

水利枢纽群安全调控技术体系

樊启祥,肖 舸,刘志武

(中国长江三峡集团公司,北京 100038)

摘要: 鉴于我国在主要流域已建成的特大水利枢纽群的运行过程受自然环境、工程结构、调度措施等诸多不确定因素的影响,以水利枢纽安全运行约束下的效益发挥为切入点,强调了梯级水利枢纽形成特大规模水利枢纽群后联合调度产生的风险与机遇。通过对比国内外水利水电工程相关研究成果,提出开展特大水利枢纽群联合调控与安全运行科学研究的必要性,综述了枢纽群安全风险辨识机理、枢纽群联合运行机理及多目标效益协调机理等研究进展,并提出水利枢纽安全调控技术体系框架,提出考虑防洪、发电、供水、通航、生态、航运等多维安全的水利枢纽群一体化调控技术发展方向。

关键词: 特大水利枢纽群;联合调控;安全运行;技术框架;综合目标

中图分类号:TV697.1+2

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2019)03-0011-07

Safety regulation technology system for water control projects//FAN Qixiang, XIAO Ge, LIU Zhiwu (China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Mega water control projects constructed in the main river basins in China can be influenced by a lot of uncertainties, such as natural environments, engineering structures and scheduling measures during operation. The benefit of water control projects under the constraint of safety operation is taken as the starting point, risks and opportunities originated from the joint regulation and control of the mega projects made up of cascade water control projects are emphasized. Related research results of water conservancy and hydropower engineering from both home and abroad are compared and the need for scientific research on joint control and safe operation of mega water control projects is proposed. Advances in the mechanisms of safety risk identification, joint operation and multi-objective benefit optimization of mega water control projects are reviewed, based on which a framework for regulation technology systems of mega water control projects is proposed. This paper gives the development direction of the integrated regulation and control technology for mega water control projects considering flood control, power generation, water supply, navigation, ecology, and shipping with multi-dimensional safety.

Key words: mega water control projects; joint regulation and control; safety operation; technical framework; comprehensive objectives

水电作为技术最成熟、供应最稳定的可再生清洁能源,在我国能源供应中占有重要地位。1912年,我国在云南省昆明市郊建成第一座水电站——石龙坝水电站,电站初始装机为480 kW。经过一百多年的水电开发,我国水电发展已取得长足进步,目前我国水电站装机规模居世界第一。我国计划在2050年前建成13个国家级梯级水电基地^[1],届时我国水电经济开发度将达70%,与发达国家水电经济开发度相当(国际水电协会的统计数据显示,2010年发达国家水电的平均经济开发度在60%以上,其中,德国、瑞士、西班牙和意大利等国的水电经济开发度超过95%,美国达82%,日本达90%)。

2000年至今,我国在流域水电开发与枢纽工程建设领域取得丰硕成果,建成了目前世界上装机台

数及总容量与建设规模最大的三峡水利枢纽、具有最大地下厂房的金沙江溪洛渡水电站、具有最高碾压混凝土坝的龙滩水电站、具有最高混凝土拱坝的锦屏一级水电站等。这些水利枢纽的某些单项指标超过了国外所有已建水利枢纽,诸如300 m级高坝高消落水深、10万MW大功率泄洪、800 MW单机容量、113 m水头、年通航1亿t船闸等。目前,我国长江中上游已建成世界上规模最大的水利枢纽群,在枢纽建设、管理和施工领域引领了全球水电产业的发展,同时也面临着世界上其他国家从未遇见的梯级水利枢纽群安全调控挑战。如高坝蓄水带来的谷幅收缩与大坝坝体安全,大功率集中泄洪引起坝址区和周边建筑物振动,巨型发电机组受泄洪尾水影响会产生强迫扰动,已有的水力学模型受限于比尺

效应难以反映高水头、大规模泄洪的实际状况,单一目标小水头变化工况的机组安全调控技术难以满足巨型机组水头与负荷变化大的要求等问题。此外,水电工程泄洪非恒定流对下游航运的影响,高水头大流量挑流、天然河道冲坑泄洪产生的过饱和气体与水生生物的关系等,也都需要在枢纽调度运行中统筹考虑。因此,应针对我国已建水利枢纽的具体特点开展新的理论与技术研究,以满足特大型水利枢纽安全生产与梯级水利枢纽联合调度管理的工程需求。事实上,我国已开展了大量自主创新,在开发绿色水电技术,建设生态友好环境保护的水电工程的同时,研发出一些有利于生态环境安全的梯级水电站集控运行平台、水库群联合调度技术等,为梯级水利枢纽联合调度安全运行提供了科技支撑。

文中,笔者主要介绍我国在水利枢纽集控运行、风险管理方面的研究进展,并结合多年来积累的水利枢纽工程建设和蓄水运行的工作经验,尝试提出考虑防洪、发电、供水、通航、生态、航运等多维安全的水利枢纽群一体化调控技术发展方向。

1 梯级水利枢纽集控平台研发应用

流域梯级水利枢纽运行管理的目标是通过多个单体水利枢纽的联合调度达到并发挥已有工程设计效益,挖掘工程潜在综合效益。梯级水利枢纽的联合调度运行不仅需要协调处理防洪、发电、航运、灌溉等多项调度任务涉及的多方利益主体的矛盾,还需要承担调度复杂程度增加所带来的相应安全风险。如:汛期防洪要求的低水位、防洪库容与发电要求的高水位、兴利库容之间的矛盾;电网要求的调峰、调频的运行灵活性与航运、减振、库岸稳定要求的水位平稳性之间的矛盾;枯水期灌溉用水与发电用水不足之间的矛盾;生态环境保护要求的水位、流量运行方式与发电最优运行方式之间的矛盾等。事实上,由于入库径流的随机性,决策过程的动态性、实时性,系统的非线性,以及管理的多目标性,使得梯级水电站联合调度决策过程非常复杂,依靠个人经验难以作出正确决策,需要调度决策支持系统的支撑。

20世纪60年代至80年代,欧美发达国家首先完成了水电大开发,并开发出系列梯级水电站通用的优化调度软件,应用最广泛的是美国陆军工程兵团水利工程中心开发的HEC系列软件,包括HEC-DSS、HEC-ResSim和HEC-HMS。除此之外,较有影响力的梯级集控运行软件还有丹麦水力研究所(DHI)的MIKE-SHE、科罗拉多大学的RiverWare、乔治亚理工的水资源管理决策支持系统GTDS和加州伯克利分校研究教育中心的CalSim。其中,

CalSim是加州伯克利分校专门为加州水资源局开发的,服务于加州州属和联邦政府所属的20多个水库和北水南调设施联合调度运行的管理软件;RiverWare是最早将水文预报与水库群短期决策相结合的集成系统,率先应用于美国田纳西河13座水库的联合调度;MIKE系列主要用于设计分析和评估演算;GTDS主要应用于埃及阿斯旺高坝/低坝(HAD-DSS)和加州萨克拉门托流域水库群(INFORM-DSS)。此外,一些具有流域水电站管理权限的机构或企业集团,也根据集团下属电站的发电调度目标和枢纽工程特点,设计出专属梯级水电站的集控平台,如美国加利福尼亚中心流域工程优化调度系统(CVP)和田纳西流域机构(TVA)的水资源优化调度系统(HYDROSIM)等。

我国梯级水电站集控平台研究在多年的实践应用中也取得了一定的进展。早期水电站集控平台是在通用平台设计框架下对某些功能模块进行本土化改进,有效保障了我国初期梯级水利枢纽经济效益的发挥。近年来,我国加快水电站集控平台的自主研发,已成功开发并设计出符合我国大型水利枢纽特点和日常应用的集控调度平台。例如,三峡工程开发公司设计的水电站集控平台,能够结合水情预测进行短期和中长期梯级水库联合优化调度^[2]。国电大渡河流域水电开发公司研发的自动化报竞价模块、水情智能测报功能模块,可通过移动终端互联,实现多尺度的水电站群联合调度和实时优化^[3]。贵州乌江水电开发有限责任公司研发的水电站优化调度系统在智能发电调度与负荷分配方面具有特色创新,实现了梯级水库联合调度与水电站发电调度之间的动态交互^[4]。云南昭通高桥发电有限公司基于NC3.0监控平台构建的集控系统,实现了计算机分步接入、多机冗余配置、多层次安全防护等功能,可保证调度正常运行^[5]。五凌公司电力有限公司基于IEC61850标准设计的智能集控平台,可实现一人一席多厂管控模式,并采用智能分析和关联诊断策略,实现设备智能监测^[6]。然而,我国已有的水利枢纽集控平台多侧重于水电站及库区各部位风险源未被触发、各项功能正常发挥的常规调度和优化调度范畴的决策支持,而对流域水资源的综合利用效益以及风险源被触发后的风险调度、风险应急和风险管理等方面考虑不足。

2 水利枢纽群联合调控与安全运行研究

水利枢纽的安全运行涉及水库、大坝、泄洪、机组、生态、航运等多个方面,其整体调控运行的对象是“库岸-大坝-坝基-水库”耦合的复杂系统。研究

的难点在于水库、库岸、大坝、坝基各子系统都是非线性的,各子系统之间存在紧密的相互耦合作用。近年来,物联网、遥感、数字流域等新技术的应用提升了枢纽监控数据实时获取能力、分析能力和安全保障水平,为枢纽安全调控技术研发提供了良好的基础。笔者以风险源辨识-监测-分析-预警-调控为主线,对枢纽调度运行过程中的风险管理技术研发进展进行综述。

2.1 水利枢纽群联合调度风险辨识

水利枢纽群的联合调度^[7]涉及防洪、发电、供水、生态、航运等多个目标,为复杂多维非线性系统,在进行多目标决策联合调度管理过程中,由于受水文、水力、工程结构、人为决策等诸多不确定性因素的影响(如入库洪水随机性、来水预报不确定性、综合利用需求不确定性等),不可避免地存在蓄水率不足、发电不足、水位高于防洪限制水位、下泄流量大于下游安全泄量等潜在风险,从而影响特大水利枢纽群多维安全运行与防洪、发电、供水、航运、生态等综合功能或效益的发挥^[8]。目前,水利枢纽库群风险研究主要集中在洪水与溃坝^[9]、大坝拦河的生态影响^[10]等,但综合考虑多效益目标和多安全约束,基于实际运行状况与监测资料对水利枢纽群进行实时风险管理仍缺乏理论基础。已有相关风险辨识研究主要辨识水利枢纽库群联合调度过程中水文、水力联系等的不确定性,如通过建立入库径流模拟模型,对综合利用水库防洪和兴利调度风险进行分析^[11]。20世纪90年代,我国学者将风险分析理论引入大坝安全和洪灾风险分析中,内容多涉及大坝安全标准、水库防洪调度、洪水风险图编制、水库泄洪风险等^[12-18]。顾文权等^[14]采用随机模拟方法生成供水水库来用水序列,基于自优化模拟技术建立水库供水调度模拟模型;王丽萍等^[15]对防洪调度、发电调度风险、多目标调度风险进行了分析;闫宝伟等^[17]采用水库调洪演算随机微分方程,将洪水过程预报误差不确定性转化为库水位过程不确定性,对隔河岩水库防洪调度风险进行分析;钟平安等^[18]以补偿期和回蓄期来水预报误差作为风险因子,建立了小流量泄流补偿风险决策树,建立了基于决策树的泄流补偿调度风险评估模型。我国“973”计划——“梯级水库群安全生命周期风险孕育机制与安全防控理论”,率先开展了梯级水库群的风险防控与安全管理的键研究,为特大水利枢纽群安全风险管控发展开拓了新方向。王浩、陈祖煜院士的团队对梯级水库群的风险孕育机理开展了深入研究,在梯级土石坝连溃风险分析理论和设计安全标准方面取得了进展^[19]。

总体来看,已有风险辨识研究主要集中在单一

电站模式下的安全分析,侧重于单级水电站的单一风险管理要素,例如调度风险、大坝风险、机组风险、通航风险、生态风险等,并重点集中在对水文要素及机组运行状态的考虑上,需要加强对单一梯级多风险源协同联动管理以及枢纽群的风险源辨识、多重风险源的叠加和累积效应等方面的研究。

2.2 水利枢纽运行风险分析与评估预警技术

在水利枢纽挡水、泄洪、机组、通航、生态等多维安全约束下,如何综合考虑这一系列相关的多重风险,研发梯级水电站实时风险分析、评估、预警和调度技术,在风险孕育和发生时,快速评估和判断风险级别,作出应急调度预案,保障梯级水库安全运行,是目前亟待解决的实际问题和亟待攻克的技术问题。我国国家防汛抗旱指挥部2005年发布了《关于明确水库水电站防汛管理有关问题的通知》、2006年发布了《水库防汛抢险应急预案编制大纲》,要求包括水利行业和电力行业在内的相关单位编制水库防汛抢险应急预案。国家发展与改革委员会2015年发布的《水电站大坝运行安全监督管理规定》要求,电力企业应当建立大坝安全应急管理体系,制定大坝安全应急预案,遇有超标准洪水、地震、地质灾害、大体积漂浮物等险情,电力企业应当按照规定启动大坝安全应急机制。我国风险应急响应与应急预案编制工作正从侧重“事故后救灾”向“增强事故前防灾抗灾意识、提高预报预警能力、提升应急预案操作性与响应时效性”转变。

近年来,澳大利亚、加拿大、美国等已从单纯基于设计标准的大坝安全管理过渡到风险指引的大坝安全管理(risk informed dam safety management),美国垦务局和陆军工程兵团对所辖的800余座大坝全面按照大坝安全风险组合管理的模式进行风险排序和风险决策。20世纪末以来,我国新建的高坝大库均建立了较完善的大坝安全监控体系,统计模型、确定性模型、混合模型等各类监测数据定量分析得到了广泛应用,对时间序列分析、数字滤波、灰色系统、神经网络等理论方法的研究也逐渐深入。我国目前的大坝安全管理主要基于设计标准,多依赖于监测数据统计分析、监测与设计值的对比以及专家经验。实现高可信度的实时定量评价和预警,就需要为安全运行智能化调度提供定量约束条件,考虑特大水利枢纽群防洪泄洪风险、机组振动风险、航运风险、生态风险等多维安全需要。为保障梯级流域水电站多维安全运行,需考虑近坝区域的多维安全风险,提出面向流域的多维安全监测指标体系和风险定量分析技术,并建立基于多维安全的条件运行阈值和应急运行阈值。

2.3 水利枢纽群集控平台智能化技术

现有枢纽群集控技术研究进展主要集中在梯级水电站一体化调度方面,近年来,物联网、遥感、数字流域等新技术大大提高了枢纽运行数据获取、分析能力和运行调度技术水平。肖舸等^[2]探讨三峡梯级与金沙江下游梯级互为备调、“水库调度统一、电力调度分区”的新体系,即“调控一体化”管理模式;芮钧等^[20]指出传统水电厂电力运行和水库调度孤立优化的模式使得经济运行体系的整体性、协调性和精细化程度不足,对发电过程的稳定性造成了不利影响,研究了基于水电站群一体化管控平台的经济运行系统;万书鹏等^[21]为满足调度与变电站一体化系统双网架构下的TCP通信,提出一种基于组播的链路状态监测与TCP通信方法;杜贵和等^[22]在智能电网调度技术支持系统框架的基础上,考虑实现智能电网调度技术支持系统框架的功能目标;曹斌等^[23]提出了考虑电网运行风险的发用电一体化调度方法;徐丹丹等^[24]从调度主站对变电站的功能需求出发,提出了智能变电站与调度主站一体化建模方案。关杰林等^[25]阐述了溪洛渡、向家坝梯级电站“调控一体化”运行调度管理模式的内涵和“调度+监视+重点控制”的实现方式。

目前,水利枢纽群集控技术研发正朝着集控平台智能化、枢纽多目标效益和多维安全综合管理方向发展,一些核心关键技术正在攻关,譬如泄洪闸

门、机组的控制需在多约束条件下进一步优化,以实现机组、泄洪闸门联合控制;开发多效益目标和多安全约束的一体化调控平台等。

3 水利枢纽群多维安全调控技术框架与关键研发内容

近年来,随着水利枢纽智能化监控体系的建设、多源数据集成融合和数据挖掘技术在梯级水电站中的初步应用,以及水利枢纽运行风险的机理研究和辨识方法的创新,开展梯级水利枢纽群多维安全调控已具有一定的前期基础。笔者认为研发下一代水利枢纽群智能集控平台的时机已成熟。下一代水利枢纽群集控平台将能实现枢纽的多源各类基础数据和安全数据的融合,并能根据降雨、来水、地震等多源组合输入与梯级累积效应,实施动态的枢纽调控管理,包括水库、大坝、机组电站、闸门、通航设施、河道等智能安全调控与风险管理。

以下一代水利枢纽群集控平台研发为需求牵引,笔者提出构建水利枢纽群多维安全调控技术框架,并指出亟待攻关的核心关键技术。

3.1 水利枢纽群安全调控技术体系框架与要点

大型水利枢纽的兴建改变了流域水文过程,进而影响了流域水资源高效开发利用和区域社会经济系统。水利枢纽群调控技术体系框架如图1所示。

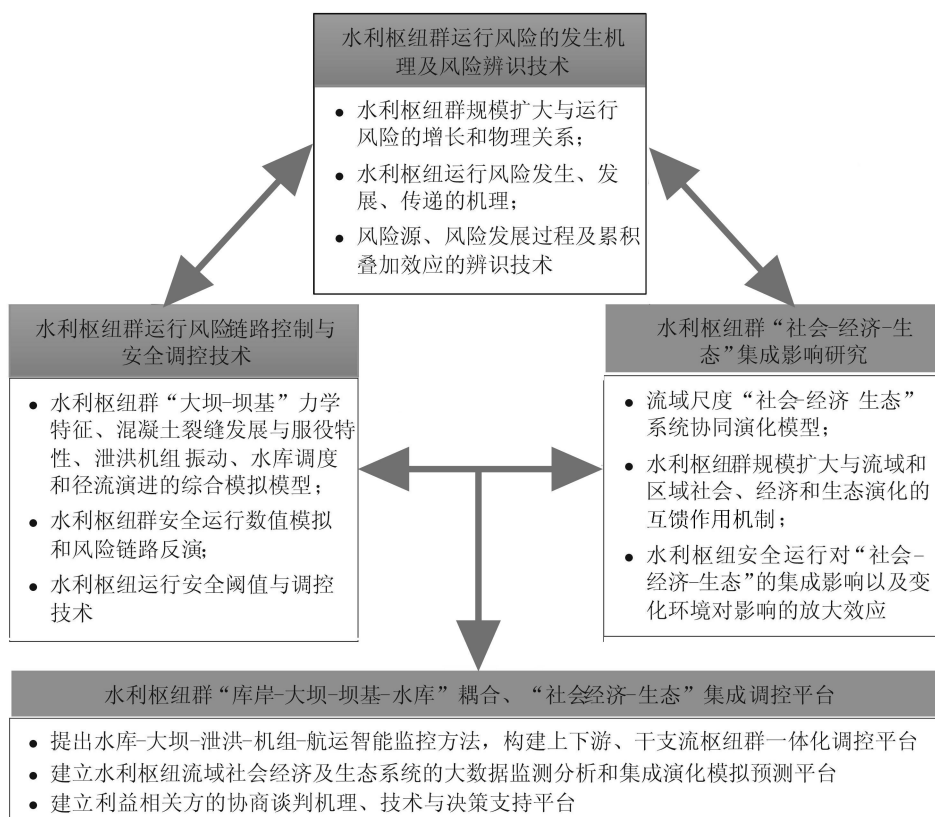


图1 水利枢纽群安全调控技术体系框架

首先,开展水利枢纽群运行风险的发生机理及风险辨识技术,突破以往工程风险研究的传统范围,将水利枢纽群运行风险分析扩展到流域可持续发展层面,综合提出风险在枢纽建筑物之间以及社会经济和生态各环节之间发生、发展及传递的机理和辨识技术。

其次,从工程设施调控的“硬”手段和流域资源环境管理的“软”措施两方面,提出“软硬结合”的特大水利枢纽群调控技术体系的核心技术。①在水利枢纽工程风险管理方面,围绕“库岸-大坝-坝基-水库”耦合性态准确模拟预警、泄洪减振减蚀、枢纽群多维安全调控等技术难题,以风险辨识-监测-分析-预警-调控为主线开展系统研究。考虑降雨、来水、地震等多源组合输入与梯级累积效应,提出泄洪-挡水-机组-航运-生态风险智能监测、风险管控技术体系;②在流域资源-环境互馈关系管理方面,研发流域“社会-经济-生态”系统协同演化理论和模拟分析技术,识别水利枢纽群规模扩大与流域和区域社会、经济和生态演化的互馈作用机制,考虑气候变化等环境因素,提出水利枢纽群安全运行对“社会-经济-生态”影响评估与调控方法。

最后,基于现代互联网、物联网和人工智能技术,建立“硬”手段和“软”措施结合的远程化、自动化和智能化的集成调控平台。提出水库-大坝-泄洪-机组-航运智能监控方法,构建上下游、干支流枢纽群一体化调控平台;建立水利枢纽流域社会经济及生态系统的大数据监测分析和集成演化模拟预测平台;建立利益相关方的协商谈判机理、技术与决策支持平台。

3.2 水利枢纽安全调控关键技术

梯级水利枢纽,尤其是以串联和并联方式混合连接的特大梯级枢纽,如长江干流的溪洛渡、向家坝、三峡、葛洲坝梯级枢纽与清江支流的隔河岩、水布垭、高坝洲梯级枢纽,其单一水库的运行风险,如坝体位移、机组振动、洪水溃决和生态流量改变等,将通过水流传播,使风险沿着枢纽群逐级传递、累积或叠加。风险传递、累积或叠加的机理和复杂的拓扑关系亟待考虑暴雨、洪水、地震以及生态破坏等多源组合输入与梯级累积效应,因此需要研究枢纽工程长期安全运行以及枢纽影响区域社会经济可持续发展的主要风险源,研究风险的发生机理、传播途径及影响程度,揭示梯级枢纽群规模扩大导致运行风险增加的物理机制,提出特大水利枢纽工程长期运行安全和可持续发展的多源风险评估理论和技术方法,建立特大水利枢纽工程群的长期运行安全调控平台。

影响水利枢纽安全的风险有库区风险、大坝风险、泄洪风险、航运风险、机组风险以及其他极端工况引起的诸多风险事件。就库区安全方面,亟须建立库区地质环境灾害智能预警模型;在大坝安全方面,以反演分析为手段确立坝-基真实参数,形成枢纽蓄水与库岸变形间的映射关系,建立基于大坝真实工作性态的水利枢纽智能监控模型;在泄洪、机组和航运安全方面,确立三者耦合的约束边界,并开展泄洪设施防蚀、防冲及抗振等运行安全评估,建立机组运行状态与相关安全边界条件之间的映射模型,提出兼顾泄洪减振、泄洪雾化控制及航运安全的协同调控和泄洪设施安全运行工程措施。具体来说,有库区地质灾害预警调控技术、高拱坝安全预警调控技术、高重力坝动态调控技术、泄洪与通航设施安全调控技术、多元耦合减振安全调控技术、机组设备健康诊断与调控技术和极端作用下枢纽应急调控技术等。

在枢纽安全模拟与调控方面,主要是研究建立“大坝-坝基-水库”力学特征分析模型、混凝土裂缝发生发展模拟模型、机组运行和振动诊断模型、水库调蓄和径流演进模型,并研究这些模型的集成方法,模拟分析水利枢纽群运行中风险发生的主要工程部位和管理环节,反演风险在枢纽群中的传递链路,识别导致风险放大的关键环节,研究风险链路控制技术;研究枢纽群安全运行的指标和阈值,实时开展水利枢纽库群安全调控,确保流域库群安全;按照“全面感知、真实分析、实时控制”的闭环智能管理要求,综合考虑枢纽多维安全约束、多效益目标以及枢纽群叠加效应等边界条件,研发水利枢纽多维安全调度平台。

4 结 语

我国水利枢纽群和水电基地规模的迅速扩大,为水电工程安全运行提出了新的技术要求,应从风险控制与协同调控的技术理论和方法体系上进行创新。水利枢纽安全调控技术源于我国水电开发的现实需求,该技术不仅对我国长江流域的水电产业发展和流域可持续管理具有重要支撑作用,也将为“一带一路”国际水电工程建设提供中国自主知识产权的核心技术,还可为美国、加拿大等发达国家提供水电枢纽运行管理技术的升级服务,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 王旭,杨伟利,蔡衡.金沙江中游梯级水电站集控中心规划研究综述[J].水力发电,2015,41(5):40-43.
(WANG Xu, YANG Weili, CAI Heng. Overview of

- planning and research on centralized control center of cascade hydropower stations in the middle reaches of jinsha river[J]. *Water Power*, 2015, 41(5):40-43. (in Chinese))
- [2] 肖刚,邢晶.金沙江区域梯级水电站迈入“调控一体化”时代[J]. *中国三峡*, 2013(9):27-34. (XIAO Ge, XING Jing. The cascade hydropower stations of Jinsha river have entered the era of “integration of dispatching and supervisory control”[J]. *China Three Gorges*, 2013(9):27-34. (in Chinese))
- [3] 钟青祥,何红荣,杨忠伟,等.大渡河流域梯级水电站集控中心“调控一体化”系统的建设与运行[J]. *水电自动化与大坝监测*, 2014, 38(1):63-66. (ZHONG Qingxiang, HE Hongrong, YANG Zhongwei, et al. Construction and operation of control and dispatch integration systems in dadu river cascade hydropower plants centralized control center [J]. *Hydropower Automation and Dam Monitoring*, 2014, 38(1):63-66. (in Chinese))
- [4] 何光宏.乌江流域梯级自动发电控制研究与应用[J]. *水电与新能源*, 2014(7):1-4. (HE Guanghong. Study on automatic generation control and its application in cascade hydropower stations in Wujiang River [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014(7):1-4. (in Chinese))
- [5] 王雁,姚碧勇.梯级水电站集控中心计算机监控系统的设计与实现[J]. *水电厂自动化*, 2017, 38(4):11-13. (WANG Yan, YAO Biyong. Design and implementation of computer monitoring system for cascade control center of cascade hydropower stations [J]. *Hydropower Plant Automation*, 2017, 38(4):11-13. (in Chinese))
- [6] 邓志华,田启荣.跨流域梯级电站群远程集控管理模式的探索与实践[J]. *水电站机电技术*, 2014, 37(3):15-17. (DENG Zhihua, TIAN Qirong. Exploration and practice of remote centralized control mode for inter basin cascade hydropower stations[J]. *Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station*, 2014, 37(3):15-17. (in Chinese))
- [7] 周兴波,陈祖煜,黄跃飞,等.特高坝及梯级水库群设计安全标准研究Ⅲ:梯级土石坝连溃风险分析[J]. *水利学报*, 2015, 36(7):765-772. (ZHOU Xingbo, CHEN Zuyu, HUANG Yuefei, et al. Evaluations on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts, part Ⅲ: risk analysis of embankment break in cascade[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 36(7):765-772. (in Chinese))
- [8] WEN Xin, FANG Guohua, GUO Yuxue, et al. Adapting the operation of cascaded reservoirs on Yuan River for fish habitat conservation[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 337: 221-230.
- [9] 纪道斌,龙良红,徐慧,等.梯级水库建设对水环境的累积影响研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(3):7-14. (JI Daobin, LONG Lianghong, XU Hui, et al. Advances in study on cumulative effects of construction of cascaded reservoirs on water environment[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(3):7-14. (in Chinese))
- [10] 刘晓群,戴斌祥.三峡水库运行以来洞庭湖水文条件变化与对策[J]. *水利水电科技进展*, 2017, 37(6):25-31. (LIU Xiaoqun, DAI Binxiang. Variation of hydrological conditions of Dongting Lake and corresponding countermeasure analysis after operation of the Three Gorges Reservoir [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(6):25-31. (in Chinese))
- [11] 李君纯,李雷.水库大坝安全评判的研究[J]. *水利水运科学研究*, 1999(1):77-83. (LI Junchun, LI Lei. A study of evaluation of reservoir dam safety [J]. *Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute*, 1999(1):77-83. (in Chinese))
- [12] 周惠成,董四辉,邓成林,等.基于随机水文过程的防洪调度风险分析[J]. *水利学报*, 2006, 37(2):227-232. (ZHOU Huicheng, DONG Sihui, DENG Chenglin, et al. Risk analysis on flood control operation of reservoir based on stochastic hydrological process [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(2):227-232. (in Chinese))
- [13] 程晓陶.我国推进洪水风险图编制工作基本思路的探讨[J]. *中国水利*, 2005(17):11-13. (CHENG Xiaotao. Basic thinking of pushing flood hazard mapping in China [J]. *China Water Resources*, 2005(17):11-13. (in Chinese))
- [14] 顾文权,邵东国,黄显锋,等.基于自优化模拟技术的水库供水风险分析方法及应用[J]. *水利学报*, 2008, 39(7):788-793. (GU Wenquan, SHAO Dongguo, HUANG Xianfeng, et al. Risk analysis on reservoir water supply based on self-optimization simulation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(7):788-793. (in Chinese))
- [15] 王丽萍,张验科,纪昌明,等.基于概率最优化方法的水库发电调度风险分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 29(16):1-6. (WANG Liping, ZHANG Yanke, JI Changming, et al. Risk analysis of reservoir generation dispatching based on probability optimization method[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 29(16):1-6. (in Chinese))
- [16] 李克飞,纪昌明,张验科.水电站水库群多目标联合调度风险评价决策研究[J]. *中国农村水利水电*, 2012(10):120-122. (LI Kefei, JI Changming, ZHANG Yanke. A study of risk assessment and decision making for hydropower reservoirs' multi-objective joint operation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(10):120-122. (in Chinese))
- [17] 闫宝伟,郭生练.考虑洪水过程预报误差的水库防洪调度风险分析[J]. *水利学报*, 2012, 43(7):803-807. (YAN Baowei, GUO Shenglian. Risk estimation of reservoir flood operation in consideration of inflow hydrograph forecasting error [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(7):803-807. (in Chinese))

- [18] 钟平安,张梦然,蔡杰,等.基于决策树的梯级水电站泄流补偿调度风险分析[J].电力系统自动化,2012,36(20):63-67. (ZHONG Pingan, ZHANG Mengran, CAI Jie, et al. Risk analysis on flow discharge compensating operation for cascade hydroelectric stations based on decision tree[J]. Automation of Electric Power System. 2012,36(20):63-67. (in Chinese))
- [19] “973”计划启动梯级水库群风险机制与安全防控理论项目[J].水利水电技术,2013(2):34. (Water Resources and Hydropower Engineering. The “973” plan initiates the project of the risk mechanism and safety prevention and control theory for cascade reservoirs[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2013(2):34. (in Chinese))
- [20] 芮钧,徐洁,李永红,等.基于一体化管控平台的智能水电厂经济运行系统构建[J].水电自动化与大坝监测,2014(4):1-4. (RUI Jun, XU Jie, LI Yonghong, et al. Economic operation system construction based on unified control and management platform in smart hydropower plant[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2014(4):1-4. (in Chinese))
- [21] 万书鹏,雷宝龙,翟明玉.调度与变电站一体化系统链路状态监测与TCP通信方案[J].电力系统自动化,2014(1):92-96. (WAN Shupeng, LEI Baolong, ZHAI Mingyu. A scheme for link monitoring and TCP communication in dispatch and substation integrated system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(1):92-96. (in Chinese))
- [22] 杜贵和,王正风.智能电网调度一体化设计与研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(15):127-131. (DU Guihe, WANG Zhengfeng. Design and research on power network dispatching integration of smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15):127-131. (in Chinese))
- [23] 曹斌,刘文霞,王睿喆,等.考虑电网运行风险的发用电一体化调度方法[J].电网技术,2015(9):2578-2584. (CAO Bin, LIU Wenxia, WANG Ruizhe, et al. A generation and load integrated scheduling method considering grid operation risk [J]. Power System Technology, 2015(9):2578-2584. (in Chinese))
- [24] 徐丹丹,米为民,邓勇,等.智能变电站与调度主站间模型/图形协调共享及无缝通信一体化建模方案[J].电网技术,2012(11):235-239. (XU Dandan, MI Weimin, DENG Yong, et al. Integrated modeling for coordinated sharing of models/images and seamless communication between smart substation and dispatch master station [J]. Power System Technology, 2012(11):235-239. (in Chinese))
- [25] 关杰林,余波,李晖,等.溪洛渡-向家坝梯级电站“调控一体化”调度运行管理模式研究[J].华东电力,2010(8):1185-1187. (GUAN Jielin, YU Bo, LI Hui, et al. Investigation on operating and scheduling management mode with integration of dispatch and control in Xiluodu-Xiangjiaba Cascade Hydropower Stations [J]. East China Electric Power, 2010(8):1185-1187. (in Chinese))

(收稿日期:2018-09-21 编辑:骆超)

(上接第10页)

- [19] 华新,周凌云,左玉辉.环境资源调控原则及机制构想:以水资源为例[J].水资源保护,2008,24(5):66-69. (HUA Xin, ZHOU Lingyun, ZUO Yuhui. Principle and mechanism of regulation of environmental resources: a case study on water resources [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(5):66-69. (in Chinese))
- [20] 尹明万,张延坤,王浩,等.流域水资源使用权定量分配方法初探[J].水利水电科技进展,2007,27(1):1-5. (YIN Mingwan, ZHANG Yankun, WANG Hao, et al. Quantitative allocation method for right to use river basin water resources [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources 2007, 27(1):1-5. (in Chinese))
- [21] 严登华,王浩,张建云,等.生态海绵智慧流域建设:从状态改变到能力提升[J].水科学进展,2017,28(2):302-310. (YAN Denghua, WANG Hao, ZHANG Jianyun, et al. Construction of an ecological sponge-smart riverbasin: from changing status to improving capability [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2):302-310. (in Chinese))
- [22] 水权制度框架研究课题组.水权水市场制度建设[J].水利发展研究,2004,4(7):4-8. (Research group on the framework of water rights system. Construction of water right water market system [J]. Research on the development of water conservancy, 2004, 4(7):4-8. (in Chinese))
- [23] 陆益龙.水权水市场制度与节水型社会的建设[J].南京社会科学,2009(7):94-100. LU Yilong. Water rights and water market system and the construction of water-saving society [J]. Nanjing Journal of Social Sciences, 2009(7):94-100. (in Chinese))
- [24] 曾玉珊,胡育荣.我国农村水权市场配置的现状与改革探析[J].开发研究,2014(5):40-43. (ZENG Yushan, HU Yurong. Analysis of the current situation and reform of rural water rights market allocation in China [J]. Research on Development, 2014(5):40-43. (in Chinese))
- [25] 林建永,余珊珊.针对世博会,上海如何构建水质和水价的统一[J].水利科技与经济,2006,12(11):724-725. (LIN Jianyong, YU Shanshan. How to deal with the relation between the water price and water quality up to world expo 2010 [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12(11):724-725. (in Chinese))
- [26] 李国锋.城市供水定价对居民资源节约行为影响的博弈分析[J].首都经济贸易大学学报,2007,9(6):103-107. (LI Guofeng. Game analysis of the effect that urban water supply pricing has on the behavior of the resident resources saving [J]. Journal of Capital University of Economics and Business, 2007, 9(6):103-107. (in Chinese))

(收稿日期:2018-04-19 编辑:郑孝宇)