

金沙江下游-三峡梯级水电走廊运行调度技术进展、挑战与对策

刘伟平¹, 刘海波²

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 430010, 武汉; 2. 中国长江电力股份有限公司, 430014, 武汉)

摘要:乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡和葛洲坝6座水库水电站沿长江干流自上而下依次分布,串联一体形成梯级,共同构成了世界最大清洁能源走廊——金沙江下游-三峡梯级水电走廊。首先,从系统科学角度出发,揭示金沙江下游-三峡梯级水电走廊作为开放复杂巨系统的本质,解构其工程系统、自然系统和社会系统等核心组成,并阐释其外源随机性、结构复杂性和功能多样性等典型特征。其次,面向水利系统、电力系统与生态系统“大系统”,明确金沙江下游-三峡梯级水电走廊防洪保安中流砥柱、能源保供“压舱石”、生态保护“主力军”等“大担当”的功能定位,并阐述其“大安全”综合效益。最后,从监测感知、预报预测和调度运行三个维度,梳理金沙江下游-三峡梯级水电走廊运行调度关键技术,并研判新形势下面临的主要技术挑战与应对举措。相关内容可为推动金沙江下游-三峡梯级水电走廊高质量发展,在更高层次、更宽领域和更大范围支撑保障国家水安全、能源安全和生态安全提供参考。

关键词:长江;梯级电站群;开放复杂巨系统;监测感知;预报预测;调度运行;综合效益

Progress, challenges, and countermeasures of operation and dispatching technologies for the Jinsha River Downstream-Three Gorges Cascade Hydropower Corridor//LIU Weiping, LIU Haibo

Abstract: The six reservoir hydropower stations of Wudongde, Baihetan, Xiluodu, Xiangjiaba, Three Gorges, and Gezhouba are distributed successively along the mainstream of the Yangtze River, forming a cascade that constitutes the world's largest clean energy corridor: the Jinsha River Downstream-Three Gorges Cascade Hydropower Corridor. From the perspective of systems science, this paper first reveals the essence of the corridor as an open, complex, and large-scale system, deconstructing its core components, including the engineering, natural, and social subsystems, and explaining its typical characteristics such as external randomness, structural complexity, and functional diversity. Second, focusing on the “large systems” of the water resources, power, and ecological domains, it defines the corridor's major functional roles as the backbone of flood control and safety, the cornerstone of energy supply security, and the main force in ecological protection, and elaborates on its comprehensive benefits for “overall safety”. Finally, from the three dimensions of monitoring and perception, forecasting and prediction, and operation and scheduling, the paper reviews key technologies in the operation and dispatching of the corridor, analyzes the main technical challenges under new circumstances, and proposes corresponding countermeasures. The study provides a reference for promoting the high-quality development of the Jinsha River Downstream-Three Gorges Cascade Hydropower Corridor and

收稿日期:2025-09-03 修回日期:2025-10-21

作者简介:刘伟平,董事长,正高级工程师,主要从事梯级水电站建设运行管理。

通信作者:刘海波,总经理,正高级工程师,主要从事梯级水电站联合调度与运行维护方面研究。E-mail: liu_haibo@ctg.com.cn

基金项目:国家重点研发计划项目“金沙江下游梯级水库群数字孪生系统构建关键技术研究与应用”(2024YFC3212700)、“大型水库群汛期运行水位动态控制与洪水资源化应用示范”(2022YFC3202805);水利部重大科技项目“基于工业互联网的梯级水电通用预报调度平台构建”(SKS-2022120);湖北省自然科学基金项目“多阻断流域梯级水库中长期预报调度耦合机制研究”(2024AFD367)。

for supporting national water, energy, and ecological security at a higher level, across broader fields, and on a larger scale.

Keywords: the Yangtze River; cascade hydropower stations; open and complex large-scale system; monitoring and perception; forecasting and prediction; operation and scheduling; comprehensive benefits

中图分类号: TV213.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2025)20-0007-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.20.002

长江流域金沙江下游至长江干流中游的葛洲坝之间,乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡和葛洲坝6座水电站沿长江干流梯级布局,共同构成世界最大清洁能源走廊。从万里长江第一坝葛洲坝工程开工建设,到兴建世界最大水利枢纽工程三峡工程,再到白鹤滩水电站全面投产发电,金沙江下游-三峡梯级水电走廊的建设历程跨越了半个多世纪。其成功建成和运转,推动我国水电领域工程建设、装备制造、运营管理等关键技术取得了突破性进展。全面投运以来,金沙江下游-三峡梯级水电走廊的建设成就与运营成效多有报道,但在学术层面,关于其系统构成与功能定位的深入阐述,运行管理关键技术的系统总结,以及当前面临挑战与应对举措的综合研判,仍相对匮乏,尚未形成系统性的研究成果。为此,本文首先从金沙江下游-三峡梯级水电走廊的构成与特征入手,揭示其开放复杂巨系统本质,解构其系统构成,阐释其典型特征;然后面向水利系统、电力系统与生态系统“大系统”,明确其“大担当”的功能定位,阐述其“大安全”的综合效益;进一步,从监测、预报与调度3个维度梳理运行管理关键技术进展;最后,从“天空地水工”一体化监测感知、变化环境下气象水文预报、新形势下多目标协同调度3个方面,研判当前面临的主要挑战与应对举措。

一、金沙江下游-三峡梯级水电走廊的构成与特征

从系统规模审视,金沙江下游-三峡梯级水电走廊被誉为世界最大清洁能源走廊,主要体现在以“大水电”为核心的装机规模与发电能力上。该走廊沿长江上游干流自乌东德至葛洲坝,绵延约1800 km,总装机容量达7169.5万kW,年均发电量约3000亿kW·h。这一规模不仅远超国内任一单一水电基地,约占全国十三大水电基地规划总容量(2.8亿kW)的1/4,更在全球范围内处于领先地位,接近世界水电大国巴西(1.1亿kW)、美国(1.02亿kW)、加拿大(8400万kW)的全国水电总装机容量,显著领先于俄罗斯(5400万kW)。

从系统科学视角,金沙江下游-三峡梯级水电走廊本质上是一个开放复杂巨系统。其以高效协同开发长江流域水资源为核心目标,是一个长江自然系统和人工开发系统高度集成的综合系统。该系统由工程系统(大坝、电站、电网)、自然系统(水文、生态、地质)与社会系统(调度管理、政策制度、经济发展)等相互联系、相互制约、相互作用的多元异质子系统构成,系统内各组分间通过物质循环、能量流动与信息传递实现耦合,并持续与外部环境进行物质、能量和信息的交换。通过科学调整系统内部结构、优化系统外部环境条件、协调内外部互动机制,该系统能在整体层面充分发挥防洪、发电、供水、航运、生态等综合效益。

1. 金沙江下游-三峡梯级水电走廊的构成

从水利资源、工程设施、调度管理3个核心维度着手,阐述构成金沙江下游-三峡梯级水电走廊的自然系统、工程系统和社会系统。

(1) 水利资源

金沙江下游-三峡梯级水电走廊的控制范围覆盖长江上游地区,其以水循环为核心的自然系统不仅依托于长江上游干流,还汇聚了金沙江、雅砻江、岷江、沱江、嘉陵江和乌江等主要支流。该走廊与各支流的交界分别位于攀枝花、桐子林、高场、富顺、北碚和武隆水文站。各站点上游是清洁能源走廊的外部环境,下游则构成其内部组成部分。具体如下:①攀枝花水文站作为金沙江中游控制站,年平均天然径流量约560亿m³,相当于乌东德水库天然入库径流量的47%。金沙江上中游已建成苏洼龙、梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉和观音岩等水电站。②桐子林水文站为雅砻江流域出口控制站,年平均天然径流量约560亿m³,相当于乌东德水库天然入库径流量的47%。雅砻江已建成两河口、杨房沟、锦屏一级、锦屏二级、官地、二滩、桐子林等水电站。③高场水文站是岷江流域出口控制站,年平均天然径流量约877亿m³,约占三峡水库天然入库径流量的20%。岷江

干支流已建成猴子岩、长河坝、泸定、大岗山、瀑布沟、紫坪铺等水电站。④富顺水文站为沱江流域出口控制站,年平均天然径流量约129亿m³,约占三峡水库天然入库径流量的3%。沱江干流已建成顽石、石桥、南津驿、王二溪等水电站。⑤北碚水文站是嘉陵江流域出口控制站,年平均天然径流量约710亿m³,约为三峡水库天然入库径流量的16%。嘉陵江干支流已建成碧口、宝珠寺、亭子口、草街、江口、武都等水电站。⑥武隆水文站为乌江流域出口控制站,年平均天然径流量约508亿m³,约占三峡水库天然入库径流量的12%。乌江干流已建成洪家渡、东风、索风营、乌江渡、构皮滩、思林、沙沱、彭水、银盘等水电站。

(2) 工程设施

金沙江下游-三峡梯级水电走廊工程系统由乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡和葛洲坝6座水利水电枢纽工程组成。各电站作为独立子系统,均包含枢纽建筑物、机电设备及信息系统等,沿长江干流自上而下串联一体形成复杂梯级系统——金沙江下游-三峡梯级系统(见图1)。①乌东德水电站采用混凝土双曲拱坝,坝高270 m,坝顶高程988 m,坝顶弧长326.95 m,坝身布置5个表孔和6个中孔,左岸靠山侧

布置3条泄洪洞。左右岸地下厂房各安装6台85万kW发电机组。②白鹤滩水电站为混凝土双曲拱坝,坝高289 m,坝顶高程834 m,坝顶弧长709 m。坝身布置6个表孔和7个深孔,左岸布置3条无压直泄洪洞。左右岸地下厂房各配置8台100万kW发电机组。③溪洛渡水电站采用混凝土双曲拱坝,坝高285.5 m,坝顶高程610 m,坝顶弧长698.07 m。坝身布置7个表孔和8个深孔,左右岸各布置2条泄洪洞。左右岸地下厂房各装设9台77万kW发电机组。④向家坝水电站为混凝土重力坝,坝高162 m,坝顶高程384 m,坝顶长度896.26 m。从左至右依次布置左岸非溢流坝段、冲沙孔坝段、升船机坝段、坝后厂房坝段、泄水坝段、右岸非溢流坝段。坝身设12个表孔、10个中孔、2个排沙洞、1个冲沙孔。左岸坝后、右岸地下各安装4台80万kW发电机组。⑤三峡水电站采用混凝土重力坝,坝高181 m,坝顶高程185 m,坝顶长度2309.47 m。坝身布置23个深孔、22个表孔、3个排漂孔、8个排沙孔、2个冲沙孔。左岸坝后、右岸坝后、右岸地下分别安装14台、12台、6台70万kW发电机组,另设电源电站2台5万kW机组。通航建筑物包括双线五级连续船闸和垂直升船机。⑥葛洲坝水电站为径



图1 金沙江下游-三峡梯级水电走廊6座水利水电枢纽工程的地理位置

流式水电站,原设计装机容量273.5万kW,包括二江电站2台17万kW机组和5台12.5万kW机组,以及大江电站14台12.5万kW机组与电源电站1台2万kW机组。经12.5万kW机组增容改造至15万kW后,总装机容量达321万kW。通航设施包括大江1号、三江2号与3号船闸。该工程系统是实现水能安全、稳定、高效转化为电能的基础,决定了金沙江下游-三峡梯级水电走廊的整体功能。

(3) 调度管理

金沙江下游-三峡梯级水电走廊的运行调度旨在实现综合效益最大化,并确保多维安全,包括自身安全、运行安全和功能安全等,因而涉及多部门协同管理。防洪调度与水资源调度的责任主体为水利部及长江水利委员会;发电调度由国家电网有限公司和中国南方电网有限责任公司负责;航运调度由交通运输部长江航务管理局和长江三峡通航管理局承担;运行管理单位为中国长江三峡集团有限公司(以下简称三峡集团)。此外,生态环境、应急管理、自然资源等主管部门也参与相关协调与监管工作。根据金沙江下游-三峡梯级水电走廊的系统界定,将运行管理主体三峡集团视为系统内部组成部分,其他调度管理主体则视为其外部环境。

2. 金沙江下游-三峡梯级水电走廊的特征

金沙江下游-三峡梯级水电走廊的特征主要体现为外源随机性、结构复杂性和功能多样性。外源随机性是指该梯级水电走廊运行面临外部环境多重不确定性因素影响;结构复杂性强调该梯级水电走廊内部结构的复杂性;功能多样性突出该梯级水电走廊具有防洪、发电、供水、航运、生态等多重功能。

(1) 外源随机性

金沙江下游-三峡梯级水电走廊既是水利系统的重要组成,又是电力系统的发电单元,同时还是长江上游水循环系统的一部分。这些系统构成该梯级水电走廊运行的主要外部环境,使其面临资源和需求的双重不确定性,资源侧包括降水、径流等自然要素,需求侧则涉及防洪抗旱、能源保供、生态保护等多目标需求。这些要素或属于清洁能源系统的输入,或是其运行边界,均属于系统的外源输入。尽管可通过预报手段获取外源输入的未来状态,但预报本身亦存在不确定性,只能做到在不确定性中寻找最大可能性。因此,受外源输入不确定性的综合影响,金沙江下游-三峡梯级水电走廊的最优运行调度本质上属于随机多阶段决策

问题。

(2) 结构复杂性

金沙江下游-三峡梯级水电走廊的工程系统是一个由“枢纽梯级-单座电站-发电机组”构成的多层次嵌套耦合系统,其结构复杂性主要体现在特性曲线、水力联系、电力联系等多个维度。特性曲线方面,有水位库容曲线、泄流能力曲线、尾水位流量曲线、机组动力特性、电站最优动力特性、预想出力曲线和水头损失曲线等。这些曲线具有显著的时变非线性特征,随运行时间、工况及环境条件动态变化,因此需定期复核甚至重新率定,以确保流量、水位、水头和出力等关键参数的计算精度。水力联系方面,清洁能源走廊6座梯级电站串联运行,形成紧密的水力耦合关系,具体表现为:上游电站下泄流量与区间入流叠加构成下游入库流量;上游水库尾水位影响下游电站水头;下游水库库区回水对上游水库尾水位产生顶托效应;区间支流汇入进一步复杂化水力响应等。这使金沙江下游-三峡梯级水电走廊的运行调度远较单一水电站复杂,任一电站的调度决策不仅要考虑自身运行状态,还须统筹考虑系统内其他电站的运行状态。电力联系方面,厂内各机组之间具有紧密的电力联系,这为厂内经济运行提供了条件;梯级水电站之间存在间接电力耦合,例如乌东德水电站和溪洛渡右岸电站均接入南方电网,具备跨电站电力互济能力。

金沙江下游-三峡梯级水电走廊的自然系统本质是一种自然-人工二元水循环系统,原本的自然河网在多级大坝调控作用下转变为由河库单元组成的复杂河库水系。事实上,不仅走廊内部,其外围天然河道也因水库群的建设与运行逐渐演化为河库单元串并联相接的复杂水网。相较于天然水系,河库水系的产汇流机制发生显著改变,洪水演进过程受水库蓄泄调度的影响,呈现出非连续性、断波等新特性,与天然洪水波存在本质差异。受此影响,金沙江下游-三峡梯级水电走廊内6座水库的来水预报难度大幅提升,必须综合考虑自然水文规律与水库调度等人类活动的复合影响。

(3) 功能多样性

金沙江下游-三峡梯级水电走廊是国家“西电东送”战略的骨干电源点,也是长江防洪体系的骨干工程,不仅提供能源供给,还肩负防洪、水资源利用、航运和生态保护等多目标功能。能源供给方面,该梯级水电走廊共安装110台水轮发电机组,总装机容量达7169.5

万kW,年均发电量约3000亿kW·h,约占2024年全国水电发电量的21%。防洪保安方面,乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝和三峡5座水库总防洪库容为376.43亿m³,约占2025年度长江流域联合调度水库总防洪库容的53%。航运能力方面,该梯级水电走廊6座水库建成后,金沙江下游攀枝花至宜宾段形成768 km深水航道,川江重庆至宜昌段航道维护水深由2.9 m提升至3.5~4.5 m,重庆至宜昌660 km河段航道等级由Ⅲ级提升为Ⅰ级。水资源调控方面,该梯级水电走廊6座水库总库容达919.65亿m³,约占2025年度长江流域联合调度水库总库容的37%,是名副其实的国家淡水资源战略储备库。生态保护方面,该梯级水电走廊也是一条“生态保护走廊”,具备叠梁门分层取水水温调节、“基荷发电”促进产黏沉性卵鱼类繁殖、“人造洪峰”促进产漂流性卵鱼类繁殖、保障下游生态流量需求等生态环境保护功能。

二、金沙江下游-三峡梯级水电走廊的功能定位与综合效益

金沙江下游-三峡梯级水电走廊庞大的物理规模“硬实力”决定了其在支撑保障水安全、能源安全和生态安全中的重要地位。面向水利系统、电力系统与生态系统“大系统”,立足该梯级水电走廊的“大水库”调蓄能力、“大水电”调节能力、“大生态”发展理念,明确其功能定位为防洪保安中流砥柱、能源保供“压舱石”与生态保护“主力军”等“大担当”。在此指引下,三峡集团精益运行管理金沙江下游-三峡梯级水电走廊,充分发挥其综合效益,在更高层次、更宽领域、更大范围为国家水安全、能源安全和生态安全提供了强有力支撑,持续助力长江经济带高质量发展。

1.大水库——防洪保安中流砥柱,水资源综合调控中枢

金沙江下游-三峡梯级水电走廊中,乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝和三峡5座水库库容巨大,其总库容分别为74.08亿m³、206.27亿m³、129.1亿m³、51.63亿m³和450.44亿m³,防洪库容分别为24.4亿m³、75亿m³、46.5亿m³、9.03亿m³和221.5亿m³。防洪安全方面,5座水库均纳入2025年度长江流域联合调度范围,其防洪库容占联调水库总库容的一半以上,约占长江干流总防洪库容的95%,构成长江防洪工程体系的核心。例如,2020年汛期,长江发生新中国成立以来仅次于1954年和1998年的流域性大洪水,金沙江

下游-三峡梯级水库共开展9次防洪调度,总拦蓄洪量达362.40亿m³,有效避免了荆江分蓄洪区的启用,守护了长江安澜。供水安全方面,5座水库蓄满后可用水量达429.71亿m³,相当于约3000个杭州西湖的水量,是长江流域水资源调度的关键中枢,已成为长江中下游经济社会可持续发展的水安全生命线。例如,2022年8—12月,长江流域遭遇60年来最严重气象干旱,金沙江下游-三峡梯级水库向下游精准补水抗击旱情,累计补水103.1亿m³,有力保障了长江中下游地区生活生产生态用水。航运安全方面,金沙江下游-三峡梯级水电走廊共配备2座升船机和4座船闸,通过“大水库”补水增加航运水深、蓄水延长深水航道,显著提升了长江“黄金水道”的通航能力。2022—2024年间,三峡船闸年均过货量1.59亿t,三峡升船机年均货运量408万t,向家坝升船机年均货运量170万t,长江“黄金水道”的“黄金效益”得到充分释放。

2.大水电——能源保供“压舱石”,清洁低碳转型支柱

金沙江下游-三峡梯级水电走廊共装有110台水轮发电机组,总装机容量达7169.5万kW,超出水电装机容量世界排名第五国家俄罗斯的1769.5万kW,接近排名第四国家加拿大的8400万kW。在全球单站装机容量排名前十二的水电站中,该梯级水电走廊独占五席,包括世界第一的三峡、第二的白鹤滩、第四的溪洛渡、第七的乌东德和第十一的向家坝等水电站。在机组单机容量方面,金沙江下游-三峡梯级水电走廊是全球巨型水轮发电机组聚集地,拥有70万kW及以上机组86台,占全球同等级别机组总数的60%以上。其中,白鹤滩水电站的百万千瓦机组为当前全球单机容量最大水电机组。凭借强大的供电能力与灵活的调节性能,清洁能源走廊已成为电力系统安全、稳定、高效运行的“稳定器”和“压舱石”。2024年,金沙江下游-三峡梯级水电走廊110台机组首次实现全开运行,全年366天持续参与调峰,最大日调峰量达3177万kW,平均调峰量为1355.89万kW;最大日发电量达16.78亿kW·h,全年共计8天单日发电量突破16亿kW·h,年总发电量达2959.04亿kW·h。在全国两会、“进博会”、迎峰度冬、迎峰度夏、新中国成立75周年等多轮重要保电任务中,金沙江下游-三峡梯级水电走廊均发挥了关键作用。截至2024年年底,金沙江下游-三峡梯级水电走廊累计发电量已突破3.7万亿kW·h,为国家能源安

全、新型电力系统建设和“双碳”目标实现提供了坚实保障。

3.大生态——生态保护“主力军”，水电绿色发展典范

生态优先、绿色发展，共抓大保护、不搞大开发。坚持“绿水青山就是金山银山”“生态就是资源，生态就是生产力”的大生态观，通过实施珍稀鱼类增殖放流、梯级水库生态调度、水土保持与生态修复等系统性措施，成功将金沙江下游—三峡梯级水电走廊打造为一条“生态保护走廊”。自2022年乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝和三峡5座水库首次被全部纳入生态调度范围以来，围绕这条“生态保护走廊”，逐步形成了一套涵盖叠梁门分层取水调节水温、“基荷发电”促进产黏沉性卵鱼类繁殖、“人造洪峰”刺激产漂流性卵鱼类繁殖、库尾减淤等调度方式的生态调度体系，生态效益日益凸显。例如，在2024年，共开展分层取水、基荷发电、人造洪峰等3类11次生态调度试验和2次三峡库尾减淤调度试验。调度期间，湖北宜都、沙市江段监测到产漂流性卵鱼类总产卵量分别约为687亿粒和609亿粒，其中“四大家鱼”总产卵量分别达342亿粒和223亿粒，均创历史最高纪录。截至2024年年底，梯级水库生态调度试验已连续实施14年，累计放流包括中华鲟（超650万尾）在内的长江珍稀特有鱼类20余种，总数超2720万尾，累计保护特有珍稀资源性植物2030余种3.1万余株，推动水电开发运行与生态环境保护协同发展，形成经济社会效益与生态效益的“最大公约数”。

三、金沙江下游—三峡梯级水电走廊运行调度技术研究进展

金沙江下游—三峡梯级水电走廊综合效益能否充分发挥，关键在于是否有高水平的运行管理保障。而运行管理效能的高低，则直接依赖于监测、预报、调度三大核心技术的支撑。以下从这三个维度着手，对该梯级水电走廊运行管理中的关键技术进行梳理。

1.多元多要素监测感知技术

监测感知是金沙江下游—三峡梯级水电走廊运行管理的前提和基础，通过对水情（降水、积雪、流量、水位、蒸发等气象水文要素）、工情（大坝位移、渗流渗压、应力应变等水工建筑物状态，以及库容、水头、耗水率、压差、闸门等电站运行参数）、电情（电压、电流、电量、有功、无功、频率等机电设备状态，以及外送直流线路、近区关联交流线路运行情况等电网侧数

据）等多元多要素进行实时精准监测，支撑无缝隙气象预报、多尺度水文预报和梯级电站协同调度等业务。近年来，为满足金沙江下游—三峡梯级水电走廊精益运行管理对大时空监测感知的迫切需求，综合运用“天空地水工”多种监测技术装备方法，结合有线电话、光纤通信、移动通信和卫星通信等多种通信技术，构建了我国水电领域规模最大、功能完备、技术先进的水情工情电情监测感知体系。该系统涵盖1570余个雨水情监测站、700余个国家气象站、2万余个区域气象站、74部天气雷达、风云二号/四号系列卫星、数十万个工情电情监测点，监测覆盖范围超100万km²，涵盖长江流域上游80%以上的区域，初步实现大时空、高频次、高精度的自动监测感知，并能够在极端灾害导致断网、断电、断路“三断”情况下对水情工情电情信息进行采集、传输与汇聚，主要控制站及控制性水库数据采集汇聚时间不超过10 min，系统畅通率与可用度超过99%。

2.流域雨水情预测预报技术

凡事预则立，不预则废。科学精准的雨水情预测预报是开展金沙江下游—三峡梯级水电走廊最优运行调度的核心基础。然而，气象水文过程本身具有内在不确定性，导致精准预报极为困难，直接影响这一梯级水电走廊发电计划编制、调度方案制定及实时调度决策的可靠性与经济性。聚焦金沙江下游—三峡梯级水电走廊精益运行对大范围、高精度预测预报的更高要求，构建了面向精细水文分区、覆盖全流域、定量化、网格化的长江流域无缝隙降水预报技术体系，开展了以集合预报、概率预报及多模式最优集成预报等技术为核心的短时—短期—中期无缝隙衔接的流域降水预报业务，以及基于多模式解释应用集成、动力与统计结合等技术的流域延伸期降水预报与短期气候预测业务。同时，针对河库单元串并联相接形成的流域复杂河库水系，提出了“流域—产汇流分区—子单元”三级空间离散化方法，研发了“子单元产汇流—分区河网汇流—流域河道演进”相耦合的流域分散式水文模拟与预报技术，通过气象水文耦合实现短中期水文预报；建立了基于平滑性先验的流域径流“时间—空间—状态”多维相似理论，基于物理特征分析与深度学习技术，提出了流域下垫面状态及降水时空分布信息的压缩降维方法，通过度量压缩信息间的距离以评估径流成因的多维相似性，进而实现多维相似理论指导下的短中期径流智能预报。此外，针对中长

期径流预报，建立了“还原流量+调蓄影响=还现流量”的技术路线，以短周期气候预测、局地及遥相关气候因子等信息为输入，采用物理与统计模型相结合的还原流量预测方法，对未来1~6个月及7~18个月的天然来水进行预测，再耦合水库群调蓄影响预测结果，生成各水库的中长期来水预报。

3. 梯级水电站协同调度技术

金沙江下游-三峡梯级水电走廊战略地位突出、综合效益显著，其安全经济运行对保障防洪安全、提升经济效益、保护生态环境和维持电网稳定等具有重要意义。这对汛前消落、防洪度汛、抗旱补水、电力保供、生态调度和梯级蓄水等调度工作提出了更高要求。为此，聚焦解决金沙江下游-三峡梯级水电走廊上下游电站联合与多目标协同优化的调度难题，系统梳理并构建了梯级水电走廊运行调度的边界与约束，提出了适用于防洪、发电、航运、供水和生态等复杂调度场景的梯级水电站群多目标优化调度模型及高效求解算法，在此基础上，研发了梯级水库群“动态消落-分级控制-提前蓄水”多目标协同优化调度技术。该技术基于短中长期来水预报及水工程实时运行状态，实现梯级水库水位渐进灵活消落，同时通过防洪库容与调节库容适度置换，使汛前消落期末水库运行水位可控上浮；采用金沙江下游梯级“等比例分级拦蓄”策略预留防洪库容，配合三峡水库对长江中下游防洪补偿调度，实现金沙江下游梯级水库与三峡水库防洪库容灵活置换运用，提升上下游梯级水库整体防洪库容利用效率，缓解平枯水年汛期防洪库容“晒太阳”难题；采用汛末“预报预蓄、有效衔接、分阶蓄水”的蓄水调度策略，增强中小洪水资源化利用，破解汛末水库群集中竞争性蓄水困境。此外，围绕梯级水电站短期精细化调控问题，融合物理机制与深度学习方法，构建了15 min尺度水位预测预警模型。该模型依据入库流量过程与水电站出力计划，精准推演水库上下游水位动态变化，支撑梯级水电站发电计划精准制定，并可对梯级水电站实时运行中可能出现的水位越限风险进行超前预警。

四、金沙江下游-三峡梯级水电走廊运行调度中面临的挑战与对策

1. 现有监测感知体系难以满足大时空、高频次、高精度需求，亟须加快构建“天空地水工”一体化监测感知体系

金沙江下游-三峡梯级水电走廊作为一个开放复

杂巨系统，其精益运行高度依赖于对系统内部水情、工情、电情的深度感知，同时也需全面掌握系统外部环境信息，包括受电区域气象信息与负荷动态、长江中下游雨水情变化、长江上游该走廊边界外雨水情形势等。当前，金沙江下游-三峡梯级水电走廊监测感知体系尚不完备，仍不足以有效满足“精益运行大国重器”提出的大时空、高频次、高精度监测感知需求。“天基”遥测方面，现有卫星载荷无法对水利电力对象开展高质量观测，缺乏满足水电行业特定需求的遥感卫星；“空基”探测方面，现有气象天气雷达聚焦大气垂直探测问题，不足以有效监测近地面层大气中的液态水，制约坝址、库区暴雨预报预警能力进一步提升；“地基”“水基”监测方面，存在空间覆盖范围不广、易受自然灾害影响、监测要素单一等局限，难以保证极端条件下的雨水情监测。

为此，有必要聚焦打造“天空地水工”一体化监测感知体系目标，建设世界首个服务水电行业应用的遥感卫星星座，形成覆盖长江全流域，可全天候、全天时进行水情、工情、电情多元多要素遥测的天基监测感知网；加快推进金沙江下游-三峡梯级水电走廊雨水情监测预报“三道防线”测雨雷达建设，实现雨水情监测从“落地雨”向“云中雨”转变，提升对短时强降雨的感知预警能力；系统梳理长江上游及其他相关区域雨水情监测站点现状，评价论证“地基”“水基”监测站网空间布局、分布密度与监测能力是否匹配实际需求，针对薄弱环节优化监测站网结构，实现整体功能提升；加快研发和应用智能化监测技术、装备、方法，促进新一代信息技术与水利电力监测感知深度融合，实现数据采集、传输、处理、分析及应用全链条数智化。最终实现天基、空基、地基、水基、工基监测“五位一体”，覆盖金沙江下游-三峡梯级水电走廊水利电力对象全要素及其运行管理全过程，为梯级水电走廊安全经济运行提供可靠的数据支撑。

2. 变化环境下预报难度加大、需求增多，亟须加速形成“生产-输送-消纳”全过程气象水文保障能力

金沙江下游-三峡梯级水电走廊系统的资源性外源输入具有不确定性，特别是在气候变化与人类活动的双重影响下，这种不确定性有上升的趋势。从气候变化影响看，全球变暖趋势持续加剧，该梯级水电走廊所处长江流域是全球气候变化敏感区和影响显著区，近年来流域极端降水、极端高温、旱涝（涝旱）急转等

极端灾害事件趋多趋频趋强趋广,导致降水、径流等资源要素的不确定性增强,进一步加大了预测预报难度。从人类活动影响看,受大规模水库群调蓄影响,金沙江下游-三峡梯级水电走廊外部环境中的天然河道系统已演变为河库单元串并联相接的复杂河库水系,在流域水库群统一联合调度格局尚未完全建立的背景下,这无疑增加了梯级水库来水预报的复杂性。此外,电力市场化改革持续推进,水电作为技术成熟的传统能源正逐步融入电力市场;新型电力系统加速建设,风电、光伏等新能源并网比例不断提高,水电作为灵活性电源支撑新能源消纳。这些新变化对受电区域负荷预测、金沙江下游-三峡梯级水电走廊水风光能预测等提出了更高要求。

为此,有必要聚焦全面提升金沙江下游-三峡梯级水电走廊“生产-输送-消纳”全过程气象水文保障能力,优化构建对“云中雨”的降雨预报模型、对“落地雨”的产汇流水文预报模型、对“河中水”的河道演进模型、对“库中水”的调蓄预测模型,构筑由监测感知网络加“气陆库水”预报模型组成的雨水情监测预报“三道防线”,进一步提升梯级水库来水预报精度和延长预报有效预见期;加强受电区域短中期天气预报与高温、寒潮、台风、冻雨等高影响天气预测预报能力,为受电区域用电负荷预测提供高精度的气象要素预报,实现受电区域负荷预测精度进一步提升,支撑金沙江下游-三峡梯级水电走廊参与电力市场交易;研发基于人工智能和数值模拟相结合的风电、光伏超短期、短期、中长期功率一体化模拟及预测模型,提高金沙江下游新能源场站风光功率预测精度,支撑金沙江下游-三峡梯级水电走廊水风光多能互补调度运行;开展微区域雷电、大风、暴雨等灾害性天气预报技术研究,持续提升水电站坝址、新能源场站、外送输电线路灾害性天气监测与预警能力,支撑保障清洁能源场站安全稳定运行;积极探索人工智能与数字孪生技术在气象水文预报中的应用,突破传统范式研发气象水文人工智能大模型与智能预报平台,提升金沙江下游-三峡梯级水电走廊“生产-输送-消纳”全过程气象水文保障体系的智能化水平。

3.新形势下的梯级水电站的调度边界复杂性凸显,亟须聚力突破非确定性条件下巨型梯级水电站多目标协同优化调度技术

2025年是习近平总书记提出“总体国家安全观”11周年。总体国家安全观强调“大安全”理念,涵

盖水安全、能源安全、生态安全等多领域,其核心要义在于统筹发展和安全,将二者置于同等重要位置。当前,国家水网工程与新型电力系统建设加快推进,电力市场化改革不断深化;全球气候变暖态势持续,极端天气事件多发频发;这均对金沙江下游-三峡梯级水电走廊运行调度提出更高要求,调度边界的复杂性日益凸显。水安全方面,长江流域水资源管理已由水量分配逐步转向统筹经济、环境与生态需求的综合调控,叠加长江流域近年来洪涝、干旱等极端天气事件频发影响,梯级水电站实现综合效益最大化面临诸多困难与挑战。能源安全方面,随着大规模高比例新能源并网运行,水电功能定位正由电量供应为主,转向电量供应和容量支撑并重,梯级水电站调峰和调节任务加重,带来的水库调度新风险明显增大。

为此,有必要聚焦“安全生产、效益增长、能力提升”目标,深化科学调度研究与实践。主动适应新型电力系统发展趋势,明晰风光新能源发电特性及对“大水电”的影响,优化梯级水电站调度运行方式,发挥好“大水电”绿色低碳优势,利用好“大水电”调节能力资源,充分挖掘金沙江下游-三峡梯级水电走廊的多维价值;前瞻开展国家水网工程建设运行对梯级水电走廊的影响研究,高位探索长江流域水库群联合调度政策法规与体制机制,为梯级水电走廊调度运行创造更有利的外部环境;深入开展极端天气事件频发、电力交易市场化、新能源高占比、发电主体不统一、多目标调度需求等复杂环境下的梯级水电站协同优化调度技术研究,进一步提升精细化调度水平,不断优化完善调度运行方式,持续拓展调度空间,实现非确定性条件下清洁能源走廊安全经济运行;探索建设基于人工智能的水电大模型,自主打造梯级水电站运行调度信息支撑平台,全力提升梯级水电站预报调度体系与能力的现代化、智能化、国产化水平。不断以预报调度技术的自主性、可靠性、先进性,防范应对水安全、能源安全与生态安全风险事件发生的随机性、突发性、致灾性,支撑“用好每一方水、调好每一度电”,保障金沙江下游-三峡梯级水电走廊综合效益全面发挥。

五、结 论

金沙江下游-三峡梯级水电走廊以7169.5万kW的总装机容量和3000亿kW·h的年均发电规模冠绝全球,是当今世界规模最大的沿江清洁能源走廊。该

走廊由6座巨型水电站串联构成,控制着整个长江上游流域,具有外源随机、结构复杂、功能多样等特征,由水利、电力、航运、生态等多部门协同调度管理,其本质是一种开放复杂巨系统。近年来,立足防洪保安中流砥柱、能源保供“压舱石”、生态保护“主力军”等“大担当”的功能定位,金沙江下游-三峡梯级水电走廊充分发挥“大水库”调蓄能力与“大水电”调节能力,深入践行“大生态”发展理念,全面释放防洪、发电、供水、航运、生态等“大安全”综合效益,为国家水安全、能源安全和生态安全提供了强有力支撑,持续助力长江经济带高质量发展。

近年来,聚焦提升金沙江下游-三峡梯级水电走廊运行调度技术水平,围绕监测、预报、调度三大方向开展技术攻关,构建了涵盖多元素监测感知、流域雨水情预报预测、梯级水电站协同调度的技术体系,有力支撑了梯级水电走廊安全经济运行。然而,在国家水网工程与新型电力系统加快建设,电力市场化改革持续推进,以及全球气候变暖持续发展,导致极端天气事件多发频发的新形势下,梯级水电走廊运行管理面临诸多技术挑战。亟须聚焦提升梯级水电走廊运行调度体系与能力的现代化水平,加强人工智能与数字孪生等新技术应用,强化关键核心技术攻关和成果应用,加快构建“天空地水工”一体化监测感知体系,加速形成梯级水电走廊“生产-输送-消纳”全过程气象水文保障能力,聚力突破非确定性条件下巨型梯级水电站群多目标协同优化调度决策技术,不断以监测、预报、调度技术的自主性、可靠性、先进性,调好用好金沙江下游-三峡梯级水电走廊,实现综合效益充分发挥,为支撑保障国家水安全、能源安全和生态安全作出更大贡献。

参考文献:

- [1] 何亮.世界最大清洁能源走廊全面建成[N].科技日报,2022-12-21(1).
- [2] 周建平,钱钢粮.十三大水电基地的规划及其开发现状[C]//中国水电100年纪念大会.昆明:国家能源局,2010.
- [3] International Hydropower Association. 2025 World Hydropower Outlook[R].London (UK): International Hydropower Association, 2025.
- [4] 钱学森.一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论[J].上海理工大学学报,2011,33(6):526-532.
- [5] 张海荣,鲍正风,汤正阳,等.流域梯级水资源管理决策支持系统关键技术研究——以金沙江下游—三峡梯级水电走廊为例[J].中国水利,2020(11):47-50.
- [6] 王浩.数说世界最大清洁能源走廊[N].人民日报,2024-05-15(2).
- [7] 赵建华,舒卫民,王文军.金沙江下游-三峡梯级水库水文预报技术及应用[J].人民长江,2022,53(S2):52-58.
- [8] 胡向阳.长江流域水工程联合调度实践与思考[J].人民长江,2023,54(1):75-79.
- [9] 刘冬顺.长江流域以三峡水库为核心的水库群统一联合调度思路、举措和成效[J].中国水利,2024(22):7-12.
- [10] 许银山,李玉荣,闵要武.三峡水库水文气象预报不确定性和误差分布分析[J].人民长江,2015,46(21):27-32+54.
- [11] 赵紫薇,杨哲,张全旺,等.考虑预报不确定性的梯级水库群联合优化调度[J].水利水电科技进展,2025,45(4):67-75.
- [12] 徐斌,钟平安,陈宇婷,等.金沙江下游梯级与三峡-葛洲坝多目标联合调度研究[J].中国科学:技术科学,2017,47(8):823-831.
- [13] 贾本军.水电站水库特性解析与隐随机优化调度方法研究[D].武汉:华中科技大学,2022.
- [14] 贾本军,周建中,陈潇,等.水电站尾水位特性解析与建模[J].水力发电学报,2021,40(10):45-59.
- [15] 王飞龙,胡挺,时玉龙.向家坝坝下水位顶托关系研究[J].水电能源科学,2024,42(12):200-203+208.
- [16] 华小军,汪芸,刘志武.多河流顶托情况下水库下游水位计算方法探讨[J].人民长江,2016,47(7):34-36.
- [17] 王浩,贾仰文.变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J].水利学报,2016,47(10):1219-1226.
- [18] 胡维忠,王乐,刘佳明.长江流域防洪工程体系能力提升建设思路[J].中国水利,2022,(05):31-34.
- [19] 国能能源研究院.中国能源数据报告(2025)[R].2025.
- [20] 曹瑞,李帅,龚文婷,等.金沙江下游-三峡梯级水库2023年联合调度实践[J].人民长江,2024,55(6):1-8.
- [21] 陈桂亚,张俊,邹强.三峡工程防洪调度研究及作用分析[J].中国水利,2024,(22):41-47.
- [22] 严子奇,刘至一,周祖昊,等.三峡水库旱限水位确定及运用方式[J].水科学进展,2025,36(3):469-480.

- [23] 中国长江电力股份有限公司.中国长江电力股份有限公司2022年社会责任报告[R].2023.
- [24] 霍思伊.白鹤滩投产发电!建成世界唯一百万千瓦机组水电站有多难[EB/OL].(2021-07-05)[2025-10-21].<https://www.inewsweek.cn/finance/2021-07-05/13130.shtml>.
- [25] 郎慧慧.论新质生产力的大生态观[J].中国地质大学学报(社会科学版),2025,25(1):1-10.
- [26] 周保红,万韶辉,刘煜.三峡水情遥测系统运行质量评价体系构建[C]//水电站运行管理及梯级调度控制研究(2019).西昌:中国水力发电工程学会,2019.
- [27] 陈辉,赵云发,梁志明.金沙江下游-三峡梯级水库联合调度技术及实践[J].人民长江,2022,53(11):203-210.
- [28] 曾志强,汤正阳,曹辉,等.长江上游流域水文预报系统及典型洪水反演分析[J].水利水电快报,2022,43(10):6-12.
- [29] 张雅琦.长江上游流域短期水文气象耦合预报技术研究[J].水电与新能源,2016(6):1-6+10.
- [30] 中国长江电力股份有限公司.一种基于降雨空间分布的图像相似水情挖掘及预报方法:202310481237.5[P].2024-05-14.
- [31] 中国长江电力股份有限公司.基于降雨时间分布柱状图的相似降雨径流过程查找方法:202310536513.3[P].2024-01-02.
- [32] 张海荣,鲍正风,汤正阳,等.流域梯级水资源管理决策支持系统关键技术研究——以金沙江下游-三峡梯级水电站为例[J].中国水利,2020(11):47-50.
- [33] 刘亚新,徐杨,马皓宇,等.金沙江下游梯级电站汛期及蓄水期调度策略研究[J].中国农村水利水电,2023(10):230-239.
- [34] 刘亚新,姚华明,徐杨,等.白鹤滩蓄水对金沙江下游梯级水库消落期调度影响分析[J].水电能源科学,2021,39(12):84-88.
- [35] 刘亚新,冯志州,徐杨,等.兼顾生态的梯级水电站优化调度模型研究与应用[J].水文,2024,44(4):38-44.
- [36] 汪涛,徐杨,曹辉,等.基于LSTM的三峡-葛洲坝梯级电站超短期水位预测[J].长江科学院院报,2025,42(4):80-86.
- [37] 徐杨,樊启祥,尚毅梓,等.非弃水期葛洲坝水电站下游水位变化过程预测新方法[J].水利水电科技进展,2019,39(3):50-55.
- [38] SHANG Y, XU Y, SHANG L, et al. A method of direct, real-time forecasting of downstream water levels via hydropower station reregulation: A case study from Gezhouba Hydropower Plant, China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 573:895-907.
- [39] 钱峰,成建国,夏润亮,等.数字孪生水利“天空地水工”一体化监测感知体系构建与应用初探[J].中国水利,2024(24):39-47.
- [40] 刘志雨.雨水情监测预报“三道防线”耦合贯通建设应用与探讨[J].中国水利,2025(10):1-7.
- [41] 黄艳,郑浩,王权森.聚焦“十大安全”的数字孪生三峡工程高质量发展探索[J].中国水利,2024(22):79-88.

责任编辑 杨文杰