

# 高拱坝施工实时控制系统集成理论与应用

任炳昱, 吴斌平

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

[摘要] 针对高拱坝施工过程具有很强的复杂性和随机性的特征, 提出将系统集成理论应用于高拱坝施工实时控制中, 设计了高拱坝施工实时控制系统集成框架, 从数据信息集成、应用功能集成、技术方法集成和监控指标集成 4 个方面详细论述了系统集成的实现过程, 并研制开发了网络平台下的高拱坝施工实时控制系统。工程应用实例表明, 基于系统集成理论构建的高拱坝施工实时控制系统能对高拱坝施工过程实现动态的集成控制与分析, 有效地提高了大坝建设管理水平。

[关键词] 实时控制; 系统集成; 数据集成; 网络平台; 高拱坝施工

[中图分类号] TP273 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)12-0084-07

## 1 前言

高拱坝施工是一个由基础处理、大坝混凝土浇筑、接缝灌浆以及金属结构安装等多个施工环节所组成的十分复杂庞大的系统, 且系统的各施工环节相互之间交叉影响, 错综复杂。同时, 高拱坝施工过程还受水文、气象等自然环境、施工场地及交通布置、机械设备与建筑材料、施工工艺与组织方式等诸多因素的影响, 施工过程具有很强的随机性与不确定性<sup>[1]</sup>。高拱坝施工实时控制分析技术可以对大坝施工过程的质量与进度进行有效地控制与分析, 实现施工在线实时监测和反馈控制, 对于提高大坝建设过程控制和管理水平具有十分重要的意义<sup>[2]</sup>。高拱坝施工实时控制系统包括各种数据信息的采集及传输、三维视景仿真、施工质量动态监测及预警、施工进度实时控制分析以及数据存储与管理等多个子系统。然而, 上述各子系统在不同的硬件和软件环境下运行, 分别承担高拱坝施工实时控制分析系统的不同功能。如何对各个子系统进行统一的控制和管理, 使不同功能的子系统进行一体化的联动和协同工作, 实现数据信息、资源和任务的共享, 高拱

坝施工实时控制系统集成理论与方法为解决这类问题提供了有效的途径, 为高拱坝建设实现高标准、高强度连续施工提供了强有力的技术支持。

系统集成研究已经成为航空航天、先进设备制造、铁路交通、土木工程等大型工程系统领域研究的热点, 在国内外均取得了一些应用研究成果。例如, Leung<sup>[3]</sup>等人利用网络技术开发了视频通信集成系统对房屋建筑施工质量与进度进行实时控制; 杨天社等人<sup>[4]</sup>建立了航天工程系统集成模型并设计了递增集成策略, 对航天工程的系统集成进行了一定的理论研究; 吕超等人<sup>[5]</sup>提出了可重组制造系统集成设计框架, 根据该框架设计思想开发了集制造工艺分析描述、布局规划、生产调度优化、成线监控和资源管理为一体的集成系统; 李惠等人<sup>[6]</sup>对大型桥梁结构健康监测进行了系统集成研究, 建立了基于网络平台的开放式的实时在线智能健康监测系统。耿志修<sup>[7]</sup>将 Locotrol 技术与 GSM-R 技术相结合, 实现了铁路列车多种技术的系统集成创新, 大幅度提高了列车的运输能力; 钟登华<sup>[8]</sup>通过把心墙堆石坝建设过程中的质量监测、安全监测等信息, 进行动态高效的集成管理和分析, 实现了大坝施工过程质

[收稿日期] 2011-09-16

[基金项目] “十一五”国家科技支撑计划(2008BAB29B0501); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004)

[作者简介] 任炳昱(1985—), 男, 河北邢台人, 博士, 天津大学讲师, 研究方向为高混凝土坝施工仿真与实时控制;

E-mail: renbingyu12@163.com

量的精细化、全天候实时监控。上述研究成果推动了系统集成的理论与应用研究,但都有其各自的侧重点,尤其是针对大型水电工程高拱坝施工领域的研究成果很少。

高拱坝施工是一个复杂的随机动态过程,为其建设过程的控制与管理带来了很大的难度。针对高拱坝施工过程的复杂性和随机性的特征,提出将系统集成理论应用于高拱坝施工实时控制与分析中,建立了高拱坝施工实时控制系统集成概念模型,从数据信息集成、应用功能集成、技术方法集成和监控指标集成4个方面详细论述了系统集成实现过程,并结合具体的工程研制开发了网络环境下的高拱坝施工实时控制系统,为高拱坝工程建设的控制与管理提供了理论与技术支持。

## 2 系统集成框架设计

高拱坝施工实时控制就是通过实时地采集大坝

施工过程中产生的各种质量和进度数据信息,并以网络为媒介快速高效地传输到服务器数据库中进行分析汇总,与各项监控指标对比分析后向施工的各个环节反馈质量和进度控制要求。高拱坝施工实时控制与分析贯穿于大坝混凝土施工的整个动态过程,以提高大坝施工质量、保证大坝施工进度为控制目标。为了能更有效地对高拱坝施工过程进行实时控制与分析并满足这一目标,需要从数据信息、应用功能、技术方法和监控指标4个方面进行有机地系统集成,确保各种数据资源共享、各个功能模块耦合协调,提升高拱坝施工实时控制系统的综合分析应用能力。高拱坝施工实时控制系统集成框架如图1所示,该框架由以下5个部分所组成:

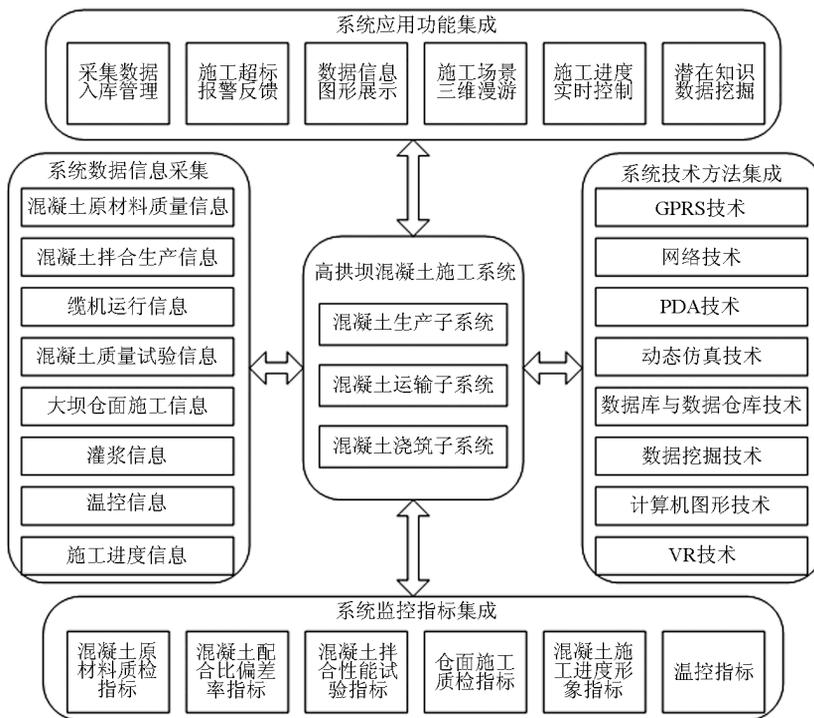


图1 高拱坝施工实时控制系统集成框架

Fig. 1 The framework of system integration in real-time control on high arch dam construction

1)高拱坝混凝土施工系统。它是系统集成的核心对象,系统集成主要是围绕着大坝混凝土施工这个大的系统工程开展研究的。它共包含了混凝土生产、混凝土运输和混凝土浇筑3个彼此关联的子系统。这3个子系统是高拱坝混凝土施工动态过程

的概括和抽象,同时也是高拱坝施工过程实时控制系统重点应用的领域,体现了对大坝混凝土施工过程进行控制的特点。

2)系统数据信息集成。高拱坝混凝土施工过程涉及众多的施工动态信息,主要包括混凝土原材

料质量信息、混凝土拌和生产信息、缆机运行信息、混凝土质量试验信息、大坝仓面施工信息、灌浆信息、混凝土温控信息和混凝土施工进度信息等方面,通过对各个方面大坝施工数据信息的动态集成可以构建大坝施工综合信息平台。

3) 系统应用功能集成。高拱坝施工实时控制系统包括的主要功能有现场采集数据的入库与管理、施工参数超标后的报警反馈、数据信息的二维及三维可视化分析、施工进度动态仿真与实时控制分析以及潜在知识的数据挖掘等多个功能,对这些功能的综合集成体现了大坝施工实时控制系统集成的作用。

4) 系统技术方法集成。通过对通信技术、网络技术、数据库技术、图形技术以及动态仿真技术等系统关键技术的集成为大坝施工实时控制系统集成的实现提供了方法与手段。

5) 系统监控指标集成。高拱坝施工实时控制系统中需要动态监测的指标主要包括混凝土原材料质检指标、混凝土配合比偏差率指标、混凝土拌和性能试验指标、大坝仓面施工质检指标、混凝土温控指标和混凝土施工进度形象指标等,通过对这些监控指标的集成明确和细化了大坝施工过程质量和进度实时控制管理的关键环节。

### 3 系统集成实现

#### 3.1 系统数据信息集成

系统数据信息集成是高拱坝施工实时控制系统集成的基础。它是把不同来源、格式、特点性质的数据信息在逻辑上或物理上有机地集中在一起,从而为用户提供全面的数据共享<sup>[9]</sup>。能否将分布在异地的且异构的各个数据源中的数据集成在一起,以统一的数据形式供用户查询分析是系统数据信息集成实现的关键。

高拱坝施工实时控制系统涉及大量动态数据信息,这些数据信息来源于大坝不同施工部位且数据结构不一致,在对这些数据信息集成时采用了数据仓库模型的数据集成方案,将采集到的数据信息按照主题的内容来构建数据仓库,比如大坝温度信息数据仓库、大坝灌浆信息数据仓库和大坝仓面施工信息数据仓库等,方便了用户对数据之间潜在的相关关系和规律的挖掘分析,有利于管理者的科学决策。高拱坝施工实时控制系统数据仓库模型的体系结构如图2所示。

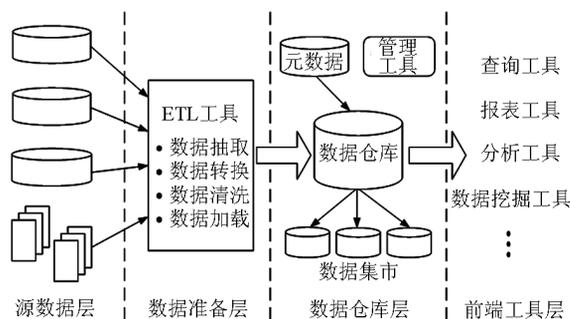


图2 数据仓库模型体系结构

Fig. 2 The system structure of the data warehouse model

#### 3.2 系统应用功能集成

高拱坝施工实时控制系统应用功能的集成就是建立一个统一的综合应用,将各种不同应用平台的软件和系统的功能有机地集成到一个无缝的、一体化的且易于访问的系统环境中,方便用户进行业务的处理和信息共享。应用功能集成是在业务逻辑的层面上进行集成,用于满足用户对大坝施工过程实时控制管理的具体需求,是高拱坝施工实时控制系统集成的核心。

在高拱坝施工实时控制系统中,施工进度实时控制分析子系统是用 VC++ 语言开发的独立的业务程序,通过在其程序中编写 Web 服务接口,使其与高拱坝施工综合信息子系统进行了应用功能的集成。从而,用户在高拱坝施工综合信息子系统中就可以查询分析施工进度实时控制系统的相应成果如大坝施工动态仿真形象面貌、仿真预测的混凝土施工强度以及混凝土施工进度计划安排等。通过对高拱坝施工实时控制系统各个业务程序进行应用功能上的集成,使用户可以在一个统一的综合应用平台下进行多种数据分析应用,极大地提高了用户对大坝施工过程实时控制管理的效率。

#### 3.3 系统技术方法集成

高拱坝施工实时控制与分析需要多项技术方法的支持,只有通过对各项技术方法进行有机地集成才能实现系统应用功能的集成。技术方法集成是高拱坝施工实时控制系统集成的方法和手段。高拱坝施工实时控制系统关键技术集成模型如图3所示,其包含了内外两个层次的集成。

1) 模型外层次的集成。主要是实现现场以及试验室的施工数据的采集与传输,主要集成的技术方法包括:应用 PDA 技术在大坝现场实现仓面施工信息的采集与审核,应用无线通信技术实现现场施

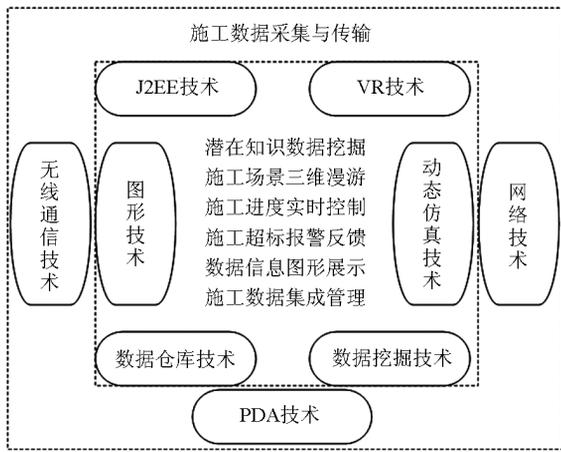


图3 系统关键技术集成模型

Fig. 3 The model of the system key technology integration

工数据(如仓面施工数据、温控数据、硬件设备自动采集接口数据等)的无线传输,应用网络技术实现整个工地的局域网络组网。模型外层次的技术集成成为高拱坝施工实时控制系统搭建了网络系统环境,采集了大坝施工过程的数据,为用户进一步的控制管理分析奠定了基础。

2)模型内层次的集成。其是高拱坝实时控制系统技术方法集成的核心,它实现了对大坝施工过程中实时控制管理所需要的各种功能要求,主要集成的技术方法包括:应用数据仓库和数据挖掘技术实现施工数据的组织、管理、分析以及知识发现,应用计算机图形技术实现施工信息的可视化展示,如温度历时曲线图、灌浆单位注灰量频率曲线图以及原材料质量检测曲线图等图形的绘制,应用动态仿真技术实现高拱坝施工进度的实时控制分析,应用VR技术实现大坝施工场景的三维虚拟漫游,应用J2EE技术构建高拱坝施工综合数字化信息平台。

### 3.4 系统监控指标集成

高拱坝混凝土施工过程涉及很多施工规范要求的施工控制标准,能否在控制标准允许的范围内进行施工直接决定了大坝施工质量的高低。通过对高拱坝混凝土施工系统监控指标集成可以辅助管理者较全面地了解和分析大坝整体施工质量与进度的情况,为施工过程质量与进度的动态反馈控制提供了重要依据。高拱坝施工实时控制系统监控指标集成体系如图4所示,主要包括以下6类系统监控指标:

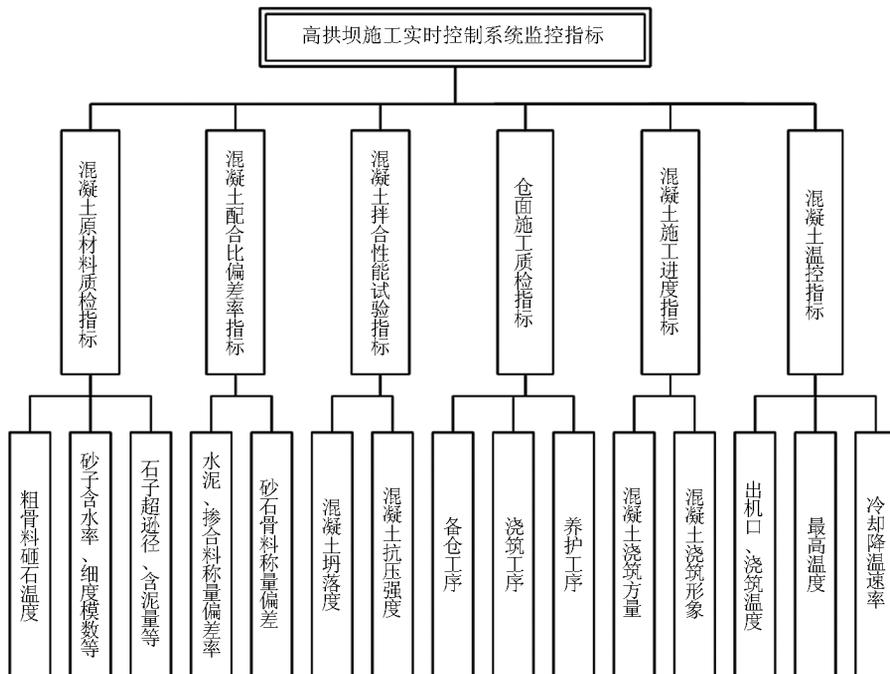


图4 系统监控指标集成体系

Fig. 4 The hierarchy of the system monitoring index integration

1)大坝混凝土原材料质检指标。大坝混凝土原材料的质量直接影响着大坝混凝土的性能,因此对于每一生产批次的原材料都要对其质量进行抽检。一般而言,水泥、掺合料和外加剂是由专门厂家

生产,其各项性能指标比较稳定,满足检测指标控制标准的合格率很高;而砂石骨料由于是在现场附近山体开采并加工生产而得,其有些性能指标如砂子含水率、细度模数等随开挖的岩层特性变化不稳定,

呈现出一定的波动性,需要加强对这些指标的抽检,以提高砂石骨料的物理性能。

2)大坝混凝土生产配合比偏差率指标。拌和系统生产混凝土需要严格按照设计提出的大坝混凝土相应部位的设计配合比,在生产的每一盘混凝土中各组分的实际用料量与设计的用料量须保持一致。然而,由于拌和系统中的称量系统存在一定的偏差会导致混凝土各组分的实际用料量与设计用料量发生偏差,因此需要对两者的偏差率进行控制。通过对每一盘混凝土各组分用料量的实时采集,当发现混凝土某组分用料量与设计用料量偏差率超过控制标准时,要向混凝土拌和系统人员反馈令其调整拌和系统称量偏差,从而保证大坝混凝土生产拌和质量。

3)大坝混凝土拌和性能试验指标。对于大坝混凝土拌和性能主要是从混凝土的坍落度和抽检试件的抗压强度两个指标去衡量。其中,对于配筋率不同的混凝土其坍落度的控制标准不同;而对于不同养护龄期的混凝土亦具有不同的抗压强度要求。

4)大坝仓面施工质检指标。对于大坝仓面施工质量的控制主要是对备仓工序、浇筑工序和养护工序3个方面来进行控制。其中在备仓工序中又有钢筋绑扎、模板架立等多项施工工序,每一项工序都有其相应的控制指标;浇筑工序主要是对混凝土浇筑过程进行控制如振捣是否密实等;养护工序则是针对收仓后仓面所采取的养护工艺、混凝土成形质量等进行控制。

5)大坝混凝土施工进度指标。其控制指标主要包括混凝土浇筑方量和混凝土浇筑形象。混凝土浇筑方量体现了混凝土施工进度情况,一般而言,混凝土浇筑方量越大说明混凝土施工进度完成的越好。然而,由于每年度汛要求,还要注意大坝混凝土浇筑形象,要兼顾边坡坝段的混凝土浇筑,而不能一味地追求河床坝段大体积仓位的混凝土施工。因此,需要从混凝土的浇筑方量和浇筑形象两个监控指标来对大坝混凝土施工进度进行控制分析。

6)大坝混凝土温控指标。其控制指标主要包括混凝土的出机口温度、浇筑温度和最高温度以及各个冷却通水期的混凝土降温速率。其中混凝土的最高温度是温控监控指标中最重要,在大坝混凝土浇筑过程中需要严格控制。

## 4 网络平台下的高拱坝施工实时控制系统

网络平台下的高拱坝施工实时控制系统采用  $N$

层计算结构。从逻辑角度看,系统分成客户端、Web服务器、应用服务器、数据库服务器;从物理角度看,应用服务器可以视用户并发数从1到 $N$ 台进行扩充,以保证客户端用户的响应要求。系统工作模式采用C/S模式与B/S模式相结合的方式,从逻辑上划分为以下3层。

1)表现层。展现给用户的界面,即用户在使用一个系统的时候的所见所得。其位于最外层,离用户最近,用于显示数据和接收用户输入的数据,为用户提供一种交互式操作的界面。

2)业务逻辑层。包括Web服务器和应用服务器。应用系统的业务逻辑层,是系统架构中体现核心价值部分,它主要集中关注在业务规则的制定、业务流程的实现等与业务需求有关的系统设计上。其处于数据访问层与表现层中间,起到了数据交换中承上启下的作用。

3)数据访问层。主要是用来存储和管理各种数据,负责对各种数据库和数据源的访问。

## 5 工程实例

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。大坝混凝土总量约530万 $m^3$ ,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。

笔者研发的网络平台下的高拱坝施工实时控制系统对大坝施工过程数据信息进行了有效的集成和共享,从大坝首仓混凝土开浇即在现场投入使用,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动态实时控制分析。以下仅列举系统在应用中的部分成果。

1)系统对大坝右岸高线两座拌和楼的混凝土拌和生产数据进行了采集与分析,发现1#和2#两座拌和楼在供应大坝混凝土时其各组分的称量合格率基本上都在90%以上,只有1#拌和楼在为大坝14#-19单元供应混凝土时,其中的特大石的称量合格率只有87.2%。总体来看,右岸高线的混凝土拌和系统称量误差控制得较好,混凝土拌和生产过程在可控范围之内,1#和2#两座拌和楼的特大石称量合格率统计分别如图5(a)和(b)所示。

2)系统对大坝施工进度控制与分析中两个重要的指标混凝土施工入仓强度和大坝层间间歇时间进行了采集与分析。其中大坝混凝土仓面单元的入

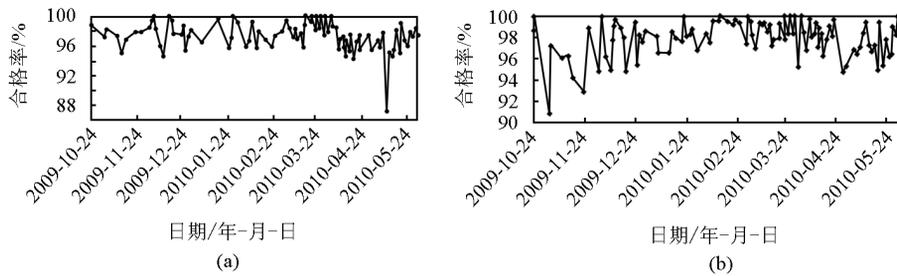


图5 拌和楼特大石称量合格率统计

Fig. 5 The statistics of weighing qualified percent of large stone in the mixing plants

仓强度统计如图 6 (a) 所示, 平均入仓强度为  $158.89 \text{ m}^3/\text{h}$ , 且随着施工控制管理的加强, 后期的入仓强度要高于前期, 但是还具有进一步提升的空间; 大坝所有仓面单元的层间间歇时间统计如图 6 (b) 所示, 平均层间间歇时间为 10.46 d, 超过设计标准 14 d 所要求的混凝土仓面单元有 36 个, 没有

超过 28 d 形成老混凝土的仓面单元, 且大坝后期混凝土施工的层间间歇时间相比前期有所下降, 基本上能保持在 10 d 左右, 在施工中应该注意混凝土浇筑能力的提高以及跳仓规则的优化, 保证大坝混凝土短间歇连续浇筑上升。

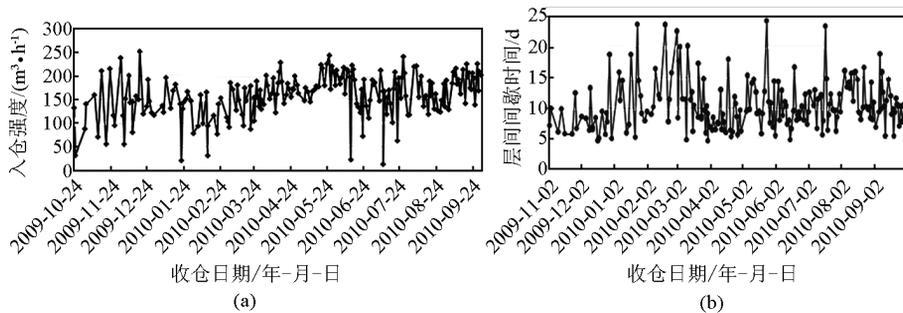


图6 大坝混凝土施工进度指标统计

Fig. 6 The statistics of the dam concrete construction progress index

## 6 结语

将系统集成理论应用于高拱坝施工实时控制与分析中, 有利于各种数据资源的共享以及功能的有机结合, 可以实现大坝施工过程中质量和进度的在线实时监测和反馈控制。笔者在对高拱坝施工实时控制技术分析的基础上设计了高拱坝施工实时控制系统集成框架, 从数据信息集成、应用功能集成、技术方法集成和监控指标集成 4 个方面详细论述了高拱坝施工实时控制系统集成的实现过程。基于上述理论和方法研制开发了网络平台下的高拱坝施工实时控制系统, 并结合某高拱坝工程进行了应用研究, 提高了该大坝建设管理与控制水平, 为其高标准、高强度连续施工提供了有力的技术支持。

### 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[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.  
[2] Zhong D H, Ren B Y, Li M C, et al. Theory on real-time control

of construction quality and progress and its application to high arc dam [J]. Science in China Technological Science, 2010, 53 (10): 2611 - 2618.  
[3] Leung S W, Mark S, Lee B. Using a real-time integrated communication system to monitor the progress and quality of construction works[J]. Autom Constr, 2008 (17): 749 - 757.  
[4] 杨天社, 席 政, 黄永宣, 等. 航天工程系统集成模型和策略研究[J]. 空间科学学报, 2006, 26(6): 459 - 464.  
[5] 吕 超, 李爱平, 徐立云. 计算机辅助可重组制造系统集成设计框架[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(11): 1531 - 1536.  
[6] 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.  
[7] 耿志修. 大秦线开行 20 kt 级重载组合列车系统集成与创新[J]. 中国工程科学, 2008, 10(3): 31 - 43.  
[8] 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[J]. Science in China Series E - Technological Science, 2009, 52(11): 3406 - 3412.  
[9] 温志萍, 程 初. 水电站监控系统中异构数据源的集成研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 190 - 192.

# Theory and application of system integration in real-time control on high arch dam construction

Ren Bingyu, Wu Binping

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[ **Abstract** ] A method of applying system integration theory to real-time control on high arch dam construction was proposed to fit the strong complexity and randomness in the construction process. A system integrated framework of real-time control on high arch dam construction was designed. Then, the implementation process of the system integration was illustrated in detail from four aspects of information integration, function integration, technique integration and monitoring index integration. Finally, a real-time control system based on the network platform was built up. The application result shows that the theory and the system can realize integrated control and analysis dynamically, and improve the dam construction management level effectively.

[ **Key words** ] real-time control; system integration; data integration; network platform; high arch dam construction

---

(上接 83 页)

# Research on dynamic visual simulation for construction process of river closure project based on virtual reality

Tong Dawei

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[ **Abstract** ] In this paper, 3D simulation model for the river closure is established by making use of virtual reality and 3dsmax technique. With the analysis of the dynamic hydraulic characteristics at the closure-gap, a VR-based 3D dynamic visual-simulation of method for the complex process of river closure is presented. In this visual representation, comparison among different schemes of river closure is achieved easily. Therefore, a powerful visual tool for aiding river closure design and management can be provided.

[ **Key words** ] virtual reality; river closure; three-dimensional dynamic; visual simulation