



高拱坝施工质量与进度实时控制理论及应用

钟登华^①, 任炳昱^{①*}, 李明超^①, 吴斌平^①, 李名川^②

① 天津大学水利水电工程系, 天津 300072;

② 二滩水电开发有限责任公司, 成都 610051

* E-mail: renbingyu12@163.com

收稿日期: 2010-04-06; 接受日期: 2010-06-10

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2007CB714101)、“十一五”国家科技支撑计划(批准号: 2008BAB29B0501)和国家自然科学基金(批准号: 90815019)资助项目

摘要 针对高拱坝建设能否实现高标准、高强度连续施工的关键科学技术问题, 通过对高拱坝施工系统进行分解-协调耦联分析, 综合考虑各种复杂的施工约束条件, 建立了高拱坝施工质量与进度实时控制数学模型, 提出了基于动态仿真的高拱坝施工进度实时控制方法, 建立了基于 PDA 信息采集与分析的高拱坝施工质量动态控制机制, 并研制开发了网络环境下集信息采集、进度仿真与质量控制分析于一体的高拱坝混凝土施工质量与进度实时控制系统. 工程应用实例表明, 所提出的理论方法和研制开发的系统能对高拱坝施工过程的各个环节进行有效地管理, 可以实现施工在线实时监测和反馈控制, 为高拱坝建设过程的质量与进度控制提供了新的理论方法和技术手段.

关键词
施工质量
施工进度
动态仿真
实时控制
网络环境
高拱坝

高拱坝一般处于地质条件复杂的高山峡谷地区, 地形陡峭、河谷深切、地应力高, 且空间资源有限, 不利于施工场地的布置和交通运输, 因此高拱坝的施工进度与质量直接影响着整个工程的建设工期和安危^[1]. 高拱坝的施工过程受自然环境、结构形式、工艺技术、组织方式、机械设备与建筑材料等诸多因素影响, 具有很强的随机性、不确定性和半结构化等特征, 难以通过单纯的数学解析模型来分析, 而实时控制分析技术为高拱坝建设实现高标准、高强度连续施工的关键技术问题的研究提供了有效的途径.

工程施工质量与进度控制问题是国内外相关领域研究的热点, 并取得了一些研究成果. 例如, Poku 等人^[2]通过把 CAD, P3 和 GIS 相结合开发了 PMS-GIS 系统, 运用可视化技术实现了房屋建筑施工进度动态形象的三维展现, 为房屋建筑施工的进度控制提供了有效的辅助手段; Leung 等人^[3]利用网络技术在

建筑工地安装摄像头对现场施工活动进行视频监控, 并开发了协同工作的网络平台供管理人员对房屋建筑施工的质量和进度进行实时控制; 肖汝诚等人^[4]以 Internet 网络为媒介, 通过对现场桥梁各种施工数据的快速数字化采集、双向传输及控制分析决策从而较好地对桥梁施工质量进行了实时控制; 朱伯芳^[5, 6]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, 在施工期即可给出大坝当时温度场和应力场, 为混凝土坝温度控制决策提供依据. 上述成果推动了工程施工质量与进度控制的理论方法与应用研究, 但都有其各自的侧重点, 尤其是针对水电工程高拱坝施工领域的研究成果则很少.

钟登华等人^[7~11]提出了高拱坝施工全过程动态仿真建模理论与方法、高拱坝施工过程与温度应力耦合仿真分析理论以及高拱坝施工智能仿真与多方案优化技术等理论方法与技术. 本文在上述工作基础

上针对高拱坝施工过程中存在的很强的随机性和不确定性, 影响其施工质量和进度的因子众多且关系错综复杂, 对高拱坝施工系统进行了分解-协调耦联分析, 通过综合考虑各种施工约束条件、耦合分析温度和导流对施工的影响机制, 建立了高拱坝施工质量与进度实时控制数学模型, 提出了高拱坝施工质量与进度实时控制分析方法, 并研发了网络环境下的集信息采集、进度仿真与质量控制分析于一体的高拱坝混凝土施工质量与进度实时控制系统, 为高拱坝建设过程的质量与进度控制提供了技术平台。

1 高拱坝施工系统分解-协调

高拱坝施工是一项复杂的动态的系统工程, 根据其受控对象的性质, 可分解为施工目标控制子系统、施工工艺控制子系统和施工条件控制子系统, 各个子系统又包含了若干作用机制复杂的影响因子。施工目标控制子系统包含质量目标和进度目标 2 个因子: 质量目标主要是尽可能减少大坝混凝土裂缝, 主要措施为大坝施工过程中的温度控制, 而进度的目标除满足总工期要求外, 还要满足防洪度汛、首台机组发电等节点事件的时间要求, 其在满足质量目标的前提下, 应力求最短以获取最大的发电效益; 施工工艺控制子系统针对影响大坝混凝土施工过程的质量和进度控制的各个环节由原材料生产和存储因子、混凝土生产和运输因子、仓面备仓因子、混凝土浇筑和养护因子、温控措施因子、施工控制参数因子等构成, 其中, 温控措施因子和施工控制参数因子是影响大坝混凝土施工质量和进度最为复杂和关键的因素; 施工条件控制子系统包含了工程结构因子、水文气象因子和地形地质因子, 这些因子是大坝施工的基础条件同时又制约着大坝的施工组织设计。

这 3 个子系统之间既相互影响又相互联系: 一方面, 各种施工条件决定了大坝施工所能采取的施工工艺, 而大坝施工工艺的选取要与各种施工条件相适应协调; 另一方面, 采取不同的施工工艺(如修改温控措施、施工控制参数等)会直接影响大坝施工的质量和进度目标, 而为了达到某个质量和进度的目标则需要不断的调整各种施工工艺措施; 施工条件的变化如边坡基坑开挖遇到恶劣的地质情况则通常会导致大坝施工进度目标有一定的调整, 而为了保证大坝施工质量和进度的目标则需要做好对各种施

工条件的监测预报分析。高拱坝施工系统分解-协调耦联分析如图 1 所示。

2 高拱坝施工质量与进度实时控制数学模型

高拱坝混凝土施工是一个复杂的随机动态过程, 因此对其施工过程的质量与进度控制也是动态变化的, 在综合考虑各种复杂约束条件下, 可以建立高拱坝施工质量与进度实时控制的随机动态数学模型, 其状态转移方程如下

$$H(i, t+1) = H(i, t) + \Delta H(i, t), \quad t=t_0, t_0+1, \dots, T,$$

其中, i 为坝段号, t_0 为实时控制的初始时刻, $H(i, t)$ 为第 i 坝段、 t 时刻的浇筑高程, $\Delta H(i, t)$ 为第 i 坝段在 t 时刻的混凝土浇筑厚度。

控制目标函数的目的就是在大坝当前施工面貌状态下, 寻求下一阶段的质量和进度综合最优的施工方案, 其控制目标函数如下

$$\text{Opt}(S_i, T_{t_i-t_j}, Q_{t_i-t_j}, X(P_1, P_2, \dots, P_n)),$$

其中, S_i 为 t_i 时刻的大坝施工面貌状态, $T_{t_i-t_j}$ 和 $Q_{t_i-t_j}$ 为时刻 t_i 到时刻 t_j 这一阶段的进度和质量要求, 而 $X(P_1, P_2, \dots, P_n)$ 为此阶段备选的施工方案集。

目标函数的约束条件如下

$$\begin{cases} S(i, j, t) = 0, \\ R(i, j, t) = 0, \\ QU_a[] \subset QU_c[], \\ TU_a[] \subset TU_c[], \end{cases}$$

其中, $S(i, j, t)$ 表示约束条件矩阵, $R(i, j, t)$ 表示控制条件矩阵, $QU_a[]$ 表示质量检验数据集, $QU_c[]$ 表示

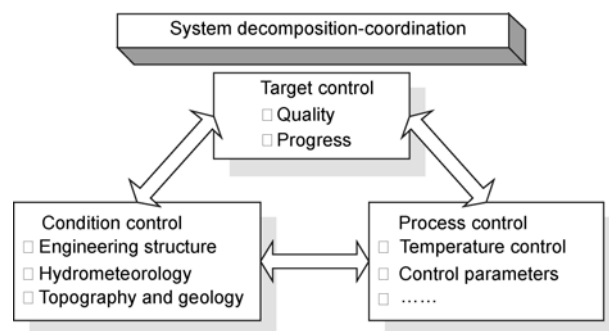


图 1 系统分解-协调耦联分析

质量控制标准集, $TU_a[]$ 表示温度监测数据集, $TU_c[]$ 表示温度控制标准集.

$$\begin{cases} H(i,t) \leq H_{\max}, \\ \Delta H(i,t) = f[D(i,j), \Gamma(i), V(i)], j=1,2,\dots,M, \\ D(i,j) = \bigcup_{k=1}^m q(k), \\ q(k) = \int p_k(\phi) d\phi, \\ \Gamma(i) = g_1(\tau), \\ V(i) = g_2(r), \end{cases}$$

其中, $H_{\max}$ 为最大坝高, $q(k)$ 为 k 工序历时, $D(i,j)$ 为单循环历时, $p_k(\phi)$ 为某种分布的概率密度函数, τ 为温度场, r 为导流标准.

高拱坝施工质量与进度实时控制是一个动态优化控制的过程, 根据阶段目标要求, 开展月份、季度或年度的形象面貌、施工强度、温控措施等的方案优化过程, 同时, 根据实际工程的进展与计划进度偏差情况以及工程中遇到的质量问题来动态地进行下一阶段实施方案的优化活动, 制定新的施工进度计划, 并配备相应的质量控制标准与措施, 为高效的施工质量与进度控制、快速的施工决策服务.

3 高拱坝施工质量与进度实时控制分析方法

3.1 基于 PDA 的高拱坝施工信息采集与分析

利用手持 PDA 终端^[12]可以实现快速采集现场的施工质量与进度即时信息, 录入的数据首先经 PDA 数据分析应用程序进行简单的整理以供现场浏览和初步分析, 经初步检验合格后, 通过无线网络传输到信息分析决策中心并进行深入分析处理后把反馈的决策信息发送到施工人员的 PDA 终端, 从而指导现场施工. 基于 PDA 的现场施工信息采集与实时控制分析流程如图 2 所示. 在现场需要通过 PDA 进行施工信息采集与实时控制分析的内容有仓面施工信息和温控信息 2 部分.

1) 仓面施工信息采集与实时控制分析: 仓面混凝土施工质量与进度控制由备仓工序质量检验、仓面混凝土浇筑工艺设计、开仓申请单会签、仓号基本施工信息采集、混凝土浇筑工序质量检验、混凝土外观质量检验及单元工程质量评定等多个环节构成. 其中, 备仓工序质量检验环节又包括基础面或施工缝

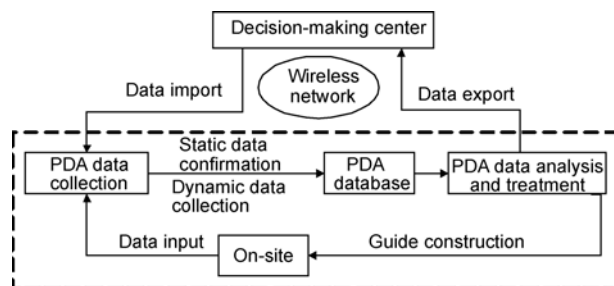


图 2 基于 PDA 的信息采集与实时控制分析流程

面、模板、钢筋、预埋件安装等工序的质量验收; 仓号基本施工信息采集内容不仅包括混凝土仓号、起止高程、仓号面积、混凝土工程量等仓号的基本属性信息, 还包括仓号开封仓时间、浇筑机械和仓面设备、现场人员配备、混凝土的坍落度和含气量等混凝土施工进度和质量信息.

现场实时采集的仓面施工各工序质量检验信息只有在 PDA 上通过施工单位内部三级自检及监理审核后才能完成其工序的质量验收, 其信息采集与审核流程如图 3 所示. 如果现场监理审核发现某项工序检测结果不符合标准则可以把驳回信息发到现场施工单位人员的 PDA 中, 责令其完成相应工序修正后重新录入检测信息. 当工序验收完成后会自动把该工序质量验收评定的结果和验收完成的时间发到指定管理者的 PDA 中, 从而为其对仓面施工的质量与进度实时控制分析决策服务.

2) 温控信息采集与实时控制分析: 高拱坝的混凝土温度控制是其施工质量控制的关键环节. 快速

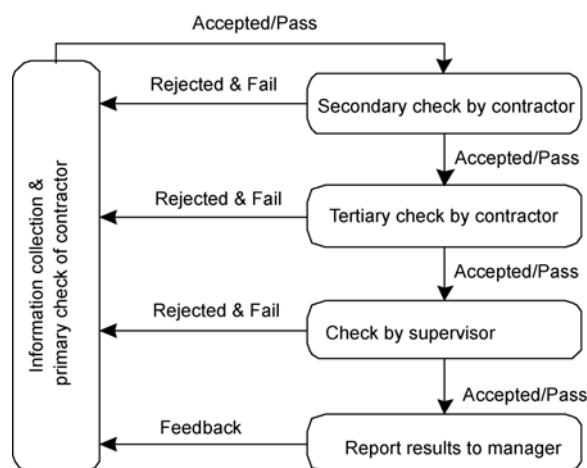


图 3 仓面施工信息 PDA 采集与审核流程

高效地采集大坝混凝土各个温控阶段的温度信息,并无线传输到信息分析决策中心进行数据的统计分析后可以生成各种温度的历时过程曲线便于管理者对当前温度及其变化趋势的整体把握,当采集到的温度数据接近或超过设计标准时,可以实现不同程度的预报警并将其信息以短信形式发送到用户的 PDA 中,从而有效地辅助了管理者对大坝温度的实时控制分析决策。

在现场用 PDA 实时采集的温度信息主要包括坝址区的公共信息如气温、河水温度、天气状况等、拌和楼出机口温度、入仓温度、浇筑温度、仓内小气候温度、各个时期通水的进出水口温度和闷温温度等,且由施工单位和监理单位独立地进行采集。利用实时采集的温度数据可以在系统中绘制出某仓号的单支温度计的历时过程曲线,仓号内部平均温度历时过程曲线、冷却水管进出口的通水温度历时过程曲线等多种曲线供管理者进行直观分析。对仓面的混凝土入仓温度、浇筑温度及永久温度计监测的仓面最高温度等关键混凝土温度数据实施预报警功能,及时反馈和指导仓面施工人员采取相应的温控调整措施。

3.2 基于动态仿真的高拱坝施工进度实时控制

在高拱坝混凝土浇筑施工过程中由于具有很强

的随机性、不确定性,管理者难以对工程的施工进度实现有效地控制和管理,尤其是当实际进度比计划进度滞后时,常常需要进行多种施工方案的比较、分析与优选来研究可行的赶工措施。传统的依靠人工的跳仓排块的方法具有相当的局限性,不仅耗时、费力、灵活性差、且考虑因素不系统全面,而高拱坝施工动态仿真技术的发展与应用为这些问题的解决提供了有效的手段。

基于动态仿真技术在 Windows 平台和 Visual C++6.0 环境下编程开发了高拱坝施工进度实时控制程序。利用此程序可以实现工程当前实际进度与计划进度的动态比较分析;辅助管理者制定大坝的周、月、季、年等混凝土施工短期进度计划或中长期施工进度计划安排,并自动生成混凝土施工进度计划报表;当大坝当前施工进度比计划进度滞后时,可以方便快捷地进行多种施工方案的动态仿真计算分析以研究可行的工程措施,及时优化调整施工进度方案等多种功能,有效地辅助了管理者对大坝混凝土施工进度度的实时控制,其程序界面如图 4 所示。

3.3 耦合施工质量与进度的高拱坝施工实时控制

在高拱坝施工质量与进度实时控制的过程中,重点是要把握好两者之间的协调关系,尤其是当两

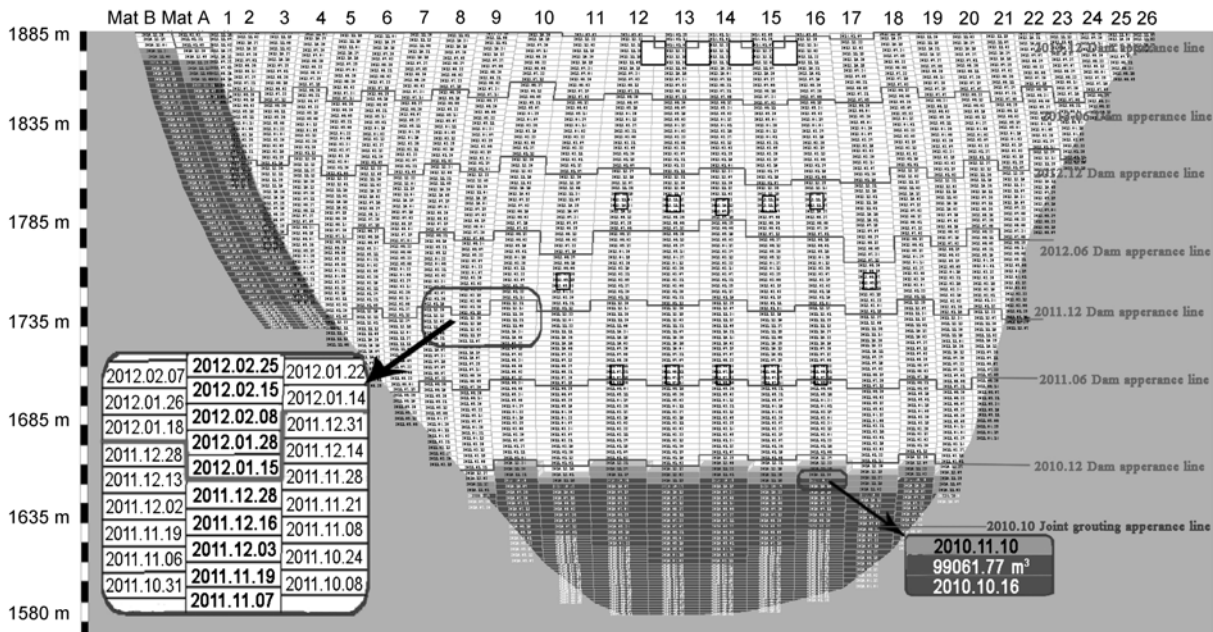


图 4 高拱坝施工进度实时控制程序界面

者相冲突时对质量与进度控制综合目标的协调。在大坝施工过程中质量与进度控制是并行的: 一方面要实时地分析大坝当前进度形象面貌与计划进度形象的偏差, 以及当前施工参数条件下将来的形象进度与计划形象进度的偏差, 判断是否有进度滞后的现象, 是否需要采取工程措施加快进度, 并根据新的进度计划判断初始质量控制计划是否满足要求, 提出并执行与新的计划进度相对应的质量控制标准及措施; 另一方面要实时地对大坝施工过程的典型质量控制指标进行监测, 当发现超标现象时, 及时采取调节措施保证质量, 并要分析现场的实时调整措施对大坝浇筑进度计划的影响。这样不断循环, 从而保证大坝高标准、高强度地连续上升。高拱坝施工质量与进度实时控制原理如图 5 所示。

影响高拱坝施工质量与进度的因素众多且关系错综复杂, 任何一个环节出现问题都会导致高拱坝施工质量的下降和进度的滞后。除了对仓面施工信息和温控信息采用 PDA 进行现场采集和实时控制分析外, 还对以下 4 个重要施工环节进行了信息的综合集成与实时控制分析。

1) 混凝土原材料质量信息采集与实时控制分析。混凝土原材料如砂石骨料、水泥、粉煤灰和外加剂等的质量能否达到标准要求直接关系到大坝混凝土的质量高低。系统对试验室每批次以及现场存储的原材料的几个变化敏感指标如砂子的含水率和细度模数、石子的超逊径含量等分别进行实时监控并绘制了其检测值随时间的变化曲线, 当发现检测值将要达到或者超过标准要求时对相应施工人员实施预报警并令其采取相应的措施, 从而达到对混凝土原材料质量的实时控制。

2) 灌浆信息采集与实时控制分析。通过读取灌

浆自动记录仪中的灌浆数据信息如每一灌浆孔的每一段的段长、注浆量、注灰量、压水试验的透水率等, 经过统计分析处理后可以生成灌浆的成果表、分序表、综合表、单位注灰量频率曲线、透水率频率曲线及灌浆综合剖面图等灌浆规范成果, 从而便于管理者对灌浆质量进行直观总体地评价, 对认为达不到要求的部位采取补灌或加密灌浆的措施从而保证灌浆质量。

3) 拌和楼混凝土生产配料单信息自动采集与实时控制分析。通过与拌和楼生产系统做数据接口可以做到实时采集并无线发送每一盘混凝土的生产配料数据包括砂子、石子、水泥、粉煤灰、外加剂等各组分的含量, 经过统计分析处理后可以得到与设计标准的混凝土配合比的偏差率, 当偏差率超过规范要求时要反馈拌和楼操作人员进行拌和楼称量恒定, 以对混凝土生产配合比进行实时控制。

4) 缆机运行信息自动采集与实时控制分析。缆机作为高拱坝施工的混凝土的主要入仓设备, 其运行效率的高低对大坝混凝土浇筑进度有重要影响。通过与缆机作数据接口可以采集缆机每一个吊运循环吊罐的运行轨迹、每一个循环的各个环节如装料、吊运、浇筑、回程所用的时间、水平和垂直运距及其相应的平均速度等。缆机的运行数据信息经过整理后可以作为大坝施工进度实时控制程序的重要控制参数。

4 网络环境下的高拱坝混凝土施工实时控制系统

4.1 系统总体结构

高拱坝施工质量与进度实时控制就是综合运用工程控制理论、网络技术、仿真技术、数据融合集成^[13]

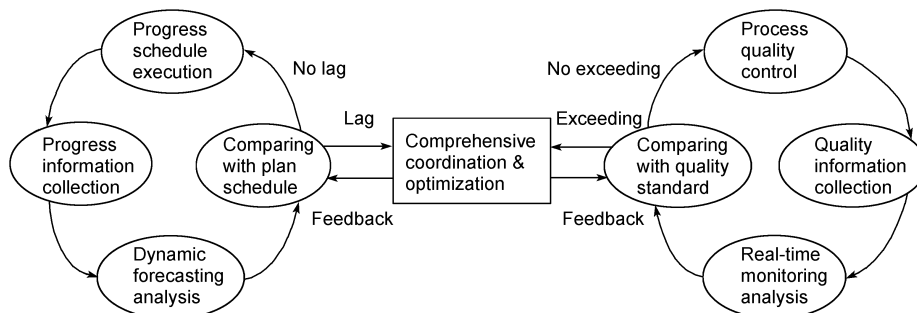


图 5 高拱坝施工质量与进度实时控制原理

等新技术, 实时地采集高拱坝施工过程中的各种质量和进度信息, 并以网络为媒介快速高效地传输到服务器中进行分析汇总, 供管理者分析决策后向施工的各个环节反馈质量和进度控制要求. 该系统由信息采集层、应用逻辑层和服务决策层构成, 其总体结构如图 6 所示. 其中, 信息采集层包括了手持 PDA 终端采集、桌面客户端采集以及接口自动采集 3 种数据采集手段; 而应用逻辑层则针对高拱坝施工质量与进度控制的关键环节对仓面施工信息、混凝土温控信息、混凝土原材料质检信息、灌浆信息、拌和楼生产信息和缆机运行信息进行了采集与分析, 各种信息所对应的信息采集层的数据采集手段如图 6 所示; 服务决策层则利用应用逻辑层数据库中的数据进行了三维、二维的可视化展现, 对将要达到或超过某项控制指标的施工环节实施预报警, 并与施工进度实时控制分析程序和温度控制实时仿真计算程序提供数据接口, 从而为管理者对大坝施工质量与进度的实时控制决策服务.

4.2 系统实现

在传统的高拱坝施工过程中, 施工信息的采集主要是依靠现场表格记录、后方整理汇总的方式, 这种方式使得信息采集周期长、实时性很差, 业主、监理和承包商各方之间做不到信息的及时沟通分析,

很难实现管理者对施工各环节的实时控制分析决策. 通过在工地构建一体化的网络环境很好地解决了信息采集、传输和反馈的实时性问题^[14], 其结构如图 7 所示. 首先在大坝施工现场搭建了无线网络覆盖, 实现 PDA 终端和大型设备接口采集的信息无线实时发送, 然后把施工现场、业主营地、监理营地和承包商营地各自的网络通过光纤进行联结从而形成一个大的局域网络, 为施工过程中的质量与进度实时控制搭建了一个网络平台. 另外通过把业主营地的服务器与 Internet 相连接, 可以便于远程授权用户登录系统进行相应的分析决策.

系统以现场搭建的网络环境为依托, 基于 B/S 结构在 Java 环境下编程开发实现. 通过对大坝施工现场采集的各个施工环节的信息高效地集成与可视化的统计分析处理, 与利用 Visual C++6.0 工具编写的大坝施工进度实时控制分析程序相耦合, 并结合施工过程中施工质量的预报警反馈分析, 从而建立了集信息采集、进度仿真与质量控制分析于一体的高拱坝混凝土施工质量与进度实时控制系统.

5 工程应用实例

在建的某高拱坝位于我国西南山区, 其最大坝高 305 m, 是目前已建和在建中的世界第一高拱坝.

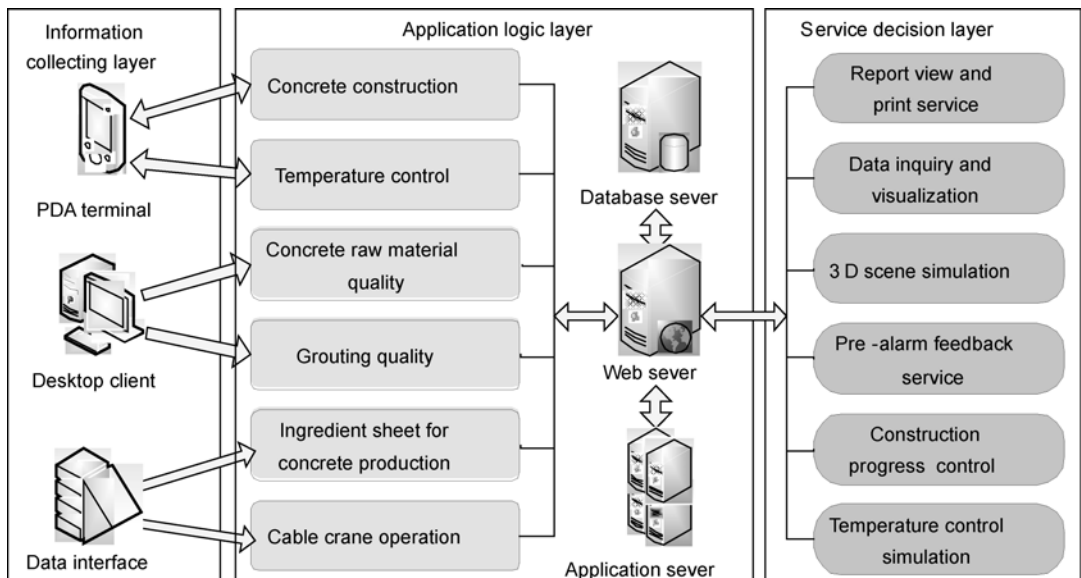


图 6 系统总体结构

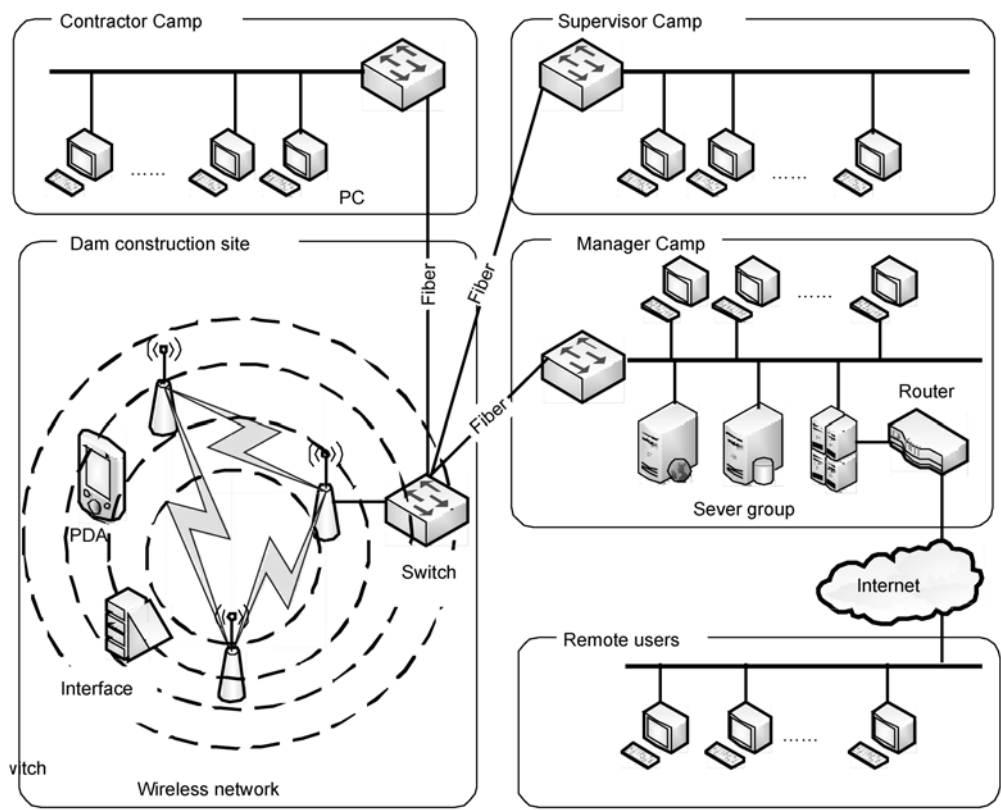


图 7 系统网络环境结构

大坝混凝土总量约 530 万方，其中左岸垫座混凝土约 52 万方。大坝首仓混凝土于 2009 年 10 月 23 日开浇，合同工期要求 2012 年年底首台机组发电，2013 年 8 月底大坝全线浇筑到顶。

本文所研发的施工质量与进度实时控制系统从大坝首仓混凝土开浇以来就已在工地投入使用，工程建设各方均在该系统平台下对大坝混凝土的施工质量和进度进行实时控制分析，对大坝的高标准、高强度连续施工发挥了重要作用。这里以 14 号坝段第 1 仓(14#-1)混凝土单元为例介绍系统中的部分成果。

1) 对供应此单元混凝土的高线拌和楼的每一盘混凝土的生产配料信息进行了实时采集与控制分析，其中 1#拌和楼生产了 215 盘混凝土，2#拌和楼生产了 302 盘混凝土，共生产混凝土 517 盘，发现混凝土各组称量偏差率的合格率除了加水量一项偏低外只有 76%，如图 8 所示，其他的合格率都在 99% 以上符合标准要求，因此系统向拌和楼操作人员反馈报警信息令其调整加水量的称料偏差从而实时控制混凝土的拌和生产质量。

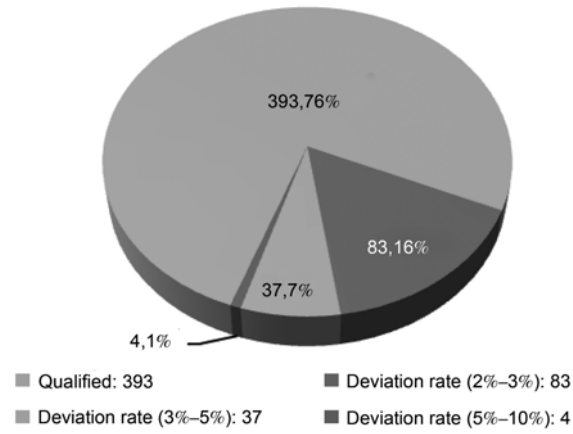


图 8 14#-1 单元加水量偏差率分布

2) 此单元仓面各工序施工质量和进度信息均由施工人员现场实时采集并经现场监理分析审核。此单元只有基础面处理工序质量评定为合格，其余工序的质量评定均为优良，且综合质量评定为优良；另外此仓的混凝土方量为 2140 m³，于 2009 年 10 月 24 日凌晨 2 点收仓共浇筑了 17 h，浇筑平均强度为

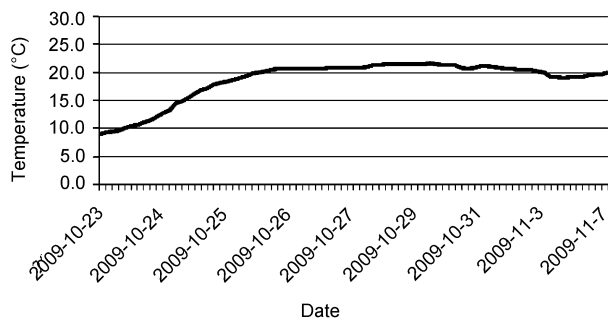


图9 T14-1580.75-8 温度计温度历时过程曲线

125.9 m³/h.

3) 施工人员在现场利用 PDA 进行此单元的各种温度数据的实时采集分析, 其中共检测录入拌和楼出机口温度数据 18 次, 最高值为 6.1℃, 平均值为 5.5℃, 合格率为 100%; 检测录入入仓温度数据 64 次, 最高值为 7.0℃, 平均值为 6.0℃; 检测录入浇筑温度数据 48 次, 最高值为 10.5℃, 平均值为 8.7℃, 合格率为 100%. 此单元共埋设了 8 支永久测温计, 其中一支编号为 T14-1580.75-8 的温度计截止到 2009 年 11 月 7 日的温度过程历时曲线如图 9 所示, 最高温度为 21.6℃(符合设计标准), 达到最高温度历时 5 d 16 h. 当以上实时采集的温度数据将要达到或者超过设计标准时则会向现场施工人员反馈预报警信息, 令其及时采取相应温控措施.

由于大坝基坑开挖滞后和其他因素影响, 大坝首仓混凝土开浇时间比合同要求滞后了近 9 个月, 为了实现 2012 年首台机组发电的合同工期目标, 利用施工进度实时控制程序在当前的实际形象面貌下进行了多方案的施工进度仿真预测分析, 提出可行的工程措施为在 2010 年 4 月份增加投入运行 1 台缆机且提高孔口坝段非结构部位混凝土分层厚度为 4.5 m. 由大坝施工进度实时控制程序计算分析所得出的 2009 年 12 月份仓位浇筑计划安排如表 1 所示.

表 1 2009 年 12 月份大坝仓位浇筑计划

Dam section No.	Mat A	Mat B	12#	13#	14#	15#	16#	Sum
Number of blocks	2	1	2	5	2	3	4	19
Volume (10 ⁴ m ³)	1.25	0.48	0.48	1.28	0.45	0.66	0.59	5.19

6 结论

本文针对高拱坝建设能否实现高标准、高强度连续施工的关键技术问题, 对高拱坝施工系统进行了分解-协调耦联分析, 通过综合考虑各种施工约束条件、耦合分析温度和导流对施工的影响机制, 建立了高拱坝施工质量与进度实时控制数学模型, 提出了高拱坝施工质量与进度实时控制分析方法, 并研发了网络环境下的集信息采集、进度仿真与质量控制分析于一体的高拱坝混凝土施工质量与进度实时控制系统, 为高拱坝建设过程的质量与进度控制分析提供了技术平台.

所提出的理论方法和实现的系统平台在西南山区某高拱坝工程中得到了实际应用, 在现场利用 PDA 进行仓面施工的各工序质量检测信息录入及审核, 仓面混凝土各种温控信息的实时采集分析且当采集到的温度数据接近或超过设计标准时, 可以实现不同程度的预报警并反馈给现场人员指导其采取合理的温控措施. 另外对涉及大坝施工质量和进度的其他环节的信息如混凝土原材料的质量信息, 灌浆质量信息, 拌和楼混凝土生产配料单信息, 缆机运行信息等也进行了综合地集成与控制分析. 同时, 利用大坝施工进度实时控制程序对大坝当前实际进度与计划进度动态比较分析, 对未来进度实时仿真预测从而辅助管理者制订不同阶段的混凝土排仓计划, 并提出合理的工程赶工措施. 如利用本系统分析计算得到的增加投入运行 1 台缆机且提高孔口坝段非结构部位混凝土分层厚度为 4.5 m 的赶工措施计划被管理者采纳从而为实现首台机组按时发电的目标提供了保障. 实践应用表明, 该系统可以对高拱坝施工过程的各个环节进行有效地管理, 实现了施工在线实时监测和反馈控制, 为解决复杂条件下高拱坝施工质量与进度难以控制的问题提供了新的理论方法和技术手段, 具有重要的理论和实用价值.

参考文献

- 1 钟登华, 练继亮, 吴康新, 等. 高混凝土坝施工仿真与实时控制. 北京: 中国水利水电出版社, 2008
- 2 Poku S E, Arditi D. Construction scheduling and progress control using geographical information systems. *J Comput Civ Eng*, 2006, 20: 351—360
- 3 Leung S W, Mark S, Lee B. Using a real-time integrated communication system to monitor the progress and quality of construction works. *Autom Construct*, 2008, 17: 749—757
- 4 袁帅华, 肖汝诚. 基于网络的桥梁智能化施工控制系统研究. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35: 734-738, 744
- 5 朱伯芳. 混凝土坝的数字监控. *水利水电技术*, 2008, 39: 15—18
- 6 朱伯芳, 张国新, 许平, 等. 混凝土高坝施工期温度与应力控制决策支持系统. *水利学报*, 2008, 39: 1—6
- 7 钟登华, 吴康新, 任炳昱. 面向对象的高拱坝施工全过程动态仿真. *天津大学学报*, 2007, 40: 976—982
- 8 钟登华, 任炳昱, 吴康新. 虚拟场景下高拱坝施工仿真建模理论与应用. *系统仿真学报*, 2009, 21: 4701—4705
- 9 Zhong D H, Ren B Y, Wu K X. Construction simulation and real-time control for high arc dam. *Transac Tianjin Univ*, 2008, 14: 248—253
- 10 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. *系统仿真学报*, 2008, 20: 485—489, 498
- 11 练继亮, 钟登华. 混凝土坝施工仿真多目标评判理论与方法. *水力发电学报*, 2005, 24: 75—79
- 12 Kenji K, Kazuyoshi E, Satoru I, et al. The application of PDA as mobile computing system on construction management. *Autom Construct*, 2005, 14: 500—511
- 13 Zhong D H, Cui B, Liu D H, et al. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rockfill dam. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 3406—3412
- 14 Chassiakos A P, Sakellariopoulos S P. A web-based system for managing construction information. *Adv Eng Software*, 2008, 39: 865—876