

水利工程智能建造系统与数字孪生的交互和共生

廖悦, 文伏灵, 孙周辉

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 数字化技术的应用为水利行业带来了革命性的变革, 随着数字孪生技术和智能建造系统的发展, 水利工程领域也面临着前所未有的机遇和挑战。数字孪生技术是一种将物理系统的数字模型与实际系统的运行数据相结合的方法, 可以提供更准确的预测、监测和决策支持。智能建造系统借助人工智能、物联网和自动化技术提高了施工效率和质量。回顾了水利工程领域数字孪生技术的应用情况以及智能建造系统在项目实施和管理中的机遇与挑战; 探讨了数字孪生和智能建造系统之间的交互关系以及它们如何共同推动水利工程的创新和发展。阐述了其在提高工程效率、减少成本、降低风险和实现可持续发展方面具有的潜在贡献。

关键词: 水利工程; 数字化转型; 智能建造; 数字孪生; 数字模型; 工程协同

中图分类号: [TV91]; TV76; TV1

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2024)02-0069-03

Interaction and Symbiosis of Intelligent Construction Systems and Digital Twin Technology in Water Conservancy Projects

LIAO Yue, WEN Fuling, SUN Zhouhui

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu Sichuan 610072)

Abstract: The application of digital technology has brought revolutionary changes to the water conservancy industry. With the development of digital twin technology and intelligent construction systems, the field of water conservancy faces unprecedented opportunities and challenges. Digital twin technology is a method that combines the digital model of a physical system with the operational data of the actual system, providing more accurate predictions, monitoring, and decision support. Intelligent construction systems improve construction efficiency and quality with the help of artificial intelligence, Internet of Things, and automation technologies. This essay explores the interaction and symbiotic relationship between intelligent construction systems and digital twin technology in the field of water conservancy projects, as well as their potential contributions to improving project efficiency, reducing costs, mitigating risks, and achieving sustainable development.

Keywords: Water conservancy project; Digital transformation; Intelligent construction; Digital twin; Digital model; Engineering collaboration

1 水利工程的数字化转型

数字化转型在水利工程领域的应用已经引发了革命性的变革, 其中数字孪生和智能建造平台是其关键元素。数字化转型的核心概念是将水利工程系统引入虚拟世界, 使其在数字空间中得以映射和同步呈现。

数字孪生是数字化转型的核心概念之一, 其建立在数据和模型的基础上。数字孪生的理念是通过充分利用物理模型、传感器更新、历史运行数据等多源数据将实体水利工程系统在虚拟空间中呈现为精确的数字映像。水利工程数字化转型的成功离不开现代技术的支持, 如物联网、云计算和 5G 技术, 这些技术的发展使水利工程能够更有效

收稿日期: 2023-12-20

地收集、传输和处理各类数据。物联网传感器的广泛部署可以实时监测土地利用、气象条件等因素,为数字孪生提供了数据的不断更新和丰富性。云计算技术允许水利工程项目存储和处理大规模数据,以进行实时模拟和决策支持。

2 智能建造系统在水利工程中的应用

随着科学技术的迅猛发展,智能建造系统在水利工程领域的应用逐渐成为推动创新和提高效率的关键因素。其中白鹤滩水电站特高拱坝的智能建造为水电工程建设树立了崭新的典范。该项目以全面感知、真实分析、实时控制的闭环控制为理论基石,构建了针对关键施工工艺和业务流程的智能建造技术系统,依赖大数据和人工智能的支持,成功地实现了对整个建造过程的高效管理。项目团队精心研发并推出了浇筑一条龙监控、平仓振捣监控、智能通水、智能喷雾、智能灌浆等一系列核心智能筑坝成套新技术,这些创新技术的应用使整个建造过程更为智能、高效和安全。白鹤滩水电站特高拱坝的智能建造实践不仅成为水利工程领域的成功典范,更为水利工程建设提供了实现数字化转型的可行路径^[1]。

樊启祥等人通过在溪洛渡项目中的重大工程实践,成功借助闭环控制理念与智能建造理论为大坝建设领域的技术发展开辟了新的篇章。他们采用互联网、物联网、数据库、传感器等先进技术,构建了建设过程实时信息数据库,覆盖了施工的方方面面;专注于生产、运输、振捣、通水、灌浆等关键环节的研发,成功推出了具备监控、预测、预警和控制功能的关键系统。此外,他们提出了“一个中心、两个支撑、三个支柱”的智能建造管理模式,并成功建成了大坝协同业务工作平台。这一努力最终使得首座300 m级无缝特高拱坝的建成成为大坝智能建造技术发展的重要里程碑^[2]。

3 数字孪生技术及其应用

随着数字化技术的飞速发展,数字孪生作为一种通过数字化手段构建与现实世界一一对应的技术不仅包括数字物理模型的构建,还涉及到传感器协议数据传输、运行历史存储等多个方面,是一个集成多学科、多物理变量、多维度测量、事件概率统计的仿真过程^[3]。举例来说,在水利工程建设领域,数字孪生技术的应用使得整个建造过

程更加智能、高效和安全。其建模与算法在构建数字孪生水利工程中扮演着至关重要的角色,它们是捕捉工程演变规律数学表达的关键组成部分。在数字孪生的框架下,模型承担了理解和模拟水利工程复杂性的任务,为实现全链条的工程安全性能分析、预测、评价以及预警提供了坚实的支持^[4]。通过建设工程安全模型,我们能够更加方便地进行模型的选择和应用。这一模型库的构建包括:数理统计模型、机理分析模型和混合模型。数理统计模型通过对历史数据进行分析,能够捕捉到水利工程演变的统计规律;机理分析模型基于对水利工程内在机理的深入理解,提供了更为准确和可解释的数学表达;而混合模型则是将数理统计模型与机理分析模型相结合以克服各自的局限性,达到更全面、可靠的模拟效果。

4 智能建造系统与数字孪生的交互

在当今水利行业,智能建造系统和数字孪生技术作为先进的数字化工具,正逐渐成为工程管理和设计中的关键要素。它们之间的协同作用为建筑过程带来了新的思路和可能,极大地提升了工程的效率、可视化和可持续性。

在数字孪生和智能建造平台应用过程中,数据的收集、共享和分析被认为是其基础且至关重要的环节。它不仅仅是简单地汇集了各业务系统的数据,更是建立在相关标准、规范、技术和基础设施之上的完整的数据服务体系。特别是在水利工程协同管理和孪生模拟过程中,数据成为实现全方位、全过程、数字化、信息化、智能化协同工作与管理的基石^[5],涵盖了水利工程的所有阶段。

(1)整合能力。数据整合能力是数字孪生和智能建造平台的关键特征之一,涵盖了将从多个源头收集到的数据整合为一个统一、完整的数据集的能力。水利工程涉及到的数据来源众多,包括设计文件、施工计划、传感器数据等。数字孪生和智能建造平台通过整合这些数据,实现了不同数据源之间的无缝协同,使各业务系统能够更有效地共享和利用这些信息,进而提高了水利工程的整体管理效能。

(2)开放能力。智能建造平台的开放能力体现在其对外部数据的灵活接入和共享的能力。意味着其能够与数字孪生以及第三方数据源进行无缝连接,实现更广泛的数据交流。在水利

工程中,这种开放能力使得不同团队和合作伙伴能够共享实时的工程数据,进而促进了协同工作和决策的迅速响应。通过开放能力,数字孪生和智能建造平台实现了水电工程设计施工一体化的信息流畅传递。

(3)云计算能力。云计算能力是数字孪生和智能建造平台实现大规模数据处理和存储的关键支持。在水利工程建造的复杂过程中,大量的数据需要被高效地进行处理和存储,而云计算提供了强大的计算能力和存储资源。数字孪生和智能建造平台通过利用云计算实现了对海量数据的高效管理,进而为水利工程的设计、模拟和决策提供了更大的灵活性和可扩展性。

5 利用数字孪生和智能建造进行水利工程优化和决策支持

(1)淮河流域作为我国重要的水利工程区域,其防洪工作一直备受关注。数字孪生和智能建造平台在淮河正阳关以上流域的应用已取得初步成效。该流域防洪“预报预警实时化、预演实景化、预案实地化”的目标已得以初步实现,为淮河流域的防洪工作提供了全新的思路和实践经验。为应对淮河流域复杂多变的防洪挑战,提高防洪工作的精准性和时效性,淮河流域积极采用了数字孪生技术。在“四预”试点工作中,提出了数字孪生淮河流域智慧防洪试点建设方案。该方案着眼于智能建造平台的深度应用,全面收集了流域内的各项数据,旨在建立全面、实时、智能的防洪管理体系。通过数字孪生的实时模拟和预测,淮河流域的智能建造平台实现了防洪预报、预警、预演和预案的全面升级^[6]。这一全新模式使得防洪决策更为科学、及时,并在全流域范围内展现出协同效应。在数字孪生淮河流域智慧防洪实践中涉及到多方面的技术研究与应用。数字孪生底板、数字化场景、数字化流场和数字映射等技术的综合运用构建了一个全方位、高度还原的数字模型。基于高性能并行计算的水文水动力学实时模拟预报技术的开发,使得防洪决策能够更准确地基于实时数据作出。

(2)长江流域是中国最大的河流系统之一,长江数字孪生和智能建造的关键任务之一是根据整合到的实时及未来水雨情、工情、险情等因素,对

水利工程进行联合调度方案的模拟,包括智能建造平台对各种目标(防洪、蓄水、发电等)进行多目标数据的分析与优化,以找到效益最大、风险最低的调度方案^[7]。通过数字孪生的实时模拟和多目标优化,可以更全面地考虑各项指标,使调度决策更为科学和智能。长江流域的水利工程已经形成较为成熟的联合调度方案,其以防洪为主要目标并兼顾其他目标。数字孪生的建设需要将这些调度方案进行规则化、模型化。通过知识图谱等信息化手段构建水利工程调度规则库,使调度方案逻辑化、结构化,不仅为数字孪生提供了可操作的数据基础,也使得智能建造方案更易于与模型进行交互。基于已有的调度研究成果和经验知识体系,长江数字孪生采用知识图谱等信息化手段,初步构建了水利工程调度的“智慧大脑”。这个智慧大脑通过数字化手段实现了水利工程联合调度方案的逻辑化、结构化,使得调度决策更加智能和灵活。数字孪生的建设为长江流域防洪领域的智慧应用奠定了基础。

6 结 语

笔者对水利工程中智能建造系统与数字孪生的交互和共生进行了探讨,理清了智能建造系统和数字孪生的概念并深入挖掘了其在水利工程领域中的潜在应用。

首先,智能建造系统与数字孪生的结合在水利工程中具有巨大的潜力。数字孪生技术为水利工程提供了高度还原的虚拟模型,使工程师能够更全面、实时地监测和模拟工程过程;其次,数字孪生通过实时监测和模拟为智能建造系统提供了实时数据,使工程管理更加科学化和精准化。两者的共生使水利工程能够更好地适应复杂多变的环境,进而提高了工程的可持续性和适应性。

在未来,智能建造系统与数字孪生的交互和共生将在水利工程领域发挥出更为重要的作用。随着数字技术的不断发展,我们期待这一研究领域能够为水利工程的智能化和数字化转型提供更多的启示和创新。通过不断深入的研究和实践,智能建造系统与数字孪生的交互与共生将为水利工程带来更多的机遇和挑战,进而推动水利工程行业迎接数字时代的到来。

(下转第 84 页)

(3)管道内的压力需要在试验压力下稳压 15 min,其压降不超过规范允许的压力数值时保持 30 min,观察管道外观有无渗漏水现象出现,若无渗水则水压试验合格。

4.4 卸压

(1)试压完成后,打开泄水口缓慢将管道内的水排出;

(2)将管道内的水压缓慢释放,其卸压速率不大于 0.1 MPa/min。

5 试通水及通水后对其质量进行的检验

根据试验段成功打压的结果,全线按照地形特点、管道分布情况、打压水源供应等方面综合考虑,详细划分管道打压段落。

待分段打压全部合格后,对其进行了联通后的分段试通水,通水从水源水库至第一条隧洞进口处,采用运行工作压力充分浸泡。实践证明:其质量满足相关设计及规范要求。

全部联通试运行 2 个月及后期运行大半年的实践表明:其施工质量可靠,完全满足设计及规范要求。

6 结语

笔者根据管道打压试验段的试验过程记录和监测数据分析总结了大口径管道水压试验的改进之处:

(1)对于试验段落长度的确定可以根据实际情况适当进行调整,需专门研究突破要求的不大于 1 000 m 的规定;

(2)对于堵头的设计与施工可以根据理论计算后尽量简化,并且将两端头尽量设置在地形较高的位置;打压注水的速率根据规范要求即可。

该工程水压试验的成功案例可供类似大口径、长距离管道水压试验时参考。

参考文献:

[1] 给水排水管道施工及验收规范,GB 50268-2008[S].

[2] 刘发民.大口径 PCCP 输水管线水压施工方法及工艺探讨[J].农业科技与信息,2021,28(3):99-100,103.

[3] 韦庆华,余金凤,张宪民,等.引水式水电站压力钢管岔管水压试验[J].广西水利水电,2019,47(2):10-13.

[4] 王国君.PCCP 管道水压试验技术研究[J].山西水利科技,2020,27(4):31-34.

[5] 郭谨.PCCP 管道水压试验[J].东北水利水电,2017,35(3):22-24.

作者简介:

张晓川(1984-),男,宁夏固原人,工程师,学士,从事水利工程项目管理工作;

陈云(1984-),女,湖北咸宁人,副高级经济师,学士,从事水利工程合同管理工作;

孙周辉(1980-),男,陕西宝鸡人,正高级工程师,工程硕士,从事水利工程总承包项目管理工作。

(编辑:李燕辉)

(上接第 71 页)

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 周博.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用研究[J].建筑设计与研究,2022,3(6):29-30.

[4] 牛广利,李天旸,杨恒玲,等.数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J].长江科学院院报,2023,40(3):181-185.

[5] 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.

[6] 刘昌军,吕娟,任明磊,陈胜,张晓蕾,宋文龙,张大伟.数字孪生淮河流域智慧防洪体系研究与实践[J].中国防汛抗旱,2022,25(1):40-42.

[7] 黄艳,喻杉,罗斌,等.面向流域水工程防灾联合智能调度的数字孪生长江探索[J].水利学报,2022,53(3):253-269.

作者简介:

廖悦(1991-),女,重庆市人,工程师,硕士,从事能源行业数字化研发及管理工作;

文伏灵(1987-),男,湖北襄阳人,副高级工程师,硕士,从事能源行业数字化研发及管理工作。

孙周辉(1980-),男,陕西宝鸡人,正高级工程师,工程硕士,从事水利水电工程项目管理及数字化工作。

(编辑:李燕辉)