

# 地下工程智能施工安全与质量实时监控系统研究与应用

杨彬林, 钟 为

(国电大渡河流域水电开发有限公司, 成都 610041)

**摘要:** 在“互联网+”时代背景下, 水电工程建设管理出现诸多新概念与新理论, 传统的工程建设管理模式在该背景下存在诸多优化进步的空间, “智慧工程”的概念呼之欲出。本文针对水电地下工程, 以信息化、智能化手段为基础, 以工程安全、质量、进度为管控目标, 构建了地下工程智能施工安全与质量实时监控系统, 对智能化的地下工程建设管理进行了系统探索, 系统基本实现了安全实时监控、质量全程可追溯、进度动态控制、信息可视化集成展示的目标。其成果已经成功应用到了双江口水电站地下工程建设过程中, 为水电地下工程“智慧工程”建设提供有力参考。

**关键词:** 智慧工程; 地下工程; 智能监控; 系统应用; 安全质量

## 1 引言

水电是绿色可再生能源, 兼具防洪、灌溉、航运、供水、扶贫、旅游等综合效益, 是具有重大现实意义的民生工程、绿色工程、安全工程、和谐工程<sup>[1]</sup>。我国水电工程建设自改革开放以来取得巨大成效, 但仍然存在参与方众多、管理对象复杂、协调工作量大、管控内容多等难点<sup>[2]</sup>。随着大数据、云计算、物联网、人工智能、5G时代的到来, 全球各界为提升自身发展力, 社会结构和经济模式都随时代潮流而改变<sup>[3]</sup>。传统水电工程建设亦顺应时代潮流, 引入了新技术和管理方式。目前, 涂扬举等人根据企业管理的特点, 提出了智慧企业体系建设方案, 包括智慧电厂、智慧检修、智慧调度、智慧工程这四大业务单元的建设方法<sup>[4-9]</sup>。其中, 智慧工程作为智慧企业重要业务单元, 已在大渡河流域水电工程建设管理过程中进行了大量尝试, 发挥了重要作用<sup>[10]</sup>。

地下工程施工安全与质量实时监控系统是智慧工程的重要组成部分, 该系统利用物联网、全球定位技术GPS/北斗、建筑信息模型技术BIM、移动互联技术MS等现代先进信息技术对引水发电系统、泄洪系统的设计、建设和运行过程中涉及的施工资源、施工质量、工程进度等信息进行动态采集、自动分析、智能管控和闭环反馈, 对工程安全实时监测和预警、质量全过程可追溯、工程进度三维可视化实时监控以及进度分级预警和分级决策。本文旨在以实现水电工程高效、智能、实时为目标, 对该系统开展研发与应用, 为中国水电地下工程建设智能化提供有力参考。

## 2 系统设计

**2.1 系统总体构架** 该系统构架如图 1 所示, 是基于 WebAPI 及实时通信框架, 搭载三维可视化基础平台, 采用 SOA 的设计思想开发实现多层次的应用体系结构。该系统构架分为五个层级, 由基础保障层、数据获取与接入层、通用服务层、业务组织层、业务表现层组成。其中, 基础保障层是获取数据的最基本设施, 主要负责硬件设备和网络环境的条件保障; 数据获取与业务接入层

从各类外部系统或新建系统中获取基础数据，并提供接口接入数据上传至通用服务层。通用服务层提供数据服务和应用服务两类支撑，数据服务提供统一的数据存储、管理、供述，应用服务提供通用的服务构件。业务组织层包括地下工程定位、质量评定、混凝土质量监控、信息可视化集成与预警决策业务的组织，其中信息可视化集成与预警决策业务是在其他业务模块基础上，集成其业务数并进行分析与预警。业务表现层主要服务于现场施工及管理人员，通过 PC、大屏幕、手机移动终端实现页面展现、预警预报、指挥决策等功能。

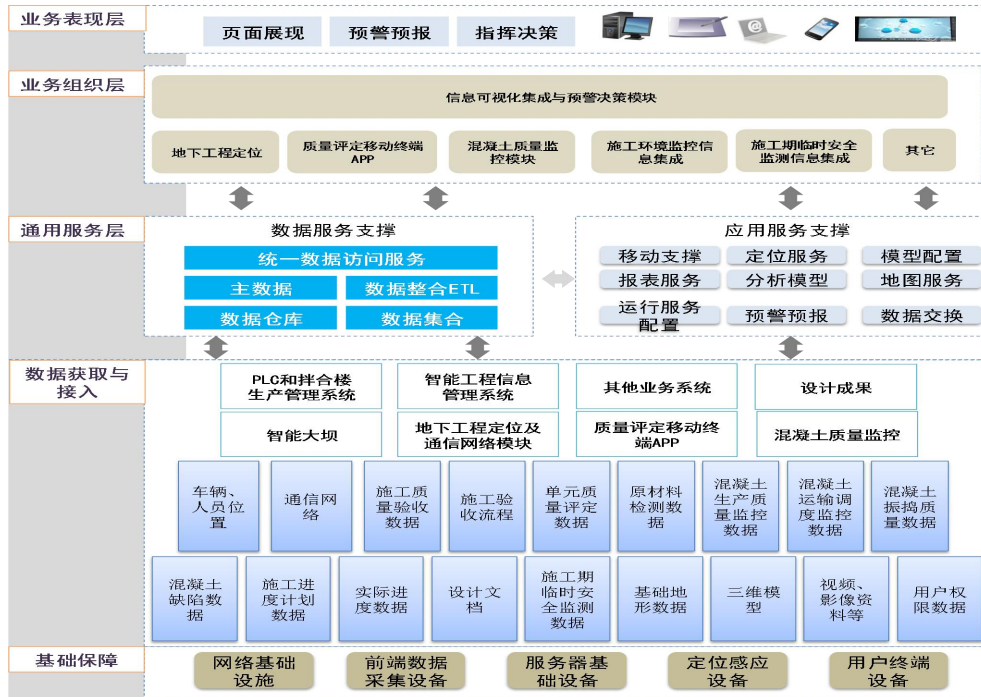


图 1 地下工程施工安全与质量实时监控系統总体架构图

2.2 基础设施部署 该系统基础设施设计如图 2 所示，采用 UWB 射频识别技术和“4G+WIFI”双网通信技术，在地下工程中根据工程进展动态建设人员定位管理网络及无线覆盖网络，使 UWB 信号覆盖已开挖的重点洞段区域，使“4G+WIFI”双网通信技术能够为本系统及本项目其他子系统提供地下工程接入网络支持。

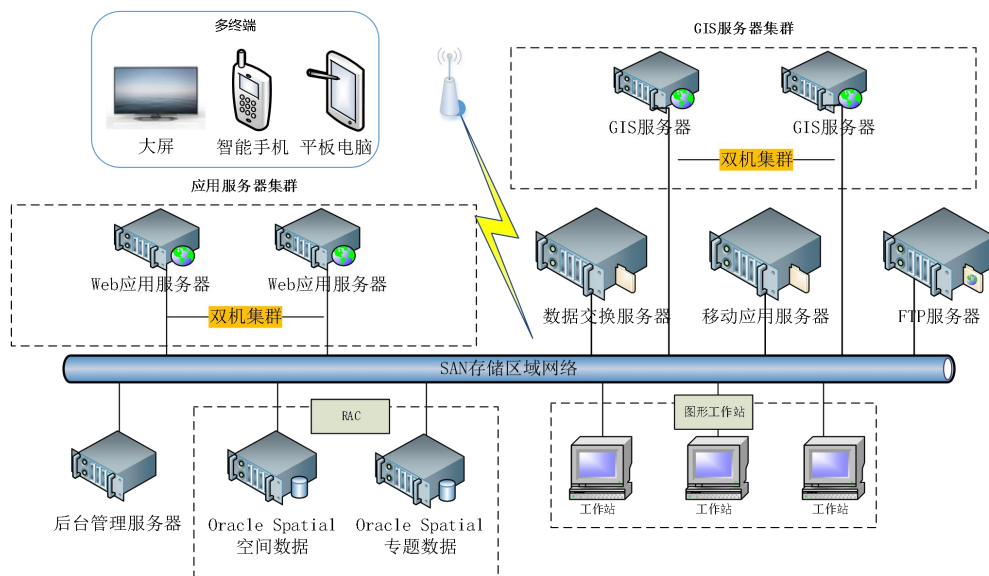


图 2 地下工程施工安全与质量实时监控系統基础设施设计

**2.3 系统数据结构及分析设计** 地下工程施工安全与质量实时监控系统的结构由数据应用层、数据储存层、外部系统及内部数据接口四部分组成。其中，数据应用层是从外部系统和内部数据接口以及系统使用者获取源数据，经过加工处理后录入数据库；数据储存层是在数据源的基础上，通过 ETL 进行数据整合形成供上层计算或业务使用的数据库及数据集；外部接入系统通过接口链接向数据应用层及数据储存层提供数据；内部数据接口主要功能是向系统应用层提供所需的数据，并批量导入至数据储存层。

地下工程施工安全与质量实时监控系统设计分为 5 个层级。其中，系统采用 Bootstrap 框架作为 UI 的基本实现，其他特殊需求采用 DHTMLX 的 UI 库的功能进行实现，系统报表使用 Echarts 库来呈现；系统主要业务功能实现采用 PHP 技术框架 ThinkPHP，数据实时采集部分使用后端通信框架进行 socket 实时通信；系统数据库采用 Oracle 来对数据进行物理存储，对于性能响应要求高的部分使用 Redis 来内存存储，提供给业务层访问的数据接口有 Restful 接口和 SOA 服务。系统数据接入通过读取数据采集设备获取数据，数据根据需要使用 ETL 工具转换进入 Oracle 关系数据库中存储。

### 3 系统功能设计及关键技术

**3.1 系统关键技术** 地下工程施工安全与质量实时监控系统依托数据外部系统接口与混凝土拌合楼、车辆定位系统、施工环境监测、爆破振动监测、岩爆监测、松动圈监测等系统实现数据集成四项关键技术。

**3.1.1 地下工程施工安全与质量状态全要素、全过程、全天候智能感知方法及成套技术** 该技术基于隧洞内高精度定位技术，实现了检—验—审各环节超时预警功能，具有地下工程施工质量验评 8 类 170 余项验评标准体系。

该技术设有大体积混凝土振捣过程中振捣覆盖度、插入深度、振捣时长等混凝土振捣工艺智能化监控关键参数，并基于振捣能量密度的混凝土振捣质量分布算法研发了混凝土振捣棒智能穿戴设备，实现了混凝土振捣质量全过程智能监控与实时动态纠偏。

**3.1.2 多种新型智能感知技术的施工—运行一体化工程安全风险监测技术** 针对地下工程地应力高、安全风险高的特点，该技术设有感知传感、受力承载一体化的内嵌光纤自感知智能锚杆(锚索)，通过全时段、高频次自动化数据采集功能，建立有锚杆(锚索)实时监测数据与锚杆(锚索)内应力变化情况的关联评价机制；并融合了微震监测、爆破振动监测、施工环境监测传感器和多源异构数据等技术，通过柔性测斜仪实现了洞室全断面准确监测和在线实时监测。

该技术同时建立了地下洞室安全性态与监测信息耦联机制与地下洞室安全风险动态评估与预警模型，依托智能安全帽将预警信息传递到安全管控平台，实现了地下工程安全的全方位智能管控。

**3.1.3 智能感知大数据的施工安全与质量风险量化分析与预警技术** 该技术基于对工程建设状态的实时智能感知，建立了涵盖安全/质量/进度多维度、人/机/料/法/环等多要素、现场/部门/项目等多层级的 6 大类 120 项分级、量化、协同预警指标体系，并构建了基于智能感知大数据的趋势分析与提前预警模型，基于智能感知海量数据创建了工程建设安全、质量风险量化评价、趋势分析、提前预警和协同管控方法，有效提升风险管控能力、降低工程建设风险。

该技术同时将高精度微震监测术引入洞室群开挖中，采用不同微震预警指标对地下洞室群围岩稳定性进行评价，建立了基于微震监测和数值模拟的地下洞室群安全评价方法；并通过建立厂区三维地质模型和采用数值模拟手段研究深埋地下洞室群在开挖过程中可能出现的大变形情况，能圈定和识别地下洞室群潜在风险区域。

该技术基于全面监测大数据的分析，提出了基于监测大数据的地下工程围岩时空力学响应与安全动态调控技术，实现了开挖强卸荷过程高地应力地下洞室群稳定性的动态评价(图 3)。

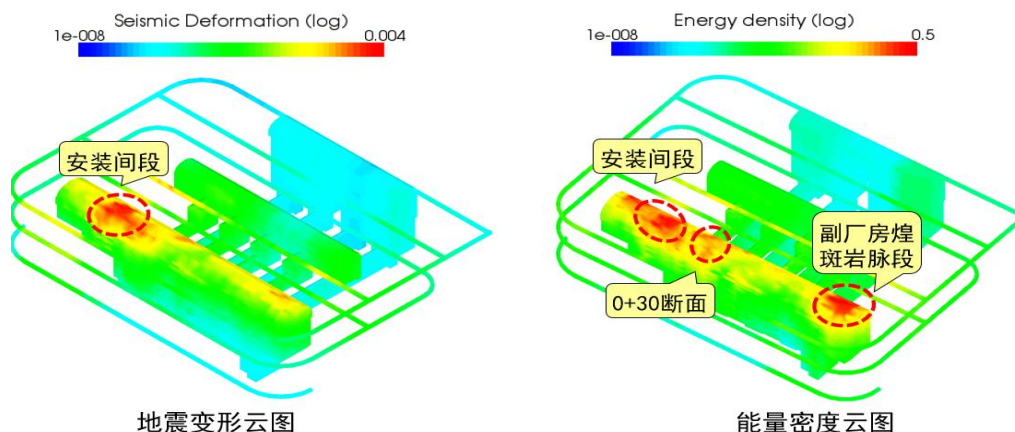


图3 地下工程围岩时空力学响应与安全稳定动态调控技术

**3.1.4 智能感知大数据的施工安全与质量风险量化分析与预警技术** 该技术基于智能感知和风险量化分析建立了设计-监测-施工联动机制和开挖卸荷过程深埋地下厂房洞室安全预警机制；并基于爆破振动及松动圈监测数据建立地下厂房开挖支护优化工法，获取了适用于不同地应力地区最优爆破参数；形成引水发电系统工程地下洞室群开挖支护施工程序中的关系，动态大数据指导施工。

该技术应用“云、大、物、移、智”及 BIM 等前沿信息技术，建立“智能感知-真实分析-实时馈控”动态管控理论，形成了集智能感知、真实分析、实时馈控功能于一体的大型地下工程施工智能管控平台（图 4）；该技术可将设计信息集成到 BIM 模型中，通过系统平台将 BIM 数据直观、高效地传递给施工、监理和业主单位，现场施工信息通过系统平台采集、加载在设计 BIM 模型上，设计单位基于反馈信息进行设计方案优化和调整。

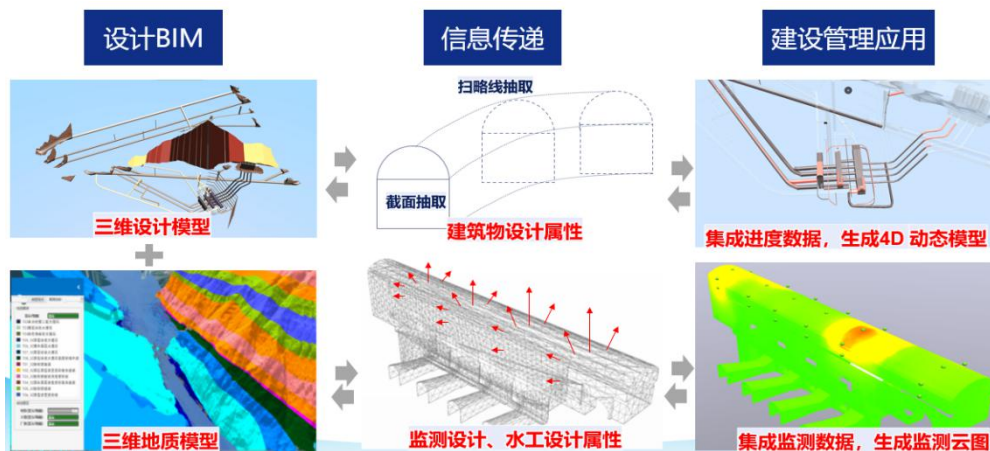


图4 基于施工一体化全信息 BIM 模型的设计反馈与动态优化

**3.2 系统主要功能设计** 地下工程施工安全与质量实时监控系统包括施工工序质量验评及单元工程质量评定、混凝土质量监控、施工进度信息分析与预警决策、质量信息分析与预警决策、施工安全监测信息集成与预警、人车定位管理模块及三维动态设计成果管理模块。

施工工序质量验评及单元工程质量评定由手机端 APP 控制，包括二大功能：质量过程管理、施工日志管理。其中质量过程管理主要对开挖、支护、混凝土、灌浆、金结埋件及机电安装进行验评；施工日志管理对日志填报及日志审核进行验评。

混凝土质量监控模块是混凝土质量监控过程信息管理、实时监控、即时预警于一体的平台，主要有混凝土原材料质量管理、混凝土生产质量监控、混凝土运输调度监控、大体积混凝土振捣质量监控、混凝土缺陷管理等功能。

施工进度信息分析与预警决策主要功能是负责施工进度计划管理、施工进度计划形象可视化、实际进度信息管理、实际施工过程动态可视化、施工进度偏差分析与预警、施工进度仿真预测、质量信息分析与预警决策。

施工安全监测信息集成与预警主要功能有爆破震动、岩爆监测、施工环节监测及松动圈监测。其中，爆破震动及松动圈监测是对爆破震动及松动圈的数据导入，并为爆破震动及松动圈展示功能提供数据；岩爆监测主要是将岩爆监测数据导入，并在三维场景中展示；施工环境监测是将导入的施工环境监测数据在三维模型中展示。

人车定位管理模块应用 RFID、UWB、GPS 技术进行人员及车辆的定位，通过瘦 AP 架构实现地下工程网络覆盖，主要有人员及车辆基本信息查询功能、人员及车辆位置信息实时展示功能、人员及车辆历史轨迹回放功能、人员及车辆到岗及越界情况分析功能。

三维动态设计成果管理功能主要是对模型中指定部位的基本信息、附件信息、围岩类信息的显示。其中基本信息主要包括入库时间、所属部位、长度、围岩类、起始桩号、终止桩号、开挖工程量、支护工程量、衬砌工程量、所属标段、施工方法、描述等信息的显示；附件列表主要是对该部位所有的成果文件的显示；围岩类信息主要是对该部位所有部段的围岩类信息。

## 4 系统应用

**4.1 工程概况** 双江口水电站地处四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康县、金川县境内，具有明显的大陆性高原季风气候特征，年平均气温一般 6°C 以下，极端最低气温可达 -36°C，平均海拔高度在 2500m 左右，最大地应力达 38MPa，强度应力比小于 4。枢纽工程由拦河坝、引水发电系统、泄洪系统组成。其拦河大坝最大坝高 312m，为同类心墙堆石坝中的世界第一高坝。工程的引水发电系统和泄洪系统主要由地下洞室构成，其中引水发电系统包括进水口、压力管道、主副厂房、主变室、出线系统、尾水调压室、尾水隧洞、尾水塔等构成，泄洪系统由洞式溢洪道、深孔泄洪洞、竖井泄洪洞、放空洞等组成。

**4.2 应用概况** 针对双江口工程特点，结合双江口智慧工程总体架构，该系统已经成功研发并应用。其中，地下工程混凝土施工质量管控初步应用于双江口尾调交通洞和进水口混凝土浇筑中；施工进度信息分析与预警决策功能与人车定位系统相结合，应用于双江口地下洞室中；施工工序质量验评及单元工程质量 APP 与施工安全监测信息集成与预警已实现对地下工程的安全与质量全面管控；三维动态设计成果管理功能依托施工一体化 BIM 实现了设计数字移交及设计优化反馈。

**4.3 应用成效** 目前，该系统在双江口水电站工程建设中应用已日趋成熟，社会经济效益显著，系统基本实现了安全实时监控、质量全程可追溯、进度动态控制、信息可视化集成展示的目标。

在安全实时监控方面，上报隐患 9000 余次，及时闭合率 99.7%，隐患处理闭合时间平均 3.01 天；成功预警高风险岩爆、人员安全风险共计 10 余次累计采集数据 1 万余条，发生爆破振动二级预警 2 次、三级预警 15 次，发生岩爆监测三级预警 1 次，发生施工环境监测二级预警 7 条、三级预警 292 条。

在质量管理方面，实现了对施工质量和日志的全程管控，所有的质量验评资料的传递都做到了按时、保质、保量；混凝土的配合比符合率达到 95.5%，强度保证率达到 95.4%，振捣覆盖率达到 96.8%；管理程序类表单 120 余类，质量验评类表单 50 余类；工序三检审批流程平均完成时间缩短至 1.2d，效率提升 45%。

在进度动态控制方面，实现隧洞施工面貌自动识别。结合施工资源投入、历史施工工效和当前施工面貌，成功预警了关键线路进度偏差，辅助及时进度纠偏（图 5）。

在信息可视化集成展示方面，主要运用三维动态设计成果管理技术与人车定位技术相结合，创建了施工阶段移交全景 BIM 信息模型，模型对象包括 13000 余个，地质及设计属性信息 10 万余条；完成施工进度信息集成并向设计反馈 1000 余条，安全监测信息集成及反馈 20000 余条。通过 BIM 平台完成设计优化 8 项，节约投资 3500 万。

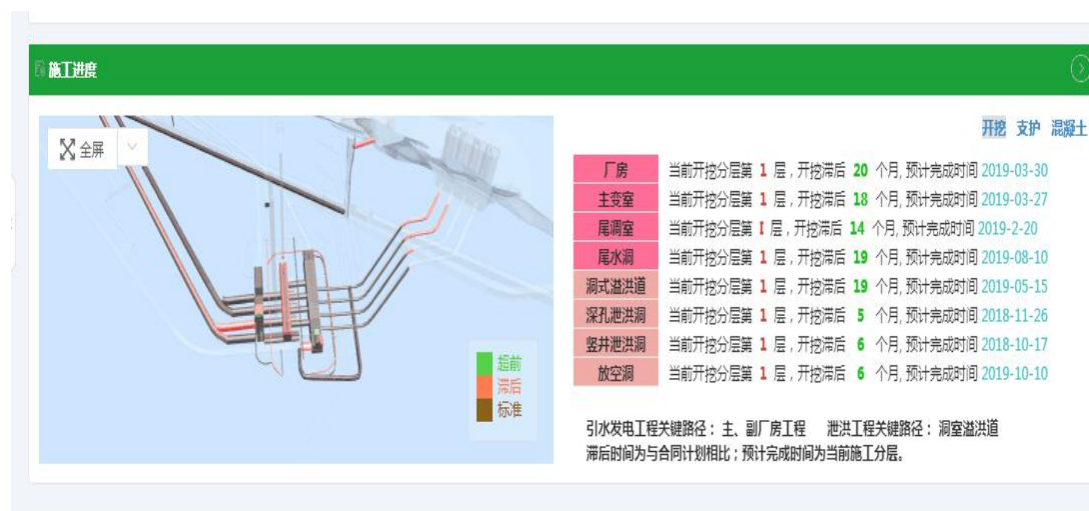


图 5 双江口水电主要洞室施工进度偏差与预警

## 5 结语

水电工程智能化已是大势所趋。地下工程智能施工安全与质量实时监控系统的开发应用是信息化、智能化时代下应用而生的产物，该系统的应用能显著提高地下工程建设的数据整合能力、管理运行效率及风险预判能力，有效节约投资成本。该系统在其他水电地下工程乃至市政交通隧洞工程、城市地下空间施工领域都具有很强的推广前景。同时，该系统可作为未来智慧工程基础，随着新技术的出线继续革新，为水电工程智能化建设创造丰硕成果。

## 参 考 文 献:

- [1] 李锐,杜治洲,杨佳刚,何思源,张凌.中国水电开发现状及前景展望[J]. 水科学与工程,2019(06):73-78.
- [2] 涂扬举. 智慧工程在大渡河水电建设中的探索与实践[C]. 中国大坝工程学会.水库大坝高质量建设与绿色发展——中国大坝工程学会 2018 学术年会论文集.中国大坝工程学会:中国大坝工程学会,2018:208-217.
- [3] 彭远川,彭显国,杨亚刚.基于智慧工程理念的水电工程智能安全管控系统研发与应用[J]. 四川水力发电, 2019,38(S2):118-121.
- [4] 涂扬举,郑小华, 何仲辉, 等. 智慧企业框架与实践[M]. 北京: 经济日报出版社, 2016.
- [5] 涂扬举. 建设智慧企业, 实现自动管理[J]. 清华管理评论, 2016(10): 29-37.
- [6] 涂扬举. 水电企业如何建设智慧企业[J]. 能源, 2016(8):96-97.
- [7] 涂扬举. 智慧企业关键理论问题的思考与研究[J]. 企业管理, 2017(11):107-110.
- [8] 涂扬举. 数据驱动企业管理[J]. 企业管理, 2018(2):100-103.
- [9] 涂扬举. 基于自主创新的智慧企业建设[J]. 企业管理, 2018(5):21-22.
- [10] 李善平,肖培伟,唐茂颖,段斌,陶春华.基于智慧工程理念的双江口水电站智能地下工程系统建设探索[J]. 水力发电, 2017,43(08):67-70+111.

# **Research and application of real-time monitoring intelligent system for security and quality of underground engineering**

Yang Bin-lin, Zhong wei

*(Dadu River Hydropower Development Co Ltd, Chengdu 610014)*

**Abstract:** Under the background of "Internet+", there are many new concepts and new theories in the construction management of hydropower projects. There are many development space in the traditional engineering management mode, and "intelligent engineering" is coming. In this paper, the system was constructed and systematically explored based on the information and intelligent means for monitoring security and quality of underground engineering, and the system. The system was achieved real-time monitoring effect for the safety, quality whole process traceability, rate of progress was control by the system dynamic, and the goal of information visualization integrated display. The results have been successfully applied to the construction of the underground engineering of Shuangjiangkou Hydropower Station, providing a strong reference for the construction of "smart engineering" of the underground engineering of hydropower station.

**Key word:** Intelligent engineering; underground engineering; intelligent monitoring; system application; security and quality