梯级水利枢纽多维安全管理框架与重大挑战

樊启祥

中国长江三峡集团公司, 北京 100038

E-mail: fan_qixiang@ctgpc.com.cn

梯级开发是中国水能资源富集河流以及世界主要河流(如美国、加拿大哥伦比亚河, 美国科罗拉多河、田纳西河等)水能开发利用的主体形式。中国长江干流上中游将建成世界上最大的梯级水利枢纽群, 从三峡-葛洲坝水利枢纽到金沙江下游河段向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德等 6 座干流梯级水电站, 其总库容达 858.8 亿 m^3 , 防洪库容超过 430.5 亿 m^3 , 总装机容量达 71675 MW, 控制流域面积约 100 万 km^2 。此外, 我国在黄河、淮河、海河、珠江、黑龙江等主要河流也建设有大量代表性的梯级水利枢纽。第一次全国水利普查成果显示, 我国库容在 10 万 m^3 以上的水库就有 98002 座^[1]。大型水利枢纽是天然河流的控制性建筑综合体, 通过修筑大坝雍高水位以获得防洪、发电、供水、航运、生态等综合社会效益。为获得综合效益的最大化, 枢纽水库根据调节特性需要进行反复的蓄泄水, 这个过程蕴藏着大量的风险^[2-4]。自世界上第一座水利枢纽建成以来, 溃坝、洪水、滑坡、机组老化、沉船等安全事故时有发生, 造成了重大人员伤亡和财产损失。

2012 年, 长江上中游水库群率先实施了联合调度, 随着技术与管理进步, 在坚持安全第一的原则下, 水库调度运用方式变得越来越灵活。一方面, 水库群的联合调度运行可以实现水利枢纽风险分担, 减小单体枢纽的风险压力; 但另一方面, 随着梯级水利枢纽规模的增大及综合功能发挥的显著需求, 影响枢纽运行安全的风险源明显增多。此外, 水利枢纽调度运行的外部环境也在改变。譬如, 近年来全球气候变化加剧、人类活动导致流域下垫面显著改变等, 水利枢纽建成后的这些外部环境变化^[3], 进一步增加了梯级水利枢纽群协同安全调控的复杂性及技术难度, 若风险应对不当, 必将产生“多米诺骨牌”效应, 导致较单体水利枢纽影响更为广泛, 后果更为严重的灾害。

目前, 梯级水利枢纽风险管控与应对措施方面的技术研究还不多见, 相关理论和方法研究还处于起步阶段。已有相关研究多针对于单一水库和单一风险要素, 例如洪水风险^[4-6]、水文预报误差风险^[5,6]、滑坡风险^[7,8]、地震风险^[8,9]、漫顶风险^[9-13]、溢洪道风险^[10,11]、溃坝风险^[12,13]、生态风险^[14,15]、供水风险^[16]、污染物风险^[17]等引起的水利枢纽安全问题。实际上, 以安全风险为指引的管理模式已成为水利枢纽安全管理的主流趋势。近年来, 澳大利亚、

樊启祥 1984 年葛洲坝水电工程学院(现三峡大学)水工建筑系毕业, 2011 年获清华大学水利水电工程系博士学位。2018 年 1 月至今任中国华能集团副总经理, 曾任中国三峡集团副总经理。水利水电工程建设技术与管理专家, 享受国务院政府特殊津贴, 入选国家新世纪“百千万人才”工程、有突出贡献的

中青年专家。主持建设了三峡双线五级船闸和金沙江向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德等巨型水电工程。致力于水电工程智能建造、特高拱坝智能化建设、工程项目数字化动态管控、水工大体积与衬砌混凝土材料与温控、水电开发流域与项目环境保护、梯级电站多目标协同运行调度等关键技术, 以及大型复杂水电工程建设管理的实践与研究。

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师团对所辖的 800 余座大坝全面按照大坝安全风险组合管理的模式进行安全排序和风险决策(<https://www.ancold.org.au>)^[18]。

中国水电开发正处于干支流枢纽库群同期建设、同时运行的阶段, 开展考虑大坝、机组、船闸或升船机、泄洪、库岸、生态等多维安全的梯级水利枢纽联合调度技术研究十分重要也十分必要, 尤其是我国在西南地区已建成数量众多且运行管理效益显著、梯级枢纽调控富于挑战的高坝、大库。本文结合长江干流及金沙江下游河段大型水电工程建设管理多年的工程实践经验, 对梯级水利枢纽群运行过程中面临的多源风险进行了初步归类分析, 评述了现有风险源识别和安全状态实时判别技术, 分析了梯级水利枢纽管理模式特性, 提出要以“风险辨识-监测-分析-预警-调控”为研究主线, 分正常调控、条件调控、应急调控三类调控模式。从多源数据获取, 到梯级枢纽群多维安全调控与多效益目标综合分析, 建立完备的梯级水利枢纽群多维安全调控技术体系。随后分析了梯级水利枢纽安全运行所面临的重大技术挑战, 并指出梯级水利枢纽风险管理下一

步的研究方向。

1 梯级水利枢纽运行过程中面临多源风险

水利枢纽是天然河流上控制性建筑物的综合体,通过调节天然河道的径流过程,产生防洪、发电、航运、供水、生态等综合效益。一方面充分发挥河流水能资源的综合功能,使经济社会环境发展更可持续、更为和谐、更有效益;另一方面通过水利工程与河流的生态友好协调技术与与管理,对失衡的自然河流系统进行调整与改善。大型水利枢纽通常由挡水建筑物、泄水建筑物、发电机组、通航建筑物、过鱼设施、分层取水设施和近坝库岸防护工程等专门性建筑物组成。水利枢纽作为河流改善性、控制性建筑综合体,建筑规模大、建筑物组成类型多,部分组件失效或者出现故障都可能引发灾难。引发灾难的风险诱因,除大家熟知的洪水^[19,20]、地震^[21,22]、滑坡^[23,24]、干旱^[25,26]等自然灾害外,还有枢纽自身风险,包括坝体结构损坏、机组老化等,当风险发生后倘若处置不当,将造成不可估量的直接损失和次生灾害。例如,1959年12月,法国马尔帕赛特拱坝因坝基地质问题失事造成421人死亡;1963年10月,意大利瓦伊昂大坝水库发生山体滑坡引起库水涌浪,造成1925人死亡^[27];2009年8月,俄罗斯萨扬·舒申斯克水电站的水轮机顶盖螺栓断裂,引发重大安全事故,造成75人死亡;2017年2月,美国奥罗维尔水电站溢洪道损坏,导致防洪度汛中20万人被迫紧急转移等。

梯级水利枢纽由多个单级水利枢纽串联组成,上下级水利枢纽通过库区回水相衔接,控制范围可由河流延伸至整个流域,上游枢纽失控的风险经过水流波动进行传递,在下游枢纽进行逐级的叠加和累积,风险发生后造成灾难将更大。梯级水利枢纽的安全,除大坝及其附属建筑物安全之外,还包括库区库岸、航道通航、以及水库上下游的生态安全。梯级枢纽联合调度运行过程,需要考虑的因素更多,不合适的调度操作将产生诸多人为风险,面临突发或者自然灾害的风险管控也更为复杂。因此,需要对梯级水利枢纽运行风险进行系统的梳理,并对影响梯级水利枢纽安全运行的风险源进行识别,以在风险发生后能及时识别出风险源头,并按应急预案和防范措施进行实时有效的应对。目前,这项系统性工作开展得较少。实际上,梯级水利枢纽运行安全的风险无时无刻不在面对。2016年汛期,清江隔河岩梯级按洪水调控规程紧急泄洪,下游库区养殖网箱堵塞下游高坝洲水电站的泄洪与发电通道。梯级水利枢纽的大坝等核心建筑物溃决造成的影响更大,例如1975年8月发生在河南省的板桥-石漫滩水库群连溃事件,共溃决52座水库,死亡23万人,灾民1100万,直接经济损失占河南省当年GDP的2/3,如图1和2所示。

本文针对金沙江下游河段梯级电站高坝大库工程特性,初步梳理出梯级水利枢纽运行过程中可能面临的

图1 洪水淹没范围

Figure 1 Flood inundation area

图2 石漫滩水库溃坝

Figure 2 Dam break of Shimantan project

按照水利枢纽的结构与功能划分出风险评价单元,并对各个评价单元内部和外部的潜在风险进行整理归类。水利枢纽的风险评价单元可划分为库区、大坝(重力坝或拱坝)、生态、泄洪、机组和通航6个大类的评价单元,如图3所示。库区单元可能面临滑坡稳定风险、涌浪风险和漂浮物风险等;重力坝单元内可能面临整体失稳风险、纵缝开合风险、坝踵应力风险、渗控风险、变形协调风险和应急放空风险等;拱坝单元内可能发生稳定及应力风险、谷幅收缩变形风险、渗控风险、应急放空风险等;生态单元可能面临泄洪水体过饱和风险和、水库水温风险、生态水文过程风险等;泄洪单元可能面临洪水风险、高流速空化空蚀风险、泄洪流态风险、泄水非恒定流风险、泄洪雾化风险、泄洪冲坑与河岸稳定风险、大功率泄洪引发闸门振动风险和周边建筑物振动风险等;机组单元可能面临尾水强迫扰动风险、机组振动风险、调峰风险、厂房或周边建筑物振动耦合风险等;通航单元可能面临河道安全风险(不稳定水位变幅、流速和流量)、通航建筑物口门风险、通航建筑物对接风险和切机补水风险等。

图 3 梯级水利枢纽多维安全管理框架
Figure 3 Framework for multi-facet security management of cascaded water conservancy projects

2 水利枢纽风险源辨识、风险分析与管理

2.1 水利枢纽风险源辨识与风险定量分析方法

风险源辨识的主要任务是要识别水利枢纽的薄弱环节,建立水利枢纽可能的失效模式。如要完成此项工作,首先就需要找出水利枢纽中各部位的薄弱环节,识别出风险发生的源头。在实际操作过程中,如要准确识别风险源,通常需结合库区、大坝、防洪、机组、航运和生态等方面的监测数据进行分析,分析风险作用下的水利枢纽劣变状态,摸清楚风险累积可能导致水利枢纽失效的概率。针对梯级水利枢纽,还需要分析风险经过梯级水利枢纽逐级传递可能导致的叠加和放大效应。这些工作都是梯级水利枢纽风险辨识的重要研究内容,是绘制出风险转化拓扑关系图的基础和关键。

风险诱因、风险源和风险三者串联构成了水利枢纽的风险产生链。风险诱因大致可归结为以下 4 类,包括非正常自然条件(暴雨、洪水等)、运行故障(外送切机故障、机组切机故障、闸门故障、供电故障等)、突发事件(船或漂浮物撞击、爆炸、干旱、沉船等)、极端条件(地震等)和低水位(缺水、干旱等)。这些风险诱导因素作用于水利枢纽的薄弱部位形成风险源。实际上,梯级水利枢纽在调度运行中是一个结构复杂、随时间变化的动态系统。风险诱因如何演变为风险,以及风险在这一动态系统中又如何传递和进一步演化,是一个复杂的系统动力学问题。在识别出风险源后,可应用系统动力学理论,分析不同风险源与可能风险事件的因果关系,绘制出能够描述风险诱因演变与风险传递的拓扑关系图,勾画出梯级水利枢纽的风险流。

在辨识风险的基础上,就可以利用监测数据开展风险的定量分析,分析风险诱因转化为风险的可能性,计算出风险作用下的水利枢纽失效概率,为后续风险预警和风险处置工作提供决策依据。需要说明的是,单级水利枢纽及梯级水利枢纽的失效概率是不同的,通常需要分别分析和计算。计算单级水利枢纽失效概率时需要考虑来源于枢纽不同部位即单元的风险,还有同一部位即单元多种风险的累积;计算梯级水利枢纽的失效概率时,还需要进一步考虑上游枢纽发生的风险通过河道径流演进过程引起的风险叠加。

风险源识别的常用方法有头脑风暴法^[28]、问卷调查法^[29]、德尔斐法(专家咨询法)^[30]、失效模式与效应分析法(failure mode and effects analysis, FMEA)^[31]、故障树分析法等^[32,33]。头脑风暴法是通过专家的知识经验和对风险的认识来进行风险源穷举的办法。问卷调查法的调研对象可以更广泛,它是通过向调查者发出调查问卷,收集尽可能多的风险源调查样本;问卷调查的对象不仅可以包括枢纽运行管理人员,还可以包括来自枢纽设计、建设等单位的专业人员。德尔斐法是对专家进行 3~5 轮征求意见,对每轮

风险源的调查结果进行统计汇总,再进行下一轮征求意见,最后归纳出的是基本一致的风险源。在实际操作过程中,我们更倾向于使用德尔斐法进行关键风险要素的甄别,以在对风险要素全面分析的基础上把握重点与关键。总体来说,这几种方法操作简便,对调查者的专业性要求较低,可识别出水利枢纽大部分显而易见的风险源,但是识别出的风险源系统性较差,缺乏逻辑关系;此外,受到专家对水利枢纽风险的认知水平制约,运用这些方法开展风险排查可能会疏漏一些潜在的但是很重要的风险源。失效模式与效应分析法是将系统进行层次或功能划分,逐层或逐项功能识别可能的失效模式,并分析失效对系统的安全影响。故障树分析法是由故障或风险事件出发,根据逻辑推理,查找系统各层级、各功能引起此事件的各种失效组合。这两种方法可通过层次分析和逻辑推理有效识别水利枢纽的可能失效状态和潜在风险源,但专业性强、逻辑关系复杂。梯级水利枢纽规模大、涉及范围广,诱发梯级水利枢纽发生风险的因素众多。单一风险源识别方法难以系统、全面识别全部可能风险源。可考虑将简单调查方法(头脑风暴法、问卷调查法、德尔斐法)和系统分析方法(失效模式与效应分析法、故障树分析法)结合使用,先穷举所有可能风险源,再按层次、逻辑关系进行风险源的梳理与辨识。

风险定量分析方法有蒙特卡洛法^[34,35]、层次分析法^[29]、风险熵法^[36,37]、模糊分析法^[38]、贝叶斯风险决策法^[39,40]和神经网络^[41]等。目前,我国已在流域层面布设了相对密集的水文监测站网,大多水利枢纽运行管理机构也研发有监测枢纽运行状态的传感器网络,基本能够满足日常调度需要。但是,如要全面识别枢纽风险源,并能够实时评判其安全状态,仍需要进一步完善现有的梯级水利枢纽的监测网络,以全面覆盖梯级水利枢纽风险调控所需的环境数据(雨量、水位、流量、泥沙、温度等)、监测数据(应力、变形、位移、渗压、脉动压力、开合度、开度摆渡、抬动量、频率、电压、时域波形、振动、流速、流态、溶解氧、气体饱和度、底泥、气压、湿度、水库地震、天然地震等)、过程数据(巡视、监测、试验、检测等)和基础数据(原始地形地质数据、设计参数、材料参数、地应力等)。

2.2 梯级水利枢纽调度平台与风险管理模式评述

20 世纪 60 年代以来,欧美国家率先开展了水库优化调度技术研究,研发出一系列单一水库操作运用模式的优化方法。进入 21 世纪,国内外学者的研究范围逐渐从单级水库到梯级水库,研究方法由传统的线性规划方法(LP)^[42]、非线性规划方法(NLP)^[43],发展到动态规划方法DP^[44]和人工智能方法(GA)^[45]等,各种水库群优化调度模型和方法在生产实践中也得到不断的发展和应用。目前,围绕发电目标以及防洪目标的梯级枢纽、库群的优化调度模型已日趋成熟,广泛应用于实际调度平台当中。例如,美

国加利福尼亚中心流域工程优化调度系统(CVP)、田纳西流域机构(TVA)的水资源优化调度系统(HYDROSIM)、美国陆军工程兵团开发的防洪兴利调度系统(HEC-5)等^[46]。近20年来,随着我国诸多大型梯级水利枢纽群建成并投入使用,我国研发出具有自主产权的梯级水利枢纽调度决策支持系统^[47,48],例如溪洛渡、向家坝与三峡水库联合防洪调度系统、三峡梯级水库调度自动化系统、金沙江下游成都调控中心水库调度自动化平台、雅砻江流域数字化平台等流域水电开发综合管理决策支持系统等。这些调度平台提升了梯级水利枢纽的整体效益,并在一定程度上实现了梯级水利枢纽的洪水风险管控。但是,现有的梯级水利枢纽调度平台主要侧重于以防洪、发电为主要目标的常规优化调度,越来越难以应对日益凸显的“库区、大坝、航运、生态”等方面的多维风险。笔者基于金沙江下游水文气象、水环境等专业系统,构建了基于数字流域的梯级水库运行调度系统,集监测系统、运行调度方案及预报模型于一体,并实现实测数据系统与调度方案的实时修正与调整^[49]。

目前,我国水利枢纽的风险管控是以水电企业为责任主体、流域进行统一管理的模式进行风险应对与处置。在实际运行中,一旦水利枢纽发生重大风险,由相关责任主体及时上报并提出初步调度预案,按管理权限由责任管理机构,如流域水利委员会组织水利、国土、航道、农业、环保、水电公司、电网公司等有关部门和单位进行会商,商讨和审核调度预案的可行性,最终由流域委员会做出决策并统一组织实施。这种基于群策群力的人工应急管控模式在应对单一突发风险时,具有较为成熟的安全保障体系,可有效组织梯级水利枢纽之间进行积极应对和风险分担。但是当洪水、大坝、机组、近坝库岸、库区、航运、环境和生态等多个风险同时发生时,从监测数据到风险的人工上报,到组织会商和方案决策,整个应急处置流程较长,反应时间就会迟滞,不利于应急救援;而且,针对某一风险决策提出的应急方案一般偏于保守和安全,缺乏有效模型工具对应急方案进行计算和多方案比选,不利于实现安全和综合效益最大化之间的有效协同。在各类针对水利枢纽的应急预案中,如《水库防汛抢险应急预案》《防台、防汛、防强对流天气应急预案》《防雨雪冰冻应急预案》《防地震灾害应急预案》《防地质灾害应急预案》等,所涉及的应急内容、处置方案系统、原则、抽象和静态,需要结合实际动态变化条件与对应的突发风险事件,对预案进行应急演练,解决预案与应急处置可能存在的不一致和操作性不强等问题。基于人工分析决策的应急管控模式,难以快速有序应对梯级水利枢纽的多源风险。因此,亟需推进智能化风险管控模式,建设集风险监测、风险识别、风险预警、风险决策和风险调控为一体的智能化风险调控平台。智能化管控模式是基于现代通讯技术与数据技术,基于“全面感知、真实分析、实时控制”的闭环智能管理理论,利用专家系统发挥枢纽调控相关各方的专业优势和调控经

验,建立枢纽的数据库、规则库、判据库、案例库,来实现实时有效的枢纽运行风险控制^[50]。

3 梯级水利枢纽多维安全调控理论技术体系

3.1 梯级水利枢纽多维风险预警阈值理论

风险转化是量变到质变的过程,为实现有效的风险管控,需要根据风险水平可接受程度建立相应的风险预警阈值,提出基于多维风险预警阈值的风险分级调控方案。根据梯级水电站风险评价单元划分,风险预警阈值是一个阈值控制体系,由库区、大坝、生态、泄洪、机组和通航等评价单元的阈值组成。每个风险评价单元的预警阈值都需考虑该单元的所有风险源,是多个单风险源的阈值集成和综合。例如机组风险包括了尾水强迫扰动、振动、调峰等风险;大坝风险包括了整体失稳、纵缝开合、坝踵应力、渗控、变形协调等风险;生态风险包括了水文过程、水温、溶解气体过饱和等风险。

单风险阈值的确定方法比较多,包括比较法、波动法和专家征询法等^[51]。比较法包括中数原则法、均数原则法和多数原则法。波动法中通常包括参数原则法、波动原则法和关联原则法,常用于金融银行业^[52,53]。专家征询法是一种适用性最为宽泛,结果更为客观的风险指标阈值确定方法,综合考虑了比较法和波动法,明确地反映决策管理者的风险偏好,但方法流程相对复杂、投入成本也较大,在此基础上结合系统分析理论,衍生出了许多具体的算法,用于工业、农业、食品、经济等领域^[54]。在水利枢纽单风险要素阈值研究和实践中,也较多采用专家征询法,结合已有标准和操作经验,绘制单一风险要素曲线,进而确定出单一风险的预警阈值。

在梯级水利枢纽风险评价单元阈值确定过程中,涉及到多维风险要素,需在多种运行工况下,建立风险关联矩阵,绘制多个风险要素的响应曲面,建立风险评价单元阈值曲面簇,考虑在一定风险水平内的运行条件,确定风险运行边界,划定正常运行、条件运行和应急运行的风险阈值,实现梯级水电站风险分级调控管理。该思路方法在工业领域有初步探索实践,但风险要素响应曲面整合技术极其复杂,还会出现非凸、凹点等数学模型难以处理的问题,如何合理解决并在梯级水利枢纽风险阈值研究中推进仍需进一步探讨。

3.2 梯级水利枢纽多维安全调控技术流程

现阶段梯级水利枢纽多维安全调控已具备监测数据、调度系统和计算模型等基础条件,具备了开展多维安全调控研究的前期基础,已有条件将理论与实践相结合建立一体化调控平台。根据水利枢纽风险可控程度和处置方式,本文将水利枢纽安全运行范围划分为正常运行、条件运行

和应急运行三个阶段,见图3和4。其中,枢纽在条件运行预警阈值和应急预警阈值范围内运行,枢纽将处于条件风险运行状态,需采取调控措施将水利枢纽回归至正常运行状态范围内;超过应急运行的预警阈值,则处于应急状态,需要紧急制定应对措施。针对库区、大坝、机组、泄洪、通航、生态等方面给出调度指标,考虑单体工程各建筑物以及库岸边坡间、梯级枢纽群内工程间的相互影响,提出单级工程多目标均衡、梯级枢纽群内联动的风险调控模式和应急处置对策。

根据上述三阶段的划分,在图3所示的梯级水利枢纽多维安全管理框架下,提出构建“风险辨识-监测-分析-预警-调控处置”为一体的多维安全风险调控技术体系。这一体系,第一以梯级枢纽联合调度运行的多年数据为基础,辨识梯级枢纽运行的潜存的多源风险,研究梯级水利枢纽风险叠加和累积效应;第二开展风险源影响因素的定量监测和定性描述;第三根据风险阈值和控制范围,进行风险预警;第四结合实时多源安全监测数据,开展真实参数反演分析,实时判别并动态分析风险发展趋势;第五通过调控模型,对各类风险单元根据梯级水利枢纽调控对象(如水位、流量、变幅等)进行安全调控。这样在风险发生之前进行有效防范,在风险发生后有效控制,形成如图4所示的梯级水利枢纽风险调控技术流程。在安全运行域内,编制正常运行调控方案集,通过对防洪、发电、航运、供水、生态等效益的综合比选,选取综合效益最大的调控运行方案。在条件运行域内,根据枢纽状态和自然输入(包括降雨、温度、来水、地应力等),编制条件运行调控方案集;方案优选综合考虑风险损失和效益最大,通过综合比选和损益得失之间的综合权衡,优选出最佳方案,报批并实施。当发生极端暴雨、滑坡、泥石流等自然灾害或极端条件,枢纽处于应急运行域。在应急运行情况下,如果存在完备的应急预案,直接调出应急预案执行;如果没有成熟的预案,则需要根据枢纽保护对象的优先等级,并综合考虑工程措施和非工程措施,形成应急调控方案集,根据最大损失最小化模型计算方法,优选出损失最小调控方案,报批并实施。如在实践中得到了检验,则将该实施方案进行备案,并纳入预案数据库。在整个安全调控过程中,正常运行和条件运行、应急运行状态具有相似的调控方案编制流程,但编制过程中考虑的核心效益各不相同。正常运行考虑项目设计范围及功能目标的综合效益;条件运行基于水库规则调度优化,侧重考虑风险防控和风险条件下的效益最大化;应急运行则需要考虑安全约束,以及在事故发生过程后可采取的工程和非工程措施,形成方案比选和策略生成,得到科学的决策方案。

在此多维安全调控管理框架下,遵循图4所提出的风险调控技术流程,设计多维安全调控系统与现有系统的衔接关系与数据接口,建立梯级水利枢纽多维安全调度决策支持系统,可运用机组状态检修、大坝安全监测、库区滑

坡、地震监测预警等实时监测信息,实时判别梯级水利枢纽安全运行区间;结合多源数据融合和精细化仿真技术,可实现多源安全监测融合数据库、条件运行安全调控模型、应急运行综合处置预案等模型的组件化及无缝集成;结合风险叠加分析和采取措施后的风险减缓或消减效果模拟,统筹考虑不同调度方案的综合效益和损失;可根据风险传递和发展情况,动态修订并实时优选出当前时刻的最佳处置方案,为梯级水利枢纽多维安全调度提供全方位决策支持。

4 梯级水利枢纽多维安全调控亟待解决的重大技术难题

4.1 多源安全监测数据融合难题

多源数据融合需求提出于20世纪70年代初期,这项技术发展和进步始于80年代,2000年以后,多源数据融合技术先后应于军事指挥、气象预报等行业。美、英、日、德、意等发达国家不但在所部署的一些重大研究项目上取得了突破性进展,而且已陆续开发出一些实用性系统投入实际运行。多源数据融合技术的研究与应用,实质上包括对信息的采集、传输、综合、过滤、相关及合成等诸多环节,以便辅助人们进行态势/环境判定、规划、探测、验证、诊断。采用这项技术,准确获取各种状态信息对判别梯级水利枢纽运行状态,对运行情况和风险威胁及其重要程度进行适时的完整评价,对实施风险防范、联合调度辅助决策与制定应急处置策略,均是极其重要的。

梯级水利枢纽包括库区、大坝、泄洪、机组、航运、生态等多方面的安全监测内容,每方面内容又包括诸多层次的监测数据信息,此外不同方面的多层次数据之间还存在相关关系,为数据融合造成了进一步困难。譬如,就单大坝监测这一项内容,其监测量有应力、变形、位移、渗压、脉动压力、开合度、开度等信息;同时水利枢纽是一个整体,大坝的安全监测数据与机组、库区等方面监测数值必然具有相关联系。如何找寻其内在机理关系,并在机理分析的基础上实现多源数据融合,是梯级水利枢纽多源数据融合的难度点。

通过整合梯级水利枢纽运行风险诸要素,来建立多源安全监测数据库。基于安全监测数据库这个大数据平台,提取风险征兆信息,并借助推理工具,将征兆与知识库中的知识匹配,就可以做出有效的风险识别与故障诊断决策。此外,如果能够实现决策级的数据融合,就能将来自多种、多个传感器的监测信息进行融合,也可以将来自传感器的信息和人机界面的观测事实进行信息融合。目前来看,我国已建成的大型水利枢纽,其监测站点布设与监测信息已较为完备,可以满足常规调度运行的需要,但是要实现有效的风险决策与管控,这些已布设的监测站点和监测量

都还十分不足, 还需要根据互联网背景下, 物联技术发展与在线分析决策的调控需求, 进一步补充监测点, 并提出补充监测规划、标准及规范。

4.2 风险源辨识、风险链传递和风险定量评估难题

风险源辨识是风险管理的第一步, 也是风险防控的基础。只有正确识别出大型水利枢纽的风险源, 人们才能够主动选择适当有效的方法进行风险处置。水利枢纽的风险是多样的, 既有当前的也有潜在于未来的, 既有内部的也有外部的, 既有静态的也有动态的。风险源辨识的一项核心任务就是要从错综复杂环境中找出影响其安全运行的主要风险。较单级水利枢纽而言, 梯级水利枢纽的调度运行环境更为复杂, 单级枢纽的风险随着水流的传播, 将出现累积、叠加, 如若失控可能会导致流域洪水、大坝溃决等不可估量的损失。以往的单级水利枢纽的风险辨识, 主要是通过感性认识和历史经验来判断; 梯级水利枢纽建成之后, 风险传递链延长, 风险的累积、叠加给定量评估造成了极大的困难。目前, 运行调度人员主要是通过对各种客观的资料和风险事故的记录来分析、归纳和整理, 以及必要的专家访问, 从而找出梯级水利枢纽各种明显的和潜在的风险及其风险损失规律。

因为风险具有可变性, 因而风险辨识是一项持续性和系统性的工作, 要求风险管理者密切注意原有风险的变化, 并随时发现新的风险。这为梯级水利枢纽的风险防控提出了极大挑战。如果能在风险决策系统中加入自学习模块, 则能将多源融合数据库中的枢纽安全状态信息和决策者对风险的应对处置建立动态联系。如此, 自学习模块还应该具有另外一项特殊功能, 就是它将风险辨识结果与风险处置决策反馈给知识库, 并对相应的置信度因子进行修正, 补充、完善或更新知识库, 这样决策支持系统就能够在运行实践过程中不断总结新经验, 获得新知识, 实现专家系统的自学习功能。

4.3 梯级水利枢纽的风险防控与处置难题

梯级水利枢纽的调度运行需要服从流域的整体管理。梯级水利枢纽运行管理主体总是希望采取各种措施和方法, 消灭或减少风险事件发生的各种可能性, 或减少风险事件发生时造成的损失。然而, 风险总是存在的, 总会有有些事情是难以控制的。我国水利枢纽的规模比较大、影响范围广, 风险一旦发生将会带来巨大损失。在梯级枢纽运行调度中, 围绕着效益与安全, 可以通过梯级水利枢纽的联合调度来减小单级水利枢纽发生风险造成的损失, 从而实现风险转移和风险共担。然而, 这样的调度模式也可能制约了单级水利枢纽功能的发挥。实际上, 面对水利枢纽

风险事件可能造成的危害, 枢纽运行管理主体需要在风险防控中把握好发挥单级枢纽功能与梯级枢纽整体功能的安全度。关系把握不好, 就会造成安全裕度过大, 而梯级水资源利用效率不高。这些问题表面看起来是管理问题, 实质则是一些技术障碍需要攻克。

譬如, 水动力学模型模拟精度不高就是其中的一个关键方面。梯级水利枢纽建成后原来河流的水动力学条件发生了根本性的改变。梯级建成后, 单级水利枢纽之间通过库区回水相衔接, 且近坝库岸水流具有明显三维特征。现有的河道一维水动力学模型实际上无法准确模拟库区水流条件变化。针对这个问题, 一是有必要研发近坝重要区域三维水动力精细化技术, 针对一维、二维、三维模型计算精度及计算历时特性, 发挥一维、二维及三维模型协同作用, 以满足实时调度的决策需求。二是研发一维、二维、三维河道-库区水动力耦合模拟技术, 实现梯级水库调蓄运用下的河道径流不间断模拟, 为风险防控与处置方案校核提出工具。除此之外, 如何遴选出最佳的风险应对和处置方案同样是一项关键技术。核心问题是针对梯级水利枢纽建立起防洪、发电、航运、供水、生态等效益核算方法, 并在此基础上进行风险损失-效益的综合评估。

5 结论与展望

随着社会各方对梯级水利枢纽安全运行的日益重视, 考虑多维安全的梯级水利枢纽风险调控系统研究是整体提升流域水电源系统安全保障水平的必然要求, 是信息化快速发展条件下水利枢纽群安全管控模式转变的内在需求。本文系统梳理了梯级水利枢纽安全管理工作内容和风险处置流程, 提出我国流域梯级水利枢纽亟需建立集“风险辨识-监测-分析-预警-调控处置”为一体的多维安全风险调控平台。该风险调控平台应能结合多源监测数据, 定量分析风险发展趋势, 在风险发生之前进行有效防范, 在风险发生后有效控制。目前梯级水利枢纽优化调度模型、水动力模型、水工建筑物结构应力模型、边坡稳定模型、及工程数据监测系统等研究成果, 都可为该技术框架的实现奠定基础, 但仍需要攻克安全数据监测与多源数据融合, 风险辨识、风险链传递和风险定量评估, 以及梯级水利枢纽的风险防控与处置等技术难题。信息技术的快速进步, 将推动梯级水利枢纽群安全管控模式由人工化向智能化转变, 提高风险管控决策的科学性, 有效化解梯级水利枢纽群的运行风险。本文提出的多维安全调控模型及技术框架体系, 还需要梯级枢纽运行的责任主体结合实际工程需求开展试点研究, 需要业内科研人员积极研究解决关键技术难题, 使得该技术体系能够早日成熟, 对应的工作平台早日发挥作用。

推荐阅读文献

- 1 Bulletin of First National Census for Water (in Chinese). Beijing: China Water Power Press, 2013 [第一次全国水利普查公报. 北京: 中国水利水电出版社, 2013]
- 2 Latrubesse E M, Arima E Y, Dunne T, et al. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature*, 2017, 546: 363–369
- 3 Yang X K, Lu X X. Drastic change in China's lakes and reservoirs over the past decades. *Sci Rep*, 2013, 4: 6041
- 4 Zhong P A, Zeng J. Research on risk analysis of reservoir real-time flood control operation (in Chinese). *Water Power*, 2008, 34: 8–9 [钟平安, 曾京. 水库实时防洪调度风险分析研究. 水力发电, 2008, 34: 8–9]
- 5 Zhang Y P, Wang G L, Peng Y, et al. Risk analysis of dynamic control of reservoir limited water level by considering flood forecast error. *Sci China Technol Sci*, 2011, 54: 1888–1893
- 6 Yan B W, Guo S L. Risk estimation of reservoir flood operation in consideration of inflow hydrograph forecasting error (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2012, 43: 803–807 [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. 水利学报, 2012, 43: 803–807]
- 7 Yin Y P, Huang B L, Liu G G, et al. Potential risk analysis on a Jianchuandong dangerous rockmass-generated impulse wave in the Three Gorges Reservoir, China. *Environ Earth Sci*, 2015, 74: 2595–2607
- 8 Zhao R X, Yin Y P, Li B, et al. Research on the colluvial landslide stability during reservoir water level fluctuation (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2017, 48: 435–445 [赵瑞欣, 殷跃平, 李滨, 等. 库水波动下堆积层滑坡稳定性研究. 水利学报, 2017, 48: 435–445]
- 9 Kuo J T, Yen B C, Hsu Y C, et al. Risk analysis for dam overtopping-Feitsui reservoir as a case study. *J Hydraul Eng*, 2007, 133: 955–963
- 10 Yenigun K, Erkek C. Reliability in dams and the effects of spillway dimensions on risk levels. *Water Resour Manag*, 2007, 21: 747–760
- 11 Zargar M, Samani H M V, Haghighi A. Optimization of gated spillways operation for flood risk management in multi-reservoir systems. *Nat Hazards*, 2016, 82: 1–22
- 12 Zhou X B, Chen Z Y, Huang Y F, et al. Evaluation on the safety design standards for dams with extra height or cascade impacts. Part III: Risk analysis of embankment break in cascade (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2015, 46: 765–772 [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. 水利学报, 2015, 46: 765–772]
- 13 Shi Z M, Xiong Y F, Peng M, et al. An efficient risk assessment method for landslide dam breach: Taking the Hongshiyuan landslide dam formed by the 2014 Ludian earthquake as an example (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2016, 47: 742–751 [石振明, 胸永峰, 彭铭, 等. 堰塞湖溃坝快速定量风险评估方法——以2014年鲁甸地震形成的红石岩堰塞湖为例. 水利学报, 2016, 47: 742–751]
- 14 Hao F H, Chen G C. A fuzzy multi-criteria group decision-making model based on weighted Borda scoring method for watershed ecological risk management: A case study of Three Gorges Reservoir area of China. *Water Resour Manag*, 2010, 24: 2139–2165
- 15 Chen Y B, Peng Q D, Liao W G. The evolvement study on supersaturation of dissolved gas in the Middle Reaches of Yangtze River after the Three Gorges project running (in Chinese). *J Hydroecol*, 2009, (5): 1–5 [陈永柏, 彭期冬, 廖文根. 三峡工程运行后长江中游溶解气体过饱和和演变研究. 水生态学杂志, 2009, (5): 1–5]
- 16 Guo X N, Hu T S, Zeng X, et al. The maximum water-supply yield of the multi-reservoir system under the operating policy control with risk analysis (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2013, 44: 664–672 [郭旭宁, 胡铁松, 曾祥, 等. 基于调度规则的水库群供水能力与风险分析. 水利学报, 2013, 44: 664–672]
- 17 Ge J, Yun X Y, Liu M X, et al. Distribution, potential source and ecotoxicological risk of polychlorinated biphenyls and polybrominated diphenyl ethers in the surface water of the Three Gorges Dam region of the Yangtze River, China. *Ecotoxicology*, 2014, 23: 978–987
- 18 Li Z K, Ge W, Wang J, et al. Strategic consideration of dam safety management and risk management in China (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2017, 26: 589–595 [李宗坤, 葛巍, 王娟, 等. 中国大坝安全管理与风险管理的战略思考. 水科学进展, 2017, 26: 589–595]
- 19 Mediero L, Garrote L, Martin-carrasco F. A probabilistic model to support reservoir operation decisions during flash floods. *Hydrol Sci J*, 2007, 52: 523–537
- 20 Chen J. An approach on flood control strategy in middle and lower reaches of Yangtze River after the completion of the Three Gorges Dam project (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2014, 25: 745–751 [陈进. 三峡水库建成后长江中下游防洪战略思考. 水科学进展, 2014, 25: 745–751]
- 21 Lin P, Huang B, Li Q B, et al. Hazard and seismic reinforcement analysis for typical large dams following the Wenchuan earthquake. *Eng Geol*, 2015, 194: 86–97
- 22 Du R Q, Zhang Q, Chen S H, et al. Safety evaluation of Dagangshan arch dam resisting strong earthquakes with a rate-dependency anisotropic damage model. *Sci China Technol Sci*, 2011, 54: 531–540
- 23 Gu C S, He X F, Wu Z R, et al. Risk analysis model for landslide mass of high slope in dam area. *Sci China Ser E-Technol Sci*, 2008, 51: 25–31

- 24 Yang S H, Pan Y W, Dong J J, et al. A systematic approach for the assessment of flooding hazard and risk associated with a landslide dam. *Nat Hazards*, 2013, 65: 41–62
- 25 Huang W C, Chou C C. Risk-based drought early warning system in reservoir operation. *Adv Water Resour*, 2008, 31: 649–660
- 26 Jin J L, Song Z Z, Gui Y, et al. Research progress on the key technologies of drought risk assessment and control (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2016, 47: 398–412 [金菊良, 宋占智, 崔毅, 等. 旱灾风险评估与调控关键技术研究进展. 水利学报, 2016, 47: 398–412]
- 27 Fan Q X, Li W W, Weng W L. Survey of European dams (in Chinese). *China Three Gorges*, 2010, (3): 39–49 [樊启祥, 李文伟, 翁文林. 欧洲水坝考察纪实. 中国三峡, 2010, (3): 39–49]
- 28 Lyons T, Skitmore M. Project risk management in the Queensland engineering construction industry: A survey. *Int J Project Manag*, 2004, 22: 51–61
- 29 Rasouliazar S, Fealy S. Effective factors on rural people's non-participation of Mahabad's dam catchment in Watershed Management Projects. *Int J Agril Manag Dev*, 2015, 5: 19–26
- 30 Hallowell M R, Gambatese J A. Qualitative research: Application of the Delphi method to CEM research. *J Constr Eng Manag*, 2009, 136: 99–107
- 31 Carbone T A, Tippet D D. Project risk management using the project risk FMEA. *Eng Manag J*, 2004, 16: 28–35
- 32 Fu H H, Li Z W, Hu J M. Dam break risk analysis of small reservoirs based on FTA (in Chinese). *Water Res Power*, 2011, 29: 41–43 [傅惠寰, 李志威, 胡进民. 基于失效树的小型水库溃坝风险分析. 水电能源科学, 2011, 29: 41–43]
- 33 Abdollahzadeh G, Rastgoo S. Risk assessment in bridge construction projects using fault tree and event tree analysis methods based on fuzzy logic. *J Risk Uncertain Eng Syst, Part B: Mech Eng*, 2015, 1: 600–603
- 34 Diao Y F, Wang B D. Risk analysis of flood control operation mode with forecast information based on a combination of risk sources (in Chinese). *Sci China Technol Sci*, 2010, 40: 1140–1147 [刁艳芳, 王本德. 基于不同风险源组合的水库防洪预报调度方式风险分析. 中国科学: 技术科学, 2010, 40: 1140–1147]
- 35 Wang D B, Zhang J. Risk analysis on classified forecast dispatching mode based on stochastic simulative method (in Chinese). *J Hydroel Eng*, 2009, 28: 8–13 [王本德, 张静. 基于随机模拟的分类预报调度方式风险分析. 水力发电学报, 2009, 28: 8–13]
- 36 Yang Y, Ren Q W, Tian Y, et al. Risk analysis for a cascade reservoir system using the brittle risk entropy method. *Sci China Technol Sci*, 2016, 59: 882–887
- 37 Wang L P, Zhang Y K, Ji C M, et al. Simulate maximum entropy method and its application to reservoir flood risk calculation (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2011, 42: 27–32 [王丽萍, 张验科, 纪昌明, 等. 模拟最大熵法及其在水库泄洪风险计算中的应用. 水利学报, 2011, 42: 27–32]
- 38 Zhang R, Zhang S H, Wang B D, et al. Analysis of the dam overtopping failure fuzzy risk under consideration of the upstream dam-break flood (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2016, 47: 509–517 [张锐, 张双虎, 王本德, 等. 考虑上游溃坝洪水的水库漫坝失事模糊风险分析. 水利学报, 2016, 47: 509–517]
- 39 Wang B D, Guo X L, Zhou H C, et al. Risk analysis on the dynamic control of limit water level based on Bayes theorem (in Chinese). *J Hydroel Eng*, 2011, 30: 34–38 [王本德, 郭晓亮, 周惠成, 等. 基于贝叶斯定理的汛限水位动态控制风险分析. 水力发电学报, 2011, 30: 34–38]
- 40 Kang L, He X C, Xiong Q L. Risk analysis for precipitation rich-poor encounter between source area and receiving area of the middle route of South-to-North Water Transfer project based on Bayes-net theory (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2010, 41: 908–913 [康玲, 何小聪, 熊其玲. 基于贝叶斯网络理论的南水北调中线工程水源区与受水区降水丰枯遭遇风险分析. 水利学报, 2010, 41: 908–913]
- 41 Su H Z, Wu Z L, Wen Z P, et al. The application of genetic algorithm in establishment of neural network forecast model for dam safety monitoring (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2001, (8): 44–48 [苏怀智, 吴中如, 温志萍, 等. 遗传算法在大坝安全监控神经网络预报模型建立中的应用. 水利学报, 2001, (8): 44–48]
- 42 Needham J, Watkins D, Lund J, et al. Linear programming for flood control in the lows and Des Moines rivers. *J Water Res Plan Man*, 2000, 126: 118–127
- 43 Barros M, Tsai F, Yang S, et al. Optimization of large-scale hydropower system operation. *J Water Res Plan Man*, 2003, 129: 178–188
- 44 Chandramouli V, Raman H. Multi-reservoir modeling with dynamic programming and neural networks. *J Water Res Plan Man*, 2001, 127: 89–98
- 45 Li X, Wei X. An improved genetic algorithm-simulated annealing hybrid algorithm for the optimization of multiple reservoirs. *Water Res Man*, 2008, 22: 1031–1049
- 46 Guo S L, Chen J H, Liu P, et al. State-of-the-art review of joint operation for multi-reservoir systems (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2010, 21: 496–503 [郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联合优化调度研究进展与展望. 水科学进展, 2010, 21: 496–503]
- 47 Wang W G, Zeng W M, Dai W, et al. An integrated automation system for electric power dispatching based on data storage (in Chinese). *Autom Electr Power Syst*, 2003, 12: 67–70 [王为国, 曾伟民, 代伟, 等. 基于数据仓库的一体化电力调度自动化系统. 电力系统自动

化, 2003, 12: 67–70]

- 48 Guan J L, Yu B, Li H, et al. Investigation on operating and scheduling management mode with integration of dispatch and control in Xiluodu-Xiangjiaba cascade hydropower stations (in Chinese). *East China Electr Power*, 2010, (8): 1185–1187 [关杰林, 余波, 李晖, 等. 溪洛渡—向家坝梯级水电站“调控一体化”调度运行管理模式研究. *华东电力*, 2010, (8): 1185–1187]
- 49 Fan Q X, Jin H P, Weng W L, et al. Architecture design and application of cascade hydropower project management system based on digital river basin (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2016, 35: 136–145 [樊启祥, 金和平, 翁文林, 等. 基于数字流域的梯级水电工程管理系统设计与应用实践. *水力发电学报*, 2016, 35: 136–145]
- 50 Fan Q X, Qiang M S, Jin H P, et al. Intelligent management of large-scale construction projects (in Chinese). *J Hydroelectr Eng*, 2017, 36: 112–120 [樊启祥, 强茂山, 金和平, 等. 大型工程建设项目智能化管理. *水力发电学报*, 2017, 36: 112–120]
- 51 Hu L Q. Method of determining index threshold in risk early warning (in Chinese). *Financ Comput*, 2011, (9): 43–45 [胡乐群. 风险预警中指标阈值确定方法. *金融电化*, 2011, (9): 43–45]
- 52 Bystrom H N E. Managing extreme risks in tranquil and volatile markets using conditional extreme value theory. *Int Rev Financ Analy*, 2004, 13: 133–152
- 53 Bekiros S D, Georgoutsos D A. Estimation of value-at-risk by extreme value and conventional methods: A comparative evaluation of their predictive performance. *J Int Financ Market Instit Money*, 2005, 15: 209–228
- 54 Brooks C, Clare A D, Molle J W D, et al. A comparison of extreme value theory approaches for determining value at risk. *J Empir Finance*, 2005, 12: 339–352

Summary for “梯级水利枢纽多维安全管理框架与重大挑战”

Multi-dimensional safety management framework and major challenges for cascade water conservancy projects

Qixiang Fan

China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China
E-mail: fan_qixiang@ctgpc.com.cn

The safe operation of large water conservancy projects is receiving more and more attention, and historical accidents show that improper operation of the water conservancy project will bring huge loss to human life and property. In the past decades, China has built a large number of high dams and large reservoirs that are extremely difficult for operation and management. It is therefore necessary and urgent to carry out profound researches on the joint dispatching technology of cascaded water conservancy projects with the consideration of dam safety, ancillary facilities safety, generating unit's safety, near dam reservoir areas safety and flood discharge safety. Nevertheless, the safety management of cascaded water conservancy projects is an extremely risk decision task since it involves in a broadly wide range of risk issues and highly nonlinear problems. Actually, the risk of large water conservancy projects has posed a challenge to their long-term safety and stable operation.

The author has long been engaged in the operation management of water conservancy projects. Therefore, he has rich experience on the risk management. In the article, the author reveals the deficiency of the current management mode based on many years of practice on operation management of huge water conservancy projects, and further summarizes the potential risks stem from different sources during the joint operation of cascaded water conservancy projects. More importantly, the author systematically reviews the existing technology for risk identification and safety status discriminant in a real-time manner, as well as analyzes their technical feasibility. Besides that, the technical challenges faced by the safe operation of those huge water conservancy projects are analyzed in detail, and the future research direction is pointed out as well. In order to facilitate top-level design, the author also formulates the risk management content and proposes workflow of “identification-monitoring-analysis-early warning-regulation” for cascaded water conservancy projects from the perspective of multi-source risks management. The author sincerely hopes this article could provide some new insights for risk prevention and control.

cascaded water conservancy project, safe operation, risk identification, multi-source risks management

doi: 10.1360/N972018-00367