

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.040



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 基于数字孪生的智能运维理论体系与实现方法

刘占省, 史国梁, 杜修力, 焦泽栋

(北京工业大学城市建设学部; 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:**在建筑行业转型升级的背景下, 针对大型建筑运维过程管理效率低、各类运维事件决策分析精度不足、智能化程度有待提高等问题, 提出基于数字孪生的智能运维理论体系与实现方法。总结归纳大型建筑智能运维需要采集的信息, 分析智能运维亟待解决的问题, 融合智能感知与数字孪生技术, 给出智能运维运行机理, 建立针对大型建筑智能运维架构体系与多维多尺度的孪生模型。研究建筑智能运维的实现方法, 其中包含智能运维全要素信息的采集与传输、智能运维孪生体的构建与运行、智能运维孪生数据的管理机制及智能运维平台的架构。在智能运维理论体系和实现方法的指导下, 搭建了智能运维平台, 并应用于某大型建筑工程的运维管理。考虑运维管理过程中的虚实交互与时空演化, 初步验证了数字孪生在提高运维管理智能化程度方面的有效性。

**关键词:**建筑运维; 智能运维; 数字孪生; 智能管理

**中图分类号:** TU17 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)01-0046-12

## Theory system and realization method of intelligent operation and maintenance based on digital twins

LIU Zhansheng, SHI Guoliang, DU Xiuli, JIAO Zedong

(College of Architecture, Civil and Transportation Engineering; The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

**Abstract:** In the context of the transformation and upgrading of the construction industry, aiming at the problems of low management efficiency of large-scale building operation and maintenance process, insufficient accuracy of decision analysis of various operation and maintenance events, and the degree of management intelligence needs to be improved, this study proposes an intelligent operation and maintenance theory system and implementation method based on digital twins. Firstly, the information required for intelligent operation and maintenance of large buildings is summarized, and the problems to be solved in intelligent operation and maintenance are analyzed. The intelligent sensing technology is integrated into digital twins to propose an operation mechanism of intelligent operation and maintenance, and the intelligent operation and maintenance architecture system for large buildings and the multidimensional and multi-scale twinning model is formed. The realization method of building intelligent operation and maintenance is studied. It includes the collection and transmission of all elements of intelligent operation and maintenance information, the construction and operation

**收稿日期:** 2021-12-08

**基金项目:** 国家自然科学基金(52178095)

**作者简介:** 刘占省(1983-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事智能建造与数字孪生方法研究, E-mail: lzs4216@163.com。

**Received:** 2021-12-08

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No.52178095)

**Author brief:** LIU Zhansheng (1983-), associate professor, doctoral supervisor, main research interests: intelligent construction and digital twin, E-mail: lzs4216@163.com.

of intelligent operation and maintenance twins, the management mechanism of intelligent operation and maintenance twin data and the architecture of intelligent operation and maintenance platform. Under the guidance of the intelligent operation and maintenance theory system and implementation method, an intelligent operation and maintenance platform is formed and applied to the operation and maintenance management of a large construction project. Considering the virtual-real interaction and spatio-temporal evolution in the process of operation and maintenance management, the effectiveness of digital twins in improving the intelligence of operation and maintenance management is preliminarily verified.

**Keywords:** architectural operation and maintenance; intelligent operation and maintenance; digital twins; intelligent management

在新兴现代化信息技术(数字孪生、物联网、人工智能、大数据等)快速发展的背景下,建筑行业迎来了高质量发展契机,并推动着建筑运维管理的智能化转型升级<sup>[1-2]</sup>。为深化落实现代信息技术在建筑业中的融合和应用,各国基于自身国情分别提出了相应的发展策略,为人工智能、数字孪生等相关技术的快速发展带来了契机<sup>[3]</sup>。大型建筑具有建筑面积大且人流密集等特征,同时,复杂的环境信息加大了建筑内部运维管理难度。另外,传统的运维方式存在数据共享困难、系统集成工作量大等问题,尤其是建筑新功能需求无法与现行系统相契合,影响整个建筑物的正常运维<sup>[4]</sup>。

众多学者提出在建筑运维过程中引入信息技术,提高管理的智能化水平<sup>[5]</sup>。杨启亮等<sup>[6]</sup>为高效构造基于BIM的建筑运维动态管控、增强现实人机交互等新型系统,提出了一种面向信息物理融合的BIM扩展方法。段晓晨等<sup>[7]</sup>开展了桥梁工程运维成本三维非线性智能控制研究,并将三维非线性智能控制技术运用到实际工程中,提高了运维管理的实时性和高效性。针对如何实现建筑各管理方的协同工作,宋战平等<sup>[8]</sup>提出了基于BIM技术的建筑全生命周期管理理念,并建立了面向隧道工程的协同管理平台。朱宏平等<sup>[9]</sup>提出大型复杂结构的健康精准体检方法,有效地提高了大型建筑的运维效率和智能化水平。Chen等<sup>[10]</sup>针对建筑物运维计划效率低下等问题,提出了一种创新的管理工作流程设计方案,实现了建筑结构维护的高效规划。在建筑物运营和维护过程中,由于难以访问和使用来自建设阶段的设施信息, Kim等<sup>[11]</sup>提出了一种BIM技术驱动的建筑要素与设施工作信息管理方法,从而提高了多信息数据的提取效率。Belussi等<sup>[12]</sup>针对建筑物的能源消耗问题,提出了零能耗建筑的相关理念,并对实际应用的通用解决方案的性能进行了分析,最终概述了使零能耗目标成为建筑物新标准的关键要素。通过分析建筑物运维管理现状发现,在业务应用上,当前建筑智能化发展仍存在高精度信息

采集难、信息孤岛严重、运维效率低和管理精度不足的现象<sup>[13]</sup>,没有考虑建筑运维时间与空间维度上多源信息的融合,无法实现对运维全要素的智能化管控。数字孪生作为智能建造的关键使能技术<sup>[14]</sup>,充分考虑虚实交互与时空融合,可以实现多个管理要素的集成,为建筑行业的转型升级提供了新的思路<sup>[15-16]</sup>。在新兴现代信息技术中,数字孪生的应用可以提高大型复杂建筑运维管理的精细化和智能化水平。

数字孪生可以融合人工智能、物联网等信息技术,创建实时的数字仿真模型<sup>[17-18]</sup>,该模型能够集成多源数据进行学习和更新,进而表示和预测物理对应物的当前和未来状况,在建筑施工过程中,基于数字孪生,可以实现全过程实时控制<sup>[19]</sup>。将数字孪生的理念应用于运维过程可以实现建筑全生命期的智能闭环控制<sup>[20]</sup>。Liu等<sup>[21]</sup>将数字孪生引入到建筑物室内安全管理中,并提出了一种基于数字孪生的室内安全管理系统框架,有效提高了建筑物室内安防管理的智能水平。Marai等<sup>[22]</sup>结合物联网设备进行道路交通数据的实时采集与分析,从而创建了面向物理道路资产的数字孪生模型。Kaewunruen等<sup>[23]</sup>建立了用于铁路系统生命周期管理的6D数字孪生模型,实现了构件安装、运营管理及拆除的整体信息集成。Lu等<sup>[24]</sup>提出了一种专为建筑和城市两个层次设计的数字孪生系统架构,支持运维管理中的决策过程。Peng等<sup>[25]</sup>应用数字孪生技术,实现了全生命周期静态数据和动态数据的连续集成。数字孪生可以作为建筑物施工、运维等过程中信息集成的技术基础<sup>[26]</sup>。在提升建筑全生命期智能化管控水平过程中,还需依托物联网技术进行数据的实时提取和采集。基于物联网的智能感知技术具有高精度、全天候、全天时、高效便捷等优良特性,在工程定位系统应用中发挥了重要作用<sup>[27]</sup>。Sakic等<sup>[28]</sup>通过改进GNSS并融合最小二乘反演,实现了精确的水下大地定位。在室内施工现场中,McCabe等<sup>[29]</sup>依托无人机的精准定位性能探索了一套融合物

联网等新兴技术的智能感知系统,为施工现场质量控制与信息采集水平的提高提供了参考。由此可见,智能感知技术可以实现物体的精准定位,为智能运维的实现提供信息采集技术支撑。

通过分析大型建筑运维管理研究现状,结合数字孪生及智能感知技术的应用价值,面向大型建筑的运维全过程,研究基于数字孪生的智能运维理论体系,提出智能运维的实现方法。首先总结智能运维所需采集的信息,分析基于数字孪生智能运维亟待解决的问题;为解决关键问题,将智能感知技术融于数字孪生,搭建面向智能运维的架构体系和多维模型;然后,在理论体系驱动下,分析智能运维的实现方法;最后,基于对智能运维理论体系和实现方法的研究,开发了智能运维平台并应用于某大型建筑工程的运维管理,通过工程实践验证了数字孪生可以有效提高建筑运维管理的信息化和智能化水平。

### 1 智能运维信息与数字孪生的融合机理

实现信息物理融合的有效手段是数字孪生技术<sup>[30-31]</sup>。一方面,数字孪生能够实现运维过程的现实物理空间与虚拟数字空间之间的交互映射;另一方面,数字孪生能够将外界环境等现实信息与模型仿真等信息空间数据进行交互反馈与精准融合,从而增强现实世界与虚拟空间的同步性与一致性。在建筑运维过程中,提高管理的智能化水平,需要明确智能运维所需采集的信息。针对信息的应用,进一步明确亟待解决的问题。基于此,探索数字孪生与智能感知技术的融合机理,形成高效的运维模式。

#### 1.1 智能运维所需采集的信息表达与体系

结合工程实践,按照系统性、科学性、全面性、层次性和可行性原则,需要对建筑运维活动中的各要素进行集成与融合。在信息技术的驱动下,进行建筑、人员与环境的建模是实现智能运维的基础<sup>[21]</sup>。在大型复杂建筑的运维过程中,将运维信息分为三大类,即建筑(B)、人员(P)和环境(E)。运维信息( $I_{om}$ )的数学语言由式(1)表示。

$$I_{om}=(B,P,E) \quad (1)$$

其中,建筑信息主要包括建筑的整体布局,建筑结构的使用性能,建筑物机电设备的运行状态,建筑物中其他构件的运行状况及建筑物中的能源消耗情况。人员信息主要包括建筑物中人员的数量,人员的密度、分布及人员的准确位置。环境信息主要包括温度、湿度、风速、各种气体的浓度及光照情况。建筑、人员和设备信息是运维过程中主要

的服务对象。通过捕捉3类信息,分析其状态,对异常现象进行及时调整,从而实现建筑的智能化运维。调整和维护3类要素对降低运维过程成本起到重要作用。

通过实时感知和采集运维过程中的各类信息,可以为数字孪生模型的搭建和运维信息智能化的分析提供数据支撑。智能运维信息捕捉体系如图1所示。

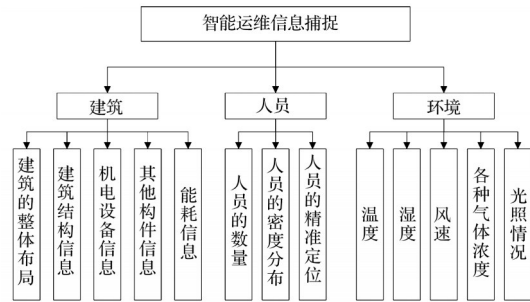


图1 智能运维信息捕捉体系

Fig. 1 Intelligent operation and maintenance information capture system

#### 1.2 智能运维需解决的关键技术问题分析

基于数字孪生技术,引入“数字化镜像”,使得在虚拟世界中再现运维过程成为可能。数字孪生应用于运维管理的基础是实现虚实融合与交互反馈,实质上是数据与信息在虚实世界中传递与发挥作用的过程<sup>[32]</sup>。在建筑运维过程中,数据的管理与应用是提高智能化水平的关键问题<sup>[33-34]</sup>。根据建筑智能运维所需采集的多源异构信息,将数字孪生应用于智能运维中还需解决数据采集与传输、数据建模、数据分析和数据应用4个关键问题,如图2所示。



图2 数字孪生应用于智能运维的关键问题

Fig. 2 Key issues of digital twins application in intelligent operation and maintenance

##### 1) 数据采集与传输

数据是连接物理世界与虚拟世界的桥梁,而如何采集与获取数据则是应用数字孪生技术要解决的首要问题。与生产车间不同,大型复杂建筑运维过程中存在的不确定因素多,周围的环境变化与人员的参与都可能影响运维过程<sup>[35]</sup>。数字孪生应用于建筑的智能化运维中需要动态实时采集数据及信

息。因此,要尽可能全面地采集智能运维过程中的建筑、人员、环境多源异构数据,并保证数据的全面性与准确性,才能最大限度地虚拟空间中还原物理空间。

### 2) 数据建模

利用数据进行建模是一种模型表达方法,目的是通过建立数字孪生模型完全真实反映物理空间,从而在数字孪生模型中仿真模拟实际运维过程,为物理世界的正常运行提供保障。目前大多产品数字化建模与建筑物三维建模往往只考虑了对象的几何信息,并不能真实刻画对象的实际状态。因此,在信息层次上,需要建立几何、物理、行为、规则模型,从而进一步提高数字孪生模型仿真的真实性和准确性。在运维过程中,涉及多样的数据信息,且各自的表现形式不同。在智能运维过程中,需要建立标准的数据处理模型,进行数据的统一处理。

### 3) 数据分析

面对建筑运维庞大的数据规模,提高数据的存储与管理水平成为重中之重<sup>[36]</sup>。首先,数据存储与管理的业务范围需要横跨运维过程的实时数据与历史数据;其次,面对有持续增长趋势的海量数据,需要引入分布式数据管理系统,以满足可靠性与可扩展性需求。在此基础上形成的大数据存储管理平台可筛选关键数据,并为物理空间、虚拟空间以及智能运维系统的数据应用与分析提供驱动力和支撑。面对海量数据,数字孪生驱动的智能运维还应进行数据的融合处理,精准分析与预测各要素的状态,为维护措施的制定提供依据。

### 4) 数据应用

对数据进行应用的核心工具是基于数字孪生的智能运维系统,该系统需要明确智能运维管控的现实需求。系统应搭载人工智能算法,以实现数据的分析挖掘和功能性调控。系统的功能应该至少包括对运维过程的可视化呈现、运维事件的智能诊断与科学预测、精准指导运维过程3个层面。系统还需要利用B/S或C/S架构开发人机交互界面,便于有效信息的输入输出。在运维系统的驱动下,形成相应的维护措施,同时,还应进行建筑实际运维的精准执行。

## 1.3 智能感知与数字孪生的融合机理

结合智能运维需要捕捉的信息和基于数字孪生的智能运维亟待解决的问题,将智能感知与数字孪生相融合,可以实现运维数据的实时采集和精准分析<sup>[37]</sup>。在数字孪生的驱动下,可以实现运维过程的可视化呈现、运维事件的智能诊断、科学预测,最

终精准指导现实世界的运维决策。与此同时,基于物联网的智能感知系统从各种传感设备抽取对象的运维信息,确定待测点的位置。在室内,可以实现高精度定位。在室外,可以实现精准导航、智能化测量等一系列辅助智能运维功能。通过智能感知技术精准采集运维信息,在数字孪生的驱动下形成决策指令,最终应用于现实运维过程,实现运维管理的闭环控制。基于数字孪生和智能感知的技术特点,进行了融合机理研究,模式如图3所示。

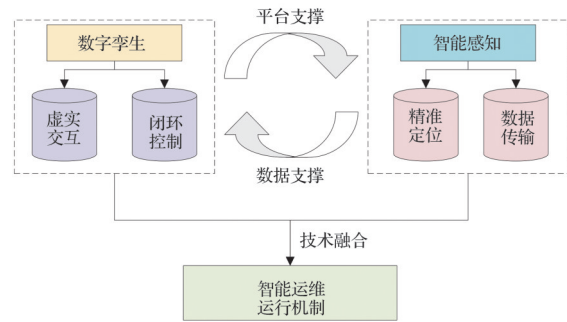


图3 数字孪生与智能感知的融合机理

Fig. 3 Fusion mechanism of digital twins and intelligent perception

将智能感知融于数字孪生可以最大限度地采集运维过程的多源异构数据、精准把握运维各个时间节点要素的状态,最终实现管理指令的精准执行。数字孪生与智能感知互为支撑,有效地解决了智能运维亟待解决的问题。一方面,数字孪生可以为智能运维提供技术融合的基础和平台,实现运维过程的虚实映射和闭环控制;另一方面,智能感知技术可以为运维信息提供精准定位和数据传输渠道,动态采集运维信息并最终精准传达管理指令。数字孪生为智能感知技术的应用提供平台支撑,智能感知为数字孪生架构的搭建提供数据支撑,两者有机融合可以推动智能运维的高效运行。将物联网与数字孪生相融合,实现数据的动态采集与传输,同时,设置相应协议,使数据格式统一,便于建模与分析,最终维护措施由物联网定位技术进行精准执行。

在整个运维过程中,通过数字孪生与智能感知的融合,进行各类信息的采集与管理。将现实物理空间中的各类信息统称为 $I_p$ ,其数学语言表述为

$$I_p = \begin{pmatrix} B_p \\ P_p \\ E_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{p1} & B_{p2} & \cdots & B_{pm} \\ P_{p1} & P_{p2} & \cdots & P_{pn} \\ E_{p1} & E_{p2} & \cdots & E_{pw} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $B_p$ 、 $P_p$ 和 $E_p$ 分别表示物理空间中建筑、人员和环境信息; $B_{p1}$ 、 $B_{p2}$ 、 $\cdots$ 、 $B_{pm}$ 表示物理空间中建筑自身的各个构件单元信息; $P_{p1}$ 、 $P_{p2}$ 、 $\cdots$ 、 $P_{pn}$ 表示物理空间中

运维过程涉及的人员个体信息。 $E_{p1}, E_{p2} \dots E_{pw}$  表示物理空间中运维过程各类环境因素信息。针对物理空间的信息,由智能感知技术进行各类要素信息的采集与传输。同时,在虚拟空间中进行各类信息的仿真模拟,由此形成数字孪生信息( $I_{DT}$ ),其数学语言表述为

$$I_{DT} = \begin{pmatrix} B_{DT} \\ P_{DT} \\ E_{DT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{DT1} & B_{DT2} & \dots & B_{DTm} \\ P_{DT1} & P_{DT2} & \dots & P_{DTn} \\ E_{DT1} & E_{DT2} & \dots & E_{DTw} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $B_{DT}$ 、 $P_{DT}$ 和 $E_{DT}$ 分别表示虚实交互形成的建筑、人员和环境数字孪生信息; $B_{DT1}, B_{DT2} \dots B_{DTm}$ 表示孪生空间中建筑自身的各个构件单元信息; $P_{DT1}, P_{DT2} \dots P_{DTn}$ 表示孪生空间中运维过程涉及的人员个体信息; $E_{DT1}, E_{DT2} \dots E_{DTw}$ 表示孪生空间中运维过程各类环境因素信息。在数字孪生空间中进行各类运维事件的仿真分析。针对运维事故可以进行修正决策的辅助制定,并在虚拟模型中进行可行性分析。最终借助智能感知技术的精准定位功能高效指导物理空间的维护。在实际运维过程中,发生某一个事件并不仅仅只针对某一个环境中的某一个人或者某一个结构构件,而是多个环境因素及相关构件组成的复杂系统。因此,针对运维信息的捕捉与修正应该具有实时性与全面性。在数字孪生的驱动下,集成建筑、环境与人员形成运维后的各类信息( $I^*$ )具体表述为

$$I^* = \begin{pmatrix} B^* \\ P^* \\ E^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_1^* & B_2^* & \dots & B_m^* \\ P_1^* & P_2^* & \dots & P_n^* \\ E_1^* & E_2^* & \dots & E_w^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: $B^*$ 、 $P^*$ 和 $E^*$ 分别表示维护后的建筑、人员和环境数字孪生信息; $B_1^*, B_2^* \dots B_m^*$ 表示维护后建筑自身的各个构件单元信息; $P_1^*, P_2^* \dots P_n^*$ 表示维护后的人员个体信息; $E_1^*, E_2^* \dots E_w^*$ 表示维护后的各类环境因素信息。

## 2 基于数字孪生的智能运维理论框架

数字孪生作为实现智能运维的关键技术<sup>[38]</sup>,通过融合智能感知技术能够实现虚拟空间与物理空间的信息融合与交互,并向物理空间实时传递虚拟空间反馈的信息,从而实现建筑运维的全物理空间映射、全生命期动态建模、全过程实时信息交互及全阶段反馈控制。

### 2.1 智能运维架构体系

基于数字孪生的智能运维框架包括物理空间、虚拟空间、信息处理层、系统层4部分。各个层级之间的关系如下:物理空间提供包含“建筑-人员-环

境”在内的运维过程多源异构数据并实时传送至虚拟空间;虚拟空间通过建立起物理空间所对应的全部虚拟模型,完成从物理空间到虚拟空间的真实映射,在虚拟空间中进行仿真模拟、可行性分析可以实现对物理空间运维全过程的实时反馈控制;信息处理层接收物理空间与虚拟空间的数据并进行一系列的数据处理操作,提高数据的准确性、完整性和一致性,作为调控运维活动的决策性依据;基于数字孪生的智能运维系统平台(系统层)通过分析物理空间的实际需求,依靠虚拟空间算法库、模型库和知识库的支撑以及信息层强大的数据处理能力,进行运维管理的智能化决策与功能性调控。基于数字孪生的智能运维架构体系如图4所示。

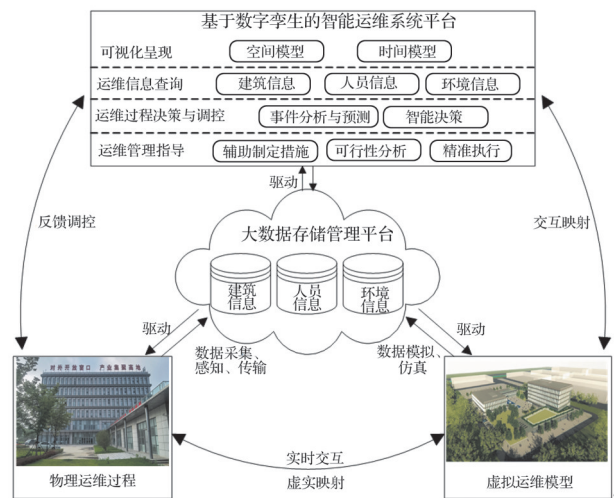


图4 基于数字孪生的智能运维架构体系

Fig. 4 Intelligent operation and maintenance architecture based on digital twins

### 2.2 面向智能运维的多维模型建立

智能运维的架构体系包含4个部分,实现各个部分的协同工作需要建立基于数字孪生的多维模型。多维模型是对智能运维框架的具体补充,形成各个模块的运行机制,为智能运维方法的实现提供理论支撑。多维模型包含物理空间、虚拟空间、孪生数据处理层、功能应用层及各组成部分间的连接5个模块。在物理空间,通过捕捉运维全要素信息,建立动态感知模块,采集建筑、人员、环境信息,并形成信息网络模块,进行数据的标准化传输。与此同时,在虚拟空间中,建立集“几何-物理-行为-规则”为一体的虚体模型,从而实现虚拟空间与物理空间的交互映射。在运维管理过程中,由优化算法、规范标准实时修正虚拟空间中的超限行为,并反馈到物理空间中进行调整。由物理空间和虚拟空间形成孪生数据,在孪生数据处理层中,进行运维数据的融合、预处理、挖掘与应用,从而驱动孪生

体的运行。最终,在功能应用层对运维过程进行可视化呈现运维信息的实时捕捉,从而智能化指导运维决策。同时,在数字孪生中融入智能感知,实现各个层级的连接与协作,形成面向智能运维的多维模型,由式(5)表示。

$$DTM=(S_p, S_v, P_{td}, L_{fa}, C_n) \quad (5)$$

式中:DTM为面向智能运维的多维模型; $S_p$ 为物理空间; $S_v$ 为虚拟空间; $P_{td}$ 为孪生数据处理层; $L_{fa}$ 为功能应用层; $C_n$ 为各组成部分间的连接。基于多维模型可以实现对现实运维过程的仿真映射,进而智能化分析各要素信息的状态,对运维现场做出精准维护决策。在建模过程中,物理空间对应着建筑的现实运维过程,虚拟空间则是由智能感知采集的现实信息建立起的虚拟模型,由此实现对物理空间的交互映射,并形成运维过程的孪生数据集。数据一方面来源于物理空间的采集,另一方面来源于虚拟空间的仿真。在功能应用层中,对各类数据进行融合,智能分析各要素的状态,并预测未来的发展趋势。当出现要素运行异常情况时,在虚拟空间中进行维护处理,并验证其可行性。最终,再由智能感知技术传递到运维现场,进行精准维护。

### 3 基于数字孪生的智能运维实现方法

在智能运维理论体系的驱动下,实现智能运维需要进行4个方面的探索,即运维全要素信息的采集与传输机制、智能运维孪生体的构建与运行模式、数据的存储与管理方法、基于数字孪生的智能运维平台架构。

#### 3.1 智能运维全要素信息采集与传输

在大型复杂建筑的运维过程中,数据主要来源于建筑、人员、环境等。数据采集是指利用某种设备从待测对象向计算机中自动采集数据的方式。用于运维过程的数据采集方式主要包括:1)为待测对象生成包含对象信息的条形码或二维码,利用配套的扫描设备获取相应信息;2)在待测对象上安装传感器,数据采集仪将传感器传出的模拟信号转化为数字信号传至计算机。

在运维过程中,物理空间是一个复杂、动态的环境,由影响运维的各类信息要素、感知模块及网络模块组成。其中,建筑、人员、环境是最原始的数据源,在运维活动中产生的多源异构数据被传送至虚拟空间,同时,接收虚拟空间的指令并做出相应反应。感知模块与网络模块分别负责数据的感知采集与数据向虚拟空间的传输,感知模块通过安装在建筑结构或机电设备上的不同类型传感器来进

行状态感知、质量感知和位置感知,同时采集多源异构数据;在此基础上,通过在网络模块中建立一套标准的数据接口与通讯协议,实现对不同来源数据的统一转换与传输,将运维活动的实时数据上传至虚拟空间。由此形成面向智能运维全要素信息的采集与传输机制。

智能运维全要素信息采集与传输包含4个层级,即物理对象、数据类型、感知层和网络层,首先采集建筑、人员、环境3类运维要素,将各类要素进行统一集成,在运维平台中融合各类数据,进而建立各要素历史数据与当前运行状态的关联。最终通过构建智能运维孪生体进行各类信息的分析与预测。

#### 3.2 智能运维孪生体的构建与运行

自主智能特别是智能体技术的发展为运维系统孪生智能体建模带来了新的思路和方法<sup>[39]</sup>。以自主智能技术为依托,充分考虑时间与空间两个维度,在空间维度( $R$ ),融合数字孪生技术,构建智能运维的建筑信息( $B$ )、人员信息( $P$ )和环境信息( $E$ ),实现对运维系统纵向维度的多尺度建模;在时间维度( $T$ ),围绕整个运维过程,融合事件维护前( $T_1$ )、事件维护中( $T_2$ )和事件维护后( $T_3$ )的时间演变数据,建立以智能运维孪生体为主的动态协同运作机制,支撑智能运维虚实交互配置建模及多维多尺度时空域下智能运维过程的建模,实现智能运维系统多要素、多流程、多业务的时程平行仿真模拟与虚实集成管控。基于时空信息融合的智能运维孪生体( $TA$ )建模由式(6)表示。

$$TA = \begin{pmatrix} R \\ T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B & P & E \\ T_1 & T_2 & T_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

在智能运维孪生体建模的基础上,形成包含几何、物理、行为、规则模型在内的多种模型深度融合,作为“数字镜像”真实地反映物理实体的过程。首先,在虚拟空间中进行几何建模,反映物理空间的尺寸、大小、形状、位置关系等几何信息,形成“三维模型”。然后通过安装在物理空间上的多类型传感器采集反映实体物理属性的信息,进行物理建模,包括结构性能、设备状态、人员分布、环境参数等。将采集到的物理属性信息与三维模型进行融合,并赋予模型行为与反应能力,进行行为建模,可以对运维过程中的人工操作或系统指令作出相应响应并进行可行性分析。最后,对运维物理实体的运行规律进行规则建模,包括诊断规则、预测规则、决策规则等,并与行为模型进行关联,最终实现面向智能运维的孪生体运行示意,如图5所示。

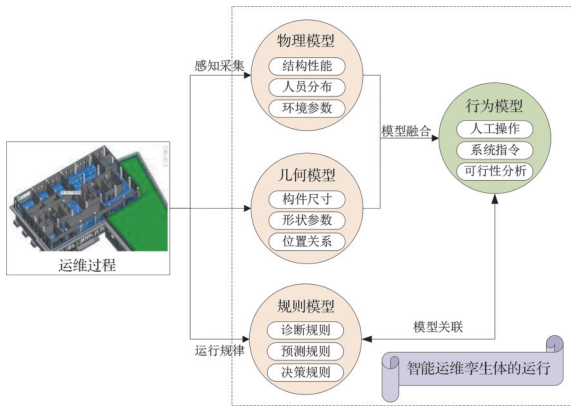


图 5 面向智能运维的孪生体运行示意

Fig. 5 Operational implications of twins for intelligent operation and maintenance

3.3 智能运维孪生数据的存储与管理

孪生数据存储与管理平台( $P_{sm}$ )是沟通物理空间与虚拟空间的桥梁,主要包括数据融合( $D_f$ )、数据预处理( $D_p$ )、数据挖掘( $D_m$ )、数据应用( $D_a$ )4个步骤。智能运维孪生数据的存储与管理由式(7)表示。

$$P_{sm} = (D_f, D_p, D_m, D_a) \quad (7)$$

来自物理空间与虚拟空间的海量多源异构原始数据由物联网传感技术实时采集并进行融合,这些数据包括物理空间的运维要素数据,以及虚拟空间的模型数据、仿真数据、管理数据、评估数据等。然后对这些原始数据进行数据预处理,包括数据清洗、数据集成、数据转换、数据规约等,提高数据的准确性、完整性和一致性。由人工智能算法进行数据分析挖掘,达到分类、预测、聚类的效果。最后,在数据融合、预处理、分析挖掘的基础上,从数据库和知识库中提取相应参数,进行特征级和决策级的数据应用,从而作为调控建设活动的决策性依据。

在运维过程中,发生运维事故时,通过虚拟模型的仿真分析与感知技术对物理空间的精准定位<sup>[40]</sup>,判断运维事故的类型并分析发生的原因。最终在虚拟模型的可行性分析与智能感知技术的精准定位驱动下对运维事故进行整改,并形成数据库,保证运维阶段的有序进行。基于数字孪生的建筑运维事故管理过程如图6所示。

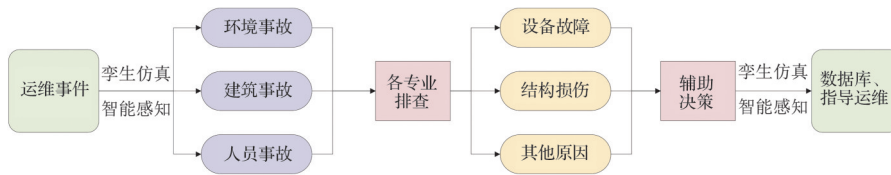


图 6 基于数字孪生的建筑运维事故管理过程

Fig. 6 Management process of building operation and maintenance accidents based on digital twins

3.4 基于数字孪生的智能运维平台架构

在运维数据的采集传输、智能运维孪生体的构建与运行以及孪生数据的存储与管理基础上,通过融合感知技术与数字孪生建立智能运维平台,最终辅助决策是实现建筑智能运维的最终目标。基于数字孪生的智能运维平台通过分析物理空间的实际需求,依靠虚拟空间算法库、模型库和知识库的支撑和信息层强大的数据处理能力,对运维过程中遇到的各类事件与建筑自身、人员、环境状态进行决策,进而实现功能性调控。具体功能包括运维要素的实时监控、状态智能诊断、风险科学预警、自动化监测、辅助运维决策、可行性分析等,对整个运维过程进行实时优化控制。由物理空间与虚拟空间交互映射,形成运维信息的孪生数据。依据孪生数据进行运维过程的实时监控,智能诊断各类运维对象的状态,科学预警发生问题的位置并及时补救或辅助决策。将辅助决策导入虚拟空间中,进行可行性分析,从而输出合理的措施,结合运维过程的人机交互系统,指导现实物理空间的运维。与此同

时,将维护后的信息继续实时分析,以此形成运维过程的智能化闭环控制。基于数字孪生的智能运维平台架构如图7所示。在该平台中,映射现实建筑的运维过程及分析各要素的运行状态是平台的重点。其中,平台中存在各要素的历史运行数据及其相关的限值,当系统中出现要素数据异常或超限的情况,则进行预警。通过维护措施的制定,辅助运维的正常运行。同时,在平台中进行维护措施的可行性分析,最终指导现实运维。

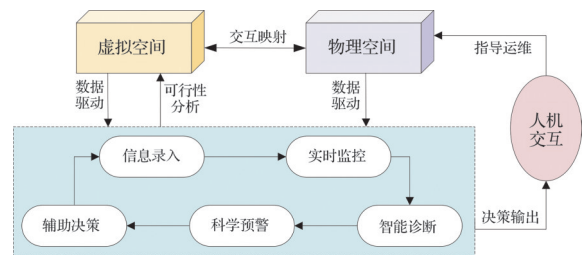


图 7 基于数字孪生的智能运维平台架构

Fig. 7 Architecture of intelligent operation and maintenance platform based on digital twins

### 4 案例应用

基于对智能运维理论体系与实现方法的分析,围绕某大型建筑工程项目进行基于数字孪生的智能运维平台案例应用。在数字孪生的驱动下,搭建智能运维平台,让运维管理对象和管理工作变得更加形象、直接。在平台中依托数字孪生与智能感知的技术特点,充分考虑运维过程的虚实交互与时空

演化,实现对运维信息的准确、全面、快速掌握,更有效地进行建筑运维协同管理,提高维护效率,降低运维管理成本,弥补传统运维管理存在的不足。智能运维平台的搭建实现了大型建筑运维管理的高效率、精细化和智能化,为项目带来实际的效益,改善了传统落后的管理方式。智能运维平台主要包括模型管理、机电运维、能耗监测和其他系统,如图 8 所示。

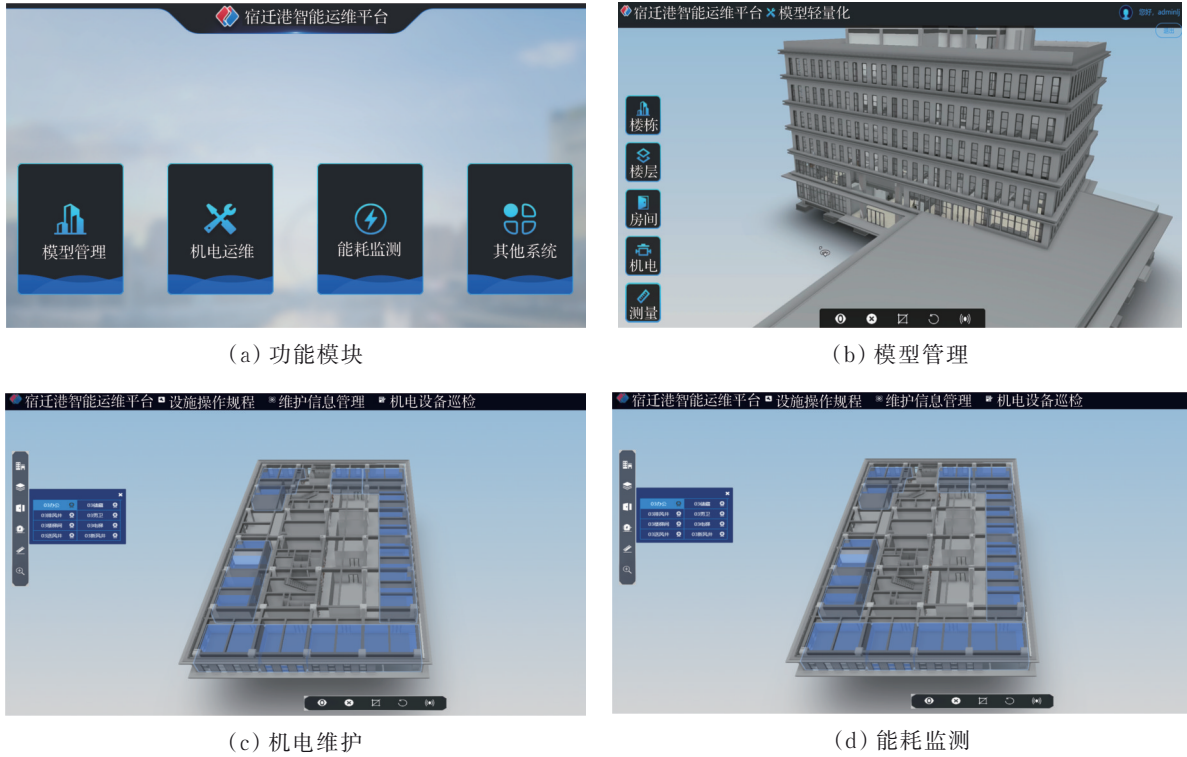


图 8 智能运维平台

Fig. 8 Intelligent operation and maintenance platform

#### 4.1 运维平台的技术架构

结合运维平台功能模块的配置,根据数字孪生与智能感知的技术特点,建立了运维平台的技术架构,如图 9 所示。为了实现对建筑的绿色运维、高效运维及安全运维,从目标出发,建立平台的功能层-平台层-数据层-网络层-物理层,完成平台搭建。在运维平台中,按照物理层-网络层-数据层-平台层-功能层的顺序实现正向的数据传输,融合运维过程的时空多维信息,整体把控运维事件。最终在平台层上进行建筑运维状态展示,实现对运维过程的可视化呈现、智能化分析、精准化决策。

基于数字孪生智能运维平台的搭建,可以将项目的各个阶段信息加以集成,通过开发项目设计管理、运营管理模块,利用软件工程技术实现建筑可视化、资源共享,操作简便高效,达到减少工程变更、方便运营维护管理的目的。

在感知层中,由各类传感设备进行运维信息的实时采集,进行设备、构件等要素的精准定位与虚

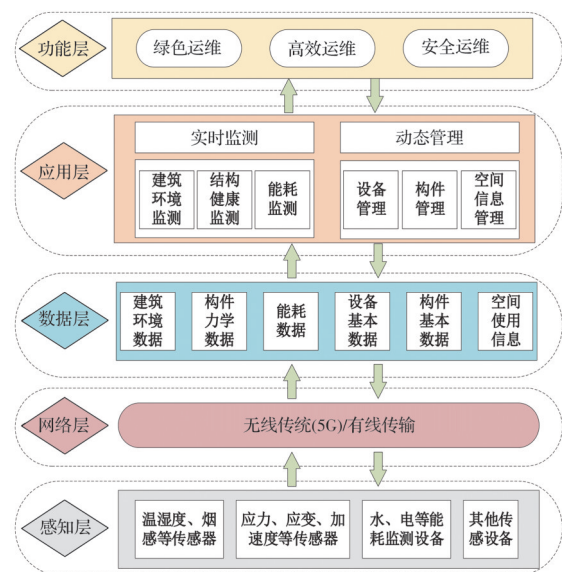


图 9 运维平台的技术架构

Fig. 9 Technical architecture of operation and maintenance platform



拟模型实时映射。针对多源异构数据,由网络层将数据传输到数据层,数据层将运维阶段项目孪生数据进行整合,并存储到数据库中。数据库数据来源分两部分,即孪生模型仿真数据及现场实测数据,同步项目开展持续动态更新。结合运维系统的功能模块进行运维信息的实时监测和动态管理,并由感知技术在应用层中进行维护的精准化指导,提高运维的效率。

#### 4.2 运维平台的应用

基于运维平台的技术架构,进行具体的运维管理应用。在智能运维系统辅助下,可以有效提高结构健康监测的效率和精度。同时,对于建筑物中的设备运行信息可以进行可视化调取,实时监控其运行状态,及时修正不合格现象,有效减少因为设备运行超限而导致的能源浪费,由此可以避免因为设备失效而造成的资源浪费。也为国家碳达峰、碳中

和等建筑节能战略规划<sup>[41-42]</sup>提供新的思路和方法。

以建筑物中的设备维护为例,形成的智能运维应用体系如图 10 所示。根据运维现场的设备特征,由嵌入在运维平台的感知系统对需要维护的设备进行精准定位。通过捕捉设备的位置信息,在运维平台中调取出相应的虚拟模型。根据现实建筑中附着在设备上的传感器,在孪生模型中提取其运行信息,并将数据进行可视化呈现。根据设备的型号和历史运行数据,设置设备正常运行状态参数。在此基础上,对运行参数超限的设备进行及时整改,分析设备故障原因,保证其运行的可靠性。与此同时,将整改措施导入运维平台的虚拟模型中,进行可行性分析。最终,形成维护决策,录入更新后的信息,便于下一阶段信息查询,由平台中智能感知系统的辅助定位功能指导现场运维。

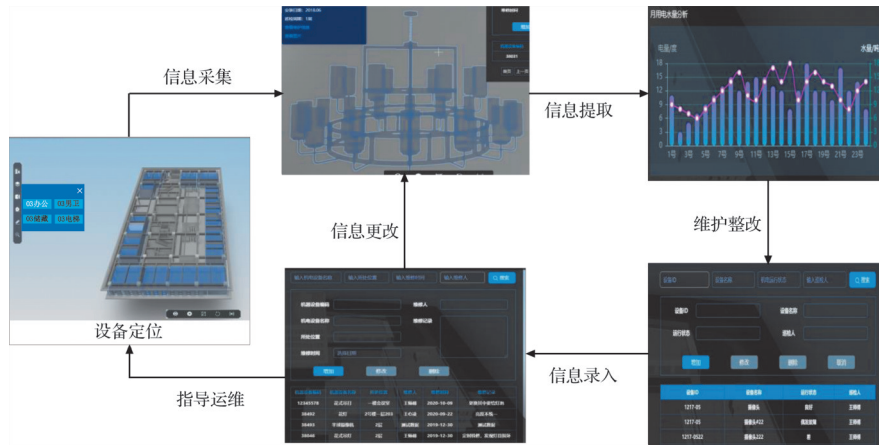


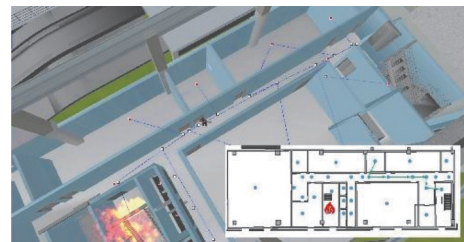
图 10 设备智能运维应用体系

Fig. 10 Application system of equipment intelligent operation and maintenance

根据智能运维应用体系,可以实现建筑物中各要素信息的可视化呈现、运行状态的智能诊断、参数超限的科学预警,并最终辅助生成维护决策,指导整个运维过程。由此形成了面向建筑运维的智能闭环控制,便于运维管理及迅速精准地做出维护措施。在项目运维过程中,各个平台模块还针对能源消耗、结构构件、空间信息、应急预警等方面进行了智能运维技术体系的应用。基于数字孪生,实现了建筑的智能运维管理,有效提高了管理的效率与精度。能源消耗及应急预警模块如图 11 所示。在实际工程应用中,相较于传统运维管理模式,通过智能运维管理平台对数据进行管理节约时间高达 20%,减少人力成本约 50%,节约资源能耗约 20%,监控的覆盖率达到 90% 以上,提高应急响应时间约 40%。



(a) 能源消耗监测模块



(b) 应急预警模块

图 11 运维系统的功能模块

Fig. 11 Functional modules of the operation and maintenance system

## 5 结论

针对大型建筑运维过程管理效率低、各类运维事件管理精度不足等问题,提出基于数字孪生的智能运维理论体系与实现方法。数字孪生作为智能运维的关键技术,融合智能感知技术的精准定位功能,为大型复杂建筑的智能运维提供了新的思路。得到以下主要结论:

1)结合工程实践,总结智能运维所需捕捉的信息要素,归纳基于数字孪生的智能运维亟待解决的问题并探索智能感知技术与数字孪生的融合机理,形成面向智能运维的运行机制。

2)通过融合机理研究,提出智能运维的架构体系,并搭建面向智能运维的多维模型,由此形成基于数字孪生的智能运维理论框架。

3)在智能运维理论框架的驱动下,建立智能运维全要素信息采集与传输机制,搭建面向智能运维的孪生体,给出智能运维孪生数据的存储与管理模式,最终搭建智能运维平台架构,形成了智能运维的实现方法。

基于智能运维理论框架与实现方法,结合某大型建筑工程项目的运维特点,研发了集成多个功能模块的智能运维平台。通过分析运维平台的技术架构和应用体系,通过在工程项目中的应用,平台对运维时间、人力资源及能耗的节省方面有显著效果。提出的理论方法可以实现对运维过程的智能闭环管理,也为“双碳”目标的实现提供了新的思路和方法。

### 参考文献

- [1] MOHAMMADI S, TAVAKOLAN M, ZAHRAIE B. An intelligent simulation-based framework for automated planning of concrete construction works [J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2022, 29(2): 916-939.
- [2] 罗齐鸣, 华建民, 黄乐鹏, 等. 基于知识图谱的国内外智慧建造研究可视化分析[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(6): 1-14.
- LUO Q M, HUA J M, HUANG L P, et al. Visualization analysis of domestic and overseas intelligent construction assisted by mapping knowledge domains [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(6): 1-14. (in Chinese)
- [3] DAVARI M, AGHABABA M P, BLAABJERG F, et al. An innovative, adaptive signal rectifier along with a switching controller for reliable primary control of GC-VSIs in CPS-based modernized microgrids [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(7): 8370-8387.
- [4] 蒋雪雁. 智慧建筑运维管理平台的应用研究:以某大型商业综合体项目为例[J]. *建筑经济*, 2021, 42(9): 78-82.
- JIANG X Y. Research on the application of intelligent building operation and maintenance management platform: Taking a large commercial complex project as an example [J]. *Construction Economy*, 2021, 42(9): 78-82. (in Chinese)
- [5] 郑秋怡, 周广东, 刘定坤. 基于长短时记忆神经网络的大跨拱桥温度-位移相关模型建立方法[J]. *工程力学*, 2021, 38(4): 68-79.
- ZHENG Q Y, ZHOU G D, LIU D K. Method of modeling temperature-displacement correlation for long-span arch bridges based on long short-term memory neural networks [J]. *Engineering Mechanics*, 2021, 38(4): 68-79. (in Chinese)
- [6] 杨启亮, 马智亮, 邢建春, 等. 面向信息物理融合的建筑信息模型扩展方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(10): 1406-1416.
- YANG Q L, MA Z L, XING J C, et al. An extension approach of building information modeling to cyber-physical systems [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48(10): 1406-1416. (in Chinese)
- [7] 段晓晨, 喇海霞, 胡天明, 等. 桥梁工程运维成本三维非线性智能控制研究[J]. *铁道工程学报*, 2020, 37(9): 102-107.
- DUAN X C, LA H X, HU T M, et al. Research on the 3D nonlinear intelligent control for bridge engineering operation and maintenance cost [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2020, 37(9): 102-107. (in Chinese)
- [8] 宋战平, 史贵林, 王军保, 等. 基于BIM技术的隧道协同管理平台架构研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(Sup2): 117-121.
- SONG Z P, SHI G L, WANG J B, et al. Framework of collaborative management platform for tunnels based on BIM technology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(Sup2): 117-121. (in Chinese)
- [9] 朱宏平, 翁顺, 王丹生, 等. 大型复杂结构健康精准体检方法[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(2): 215-226.
- ZHU H P, WENG S, WANG D S, et al. Precise structural health diagnosis of large-scale complex structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(2): 215-226. (in Chinese)
- [10] CHEN C, TANG L. BIM-based integrated management workflow design for schedule and cost planning of building fabric maintenance [J]. *Automation in Construction*, 2019, 107: 102944.
- [11] KIM K, KIM H, KIM W, et al. Integration of IFC objects and facility management work information using Semantic Web [J]. *Automation in Construction*, 2018, 87(5): 173-187.
- [12] BELUSSI L, BAROZZI B, BELLAZZI A, et al. A

- review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions [J]. *Journal of Building Engineering*, 2019, 25: 100772.
- [13] 王建伟, 高超, 董是, 等. 道路基础设施数字化研究进展与展望[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11): 101-124.  
WANG J W, GAO C, DONG S, et al. Current status and future prospects of existing research on digitalization of highway infrastructure [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(11): 101-124. (in Chinese)
- [14] LIU Z S, SHI G L, JIAO Z D, et al. Intelligent safety assessment of prestressed steel structures based on digital twins [J]. *Symmetry*, 2021, 13(10): 1927.
- [15] LIU Z S, SHI G L, ZHANG A S, et al. Intelligent tensioning method for prestressed cables based on digital twins and artificial intelligence [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(24): 7006.
- [16] 杨阳, 李青泽, 姚刚. 预制叠合板构件智能化识别与检测方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(1): 87-93.  
YANG Y, LI Q Z, YAO G. Intelligent identification and detection method of prefabricated laminated slab [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(1): 87-93. (in Chinese)
- [17] 刘占省, 刘子圣, 孙佳佳, 等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(6): 26-36.  
LIU Z S, LIU Z S, SUN J J, et al. Intelligent construction methods and model experiments based on digital twins [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(6): 26-36. (in Chinese)
- [18] 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. (in Chinese)
- [19] LU Q C, CHEN L, LI S, et al. Semi-automatic geometric digital twinning for existing buildings based on images and CAD drawings [J]. *Automation in Construction*, 2020, 115: 103183.
- [20] LU R D, BRILAKIS I. Digital twinning of existing reinforced concrete bridges from labelled point clusters [J]. *Automation in Construction*, 2019, 105: 102837.
- [21] LIU Z S, ZHANG A S, WANG W S. A framework for an indoor safety management system based on digital twin [J]. *Sensors*, 2020, 20(20): 5771.
- [22] MARAI O E, TALEB T, SONG J. Roads infrastructure digital twin: a step toward smarter cities realization [J]. *IEEE Network*, 2021, 35(2): 136-143.
- [23] KAEWUNRUEN S, LIAN Q. Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 1537-1551.
- [24] LU Q C, PARLIKAD A K, WOODALL P, et al. Developing a digital twin at building and city levels: A case study of west Cambridge campus [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 36(3): 05020004.
- [25] PENG Y, ZHANG M, YU F Q, et al. Digital twin hospital buildings: An exemplary case study through continuous lifecycle integration [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8846667.
- [26] LIU Z S, SHI G L, JIANG A T, et al. Intelligent discrimination method based on digital twins for analyzing sensitivity of mechanical parameters of prestressed cables [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1485.
- [27] 刘江, 蔡伯根, 王剑, 等. 专用短程通信辅助的车辆卫星定位故障检测方法[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(11): 265-281.  
LIU J, CAI B G, WANG J, et al. Dedicated short-range-communication-aided fault detection method for satellite-based vehicle positioning [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(11): 265-281. (in Chinese)
- [28] SAKIC P, CHUPIN C, BALLU V, et al. Geodetic seafloor positioning using an unmanned surface vehicle-contribution of direction-of-arrival observations [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 636156.
- [29] MCCABE B Y, HAMLEDARI H, SHAHI A, et al. Roles, benefits, and challenges of using UAVs for indoor smart construction applications [C]//ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering 2017. June 25-27, 2017, Seattle, Washington. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2017: 349-357.
- [30] URBINA CORONADO P D, LYNN R, LOUHICHI W, et al. Part data integration in the shop floor digital twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 48: 25-33.
- [31] 朱庆, 王所智, 丁雨淋, 等. 铁路隧道钻爆法施工智能管理的安全质量进度知识图谱构建方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(8): 1155-1164.  
ZHU Q, WANG S Z, DING Y L, et al. Construction method of "safety-quality-schedule" knowledge graph for intelligent management of drilling and blasting construction of railway tunnels [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(8): 1155-1164. (in Chinese)
- [32] BARARI A, SALES GUERRA TSUZUKI M, COHEN Y, et al. Editorial: Intelligent manufacturing systems towards industry 4.0 era [J]. *Journal of*

- Intelligent Manufacturing, 2021, 32(7): 1793-1796.
- [33] PATACAS J, DAWOOD N, KASSEM M. BIM for facilities management: A framework and a common data environment using open standards [J]. Automation in Construction, 2020, 120: 103366.
- [34] 南天辰, 蔡柔丹, 姜冬, 等. 群策式智能多联机末端在大学教学楼的设计应用与分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(Sup2): 120-126.  
NAN T C, CAI R D, JIANG D, et al. A designing analysis of the transformation in universities' teaching building about multi-line terminal's intelligent energy-saving based on group decisions [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2016, 38 (Sup2): 120-126. (in Chinese)
- [35] 潘毅, 刘扬良, 黄晨, 等. 大型铁路站房结构健康监测研究现状评述[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 70-80.  
PAN Y, LIU Y L, HUANG C, et al. A review of structural health monitoring of large railway stations [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 70-80. (in Chinese)
- [36] 李惠, 周文松, 欧进萍, 等. 大型桥梁结构智能健康监测系统集成技术研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(2): 46-52.  
LI H, ZHOU W S, OU J P, et al. A study on system integration technique of intelligent monitoring systems for soundness of long-span bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(2): 46-52. (in Chinese)
- [37] 胡振中, 冷烁, 袁爽. 基于BIM和数据驱动的智能运维管理方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(2): 199-207.  
HU Z Z, LENG S, YUAN S. BIM-based, data-driven method for intelligent operation and maintenance [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(2): 199-207. (in Chinese)
- [38] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 1-11.  
BAO Y Q, LI H. Artificial intelligence for civil engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(5): 1-11. (in Chinese)
- [39] MALIK J, ELHAYEK A, STRICKER D. WHSP-net: A weakly-supervised approach for 3D hand shape and pose recovery from a single depth image [J]. Sensors, 2019, 19(17): 3784.
- [40] 姚刚, 秦蔚壑, 周梦, 等. 工业化生产PC构件的BIM技术定位优化[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(2): 140-146, 166.  
YAO G, QIN W H, ZHOU M, et al. PC elements localization optimization with BIM technology in industrial production [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(2): 140-146, 166. (in Chinese)
- [41] 王志伟, 戴若彬, 张星冉, 等. 膜法污水处理技术研究应用动态与未来可持续发展思考[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(3): 86-103.  
WANG Z W, DAI R B, ZHANG X R, et al. Recent advances and overview on sustainable development of membrane-based wastewater treatment technology [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(3): 86-103. (in Chinese)
- [42] 张勇, 梁晓珂, 袁丽娟. 面向节能的建筑设计多目标优化方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 107-112.  
ZHANG Y, LIANG X K, YUAN L J. Multi-objective optimization algorithm for building energy-saving design [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 107-112. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)