

文章编号:1005-0523(2022)02-0086-08



基于 BIM 技术的无砟轨道健康监测方案应用研究

路宏遥^{1,2},许玉德^{1,2}

- (1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;
2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

摘要:为实现高速铁路无砟轨道养修资源的合理分配和科学管理,在线路关键位置布设智能传感器,对无砟轨道全生命周期内的服役状态关键参数实施健康监测至关重要。针对高速铁路养护维修的实际需求,将健康监测方案与 BIM 技术进行可视化融合,实现传感器布设方案碰撞检测、作业工序优化与安装过程模拟等功能。监测数据通过网络传输至后台数据库管理系统,与 BIM 模型进行联动,对线路病害实时预警并针对性制定科学合理维修方案。结果表明:将 BIM 技术应用于无砟轨道的智能监测工程中,可有效提高监测设备安装精度与效率,为线路“预防性”状态修提供实时数据支撑,全面提升管理水平。

关键词:无砟轨道;BIM 技术;健康监测;系统设计;工程应用

中图分类号:U216.4

文献标志码:A

本文引用格式:路宏遥,许玉德.基于 BIM 技术的无砟轨道健康监测方案应用研究[J].华东交通大学学报,2022,39(2):86-93.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2022.02.004

Application Research on Health Monitoring Program for Ballastless Track Based on BIM Technology

Lu Hongyao^{1,2}, Xu Yude^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: In order to realize the reasonable allocation and scientific management of maintenance resources of ballastless tracks, it is very important to deploy intelligent sensors at key positions of railway lines to monitor the key parameters of service state of ballastless tracks. Combined with the actual needs of high-speed railway maintenance, health monitoring scheme and BIM technology were visually integrated. The collision detection function of sensor layout, operation process optimization and operation process simulation were realized. The monitoring data were transmitted to the background database management system through the network and linked with the BIM models. The analysis and evaluation algorithm were embedded in BIM analysis model and database to realize real-time early warning of disease and timely find out the disease problems on site. Research shows that applying BIM technology to the intelligent monitoring project of ballastless tracks can effectively improve the installation accuracy and efficiency of monitoring equipment. It provides strong support for the preventive state maintenance of the lines and comprehensively improves the maintenance management level.

Key words: ballastless track; BIM technology; health monitoring; programme design; engineering application

Citation format: LU H Y, XU Y D. Application research on health monitoring program for ballastless track based on BIM technology[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(2): 86-93.

收稿日期:2021-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51978393)

随着我国高速铁路的发展,如何保障无砟轨道在高速列车行驶下的安全性、适用性和耐久性,是当前高速铁路建设与养修中备受关注的问题。无砟轨道作为暴露在自然条件下的层状混凝土结构,在列车与环境荷载耦合作用下易发生翘曲变形与离缝脱空等病害,影响无砟轨道线路的平顺性,危及行车安全^[1-2]。而高速铁路的维修天窗均为夜间,传统人工巡检的方式受到光线条件差与检查时间短的限制,难以及时发现轨道结构的病害,且对既有病害的发展规律认识难以定量分析。传统的周期性维修模式已不能满足无砟轨道高安全性与精细化维修管理的需要,搭建无砟轨道健康监测设备,获得结构实时状态数据并设置预警指标^[3],有针对性的制定养修计划与调配维修资源^[4],实现“预防性”状态修已成为必然要求^[5]。

为实现无砟轨道结构的健康监测,需在关键位置布置智能传感器,通过先进的数据分析手段,结合实时数据对结构的服役状态进行分析与评估^[6]。然而,在夜间天窗条件下,传感器安装布点时存在传感器布设效率低、作业工序不合理等问题,在有限天窗时间内难以完成传感器的安装调试。同时,健康监测所需的传感器通道数量多^[7],传统管理模式下难以实现多维监测数据的有效传递与整合,对指导养护维修工作的作用有限。建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术可为铁路结构的设计^[8]、施工^[9]与监测提供可视化、信息化的管理手段^[10],应用于无砟轨道结构健康监测体系之中,可实现传感器布点安装、监测方案优化,有效地数据集成和综合管理,实现无砟轨道服役性能的智能化监控^[11]。基于BIM技术的反馈性与实时性,在数据库中融入状态评价算法可对结构服役状态进行判断,同时将实时状态数据反馈至力学分析模型中,实现无砟轨道全生命周期健康监测体系的构建,充分调配资源实现科学养修^[12]。

在铁道工程领域BIM技术应用方面,郝蕊等^[13]利用GIS-BIM技术,构建工程建设环境与三维场景,实现铁路工程项目信息化管理。王同军^[14]基于BIM技术提出一种基于工程数据对象的铁路工程建设协同管理模式。连茜椰等^[15]应用BIM技术对多专业协同管理,将既有铁路车站综合体改扩建工程施工进度管理进行优化。在BIM技术与监测技术结合方面,张宇昕等^[16]建立高速铁路沉

降监测BIM模型,实现沉降监测点数据可视化分析。郑明新等^[17]应用BIM技术搭建框架桥下穿既有铁路监测平台,对监测数据实时分析拟合与变形趋势预测。沈劲松等^[18]将高速铁路大桥运营监测系统与BIM模型结合,实现结构信息的可视化,分析桥梁实际运营状态。赵亚宁等^[19]将高铁连续梁应力监测数据与传感器模型关联,对监测数据实现阈值预警。

现阶段BIM技术在铁道工程领域上已经开展一系列研究,但是在高速铁路无砟轨道结构健康监测方面研究尚少,且存在一定的局限性。一方面,应用BIM技术未能科学指导轨道健康监测传感器的布置工作,仍存在工序方法不合理,安装精度与效率较低的问题,导致在较短的天窗时间内难以顺利完成监测布点任务;另一方面,实时监测的数据未能与BIM模型进行联动,缺少有效的病害预警方案,难以满足日益严格的养护维修要求。

本文应用BIM技术,构建无砟轨道结构健康监测体系,监测数据可通过网络传输至后台数据库管理系统。将实时监测数据与所建立的健康监测BIM模型发生联动,设置合理预警条件,可进一步完善高速铁路无砟轨道安全评价标准体系,科学调配养护维修资源,实现服役状态下无砟轨道的科学管理^[20]。

1 轨道健康监测需求分析

1.1 无砟轨道病害成因

无砟轨道结构长期暴露于自然环境之中,由于轨道板边界受到约束作用而不能自由变形,在温度与列车荷载等耦合作用下,在轨道板与砂浆层、板间接缝等位置容易产生较大应力与变形,出现离缝或掉块等结构病害,严重影响线路的平顺性。

1.2 无砟轨道健康监测需求分析

结合高速铁路无砟轨道的结构特点和实际养修需求,健康监测内容主要包括:

1) 气象参数与轨道板温度场。无砟轨道结构直接暴露于大气环境中,气象参数发生变化时,受到约束的无砟轨道结构内部温度场发生改变,易造成轨道结构开裂与上拱等问题。对气象参数的监测采用包含环境温湿度与风速等指标的气象站,对无砟轨道结构温度场监测采用关键位置埋入温度传感器的方案实现。

2) 关键位置位移。列车与温度荷载作用下,无砟轨道产生不均匀的伸缩与翘曲变形,直接影响高速铁路的轨道几何形位。为获得无砟轨道结构变形的关键信息,监测内容需包含板端与板中位置轨道板与砂浆层的垂向相对位移,相邻板间接缝处纵向相对位移等参数。

3) 薄弱位置裂缝扩展。无砟轨道薄弱位置(如不同层间黏结处、预设夹缝处等)在周期性疲劳荷载作用下,出现局部开裂后将极大影响结构的耐久性,可采用机器视觉的原理对裂缝损伤累积扩展规律进行非接触式监测。

1.3 健康监测体系架构

为实现轨道结构健康监测目的和需求,监测系统将结合 BIM 技术的可视性、模拟性与反馈性等优势,采用多种传感器和监测手段对服役状态下高速铁路无砟轨道关键参数进行监测,对轨道结构的安全性和耐久性进行分析以及预测。健康监测系统包括:传感器采集模块、能源数据传输模块、BIM 模型与数据库联动模块和预警与分析模块,基本构架如图 1 所示。

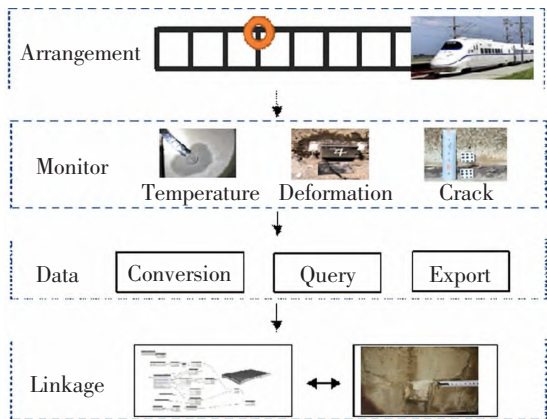


图 1 健康监测系统基本构架
Fig.1 Basic framework of health monitoring system

2 健康监测方案实现策略

2.1 传感器布置方案

监测整体结构主要由太阳能供电及管理系统、传感器采样节点与底层主控采集及发送系统构成。通过光伏一体机将太阳能存储到锂电池组内,并供给主控系统。主控系统一方面通过 485 总线采集、存储和发送各个传感器节点的数据,另一方面管理整个系统的供电,确保监测系统的长时间在线监测。

1) 气象参数与轨道板温度场监测方案。为分析轨道板内的温度分布情况变化规律,需要分别在板表、板中与板底等位置按照一定间隔布置温度传感器。温度传感器可选用接触式温度传感器,将传感器提前按所需间隔固定,在轨道板上打孔并将传感器埋入至合适位置,如图 2 所示。气象参数的采集可选用小型气象站,固定安放于测点相邻位置的安全区内。

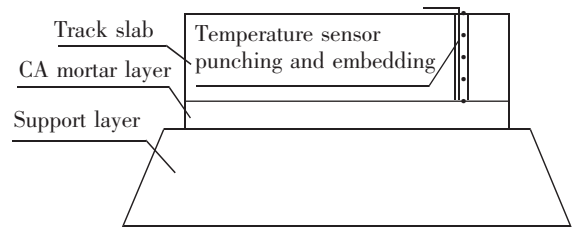


图 2 温度传感器布置图
Fig.2 Temperature sensors layout

2) 关键位置变形监测方案。对板中与板端位置处的垂向相对位移和板间接缝处的纵向位移进行监测时,位移传感器布置示意图如图 3 所示,在所监测位置处的轨道板和支撑层位置通过化学锚栓固定位移传感器,并做好绝缘与防水处理。

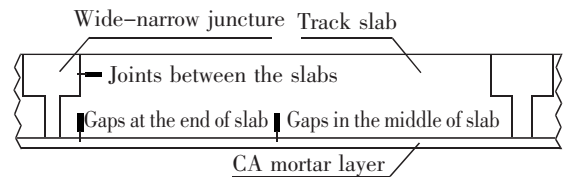


图 3 位移传感器布置示意图
Fig.3 Displacement sensors arrangement

3) 薄弱位置裂缝扩展监测方案。以轨道板与砂浆层之间的裂缝扩展规律为例,采用机器视觉的原理,根据限界要求在线路外侧合适位置安装摄像头,并调整摄像头的焦距,对裂缝扩展规律进行非接触式监测,布置方案如图 4 所示。

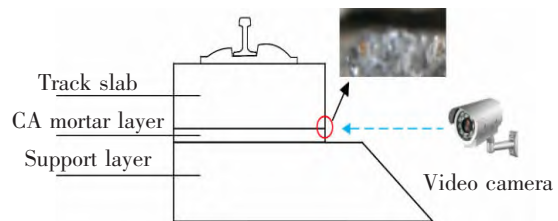


图 4 裂缝扩展监测示意图
Fig.4 Crack propagation monitoring

2.2 BIM 模型与数据库结合

传感器安装布置完成后,对传感器全面检查和

联调,确保所采集各通道的数据准确稳定,主控系统进行实时采集存储并通过4G网络传输至后台服务器终端。结合服役状态下无砟轨道实际情况,可将所建立无砟轨道BIM模型与设计、养护维修历史资料进行统一集成,形成高速铁路无砟轨道运营全周期管理的数字化管理模式。各岗位技术人员可通过基础平台协同工作,极大提高工作效率。将监测数据与BIM模型进行结合,工务部门可对各监测数据进行数据查询和统计分析,直观分析轨道结构的薄弱位置与现阶段设计状态,并对照服役期间不同阶段维修要求,明确最优维修节点与工艺等。

2.3 科学预警与方案优化

在监测数据库内嵌入统计与预警算法,实现服役性能关键参数的在线监测与预警,可科学指导工务实际养护维修工作。通过对监测数据进行统计、分析和处理,实现多源海量检测数据的整合和集成,从中提取能辅助后续自动状态识别与状态评估的关键性数据,从而实现无砟轨道服役性能的准确判断。基于实测数据实现各监测阶段BIM模型的联动,直观展现无砟轨道各位置的实际情况,可建立符合现场实际的力学分析模型,完善下一阶段健康监测所需传感器布置方案的优化。基于监测数据设置多层次伤损识别的阈值,实现信息的综合管理,为无砟轨道基础设施的养护维修提供科学指导。

3 健康监测体系功能实现

3.1 传感器布置实现方案

以CRTSII型板式无砟轨道为例,按照设计资料所建立的包含内部精细化配筋的BIM模型。依次建立钢轨、扣件系统、轨道板、砂浆层和支承层结构,完成无砟轨道BIM模型的搭建,如图5所示,可为传感器的布置、数据库联动与伤损模型评估等提供精准支撑。

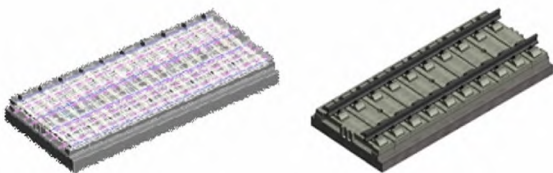


图5 轨道板内部配筋与三维模型
Fig.5 3D model of track slab

3.1.1 传感器安装碰撞检测

无砟轨道结构内部横、纵向钢筋布置复杂,传感器埋入与固定时需考虑避让内部钢筋。夜间时间布点受到光线条件限制,易出现打孔与内部钢筋出现冲突的情况,若现场临时更换布点方案,在有限时间内难以保证传感器安装任务。以轨道板内部埋入温度传感器监测方案为例,将所建立BIM模型与设计、施工资料结合,提前对传感器安装所需的空间范围与轨道板内部钢筋等进行碰撞检测,如图7所示,可确定传感器合理的布设位置。

3.1.2 传感器布点工序优化

由于高铁线路夜间天窗时间有限,且传感器走线和工器具安全使用要求严格,合理的安装工序对保证健康监测工作的有效进行意义重大。为实现健康监测系统的高效安装,需对传感器的安装计划管理,根据监测布点的实际需求,将安装布置任务逐级分解至最小工序模块。对无砟轨道监测设备安装中所需的工序进行分类,分别关联时间维度后可进一步实现进度精细化编制,合理地进行人员的高效调配与工序衔接。

3.1.3 传感器布置过程模拟

在传感器现场安装前,基于所建立BIM模型可实现传感器的布置过程模拟,辅助施工人员提前熟知传感器安装流程,明确工器具的使用数量,对影响传感器安装精度与作业效率的工序进行提前模拟,以缩短布点作业所需的安装时间,科学有效地指导实际传感器布置,位移传感器安装与采集控制终端固定的施工过程模拟如图6所示。



图6 安装流程模拟
Fig.6 Installation process simulation

3.2 数据库实现方案

健康监测系统各通道传感器所采集的数据,经智能化采集终端存储与初步整合后,由4G网络发送到云端的数据管理系统。监测数据的预处理在云端完成,可对数据自动进行分类整理与图形化展示,实现在本地服务器上对云端数据与信息的管理

和查询。数据库管理系统包含无砟轨道结构的测点位置、工况信息与关键参数实时信息,可根据当前监测分析结果对 BIM 模型进行更新与修正,并提供全面的轨道结构病害信息,获取无砟轨道的实时数据与状态准确评估,如图 7 所示。

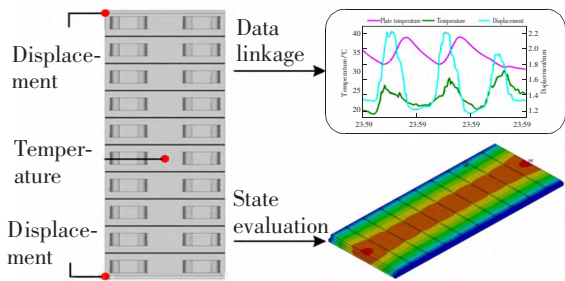


图 7 数据库与 BIM 模型联动方案
Fig.7 Database and BIM model linkage scheme

3.3 病害预警实现方案

以轨道板与砂浆层之间的离缝伤损为例,根据《高速铁路无砟轨道线路维修规则(试行)》对无砟道床伤损等级进行判定,将评价算法嵌入分析系统中,根据所监测的离缝宽度判定结构是否处于 I、II 和 III 级伤损状态(图 8)。当监测数据达到伤损预警值时,后台数据库以弹窗形式发出相关预警,实现在大量监测数据条件下轨道性能状态的智能诊断。根据当前轨道结构的伤损状态,利用监测数据进行损伤分析以及规律预测,实现对结构病害发展规律和伤损状态的准确把握,科学指导养护维修工作。

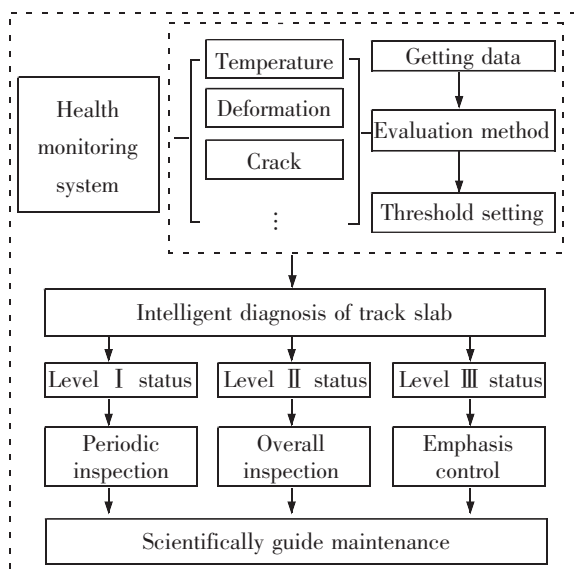


图 8 伤损预警方案
Fig.8 Early warning scheme of damage

4 系统工程实际应用

基于 BIM 技术与结构健康监测技术综合对无砟轨道全寿命周期管理,应用关键监测数据对无砟轨道的服役状态进行准确评价,系统在实际工程中的应用可针对性制定不同时期运营线路的养护维修方案。

4.1 传感器现场安装与调试

无砟轨道结构健康监测系统安装于华东地区某高速铁路运营线路,线路铺设的轨道结构为纵连的 CRTS II 型板式无砟轨道。测点位置光线与网络信号条件良好,可满足数据采集与无线传输的基本需求。利用 BIM 技术在交互性与模拟性上的优势,在传感器安装与调试前,对布点计划充分论证,优化布点工序,实现传感器位置准确安装。相比较于先前传感器的安装与调试工作需要安排 2~3 个连续天窗时间的要求,现阶段仅需用 1 个天窗时间即可完成全部安装工作,安装效率提高 50% 以上。

4.2 数据调用与分析

通过无线传输技术将监测数据实时传输至服务器终端,实现足不出户获取高速铁路的实时数据并加以分析。基于 Dynamo 等软件进行二次开发,实现轨道板批量健康监测数据与所建立的 BIM 模型联动,可分析对应的监测位置所关注时段内的数据变化规律。如图 9 所示,在夏季持续高温期间,一周内轨道板不同位置的位移均随温度呈现以日为周

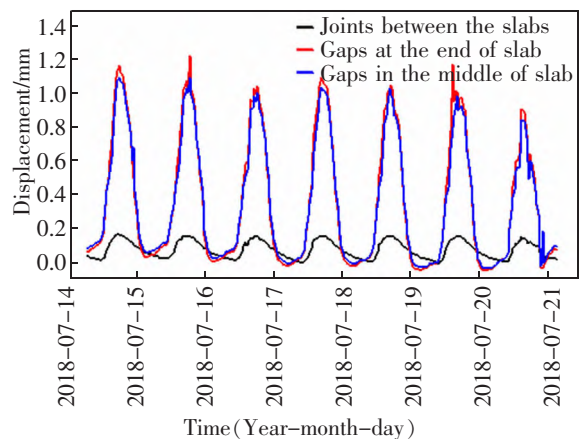


图 9 位移变化规律
Fig.9 Variation law of displacement

期的变化。健康监测数据可为高铁工务夏季高温天气胀板检查等作业计划的编排提供数据支撑,以板中层间离缝位移为例,一周内位移变化范围为 $-0.04\sim 1.22$ mm,达到Ⅱ级伤损状态,需列入维修计划进行全面检查工作,如图10所示,以便科学合理进行养护维修资源调配。

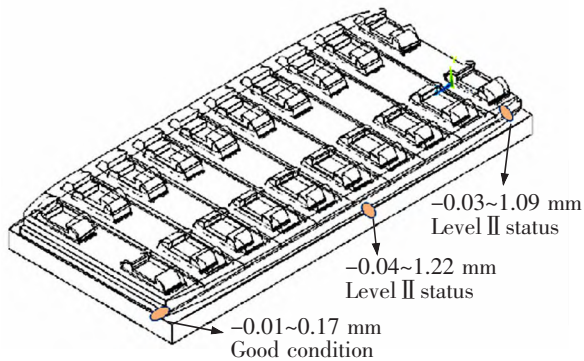


图10 不同位置状态评估

Fig.10 Status assessment of different locations

4.3 科学化指导养修工作

健康监测数据管理系统可设置多层次预警指标,实现在非“天窗”时间内及时了解轨道服役状态,尤其胀板等突发情况时做好防范和准备。根据所监测的实时数据,所建立的BIM模型中各位置的温度和变形等历史信息自动更新与反馈,实现以现阶段轨道板的实际受力及变形状态为参考,针对性提出符合当前实际的养护维修方案。在无砟轨道服役使用的全周期中,不同阶段的预警方案及养护维修措施依据无砟轨道的实时状态进行动态调整,建立更科学的综合评价指标,基于预防性状态修的理念为高速铁路基础设施的养护维修提供科学指导。

5 结论

本文以高速铁路无砟轨道结构健康监测体系的设计与应用为研究对象,应用BIM技术将实时监测数据与模型进行联动,实现服役状态下无砟轨道的科学管理,结论如下:

1) 基于BIM技术实现无砟轨道结构健康监测所需的传感器布置碰撞检测、布点工序优化与布点作业全过程模拟,有效提高了天窗时间的传感器安

装与调试效率。

2) 无砟轨道健康监测数据与所建立BIM模型进行联动,实现关键位置处的数据实时调用与分析,将分析方法与评价算法嵌入后台数据库管理系统,可实现多层次病害预警功能。

3) 结合无砟轨道关键位置服役状态的实时信息,制定符合当前实际的养护维修方案,可科学调配养护维修资源,实现高速铁路无砟轨道“预防性”状态修的要求。

参考文献:

- [1] 李东昇,施成. CRTSⅡ型板式无砟轨道砂浆层界面离缝对轨道板间纵连钢筋受力影响[J]. 中国铁道科学,2019,40(5):22-27.
LI D S,SHI C. Effect of interfacial cracks of mortar layer of CRTSⅡ slab ballastless track on stress of longitudinal reinforcing bars between track slabs[J]. China Railway Science, 2019,40(5):22-27.
- [2] 赵国堂,刘钰. CRTSⅡ型板式无砟轨道结构层间离缝机理研究[J]. 铁道学报,2020,42(7):117-126.
ZHAO G T,LIU Y. Mechanism analysis of delamination of CRTSⅡ slab ballastless track structure[J]. Journal of the China Railway Society,2020,42(7):117-126.
- [3] 娄小强,何越磊,路宏遥,等. 基于Logistic回归的无砟轨道层间位移预警研究[J]. 铁道科学与工程学报,2021,18(3):638-644.
LOU X Q,HE Y L,LU H Y,et al. Research on early warning of interlayer displacement of ballastless track based on Logistic regression[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(3):638-644.
- [4] 陈勋. 高速铁路基础设施综合养护维修管理模式探索与实践[J]. 铁道建筑,2013(6):122-125.
CHEN X. Exploring and practice of integral maintenance and repair management mode for high speed railway infrastructures[J]. Railway Engineering,2013(6):122-125.
- [5] 刘大玲,黄小钢. 高速铁路无砟轨道系统状态监测及预防性维修[J]. 中国机械工程,2019,30(3):349-353.
LIU D L,HUANG X G. Condition monitoring and preventive maintenance of ballastless track systems for high-speed

- railways[J]. *China Mechanical Engineering*, 2019, 30(3): 349-353.
- [6] 王玉泽,王森荣. 高速铁路无砟轨道监测技术[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(8): 1-9.
WANG Y Z, WANG S R. Monitoring technique for ballastless track of high-speed railway[J]. *Railway Standard Design*, 2015, 59(8): 1-9.
- [7] 史康,何旭辉,邹云峰,等. 大跨度高速铁路桥梁健康监测系统设计[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(4): 737-742.
SHI K, HE X H, ZOU Y F, et al. Research and development of health monitoring system for long-span bridges of high-speed railways[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(4): 737-742.
- [8] 路宏遥,吴佳欣,李雅雯,等. 基于 BIM 技术的铁路车站智能信息管理模式研究[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 84-87.
LU H Y, WU J X, LI Y W, et al. Research on intelligent information management mode of railway station based on BIM technology[J]. *High Speed Railway Technology*, 2020, 11(4): 84-87.
- [9] 王卫东,雷晓明,杜香刚,等. 基于蒙特卡洛和 BIM 的 CRTS III 型板式无砟轨道铺设工期仿真[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(7): 1655-1661.
WANG W D, LEI X M, DU X G, et al. Period-simulation of CRTS III slab track based on Monte Carlo simulation and BIM[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(7): 1655-1661.
- [10] VIGNALI V, ACERRA E M, LANTIERI C, et al. Building Information Modelling (BIM) application for an existing road infrastructure[J]. *Automation in Construction*, 2021, 128: 103752.
- [11] 雷鹰,刘丽君,郑翥鹏. 结构健康监测若干方法与技术研究进展综述[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(3): 630-640.
LEI Y, LIU L J, ZHENG Z P. Review on the developments of some methods and techniques in structural health monitoring[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2021, 60(3): 630-640.
- [12] 马良民,陈辉华,王孟钧. 高速铁路基础设施综合维修体系运行机制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(12): 2540-2545.
MA L M, CHENG H H, WANG M J. The research of operation mechanism for comprehensive maintenance system in high-speed railway infrastructure[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(12): 2540-2545.
- [13] 郝蕊,王辉麟,卢文龙,等. GIS-BIM 在铁路工程建设管理中的应用研究[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(4): 46-50.
HAO R, WANG H L, LU W L, et al. Application of GIS-BIM in railway engineering construction management[J]. *Railway Computer Application*, 2018, 27(4): 46-50.
- [14] 王同军. 基于 BIM 技术的铁路工程建设管理创新与实践[J]. 铁道学报, 2019, 41(1): 1-9.
WANG T J. Innovation and practice of railway engineering construction management based on BIM technology[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2019, 41(1): 1-9.
- [15] 连茜椰,何越磊,程岩,等. 基于 BIM 的铁路车站综合体改扩建工程施工管理应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(4): 1036-1042.
LIAN X Y, HE Y L, CHENG Y, et al. Application research of BIM-based construction management in railway station complex reconstruction and extension project[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(4): 1036-1042.
- [16] 张宇昕,张献州,邱颖新,等. 基于 BIM 的高速铁路监测数据可视化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(4): 55-57.
ZHANG Y X, ZHANG X Z, QIU Y X, et al. Research on visualization of monitoring data of high speed railway based on BIM[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(4): 55-57.
- [17] 郑明新,杜子真,康蒙,等. 基于 BIM 技术的框架桥下穿既有铁路智慧监测平台研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(11): 88-93.
ZHENG M X, DU Z Z, KANG M, et al. Intelligent monitoring platform of frame bridge underpassing existing railway based on BIM[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2021, 40(11): 88-93.
- [18] 沈劲松,陈令康,鞠晓臣,等. 基于 BIM 技术的高速铁路系杆拱桥运营监测系统研究[J]. 铁道建筑, 2019, 59(9): 23-26.

SHEN J S, CHEN L K, JU X C, et al. Research on operation monitoring system of tied arch bridge of high speed railway based on BIM technology[J]. Railway Engineering, 2019, 59(9): 23-26.

- [19] 赵亚宁,王浩,郜辉,等. 基于BIM的高铁连续梁施工应力监控方案设计及应用[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(11): 68-73.

ZHAO Y N, WANG H, GAO H, et al. Design and application of stress monitoring scheme for high-speed railway continuous girder bridge construction based on BIM[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(11): 68-73.

- [20] 刘为群. BIM技术应用于数字铁路建设的实践与思考[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 97-101.

LIU W Q. Practice and thoughts on application of BIM technology to digital railway construction[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 97-101.



第一作者:路宏遥(1990—),男,博士研究生。研究方向为轨道结构健康监测技术。E-mail:luhongyao1@163.com。



通信作者:许玉德(1965—),男,同济大学教授,博士,博士生导师,上海市土木工程学会理事、上海市土木工程学会铁道工程专业委员会副主任委员。研究方向为轨道管理,轨道养护维修技术。E-mail:xuyude2000@163.com。

(责任编辑:吴海燕 姜红贵)