

# 数字孪生驱动的桥梁智能建造方法

朱军<sup>1</sup>, 朱庆<sup>1</sup>, 祝兵<sup>2</sup>, 王波<sup>3</sup>, 梁策<sup>4</sup>

1. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031;

3. 中铁大桥科学研究院有限公司, 武汉 430034;

4. 中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所, 北京 100081

**摘要:**智能化是桥梁建设的重要方向, 数字孪生是实现桥梁智能建造的有效途径。数字孪生将现实环境中桥梁的结构、状态和行为等映射到虚拟环境, 为透彻理解和精准控制桥梁建造过程提供新手段。本文首先分析了桥梁及其环境高精度数字孪生与桥梁智能建造背景及发展趋势, 然后提出了桥梁建造全过程数字孪生构建方法, 探讨了空天地一体化监测数据关联融合、数字孪生场景智能构建与增强可视化、过程动态仿真与智能预测等关键技术, 最后以复杂艰险山区大型桥梁建造为例开展案例应用分析, 本文方法可望为复杂环境大型桥梁工程智能建造提供有效的理论指导和关键技术支撑。

**关键词:** 遥感, 虚拟地理环境, 桥梁智能建造, 数字孪生, 仿真预测, 智能建模

**中图分类号:** P208/P2

**引用格式:** 朱军, 朱庆, 祝兵, 王波, 梁策. 2024. 数字孪生驱动的桥梁智能建造方法. 遥感学报, 28(5): 1340-1349

Zhu J, Zhu Q, Zhu B, Wang B and Ling C. 2024. Intelligent bridge construction method driven by digital twin. National Remote Sensing Bulletin, 28(5):1340-1349[DOI:10.11834/jrs.20232590]

## 1 引言

桥梁是跨越江河湖海、连接峡谷深沟、实现交通设施互联互通的关键节点与枢纽工程, 是扩大人类生存空间的重要渠道, 极大促进了经济发展与社会生活安全 (Fabianowski 和 Jakiel, 2019; Zhou 和 Zhang, 2019; 勾红叶等, 2020; 赵天祺等, 2021; 齐成龙等, 2022; 宋浩和韩广晖, 2022)。随着中国基础设施建设的不断进步, 桥梁建造逐渐从平原地带延伸至偏远山区, 更险峻、更复杂、更多变的桥梁施工环境, 致使桥梁建造过程中数据感知、仿真分析、信息管理极为困难, 施工品质保障仍有待提高 (张喜刚等, 2017; 王宏坤等, 2020)。为实现中国引领的桥梁建造智能化、产业化、专业化目标, 亟需依靠信息化和智能化手段全面支撑桥梁建造高标准、高质量的建设总要求。

桥梁智能建造是指综合应用互联网、大数据、

云计算、人工智能等现代新兴产业与高新技术, 实现桥梁建造过程中施工方法、人员调配、施工管理、环境感知等方面的全面感知、分析预测与智能管理, 实现桥梁建造全过程的一体化管理, 推进桥梁智能建造的信息化、智能化升级 (张喜刚等, 2017; 勾红叶等, 2020; 周绪红等, 2021; 王春生等, 2021; 王同军, 2021)。近年来国内外研究者为提高桥梁智能化建造水平, 相继开展了众多桥梁建造智能化研究。利用无人机、雷达、红外等多类型传感器进行桥梁信息感知, 并结合人工智能技术进行桥梁进度及品质检测研究, 进一步推进了桥梁建造过程中精准、高效的质量控制方法 (Karim等, 2020; Bolourian 和 Hammad, 2020; Jung等, 2020; Saleem等, 2021; 杨扬等, 2020; 《中国公路学报》编辑部, 2021; 贺拴海等, 2021); 将BIM技术与VR及GIS技术相结合, 将施工安全、进度及质量进行统一管理, 进一步提高了桥梁施

收稿日期: 2022-11-01; 预印本: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(编号:U2034202, 42271424, 42171397); 四川省交通运输科技项目(编号:2021-B-02); 西成铁路客运专线陕西有限责任公司科技研究开发计划项目(编号:西康高铁合(2021)24号)

第一作者简介: 朱军, 研究方向为虚拟地理环境与数字孪生。E-mail: zhujun@swjtu.edu.cn

工过程的智能化水平 (Zhang 等, 2021; 张翔 等, 2020; 王宏坤 等, 2020; 赵亚宁 等, 2020; 潘永杰 等, 2020); 利用数据挖掘及统计分析等方法对桥梁进行状态评价及模型预测, 进一步提高了桥梁建设过程中的安全保障 (Liu 等, 2020; Zhou 等, 2020; Zhang 等, 2020; Zhan 等, 2021; 马亚飞 等, 2020; 夏焯 等, 2021)。从智能建模、智能分析、智能预测等多个维度将传统桥梁施工过程与现代智能化技术结合, 实现桥梁的信息化、智能化建造必将推动中国“第三代桥梁工程”的发展 (勾红叶 等, 2021)。

数字孪生是实现桥梁智能建造的有效途径, 其将现实物理实体的属性、结构、状态、性能及行为映射到虚拟世界, 形成全要素互联且具有高保真度的桥梁虚拟地理环境 (谭建荣 等, 2018; 林琿 等, 2020; 杜明芳, 2021; 张新长 等, 2021; 李德仁, 2021; 李德仁 等, 2022; 朱庆 等, 2020, 2022), 可支持物理世界和信息世界的虚实映射和双向交互, 形成高保真动态多维多尺度数字化镜像, 从而具备对过去问题诊断、当前状态评估以及未来趋势预测的能力, 对提升桥梁建设品质与信息化管理水平具有重要意义 (Tao 和 Qi, 2019; 卢春房, 2018; 朱庆 等, 2020; 陶飞 等, 2019; 王同军, 2021; 卢春房和班新林, 2021)。因此, 亟需开展空天地一体化监测数据关联融合、数字孪生场景智能建模、过程动态仿真与智能预测及一体化集成管理等关键技术研究, 构建桥梁建造数字

孪生模型, 支持桥梁施工全过程动态仿真与智能管理, 有助于加快桥梁施工进度, 提高桥梁建造品质, 保障桥梁施工安全。

## 2 数字孪生驱动的桥梁智能建造方法

### 2.1 基本原理

总体研究思路如图1所示。通过引入虚拟地理环境与数字孪生理论, 对桥梁建造全过程进行动态数据和仿真模型双驱动的空间建模与虚实映射。具体过程如下: 基于空天地一体化观测技术获取的多源异构数据, 构建空天地一体化监测数据关联融合模型, 实现对桥梁建造物理空间的数据感知, 使桥梁建造过程信息能够“看得全”; 在桥梁建造过程动态数据驱动下, 研究桥梁建造数字孪生场景智能建模方法, 实现桥梁建造环境的精细刻画与准确描述, 使桥梁建造环境能够“看得清”; 在桥梁建造孪生场景支撑下, 结合多源监测数据, 建立桥梁建造过程动态仿真与智能预测方法, 支持桥梁建造过程状态与品质的动态诊断、评估与智能预测, 使桥梁结构状态变化能够“看得懂”; 一体化集成桥梁数据—仿真模型—建模知识, 建立桥梁建造全过程智能管理机制, 对桥梁建造过程进行主动控制, 使桥梁建造过程能够“管得准”, 完成桥梁建造过程“数据感知—仿真分析—智能预测—优化控制”的迭代交互演化和智能闭环, 为桥梁智能建造提供新的研究思路和方法。

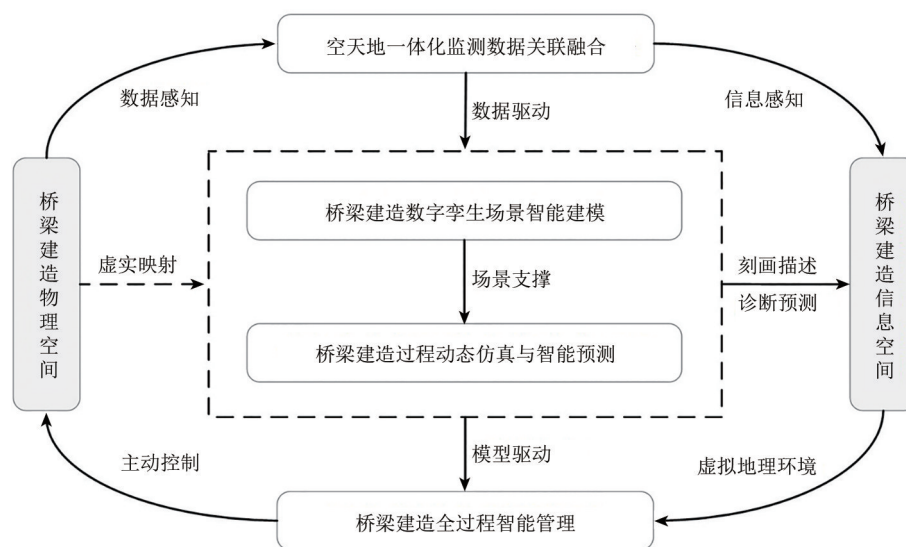


图1 数字孪生驱动的桥梁智能建造方法原理

Fig. 1 Principle of the bridge intelligent construction method driven by digital twins

## 2.2 空天地一体化监测数据关联融合

桥梁是跨越天堑的纽带，其施工环境复杂，亟需综合运用卫星遥感、无人机航拍、视频监控、GNSS等观测技术来全面感知桥梁建造环境，而空天地一体化监测数据存在多源多模态、多维多尺

度、时空基准不统一、动态变化等特点。因此，本文面向桥梁施工过程中人机物多维度空间数据需求，通过构建空天地一体化监测数据关联融合模型，提升桥梁建造场景多源监测数据的综合利用效率。具体技术路线如图2所示。

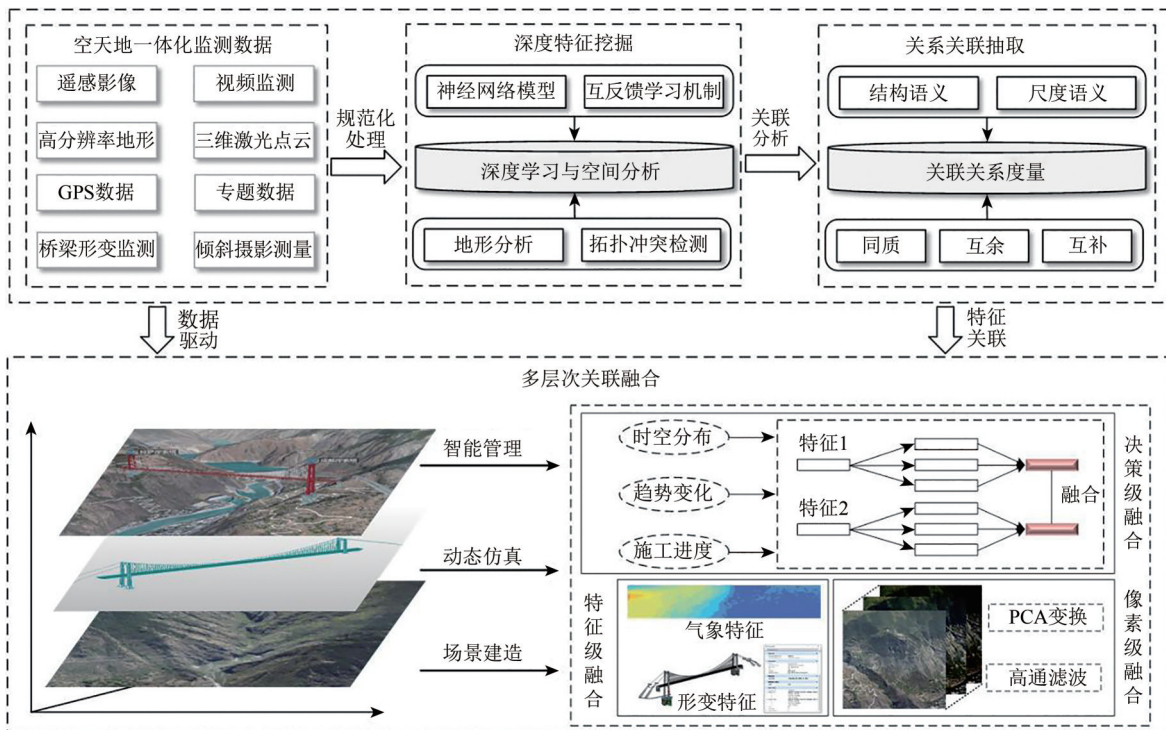


图2 桥梁建造过程数据多层次关联融合

Fig. 2 Multi-level correlation and integration of data during the bridge construction process

针对遥感影像、形变监测、倾斜模型、视频监控等桥梁建造环境空天地一体化监测数据，剖析桥梁数据的几何、拓扑、尺度、语义与时空等特征，并进行格式转换、时空尺度统一等规范化处理，构建深度卷积神经网络，提取桥梁建造过程数据结构、形态、语义、行为等深度特征，顾及数据特征可信度支持度，设计多源数据关联规则抽取算法，建立基于多源多特征数据的像素级、特征级、决策级多层次关联融合模型，实现桥梁建造场景空天地一体化监测数据的全面感知，为桥梁智能建造提供关键技术支撑。具体计算公式如下：

$$\text{Confidence}(X \Rightarrow Y) = \frac{|\{t_i\} X \cup Y \subseteq t_i\}|}{|\{t_i\} X \subseteq t_i\}|} \quad (1)$$

$$\text{Support}(X \Rightarrow Y) = \frac{|\{t_i\} X \cup Y \subseteq t_i\}|}{|T|} \quad (2)$$

式中，Confidence表示可信度，Support表示支持度； $T$ 表示事务集， $X$ 、 $Y$ 代表不同数据特征，而 $t_i$

则表示事务集 $T$ 中的成员。关联规则 $X \Rightarrow Y$ 的可信度表示在事务中特征 $X$ 出现的前提下特征 $Y$ 出现的概率。关联规则 $X \Rightarrow Y$ 的支持度表示在特征 $X$ 与特征 $Y$ 同时出现的概率。若 $\text{Confidence}(X \Rightarrow Y)$ 和 $\text{Support}(X \Rightarrow Y)$ 大于给定的阈值，则说明特征 $X$ 和 $Y$ 间存在较强的关联联系。

## 2.3 桥梁建造数字孪生场景智能建模

桥梁施工环境复杂、环境对象繁杂且施工过程动态变化，导致桥梁数字孪生场景构建困难，无法实时反映桥梁建造全生命周期状态变化过程。针对全要素互联且具有高保真度的桥梁虚拟地理环境构建需求，实现桥梁建造实体属性、结构、状态、性能及行为精准虚实映射，亟需突破桥梁工程实体、地理地质以及地上下场景融合建模等关键技术，提升桥梁建造品质与保障桥梁建设安全。桥梁建造数字孪生场景智能建模方法如图3所示。

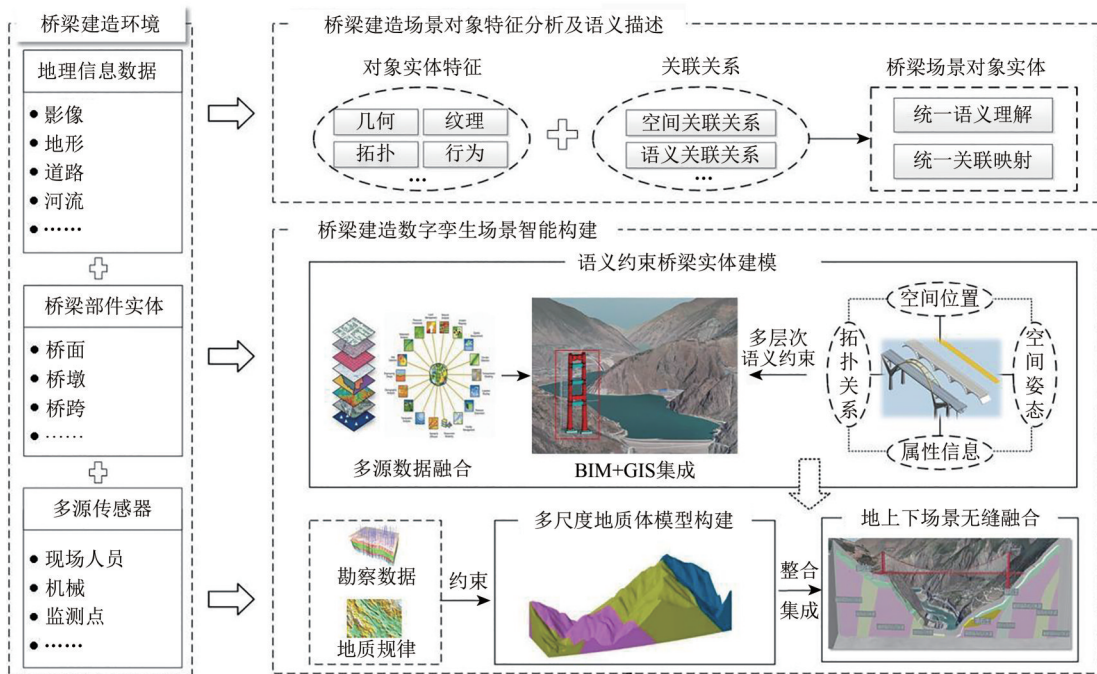


图3 桥梁数字孪生场景智能建模

Fig. 3 Intelligent modeling of bridge digital twin scenarios

分析桥梁建造环境各类实体的几何、纹理、拓扑、语义、行为等特征及相互关系,建立桥梁场景对象实体的统一语义描述,融合BIM模型与多源监测数据,构建包含空间位置、拓扑关系与空间姿态等多层次语义约束,实现桥梁建造基础地理场景与BIM模型的自动集成,结合线状勘察数据与地质规律,通过“点、线、面、体”逐层和“围合体”建模,快速构建多尺度地质体模型,根据几何—拓扑—语义关系统一集成整合地理地质信息,实现地上下地理地质场景的三维一体化无缝融合建模表达。

#### 2.4 桥梁建造过程动态仿真及智能预测

桥梁施工工序繁多、工艺复杂且精度要求高,实际施工过程不仅需要考虑到桥梁自身荷载及临时施工荷载作用等内应力影响,还需考虑不良地质处滑坡泥石流等地质灾害、山洪等外应力的影响,尤其是在复杂艰险山区还需要考虑更多的影响因素。针对桥梁建造过程在多影响因素下结构状态精准分析与施工风险超前预测的需求,需要揭示多场耦合荷载作用下桥梁建造过程力学行为,突破桥梁建造过程动态仿真与智能预测关键技术方法。桥梁建造过程动态仿真与智能预测研究思路如图4所示。

剖析桥梁施工过程中桥梁张拉、徐变、位移等内应力因素及其相互关系,探讨桥梁施工过程

中内应力及外应力影响因素,综合分析典型影响因素的表现形式及相互影响特征,确定多场耦合荷载作用下的桥梁力学行为;利用多场耦合作用下的力学行为进行理论数据分析,构建桥梁建造全过程的多尺度结构仿真可视化模型,建立全要素高铁桥梁建造过程数字孪生仿真构架,实现桥梁建造过程动态仿真分析;基于多传感器时序监测数据与全过程动态仿真结果,提出桥梁施工全过程的关键控制因素(线形、应力和应变等)及健康状态预测方法,支持桥梁建造过程的智能预测。

#### 2.5 数据—模型—知识一体化集成管理

现实世界与虚拟世界的虚实映射和双向交互构成了桥梁建造数字孪生场景,如何基于虚拟地理环境实现桥梁建造“数据感知—仿真分析—超前预测—优化控制”,对合理建造工序的动态确定与桥梁结构安全的智能管理十分关键。而桥梁数据、仿真模型与建模知识是构成这一切的基础,桥梁数据承载了描述桥梁对象实体的关键信息,模型映射了桥梁建造场景的真实表达,建造知识概括了桥梁建造场景对象关系、界定了施工过程规范规则。以知识为导向,关联组织数据与模型,建立数据—模型—知识一体化集成管理方法是现实与虚拟场景连接的核心。数据—模型—知识一体化集成管理研究思路如图5所示。

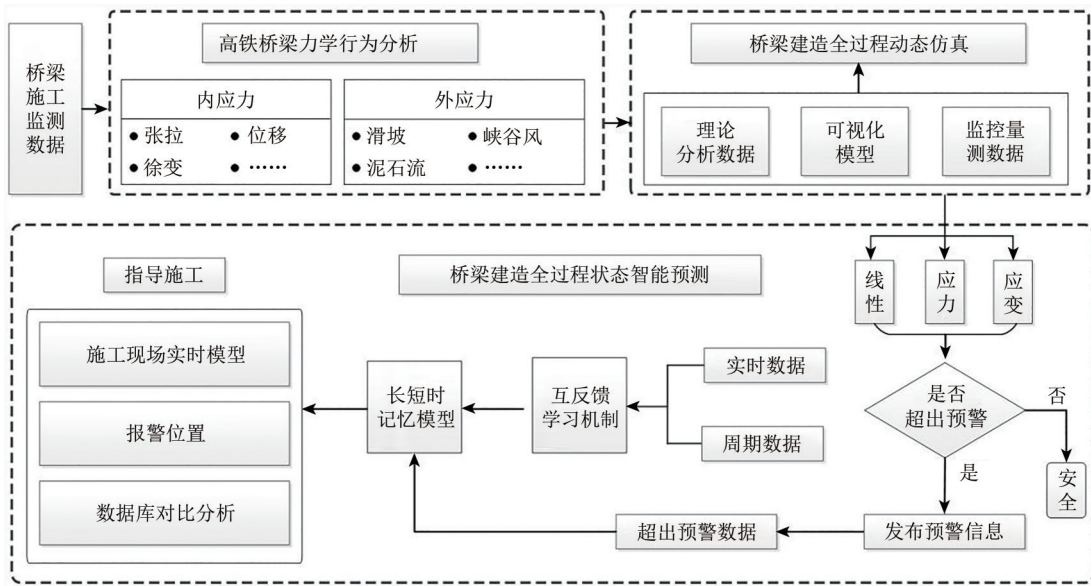


图4 桥梁建造过程动态仿真与智能预测

Fig. 4 Dynamic simulation and intelligent prediction of bridge construction process

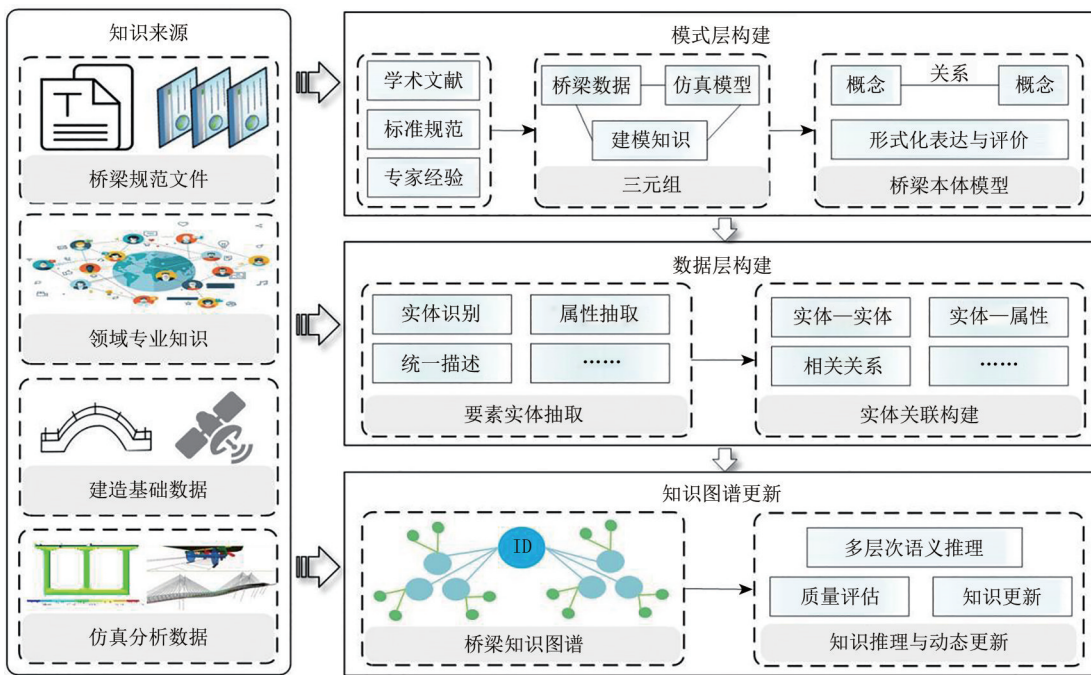


图5 数据—模型—知识一体化集成管理

Fig. 5 Integrated management of data-model-knowledge

梳理桥梁建造场景的基础数据、仿真模型及领域知识等知识来源，探究顾及桥梁建造知识的桥梁本体结构组织方式，分析结构化、半结构化和非结构化多种形式的桥梁知识来源结构特征，建立面向多源数据类型的桥梁知识抽取方法，研究桥梁建造知识存储方式，构建桥梁建造场景知识图谱，建立耦合外部需求变化与内部知识推理的桥梁建造知识图谱自主循环优化动态更新机制，形成数据—模型—知识的一体化集成管理模型，

可实现桥梁数据—仿真模型—建模知识的一体化集成与精准关联分析。

### 3 应用实践思考

为验证所提方法的有效性与其可行性，选择复杂艰险山区在建大型桥梁为研究对象，集成上述关键模型以及核心算法，开展桥梁建造孪生场景构建、动态仿真模拟及精细化智能管理研究，其案例实践总体技术路线如图6所示。

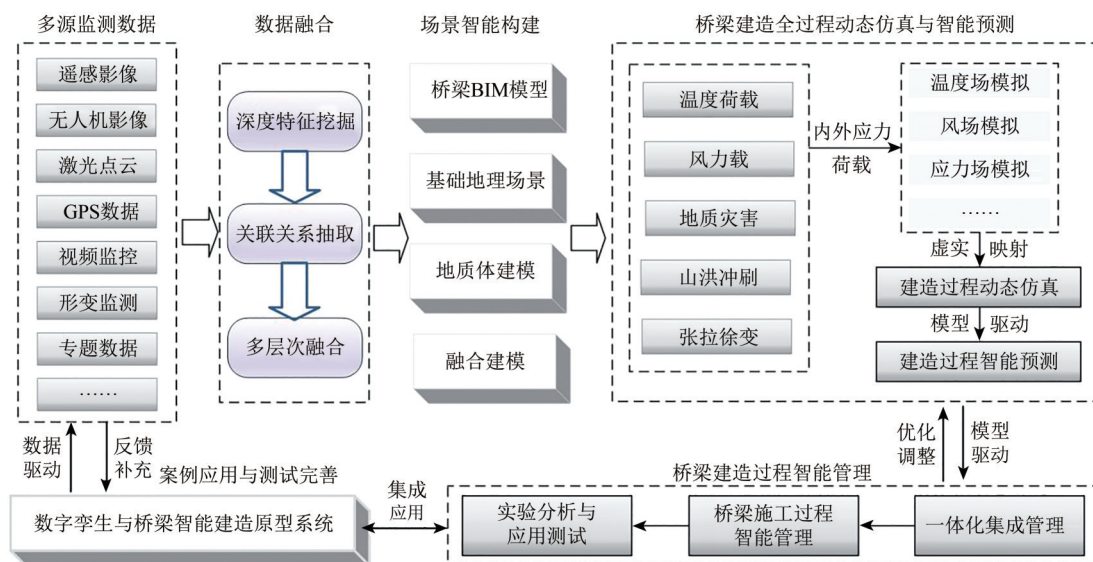


图6 案例实践技术路线

Fig. 6 Framework of case practice

### 3.1 多源数据接入及建造孪生场景构建

桥梁孪生场景构建可以实时反映建造过程全生命周期状态变化，为开展桥梁智能建造精细化管理提供基础平台。通过接入遥感影像、GNSS、视频等空地一体化监测数据，进行数据清洗、

时空基准统一、格式转换等一系列规范化处理，利用多源数据关联规则抽取算法，完成多源多层次数据融合，自动集成桥梁BIM模型与虚拟地理场景，结合多尺度的地质体模型快速构建方法，动态构建桥梁建造数字孪生场景，如图7所示。



图7 多源数据接入与桥梁建造孪生场景构建

Fig. 7 Multi-source data access and construction of bridge twin-scene

在某大桥实际建造案例中，通过联合GPS、传感器监测与物联网等技术手段，对桥梁建造环境、主塔沉降和偏位、主梁应力和振动等进行实时监测，以期及时掌握桥梁结构建造进度和状态的基本情况，其中温度、降雨量、风速风向等外部环境因素及应力等内部结构因素的采集频率为1小

时，通过对多源监测数据进行挖掘分析，用于支撑桥梁建造场景动态更新

### 3.2 桥梁建造数字孪生场景动态仿真模拟

桥梁建造过程动态仿真模拟，能够为桥梁施工提供决策参考，可有效地提升桥梁建造品质，保障桥梁建设安全。因此本文综合考虑桥梁建造

环境影响因素, 基于构建的桥梁建造数字孪生场景与施工进度计划台账数据, 耦合空天地一体化监测数据与桥梁建造过程力学仿真分析结果, 开

展了桥梁建造过程温度场环境、风场环境、施工进度管控、液压爬模、虚拟拼装以及结构应力变化等系列动态仿真模拟应用案例实践, 如图8所示。

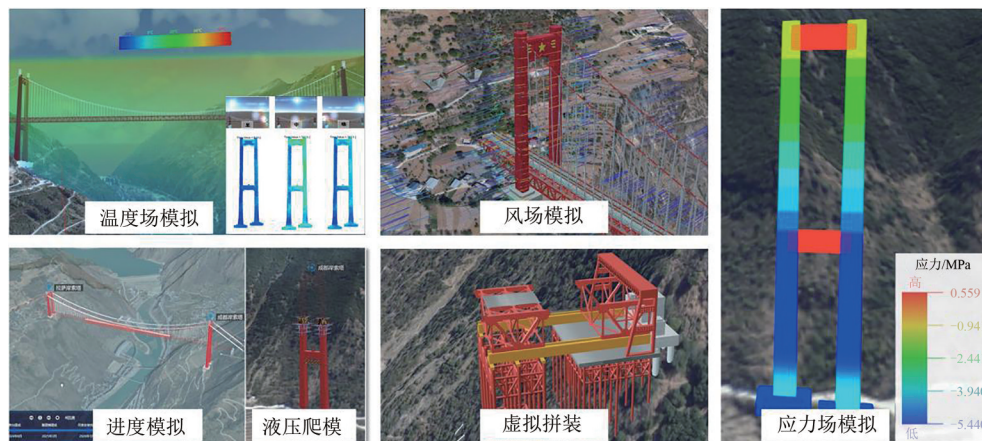


图8 桥梁建造数字孪生场景动态仿真模拟

Fig. 8 Dynamic simulation of bridge construction digital twin scenarios

例如, 在风、温度、重力等环境因素影响下, 桥梁可能会产生较大的挠度与振动, 从而对桥梁构件拼装过程的质量与安全造成不利影响。利用桥梁环境监测数据, 结合 ANSYS、FIUENT、MIDAS 等工具对多场耦合下桥梁结构的变形进行模拟、分析、预测, 再根据桥梁变形趋势, 在孪生场景中对桥梁实施虚拟预拼装, 提前发现、提早诊断环境影响下桥梁构件的运输及吊装问题, 从而为真实的施工现场提供指导, 实现“由实到虚”“由虚到实”的桥梁建造。

### 3.3 桥梁智能建造精细化管理

桥梁建造过程周期长, 施工工艺繁杂, 结构部件众多, 对桥梁建造过程人机物料法等环节进行精细化管理, 对整个桥梁工程建设甚至桥梁运营管理具有重要意义。为了突破传统的桥梁施工过程管理方法的局限性, 本文综合考虑桥梁建造过程各施工环节、桥梁地上下结构、地理地质环境等, 通过桥梁建造数字孪生场景, 开展了桥梁智能建造过程中临建设施、地质体、桥梁结构部件以及属性数据查询等精细化管理应用案例实践, 如图9所示。

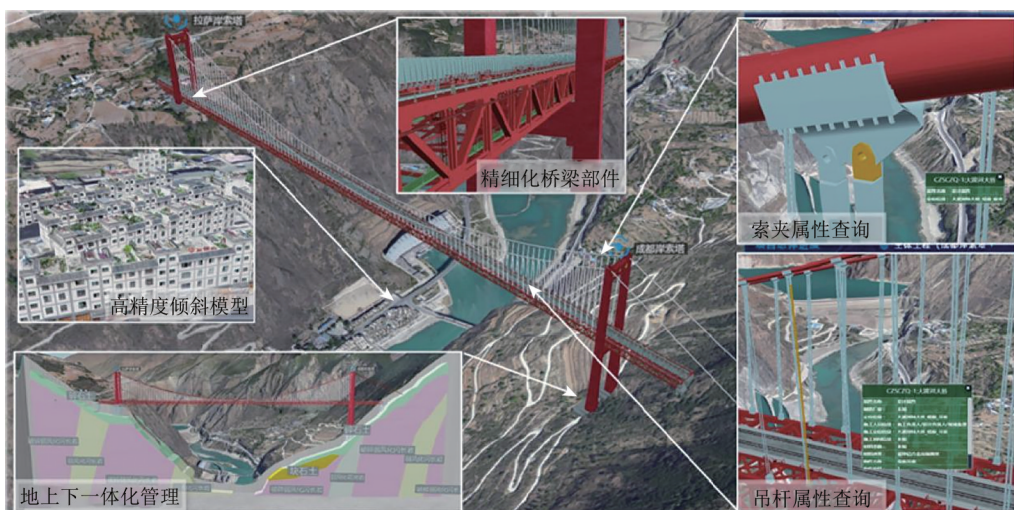


图9 桥梁智能建造精细化管理

Fig. 9 Refined management of intelligent bridge construction

## 4 结 论

本文提出了数字孪生驱动的桥梁智能建造方法,分析了空天地一体化监测数据融合、建造场景智能建模、仿真计算、数据—模型—知识一体化集成管理关键技术,进行了典型案例实践,介绍了桥梁建造全过程的数据感知、仿真分析、智能预测与优化控制等技术方法,为保障桥梁施工安全与建造品质,为切实提升桥梁建造智能化、信息化水平提供强有力的科技支撑。以下几个方面将是进一步研究的关键内容:

(1) 进一步加强物联网、扩展现实、空天地一体化监测、5G、区块链等技术的深度融合,通过与新技术结合为物理实体提供多维度、多时空尺度的高保真数字化映射。

(2) 通过多类型、多层次、多地域和多周期的应用实践与凝练总结,形成施工进度管理、精细化查询、仿真模拟等标准与规范,确保桥梁数字孪生智能建造中的共性关键技术推广应用,为落地应用过程中提供标准的指导与参考。

(3) 突破现有桥梁智能建造侧重单体化建模、变形监测、稳定性分析以及数字化平台建设等局限,充分利用数字孪生汇聚的时空大数据,发展通用空间智能,实现“人机料法环”全生命周期整体智治。

## 参考文献

- Bolourian N and Hammad A. 2020. LiDAR-equipped UAV path planning considering potential locations of defects for bridge inspection. *Automation in Construction*, 117: 103250 [DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103250]
- Du M F. 2021. Research on the development of new technology and business form of China intelligent construction. *Construction Technology*, 50(13): 54-59 (杜明芳. 2021. 中国智能建造新技术新业态发展研究. *施工技术*, 50(13): 54-59) [DOI: 10.7672/sjgs2021130054]
- Editorial Office of “Chinese Journal of Highways”. 2021. Review on China's bridge engineering research: 2021. *China Journal of Highway and Transport*, 34(2): 1-97 (《中国公路学报》编辑部. 2021. 中国桥梁工程学术研究综述·2021. *中国公路学报*, 34(2): 1-97) [DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.02.001]
- Fabianowski D and Jakiel P. 2019. An expert fuzzy system for management of railroad bridges in use. *Automation in Construction*, 106: 102856 [DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102856]
- Gou H Y, Yang B, Hua H, Xie X, Liu C, Liu Y and Pu Q H. 2020. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2019. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 42(5): 14-27 (勾红叶, 杨彪, 华辉, 谢蕊, 刘畅, 刘雨, 蒲黔辉. 2020. 桥梁信息化及智能桥梁2019年度研究进展. *土木与环境工程学报(中英文)*, 42(5): 14-27) [DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.103]
- Gou H Y, Yang B, Liu Y and Pu Q H. 2021. Deformation mapping relationship and running safety evaluation of train-track-bridge system for high-speed railway in complex conditions. *China Journal of Highway and Transport*, 34(4): 162-173 (勾红叶, 杨彪, 刘雨, 蒲黔辉. 2021. 复杂条件下车—轨—桥变形映射关系及行车安全评价. *中国公路学报*, 34(4): 162-173) [DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.04.014]
- He S H, Wang A H, Zhu Z and Zhao Y. 2021. Research progress on intelligent detection technologies of highway bridges. *China Journal of Highway and Transport*, 34(12): 12-24 (贺拴海, 王安华, 朱钊, 赵煜. 2021. 公路桥梁智能检测技术研究进展. *中国公路学报*, 34(12): 12-24) [DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.12.002]
- Jung S, Choi D, Song S and Myung H. 2020. Bridge inspection using unmanned aerial vehicle based on HG-SLAM: hierarchical graph-based SLAM. *Remote Sensing*, 12(18): 3022 [DOI: 10.3390/rs12183022]
- Karim M M, Dagli C H and Qin R W. 2020. Modeling and simulation of a robotic bridge inspection system. *Procedia Computer Science*, 168: 177-185 [DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.276]
- Li D R. 2021. Smart city based on digital twin. *China Internet*, (7): 12 (李德仁. 2021. 基于数字孪生的智慧城市. *互联网天地*, (7): 12)
- Li D R, Zhang H Y and Jin W J. 2022. The mission of geo-spatial information science in new infrastructure era. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 47(10): 1515-1522 (李德仁, 张洪云, 金文杰. 2022. 新基建时代地球空间信息学的使命. *武汉大学学报(信息科学版)*, 47(10): 1515-1522) [DOI: 10.13203/j.whugis20220078]
- Lin H, Hu M Y, Chen M, Zhang F, You L and Chen Y T. 2020. Cognitive transformation from geographic information system to virtual geographic environments. *Journal of Geo-Information Science*, 22(4): 662-672 (林珩, 胡明远, 陈旻, 张帆, 游兰, 陈宇婷. 2020. 从地理信息系统到虚拟地理环境的认知转变. *地球信息科学学报*, 22(4): 662-672) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.200048]
- Liu Y F, Nie X, Fan J S and Liu X G. 2020. Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 35(5): 511-529 [DOI: 10.1111/mice.12501]
- Lu C F. 2018. Challenges facing transport infrastructure. *China Highway*, (15): 22-23 (卢春房. 2018. 交通基础设施面临的挑战. *中国公路*, (15): 22-23) [DOI: 10.13468/j.cnki.chw.2018.15.004]
- Lu C F and Ban X L. 2021. Health management of railway bridge based on testing technology. *China Railway*, (9): 11-17 (卢春房, 班新林. 2021. 以检测技术为基础做好铁路桥梁健康管理. *中国铁路*, (9): 11-17) [DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2021.09.011]
- Ma Y F, Ouyang Q B, Wang G D, Wang L and Zhang J R. 2020. Fatigue life prediction for suspender based on equivalent initial flaw size. *Journal of Transport Science and Engineering*, 36(2): 52-57 (马亚飞, 欧阳清波, 汪国栋, 王磊, 张建仁. 2020. 基于等效初始裂纹尺寸的吊杆疲劳寿命预测. *交通科学与工程*, 36(2): 52-57)

- [DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.009]
- Pan Y J, Liu X G, Cai D G and Zhao X X. 2020. Research on correlation of railway bridge BIM model and full life cycle information oriented to operation and maintenance. *China Railway*, (5): 73-80 (潘永杰, 刘晓光, 蔡德钧, 赵欣欣. 2020. 面向运维的铁路桥梁 BIM 模型及全生命周期信息关联研究. *中国铁路*, (5): 73-80) [DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2020.05.073]
- Qi C L, Kang Y G, Wang Y, Song S F and Xu H Q. 2022. Intelligent design and construction system scheme of Hangzhou bay bridge. *Railway Technical Innovation*, (3): 30-35 (齐成龙, 康银庚, 王永, 宋树峰, 徐洪权. 2022. 杭州湾跨海大桥智能设计与建造体系方案. *铁路技术创新*, (3): 30-35) [DOI: 10.19550/j.issn.1672-061x.2022.01.29.001]
- Saleem M R, Park J W, Lee J H, Jung H J and Sarwar M Z. 2021. Instant bridge visual inspection using an unmanned aerial vehicle by image capturing and geo-tagging system and deep convolutional neural network. *Structural Health Monitoring*, 20(4): 1760-1777 [DOI: 10.1177/1475921720932]
- Song H and Han G H. 2022. Intelligent span arrangement of railway bridges based on BIM and AI technology. *Railway Computer Application*, 31(7): 32-36 (宋浩, 韩广晖. 2022. 基于 BIM 和 AI 技术的铁路桥梁智能布跨研究. *铁路计算机应用*, 31(7): 32-36) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-8451.2022.07.06]
- Tan J R, Liu Z Y and Xu J H. 2018. Intelligent products and equipment led by new-generation artificial intelligence. *Strategic Study of CAE*, 20(4): 35-43 (谭建荣, 刘振宇, 徐敬华. 2018. 新一代人工智能引领下的智能产品与装备. *中国工程科学*, 20(4): 35-43) [DOI: 10.15302/J-SSCAE-2018.04.007]
- Tao F, Liu W R, Zhang M, Hu T L, Qi Q L, Zhang H, Sui F Y, Wang T, Xu H, Huang Z G, Ma X, Zhang L C, Cheng J F, Yao N K, Yi W M, Zhu K Z, Zhang X S, Meng F J, Jin X H, Liu Z B, He L R, Cheng H, Zhou E Z, Li Y, Lü Q and Luo Y M. 2019. Five-dimension digital twin model and its ten applications. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 25(1): 1-18 (陶飞, 刘蔚然, 张萌, 胡天亮, 戚庆林, 张贺, 隋芳媛, 王田, 徐慧, 黄祖广, 马昕, 张连超, 程江峰, 姚念奎, 易旺民, 朱恺真, 张新生, 孟凡军, 金小辉, 刘中兵, 何立荣, 程辉, 周二专, 李洋, 吕倩, 罗椅民. 2019. 数字孪生五维模型及十大领域应用. *计算机集成制造系统*, 25(1): 1-18) [DOI: 10.13196/j.cims.2019.01.001]
- Tao F and Qi Q L. 2019. Make more digital twins. *Nature*, 573(7775): 490-491 [DOI: 10.1038/d41586-019-02849-1]
- Wang C S, Wang Q and Duan L. 2021. Leading the development trend of steel bridge technology-design theory and intelligent construction of long-life steel bridges. *China Highway*, (11): 48-49 (王春生, 王茜, 段兰. 2021. 引领钢桥科技发展趋势——长寿命钢桥设计理论与智能建造. *中国公路*, (11): 48-49) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-3897.2021.11.018]
- Wang H K, Liu J J, Zhang Y G, Guan G Y and Wu T T. 2020. BIM intelligent management system for maintenance and reconstruction of Nanjing Yangtze River Bridge. *Highway*, 65(11): 361-365 (王宏坤, 刘锦军, 张义桂, 关高勇, 吴涛洮. 2020. 南京长江大桥维修改造 BIM 智能管理系统. *公路*, 65(11): 361-365)
- Wang T J. 2021. Research on key technologies for intelligent construction of railway bridge. *China Railway*, (9): 1-10 (王同军. 2021. 铁路桥梁智能建造关键技术研究. *中国铁路*, (9): 1-10) [DOI: 10.19549/j.issn.1001-683x.2021.09.001]
- Xia Y, Lei X M, Wang P, Liu G M and Sun L M. 2021. Regional bridge information integration and data mining for network-level assessment. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 53(3): 66-74 (夏烨, 雷晓鸣, 王鹏, 刘国明, 孙利民. 2021. 针对网级评估的区域桥梁信息集成与数据挖掘. *哈尔滨工业大学学报*, 53(3): 66-74) [DOI: 10.11918/201908024]
- Yang Y, Wang L F and Zhang Y F. 2020. Development and challenging issues of bridge detection technology using unmanned aerial vehicles. *Modern Transportation Technology*, 17(4): 27-32 (杨扬, 王连发, 张宇峰. 2020. 无人机桥梁检测技术进展与瓶颈问题分析. *现代交通技术*, 17(4): 27-32) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-9889.2020.04.006]
- Zhan J W, Zhang F, Siahkouhi M, Kong X and Xia H. 2021. A damage identification method for connections of adjacent box-beam bridges using vehicle-bridge interaction analysis and model updating. *Engineering Structures*, 228: 111551 [DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111551]
- Zhang K C, Wang C and Liu X S. 2020. Research on construction of highway bridge quality engineering based on BIM technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 510(5): 052092 [DOI: 10.1088/1755-1315/510/5/052092]
- Zhang X, Lian F, Wang T M and Ma P. 2020. BIM+ Internet application in construction of Bianyuzhou Yangtze river bridge. *Railway Technical Innovation*, (3): 70-75 (张翔, 连飞, 王同民, 马攀. 2020. BIM+互联网技术在鳊鱼洲长江大桥施工中的应用. *铁路技术创新*, (3): 70-75) [DOI: 10.19550/j.issn.1672-061x.2020.03.070]
- Zhang X C, Li S Y, Zhou Q M and Sun Y. 2021. The rationale and innovative thinking of building Digital Twin City. *Science of Surveying and Mapping*, 46(3): 147-152, 168 (张新长, 李少英, 周启鸣, 孙颖. 2021. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考. *测绘科学*, 46(3): 147-152, 168) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.03.022]
- Zhang X G, Liu G, Ma J H, Wu H B, Fu B Y and Gao Y. 2017. Current situation and prospect of bridge technology in China. *China Highway*, (5): 40-45 (张喜刚, 刘高, 马军海, 吴宏波, 付佰勇, 高原. 2017. 中国桥梁技术的现状与展望. *中国公路*, (5): 40-45) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-3897.2017.05.010]
- Zhang Y M, Wang H, Mao J X, Xu Z D and Zhang Y F. 2021. Probabilistic framework with Bayesian optimization for predicting typhoon-induced dynamic responses of a long-span bridge. *Journal of Structural Engineering*, 147(1): 04020297 [DOI: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002881]
- Zhao T Q, Gou H Y, Chen X Y, Li W H, Liang H, Chen Z H and Zhou S Q. 2021. State-of-the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2020. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 43(S1): 268-279 (赵天祺, 勾红叶, 陈萱颖, 李文昊, 梁浩, 陈子豪, 周思清. 2021. 桥梁信息化及智能桥梁 2020 年度研究进展. *土木与环境工程学报(中英文)*, 43(S1): 268-279) [DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.230]
- Zhao Y N, Wang H, Gao H, Zhu Q X, Wang F Q and Xie Y S. 2020. Design and application of stress monitoring scheme for high-speed railway continuous girder bridge construction based on BIM. *Railway Standard Design*, 64(11): 68-73 (赵亚宁, 王浩, 郜辉, 祝

- 青鑫, 王飞球, 谢以顺. 2020. 基于BIM的高铁连续梁施工应力监控方案设计及应用. 铁道标准设计, 64(11): 68-73 [DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201910070002]
- Zhou X H, Liu J P, Cheng G Z, Li D S, Huang T, Liang J H, Liu H and Liu Y X. 2021. Intelligent virtual trial assembly of large and complex steel arch bridges based on point cloud data. China Journal of Highway and Transport, 34(11): 1-9 (周绪红, 刘界鹏, 程国忠, 李东声, 黄涛, 梁俊海, 刘虎, 刘雨鑫. 2021. 基于点云数据的大型复杂钢拱桥智能虚拟拼装方法. 中国公路学报, 34(11): 1-9) [DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.11.001]
- Zhou X H and Zhang X H. 2019. Thoughts on the development of bridge technology in China. Engineering, 5(6): 1120-1130 [DOI: 10.1016/j.eng.2019.10.001]
- Zhou Y, Pei Y L, Li Z W, Fang L, Zhao Y and Yi W J. 2020. Vehicle weight identification system for spatiotemporal load distribution on bridges based on non-contact machine vision technology and deep learning algorithms. Measurement, 159: 107801 [DOI: 10.1016/j.measurement.2020.107801]
- Zhu Q, Zhang L G, Ding Y L, Hu H, Ge X M, Liu M W and Wang W. 2022. From real 3D modeling to digital twin modeling. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 51(6): 1040-1049 (朱庆, 张利国, 丁雨淋, 胡翰, 葛旭明, 刘铭崑, 王玮. 2022. 从实景三维建模到数字孪生建模. 测绘学报, 51(6): 1040-1049) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20210640]
- Zhu Q, Zhu J, Huang H P, Wang W and Zhang L G. 2020. Real 3D spatial information platform and digital twin Sichuan-Tibet railway. High Speed Railway Technology, 11(2): 46-53 (朱庆, 朱军, 黄华平, 王玮, 张利国. 2020. 实景三维空间信息平台与数字孪生川藏铁路. 高速铁路技术, 11(2): 46-53) [DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2020.02.008]

## Intelligent bridge construction method driven by digital twin

ZHU Jun<sup>1</sup>, ZHU Qing<sup>1</sup>, ZHU Bing<sup>2</sup>, WANG Bo<sup>3</sup>, LIANG Ce<sup>4</sup>

1. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. Faculty of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
3. China Railway Bridge Science Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430034, China;
4. Institute of Computing Technologies, China Academy of Railway Sciences Co. Ltd., Beijing 100081, China

**Abstract:** In recent years, China's infrastructure construction has expanded into remote, rugged mountainous regions, making bridge construction more challenging than ever before. These difficult environments make collecting data, simulating scenarios, and managing information effectively extremely challenging, resulting in the need for improved quality assurance during construction. To meet these challenges, the concept of digital twinning has emerged as a crucial tool for achieving intelligent construction. By mapping the attributes, structures, states, performances, and behaviors of real-world bridges onto a virtual twin, a highly realistic, interconnected digital representation of the bridge and its surroundings can be created. This virtual geographic environment provides a powerful means of comprehending and controlling the construction more precisely. This paper provides an in-depth analysis of the background and development trends of high-precision digital twinning for bridges and their environment as well as intelligent bridge construction. This paper introduces the theory of virtual geographic environments and digital twinning, and explores the use of dynamic data and simulation models to drive spatial modeling and virtual-real mapping throughout the bridge construction. The proposed approach is divided into four stages. First, a monitoring data correlation fusion model is constructed by integrating space, air, and ground monitoring technology. This step enables data perception of the physical space of the bridge construction and makes information on the bridge construction visible. Second, intelligent modeling methods are studied for the digital twinning scene of bridge construction. This step achieves a refined characterization and accurate description of the bridge construction environment using advanced modeling techniques. Third, dynamic simulation and intelligent prediction methods are established for bridge construction. This step utilizes the bridge construction digital twinning scene and combines it with multisource monitoring data to enable dynamic diagnosis, evaluation, and intelligent prediction of the states and quality of bridge construction. Fourth, the bridge data, simulation models, and modeling knowledge are integrated to establish an intelligent management mechanism for the entire bridge construction. This step enables actively controlling the construction, completing the iterative and interactive evolution, and achieving an intelligent closed-loop of "data perception-simulation analysis-intelligent prediction-optimization control" of bridge construction. To validate our methodology, a case study of a large bridge constructed in a complex, difficult mountainous area is presented. Our approach provides effective theoretical guidance and key technological support for the intelligent construction of large bridges in complex environments.

**Key words:** remote sensing, virtual geographic environment, intelligent construction of bridge, digital twin, simulation prediction, intelligent modeling

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. U2034202, 42271424, 42171397); Sichuan Transportation Science and Technology Program (No. 2021-B-02); Xicheng Railway Passenger Dedicated Line Shaanxi Limited Liability Company Science and Technology Research and Development Program Project (No. Xikang High-Speed Rail Joint (2021) 24)