

崔培,肖尧轩,张振. 数字孪生水利工程评价体系构建及应用[J]. 人民珠江,2025,46(12):99-109.

# 数字孪生水利工程评价体系构建及应用

崔培<sup>1</sup>,肖尧轩<sup>2</sup>,张振<sup>1</sup>

(1. 水利部小浪底水利枢纽管理中心,河南 郑州 450000;2. 水利部珠江水利委员会珠江水利综合技术中心,广东 广州 510611)

**摘要:**为科学评价数字孪生水利工程建设成效,解决当前存在的发展不均衡、技术路线分散等问题,构建一套数字孪生水利工程评价体系。评价体系基于水利部“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”的要求,将数字孪生水利工程建设成熟度由低到高划分为4个层级,依次分别L1级(数字映射,虚实交互)、L2级(智能预测,以虚预实)、L3级(精准调度,以虚优实)、L4级(自主优化,虚实共生)。评价体系包含6个维度,19项指标,67项评价因子,构建一套综合评价模型,通过某典型水利枢纽工程验证,获取具体评价分值,结果表明本评价体系可以从多个维度完成对水利工程的精准评价。评价体系具有动态适应性,可识别建设短板、指导技术发展方向、加强管控精细化、提供考核评优标准。

**关键词:**数字孪生水利工程;评价体系;成熟度分级;多维评价;业务应用

**中图分类号:**TV213.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-9235(2025)12-0099-11

## Construction and Application of Digital Twin Water Conservancy Project Evaluation System

CUI Pei<sup>1</sup>, XIAO Yaoxuan<sup>2</sup>, ZHANG Zhen<sup>1</sup>

(1. Xiaolangdi Water Conservancy Hub Management Center, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450000, China; 2. Pearl River Comprehensive Technology Center, Pearl River Water Resources Commission of the Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China)

**Abstract:** In order to scientifically, systematically, and comprehensively evaluate the effectiveness of digital twin water conservancy engineering construction and solve the problems of uneven development and scattered technical routes in digital twin water conservancy engineering construction, this study constructed a set of digital twin water conservancy engineering evaluation system. This evaluation system is strictly based on the core requirements of China's Ministry of Water Resources, featuring "demand-driven, application-oriented, digital empowerment, and capacity enhancement", to ensure that the system conforms to national policy guidance and actual engineering needs. This study divided the maturity of digital twin water conservancy engineering construction from low to high into four levels, namely L1 level (digital mapping, virtual real interaction: realizing the digital mapping of all elements and processes of the project, and dynamic real-time interaction and synchronization between physical and digital engineering), L2 level (intelligent prediction, virtual real integration: integrating multi-source information from the data base, developing mechanism models and mathematical statistical models, simulating the operation process), L3 level (precise scheduling, virtual real optimization: integrating the data base and models, conducting rehearsals and multi scheme optimization comparisons, warning risks in advance and assisting decision-making), and L4 level (autonomous optimization, virtual real symbiosis: applying artificial intelligence technology to achieve autonomous learning and optimization iteration). This evaluation system consists of six dimensions, 19 indicators, and 67 evaluation factors. The six dimensions are information infrastructure capability, digital twin platform capability, business application

**基金项目:**水利部重大科技项目(SKS-2022130)

**收稿日期:**2025-07-29 **修回日期:**2025-09-09 **网络首发日期:**2025-10-24

**作者简介:**崔培(1979—),男,高级工程师,研究方向为水利信息化。E-mail: cuipei@xiaolangdi.com.cn

capability, network security capability, guarantee capability, and expansion capability. Therefore, a comprehensive evaluation model for digital twin water conservancy projects was constructed based on this and evaluated and verified through a typical water conservancy hub project to obtain specific evaluation scores for different dimensions, indicators, and evaluation factors, forming an evaluation of the digital twin water conservancy project. The final results show that this evaluation system can complete a comprehensive, systematic, and accurate evaluation of the digital twin water conservancy project. At the same time, by providing examples of the same digital twin water conservancy project, it has been verified that this evaluation system has dynamic adaptability and can complete comprehensive evaluations from multiple dimensions, as well as personalized evaluations from a single dimension. At the same time, this evaluation system can identify various construction shortcomings of digital twin water conservancy projects, guide their future technological development directions, strengthen their departmental control and refinement, and provide standards for their assessment and evaluation in different forms.

**Keywords:** digital twin water conservancy project; evaluation system; maturity grading; multi-dimensional evaluation; business application

水利是国民经济的重要基础,发展水利新质生产力是推动高质量发展的关键。数字孪生水利工程通过构建物理实体与虚拟模型的双向映射,实现对工程运行状态的实时监控、问题诊断与优化调度,显著提升了水利工程的管理效能<sup>[1]</sup>。“十四五”期间,三峡、小浪底等标志性水利工程率先建成数字孪生系统,为水利工程现代化管理提供了有力支撑。

当前研究多集中于通用数字孪生成熟度模型及工业领域应用,数字孪生水利工程专业化评价体系尚未健全。《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》明确了“数字映射—智能模拟—前瞻预演—精准决策”的技术路径,但对成熟度分级、量化评价及动态优化缺乏系统指导。部分数字孪生水利工程建设过度关注三维可视化等形态层面,忽视监测感知、专业模型与“四预”(预测、预警、预演、预案)功能等核心能力建设,导致资源配置与技术攻关方向不聚焦。

为推动数字孪生水利工程建设向更高水平发展,亟需建立具有指挥棒作用的数字孪生水利工程评价体系,把控数字孪生水利工程建设发展方向,促进资源优化配置和技术融合创新,为水利行业评价数字孪生水利工程建设成效提供统一标准,促进数字孪生水利工程建设良性健康发展。

近年来,国内外学者和机构在数字孪生能力成熟度模型方面开展了广泛的研究<sup>[2]</sup>。标准制定方

面,中国信息通信研究院、中国电子技术标准化研究院等机构相继发布了数字孪生相关的成熟度模型和测试方法<sup>[3-4]</sup>。模型构建方面,陶飞等<sup>[5]</sup>提出的数字孪生成熟度模型从数据、信息、模型、仿真、优化等多个维度对数字孪生的能力进行了评价;马瑞鑫等<sup>[6]</sup>提出五级数字孪生航道成熟度等级和架构;Hu等<sup>[7]</sup>强调了量化评价的重要性,提出五级数字孪生能力成熟度模型;Liu等<sup>[8]</sup>从技术、数据、应用等多个维度评价数字孪生的成熟度,提出五级数字孪生成熟度模型,这些模型从不同视角出发,提供了全面的评价框架,但缺少针对数字孪生水利工程的成熟度模型。应用领域拓展方面,张竞涛等<sup>[9]</sup>、栾燕等<sup>[10]</sup>、冶运涛等<sup>[11-12]</sup>、Haraguchi等<sup>[13]</sup>分别在城市、工业设备、水利等领域开展了数字孪生能力成熟度模型的相关研究,为不同行业的数字孪生应用提供了针对性的评价方法。

信息化发展评价体系不仅涉及技术领域,更广泛渗透到城市管理、物流、水利等多个行业,为各领域的信息化进程提供了重要的指导和参考<sup>[14-18]</sup>。丁恩杰等<sup>[19]</sup>以数字孪生为核心,通过4个方面的因素评价矿山的信息化发展水平;Li等<sup>[20]</sup>基于熵权法的浅层地热能开发适宜性信息化评价系统;刘木子等<sup>[21]</sup>,通过可视化分析研究当前国内外疾病诊断相关分组支付影响医院信息化建设的研究现状。

水利信息化发展评价体系方面,相关研究者提出了多种创新性方法。如通过整合多种决策支持

工具和水资源管理信息,参与式评价框架、基于分区和系统动力学的可持续性评价框架体系等都有效提高了决策的影响力和相关性<sup>[22]</sup>;针对工业水资源管理,提出了包含环境、经济和社会因素的可持续性评价框架<sup>[23]</sup>;基于决策支持系统的水资源管理框架,整合了多种建模和信息管理功能<sup>[24]</sup>;此外,在一些特定的应用领域,如积雪融化洪水预报系统中,融合信息管理的系统也得到了广泛应用<sup>[25]</sup>。这些研究为水利信息化评价体系的构建提供了多元化的方法和工具,进一步推动了水利信息化的持续发展<sup>[26-27]</sup>。

## 1 总体框架

数字孪生水利工程评价体系由成熟度分级、指标体系和评价模型组成,见图1。其中,成熟度分级遵循国家及网信主管部门数字孪生能力成熟度模型等标准,结合水利业务特点划分为四级。指标体系结合数字孪生水利工程体系框架及顶层设计、相关技术标准等设计6项维度指标。成熟度评价模型主要包括成熟度要求、计算方法和指标权重,通过成熟度评价模型得出综合成熟度指数并据此进行数字孪生水利工程成熟度定级。

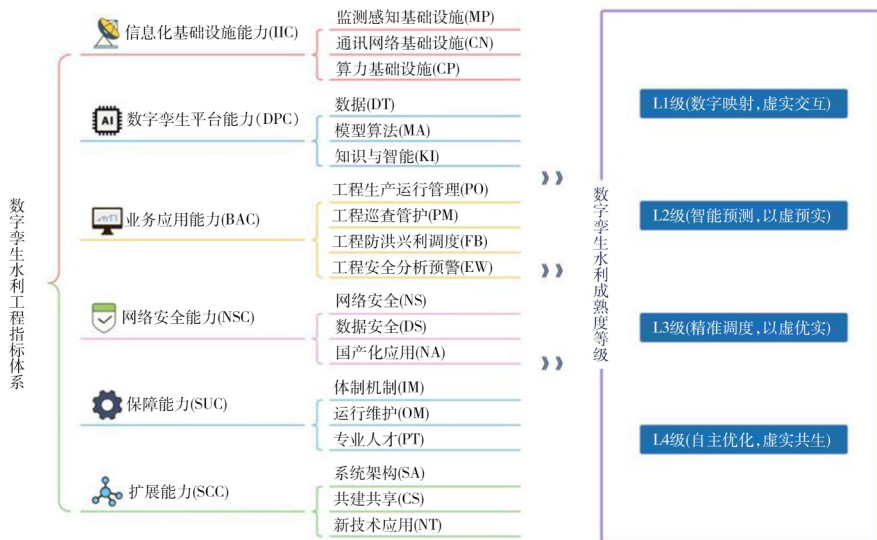


图1 数字孪生水利工程评价体系

Fig. 1 Digital twin water conservancy engineering evaluation system

## 2 成熟度分级及指标体系

### 2.1 成熟度分级

数字孪生水利工程是以物理工程为单元、时空数据为底座、数学模型为核心、水利知识为驱动,对物理工程全要素和建设运行全过程进行数字映射、智能模拟、前瞻预演,实现对物理工程的实时监控、优化调度的基础设施。本文将数字孪生水利工程能力成熟度等划分为4个等级,各层级呈递进关系,基本含义如下。

a)L1级(数字映射,虚实交互)。实现工程全要素、全过程数字化映射及物理与数字工程间动态实

时交互与同步。建成“天空地水工”一体化感知网、主要设施设备监控系统,融合多源异构数据的数据底板、水利工程一张图及云计算平台等信息化基础设施。

b)L2级(智能预测,以虚预实)。融合数据底板多源信息,研发机理模型(如变形、渗流、洪水演进分析等)和数理统计模型(如安全预警、故障诊断等),对运行过程进行模拟。主要特征:建成专业模型算法及支撑智能化模拟的大数据平台等基础设施。

c)L3级(精准调度,以虚优实)。融合数据底板与模型,进行预演和多方案优化比选,提前预警风

险并辅助决策。建立安全评价指标体系及决策会商平台,实现工程安全分级预警、超前精准预报预测,对关键场景进行模拟预演生成决策建议。建成支撑预演的大数据平台、会商环境等设施。

d)L4级(自主优化,虚实共生)。应用人工智能技术,实现自主学习与优化迭代。将AI(Artificial Intelligence)融合应用于监测感知、模型知识和“四预”全过程,实现运行状态智能诊断与参数自调整、

模型算法自优化、智能生成并执行最优调度方案。建成高性能计算、AI平台、智能感知与控制等设施支撑自主学习优化。

## 2.2 评价指标体系

本文结合数字孪生水利工程建设技术导则,提出数字孪生水利工程建设评价指标体系。见表1,评价指标体系包含6个评价维度、19个评价指标和67个评价因子。

表1 指标体系结构

Tab. 1 Indicator system structure

维度	指标	评价因子
信息化基础设施能力(IIC)	监测感知基础设施(MP)	监测类型、范围和频次;监测设备极端工况保障能力;监测数据汇聚平台能力
	通信网络基础设施(CN)	网络互联互通;网络分区隔离;网络通道带宽
	算力基础设施(CP)	通算能力和存储能力;超算和智算能力;容灾备份能力;会商指挥环境
	数据底板(DT)	数据汇聚治理;数据建模上图;数据质量管理
数字孪生平台能力(DPC)	模型算法(MA)	建立机理模型;建立数理统计模型;建立混合模型;建设智能识别模型;建设模拟仿真引擎
	知识与人工智能大模型(KI)	预报调度方案库;历史场景库;专家经验库;业务规则库;工程安全知识库;知识引擎
	生产运行管理(PO)	重要设施设备远程监控;重要设施设备状态监测
业务应用能力(BAC)	巡查管护(PM)	库区巡查管理;设施设备巡检;安全保卫管理
	防洪兴利调度(FB)	业务功能完备;“四预”能力提升;系统应用效能
	工程安全分析预警(EW)	业务功能完备;“四预”能力提升;系统应用效能
网络安全能力(NSC)	网络安全(NS)	网络安全管理体系;网络安全技术体系;网络安全运营体系;网络攻防演练
	数据安全(DS)	数据分类分级;传输安全;存储安全
	国产化应用(NA)	国产硬件改造;国产软件改造;业务系统改造
保障能力(SUC)	体制机制(IM)	组织机构;管理制度;资金保障
	运行维护(OM)	运维责任体制;运维技术手段;运维人员情况
	专业人才(PT)	人员配置;人员培训;人员融合
扩展能力(SCC)	系统架构(SA)	系统可扩展性;系统架构一致性;安全防护一致性
	共建共享(CS)	数据共享;接口规范;共享机制;资源利用
	新技术应用(NT)	新型感知设备;新型通讯装备;新型智能技术

## 3 评价模型

本评价模型具备鲜明的水利特色。其评价指标全部基于数字孪生水利工程相关的技术标准精心抽取,确保了评价的科学性和权威性。成熟度等

级的划分逐级递增,逐级支撑,为数字孪生水利工程的发展指明了远景方向和建设路径;具备出色的整体性和逻辑完备性。体系不仅包含完善的成熟度等级和指标体系,还配备了适应性极强的评价方

法,兼具技术性和操作性。这一整体性的评价体系能够为水利工程提供全面的支撑,确保数字孪生水利工程建设各个环节都能得到科学、系统的评价和指导;具备强指导性的评价结果。评价结果不仅提供了成熟度等级,还能对数字孪生水利工程建设情况进行全面的诊断。通过分析优势环节和薄弱

环节,其为下一步的优化迭代提供了参考,便于资源的整合、难点问题的攻坚以及技术创新。

### 3.1 数字孪生水利工程成熟度要求

根据数字孪生水利工程建设情况,本文提出6个评价维度和19项评价指标的数字孪生水利工程成熟度4个等级具体要求,见表2。

表2 成熟度等级要求

Tab. 2 Maturity level requirements

评价维度	评价指标	L1级(虚实交互)	L2级(智能预测)	L3级(精准调度)	L4级(自主优化)
信息化基础设施能力 (IIC)	监测感知基础设施 (MP)	具备完备的监测设施,可实现全面的监测;监测设备具备一定冗余保障能力;建成监测数据汇聚平台	具备完备的监测设施,可实现全要素的动态自动化监测;监测设备具有多通道保障能力;建成统一的监测数据汇聚平台	具备完备的监测设施,可实现全天候、全要素的自动化监测;监测设备具备极端工况保障能力;建成统一的监测数据汇聚平台	具备完备的监测设施,可实现全天候、全要素的动态自动化监测;监测设备具备极端工况保障能力;建成统一的监测数据汇聚平台
	通讯网络基础设施 (CN)	网络覆盖主要区域,工控网与管理网独立组网逻辑隔离,网络带宽满足通讯要求	网络覆盖全部区域,工控网与管理网独立组网物理隔离,网络带宽较高,满足通讯要求	网络覆盖全部区域,实现双通道全连接网络互联互通;工控网与管理网独立组网物理隔离;网络带宽充足,满足通讯要求	网络覆盖全部区域,实现双通道全连接网络互联互通;工控网与管理网独立组网物理隔离;网络带宽充足,满足高峰并发通讯要求
	算力基础设施 (CP)	通算能力和存储能力满足数字映射要求,建有本地灾备中心	通算能力、超算能力和存储能力满足智能模拟要求,建有本地灾备中心,建有会商指挥中心	通算能力、超算能力、智算能力和存储能力满足实时计算要求;建有异地灾备中心;建有会商指挥中心	通算能力、超算能力、智算能力和存储能力满足实时计算和大模型训练要求;建有异地灾备中心;建有会商指挥中心
数字孪生平台能力 (DPC)	数据 (DT)	建立数据引擎进行数据统一汇聚;开展数据质量管理;建成主要业务二维一张图	建立统一数据引擎进行数据统一汇聚;数据治理比较成熟,数据质量较高;主要业务数据模型建立,二三维一张图涵盖大部分业务	建立统一数据引擎进行数据统一汇聚;数据治理成熟,数据质量高;数据模型体系较完整,二三维一张图涵盖所有业务	建立统一数据引擎进行数据统一汇聚;数据治理非常成熟,数据质量非常高;数据模型体系非常完整,二三维一张图涵盖所有业务
	模型算法 (MA)	开展模型算法研究,有一定成果	主要业务建立模型算法建立,支持预报预测;建成二维模拟仿真引擎	建立模型平台,大部分业务具有模型算法并经过运行验证,支持在线计算,不断优化迭代;建成二三维模拟仿真引擎	建立模型平台,各类模型算法齐备并经过多年运行验证,所有模型均标准化封装在线计算,支持模型自动优化迭代;建成高性能、高保真模拟仿真引擎
	知识与人工智能大模型 (KI)	不做要求	建立初步的水利知识库,预报调度方案、工程安全知识和主要业务规则	建立水利知识库,预报调度方案、工程安全知识和各类业务规则较齐备;建成智能化知识引擎	建立完善的水利知识库,预报调度方案、工程安全知识和各类业务规则齐备;建成智能化知识引擎,具备大模型智能化业务支撑能力

(续表2)

评价维度	评价指标	L1级(虚实交互)	L2级(智能预测)	L3级(精准调度)	L4级(自主优化)
	生产运行管理(PO)	建成主要业务的工程自动化监控应用和重要设备状态监测应用,实现远程自动化监控	建成涵盖全业务的工程自动化监控应用和重要设备状态监测应用,实现远程自动化监控、状态监测和故障风险预警	建成涵盖全业务的工程自动化监控应用和重要设备状态监测应用,实现远程自动化监控、状态监测和故障风险预警	建成涵盖全业务的工程自动化监控应用和重要设备状态监测应用,实现远程自动化监控、状态监测和故障风险预警
	巡查管护(PM)	建成库区巡查、设施设备巡检和安全保卫管理业务应用,实现“四乱”整治、设施设备隐患缺陷、安全保卫风险快速发现处置闭环管理	建成库区巡查、设施设备巡检和安全保卫管理业务应用,实现“四乱”整治、设施设备隐患缺陷、安全保卫风险快速发现处置闭环管理	建成库区巡查、设施设备巡检和安全保卫管理业务应用,实现“四乱”整治、设施设备隐患缺陷、安全保卫风险快速发现处置闭环管理	建成库区巡查、设施设备巡检和安全保卫管理业务应用,实现“四乱”整治、设施设备隐患缺陷、安全保卫风险快速发现处置闭环管理
业务应用能力(BAC)	防洪兴利调度(FB)	建成防洪、供水、发电、航运等基础应用,具备报警能力,业务应用稳定高效,用户应用较充分,不断进行迭代优化	建成涵盖防洪、供水、生态、发电、航运的防洪兴利调度应用,实现水库库容管理,“四预”功能比较完备、相关指标良好,实现跨部门协同,业务应用稳定高效快捷、用户应用比较充分,不断进行迭代优化	建成涵盖防洪、供水、生态、发电、航运多目标的防洪兴利调度应用,实现水库库容动态管理,“四预”功能完备、相关指标优秀,实现跨部门协同一体化应用,业务应用稳定高效快捷、用户应用充分,不断进行迭代优化	建成涵盖防洪、供水、生态、发电、航运多目标的防洪兴利调度应用,实现水库库容动态管理,“四预”功能非常完备、相关指标非常优秀,实现跨部门协同一体化应用,业务应用非常稳定高效快捷、用户应用非常充分,自主进行迭代优化
	工程安全分析预警(EW)	建立重要水工建筑物、地质灾害、金属结构和启闭设备的安全监测与风险预警应用,业务应用稳定高效,用户应用较充分,不断进行迭代优化	建立重要水工建筑物、地质灾害的安全预警指标体系,建成安全监测与风险预警应用,实现险情、安全隐患预警,工程安全“四预”功能比较完备、相关指标良好,实现跨部门协同,业务应用稳定高效快捷、用户应用比较充分,不断进行迭代优化	建立重要水工建筑物、地质灾害、金属结构和启闭设备的安全预警指标体系,建成安全监测与风险预警应用,实现险情、安全隐患进行分级预警,工程安全“四预”功能完备、相关指标优秀,实现跨部门协同一体化应用,业务应用稳定高效快捷、用户应用充分,不断进行迭代优化	建立重要水工建筑物、地质灾害、金属结构和启闭设备的安全预警指标体系,建成安全监测与风险预警应用,实现险情、安全隐患进行分级预警,工程安全“四预”功能完备、相关指标优秀,实现跨部门协同一体化应用,业务应用稳定高效快捷、用户应用充分,自主进行迭代优化
网络安全能力(NSC)	网络安全(NS)	建立网络责任体系,开展网络安全防护	建立网络责任体系、安全运营体系,系统通过等级保护,网络攻防演练表现良好	建立网络责任体系、安全运营体系,系统通过等级保护,网络攻防演练表现较好	建立完备的网络责任体系、安全运营体系,系统等级保护成绩优异,网络攻防演练表现优秀
	数据安全(DS)	完成数据分类分级,并制定不同保护策略	建立重要数据保护措施,保障重要数据安全	建立数据保护体系,通过密码评测	建立完备的数据保护体系,密码评测成绩优异
	国产化应用(NA)	国产芯片的PC及服务器、办公系统实现国产化替代	经营管理系统实现国产化替代,主要包括CRM、ERP等	生产运营系统实现国产化替代,主要包括生产管理系统、工控系统等	全面实现国产化替代
保障能力(SUC)	体制机制(IM)	有信息化组织机构和管理制度	有专门信息化组织机构和管理制度,信息化建设和运维有资金保障	有比较完善的信息化组织机构和管理制度,信息化建设和运维资金保障比较充分	有完善的信息化组织机构和管理制度,信息化建设和运维资金保障充分
	运行维护(OM)	有专业的运维负责部门和人员	建立运行维护体制机制,有专业的运维负责部门和人员	建立比较完备运行维护体制机制,建立运行维护监测管理平台,高素质运维人员保障比较充分	建立完备运行维护体制机制,建立运行维护监测管理平台,高素质运维人员保障充分

(续表2)

评价维度	评价指标	L1级(虚实交互)	L2级(智能预测)	L3级(精准调度)	L4级(自主优化)
扩展能力 (SCC)	专业人才 (PT)	具备通讯网络、数据业务应用等专业人才队伍	具备通讯网络、数据、模型、业务应用等专业人才队伍,人员培训比较好,复合型人才培养有成效	具备比较高素质通讯网络、数据、模型、业务应用等专业人才队伍,人员培训比较充分,复合型人才培养成效显著	具备高素质通讯网络、数据、模型、人工智能、业务应用等专业人才队伍,人员培训充分,复合型人才培养成效显著
	系统架构 (SA)	各业务应用统一应用架构、数据架构和开发架构	系统各类功能模块化,各业务应用统一应用架构、数据架构和开发架构,建成比较统一的网络安全防护体系	系统各类功能微服务化,各业务应用统一应用架构、数据架构和开发架构,建成统一的网络安全防护体系	系统各类功能微服务化,融入人工智能平台,各业务应用统一应用架构、数据架构和开发架构,建成统一的网络安全防护体系
	共建共享 (CS)	开展数据、模型、知识共享;利旧现有信息化资源	具备数据、信息共享机制;按标准规范要求开发数据接口,开展数据、模型、知识共享;利旧现有信息化资源	具备完备的数据、信息共享机制;按标准规范要求开发数据接口,数据、模型、知识比较充分共享;较充分利旧现有信息化资源	具备非常完备的数据、信息共享机制;按标准规范要求开发数据接口,充分开展数据、模型、知识共享;充分利旧现有信息化资源
	新技术应用(NT)	不做要求	应用新型感知设备、通讯装备	较多应用新型感知设备、通讯装备,开展人工智能新技术应用	大量应用新型感知设备、通讯装备,人工智能新技术充分应用

### 3.2 计算方法与指标权重

根据评价指标成熟度等级要求,逐项确定评价对象各维度下各评价指标的成熟度等级,单项评价指标所能支撑的数字孪生水利工程成熟度的最高等级,即为该项评价指标的得分,维度得分依据各构成评价指标的加权值确定,等级总体得分依据各维度的加权值确定。具体见式(1):

$$S_x = \sum(X_i \cdot \omega_i), i = 1, 2, 3 \dots n, X \in \{IIC, DPC, BAC, NSC, SUC, SCC\} \quad (1)$$

式中: $S_x$ 为某维度成熟度得分; $X_i$ 为该维度下某评价指标得分; $i$ 为该维度下评价指标个数; $X$ 包括信息化基础设施能力(IIC)、数字孪生平台能力(DPC)、业务应用能力(BAC)、网络安全能力(NSC)、保障能力(SUC)、扩展能力(SCC)共6个维度; $\omega_i$ 为该评价指标所占权重。通过式(1),每次可计算出单一维度的分值。

$$S = \sum(S_x \cdot \omega'_j), j = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

式中: $S$ 为数字孪生水利工程成熟度; $j$ 为参与评价

维度个数; $S_x$ 为某维度成熟度得分; $\omega'_j$ 为该维度所占权重。通过式(2),可计算出总分值。

该评价计算方法也适用于选取部分指标进行的成熟度评价,将根据上述计算方法,对选取的部分指标进行加权平均确定。如只评价防洪兴利调度(FB)、工程安全分析预警(EW)2个业务应用,也适用于本成熟度模型和评价方法。

图2和表3中,根据评价维度、评价指标在成熟度等级中的重要程度,确定两者权重,其中所有评价维度权重之和为1,单个维度下所有评价指标权重之和为1,评价指标绝对权重为评价指标权重与对应评价维度权重的乘积,表示该指标在所有指标中的重要程度,评价指标绝对权重之和为1。本文权重根据实际指标的重要性设置,不同的数字孪生水利工程可根据实际情况进行调整。

### 4 评价示例

以某大型水利枢纽数字孪生水利工程为例进

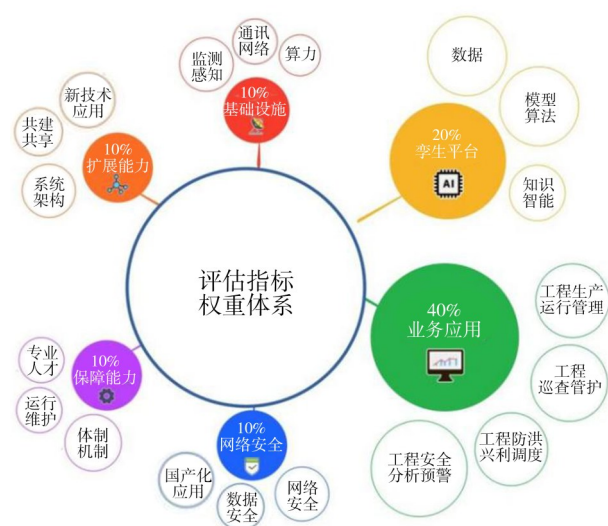


图2 评价指标权重体系

Fig. 2 Evaluation index weight system

表3 评价指标权重体系

Tab. 3 Evaluation index weight system

评价维度	评价指标	维度权重	指标权重	绝对权重
信息化基础设施能力(IIC)	监测感知基础设施(MP)	0.1	0.4	0.04
	通讯网络基础设施(CN)		0.3	0.03
	算力基础设施(CP)		0.3	0.03
数字孪生平台能力(DPC)	数据(DT)	0.2	0.4	0.08
	模型算法(MA)		0.4	0.08
	知识与智能(KI)		0.2	0.04
业务应用能力(BAC)	生产运行管理(PO)	0.4	0.2	0.08
	巡查管护(PM)		0.2	0.08
	防洪兴利调度(FB)		0.4	0.16
网络安全能力(NSC)	工程安全分析预警(EW)	0.1	0.2	0.08
	网络安全(NS)		0.5	0.05
	数据安全(DS)		0.3	0.03
保障能力(SUC)	国产化应用(NA)	0.1	0.2	0.02
	体制机制(IM)		0.4	0.04
	运行维护(OM)		0.3	0.03
扩展能力(SCC)	专业人才(PT)	0.1	0.3	0.03
	系统架构(SA)		0.4	0.04
	共建共享(CS)		0.3	0.03
	新技术应用(NT)		0.3	0.03

行评价打分,数字孪生水利工程建设情况如下。

a)信息化基础设施能力。对原设计的3 201支仪器进行补充完善和自动化升级改造,目前2 780支仪器能正常观测,自动化率从49%提升到84%;对255个关键部位测点建立监控指标体系;投入使用机器人、无人机、无人船、多波束水下扫描等新技术装备。监测网与工控网物理隔离,双通道覆盖全域,带宽满足高峰并发要求。建成数据中心,部署80台服务器主机集群,48块高性能GPU算力卡。MP、CN、CP达到L3级标准。

b)数字孪生平台能力。完成大坝及泄洪建筑物L3级BIM建模,枢纽区22 km<sup>2</sup>的L3级、库区约1 000 km<sup>2</sup>的L2级数据采集和处理,构建了多源异构空间数据和业务数据融合的数据底板。研发了基于河道演进的来水预报模型、融合溯源冲刷和异重流计算的水库冲淤模型、具有补偿反算能力的水库防洪调度模型、基于有限元和数理统计的大坝渗流分析模型。初步研发了遥感智能分析模型、厂房积水和水尺读取等视频AI识别模型。搭建了预报调度方案库、工程安全知识库、业务规则库、历史场景库等知识框架,完成水工建筑物知识图谱、100多个预案及规程的知识生产。构建了涵盖主数据、元数据、数据质量、数据安全等内容的数据治理体系。DT达到L3级标准,MA达到部分L3级标准,KI达到L2级标准。

c)业务能力。建成数字孪生集控中心,汇集水情调度、闸门控制、发电运行、生产保障等核心业务,集中监控并协同联动枢纽安全运行。建成防汛调度和工程安全“四预”专题应用场景,实现水库防汛调度方案模拟推演、水库冲淤分析和模拟展示、大坝安全性分析和监测数据场景模拟等功能,并在防汛实战中开展模型训练和实战检验,不断推动建设成果的应用和优化迭代。建成防汛调度“四预”应用,实现方案模拟推演、冲淤分析展示;模型在防汛实战中训练检验并迭代优化。建成工程安全“四预”应用,实现大坝安全分析、监测数据场景模拟,并对255个测点形成全自动监控巡查体系。PO、PM达到L3级标准,FB完成部分L3级标准,EW

达到 L2 级标准。

d)网络安全能力。优化、提升现有网络安全体系,强化边界防护和纵深防御,开展网络安全态势感知平台建设,进一步提升网络安全和数据安全保障能力。通过等保、密码测评,攻防演练表现良好。NS 达到 L4 级标准,DS、NA 达到 L2 级标准。

e)保障能力。该工程 2022 年 3 月启动《数字孪生某工程工程建设先行先试实施方案》,2022 年 10 月完成《某数字孪生水利工程项目初步设计报告》,各项工作按计划推进并达成预期目标。该数字孪生水利工程建设在先行先试中期评价中获得优秀

成绩,并被评为优秀应用案例。IM、OM、PT 达到 L3 级标准。

f)扩展能力。平台框架支持数据、模型、知识共享;按标准开发接口;利旧现有资源;应用微服务、AI 等技术。应用机器人、无人机、无人船、多波束扫描、视频 AI 识别等新型感知和智能技术。SA、CS、NT 达到 L3 级标准。

表 4 中,为该示例的各项指标评价分数,根据章节 3.2 中数字孪生水利工程成熟度计算方法,满分 4 分,总体得分 2.76 分,成熟度接近 L3 级。

表 4 评价指标得分值

Tab. 4 Score of evaluation index

评价维度	评价指标	维度权重	指标权重	指标得分	维度得分	总体得分
信息化基础设施能力(IIC)	监测感知基础设施(MP)	0.1	0.4	3.0	3.0	
	通讯网络基础设施(CN)		0.3	3.0		
	算力基础设施(CP)		0.3	3.0		
数字孪生平台能力(DPC)	数据(DT)	0.2	0.4	3.0	2.6	
	模型算法(MA)		0.4	2.5		
	知识与智能(KI)		0.2	2.0		
业务应用能力(BAC)	生产运行管理(PO)	0.4	0.2	3.0	2.6	
	巡查管护(PM)		0.2	3.0		
	防洪兴利调度(FB)		0.4	2.5		
网络安全能力(NSC)	工程安全分析预警(EW)	0.1	0.2	2.0	3.0	2.76
	网络安全(NS)		0.5	4.0		
	数据安全(DS)		0.3	2.0		
	国产化应用(NA)		0.2	2.0		
保障能力(SUC)	体制机制(IM)	0.1	0.4	3.0	3.0	
	运行维护(OM)		0.3	3.0		
	专业人才(PT)		0.3	3.0		
扩展能力(SCC)	系统架构(SA)	0.1	0.4	3.0	3.0	
	共建共享(CS)		0.3	3.0		
	新技术应用(NT)		0.3	3.0		

通过本文提出的评价模型,能够较为清晰地评价出目标工程的各项分数及总分。图 3 中,该大型水利枢纽数字孪生水利工程成熟度在信息化基础

设施方面得分最高,在数字孪生平台、业务应用方面得分偏低,后者 2 个维度分别在 MA、KI 和 FB、EW 的指标建设方面相对落后,亟需提升。

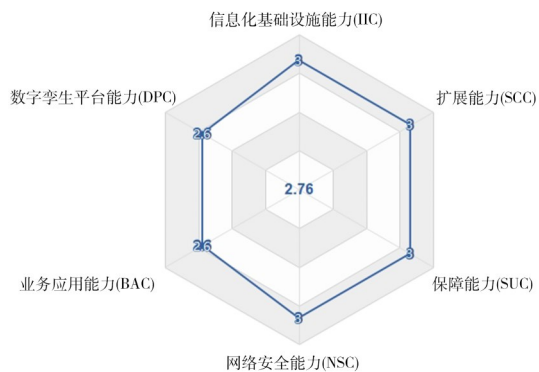


图3 某大型水利枢纽数字孪生水利工程评价指标得分

Fig. 3 Evaluation index score of digital twin water conservancy engineering of a large water control project

本评价体系具备广泛的适应性和强大的动态适应能力。能够适用于多种对象和全生命周期的评价,该体系涵盖了从规划设计、建设实施到应用运营的各个阶段,为数字孪生水利工程建设的全程评价提供了科学依据;相关的指标和权重可以根据数字孪生水利工程发展的不同阶段、重点推进任务目标、生命周期阶段等进行动态调整,确保评价结果的准确性和时效性。

这里仍以上文某大型水利枢纽数字孪生水利工程数据举例。假设某类水利工程只注重评价信息化基础设施能力和数字孪生平台能力,二者权重经评价组商议确定为0.6和0.4,则该示例水利工程得分为2.64分。此类水利工程依旧可依据本评价体系进行评价,并依据评价指标调整工作与计划。

## 5 结论与展望

本文聚焦数字孪生水利工程建设评价,系统构建了一套兼具广泛适用性、动态适应性和实践指导性的评价体系模型,该体系模型覆盖数字孪生水利工程建设各项功能指标。

本文首次提出基于“虚实交互-智能预测-精准调度-自主优化”演进路径的总体架构,并针对数字孪生水利工程的不同需求与目标,分别制定了差异化的成熟度分级标准,为评价提供了统一基线。本评价体系同时具备鲜明的水利特色、出色的整体性和逻辑完备性。研究成果首次系统提出了适用于中国数字孪生水利工程建设的评价标准、指标和方

法框架,为后续国家相关标准规范制定奠定了理论基础,对引导和规范建设实践、识别短板、明确方向、驱动持续优化升级具有重要意义。

未来需在现有框架基础上深化具体概念与指标细节研究,并紧密结合人工智能等前沿技术发展,持续优化评价体系。同时,不仅需关注技术能力的持续提升,还需同步重视建设运营的体制机制、法规政策、人才队伍与资金保障等关键支撑条件,确保数字孪生水利工程建设健康纵深发展,最终赋能水利工程各项能力的全面提升。

## 参考文献:

- [1] 王留杰,郭恒睿,何虹,等. 边缘计算在数字孪生北江建设中的研究和应用[J]. 人民珠江, 2025, 46(S1): 13-15.
- [2] 蒋鑫,周轩. 数字化成熟度模型:研究评述与展望[J]. 外国经济与管理, 2024, 46(1): 77-91.
- [3] 中国信息通信研究院, 中国互联网协会, 中国通信标准化协会. 数字孪生城市白皮书(2023年)[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2023.
- [4] 信息技术服务 数字化转型 成熟度模型与评估: GB/T 43439—2023[S].
- [5] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1267-1281.
- [6] 马瑞鑫, 薛礼, 问皓, 等. 数字孪生航道建设及航道智慧化指标体系研究[J]. 水道港口, 2024, 45(4): 612-620.
- [7] HU W F, FANG J H, ZHANG T Z, et al. A new quantitative digital twin maturity model for high-end equipment [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 66: 248-259.
- [8] LIU Y, FENG J, LU J M, et al. A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model [J]. Advanced Engineering Informatics, 2024. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102454.
- [9] 张竞涛, 闫嘉豪, 陈才, 等. 数字孪生城市成熟度模型和评估方法研究[J]. 信息通信技术与政策, 2023, 49(8): 8-17.
- [10] 栾燕, 段翔宇, 孟祥曦, 等. 工业设备数字孪生就绪度和成熟度评估指标体系[J]. 制造业自动化, 2024, 46(1): 214-220.
- [11] 冶涛涛, 蒋云钟, 梁犁丽, 等. 数字孪生流域: 未来流域治理管理的新基建新范式[J]. 水科学进展, 2022, 33(5): 683-704.
- [12] 冶涛涛, 蒋云钟, 寇怀忠, 等. 数字孪生流域的基础模型、演化路径与评判准则[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2023, 44(4): 27-38, 46.
- [13] HARAGUCHI M, FUNAHASHI T, BILJECKI F. Assessing

- governance implications of city digital twin technology: A maturity model approach [J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2024. DOI:10.1016/j.techfore.2024.123409.
- [14] 艾萍,方彦舒,吴军澜,魏延玲. 一种水利信息化发展程度评估指标体系的探讨[J]. *水利信息化*,2012(5):16-19.
- [15] 邱相彬,李芮,单诚,童兆平. 区域基础教育信息化发展评价指标体系设计与应用研究[J]. *湖州师范学院学报*,2023,45(6):110-116.
- [16] 王卫星,李斌. 省域高校信息化发展水平及其影响因素的实证分析[J]. *教育与教学研究*,2020,34(12):79-90.
- [17] 任鹏,丁然,姜彩良. 基于大数据的物流信息化发展影响评估体系[J]. *物流技术*,2015,34(21):197-200.
- [18] HEIDARI A, NAVIMPOUR N J, UNAL M. Applications of ML/DL in the management of smart cities and societies based on new trends in information technologies: A systematic literature review [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104089.
- [19] 丁恩杰,俞啸,夏冰,等. 矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J]. *煤炭学报*,2022,47(1):564-578.
- [20] LI Z, LUO Z J, WANG Y, et al. Suitability evaluation system for the shallow geothermal energy implementation in region by entropy weight method and TOPSIS method [J]. *Renewable Energy*, 2022, 184: 564-576.
- [21] 刘木子,王晨,张艳丽,等. DRG 支付对医院信息化发展的要求与对策[J]. *中国医院*,2024,28(1):28-32.
- [22] CROKE B F W, TICEHURST J L, LETCHER R A, et al. Integrated assessment of water resources: Australian experiences [J]. *Water Resources Management*, 2007, 21(1): 351-373.
- [23] SMITH R, KASPRZYK J, DILLING L. Participatory framework for assessment and improvement of tools (ParFAIT): increasing the impact and relevance of water management decision support research [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, 95: 432-446.
- [24] ABDI-DEHKORDI M, BOZORG-HADDAD O, SALAVITABAR A, GOHARIAN E. Developing a sustainability assessment framework for integrated management of water resources systems using distributed zoning and system dynamics approaches [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(11): 16246-16282.
- [25] FANG S F, XU L D, PEI H, et al. An integrated approach to snowmelt flood forecasting in water resource management [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(1): 548-558.
- [26] 蔡阳. 数字孪生水利建设中应把握的重点和难点[J]. *水利信息化*,2023(3):1-7.
- [27] 蒋国栋,邓大建,李莉,等. 数字孪生技术在水利工程中的应用[J]. *电子技术*,2024,53(9):96-97.

(责任编辑:李泽华)