

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.022

# 基于BIM技术的拱桥运营状况可视化研究

童光旭,谢艳,宋华,常军

(苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011)

**摘要:**当前桥梁结构在运维过程中数据杂乱、可视化程度不高。为了提高监测效率,保障桥梁日常运营安全,解决传统桥梁在监测管理中监测信息可视化、动态实时预警以及运维管理信息共享不足等问题。利用BIM软件的高度可视化、贯穿项目生命周期等特点,结合通信技术与数据库建立健康监测系统。将健康监测信息可视化并且实现基于监测信息进行实时可视化预警等功能。最后通过工程实例验证了此方法的实用性。

**关键词:**桥梁;BIM;桥梁健康监测;可视化;预警

**中图分类号:**U446.2      **文献标志码:**A

## 0 引言

桥梁作为道路建设的重要组成部分,与人们的生活密切相关。中国数以万计的桥梁在建设和日常运营过程中,其平均寿命往往会因为自然灾害、恶劣天气、交通事故以及在建设施工阶段和运维管理不完善等原因而降低,导致桥梁出现安全事故。因此,主动预防式桥梁健康监测成为工程师当前研究的焦点。

王超<sup>[1]</sup>提出了对桥梁的健康监测数据设计SQL Server数据库,通过BIM建模软件Revit平台实现数据共享与可视化;Cheung等<sup>[2]</sup>利用无线传感设备实现桥梁监测信息与模型的连接,利用传感设备将实桥上采集的数据实时传输至BIM模型,实现了健康监测数据实时连接;王长祺<sup>[3]</sup>提出了健康监测系统云平台的设计,对BIM模型进行轻量化设计,从而在Web端展现了桥梁的健康监测数据以及预警信息等。

传统的桥梁健康监测系统主要以人工携带仪器对桥梁进行检测和传感器监测为主,通常检测结果会局限于桥梁的结构表面,桥梁内部出现的问题很难被发现,且人为影响因素较高,如漏检、误检等。通过数量繁多的传感器对监测数据进行连续采集,

并通过数据库管理软件对其处理。然而随着时代的发展,这种情况已经不再满足桥梁健康监测的需求,并且现代桥梁逐步往智能化、自动化、信息化方向发展。

尽管国内外许多桥梁已经运用了桥梁健康监测系统,然而,研究发现,这些桥梁健康监测系统都是单方面向监测数据的,且大多数仅仅是对监测数据的采集与保存,在以下几方面仍然存在许多问题:健康监测信息可视化;桥梁安全预警实时性;人工巡检电子化。

健康监测的核心任务是获得环境荷载、结构响应以及局部损伤等信息,在对监(检)测信息进行综合评估的基础上保障桥梁在日常行车和结构处于双重安全状态。BIM作为一种新型的管理方法,贯穿整个工程项目的生命周期。BIM的优势在于其高度的可视化功能,可以为结构的健康监测提供良好的可视化表达环境。当前,BIM应用于桥梁健康监测领域较少。区别于传统的桥梁健康监测系统,BIM强大的可视化功能可以很好地表达桥梁健康监测的信息,可以更直观地显示出监测信息,降低其理解难度,提高监测效率和监测系统的交互性。因此,本文提出BIM技术与桥梁健康监测相结合,实现桥梁在日常运营状态下健康监测数据、实时预警以及电子化人工巡检功能,为拱桥在运营状态下的可视化管

收稿日期:2023-03-16(修改稿)

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(编号:BK20141180)

作者简介:童光旭,男,硕士研究生.E-mail:tgx656434926@163.com

理提供新的方法。

### 1 设计思路

#### 1.1 系统框架的设计

根据健康监测系统的功能需求以及设计原则,以 Revit 技术作为开发的核心平台,Microsoft.NET 4.8 为框架,Visual Studio 2019 为开发环境,数据库管理软件采用 SQL Server 2012,开发语言为 Visual C#, Javascript, Asp.net。基于 Revit API 的二次开发<sup>[4]</sup>,监测系统从逻辑上分为采集层、数据层、平台层以及应用层,采用插件架构方式集成,开发了桥梁健康监测管理系统,如图 1 所示。



图 1 系统架构

#### 1.2 系统功能设计

根据桥梁监测信息的可视化要求,系统功能模块可分为数据管理、模型管理、监测管理、预警管理、人工巡检管理等模块,如图 2 所示。

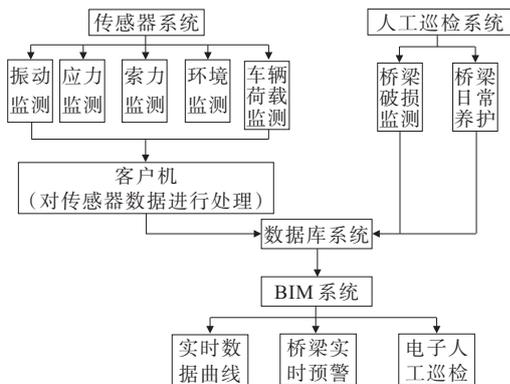


图 2 系统功能

#### 1.3 参数化 BIM 模型

BIM 包含了项目所有数据,可以为各种信息交互共享提供数据。建立基于 BIM 的桥梁健康监测系统,首先实现 BIM 模型的建立,BIM 模型的内容主要包含桥梁模型和传感器模型,两者均通过 Revit 族建立。然后通过族的共享参数设置,将桥梁的实际物

理信息和几何信息输入到 BIM 模型中,之后在运维管理中将模型数据与监测数据融合,从而提高监测信息的管理效率<sup>[5]</sup>。

#### 1.4 监测数据的采集与传输

桥梁结构健康监测系统是以数据采集与传输模块为核心的全自动桥梁结构监测系统,该模块负责完成对传感器获得桥梁信息数据的信号调理,模数转换及网络传输,是连接桥梁外场与监控中心的纽带,数据采集设备、数据传输设备、数据采集软件及其他附属设备组成数据采集与传输模块。

数据实时采集模块则是对数据采集和传输模块的整合。数据采集模块是通过给桥梁的自动监测传感器设定固定频率并使用高速连续的频率对桥梁结构的动、静态数据进行采集。这样的采集方式不仅精确、同步,而且为后期桥梁状态的安全评估提供可靠的数据。数据传输模块,从通信的实效性和稳定性考虑,数据传输一般租用电信公司的光纤网络,由电信公司组建虚拟的 VPN 网络链接,利用数据库实现对不同类型传感器采集到的数据接收与存储,再通过数据采集单元传输至数据处理与控制服务器,实现数据连接上 BIM 模型,如图 3 所示。

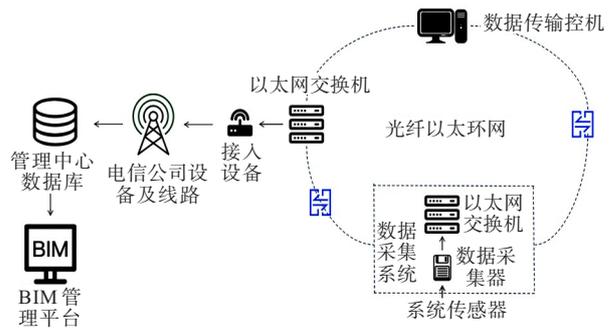


图 3 数据采集与传输

#### 1.5 监测数据处理分析

对监测数据的分析和处理,是长期持续监测形成的对大量数据的有效管理。桥梁结构健康监测数据不仅数量多,而且数据类型复杂,在处理过程中,由于数据的储存形式和管理需求均不同,把整个健康监测系统数据库划分为 9 个子数据库:系统参数数据库、结构信息数据库、结构模型数据库、原始数据库、处理后数据库、健康状态数据库、超阈值事件数据库、系统维护数据库、管养检查数据库。利用统计法、时间序列法等方法对监测数据实现预处理分析。

## 2 系统功能实现

### 2.1 实时监测数据BIM可视化

通常,桥梁的各项监测数据在日常监测中都是相对稳定的,但是如果碰到一些特殊情况,如船撞、超载、交通事故等,桥梁的某些监测数据会产生突变。这样,可以通过实时监测数据实现管理人员对异常情况的及时应对。

以前采用的健康监测系统的监测数据相对复杂,且枯燥,可视化程度不高。BIM的高可视化技术优势很容易解决这个问题。BIM同时实现了对索力、环境、挠度、振动、应变等数据进行实时监测,可以借助模型全方位地展示出桥梁各个部位的健康监测数据。原始数据在经过处理后会被存储在数据库中,BIM模型可以在数据库获取这些监测数据,然后把监测数据对应到相应的构件上,从而利用BIM进行展示,监测内容及传感器类型见表1。

表1 监测内容

监测项目	所用传感器名称	监测指标
位移	压力变送器	主梁挠度
	磁致伸缩位移计	支座位移
动力特性	竖向拾振器	主梁竖向振动特性
应变	振弦式应变计	主梁内力
索力	拾振器	索力及动力特性
环境	温湿度传感器	大气温湿度
车辆荷载	动态称重系统	车辆荷载监测

### 2.2 实时预警

基于BIM的实时预警模块是用户与监测系统交互的界面<sup>[6]</sup>,该功能实现实时动态显示的桥梁安全状态、报警信息查询。预警功能的实现为桥梁后期的评估提供了有效的依据。

#### 2.2.1 传感器阈值的设定

能够进行合理预警的关键是要确定传感器预警的预警阈值。通过理论分析获得每一个测点的报警值<sup>[7]</sup>,关键位置的传感器的阈值则不仅需要通过理论计算,还需与有限元软件模拟结果相结合得出。本文使用Midas Civil有限元软件,利用BIM软件与有限元软件的模型转换接口插件(图4),获取BIM桥梁模型的几何信息和物理信息,将BIM模型转换到

Midas Civil中进行有限元分析。在Midas Civil中设置荷载组合,采用移动荷载和静力荷载最大值工况,从而获得桥梁跨中的理论应力值,该值则为桥梁应力阈值。将计算得出的阈值录入数据库中,当传感器的数据上传至数据库后,数据库内的监测数据发生变化,上传后数据将会与阈值进行比较,达到阈值的某一程度便会自动报警,以不同的颜色来表示桥梁的安全状态。



图4 BIM模型向Midas Civil转换程序

#### 2.2.2 预警功能的实现

本文的健康监测系统预警等级划分是参考相关的大跨度桥梁结构,根据不同的情况,将预警等级划分为4级,分别为正常、警示、临界和超限。当测点在阈值区间的80%,表示测点状态处于正常,构件颜色为绿色;当测点在阈值区间的80%~90%,该测点的状态应引起警示,构件颜色由绿色变为黄色;当测点处于阈值的90%~100%,该测点的状态应引起高度重视,构件颜色变为橙色;当测点超过阈值时,应迅速报警,构件颜色变为红色,如表2所示。

表2 结构预警

预警等级	结构危险程度	预警指标(监测值绝对值 X, 阈值 Y, Y ≥ 0)	预警颜色
正常	低	$X \in [0, 80\% Y]$	绿色
警示	中/低	$X \in [80\% Y, 90\% Y]$	黄色
临界	中/高	$X \in [90\% Y, 100\% Y]$	橙色
超限	高	$X > Y$	红色

### 2.3 人工巡检

传感器的监测系统识别对于桥梁构件的局部表观损伤识别还无法实现。所以,在桥梁健康监测系统中引入人工巡检也是对其的补充和完善,而且BIM的可视化能够和人工巡检相辅相成,能够让检测人员更直观地发现桥梁局部构件的表观损伤并及时维护。

### 2.3.1 巡检信息采集

巡检信息采集模块是基于BIM桥梁三维模型的病害信息录入系统,能够为桥梁后期评估提供有效的依据,检测人员在桥梁巡检时对桥梁病害信息进行采集<sup>[8]</sup>。检测人员在巡检过程后将病害记录缓存至采集设备的本地存储数据库。在Revit中获取病害信息采集模块的子数据库<sup>[8]</sup>,得到不同时间记录的桥梁病害信息。

### 2.3.2 巡检信息管理

巡检记录管理模块是利用BIM技术的高可视化优势对管养检查数据库中的巡检记录进行可视化的管理<sup>[9-10]</sup>。该模块主要是对病害信息展示,对管养检查数据库中的病害记录通过Revit平台展示。展示方式包括:图片化显示巡检信息、病害信息的详细查看、桥梁所有病害信息总览。

巡检记录管理模块以Revit平台作为病害记录的管理入口,管理病害可视化信息。实现全桥的病害历史记录查询,即能够将病害信息对应到BIM模型相应位置上,从而表示出整个桥梁的病害情况,为后期在桥梁评估提供便利。

## 3 工程实例

案例项目为上海平申线大桥(紫金大桥),平申线大桥为主跨188 m的下承式系杆拱桥,主拱与主梁通过整体节点构造连为一体,拱肋推力由主梁承担,

不对基础产生水平推力,主桥桥面宽40 m,下部结构采用钻孔灌注桩基础。本桥约束体系采用简支支撑体系。由于平申线大桥是上海市金山区交通主干道的重要节点,对区域发展具有重大影响,由于桥梁结构会受到连续荷载反应、疲劳反应等负面因素的长期影响,最终出现不同程度的损伤,因此在桥梁运维过程中需对桥梁健康状况进行实时监测,采用本文提出的系统进行实时监测和预警,有利于及时掌握桥梁的承载能力。其中在桥梁跨中布置了8个位移传感器,14个竖向拾振器,36个振弦式应变计,18台索力测试计,为桥梁运维管理提供实测值,该项目的BIM三维模型如图5所示。

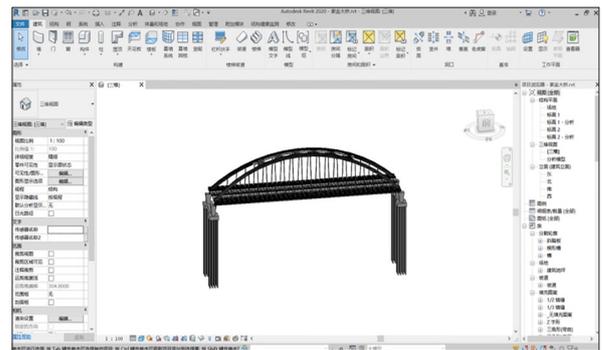


图5 紫金大桥 BIM模型

采用本文提出的系统进行健康监测时,可以根据传感器快速定位到所想要查询的构件,并查看实时的监测数值大小,如图6所示。通过选择曲线可以获得该传感器在当前时间的数据曲线,如图7所示。

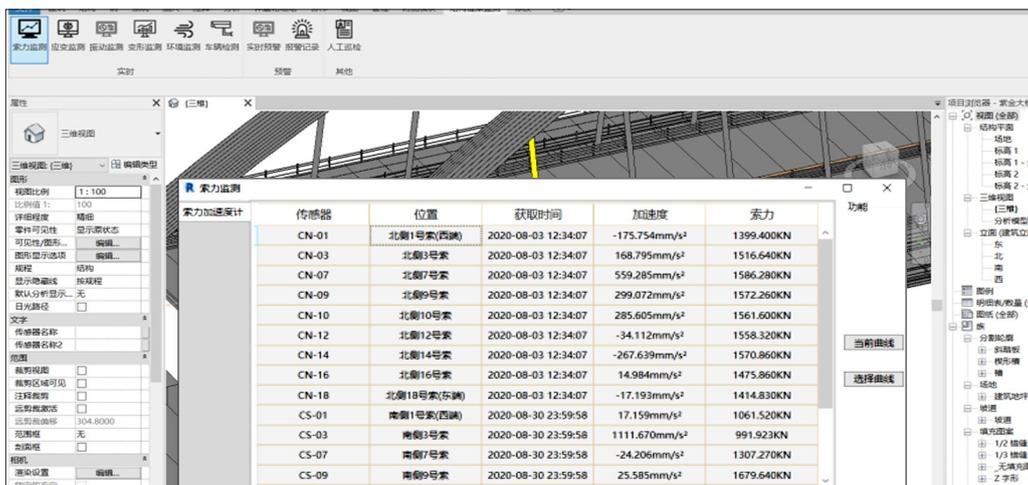


图6 查询传感器所在位置

运用BIM与有限元软件的接口,将紫金大桥的BIM模型导入Midas Civil中添加静力荷载和移动荷

载组合工况进行有限元分析,有限元分析结果见图8。根据有限元分析结果获得跨中挠度的最大值,并

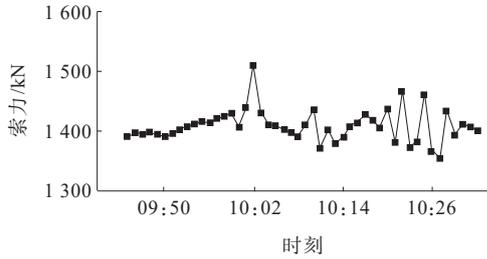


图7 实时监测曲线查看

与相关规范比较取两者较大值作为设计阈值。根据

比较,获得该桥的索力最大值为1 570 kN,跨中挠度为161.934 mm,并以此作为紫金大桥的设计阈值。在数据监测过程中出现异常后报警,如图9所示,出现报警后查看构件的超限情况,如图10所示。

在桥梁的日常运维过程中,不仅需要看到桥梁的实时状态,后期专家在对桥梁评估过程中需要对桥梁出现超限的时间点和位置进行评估,本文所提出的系统则在出现预警后记录下来,以供专家评估,如图11所示。

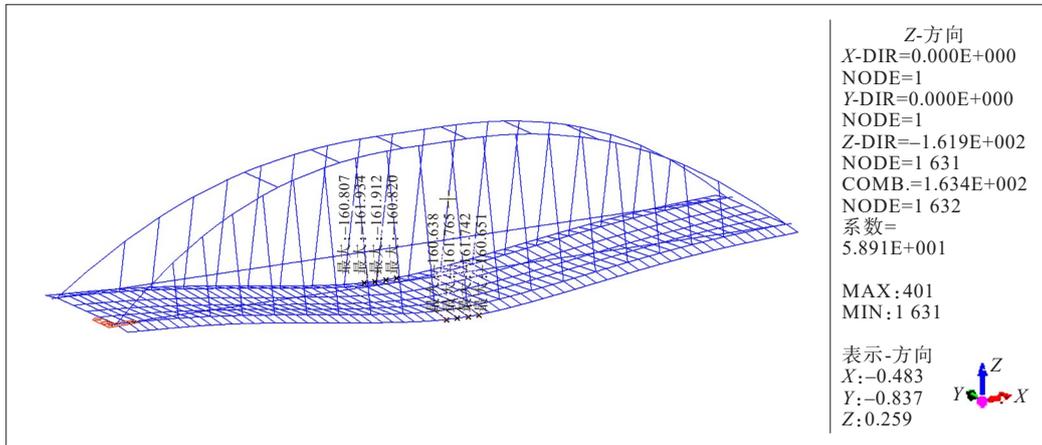


图8 有限元分析结果(单位:mm)

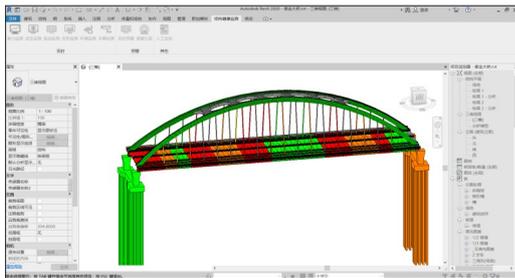


图9 实时预警

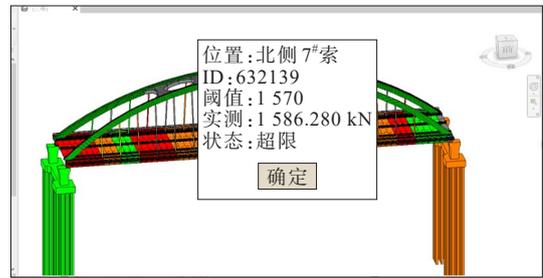


图10 超限构件的查看

桥梁名称	传感器类型	编号	警告类型	报警时间	报警描述
紫金大桥	应变传感器	SS-041	超限	2020/10/13 10:51:03	超出了阈值: 152.73
紫金大桥	应变传感器	SN-011	超限	2020/10/13 10:51:03	超出了阈值: 846.435
紫金大桥	索力传感器	CS-18	超限	2020/10/13 10:51:03	超出了阈值: 324.280
紫金大桥	频率传感器	CN-16	临界	2020/10/13 10:51:03	无
紫金大桥	频率传感器	AS-05	超限	2020/10/13 10:51:03	超出了阈值: 0.889
紫金大桥	频率传感器	CS-09	超限	2020/10/13 10:51:03	超出了阈值: 109.640
紫金大桥	频率传感器	AS-04	超限	2020/10/13 10:51:03	超出了阈值: 0.811
紫金大桥	频率传感器	CS-07	警告	2020/10/13 10:51:03	无
紫金大桥	频率传感器	AN-03	临界	2020/10/13 10:51:03	无
紫金大桥	频率传感器	AS-03	超限	2020/10/13 10:51:03	超出了阈值: 1.768
紫金大桥	频率传感器	CN-01	警告	2020/10/13 10:51:03	无
紫金大桥	频率传感器	CN-01	警告	2020/10/13 10:51:03	无
紫金大桥	频率传感器	CN-03	临界	2020/10/13 10:51:03	无
紫金大桥	频率传感器	CN-07	超限	2020/10/13 10:51:03	超出了阈值: 16.280

图11 报警记录查询

人工巡检功能的引入能够更加方便专家对桥梁的评估<sup>[11-15]</sup>,检测员在检测完桥梁后将病害信息录入数据库并与BIM连接。BIM的可视化,可以使专家

在评估时能够更加直接地根据BIM模型对应到实际桥梁进行评估,如图12所示。

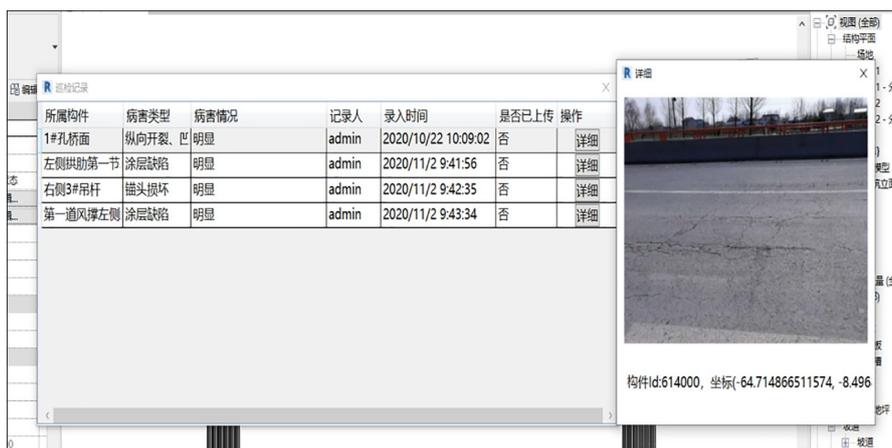


图 12 人工巡检信息

## 4 结论

本文针对当前桥梁在运维过程中健康监测可视化程度不高的问题,提出基于BIM的桥梁实时监测和预警架构以及相应的人工巡检管理机制,并以此为基础,开发基于BIM的健康监测运维管理系统。结合BIM模型,根据传感器数据和定期的人工巡检报告,获得桥梁的健康信息,掌握桥梁在运维过程中的实时状况以及损伤情况,保证桥梁健康安全运营,延长桥梁的使用寿命。同时,针对桥梁的健康状况给出评估,在灾难来临之前给出预警。

### 参考文献:

- [1] 王超. 基于BIM的监测信息IFC表达与集成方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2] CHEUNG W F, LIN T H, LIN Y C. A real-time construction safety monitoring system for hazardous gas integrating wireless sensor network and building information modeling technologies[J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 436.
- [3] 王长祺. 基于BIM的桥梁健康监测云平台系统设计与实现[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [4] 耿方方, 尹方舟, 丁幼亮, 等. 基于BIM的桥梁健康监测系统研究[J]. *现代交通技术*, 2018, 15(1): 35-38.
- [5] 黄颖锐. BIM技术在刚构桥状态监测中的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [6] 石韵, 韩鹏举, 刘军生, 等. 基于BIM技术的结构健康监测管理系统设计与应用[J]. *建筑钢结构进展*, 2019, 21(2): 107-114.
- [7] 尹方舟. 混凝土组合箱梁桥健康状态预警及BIM可视化方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [8] 王乾坤, 张雨峰, 蒋小凡. 基于BIM-SHM的大跨度钢结构实时感知预警系统研究[J]. *建筑经济*, 2017, 38(3): 50-55.
- [9] 孙建诚, 任浩, 等. 基于BIM技术的公路协同管理平台研究[J]. *中外公路*, 2021, 41(4): 384-387.
- [10] 夏子立, 罗强, 高文博, 等. 基于BIM的桥梁技术状况评定系统研究[J]. *中外公路*, 2023, 43(1): 83-87.
- [11] 韩宇轩. 基于BIM的桥梁健康监测及病害预测系统的设计与实现[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [12] 王欢, 熊峰, 张云, 等. 基于BIM的桥梁运维管理系统研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2017, 30(5): 71-75.
- [13] 郭海超, 王仁华. 基于BIM的健康监测信息研究及其可视化实现[J]. *施工技术*, 2017, 46(S1): 510-513.
- [14] 张志强. 基于Web的桥梁健康监测系统设计与实现[J]. *中国公路*, 2020(11): 148-149.
- [15] DAVILA DELGADO J M, BUTLER L J, GIBBONS N, et al. Management of structural monitoring data of bridges using BIM[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Bridge Engineering*, 2017, 170(3): 204-218.