

水利工程智能建造的理论思考和发展展望

钮新强, 谢明霞*, 徐利福

(长江设计集团有限公司, 武汉 430010)

摘要: 水利工程智能建造是数字技术与传统水利工程深度融合的产物, 核心价值体现为技术工具革新以及通过理论体系重构推动行业范式升级, 助力水利行业从传统建造向智慧服务跨越。本文阐释了包括内涵界定、核心特征、发展演进等在内的水利工程智能建造基本概念, 从系统哲学视角、人工智能哲学视角出发审视了水利工程智能建造的认知思维、方法逻辑、实践框架; 从复杂系统理论提供解析水利工程复杂性的认知范式、数据科学原理构成水利工程智能决策“引擎”、系统工程方法支撑水利工程全生命期协同管理以及三方面理论的协同机制等角度, 构建了水利工程智能建造的理论体系。进一步提出了水利工程智能建造的技术体系, 涵盖智能感知、数据融合与分析、智能决策与控制、智能施工装备、全生命期协同、智能材料与绿色建造等技术要素, 阐明了各类技术的功能定位和逻辑关联。展望水利工程智能建造未来发展, 可在拓展多学科融合的深度与广度、深化数据驱动与物理机理融合、提高人工智能技术的复杂工况适应性、实施“设计-施工-运行”数模一体化、推进智能建造技术的标准化与规范化等方面采取切实行动, 以为国家水安全战略实施与可持续发展提供坚实支撑。

关键词: 水利工程; 智能建造; 复杂系统; 数据科学; 系统工程; 工程即系统; 数据驱动决策; 全生命期协同

中图分类号: TV51; TV52 **文献标识码:** A

Intelligent Construction of Water Conservancy Projects: Theoretical Thinking and Development Prospects

Niu Xinqiang, Xie Mingxia*, Xu Lifu

(Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: The intelligent construction of water conservancy projects is a product of in-depth integration of digital technologies with conventional water conservancy projects. Its core value is reflected not only in the innovation of technical tools, but more importantly in promoting the upgrading of industry paradigms through the reconstruction of theoretical systems, thereby helping the water conservancy industry achieve its leap from “conventional construction” to “smart services.” This study expounds on the basic concepts of intelligent construction of water conservancy projects, including its definition, core characteristics, and evolution. It examines the cognitive thinking, methodological logic, and practical framework of intelligent construction of water conservancy projects from the perspectives of systems philosophy and artificial intelligence (AI) philosophy. Moreover, the study constructs a theoretical system from the perspectives of complex systems theory, data science, systems engineering, and coordination of these three aspects. Specifically, the complex systems theory provides a cognitive paradigm for analyzing the complexity of water conservancy projects; principles of data science constitute the “engine” for intelligent decision-making in these projects; and systems engineering

收稿日期: 2025-06-27; 修回日期: 2025-08-26

通讯作者: *谢明霞, 长江设计集团有限公司高级工程师, 研究方向为水利信息化; E-mail: xiemingxia@cjwsjy.com.cn

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3005504)

本刊网址: sscae.engineering.org.cn

methods support the lifecycle collaboration of the projects. Furthermore, it proposes a technical system that covers elements such as intelligent perception, data fusion and analysis, intelligent decision-making and control, intelligent construction equipment, lifecycle collaboration, intelligent materials, and green construction, and clarifies the functions and logical relationships of these technologies. Looking forward, practical actions can be taken in the following aspects: expanding the depth and breadth of interdisciplinary integration, deepening the integration of data-driven and physical mechanisms, improving the adaptability of AI technology to complex working conditions, realizing the integration of design – construction – operation digital models, and promoting the standardization of intelligent construction technologies. These efforts will provide solid support for improving the national water security and sustainable development of China.

Keywords: water conservancy project; intelligent construction; complex system; data science; systems engineering; engineering as a system; data-driven decision-making; lifecycle coordination

一、前言

水利工程作为支撑经济社会发展、保障生态安全的重要基础设施，在调节水的时空分布，平衡水、生态和人类需求方面发挥着关键作用，相应建设水平及质量事关国家的可持续发展。从古代的都江堰到现代的三峡水利枢纽，水利工程的发展始终与技术革新紧密关联。随着新一代信息技术的迅猛发展，智能建造技术为水利工程领域带来了新的发展契机，成为全行业升级变革的关键支撑。一般认为，智能建造理念源于德国“工业4.0”战略对智能制造的探索，不是传统建造技术与现代信息技术的简单叠加，而是基于全新理论体系和方法论的深度变革^[1-4]。目前，学术界尚未形成智能建造的统一定义，但普遍认可其核心属性——以新一代信息技术、工业化建造技术的深度融合为基础，构建人机协同的建造模式。智能建造理念逐步渗透至各行业，应用形态出现明显分化，如工业领域侧重数字孪生工厂的全流程自动化，建筑领域聚焦智能建筑的全过程智能化。

水利工程作为重大基础设施领域，实施智能建造既需要依托通用技术框架，也因独特的行业属性、面临的特殊挑战而与其他领域出现本质区别。这种差异的根源在于水利工程的核心作用对象“水”具有的自然属性，即水是自然产物，与人造物有着本质不同。对于人造物，人类可完全掌握其建造逻辑与运行机理，进而在数字空间中进行高效的模拟、仿真、推演与预测；在积累大量运行数据后，通过大数据分析和机器学习实现自主优化与自我完善。而在水利工程领域，人类对水的内在关联、演进规律、作用原理及成因等的认知仍处于较粗浅的阶段，认知层面的局限性致使在数字空间构建与现实水利工程完全匹配的数字孪生体极为困

难；一旦数字孪生体与物理工程实体之间出现偏差，不仅会削弱对工程建设的指导价值，更可能引发施工优化失效、安全风险管控失误等严重问题。整体来看，水利工程智能建造的特殊性体现在：工程系统与自然环境存在强的耦合，要求智能系统具备应对地质突变、极端水文等非常规工况的情境智能；鉴于全生命期的长时性，应用智能算法需突破数据漂移带来的认知衰减；社会价值具有多元性，需在防洪安全、水资源调配、发电调度、生态保护等多重目标中实现智能算法的价值平衡。为此，发展水利工程智能建造，需要突破“通用技术套用”思维，基于行业特殊性构建专属的理论体系与技术路径。

国内外学者围绕水利工程智能建造展开了多维度探索。①在理论体系层面，开创性提出“全面感知、真实分析、实时控制”的水利工程智能建造闭环控制理论，为工程全生命期的智能化管控提供核心框架。聚焦关键施工工艺（如坝体浇筑、隧洞开挖）和业务流程（如质量管控、进度管理），构建专项智能建造理论；针对复杂恶劣工况（如高海拔、强岩溶地质），探索适应性理论与方法，为工程实践提供坚实的理论支撑^[5-8]。②在技术应用层面，深入探讨智能感知、数字孪生等智能建造技术的适用场景与发展方向^[9,10]，形成多场景解决方案。针对大坝智能建造，研发施工智能控制技术与成套装备，建立高混凝土坝施工进度仿真模型，攻克坝体质量与温控协同控制技术；面向水工隧洞穿越复杂地质（如断层、涌水段）的难题，从地质超前预报、实时施工监测、工法工艺优化、机械配套升级等维度出发，构建多层次综合智能管理体系^[11-18]。智能碾压、智能温控、智能灌浆、智能安全监测、施工进度仿真等技术较为成熟^[19-30]，围岩智能感知、地质灾害预测/预

警、隧道掘进机（TBM）智能掘进、隧洞智能施工机械等技术取得突破^[31-34]，已在乌东德、白鹤滩、引江补汉等大型水利工程中实施应用和验证^[35-44]。也要注意，现有研究多围绕单点技术攻关或局部理论突破展开，而在相关理论和技术体系的全面构建、发展路径的全局规划，尤其是在多学科理论的深度融合、复杂或极端工况下技术适应性等方面，缺少有效的综合性解决方案。

深入研究水利工程智能建造，在提升水利工程建设质量、保障工程长期安全运行、推动全行业可持续发展方面兼具理论价值与现实意义。本文力求精准辨析水利工程智能建造的基本概念，从系统哲学、人工智能（AI）哲学视角出发全面阐释水利工程智能建造，进而构建理论框架、提炼技术体系、展望未来发展。相关内容可为水利工程行业标准化建设、技术创新提供参考，推动水利工程智能建造从“技术应用”向“系统变革”跨越。

二、水利工程智能建造的基本概念

（一）水利工程智能建造的内涵

水利工程智能建造是“功能精准匹配、风险主动防控、生态协同共生、全周期韧性进化”的新型建造范式，以“水-工-生态-社会”复杂系统协同为逻辑内核、智能技术与水利特性深度耦合为技术支撑，适配水利工程复杂性、高风险、强公益、长周期的行业特性，支持从单一工程建造到流域水系统健康的系统性变革与价值重构，推动水利行业从传统建造模式向数字化、智能化、绿色化转型升级。水利工程智能建造继承了智能建造“数字-物理”融合的共性特征，也因水利工程的跨流域性、强公益性、生态敏感性、长周期性等行业特殊性而形成了独特内涵。

传统水利工程建造模式多聚焦单个工程的物理实体完成情况，而水利工程智能建造的核心逻辑是将单一工程嵌入流域级的“数字-物理”系统，据此实现水利工程功能与流域整体需求的动态匹配。在规划阶段，应用数字孪生模拟不同工程布局对流域水文节律、生态基流、灌溉保证率的影响，精准替代传统的经验性规划。在施工阶段，将单个闸坝的混凝土强度数据、变形监测等数据与流域实时水情、气象预测等进行联动，据此动态调整施工进

度。在运维阶段，通过全流程数据中台整合水库、堤防、泵站等设施的运行数据，实现“一库调度影响全域”。

水利工程智能建造的技术内核是智能技术与水利特性的深度耦合，与通用技术的简单套用有着实质性不同。将智能感知、自动化装备、数据算法等技术要素与水利工程的水动力学特性、地质复杂性、结构特殊性等进行深度融合，构建“动态水情”驱动的数字孪生模型、“多目标平衡”导向的AI算法集群、“水情感知-数字映射-智能决策-物理执行”的闭环系统，确保适应水的流动性、不可控性、生态关联性，由此形成专属技术体系。

水利工程智能建造适配水利工程的跨区域、高风险、长周期的行业特性，超越施工效率提升的表层目标，着力解决传统建造的核心矛盾。例如，南水北调等大型水利工程跨越多个行政区，山区、平原、河流等地貌单元，开展水利工程智能建造需要解决跨域数据、业务、系统等要素的协同，以有效应对跨域协同的复杂性。水利工程一旦发生溃坝、堤防决口等事件，后果涉及生命财产与生态安全，相关风险防控具有极端重要性。水利工程智能建造的核心目标之一是构建从微米级监测到流域级预警的全链条风险防线。水利工程的设计寿命多为50~100年，远超一般建筑（30~50年），针对相关工程全生命期的持续性，水利工程智能建造需实现建造期向运维期的无缝衔接与持续进化。

传统水利工程建造以工程实体达标为终点，而水利工程智能建造的终极价值在于通过技术重构实现水利工程与水系统、生态系统、社会系统的协同健康，推动工程实体达标向水系统健康的范式转型。具体表现在：通过精准调控减少人工调度滞后导致的水资源浪费，提升流域水资源的利用效率；应用生态流量算法、鱼类通道智能监测，降低水利工程对水生态的干扰；通过水利工程全生命期风险预警，驱动“被动救灾”转向“主动避险”，提升水利工程的公共安全保障能力。

（二）水利工程智能建造的核心特征

从实践维度看，水利工程智能建造具有四大核心特征（见图1）。①数据驱动。采集、处理、分析、挖掘水利工程全生命期内全业务流程中的海量数据，如地质勘察数据、施工监测数据、设备运行

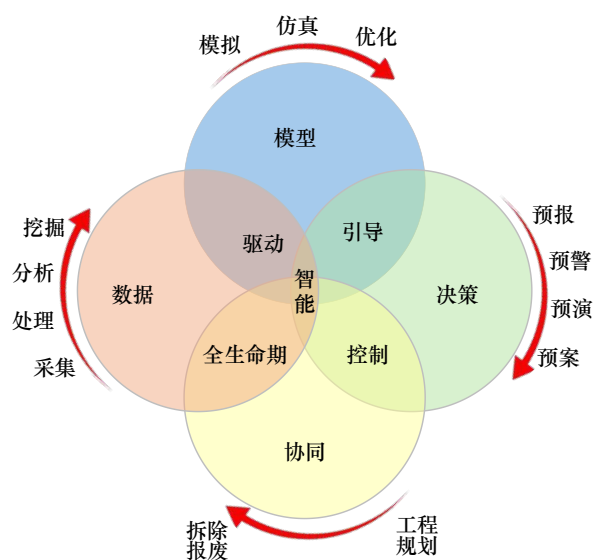


图1 水利工程智能建造的核心特征

数据等，实现工程状态的实时监测、趋势预测、动态调整，为工程建设与管理决策提供可靠依据。例如，在大坝施工过程中部署智能传感器，实时采集碾压参数、温度变化等数据，支持对压实质量、裂缝防控的精准管控。② 模型引导。借助机器学习、虚拟仿真等模型，对工程方案、施工过程、运行状态进行模拟、仿真、优化，提升工程建设与管理的科学性及可操作性。例如，利用隧洞施工仿真模型预判围岩变形风险，优化全断面的TBM掘进参数。③ 决策管控。应用AI、数字孪生等信息技术，构建涵盖“预报-预警-预演-预案”的闭环管理体系，提供复杂工程问题的自动化决策与高效管控能力。例如，应用水工隧洞的地质灾害智能预警模型并结合多源监测数据，快速预判塌方、涌水等风险并触发应对预案。④ 全生命期协同。以建筑信息模型（BIM）为载体，贯通工程规划、勘察设计、施工建管、运行维护、拆除报废等主要环节的关键信息，实现数据流转与业务协同，形成一体化的智能管理能力。例如，在BIM模型中整合水利工程从规划选址到拆除报废的全流程信息，精准支撑各环节的协同优化。

（三）水利工程智能建造的发展演进

水利工程智能建造的发展演进得益于技术迭代与认知深化的协同，主要经历了数字化启蒙、信息化发展、智能化突破3个阶段。

数字化启蒙阶段（1980—2000年），属于技术探索与初步应用层次，以计算机辅助技术取代部分人工计算（如水利水电工程的结构力学分析），基于地理信息系统、全球定位系统等技术实现水利工程地理信息数字化（如坝址勘察的地形数据采集）为代表。此阶段未能形成系统认知，但在要素量化方面开展了初步探索，出现了传统模式向数字化模式的转变，为水利工程数字化创造了基础条件。

信息化发展阶段（2001—2010年），属于系统集成与管理提升层次。自动化设备与监控系统（如混凝土拌合站自动配料、水库远程监测）进一步普及，支持水利工程的远程实时监控和操作；数据库和网络技术进步促成流域水情等信息的集中存储与共享，提升各环节信息流通和协同工作水平。此阶段聚焦信息集成，体现了要素关联层面的认知进步，但未涉及智能决策的深度思考。

智能化突破阶段（2011年至今），属于技术融合与创新层次。AI、大数据、物联网技术深度融合，智能碾压、TBM智能掘进等技术提高了水利工程的全流程智能化水平。例如，乌东德水电站建设过程中采用的人机协同温控系统，发挥AI的实时计算优势、保留工程师的最终决策权，在工具属性、自主能力边界上取得平衡。此阶段不仅关注技术升级，更显现水利工程AI的实践探索。

三、水利工程智能建造的哲学思考

水利工程智能建造的本质是数字技术与传统水利工程深度融合带来的系统性变革，相关认知及实践需在系统哲学与AI哲学双重视角下进行审视。这是由水利工程智能建造的基本属性，即水利工程的复杂性与智能技术的特殊性决定的。系统哲学界定“工程是什么”（复杂巨系统），AI哲学阐释“技术如何用”（工具边界与伦理），两方面共同确保智能技术高效且安全地服务于水利工程目标，为解构水利工程智能建造提供了互补性认知思维，阐释水利工程智能建造理论体系提供了逻辑脉络，梳理水利工程智能建造的技术体系并促进实践落地提供了指导框架。

（一）系统哲学视角下的水利工程智能建造

系统哲学着重研究整体与部分的非线性关系、

系统与环境的动态交互、层级结构的涌现性等，这些方面与水利工程的天然复杂性相契合。在此视角下，水利工程智能建造是对传统水利工程这一线性、孤立、经验驱动系统的重构。

1. 从孤立子系统到有机整体系统，打破层级割裂的涌现性重构

在传统水利工程中，工程规划、勘察、设计、施工、运维等被视为相对独立的子系统，表现在设计依赖图纸、施工依赖经验、运维依赖人工巡检；子系统之间的信息传递存在滞后性、呈现碎片化，导致“整体效能 \neq 部分之和”，甚至因协调不畅产生内部损耗。在系统哲学视角下，水利工程智能建造通过数字化建模与实时交互，将地质环境、水工结构、施工装备、水文动态等要素转化为相互嵌套的层级系统。在微观层，传感器网络构成“感知子系统”，支持坝体应力、渗流量等微观数据的实时捕捉。在中观层，AI算法与数字孪生平台构成“协同子系统”，将微观数据转化为设计优化、施工调整的决策指令。在宏观层，水利工程与流域生态、社会需求构成“环境子系统”，通过智能调度实现工程功能与生态保护、经济效益等的动态平衡。

上述层级系统的核心是“整体涌现”，即以数字技术为纽带，重构要素之间的关联机制，使水利工程系统在动态环境中持续进化，进而推动功能升级与价值跃迁。实现“整体涌现”不仅需要技术创新，而且涉及从系统论的层次重新理解水利工程：水利工程不是要素的简单堆砌，而是能够自我调节、与环境共生的复杂系统，其中的各类要素存在非线性的耦合关系（如坝体变形与地质应力、水流冲刷的动态交互）；各类要素通过数据链路进行深度耦合时，会产生单个要素无法实现的整体效能。

2. 从静态平衡到动态韧性，应对不确定性的系统智慧

水利工程面临的核心挑战是极端洪水、地质突变等环境不确定性，传统建造模式依赖“预设安全系数”实现静态平衡（如按百年一遇洪水标准设计坝体），但难以应对超出预设的突发场景。系统哲学强调系统与环境的持续交互，智能建造通过“感知-反馈-自适应”的闭环机制，将水利工程从静态防御系统升级为动态韧性系统。在感知维度，物联网系统实时监测环境输入信息，如水位骤升、山体滑坡预警。在反馈维度，数字孪生模型快速映射

物理系统的状态变化，如坝体应力分布的实时计算过程。在自适应维度，AI算法基于反馈结果调整系统输出，如自动开启溢洪道、调度抢险机器人。这种动态性在本质上是系统哲学中自组织理论的体现，即水利工程系统在智能技术赋能后获得自我调节能力，在环境扰动下维持核心功能（如防洪安全），甚至通过学习迭代提升应对能力（如基于历史洪水数据的优化调度策略）。

系统哲学的核心价值在于为水利工程智能建造提供兼有整体性和动态性的认知框架^[45-48]。在整体性方面，打破传统的分段管控思维，转而强调从全局视角出发理解水利工程各部分的关联关系。例如，流域防洪不仅关注单一水库的调度，而是统筹水库群、闸门、堤防等要素并发挥协同作用，契合智能建造追求的全系统优化目标。在动态性方面，揭示水利工程系统的演化特性，如坝体在长期运行中因水文条件变化、材料老化等面临新的风险。可见，系统哲学指导智能建造从静态设计转向动态调控，通过数字孪生等技术模拟系统演化趋势、主动防控潜在风险^[48]，实现水利工程的要素协同（从离散单元到有机整体）、过程演进（从线性流程到动态循环）、环境交互（从被动适应到主动调节）。

（二）人工智能哲学视角下的水利工程智能建造

AI哲学着重研究机器智能的本质、人机认知的分工、技术理性的伦理边界等，这些内容在水利工程智能建造中体现为独特的实践形态。在此视角下，水利工程智能建造既是技术层面的革新，也是工程决策范式、人机关系、系统本质的底层重构^[49-55]。

1. 从工具替代到认知延伸，AI作为增强型理性工具

在水利工程智能建造中，应用AI并非替代人类的自主智能，而是作为延伸人类认知边界的理性工具，用于弥补人类在处理复杂数据、计算效率上的局限性，仍然依赖人类提供的价值判断与实践智慧。例如，智能灌浆系统中的AI算法，结合力学模型与历史数据，可快速计算“压力-流量-密度”的最优匹配关系，但灌浆的最终目标是防渗还是加固（价值判断）、遇到岩溶地质时如何调整工艺（实践智慧），仍需人类决策。这一过程体现了AI哲学的互补性认知，即AI擅长工具理性层面的量

化计算、规则执行、海量数据处理，人类擅长价值理性层面的价值判断、情境应变、模糊决策，两方面协同构成完整的建造认知体系。

2. 从算法理性到伦理约束，技术异化的风险与规避

警惕AI技术异化对水利工程而言尤为关键，这是因为水利工程具有防洪、供水等公益性以及关乎生命财产的安全性特征，实施智能建造必须守住“技术服务于人”的价值底线。一方面，AI算法的“黑箱”问题可能引发风险。以AI优化施工方案为例，若仅以效率最高为目标，可能忽略水利工程的安全隐患（如简化防渗工艺），此时需工程师基于工程伦理（如安全优先）修正优化目标。另一方面，数据的“偏见”传递可能导致错误。若训练AI的数据集中缺乏高原冻土区数据等极端地质条件样本，则AI算法可能低估此类环境下的施工风险，需要工程师通过跨区域数据融合、实地验证等打破数据局限。水利工程智能建造中算法理性、伦理约束的平衡处理，实质上是AI哲学中工具理性、价值理性的统一，即水利工程智能建造的终极目标不是技术至上，而是通过技术应用更好实现水利工程的公益价值。

水利工程智能建造的核心矛盾，除了技术实现的复杂性，还涉及智能本质的认知差异和伦理权衡。AI在水利工程中究竟是辅助工具，还是具备自主决策能力的“准主体”^[56-58]，这一认知差异直接影响技术路线的选择。例如，在地质灾害预警中，若将AI视为辅助工具，则应侧重人机协同，由工程师结合AI预警结果进行决策；若认可AI的“准主体”属性，则需构建自主响应系统。显然，水利工程的高安全性要求，理应明确“人类主导”的边界。此外，水利工程需平衡防洪、供水、发电、生态等多元目标，AI算法的决策逻辑需符合社会价值伦理^[59-61]，如在洪水调度中，算法需优先保障人员安全而非单纯追求经济效率，可通过哲学思考明确算法的价值排序。

四、水利工程智能建造的理论体系

水利工程智能建造作为融合多个学科、多类技术的复杂系统，涉及技术工具迭代、理论范式重构，需以涵盖复杂系统理论、数据科学原理、系统工程

方法的“三位一体”理论体系作为发展基础^[62]。其中，复杂系统理论将水利工程解构为相互关联的子系统，界定各子系统边界与要素耦合规律，为智能化发展提供认知范式，即回答工程系统是什么；数据科学原理通过AI算法等挖掘数据价值，构成水利工程智能化发展的决策“引擎”，即解决如何基于数据做决策；系统工程方法统筹水利工程全生命周期流程，提供智能化发展的实施路径，即明确全流程如何协同。“三位一体”理论体系从“认知论-方法论-实践论”层面构成闭环，支撑水利工程从被动适应自然向主动协同自然的范式跃迁。

（一）复杂系统理论提供解析水利工程复杂性的认知范式

水利工程是“自然-人工”复合的复杂巨系统。子系统多元耦合，涉及地质（如岩体结构、断层分布）、水文（如流量、水位、水质）、结构（如坝体、隧洞、闸门）、生态（如水生生物、植被）等方面的要素，各子系统之间存在非线性交互关系（如坝体变形改变地质应力场，进而引发围岩渗透性变化）。动态演化涌现，工程行为并非各要素的简单叠加，而是呈现新特性（如局部坝段裂缝可能通过水流冲刷引发整体失稳）。环境交互具有不确定性，受到极端气候、地质突变等的影响，系统行为难以由线性规律进行描述。复杂系统理论的核心价值在于确立“工程即系统”的认知范式，为智能化划定边界：所有技术应用应服务于系统整体效能提升，而非局部优化^[63,64]，指导水利工程智能建造从线性流程管控转向动态协同调控^[65]。

在水利工程智能建造中运用复杂系统理论，主要关注两方面。① 揭示水利工程各部分之间的复杂关联（见图2）。以大坝建设过程为例，坝体结构、水流条件、地质基础、周边生态环境之间存在着复杂的相互作用。运用复杂系统理论，构建多物理场耦合模型，建模力学、热学、水动力学等物理过程，模拟各类物理过程的相互作用以及在工程建设和运行过程中的动态变化，为工程设计、施工方案优化、安全监测等提供科学依据。② 复杂系统理论的涌现性，要求水利工程智能建造系统立足全局视角，构建数字孪生模型以模拟系统的涌现特性，避免局部优化伴生的全局性风险。

(二) 数据科学原理构成水利工程智能决策“引擎”

数据科学原理为精准认知水利工程的复杂性提供了有效工具，通过“数据→信息→知识→决策”的转化链^[66-68]，赋予水利工程系统以智能属性（见图3）。在水利工程的全生命期内，包括地质和地形勘测数据、工程设计数据、施工监测数据、运行维护管理数据在内的海量多源异构数据成为智能化发展的基础条件，基于数据科学工具可从中提炼支撑

科学决策的规律方法。在更深层次上，数据科学原理支持对水利工程认知方式的重构，即提供“数据驱动决策”的方法论工具，从基于经验的定性判断转向基于数据的定量决策^[69]，成为智能建造的核心驱动力。例如，大坝安全评估可不再依赖定期的人工巡检，而是应用传感器实时采集的数据并结合异常检测算法来自动识别潜在风险。

机器学习、深度学习等算法超越传统的经验建

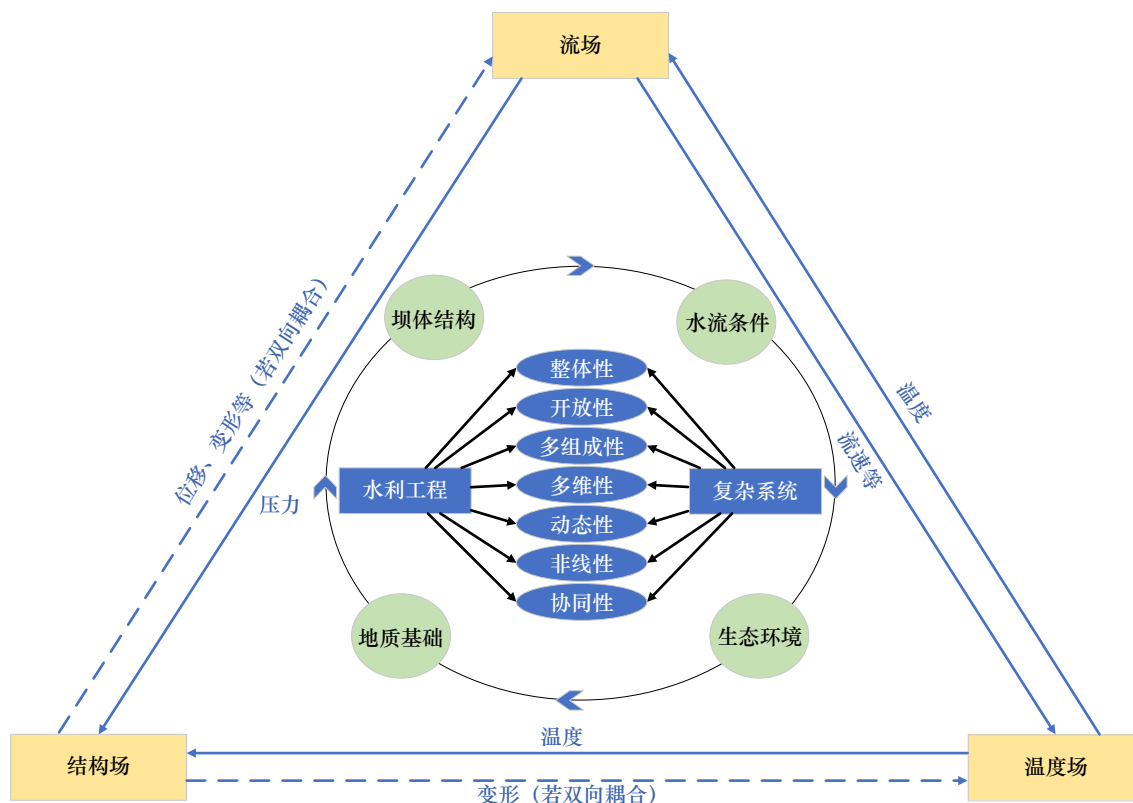


图2 水利工程复杂系统示意（大坝建设过程）

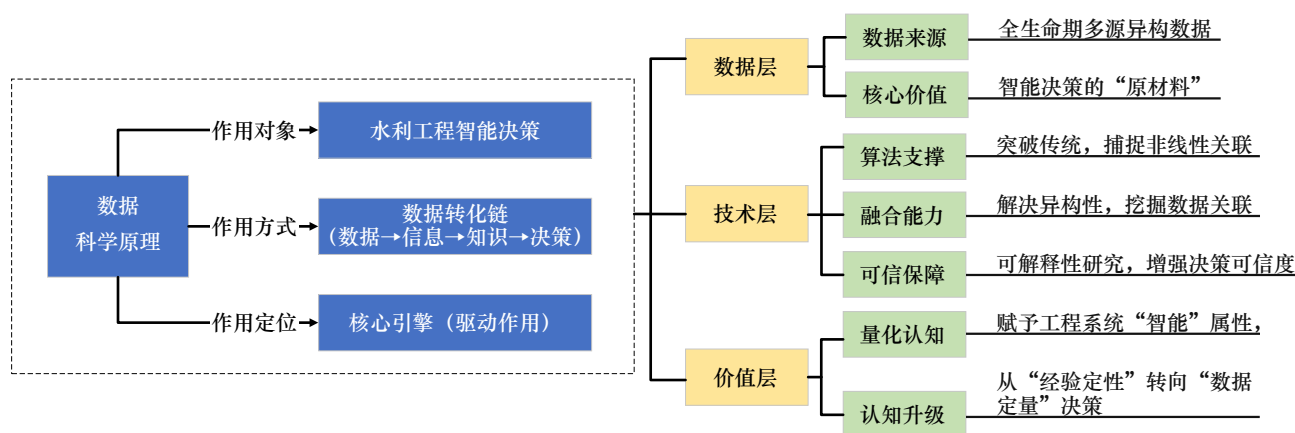


图3 水利工程智能决策“引擎”

模能力，可自动捕捉数据中的非线性关联。基于深度学习的围岩稳定性评估模型，分析TBM掘进参数、声波探测数据、围岩变形速率等信息即可实时判断前方地质条件。应用数据融合技术解决多源数据的异构性问题，支持发现数据之间的相关性。分析施工工艺参数、工程质量数据之间的关系，支持施工流程优化。可解释性研究增强智能决策的可信度，开发物理约束注意力机制，明确可视化模型决策中关键参数的贡献度（如岩体完整性系数对塌方预警的权重），支持工程师理解并信任智能决策结果。

（三）系统工程方法支撑水利工程全生命期协同管理

系统工程方法以整体最优为目标，将涵盖工程规划、勘察设计、施工建管、运行维护、拆除报废在内的水利工程全生命期视为有机整体（见图4），通过“目标-过程-资源”协同优化推动工程价值最大化^[70,71]。工作重点是构建全流程协同的实施路径，确保复杂系统理论的认识、数据科学的方法发挥成效^[72,73]。系统工程方法的本质是构建理论、技术、工程的转化“桥梁”，将复杂系统理论的认识转化为可执行的目标体系，将数据科学的方法嵌入具体的业务流程，确保智能化成为贯穿水利工程全生命期的可操作实践。

基于系统工程方法已实现水利工程全生命期各阶段的无缝衔接和协同工作，提高了工程建设和运行的整体效益^[79]。①在工程规划阶段，应用系统工程方法综合分析经济社会发展需求、水资源状况、生态环境影响等因素，确定工程的总体目标和功能定位，进而采用系统动力学模型实现多元目标的平衡。例如，在南水北调工程规划过程中，综合考虑供水安全、生态保护、经济成本等约束，利用多目

标优化算法确定了输水规模与线路，实现“社会-生态-经济”效益协同最优。②在勘察设计阶段，将BIM平台作为信息整合载体，集成地质、结构、施工等方面的数据开展多专业协同设计。例如，在某水利枢纽设计中，结构、机电、水文等专业在统一的BIM平台上工作，通过碰撞检测提前发现管道与坝体的空间冲突，优化工程设计方案，减少后期变更需求。③在施工建管阶段，建立施工管理信息系统，基于BIM模型实时监控施工进度、质量、安全等方面的技术指标，及时调整施工计划以确保工程顺利推进^[74-78]。④在运行维护阶段，应用智能监测系统、调度决策支持系统，构建“监测-预警-调控”闭环能力，开展水利工程的实时监控与优化调度，确保运行效率和安全性。⑤在拆除报废阶段，利用爆破仿真、资源回收优化分析等手段，提高水利工程的绿色、节能、环保处置水平。

（四）三方面理论的协同机制

作为水利工程智能建造的发展基础，复杂系统理论、数据科学原理、系统工程方法三方面协同，呈现“认知-方法-实践”的螺旋式上升，而实践中产生的新问题又会促成理论深化。水利工程智能建造范式得益于三方面理论协同，逐步从经验驱动的分散管理转向数据驱动的系统管控、从单一工程的功能实现转向流域系统的协同优化，从短期建设的成本控制转向全生命期的价值最大化（见图5）。以引江补汉工程为例说明上述协同机制：基于复杂系统理论识别了“TBM掘进-围岩稳定-地质环境”耦合关系，应用数据科学原理并融合掘进参数、物探数据构建了预警模型，经由系统工程方法将预警模型嵌入施工流程，形成了涵盖实时监测、智能预警、参数调整的协同管控体系，提升了隧洞施工效率并保障了工程系统性安全。

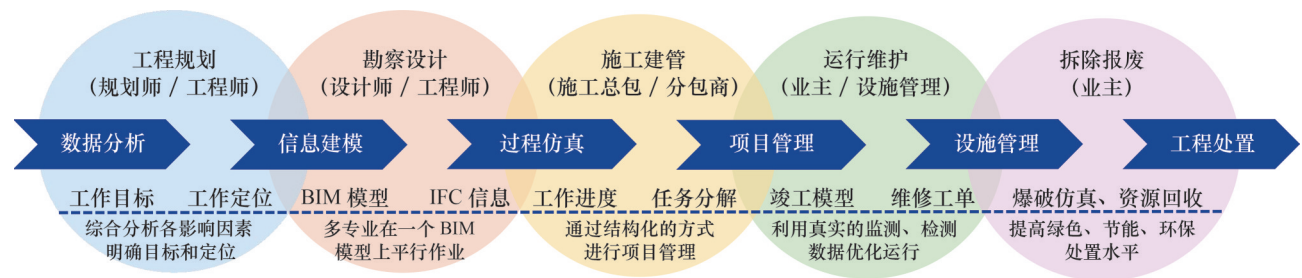


图4 系统工程方法贯穿水利工程全生命期
注：IFC表示工业基础类。

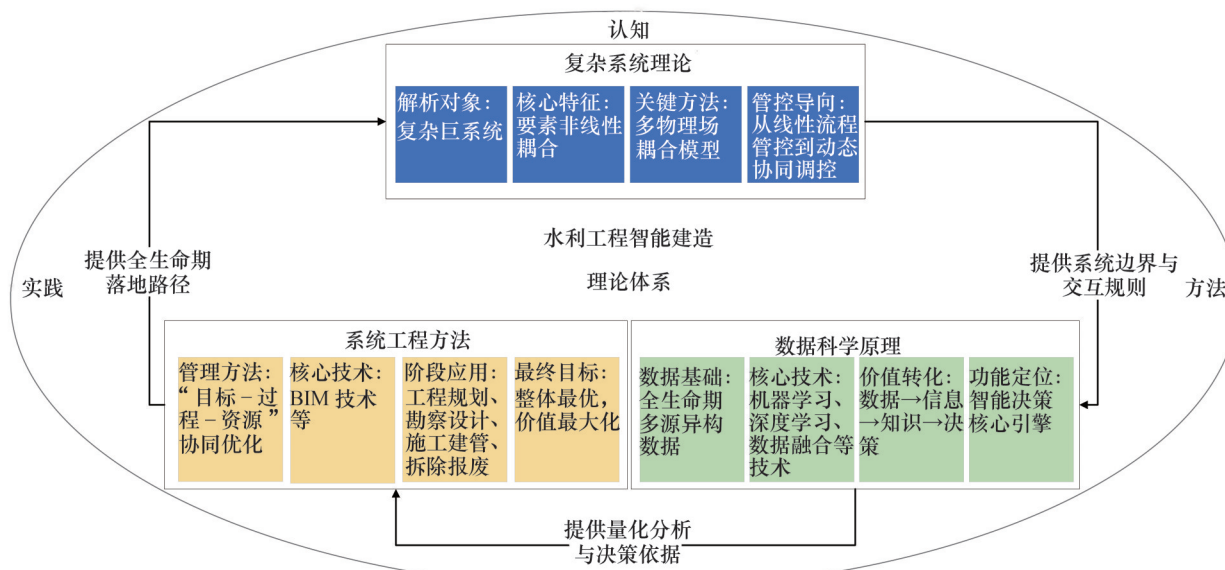


图5 水利工程智能建造理论体系

五、水利工程智能建造的技术体系

水利工程类型多样，不同类型水利工程的建造目标、关键难题、施工特性、结构特征、管理体系均有显著差异。在此背景下，水利工程智能建造技术体系成为理论与实践相结合的“纽带”。以水利工程智能建造的理论体系为支撑，结合乌东德水电站、引江补汉工程等重大工程实践经验，构建了“感知-分析-决策-执行-协同”全链条技术体系。相关技术涉及硬件装备、软件系统、跨阶段协同机制，其中硬件装备涵盖从纳米级传感器到千米级TBM的全谱系装备，软件系统包含数据采集、仿真计算、业务管理等层级平台，跨阶段协同机制通过BIM、区块链等技术实现设计参数、施工数据、运维记录的全程追溯；以多类技术的协同联动、全生命期的数据贯通为核心，采用实时数据驱动模拟预测，将工程管控从经验判断转向数据驱动、从事后补救升级为事前预警。

（一）智能感知技术

智能感知技术是水利工程智能化的基础。构建多尺度、高精度的“神经感知网络”，支持工程状态的全面监测与信息采集。

1. 多尺度传感网络

考虑复杂系统的要素多元耦合特性，针对水利

工程空间尺度大、结构复杂的特点，构建覆盖宏观、中观、微观层面的感知网络。在宏观层面，采用“卫星遥感+无人机集群”协同模式，监测流域地形变化，获取坝区三维实景，开展大范围工程环境的动态感知。在中观层面，采用“分布式光纤+点式传感器”混合布设方案，在坝体、隧洞等关键结构表面布设光纤光栅传感器，实时采集温度、应力等参数；在坝踵、坝肩等坝体关键部位安装应变计，实时监测结构应力状态。在微观层面，配置渗压计、钢筋计、测缝计等，捕捉结构内部的细微变化，如坝基扬压力、混凝土裂缝发展等。在实践中，乌东德水电站工程在坝体、坝基布设超过1000套传感器，实时监测混凝土温度、坝基扬压力等参数；引江补汉工程隧洞中布设传感系统，精准监测围岩收敛速率，为实施智能支护提供数据支持。

2. 智能识别与传输

基于数据科学的全要素量化原理，开展信息精准采集与传输，采用先进的识别算法提升数据解析能力。在计算机视觉方面，布设工业相机并结合深度学习算法，精准识别混凝土表面裂缝、灌浆孔返浆状态等信息。在物探融合方面，将地质雷达、地震波反射仪等物探数据与钻探结果融合，提高复杂地质条件下的结构识别精度。在数据传输网络方面，采用第五代移动通信专网，实现海量监测数据

的实时上传；在边缘计算节点进行滤波、异常值剔除等数据预处理，减少传输冗余；针对高电磁干扰环境，采用低功耗广域网技术，确保隧洞内传感器数据的稳定传输。在实践中，乌东德水电站工程利用AI算法实现混凝土裂缝的自动识别；引江补汉工程在TBM上搭载地质雷达，将物探数据与超前钻探数据融合，提高断层识别的吻合度。

（二）数据融合与分析技术

应用数据融合与分析技术，整合多源异构数据并挖掘隐含规律，为水利工程决策提供量化依据，成为连接感知与决策的核心环节，

1. 多源数据融合

基于数据科学的关联挖掘原理，整合异构数据以进一步揭示内在规律。进行数据的时空对齐，采用时间戳同步、空间坐标转换等方式，解决不同传感器数据的时空错位问题。开展数据的特征提取，应用主成分分析等机器学习方法处理高维度的监测数据，改善计算效率。实施置信度融合，基于证据理论对工程勘测数据、实时监测数据、分析预测数据进行加权处理，提高地质解释、工程安全监测的准确率。在实践中，乌东德水电站工程将拌合楼数据、运输记录、仓面监测信息进行时空对齐，支持混凝土质量追溯；引江补汉工程通过证据理论融合多源数据，提高断层预报的准确率。

2. 智能算法与数字孪生

应用基于数据科学的预测与模拟方法，构建水利工程联合调度、工程安全等分析与仿真模型。利用随机森林、神经网络等机器学习和深度学习算法，基于历史监测数据训练模型，提升水利工程防洪、安全监测等预报预测精度。整合设计规范、施工案例、监测数据等信息，构建水利工程领域知识图谱，据此提供智能问答（如IV类围岩支护参数）、案例推理（如岩溶区灌浆方案推荐）能力，为工程决策提供知识支撑。耦合力学、水动力学等物理模型，建立适应业务应用精细度要求的工程数字模型，实时映射物理实体状态，减少仿真计算误差。在实践中，引江补汉工程通过数字孪生体模拟TBM掘进与围岩变形的动态关系，为参数优化提供可视化作业环境；“江汉平安号”TBM每掘进50 m即实施1次超前地质钻探，实时分析刀盘转速、推力、扭矩、岩屑等12项关键参数，在数字空间内还原掌

子面前方50 m范围的地质构造，据此精准预演断层破碎带、高压涌水区的分布形态，引导TBM安全穿越高危地质区段。

（三）智能决策与控制技术

应用智能决策与控制技术，基于分析结果生成优化方案，驱动执行设备精准操作，实现从数据到决策再到具体实施的闭环控制。

1. 多目标优化与自适应控制

基于系统工程的整体最优原则，实现流域水资源调度与工程多目标平衡复杂问题的精准决策。建立包括防洪、发电、供水在内的多目标优化模型，采用遗传算法等获得最优解。针对生态影响等定性指标，引入模糊层次分析法并将之转化为量化权重，提升多目标协同条件下决策的科学性。针对混凝土温控系统等，通过粒子群算法实时优化比例-积分-微分参数，提高动态工况下自适应调节控制的精度。基于监测、检测、设备参数等数据，如TBM掘进参数（推力、扭矩）与围岩条件，预测最优的掘进速度，有效控制施工过程与设计目标的偏差。

2. 人机协同决策

应用基于AI哲学的人机互补理念，构建“AI辅助+人类主导”双向赋能的科学决策机制。在系统识别到未收录工况（如新型岩溶形态）时，自动切换至人机协同模式，推送数据可视化报告，如趋势图、风险指数等。构建决策支持平台，支持工程师在线调整参数（如灌浆压力），实时模拟调整效果。在实践中，乌东德智能灌浆系统、引江补汉地质预警平台应用成效良好，表明人机协同模式可有效应对复杂工况下的决策需求。

（四）智能施工装备技术

推动机械化和智能化融合，提高水利工程施工过程的自动化、精准化水平，显著减少人工干预并提升作业质量。

1. 专业化智能装备

开展理论指导下的施工装备创新，提升施工作业的精度和效率。智能拌合站由机器人自动配料，根据含水率动态调整加水量，降低混凝土的坍落度标准差。智能布料机基于BIM仓面模型的路径规划、激光定位，提高布料覆盖率。自动振捣机器人

搭载超声波传感器检测密实度，自适应调整振捣参数，提高振捣均匀度。智能TBM集成超前探测（地质雷达+地震波）、刀具状态监测（振动+温度），自动优化推力与转速。智能支护台车通过激光定位降低锚杆钻孔偏差，应用注浆压力闭环控制提升支护效率。智能巡检机器人搭载高清相机、气体传感器等，沿坝顶、隧洞自动巡航。在实践中，引江补汉工程中“江汉平安号”TBM创造硬岩段掘进速度27.8 m/d的新纪录，智能支护台车进一步提高作业效率；乌东德水电站工程的无人机集群、引江补汉隧洞的智能巡检机器人，拓宽了监测、运维的覆盖范围及效率。

2. 装备协同作业

应用基于系统工程理念的协同机制，实现多装备联动。构建“拌合站-运输车队-仓面”协统链，通过卫星定位系统进行调度并与BIM模型联动，有效提升混凝土浇筑强度；TBM与喷锚机器人协同，基于掌子面扫描数据同步调整掘进与支护参数，合理缩短工序衔接时间；在防渗墙施工中，智能抓斗、泥浆净化设备、混凝土浇筑机协同，依据墙体深度、泥浆浓度实时匹配作业参数，有效控制墙体垂直度误差。在乌东德水电站、引江补汉等重大工程中，装备协同作业显著提升施工效率，显现智能装备协同对工程建设的支撑价值。

（五）全生命周期协同技术

应用全生命周期协同技术，打破各阶段、各专业的信息壁垒，实现数据流转与业务协同，支撑水利工程全流程智能化管理。

1. 跨阶段协同技术

基于系统工程的全生命周期集成理念，打破信息壁垒。采用三维协同设计，地质、结构、水文、机电等专业在统一的BIM模型上作业，提高碰撞检测效率，减少设计变更；面向模型动态更新需求，建立三级迭代机制，施工阶段每完成1个仓面浇筑即将实际参数（如混凝土强度、养护温度）录入BIM模型，形成“设计-施工”比对记录；在运行阶段融合监测数据（如位移和渗流）进行模型状态更新，根据检测结果（如裂缝修复范围）修正模型几何与属性信息，确保数字孪生体与物理大坝的一致性，实现模型全生命周期的可靠演进；实施一体化管理，整合设计、施工、运维等数据，形成工程数字

档案，支持全生命期追溯；开发移动端应用程序，支持现场数据录入（带定位和时间戳）、审批流程线上化，提升处理效率。

2. 流域协同调度

应用系统交互原理，优化资源配置。构建流域级智能调度平台，整合水库群、闸门、堤防等要素，缩短防洪调度响应时间；基于水情预报与用水需求，优化水资源分配方案，提升流域水资源利用率；开展流域生态流量协同调控，结合鱼类产卵期等生态保护需求，联动梯级水库调整下泄流量，保障河道生态基流达标率。在实践中，乌东德水电站工程纳入长江流域水工程联合调度，引江补汉工程与南水北调中线工程数据实现互通，跨区域协同调度价值凸显。

（六）智能材料与绿色建造技术

1. 智能材料

基于数据科学的功能集成理念，开发新型材料，实现“感知-响应-修复”一体化功能集成。在坝体关键部位采用碳纤维增强的自感知混凝土，经由电阻率变化感知坝体内部的应力和应变；当裂缝超过阈值时由微生物实施激活修复，减少坝体维护成本；在地质断层带采用形状记忆合金锚杆，当支护变形超阈值后合金自动恢复预设形状并产生预应力，自适应补偿变形，提高支护的可靠性；在堤防迎水坡采用透水自愈型生态护坡材料，通过孔隙结构实现雨水渗透涵养地下水，也在出现微小裂缝时通过材料内部活性组分自聚合完成修复，兼顾生态性与耐久性。这些智能材料的应用，显著提升了水利工程结构的安全性及长效性。

2. 绿色建造

面向水利工程可持续发展目标，创新低碳技术，实现工程建设与生态保护、资源节约的协同统一。实施施工废弃物资源化，建立“盾构渣土-再生骨料”生产线，应用智能分拣设备分离渣土中的砂石，提高再生骨料强度的达标率，显著减少弃渣量；应用低碳施工技术，通过“太阳能+储能”提供电力并促进废水回用，减少CO₂排放量；采用“电驱+能量回收”系统，降低施工综合能耗；在堤防加固工程中应用生态型固化土技术，以工业固废为原料复配固化剂，替代传统水泥土，减少水泥用量，同时提升土体抗渗性与植物兼容性。相关绿色

建造技术的落地应用，有效降低水利工程全生命周期的资源消耗与环境影响。

(七) 各类技术的功能定位和逻辑关联

水利工程智能建造技术体系反映理论指导实践、技术协同联动、应用全链条落地的闭环逻辑(见图6)，实现理论、技术与实践结合的最终价值。在理论指导技术实践方面，复杂系统理论为多尺度感知网络构建、流域协同调度等提供支撑，数据科学原理为智能识别、多源数据融合、智能材料功能集成等提供支撑，系统工程方法为装备协同作业、全生命周期协同、多目标优化等提供支撑。在技术应用落地的逻辑关系方面，智能感知作为数据入口，输出反映水利工程状态的环境、结构、地质等原始数据，为数据融合与分析提供输入；数据融合与分析是“感知-分析-决策-执行-协同”链条中承上启下的核心环节，输出量化规律、预测结果、数字孪生体等信息，为智能决策与控制提供量化依据；智能决策与控制负责指令生成，输出施工参数优化方案、设备控制指令、决策建议等，指导智能施工装备的精准执行；智能施工装备负责作业执

行，是决策落地的硬件载体，输出混凝土浇筑、隧洞掘进、支护等工程实体建造信息，通过全生命周期协同实现过程数据回溯；全生命周期协同作为跨阶段的信息“中枢”，输出全流程数据链、一体化管理平台、优化方案等，为数据融合与分析提供全生命周期数据支撑；智能材料与绿色建造为全流程技术落地应用提供基础保障，为智能感知技术提供新型传感载体，为智能施工装备技术提供绿色作业环境与材料支撑，同时输出智能功能材料、绿色施工方案、低碳建造模式等，融入全生命周期协同技术的可持续发展管理体系。

六、水利工程智能建造发展展望

(一) 拓展多学科融合的深度与广度

水利工程智能建造已在一定程度上融合了多学科理论和技术，但融合程度仍待深化。复杂系统、数据科学、系统工程等学科之间的协同效应尚未充分发挥，在处理复杂工程问题时显现局限性，在理论指导工程建设实践方面存在不足。例如，在建立水利工程模型时，虽然考虑了复杂系统协同和数据

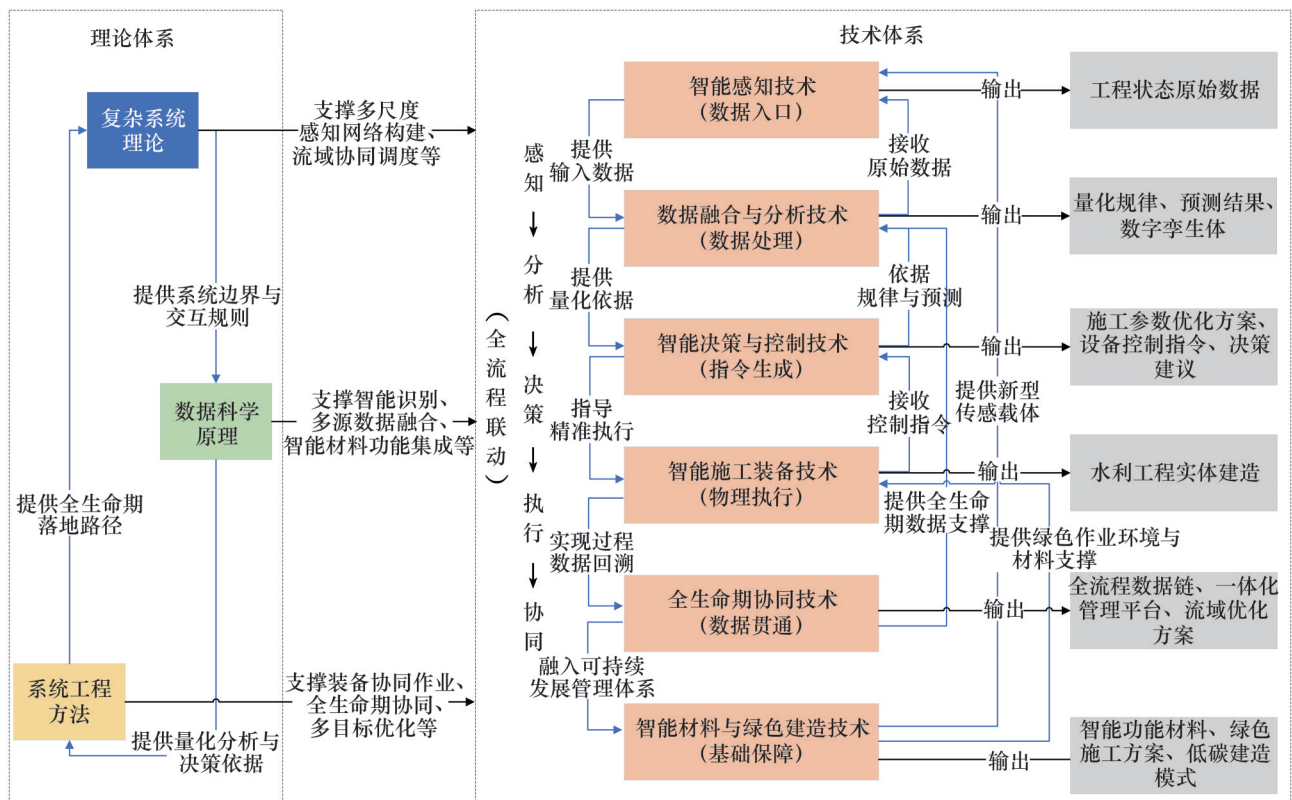


图6 水利工程智能建造技术体系

驱动的方法，但系统工程中全生命期管理理念的融入不够深入，模型难以全面反映工程建设和运行过程中的各种复杂关系。在理论研究和技术开发方面，需要进一步整合多学科理论体系，构建相应的理论融合框架，以复杂系统理论界定水利工程要素的交互维度、数据科学算法挖掘要素关联的量化规律、系统工程方法保障模型在全生命期各阶段的适配性，形成“边界约束-规律挖掘-阶段适配”的三阶融合逻辑。在构建水利工程智能建造模型时，建立多学科理论映射矩阵，明确复杂系统理论的动态演化分析在数据科学/机器学习算法中的约束边界（如将坝体结构、地质基础的非线性耦合关系转化为算法的正则化条件），同时将系统工程的全生命期管理要求拆解为各阶段的理论应用节点（如规划阶段侧重系统工程的目标协同、施工阶段强化复杂系统的动态调控）。在理论指导水利工程建设方面，需构建“理论-技术-工程”传导机制，以复杂系统理论指导工程系统的解构与重构、数据科学原理支撑工程决策的精准化、系统工程方法保障全流程协同。

（二）深化数据驱动与物理机理融合

数据驱动模型尽管可从积累的大量水利工程数据中学习规律，但缺乏对工程物理本质的深入理解，在解释模型结果、应对数据缺失或异常情况时存在不足。然而，物理机理模型基于工程学原理，具有明确的物理意义，但在处理复杂非线性问题时因计算复杂度高而难以适应实际工程中的不确定性^[9]。例如，传统的渗流物理模型较多采用简化假设，难以精准模拟复杂地质条件下的渗流场，而纯数据驱动模型在训练数据覆盖不足时易出现“物理悖论”。可发展基于物理引导的深度学习方法，将物理方程作为约束条件融入深度学习模型的训练过程中，使模型在学习数据特征的同时遵循物理规律，提高模型的可解释性和泛化能力。可发展混合建模架构，利用物理机理模型生成“虚拟样本”（如通过有限元模拟生成百年一遇洪水的坝体响应数据），扩充训练数据集，解决极端工况下实测数据稀缺的问题。可开发可解释性模块，通过可视化技术展示物理参数（如渗透系数）在神经网络中的权重分布，使工程师直观理解AI决策中地质参数的影响权重，增强模型的可信度。

（三）提高人工智能技术的复杂工况适应性

水利工程建设运行环境复杂多变，存在许多不确定性因素，如地质条件的复杂性、极端气候的影响等。AI技术在处理这些复杂工况时存在一定的局限性，模型的适应性和鲁棒性有待提高^[80]。例如，在地质灾害预测/预警中，当遇到罕见的地质条件或突发事件时，现有的AI模型可能无法准确预测灾害的发生。未来可从算法、数据、验证等方面进行突破，提高AI技术的复杂工况适应能力。在算法层面，开发自适应深度学习网络，引入注意力机制以自动聚焦关键特征，结合迁移学习将已建水利工程的模型参数迁移至新工程，提高模型对复杂工况的学习能力。在数据层面，构建“空天地水工”一体化感知网络，整合卫星遥感、无人机巡检、地面传感器等不同颗粒度的数据，形成多尺度数据集，丰富工况数据库，为模型训练提供更充分的样本数据，使模型更好地学习和应对复杂情况。在验证层面，结合物理模拟与数字孪生技术，在虚拟环境中模拟强震、溃坝等极端工况，验证AI模型的极限性能，提高模型在复杂工况下的可靠性和准确性。

（四）实施“设计-施工-运行”数模一体化

传统水利工程中的设计、施工、运行阶段往往独立展开，设计单位的二维图纸或BIM模型难以直接指导施工，施工过程中的海量数据无法反馈至设计方案优化，运行阶段的监测数据与前期模型脱节，导致“数据断层”“信息损耗”。水利工程具有地质复杂、工况多变的特点，传统决策依赖经验判断，易出现设计与实际脱节、施工应对滞后、运行调度保守等问题。实施水利工程“设计-施工-运行”数模一体化是破解以上问题的关键举措。在技术层面构建全生命期模型链，建立统一的数据接口标准，推动设计模型向施工模型的无损转换、再向运维模型的动态演进。设计阶段的地质勘察数据可直接导入施工模型，指导智能碾压参数设定；施工阶段的混凝土温控数据可反馈至设计模型，优化后续坝体结构；运行阶段的渗流监测数据可与设计参数联动，支持工程老化趋势评估。通过数模一体化的数字孪生体开展水利工程全生命期内的动态仿真，在设计阶段预演不同坝型的受力状态，提前规避结构风险；在施工阶段进行进度与资源调配，解

决潜在的冲突和矛盾；在运行阶段模拟洪水、地震等极端工况，提前优化调度策略。在政策层面建立和实施适配机制，由行业主管部门牵头制定相关标准，明确模型精度等级、数据采集频率等方面的强制性要求；将数模一体化应用列为优质工程评选指标，对示范项目给予造价补贴；建立第三方评估制度，将评估结果与项目法人信用等级挂钩，确保技术落地应用不流于形式。

（五）推进智能建造技术的标准化与规范化

水利工程智能建造领域的技术标准和规范较为零散、不成体系，相关企业和重点项目采用的技术方案及数据格式通常各不相同，不利于共性技术成果的推广应用，行业性的工程建设和管理协同受到影响。例如，智能监测系统中的传感器选型、安装位置、数据采集频率尚无统一标准，不同重点工程之间的数据难以直接进行对比。亟需提高智能建造技术的标准化与规范化水平^[81]，促进智能建造技术的推广应用。水利工程智能建造技术的标准化建设可采取“分层分类”策略，涵盖数据采集、传输、处理，模型构建、验证、应用，智能施工设备设计、制造、使用等。在基础层，制定传感器布设间距、采样频率等数据采集标准，通信协议优化、数据加密方式等传输标准；在应用层，统一数字孪生模型精度等级等模型构建标准、TBM安全操作参数相关的智能设备标准。针对大坝、隧洞等工程类型，制定大坝安全监测数字孪生标准、隧洞TBM施工智能控制标准等专项规范。建立标准化的测试和评估体系，支撑水利工程智能建造技术和产品应用。

七、结语

水利工程智能建造是数字技术与传统水利工程深度融合的产物，核心价值体现为技术工具革新以及通过理论体系重构推动行业范式升级，将促进水利行业从传统建造向智慧服务跨越，为国家水安全战略实施与可持续发展提供坚实支撑。本文从系统哲学、AI哲学双重视角出发，构建了以复杂系统理论、数据科学原理、系统工程方法为支撑的“认知-方法-实践”框架，揭示了水利工程从被动适应到主动协同的智能化发展与演进逻辑。研究取得的

核心突破有：①明确三方面理论的协同机制，即复杂系统理论明确“工程即系统”的认知边界，数据科学原理提供“数据驱动决策”的方法论工具，系统工程方法构建全生命期协同的实践路径；②基于构建的理论体系，结合乌东德水电站工程、引江补汉工程等实践，提炼了水利工程智能建造技术体系，显现出理论指导技术、技术赋能实践、实践反馈理论的良性互动；③针对多学科融合不深、数字-物理模型脱节、AI技术的复杂工况适应性不佳等瓶颈，提出了“理论融合-技术创新-标准构建”的突破路径，为水利工程行业提供了发展路线图。

从行业变革的视角看，水利工程智能建造的终极目标是重构“工程-自然-社会”的共生关系。通过复杂系统理论认知水利工程与生态的耦合规律，借助数据科学原理实现水利工程的防洪智能联合调度与水资源精准调配，依托系统工程方法统筹工程全生命期内的可持续发展，最终实现防洪安全、工程安全、供水保障、生态保护等的多元平衡。未来研究可在三方面进行拓展：深化理论融合，构建“物理机理-数据特征-系统目标”混合建模范式；突破技术瓶颈，开发适应极端工况的自适应智能算法与数字孪生系统；完善标准体系，建立“技术规范-伦理准则-政策保障”协同机制，确保智能化发展不偏离人类价值轨道。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: June 27, 2025; **Revised date:** August 26, 2025

Corresponding author: Xie Mingxia is a senior engineer from Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Corporation. Her major research field is water conservancy informatization. E-mail: xiemingxia@cjwsjy.com.cn

Funding project: National Key R&D Program Project (2022YFC3005504)

参考文献

- [1] Zhang L M, Li Y S, Pan Y, et al. Advanced informatic technologies for intelligent construction: A review [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2024, 137: 109104.
- [2] Irani Z, Kamal M M. Intelligent systems research in the construction industry [J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(4): 934-950.
- [3] Wong J K W, Li H, Wang S W. Intelligent building research: A review [J]. *Automation in Construction*, 2005, 14(1): 143-159.
- [4] 臧冀原, 刘宇飞, 王柏村, 等. 面向2035的智能制造技术预见和路线图研究 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58(4): 285-308.

- Zang J Y, Liu Y F, Wang B C, et al. Technology forecasting and roadmapping of intelligent manufacturing by 2035 [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(4): 285–308.
- [5] 钟登华, 时梦楠, 崔博, 等. 大坝智能建设研究进展 [J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 38–52, 61.
Zhong D H, Shi M N, Cui B, et al. Research progress of the intelligent construction of dams [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 38–52, 61.
- [6] 钟登华, 刘东海, 郑家祥. 基于GIS的水电工程施工动态可视化仿真方法及其应用 [J]. *水利学报*, 2003, 34(7): 101–106.
Zhong D H, Liu D H, Zheng J X. Dynamic visual simulation of hydro project construction based on GIS [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(7): 101–106.
- [7] 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.
Zhong D H, Wang F, Wu B P, et al. From digital dam toward smart dam [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(10): 1–13.
- [8] 钟登华, 任炳昱, 宋文帅, 等. 高拱坝建设进度与质量智能控制关键技术及其应用研究 [J]. *水利水电技术*, 2019, 50(8): 8–17.
Zhong D H, Ren B Y, Song W S, et al. Study on key techniques for intelligent control of construction progress and quality of high arch dam and their applications [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(8): 8–17.
- [9] Skibniewski M J. The present and future of smart construction technologies [J]. *Engineering*, 2025, 44: 21–23.
- [10] Ahn H, Lee C S, Kim M, et al. Applicability of smart construction technology: Prioritization and future research directions [J]. *Automation in Construction*, 2023, 153: 104953.
- [11] 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.
Ma H Q, Zhong D H, Zhang Z L, et al. Key technologies of real-time construction control for major hydraulic and hydroelectric projects [J]. *Strategic Study of CAE*, 2011, 13(12): 20–27.
- [12] 樊启祥, 林鹏, 魏鹏程, 等. 智能建造闭环控制理论 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(7): 660–670.
Fan Q X, Lin P, Wei P C, et al. Closed-loop control theory of intelligent construction [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(7): 660–670.
- [13] 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, 933.
Fan Q X, Zhou S W, Lin P, et al. Construction intelligent control packaged technology and its application for a large hydropower project [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(7): 916–923, 933.
- [14] 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.
Fan Q X, Huang C X, Jiang X C, et al. Intelligent grouting control method and system for hydropower engineering [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(2): 165–174.
- [15] 李庆斌, 林鹏. 论智能大坝 [J]. *水力发电学报*, 2014, 33(1): 139–146.
Li Q B, Lin P. Demonstration on intelligent dam [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014, 33(1): 139–146.
- [16] 李庆斌, 马睿, 胡昱, 等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(8): 1252–1269.
Li Q B, Ma R, Hu Y, et al. A review of intelligent dam construction techniques [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2022, 62(8): 1252–1269.
- [17] 李庆斌, 石杰. 大坝建设4.0 [J]. *水力发电学报*, 2015, 34(8): 1–6.
Li Q B, Shi J. Dam construction 4.0 [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2015, 34(8): 1–6.
- [18] 刘耀儒, 侯少康, 程立, 等. 水利工程智能建造进展及关键技术 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(10): 1–20.
Liu Y R, Hou S K, Cheng L, et al. Advances and key technologies of intelligent construction of hydraulic engineering [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(10): 1–20.
- [19] 马睿, 尹韬, 李浩欣, 等. 大坝机理-数据融合模型的基本结构与特征 [J]. *水力发电学报*, 2022, 41(5): 59–74.
Ma R, Yin T, Li H X, et al. Basic structure and characteristics of dam mechanism-datadriven fusion models [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41(5): 59–74.
- [20] 张钟壬, 马睿, 胡昱, 等. 大坝智能建造智能化程度评价方法探讨 [J]. *水力发电学报*, 2023, 42(12): 108–118.
Zhang Z R, Ma R, Hu Y, et al. Evaluation method of intelligence degree for intelligent construction of dams [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(12): 108–118.
- [21] 樊贵超, 钟登华, 任炳昱, 等. 基于分形理论的坝基裂隙岩体注灰量与导水率关系研究 [J]. *水利学报*, 2017, 48(5): 576–587.
Fan G C, Zhong D H, Ren B Y, et al. Research on the relationship between cement take and transmissivity of fractured rocks under dam foundation based on fractal theory [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(5): 576–587.
- [22] 张国新, 刘毅, 刘有志, 等. 高混凝土坝温控防裂研究进展 [J]. *水利学报*, 2018, 49(9): 1068–1078.
Zhang G X, Liu Y, Liu Y Z, et al. Reviews on temperature control and crack prevention of high concrete dam [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(9): 1068–1078.
- [23] 张庆龙, 马睿, 胡昱, 等. 大体积混凝土结构温度应力智能控制理论 [J]. *水力发电学报*, 2021, 40(5): 11–21.
Zhang Q L, Ma R, Hu Y, et al. Intelligent control theory of thermal stress in mass concrete structures [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2021, 40(5): 11–21.
- [24] 王飞, 刘金飞, 尹习双, 等. 高拱坝智能进度仿真理论与关键技术 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(7): 756–767.
Wang F, Liu J F, Yin X S, et al. Intelligent scheduling for high arch dams [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(7): 756–767.
- [25] 刘有志, 张国新, 谭尧升, 等. 仿真大坝建设关键技术与实践应用 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(7): 714–723.
Liu Y Z, Zhang G X, Tan Y S, et al. Key techniques for dam construction simulations [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2021, 61(7): 714–723.
- [26] 张庆龙, 安再展, 刘天云, 等. 土石坝压实的智能控制理论 [J]. *水力发电学报*, 2020, 39(7): 34–40.
Zhang Q L, An Z Z, Liu T Y, et al. Intelligent control theory of earth-rock dam compaction [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2020, 39(7): 34–40.
- [27] 王少伟, 顾冲时, 包腾飞. 基于MSC.Marc的高混凝土坝非线性

- 时效变形量化的程序实现 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(4): 433-444.
- Wang S W, Gu C S, Bao T F. Program implementation of quantifying the nonlinear time-dependent deformation of high concrete dams based on MSC. Marc [J]. Scientia Sinica Technologica, 2019, 49(4): 433-444.
- [28] 时梦楠, 崔博, 王佳俊, 等. 复杂施工条件下无人碾压机群协同全覆盖路径规划研究 [J]. 水利学报, 2020, 51(12): 1544-1557.
- Shi M N, Cui B, Wang J J, et al. Research on cooperative complete coverage path planning for unmanned roller group under complex construction conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(12): 1544-1557.
- [29] 张社荣, 姜佩奇, 吴正桥. 水电工程设计施工一体化精益建造技术研究进展——数字孪生应用模式探索 [J]. 水力发电学报, 2021, 40(1): 1-12.
- Zhang S R, Jiang P Q, Wu Z Q. Advances in research of lean construction technology of integrated design and construction for hydropower projects: Exploration of digital twin application mode [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(1): 1-12.
- [30] Castilho E, Schclar N, Tiago C, et al. FEA model for the simulation of the hydration process and temperature evolution during the concreting of an arch dam [J]. Engineering Structures, 2018, 174: 165-177.
- [31] 陈克霖, 梁庆国, 李海宁, 等. 基于引水隧洞安全和经济施工的支持参数优化分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2021, 32(6): 143-151.
- Chen K L, Liang Q G, Li H N, et al. Optimization of supporting structure parameters based on safe and economic construction of water diversion tunnels [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 32(6): 143-151.
- [32] Hou S K, Liu Y R, Yang Q. Real-time prediction of rock mass classification based on TBM operation big data and stacking technique of ensemble learning [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2022, 14(1): 123-143.
- [33] 王俊英, 陈馈, 张兵. 盾构智能建造新技术与展望 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(17): 1-6.
- Wang J Y, Chen K, Zhang B. New technologies and prospects for shield intelligent construction [J]. Construction Technology, 2023, 52(17): 1-6.
- [34] 刘红波, 张帆, 陈志华, 等. 人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 14-32.
- Liu H B, Zhang F, Chen Z H, et al. Applied research status and prospects of artificial intelligence in civil engineering field [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(1): 14-32.
- [35] 谭尧升, 樊启祥, 汪志林, 等. 白鹤滩特高拱坝智能建造技术与应用实践 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(7): 694-704.
- Tan Y S, Fan Q X, Wang Z L, et al. Intelligent construction methods for the Baihetan super high arch dam [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(7): 694-704.
- [36] 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.
- Fan Q X, Lu Y M, Zhou S W, et al. Research and practice on intelligent construction technology system of Jinsha River hydropower projects [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(3): 294-304.
- [37] 林鹏, 尹剑奇, 向云飞, 等. 高海拔地区水电工程智能建造生命周期碳排放计算方法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2025, 65(7): 1173-1184.
- Lin P, Yin J Q, Xiang Y F, et al. Calculation method of life cycle carbon emissions of intelligent construction for hydropower projects in high-altitude areas [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2025, 65(7): 1173-1184.
- [38] 沈辉, 罗先启, 李野, 等. 乌东德拱坝坝肩三维抗滑稳定分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 1026-1033.
- Shen H, Luo X Q, Li Y, et al. Three-dimensional stability analysis of dam abutment of wudongde arch dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 1026-1033.
- [39] 梁仁强, 翁永红, 关涛, 等. 乌东德高拱坝施工进度仿真分析及其方案优化 [J]. 人民长江, 2014, 45(20): 76-79.
- Liang R Q, Weng Y H, Guan T, et al. Simulation analysis and scheme optimization for construction progress of high arch dam of Wudongde Hydropower Station [J]. Yangtze River, 2014, 45(20): 76-79.
- [40] 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.
- Fan Q X, Zhang C R, Chen W B, et al. Key technologies of intelligent construction of Wudongde and Baihetan super high arch dams [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(2): 22-35.
- [41] 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.
- Zhong D H, Liu D H, Cui B. Real-time monitoring technology and application of rolling quality of high core rockfill dam [J]. Scientia Sinica Technologica, 2011, 41(8): 1027-1034.
- [42] 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.
- Zhong D H, Chang H T, Liu N, et al. Simulation and optimization of high rock-filled dam construction operations [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(7): 863-872.
- [43] 钮新强, 吴永妍, 王磊, 等. 高质量建设国家水网工程的思考与建议 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(6): 108-119.
- Niu X Q, Wu Y Y, Wang L, et al. Thoughts and suggestions on high-quality construction of national water network project [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(6): 108-119.
- [44] 钮新强, 万蕙, 刘琪. 引江补汉工程关键技术挑战 [J]. 中国水利, 2022 (18): 15-17.
- Niu X Q, Wan H, Liu Q. Key technical challenges of the river diversion project from the Yangtze River to the Han River [J]. China Water Resources, 2022 (18): 15-17.
- [45] Sigurdsson S. The nature of scientific knowledge: An interview with Thomas S. Kuhn [J]. Harvard Science Review, 1990(1):18-25.
- [46] 李诗和. 系统哲学与整体性思维方式 [J]. 系统辩证学学报, 2005, 13(2): 25-28.
- Li S H. Systematic philosophy and integrative thinking mode [J]. Journal of Systemic Dialectics, 2005, 13(2): 25-28.
- [47] 宋超, 杨瑶. 库恩范式结构特点的系统哲学解读 [J]. 系统科学学报, 2023, 31(3): 16-22.
- Song C, Yang Y. Interpretation of Kuhn's paradigm structure based on system philosophy [J]. Journal of Systems Science,

- 2023, 31(3): 16–22.
- [48] 陈珂, 丁烈云. 我国智能建造关键领域技术发展的战略思考 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 64–70.
Chen K, Ding L Y. Development of key domain-relevant technologies for smart construction in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4): 64–70.
- [49] Boden M A. The philosophy of artificial intelligence [M]. Oxford: Oxford University Press, 1990.
- [50] Kousta S. Artificial intelligence: Machines that reason [J]. Nature Human Behaviour, 2017, 1: 32.
- [51] Nilsson N J. Principles of artificial intelligence [M]. Amsterdam: Elsevier, 1982.
- [52] Berente N, Gu B, Recker J, et al. Managing artificial intelligence [J]. MIS Quarterly, 2021, 45(3): 1433–1450.
- [53] Mitchell M. Complex systems: Network thinking [J]. Artificial Intelligence, 2006, 170(18): 1194–1212.
- [54] 钟义信. 机制主义: 人工智能的统一理论 [J]. 电子学报, 2006, 34(2): 317–321.
Zhong Y X. Mechanism: A unified theory of AI [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 317–321.
- [55] Li Y B, Li Z, Duan Y C, et al. Physical artificial intelligence (PAI): The next-generation artificial intelligence [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24(8): 1231–1238.
- [56] 孙喜亮, 孙志勇, 薛小龙, 等. 智能建造技术协同创新主体互动关系研究 [J]. 土木工程学报, 2022, 55(11): 108–117.
Sun X L, Sun Z Y, Xue X L, et al. Research on interactive relationships between collaborative innovation stakeholders of intelligent construction technology [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(11): 108–117.
- [57] 袁烽, 胡雨辰. 人机协作与智能建造探索 [J]. 建筑学报, 2017 (5): 24–29.
Yuan F, Hu Y C. Exploring human-machine collaboration and intelligent construction [J]. Architectural Journal, 2017 (5): 24–29.
- [58] Henry W P, Winston P H. Artificial intelligence [M]. Reading: Addison Wesley Longman Publishing Company, 2004.
- [59] Wang L Z, Zhang J, Wang Y Q, et al. Artificial intelligence reshapes river basin governance [J]. Science Bulletin, 2025, 70(10): 1564–1567.
- [60] Hunt E B. Artificial intelligence [M]. New York: Academic Press, 2014.
- [61] 王永庆. 人工智能原理与方法 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
Wang Y Q. Principles and methods of artificial intelligence [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [62] 毛超, 彭窑胭. 智能建造的理论框架与核心逻辑构建 [J]. 工程管理学报, 2020, 34(5): 1–6.
Mao C, Peng Y Y. The theoretical framework and core logic of intelligent construction [J]. Journal of Engineering Management, 2020, 34(5): 1–6.
- [63] May R M. Will a large complex system be stable? [J]. Nature, 1972, 238(5364): 413–414.
- [64] Cao L B. Data science: A comprehensive overview [J]. ACM Computing Surveys, 2018, 50(3): 1–42.
- [65] 王学通, 任柏源, 刘景矿, 等. TOE 视角下建筑业智能建造技术应用的影响因素研究 [J/OL]. 工程管理学报, 2025. [2025-08-17]. <https://link.cnki.net/doi/10.13991/j.cnki.jem.2025.01.003>.
Wang X T, Ren B Y, Liu J K, et al. Influencing factors for smart construction technology application in construction industry: A TOE perspective [J/OL]. Journal of Engineering Management, 2025. [2025-08-17]. <https://link.cnki.net/doi/10.13991/j.cnki.jem.2025.01.003>.
- [66] Tian D, Li M C, Shi J, et al. On-site text classification and knowledge mining for large-scale projects construction by integrated intelligent approach [J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 49: 101355.
- [67] Gupta M, George J F. Toward the development of a big data analytics capability [J]. Information & Management, 2016, 53(8): 1049–1064.
- [68] 钟义信. 知行学引论——信息 知识 智能的统一理论 [J]. 中国工程科学, 2004, 6(6): 1–8.
Zhong Y X. An introduction to cognetics—Unified theory of information, knowledge and intelligence [J]. Strategic Study of CAE, 2004, 6(6): 1–8.
- [69] Tao F, Qi Q L, Liu A, et al. Data-driven smart manufacturing [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48: 157–169.
- [70] Hitchins D K. Systems engineering: A 21st century systems methodology [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- [71] Nielsen C B, Larsen P G, Fitzgerald J, et al. Systems of systems engineering: Basic concepts, model-based techniques, and research directions [J]. ACM Computing Surveys, 2015, 48(2): 1–41.
- [72] Blanchard B S, Fabrycky W J. Systems engineering and analysis [M]. London: Pearson, 1981.
- [73] Kossiakoff A, Sweet W N, Seymour S J, et al. Systems engineering principles and practice [M]. New York: John Wiley & Sons, 2011.
- [74] 贾明, 张德洋, 李政依, 等. 智能建造背景下 BIM 在建筑工程领域的研究进展 [J]. 土木工程, 2025, 14(3): 570–577.
Jia M, Zhang D Y, Li Z Y, et al. Research progress of BIM in the field of architectural engineering under the background of intelligent construction [J]. Hans Journal of Civil Engineering, 2025, 14(3): 570–577.
- [75] Gu N, London K. Understanding and facilitating BIM adoption in the AEC industry [J]. Automation in Construction, 2010, 19(8): 988–999.
- [76] Azhar S, Khalfan M, Maqsood T. Building information modelling (BIM): Now and beyond [J]. Construction Economics and Building, 2015, 12(4): 15–28.
- [77] Bryde D, Broquetas M, Volm J M. The project benefits of building information modelling (BIM) [J]. International Journal of Project Management, 2013, 31(7): 971–980.
- [78] Eastman C, Teicholz P, Sacks R, et al. BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers, and contractors [M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [79] 刘占省, 武乐佳, 刘子圣. 面向全生命期的多维多尺度智能建造体系 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, 56(12):

- 1295–1306.
- Liu Z S, Wu L J, Liu Z S. Multi-dimensional and multi-scale intelligent construction system for entire life cycle [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2023, 56(12): 1295 – 1306.
- [80] 夏侯遐迹, 田丰华, 李启明. 智能建造背景下人机协作安全研究综述 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(6): 1053–1064.
Xiahou X E, Tian F H, Li Q M. Review of research on human-robot collaboration safety in the context of intelligent construction [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(6): 1053–1064.
- [81] 周绪红. 智能建造关键技术研究 [J]. 工程建设标准化, 2023 (9): 55–57.
Zhou X H. Research on key technologies of intelligent construction [J]. Standardization of Engineering Construction, 2023 (9): 55–57.