文章编号:1005-0523(2023)05-0106-14

基于BIM技术的铁路路基设计施工应用现状及发展趋势

涂文博,孔紫亮,张鹏飞,刘林芽,宋立忠,张 洪

(华东交通大学轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室,江西 南昌 330013)

摘要:铁路路基设计施工是铁路基础设施建设的重要环节,对于确保铁路运行安全和效率具有重要作用。然而,传统铁路路基设计施工中存在设计效率低、施工质量监控难、设计施工协调差等系列问题和挑战,无法适应高效、精准、可持续的铁路路基建设需求。BIM技术快速发展,其作为一种全新的设计和管理工具,已成为现代化铁路路基设计施工的重要辅助技术,为铁路路基的发展带来了巨大的机遇和挑战。文章基于BIM技术的铁路路基设计施工应用现状进行分析,并探讨其面临的挑战和发展趋势。研究发现,BIM技术在铁路路基设计施工中具有提高设计精度、减少错误和冲突、优化施工管理等优势,但在技术、组织管理、法律等方面存在诸多挑战。而未来,BIM技术在铁路路基设计施工中将向智能化、协同化和数字化方向发展。

关键词:铁路路基;设计施工;BIM技术;现状;发展趋势

中图分类号:U213.1 **文献标志码**:A

本文引用格式:涂文博,孔紫亮,张鹏飞,等. 基于BIM技术的铁路路基设计施工应用现状及发展趋势[J]. 华东交通大学学报,2023,40(5):106-119.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2023.05.006

Application Status and Development Trend of Railway Subgrade Design and Construction Based on BIM Technology

Tu Wenbo, Kong Ziliang, Zhang Pengfei, Liu Linya, Song Lizhong, Zhang Hong

(State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Railway subgrade design and construction is an important part of railway infrastructure construction, which plays an important role in ensuring the safety and efficiency of railway operations. However, there are a series of problems and challenges, such as low design efficiency, difficult construction quality monitoring, poor design and construction coordination, which cannot adapt to the needs of efficient, accurate and sustainable railway subgrade construction. The rapid development of BIM technology, as a new design and management tool, has become an important auxiliary technology for modernized railway subgrade design and construction, which brings great opportunities and challenges for the railway subgrade. This paper studies the application status of railway subgrade design and construction based on BIM technology and discusses the challenges and development trends. It found that BIM technology in railway subgrade design and construction has the advantages of improving design accuracy, reducing errors and conflicts, and optimizing construction management. However, there are a lot of challenges in technology, organization and management, and legal aspects. In the future, BIM technology in rail-

收稿日期:2023-09-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2602200);国家自然科学基金项目(52268069);中国科协青年人才托举工程(2021QNRC001)

way subgrade design and construction will develop in the direction of intelligence, collaboration and digitalization.

Key words: railway subgrade; design and construction; BIM technology; application status analysis; development trend

Citation format:TU W B,KONG Z L,ZHANG P F,et al. Application status and development trend of railway subgrade design and construction based on BIM technology[J]. Journal of East China Jiaotong University,2023,40(5):106–119.

铁路路基设计施工一直是铁路基础设施建设的重要环节，对确保铁路运行安全具有重要作用。然而，传统铁路路基设计施工中存在设计效率低、施工质量监控难、设计施工协调差等系列问题和挑战[1–2],无法适应现代高效、精准、可持续的铁路路基建设需求。必须引入现代化的设计理念、技术手段和管理模式，以提升铁路路基工程设计施工的质量、效率和可持续性。

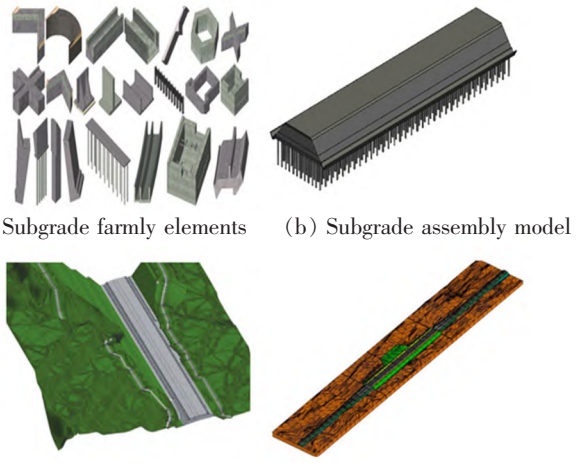
近年来,BIM(building information model)技术快速发展，其作为一种全新的设计和管理工具,已成为现代化铁路路基设计施工的重要辅助技术,为铁路路基的发展带来了巨大的机遇和挑战。显然,BIM 技术在铁路路基设计施工中有很大的应用优势。首先,BIM 技术可将不同结构的设计信息整合以实现协同设计和交流,有效降低人为错误和重复工作,大幅提高工作效率[3]。其次,基于 BIM 技术的全方位模拟和分析可辅助设计人员开展设计方案比选和评估，并对设计方案进行优化提高设计质量。此外,施工方可基于 BIM 模型实时查看施工进度,并与其他相关方进行协同联动以对施工过程进行全面监控和管理,提高施工管理质量[4–5]。最后,BIM 技术可实现对大量设计和施工数据的收集和分析,包括土质情况、工程量计算、材料需求等,为相关部门提供准确全面的信息进行决策和规划[6]。

随着技术进一步发展和应用深入,BIM 技术在铁路路基设计施工中的作用将进一步凸显,并为我国铁路高质量建设和发展提供更强有力的支持。因此,进一步加强 BIM 技术在铁路路基设计施工的研究和创新,提高设计水平和施工质量无疑是交通运输工程领域今后的研究重点[7–8]。本文对 BIM 技术在铁路路基设计施工中的应用现状进行了全面分析,并探讨 BIM 技术在铁路路基设计施工中的挑战及其解决方案,明确 BIM 技术在铁路路基设计施工中未来的发展趋势,对推广 BIM 在我国铁路基础设施设计施工更广泛更深入的应用具有重要研究意义。

1　基于 BIM技术的铁路路基设计施工应用现状

1.1　模型可视化与仿真

模型可视化功能是 BIM 技术的重要特点之一。工程师可结合三维数值化软件对铁路路基进行建模,实现对铁路路基结构的直观展示,使设计人员、施工人员和决策者能够更好地理解和沟通设计意图,如图 1 所示[9–10]。



(a) Subgrade farmly elements　(b) Subgrade assembly model

(c) Subgrade drainage model　(d) Subgrade subgrade model

图 1　铁路路基 BIM 模型

Fig.1　BIM model of railway subgrade

铁路路基设计施工中主流 BIM 三维数值建模软件主要包含 6 类,如表 1 所示。结合以上 BIM 三维数值建模软件,研究人员对铁路路基建模开展了大量的模型可视化与仿真应用研究,主要分为 3 个方面。

1.1.1　基于 BIM 软件的可视化建模

在初步设计阶段,可利用 BIM 软件创建实体模型，实现铁路路基的快速化建构并进行直观展示。Sheng 等[11]利用 Bentley Rail Track 分别演示了数字

表1 铁路路基BIM建模软件及其功能介绍

Tab.1 Introduction of railway subgrade BIM modeling software and its functions

Number	Software	Main function
1	Autodesk Revit	Revit allows users to create a variety of railway subgrade family models and improve efficiency through parametric modeling.
2	Autodesk Civil 3D	Civil 3D provides a rich set of tools for creating and modifying terrain, designing cross sections and longitudinal sections, etc.
3	Autodesk InfraWorks	InfraWorks provides comprehensive terrain modeling and design tools, including route design, terrain analysis, and track geometry design.
4	OpenRail Designer	It can be integrated with terrain data to ensure the design accuracy of railway subgrade line and provides a range of subgrade modeling tools.
5	CATIA	It can establish a template library of railway subgrade cross-section and subsidiary structures, and realize knowledge reuse and model update.
6	Bentley Rail Track	Bentley provides comprehensive railway subgrade design tools, including terrain modeling, longitudinal section and cross section design.

地形模型、线路走向、横断面,以及三维模型的显示方法，实现了BIM技术在铁路路基应用的初步探索。Cao[12]以一条新建铁路专线的测量数据为原始依据，采用Autodesk Civil 3D对测量数据进行分析，实现了地形表面分析、边坡设计和铁路线路设计，初步探讨了Civil在铁路建模中的应用。李明等[13]采用Revit软件对路堑边坡支护结构协同设计应用，使得路堑支护结构三维可视化,进一步提高了铁路路基支挡结构设计质量和工作效率。谢先当等[14]提出了一种对路基各部分结构进行分解,将参数化构件与不可参变构件结合使用,最后进行拼装组合的路基建模思路,解决了OpenRail Designer在铁路路基BIM设计中,构件建模工作量较大,路基构件库扩充在短时间内无法满足设计施工需求等情况,最后依托丽香铁路路基工程,实现了基于BIM技术的铁路路基工程施工建模可视化。刘祯颀[15]为实现站场路基BIM模型建模可视化,针对铁路站场路基结构特点,结合BIM建模原理,基于Bentley平台和建模关键技术研发了铁路站场路基BIM设计系统,并先后应用于福厦铁路、襄荆铁路等一系列工程实践中,验证了系统的可靠性和稳定性。

1.1.2 基于BIM软件的二次开发

随着铁路路基设计施工的发展,单一BIM软件的现有功能已经无法满足铁路路基模型可视化与仿真需求。基于BIM软件的二次开发逐渐兴起,以实现更精确、高效和符合铁路路基设计施工标准的建模功能。刘厚强等[16]针对二维辅助设计软件的不足,自主研发了一种三维铁路路基设计软件,基于OpenGL对铁路路基本体及相关支挡附属结构的模型二次开发,实现了路基部件的快速参数化建模,并成功应用于川藏线拉林段路基设计施工中。靳猛[9]依托银西高铁BIM试点项目,基于欧特克平台进行二次研发实现了铁路路基快速建模,提高了铁路路基BIM模型可视化应用水平。柯子翊等[17]重点研究了站场路基模型的构建方法,根据铁路站场的平纵横设计资料,编制原型程序和路基模型剖切算法,成功应用于独李北站实现了铁路站场路基信息模型的快速建模和高效信息可视化提取。Pu等[10]提出了一种创新性方法实现由模型变化驱动的BIM更新技术,通过该方法可以实现对现有站场路基BIM模型的快速更新。总体而言,基于BIM技术的二次开发在铁路路基设计施工可视化建模方面发展已较为成熟。

1.1.3 BIM+GIS的融合应用

BIM和GIS在铁路路基模型方面有不同的侧重点。BIM主要关注对路基主体结构的精细可视化,而GIS则更关注地理信息的全局整体管理。根据铁路路基长大线状结构特点,一些研究者进行了BIM+GIS融合应用的研究，以建立铁路的三维场景。这种融合应用可以实现可视化和三维模型计算分析等许多功能,最大程度地发挥BIM+GIS在铁路路基模型可视化与仿真方面的应用价值[18]。王明生

和张振平[19]在分析了当前铁路路基三维建模方法后指出路基三维建模技术和方法的关键和难点是路基三维建模过程中如何与地形三维模型进行交接、融合,其重点研究了在 GIS 环境下路基模型与地形模型的叠加问题,提出了利用 GIS 软件实现铁路路基的建模可视化和仿真方法。Wang 等[20]在数据采集中引入无人机新的测量手段，提高勘测设计的效率，通过 BIM 模型数据和 GIS 信息集成和交互操作，地形数据进行叠加分析，用于支持排水设施 BIM 模型的建立，从而解决铁路路基防护问题,避免了人力、物力的浪费。郭泽等[21]将 BIM 和 GIS 技术结合起来，实现了铁路路基模型的可视化与仿真。通过利用数字高程模型与高分辨率遥感影像,对铁路工程各部分结构模型进行参数化建模,建立了铁路线路三维线状地理环境,并将 BIM 与三维地理环境场景进行交互融合，结合某铁路进行了应用,实现了三维场景的发布、在线浏览、空间分析等功能。张钰等[22]结合基础地形测绘资料和铁路设计资料等数据，介绍了铁路三维场景快速构建方法,包括三维地形模型创建、铁路构筑物 BIM 模型快速生成、BIM 与 GIS 融合、场景标注配置等。夏宇等[23]研究了铁路线路 BIM 与 GIS 技术融合的三维场景的构建流程,选取兰张铁路项目中的永登至天祝段局部区域，应用遥感影像与地面高程信息数据,在 InfraWorks 平台上建立了路段地形、路基主体结构物、附属支挡结构设施等三维模型,实现了在铁路线路三维虚拟环境中对不同方案进行比较和分析,沿着铁路线路进行导航,模拟实际的场景,帮助决策者选择最合适的方案等功能。

1.2　协同设计与冲突检测

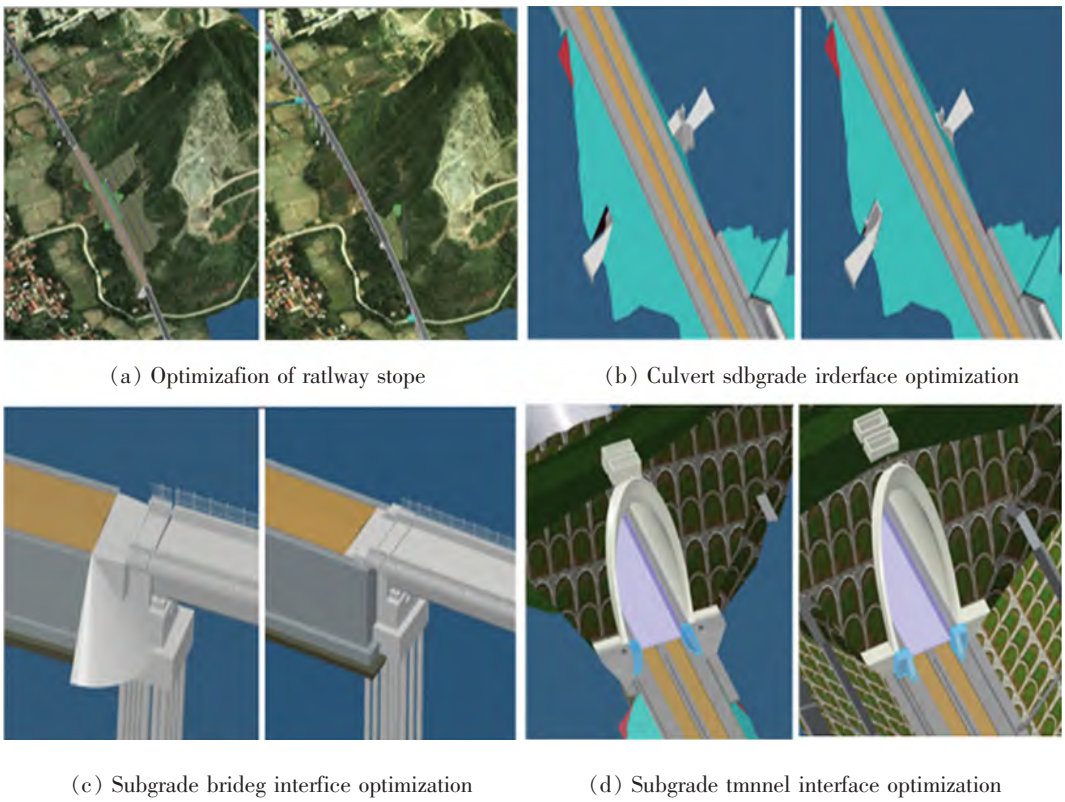
基于 BIM 技术的铁路路基协同设计与冲突检测是一种利用 BIM 技术进行铁路路基设计的创新方法。在传统设计方法中往往存在设计信息不完整、协调困难、冲突频发等问题,而基于 BIM 技术的铁路路基协同设计与冲突检测可以提高设计效率,减少设计错误和施工风险。

Tang 等[24]基于 Python 开发子程序,将 Dynamo 与力学经验、路面设计指南相结合,对路基路面结构进行分析,为路基与路面分析协同一体化设计提供了创新性和实用性的解决方案,有效解决了长期存在的 BIM 环境下无法分析路面结构的缺陷,从而减少了在路面设计中的错误和重复等问题。孔国梁等[25]对 AutoCAD 二次开发后,利用其多视口,排水纵断面自动化设计等功能,对铁路路基排水平纵断面协同设计并导入达索软件共同完成铁路路基排水沟 BIM 协同设计模型,提高了铁路路基排水的系统性和信息化,对未来的应用提供了有益借鉴。卞友艳[26]研究了基于 Bentley 平台的铁路站场路基多专业协同设计解决方案，并成功应用于沪通铁路 BIM 试点项目中,该研究对于促进铁路站场路基协同设计的发展具有重要意义,并为相关领域的实践提供了有益的经验。易菊香[27]以某高速铁路工程为例,基于数字化技术及多专业协同技术形成的三维设计模型,实现了全方位、多角度查看、构件单元快速识别、构件与地形面数据化交互,从而使设计精度更高,提取的数量相对更精确。

铁路路基工程与桥梁、隧道等各专业接口间存在大量接口设计,BIM 技术便于在各专业间开展协同设计工作,通过专业间的碰撞检测,筛选出有效碰撞点,各专业接口协调设计与碰撞如图 2[28]。相关学者对路基各专业接口协同设计与冲突检查也做了研究应用。张钧达[29]应用 BIM 技术对铁路路基与隧道过渡段接口、铁路路基与站后各专业间接口、排水设计的接口等进行了协同设计优化。刘彦明[30]在银西高铁项目中选择了两站一区间作为 BIM 技术协同设计应用工程,重点研究了桥隧工点、特殊路基工程和过渡段的接口协同设计与冲突检查等方面,优化了设计流程,提高了协同设计效率和质量。胡文丽[31]运用 MicroStation Connect Edition 对铁路路基的声屏障结构模型进行 BIM 协同设计,在 Project Wise 协同设计平台上实现了数据共享和碰撞检查等功能,采用二次开发的插件以及 Navigator 软件进行碰撞检测和实景展示。该协同设计应用显著减少了图纸设计中的差错和遗漏等问题,有效避免了施工阶段的多次返工,为铁路项目设计及施工过程提供了高质量服务。

1.3　数据采集与处理

BIM 技术在铁路路基数据采集和处理方面可为铁路设计施工提供全面、准确和可靠的数据支持。三维扫描是 BIM 技术中常用的一种数据采集方式,它利用激光扫描仪或者相机等设备对铁路路基进行扫描,获取路基三维点云数据,这些点云数据可以准确地反映路基相关结构形状、尺寸和细节,并用来构建 BIM 模型[32]。当需要对范围的地区进行



(a) Optimizafion of ratlway stope (b) Culvert sdbgrade irderface optimization

(c) Subgrade brideg interfice optimization (d) Subgrade tmnnel interface optimization

图2 路基各专业接口协同设计与冲突检查

Fig.2 Collaborative design and conflict checking of interfaces between roadbed specialties

航拍和数据采集时,可采用无人机技术搭载激光雷达、相机等设备快速获取大范围区域的高分辨率影像和三维点云数据[33]。将点云数据和摄影数据导入BIM软件进行整合分析,可生成真实的三维路基模型,进一步将路基模型与其他相关数据如GIS数据、地质勘探数据等进行集成,以提供更全面的设计施工应用支持。夏艳军[34]利用激光扫描技术对高铁路基进行数据采集,获取路基三维空间信息的点云数据,经过融合处理后获得对应的大地坐标,研究算法提高了数据处理精度。刘孟涵[35]采用航拍测量技术采集高分影像数据,经过多项处理,得到了数字高程模型及影像图,进而应用于BIM铁路项目来模拟真实三维环境,为路桥隧等专业的协同设计提供设计依据,从而提高铁路建设信息化水平。岳忠翔[36]利用无人机技术进行数据采集,根据现场地质勘察得到的地质数据,导入地表模型中,生成该地区三维地质模型,根据该地质模型和地表高程确定抗滑桩深度及位置,极大地提高了施工方案的经济合理性,有效降低了路基边坡竣工后可能出现的滑移、开裂等质量风险。林国涛等[37]针对各专业协同设计难,路基设计不精确等问题,提出了综合运用倾斜摄影和激光雷达技术收集工程地质调绘数据、GIS数据等一系列数据,用以快速建立道路及各专业模型的信息融合体,提升了我国道路设计数据采集技术手段。刘曜玮等[38]基于无人机+BIM技术优化了道路工程施工计量过程中的数据采集及处理等环节,分析无人机+BIM技术在数据采集与处理应用中的优势,并提出了一套用于道路工程施工计量的新方案,对提高数据采集效率、数据精度和决策处理能力起到了一定的推动作用。

BIM技术还可以在施工过程中进行施工数据采集与处理,及时发现和解决施工过程中的问题如图3所示。

梁策等[39]研发了一款结合北斗卫星定位与BIM技术的路基连续压实信息系统。系统集成了路基压实数据采集与处理、质量数据结果可视化展示等多项功能,实现对铁路路基压实质量的实时监测与控制,满足了铁路路基数字化施工的需求,对BIM结合北斗技术进行施工数据采集及质量控制具有参考价值。卢春房等[40]以朔黄铁路为背景,融合应用人

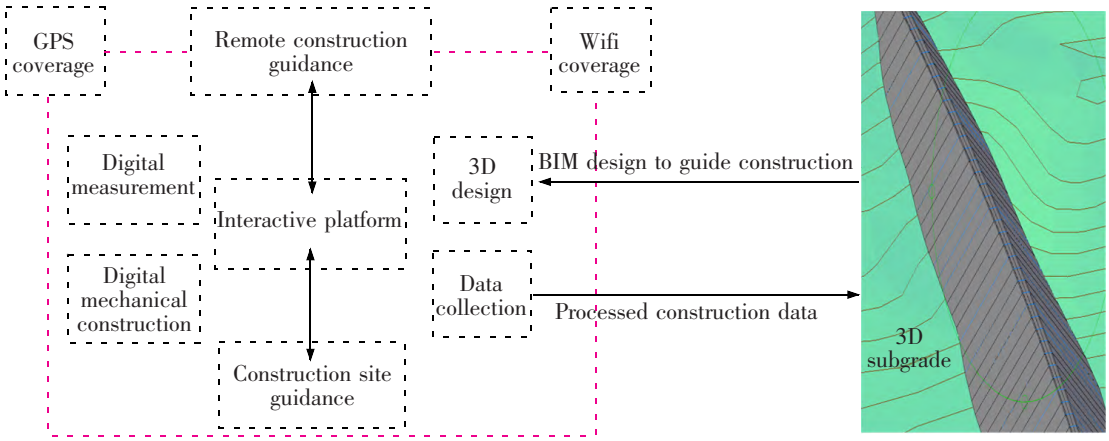


图 3　基于 BIM 技术的路基数字化施工

Fig.3　Digital construction of subgrade based on BIM technology

工智能、BIM+GIS、北斗、物联网、大数据等先进技术,对铁路路基边坡和隧道与路基接口处仰坡的稳定性进行了实时监测和反馈。赵敏聪等[41]在哈大铁路客运专线路基施工项目中利用 Real-time kinematic 测量技术和 3DGPS 系统对路基施工的摊铺厚度、平整度等施工质量数据进行实时采集控制,以确保路基施工过程质量,还采用了 CCS900 压实系统实时采集和监测现场路基施工压实度,提高了施工效率。

1.4　施工管理与优化

随着我国铁路建设行业的快速发展,施工技术、材料、数据不断更新,传统的管理模式已很难服务现代化铁路路基施工。BIM 技术可以支持工程项目的全生命周期的健康管理,并已成功应用于铁路建设项目的管理,其中铁路工程管理平台框架如图 4 所示。基于 BIM 的铁路施工管理与优化技术应用研究主要围绕施工建设与组织管理、施工安全与风险管控、施工资源管理、施工进度管理等方面开展。

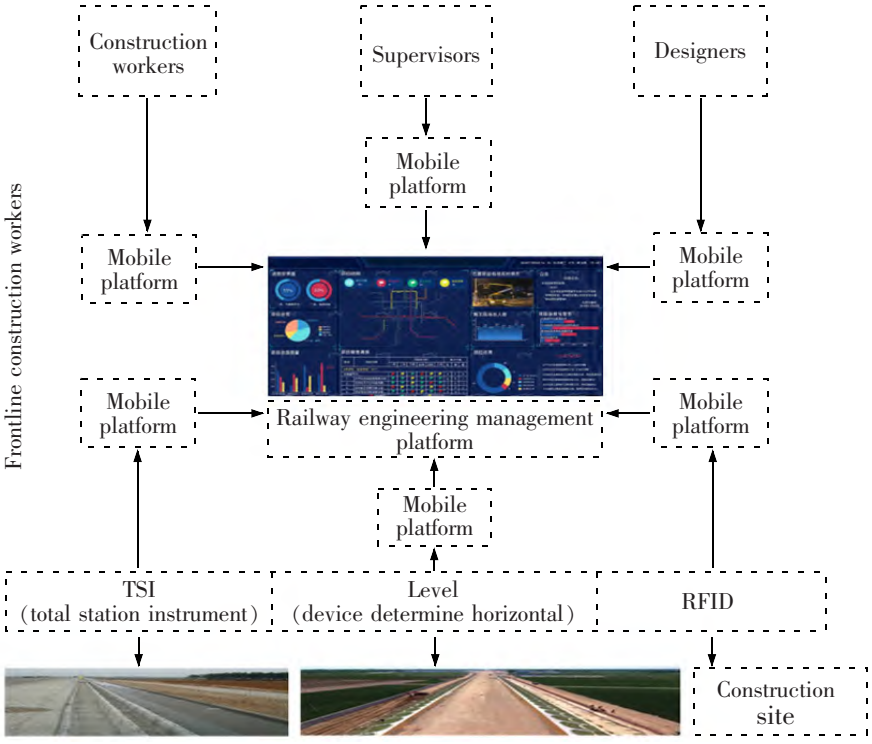


图 4　铁路工程管理平台框架

Fig.4　Subgrade engineering management platform framework

在施工建设与组织管理方面，王同军[8]基于BIM管理技术的应用，提出了一种创新的铁路工程建设与组织协同管理模式，明确阐述了铁路工程建设管理的内涵，建立了铁路工程管理总体框架，并成功应用于铁路工程多项目、多专业、多任务的建设实践过程中。张乃乐等[42]为提高施工组织管理质量和效率，通过开发无人机影像和BIM融合技术，提出了一种针对铁路线路建设施工组织智能化管理的方法。该方法实现了自主巡检施工现场，识别施工机械设备出勤和工作情况、分析施工进度等施工过程管理。鲍榴等[43]提出了一种铁路建设管理一张图管理模式，并研发了基于BIM+GIS的建设管理一张图系统，在京雄高铁试点进行了应用。该系统能够在一张图上将BIM、GIS模型和工程建设等多源异构数据集成展示，并满足了信息建设与组织管理精益化需求。韩宝剑等[44]依托京雄城际铁路四电施工项目，基于BIM+GIS数据集成技术，搭建一体化铁路施工管理平台，该管理平台具备三维电子沙盘、接触网智能预配信息管理、施工安全和质量管理等功能，可实现铁路施工各阶段管理数据的整合和不断优化。该项目基于BIM管理与优化技术的应用，提高了铁路施工全产业链数字化、信息化应用水平。

在施工安全与风险管控方面，康振江[45]基于铁路施工安全管理工作的特点提出了采用BIM技术进行施工安全管理的措施。采用三维模型、施工工艺模拟等方法，及时发现工程设计中存在的各种危险因素，从而达到预防工程安全事故的目的。同时，结合已有的工程实例、工程事故信息构建工程风险信息数据库，为铁路施工的风险分析提供多种危险源信息，对工程建设进行风险评估、风险分类和辨识工作。张钦礼等[46]提出了利用BIM技术优化铁路施工全生命周期安全管理，以解决现行安全管理强度大和施工保障不足等问题。采用Revit软件完成铁路工程项目模型的构建，并结合BIM模型对施工人员进行安全教育。该安全管理方案通过预先采取针对性安全措施，以实现高效、可靠的铁路工程全生命周期信息化安全管理。

在施工资源和进度管理方面，张建平等[47]针对现行施工资源及成本管理方式存在人为监控不及时，无法精细化管理等问题，运用BIM技术，建立4D(3D+施工进度)动态施工资源信息模型，发现和解决工程施工资源和成本控制过程中出现的矛盾和冲突，避免出现工程超预算，及时保障资源供给。张毅等[48]为解决铁路工程设计施工中信息传递困难和项目参与各方无法共同利用BIM技术进行管控的问题，研究了BIM与传统的施工进度和物料等项目管理技术，并研发了一种基于BIM的铁路工程项目管理系统。该系统应用于大瑞铁路，极大提高了模型数据共享能力和工程建设管理水平。

1.5 质量控制与检测

施工质量的控制与检测是保证路基工程安全和可持续发展的重要环节。目前利用BIM对路基施工质量控制和检测主要集中在路基填筑压实过程，在地基处理、边坡防护、排水设施等方面的研究较少。王薇[49]结合现场试验段的路基压实与质量控制全过程实施，通过北斗定位系统和BIM实现了路基施工的实时碾压和检测。该系统可自动完成施工工程量统计，直观显示施工进度、压实状态和压实质量信息，实时控制发现问题并整改。王春明等[50]通过使用BIM技术，将设计数据转化为可视化的模型，提供给施工人员参考，准确地进行路基填筑工作。将BIM技术与智能压实设备结合使用，实现模型到施工的联动，确保施工过程中的压实遍数和压实程度符合设计要求。这种数字化连续压实BIM技术可以大大提高施工效率和质量，减少施工过程中的误差和纠正。赵龙等[51]在西成线江油北站路基压实施工项目中设计了一套符合BIM管理的软硬件结构，解决了路基压实施工过程中检测速度慢、效率低、工作量大等问题，并研究了基于路基压实的BIM模型自动生成算法，将BIM模型引入到路基压实施工过程中，取得了良好效果。马源等[52]通过定性分析，研究了智能压实质量评价指标的变化规律，结合Abaqus软件的二次开发，在路基土智能压实过程中实现了质量指标参数的动态监控。刘呈斌等[53]在铁路建设施工阶段分析了铁路路基填筑施工过程质量关键控制因素，研究了基于BIM技术的施工过程质量控制与检查方法。该方法在丽香铁路路基填筑施工中进行了实践应用，施工质量达到了良好效果。随着智能施工和路基质量控制的应用，大量的现场数据亦随之产生，如何利用这些数据来提高路基质量也是近年来研究的热点问题。邱永平等[54]总结了两方面的问题，一是利用人工智能算法和数据融合方法，对多个现场监测终端的数据进行自动、快速的数据挖掘。二是关于如何通过使用数学算法

和一些物理模型来更有效地使用大数据的关键功能预测,以预测一些场景,如沉降发展、边坡稳定性、路基动力响应等。

2　BIM 技术在铁路路基工程中的挑战与解决方案

2.1　技术方面

铁路路基设计施工涉及大量数据，包括地形、测量、结构设计数据等[55-56],不同参与方使用的 BIM 软件和数据标准不同，将会产生数据兼容性问题,并导致数据交换困难。如何确保数据的准确性和一致性,并基于 BIM 技术高效处理和管理以上大规模数据是首要难题。统一数据标准和命名规范是有效方式,其可确保各参与方使用相同标准进行数据交换和共享,如采用 IFC(industry foundation classes)作为通用的数据交换格式[57-59]。另一方面,可采用云计算和分布式计算技术,提高数据处理和存储的效率,利用数据压缩和优化算法,减轻数据存储和传输的负担。同时,建立完善的数据管理系统,确保数据的及时更新和共享[44,60]。

随着施工过程的进行,BIM 模型还需同步更新,以反映实际施工情况。然而,模型更新同步的过程可能存在延迟和不准确性,更新之后的模型结构尺寸会发生变化,导致 BIM 模型无法拼装成为整体结构。Pu 等[10]结合站场路基施工提出了一种局部 BIM 模型更新方法,但其仍存在部分信息无法修改难题。在保证 BIM 模型精度的前提下,对路基 BIM 模型进行实时更新还面临巨大挑战,需进一步结合新技术或二次开发进行探索。

2.2　组织管理方面

BIM 技术在铁路路基设计施工中的应用可提供更高效和精确的组织管理,但因路基设计施工分部分项工程繁多,如何实现各分部分项工程的协同施工和信息共享,管理和更新设计施工中涉及的图纸、材料、施工计划等信息,并跟踪项目实施进度是 BIM 技术在铁路工程应用中面临的重要挑战[47-48]。

构建 BIM 协作管理平台实现铁路路基设计和施工参与方间的协同工作和信息共享;构建标准统一的信息库,实现信息集中管理、信息实时更新、项目进度实时审批和跟踪是当前深化 BIM 技术在组织与管理方面的主要方式。王万齐等[61]通过采用开放的标准和工作流程，并利用中立的协同平台,提出了一种基于 OpenBIM 的铁路工程协同管理模式,在京张高铁项目中进行了实际应用。该模式对铁路工程施工数据信息进行全面管控，最大化发挥了 BIM 的应用价值。张红勇等[62]针对国内铁路工程建设信息化管理存在缺乏统一的企业信息化架构指导，难以服务于现代铁路工程建设信息化应用,对铁路工程的数字建造平台的理论和实现方法进行研究,搭建了铁路信息共享服务平台,并在某高海拔铁路进行了数字建造应用,验证了数字建造在提高铁路工程建设信息化管理方面的有效性。

目前 BIM 技术在铁路工程组织管理方面存在一些不足之处:缺乏统一的信息管理平台,导致信息分散、不统一,难以进行全面的协同管理和数据共享；协同设计和合作的流程和工具还不够完善,缺乏有效的沟通渠道和协作平台,导致各方之间的合作效率低下,可能出现信息不一致、沟通不畅等问题;BIM 技术的应用需相关人员具备一定的技术和管理能力,然而,目前铁路工程中缺乏相关人员的培训和人才支持,导致在实际应用中,人员可能不熟悉 BIM 技术的操作和应用，影响 BIM 技术在铁路工程组织管理中的应用效果。

2.3　法律合规性方面

BIM 技术在铁路路基设计施工必须遵守相关的法律法规。然而,当前对 BIM 技术的法律法规尚不完善,缺乏明确的规范性指引,导致在实际应用中存在法律风险[63-64]。

BIM 技术的应用涉及大量数据和信息,其中包含着设计师、建筑师等多方的知识产权[65]。在信息共享的过程中，知识产权的保护成为一个重要的问题。尤其是在合作设计中,如何保护各方的知识产权成为亟待解决的难题。此外,部分 BIM 存储数据和信息具有高度敏感性,可能包含个人隐私等敏感内容。在数据的采集、存储和共享过程中,如何防止数据泄露和滥用。同时,BIM 技术在铁路路基设计施工中涉及多方的合同关系和责任划分。BIM 技术的应用可能改变项目参与方之间的法律责任和风险分担方式，如 BIM 模型中一旦出现设计问题、数据丢失、信息传递差池等情况,可能导致工程延误或损失会给项目带来巨大风险，当模型管理者、项目负责人和其他参与方之间的职责模糊时,责任将无法清晰划分[66]。

需建立起完善的知识产权保护机制,加强数据

的加密和访问权限管理,并在合同中明确各方在数据分享和使用中的责任与义务，规范技术应用,确保各方的权益得到保护。

2.4 经济效益方面

BIM技术在铁路路基设计施工中的应用可提高设计效率、施工协调性、施工质量和安全性,从而提高项目的整体经济效益[67]。但就当前BIM技术应用现状而言,无法实现模型的顺利传递,即无法实现设计、施工和运维阶段的一体化,导致项目不同阶段会出现重复投资,且引入BIM技术需额外考虑到相关的技术和人员培训成本,以及与传统设计施工方式的衔接和协调,其价值是长期的,短期内很难直接计算出经济价值,以上问题的客观存在阻碍了BIM技术在多数项目建设中的推广应用[68]。

为解决以上难题，我国出台了一系列政策文件,鼓励和推动BIM技术在铁路工程中的应用[69]。《“十四五”铁路科技创新规划》明确提出在国家铁路建设与发展“十四五”规划期间,深入推广铁路信息模型技术。但以上仍需铁路路基设计施工参与各方统一认识,推动BIM技术在项目设计施工阶段的综合管理,并配备适当的技术力量和资源,协助项目推广BIM技术,逐步扩大其在项目管理中的应用广度和深度。

3 基于BIM技术的铁路路基工程发展趋势

对BIM技术在铁路路基工程中的技术发展与创新方面作出以下展望。

1）5D BIM。5D BIM是在3D模型的基础上加入时间(4D)和成本(5D)信息,实现对施工进度和成本的模拟和优化[70]。通过模拟和优化,可以预测和评估不同设计施工方案的效果,包括结构强度、水流模拟、风险评估等,减少后期的修改和成本。5D BIM将在提高施工效率和控制成本方面发挥更重要的作用。

2）BIM与物联网的融合。BIM技术与传感器、无人机等物联网设备相结合,可实现对铁路路基施工过程的实时监测和管理[71],包括实现对施工设备和材料的追踪和管理,提高施工质量和安全性。BIM与物联网的融合可在铁路路基工程中提供更准确、可靠和高效的施工技术,改善施工管理、施工质量的各个方面。

3）BIM与数值分析软件的融合。BIM融合有限元软件技术的研究已逐渐应用在土木工程研究领域[72-73],铁路路基设计施工难点众多,结合有限元软件可以分析铁路路基工程受力特性,模拟不同荷载条件下的结构行为，评估结构的安全性和稳定性,确保其具备足够的强度和稳定性。未来,BIM融合有限元软件的应用可为铁路路基工程带来更安全、更可持续的设计、施工和管理。

4）数据集成和共享。数据的集成和共享是BIM技术发展的必然方向。BIM模型可以整合各种数据源,包括GIS、地形数据、材料属性等,以建立更全面和精确的模型。同时,BIM模型的共享将促进不同利益相关方之间的协同合作,提高项目的整体效率和质量。

5）智能化和自动化。通过对大量数据的分析和学习,BIM已可以自动识别和纠正设计中的潜在问题,提供更精确和可靠的建模结果[74]。未来,BIM技术与机器人和自动化设备结合,实现设计施工任务的自动化和智能化是重要的创新发展方向。

6）虚拟现实(VR)和增强现实(AR)。VR和AR技术可为铁路路基设计和施工提供更直观、沉浸式的体验[75-76]。通过VR创建虚拟的工程环境,工程师可进行沉浸式的体验和评估。AR可将BIM模型叠加到实际工程现场,帮助施工人员准确理解设计意图和施工要求,提高设计和施工的效率和质量。

7）数据分析和决策支持。随着BIM模型产生的数据增多,数据分析和决策支持的重要性也将增加[77]。通过对数据的分析,可发现工程项目中的模式和趋势,提供更准确的预测和决策依据,优化项目的进展和成果。

4 结论

1）目前基于BIM技术的铁路路基设计施工应用研究主要包括模型可视化、协同设计与冲突检测、数据采集与处理、施工管理与优化、质量控制与检测等方面。利用BIM技术可实现对铁路路基结构进行直观展示并优化施工管理,提高效率减少施工风险。

2）BIM技术在铁路路基设计施工中仍面临技术、组织管理、法律合规性和经济效益等方面的挑战。针对现有挑战应加快深入BIM技术的研究应用,完善相关法律法规,强化认识及管理,为铁路路基工程可持续发展提供解决方案。

3) BIM 技术在铁路路基工程中具有巨大的发展潜力和应用前景。BIM 技术在铁路路基中的应用研究仍处于初期阶段,在数据集成和共享、智能化和自动化、虚拟和增强现实以及数据分析和决策支持等方面还有待进一步发展,这些发展将为铁路路基工程带来更高效、可靠和可持续的设计、施工和维护过程。

参考文献:

[1] 孟存喜,钟祥水,卞祖经. 铁路勘测设计一体化、智能化的研究与关键技术[J]. 铁道标准设计,2006(S1):212-214.
MENG C X,ZHONG X S,BIAN Z J. Research and key technology of railroad survey and design integration and intelligentization[J]. Railway Standard Design,2006(S1):212-214.

[2] 刘辉. 季节性冻土地区高速铁路设计施工技术[J]. 铁道工程学报,2017,34(10):1-10.
LIU H. Design and construction technology of high speed railway in seasonal frozen soil region[J]. Journal of Railway Engineering,2017,34(10):1-10.

[3] 卢祝清. BIM 在铁路建设项目中的应用分析[J]. 铁道标准设计,2011(10):4-7.
LU Z Q. Application analysis of BIM in railway construction projects[J]. Railway Standard Design,2011(10):4-7.

[4] 朱江. BIM 在铁路设计中的应用初探[J]. 铁道工程学报,2010,27(10):104-108.
ZHU J. Discussion on application of BIM in railway design [J]. Railway Engineering Journal,2010,27(10):104-108.

[5] BIANCARDO S A,VISCIONE N,CERBONE A,et al. BIM-based design for road infrastructure: a critical focus on modeling guardrails and retaining walls[J]. Infrastructures,2020,5(7):59.

[6] BENSALAH M,ELOUADI A,MHARZI H. Overview: the opportunity of BIM in railway[J]. Smart and Sustainable Built Environment,2019(2):8.

[7] 王同军. 智能铁路总体架构与发展展望[J]. 铁路计算机应用,2018,27(7):1-8.
WANG T J. Overall architecture and development prospect of intelligent railway[J]. Railway Computer Application,2018,27(7):1-8.

[8] 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 Railway,2019,41(1):1-9.

[9] 靳猛. 基于欧特克平台的铁路路基 BIM 设计技术研究[J]. 铁道标准设计,2020,64(7):59-63.
JIN M. Research on BIM design technology of railway subgrade based on Autodesk platform[J]. Railway Standard Design,2020,64 (7):59-63.

[10] PU H,FAN X,LI W,et al. Realizing a quick partial BIM update of subgrade in railway stations [J]. Journal of Construction Engineering and Management,2023,149(9):04023073.

[11] SHENG X,LUO H,WANG P. Application of Bentley power rail track software in the BIM railway design[J]. Applied Mechanics and Materials. 2014,587:1091-1094.

[12] CAO B. Application of BIM technology in forward design of railway subgrade[J]. Journal of Civil Engineering and Urban Planning,2022,4(5):1-5.

[13] 李明,曹博,白朝能,等. BIM 技术在铁路路基防护中的应用[J]. 建筑,2022(2):78-80.
LI M,CAO B,BAI Z N,et al. Application of BIM technology in railway subgrade protection[J]. Architecture,2022(2):78-80.

[14] 谢先当,刘厚强,翟连吉. 基于 Bentley 平台的铁路路基 BIM 正向设计研究[J]. 铁路技术创新,2020(4):43-49.
XIE X D,LIU H Q,ZHAI L J. Research on BIM forward design of railway subgrade based on Bentley platform[J]. Railway Technology Innovation,2020(4):43-49.

[15] 刘祯颌. 铁路站场 BIM 设计系统关键技术研究[J]. 铁道工程学报,2022,39(6):84-89.
LIU J C. Research on the key technologies of BIM design system for railway stations[J]. Journal of Railway Engineering,2022,39(6):84-89.

[16] 刘厚强,易旭鹏,朱聪. 基于 BIM 的三维铁路路基建模应用研究[J]. 铁道标准设计,2015,59(7):20-23.
LIU H Q,YI X P,ZHU C. The application of three dimensional modeling with BIM technology in railway subgrade [J]. Railway Standard Design,2015,59(7):20-23.

[17] 柯子翊,蒲浩,李伟,等.基于广义六面体的站场数字路基模型构建方法研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(8):1913-1922.
KE Z Y,PU H,LI W,et al. Research on the modeling method of railway station digital subgrade model based on general hexahedron[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(8):1913-1922.

[18] 王宏远. 铁路路基 BIM 与 GIS 融合应用技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2022.
WANG H Y. Research on BIM and GIS fusion application technology in railway subgrade[D]. Lanzhou:Lanzhou Jiaotong

University,2022.

[19] 王明生, 张振平. GIS环境下铁路路基三维建模方法研究[J]. 铁道运输与经济,2008(1):54-56.
WANG M S,ZHANG Z P. Study on roadbed 3D model under the condition of GIS[J]. Railway Transportation and Economy,2008(1):54-56.

[20] WANG H,DUAN X,HAN F. Research on ecological protection of side slope along railway subgrade based on BIM+ GIS[C]//Nanjing:Nanjing International Conference on Hydraulic and Civil Engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum,2021.

[21] 郭泽,谭衢霖,戴泽宇,等. 基于WebGIS的铁路线路三维场景构建[J]. 铁路计算机应用,2022,31(5):22-27.
GUO Z,TAN Q L,DAI Z Y,et al. Construction of railway line 3D scene based on WebGIS[J]. Railroad Computer Application,2022,31(5):22-27.

[22] 张钰,董凤翔,赵亮亮,等. 基于BIM+GIS的铁路三维场景快速建立方法研究[J]. 铁路技术创新,2021(4):27-31.
ZHANG Y,DONG F X,ZHAO L L,et al. Research on rapid establishment method of railroad three-dimensional scene based on BIM+GIS[J]. Railroad Technology Innovation,2021(4):27-31.

[23] 夏宇,谭衢霖,蔡小培,等. 铁路BIM应用三维线路场景构建研究[J]. 铁路计算机应用,2018,27(7):95-98.
XIA Y,TAN Q L,CAI X P,et al. Railway BIM applied to 3D line scene construction[J]. Railway Computer Application,2018,27(7):95-98.

[24] TANG F,MA T,ZHANG J,et al. Integrating three-dimensional road design and pavement structure analysis based on BIM[J]. Automation in Construction,2020,113:103152.

[25] 孔国梁,苏林,李顶峰. 铁路路基排水BIM设计方法研究[J]. 铁路技术创新,2016(3):42-45.
KONG G L,SU L,LI D F. Research on BIM design method of railroad roadbed drainage[J]. Railway Technology Innovation,2016(3):42-45.

[26] 卞友艳. BIM技术在沪通铁路站场路基设计中的应用研究[J]. 铁道标准设计,2020,64(9):6-9.
BIAN Y Y. Research on the application of BIM technology in the design of roadbed of Hutong Railway Station [J]. Railway Standard Design,2020,64(9):6-9.

[27] 易菊香,薛宇腾,黄新文,等. 基于数字化技术的铁路路基三维信息模型算量方法研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(10):94-100.
YI J X,XUE Y T,HUANG X W,et al. Research on the calculation method of three-dimensional information model of railroad roadbed based on digital technology[J]. Railway Standard Design,2023,67(10):94-100.

[28] 李琬荻. BIM技术在铁路路基设计中的应用 [J]. 铁路技术创新,2022(4):87-91.
LI W D. Application of BIM technology in railroad roadbed design[J]. Railway Technology Innovation,2022(4):87-91.

[29] 张钧达. 铁路路基工程BIM技术应用研究[J]. 铁路技术创新,2020(3):56-60.
ZHANG J D. Research on the application of BIM technology in railroad roadbed project[J]. Railroad Technology Innovation,2020(3):56-60.

[30] 刘彦明. 基于Bentley平台的铁路桥梁BIM设计系统[J]. 铁路技术创新,2017(1):12-14.
LIU Y M. Railroad bridge BIM design system based on Bentley platform[J]. Railway Technology Innovation,2017(1):12-14.

[31] 胡文丽. BIM技术在高速铁路工程声屏障设计中的应用研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(8):166-170.
HU W L. Application of BIM technology in the design of the sound barrier of railway engineering[J]. Railway Standard Design,2021,65(8):166-170.

[32] 李亚东,郎灏川,吴天华. 现场扫描结合BIM技术在工程实施中的应用[J]. 施工技术,2012,41(18):19-22.
LI Y D,LANG H C,WU T H. Application of field scanning combined with BIM technology in engineering implementation[J]. Construction Technology,2012,41(18):19-22.

[33] 卢玉韬,韩春华,曾鹏. 基于BIM的无人机桥梁检测实施方案研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2017,9(2):73-77.
LU Y T,HAN C H,ZENG P. Research on the implementation program of UAV bridge inspection based on BIM[J]. Information Technology for Civil Engineering and Construction,2017,9(2):73-77.

[34] 夏艳军. 基于激光雷达的高铁路基正常高测量方法[J]. 铁道工程学报,2018,35(12):7-10.
XIA Y J. The measurement method of normal height for high speed railway foundation based on laser radar [J]. Journal of Railway Engineering,2018,35(12):7-10.

[35] 刘孟涵. BIM地形建模技术在高速铁路测绘中的应用[J]. 铁道勘察,2019,45(3):9-12.
LIU M H. Application of BIM terrain modeling technology in high speed railway surveying and mapping[J]. Railway Survey,2019,45(3):9-12.

[36] 岳忠翔,罗俐,王全,等. BIM技术在山岭高速公路工程施工管理中的应用[J]. 施工技术,2019,48(S1):244-248.
YUE Z X,LUO L,WANG Q,et al. Application of BIM technology in construction management of mountain ex-

pressway project[J]. Construction Technology,2019,48(S1):244-248.

[37] 林国涛,孙增奎,肖斌,等. 综合无人机、GIS、BIM 技术的道路设计研究[J]. 公路,2021,66(3):23-26.
LIN G T,SUN Z K,XIAO B,et al. Research on roadway design by synthesizing UAV,GIS and BIM technologies[J]. Highway,2021,66(3):23-26.

[38] 刘曜玮, 郭婧娟. 无人机航拍与 BIM 技术相结合的公路工程量计量技术研究[J]. 项目管理技术,2020,18(10):98-103.
LIU Y W,GUO J J. Research on highway project quantity measurement technology combining drone aerial photography and BIM technology[J]. Project Management Technology,2020,18(10):98-103.

[39] 梁策,王万齐,蔡德钩. 基于 BIM 和北斗卫星定位的路基连续压实信息系统研究[J]. 铁道建筑,2017(7):104-107.
LIANG C,WANG W Q,CAI D H. Research on continuous compaction information system of subgrade based on BIM and Beidou satellite positioning[J]. Railway Construction,2017(7):104-107.

[40] 卢春房,马战国,蔡超勋. 重载铁路线路设备智能感知体系框架研究[J]. 铁道建筑,2022,62(8):1-6.
LU C F,MA Z G,CAI C X. Research on the framework of intelligent sensing system for line equipment of heavy railroad[J]. Railway Construction,2022,62(8):1-6.

[41] 赵敏聪,白鹏程. 哈大铁路客运专线路基数字化施工工艺[J]. 铁道标准设计,2012(5):52-55.
ZHAO M C,BAI P C. Digitalized processes for construction of Harbin-dalian passenger dedicated line roadbed[J]. Railway Standard Design,2012(5):52-55.

[42] 张乃乐,钱进,王文涛,等. 基于无人机影像与 BIM 技术的铁路施工组织管理智能化应用[J]. 铁路技术创新,2022(4):7-13.
ZHANG N L,QIAN J,WANG W T,et al. Intelligent application of railroad construction organization and manage ment based on drone image and BIM technology[J]. Railway Technology Innovation,2022(4):7-13.

[43] 鲍榴,杨斌,杨威,等. 基于 BIM+GIS 的铁路工程建设管理一张图关键技术研究及应用[J]. 铁道标准设计,2021,65(5):55-60.
BAO D,YANG B,YANG W,et al. Research and application of key technology of railway construction management based on BIM+GIS[J]. Railway Standard Design,2021,65(5):55-60.

[44] 韩宝剑,刘红良,闫军.BIM+GIS 数据集成在京雄城际铁路四电施工管理中的应用[J]. 中国铁路,2022(12):50-57.
HAN B J,LIU H L,YAN J . Application of BIM+GIS data integration in the construction management of four power supply of Beijing—Xiongan Intercity Railway[J]. China Railway,2022(12):50-57.

[45] 康振江. 铁路施工安全管理工作特点及提升管理的措施[J]. 城市建设理论研究,2023(10):16-18.
KANG Z J. Characteristics of railroad construction safety management and measures to improve management[J]. Urban Construction Theory Research,2023(10):16-18.

[46] 张钦礼,王雅. 基于建筑信息模型的铁路工程安全管理体系研究[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(12):174-178.
ZHANG Q L,WANG Y. Research on safety management system of railway engineering based on building information modeling[J]. China Safety Production Science and Technology,2017,13(12):174-178.

[47] 张建平,范喆,王阳利,等. 基于 4D-BIM 的施工资源动态管理与成本实时监控[J]. 施工技术,2011,40(4):37-40.
ZHANG J P,FAN Z,WANG Y L,et al. Resource dynamic management and cost real-time monitoring in building construction based on 4D-BIM[J]. Construction Technology,2011,40(4):37-40.

[48] 张毅,黄从治,朱聪. 基于 BIM 的铁路工程项目管理系统应用研究[J]. 铁道工程学报,2019,36(9):98-103.
ZHANG Y,HUANG C Z,ZHU C. Research on the application of railway engineering project management system based on BIM[J]. Journal of Railway Engineering,2019,36(9):98-103.

[49] 王薇. 铁路路基连续压实技术质量控制研究[J]. 铁路工程技术与经济,2021,36(3):42-46.
WANG W. Study on quality control of continuous compaction technology on railway subgrade[J]. Railroad Engineering Technology and Economy,2021,36(3):42-46.

[50] 王春明,李柏林,杨植. 数字化连续压实 BIM 技术在重载铁路工程路基填筑中的应用[J]. 路基工程,2018(4):178-181.
WANG C M,LI B L,YANG Z. Application of digital continuous compaction BIM technology in roadbed filling of heavy railroad engineering[J]. Roadbed Engineering,2018(4):178-181.

[51] 赵龙,闵世平,赵亮亮. BIM 模型在路基压实检测技术中的应用[J]. 铁道工程学报,2015,32(4):36-41.
ZHAO L,MIN S P,ZHAO L L. Application of BIM model in detection technology of subgrade compaction[J]. Journal

of Railway Engineering,2015,32(4):36–41.

[52] 马源,方周,韩涛,等. 路基智能压实关键控制参数动态仿真及演变规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2246–2257.
MA Y,FANG Z,HAN T,et al. Dynamic simulation and evolution of key control parameters for intelligent compaction of subgrade[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2021,52(7):2246–2257.

[53] 刘呈斌,董凤翔,谢先当,等. 基于BIM技术的数字化路基填筑施工过程控制研究[J]. 铁路计算机应用,2019,28(6):59–63.
LIU C B,DONG F X,XIE X D,et al. Digital subgrade filling construction process control based on BIM technology [J]. Railroad Computer Application,2019,28(6):59–63.

[54] 邱永平,张东卿,刘菀茹."大数据"在铁路路基工程设计中的应用探讨[J]. 高速铁路技术,2017,8(3):16–19.
QIU Y P,ZHANG D Q,LIU W R. Discussion on application of big data in railway subgrade engineering design[J]. High–speed Railway Technology,2017,8(3):16–19.

[55] DANIEL Q,MAIRA P,RAMON S,et al. Influence of topographic data in the development of railway projects using BIM[J]. Journal of Transportation Engineering,Part A: Systems,2023,149(6):4023036.

[56] 刘昭,邓运成,李鸣. 一种基于BIM模型的铁路站场线路结构数据提取智能算法[J]. 铁道标准设计,2023,67(10):70–78.
LIU Z,DANG Y C,LI M. An intelligent algorithm for extracting railway station yard line structure data based on BIM model[J]. Railway Standard Design,2023,67(10):70–78.

[57] 蔡靖,王瀚雪,戴轩,等. 基于IFC标准的场道结构信息模型存储与传递方法研究[J/OL]. 北京航空航天大学学报:1–13. [2023–09–02].https://doi.org/10.13700/j.bh.1001–5965.2022.0815.
CAI J,WANG H X,DAI X,et al. Research on storage and transfer method of airport pavement information model based on IFC standard[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics:1–13.[2023–09–02].https://doi.org/10.13700/j.bh.1001–5965.2022.0815.

[58] GAO G,LIU Y S,WU J X,et al. IFC railway: a semantic and geometric modeling approach for railways based on IFC[C]//Osaka:Osaka Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering,2016.

[59] PU H,FAN X,SCHONFELD P,et al. Extending IFC for multi–component subgrade modeling in a railway station[J]. Automation in Construction,2022,141:104433.

[60] 施平望. 城市轨道交通BIM数据资源共享服务平台[J]. 现代城市轨道交通,2023(3):96–100.
SHI P W. BIM data resource sharing service platform for urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transportation,2023(3):96–100.

[61] 王万齐,李达墩,李飞. 基于open BIM的铁路工程建设协同模式研究及应用[J]. 铁道运输与经济,2022,44(9):130–138.
WANG W Q,LI D Z,LI F. Research and application of open BIM–based collaborative code for railway engineering construction[J]. Railway Transportation and Economy,2022,44(9):130–138.

[62] 张红勇,左睿,卫佳佳,等. 铁路工程数字建造平台建模方法与应用研究[J]. 工程建设与设计,2023(11):133–137.
ZHANG H Y,ZUO R,WEI J J,et al. Modeling method and application of railway engineering digital construction platform[J]. Engineering Construction & Design,2023(11):133–137.

[63] WONG P,LAI J. Building Information Modelling (BIM): insights from collaboration and legal perspectives[C]//Kuala Lumpur:IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2022.

[64] 刘枏,张媛杰,邓禾,等. BIM技术应用的法律问题[J]. 土木建筑工程信息技术,2019,11(6):36–41.
LIU Y,ZHANG Y J,DENG H,et al. Legal issues of BIM technology application[J]. Civil Engineering and Construction Information Technology,2019,11(6):36–41.

[65] 李明宇. BIM技术著作权法律问题研究[D]. 沈阳:东北财经大学,2022.
LI M Y. Research on legal issues of BIM technology copy right[D]. Shenyang:Northeast University of Finance and Economics,2022.

[66] 刘枏,徐程程,肖青,等.基于BIM应用的我国工程合同部分条款的变更探讨[J]. 建筑经济,2021,42(9):28–32.
LIU J,XU C C,XIAO Q,et al. Discussion on the modification for some clauses of Chinese construction contract based on BIM application[J]. Construction Economy,2021,42(9):28–32.

[67] 陈一鑫,马少雄,徐宏. BIM技术在既有铁路车站站改工程施工阶段的应用研究[J]. 铁道标准设计,2018,62(8):123–126.
CHEN Y X MA S X,XU H. Study on application of BIM technology in reconstruction of existing railway stations[J]. Railway standard design,2018,62(8):123–126.

[68] 纪博雅,戚振强,金占勇. 基于外部性分析的建筑业BIM

应用阻碍及对策[J]. 施工技术,2014,43(3):84-87.
JI B Y,QI Z Q,JIN Z Y. Obstacles and countermeasures of BIM application in construction industry based on ex ternality analysis[J]. Construction Technology,2014,43(3):84-87.

[69] 徐骏,李安洪,刘厚强,等. BIM 在铁路行业的应用及其风险分析[J]. 铁道工程学报,2014(3):129-133.
XU J,LI An H,LIU H Q,et al. Application and risk analysis of BIM in railway systems[J]. Journal of Railway Engineering,2014(3):129-133.

[70] 董洪学,陈景雅. BIM 在公路工程中的应用研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(1):32-36.
DONG H X,CHEN J Y. Research on the application of BIM in highway engineering[J]. Journal of East China Jiaotong University,2018,35(1):32-36.

[71] HAN T,MA T,FANG Z,et al. A BIM-IoT and intelligent compaction integrated framework for advanced road compaction quality monitoring and management[J]. Computers and Electrical Engineering,2022,100:107981.

[72] 徐凯,刘惊灏,苏谦,等. 基于 BIM 精细设计模型融合FEM的铁路高边坡稳定性分析[J]. 铁道标准设计,2023,67(9):36-41.
XU K,LIU J H,SU Q,et al. Stability analysis of railway high slope based on fine BIM design model and FEM[J]. Railway Standard Design,2023,67(9):36-41.

[73] 李枝军,安景峰,卢镇林,等. 基于桥梁 BIM 模型的力学分析与融合应用技术研究[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2022,44(6):647-653.
LI Z J,AN J F,LU Z L,et al. Research on mechanical analysis and fusion application technology based on bridge BIM model[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition),2022,44(6):647-653.

[74] 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]. Journal of Civil Engineering,2019,52(5):1-11.

[75] 王志伟,马伟斌,于进江,等. 基于 BIM+VR 的沉浸式地下高速铁路车站疏散演练场景构建关键技术[J]. 铁道建筑,2022,62(12):153-157.
WANG Z W,MA W B,YU J J,et al. Key technology for construction of immersive underground high-speed railroad station evacuation drill scene based on BIM+VR[J]. Railway Construction,2022,62(12):153-157.

[76] 张超,何越磊,路宏遥. 基于 BIM+移动增强现实的高速铁路工务智能维修技术研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(12):44-49.
ZHANG C,HE Y L,LU H Y. Research on intelligent maintenance technology of high-speed railway based on BIM+Mobile augmented reality[J]. Railway Standard Design,2021,65(12):44-49.

[77] 陈华鹏,鹿守山,雷晓燕,等. 数字孪生研究进展及在铁路智能运维中的应用[J]. 华东交通大学学报,2021,38(4):27-44.
CHEN H P,LU S S,LEI X Y,et al. Advance in research on applications of digital twin in intelligent railway operation management[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(4):27-44.



第一作者:涂文博(1989—),男,副教授,博士,硕士生导师,中国科学技术协会青年人才托举工程获得者,研究方向为土与结构相互作用。E-mail:wenbotu@126.com。



通信作者:张鹏飞(1975—),男,教授,博士,博士生导师,江西省高层次高技能领军人才培养工程人选,研究方向为轨道结构及轨道动力学。E-mail:zhangpf4236@163.com。

(责任编辑:姜红贵)