

Intelligent Construction Technology Innovation and Practice of Super-High Arch  
Dam—Intelligent Construction of Xiluodu Arch Dam (300m-Grade)

# 特高拱坝智能化建设技术 创新和实践

——300m级溪洛渡拱坝智能化建设

樊启祥 张超然 等著

Fan Qixiang Zhang Chaoran



清华大学出版社



Intelligent Construction Technology Innovation and Practice of Super-High Arch  
Dam—Intelligent Construction of Xiluodu Arch Dam (300m-Grade)

# 特高拱坝智能化建设技术 创新和实践

——300m级溪洛渡拱坝智能化建设

樊启祥 张超然 等著

Fan Qixiang Zhang Chaoran



清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

高拱坝质量与安全事关国计民生。我国拱坝建设已进入 300m 级时代,施工期温控防裂、运行期整体安全和抗震安全是其建设面临的三大挑战。温控防裂是世界性难题,采用现有技术仍然难以解决。本书旨在为特高拱坝建设提供科技支撑和系统解决方案:针对“特高拱坝温控防裂、工作性态分析、工程数据共享”等难题,基于“感知、分析、控制”的特高拱坝智能化建设理论,在“实时监测、全坝分析、智能控制、协同工作”等多学科技术上进行系统研究,介绍了以“大坝全景信息模型与智能拱坝建设信息化平台”为核心软件环境,及“大坝施工全过程综合信息感知与实时监控技术、基于海量感知数据的大坝仿真分析关键技术、大坝-基础质量智能控制技术”等智能控制装置和系统。

图书内容新颖翔实,涉及多学科交叉,涵盖移动通信技术、数据筛选分析技术、三维仿真技术、预警预判和决策支持技术、高精度定位技术等多种技术,为特高拱坝施工期质量控制、温控防裂等提供了科技支撑和系统解决方案,可供相关领域人员参考和学习。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

特高拱坝智能化建设技术创新和实践:300m 级溪洛渡拱坝智能化建设/樊启祥等著. —北京:清华大学出版社,2018

ISBN 978-7-302-46628-4

I. ①特… II. ①樊… III. ①高坝—拱坝—混凝土坝—水利建设 IV. ①TV642

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 067705 号

责任编辑:张占奎

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:30.25

字 数:733 千字

版 次:2018 年 8 月第 1 版

印 次:2018 年 8 月第 1 次印刷

定 价:268.00 元

产品编号:068973-01

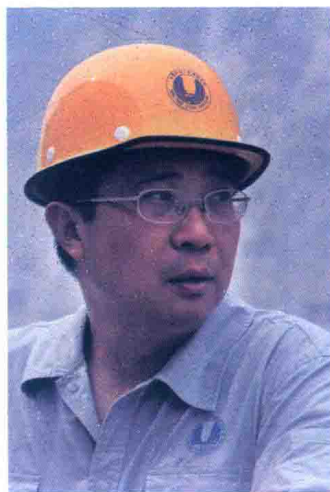
## 著 者

樊启祥	张超然	洪文浩	周绍武
廖建新	杨 宁	邬 昆	李庆斌
张国新	王仁坤	戴科夫	彭 华
周宜红	林 鹏	刘有志	胡 昱
杨 萍	杨秀国	林恩德	

## 作者简介

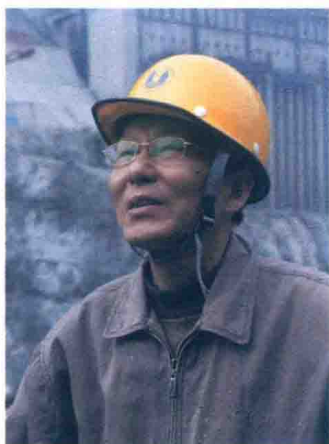


**樊启祥** 男,1963年12月生,中共党员,工学博士,教授级高工,现任中国华能集团副总经理。历任中国三峡总公司筹建处工程技术部技术处助理工程师,中国三峡总公司筹建处利源公司工程项目处副处长、监理组长,中国三峡总公司工程建设部左岸工程部临时船闸项目处处长、临时船闸与升船机项目部主任、航建项目部副主任及主任,中国三峡总公司工程建设部副主任兼航建项目部主任,2004年2月至2018年1月底任中国长江三峡集团公司(原中国三峡总公司)副总经理。长期在大型水电工程建设一线从事技术和管理工作的,是我国著名的水利水电工程专家。主持建设了三峡双线五级船闸和金沙江向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德等巨型水电工程,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等关键技术,以及大型复杂水电工程建设管理等方面的实践与研究工作,取得多项创新成果。获国家科技进步二等奖4项,省部级与行业级科技奖励32项;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”。





## 作者简介



**张超然** 男,1940年8月生,中共党员,中国工程院院士。1966年毕业于清华大学水利系,分配到水利电力部成都勘测设计院,先后担任坝工室主任、设计总工程师、院副总工程师、副院长、院总工程师等职务;1996年8月调中国长江三峡工程开发总公司,任总工程师职务,2003年当选工程院院士。一直从事水利水电工程勘测设计和科研试验工作,负责我国20世纪已建成的最大水电站——二滩水电站的设计,主持高混凝土坝设计方法和准则、高坝泄洪消能、高强度大体积混凝土特性等关键技术研究 and 成果应用上取得重大成果;主持锦屏一级、官地、沙牌、福堂、东西关、小关子等条件复杂的大中型水电站的勘测设计工

作;参与主持三峡工程建设中的重大技术问题的研究和决策,在混凝土坝快速施工、高边坡开挖与支护、大流量和高落差截流等技术研究工作中取得重大成果;参与主持金沙江溪洛渡、向家坝特大型水电站工程建设中重大技术问题的研究和决策,在特高拱坝施工和温控防裂、高拱坝智能化建设等技术研究工作中取得重大成果。

# 序

PREFACE



—

远眺溪洛渡，巍巍拱坝横矗金沙，“坝”气十足，但鲜为人知的是，开工之初，对于如何保证溪洛渡特高拱坝的建设质量，不少人存有疑虑。正是在这样的环境和背景下，中国三峡集团依托现代化的信息和管理手段，通过打造“数字溪洛渡”工程和特高拱坝智能化建设，实现实体大坝、仿真大坝、数字大坝三坝同筑，不仅有效解决了高拱坝施工建设的诸多难题，保证了蓄水、发电目标的顺利完成，更促进了工程施工效率和管理水平的极大提升，开启了高拱坝建设管理的新时代。

溪洛渡大坝为混凝土双曲坝，坝顶高程 610m，最大坝高 285.5m，为超高薄壁拱坝，工程地质条件复杂，施工与质量控制难度大。这是中国三峡集团开发建设的首座 300m 级拱坝，在此之前，集团公司并没有同类工程的建设经验。尽管集团公司开发建设的世界水电“翘楚”——三峡工程已经高质量完成主体建设任务，并安全高效投入运行，但在复杂的高拱坝施工领域，集团公司技术、管理和经验的储备仍是“白纸一张”。溪洛渡工程规模巨大，举国关注，如何保证工程的建设质量，不仅业界普遍关心，更是集团公司必须回答的问题。

与重力坝相比，拱坝，特别是高拱坝的结构、受力情况极为复杂，整个施工过程中，坝体的受力状况都在不断调整。这些特点给拱坝的施工质量控制带来很大挑战，因此，拱坝也被认为是水工界最复杂的建筑物。我曾经表示：“拱坝是真正培养工程师的地方”。拱坝自身的特点决定了溪洛渡工程的建设难度之大，而工程自身的实际情况，让建设者身上本就不轻的担子又重了几分。溪洛渡大坝的自身体积收缩变形、混凝土刚性、徐变等力学指标都不理想，对大坝抗裂不利。因此，曾有专家断言：“溪洛渡大坝浇筑之日，就是混凝土裂缝出现之时”。

如何从特高拱坝永久安全运行出发，进行有效的设计和施工质量管理、进度计划管理，实现科学的施工组织、合理的资源配置和进度安排，对拱坝施工期工作性态及混凝土施工质量与进度进行实时动态仿真监测控制是建设过程中必须关心的主要问题。在实际施工中出现不确定状况时，如何快速反应，对技术要求、施工方案进行实时动态的调整和优化，对保证拱坝建设的均质性、均衡性、连续性与整体性，对高拱坝施工质量与进度具有重要意义。

溪洛渡大坝工程应用计算机技术、仿真技术、精确温控技术、信息传输技术，从实体大坝到数字大坝，再到智能大坝，借助现代化信息和管理手段，实现了大坝建设的全方位控制与管理，在世界高拱坝建设领域居领先地位。300m 级溪洛渡拱坝智能化建设，充分利用科技发展成果、采用新型测量仪器和设备，进行规范化、系统化、信息化的数据采集和处理，建立统一的综合业务协同工作平台，实现工程数据的有效流转；基于海量数据、质量安全判断规则与标准，利用实时数据全过程开展整坝真实工作性态分析，通过专家咨询体系，对拱坝建设质量、安全

和进度进行预判与决策；运用智能设备及系统，通过预定的时程曲线和控制标准进行动态优化和调控，实现目标和过程的有效控制，并结合阈值达到预测、预警报警和动态调整的目的。

溪洛渡特高拱坝智能化建设，体现了集成化、全生命期和科学、现代化的管理体系创新，其核心理念是：“集成化”——强调基于管理活动的项目参与各方（业主牵头下的设计、监理、施工、科研、技术咨询）资源的最优整合，特别是面向建设管理过程、全员的协同工作极大提高了项目管理效率，实现了科研成果紧密结合生产实践，真正做到产学研用的良性循环，实现了各方的互利与共赢；“全生命期”——强调从设计、施工到运行全过程的方案和措施设计、工程数据采集，保证信息的“六性”（及时性、真实性、准确性、全面性、有效性和预见性）；“质量保障”——强调质量管理的动态性，关键是预警、预报，主要在预防。

高拱坝智能化建设，体现了施工全过程的全面精细化控制技术创新，其核心理念是：“精细控制”——采取一系列的智能控制技术，如通水冷却智能控制系统、混凝土智能振捣系统和灌浆记录仪数据在线监控系统，保障了施工数据的及时性和真实性，确保设计技术要求的落实；“精细化管理、精细化施工”——研发了一套行业软件，对混凝土基础处理、混凝土施工、温度控制的数据进行全面的搜集、整理、分析、展示、共享，促进了精细化施工和管理，保证了数据的准确性和全面性；“预防为主”——保证工程的质量和需要参建各方的协调配合，需要做到精心管理、精心设计、精心科研、精心施工；谨慎、客观、前瞻性的科研成果为上述要求的落实提供支持，保证了数据的有效性和预见性，为工程质量和安全的预控提供保障。

高拱坝智能化建设，体现了建设过程遵循实时、在线、个性化的行动原则，其核心理念是：“实时、在线”——通过集成一体化协同工作平台内智能化监测系统，实现了施工数据的实时、在线采集；“仿真反馈”——在施工数据实时、在线采集的基础上，实现全过程、全方位的仿真反演，做到及时预警预报、可知可控；“个性化控制”——特高拱坝结构复杂，温度、应力应变分布不均，施工进度控制困难，为全面实现工程质量、进度、安全等目标，须对悬臂高度、通水冷却方案、灌浆时机等采取个性化控制。

强大的数据采集、分析能力，预警预报，辅助施工决策，是300m级溪洛渡拱坝智能化建设的特点之一。特高拱坝规模大，各类生产数据内容庞大，采用传统的桌面数据录入模式，不仅费时费力，还存在数据准确性低、及时性差等问题。为尽可能有效地采集数据，项目大规模应用了信息采集与感知技术，实现了拱坝多专业建设全过程监测，有效解决了各专业施工过程记录、追溯以及信息实时共享等难题，实现了多模式的数据采集手段。通过自动采集和导入拌合楼的生产数据、缆机运输数据，避免了人工干预与额外操作，保证了数据采集的准确性与及时性；在大坝浇筑及温控管理过程中，借助在线式手持数据采集系统，技术人员能够对采集的目标进行统一的条码编码，实现快速扫描定位和数据的快速录入，并通过规范约束，尽可能减少出错的可能性。大幅提高人工测量的工作效率；数字测温与光纤测温相结合的逐仓混凝土温度实时监测传输系统，实现了混凝土温度自动、实时观测；智能仓面管理系统首次解决了施工过程中质量数据采集面多、变动性大、数据量大、及时性高等难题，实现了盯仓数据等质量信息实时采集与传输。同时，借助二维图表与三维可视化相结合的数据查询与分析模式，系统解决了繁杂的数据采集、统计和分析工作，使得现场生产数据及时准确、完整真实地反馈到管理层，使各级管理人员能迅速、准确地掌握到第一手数据资料，及时了解现场生产情况，并为决策层提供准确、及时的数据和辅助分析，为有效指导管理施工奠定基础。此外，为了实现有效的现场施工过程、施工质量管理，在对现场数据的有效、及时采集的基础

上,通过制定各类标准与阈值,以及根据拟合参数预测变化趋势,来实现分析预警、报警。

对拱坝真实性态的科学感知、仿真分析与动态控制,是300m级溪洛渡拱坝智能化建设的另一个特点,可实现高拱坝有序、安全、按期建设的本质要求。面对超出规范、前无经验的特高拱坝建设,为确保其全生命期安全,在系统、全面、科学的论证分析基础上,从理论和实践的结合与提升来看,溪洛渡拱坝建设至少需要对每一个浇筑块、每一层接缝、每一个施工过程和每一次结构体系的变化,都要做好两件事:一是已完成的施工,要与设计、科研的预计成果吻合,符合规律;二是对即将施工的部分进行预测分析、合理调整,使其安全可控。基于数据挖掘技术和DIM中的海量数据,针对溪洛渡特高拱坝温度应力、工作性态和进度控制,通过全坝全过程真实工作性态仿真分析,实现了高可靠度施工分析优化,实现了仿真分析向事前预测、事中控制、事后反馈的转变。在施工现场开展了全级配混凝土起裂断裂韧度、扩展以及失稳断裂韧度的研究,为正确评价大坝开裂风险、大坝已有裂缝的扩展风险提供定量科学依据;开展了横缝在不同施工期相应的张开机制的理论分析,改进了工艺措施,实现了横缝张开与接缝灌浆的全过程、全状态动态控制;提出了悬臂高度个性化控制分析概念,给出了特高拱坝全坝段个性化悬臂高度控制值的应力判断标准以及相应数值分析方法;现场监测分析坝趾灌浆作用机理,提出了等效灌浆压力求解模型,确定了溪洛渡贴角灌浆时机和灌浆压力的安全取值,并在实际中得到了检验;解决了干热河谷高拱坝高温季节浇筑温控防裂的关键技术;提出了特高拱坝施工期全过程跟踪反馈仿真与精细化仿真相结合的动态、个性化工程设计与控制理论,对运行期大坝真实应力状态进行了非线性精细仿真分析,预测了溪洛渡拱坝长期运行的安全性;进行了基于分布式光纤的大尺度和小尺度的温度状态实时、在线监测与反馈,为现场温控施工提供了指导。

举例来说,溪洛渡拱坝最高温度控制相对较低,中冷和二冷温降幅度有限,再加上实际最高温度控制一般要低于设计允许最大值,故横缝的开度及张开的时机都会受到一定的影响。溪洛渡拱坝第一批冷却横缝开度偏小,为确保后期冷却时大坝横缝张开并具备较好的可灌性,经仿真分析提出提高一期冷却目标温度,提高非约束区最高温度,改进冲毛工艺,减小横缝粘结强度,超冷 $1\sim 3^{\circ}\text{C}$ ,加强上、下游表面保温等综合措施;另外,在对横缝张开数据统计分析的基础上进行了反演分析,为避免横缝突然张开对已灌区产生不利影响,建议接缝灌浆拟灌区上部至少确保3个灌区横缝处于张开状态。对横缝开度与缝面处理的研究,明确了横缝面“净除乳皮”的质量标准。

通过预定的时程曲线和控制标准进行动态优化和调控,并结合阈值进行预测、预警和报警,是300m级溪洛渡拱坝智能化建设最终达到的目标。溪洛渡拱坝,建立了大体积混凝土振捣智能监控系统,实现了特高拱坝混凝土振捣施工过程实时在线监控与分析预警,形成了大坝混凝土振捣施工质量智能监控评价方法及预报警流程;研制了通水冷却智能控制系统,结合逐仓全过程全坝测温技术,实现了逐仓智能通水精准控制;将网络化管理技术引入灌浆记录仪领域,研制了灌浆记录仪实时在线智能监测系统,改变机组旁站的单机、单线监测方式,实现了多机、集中监测和灌浆过程控制全面自动化、数字化。

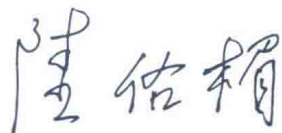
施工期温度应力控制和裂缝预防一直是高拱坝建设最为重要的问题之一。作为大坝混凝土最重要的一项温控防裂措施水管冷却,在控制大坝最高温度、冷却速率、温度梯度和接缝灌浆进度等方面发挥了极其重要的作用。在以往的工程实践中,混凝土内部温降速率受到水管布置型式、冷却水温、通水流量、天气等多方面因素的影响,当出现温降速率超标时,

往往只能凭人工经验对水管通水流量或者冷却水温进行调整,由于水管冷却的过程是一个由近及远逐渐变化的过程,施工期大坝内部埋设的水管往往多达上百、千条,仅仅依靠人工的方式进行调整往往很难避免降温过程偏离设计指导曲线的情况,这种传统的工作模式往往导致人为失误多、开裂风险大的问题。溪洛渡,通过收集、整理混凝土通水冷却方面相关科研成果,并对溪洛渡拱坝混凝土的历史通水数据进行了详细、系统、深入的研究,提出了一套有效的计算理论和控制模型,研制了与之匹配的一体化流量和温度控制装置;基于温度-时间过程线,进行实时反馈分析,动态调整通水流量,保证混凝土温控过程满足设计要求。智能通水控制系统,可实时、自动地检测混凝土大坝的温度,进而实现通水量的自精确控制,实现了“小温差、早冷却、慢冷却”精确、个性化智能控温,有效降低建设大坝的用水成本,降低通水冷却工作强度。

在混凝土浇筑方面,通过卫星定位技术(RTK 动态差分)实现对振捣台车振捣头的精确定位,获取仓面混凝土实时振捣覆盖情况,并再通过对振捣头的全程动态监控,综合分析各振捣点的振捣质量关键控制指标,结合质量控制专家知识库、相关技术规范要求及现场试验结果确定质量控制标准,实现对混凝土振捣过程质量监控与在线评估分析,有效避免漏振、过振及欠振等不规范施工行为的发生,保证混凝土施工质量及时受控。以此技术为基础,进一步研究混凝土施工“一条龙”数字监控,包括混凝土水平运输、缆机运行、平仓机、振捣(振捣车与人工振捣)监控、数据挖掘分析等,以提升混凝土施工质量控制水平。

随着科学技术的发展,大型设备和自动化控制手段应用于大坝施工,筑坝技术得到了不断进步。进入 21 世纪,特高拱坝建设和运行面临更加复杂的自然环境和社会环境,单纯依靠物质手段的进步已经难以保证大坝全寿命周期的安全可靠运行,需要运用数字化、信息化技术,提高拱坝建设管理水平,落实精细化管理措施,从而保证施工质量和大坝全寿命周期的安全可靠运行。基于全寿命周期管理理论构建的 300m 级溪洛渡拱坝智能化建设关键技术,是一个集网络、硬件、软件、项目合同各方和专家团队为一体的综合性人机交互系统,为保障工程质量、进度、安全提供了先进的系统解决方案。正如我在 2010 年和 2011 年度金沙江水电开发质量专家组第六次和第七次质量检查中所说,“特高拱坝智能化建设能够做到数字化监控,能够时时刻刻知道大坝的性态,非常了不起,世界上大坝施工还没有能够做到这个程度的。温度控制智能化,这也是很了不起的事情。到目前为止,世界上没有一个大坝能建立这样这一个在线监测系统,这对指导施工是非常有效的。”

展望 21 世纪的未来发展,我国特高拱坝的建设还面临着极为艰巨的建设任务和管理任务,积极探讨新的技术、新的结构、新的材料、新的工艺,尤其是要吸取数字化、智能化的发展成果,全面提升高坝大库的建设和管理水平。本书针对特高拱坝建设过程中温控防裂、工作性态分析以及数据采集和共享等难题,结合溪洛渡特高拱坝建设,系统总结并介绍了特高拱坝智能化建设创新和实践成果,本人衷心希望本书的出版能为高拱坝的设计人员、施工人员、监理人员和建设单位提供有价值的参考。



2018 年 4 月



当今世界,数字化、信息化水平已成为衡量一个国家综合实力、国际竞争力和现代化程度的重要标志,信息技术是推动社会生产力发展和人类文明进步的新的强大动力。党中央、国务院高度重视我国信息化工作。党的十六大就把大力推进信息化作为我国在新世纪头二十年经济建设和改革开放的一项主要任务,向全党提出了“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”的要求;党的十八大要求“推动信息化和工业化深度融合”“促进工业化、信息化、城镇化、农业现代化同步发展”;党的十九大则提出,要突出关键共性技术、现代工程技术创新,建设网络强国、数字中国、智慧社会。

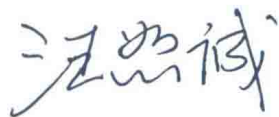
经济社会的健康快速发展,离不开水与能源的支撑,而水资源的开发利用离不开修建大型工程。我国现已建成各类水库大坝 9.8 万座,总库容超过 9300 亿  $\text{m}^3$ ,其中坝高 15m 以上的大坝就有 3.8 万座,已建成世界最高拱坝锦屏一级,最高碾压混凝土坝光照,最高面板堆石坝水布垭,还有三峡、二滩、小浪底、小湾、龙滩、溪洛渡等一批世界级的水库大坝先后建成。高坝枢纽库容大、装机容量大、水推力巨大,一旦发生严重破坏,会造成难以估计的人民生命和财产损失,所以保证高坝枢纽的施工质量和运行安全,是保障国家经济和公共安全的重大需求。

数字化、信息化是新时期进一步提高我国水利水电建设事业管理水平和技术的核心问题之一。现代信息技术的飞速发展,使我国水资源管理更加精细化。同时,数字化、智能化也大大提升了水电建设管理的水平和层次,在保障水库大坝安全、高质量建设,合理调配流域水资源、实现水电站安全经济运行方面发挥出重要作用。

作为我国第二大水电站的溪洛渡电站工程,是我国“西电东送”战略的骨干工程项目。中国三峡集团以溪洛渡大坝建设为核心打造“数字大坝”,开创了国内特高拱坝智能化建设的先河。“数字大坝”建设了一个集网络、硬件、软件、项目参建各方和专家团队为一体的综合性人机交互系统,其功能涵盖了混凝土施工、温控、灌浆、金结、监测、仿真分析、预警预控等大坝工程建设管理的全过程。有关成果在溪洛渡高拱坝建设中得到了成功应用,在很大程度上解决了特高拱坝建设管理面临的挑战,使工程建设得以顺利进行,为工程全生命周期的安全可靠运行提供了重要保障。

溪洛渡“数字大坝”和智能化建设关键技术的应用是技术与管理的创新。这一探索开创的高拱坝建设管理模式,不仅铸造了溪洛渡工程这一西部精品,也为我国水电开发积累了宝

贵经验,促进了传统基建行业向信息化、自动化、网络化、智能化方向发展;也为规范施工过程、提高生产效率、提高竞争能力,提供确实有效的管理工具。它将为我国水电开发和能源建设提供强大动力,也可为国内外同类高坝建设管理提供借鉴。希望本书的出版能够全面提升特高拱坝的建设水平和管理水平。



2018年6月



这些年我多次到过溪洛渡拱坝建设现场,也参与过相关研究、咨询工作。尽管在可研阶段认为建特高拱坝条件相对优越,地质条件较好,拱高比合适,但溪洛渡大坝位于长江干流,安全要求特别高,不利因素和建设难度也非常突出,如地震设防标准、坝身泄洪流量及泄洪功率位居世界特高拱坝之首,大坝结构复杂程度为世界拱坝之最,综合技术难度极大。溪洛渡是世界上首例全坝粗骨料利用了地下洞室玄武岩开挖料的特高拱坝。混凝土本体材料抗裂特性导致坝体温控防裂面临技术难题。

自 20 世纪中叶以来,中国的大坝建设发展迅速。特别是近 20 年来世界级的特高拱坝设计和建设集中在我国,特高拱坝研究最具挑战性的三大问题为施工阶段的温控防裂、运行阶段的坝肩稳定和特殊工况的抗震安全研究。假如这三个问题都解决好了,大坝的安全就有了保障。那么,运行以后的坝肩稳定问题,根据现代筑坝技术、现代地质勘测、试验分析和地基加固措施来看,也取得较成熟经验;对特殊条件下的抗震安全问题,在汶川地震中给出了一个初步的答案,对于拱坝来说,抗震能力较强。其余,一个保证大坝安全的核心问题是施工期的抗裂问题,这是重点关键之一,要保证拱坝能够安全、优质、高效建成,首先要保证施工过程中避免结构性的温度裂缝出现。全世界一两百年的建坝历史,高坝历史也有半个多世纪,还没有一个工程能够从施工过程的最初阶段,一直到长期运行阶段,拿出大坝性能的动态观测和数模实时反馈全过程对比结果,主要难点在于复杂因素众多,如温度应力、自身体积变形、徐变、浇筑块关系、地基约束、地基变形等。

溪洛渡的智能化建设,通过在施工浇筑、分缝、温度控制、材料各个层面上采取了措施,总结和吸取了我国拱坝施工的经验和教训,浇筑的混凝土没有发现裂缝。从溪洛渡智能大坝建设施工的第一仓混凝土开始,一直到目前的长期运行,将原型观测、数模预报结合得很好,通过设计、施工、监理和科研等单位动态协同创新,把质量安全的潜在危险解决在萌芽状态,真正做到了事前预测、事中控制、事后反馈,确保大坝施工、运行全生命期的安全。溪洛渡的智能化建设在国际坝工建设史上具有创新。“300m 级溪洛渡拱坝智能化建设关键技术”也获得了 2015 年度国家科技进步二等奖。

我很高兴看到本书即将交付印刷,该书对特高拱坝智能化建设和管理中的原创成果:智能通水温控, DIM 大坝全景信息模型,智能灌浆、智能振捣、混凝土施工“一条龙”智能控制、人员智能安全保障等做了系统总结。在溪洛渡特高拱坝建设过程中也开创了“一个中

心、两个支撑、三个支柱”的产学研用项目管理新模式。我也高兴看到这些智能建设技术已在白鹤滩、乌东德等大型水电站中推广使用,这必将促进水工建筑学科的发展,引领世界高坝智能建设的方向。

A handwritten signature in black ink, reading '张斌彦' (Zhang Binyan). The signature is fluid and cursive, with a long horizontal stroke at the beginning.

2018年3月于清华园

# 前

# 言

## FOREWORD



溪洛渡水电站是中国第二大、世界第三大水电站。其枢纽主要建筑物由混凝土双曲拱坝、地下引水发电系统和泄洪建筑物组成。混凝土双曲拱坝最大坝高 285.50m,是世界上已建的三座 300m 级特高双曲拱坝之一。大坝位于长江干流,是控制性水利水电枢纽,安全要求特别高。电站周边及水库区处在我国西南地震高发区,地震设防标准  $0.355g$ ,坝身泄洪流量  $32255\text{m}^3/\text{s}$  及泄洪功率位居世界特高拱坝之首,大坝结构复杂程度(4 层 25 孔口)为世界拱坝之最,综合技术难度极大。考虑工程安全直接关系到国家经济命脉和长江流域的安危,必须不折不扣把溪洛渡水电站建成西部典范工程和国际一流水电站。

溪洛渡拱坝的挑战前所未有的,它是我国首批挑战 300m 级拱坝建设的依托工程,也是世界上孔洞最多、泄流最大的拱坝。“世界的水电在中国,中国的水电在西部,西部的水电看溪洛渡。”溪洛渡是唯一一个坝体混凝土粗骨料采用地下洞室玄武岩开挖料的特高拱坝,与国内同类工程相比,弹模高、极限拉伸值小、徐变小、自身体积收缩变形大,混凝土自身综合抗裂能力较弱。尽管有针对性地开展了原材料选择与配合比优化设计,选用国内外类似工程已成功应用的材料,并重视吸取采用新技术、新材料,重点选择极限拉伸值大、线胀系数小、发热量低的混凝土配合比,尽可能减小坍落度和用水量,以改善混凝土抗裂性能,采用高内含氧化镁改善混凝土自身体积变形但改善效果有限,但大部分混凝土自身体积变形试验结果仍难以全部满足  $-20 \times 10^{-6} \mu\epsilon$  的设计要求。有专家甚至说,溪洛渡大坝混凝土一浇筑就要开裂。在这种背景下,业界主要负责同志们在一起交流,共识就是溪洛渡拱坝混凝土建设的目标就是不出现温度裂缝,至少不能出现危害性裂缝,绝对不能出现意想不到的情况。

为此,围绕混凝土变形性能以及混凝土防裂安全,按照“全坝全约束、全年生产冷混凝土、高内含氧化镁水泥、严格最高温度、严控温度变幅、严格表面保温养护、严格预报预警”等来实现最严格的温控措施,确保混凝土防裂安全。其中,个性化、精细化的分段缓慢通水冷却的严格控制是重点,决定着混凝土温度过程以及拱坝接缝灌浆的质量与进度,也是预报预警以及调控的主要环节。为此,从混凝土内部温度感知、通水过程的通水流量、通水水温、混凝土温度的实时自动计算、分析和比较,也就是一体流温控制装置(阀组件),对通水流量进行自动调整,实现了全部的自动化,达到了智能控制。通过这套系统,有效控制了全坝、全过程、孔口及季节气温变化下的温度目标值和温度梯度,大坝建设过程中没有出现温度裂缝。

在这个过程中,也进行了爆破开挖精细化质量控制、混凝土施工全过程的质量监测、基础处理灌浆质量的研究。在混凝土浇筑方面,运用物联网等技术,首次实现了混凝土拌合、运输、平仓、振捣的全程实时监控。对混凝土振捣过程的智能控制、反馈与预警,有效避免了

漏振、过振、欠振等问题,是大坝混凝土施工质量控制的重大创新;在灌浆方面,通过数字拾动仪与四参数灌浆自动记录仪的协同,实现了拾动、压力、流量、密度的现地和远程实时监测及控制,确保了灌浆质量;在爆破开挖方面,通过定量、个性、动态的钻爆设计,以及“三定”“三证”“三校”的管理与定量评价体系,达到“爆破就是雕刻”。

溪洛渡工程自2007年顺利截流后,进入河床坝基开挖,揭示了河床水文地质条件的情况,进行了下部扩大开挖,也对双曲拱坝下部基础部位的结构体型进行了加厚。对这种处理方式,国内专家们有不同的认识,但通过多家对比计算分析和慎重的多次技术咨询与决策,形成了扩大基础、整体结构、连续浇筑、加强固灌的共识。这种地质变化带来的设计调整,带来的影响至少是三个方面:一是地基与坝体的整体安全;二是扩大基础后下部20m深岩体范围内包含14%需要处理的弱卸荷下限岩体的基础处理;三是保证安全和质量目标下,大坝按期蓄水发电的大坝分年建设进度与度汛安全。

这些问题,时刻困扰着溪洛渡的参建各方。国内有二滩建设成果,同期也有同类工程实践,但溪洛渡300m级拱坝有自身需要跨越的挑战,超出了国内规范,如何做到稳扎稳打、一步一个脚印,真是如临深渊、如履薄冰。从理论和实践的结合与提升来看,溪洛渡拱坝建设至少需要对每一个浇筑块、每一层并缝、每一个施工过程和每一次结构体系的变化,都要做好两件事:一是已完成的施工,要与设计、科研的预计成果吻合,符合规律;二是对后续施工过程要进行预测分析、合理调整,达到安全可控。

从这些问题出发,从河床坝基第一方混凝土开始浇筑起,就组织科研团队独立开展第三方分析,与设计工作同步,有关成果通过专家系统的技术咨询后,进行决策,并转入实施。为了确保仿真分析的真实准确,开展了有关全级配混凝土断裂性能试验,也依托各类监测和实验数据,开展了全程参数反演;形成了快速建模、高速仿真、结构缝非线性模拟及施工期温度、应力、变形、渗流多场耦合分析等核心技术,实现了拱坝结构体型的有效控制和施工进度动态优化;实现了混凝土抗裂安全及大坝安全状态的分析与预报,确保了工程度汛安全和均衡高效建设。对大坝基础整体安全,开展了进度、温度、应力的耦合仿真分析与预测的基础上,围绕拱坝建设的整体性、均衡性、均匀性和连续性,开展了孔口部位、拱坝悬臂、横缝开合、陡坡坝段等的专题研究,这些精细研究,揭示了有关规律和机理,从微观上进一步保证了拱坝整体质量和安全。

为了时刻掌握大坝的质量和状态,时刻把控大坝建设过程中的主要问题,时刻协调拱坝建设各专业、各阶段的矛盾,必须时刻知晓大坝工作状态,真实把握大坝建设的脉搏,各类、各方的信息要能实时共享,以第一时间为各方判断,采取措施。DIM是大坝全景信息模型,BIM主要是面向建筑工程的,DIM是面向水电工程的。iDam包含了拱坝建设各专业模块和相关管理模块,包括温控、灌浆和混凝土施工过程等主要业务模块,并在产学研用之间,建立了规范的数据交互利用和成果发布应用的格式文件。

唯一的、统一的工程数据和共享、协同的业务平台十分重要。这两方面的主要作用,是实时获取各类工程数据,并为设计、科研、施工、管理等各方共享,在大坝建设数字化的基础上,首次实现了拱坝建设的智能化。真实、实时、全面的工程数据系统和业务协同平台,尤其是数据在项目各方间的有效交流,实现了特高拱坝真实工作性态的过程仿真和预测,有效指导了设计、施工、监理和运营单位的生产管理,确保了大坝整体安全。

近期,国际水电协会IHA北京会议展示了世界水电未来的发展前景,我国水电建设和

运行形成的杰出成果必将在世界舞台上发挥更大的作用。信息技术的迅猛发展是各专业必须面对的机遇。水电这个传统行业,承担了新的责任,引来新的机遇。面对超出规范、前无经验的特高拱坝建设,为确保其全生命期安全,在系统、全面、科学的论证分析基础上,建设阶段必须实时、真实地把握拱坝建设过程的安全状态。水电工程建设全面感知、真实分析、实时控制的特高拱坝智能化建设理论,以及在溪洛渡拱坝建设中形成的智能化成果,代表了今后筑坝技术的发展方向,使水电管理从传统粗放管理发展到智能精细管理,中国水电的升级会呈现给世界一个崭新的面貌。300m级溪洛渡拱坝智能化建设关键技术研究与应用,攻克了坝肩槽精细爆破开挖、坝体温控防裂、坝体-基础质量控制与快速施工、水工信息化建设等技术难题,实现了拱坝智能化建设,创造了大坝浇筑 680 万  $\text{m}^3$  混凝土未发现温度裂缝、常态混凝土取芯 20.59m 和国内外钢衬混凝土最短间歇期 26 天均衡施工的世界纪录,提前工期 11.5 个月确保按期蓄水发电。中国工程院陈厚群、郑守仁等院士专家向国务院提交的调研报告认为:溪洛渡开创了我国智能高拱坝建设的先河;潘家铮、马洪琪、张楚汉等院士专家对本成果予以高度肯定和评价;中国大坝协会汪恕诚理事长评价本成果是技术与管理的重大创新。国际大坝委员会名誉主席 Luis Berga 教授认为溪洛渡拱坝智能化建设已居世界领先地位,成功解决了“无坝不裂”的世界难题。

本书针对特高拱坝建设过程中温控防裂、工作性态分析以及数据采集和共享等难题,结合溪洛渡特高拱坝建设,介绍了特高拱坝智能化建设理论,进行了特高拱坝智能化建设技术创新和实践,研发相应的智能控制装置和系统,达到大坝真实工作性态的可知可控,保证溪洛渡拱坝优质、按期建成。全书内容新颖翔实,涉及多学科交叉,涵盖物联网技术、移动通信技术、数据筛选分析技术、三维仿真技术、预警预判和决策支持技术、高精度定位技术等多种技术,为特高拱坝施工期质量控制、温控防裂等提供了科技支撑和系统解决方案,也可为相关领域人员提供极具参考和学习价值的工具资料。本书具体创新内容有三点:一是针对特高拱坝建设过程中所面临的挑战,考虑传统筑坝模式难以解决温控防裂等世界难题,创建了感知、分析、控制闭环智能控制的大坝智能化建设理论;攻克了智能温控、智能振捣、数字灌浆、精细爆破等关键技术,研发了智能控制成套装置和系统,实现了通水冷却过程的智能控制,混凝土施工全过程在线监控、预警和反馈,灌浆工程现地和远程实时监控。二是针对特高拱坝施工期温度、应力、变形、渗流全过程的多场耦合分析难点,建立了特高拱坝施工进度与真实工作性态的耦合仿真分析方法,实现了全坝、全过程、实时工作性态的动态可控;开展了横缝辨识、悬臂控制、陡坡防裂、贴脚加固等精细仿真,揭示了特高拱坝整体变形协调机理,提出了个性化判别标准与动态控制方法。三是针对复杂环境条件下的数据采集、多方参与条件下的共享、协同、交互的要求,海量数据条件下的数据挖掘和数据应用问题,创建了大坝全景信息模型,研发了拱坝智能化建设与运行信息化平台,确保了全面感知、真实分析与实时控制的有效运转,实现参建各方协同工作、快速反应,高效指导了设计、施工、监理和建设单位的生产管理。

本书较为系统地介绍了特高拱坝智能化建设技术创新理论方法和工程实践应用成果。全书共分 9 章:第 1 章简要介绍拱坝的建设与发展,特高拱坝建设特点和面临的挑战,数字化、智能化建坝的发展趋势以及溪洛渡特高拱坝智能化建设,由樊启祥、张超然著;第 2 章主要对感知、分析、控制的闭环智能控制的特高拱坝智能化建设理论和体系,以及全面感知、真实分析、实时控制的主要技术体系,智能控制系统核心装置和保证感知分析控制有效运行