

# 锦屏一级水电站高拱坝施工实时控制系统的应用

郑江

(雅砻江流域水电开发有限公司,四川成都 610051)

**摘要:**锦屏一级水电站特高拱坝高305 m,为已建世界最高拱坝,其高水压力对工程施工质量要求高。工程区河谷深切、地形陡峻,有限的空间资源不利于施工布置和进度管控,骨料先天缺陷和大坝结构孔洞多等不利因素增加了高拱坝温控防裂的难度,使工程建设面临巨大的挑战。研究并在施工全过程中运用了高拱坝混凝土施工质量与进度实时控制系统,该系统具有实时性、连续性、自动化、数字化的特点,对工程施工质量和进度信息进行了采集和分析,工程蓄水后各项监测数据显示大坝工作性态正常。

**关键词:**锦屏一级水电站;特高拱坝;进度仿真;综合信息集成;实时控制分析;4.5 m 仓层厚度

**中图分类号:**TV7;TV52;TV37

**文献标识码:** B

**文章编号:**1001-2184(2015)05-0075-04

## 1 概述

高拱坝施工是一个由基础处理、混凝土浇筑、接缝灌浆以及金属结构安装等多个项目组成的庞大系统,且该系统的各施工项目交叉实施,错综复杂,因此迫切需要获取和分析工程综合信息,用以指导复杂的巨型水电工程管理决策,保障施工质量控制。目前,信息技术越来越多地运用于工程建设,李惠人等人针对大型桥梁建立了基于网络平台在线智能健康监测系统<sup>[1]</sup>;朱伯芳提出了混凝土坝数字监控的概念,利用全坝全过程的仿真计算分析,为混凝土坝温度控制决策提供依据<sup>[2]</sup>;钟登华等人提出了高拱坝施工全过程动态仿真建模理论与方法<sup>[3]</sup>。

锦屏一级水电站双曲拱坝坝高305 m,为世界第一高拱坝,厚高比为0.207;坝体共设26个坝段,坝体混凝土方量约476.47万m<sup>3</sup>。工程面临坝体厚度大、坝基两岸坡度陡、结构孔洞多、坝区昼夜温差大、冬季干燥、混凝土原材料抗裂性能不优等不利条件,温控防裂难度大<sup>[4]</sup>,施工质量控制要求高。同时,工程由于复杂地质条件边坡开挖支护等难题超出原设计预期而造成大坝施工工期延后9个月,故拱坝优质快速施工问题更为突出。为此,工程建设方成立了课题组,在已有理论的基础上,针对工程实际问题的需要,研究并在工程建设中运用了锦屏一级水电站高拱坝施工实

时控制系统。

## 2 系统总体结构和子系统设计

为满足特高拱坝建设对质量和施工进度进行在线实时监测和反馈控制的要求,实现业主和监理对工程建设的深度参与和精细管理,该系统的设计包含8个模块:仓面施工信息采集分析模块、混凝土原材料质检信息采集分析模块、混凝土试验信息采集与分析模块、高线拌和系统混凝土生产信息采集分析模块、缆机运行信息采集分析模块、大坝温控信息采集分析模块、灌浆信息采集分析模块、大坝施工进度实时控制分析模块。系统总体架构见图1。

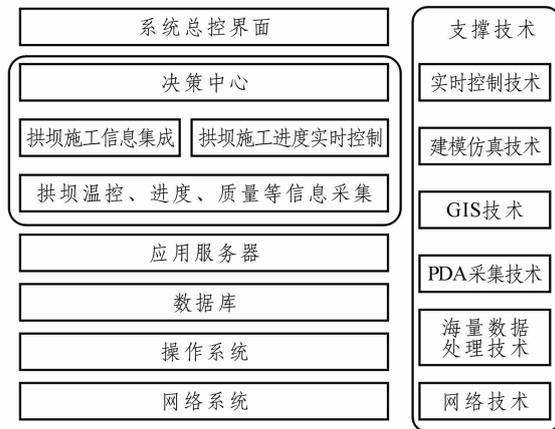


图1 高拱坝实时控制系统总体架构图

### 2.1 大坝混凝土施工动态信息 PDA 采集系统

通过监理和施工单位手持 PDA(也可通过电

收稿日期:2015-06-18

脑进行IE端录入)进行现场数据的实时采集(系统技术路线见图2),包括大坝仓面施工信息(基础面或施工缝面、模板、预埋件、开仓申请单、仓号基本信息、浇筑工序质量等工序质检信息)和现场的混凝土试验信息(混凝土的坍落度和含气量等)两部分。执行“施工单位三级自检,监理审核”的工序质检流程,当发现有录入错误或者工序质量检查不合格时,其上层管理人员将其驳回至施工单位初检人员。

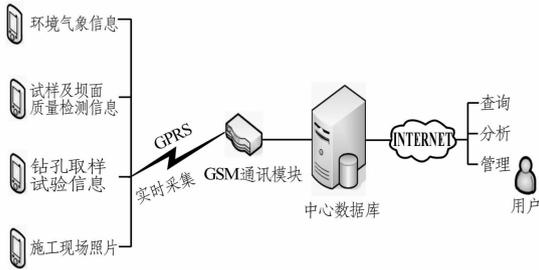


图2 PDA采集系统总体技术路线示意图

### 2.2 温控信息自动采集与分析系统

锦屏一级水电站拱坝混凝土施工期实施温度监测的温度计达3565支,温控观测的频次高。为更加高效、准确和及时地掌握混凝土内部温度,课题组研发并实施了大坝混凝土施工期温度自动化监测系统,将自动化采集设备布置在坝体廊道内,温度计电缆通过预埋向上或向下牵引至坝体廊道内的自动化采集单元,从而减少了监测设备对仓面施工的干扰,克服了自动化采集设备布置的难题。运用该系统,可以实时温控数据共享,随时检查温控情况,该系统同时具备根据监测数据和评价指标进行自动报警的功能。

### 2.3 拱坝混凝土施工进度动态仿真与实时控制分析系统

坝体混凝土浇筑是以浇筑机械为“服务台”,浇筑坝块作为浇筑服务“对象”的、复杂、多级的随机有限源服务系统。通过综合比较所设定的大坝混凝土浇筑仿真探寻的目标是:在满足各种约束限制下(1.时间约束(如备仓时间、钢衬安装时间、最长间歇期);2.三大高差限制(整体大坝高差,相邻坝段高差、悬臂高差);3.缆机工作范围的限制(最小安全间距);4.基础处理速度对坝块

选择的约束;5.气候条件对浇筑的影响(雨季月需扣除降雨对施工的影响时长)),在安排混凝土大坝浇筑块的浇筑顺序时,使大坝的浇筑工期最紧凑,使各机械设备的利用率最高。高拱坝混凝土浇筑施工仿真是一个动态优化的过程,根据实际工程的进展与进度偏差情况,动态地进行下一阶段实施方案的优化活动。高拱坝施工进度实时控制流程见图3。

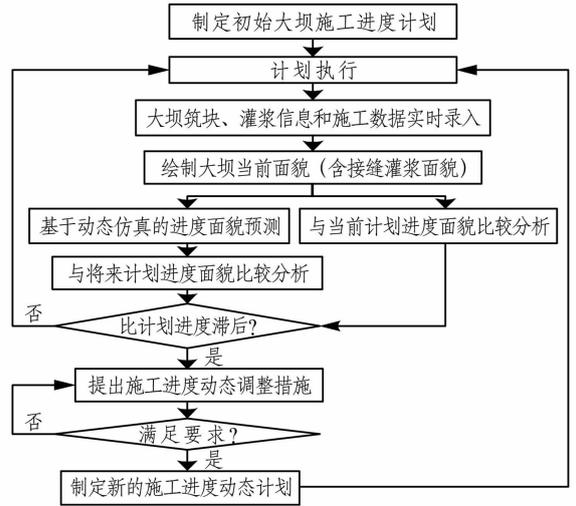


图3 高拱坝施工进度实时控制流程图

### 2.4 大坝施工综合信息集成系统

采用三维建模技术、GIS技术、海量数据仓库技术、网络技术和虚拟现实技术等,将锦屏一级水电站大坝设计和施工过程中涉及的各种工程信息(大坝仓面施工信息、混凝土原材料质检信息、混凝土试验信息、高线拌和系统混凝土生产信息、缆机运行信息、大坝温控信息、灌浆信息等)进行动态采集与数字化处理(如入库的温度数据可以以仓号为中心进行检索,并可自动绘制输出各种温度历时过程曲线,如混凝土内部平均温度历时曲线;温控数据直接导入温控仿真分析系统,开展全坝全过程温度仿真分析),构建锦屏一级水电站大坝综合数字信息平台,研发了支持IE访问的大坝综合信息集成系统。

### 3 系统应用情况

2009年8月,在恶劣的枢纽工程区建设了网络系统,为系统投入试运行提供了基础条件;2010

年2月,系统各主要功能模块基本开发完毕,系统正式投入试运行(系统主界面见图4),并根据现场需求不断反馈完善。系统运行状态良好,实现了大坝建设过程中的进度、质量、监测等信息的动态集成管理以及大坝施工进度实时跟踪和仿真预测分析功能,提高了大坝施工质量监控与进度控制的水平和精度,为保证大坝施工进度和工程质量提供了技术平台支持。

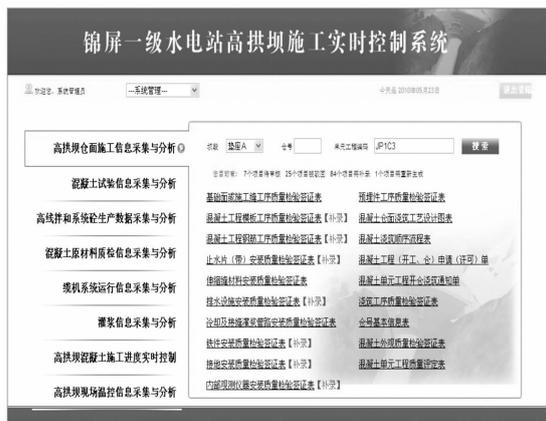


图4 系统总界面图

### 3.1 温控信息采集与分析系统使用取得的成效

系统高峰时段录入数据量达360万条,课题组运用系统提供的图表对海量数据进行了高效管理,并在参建各方之间提供了共享的数据平台。运用该系统,可以实时共享温控数据,随时检查温控情况,系统报警预警项目包括系统最高温度超标预警、降温速率超标预警、温度回升超标预警、温差超标预警、数据缺失预警等。同时,将该系统自动采集到的温度数据用于锦屏一级水电站全坝全过程的温控仿真分析,每周通报分析成果,使参建各方能够及时掌握大坝温度应力状态,满足了特高拱坝温控防裂精细化要求。

根据统计数据得知,锦屏一级水电站大坝全坝最高温度平均合格率为96.7%,温度回升符合率为96.4%,一期冷却、中期冷却和二期冷却降温速率合格率分别达到98.2%、98.6%和99.1%。大坝混凝土一期、中期和二期冷却内部温差符合率分别为95.8%、96.8%和100%,全坝无危害性裂缝出现。

### 3.2 大坝混凝土施工进度动态仿真与实时控制分析系统应用成效

由于锦屏一级水电站大坝浇筑仓数多达1496个,因此,大坝进度编制是一个异常繁琐而需要考虑多方面因素的过程。课题组在工程建设全过程中充分运用了混凝土施工进度动态仿真与实时控制分析系统,开展了拱坝混凝土浇筑进度仿真分析工作,并将其用于编制大坝混凝土浇筑月计划、年计划和总进度计划(系统仿真分析形成的拱坝每半年仿真形象面貌见图5),用于分析施工机械和仓层厚度对大坝浇筑进度的影响。

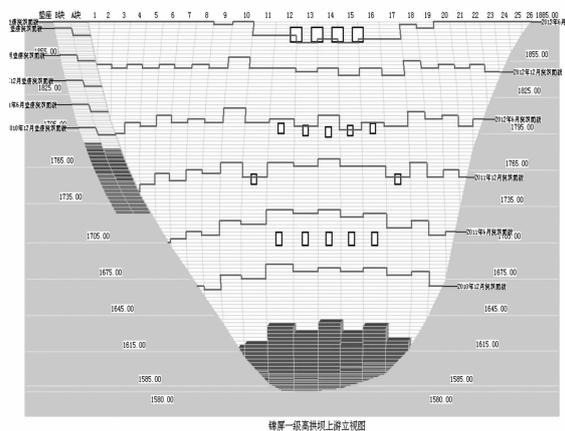


图5 拱坝每半年仿真形象面貌图

为研究按期发电的可行性,运用该系统开展了“4台缆机+3m仓层厚度”(可研阶段施工规划)、5台缆机方案+3m仓层厚度和5台缆机+非结构部位4.5m仓层厚度三种方案的比较分析,根据分析成果得知5台缆机+非结构部位4.5m仓层厚度满足要求,而后锦屏一级水电站拱坝浇筑在原4台缆机的基础上新增了1台缆机并首次在拱坝中全面推广采用4.5m仓层厚度浇筑。2013年8月,工程按照可研工期如期发电,2013年12月,大坝历时50个月全线浇筑至坝顶;2014年8月24日工程顺利蓄水至正常蓄水位,工程各项监测指标正常,大坝施工质量经受了设计水头的考验。

## 4 结语

课题组研发并在实际工程中应用了锦屏一级水电站高拱坝施工实时控制系统,实现了混凝土

施工仓面信息、混凝土原材料检验信息、混凝土试验信息、混凝土生产信息、缆机运行信息、坝体混凝土温度信息、灌浆信息、施工进度信息等与质量和进度紧密相关的各基础信息的实时采集、传输、共享与分析,并开展了全过程进度仿真分析,确定了大坝混凝土浇筑缆机配置和仓层厚度方案,工程成功赶回了因坝基开挖滞后等不利因素而影响的9个月工期,电站按照可研工期发电,工程质量经受住了300 m级特高水头的考验,丰富了特高拱坝优质快速施工关键技术,可为国内外同类工程提供借鉴。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 混凝土坝的数字监控[J]. 水利水电技术, 2008,

39(2): 15-18.  
[2] 李惠,周文松,欧进萍,等. 大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J]. 土木工程学报,2006,39(2): 46-52.  
[3] 钟登华,吴康新,练继亮. 基于多Agent的混凝土坝施工仿真与优化研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 485-489, 498.  
[4] 王继敏,段绍辉,郑江. 锦屏一级拱坝建设关键技术问题[A]. 水库大坝建设与管理中的技术进展——中国大坝协会2012学术年会论文集[C]. 郑州, 2012.

作者简介:

郑江(1986-),男,四川西昌人,工程师,硕士,从事水电工程建设技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

(上接第4页)

止出现管涌,经过现场仔细勘查后决定立即采取措施对渗漏点进行处理,通过对几种处理方案比较分析后确定采用水下不分散浆液灌注。

5.2 实施方案及效果

根据现场情况,将灌浆孔布置在原高喷灌浆孔中间,孔距1 m,深度入岩0.5 m,根据钻孔漏风、返水、返渣等情况进行分析后,确定重点处理孔深以下9~18 m范围。灌注水灰比采用0.8:1、0.6:1和0.5:1三种,絮凝剂掺量为2%,调凝剂掺量为10%。首次灌注时,由于存在水头差,部分浆液沿着基坑内的漏失通道流出,于是将第一次序孔在孔深10~15 m处改用螺杆泵灌注水下不分散膏浆,这种膏状浆液由水泥浆、膨润土、砂子、絮凝剂和水玻璃速凝剂等组成,第二次序孔根据漏失情况决定采用水下不分散水泥混合浆液或不分散速凝膏浆灌注。通过实施,在原高喷轴线一共布置了35个孔,灌注完成后,出现较大漏失通道部位完全被封堵住。1个月后,在这些部位进行了钻孔取芯检查,从该部位取出的岩芯可以看出:岩芯多呈柱状结构,卵砾石与水泥浆包裹密实,芯样抗压强度超过20 MPa,渗透系数小于 $1 \times 10^{-5}$  cm/s,完全满足该工程防渗要求。

6 结语

水下抗分散水泥混合浆液作为一种新型防渗

灌浆材料具有在水下不分散、抗水性强、胶凝过程中粘度不断增大、不容易被地下水带走、凝胶时间可以通过速凝剂调节等优点,其性能指标优于普通水泥浆、水泥砂浆和水泥-水玻璃双组分浆液,可以作为高水头、大流量和动水条件下的防渗堵漏材料。试验结果充分表明:按照不同地层条件和要求配置的不分散浆液,完全可以满足各类水工围堰的防渗要求。

复杂地层围堰防渗一直是一个难题。如何在保证围堰防渗可靠的前提下,优化设计和施工方案,采取最经济、科学、合理的方法是每一个从事防渗工程设计和施工的技术人员都值得探讨的技术问题,对于笔者提出的水下不分散水泥混合浆液其实也是具有适用范围和局限性的,比如扩散半径、灌浆压力、灌注量的控制等都需要进一步深入研究和大量的实践来验证。在此,笔者希望对这方面感兴趣的专业技术人员不断探索、研究,以推动围堰防渗堵漏技术水平的不断提高。

作者简介:

向学忠(1970-),男,重庆丰都人,基础工程分局局长,高级工程师,从事水利水电施工与技术管理工作;  
邓树密(1971-),男,四川广安人,基础工程分局总工程师,教授级高级工程师,从事水利水电、房屋建筑工程施工与技术管理工作。

(责任编辑:李燕辉)