

金沙江下游大型水电工程智能建造管理创新与实践

樊启祥^{1, 2}, 陆佑楣^{2, 4}, 李果^{1, 2}, 强茂山³, 林鹏³, 刘益勇², 鄢坤², 魏鹏程³

(1. 中国华能集团有限公司, 北京100031; 2. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038; 3. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 4. 中国工程院, 北京 100088)

摘要:金沙江下游大型水电工程面临建设环境复杂、资源流动强、工程规模大、技术难度高、施工风险多、建设历时长等管理挑战, 通过智能建造管理实现高质量建设目标具有重要意义。本文首先围绕金沙江下游大型水电工程建设的安全、质量、环保、工期及造价等管理内容, 以“全面感知、真实分析、实时控制”的闭环控制理论为基础, 提出了水电工程智能建造管理定义、特征和体系; 其次, 面向电站设计、建设、运行的全生命期, 围绕工程建设中资源投入、工艺过程、业务流程、结构性态、工程进度及实物成本等六大管理要素, 以建筑物结构性态安全为核心, 构建了深度融合关键智能建造技术的实时动态分析、耦合仿真预测和交互协同调控的智能化管理方法; 最后, 运用现代先进信息技术, 构建了智能建造工程数据系统DIM和集成应用GIS+BIM+MIS技术的智能建造管理平台iDam, 研发智能化控制成套设备和应用软件, 并通过产学研用深度融合及协同创新, 达到优质安全绿色高效的工程建设绩效, 实现价值创造。智能建造管理成果在金沙江溪洛渡300m级高拱坝智能化建设中取得了显著成效, 并在乌东德、白鹤滩大坝工程中全面深化应用, 也可在大型基础设施工程建设中推广应用。

关键词: 水电工程; 智能建造; 智能管理; 智能技术; 闭环控制理论

中图分类号: TU71

文献标志码: A

1 金沙江下游水电工程智能建造管理的实践背景和发展历程

水电工程智能建造管理是在金沙江下游水电开发 20 年的历程中, 在直面金沙江下游河段四座千万千瓦级水电工程建设风险和 challenge 中, 在“规范、有序、协调、健康”地建设这些世界性伟大工程的进程中, 逐步探索发展起来的, 并将随着智能技术的进步与水电开发的需求, 得到更深入更广泛的拓展与应用。

1.1 工程建设面临的挑战需要智能建造管理 位于云南、四川两省界河的金沙江下游河段(从攀枝花市至宜宾市)全长782km、落差729m, 水力资源富集。自上而下规划有乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝四座千万千瓦级的梯级电站, 总装机容量46460MW, 年发电量1910.25亿度, 相当于“两个三峡”, 年均节约标准煤6000万吨, 环保效益显著, 并在长江干流发挥着防洪、通航、供水等重要作用, 成为当今以及未来世界水电项目中的代表性工程。金沙江下游梯级水电站通过控制金沙江洪水, 可提高宜宾、泸州和重庆等川江沿岸城市的防洪标准, 助力长江中下游防洪^[1]; 利用金沙江下游四座电站建设形成的库区深水航道条件, 完善金沙江下游综合运输体系^[2], 可促进沿江区域集中连片特困地区和少数民族地区的经济社会发展, 是名副其实的大国重器。

金沙江下游四座梯级电站, 需要在复杂的地形环境、工程地质、水文地质、地灾地震和水文泥沙背景下, 建设三座 300m 级混凝土高拱坝和一座 160m 级常态混凝土与碾压混凝土组合的重力坝, 建设机组单机容量 700~1000MW、单厂装机容量达 3200~8000MW、单电站装机容量达 6400~16000MW 的七座地下厂房和一座地面厂房共计八座电站厂房, 建设具有泄放 30000~50000m³/s 洪水流量的岸边泄洪洞和大坝坝身泄洪系统。这些工程及其单体建筑物规模巨大、质量标准高、建设技术难度大、施工程序复杂、建设周期长、专业多且协同要求高, 工程风险与建设管理难度大。建设过程还面临自然环境复杂、参建单位众多、人员设备物资流动性强、社会经济发展需求迫切等特点, 需要科学有效的组织管理, 才能保障高坝大库的工程安全和质量。

金沙江下游河段四个电站建设背景和挑战与当代社会经济生态环保要求的结合,加上建设过程中工程地质、水文地质、工程材料和建设资源的变化,给“大数据、云计算、物联网、移动通讯、互联网、人工智能”等科学技术带来了广阔的应用场景,使得大型水电工程智能建造的管理与技术创新结出了丰硕的成果。金沙江溪洛渡水电站高拱坝建造过程中,建立了“全面感知、真实分析、实时控制”的智能建造闭环管理理论^[3,4],应用了智能通水、智能灌浆等智能化建设技术^[5,6,7],开发了高拱坝智能建造管理平台 iDam1.0^[3,8],该平台包含全景信息模型、现场施工生产与监督管理控制、设计与科研仿真分析服务,以及混凝土、灌浆、金结制安、安全监测等专业化系统,确保了溪洛渡拱坝顺利建设。在此基础上,面对金沙江白鹤滩、乌东德 300m 级高拱坝建设挑战,智能化技术和智能建造管理平台 iDam 进行了升级完善,可实时、在线管理与分析工程建设及运行期各类数据,正全面应用于白鹤滩、乌东德工程建设。

1.2 金沙江下游水电工程智能建造管理发展历程 金沙江下游梯级水电工程自 2003 年开始现场筹建起,就拓展运用三峡工程建设管理系统 TGPMS^[9],并在中国政府信息化和工业化融合战略的指引下,面对工程建设需要持续推进科技创新与管理提升,进行了大型水电工程建设智能建造技术与管理的创新探索^[10,11],以将金沙江下游水电工程建成世界一流精品工程,实现信息化时代水电工程建设管理的重大变革。大型水电工程智能建造管理探索是一个动态过程,在近 20 年的实践中大体经历以下四个阶段:

第一阶段,业务流程的信息化管理。这一阶段中,继承三峡工程建设经验和信息化成果,全面推广三峡工程管理信息系统 TGPMS;针对建筑市场施工资源管理中分包管理合规性及作业人员入场流动性等问题,开发了建筑市场准入管理系统;针对工程结算的及时性和准确性,开发了基于单元工程的计量签证管理系统^[12];为了适应市场化环境下现场集约化物资仓储管理体系的建设,开发了物资在途运输管理、动态核销管理^[13]等子系统,拓展了大型水电工程建设业务流程信息化管理的内容。

第二阶段,数据共享与累积的数字大坝。溪洛渡大坝是三峡人建设的第一座 300m 级高拱坝,也是当时在建的世界第三高拱坝。2009 年大坝混凝土开始浇筑,为保证地质条件和混凝土变形特性变化后大坝结构安全,处理好混凝土温控防裂、基础处理质量、工程度汛与进度的矛盾,落实精细化施工管理,研发和应用了集网络、硬件、软件、项目参建各方和专家团队于一体的综合性人机交互系统,即“溪洛渡数字大坝系统”,实现数据共享与累积,满足精细化、个性化工艺过程控制和业务流程协同管理的需要^[14,15]。

第三阶段,关键工艺过程的智能控制。在“溪洛渡数字大坝系统”的基础上,针对溪洛渡拱坝河床地质条件的变化,针对混凝土原材料及结构体型带来的温控防裂难题,聚焦核心关键工艺过程,如混凝土通水冷却过程,开发了集感知、分析、控制于一体的智能控制系统,攻克了数字灌浆、数字振捣及智能通水等关键工艺过程的数字化、智能化技术,实现了水电工程建设智能化技术的规模化应用,创世界先例^[16]。开发了大坝全景信息模型 DIM (Dam Information Model),建设了大坝智能建造管理平台 iDam (Intelligent Dam Analysis Management),实现了工程建设各方的协同工作^[3,8]。同期开展了基于位置的施工人员定位和轨迹分析系统,保证了大坝混凝土仓面施工及大坝基础廊道灌浆施工等作业人员的安全,提高了工程建设绩效^[17,18,19]。

第四阶段,全面智能建造管理。在业务流程信息化管理、数字大坝、核心工艺智能化技术已有应用的基础上,针对乌东德、白鹤滩两座千万千瓦级大型水电工程建设挑战,尤其是面对干热低湿持续大风环境下 300m 级高拱坝全坝采用低热硅酸盐水泥水工混凝土以建设无温度裂缝大坝的目标,围绕大型水电工程建设资源动态精准管理、业务流程工点数字化管理、工艺过程实时智能控制、实物成本精确计量分析、结构性态与进度耦合分析及联动调控的数字化和智能化技术开展研发,逐步实现了核心工艺过程、关键业务流程的智能监测、智能分析和智能调控^[20,21]。在乌东德、白鹤滩的建设过程中,通过调研分析、数字模拟、室内试验和现场试点,对主要施工资源(如作业人员),关键工艺过程(如基础水泥灌浆),主要业务流程(如单元工

程质量验收签证、安全隐患排查治理），实物成本分析（如物料核销、人工绩效），结构性态安全（如低热水泥水工混凝土温度过程控制、拱坝体型调控），以及业务链、工序链的整体优化分析上，进行深化探索和实践突破^[22]。随着乌东德、白鹤滩水电工程进入大坝主体工程建设阶段，智能建造系统得到全面开发并结合业务需求深化应用。

2 金沙江水电工程智能建造管理体系

2.1 水电工程智能建造管理定义 水电工程智能建造管理就是围绕工程建设的安全、质量、环保、工期及造价等管理内容，运用数字化和智能化技术，对工程建设的资源投入、工艺过程、业务流程、结构性态、工程进度及实物成本等管理要素进行实时交互协同管理，达到优质安全绿色高效经济的工程建设绩效，实现工程全生命周期价值创造。

徐宗本^[23]对数字化、智能化进行了定义，并对其关系进行了分析。结合水电工程建设智能化技术实践，笔者认为数字化（digitalization）是将一个物体多模态模拟源信息（如图像、声音、文本等），无损失、快速、安全地转换、传输、储存为一系列任何类型的数字格式，以便于机器处理的过程；智能化（Intelligence）是把感知物联、通讯传输、数据分析、人工智能以及自动控制等技术，集成融合运用到工程实际场景中，来完成某一过程的闭合控制，以实现相应工程管理目标的活动。数字化使传感器等感知技术得到了长足的发展，保证了数据的真实性、实时性和安全性，同时促进了物联网、移动互联、大数据等技术的进步，保证了数据传输实时交互的响应速度要求。显然，数字化是大数据、智能化技术的必要条件，是最重要的基础。智能化实现的主要途径是发展传感、通讯、数据分析、人工智能等技术，研发相应的传感器、控制器，制造集成性的成套装备。智能化可以聚焦在通过智能装备实现建造工艺过程的闭环控制上，也可以聚焦在通过业务链数据的智能分析实现业务流程的优化控制上，以保证建造质量和安全。

不同工程应用场景和基础设施建造的安全、质量目标要求，需要相适应的智能化技术，并非只有采用了人工智能技术才是智能化。如：火力发电工业控制系统的智能化技术就需要以安全为前提，排除消除任何不可靠的控制过程，人工智能技术的应用可以深化智能化的应用场景。水电工程智能建造管理基于物联网、移动互联与智能控制技术，通过工程数据的实时、在线、交互管理与仿真预测分析，实现水工建筑物工作性态及建造活动的动态控制与集成管理，确保工程全生命周期结构安全和工作性态的可知可控。简言之，就是采用物联、移动、网络通信与数字化、智能化技术，对水电建设全生命周期工程结构性态的全面感知、真实分析与实时控制的闭环管理，其相互关系见图 1。这个定义与计划、组织、指挥、协调、控制的一般管理职能，与管理学的 PDCA 理论等是贯通的，遵循了一般管理思想和理论，融合了现代通信技术和数字技术。

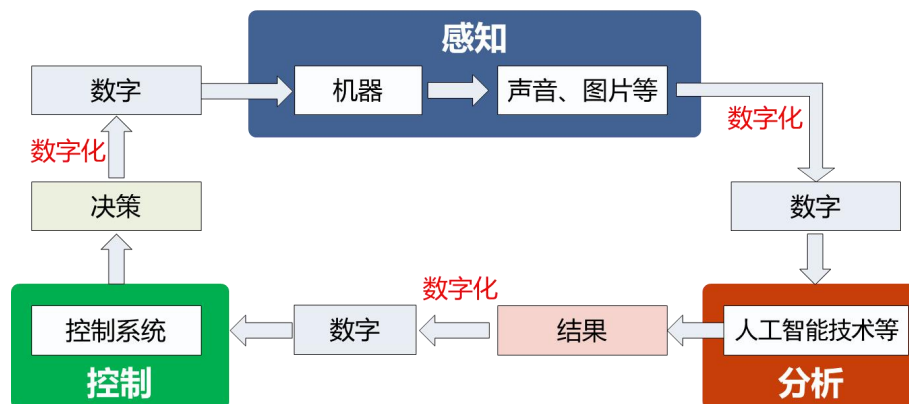


图1 工程智能建造管理闭环控制的相互关系

具体来讲，水电工程智能建造管理就是通过对水工结构、施工设备及材料、施工环境和现场人员的管理与控制，将感知的工程环境信息、施工过程信息、监测反馈信息、施工资源如人

员活动轨迹等各类工程数据，自动采集传输进入工程数据中心，通过监测数据与仿真分析的一体化，对水工结构安全性态及施工管理活动进行预警，对偏差进行智能化在线闭合控制，减少工程建设过程中的不确定性，有效管控施工现场人员安全和工程质量，达到提高生产效率、保证工程安全的目的。

2.2 智能建造管理闭环控制理论 “全面感知、真实分析、实时控制”是大型水电工程智能建造管理理论的核心^[3,4]，主要汲取了工程控制论的自动控制原理、智能控制系统（包括专家系统），以及管理控制论中生产流程改进法、系统动力学法的反馈、闭环、建模与仿真、自组织学习等理论。在金沙江下水电工程建设管理实践中，结合基础水泥灌浆施工工艺，以工程数据驱动的智能建造管理闭环控制模型和水泥灌浆工艺过程智能控制实例见图 2。



图2 数据驱动的智能建造管理闭环控制理论模型及其应用实例

大型水电工程智能建造管理创新与实践强调从设计、施工到运行全过程的设计技术方案和实施措施的工程数据采集，保证工程建设信息的及时性、真实性、准确性、全面性、有效性和预见性；强调面对工程管理动态性与不确定性时，关键在于预警、预报，主要在于预防与调控。“工程数据的实时全面感知传输、实时数据驱动的真实分析、过程状态的预报预警实时控制”是智能管理闭环控制的三个关键要素，在溪洛渡 300m 级高混凝土拱坝智能化建设中进行了全面实践，主要体现在以下几方面：①在全面感知方面，大规模应用水工无线光纤和数字测温计，研发了智能手机仓面管理系统、灌浆数据自动数字采集系统，解决了复杂环境下工程数据的准确、及时采集问题，能快速、全面地获取大坝建设属性与施工现场数据，并集成进入大坝全景信息模型 DIM；在通信传输方面，以光纤传输、Wi-Fi 无线覆盖、3G+ZigBee 等通信技术为基础，建立了工程数据实时双向传输系统，保证了拱坝建设数据采集传输的稳定性与现场的适用性。②在真实分析方面，基于采集的海量数据和反演分析数据，通过全坝全过程真实工作性态的耦合仿真分析，通过建立建基岩体开挖、基础处理、混凝土拌合运输振捣、混凝土温度控制、拱坝工作性态的定量评价体系，对温度应力、变形特性等工作性态和不同进度方案开展分析优化，进行预报预警。③在实时控制方面，研发混凝土振捣数字监控及预警反馈控制系统、通水冷却智能控制系统和基础灌浆数字监控系统，根据判断准则和判别标准，对大坝混凝土浇筑质量、混凝土通水冷却和基础灌浆处理的过程状态，进行偏差实时控制。为此，开发了水电工程智能建造管理平台 iDam，为溪洛渡拱坝智能化建设提供先进的管理工具，实现过程数据在参建各方的有效流转，确保闭环控制系统的高效运转。

2.3 智能建造管理体系 樊启祥^[3]基于数字化与智能化技术,从管理基础、管理核心、管理主线、管理目标与管理平台等五方面,建立了大型工程建设智能化管理体系。本文在此基础上,通过对构成安全、质量、环保、工期、造价等工程建设管理内容的基本要素和基础活动的结构分解,发现工程建设活动主要由六项基础活动也就是六个管理要素组成,一是资源投入,如作业人员、机械设备、物资材料的品质与时空状态;二是工艺过程,由一系列工序构成,如水泥灌浆工艺、岩石开挖爆破工艺、混凝土浇筑工艺、混凝土温度过程控制等;三是业务流程,由建设管理体制确定的建设各方管理职责和一序列工作流程及管理程序来确定,如混凝土、支护等单元工程质量验收中施工单位初检、复检、终检的三级检查及监理工程师检查;四是结构性态,为水工建筑物的性能指标及过程状态指标,如高拱坝混凝土应力及抗裂安全性、坝体变形及拱坝体型均衡性等指标等;五是工程进度,体现以时间为主线、以结构安全为核心的多方案优化与比选,如不同施工进度方案下的结构性态及不同施工资源投入组合的耦合分析与联合管理;六是实物成本,如人、机、物的动态消耗及费用投入。针对这六个管理要素,充分发挥数字化与智能化技术在实时交互协同的工作特性和移动互联控制的技术优势的作用,更好地在增强工程建造基层活动现场感中做到实时、实地、实物、实人、实据管理,使智能建造活动可感知、可分析、可预测、可控制。有利于工程建设管理者以工程智能控制技术、先进通信技术和数据技术为支撑,遵循工程建设规律,把握管理主动性,避免建设过程的反复与失误,实现优质安全高效建设。金沙江下游水电开发工程建设智能建造管理闭环控制的逻辑关系如图3。



图3 水电工程智能建造管理闭环控制体系的逻辑关系

综合来看,大型水电工程智能建造管理直面了金沙江下游河段向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德等四座千万千瓦级水电站工程建设自然社会人文环境复杂、条件变化、资源流动、结构转换、性态调整的工程特性和技术难度大、质量标准高、施工风险多、建设周期长的管理挑战,通过建立“全面感知、真实分析、实时控制”的智能管理闭环控制理论,结合物联网、位置定位系统,集成智能识别及移动交互技术,对资源投入、工艺过程、业务流程、结构性态、工程进度和实物成本等六大管理要素进行全过程数字化、智能化管理,实现对施工现场各类资源、关键作业过程和工程质量安全的有效管控,达到提高生产效率、增强结构安全、降低生产成本的目的,从而确保国家清洁能源重点工程全生命周期价值创造。从此出发,智能建造管理体系主要包含管理理论、管理内容、管理要素、管理技术、管理方法和管理系统等方面的内容,其组

成具体如图 4。

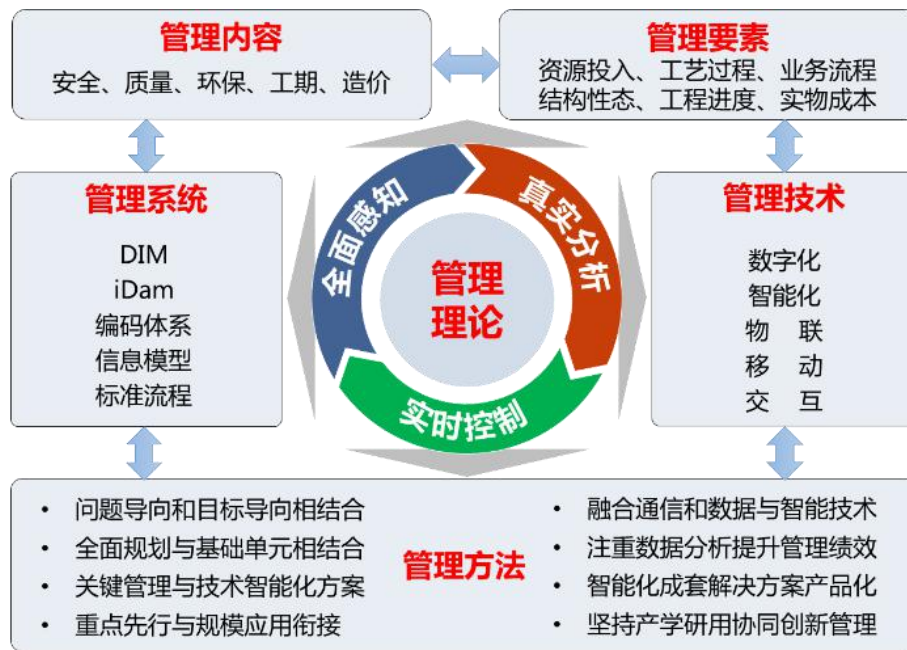


图4 水电工程智能建造管理体系的组成关系

2.4 智能建造管理的创新特性 智能建造管理是工程建设技术、项目管理知识与现代通信技术、数据分析技术及人工智能技术的深度融合。智能建造管理坚持问题导向和目标导向相结合，坚持底线思维和顶层设计相结合，坚持自主创新和协同共享相结合，集成现代管理科学和水电工程建设技术，科学准确地把握工程环境条件以及演变规律，实现工程全生命期价值创造。通过数据采集、仿真分析及预测预警一体化，实现个性化、精细化管理和数字化、智能化调控。

(1) 智能建造管理是集成协同与知识传递等现代工程管理思想的创新发展。集成协同管理强调基于过程的工程建设业主、设计、监理、施工、科研、技术咨询等组织资源的最优整合，以多组织治理和协同高效工作为目标，建立了建设单位主导、科研院校咨询单位和专家团队支撑、设计施工监理单位为基础的产学研用深度融合协同创新项目管理模式^[24]，建立了网络、数据、系统、设备等研究开发单位与工程需求紧密协同的创新工作机制，使科研成果紧密结合生产实践，实现建设各方的互利共赢。知识传递是通过智能建造优秀专业团队和专业人才的集合，利用已有工程经验和知识积累，通过规则库、案例库、经验库和判据库，有效控制工程风险^[25]。金沙江乌东德、白鹤滩大坝建设中，通过竞争性方式引入了清华大学、中国水利水电科学研究院、长江科学院、天津大学、武汉大学、河海大学、三峡大学、成都勘测设计研究院等国内一流院校与科研机构，以及武汉英思工程科技股份有限公司、浙江大华系统工程有限公司等信息技术公司，构成了一支复合型智能建造团队。

(2) 智能建造管理是全生命期全过程全面精细化管理方法的创新发展。全生命期管理强调从设计、施工到运行的工程数据采集，保证工程建设信息的及时性、真实性、准确性、全面性、有效性和预见性，从工程全生命期价值创造出发，科研与咨询机构及智能建造管理系统开发团队深度参与、专家团队动态跟踪，优化技术方案和实施措施，保障了工程问题的及时解决。精细化管理是通过研发相关专业软件，对基础处理、混凝土施工、温度控制的数据进行全面的感知、搜集、整理、分析、展示、共享，保证数据的及时性和真实性。全面质量管理强调基于业务流程的全过程管理，通过参建各方的协调配合，做到精心管理、精心设计、精心科研、精心施工，重点是源头管理和动态调控，关键在预防为主，保证工程的质量安全。

(3) 智能建造管理是实时在线、个性化、动态控制等管理技术的创新发展。实时在线通过集成在一体化协同工作平台 iDam 内的智能化监测系统，实现了施工数据的实时在线采集，并在

此基础上，实现全过程、全方位的仿真反演，做到及时预警预报、实时可知可控。面对水电工程特别是高拱坝结构复杂、温度和应力应变分布不均、施工进度控制困难的情况，须对悬臂高度、通水冷却方案、灌浆时机等进行个性化控制。控制技术创新需要谨慎、客观、前瞻性的仿真预测分析，如智能通水系统、智能灌浆系统和混凝土一条龙智能优化分析系统，优化技术与管理措施，确保设计技术要求的落实，提高生产效率，提升工程持续改进、稳定高效的建设能力。

(4) 智能建造管理是坚持突破关键问题与有序系统推进相结合的管理路径的创新发展。首先围绕关键技术和核心工艺智能控制开展创新，落实混凝土温控防裂、高坝结构安全和进度耦合分析的核心技术，并落实到可操作可控制可复制的工艺上。其次是聚焦业务流程和关键工艺，建立以最小管理单元（如工序）为基础的完整、规范、标准的格式化表单和编码体系，为数字化智能化管理打好基础。第三是运用现代信息与智能控制技术，通过实时在线和智能化管理，减少工程建设过程中人为因素和不确定性的变化影响；通过预测式仿真分析、模拟演练与风险评估，落实源头管理和过程管理，实现实时工作性态和建设行为的智能调控。第四是通过数据统计与数据挖掘，开展工程建设过程质量、安全、成本、进度、效率等绩效分析，实现精细化管理、精细化施工、精准化调控。

3 六大管理要素的数字化与智能化管理

3.1 资源投入管理 大型水电工程从筹建至退场，在水电建设的专业转换和阶段调整的过程中，伴随着大规模的物流如材料、设备，人流如民技工、技术工人，交通流如施工机械、车辆，资金流如现金、电子货币，信息流如合同、档案等资源要素的流动，且具有流动性大、不确定性强的特性。资源投入数字化管理以资源要素精准动态管理为目标，集成建筑市场管理、智能识别、社交媒体与复杂环境混合叠加定位技术，构建工程建设资源要素安全准入与实时管理系统，通过不同场景定位精度和网络响应速度，实现建筑市场资源要素精确准入、人员设备行为实时安全管理、物资在途流向动态管理与核销精确跟踪、工程计量可靠可信，解决人员、设备、物资流动性管理难题。

重点聚焦工程现场人员安全准入与动态轨迹管理，采用混合叠加定位技术与通讯技术，满足复杂环境不同工作场景下定位精度和响应速度双控的需要；通过智能识别或移动终端，如人脸识别系统、头盔系统和有源 RFID 技术，实现了作业人员与物资设备等资源要素实时准入与精细管控。研发了基于施工计划和单元工程实物量的材料控制系统，采用社交媒体技术，实现了物资材料全流程实时在途动态管理。综合定位系统给出的施工人员的定位数据，通过分析监理和施工作业人员进出作业面的次数、时长等关键数据，促进监理工程师以及施工管理人员现场履职管控水平持续提升。

3.2 工艺过程管理 传统的施工工艺过程现场管控依赖于监理工程师、施工管理人员以及作业工人的素质和责任心，虽有部分观测仪器支持，但速度慢、数量少，无法做到全过程自动监测和实时反馈，不利于精细化工艺过程管理的落实。智能建造通过研发感知、分析、控制的智能技术和成套设备，实现工艺标准的量化控制和工序过程的智能化管理，提高工序衔接效率，降低工序控制波动及其导致的质量问题，实现了个性化、精细化、智能化的技术创新。工艺过程智能管理体现在两个方面：

一是关键工艺过程的智能控制，如混凝土通水冷却和基础水泥灌浆。智能通水系统实现了混凝土温度与通水数据的自动采集、通水流量的智能调节，乌东德及白鹤滩大坝全坝浇筑低热硅酸盐水泥大坝混凝土，已浇筑的低热水泥混凝土全部实现了智能通水控制，保证温控符合率达到 95%以上，节约冷却用水 30%。在智能通水的基础上，通过拱坝智能建造管理平台，打通了全流程、全过程混凝土温控防裂的智能控制技术，进而研发拌合楼混凝土出机口温度智能控

制、浇筑仓面小环境智能喷雾、混凝土表面智能保温等技术。智能灌浆系统实现了灌浆压力、流量、密度、温度、抬动及异常情况的灌浆工艺智能控制，研发了一键启动、无人操作、少人监控、轻量集成、可视化的智能灌浆设备，可自动采集施工钻孔、冲洗、压水、灌浆和封孔全过程数据，在线分析灌浆成果数据，自动生成工序验收报表，进行特殊情况自动预报警。智能灌浆系统解决了人工管控配浆精度低、压力响应慢，以及施工环境改善、真实计量和质量可信等突出问题，对规范水泥灌浆管理与施工作业起到积极的推进作用。

二是对多个工序构成的一条龙连续过程的整体优化与关键工序调控。我们把基于业务流、程序流、供应链和工序链的各环节数据，运用数据分析和人工智能技术开展整体绩效优化，进而对某一环节进行调控的技术，也归为工艺过程智能控制。水电工程基础水泥灌浆各种特殊情况（如基础抬动的灌浆压力-流量-密度智能联动控制），就是以工序过程控制为基础，实现了正常灌浆过程遇特殊情况的分析判断，智能进入相应处理工艺过程的业务流程的联动。大坝混凝土浇筑施工全过程一条龙系统的智能分析、评估、优化和调控，通过对大坝仓面混凝土施工质量、作业人员行为与设备仓面安全、缆机安全运行效率的过程监控与实时反馈，实现关键工序的优化与精准控制。如基于混凝土水平运输过程数据，优化车辆、缆机的停等时间，有效控制混凝土的塌落度损失和温度回升，从而保证施工质量。在乌东德大坝混凝土浇筑控制中，通过这一工序链的匹配性分析，实现了混凝土运输车在缆机取料点等待时间由 10 分钟降低到 7 分钟，效率提高约 30%。

3.3 业务流程管理 水电工程参建单位多，各方管理程序与工艺控制标准不一，不利于知识积累和传递，也不适应多项目统一管理的需要。业务流程数字化管理通过制定水电工程建设管理各专业的标准化作业流程与格式化表格，开发移动端单元工程质量管理 APP 和安全隐患排查治理等系统，建立了质量验收实时实地实人实据的工作机制，实现业务流程数字化在线实时管理和业务链、工序链与供应链的整体优化。

基于业务管理流程与职责、先进技术标准和科学作业程序，制定了金沙江下游水电建设各专业统一的规范化、标准化、格式化的工艺流程、管理表格及编码体系，涵盖了大型水电工程建设管理 8 个大类、19 个专业，形成 175 个流程和 2450 张表格。通过质量、安全、环保等业务流程的标准化、规范化和在线动态管控，及时有效地应对复杂多变的现场环境与人员设备的流动变化。乌东德工程地下厂房混凝土单元工程质量验收的单张表单平均填写效率提高 66.7%，三检流程平均流转效率提高 76.7%。

通过揭示水电工程安全事故时空关系及安全隐患本质特征，基于“全面感知、真实分析、实时控制”闭环控制理论，建立了全员、全要素、全过程安全智能化管控体系。典型应用案例之一是，基于卷积神经网络（CNN）建立了数据驱动的安全行为学习模型，利用安全隐患排查治理系统采集的 7 万多条隐患数据进行模型训练，识别典型隐患。随着隐患上报数量的增加，识别精确度与识别效率进一步提高，相比于人工识别，隐患平均整改时间由 1.73 天降低到 0.62 天左右，整改效率提升 63%左右。

3.4 结构性态管理 全生命期水工结构工作性态安全是水电工程建设生命。大坝建设过程是结构体型、结构应力和混凝土温度过程的动态调整过程。300m 级高拱坝混凝土技术要求和施工标准十分严格，由于各仓混凝土施工时的环境温度、浇筑温度、冷却目标温度、浇筑层厚、浇筑时长等条件存在差异，需要采用先进的实时监控技术，根据现场实际情况及时分析和反馈调整，才能更好地满足拱坝施工安全和质量要求。大坝全过程真实工作性态仿真分析系统，利用在线实时采集的工程数据，开展全坝全过程混凝土应力、温度、变形及进度的耦合仿真，对不同区域、不同时段、关键节点的混凝土抗裂安全状态，通过建立科学的评价体系进行预测预报，为混凝土温控防裂安全控制提供决策依据。如对 300m 级高拱坝悬臂高度、通水冷却方案、灌浆时机等进行个性化控制，保证高拱坝建设的整体性、均匀性、均衡性、连续性，确保大坝结构全生命期安全。

3.5 工程进度管理 工程结构在不同的形象进度条件下会表现出不同的工作性态与安全特性。水电工程的进度计划与度汛安全密切相关，与结构安全存在复杂的耦合关系。水电工程施工进度与水工混凝土温控防裂及结构安全的耦合仿真分析和动态调控技术，贯彻了以进度为主线、安全为前提、合理工期为基础的工程进度多要素联合管理与结构安全多场耦合仿真分析的要求，有利于实现进度、质量、安全以及资源配置的有机统一，化解施工期度汛安全与结构安全控制的难题，同时提高进度计划的可执行性。面对溪洛渡拱坝河床地质条件变化及大坝结构调整，开展了以工程温控安全、结构安全和度汛安全为前提，以合理单元工期为基础的多方案进度计划比选，建立了全坝全过程高精度进度仿真模型和混凝土温度应力控制、施工进度优化的评价体系，通过进度计划与结构安全的耦合分析及动态调控，保证了溪洛渡水电工程如期安全蓄水发电。

在大坝混凝土施工中，上下层仓面混凝土间歇期与实际资源投入、实际生产效率和施工组织水平密切相关，更关系大体积混凝土温控防裂安全。以间歇期为结合点，将大坝混凝土施工进度仿真和工作性态仿真耦合起来，建立了基于仓面浇筑间歇期的多维仿真分析方法，分析过程见图 5。按此步骤循环，可进行以混凝土抗裂安全性为前提、基于层间间歇期的施工进度与工作性态耦合仿真，以指导建设单位动态调整资源配置满足层间间歇期要求，并同时满足全局施工均衡与结构安全的要求。

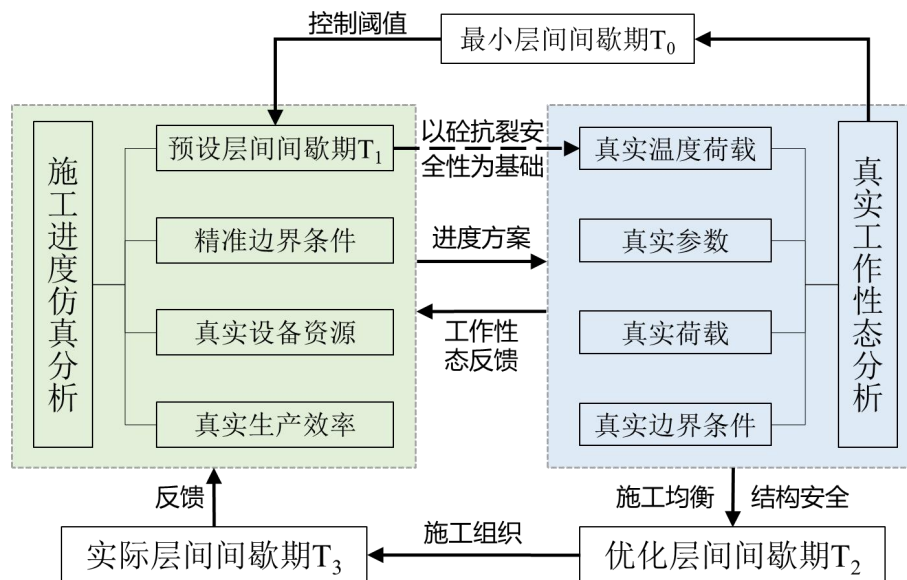


图5 基于层间间歇期的施工进度与工作性态耦合仿真

3.6 实物成本管理 实物成本主要是建造过程中投入到现场的人力、物资和机械设备。通过资源要素精准定位和跟踪管理，建筑市场准入管理精确到个人和单台设备，工程计量签证精确到单元工程。基于施工计划和单元工程实物量的材料控制系统，实现全流程物资在途动态管理。单元工程计量签证系统贯通工程概算、招标设计、施工详图、施工签证，实现了投资、进度和质量的联合管理。工程造价快速估算系统基于施工工序，建立概算定额、投标定额、实测定额等基础数据库，结合实物量投入，实现了工程、合同、工序三级实物成本动态监测，以及工程概预算、投标报价、合同标底及合同变更价的快速编制、可信分析和有效管理。乌东德和白鹤滩两个工程建造过程中，人力、材料及机械设备等实物成本控制的精准性得到有效保障，仅资金利息节余就可达合同金额的 2%。

4 智能建造管理平台

智能建造管理是一个汇集建设各方、融通各项技术、聚焦关键问题、落实解决方案、进行技术与管理决策的活动。智能建造管理需要一个以工程数据编码体系为基础，以数据实时在线管理与分析为核心，技术一流、管理有方、运转有效、实时在线、协同工作的生态系统，也就是智能建造管理平台 iDam。

4.1 工程数据模型及编码体系 水电工程施工过程复杂，涉及大量的工程数据，可以分为四类：一是基础数据，包括水工建筑物的设计参数和成果数据，如各类地质结构的参数和分布、坝体三维结构模型、混凝土物理力学性能试验成果、建筑物和基础联合体的应力变形等；二是过程数据，指工程施工过程中的动态信息，包括开挖支护、混凝土浇筑、灌浆、金结等施工专业数据，质量、安全、进度、测量、试验、检测等管理业务数据，以及各类仿真分析数据和成果；三是环境数据，包括工程的水文、气象、地应力与异常天气信息等；四是监测数据，指工程全生命周期的安全监测数据，包括环境监测及温度、应力、变形、渗流、接缝面开合度等。

金沙江下游水电滚动开发的过程中，面临多项目条件下的数据共享和知识积累传递。大坝全景信息模型 DIM 是 BIM 技术在水电建设领域深度应用的成果，从一开始就建立在工程全生命周期结构安全和价值创造的基础上，通过建立一套由建筑结构分解固定编码和可扩展的建设属性编码组成的统一编码体系，进行基础开发、数据积累、业务集成、协同工作和应用扩展，来集成管理设计-施工-运维全生命期的基础数据、环境数据、过程数据、监测数据，也为多项目条件下的数据共享和知识积累传递提供了条件，可实现跨工程、跨组织、跨专业、跨职能的工程数据共享、信息协同、成果分析与对比。

通过建立工程大数据平台、标准化数据接口与统一的系统集成平台，应用物联网、工业组态与移动应用等技术，实现对建筑物结构、施工与环境监测数据，缆机、拌和楼等工业控制系统数据，平仓、振捣等作业监控数据的实时采集和存储，通过统一的编码体系实现多维数据关联与融合，支撑各类专题分析与工程应用。以缆机为例，通过与缆机工业控制系统（WinCC）建立接口，以每秒一次的频率采集缆机主塔、副塔、小车位置、吊钩深度、移动速度、重量等数据。基于原始监控数据，自动分析缆机工作状态，包括待令、混凝土运输、其他零星运输等；混凝土运输状态下可分析其待料、装料、运输、对位、下料、回程状态，单循环周期及工作效率等。进一步，基于下料时间与坐标位置，分析混凝土下料点分布均衡性与坯层覆盖时间、浇筑强度与施工均衡性等。

4.2 工程数据的感知传输 智能建造中大量工程数据的采集和传输，是物联技术中数字监测与网络传输技术在水电工程建设领域的深度应用。智能感知设备和仪器是智能建造系统的核心元件，构成物联系统的源头，以传感器为基础构建的监控系统已经成为智能建造系统的研发重点。在智能通水系统中，溪洛渡大坝通过数字温度传感器、光纤传感器与移动传输通讯技术的结合，实现了大坝全过程温度数据的实时在线获取和传输；在智能灌浆系统中，对传统的水泥密度模拟传感器进行了数字化及加密处理；全球导航卫星系统如 GPS 和北斗以及合成孔径雷达、微震监测等，已在工程边坡变形监测中应用。智能建造管理将重点实现水电工程大范围、多尺度、全过程实时监测与自动化，与数值仿真分析的结合，为全面实时掌控大坝施工、蓄水、运行全过程真实工作性态提供有力的数据支持、分析模型支持和扩展应用支持。

智能建造管理需要构建基于开源架构的企业混合云平台，通过计算资源、存储资源、应用服务的云化，实现所需计算和存储资源的快速供给及服务的快速交付，为数据资源的集中存储与管理创造基础环境。在数据传输上，乌东德水电工程集成应用 4G（FDD-LTE）、数据加密技术（VPDN）、光环传输网（SDH）及混合定位系统，构建了适应大型水电工程建设狭窄河谷、高陡边坡、地下洞室群等不同施工场景的位置定位系统和数据实时传输通讯系统，实现了统一网络环境下安全、稳定的互联互通。

4.3 智能建造管理的成套设备 科学技术和实体工程的结合，在于将解决方案转化为可以带来工程建设管理效益的产品。智能建造在于形成智能装备，实现科学、技术、艺术的结晶。我们在

实践中，围绕关键工艺过程以及资源投入管控，研发了具有自主知识产权的实现感知、分析、控制闭环智能管理的硬件控制设备和软件控制系统，实现了智能通水、智能灌浆、混凝土施工一条龙智能优化分析，以及资源投入（如作业人员、施工车辆）的精确定位管理和绩效分析。溪洛渡拱坝智能化建设过程中开发了智能通水温度控制系统（见图6），乌东德工程建设中研制了水泥智能灌浆单元机（见图7）。

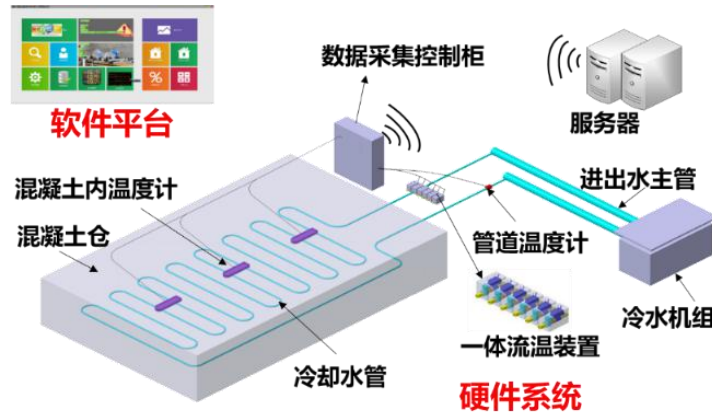


图6 智能通水温度控制系统



图7 集成式水泥智能灌浆单元机

通过对业务流和产业链的优化分析，在揭示系统反馈、人工响应的关键工序调控方面，应根据实践需要研发可以自动响应的成套控制装备，对重点施工设备如砂石系统、拌和楼、缆机、振捣机等进行全面调控，实现混凝土运输、入仓、浇筑过程的全面管理，优化施工组织过程。

4.4 智能建造管理平台 iDam 智能建造管理利用物联网、云计算、移动互联、综合定位等现代信息技术，研发内生式和手持式数据采集技术、内嵌仿真分析等专业软件，将各类感知系统、传输系统、分析系统、预测预警系统及实时调控系统，构成一体化协同工作平台。在溪洛渡大坝建设经验基础上，智能建造管理平台 iDam 以大坝全景信息模型 DIM 为基础，融合 GIS 技术来构建水电工程建设地形环境等实体场景，采用 BIM 技术来构建水工建筑物三维整体结构场景，结合 MIS 技术进行管理功能流程和职责的设定，然后根据水电工程建设施工全过程中资源投入、工艺过程、业务流程、结构性态、工程进度及实物成本等六大管理要素的动态演进，进行工程结构、组织结构、成本结构、资产结构的分解，搭建结构编码与属性编码，利用开发软件和管理工具，构建以数据为核心的分析模型和控制模型，进行深度集成与全面应用。以数据为核心，

以开发工具为支撑，面向六大管理要素的水电工程智能建造管理平台 iDam 的业务模块见图 8。

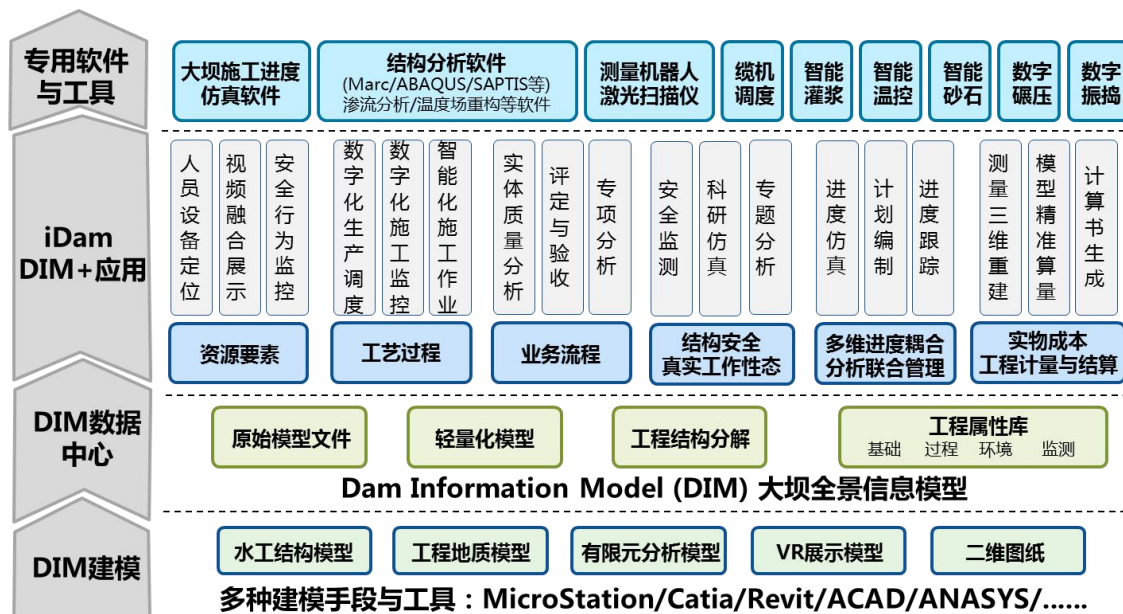


图8 智能建造管理平台iDam的业务模块与协同工作关系

5 实践成效

5.1 溪洛渡大坝智能化建设成效 大型水电工程智能建造管理创新的相关成果已在装机容量 6400MW 的向家坝和装机容量 13860MW 的溪洛渡等工程中成功应用，为业主、监理和施工单位的管理带来了便利，大大减轻了工程建设基层单位的日常工作量。两个工程的总装机规模相当于又建了一个三峡工程，工程运行安全正常，发挥了发电、防洪、航运、环保、供水等显著的综合效益。以溪洛渡大坝工程为例，从溪洛渡大坝左岸 A 区置换块第一仓混凝土浇筑开始，包括仓面设计、混凝土生产、缆机运输、浇筑盯仓记录、混凝土温控与通水冷却、试验检测、安全监测、固结灌浆、帷幕灌浆、接缝灌浆、金结制安等施工数据，全部记录到大坝全景信息模型 DIM 中，各类数据达 9.4T，涵盖 2538 仓混凝土、3496 支安全监测仪器、4723 支混凝土温度计以及 2.4 万 m 的测温光纤相关的过程信息。基于这些真实、全面的工程数据，从第一仓混凝土开始，全过程组织科研院所开展大坝施工期工作性态分析，形成了孔口部位、拱坝悬臂、横缝开合、陡坡坝段等约 80 余项专题研究成果，与设计工程师同步提供的工作成果进行比较，并通过技术咨询后进行决策、转入实施。这些精细研究揭示了 300m 级高拱坝的建设规律和机理，从微观上进一步保证拱坝整体质量和安全，保证了工程度汛安全和均衡高效建设。溪洛渡大坝建设克服前期地质缺陷处理带来的工期缩短等不利影响，实现按期蓄水发电，带来上百亿元的发电经济效益，并取出 20.59m 同类工程世界最长混凝土芯样。

5.2 乌东德和白鹤滩工程智能建造成效 智能建造管理及其核心技术已在装机容量 16000MW 的白鹤滩工程和装机容量 10200MW 的乌东德工程中进一步扩展提升、开发应用、取得实效，将保障工程成功建设。近三年，乌东德、白鹤滩工程仅在智能化管理技术的应用就已经取得了 7 亿元的经济效益。以该平台在金沙江白鹤滩水电站大坝工程建设管理全面应用为例，截止到 2020 年 6 月 30 日，实现对大坝、垫座、水垫塘、层内错动带 LS3319 置换回填区等部位 3572 仓，累计采集数据已超过 4000 万条的混凝土生产、缆机运输、混凝土浇筑、温度控制、安全监测等管理；实现白鹤滩大坝 368 个单元、9.5 万个孔、累计灌浆 91.8 万延米的固结灌浆施工，及 415 个单元、1.3 万个孔、累计灌浆 36.4 万延米的帷幕灌浆的全面管理，并已将大坝固结和帷幕灌浆的管理技术推广应用至地厂、泄洪洞等工程部位。白鹤滩大坝自首仓混凝土浇筑开始，每一仓

施工全过程的数据与信息均在智能建造系统中管理,实现了浇筑过程的全面监控。智能建造在乌东德、白鹤滩工程的示范性应用以及取得的显著效果,一方面为保障工程建设质量、安全与进度提供了先进的技术手段,显著提升了大型基建工程的管理水平;另一方面,缩小了我国在施工过程精细化管理方面与国际先进水平间的差距,对业主的工程管理水平、监理单位的工程监管水平、施工单位的生产管理水平均有较大的促进作用。有关成果已在浙江长龙山抽水蓄能电站、西藏雅江藏木和加查、金沙江观音岩等水电站和港珠澳大桥等多个工程推广应用,并在“一带一路”巴基斯坦卡洛特水电站等基础设施建设项目中推广。

6 结语与展望

大型水电工程智能建造管理是一个持续创新提升的过程。智能建造管理成效体现在智能化技术突破带来工程管理的革命性变革。智能建造管理结合综合定位系统,集成智能识别技术,利用移动交互式应用,实现了资源投入、工艺过程、业务流程、结构性态、工程进度和实物成本的精准、实时、扁平化管理和调控,解决了复杂多变的现场环境与人员设备流动变化导致的资源流动性管理难题,有效克服了业务流程与工艺控制波动导致的质量安全问题,实现了成本、进度与结构安全控制的有效平衡,化解了大型水电工程施工工期度汛安全与结构安全控制的难题。智能建造管理平台解决了海量数据的采集、统计和分析工作,有效的规范了业务流程、提高了管理效率,使现场信息及时、准确、真实、完整的传递到各级管理层,使管理人员能够迅速掌握第一手数据资料和现场生产情况,为科学管理、指导施工、辅助决策奠定基础。

水电工程智能建造管理将在水电工程建设的项目层面、流域层面及企业层面,带来组织架构、建设模式、资源配置的革命性变革,促进质量和效益的提升,确保高坝大库长期安全有效运行。未来的工程建设智能管理将是一个必然的、自然的、常态的管理活动。大型水电工程智能建造管理实践成果具有集成化、专业化、模块化的特点,移植灵活,适用范围广;既可以集成应用,也可将各个模块单独应用,适于推广到基础设施建设各个领域,是新基建的代表性应用成果。集成应用时,可以适用于具有复杂多样性、动态变化性、累积叠加性、突发重复性、群体重大性等特性的重大工程,特别是建设风险危害大、建设管理难度大的重大工程。各模块单独应用时,可以适用于中小型工程应对关键管理难题的解决要求。在推广应用,需要建立工程现场全覆盖的、可满足信息传输要求的网络系统,实现数据高效、准确的传输和应用;需要整合设计、施工、监理等多方面的信息,建立统一、规范、科学的数据标准体系,通过编码体系、数据结构、通信接口等实现数据交换和共享,保证各方提供数据的真实性、完整性;应明确信息化成果集成交付的相关要求,使智能建造管理高质量、秩序化运行,以更好地发挥智能建造管理的作用。

参 考 文 献:

- [1] 张睿, 李安强, 丁毅. 金沙江梯级与三峡水库联合防洪调度研究[J]. 人民长江, 2018, 49(13):22-26.
- [2] 徐昶, 吴文凤, 高超,等. 金沙江航运体系的建立[J]. 水运管理, 2017, 39(6):5-7.
- [3] 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.
- [4] 樊启祥, 林鹏, 魏鹏程,等. 智能建造闭环控制理论[J/OL]. 清华大学学报(自然科学版):1-11[2020-08-24]. <https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2020.26.023>.
- [5] 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.
- [6] 周绍武, 洪文浩, 李炳锋,等. 溪洛渡高拱坝混凝土温控防裂理论与实践[C]// 中国大坝协会2012学术年

会. 2012.

- [7] 樊启祥, 黄灿新, 蒋小春,等. 水电工程水泥灌浆智能控制方法与系统[J]. 水利学报, 2019, 50(2):165-174.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 吴林艳, 林恩德. 大坝施工信息化管理系统应用分析[J]. 水利水电施工, 2014(3):112-114.
- [11] Lin P, Li Q, Fan Q, et al. Real-time monitoring system for workers' behaviour analysis on a large-dam construction site[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 9(10): 509423.
- [12] 冉小兰, 赵严. 浅谈TGPMS之计量签证在向家坝水电站工程中的运用[J]. 中国科技博览, 2014(4):424-424.
- [13] 韩海亮. 基于信息化技术的物资管理模式探究--以溪洛渡水电站为例[J]. 水电与新能源, 2014(5):34-36.
- [14] 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. 2013.
- [15] 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.
- [16] 李庆斌, 林鹏. 论智能大坝[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1):139-146.
- [17] Lin P, Li Q, Fan Q, et al. A real-time location-based services system using WiFi fingerprinting algorithm for safety risk assessment of workers in tunnels[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(4):1-10.
- [18] Jiang H, Lin P, Qiang M, et al. A labor consumption measurement system based on real-time tracking technology for dam construction site[J]. Automation in Construction, 2015, 52(2): 1-15.
- [19] 贾洪刚. 基于RFID的人员定位管理系统在向家坝水电站的应用[J]. 水力发电, 2014, 40(10):24-25.
- [20] 樊启祥, 杨宗立, 汪志林,等. 大型水电工程建设全过程数字化动态管控[J]. 水力发电学报, 2019, 38(1):1-11.
- [21] 樊启祥, 陆佑楣, 周绍武,等. 金沙江水电工程智能建造技术体系研究与实践[J]. 水利学报, 2019, 50(3):294-304.
- [22] 樊启祥, 张超然, 陈文斌,等. 乌东德及白鹤滩特高拱坝智能建造关键技术[J]. 水力发电学报, 2019, 38(2):22-35.
- [23] 徐宗本. 数字化 网络化 智能化 把握新一代信息技术的聚焦点[J]. 网信军民融合, 2019, 022(03):27-29.
- [24] 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):12-17.
- [25] 樊启祥, 孙洪昕, 雷振, 等. 大型梯级水电项目开发知识管理研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1):102-109.

Innovation and practice of intelligent construction management of large-scale hydropower projects on the lower Jinsha River

FAN Qixiang^{1,2}, LU Youmei^{2,4}, LI Guo^{1,2}, QIANG Maoshan³, LIN Peng³, LIU Yiyong², WU Kun², WEI Pengcheng³

(1. China Huaneng Group., Co., Ltd., Beijing 100031, China; 2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 3. Department of hydraulic engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

Abstract: Large-scale hydropower projects on the lower reaches of the Jinsha River face management challenges such as complex construction environment, high resource mobility, large

project scale, high technical difficulty, multiple construction risks, and long construction duration. This article first focuses on the management content of safety, quality, environmental protection, duration and cost of large-scale hydropower project construction in the lower reaches of the Jinsha River. Based on the closed-loop control theory of "full perception, real analysis, and real-time control", it is proposed that the definition, characteristics and system of intelligent construction management of hydropower projects. Secondly, for the whole life cycle of power station design, construction, and operation, focusing on the six management elements of resource investment, technological process, business process, structural behavior, project progress, and physical cost in project construction, and taking the structural safety of buildings as the core, we built an intelligent management method that deeply integrates key intelligent construction technologies in real-time dynamic analysis, coupled simulation prediction and interactive coordinated control. Finally, by using modern advanced information technology, the intelligent construction engineering data system DIM and management platform iDam integrated with GIS + BIM + MIS technology are constructed. The intelligent control equipment and application software are developed. Through the deep integration of industry, university, research and application, the project construction performance of high quality, safety, green and efficient is achieved, and the value creation is realized. The intelligent construction management has achieved remarkable results in the Xiluodu 300m high arch dam on Jinsha River, and has been comprehensively applied in Wudongde and Baihetan dam. It can also be popularized and applied in the construction of large-scale infrastructure projects.

Key words: hydropower engineering; intelligent construction; intelligent management; intelligent technology; closed loop control theory

作者简介：樊启祥（1963-），男，湖北仙桃人，教授级高工，主要从事
水利水电工程建设管理工作。

通讯地址：北京市西城区复兴门内大街6号华能大厦

电话：010-63228916

传真：010-66066182

手机号：15210587287

电子邮件：qx_fan@chnng.com.cn