

重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用

马洪琪¹, 钟登华^{2,3}, 张宗亮⁴, 孙玉军⁵, 刘东海^{2,3}

(1. 华能澜沧江水电有限公司, 昆明 650214; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 3. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 4. 中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 昆明 650051; 5. 青海黄河上游水电开发公司, 西宁 810008)

[摘要] 高心墙堆石坝和高混凝土坝的施工质量与施工进度控制是工程建设的重要技术问题。针对常规人工控制手段难以确保高心墙堆石坝施工质量, 以及高强度连续施工下高混凝土坝施工进度难以实时控制等问题, 提出了高心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控技术、坝料上坝运输过程实时监控技术和施工质量动态信息 PDA 实时采集技术, 实现了大坝填筑碾压全过程的全天候、精细化、在线实时监控; 在建立高混凝土坝施工进度实时控制数学模型基础上, 提出了施工进度实时预警与动态调整方法, 为高混凝土坝施工进度的实时预测、适时预警、动态调整与优化提供了分析手段; 提出了网络环境下数字大坝系统集成技术, 研制开发了数字大坝系统, 为大坝竣工验收、安全鉴定及运行管理提供了支撑平台。成果已应用于 10 余项重大工程, 取得了显著的经济效益和社会效益。

[关键词] 高心墙堆石坝; 高混凝土坝; 施工质量; 施工进度; 实时监控; 数字大坝

[中图分类号] TV5 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)12-0020-08

1 前言

我国正在和将要建设一大批世界级的超高土石坝和高混凝土坝, 如澜沧江糯扎渡心墙堆石坝(高 261.5 m, 居国内同类坝型第一)、雅砻江两河口心墙堆石坝(高 293 m), 澜沧江如美心墙堆石坝(高 300 m)、雅砻江锦屏一级拱坝(高 305 m)、黄河拉西瓦拱坝(高 250 m)等。这些工程的建设规模和难度居世界之最, 其中施工质量和施工进度控制是高坝工程建设的重要技术问题, 决定了工程的成败。对于超高土石坝而言, 其施工工程量大, 分期分区复杂, 坝体填筑碾压质量要求高。千年大计, 质量第一。施工质量控制关系大坝安全。常规质量控制手段由于人为干扰大, 管理粗放, 难以确保填筑碾压过程质量, 工程实践中迫切需要更为先进的质量控制手段。同时, 高混凝土坝施工过程十分复杂, 需考虑

结构形式、施工工艺、防洪度汛、温度控制和浇筑能力等众多影响因素, 其施工进度控制难度大, 这是高混凝土坝建设的关键技术难题。因此, 高心墙堆石坝的施工质量实时监控问题和高强度连续施工下高混凝土坝的施工进度实时控制问题急需解决。

目前, 国内外尚未有针对心墙堆石坝施工质量实时监控的相关研究。国外有关于道路施工碾压质量监控方面的研究, 即所谓道路施工先进碾压技术(advanced compaction technology, ACT), 这是一种土料压实过程中碾压机碾压质量的自动控制技术^[1-3]。但是, 由于心墙堆石坝施工质量控制要求的碾压质量参数、压实指标及施工工艺与道路施工不同, 该技术并不能适用。国内黄声亨等^[4]针对混凝土面板堆石坝施工特点, 开发了面板堆石坝填筑质量的 GPS 实时监控系統。此外, 由于目前国外在建和拟建的高混凝土坝较少, 国外有关混凝土坝施

[收稿日期] 2011-09-16

[基金项目] 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004); “十一五”国家支撑计划课题(2008BAB29B05); 国家自然科学基金项目(50879056)

[作者简介] 马洪琪(1942—), 男, 上海市人, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 华能澜沧江水电有限公司高级顾问, 研究方向为水利水电工程施工; E-mail: mahq@lejsd.cn

工进度实时控制方面的研究成果很少。在国内,近年来高混凝土坝施工进度控制问题受到人们越来越多的关注,天津大学、武汉大学、河海大学以及中国水电顾问集团成都勘测设计研究院等单位在这方面开展了较多研究^[5~8]。文章在国内外现有研究的基础上,深入开展重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用研究。

2 高心墙堆石坝施工质量实时监控技术

2.1 高心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控技术

2.1.1 高心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控总体方案

根据高心墙堆石坝填筑碾压质量监控的环节及流程,采用GPS技术、GPRS技术、自动控制技术和计算机网络技术等,提出由基准站、监控终端、现场分控站、总控中心等组成的高心墙堆石坝碾压质量实时监控的总体方案^[9],如图1所示。通过安装在碾压机械上的自主研制开发的碾压过程信息实时自动采集装置^[10],实时采集碾压机的动态坐标(经GPS基准站差分,精度可提高至厘米级)和激振力输出状态,进而进行碾压机械车速、激振力状态、

碾压遍数、压实厚度等碾压参数的实时计算和分析,判断碾压参数是否超标,并通过监控终端PC和手持PDA实时报警,以指导相关人员做出现场反馈,确保碾压质量始终真实受控^[11,12]。

2.1.2 碾压过程可视化监控的高精度快速图形算法

为解决动态巨量数据的实时快速绘制难题,提出了基于Bresenham算法的碾压机行进轨迹绘制方法,并以碾压轨迹为轴线、以半碾轮宽向两边垂直扩展形成的碾压条带,采用移动画笔法将画笔宽度设置为代表碾轮宽度的数值,画笔中心沿轨迹线段移动即可产生相应的碾压条带,如图2(a)所示。同时,应用字符生成技术在碾压机行进轨迹上动态显示当前速度、振动状态及碾压遍数,达标数据用绿色显示,不达标数据用红色显示^[12]。

采用基于像素点,计算碾压遍数,并以不同颜色表示碾压遍数。碾压条带经过所覆盖的每个像素时,首先判断该像素当前颜色,换算得到当前颜色表示的碾压遍数数值,然后将当前碾压遍数数值加1对应的颜色赋予该像素。如图2(b)所示。

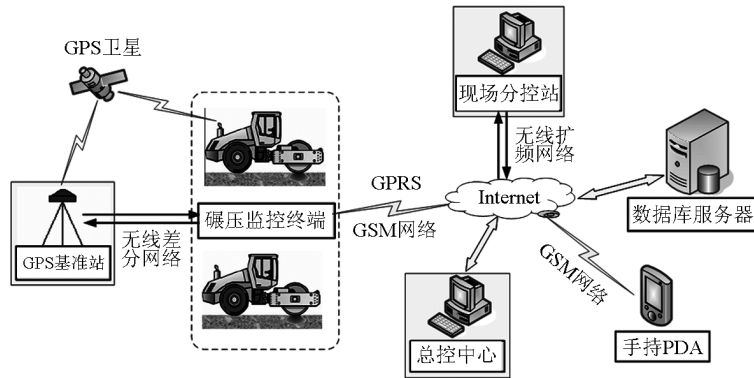


图1 高心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控总体方案

Fig. 1 Schematic diagram of real-time quality monitoring for high core rock-fill dam compaction

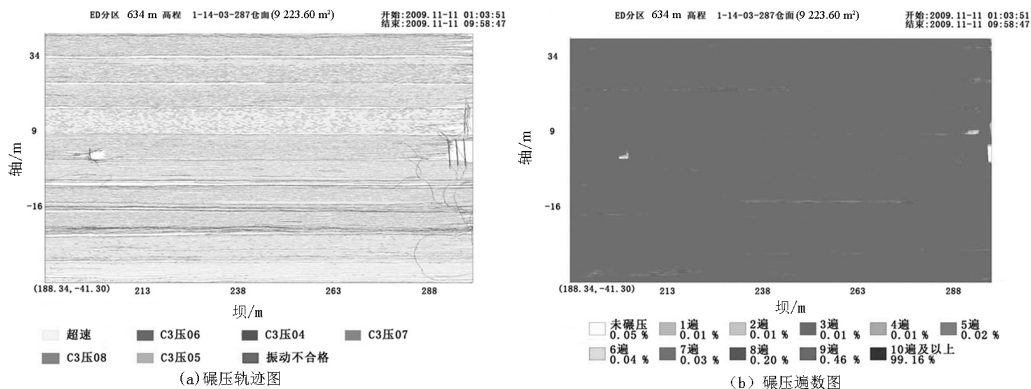


图2 碾压过程可视化监控的图形输出

Fig. 2 Graphic output of rolling process visualization monitoring

对于非监测位置处的仓面碾压高程,采用基于像素灰度阶值的插值法,以灰度阶值表示碾压高程。该方法可有效提高图形运算速度和高程计算精度。

2.2 高心墙堆石坝坝料上坝运输过程实时监控技术

采用 GPS、GIS、GPRS 和 PDA 技术,实现对运输车辆从料源点到坝面的全过程定位与装卸料监控。利用自主研发开发的坝料运输车辆动态信息的自动采集装置,结合坝区施工总布置数字地图,实时分析

判断卸料匹配性,当车辆卸料错误时,自动向监控 PC 终端和质量管理人员的手持 PDA 报警,有效避免了坝料分区复杂、料场分布多所导致的卸料分区容易混淆的情况,确保了上坝料的正确性;并实现了上坝强度和道路行车密度的动态统计,为现场合理组织施工和运输车辆优化调度提供了依据。图 3 为糯扎渡心墙堆石坝坝料上坝运输过程实时监控系统界面。

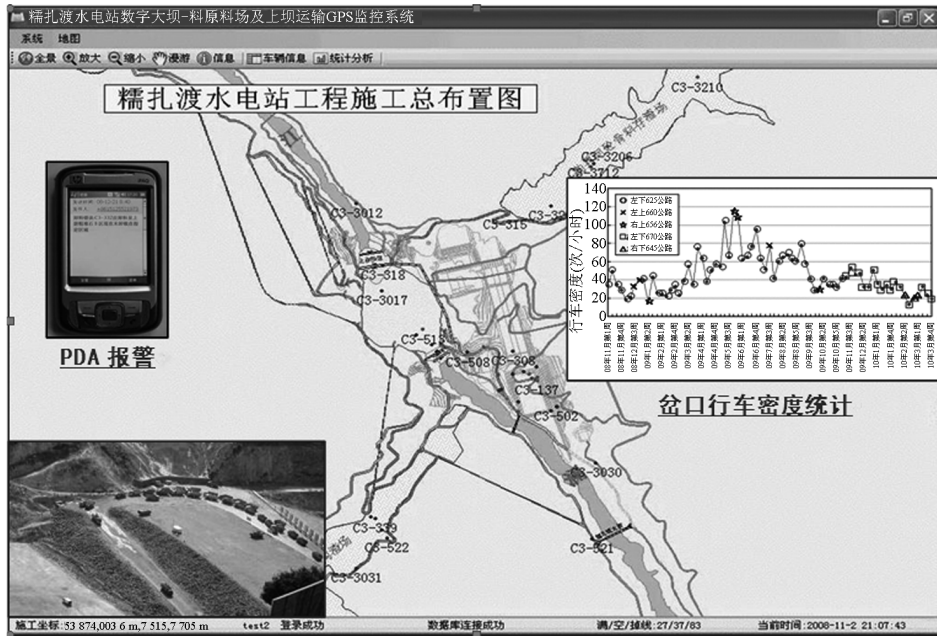


图 3 糯扎渡坝料上坝运输过程实时监控

Fig. 3 Real-time entire-processes monitoring of Nuozhadu dam material transportation

2.3 高心墙堆石坝施工质量动态信息 PDA 实时采集方法

利用 PDA 实时采集施工现场信息,包括坝料运输和车辆动态调配信息(车辆载料性质、始发料场、目的卸料分区、载料方量等)、碾压机械参数和车辆动态调配信息(碾压机械编号、机械规格、振动频率、激振力、所属碾压分区等)以及试坑质量检测信息(压实度、干密度、含水率、现场取样照片等)。

具体采集方法如图 4 所示,即现场管理人员使用 PDA 客户端程序采集上述动态信息,通过 GPRS 无线通讯方式,经 Internet 网络,将采集的信息发送至 PDA 数据库服务器,接着将采集到的数据进行应用分析。该方法实现了大坝填筑碾压质量的信息和上坝运输车辆信息的 PDA 实时采集,为动态调度坝

料运输车辆,以及管理人员及时全面掌握现场施工质量信息和反馈控制提供了一条有效的解决途径。

3 高混凝土坝施工进度实时控制分析技术

3.1 混凝土坝施工全过程实时控制数学模型

基于混凝土坝施工特征分析,建立了综合考虑结构形式、工艺要求、温度控制、防洪度汛和浇筑能力等复杂约束条件的高混凝土坝施工全过程实时控制数学模型^[13]:

控制目标函数:

$$\text{Opt}(S_{i,j}, I_{i-t_j}, D_{i-t_j}, X(P_1, \dots, P_2, P_n)) \quad (1)$$

状态转移方程:

$$H(i, t) = H(i, t - 1) + \Delta H(t), \\ t = 1, 2, \dots, T$$

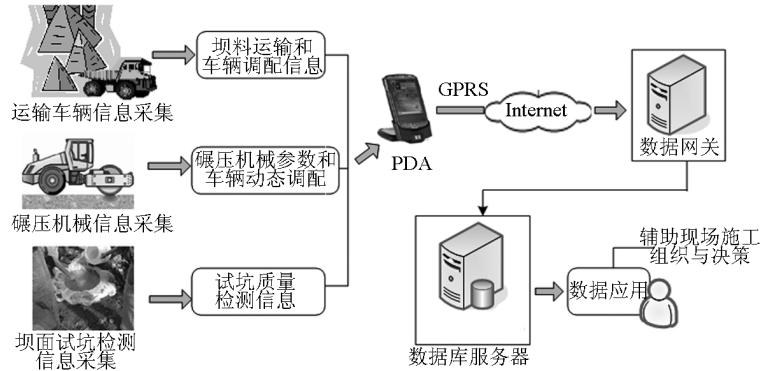


图4 心墙堆石坝施工信息 PDA 实时采集

Fig. 4 Real-time information acquisition of core rock-fill dam construction using PDA

$$\text{s. t. } \begin{cases} S(i, j, t) = 0, & \text{约束条件矩阵} \\ R(i, j, t) = 0, & \text{控制条件矩阵} \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} H(i, t) \leq H_{\max} \\ \Delta H(t) = f[D(i, j), \Gamma(i), V(i), X] \\ D(i, j) = \bigcup_{k=1}^m q(k) \\ \Gamma(i) = g_1(\tau) \\ V(i) = g_2(r) \\ q(k) = \int p_k(\Phi) d\Phi \end{cases}$$

式(2)中, $H(i, t)$ 为第 i 坝段、第 t 浇筑层的高程; H_{\max} 为最大坝高; $\Delta H(t)$ 为该浇筑层厚度; $q(k)$ 为 k 工序历时; $D(i, j)$ 为单循环历时; τ 为温度场; r 为导流标准; $p_k(\Phi)$ 为概率密度函数。目标是寻求在给定时刻 t_j 或阶段 $t_i \sim t_j$ 的浇筑面貌 (S_{t_j})、强度 ($I_{t_i-t_j}$) 及工期 ($D_{t_i-t_j}$) 最优的施工方案 X 。该模型描述了混凝土制备、运输和浇筑全过程的逻辑关系, 浇筑规则、控制准则等算法, 温度应力与施工动态过程耦合反馈机制, 以及施工导流对坝体浇筑进程的控制模式。

3.2 高混凝土坝施工进度实时预警与动态调整方法

3.2.1 高混凝土坝施工进度实时预警

高混凝土坝浇筑过程所受的影响因素众多, 其施工进度与工程量呈非线性关系, 即在相同的施工

机械条件下, 不同时段浇筑强度是不同的。因此提出前锋线分析法与实时预测相结合的方法, 进行大坝前锋线跟踪进度的计算与工期预测, 不仅可对总体的进度实施动态跟踪, 而且按坝段情况进行细分, 掌握大坝浇筑施工的全貌^[8]。

建立施工进度预警机制是实现施工进度实时控制的重要手段。施工进度预警模型以最优施工网络进度计划为依据, 且满足导流、度汛和发电等关键控制点进度的要求, 即这些控制点的实际工期必须小于等于计划目标工期, 其施工进度监控信号强度预警模型为:

$$\alpha_i = \frac{1}{\delta(T_i - T_n)} \times \frac{TKJ_i^n - TKJ_i^*}{TKJ_i^*} \times 100\% \leq \alpha_i^M \quad (3)$$

式(3)中, T_i 为第 i 个控制点工期时间; T_n 为当前时间; TKJ_i^n 和 TKJ_i^* 分别为控制点 KJ_i^* 的实时预测工期和计划目标工期; α_i 与 $T_i - T_n$ 的时间差成反比, 即预测时间离控制点工期时间越近, 信号强度越强; δ 为工期控制的允许浮动系数, 一般取 1.00 ~ 1.05; α_i^M 为控制点 KJ_i^* 的极限强度, 当 $\alpha_i > \alpha_i^M$ 时, 系统发出警报, 要求施工管理人员采取相应的进度调整与控制措施。

3.2.2 高混凝土坝施工进度动态调整

根据相应控制点的预警指标, 实时计算工期的调整量 Δt_i :

$$\Delta t_i = TKJ_i - TKJ_i^* \begin{cases} > 0 & \text{当 } (\delta - 1) \times 100\% < \alpha_i \leq \alpha_{\max, i} \text{ 时} \\ = 0 & \text{当 } (1 - \delta) \times 100\% < \alpha_i < (\delta - 1) \times 100\% \text{ 时} \\ < 0 & \text{当 } \alpha_{\min, i} \leq \alpha_i < (1 - \delta) \times 100\% \text{ 时} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, $\alpha_{\max,i}$ 和 $\alpha_{\min,i}$ 分别为控制点 KJ_i^* 的工期监控信号强度的最大值和最小值。由此可制定出下阶段大坝施工的月(周)进度计划安排,从而实现施工进度的动态跟踪、当前进度偏差对工期的影响

分析,以及进度调整措施合理性和有效性的评价,为施工方案动态调整和进度控制提供依据。图5所示为拉西瓦拱坝施工进度实时控制分析成果。

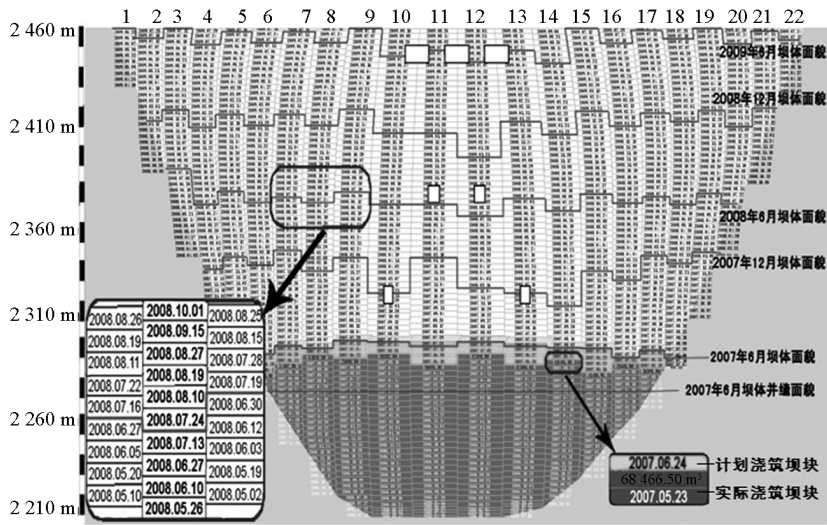


图5 拉西瓦拱坝施工进度实时控制分析成果

Fig. 5 Analysis results of real-time schedule control for Laxiwa arch dam construction

4 网络环境下数字大坝系统集成技术

4.1 数字大坝集成模型

数字大坝是一种集成先进监测感应技术、GIS技术、GPS技术、PDA技术、无线网络技术、移动通信技术、Internet技术等多种技术的手段,在网络环境下、在工程全寿命周期里,将质量、进度、安全等动态信息进行综合集成及数字化基础上,用于实现大坝进度控制、质量控制、安全评估和长期运行管理的信息支撑和计算分析平台。根据数字大坝的内涵,建立高心墙堆石坝数字大坝集成模型,如图6所示,包括技术集成、信息集成和功能集成3个部分。

4.2 高心墙堆石坝数字大坝系统研制开发

采用ActiveX控件技术和J2EE构架技术,来实现多种工程动态信息的网络三维表达与可视化综合集成。在此基础上,研制开发了高心墙堆石坝数字大坝系统,包括坝料上坝运输实时监控、心墙堆石坝填筑碾压质量实时监控、大坝施工信息PDA实时采集系统、安全监测数字化信息系统、工程地质数字化信息系统、渗控工程数字化信息系统等10个功能模块,实现了网络环境下工程质量、进度、安全监测、地质、渗控工程等多源工程信息的综

合集成,可为大坝竣工验收、安全鉴定、运行管理与健康诊断提供信息应用和支撑平台。图7为所开发的糯扎渡水电工程数字大坝系统的界面。

5 工程应用

文章研究成果先后在我国糯扎渡、拉西瓦、锦屏一级、南水北调中线等11项重大水利水电工程建设中得到了成功应用,取得了显著的经济效益和社会效益;并即将在长河坝、鲁地拉、梨园、南水北调中线河南段、缅甸密松等12项重大工程中进一步推广应用。

在糯扎渡心墙堆石坝工程应用中,实现了对大坝工程全部15台碾压机和近200台上坝运输车辆的实时监控,不仅使碾压遍数、行车速度、激振力、压实厚度等碾压参数以及卸料正确性得到了有效控制,确保各项碾压参数均符合控制标准要求,而且减少返工,优化资源配置,提高了施工效率;并建立了以数字大坝系统为核心的“监测—分析—反馈—处理”的施工质量监控体系,将监控成果纳入单元质量验收环节。图8为心墙区仓面碾压遍数的统计情况,统计总计1010个仓面后,发现碾压遍数达10遍以上面积占仓面总面积的比值的均值为97.6%,8

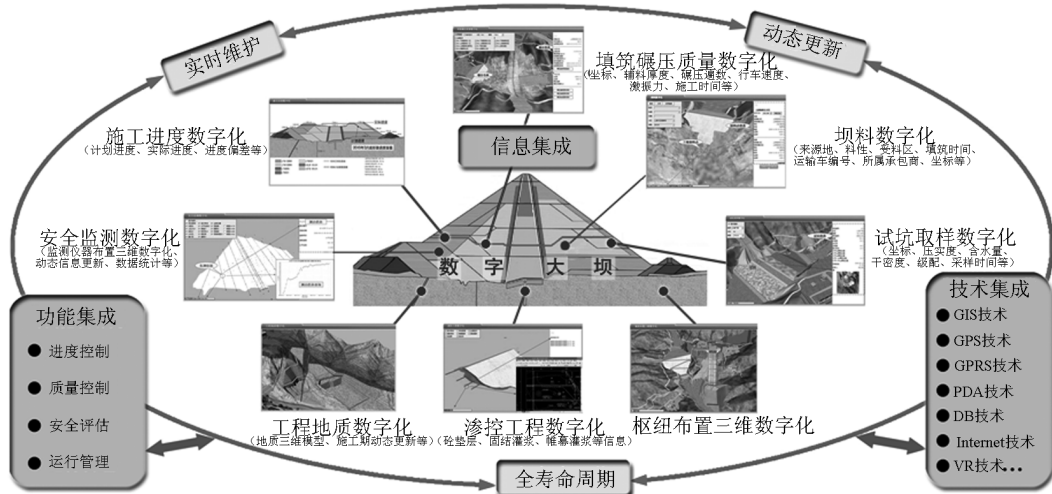


图 6 高心墙堆石坝数字大坝集成模型

Fig. 6 Digital dam integrated model of high core rock-fill dam



图 7 糯扎渡水电工程数字大坝系统界面

Fig. 7 User interface of digital dam system of Nuozhadu project

遍以上面积占仓面总面积的比值的均值为 99.7 % , 远高于两者分别为 90 % 和 95 % 的控制标准。图 9 为心墙区仓面压实厚度的统计成果, 实际仓面的平均压实厚度为 23.8 cm, 达到所要求的压实厚度为 25 cm 的控制标准。

在黄河第一高拉西瓦拱坝工程应用中, 建设各方自 2006 年 4 月 15 日大坝第一块混凝土浇筑以来, 一直采用高混凝土坝施工进度实时控制系统进行施工方案动态调整、优化与控制(见图 10), 为拉西瓦水电站提前发电发挥了重要的作用。

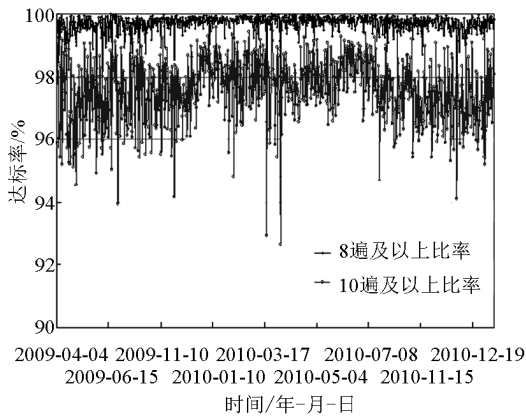


图 8 心墙区仓面碾压遍数统计

Fig. 8 Statistics results of compaction passes of work units at core wall

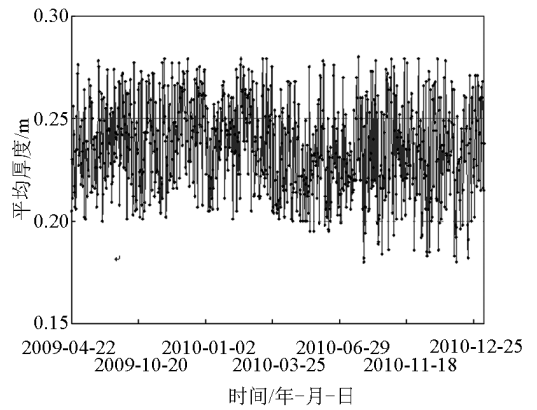


图 9 心墙区仓面压实厚度统计

Fig. 9 Statistics results of compaction thickness of work units at core wall district

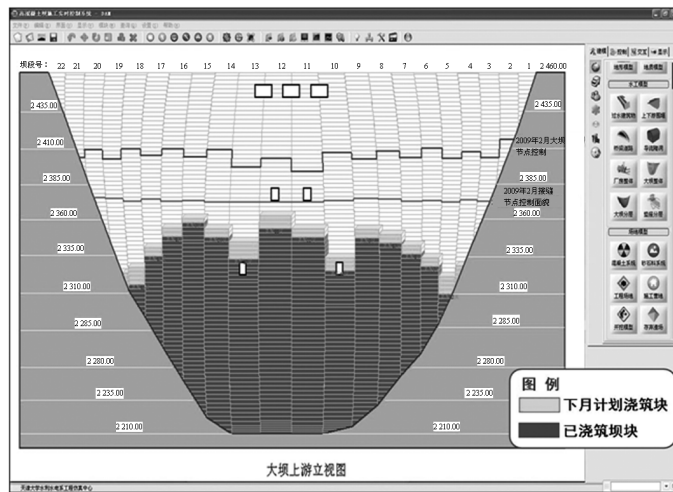


图 10 拉西瓦拱坝施工进度实时控制系统

Fig. 10 Real-time schedule control system for Laxiwa dam construction

6 结语

文章针对重大水利水电工程施工实时控制关键技术问题,提出了高心墙堆石坝施工质量实时监控技术、高混凝土坝施工进度实时控制分析技术和网络环境下数字大坝系统集成技术,研制开发了数字大坝系统,不仅实现了大坝填筑碾压全过程的全天候、精细化、在线实时监控,为确保高心墙堆石坝建设质量提供了一条新的途径,是大坝施工质量控制手段的重大创新;而且为高混凝土坝施工进度的实时预测、适时预警、动态调整与优化提供了定量分析的手段,为确保高坝安全、指导防洪度汛和按期发电提供了重要保障。成果在我国水利水电工程界产生

了重大影响,且正在推广至一批拟建的高土石坝和高混凝土坝工程,应用前景十分广阔。

参考文献

- [1] Carlos Zambrano, Vincent Drnevich, Philippe Bourdeau. Advanced compaction quality control [R]. U. S.: School of Civil Engineering, Purdue University, 2006. (<http://docs.lib.purdue.edu/jtrp/285>)
- [2] Michael A, Mooney, Robert V, et al. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering-ASCE, 2007, 133 (3): 257 - 265.
- [3] Petersen D, Siekmeier J, Nelson C, et al. Intelligent soil compaction-technology, results and a roadmap toward widespread use [J]. Journal of the Transportation Research Board, 2006, 81 -

- [4] 黄声亨,刘经南. GPS 实时监控系统及在堆石坝施工中的初步应用[J]. 武汉大学学报,2005,30(9):813-816.
- [5] 王卓甫,李红仙,杨建基. 水利水电施工进度问题研究综述[J]. 水利水电科技进展,2001,21(3):14-18.
- [6] 丁世来,胡志根,刘全. 大坝混凝土浇筑块排序方法的评价研究[J]. 红水河,2004,23(2):97-100.
- [7] Zhong Denghua, Ren Bingyu, Wu Kangxin. Construction simulation and real-time control for high arch dam [J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14(4): 248-253.
- [8] 钟登华,练继亮,吴康新,等. 高混凝土坝施工仿真与实时控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [9] 钟登华,刘东海,张社荣,等. 心墙堆石坝施工质量实时监控方法:中国,ZL200910069245.9 [P]. 2010-10-13
- [10] 钟登华,刘磊,刘东海. 心墙堆石坝碾压过程信息自动采集装置:中国,ZL200910069167.2 [P]. 2010-10-06
- [11] Zhong Denghua, Cui Bo, Liu Donghai. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rock-fill dam [J]. Science China-Technological Sciences, 2009, 52(11): 3406-3412.
- [12] Zhong Denghua, Liu Donghai, Cui Bo. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam [J]. Science China-Technological Sciences, 2011, 54(7):1906-1913.
- [13] Zhong Denghua, Ren Bingyu, Li Mingchao, et al. Theory on real-time control of construction quality and progress and its application to high arch dam [J]. Science China-Technological Sciences, 2010, 53(10): 2611-2618.

Key technologies of real-time construction control for major hydraulic and hydroelectric projects

Ma Hongqi¹, Zhong Denghua^{2,3}, Zhang Zongliang⁴,
Sun Yujun⁵, Liu Donghai^{2,3}

(1. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd, Kunming 650214, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. Hydro China Kunming Engineering Corporation, Kunming 650051, China; 5. Huanghe Hydropower Development Co., Ltd, Xining 810008, China)

[Abstract] The quality control and schedule control are the significant technical problems in high core rock-fill dam and high concrete dam construction. The conventional quality control methods exhibit difficulty to ensure construction quality of high core rock-fill dam and to control timely schedule of high concrete dam under high-intensity continuous construction. Real-time compaction quality monitoring technology of high core rock-fill dam, real-time entire-process monitoring technology of dam materials transportation and real-time acquisition technology for dynamic information of construction quality using personal digital assistant devices (PDAs) are proposed, which realize the precise automatic online entire-process monitoring of compaction and transportation. In addition, based on an established mathematical model of concrete dam schedule real-time control, the method of timely warning and dynamic adjustment of construction schedule is proposed to provide means for schedule prediction, appropriate warning, dynamic adjustment and optimization of high concrete dam construction schedule. Furthermore, system integration technique for digital dam on Internet is presented, and a digital dam system is developed, which provides a supporting platform for dam final acceptance, safety assessment and operation management. The above-mentioned technologies have been applied to more than 10 major hydro-electric projects with achieving remarkable economic and social benefits.

[Key words] high core rock-fill dam; high concrete dam; construction quality; construction schedule; real-time monitoring; digital dam