

多平台通用的桥梁工程参数化建模方法研究

张亚州^{1,2}, 赵训刚^{1,2}, 刘瑞芳³, 黄晓航^{1,2}, 钟继卫^{1,2}, 赖修文^{1,2}

(1. 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 武汉 430034; 2. 中铁大桥局集团有限公司, 武汉 430050;

3. 国家铁路局安全技术中心, 北京 100160)

摘要:铁路桥梁工程结构多样细节复杂,传统的BIM模型创建方式通常需要逐步手工操作,过程繁琐且效率较低。为解决这一问题,提出一种多平台通用的BIM模型参数化创建方法,旨在提高桥梁BIM模型创建的自动化程度和建模效率。首先,设计桥型-构件-截面三层级数据库,通过解耦三者之间的几何约束关系,方便知识积累和信息复用,从而提高建模的效率和可持续性。其次,基于Python编写了斜拉桥、悬索桥、刚构桥等不同桥型的建模算法,实现从设计信息到BIM模型信息的直接转换,降低建模人员的BIM知识储备需求和繁琐的计算过程,进一步提高建模效率。同时,设计信息解读、BIM构件坐标计算及截面库的组织等工作均在Python中进行,只在最后向不同BIM平台进行实例化,从而摆脱BIM平台的限制,增强技术的通用性。最后,以一座大跨径斜拉桥为工程背景,验证所提技术路线的可行性和高效性。研究表明,参数化建模技术可适用不同平台,且建模效率较高,在桥梁工程中具有广阔的应用前景。

关键词:铁路桥梁; BIM; 多平台通用性技术; 参数化建模方法

中图分类号:U24; U452 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202407170001

Research on Cross-Platform Parametric Modeling Method for Bridge Engineering

ZHANG Yazhou^{1,2}, ZHAO Xungang^{1,2}, LIU Ruifang³,

HUANG Xiaohang^{1,2}, ZHONG Jiwei^{1,2}, LAI Xiuwen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Wuhan 430034, China; 2. China Railway

Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 3. Safety Technology Center,

National Railway Administration of the People's Republic of China, Beijing 100160, China)

Abstract: Railway bridge engineering structures are diverse and feature complex details. Traditional BIM model creation methods usually require step-by-step manual operations, making the process cumbersome and inefficient. In order to solve this problem, this paper proposed a cross-platform parametric BIM modeling method, aiming to improve the automation level and modeling efficiency of bridge BIM models. Firstly, a three-layer database of bridge type, component, and section was designed. By decoupling the geometric constraint relationship among the three, this facilitated knowledge accumulation and information reuse, thereby improving the efficiency and sustainability of modeling. Secondly, modeling algorithms for different bridge types, such as cable-stayed bridges, suspension bridges, and rigid frame bridges, were developed in Python, enabling direct conversion from design information to BIM model data, reducing the required level of BIM expertise and eliminating tedious calculation processes, thereby further improving the modeling efficiency. At the same time, design information interpretation, BIM component coordinate

calculation, and cross-section library organization were all carried out in Python, and instantiation to different BIM platforms was performed only at the final stage, thus getting rid of the limitations of BIM platforms and enhancing the versatility of the

收稿日期:2024-07-17; 修回日期:2024-08-15; 网络首发日期:
2024-12-02

基金项目:中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2022-专
项-01,2021-专项-03)

作者简介:张亚州(1989—),男,工程师,2018年毕业于武汉理工大学
土木工程专业,工学硕士,主要从事桥梁研究工作, E-mail:
15927233950@163.com。

technology. Finally, a long-span cable-stayed bridge was taken as the engineering background to verify the feasibility and efficiency of the proposed technical route. The research indicates that the proposed parametric modeling technology can be applied to different platforms, achieves high modeling efficiency, and has broad application prospects in bridge engineering.

Key words: railway bridges; BIM; cross-platform universality technology; parametric modeling method

引言

在桥梁工程领域,建筑信息模型(BIM)技术在协同设计和智能化施工中的应用日益广泛,其直观展示和多专业协同的优势使其在方案汇报、设计意图解释以及施工阶段的数字化沙盘等方面发挥着重要作用^[1-2]。然而,对于斜拉桥、悬索桥等大跨径桥梁,传统的BIM模型创建方式主要依赖手工操作,过程繁琐且耗时,难以满足实际工程需求。另一方面铁路桥梁结构复杂,设计方案和细节在实际工程中经常需要多次调整,要求BIM模型具备高度的参数化和灵活性^[3-4]。

为应对这些挑战,已有许多学者和工程人员进行多种尝试。王开^[5]基于 Bentley 平台设计桥梁下部结构的参数化建模流程,在数据、建模、应用3个层面对技术流程进行创新设计,旨在提高建模速度和多专业协同设计的便捷性;祝兵^[6]在 CATIA 平台上,采用二次开发的方法实现桥梁构件的批量实例化,大幅提高建模效率;宋晓峰^[7]基于 Revit 和可视化编程插件 Dynamo 实现 T 梁结构的参数化建模,并在一座实际桥梁上进行技术和效率验证,在已经创建各类构件族的基础上完成坐标解析和构件放置。虽然上述研究取得了一定的成果,但仍存在一些关键问题尚未解决。一方面,上述研究均面向单一 BIM 平台,无法在多个平台之间进行数据交流和业务协作,导致技术的应用范围受限^[8-9];另一方面,上述研究主要集中在单一结构或少数类型的桥梁结构,相关技术在整个桥梁各个构件中的应用效果和效率未经验证,技术通用性难以保证^[10-11]。

针对上述问题,提出一种基于 Python 的桥梁工程通用性参数化 BIM 模型创建方法。首先介绍参数化建模技术流程,然后详细解释关键技术点,最后通过一个大跨径斜拉桥工程案例验证方法的可行性和高效性。提出一种基于 Python 的参数化建模技术,为提升铁路桥梁工程中的建模效率和质量提供新的思路和方法。

1 参数化建模技术路线

桥梁工程建模是将图纸或者数据形式呈现的设计信息,通过分析解读创建各个构件 BIM 模型的过

程^[12]。参数化建模是指对于桥梁在生命周期中可能产生变化的结构数据,采用参数化的表示方法,以便后期的修改与调整^[13-15]。根据参数化思想,设计参数化建模技术路线,如图1所示,将建模的主要工作划分为桥型、构件和截面3个层级,在每个层级仅读取、处理和组织当前层级的相关信息和数据,实现3个层级的相互解耦,旨在实现模型知识的复用和提高建模效率。

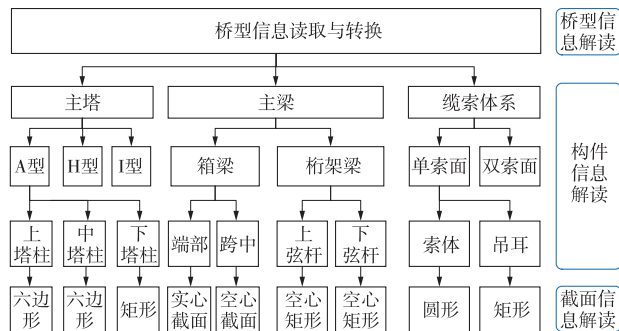


图1 参数化建模技术路线

Fig.1 Technical route of parametric modeling

1.1 桥型信息解读与组织

不同桥型的结构形式、所包含的构件类型、设计参数的数据结构均具有明显区别^[16-17]。为模块化组织和提高建模效率,设计流程的第一步是解读桥型信息。根据结构的受力体系和设计中常规的分类方式,将桥型划分为悬索桥、斜拉桥、刚构桥、拱桥、组合体系桥和常规梁桥。划分不同桥型后,可以针对每种桥型设计专门的数据格式,方便后续建模过程中的信息读取和处理,在提高建模效率同时,确保模型的准确性和一致性。

表1为不同桥型的结构划分,表中不同桥型对应构件的划分方式兼顾设计阶段的受力计算需要和施工阶段的工序划分及信息挂载需求。

表1 不同桥型结构组成

Tab.1 Structural composition of different bridge types

斜拉桥	悬索桥	刚构桥	拱桥	常规桥梁
桥塔	桥塔	主梁	主拱圈	主梁
斜拉索	主缆	下部结构	吊杆	下部结构
主梁	吊杆	附属结构	主梁	附属结构
下部结构	主梁		下部结构	
附属结构	下部结构		附属结构	
	附属结构			

由于实际工作中桥型种类是明确和有限的,因此

在桥型信息组织过程中,针对每种桥型设计专门的数据格式。表 2 列举了部分斜拉桥所具备的桥型层级数据结构。

表 2 斜拉桥桥型数据结构示意

Tab.2 Data structure of a cable-stayed bridge

序号	参数	类型	示例
1	桥梁起点桩号	字符	K3000+178.5
2	桥梁终点桩号	字符	K3001+058.5
3	主塔数量	数字	2
4	塔顶坐标	列表	[180.0,25.5,310.5]

1.2 桥梁构件信息解读与组织

桥梁构件信息解读的目的是分析计算 BIM 模型中各个构件的三维坐标位置^[18]。构件坐标信息主要依赖于两方面,一是构件类型及相关参数;二是桥梁的起终点坐标及横纵坡等路线信息。

以钢桁架桥梁为例,要计算每个杆件的坐标信息,首先根据桥梁所在的路线信息计算整个钢桁架梁的信息,确定各个桁段的起终点坐标,然后根据桥梁实际设计方案选择不同的桁架梁类型,最后读取类型信息对应的相关参数计算各个杆件的坐标信息。钢桁架梁构件信息如表 3 所示。

表 3 钢桁架梁构件信息

Tab.3 Member information of steel truss girders

路线信息	类型信息	类型参数
桁架梁起点桩号及高程	N 形钢桁架梁	桥宽
桁架梁起点桩号及高程	倒 N 形桁架梁	每榀间距
桥梁段纵坡	口字形桁架梁	桁段高度
...	...	...

构件的类型和参数数量随着桥型的不同会有较大变化,因此在组织上述信息时采用更为灵活的多结构类型组织。在路线信息中信息主要为数据,采用固定的列表进行组织,以提高数据处理效率。如针对钢桁架梁建立路线信息列表(起点桩号=K12+250.0,终点桩号 K13+360.0,纵坡=2.9%)。构件类型主要为文字信息,采用字符串进行组织。参数类型种类多且不定,采用字典形式进行组织。

1.3 构件截面信息解读与组织

一个桥梁构件往往由多个截面组成,不同截面的参数所指示内容和参数数量具有明显差别,组成一个桥梁的构件截面数量庞大,在建模初期便要求完成所有截面类型和具体参数数据将使得建模过程推进缓慢,不利于模型的快速展示^[19]。同时,在正向设计中,设计初期尚无具体和详细的截面几何参数信息,仅有大致几何造型^[20]。基于上述实际问题特点,提出在模型创建时,均使用默认截面及参数来完成桥梁模型的快速成型与展示。在模型不断修改和设计过程中完

善,通过对截面类型选择和参数控制进行实时调整。

截面信息的读取通过二维图形引擎进行截面信息参数的展示和输入。截面参数输入布置示意如图 2 所示。

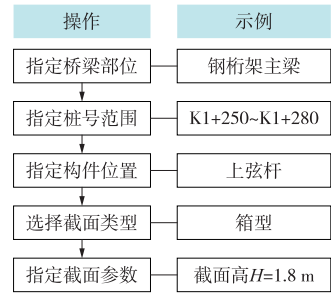


图 2 截面参数输入布置示意

Fig.2 Schematic layout of section parameter input

2 桥型-构件-截面三层级数据库

参数化构件库的积累是快速建模的关键和基础性资料,在设定规则下逐渐积累和完善构件库可以逐步提高建模效率^[21-22]。设计桥型-构件-截面 3 个层级的数据库,通过 3 个层级解析全桥信息,做到每个层级的信息解耦,从而大幅提高截面、构件的复用率。

在桥型级,设计悬索桥、斜拉桥、连续梁桥/连续刚构桥、简支/连续梁桥的数据库,并针对每种桥型,为库中桥型添加关键属性。斜拉桥控制点示意如图 3 所示,其中 A、D 点为主梁的起终点桩号及对应坐标,同时还应输入桩号范围内容的平纵面等路线信息。B、C 点为主塔的塔顶桩号及坐标。通过上述信息可以完成斜拉桥主梁、主塔等各类构件的定位,定位完成后,在下一级的构件级进行具体构件的细化。

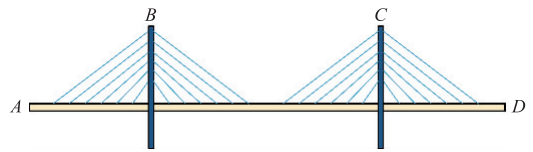


图 3 斜拉桥控制点示意

Fig.3 Schematic of control points for a cable-stayed bridge

构件库包含组成桥梁的主要构件,如主塔、主梁、桥墩和桩基等。构件库的设计考虑通用性原则和与截面及桥型区分的原则。参数化 A 字形桥塔的 BIM 模型示意如图 4 所示。

由图 4 可知,库中每个文件均给出几何外观示意和参数示意。通过上塔柱间距等参数可以计算出图中黄色虚线的骨架线结构,此时桥塔不含任何向下截面和向上桩号等信息。通过赋予其截面库中截面信息,可以完成桥塔的创建。在组成的骨架线中,任何一个

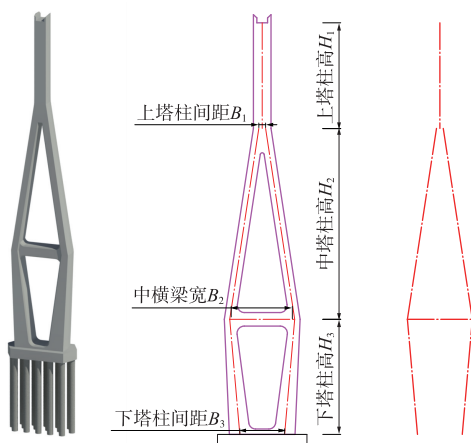


图4 A字形桥塔 BIM 模型示意

Fig. 4 Schematic diagram of BIM model of an A-shape bridge tower

单元线均包含“上游侧上塔柱”等描述信息,以便在后期赋予截面时快速索引位置。

截面库是构成桥梁的最小组成单位,基于 python 设计参数化的截面数据库,截面库由两部分组成:调用格式和图形示意。参数化截面图形及调用格式示意如图 5 所示。

调用方式:

```
Section_sec.Box_12_da(B1=5110,B2=570,H1=2320,H2=700,D1=460,beta=0*pi)
```

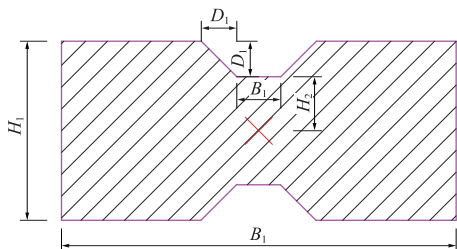


图5 参数化截面图形及调用格式示意

Fig. 5 Schematic diagram of parameterized cross-section and call format

在截面库中,针对具体截面,首先将截面进行参数化,以最少且与实际设计人员操作习惯相一致的原则确定该截面由哪些参数驱动。其次根据设定的原点和参数,计算各个角点的参数化坐标。然后将各个角点按顺序连成面,最后按照不同的 BIM 平台规则,输出相应格式的截面文件。

3 通用性接口设计

在桥梁 BIM 模型创建过程中,前期信息解读与组织、三层级数据库的构建均在 Python 中进行,一方面由于 Revit、BIMBase 等平台对 Python 的支持性较好;另一方面由于在建模过程中需要处理大量的数据、规则并进行可视化,而 Python 具有良好的生态环境和众多的第

三方库,可以使开发工作更加便利和高效^[23-24]。

工作流程中,前期工作不涉及具体图形引擎及软件平台,保证信息组织的高效性和独立性。最终模型可视化需要在具体平台中进行展示^[14]。

为了实现快速生成不同 BIM 平台所需的模型,开发相应的通用性接口,使模型生成过程不再受限于特定的平台,从而大幅提高建模效率和技术的通用性。

(1) 确定输出格式

不同 BIM 平台(如 Revit、Bentley、CATIA)对模型文件的格式要求不同。因此,首先需要确定各平台的输出格式和规范。包括了解每个平台的文件结构、数据格式以及特定要求。

(2) 编写接口函数

在 Python 中编写接口函数,以读取前期解析和组织的信息,并根据不同 BIM 平台的格式要求生成相应的模型文件。接口函数需要处理各种数据转换和格式化操作,以确保生成的模型文件符合各个平台的规范。

(3) 多平台支持

为了实现对多种 BIM 平台的支持,接口函数不仅需要具备输出不同格式的能力,还需考虑不同平台特有的参数和设置。例如,对于 Revit 和 Bentley 平台,需要不同的参数定义方式和处理逻辑。

(4) 参数转换和映射

针对不同平台的特性,需要进行参数转换和映射。例如,Revit 和 Bentley 在处理构件几何信息时,使用不同的参数定义方式。接口函数中应包含相应的转换逻辑,以确保参数在不同平台间的正确映射。

(5) 测试与验证

为确保接口函数的正确性和可靠性,需要编写单元测试和集成测试,对接口函数进行全面测试。这些测试将验证生成的模型文件是否符合各平台的格式和规范要求。此外,还需选取实际工程案例进行测试,以验证接口在真实场景下的应用效果。

4 案例分析与验证

盘龙柳江特大桥主桥全长 626.7 m,孔跨布置为 (51.4+100+326+86.2+63.1) m,钢-混凝土混合箱梁斜拉桥。主塔采用钻石形,与主塔之间采用纵向活动和纵向固定的约束体系。主跨主梁为钢箱结构,边跨主梁为混凝土结构,桥梁布置及主梁形式如图 6 所示。

参数化建模首先需要根据桥梁结构进行构件库的创建,构件库中应包含所建桥梁的全部构件。创建构件需要对桥梁结构进行分解,划分合适的最小单位,在保证桥梁建模效率和构件库内构件的复用性之间取得平衡:构件划分越细,则复用率越高,但建模的复杂度

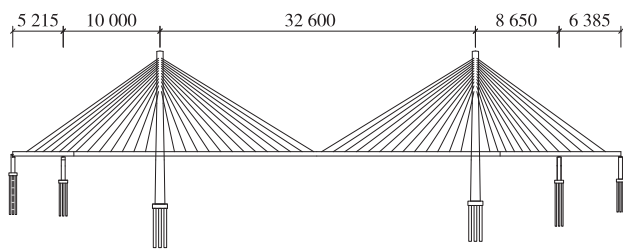


图 6 盘龙柳江特大桥主桥布置(单位:cm)

Fig. 6 Layout of main bridge of Panlong Liujiang Grand Bridge (unit: cm)

也越大,反之亦然。

针对该类斜拉桥,首先对结构各层级进行分解,分解结果如表 4 所示,表中的截面文件采用 Python 进行组织,通过将截面进行参数化,拓扑结构相同,但结构尺寸不同的截面,通过调整参数可以适应所有尺寸的截面。对于非规则形状的截面,提供从 DXF 文件读入的接口。

表 4 桥梁构件及截面分解

Tab. 4 Bridge components and section decomposition

桥梁部位	构件	截面
主塔	上塔柱	八边形
	中塔柱	七边形
	下塔柱	七边形
主梁	塔顶装饰	非规则形状
	混凝土梁	单箱三室
	钢箱梁	单箱三室
斜拉索	拉索	圆形
	锚拉板	非规则形状
	支座	圆形
下部构件	盖梁	矩形
	桥墩	椭圆形
	承台	矩形
附属结构	桩基	圆形
	护栏	非规则形状
	路灯	非规则形状
	标线	非规则形状
	伸缩缝	非规则形状

在建立截面库后,需要根据结构构件的特点,建立构件库,以供桥梁建模时调用。构件库的建立一方面需要在创建之初进行良好规划,另一方面也需要在建模过程中不断积累构件,从而实现快速建模的目的^[25-26]。通过斜拉桥建模算法分析主塔、主梁、斜拉索等构件的坐标位置、截面类型及相应参数,然后调用 Revit 的接口向该平台进行实例化,实例化的 BIM 模型如图 7 所示。

5 结论

研究基于 BIM 和 Python 的铁路桥梁工程参数化建模方法,提出一种系统性、可操作的技术流程,旨在

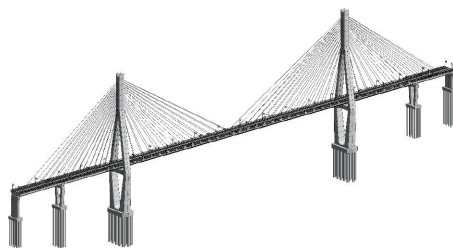


图 7 盘龙柳江特大桥 BIM 模型

Fig. 7 BIM model of Panlong Liujiang Grand Bridge

提高铁路桥梁 BIM 模型创建的自动化程度和建模效率。通过设计桥型-构件-截面三级数据库,实现知识积累和信息复用,显著提升建模的效率和可持续性。同时,基于 Python 开发不同桥型的建模算法,实现从设计信息到 BIM 模型信息的直接转换,降低对建模人员 BIM 知识储备的要求,进一步提高建模效率。

关键技术点包括设计信息解读、BIM 杆件坐标计算及截面库的组织等工作,这些均在 Python 中完成,只在最后向 BIM 平台进行实例化,从而摆脱 BIM 平台的限制,增强技术的通用性。以大跨径斜拉桥为工程背景的验证表明,所提技术路线在实际工程中具有可行性和高效性。

研究表明,基于 Python 的参数化建模技术在铁路桥梁工程中具有广阔的应用前景,为提升工程建模效率和质量提供新的方法和思路。未来研究将继续优化接口设计,进一步提高模型生成的速度和准确性,并扩展该技术在更多桥梁类型和工程场景中的应用。

参考文献:

- [1] 张礼祺. 基于 bim 技术在桥梁工程信息化建设中的应用[D]. 太原:太原理工大学,2021.
ZHANG Liqi. Application of Bim Technology in the Information Construction of Bridge Engineering[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [2] 赵彬,谢尚英,何畏. 桥梁工程 BIM2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2021,43(S1):228-233.
ZHAO Bin, XIE Shangying, HE Wei. State-of-the-art Review of BIM in Bridge Engineering in 2020[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021,43(S1):228-233.
- [3] 李恒. 基于 BIM 的结构分析数据转换及斜拉桥参数化设计研究[D]. 桂林:桂林理工大学,2020.
LI Heng. BIM-based Data Transformation for Structural Analysis and Parametric Design in Cable-stayed Bridge[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
- [4] 伍军. BIM 的本质及工程实践认知[J]. 铁道工程学报,2021,38(3):72-79.
WU Jun. The Essence of BIM and Cognition of Engineering Practice [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021,38(3):72-79.
- [5] 王开,罗天靖,李辉,等. 基于 BIM 技术的桥梁下部结构参数化建模与协同设计应用[J]. 铁道标准设计,2023,67(10):134-140.

- WANG Kai, LUO Tianjing, LI Hui, et al. Parametric Modeling and Collaborative Design of Bridge Substructure Based on BIM Technology [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(10): 134-140.
- [6] 祝兵,张云鹤,赵雨佳,等. 基于 BIM 技术的桥梁工程参数化智能建模技术[J]. 桥梁建设, 2022, 52(2): 18-23.
- ZHU Bing, ZHANG Yunhe, ZHAO Yujia, et al. BIM-based Intelligent Parametric Modeling Technology in Bridge Engineering [J]. Bridge Construction, 2022, 52(2): 18-23.
- [7] 宋晓峰. 一种基于 Revit+Dynamo 的装配式预制 T 形梁桥参数化建模方法研究[J]. 公路, 2023, 68(12): 126-129.
- SONG Xiaofeng. Research on Parametric Modeling Method of Prefabricated T-beam Bridge Based on Revit+Dynamo [J]. Highway, 2023, 68(12): 126-129.
- [8] HUANG H, RUAN B, WU X G, et al. Parameterized Modeling and Safety Simulation of Shield Tunnel Based on BIM-FEM Automation Framework [J]. Automation in Construction, 2024, 162: 105362.
- [9] SHISHLOV A S, COSTIN A M, DAVIDSON M T. Integration of Building Information Modeling Interoperability into Nonlinear Finite Element Analysis of Bridge Substructures [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2023, 2677(10): 9-21.
- [10] COSTIN A, ADIBFAR A, HU H J, et al. Building Information Modeling (BIM) for Transportation Infrastructure - Literature Review, Applications, Challenges, and Recommendations [J]. Automation in Construction, 2018, 94: 257-281.
- [11] 段盟君,罗天靖,李辉,等. 基于 Bentley 平台的铁路桥台参数化 BIM 协同建模与二次开发应用 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67(10): 141-148.
- DUAN Mengjun, LUO Tianjing, LI Hui, et al. Parametric BIM Modeling and Secondary Development and Application of Railway Abutment Based on Bentley Platform [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(10): 141-148.
- [12] 裴爱华,谷呈朋,黄慧超,等. 基于 Revit 自适应构件和 Dynamo 城市轨道交通轨道 BIM 建模方法研究 [J]. 铁道勘察, 2022, 48(2): 18-23.
- PEI Aihua, GU Chengpeng, HUANG Huichao, et al. Research on BIM Modeling Method of Urban Rail Transit Track Based on Revit Adaptive Family and Dynamo [J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(2): 18-23.
- [13] ADNET N, BRUANT I, PABLO F, et al. The FEM-BIM Approach Using a Mixed Hexahedral Finite Element to Model the Electromagnetic and Mechanical Behavior of Radiative Microstrip Antennas [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2014, 38: 17-30.
- [14] 张轩. 基于 Bentley 平台的铁路隧道 BIM 正向设计研究 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67(6): 153-159.
- ZHANG Xuan. Research on BIM Forward Design of Railway Tunnel Based on Bentley Platform [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(6): 153-159.
- [15] 杨文成,霍磊,郑玢,等. 基于 IFC 标准和数据库技术的铁路站场自动化 BIM 建模方法 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67(10): 78-85.
- YANG Wencheng, HUO Lei, ZHENG Bin, et al. Research on the BIM Modeling Method of Railway Station Automation Based on IFC Standard and Database Technology [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(10): 78-85.
- [16] VINCKE S, VERGAUWEN M. Vision Based Metric for Quality Control by Comparing Built Reality to BIM [J]. Automation in Construction, 2022, 144: 104581.
- [17] 姜瑞丰. 塔线体系参数化建模及有限元分析平台开发 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- JIANG Ruifeng. Development of Parametric Modeling and Finite Element Analysis Platform for Tower-line System [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [18] 张协崇. 基于多导线的路基 BIM 模型联动更新方法 [J]. 铁道工程学报, 2023, 40(8): 40-43.
- ZHANG Xiechong. Linkage Update Method of Subgrade BIM Models Based on Multiple Guide Lines [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(8): 40-43.
- [19] HUANG M Q, ZHU H M, NINIĆ J, et al. Multi-LOD BIM for Underground Metro Station: Interoperability and Design-to-design Enhancement [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119: 104232.
- [20] 谭衢霖,郭泽,卢文龙,等. 基于几何语义铁路隧道参数化建模研究 [J]. 铁道工程学报, 2024, 41(5): 87-93.
- TAN Qulin, GUO Ze, LU Wenlong, et al. Research on Parametric Modeling of Railway Tunnel Based on Geometric Semantics [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(5): 87-93.
- [21] 朱庆,张利国,丁雨淋,等. 从实景三维建模到数字孪生建模 [J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 1040-1049.
- ZHU Qing, ZHANG Ligu, DING Yulin, et al. From Real 3D Modeling to Digital Twin Modeling [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(6): 1040-1049.
- [22] MENG W, ZHANG H, AI Q S, et al. CBR-RBR Fusion Based Parametric Rapid Construction Method of Bridge BIM Model [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 57: 102086.
- [23] JIA J, GAO J Y, WANG W X, et al. An Automatic Generation Method of Finite Element Model Based on BIM and Ontology [J]. Buildings, 2022, 12(11): 1949.
- [24] 张其林,唐子涵,满延磊. 基于工业基础类标准的钢结构 BIM 全数据交互技术 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 331-339.
- ZHANG Qilin, TANG Zihan, MAN Yanlei. BIM Full Data-exchange Technology of Steel Structure Based on Industry Foundation Class Standard [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2024, 52(3): 331-339.
- [25] 但晨,肖春红. 基于 Revit 软件的公路桥梁标准构件库研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(5): 7-12.
- DAN Chen, XIAO Chunhong. Research of Highway Bridge Standard Component Family Library Based on Revit Software [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2022, 14(5): 7-12.
- [26] HASAN A M M, TORKY A A, RASHED Y F. Geometrically Accurate Structural Analysis Models in BIM-centered Software [J]. Automation in Construction, 2019, 104: 299-321.

(编辑:夏梦然)