

文章编号:0559-9350(2019)03-0294-11

## 金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践

樊启祥<sup>1</sup>, 陆佑楣<sup>1,2</sup>, 周绍武<sup>1</sup>, 杨宁<sup>1</sup>, 林恩德<sup>3</sup>, 李果<sup>1</sup>(1. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038; 2. 中国工程院, 北京 100088;  
3. 武汉英思工程科技股份有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 运用“全面感知、真实分析、实时控制”的智能闭环控制理论, 提出了以工程建设资源要素动态精准管理、业务流程数字化管理、工艺过程智能控制、实物成本精确分析、结构安全与进度耦合分析及联动调控的数字化技术和智能化技术为核心, 以水电工程数据模型如大坝全景信息模型DIM为基础, 以智能建造管理平台iDam为主体的智能建造技术体系, 并对工程数据结构分解与编码体系、工程数据感知传输共享技术、iDam平台的系统架构与业务架构、智能建造工程绩效等关键技术进行了分析。通过统一规范的工程数据结构与编码体系, iDam平台可集成工程建设全过程的基础数据、环境数据、过程数据和监测数据, 为各业务模块服务; 建立的基于工程技术和数据管理的机理分析功能, 可为工程建设的业主、施工、监理、设计、科研及运行等单位服务。智能建造初步实践表明, 本文构建的技术体系是科学可行的, 对基础设施智能建造技术与管理体的研究与实践具有参考价值。

**关键词:** 智能建造; 管理平台; 智能技术; 数据模型; 编码体系; 水电工程

**中图分类号:** TV512

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13243/j.cnki.slx.20180944

## 1 研究背景

大型水电工程的质量安全关乎国计民生, 攸关国民经济建设大局。为保障工程全生命期安全, 水电建设者一直在探索更好的筑坝技术和更有效的管理方法。随着时代进步和社会发展, 水电工程在历来注重生态环境、水库移民以及工程技术和创新的基础上, 呈现出利用当代最新科学技术和理论方法, 有效应对工程变化, 实时主动掌握工程建设主动权, 来更好地实现安全、优质、高效建设的目标。

水电工程建设技术方法手段的发展历程, 大致可分为4个阶段: (1)人工化阶段。基本靠肩挑手扛, 靠人工计算和绘图, 进行人工统计分析。(2)机械化与计算机化阶段。主要采用大容量、高效率的施工机械装备进行工程建设, 利用计算机进行简单的设计计算和进度分析, 如二滩拱坝和三峡重力坝普遍使用缆式起重机、塔机、胎带机和塔带机<sup>[1]</sup>。(3)数字仿真和信息化阶段。在机械化的基础上, 广泛利用计算机和信息系统进行工程设计和施工管理, 以数字仿真为主开展工程结构安全分析验证, 运用关键路线法CPM、计划评审技术PERT、图示评审技术GERT和风险评审技术VERT, 利用计算机开展工程进度计划综合分析, 代替人工计算<sup>[2]</sup>; 构建进度计划、合同、质量、设计等项目信息管理系统, 如三峡工程TGPMS<sup>[3-4]</sup>; 将信息采集与数值仿真、施工过程仿真、施工工艺控制等融合, 朱伯芳<sup>[5]</sup>提出动态跟踪反演施工期大坝真实工作性态, 实现数据监测与仿真分析同步; 黄声享等<sup>[6]</sup>、马洪琪等<sup>[7]</sup>、钟登华等<sup>[8-9]</sup>、燕乔等<sup>[10]</sup>等分别在堆石坝、心墙坝以及碾压混凝土坝的碾压施工工艺数字化控制方面实现系列突破; 樊启祥等<sup>[11]</sup>、陆佑楣等<sup>[12]</sup>等依托溪洛渡300 m级

收稿日期: 2018-10-24; 网络出版日期: 2019-02-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190226.1652.001.html>

作者简介: 樊启祥(1963-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事水利水电工程建设技术与项目管理研究。

E-mail: fan\_qixiang@ctg.com.cn

高拱坝，建立面向施工过程控制的涵盖混凝土施工、温控、灌浆和金属结构等的数字化管理信息系统，实现施工过程精细化管理；施工进度仿真则由单一的用信息化手段编制工程进度计划、用数字分析软件规划工程进度，转向面向现场施工条件的实时动态仿真分析与预测<sup>[13]</sup>。(4)智能建造阶段。钟登华等<sup>[14]</sup>在数字大坝的基础上提出智慧大坝的概念、基本架构、理论体系和重点研究方向，李庆斌等<sup>[15]</sup>提出了智能大坝的定义并论述其基本特征、构成和建设模式，樊启祥等<sup>[16]</sup>围绕“全面感知、真实分析、实时控制”的闭环智能控制理论，以监测数据仿真分析一体化、施工管理和预警控制在线化、关键工艺过程智能化的控制为核心，集智能化建坝技术<sup>[17-19]</sup>和管理模式<sup>[20-22]</sup>为一体，实现大型水电工程优质高效建造。

在从攀枝花到宜宾长 782 km 的川滇之交的金沙江下游河段，建设有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝等 4 座千万千瓦级的梯级巨型水电站。这些电站位于深山峡谷地区和高地震烈度区，水文、地质、地形条件复杂，具有 300 m 级高拱坝、500 m 级高边坡、8 级高地震烈度、近 50 m/s 高流速及大泄量、大单机容量、大地下厂房洞室群的“四高三大”工程特点，多项单项技术指标位于世界前列，综合技术难度前所未有。

面对金沙江下游大型水电工程建设环境复杂、条件变化、资源流动、结构转换、性态调整等技术与管理体系的挑战，三峡集团遵循大型水电工程“规范、有序、协调、健康”的建设理念，致力于水电工程智能建造技术与管理体系的建设，以智能建造闭环控制理论为基础，以工程结构真实工作性态的安全为目标，通过产学研用协同创新现代坝工技术，并与当代通讯技术、信息技术及数据技术相结合，对工程建设中的资源要素、业务流程、管理程序、工艺过程、实物成本、进度计划进行实时动态分析和耦合仿真预测，开发工程建设全过程数字化、智能化技术，构建大型水电工程智能建造管理平台，大大降低了工程建设过程中人的不安全行为、物的不安全状态、环境的不安全因素及管理缺陷，使数据传递更加广泛快捷，工程决策更加科学及时，项目管理水平和效率显著提升，实现工程规划-建设-运行的全生命周期价值创造。

## 2 水电工程智能建造技术体系及其管理平台

### 2.1 金沙江水电工程智能建造技术体系

2.1.1 智能建造技术体系总体内容 水电工程智能建造面向工程规划、建设、运行的全生命周期，围绕水电工程建设质量、安全、进度、投资、环保及施工区管理等六大目标，以“全面感知、真实分析、实时控制”的智能闭环控制理论为基础，通过统一规范的工程数据结构分解与编码体系，构建大坝全景信息模型 DIM (Dam Information Model)，开发智能建造管理平台 iDam (Intelligent Dam Analysis Management)，在剖析工程结构和建造过程的基础上，构建了以单元工程及其工序与流程为基础的建设过程实时管理和调控系统，形成了面向工程建设全过程的资源要素数字化管理、业务流程数字化管控、工艺过程智能化控制、实物成本精准化分析以及工程建设施工进度与温控防裂及结构安全的耦合仿真分析的智能建造技术体系，依托工程项目管理体系中规划与计划、技术与科研、投资与资金、利益相关者管理、组织机构与人力资源、信息系统、诚信文化、沟通协调及审计巡视的保障支持，最终实现水电工程全生命周期真实工作性态的可知可控和管理绩效增值。

2.1.2 水电工程大坝全景信息模型 DIM 这个模型既是工程建造活动的出发点，也可以说是建造的结果。基于统一编码体系、编码规则，对设计成果进行整理、转换和矢量化，来构建水电工程三维结构模型，如随工程进展不断深化，形成大坝整坝、分坝段、分坝块的工程结构模型及单元深化设计模型，最终细化到混凝土坯层、每根钢筋、冷却水管与止水片等；基于 GIS，形成工程场址三维工程原始地形地貌；基于工程规划和设计各阶段的地质探洞、钻孔、地质调查和力学试验等各方面的地质勘查成果，构建工程场址的三维工程地质模型，包括工程物探钻孔信息与试验数据，地形、地层、岩性、结构面等三维地质建模成果及基础岩体的热学、力学参数信息等；把三维结构、地形、

地质模型叠加构成工程三维全景模型。以三维全景模型为基本信息载体，加载专业、时间、特性、属性等多维度定性定量信息，并动态融合基础数据、环境数据、过程数据、监测数据，集成技术标准与规范、施工过程、资源投入、试验检测、质检信息、实物成本、监测资料、文档资料及多媒体信息，形成基于最小单元信息模型的DIM数据中心。这个模型展现了工程初始设计状态、建设过程动态发展状态和建成后的竣工状态，可以满足工程建设精准工程量计算与实物成本计量、进度仿真与结构数值分析、监测物理场拟合以及建设期4D模拟与形象展示等应用需求，反映了数字工程向实体工程的转变过程，形成数据资产。

**2.1.3 资源要素流动管理技术** 资源要素包括人、设备、材料等，以综合定位技术为基础，面向作业人员达标准入与人员、设备行为状态安全，研发可穿戴、便携式和车载式定位终端等，实现建设过程作业人员与物资设备等资源要素的准入管理和行动轨迹分析。通过位置信息的时空分布规律以及时长与消耗规律，实现人员和设备行为的智能识别，动态判断人员履职履责行为或设备运行状态违规与否。通过资源流动的实时动态精准管理，在合法性、合规性以及工程建设活动业务资格资质与工点岗位的匹配性上，消除人、机、料、法、环的变化带来的不确定性，消除隐患保证施工安全。

**2.1.4 业务流程数字化管理技术** 以规范化、格式化、标准化业务流程及其表格系统、定位技术和移动互联为基础，面向单元工程质量验收和安全隐患排查治理，借助移动端如手机、PAD和定位技术进行实时在线动态管理，实现业务流程和管理程序的“实时、实地、实人、实据、实物”管控，确保现场一线管理活动记录和资料的完整性、真实性、有效性、可追溯性，提高流程的过程质量和履约能力。

**2.1.5 工艺过程智能化控制技术** 以施工工艺过程精细管理为主线，对施工过程(如基坑开挖、混凝土浇筑、混凝土温控、固结灌浆、帷幕灌浆、金属结构制作与安装、接缝灌浆、回填灌浆、接触灌浆等)和技术服务(如试验检测、安全监测、测量管理等)的各工序数据进行全面采集、集成分析与展示应用，并实现关键工艺过程如混凝土通水冷却过程、水泥灌浆工艺过程的智能控制，实现业务链、各工序一条龙的智能优化分析，从而对其中某一环节进行调控，增强工艺过程的控制能力。

**2.1.6 实物成本定量化控制技术** 以单元工程或工序为研究对象，采用移动互联、GPS/北斗定位和数据集成等技术，对人工投入及其时效，对材料设备等的实物直接投入，以及资源要素的过程变化，进行实时实地量化管理，实现时空环境下人力资源、设备动态、物资运输的在线实时动态调度和交互管理，通过定制式的单元工程如混凝土仓号的备仓、浇筑和养护的全过程管理，结合单元实物工程量和建设过程单仓/各工序资源消耗量，最终达到资源消耗优化、成本分析优化的协同管理，消除浪费，降低成本。

**2.1.7 结构安全与工程进度耦合仿真分析** 在确保结构安全的基础上，通过分析、预测、对比、调控，实现环境场、温度场、应力场以及不同施工进度方案的优化，在结构安全、资源配置和建设目标之间找到可靠、经济、安全的建设计划。如高拱坝智能化建设，要研究全坝全过程工作性态仿真分析方法、多维约束条件下进度耦合分析技术、浇筑形态控制策略，开展多场耦合进度的工作性态跟踪仿真，分析坝体浇筑过程、灌浆前后、蓄水前后、水位抬升前后坝体-基础变形和应力、应变、渗流等调整过程，实时、在线精确掌握坝体-基础的运行状态和变化规律，并对工程短期、中期和长期工作性态进行预测，与同类工程进行对比，进而采取针对性的调控措施。

**2.1.8 智能建造管理平台 iDam** 水电工程智能建造技术体系集中体现在智能建造管理平台 iDam 以及集成在其中的工程建设数字化和智能化技术。iDam 是一个产学研用集成协同的共享工作平台，其业务模块与协同工作关系如图 1 所示。iDam2.0 在溪洛渡拱坝智能化平台 iDam1.0<sup>[21]</sup> 的基础上进行了全面的架构与技术升级，其中核心业务模块在混凝土施工、固结灌浆、接缝灌浆等的基础上，扩展了单元质量验收、试验检测及开挖支护等；对关键工艺过程实现智能控制，内嵌仿真分析等专业软件，

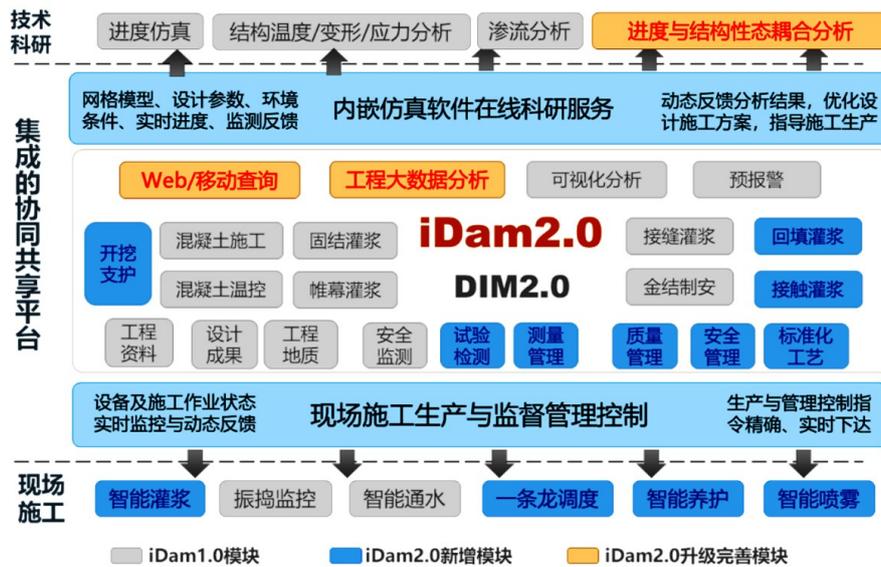


图1 智能建造管理平台iDam的业务模块与协同工作关系

实现与生产紧密结合的科研技术体系，满足水电工程全专业、全过程的数字化、智能化管理要求。iDam实现了生产科研设计跨单位、跨组织、跨标段的一体化协同工作，解决了建设过程多阶段、多专业、多履约主体的流程、工艺和绩效管理问题。其提供的数字化、智能化技术及其解决方案，实现核心工艺过程的智能调控，通过单项目与多项目工程数据的智能分析来实现管理增值，体现了智能建造管理理论、管理内容、管理方法及其管理目标的统一。

**2.2 金沙江水电工程智能建造门户组成** 水电工程智能建造门户集中体现了智能建造技术体系组成及智能建造管理理论和逻辑关系，组成如图2所示。



图2 金沙江下游大型水电工程智能建造门户架构

中间部分即A区包含了三方面内容，核心部位是其智能管理闭环控制理论及其数据中心DIM和管理平台iDam的集成模型，体现了“全面感知、真实分析、实时控制”智能控制管理及全生命期、多

工程项目的管理理念；i-工程主要反映智能建造管理平台当前管理的工程名称，面向多项目管理；i-绩效主要体现在单项目管理绩效以及多工程项目的分析评价。

左侧B区是i-建筑物、i-专业流程、i-工艺过程，从三个层面来展现工程建筑物的结构关系和技术活动。这三层关系，从上到下是结构分解关系，从下到上是施工集成关系，不同的工序工艺过程构成了不同的专业流程，不同的专业流程组合形成了需要建造的建筑物，智能建造的技术核心落脚到建造活动的基本单元，即单元工程的工序工艺。面向大坝、厂房、溢洪道、边坡等不同工程建筑物，通过工艺过程、业务流程和管理程序，体现了智能建造活动与工程结构紧密关联的内在关系。

右侧C区是智能建造的管理活动，由i-要素、i-管理程序、i-支撑体系构成。i-要素是要实现基于位置的实时动态管理，如建筑市场管理系统、人员定位及其轨迹系统、物料全程管理系统、物质核销系统等；i-管理程序，由安全、质量、成本、进度等职能管理程序构成，如大坝混凝土单元工程质量验收需要履行的施工单位三检程序和监理验收程序，i-支撑体系是金沙江水电工程建设管理的九大支撑体系<sup>[21]</sup>，通过科研管理实现产学研用协同创新，通过资金流封闭管理实现工程结算及工程投融资体系的对接。

下部区域即D区的4类数据构成了DIM的数据组成与来源。

### 3 水电工程智能建造技术体系的关键技术

水电工程智能建造需要遵循“总体规划、分部实施”的开发理念，从全局角度、顶层设计来思考智能建造体系、系统结构、系统框架和实施计划，通过任务层层细化分解，保证设计、研发和试验、应用落实到位。水电工程智能建造的关键技术首先是工程数据即大坝全景信息模型DIM的数据编码体系，第二是工程数据感知、传输及共享技术，第三是智能建造管理平台iDam系统架构，第四是智能建造工程绩效分析。

#### 3.1 工程数据编码体系

3.1.1 工程数据编码体系的作用 统一规范的工程数据结构与编码体系是智能建造的基础。水电工程由承担不同功能如挡水、发电、泄洪的建筑物等组成，建筑物的建造活动是专业流程如开挖、混凝土、灌浆、机电等的集合，各专业流程的核心是其面向工序的工艺过程，如混凝土由混凝土材料、拌和、运输、浇筑和温度控制等组成。每一个工序组成及其工艺过程是工程建造的基本单元。统一的工程数据结构分解和属性编码构成了工程建造活动中的基本构造单元，如最小单元工程或工序的全景信息。通过建立水电工程结构分解编码与属性分类编码一体的数据编码标准体系，可实现



图3 智能建造工程数据编码的结构分解编码体系

跨工程、跨组织、跨专业、跨职能的工程数据共享、信息协同、绩效分析与对比。智能建造的每一个工程数据都有一个独立的编码，它由工程结构编码和属性编码两部分组成。

3.1.2 工程结构分解编码 结构编码具有固定性、唯一性，反映了工程的组成关系。以《水电工程设计概算编制规定(2013版)》<sup>[23]</sup>、三峡集团《Q/CTG 93-2017 水电工程项目概算代码》和标准化工序流程与专业管理表格为基础编制，采用线编码与面编码组合编码方式，总体分为工程代码、(扩大)单位工程、分部工程、分项工程、单元工程、工序六级编码。每级别编码之间采用“-”隔开，每级编码内部采用指定类型码+顺序码组合的方式编码。工程数据结构分解编码总体规则如图3所示。

表1 工程数据编码的属性分类及属性描述

序号	属性分类	属性描述
1	几何属性	对象及三维模型所表达的长、宽、高、面积、体积及结构特征等属性
2	位置属性	对象所在的空间位置及对象之间的空间位置关系
3	材料属性	材料的热学、力学属性信息
4	阶段属性	预可研、可研、招标、施工
5	合同属性	合同编码、清单项目,分包属性等
6	时间属性	计划及实际的开始、结束时间
7	数据类型	数字、音频、图片、视频
8	过程属性	建设过程动态采集的各类生产、运输、施工作业中的进度、测量、检测、质量、安全等数据及日志信息
9	来源属性	规划设计、仿真模拟、现场采集等

表2 工程数据编码的属性编码组成

大类		中类		主要属性指标类型									
编码	名称	编码	名称	几何属性	位置属性	材料属性	阶段属性	合同属性	时间属性	数据类型	过程属性	来源属性	
1	基础数据	1	工程特征		√				√	√		√	
		2	工程设计	√		√	√		√	√		√	
		3	地质信息	√	√	√	√		√	√		√	
		4	概算与合同				√	√	√	√	√		√
		5	施工设计	√		√		√	√	√	√		√
2	环境数据	1	工程大环境		√				√	√	√	√	
		2	局部小环境		√				√	√	√	√	
3	过程数据	1	管理责任				√	√	√	√	√	√	
		2	人力		√		√	√	√	√	√	√	
		3	设备		√		√	√	√	√	√	√	
		4	材料与设施			√	√	√	√	√	√	√	
		5	计划与进度				√	√	√	√	√	√	
		6	科研成果	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
		7	质量		√	√	√	√	√	√	√	√	
		8	安全		√		√	√	√	√	√	√	
		9	签证结算				√	√	√	√	√	√	
		10	监督与检查		√		√	√	√	√	√	√	
		11	环保水保				√	√	√	√	√	√	
		12	工程验收	√	√		√	√	√	√	√	√	
		13	文档资料					√	√	√	√	√	
4	监测数据	1	安全监测		√		√		√	√	√	√	
		2	专项监测		√		√		√	√	√	√	
		3	施工监控		√		√		√	√	√	√	

结构分解编码体系的设计充分考虑了国家行业规范、企业标准以及工序格式化编码体系与表格体系的关系，并面向了多工程项目的管理需求，面向了同类工程项目横向对比分析，以及本工程项目纵向对比分析的需要，为工作分解、进度计划、工艺流程控制、人机料消耗、签证结算、验收归档、实物成本归集、概算投资控制及工程间横向对比分析提供支撑。

3.1.3 工程数据属性编码 在建造活动中，通过对每一个结构编码赋予其相关属性，就使结构变得生动，从定量到定性给予了每一个结构的单元工程和工序有了具体的内涵，来满足全生命期工程管理的需求。这些属性，面对基础、环境、过程、监测等4种数据类型，分为9类，包括几何属性、位置属性、材料属性、阶段属性、合同属性、时间属性、数据类型、过程属性和来源属性。工程数据编码的属性分类及其描述具体见表1，工程数据编码中的属性编码组成如表2所示。

3.2 工程数据感知传输及共享技术 iDam以工程数据编码体系为基础，在工程建设全过程中获得工程数据，通过数据感知、数据传输和数据集成功能构成数据中心。工程数据的感知传输要处理好端、网、云的关系(见图4)，开发相应的专项技术。感知采集端，如温度、应力、位置等数字传感器以及进行流程数据采集的移动终端，传感器要满足水电工程地下作业、边坡作业、坝面作业的不同精度需要；传输网建设要满足水电工地复杂环境下数据传输时间响应的要求，利用好公用网络，建设好专用网络；云平台即布置在云端的数据库及智能建造管理平台，实现异地多方协同实时工作。多项目建设单位一般布置远程系统，以满足多项目需求，同时为现地及异地用户提供数

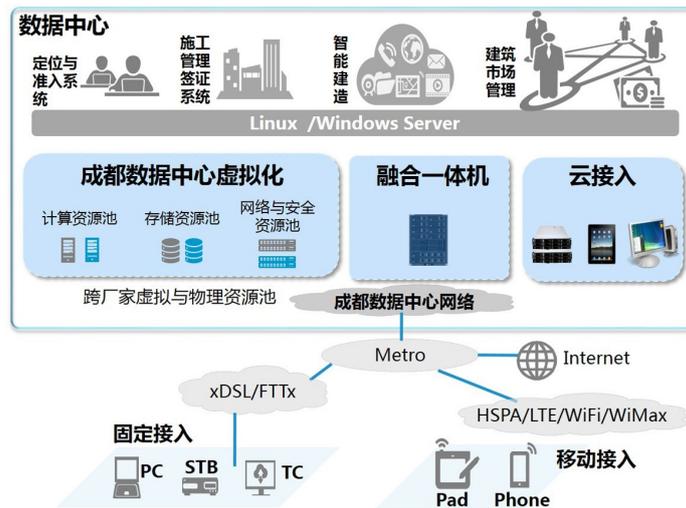


图4 工程数据的端、网、云关系

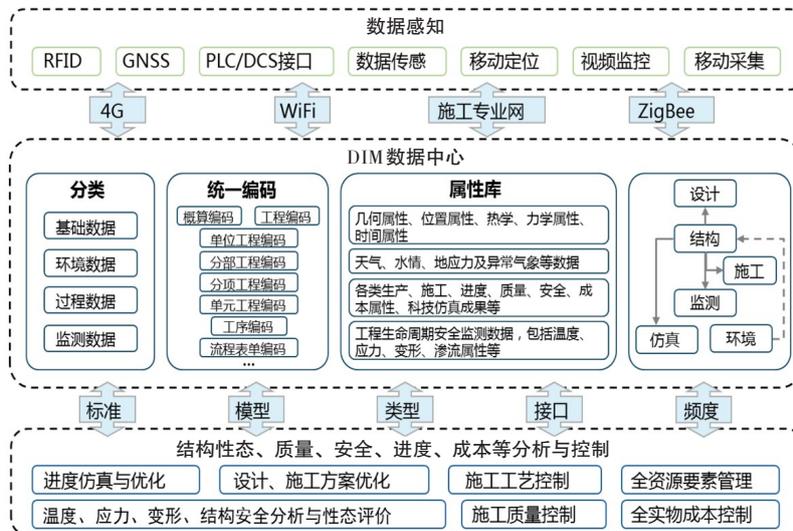


图5 基于云平台的工程数据及其应用关系

据及应用服务。

以工程数据编码体系为基础，同时制定规范统一的数据标准、数据模型、数据类型、数据接口和数据双向使用的频度，加上统一的用户认证接口和系统入口(Portal)、统一消息推送机制和标准应用接口、以及数据共享机制，保证工程数据的唯一性及其在全流程业务处理的一致性，实现智能管理平台内跨标段、跨流程、跨系统的数据产权界定，为工程建设活动的专业模块、管理模块、科研模块及绩效模块，提供在线、实时服务。产、学、研、用各方在平台上获取数据，也在生产数据，形成的阶段成果和报告、使用的参数模型和网格等基础数据要与相应的工程数据编码相匹配，进入智能建造管理平台，提供及时的工程服务。基于云平台的工程数据及其应用关系如图5所示。

### 3.3 智能建造管理平台 iDam 系统架构

3.3.1 STDPA 平台系统架构 基于SARI公共架构(Service服务、Application应用、Resource资源、Infrastructure基础设施)设计<sup>[24]</sup>，中国三峡智能建造管理平台 iDam 的系统架构由感知层 SENSOR、传输层 TRANSFER、数据层 DATA、平台层 PLATFORM、应用层 APPLICATION 以及系统集成接口组成，数据层与平台层是平台技术架构的核心。iDam 的 STDPA 五层系统架构见图6。

3.3.2 平台业务架构 智能建造管理平台是业务集成系统，它以数据为基础，结合网络化与虚拟化



图6 智能建造 iDam 系统架构 STDPA 模型

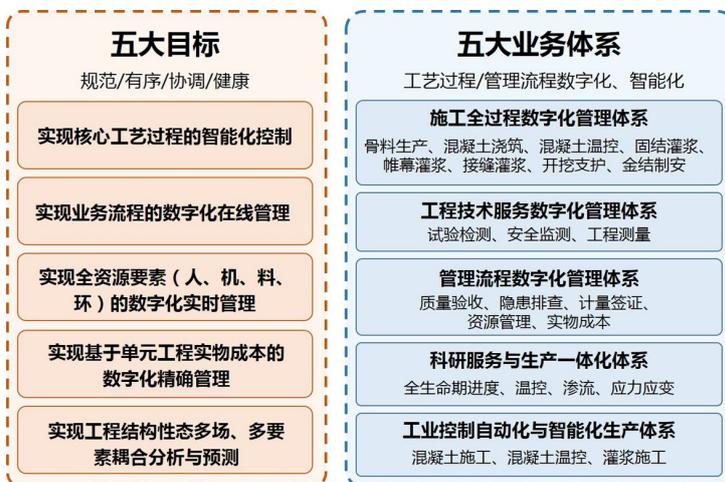


图7 水电工程智能建造管理平台业务架构及业务内容

技术形成，并以 BIM 技术、GIS 技术、物联网技术、人工智能技术、数值仿真技术、计算机视觉、智能视频识别技术及搜索引擎技术，作为技术支撑开展各类应用服务。根据水电工程建设业务特性，水电工程智能建造业务架构可归类为“五大业务体系”，如图 7。

(1)施工全过程数字化管理体系，包括骨料生产、混凝土浇筑、混凝土温控、固结灌浆、帷幕灌浆、接缝灌浆、开挖支护和金结制安等；(2)工程技术服务数字化管理体系，包括试验检测、安全监测和工程测量等；(3)管理流程数字化管理体系，包括质量验收、隐患排查、计量签证、资源管理和实物成本等；(4)科研服务与生产一体化体系，包括全生命期进度、温控、渗流和应力应变等仿真分析预测；(5)工业控制自动化与智能化生产体系，聚焦核心工艺过程，包括混凝土施工的砂石骨料生产、混凝土拌和、缆机运输、运输调度、平仓振捣和碾压施工等，混凝土温控的骨料预冷、拌合楼出口温度、浇筑温度、通水冷却和喷雾保温等，以及灌浆施工的制浆、送浆、配浆、灌浆压力和流量控制等工艺过程，研发工艺过程智能控制成套装备，达到施工全过程在线采集、后台处理、智能操作、预警控制的生产管控模式。

**3.3.3 平台业务协同方案** 智能建造管理平台 Web 应用程序，包括业务类接口与查询类接口两大类，将单一纵向业务管理或单个工艺环节的数据信息有机连接，实现全流程、跨专业、多主体之间业务协同。业务类接口，主要用于各类业务数据采集、数据调用和数据存储、数据查询与分析；查询类接口，主要用于权限控制下的综合信息查询服务。以仿真分析为例，工程中短期计划编制、混凝土温度预测等日常业务，可通过接口集成或直接嵌入平台的仿真算法组件及程序，直接调用工程进度、监测、环境数据，进行在线分析，并将分析成果集成入平台，实现生产、仿真一体化。统一消息推送机制，基于预报警规则及业务数据，实时驱动预警报警消息的生成，借助预报警引擎、消息推送组件，在桌面、手机 APP、微信等渠道实现统一信息发布、实时推送。

**3.4 智能建造工程绩效分析** 智能建造核心是将建设全过程人、机、料、法、环生产环节和管理要素互联打通，运用数据统计与数据挖掘技术，结合作业位置与时长、流程各环节时间等信息，动态分析人员与设备绩效、安全与质量行为、计划与实施差异性，变革与优化工程管理模式、建设组织形式、资源配置型式以及业务流程和工序过程等。通过研发感知、传输、分析和控制等智能监控设备，实现关键业务全流程和核心工艺全环节的智能控制，提升工程建设智能控制能力。

(1)质量绩效。智能分析统计原材料、半成品、成品质量合格率，分析引起其质量波动关键环节，提高质量合格率，降低质量控制波动性；运用智能监控终端及智能化控制技术，智能分析混凝土施工各环节消耗时间及环节间有序衔接的制约因素、混凝土温升规律和预警阈值，提升管理效率、降低人为因素、消除管理缺陷；及时、全面、实时掌握工程结构的变形协调规律，构建预控指标体系，实施预警调控，确保工程全生命期运行安全。

(2)安全绩效。从源头与过程，准确识别人的不安全行为、物的不安全状态，快速发现隐患、快速流转、及时闭合，避免各类重大安全事故的发生；基于统计分析模型，确定高风险安全隐患，降低安全隐患发生风险。

(3)成本绩效。跟踪与统计人、机、料的实际投入与真实消耗，基于最小单元部位分析人工、材料、机械设备投入，并与工程概算、企业定额及合同价格对比，从而优化组织结构、资源配置或改进施工工艺，设置激励措施，人尽其才、物尽其用，达到工程成本最优。

(4)流程绩效。以工艺过程、业务流程和管理程序的数字化为基础，监控业务流程运转的每一个关联点，分析其流转制约因素，构建多快好省稳的业务流转考核体系，疏通建设过程中业务流转经络，提高流转效率、减低管理成本。

(5)进度绩效。持续优化施工组织过程，提出最优的施工进度方案、最合适的资源配置方案和施工措施，有效协调好各专业间交叉问题，规避外界环境影响，避免异常停工，加强变更管理，确保工程有序建设如期投用。

## 4 结论与展望

经过近20年的发展,水电工程建设已基本形成机械化、信息化、数字化为主体的建设格局,随着现代信息技术、数据技术与传感技术的快速发展,正朝着智能化方向迈进。

本文从工程全生命期安全出发,运用“全面感知、真实分析、实时控制”的智能闭环控制理论,提出了以工程建设资源要素动态精准管理、业务流程数字化管理、工艺过程智能控制、实物成本精确分析、结构安全与进度耦合分析及联动调控的数字化技术和智能化技术为核心,以水电工程数据模型如大坝信息模型DIM为基础,以智能建造管理平台iDam为主体的智能建造技术体系,并对工程数据结构分解与编码体系、工程数据感知传输共享技术、智能管理平台iDam的系统架构与业务架构、智能管理平台工程绩效等关键技术进行了分析。

以智能建造技术体系为支撑的水电工程智能建造管理平台iDam2.0遵循了全面规划、分步开发、围绕重点、同步应用的规律。在溪洛渡特高拱坝智能化建设基础上进一步研发的相关成果,已在乌东德、白鹤滩水电工程地下厂房和特高拱坝建设工程中逐步应用,实现施工工艺过程、关键业务流程的智能监测、智能分析、智能调控,提升了管理水平和管理效益,促进了乌东德和白鹤滩工程“规范、有序、协调、健康”的顺利建设。

大型水电工程智能建造是智能化技术与智能化管理的深度融合,是坚持问题导向和目标导向的统一,促进质量和效益的提升,确保水电工程高坝大库长期安全有效运行。

**致谢:**感谢中国三峡金沙江大型水电工程智能建造产学研用创新团队所做的工作,感谢三峡集团、清华大学、中国水利水电科学研究院、天津大学、英思公司、成都勘测设计院及承担工程建设的设计、施工、监理等单位的科学家和工程师们为形成工程智能建造平台所做的工作。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 葛文辉,安中仁.水利工程施工技术新进展[J].中国水利,2004(8):51-53.
- [ 2 ] 樊启祥.三峡泄洪坝工程施工网络进度计划研究[D].北京:清华大学,1999.
- [ 3 ] 金和平.大型集成化工程管理系统TGPMS设计开发与实施[J].中国工程科学,2004,6(3):80-85.
- [ 4 ] 陆佑楣,樊启祥,侯建刚.长江三峡枢纽工程项目管理[M]//项目管理案例.北京:清华大学出版社,2011.
- [ 5 ] 朱伯芳.混凝土坝的数字监控[J].水利水电技术,2008,39(2):15-18.
- [ 6 ] 黄声享,刘经南,吴晓铭.GPS实时监控系统及其在堆石坝施工中的初步应用[J].武汉大学学报(信息科学版),2005,30(9):813-816.
- [ 7 ] 马洪琪,钟登华,张宗亮,等.重大水利水电工程施工实时控制关键技术及其工程应用[J].中国工程科学,2011,13(12):20-27.
- [ 8 ] 钟登华,刘东海,崔博.高心墙堆石坝碾压质量实时监控技术及应用[J].中国科学(技术科学),2011,41(8):1027-1034.
- [ 9 ] 钟登华,常昊天,刘宁,等.高堆石坝施工过程的仿真与优化[J].水利学报,2013,44(7):863-872.
- [ 10 ] 燕乔,毕明亮,王立彬.碾压混凝土坝施工质量实时动态监控系统[J].三峡大学学报(自然科学版),2009,31(4):5-8.
- [ 11 ] 樊启祥,周绍武,洪文浩,等.溪洛渡数字大坝[C]//电力行业信息化优秀成果集2013.北京:中国电力企业联合会,2013.
- [ 12 ] 陆佑楣,樊启祥,周绍武,等.金沙江溪洛渡高拱坝建设的关键技术[J].水力发电学报,2013,32(1):187-195.
- [ 13 ] 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[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版)2007,40(8):976-982.
- [ 14 ] 钟登华,王飞,吴斌平,等.从数字大坝到智慧大坝[J].水力发电学报,2015,34(10):1-13.

- [ 15 ] 李庆斌, 林鹏. 论智能大坝[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 139-146.
- [ 16 ] 樊启祥, 张超然, 等. 特高拱坝智能化建设技术创新和实践——300m级溪洛渡拱坝智能化建设[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [ 17 ] 樊启祥, 周绍武, 林鹏, 等. 大型水利水电工程施工智能控制成套技术及应用[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 916-923.
- [ 18 ] 林鹏, 李庆斌, 周绍武, 等. 大体积混凝土通水冷却智能温度控制方法与系统[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 950-957.
- [ 19 ] 钟桂良, 尹习双, 邱向东, 等. 高拱坝混凝土运输过程智能控制技术研究[J]. 水力发电, 2015(2): 55-58.
- [ 20 ] 涂序彦, 李秀山, 陈凯. 智能管理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [ 21 ] 樊启祥, 强茂山, 金和平, 等. 大型工程建设项目智能化管理[J]. 水力发电学报, 2017, 36(2): 112-120.
- [ 22 ] 樊启祥, 洪文浩, 汪志林, 等. 溪洛渡特高拱坝建设项目管理模式创新与实践[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 288-293.
- [ 23 ] 水电水利规划设计总院. 水电工程设计概算编制规定[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [ 24 ] 刘人怀, 孙凯. 工程管理信息化架构研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(8): 4-9.

### Research and practice on intelligent construction technology system of Jinsha River hydropower projects

FAN Qixiang<sup>1</sup>, LU Youmei<sup>1, 2</sup>, ZHOU Shaowu<sup>1</sup>, YANG Ning<sup>1</sup>, LIN Ende<sup>3</sup>, LI Guo<sup>1</sup>

(1. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China;  
3. Wuhan INS Engineering Technology Corporation, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Facing the challenges of complex environment, condition changes, resource flow, structural transformation and behavior adjustment of large hydropower projects in the lower reaches of the Jinsha River, an intelligent construction technology system has been established to focus on the whole life cycle safety of large-scale hydropower projects from the engineering planning, construction, and operation. This intelligent system adopts the principle of intelligent closed-loop control of “comprehensive perception, real analysis and real-time control”, takes digital and intelligent technologies of resource elements digital management, digital control of business procedures, intelligent control of process flow, accurate analysis of physical costs, structural safety, coupled simulation analysis, and linkage control as its core, the hydropower engineering data model like dam panoramic information model DIM as its foundation, and the intelligent construction management platform iDam as its main body. Hence, this paper analyzes the key technologies, including engineering data structure decomposition and coding system, engineering data aware-transmission-sharing technology, the systemic architecture and business architecture of iDam platform, and the performance of intelligent construction engineering. Relying on the unified engineering data structure and coding system, the platform iDam is capable to integrate all basis data, environment data, process data, and monitoring data throughout the whole engineering process of the construction. As a result, the analysis function, based on engineering technology and management data, can be applied to different parties including owners, construction, supervision, design, R&D and operation side. This early practice of intelligent construction shows that the technical system established by this paper is scientific and feasible, which makes it a good reference for the study and application of intelligent construction technology and management system in terms of infrastructure.

**Keywords:** intelligent construction; management platform; intelligent technology; data model; coding system; hydropower engineering

(责任编辑: 王冰伟)