却抽气量占总抽气量比值以及总冷却空气量占压气机入口空气量比值，供建模参考。黄郑等人[4]在APROS仿真平台上，以PG9171E型燃气轮机为研究对象搭建了燃气轮机热力学模型，并在此基础之上建立了IGV温度控制等控制系统模型，以便于对机组运行状态进行评估。郭荣[5]对燃气轮机联合循环进行建模，并在变工况下进行仿真模拟，分析环境温度以及压气机IGV调节对联合循环运行特性的影响，并且制定了IGV角度的优化控制策略。方继辉等人[6]对实际运行中的M701F4燃机IGV开度的变化与压气机效率之间的关系进行研究，并观测IGV开度对压气机整体运行的影响。

本文所研究的单轴H级重型燃机压气机采用14级轴流式压气机，压比为22.9（ISO），并在压气机级间设有放气阀进行抽气，用于调节透平排气温度和防止压气机喘振。燃烧系统采用预混燃烧技术，逆流分管式设计，共圆周布置16个低NO_x燃烧器，顺气流方向看为逆时针排列。燃机透平采用4级透平叶轮，其中前3级通过压气机抽气进行强制对流空气冷却，第4级静叶不设冷却装置。压气机是燃气轮机中的关键部位，其性能好坏直接影响燃气轮机运行效率[7]。为改善燃气轮机中压气机的喘振特性，控制燃气轮机的排气温度[8-9]，提高燃气轮机及联合循环的总效率，通常会在压气机中布置IGV[6,10]，位置如图1所示。IGV可以在不同负荷段发生角度调整，调节机组空气的进气流量、方向、速度，压气机的压缩比、效率[6,7]等，是燃气轮机最核心的模型之一[6,11]。

由于H级燃机高热效率、设计技术复杂，国内外研究多集中于F级燃气轮机或其他类型的机组，对H级燃气轮机整体建模及运行特性的分析存在不足，尤其在IGV开度对H级燃机运行性能影响方面缺乏针对性研究。本文基于燃机实际运行数据，建立H级重型燃气轮机机理模型，在额定负荷和部分负荷下对模型进行准确性验证，并给出H级燃气轮机IGV开度与燃机负荷之间的关系式，对额定负荷下不同IGV开度对燃机特性的影响进行研究，探究IGV开度对H级重型燃气轮机压气机进出口质量流量以及压气机效率的影响。这一研究补充了现有文献中对H级燃机机理建模以及IGV开度对燃机的影响的研究不足，有助于更好地优化燃气轮机的运行参数，进而分析其对燃机工作性能的影响。

1　燃气轮机模型建立

单轴重型燃气轮机主要结构有压气机、燃烧室、透平、转轴，各部件之间机械联系和热力气动联系紧密而复杂[12]，其工作原理为：空气进入轴流式压气机被逐级压缩增温、增压，随后其被压至燃烧室与喷入燃烧室的燃料混合燃烧，生成高温燃气。燃气进入透平中膨胀做功，推动透平转子一起高速旋转做功，其中一部分用来抵消压气机耗功，另一部分用来推动与燃气轮机同轴的发电机进行发电。燃气轮机输入参数包括大气条件（大气温度、压力、空气成分）、燃料条件（燃料流量、燃料成分）、转速；输出参数为功率、各部件出口参数。燃气轮机各部件之间由输入输出参数进行耦合联系，在MATLAB/Simulink仿真平台中基于机理分析法[13-14]，采用模块化建模方式分别建立各主要部件数学模型[15]，并通过燃机工作原理将各模块用相关参数进行耦合连接，完成整体模型，应注意的是连接各模块的耦合参数应该一致[16]，否则参数无法在模型中传递。

1.1　压气机模块

H级燃气轮机中压气机采用14级轴流式压气机,额定压比为22.9。为便于仿真研究,根据H级燃机冷却空气系统,将压气机分为四段并在其中两段设抽气口对透平进行抽气冷却,并假设压气机每段压比相同。空气在压气机中经历绝热压缩过程。

IGV影响域模块主要负责计算IGV开度以及与其相关的压气机参数,通过输入燃机负荷指令、压气机入口温度,对IGV开度、压气机入口空气质量流量、压气机效率、压气机压缩比展开计算,输入输出参数之间的函数关系由实际运行参数拟合得出。以其中的重点模块——IGV开度计算子模块为例,拟合IGV开度与燃机负荷之间的函数关系为

$$y = 0.782\,7 + 0.032\,1x + 0.162\,4x^2 \tag{1}$$

式中:x为IGV开度;y为燃机负荷百分数。经比较,实测值与拟合值二者之间平均绝对误差为0.010 6,拟合精度较高。

空气在压气机中经历绝热压缩后,温度由进口温度T_{in}升温到出口温度T_{out},压力由入口压力p_{in}升压到出口压力p_{out},一部分空气被抽取用于透平级的冷却,并且该过程均遵循质量守恒定律及能量守恒定律。

压气机出口温度计算公式为

$$T_{out} = T_{in} \cdot \left[1 + \frac{1}{\eta_{is,c}}\left(\pi_c^{(k-1)/k} - 1\right)\right] \tag{2}$$

式中:$\eta_{is,c}$为压气机绝热压缩效率;π_c为每段压气机压比;k为比热比,由T_{in}与T_{out}的算术平均值T_m决定。

压气机出口压力计算公式为

$$p_{out} = p_{in} \cdot \pi_c \tag{3}$$

进入压气机中的空气一部分被抽取用于透平级的冷却,抽气质量流量的计算公式为[17]

$$\frac{g_{cool}\sqrt{T_{cin}}}{p_{cin}} = K\sqrt{1 - \frac{p'_{cout}}{p_{cin}}} \tag{4}$$

式中:K为抽气系数;g_{cool}为冷却空气质量流量;T_{cin}为抽气点空气温度;p_{cin}为抽气点空气压力;p'_{cout}为冷却回路出口静压。由于一段压气机抽气输送给多级透平,故冷却回路出口静压难以确定,采用式(4)计算难度较大。本模型中采用表1所示抽气比例进行冷却抽气,简化模型建立过程。

表1　压气机抽气比例

Table 1 Compressor pumping ratio

压气机抽气点/透平级	静叶(占压气机该级抽气量)/%	动叶(占压气机该级抽气量)/%
2/1(静)、2(静)、3(静)	45.2、33.6、21.2	0
3/1(动)、2(动)、3(动)	0	45.5、36.4、18.1

压气机耗功P_c计算公式为

$$P_c = g(h_{out} - h_{in}) \tag{5}$$

式中:g为压气机该段的空气质量流量;h_{in}、h_{out}分别为压气机该段入口、出口的空气焓值。

基于质量守恒定律计算压气机中经过抽气后的主流质量流量,即为抽气前的质量流量减去用于透平冷却的质量流量,计算公式为

$$g_{out} = g_{in} - g'_{cool} \tag{6}$$

式中:g_{in}、g_{out}分别为压气机入口和出口空气的质量流量;g'_{cool}为压气机冷却抽气量。

1.2　容积模块

在燃气轮机压气机与燃烧室之间、燃烧室与透平级之间,存在一定的体积,该体积会造成质量流量不平衡。本文为简化所建模型,不考虑压气机和透平占用的实际体积[18],但引入容积模块来模拟各部件中的非稳态质量平衡,以实现整个系统的流量平衡。由于压气机与燃烧室之间容积较大,其他部件相对容积较小,为简化模型,忽略燃烧室与透平级之间的容积效应[19]。

基于质量守恒定律,忽略容积模块内的流速可得

$$\frac{V_p}{mRT_{vout}} \cdot \frac{\mathrm{d}p_{vout}}{\mathrm{d}t} = g_{vin} - g_{vout} \tag{7}$$

式中:V_p为容积模块虚拟体积,采用虚拟体积可以减少迭代计算次数;t为时间;m为该容积内气体质量;R为气体常数;p_{vout}为容积模块出口压力;T_{vout}为容积模块出口温度;g_{vin}为入口空气质量流量;g_{vout}为出口空气质量流量。

忽略容积模块能量累计以及压力损失,得:

$$T_{vout} = T_{vin} \tag{8}$$

$$p_{vout} = p_{vin} \tag{9}$$

式中:T_{vin}为容积模块入口温度;p_{vin}为容积模块入口压力。式(9)中压力值作为压力基准,提供给位于容积模块上游的组件,从而得到该流量情况下压气机的压比,以达到协调压气机与透平的流量值的目的。

1.3　燃烧室模块

燃烧室出口温度以及燃烧室的压力损失是该部件建模的关键，在本文中假设燃烧室为一个控制体，不考虑压气机与燃烧室间的容积模块已经考虑过的非定常质量平衡，关注燃烧室定常质量平衡、非定常能量守恒，以及燃烧室压损，对燃烧室出口温度、压力、焓值等进行求解。

忽略质量和比热的函数变化，燃烧室出口温度计算公式为[20]

$$\tau_{cc}\frac{\mathrm{d}T_{bout}}{\mathrm{d}t}=\frac{[g_{bin}h_{bin}+g_b(h_b+\eta_b\sigma_{LHV})-g_{bout}h_{bout}]}{g_{bout}c_{p_{out}}} \tag{10}$$

式中：σ_{LHV}为燃料低热值，与燃料的实际组成、温度和压力相关；η_b为燃烧室效率；g_b为燃烧室燃料质量流量；h_b为天然气焓值；h_{bin}、h_{bout}分别为燃烧室进口、出口的焓值；g_{bin}、g_{bout}分别为燃烧室的进口、出口质量流量；$c_{p_{out}}$为燃烧室出口产物的定压比热容；T_{bout}为燃烧室出口温度；τ_{cc}为时间常数，定义如式(11)所示。

$$\tau_{cc}=\frac{M_{cc}}{K'g_{out}} \tag{11}$$

式中：M_{cc}为燃烧室内部质量；K'为系数。

忽略燃烧室质量变化，得

$$g_{bout}=g_{bin}+g_b \tag{12}$$

考虑燃料与空气在燃烧室内燃烧存在压降，燃烧室出口压力为

$$p_{bout}=\gamma_{cc}p_{bin} \tag{13}$$

式中：p_{bin}、p_{bout}分为燃烧室进口、出口压力；γ_{cc}为压力保持系数。

产物为混合气体，在对$c_{p_{out}}$进行计算时，假定工质为半理想气体[21]，在MATLAB中调用refpropm函数计算比热比k值，该计算方法适用于计算各组分气体，混合气体的定压比热容C_p为

$$C_p=\sum_{i=1}^{n}\chi_i c_{pi} \tag{14}$$

式中：c_{pi}为混合气体中第i种组分在对应温度下的定压比热容；χ_i为混合气体中第i种组分占气体总量的摩尔分数；n为组分数。

1.4　透平模块

H级重型燃气轮机透平采用4级透平叶轮，解决带有冷却的透平的做功计算问题，通过压气机抽气对透平中的静叶、动叶进行冷却。静叶入口为未加入静叶冷却空气量之前的主燃气气流，混合后的燃气进入本级进行膨胀做功，用于动叶冷却的空气在动叶出口与主燃气气流混合后进入下一级，这部分冷却空气不参与本级动叶的膨胀做功。

其中，混合过程遵循能量守恒和质量守恒，如式(15)、式(16)所示，将高温燃气与冷却空气进行混合后，气体成分会发生改变，如式(17)所示。

$$h_{tout}=\frac{g_{tin}h_{tin}+g_{tcool}h_{tcool}}{g_{tout}} \tag{15}$$

$$g_{tout}=g_{tin}+g_{tcool} \tag{16}$$

$$\chi_{out}=(g_{tin}\chi_{in}+g_{tcool}\chi_{air})/g_{tout} \tag{17}$$

式中：g_{tin}、g_{tcool}、g_{tout}分别为叶片的入口流量、冷却空气流量和出口流量；h_{tin}、h_{tcool}、h_{tout}分别为叶片的入口焓值、冷却空气焓值和叶片出口焓值；χ_{in}、χ_{out}分别为某成分的气体在入口和出口烟气中所占的质量分数；χ_{air}为烟气中该成分的质量分数。

动静叶混合过程中需要考虑由于流动阻力导致的压力损失，计算公式为

$$p_{tout}=p_{tin}\cdot[1-\frac{g_{tcool}}{g_{tin}}\cdot(1-Y)\cdot k\cdot M_a{}^2] \tag{18}$$

式中：p_{tin}、p_{tout}分别为入口和出口压力；Y为动量损失系数；M_a为马赫数。本文将$(1-Y)\times k\times M_a{}^2$整体设为常数，取值为0.15~0.5[22]，该值也可根据额定工况计算[23]。

高温高压的燃气在燃气轮机透平级中膨胀做功，在该过程中燃气的内能转化为机械功，燃气温度降低、熵则增加，温度计算公式为

$$T_{tout}=T_{tin}\cdot[1-\eta_t(1-\pi_t^{(k-1)/k})] \tag{19}$$

式中：T_{tin}、T_{tout}分别为透平级进口、出口温度；η_t为透平效率；π_t为透平膨胀比。比热比与温度的计算可参考压气机压缩过程的迭代方法。

膨胀气体做功量P_t为

$$P_t=g_{tin}(h_{tin}-h_{tout}) \tag{20}$$

1.5　转轴模块

转轴是连接压气机、透平和最终施加载荷的重要蓄能部件，转轴角加速度ω取决于惯性矩J，由角动量平衡给出。惯性矩J中包括转轴及其他连接设备的惯性效应，转轴的质量很大导致转轴的惯性也很大。

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{J\omega}\cdot(P_t-P_c-P_f-P_E) \tag{21}$$

式中：P_t为透平输出功率；P_c为压气机所消耗功率；P_E为电力负载所需功率；P_f为机械摩擦、转子盘摩擦、驱动辅助设备等功率损失之和。一般来说，透平作功大于压气机消耗的功，多余的功一小部分被耗损掉，另一部分则用来带动负载发电，实现从燃料的

内能到机械能再到电能的能量转化。

惯性矩 J 的大小影响转速变化的快慢,从而影响整个系统的动态性能及仿真精度,惯性矩 J 的大小与时间常数 τ_s 相关,如式(22)所示[2]。

$$\tau_s = \frac{J \cdot \omega_{des}^2}{P_{des}} \tag{22}$$

式中:ω_{des} 为设计角速度;P_{des} 为设计功率。

1.6　燃气轮机整体模型

燃气轮机整体模型将各模块通过输入输出参数进行连接,如图 2 所示。当电网输送给燃气轮机负荷需求时,燃气轮机通过转轴模块计算出燃机转速,该转速传递给压气机入口空气流量计算模块计算出所需空气量,空气一部分用于透平动静叶冷却,另一部分升温增压后输出进入燃烧室与燃料混合燃烧,随后燃气输送到透平在透平中膨胀做功,转轴则接收压气机耗功以及透平做功,并输出转速给压气机,从而完成一个循环。

2　H级重型燃气轮机特性分析

数学模型建立的正确与否影响其能否准确地反映重型燃气轮机工作状况,故在模型建立后需要对其模型进行准确性验证,并且研究燃机在非额定工况下的工作特性。

2.1　燃机模型的准确性验证

在额定工况及适当假设下的仿真计算结果及与设计参数之间的误差值如表 2 所示。由表 2 可看出,误差最小值为 0,误差最大值绝对值为 0.23%,误差均在 0.5% 以内,所建模型在额定负荷 469 MW 下计算结果基本满足设计要求。

表2　额定功率下仿真结果及误差

Table 2 Simulation results and errors at rated power

参数	H级设计参数	仿真计算值	误差/%
转速/(r/min)	3 000	3 000	0
压气机入口空气质量流量/(kg/s)	842.0	842.1	0.01
透平入口温度/K	1 773	1 769	−0.23
透平出口烟气质量流量/(kg/s)	868.5	867.2	−0.15
透平出口温度/K	920.0	919.5	−0.05

为验证本文所建燃机模型在部分负荷下仿真计算结果的准确性,对燃机压气机入口空气质量流量、燃料质量流量、透平出口表压力、透平出口质量流量值进行变工况稳态性能仿真计算,并与现场实际运行数据进行比较,结果如图 3—图 6 所示。由图 3—图 6 可知,所建 H 级燃气轮机模型仿真计算结果与实测值之间的误差较小,最大误差值为 1.28%,是 70% 负荷下的透平出口表压力实测值与仿真值的对比误差,仿真具有较高的精度和准确度,可见本文所建立的单轴燃气轮机模型能够很好地反映燃气轮机的稳态性能。

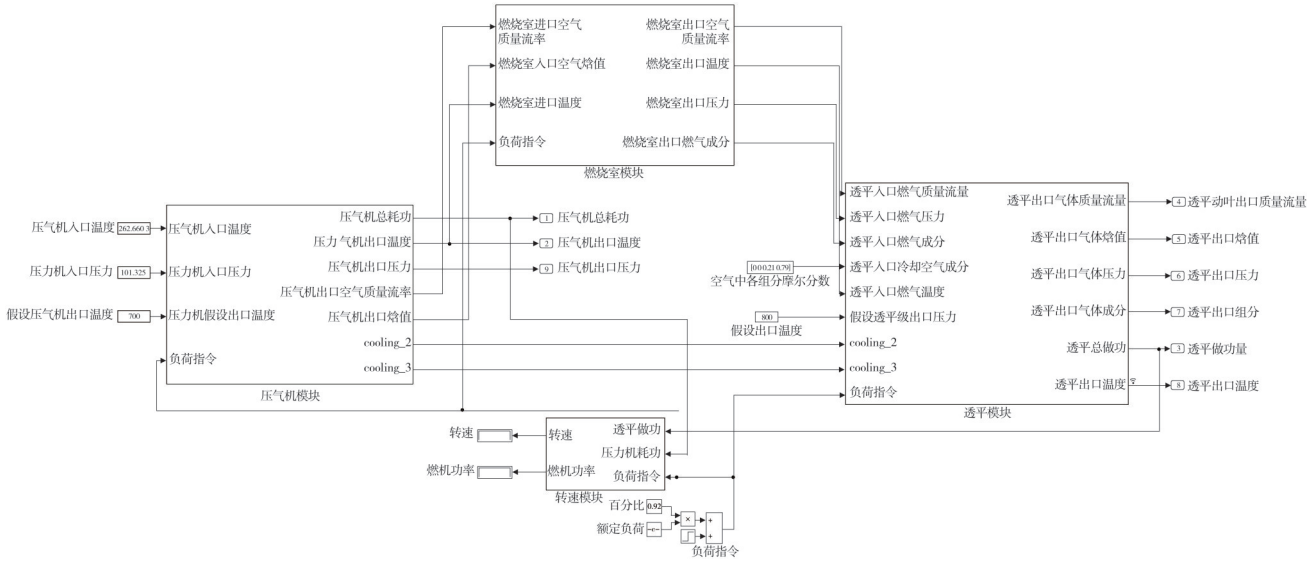


图2　燃气轮机整体模型

Fig. 2 Overall model of the gas turbine

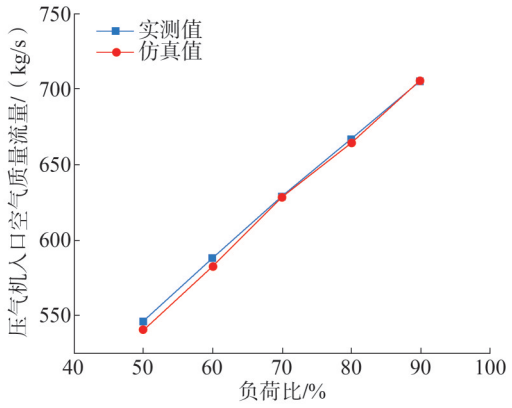


图3　压气机入口空气质量流量实测值与仿真值对比

Fig.3 Comparison of measured and simulated air mass flow rate at the inlet of the compressor

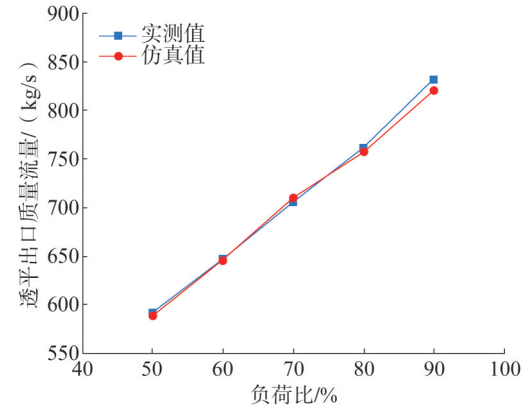


图6　透平出口质量流量实测值与仿真值对比

Fig.6 Comparison of measured and simulated mass flow rate at the outlet of the compressor

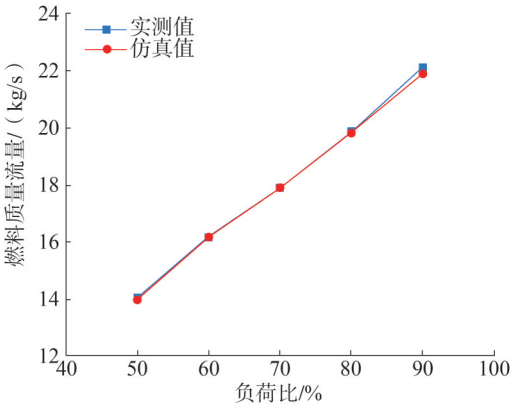


图4　燃料质量流量实测值与仿真值对比

Fig.4 Comparison of measured and simulated values of the fuel mass flow rate

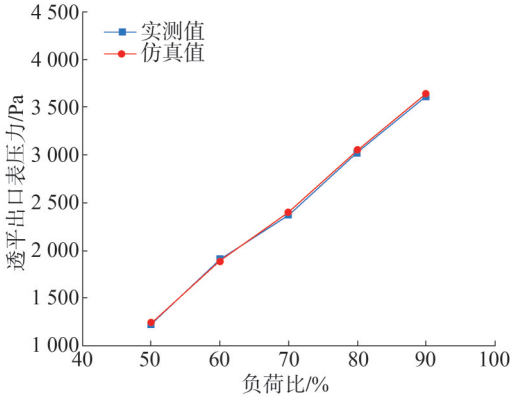


图5　透平出口表压力实测值与仿真值对比

Fig.5 Comparison of measured and simulated turbine outlet gauge pressures

2.2　满负荷及部分负荷下燃机输出参数的响应情况

透平的进出口温度是燃气轮机性能评估中非常重要的参数，直接关系透平的效率、运行安全以及污染物排放水平。故当燃气轮机负荷保持在额定负载469 MW附近时，需要密切关注透平的进出口温度，确保温度值在透平材料的承受范围内并且保持相对稳定，从而保证燃气轮机可以在最佳状态下运行。图7所示为满负荷下透平进出口温度随时间的变化曲线，可以观察到初始阶段温度随时间的增加而增大，平稳之后透平进出口温度不再发生变化，分别保持在1 769 K和919.5 K，表明所建模型稳态性能良好。通常情况下，透平入口温度是影响燃气轮机热效率和出功能力的重要因素，并且国际普遍以透平前温作为燃气轮机技术等级的标志之一[24]。但透平前温不宜太大，若太大可能会导致燃气轮机发生故障，通常情况下由于透平前部高温环境不适合安装传感器，通用的检测方法为利用燃机排温的变化情况来间接反映燃机高温部件的性能变化情况，故研究透平在额定工况下的进出口温度对于研究燃机特性至关重要[25]。

当燃气轮机的负荷偏离额定负荷469 MW时，其输出参数与额定负荷下的表现会有所不同。针对90%、80%、70%、60%、50%负荷进行仿真，结果如表3所示，随着负荷的降低，IGV开度减小，导致进入压气机的空气质量流量下降和压气机压比降低。同时，燃料质量流量也随之下降，导致透平中燃气温度和焓值降低，从而降低了用于透平膨胀模块做功的

燃气能量,直接影响了燃气轮机的输出功率和透平出口压力。仿真结果表明,该模型能够合理地反映不同负荷下燃气轮机的工作特性,并有效适应外界负荷变化带来的影响。

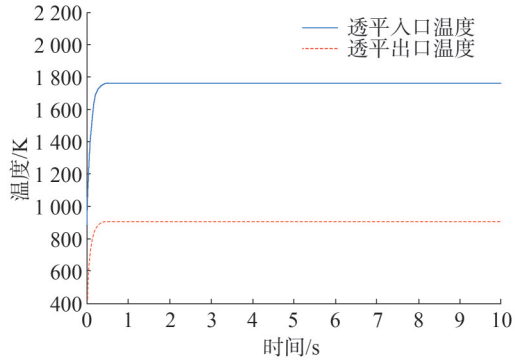


图7　透平进出口温度随时间变化

Fig.7 Turbine inlet and outlet temperature variation with time

表3　部分负荷下燃机输出参数仿真值对比

Table 3 Comparison of gas turbine output parameters at partial load

参数	负荷比例/%				
	90	80	70	60	50
转速/(r/min)	3000	3000	3000	3000	3000
IGV开度/%	82.02	68.70	57.27	46.58	38.28
压比	21.288	19.007	17.455	15.777	14.106
空气流量/(kg/s)	705.7	664.4	628.5	582.5	540.9
燃气质量流量/(kg/s)	21.9	19.8	17.9	16.2	14.0
燃烧室出口焓值/(10^6J/kg)	2.66	2.61	2.50	2.45	2.33
透平进气温度/K	1762	1761	1705	1679	1609
透平出口表压力/Pa	3 639.144	3 048.3292	397.6821	892.6431	239.919
透平出口烟气质量流量/(kg/s)	820.7	757.6	710.0	646.1	588.8
燃机功率/MW	367.1	333.8	285.2	251.3	192.9

2.3　IGV开度对燃机特性的影响

IGV开度对研究燃气轮机的性能特性至关重要。在所建立的燃气轮机IGV影响域模型中,计算不同负荷下的IGV开度,进一步探讨IGV开度变化对压气机进出口质量流量与效率的影响。

IGV开度与压气机进出口空气质量流量的关系如图8所示,总体趋势为当IGV开度增加时,压气机进出口流量随之增加;当IGV开度低于80%时,随着IGV开度的增加,压气机进出口空气质量流量的增加较为平缓,最大增加率为IGV开度每增加10%,空气质量流量增加42.8 kg/s;当IGV开度处于80%~90%之间时,随着IGV开度每增加10%,压气机入口空气质量流量增加133.8 kg/s,压气机出口空气质量流量增加106.4 kg/s,增长速度较快,这是由于实际运行过程中开度由80%增到90%时,导流叶片入口角(图9中角α)由正变负,角度变化大,引起空气流量变化剧烈;当IGV开度处于90%~100%之间时,压气机进出口空气质量流量基本维持稳定,说明IGV开度在90%以上时对进气量无影响。这一现象主要是由于IGV开度的增大加大了空气的流入量,导致压气机吸入的空气量增加。当压气机在设计点附近运行时,其几何形状和气流特性能够达到最佳匹配,IGV开启到较大角度以免产生负冲角引起不稳定流动。

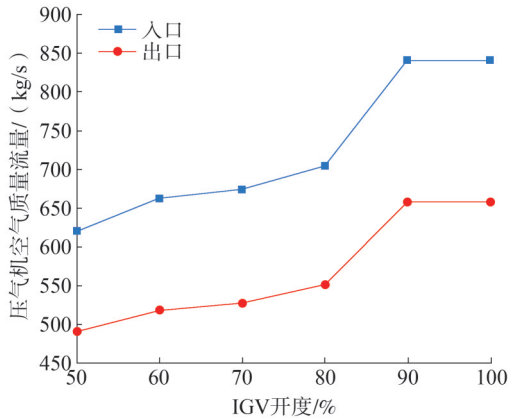


图8　IGV开度与压气机进出口质量流量

Fig 8 IGV opening and the inlet and outlet mass of the compressor

IGV开度与压气机效率之间的关系如图10所示。当IGV开度减小、流量减少时,流体动力条件改变,压气机无法发挥其最佳性能,压气机的运行工况会逐渐偏离设计点,进而导致压气机的效率降低。当IGV开度处于80%~100%时,随着IGV开度每降低10%,压气机效率降低约1%;当IGV开度处于70%~80%时,随着IGV开度每降低10%,压气机效率降低量较大,约1.89%;当IGV开度低于70%时,随着IGV开度降低,压气机效率降低较缓慢。压气机在该区域变化较慢,在该阶段压气机的进气质量流量相对较低,导致流经压气机的空气无法达到理想

的压缩参数，限制了压气机效率的提升[6]。

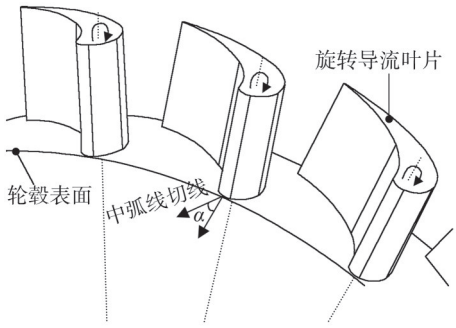


图9　IGV开度示意图

Fig.9 Schematic diagram of IGV opening

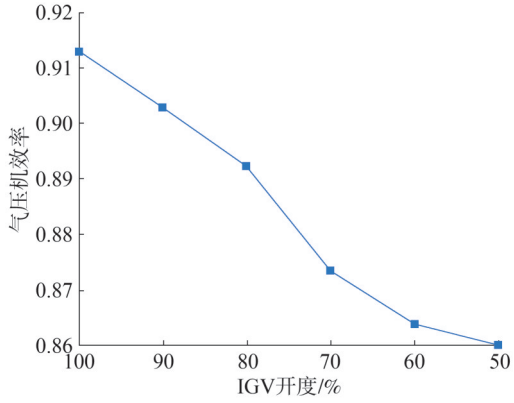


图10　IGV开度与压气机效率

Fig.10 IGV opening vs compressor efficiency

根据上述研究，随着IGV开度降低，进入压气机的空气量下降，有效参与燃烧的空气量也在减少。因此在燃烧室内燃料与空气的混合效果变差，可能引发燃烧不完全，这种情况不仅会影响燃气轮机的功率输出，还可能产生更高的排放和故障风险。

3　结论

对某H级重型燃气轮机建立单轴重型燃气轮机模型，并对燃机特性进行分析，得到如下结果：

1）明晰了重型燃气轮机结构及其工作原理，采用机理分析法基于MATLAB/Simulink仿真平台，建立压气机、燃烧室、透平、转轴等重要部件的数学模型，并通过输入输出参数将各模块进行连接，形成整体H级燃气轮机模型。

2）结合H级燃机设计参数，对所建模型在额定工况的运行情况进行仿真计算，将计算结果与参考数值进行误差对比分析，各参数误差值不超过0.5%，可认为所建模型满足仿真要求；结合H级燃机的运行实测值，对非额定工况下燃机重点参数的仿真值与实测值进行对比分析，最大误差值为1.28%，可认为所建模型具有较高的准确性。

3）为深入研究燃气轮机机理，对额定工况及非额定工况IGV开度不变的情况、额定工况IGV开度改变的情况下燃机的输出特性进行分析，进一步探究负荷以及IGV开度对压气机进出口质量流量、压气机效率的影响。结果表明当IGV开度在低于70%的范围内变化时，压气机进出口质量流量以及压气机效率的变化相对缓慢；当IGV开度在70%~90%范围内，压气机进出口质量流量以及压气机效率的变化相对较快；当IGV开度在大于90%时，压气机进出口质量流量的变化基本不变，而压气机效率的变化相对较快。

但本文模型缺少对启动模块影响的分析，对模型动态特性研究不足，需要在下一步研究中继续补充和完善。

参考文献

[1]　刘尚明，李忠义．基于SIMULNK的单轴重型燃气轮机建模与仿真研究[J]．燃气轮机技术，2009，22(3)：33-39.
LIU Shangming，LI Zhongyi. Modeling and simulation of single shafe heavy-duty gas turbine using SIMULINK [J]. Gas Turbine Technology，2009，22(3)：33-39.

[2]　李忠义，刘尚明，张文杰．基于SIMULINK的单轴重型燃气轮机模型动态仿真研究[J]．热力透平，2009，38(4)：221-225.
LI Zhongyi，LIU Shangming，ZHANG Wenjie. Dynamic simulation study based on single shaft heavy-duty gas turbine model using SIMULINK[J]. Thermal Turbine，2009，38(4)：221-225.

[3]　朱志劼，田书耘，范雪飞，等．考虑透平逐级冷却的重型燃气轮机热力学建模及关键参数影响分析[J]．热力发电，2023，52(5)：72-81.
ZHU Zhijie，TIAN Shuyun，FAN Xuefei，et al. Thermodynamic modeling and influence analysis of key parameters of heavy-duty gas turbine considering turbine stage cooling[J]. Thermal Power Generation，2023，52(5)：72-81.

[4]　黄郑，周建新，何玉宝，等．基于APROS的燃气轮机及其控制系统整体仿真建模研究[J]．燃气轮机技术，2016，29(4)：14-20.
HUANG Zheng，ZHOU Jianxin，HE Yubao，et al. Study on integrated modelling and simulation of gas turbine control system based on the APROS[J]. Gas Turbine Technology，2016，29(4)：14-20.

[5]　郭荣．基于IGV控制的先进燃气轮机联合循环运行优化[J]．动力工程学报，2020，40(6)：469-474.
GUO Rong. Operation optimization of advanced gas turbine combined cycle units based on IGV control strategy[J]. Journal of

Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(6): 469-474.

[6] 方继辉, 王荣. 重型F级燃气轮机IGV开度对压气机效率的影响[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 317-319.
FANG Jihui, WANG Rong. Influence of IGV opening degree on the compressor efficiency of MITSUBISHI F4 gas turbine [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 317-319.

[7] 梁健, 王蒙, 杨亚欣, 等. 基于压缩空气储能与增强型地热的三联产系统热力学分析[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 209-218.
Liang Jian, Wang Meng, Yang Yaxin, et al. Thermodynamic analysis of CCHP with compressed air energy storage and enhanced geothermal technology [J]. Electric Power, 2024, 57(1): 209-218.

[8] 宋党科. GE9F燃气轮机主要控制系统及IGV系统分析[J]. 工程建设与设计, 2022(22): 72-74.
SONG Dangke. Analysis of the main control system and IGV system of GE9F gas turbine [J]. Construction & Design for Engineering, 2022(22): 72-74.

[9] 熊超, 刘震华, 张英, 等. GE 9F燃气轮机主要控制系统及IGV系统分析[J]. 吉林电力, 2020, 48(3): 45-47.
XIONG Chao, LIU Zhenhua, ZHANG Ying, et al. Analysis of main control system and IGV system of Ge_9 F gas turbine [J]. Jilin Electric Power, 2020, 48(3): 45-47.

[10] 孙益科. PG9351FA型燃气轮机进口可转导叶的控制[J]. 制冷空调与电力机械, 2008, 29(5): 78-82.
SUN Yike. Control of inlet guide vane in PG9351FA gas turbine[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2008, 29(5): 78-82.

[11] 裴达. 三菱M701F燃气轮机不同工况下运行参数与节能研究[J]. 节能与环保, 2024(7): 35-43.
PEI Da. Research on operating parameters and energy conservation of mitsubishi M701F gas turbine under different operating conditions [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2024(7): 35-43.

[12] 黄呈帅, 梁健, 李波, 等. 基于掺氢燃气轮机的综合能源系统热经济学性能研究[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 195-208.
Huang Chengshuai, Liang Jian, Li Bo, et al. Study on the thermo-economic performance of a integrated energy system based on hydrogen-fueled gas turbine [J]. Electric Power, 2024, 57(1): 195-208.

[13] 王小才, 姜红燕. 数学建模[M]. 南京: 南京大学出版社, 2023.

[14] 宋业新, 黄登斌, 瞿勇. 数学模型及其应用[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2023.

[15] 张文杰. 基于SIMULINK单轴重型燃气轮机全工况仿真研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.

[16] 侯世宇. RB211-24G DLE型燃气发生器燃燃烧室燃烧工况及燃气涡轮性能仿真模型研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.

[17] 郑露霞, 张士杰, 王波, 等. GE公司重型燃气轮机透平冷气量和燃气初温推测[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6934-6943.
ZHENG Luxia, ZHANG Shijie, WANG Bo, et al. The cooling air and firing temperature estimation for GE's heavy duty gas turbines [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6934-6943.

[18] 梁超, 吴新跃. 燃气轮机动态仿真容积效应法研究[J]. 机电工程, 2013, 30(10): 1277-1279
LIANG Chao, WU Xinyue. Volume effect of gas turbine dynamic simulation [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(10): 1277-1279.

[19] 史玉恒. 基于Simulink的单轴重型燃气轮机动态仿真模型[J]. 发电设备, 2015, 29(1): 20-23.
SHI Yuheng. Dynamic simulation model of single-shaft heavy-duty gas turbine based on Simulink[J]. Power Equipment, 2015, 29(1): 20-23.

[20] CAMPOREALE S M, FORTUNATO B, MASTROVITO M. A modular code for real time dynamic simulation of gas turbines in Simulink [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(3): 506-517.

[21] 乔红, 曹越, 戴义平. 300 MW重型燃气轮机数学建模与动态仿真[J]. 燃气轮机技术, 2016, 29(2): 28-33.
QIAO Hong, CAO Yue, DAI Yiping. Mathematical modeling and dynamic simulation study based on 300 MW heavy-duty gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2016, 29(2): 28-33.

[22] 郑露霞. 重型燃气轮机透平冷却建模与热力性能分析[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2019.

[23] 何怡冲, 李永毅, 林育超, 等. 考虑透平背压影响的燃气轮机动态特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(8): 3155-3164.
HE Yichong, LI Yongyi, LIN Yuchao, et al. Study on dynamic characteristics of gas turbine considering the influence of turbine back pressure [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(8): 3155-3164.

[24] 李毅飞. 燃气透平气热环境下端区气膜冷却机理与设计方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.

[25] 朱麟海. 燃气轮机高温部件故障早期预警[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.

收稿日期: 2025-01-12
修回日期: 2025-03-19

作者简介:

韩　悦(1989), 通信作者(358183603@qq.com), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为燃气轮机与电网灵活互动机制研究;

巩志强(1989), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为煤电机组耦合储能技术研究与应用;

刘馨颖(2001), 女, 硕士, 主要研究方向为燃气轮机建模及气固两相流;

齐建荟(1989), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为先进能源循环、超临界CO_2动力循环及部件(透平、压缩机)设计及开发、稠密流体非实际气体性质可压缩流体动力学等;

郭俊山(1989), 男, 硕士, 高级工程师, 从事热电机组在线监测、调速系统建模方面的研究工作。

(责任编辑　郑天茹)

“未来电力系统的绝缘材料：性能分析、缺陷检测与状态评估”专栏

复杂的电力传输系统由多种电工材料共同构成，主要包括聚合物绝缘材料、储能材料、功能陶瓷、半导体传感材料及高导电金属材料等。近年来，得益于发电站调控精度与可控性的提升，现代可再生能源体系逐步替代传统能源体系。在此背景下，绝缘材料作为电力设备的核心关键组成部分，正面临前所未有的机遇与挑战；电力系统运行复杂度显著提升，其运行安全性与供电可靠性也随之受到负面影响。运行工况的动态变化，致使大量新型特高压设备的绝缘性能与绝缘强度面临严峻考验。因此，针对特高压设备绝缘材料开展可靠的性能分析、缺陷检测与状态评估研究，具有重要的现实必要性。

基于此，为聚焦新型电工材料的制备工艺、性能表征、劣化机理、缺陷检测及状态评估等研究方向，《山东电力技术》编辑部邀请**广西大学范贤浩副教授、清华大学梁芳蔚助理研究员、上海电力大学卢武副教授担任特约主编**，主持“未来电力系统的绝缘材料：性能分析、缺陷检测与状态评估”专栏。真诚欢迎国内外专家学者和科研人员积极投稿，本刊将快速审阅、刊登。

一、征稿方向（包括但不限于）

1、先进测试表征技术；

2、新型电工材料制备及其劣化机制研究；

3、高端绝缘缺陷检测与设备状态评估技术；

4、电介质材料与弛豫现象研究；

5、特高压设备运行维护与优化设计；

6、其他相关研究方向。

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“未来电力系统的绝缘材料”，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。

广告

关注《山东电力技术》