

梯级水库群多目标联合调度的国内外前沿研究调研

水资源所 雷晓辉, 王超, 王旭, 宋培兵

随着流域大规模巨型水库群的建成和投运,流域水库群已初具规模,流域水资源统一调度格局已初步形成。然而,由于统一协调管理机制尚未形成,梯级水库的无序调度可能严重影响流域水资源分配格局,水资源综合利用效益和水库群补偿效益难以充分发挥,带来了一系列亟待解决的国际学术前沿问题和工程技术难题,防洪减灾、联合发电调度、联合蓄放水调度等问题仍然十分突出,已逐步成为制约我国水能资源高效利用的重要因素。迄今已有的研究成果为我国开展流域梯级水库群联合调度提供了应用基础,但是,由于对多目标调度机制及其影响因素认识的不足,所建立的静态模型尚不能完全反映流域不同区间供用水的动态变化和竞争特性,限制了已有成果的工程应用价值。尤其是随着多业主、多功能特大型水库群的相继建成以及气候变化和人类活动影响,梯级水库群联合调度和管理日趋复杂,面临水文气象、洪涝灾害、供需矛盾、生态退化、安全约束诸多方面的影响和风险。因此,本项目依托国际水利水电科技发展动态调研专项,针对变化环境下流域水文预报预测技术及其不确定性分析、梯级水库群多目标联合调度的安全约束域和风险控制约束域识别、多重不确定性影响下水库群多目标联合调度与决策、多利益主体水库群多目标协同均衡调控模式、梯级水库群汛期与非汛期的实时动态控制调度关键技术、水库群联合优化调度云服务平台等问题开展深入调研,并取得以下的调研成果:

(1) **变化环境下流域水文预报预测技术及其不确定性分析研究方面:** 水文现象不确定性的研究方法主要有随机法和模糊法两类方法,而水文预报预测不确定性的分析方法可分为不确定性全要素耦合和预报总误差分析两类途径。其中,全要素耦合途径包括输入、参数和模型结构的不确定性分析。调研发现,普适似然不确定性估计 GLUE 在参数不确定性研究中广泛应用,贝叶斯概率预报系统 BFS 在预报总误差不确定性分析方面最具代表性。在变化环境下,极端水文气象事件规律发生变化,大范围高强度水利/水保工程群等人类活动的影响显著改变了降雨径流规律,面向水文预测的数值天气预报产品后处理技术尚不满足作业预报需求,多尺度水文预报全过程不确定性分析及控制理论尚不完善。这些对现有的水

文预报预测理论与方法提出挑战，亟需开展针对性研究。

(2) 多重不确定性影响下水库群多目标调度建模与风险决策关键技术研究方面：目前，统筹考虑防洪、发电、供水、灌溉、航运、生态等目标的多目标综合开发是流域水资源开发的基本原则要求，已建和在建的大型水库都有多个开发目标，有些水库还承担共同的目标任务。在多数情况下，各开发目标的用水具有竞争性，导致水库群运行调度不仅涉及技术领域，而且涉及到社会、经济、生态环境、政治等诸多方面，需要开展综合性研究。多目标决策一直是水库群调度研究的热点之一，水库群多目标决策理论方法取得了大量成果。近年来，随着水库群规模的不断扩大，水库开发目标相互交织，同时决策环境、信息条件往往存在多种不确定性，使决策风险来源增多，实时决策难度增大。多重不确定性影响下水库群多目标调度建模与风险决策理论方法，成为水库群多目标调度领域的国内外研究前沿。

(3) 水库群汛期防洪调度及风险控制技术研究方面：现在的水库防洪调度包括不考虑洪水和降雨预报全汛期固定水位方法和分期汛限水位两种方法。其中，汛限水位动态控制域确定方法有基于预报信息的防洪预报调度方式、改进预泄能力约束法、考虑年内洪水时序变化规律的统计分析法、考虑库容差异补偿的梯级水库汛限水位控制方法等；汛限水位实时动态控制方法包括预蓄预泄法、综合信息推理模式法、评价决策法和考虑库容补偿的补偿调度法。目前，防洪调度现有研究大多集中在单库研究或简单库群系统，难以适用我国各大江大河已经形成了复杂的水库群调度系统，同时水库群防洪调度涉及多个区间、多目标，预报调度系统存在多个不确定性因子，其风险的定量和效益评估更为复杂，现有风险分析方法难以适用。因此，研究基于库容补偿机制的面向多区域防洪的水库群联合防洪预报调度多目标优化模型、耦合多种风险因子的防洪预报调度风险分析方法研究是未来研究重点。

(4) 水库多目标联合调度云服务平台及应用示范方面：水库群联合调度平台体系建设是实现水资源高效利用的重要支撑，其关键技术问题的研究和原型系统的集成示范是水库群联合优化调度的重大需求。综观国内外现有水电能源系统优化运行技术、知识产权和行业技术标准现状，目前在流域干支流控制性水库联合调度这一领域还有很多尚未攻克科学技术难题，亟需围绕梯级水库多目标联合运行的应用需求，研究梯级水库群多目标联合调度涉及水文、气象、水质、泥

沙等多源多相数据的融合、集成和共享方式；提出库群联合调度涉及数据的标准组织方式和模型的标准化输入、输出接口，研发用于构建库群联合调度模型体系的模型管理平台，搭建梯级水库群多目标联合调度模型云计算平台；研究基于大数据可视化技术、二/三维 GIS 技术的沉浸式交互方式，开发拥有自主知识产权和核心技术的梯级水库多目标联合调度云服务平台，并进行推广应用。

在调研项目执行过程中，依托项目研究成果申请并获批了国家自然科学基金重点支持项目《雅砻江流域风光水多能互补运行的优化调度方式研究》1 项，支撑了《国家水资源监控能力建设项目—水资源调度通用软件开发》项目的技术方案拟定工作。此外，在本项研究成果的基础上，针对梯级水库群多目标联合调度面临的关键科学问题和调整，立项了中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目《梯级水库群多目标联合调度研究》。综上，本调研项目对支撑梯级水库群联合多目标调度研究起到了较好的效果和推动作用。