

《路基工程·智能建养》专栏

[编者按]针对“交通强国”与“新基建”国家重大战略目标与使命任务下我国交通基础设施智能化建造的转型需求,“路基工程智能建养技术”旨在解决公路、铁路与机场建造领域存在的路基智能建设重视度不够,路基病害早期准确判别难,路基性能监测、病害处治手段单一,多源数据难融合、难决策等瓶颈问题。

在数字化的基础上,全面提升基础设施的智能、绿色、韧性、与长寿品质,提高智能交通基础设施的建设质量与养护水平,离不开各类新技术、新材料、新工艺、新方法的研究、应用与推广。须及时总结路基工程智能建养技术领域国内外科学研究与工程应用的最新成果,引领交通基础设施智能化建养方向,推动“数据+智能”型新材料、新结构及新工艺的发展与创新。

为此,本刊推出《路基工程·智能建养》专栏,本期专栏的4篇文章分别从“路基智能建养关键技术”“路基回弹模量预测方法”“路堤拼接差异沉降控制”“路堑生态护坡稳定性分析”等方面研究了路基工程的智能建养技术。

专栏主编简介:

张军辉,教授,博士生导师,“十四五”国家重点研发计划项目首席科学家,国家杰出青年科学基金获得者。主要从事耐久性路基设计理论与方法、路基拼接工程差异沉降控制、特殊土路基稳定与加固、建筑固废资源化利用等方面的教学、应用基础研究、科技开发和工程实践。主持国家重点研发计划项目等国家和省部级项目10余项,发表学术论文140余篇,主参编规范6部,出版学术专著4部,授权发明专利50余项。获国家科技进步二等奖1项,省部级科技进步一等奖4项、发明一等奖1项。

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.20231225001

文章编号:1672-9331(2024)01-0059-29

引用格式:刘李彦,杨豪,张军辉,等.公路路基工程智能建养关键技术研究及展望[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(1):59-87.

Citation: LIU Liyan, YANG Hao, ZHANG Junhui, et al. Research and prospect of key technologies for intelligent construction and maintenance of highway subgrade engineering[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 59-87.

公路路基工程智能建养关键技术研究及展望

刘李彦^{1,2,3}, 杨豪^{1,2,3}, 张军辉^{1,2,3}, 郭凯丽^{1,2,3}

(1.长沙理工大学 公路工程省部共建教育部重点实验室,湖南 长沙 410114;2.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410114;3.湘江实验室,湖南 长沙 410205)

摘要:路基是公路的主要承重结构。随着我国公路建设由高速发展转向高质量发展,数字化施工技术、智能化建设以及信息化管控成为路基工程中的核心技术手段。本文综述了路基工程智能建养关键技术研究现状,并主要从建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术、路基智能压实技术、路基健康监测与评价技术以及路基智能注浆加固技术4个方面进行分析。目前存在问题如下:BIM技术在路基工程领域中的应用还处于起步阶段,缺少合理的施工质量量化指标以及成本估算方法;智能压实技术理论研究薄弱,质量均匀性评价研究较少;现有路基监测与评价技术的测量方法易受到其他因素影响,人工干预较大;注浆加固技术没有统一的质量评价指标,大多还是凭借工程经验和理论分析来评价。因此,未来需要针对提出的问题对各项关键技术开展智能化理论与应用研究,为路基工程智能化建养提供指引。

关键词:公路路基;建筑信息模型技术;智能压实;注浆加固;智能监测与评价

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

收稿日期:2023-12-25;修回日期:2024-01-09;接受日期:2024-01-09

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2600900);湘江实验室重大计划/开放课题项目(22XJ01009);国家杰出青年科学基金项目(52025085);国家自然科学基金资助项目(52208421);湖南省自然科学基金资助项目(2023JJ40050);湖南省教育厅科学研究项目(23B0315);长沙理工大学研究生科研创新项目(CSLGXCX23012)

通信作者:张军辉(1978—)(ORCID:0000-0002-0745-1213),男,教授,主要从事道路工程方面的研究。

E-mail: zjhseu@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

Research and prospect of key technologies for intelligent construction and maintenance of highway subgrade engineering

LIU Liyan^{1,2,3}, YANG Hao^{1,2,3}, ZHANG Junhui^{1,2,3}, GUO Kaili^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Highway Engineering of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. Xiangjiang Laboratory, Changsha 410205, China)

Abstract: The subgrade is the main load-bearing structure of highways. With the transition of China's highway construction from high-speed development to high-quality development, digital construction technology, intelligent construction, and information management have become the core technical means in subgrade engineering. This paper summarizes the research status of key technologies of construction and maintenance for intelligent highway subgrades, mainly analyzing building information modeling (BIM) technology, intelligent compaction technology for subgrades, subgrade health monitoring and assessment technology, and intelligent grouting reinforcement technology for subgrades. The current problems are as follows: the application of BIM technology in the field of subgrade engineering is still in its infancy, lacking reasonable construction quality quantification indicators and cost estimation methods. The theoretical research on intelligent compaction technology is weak, and there is limited research on quality uniformity evaluation. Existing measurement methods for subgrade monitoring and assessment technology are susceptible to interference from other factors and require significant human intervention. In addition, there is no unified quality evaluation index for grouting reinforcement technology, mostly relying on engineering experience and theoretical analysis for evaluation. Therefore, it is necessary to conduct intelligent theoretical and applied research on various key technologies to address the proposed problems and provide guidance for the intelligent construction and maintenance of subgrade engineering in the future.

Key words: highway subgrade; building information modeling technology; intelligent compaction; grouting reinforcement; intelligent monitoring and assessment

Foundation item: Project (2021YFB2600900) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (22XJ01009) supported by the Major Program/Open Project of Xiangjiang Laboratory; Project (52025085) supported by the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China; Project (52208421) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2023JJ40050) supported by Natural Science Foundation of Hunan Province; Project (23B0315) supported by Scientific Research Program of Hunan Provincial Department of Education; Project (CSLGCX23012) supported by Changsha University of Science & Technology Graduate Student Research and Innovation Program

Corresponding author: ZHANG Junhui (1978—) (ORCID:0000-0002-0745-1213), male, professor, research interest: road engineering. E-mail: zjhseu@csust.edu.cn

0 引言

在当今数字化经济和产业技术密集创新的时代背景下,我国适时提出了“新基建”国家战略,其核心要素之一是借助当今飞速发展的5G通信、物

联网和人工智能等前沿技术,使传统产业全面迈向数字化、信息化和智慧化^[1]。现阶段,我们国家亟待由“交通大国”转向“交通强国”^[2],在众多亟需转型升级的传统产业中,公路交通基础设施建设与运营无疑是与基本民生和社会经济关联度最高、需求最为迫切的产业之一。2019年由中共中

央、国务院印发的《交通强国建设纲要》中,强调“推动大数据、互联网、人工智能、区块链、超级计算等新技术与交通行业深度融合。推进数据资源赋能交通发展,加速交通基础设施网、运输服务网、能源网与信息网络融合发展,构建泛在先进的交通信息基础设施。”2017年1月,交通运输部印发的《推进智慧交通发展行动计划》中,强调“推进交通基础设施智能化管理。加快云计算、大数据等现代信息技术的集成创新与应用,加强公路养护决策、路网运行监测、应急调度指挥等核心业务系统建设和应用,有效提升路网建管养智能化水平。”

路基是公路基础设施的关键组成部分,是基于线路位置和技术要求所确定的带状构造物,它需要承受填料重量、路面的重力和运输荷载,在整个道路结构中起着至关重要的作用^[3]。路基作为路面结构的基础,其施工质量关系到公路的整体质量和稳定,因此,解决路基问题是公路建设中亟待解决的首要任务,只有确保路基质量,才能保证公路的安全性、稳定性和持久性^[4-6]。随着交通量持续迅速增长,我国在公路建设领域的需求量也越来越大。考虑到目前填方路堤施工后沉降、不均匀沉降和路面裂缝等问题,我国应当重视路基工程的规划和设计,特别是路基建设中的绿色化、信息化和智能化方面,努力实现成为交通强国的愿景。相较于普通国(省)干线、农村公路,高速公路具有较好的应用基础,其应用场景和服务类型也更为丰富,因此高速公路是率先开展公路智能化的公路类型。在公路建养过程中,路基工程的智能化主要聚焦于路基智能化建造、全生命周期数据数字化以及智能养护管控等方面。目前,应用于公路建设中的一些传统施工方法和检测手段正逐步朝着智能化方向发展,现有的相关研究多将每项智能技术单独应用于路基工程建养中,没有进行比较全面的总结。

为此,本文对建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术、路基智能压实技术、路基健康监测与评价技术以及路基智能注浆加固技术4种关键技术进行归纳总结,以期对路基工程智能建养技术研发与应用提供参考。

1 BIM技术在路基工程中的应用

近年来, BIM 技术为传统计算机辅助设计(computer aided design, CAD)技术面临的各种挑战提供了新思路,并为公路工程领域带来了技术层面的创新和变革^[7]。2017年9月,交通运输部正式发布《关于开展公路 BIM 技术应用示范工程建设的通知》,其中明确指出在施工中建立基于 BIM 技术的项目管理系统和全员参与的共享管理方式,此外,还强调利用 BIM 技术优化施工组织,完善 BIM 数据,加强施工质量管控;加强 BIM 技术在养护管理中的应用,推动养护期间各阶段施工数据的共享与传递,并构建全生命周期的 BIM 养护管理体系,实现病害原因分析、养护方案设计和辅助养护决策等。

1.1 BIM 技术研究

Chuck Eastman 在 1975 年首次提出“Building Description System”系统,并对其功能进行了简要说明^[8],随后芬兰学者推出了“Product Information Model”系统,美国学者 Robert Aish 提出了更加全面的“Building Modeling”^[9],但 BIM 的学术研究仍无法在实践中得到应用。在 21 世纪计算机软件飞速发展的背景下, BIM 的研究与应用取得了重大突破。2007—2015 年,美国陆续颁布了三版 BIM 标准,实现了 BIM 技术应用的统一化和标准化^[3,10]。我国在《2011—2015 年建筑业信息化发展纲要》中明确提出,在施工阶段开展 BIM 技术的研究与应用,推进 BIM 技术从设计阶段向施工阶段的应用延伸,降低信息传递过程中的衰减,研究基于 BIM 技术的 4D 项目管理信息系统在大型复杂工程施工过程中的应用,实现对建筑工程有效的可视化管理等。本文在分析大量参考文献后,对 BIM 技术在公路工程各阶段的应用进行了总结,如图 1 所示。

针对 BIM 技术在路基工程中的应用研究,基于工程系统分解结构(engineering breakdown structure, EBS)对路基工程实体的各个分部和分项工程进行统一的 BIM 信息编码,对路基工程实体模型进行几何和非几何信息分类(表 1),从而实现项目管理信息的整合^[11]。

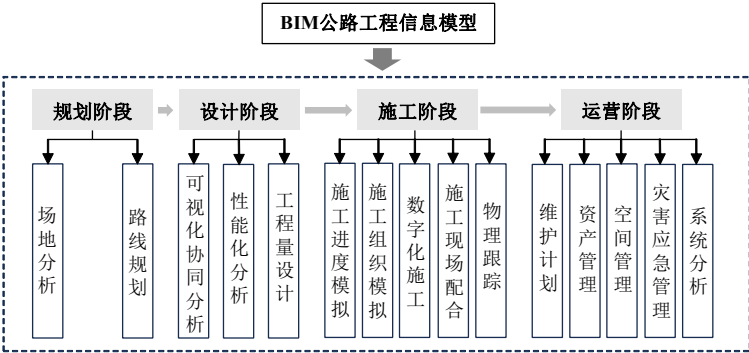


图 1 BIM 技术在各阶段的应用

Fig. 1 Application of BIM technology in each stage

表 1 路基工程BIM 模型所含几何信息^[11]

Table 1 Geometric information contained in BIM model of subgrade engineering^[11]

信息维度	信息内容
几何信息	场地:场地边界(用地红线、高程、正北向)、地形表面、场地道路等
	路基横断面大致形式
	地面线、路线和地质信息
	路线上桥梁、涵洞、通道、重大防护工程、重大排水工程的位置
	填方路段和挖方路段、填挖方高度
	每个施工步骤的几何模型
	路基横断面的粗略几何信息:每层的填料、边坡坡度、高度等
	排水工程的粗略几何信息:包括边沟、截水沟、排水沟、跌水与急流槽、蒸发池等
	路基防护与支挡的粗略几何信息:包括坡面防护、沿河路基防护、挡土墙、边坡锚固、土钉支护、抗滑桩等
	路基断面的详细几何信息
	各项排水工程的详细几何信息
	路基防护与支挡的详细几何信息:包括挡土墙尺寸、抗滑桩位置、深度等
	路基断面的深化几何信息
	各项排水工程的深化几何信息
	路基防护与支挡的深化几何信息:包括混凝土配筋等
非几何信息	施工时和竣工后实测高程、坐标、尺寸
	项目基本信息:地理位置、道路等级、沿线地质、水文、地形地貌、气象、地震等
	主要技术经济指标的基础数据:全长、面积、标高、距离、净空、定位等
	大致填挖方工程
	现存道路情况
	历年路况资料及当地路基的翻浆、崩塌、沉降变形等病害的防治经验
	填挖方路床路基信息:填料、压实度、加固材料等
	荷载信息:行车荷载、土压力等
	土力学的各项参数:液限、塑限、内摩擦角等
	详细水文和气候信息:降雨量、天然水体、地下水等
	特殊路基路段信息:滑坡、岩堆、岩溶、软土、膨胀土、盐渍土等
	施工进度、组织和设备信息
	最终路基竣工验收信息
	运维分析所需的数据、系统逻辑信息

BIM模型能集成路基工程施工、运维和管养阶段的所有信息,充分发挥BIM技术的优势,极大提高公路路基工程的生产效率。目前,BIM技术已被广泛应用于建筑领域,相应标准和体系也逐步完善。但是公路领域的BIM技术才刚刚起步,特别是目前相关部门对BIM技术的有关使用标准和规范正在做进一步的完善,再加上公路工程不同于其他工程,在实际施工过程中受环境、地质及地形地貌的影响较大,导致在应用BIM技术时很难做到有据可依,所以,在公路工程领域BIM技术还存在较大的发展空间。

1.2 BIM智能路基施工研究

施工阶段在公路建设中占据着重要的地位,施工方案的选择直接影响着设计阶段方案的设计。另外,在施工过程中,施工成本和施工质量应被视为特别关注的指标。合理运用BIM技术可以有效控制施工成本,并能实时监测施工指标的变化情况,确保施工质量得到有效管控。现有研究主要将BIM技术应用于公路路基工程的施工进度管理、施工成本管理、虚拟施工技术和施工质量管理4个方面。

1.2.1 BIM技术在施工进度管理中的应用

运用BIM技术对模型时间参数与几何参数进行全面、深入、精确地建模,既可以为整个工程提供全局性施工控制,也可以在施工过程的某个阶

段或某个节点对其进行局部控制,所以施工进度管理在整个施工中都起着至关重要的作用。张绪斌^[12]对市政道路施工中BIM技术的应用趋势进行了深入分析,提出了可行性较高的应用途径以及未来发展的重点;王学峰等^[13]研究了BIM技术在工程施工管理中的实际应用,使用CATIA软件建立工程BIM模型,并进行图纸审核和三维技术交底,利用BIM技术的可视化,将实际施工情况与BIM模型进行对比,严格控制施工进度;张建平^[14]提出了多细度BIM施工模型和多层次4D施工管理技术,开发了基于BIM的高速公路4D建设管理系统并得到实际应用,如图2所示;刘向阳等^[15]利用公路特性来研究数据编码规则,创建了公路BIM多元信息数据库,实现了公路全生命周期的有效管理和应用;程方圆等^[16]为解决公路隧道建设过程中出现的大量工程数据存储不规范、管理效率低等问题,采用地理信息系统(geographic information system, GIS)/BIM数据集成方法对其进行研究。

1.2.2 BIM技术在施工成本管理中的应用

加大公路路基工程施工成本的控制力度,不仅能确保公路路基施工的质量,还能降低公路工程的总建设成本。现行工程造价管理和基于BIM技术的工程造价管理对比如表2所示。公路路基工程涵盖了许多分项工程,如土石方工程、排水系

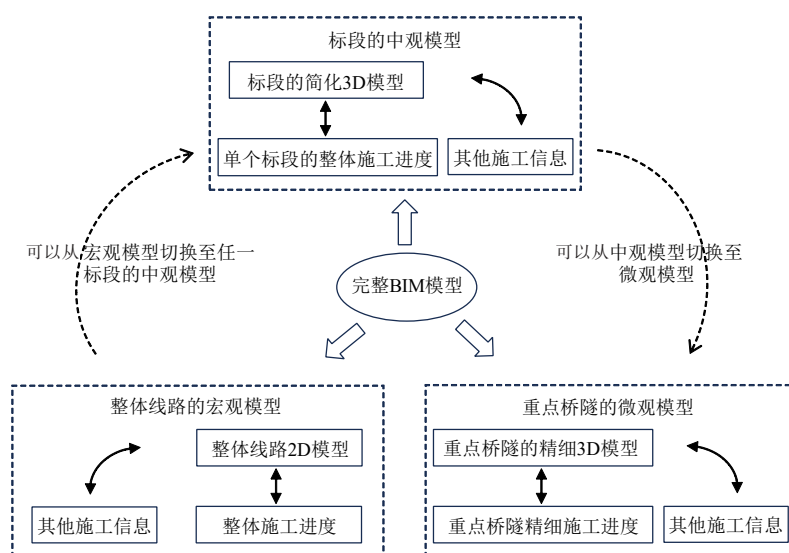


图2 高速公路工程的多细度BIM施工模型结构^[14]

Fig. 2 Multi-fineness BIM construction model structure of highway engineering^[14]

统工程和防护建设工程等,如果遇到特殊的路基,还需要对其进行加固处理。因此,公路路基工程造价是一项十分复杂且庞大的工作,涉及很多方面,包括项目设计、材料选择、机械设备采购及人员组织安排等,其中最为重要的就是施工过程中各个阶段的管理和控制。每一个分项工程的造价,都会影响总成本,必须对其进行有效控制。根据2018年交通运输部发布的《公路工程标准施工招标文件》中的《工程量清单计量规则》对路基工程进行分部分项划分,如表3所示。

表2 路基工程造价管理对比

Table 2 Comparison of cost management for subgrade engineering

造价管理类别	优势	劣势
现行工程造价管理	1. 充分的应用和认可; 2. 有较高等度的运行基础和法律保障	1. 耗费大量时间; 2. 前期造价管理薄弱; 3. 信息化程度低, 造价数据处理困难
基于BIM技术的工程造价管理	1. 有效减少计算时间, 提高工作效率; 2. 有利于全周期的造价管理; 3. 便于各方面协调合作, 提升造价管理效率; 4. 可以满足大体量、特殊异形的公路路基项目的工程量和计价要求	1. 与工程建设领域现行分段式管理有冲突, 推行难度大; 2. 对人员素质要求高; 3. 软硬件配置要求高, 前期应用投入较大

表3 基于造价管理的公路路基施工主要分部分项工程划分^[11]

Table 3 Division of major sub-parts of highway subgrade construction based on cost management^[11]

单位工程	分部工程	分项工程
路基工程	路基土石方工程	场地清理
		土石方(含借方)
		路基处理
		改路、接线、改沟土石方
	排水工程	路堑边沟
		路堤边沟
		截水沟(含平台截水沟)
		急流槽
		暗沟、渗(盲)沟
		高边坡排水
		改线、接线、改沟排水工程
	砌筑防护工程	填方边坡防护与加固
		一般挖方边坡防护与加固
		高边坡防护与加固
		挡土墙
		改路、接线、改沟防护工程

张冰心^[17]提出一种基于遗传算法(genetic algorithm, GA)网络模型的BIM辅助分析方法,该方法可以准确高效地对工程项目的造价进行分析和预测;苏卫国等^[18]将公路工程BIM模型的各个构件自动挂接上相应的清单和定额的模型,实现了实时计算造价清单,以及造价信息根据模型参数变化自动修改的功能,促进了我国公路行业信息化、标准化发展;景凤等^[19]提出了一种三级高铁工程量清单EBS/工作分解结构(work breakdown structure, WBS),并对各个级别的结构特性进行了详细的描述,该结构不仅符合BIM的建模特性,还符合总承包模式和整体造价管理流程。

1.2.3 BIM技术在虚拟施工技术中的应用

虚拟施工技术可以动态、直观地展示建筑在实际施工过程中的真实状况,能够估计出实际建设时的突发情况,避免发生返工、整改等影响工程进度的情况。如果虚拟施工技术能有效与三维成像和时间维度相结合(图3),就能实现对施工进度的模拟。

刘均利等^[20]基于BIM技术构建了三维地质模型,并结合有限元分析方法,对边坡进行稳定性分析,为边坡工程的设计及施工提供了技术支持;孙梦梦^[21]构建了基于BIM技术的道路工程施工阶段进度管理基本流程,优化进度管理和控制施工进度,采用BIM技术构建实际案例的三维模型,然后根据进度计划生成4D模型,在此基础上做出施工阶段的虚拟施工,结合现场监控系统实时采集并反馈施工进度信息,实现了施工过程管理信息化;李文虎^[22]结合道路施工的特点及管理需求,开发了基于BIM+GIS的道路施工管理系统,创建道路BIM模型并集成到GIS平台中,以实际道路施工为例来验证系统的有效性,结合二维GIS路线和三维道路场景,对施工数据进行整理分析;赵瑜隆^[23]提出了基于BIM技术的施工重点控制指标的实时监测方法,实现了施工信息的溯源功能。

1.2.4 BIM技术在施工质量管理中的应用

公路路基工程的施工质量BIM管理主要是利用BIM这一技术,对公路工程在各个施工阶段的路基施工质量进行全面管控^[24]。其管理特点如下:1)精细化:工序流程化和标准化,以及对最小工序包进行质量验收,以确保施工质量达标;2)智能化:利用BIM技术对路基施工项目进行动态仿

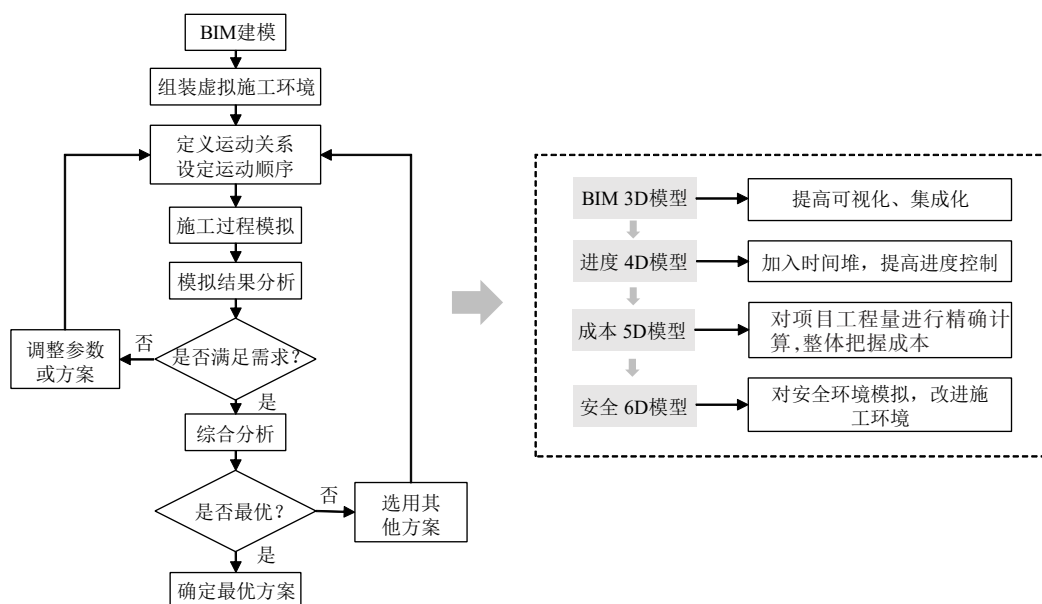


图3 基于BIM的虚拟施工流程

Fig. 3 BIM-based virtual construction process

真、工程力学模拟试验,并收集和分类质检数据,大大提高了施工质量的可控性和可预测性;3)动态化:路基施工质量管理本质上是一个动态的信息管理过程;4)一体化:利用BIM平台进行质量管理增强了施工项目的一体化水平,实现了施工流程各环节的信息共享和协同。BIM技术在保证施工质量达标的同时,还能提高工程管理效率,实现信息共享和资源协同,为施工的实施提供了更好的技术支持和管理保障。

综上所述,当前国内外针对BIM技术在施工管理优化、管理流程控制以及软件信息对接集成等方面的研究已取得了一定进展,但在施工阶段的研究仍相对滞后,存在研究方向局限、研究深度不足,以及在施工阶段技术模拟、过程监控、质量监控和预警等方面的研究明显不足等。其主要原因是施工现场信息繁多且变化快,静态的BIM模型往往很容易脱离施工现场情况,BIM协同管理应用较差。尽管施工过程中主要依赖BIM进行动态模拟和过程展示,但基于BIM的可视化施工质量管理 and 相应的质量预警系统的建立却相对较少,这使得应对工程后期频繁变动和施工质量问题变得困难。

1.3 BIM智能路基养护研究

随着我国公路养护的机械化水平持续提升,新兴机械、工艺和材料在养护工程中的应用日益

增多。养护管理部门也日益认识到BIM在公路设施养护应用中的关键作用,并通过科研项目、工程试验和技术研发等多种途径,探索BIM在公路养护中的应用,且已经取得了一定的进展。

伍朝辉等^[25]主要对BIM在道路设施养护中的应用需求与创新展开研究,验证了部分养护关键技术与应用内容的可行性,并指出未来BIM应用创新需要突破的重点方向;刘玲等^[26]提出一种结合BIM+GIS技术的公路预防性养护方法,利用移动数据系统采集养护检测所需数据,构建基于BIM的交通设施资产和运营维护管理系统,提出一种预防性养护决策模型;崔小芳^[27]以建设和养护一体化信息管理为目标,构建了基于BIM技术的道路养护信息管理平台,确保在养护过程中对工程质量、进度和安全进行全面信息管控;侯芸等^[28]针对BIM技术和公路工程养护管理系统的特点,提出了基于BIM+GIS技术与公路养护管理系统融合的技术架构和需求分析,并对BIM模型的编码方法进行了深入研究;刘晓军^[29]利用GIS技术和计算机应用系统,开发了为公路养护管理业务设计的子系统;蒋雅君等^[30]对基于BIM技术的三维可视化病害展示进行研究,旨在为公路养护工作提供更多便利条件;杨旭等^[31]基于BIM+GIS技术构建了全新的路面全域病害整合与建模框架,有效展示了路表病害以及结构内部的隐蔽性

病害。

通过对上述文献的分析,发现研究主要集中在收集养护数据、制定养护策略以及提供决策平台等领域。BIM技术在养护阶段的应用具有巨大的发展潜力,尤其在病害模型构建、信息收集和存储、养护决策和成本管理以及养护信息系统等领域。综合分析显示,深入研究BIM技术在养护阶段的应用对于更好地管理信息、制定决策方案和分配成本具有重要意义,这将对进一步提升养护阶段的工作效率和质量产生积极影响。因此,未来的研究和实践应该集中提高BIM技术在养护阶段的应用水平,以实现更好的养护管理和决策效果。

目前,BIM技术在施工过程中的研究主要集中在施工管理优化和过程控制上,以及与其他软件的对接上,如建立BIM与GIS模型的对接和信息集成等。但当前的路基施工缺乏明确的质量量化标准,也没有建立一个有效的质量预警系统,致使施工过程的质量管理难度大,且存在许多返工现象,从而造成了不必要的成本损失。此外,由于施工质量影响因素复杂,难以对其进行全面准确的分析与评估,因而分析与评估结果存在一定的主观性和片面性,不利于工程实际应用。因此,有必要深入研究基于BIM技术的施工质量评估标准,并构建一个既合理又有效的质量预警系统,以进一步加强施工质量的约束和规范。此外,现阶段的施工智能管理主要是对信息的管理,可以考虑集成运用BIM技术、物联网技术、互联网+技术和机器学习算法,实现管理对象的全面感知、多种网络深度互联、不同参与方之间信息资源的协同共享和海量信息的智能处理,形成“工期-成本-质量”多目标优化模型^[32],从而更好地实现施工现场

数据共享、协同管理目标,提高全生命周期的施工质量与运维管控效率。

在养护过程中,研究主要集中在收集养护信息、制定养护策略以及提供决策平台等领域。养护阶段的显著特征包括病害数据多、信息存储的难度高、文本检索所需的时间长,以及难以制定出合理的预测成本。因此,可以借助BIM技术存储大量病害信息并对其进行可视化表达,使病害模型与公路模型进行耦合,从而实现三维可视化展现病害空间分布状况;同时可以借GIS技术分析病害分布规律,预测病害发展趋势,评价病害破损状况,总结病害对公路运维状况的影响,从而针对性地制定养护管理措施。

2 路基智能压实技术

路基压实是公路建设中的一个关键环节,随着变革性技术的快速发展,传统路基压实技术和质量检测方法的不足日益凸显,因此,智能压实技术应运而生。智能压实(intelligent compaction, IC)由基于加速度计的振动压路机测量压实过程中压路机和物料的振动特性,通过全球定位系统(global positioning system, GPS)对压路机位置精确定位,并通过实时反馈对压实状态进行监测^[33],从而提高了压实过程的可视化程度和可控性,其基本工作原理如图4所示。

路基填筑压实工艺流程如图5所示,由于路基填料的类型、颗粒级配、形状以及矿物成分不同,填料压实后的力学性能存在明显差异。在实际工程中,受到施工条件和环境的影响,同一地区或相同路段不同填筑形式下路基填料的力学特性

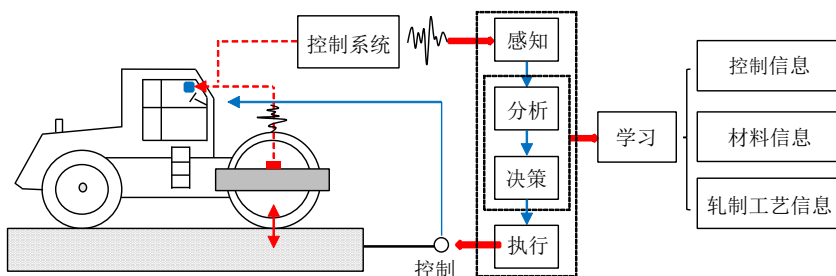


图4 智能压实原理

Fig. 4 Intelligent compaction principle

存在显著的差异。现有研究表明,采用人工方式测量压实度存在效率低、劳动强度大和无法实现自动化控制等问题。为了解决传统检测手段存在的不足,学者们提出了连续压实质量检测方法。通过使用基于机土耦合模型,实时分析振动轮在填筑和碾压过程中的动态响应,从而确定填筑体压实状态的检测手段,是当前路基智能压实技术发展的关键方向之一。因此,目前智能压实技术在路基工程中的应用主要是基于机土耦合动力学模型,对压实质量检测以及压路机压实技术进行研究。

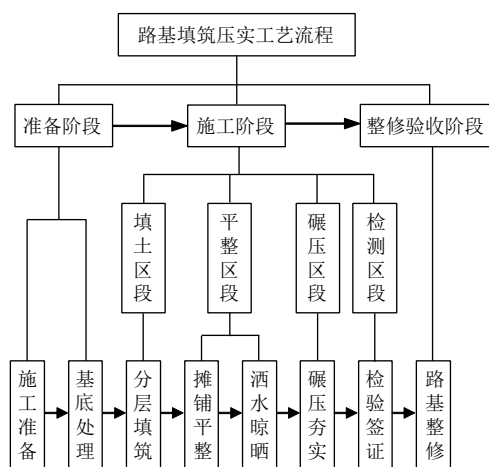


图5 路基智能压实工艺流程^[34]

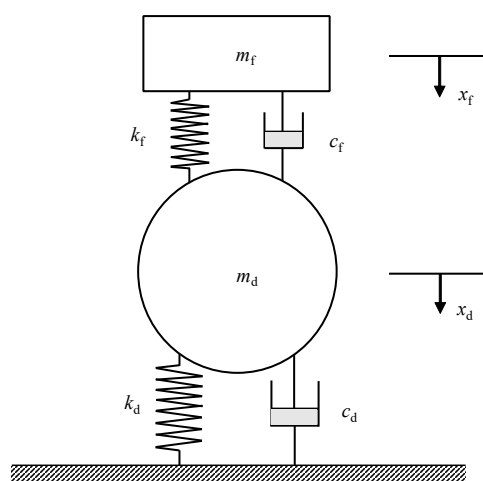
Fig. 5 Subgrade intelligent compaction process flow^[34]

2.1 机土耦合动力学模型

振动压路机在路基压实中扮演着重要角色,其与填料之间的相互作用是关键的理论基础。利用机土耦合模型可以模拟和分析振动压路机在不同土体条件下的压实效果,研究土体力学参数对“振动压路机-土”系统的影响,优化振动压实参数,提高振动压路机的施工效率和土体压实质量,并为路基工程的实际施工提供科学依据。

YOO等^[35]建立了弹性机土耦合模型,如图6所示,但该模型适用于压实后期。土体在压实过程的前期会经历较大的塑性变形,由于这种塑性变形的存在,土体的加载和卸载刚度会发生不同的变化。为研究这种影响,一些学者提出了非线性机土耦合模型,如严世榕等^[36]考虑加载和卸载刚度的差异,采用GRADE J^[37]提出的三角滞回模型来构建非线性机土耦合模型;SHEN等^[38]采用Bouc-Wen曲线滞回模型建立了非线性机土耦合

模型,并对各模型参数的影响进行了分析。非线性机土耦合模型虽然考虑了加卸载不对称性对系统动力特性的影响,但不能直接反映土体的塑性变形。为了研究土体压实变形过程,PIETZSCH等^[39]建立了黏弹塑性机土耦合模型,该模型考虑了土体和附加土体的黏弹塑性性质,理论上具有高精度的优点,但准确性难以确定;IMRAN^[40]在先前研究的基础上建立了考虑压路机水平方向行驶的条块机土耦合模型,如图7所示。



注:
 m_f 和 m_d 分别为上车机架和振动轮等效质量, kg;
 x_f 和 x_d 分别为上车机架和振动轮的质心位移, m;
 k_f 和 k_d 分别为减振器和土体的刚度, N/m;
 c_f 和 c_d 分别为减振器和土体的阻尼系数, N/(m·s⁻¹)。

图6 经典两个自由度弹性机土耦合模型^[35]

Fig. 6 Classical two-degree-of-freedom elastic machine-soil coupling model^[35]

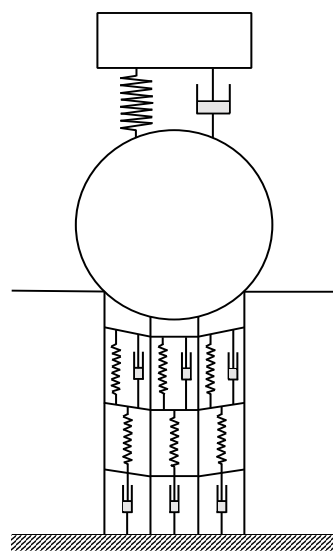


图7 条块机土耦合模型^[40]

Fig. 7 Strip-block machine-soil coupling model^[40]

2.2 压实质量的检测

智能压实的第一步是正确感知压实质量信息。由于压路机在碾压过程中的移动,目前的控制系统只能连续检测振动滚筒的振动响应信号。根据响应信号分析与压实质量直接相关的信息(控制指标)是必要的。最重要的是获得填料的物理参数——模量和密度,这是智能压实技术的关键。

2.2.1 压实质量连续评价指标

目前,智能压实质量的评价指标主要分为三类:1)基于加速度信号的指标,其主要包括加速度幅值指标^[41]和谐波比指标^[42-43],如压实质量测量值(compaction measurement value, CMV)和压实质量控制值(compaction control value, CCV)。这类指标的优势在于信号采集简便和指标计算简洁,缺点是具有很强的经验性,且谐波比指标在评价粗粒土方面表现不佳;2)基于刚度或力学参数类的指标^[44-46],如土体抗力、刚度指标 k_s 、振动模量 E_{vib} , E_{vib} 和 k_s 这两个指标与基于加速度信号的指标相比,它们与土体力学性质的相关性更大,但缺点是检测手段相对复杂;3)基于能量法的指标^[42,47],如Omega值和机械驱动功率(machine drive power, MDP)等。

连续压实技术在我国工程中也得到了大量研究和应用,刘东海等^[48]对振动轮加速度时域特征进行分析,提出压实值(compaction value, CV)这一概念;HUA等^[49]从时域角度分析了振动轮加速度信号,提出峰值因子值(crest factor, CF);徐光辉^[50]依据动力学理论,推断地基抗力与压实加速度存在线性关系,据此提出振动压实值(vibration compaction value, VCV),为实际路基压实质量检测提供理论基础;吴龙梁^[51]以路基的连续压实控制技术为研究对象,针对现有技术的不足,采用理论研究和试验研究相结合的方法,提出了基于该技术的能量模型以及连续检测指标耗散测量值(dissipation measured value, DMV)。目前压实质量检测指标及其分类情况见表4,其中,由于加速度信号类指标具有计算简单和精确度较高的优点,CMV成为了目前最常用的评价指标。

2.2.2 压实质量预测

针对压实质量的预测,COMMURI等^[53]提出了

表4 压实质量连续评价指标分类^[52]

Table 4 Classification of continuous evaluation index of compaction quality^[52]

连续检测指标类别		代表性指标
加速度类	时域	CF
	频域	CMV, CCV, THD, RMV, CV
力学类		振动模量, 刚度指标, VCV
能量类		Omega, MDP, CEV, DMV

注:表中THD为总谐波失真量(total harmonic distortion);RMV为共振计值(resonance meter value);CEV为压实能值(compaction energy value)。

一种基于人工神经网络(artificial neural network, ANN)模型的沥青混合料水平估计工具,以摊铺厚度、混合料类型、温度和压实压力为变量进行分析;ASIF IMRAN等^[54]提取信号特征作为输入层,建立了三层神经网络;CHEN等^[55]利用振动信号特征和ANN模型预测压实质量。利用ANN模型对影响因素进行权重分析,定量反映压实控制参数^[56]和土体性质^[57-58]的影响,对填料性质预测和改良有重要意义。CAO等^[59]以振动力、压路机速度和振动频率为输入变量,建立了预测压实质量的ANN模型;ZAMAN等^[60]将土体性质设为特征值来预测回弹模量;SIVRIKAYA等^[61]在ANN模型中考虑击实能来预测最大干密度;ISIK等^[62]通过土壤混合物来估计细粒土和粗粒土的压实参数,证明了所研究的ANN模型的适用性;MOZUMDER等^[63]设计了基于ANN的无侧限抗压强度预测模型,用于预测地聚合物稳定黏土无侧限抗压强度;TALEB BAHMED等^[64]构建了关于石灰稳定黏土的塑性指数、最大干密度和最佳含水率三种预测模型;安再展等^[65]基于现场试验和径向基神经网络,建立了考虑碾压参数变化的堆石料压实质量评估模型。这些研究主要集中在不同ANN算法的开发和改进上^[66],而不同输入参数的权重和影响机制并没有得到论证。

2.2.3 压实质量的监测与控制

针对压实质量的实时监测与控制,国内外学者已经提出了一些方法。国外,IC技术已广泛应用于公路建设中^[67],在保证高质量施工、降低投资成本以及加快工程进度方面起到了重要作用。IC技术通过监测碾压过程中的实时振动碾轮的加速度信号,自动计算智能碾压测量值^[68],从而准确表征材料的实时压实状态。根据文献研究,检测代

表性指标有MDP、机测土体刚度 K_B 、碾压振动加速度频域分析指标等。IMRAN等^[69]评估了美国俄克拉荷马大学开发的IC工具智能压实分析仪连续测量路基在压实过程中的干密度和模量的准确度,利用训练好的ANN模型确定压实度测量值,并实时给出密度或模量读数,得到了估计模量与回弹模量之间的良好相关性;COMMURI等^[70]采用一种新的基于ANN的方法,利用模式识别技术来估计热拌沥青混合料的密度,结果表明该技术可以实时估计用于质量控制的密度。然而,上述系统尚不成熟,因此尚未得到广泛的应用。在国内,张润利等^[71]、武雅丽等^[72]、马学良等^[73]成功研发了相应的压实度检测装置,并获得了令人满意的成果;徐光辉等^[74]提出了一种动力学监控技术,该技术的核心是连续监测路基结构的抗力变化,通过监测路基结构抗力的波动来判断压实状况的改变,从而达到在压实过程中进行连续和实时的质量监测的目的;姚仰平等^[75]利用北斗系统采集压实机的实时位置信息,并利用4G网络将其实时传送至云端服务器,在云端进行分析,最终获得压实机的实时压实质量。

从以上研究可知,智能压实的质量控制在整个智能压实过程中至关重要,国内外学者主要对压实质量连续评价指标、压实质量预测、实时监测与控制进行相关的研究,质量控制的精度要求和动态解的求解仍需深入研究。机器学习算法可以用来自主地分析和决策压实信息,现有算法包括ANN、混合专家系统、强化学习等,都为智能压路机的智能控制研发提供了基础。

2.3 压路机智能压实技术

压路机智能压实技术的研究重点是如何根据不同的填料特性和摊铺厚度,合理地选择振动频率和振幅,以适应填筑体的变化。这一技术的优势在于,在保证压实效果的前提下,可以降低工程成本,缩短工期并减少环境污染。图8为振动压路机碾压路基填筑体时的动力学模型,在振动碾压过程中,钢轮受到的力包括旋转激振力 $P\sin(\omega t)$ (P 为偏心力, ω 为旋转激振频率, t 为时间)、自重 G 和路基结构抗力 F_r ,如图8(a)所示。其中路基结构抗力 F_r 与压实力是作用力与反作用关系,这两个力均为狭窄条状荷载,分布特征如图8(b)所示。

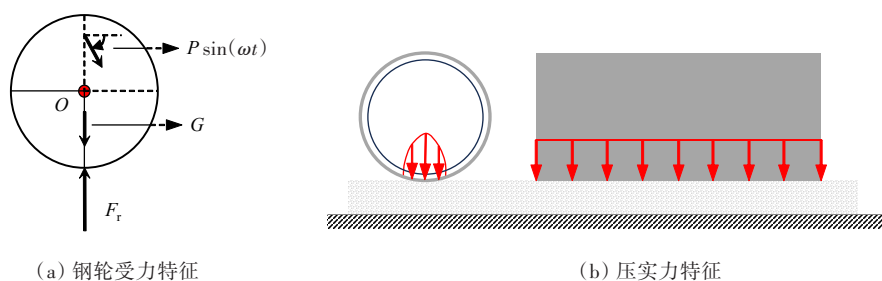


图8 振动压路机钢轮与填筑体相互作用动力学模型

Fig. 8 Dynamic modeling of vibratory roller steel wheel-fill interaction

自20世纪以来,国外专家和研究人员一直致力于路基智能压实理论和设备的研究,目前,这一领域已经发展到第5代智能压路机的阶段。除了德国BOMAG公司,瑞士Ammann、瑞典DYNAPAC、美国Ingersoll-Rand、日本SAKAI公司和德国HAMM也进行了智能压实控制技术的研究和尝试,初步达到了无级调幅调频的目标,并研发出了智能压实控制系统。在国内,一些大型的机械厂家也致力于智能化振动压路机的研发与试验,无论是在压路机振动状态的转换技术方面还是在振幅调节技术方面,他们都具有独立的知识

产权和完整的机械生产能力,已取得了一定的技术进步^[76]。然而,尽管现有的智能压路机在实时反映土体压实度和控制振动方向方面取得了巨大进步,但仍存在一些不足。目前的智能压路机尚不能在压实过程中调节振动幅值、振动频率和行驶速度等工作参数,使其与最优振动压实参数相对应。当前的调频调幅的压路机智能压实技术还不够成熟,需要进一步研发和改进,以获得更全面的智能压实控制系统。

以上研究表明,虽然智能压实技术在近年来得到迅速发展,但仍存在以下问题^[77]:1) 在智能

压实技术的数值仿真研究中,通常未考虑被压实结构层力学参数的动态变化,这一因素的忽视可能导致数值模型与实际情况之间存在较大的差异,影响研究结果的准确性和可靠性^[78-79];2) 目前对智能压实过程中影响最终压实质量的因素的研究相对较少,导致智能压实技术的机理模糊,更多地依赖现场试验结果来研发技术;3) 对智能压实质量均匀性评价的研究也相对较少。因此,在智能压实技术的研究中,应更多关注压实质量的影响因素和质量均匀性评价,解决这些问题将有助于进一步推动智能压实技术的发展,提高路基工程施工的效率和质量。

此外,虽然压实质量的检测和评价是智能压实技术研究的核心问题,但施工过程的管控和优化、填料性质的改良等方面也需要关注。其中,无人智能压实施工也是目前智能压实的发展方向,该技术以卫星定位系统为基础,与无线传输技术相结合,实时显示压路机运行状况和工作参数,通过多源传感器,实现压路机的自动避障、避险,实时采集压路机的数据并进行统计分析,从而实现对压路机碾压过程和压实质量的全面监控。

3 路基健康监测与评价技术

基于全生命周期的健康监测与评价是保障路基运营安全的关键,因此,亟需构建基于多种损伤因子的路基全生命周期健康评价的统一体系。近

年来,学者们对路基健康监测与评价进行了较为全面的研究,提出了一系列可靠的评价指标,其可分为外在健康特征指标和内在健康特征指标。

3.1 外在健康特征指标

外在健康特征指标主要包括表观指标、路基变形、侧向位移和不均匀沉降等,外在指标更多反映路基病害状况,因此,现有外在评价指标的研究多侧重于路基变形的监测。

3.1.1 路基沉降监测技术

目前,监测路基表面沉降的常用方法包括传统的土工测量技术和半自动监测技术^[80]。传统的路基沉降监测方法主要包括沉降板法、分层沉降仪法和沉降水杯法等^[81-82],路基沉降按监测部位分类如图9所示。半自动观测法主要包括车载探地雷达监测技术、合成孔径雷达干涉技术和分布式布里渊光纤传感技术。其中,车载探地雷达系统利用电磁波和GPS校正定位系统进行路基沉降病害监测,然而,这种方法存在破裂和错台等风险,可能影响监测结果的准确性^[83];合成孔径雷达干涉测量技术利用雷达获取两幅不同时间的干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)图像,需要在较大的空间范围内进行测量,这可能会增加监测复杂度和成本;分布式布里渊光纤传感监测技术是通过测量光纤中散射的光信号来反映路基地表环境的变化^[84],需要较长时间来进行监测,且在安装和操作上存在一定的复杂性^[85-86]。

肖和华等^[87]提出了一种基于光笔式机器视觉

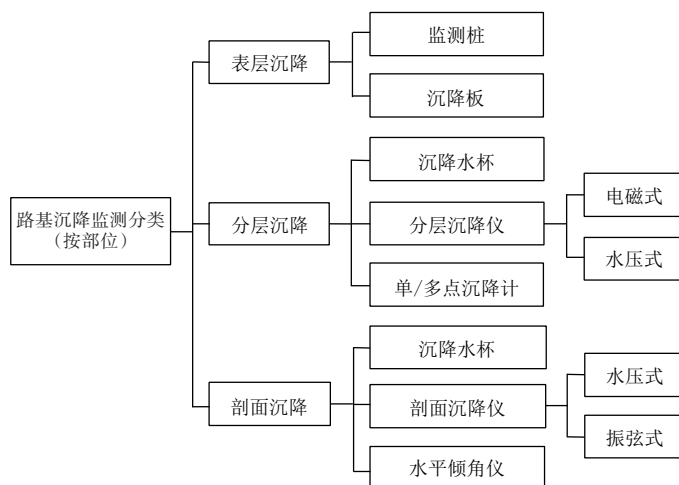


Fig. 9 Subgrade settlement monitoring methods by site

测量系统的非接触式沉降监测方法;杨婧等^[88-89]提出了一种路基表面沉降和动位移光学测量方法,通过星点法对表面沉降误差进行补偿,从而实现对接路基沉降值的多参数、全方位和高精度测量,其原理如图10所示,其中, L_1 为点光源位置坐标, L_{1t} 为经过时间 t 后的点光源位置坐标, X 和 X_0 为点光源在光电探测器上的位置坐标, S_0 为被测路基沉降量, S_t 为点光源在光电探测器上成像点产生的位移值, D_0 为点光源到成像透镜中心的水平距离, D_i 为成像面与透镜中心的水平距离;王敏等^[90]专门研究了分离动静荷载影响下的工后沉降现象,分析了不同断面由动载引起的沉降特性及路堤填筑高度对动载引起沉降的影响;郭云开等^[91-92]提出了“灰色模型+神经网络”对高速公路路基沉降进行分析的组合方法,通过超限学习机算法对多个路基断面的实测沉降数据进行了建模;姚仰平^[93]提出了UH(unified hardening)系列模型,通过对高填方工程的监测数据进行整理分析,预测高填方工程未来沉降量与差异沉降量,建立全生命周期的监测并进行稳定性、适航性等安全评价,以了解整个高填方工程在全过程中的变形及稳定情况。

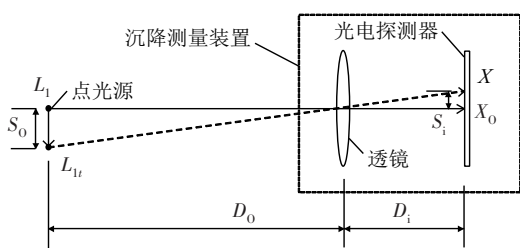


图10 路基表面沉降光学测量原理图

Fig. 10 Schematic diagram of optical measurement of settlement on subgrade surface

传统土工测量技术存在各自的局限性,如精度、成本、施工难度和受环境因素影响等;半自动观测法虽然在很大程度上可以满足路基沉降的在线监测需求,但也面临信噪比、空间尺寸、安装便利性和自动远程连续测量能力等方面的挑战。因此,一系列智能监测方法被提出,如光笔式机器视觉测量系统、路基表面沉降和动位移光学测量方法等,这些新技术有望为路基沉降监测提供更全面、更高精度的解决方案。

3.1.2 路基边坡变形监测技术

现有边坡变形监测技术可以分为接触型和非

接触型两类^[94]。其中,以接触型边坡变形监测最为常见,它主要通过对监测数据的采集、处理和分析来达到滑坡预测预报及防治的目的。国内外的研究主要集中在时域反射法(time domain reflectometry, TDR)、分布式光纤传感技术和声发射技术等方面。不同的接触型边坡变形监测技术各具优势,其中,TDR^[95-96]在边坡深部变形监测中表现出良好的监测效果;分布式光纤传感技术^[97-98]具有轻便和高灵敏度的特点,该方法通过分析光纤中反射光的波长和频率变化来研究光纤周围环境参数的变化,其技术流程如图11所示;声发射技术^[99-100]又称微震技术,通过埋设的检测仪器来接收并分析地下破裂面传输的声发射信号,从而准确判断边坡当前状况,具有成本低廉且监测便捷的优势。

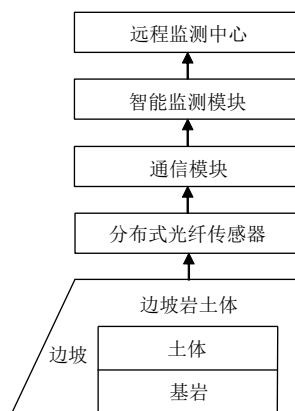


图11 边坡岩土体变形智能监测总体结构图^[97-98]

Fig. 11 Overall structure of intelligent monitoring of slope geotechnical deformation^[97-98]

非接触型边坡变形监测技术近年来也取得了显著进展,如基于全站仪进行改进的测量机器人,能够代替监测人员进行全面和高精度的持续监测,为边坡和构筑物的稳定性提供了可靠的数据支撑;“3S”技术在地质领域被广泛应用,其在边坡变形的实时监测中发挥了至关重要的作用,特别是基于GPS的连续运行GPS定位服务系统^[101]和全球导航卫星系统^[102-103]技术为边坡变形实时监测带来了巨大的便利性;为确保边坡变形的持续性监测不受GPS、全站仪等单一监测点破坏的影响,三维激光扫描技术^[104]凭借非接触、高效率和高精度的特点有效规避了上述问题,并且与传统的监测方法相比,其准确性更高,吸引了大量学者的研究兴趣。此外,在边坡变形监测领域,还有很

多非接触型边坡变形监测技术,如InSAR技术^[105]、近景摄影测量^[106]等正得到越来越广泛的应用。

因此,为满足日趋复杂化、多元化的边坡变形监测要求,有必要根据具体条件选取相应的监测方法,并在此基础上继续进行相关技术的研发与创新。这将有助于进一步提升边坡变形监测的准确性、可靠性和实用性,为保障边坡的安全与可持续发展奠定基础。

3.2 内在健康特征指标

内在健康特征指标往往是影响路基质量的关键指标,但其相关研究较为分散,主要包括含水率、压实度、回弹模量、加州承载比(california bearing ratio, CBR)、土压力等。国内外关于内在健康指标的研究较少,NEUMAN^[107]对多孔介质中的饱和-非饱和渗流问题做了大量的研究,并利用计算机技术采用有限元方法处理饱和-非饱和渗流问题;ZEHE等^[108]对黄土区地表径流进行了监测和模拟。在运营阶段,通过实时监测路基压实度的变化,直观了解路基承载能力的变化情况,周志军^[109]研究了路基压实度与承载力之间的关系,提出了基于压实度静力触探试验的方法。基于主要依靠静力触探机理和孔隙介质力学的研究成果,DA SILVA等^[110]通过试验研究了与路基表面荷载垂直的散体介质内部的应力传递规律;LIANG等^[111]提出将基质吸力作为自变量来预测黏土的回弹模量;CARY等^[112]采用了类似的概念,提出将基质吸力作为自变量来预测回弹模量的变化趋势,并进行了一系列试验。

土压力对于提前预测和预防路基病害有较好的效果。目前,对路基土压力进行实时监测的方法主要有两种,一种是预先在路基内部埋设土压力计,另一种是利用数值模拟软件模拟复杂荷载作用下路基的应力变化。PARK等^[113]采用FLAC3D软件模拟了三维主动土压力传递模式及分布规律,并通过模型试验对结果进行了验证。学者们还对测试方法进行了研究。RAHIM等^[114]研究了落锤式弯沉仪法(falling weight deflectometer, FWD)无损检测路基回弹模量的可行性;MOHAMMAD等^[115]通过现场和室内试验,对动态圆锥贯入法微损伤检测所得的回弹模量进行了对比研究;为了避免破坏性试验对软弱路基的

扰动,BYUN等^[116]采用螺旋形外螺纹杆在道砟层扰动最小的情况下测量路基状态,验证了该方法的可行性;NORVELL等^[117]讨论了表面穿透雷达在识别路基空洞位置方面的应用,并与其他无损检测方法进行了比较;YANG等^[118]研究了路基破坏与接收到的探地雷达(ground-penetrating radar, GPR)信号之间的关系,并研究了识别路基潜在病害的各种方法;D'AMICO等^[119]基于最近用频域处理GPR信号进行含水率的评价研究结果,提出了一个准确的模型来预测反射GPR信号的频谱随含水率的变化;XU等^[120-121]通过实时监测锚杆应力来反映边坡的稳定性,对边坡稳定性指标进行了研究。

综上所述,国内外对路基内在健康指标的研究主要包括对多孔介质中的饱和-非饱和渗流问题、路基压实度与承载力关系、土压力对路基病害的预测等。在此基础上,还对内在指标的检测和监测方法进行了研究,包括无损检测路基回弹模量、表面穿透雷达对路基空洞位置识别以及实时监测锚杆应力等。这些研究为路基内在健康指标的研究提供了宝贵的经验和成果。

3.3 特殊路基监测评价技术

特殊环境岩土地区(包括冻土地区、膨胀土地区、岩溶地区等)地质条件十分复杂。这些复杂的地质条件会对路基结构产生特殊的影响,导致路基病害的发生。因此,根据不同地质条件和病害形成机理,监测评价路基健康情况,可以降低养护成本、延长路基使用寿命,进而提高路基的安全性和稳定性。

在冻土地区,路基会受到冻土土质、温度、水和荷载等多因素的影响,在长期冻融循环作用下,易出现路基变形,同时,在施工过程中水热平衡条件的改变也会诱发路基病害。王蒙^[122]为研究季冻区路基水热变化,利用远程采集系统连续监测路基的温度、湿度变化情况;XU等^[123]提出了一种基于光学方法的非接触、实时、无人值守的路基沉降远程监测系统;赵世运等^[124]升级了一种长期监测系统软件,用于控制数据的监测工作,并通过移动网络实现远程传输和控制;罗博仁等^[125]利用星载InSAR技术监测冻土区公路路基形变,获取大范围形变信息及形变规律;宋竹兵等^[126]基于布拉格光栅光纤传感监测技术,建立了一种基于空间

插值优化的冻土路基变形场自动化监测系统。

膨胀土具有湿胀干缩的变形特性,在干湿循环作用下容易引起路基的不均匀变形,造成多种路基病害。秦梓航^[127]利用测斜仪、静力水准仪及温湿度仪等传感器以及采集设备,结合 GPRS/3G/4G 信息传输技术,观测膨胀土结构状态的实时发展趋势;MONTENEGRO^[128]设计了一种基于弦-壶电位器系统,使用水含量反射计(water content reflectometer, WCR)和轴向位移测量系统(axial displacement measurement system, ADMS)测量土体温度、含水量的波动以及形变,实现对膨胀土全自动化监测。

在公路建设中,岩溶是导致碳酸盐岩地区发生地质灾害的主要原因,岩溶水、岩溶塌陷以及岩溶土洞等都会对路基的稳定性产生较大的影响。

蒋小珍等^[129]提出将 TDR 应用于岩溶塌陷监测,并通过室内物理试验对 TDR 材料的选型进行了对比验证;蒙彦等^[130]将布里渊光时域反射测量技术应用在塌陷领域的监测,并进行了试验研究;王金晨^[131]提出了一种基于微电机系统(micro-electro mechanical systems, MEMS)传感器的时域积分算法,通过对来自 MEMS 的加速度信号进行预处理和多项式拟合,实现了对岩溶路基塌陷深部位移的实时监测。

从以上研究可知,目前关于外部指标的路基智能评价主要集中在路基沉降和边坡稳定等方面,但现有的监测方法受地域、气象等因素的影响较大,且过于依靠人为干预,存在精度不高、失效率高等问题;内部指标的路基智能评价侧重于影响路基质量的关键指标的研究,图 12 为路基健康

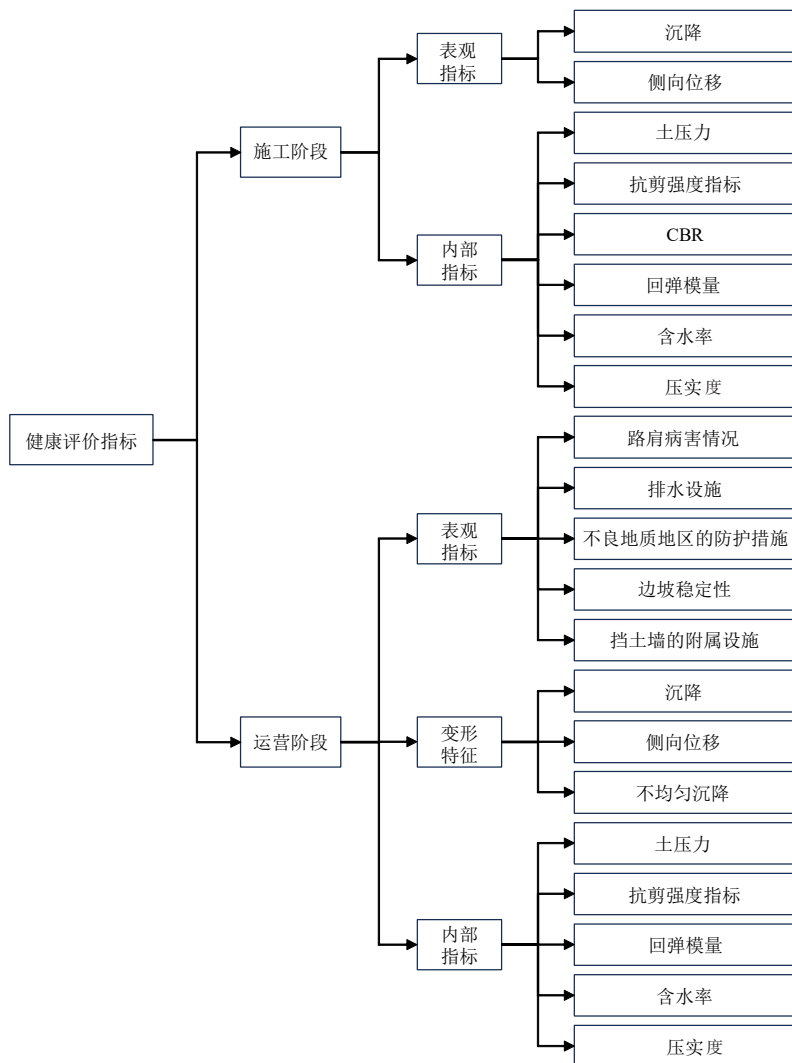


图 12 路基健康评价系统

Fig. 12 Subgrade health evaluation system

评价系统。未来的研究重点应集中在根据不同地质条件对各指标现场测试,系统地研究这些指标在实际工程中影响路基健康的机理。通过模型试验,详细研究各指标对路基整体稳定性的影响,并对健康稳定阈值进行研究,在保证路基健康的情况下确定各指标的健康限值。

4 路基智能注浆加固技术

注浆加固技术通过注入水泥浆或其他材料来填充路基内的空洞和裂缝,以提高路基的密实度和抗压强度,改善路基整体承载能力。该技术有助于减少因路基沉降、裂缝和塌陷而引起的交通中断和维护成本,同时还能增强道路的承载能力。

因此,注浆加固技术的应用对于促进地区基础设施和经济的可持续发展具有重要意义。

4.1 路基注浆加固技术原理

路基注浆加固技术是在公路上钻孔埋设注浆管,利用注浆压力将注浆材料注入路基内,起到填充或压实作用,提高土体密实度和承载能力,减少或消除路基的沉降变形。这项技术在公路养护中发挥着重要作用,特别是解决了公路运营中的桥头跳车等问题。采用此加固技术维修处治道路沉降等问题,可避免大规模挖填,且施工过程简单,对交通影响小。这不仅确保了公路的安全、舒适和畅通,还大大降低了维修和加固的成本。路基注浆加固流程如图13所示。

近年来,许多学者借助机器学习、人工智能等

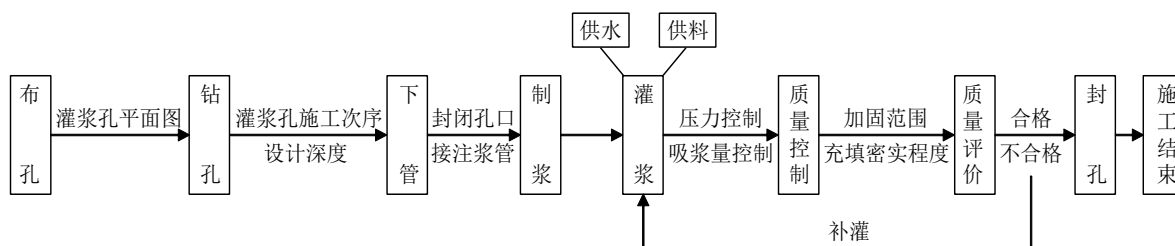


图13 路基注浆加固流程示意图^[132]

Fig. 13 Schematic diagram of subgrade grouting reinforcement process^[132]

技术,结合路基的地质条件和土体特性,以及预期的加固效果,对多种注浆材料的性能进行分析和预测。MARKOU等^[133]基于模糊线性回归方法研究了超细水泥浆液的渗透性能,结果表明其渗透性能与试验结果吻合较好;MOZUMDER等^[134]进一步利用ANN和支持向量回归(support vector regression, SVR)模型研究了微粉水泥浆在颗粒土中的渗透性能,得出这两种模型均能较好地预测渗透性能;HOANG等^[135]开发了一种新的方法,将混合元启发式和支持向量机集成来估计水泥浆液的可灌性,精度为96%;此外,DENG等^[136]提出了一种结合支持向量机和混合灰狼优化的可注性预测模型;TEKIN等^[137]采用自适应神经模糊推理系统对可灌性进行预测;ZHAO等^[138]采用基于AdaBoost的代理模型建立了水泥注浆材料组成与其力学特性之间的相关性;王超等^[139]提出了一种基于机器学习的集成预测、解释和自动超参数调整的算法框架,以识别水泥基灌浆材料抗压强度和流动度的配合比参数之间的复杂潜在关系;李

利平等^[140]研究了轻质智能同步注浆材料密度与压力的映射关系,建立了轻质智能同步注浆材料压缩理论模型,定性分析了轻质智能同步注浆材料高密实度注浆原理。综上,路基智能注浆加固技术可以结合路基特征和实际需求,利用数据分析和智能算法来选择最适合的注浆材料,从而实现智能选材。

4.2 路基注浆加固机理

当前,对路基加固的研究集中在浆液扩散半径与注浆控制参数之间的定量关系上,以实现预期的加固效果,国内外学者针对不同类型的浆液扩散机理进行了广泛的研究。

1) 充填注浆加固机理。

利用钻孔或管道将浆液注入孔洞中,以提高路基的密实度。通过注浆填充,能够有效防止水分渗透到路基中,提高路基的耐久性和稳定性。注浆研究的重点在于探讨浆液扩散距离与注浆压力及裂隙中填充介质之间的关系,以优化填充效果^[141-142]。

2) 渗透注浆加固机理。

将凝固性浆料注入碎石层和砂砾层的空隙,以填补空隙并提高路基的密实度和稳定性。在注浆过程中,浆料的扩散方式受到注入介质的特征粒径和浆料自身的特性粒径的影响,主要包括点源球形扩散和管状柱形扩散两种,具体如图14(a)所示。杨秀竹等^[143-144]对宾汉流体及幂律流体在砂质介质中的渗透扩散规律进行了深入研究;杨志全等^[145]研究了宾汉流体的黏时变特性以及去渗透扩散半径的影响规律。

3) 劈裂注浆加固机理。

在注浆过程中,浆液的压力会对土体产生影响。土体在浆液压力作用下,会发生劈裂并形成裂缝,之后浆液会填充这些裂缝。在压力的持续作用下,浆液进一步向四周扩散,形成劈裂浆脉,

具体过程如图14(b)所示。邹金锋等^[146]探讨了在劈裂注浆过程中,随着扩散半径的增大,浆液压力不断减小的变化规律;张伟杰^[147]提出了宾汉流体的劈裂浆脉扩散理论模型;曾胜等^[148]采用劈裂注浆法对路基沉陷进行了处治,并进行了注浆工程的数值模拟和基于FWD检测技术的注浆效果评价。

4) 压密注浆加固机理。

在压密注浆过程中,浆脉扩散会导致周围土体产生压缩变形,从而改变土体的黏聚力和摩擦角,最终提高了加固区的土体强度^[149-150]。在这一过程中,高压使得浆体材料通过注浆孔向外扩散,形成球状或椭球状的浆泡。浆体扩张会对周围土体施加压力,导致土壤发生塑性变形或开裂。在压密注浆过程中,高压作用使浆体材料通过注浆孔向外扩散,生成球状或椭球状的浆泡,如图14(c)所示。

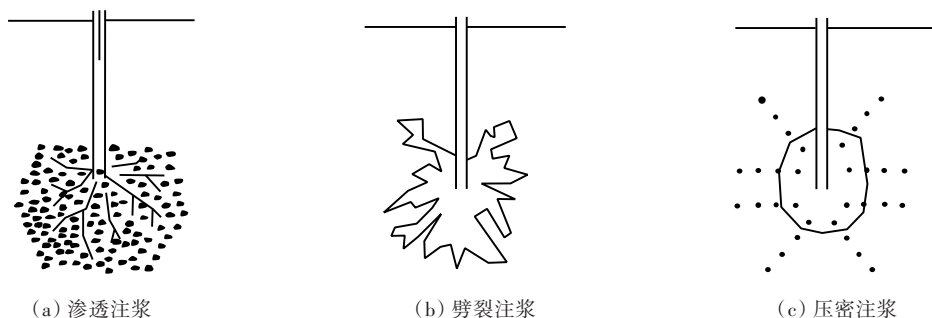


图14 路基注浆加固机理类型

Fig. 14 Types of subgrade grouting reinforcement mechanism

4.3 注浆控制系统

控制系统对于注浆施工的各个环节起到了重要的作用,它能够有效地监控施工质量的优劣以及施工过程中的安全问题。目前,国内外的注浆控制系统都是控制阀门的开合和电源的开闭,如王超等^[139]针对现有灌浆技术参数测量精度低、稳定性差以及严重依赖人工操作的问题,研制出了一种自适应灌浆测控系统,实现了电动调节阀自动化控制的稳压注浆;李梦天^[151]针对Wankel泵输出特性,开发了适用的智能化注浆系统SDUZJ,该系统可以实现自动化双液控制注浆和单液控制注浆,还具备查询注浆方案和双液控制方案的能力,具有较好的灵活性和可操作性,并基于Fuzzy-PID复合控制方法设计了Wankel泵稳压输出控制系统,以确保系统输出的稳定性;STILLE等^[152]提出了一种实时注浆控制方法,该方法通过实时监测注浆过程来预测浆液的扩散和流动轨迹,从而评

估可能出现的隆起和顶升风险;闫福根等^[153]利用Struts和Hibernate技术,借助注浆分析系统,将注浆数据转换为三维注浆孔模型,该方法能够将注浆数据以更直观、更立体的方式呈现出来;冯晓琳^[154]从流量控制、双液注浆比例控制和流量稳定3个方面出发,开发了基于互联网的注浆监控系统,并研发了专用监控设备和数据传输方案,以实现注浆过程的实时监测和控制。结合智能注浆系统,本文基于以往工程经验总结了一种路基智能控制施工方案,其具体流程如图15所示。

4.4 注浆效果评价

注浆效果评价是工程竣工阶段的关键步骤,它对整个施工过程提供了反馈,是检查注浆工程质量的重要环节,但由于注浆过程的隐蔽性,其效果难以精确控制。为此,精确评价注浆效果对于保障工程安全运营具有重要意义。目前,评定注浆效果的方法已形成5大体系^[155],包括分析法

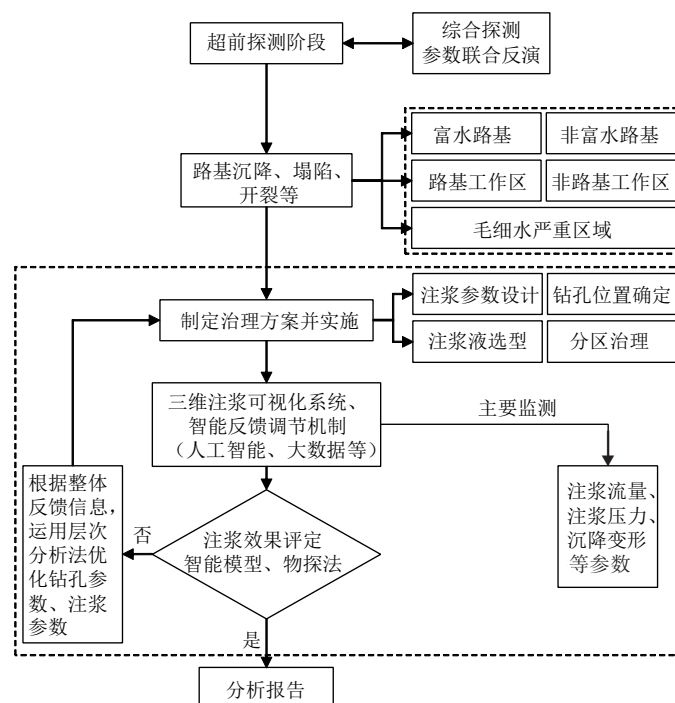


图15 路基智能控制施工方案流程图

Fig. 15 Flowchart of subgrade intelligent control construction program

(P - Q - t 曲线法、注浆量分布特征法、涌水量对比法、浆液填充率反算法)、检查孔法(检查孔观察法、检查孔取芯法、检查孔 P - Q - t 曲线法、渗透系数测试法)、开挖取样法(加固效果观察法、注浆机制分析法、力学指标测试法)、变位推测法(水位推测法、变形推测法)和物探法。目前流行的物探法具有无损探测、快速便捷等优势。表5总结了部分物探技术方法及其评定标准。

表5 部分物探技术方法及其评定标准^[155]Table 5 Selected technical methods of physical exploration and their evaluation criteria^[155]

物探技术方法	评定标准
电磁波电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)法	通过电磁波CT图可得到吸收系数 β 值彩色分布, β 值越小,介质的性状越好; β 值越大,介质的性状越差
瑞雷面波法	裂隙、空洞被浆液充填后,面波相速度上升明显,而未填充区速度较低
电测探法	经注浆覆盖后的部位,其电阻率会有明显的提高

随着科技和生产力的不断发展,注浆效果评价方法也越来越智能化,ZHU等^[156]提出了一种考虑评价过程不确定性因素的灌浆评价方法,主要分为3个部分:首先,引入了可灌性作为新的评价指标;其次,提出了一种基于云模型的模糊综合评

价方法;最后,通过计算模糊熵来表征注浆效率水平的复杂性;LI等^[157]提出了一种基于自适应神经模糊推理系统的注浆效果预测与评价方法;LIN等^[158]通过采用时域有限差分法进行探地雷达正演模拟和反投影成像的数值试验,建立了基于典型病害的探地雷达检测解释准则,并将探地雷达应用于注浆渗漏评价中;ZADHESH等^[159]采用ANN和线性回归方法来预测注浆的二次渗透性,并用统计学方法构建了试验变异函数及数学模型,结果表明ANN是评价固结灌浆质量的有效工具。该研究为注浆质量评价提供了新的方法,并且证实了ANN在该领域的潜在应用前景。然而,上述模型和方法均存在一定的局限性,因为室内试验无法完全模拟实际工程情况,从而降低了评价结果的可信度。此外,目前理论研究尚不充分,限制了数值模拟和室内理论分析的有效性,因此还有待深入,其主要包括:改进试验设计,加强理论基础研究,以及提高数值模拟和室内理论分析的可靠性和适用性。

从以上研究可知,在路基养护中,注浆加固技术的应用受多种因素影响,其中压力的作用是其中一个关键因素。由于多种因素影响,保证注浆效果的一致性具有挑战性。因此,路基智能注浆

加固技术的发展方向包括注浆材料的可灌性预测、注浆系统的智能化,以及注浆效果智能评价技术的研发。然而,在当前的注浆质量评估中存在一些不足,主要包括缺乏统一的评估标准和过分依赖工程实践和理论分析。为了解决这一问题,有必要确立一套统一且量化的评价指标。智能化发展对注浆施工质量智能调控至关重要,通过结合大数据、云计算和互联网+技术,可以实现此目标。综上所述,未来的研究和实践应着重于解决注浆技术的不足,并推动智能化发展的实施,以提高注浆施工质量和效率。

5 结论与展望

本文总结梳理了公路路基工程智能建养关键技术的研发与展望,得出以下结论:

1) BIM技术在现有的路基施工过程中缺乏有效的质量量化标准,难以形成有效的质量控制预警系统。未来须深入研究基于BIM技术的施工质量评估标准,同时可以考虑整合BIM技术、物联网技术、互联网+技术和机器学习算法,实现全面感知、深度互联和智能处理,形成多目标优化模型以提高施工质量与运维效率。BIM技术在养护阶段具有巨大的发展潜力,可以利用BIM技术存储病害信息并进行可视化表达,结合GIS技术分析病害分布规律,预测病害发展趋势和评估病害破损状况,有助于提高养护管理的科学性和准确性。

2) 目前智能压实技术在路基工程中的应用主要是基于机土耦合动力学模型,对压实质量检测以及压路机压实技术进行研究。在将来的研究中,应更多地关注压实质量的影响因素和质量均匀性评价,有助于进一步推动智能压实技术的发展,提高路基工程施工的效率和质量。此外,施工过程的管控和优化、填料性质的改良等方面也需要关注,发展无人智能压实施工技术,有助于全面监控压路机碾压过程和压实质量。

3) 在路基智能健康监测和评价领域,外在健康特征评价存在精度不高、失效率高等问题,而内在健康特征评价的研究较为分散。未来应重点研究根据地质条件的现场测试,尤其在特殊土地区,系统研究这些指标在实际工程中对路基健康的影响,并通过模型试验详细研究各指标对路基整体

稳定性的影响,在保证路基健康的情况下确定各指标的健康限值。

4) 当前,路基智能注浆加固技术主要聚焦于3个方面:预测注浆材料的可灌性、注浆系统的智能化设计以及对注浆效果的智能评价。目前,在实际应用中往往以理论分析或实际经验为基础,须确立统一和定量的注浆质量评价指标。无论是注浆施工技术还是监控管理,均须朝着智能化方向发展。通过整合大数据、云计算和互联网+技术,可以实现对注浆过程各个环节的智能调节,有助于全面提升注浆施工的整体质量。

[参考文献]

- [1] 付朝欢. 稳投资促发展惠民生 新基建将担起“重任”[N]. 中国经济导报, 2023-01-14(1). DOI: 10.28095/n.cnki.ncjld.2023.000035.
FU Chaohuan. Stabilizing investment to promote the development of new infrastructure for the benefit of the people's livelihood will shoulder the "heavy responsibility" [N]. China Economic Bulletin, 2023-01-14(1). DOI: 10.28095/n.cnki.ncjld.2023.000035.
- [2] 王建伟, 高超, 董是, 等. 道路基础设施数字化研究进展与展望[J]. 中国公路学报, 2020, 33(11): 101-124. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.11.010.
WANG Jianwei, GAO Chao, DONG Shi, et al. Current status and future prospects of existing research on digitalization of highway infrastructure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(11): 101-124. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372. 2020.11.010.
- [3] 王雷, 范晓东. 浅谈路基施工的质量控制技术[J]. 科技创新与应用, 2013(14): 206.
WANG Lei, FAN Xiaodong. Discussion on quality control technology of subgrade construction [J]. Technology Innovation and Application, 2013(14): 206.
- [4] ARUNA M. Utilization of iron ore tailings in manufacturing of paving blocks for eco-friendly mining [J]. Ahmad Dahlan University, 2012(23): 239-250.
- [5] ZANKO L M, NILES H B, ORESKOVICH J A. Mineralogical and microscopic evaluation of coarse taconite tailings from Minnesota taconite operations [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2008, 52(1): S51-S65. DOI: 10.1016/j.yrtph.2007.09.016.
- [6] AHMARI S, CHEN R, ZHANG L Y. Utilization of mine tailings as road base material [C]//GeoCongress 2012. Reston: American Society of Civil Engineers, 2012: 3654-3661. DOI: 10.1061/9780784412121.374.
- [7] JOVANOVIĆ U, SHAYANFAR E, SCHONFELD P M.

- Selecting and scheduling link and intersection improvements in urban networks [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672 (51): 1-11. DOI: 10.1177/0361198118758681.
- [8] 杨麒麟. 基于BIM的可视化协同设计应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
YANG Qilin. Applied research on BIM-based collaborative visualization design [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [9] 李明博, 蒋雅君, 刘小俊, 等. BIM技术在运营隧道病害检测结果三维可视化中的应用[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 297-301. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.01.065.
LI Mingbo, JIANG Yajun, LIU Xiaojun, et al. Application of BIM technology in three-dimensional visualization of disease detection results of operating tunnels [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(1): 297-301. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.01.065.
- [10] 刘训梅. 基于BIM技术的项目成本控制应用研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022. DOI: 10.27692/d.cnki.gsydx.2022.000272.
LIU Xunmei. Application research of BIM technology on project cost control [D]. Shenyang: Shenyang University, 2022. DOI: 10.27692/d.cnki.gsydx.2022.000272.
- [11] 杨贵荣. 基于BIM的公路工程路基施工应用研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000220.
YANG Guirong. Research on the application of highway engineering subgrade construction based on BIM [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2020. DOI: 10.26985/d.cnki.gcsjc.2020.000220.
- [12] 张绪斌. BIM技术在市政道路施工中的应用[J]. 低碳世界, 2020, 10(4): 115-116. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2020.04.070.
ZHANG Xubin. Application of BIM technology in municipal road construction [J]. Low Carbon World, 2020, 10(4): 115-116. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2020.04.070.
- [13] 王学峰, 赵永锋. BIM技术在霍永高速公路芝河大桥施工管理中的应用[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 335-338. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.03.069.
WANG Xuefeng, ZHAO Yongfeng. Application of BIM technology on Zhihe bridge construction management in Huoyong expressway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(3): 335-338. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.03.069.
- [14] 张建平, 余芳强, 赵文忠, 等. BIM技术在那汾高速公路工程建设中的研究和应用[J]. 施工技术, 2014, 43(18): 92-96. DOI: 10.7672/sjgs2014180092.
ZHANG Jianping, YU Fangqiang, ZHAO Wenzhong, et al. Research and application of BIM technology in Xingfen highway construction project [J]. Construction Technology, 2014, 43(18): 92-96. DOI: 10.7672/sjgs2014180092.
- [15] 刘向阳, 吴健, 刘国图, 等. 基于BIM的公路全寿命周期管理平台构建与应用[J]. 公路, 2016, 61(8): 131-137.
LIU Xiangyang, WU Jian, LIU Guotu, et al. BIM-based life-cycle management and application for highway project [J]. Highway, 2016, 61(8): 131-137.
- [16] 程方圆, 姚国明, 奎永才, 等. 集成GIS/BIM的公路隧道数字化管理研究及应用[J]. 隧道建设, 2019, 39(12): 1973-1980. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.12.007.
CHENG Fangyuan, YAO Guoming, KUI Yongcai, et al. GIS/BIM-integrated digital management of highway tunnel and its application [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(12): 1973-1980. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2019.12.007.
- [17] 张冰心. 基于GA网络模型的工程造价BIM辅助分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(11): 120-124. DOI: 10.13718/j.cnki.xdjk.2019.11.015.
ZHANG Bingxin. BIM-aided analysis of engineering cost based on GA network model [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2019, 41(11): 120-124. DOI: 10.13718/j.cnki.xdjk.2019.11.015.
- [18] 苏卫国, 汪朝辉. 基于BIM的公路模型与造价关联关键技术研究[J]. 公路, 2023, 68(2): 189-194.
SU Weiguo, WANG Chaohui. Research on key technologies of highway model and cost correlation based on BIM [J]. Highway, 2023, 68(2): 189-194.
- [19] 景凤, 郭婧娟. 基于BIM的高铁工程量清单EBS/WBS研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(2): 68-74. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201905120001.
JING Feng, GUO Jingjuan. Study on EBS/WBS of BIM-based high-speed railway bill of quantities [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(2): 68-74. DOI: 10.13238/j.issn.1004-2954.201905120001.
- [20] 刘均利, 廖恒彬, 张炳辉. 基于BIM技术的岩溶发育区岩质高陡边坡稳定性分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(5): 274-283. DOI: 10.19815/j.jace.2021.06063.
LIU Junli, LIAO Hengbin, ZHANG Binghui. Numerical simulation of stability of high and steep rock slope in Karst development region with BIM technology [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,

- 2022, 39(5): 274-283. DOI: 10.19815/j.jace.2021.06063.
- [21] 孙梦梦. BIM技术在道路工程施工阶段进度管理中的研究与应用[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019. SUN Mengmeng. Research and application of BIM technology in progress management in road engineering construction stage [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [22] 李文虎. 基于BIM+GIS的道路施工管理系统开发[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019. DOI: 10.27334/d.cnki.gstdy.2019.000483. LI Wenhui. Development of road construction management system based on BIM+GIS [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019. DOI: 10.27334/d.cnki.gstdy.2019.000483.
- [23] 赵瑜隆. 基于BIM技术的沥青面层施工过程控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2018.000017. ZHAO Yulong. Research on construction process control of asphalt layer based on BIM technology [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2018.000017.
- [24] 于晓田. 业主视角下EPC总承包项目前期投资管控研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019. YU Xiaotian. Research on pre-investment management and control of EPC general contract project based on owners' view [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2019.
- [25] 伍朝辉, 李青, 朱琳, 等. BIM在道路设施养护中的应用需求与创新[J]. 交通运输研究, 2020, 6(3): 116-128. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2020.03.014. WU Zhaohui, LI Qing, ZHU Lin, et al. Demand and innovative application of BIM in road facilities maintenance [J]. Transport Research, 2020, 6(3): 116-128. DOI: 10.16503/j.cnki.2095-9931.2020.03.014.
- [26] 刘玲, 孟庆昕, 刘晓东, 等. 基于BIM+GIS技术的公路预防性养护研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(4): 13-15. LIU Ling, MENG Qingxin, LIU Xiaodong, et al. Research on highway preventive maintenance based on BIM+GIS technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2015, 11(4): 13-15.
- [27] 崔小芳. 基于BIM的高速公路桥梁养护综合管理技术研究[J]. 公路工程, 2019, 44(3): 253-257. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.03.047. CUI Xiaofang. Research on integrated management technology of expressway bridge maintenance based on BIM [J]. Highway Engineering, 2019, 44(3): 253-257. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.03.047.
- [28] 侯芸, 桂成中, 张艳红, 等. 基于BIM技术的公路养护管理系统开发研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(11): 303-305. HOU Yun, GUI Chengzhong, ZHANG Yanhong, et al. Research and development of highway maintenance management system based on BIM technology [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2019, 15(11): 303-305.
- [29] 刘晓军. 基于GIS技术的公路养护管理系统开发[J]. 中南公路工程, 2003, 28(4): 117-120. LIU Xiaojun. Development of pavement management system base on GIS technology [J]. Central South Highway Engineering, 2003, 28(4): 117-120.
- [30] 蒋雅君, 李明博, 陶双江, 等. BIM技术在隧道衬砌病害信息可视化中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(4): 1114-1121. JIANG Yajun, LI Mingbo, TAO Shuangjiang, et al. Application of BIM technology on the visualization of tunnel lining defects information [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(4): 1114-1121.
- [31] 杨旭, 李毅, 刘文博, 等. 基于BIM+GIS的沥青路面表里全域病害数字孪生研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(3): 120-135. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.03.009. YANG Xu, LI Yi, LIU Wenbo, et al. Digital twin of asphalt pavement surface and internal full-field distress based on BIM+GIS technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(3): 120-135. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2023.03.009.
- [32] 李汝宁, 冯兴, 姚仰平, 等. 基于改进遗传算法的机场场道施工方案多目标优化[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-11 [2024-01-04]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0893>. LI Runing, FENG Xing, YAO Yangping, et al. Multi objective optimization of airport runway construction scheme based on improved genetic algorithm [J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: 1-11 [2024-01-04]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0893>.
- [33] CHANG G, XU Q W, RUTLEDGE J, et al. Accelerated implementation of intelligent compaction technology for embankment subgrade soils, aggregate base, and asphalt pavement materials [R]. Ames: Federal Highway Administration, 2011.
- [34] 陈春霖. 公路路基工程施工成本控制和管理的探讨[J]. 西部交通科技, 2021(11): 206-208. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2021.11.055.

- CHEN Chunlin. Discussion on project construction cost control and management of highway subgrade [J]. Western China Communications Science & Technology, 2021 (11): 206–208. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2021.11.055.
- [35] YOO T S, SELIG E T. Dynamics of vibratory-roller compaction [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, 105 (10): 1211–1231. DOI: 10.1061/ajgeb6.0000867.
- [36] 严世榕, 闻邦椿. 考虑塑性变形的振动压路机非线性动力学仿真[J]. 筑路机械与施工机械化, 1999, 16 (4): 13–16, 55. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.1999.04.006.
- YAN Shirong, WEN Bangchun. Study of a nonlinear dynamics with plastic deformation of a vibratory roller [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 1999, 16 (4): 13–16, 55. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.1999.04.006.
- [37] GRABE J. Continuous invers calculation of soil stiffness from the dynamic behavior of a driving vibratory roller [J]. Archive of Applied Mechanics, 1993, 63 (7): 472–478. DOI: 10.1007/BF00788045.
- [38] SHEN P H, LIN S W. Mathematic modeling and characteristic analysis for dynamic system with asymmetrical hysteresis in vibratory compaction [J]. Meccanica, 2008, 43 (5): 505–515. DOI: 10.1007/s11012-008-9114-x.
- [39] PIETZSCH D, POPPY W. Simulation of soil compaction with vibratory rollers [J]. Journal of Terramechanics, 1992, 29 (6): 585–597. DOI: 10.1016/0022-4898(92)90038-L.
- [40] IMRAN S. Modeling and analysis of the interaction between roller drum and pavement material during compaction [D]. Norman: University of Oklahoma, 2016.
- [41] CAI H B, KUCZEK T, DUNSTON P S, et al. Correlating intelligent compaction data to in situ soil compaction quality measurements [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2017, 143 (8): 040170388. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001333.
- [42] WHITE D J, THOMPSON M J. Relationships between in situ and roller-integrated compaction measurements for granular soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134 (12): 1763–1770. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:12(1763).
- [43] LING J M, LIN S, QIAN J S, et al. Continuous compaction control technology for granite residual subgrade compaction [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30 (12): 0401831612. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002522.
- [44] THOMPSON M J, WHITE D J. Field calibration and spatial analysis of compaction-monitoring technology measurements [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 2004 (1): 69–79. DOI: 10.3141/2004-08.
- [45] WHITE D J, VENNAPUSA P K R, GIESELMAN H H. Field assessment and specification review for roller-integrated compaction monitoring technologies [J]. Advances in Civil Engineering, 2011, 2011: 783836. DOI: 10.1155/2011/783836.
- [46] HU W, SHU X, JIA X Y, et al. Geostatistical analysis of intelligent compaction measurements for asphalt pavement compaction [J]. Automation in Construction, 2018, 89: 162–169. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.01.012.
- [47] MOONEY M A, RINEHART R V. Field monitoring of roller vibration during compaction of subgrade soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (3): 257–265. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:3(257).
- [48] 刘东海, 李子龙, 王爱国. 堆石料压实质量实时监测指标与碾压参数的相关性分析[J]. 天津大学学报, 2013, 46 (4): 361–366. DOI: 10.11784/tdxb20130412.
- LIU Donghai, LI Zilong, WANG Aiguo. Correlation analysis of rolling parameters and real-time monitoring index for rockfill dam compaction quality evaluation [J]. Journal of Tianjin University, 2013, 46 (4): 361–366. DOI: 10.11784/tdxb20130412.
- [49] HUA T B, YANG X G, YAO Q, et al. Assessment of real-time compaction quality test indexes for rockfill material based on roller vibratory acceleration analysis [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 2018: 2879321. DOI: 10.1155/2018/2879321.
- [50] 徐光辉. 路基系统形成过程动态监控技术 [D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- XU Guanghui. Technique of dynamic monitor on forming process of subgrade system [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [51] 吴龙梁. 基于能量耗散的路基连续压实控制技术研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2020. DOI: 10.27369/d.cnki.gtdky.2020.000016.
- WU Longliang. Research on continuous compaction control technology of roadbed based on energy dissipation [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2020. DOI: 10.27369/d.cnki.gtdky.2020.000016.
- [52] 叶阳升, 朱宏伟, 尧俊凯, 等. 高速铁路路基振动压实理论与智能压实技术综述 [J]. 中国铁道科学, 2021, 42 (5): 1–11. DOI: 10.3969/j.issn.1001-

- 4632.2021.05.01.
- YE Yangsheng, ZHU Hongwei, YAO Junkai, et al. Review on vibration compaction theory and intelligent compaction technology of high-speed railway subgrade [J]. China Railway Science, 2021, 42 (5): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2021.05.01.
- [53] COMMURI S, MAI A T, ZAMAN M. Neural network-based intelligent compaction analyzer for estimating compaction quality of hot asphalt mixes [J]. IFAC Proceedings Volumes, 2008, 41 (2): 2224-2229. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.00375.
- [54] ASIF IMRAN S, BARMAN M, COMMURI S, et al. Artificial neural network-based intelligent compaction analyzer for real-time estimation of subgrade quality [J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18 (6): 04018048. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001089.
- [55] CHEN C, HU Y B, JIA F, et al. Intelligent compaction quality evaluation based on multi-domain analysis and artificial neural network [J]. Construction and Building Materials, 2022, 341: 127583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127583.
- [56] WERSÄLL C, LARSSON S. Small-scale testing of frequency-dependent compaction of sand using a vertically vibrating plate [J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36 (3): 20120183. DOI: 10.1520/GTJ20120183.
- [57] BERA A, GHOSH A. Regression model for prediction of optimum moisture content and maximum dry unit weight of fine grained soil [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 5 (3): 297-305. DOI: 10.3328/ijge.2011.05.03.297-305.
- [58] HU W, JIA X Y, ZHU X Y, et al. Influence of moisture content on intelligent soil compaction [J]. Automation in Construction, 2020, 113: 103141. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103141.
- [59] CAO L P, ZHOU J, LI T, et al. Influence of roller-related factors on compaction meter value and its prediction utilizing artificial neural network [J]. Construction and Building Materials, 2021, 268: 121078. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121078.
- [60] ZAMAN M, SOLANKI P, EBRAHIMI A, et al. Neural network modeling of resilient modulus using routine subgrade soil properties [J]. International Journal of Geomechanics, 2010, 10 (1): 1-12. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2010)10:1(1).
- [61] SIVRIKAYA O, SOYCAN T Y. Estimation of compaction parameters of fine-grained soils in terms of compaction energy using artificial neural networks [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35 (17): 1830-1841. DOI: 10.1002/nag.981.
- [62] ISIK F, OZDEN G. Estimating compaction parameters of fine- and coarse-grained soils by means of artificial neural networks [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69 (7): 2287-2297. DOI: 10.1007/s12665-012-2057-5.
- [63] MOZUMDER R A, LASKAR A I. Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using Artificial Neural Network [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 69: 291-300. DOI: 10.1016/j.compgeo.2015.05.021.
- [64] TALEB BAHMED I, HARICHANE K, GHRICI M, et al. Prediction of geotechnical properties of clayey soils stabilised with lime using artificial neural networks (ANNs) [J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 13 (2): 191-203. DOI: 10.1080/19386362.2017.1329966.
- [65] 安再展, 刘天云, 皇甫泽华, 等. 利用CMV评估堆石料压实质量的神经网络模型 [J]. 水力发电学报, 2020, 39 (4): 110-120. DOI: 10.11660/slfdbx.20200411.
- AN Zaizhan, LIU Tianyun, HUANGFU Zehua, et al. Neural network model for evaluating compaction quality of rockfill materials by compaction meter value [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39 (4): 110-120. DOI: 10.11660/slfdbx.20200411.
- [66] ZHANG P, YIN Z Y, JIN Y F, et al. Intelligent modelling of clay compressibility using hybrid meta-heuristic and machine learning algorithms [J]. Geoscience Frontiers, 2021, 12 (1): 441-452. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.02.014.
- [67] CARLOS Z, VINCENT D, PHILIPPE B. Advanced compaction quality control [R]. Indiana: Purdue University, 2006.
- [68] XU Q W, CHANG G K. Evaluation of intelligent compaction for asphalt materials [J]. Automation in Construction, 2013, 30: 104-112. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.11.015.
- [69] IMRAN S A, BARMAN M, NAZARI M, et al. Continuous monitoring of subgrade stiffness during compaction [J]. Transportation Research Procedia, 2016, 17: 617-625. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.116.
- [70] COMMURI S, MAI A T, ZAMAN M. Neural network-based intelligent compaction analyzer for estimating compaction quality of hot asphalt mixes [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2011, 137 (9): 634-644. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000343.
- [71] 张润利, 张俊杰, 李熙山, 等. 振动压路机压实度连续检测仪 [J]. 工程机械, 2001, 32 (8): 4-6, 1.

- DOI: 10.3969/j.issn.1000-1212.2001.08.002.
- ZHANG Runli, ZHANG Junjie, LI Xishan, et al. Continuous tester for compactness of vibratory compactors [J]. Construction Machinery and Equipment, 2001, 32(8): 4-6, 1. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1212.2001.08.002.
- [72] 武雅丽, 王鹊, 卫雪莉. 振荡压实度计的试验与研究[J]. 中国公路学报, 1998, 11(4): 121-126. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.1998.04.021.
- WU Yali, WANG Que, WEI Xueli. Experiment and research on oscillating compaction meter [J]. China Journal of Highway and Transport, 1998, 11(4): 121-126. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.1998.04.021.
- [73] 马学良, 孙祖望, 龙水根. 振荡压实智能化控制策略的研究[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(3): 299-305. DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2008.03.009.
- MA Xueliang, SUN Zuwang, LONG Shuigen. Intelligent control strategies for oscillatory compaction [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008, 6(3): 299-305. DOI: 10.15999/j.cnki.311926.2008.03.009.
- [74] 徐光辉, 高辉, 王哲人. 路基压实质量连续动态监控技术[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3): 17-22. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2007.03.004.
- XU Guanghui, GAO Hui, WANG Zheren. Continuous dynamic monitor technology on subgrade compaction quality [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3): 17-22. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2007.03.004.
- [75] 姚仰平, 丛易敏行, 罗汀, 等. 山区高填方机场的智能建造与安全运营[J]. 科技导报, 2018, 36(17): 106-110.
- YAO Yangping, CONG Yiminxing, LUO Ting, et al. Intelligent construction and safe management of high filling airports in mountains [J]. Science & Technology Review, 2018, 36(17): 106-110.
- [76] 蔡德钧, 朱宏伟, 叶阳升, 等. 铁路路基工程信息化技术[J]. 铁道建筑, 2020, 60(4): 28-33. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2020.04.06.
- CAI Degou, ZHU Hongwei, YE Yangsheng, et al. Information construction of railway subgrade engineering [J]. Railway Engineering, 2020, 60(4): 28-33. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2020.04.06.
- [77] VENNAPUSA P K R, WHITE D J, MORRIS M D. Geostatistical analysis for spatially referenced roller-integrated compaction measurements [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6): 813-822. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000285.
- [78] 庞国强, 苟桂枝. 冲击压路机压实效果的有限元分析法[J]. 机械管理开发, 2003, 18(4): 16-17. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2003.04.009.
- PANG Guoqiang, GOU Guizhi. The finite element method on compact effect of impact roller [J]. Mechanical Management and Development, 2003, 18(4): 16-17. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2003.04.009.
- [79] 郝飞. “振动轮-土壤”模型的有限元分析[D]. 西安: 长安大学, 2007: 35-37.
- HAO Fei. Finite element analysis of "vibrating wheel-soil" model [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007: 35-37.
- [80] 郭寅, 刘常杰, 郝继贵, 等. 高速列车动态包络线测量系统[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 194-200. DOI: 10.3788/cjl201340.0208002.
- GUO Yin, LIU Changjie, ZHU Jigui, et al. Measurement system for dynamic envelope curve of high-speed train [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(2): 194-200. DOI: 10.3788/CJL201340.0208002.
- [81] 秦红丽. 高速铁路基沉降监测系统的研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018: 33-39.
- QIN Hongli. Research on subgrade settlement monitoring system for high speed railway [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018: 33-39.
- [82] 卢春房. 京沪高速铁路建设管理创新与实践[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(9): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2014.09.001.
- LU Chunfang. Research on the management innovation and practice of construction for Beijing-Shanghai high speed railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(9): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2014.09.001.
- [83] LIU G Y, WANG B L. Study on the effect of jet grouting pile reinforcing soft soil subgrade [J]. Advanced Materials Research, 2012, 594: 1420-1428. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.594-597.1420.
- [84] 王翔, 王波, 汪正兴. 高速铁路运营期基础沉降长期监测技术研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(5): 11-14, 64.
- WANG Xiang, WANG Bo, WANG Zhengxing. Research on the long-term monitoring technology of subgrade settlement for high-speed railway in operation period [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2017, 34(5): 11-14, 64.
- [85] 赵峰, 汪云甲, 闫世勇. 时序InSAR技术地表沉降监测结果可靠性及沉降梯度分析[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(5): 969-979. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.5.0969.
- ZHAO Feng, WANG Yunjia, YAN Shiyong. Analysis of the reliability and subsidence gradient for the

- subsidence monitoring result of time-series InSAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(5): 969-979. DOI: 10.11873/j. issn. 1004-0323. 2015.5.0969.
- [86] 陈强, 刘丽瑶, 杨莹辉, 等. 高速铁路轨道几何状态的车载摄影快速检测方法与试验[J]. 铁道学报, 2014, 36(3): 80-86. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-8360.2014.03.013.
- CHEN Qiang, LIU Liyao, YANG Yinghui, et al. Static geometry measurement of high-speed railway tracks by vehicle-borne photogrammetry[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 80-86. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8360.2014.03.013.
- [87] 肖和华, 金鼎沸. 基于机器视觉的路基沉降监测方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1365-1368. DOI: 10.19713/j. cnki. 43-1423/u. 2015.06.017.
- XIAO Hehua, JIN Dingfei. A subgrade settlement monitoring method based on machine vision[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1365-1368. DOI: 10.19713/j. cnki. 43-1423/u. 2015.06.017.
- [88] 杨婧, 冯其波, 高瞻, 等. 铁路路基关键参数长期监测方法与系统的研究[J]. 测绘通报, 2014(6): 24-28. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2014.0184.
- YANG Jing, FENG Qibo, GAO Zhan, et al. On a new method and system for automatically monitoring key parameters of railway subgrade [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014 (6): 24-28. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2014.0184.
- [89] 杨婧, 冯其波, 张斌, 等. 基于倾斜传感器的路基剖面沉降自动监测方法与系统[J]. 北京交通大学学报, 2012, 36(6): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.2012.06.010.
- YANG Jing, FENG Qibo, ZHANG Bin, et al. An automatic method and system for measuring and monitoring subgrade settlement using inclinometer[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(6): 52-56. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.2012.06.010.
- [90] 王敏, 李义杰, 徐林荣. 高速铁路基动载沉降现场监测分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(6): 22-29. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.003.
- WANG Min, LI Yijie, XU Linrong. Field monitoring and analysis of dynamic load settlement of high speed railway subgrade[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(6): 22-29. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.003.
- [91] 郭云开, 朱禄宏, 熊旭平, 等. 灰色模型结合神经网络预测高速公路路基沉降[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(3): 19-24. DOI: 10.3969/j. issn.1672-9331.2016.03.004.
- GUO Yunkai, ZHU Luhong, XIONG Xuping, et al. Grey model combines neural network to predict highway sub-grade settlement [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2016, 13(3): 19-24. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-9331.2016.03.004.
- [92] 郭云开, 朱善宽, 刘磊, 等. 超限学习机在高速公路路基沉降预测中的应用[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(4): 44-48, 89. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.007.
- GUO Yunkai, ZHU Shankuan, LIU Lei, et al. Prediction of expressway subgrade settlement based on extreme learning machine [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(4): 44-48, 89. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.04.007.
- [93] 姚仰平. UH模型系列研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2): 193-217. DOI: 10.11779/CJGE201502001.
- YAO Yangping. Advanced UH models for soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2): 193-217. DOI: 10.11779/CJGE201502001.
- [94] 王念秦, 申辉辉, 鲁兴生. 边坡变形监测技术发展现状及问题对策[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 7845-7855. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815. 2021.19.001.
- WANG Nianqin, SHEN Huihui, LU Xingsheng. Development status and problem countermeasures of slope deformation monitoring technology [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 7845-7855. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.19.001.
- [95] FATEMI AGHDA S M, GANJALIPOUR K, NABIOLLAHI K. Comparison of performance of inclinometer casing and TDR technique[J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 150: 182-194. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2018.01.022.
- [96] 陈云敏, 陈赞, 陈仁朋, 等. 滑坡监测TDR技术的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2748-2755. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6915. 2004.16.018.
- CHEN Yunmin, CHEN Yun, CHEN Renpeng, et al. Testing study on applications of time domain reflectometry to slope monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2748-2755. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-6915. 2004.16.018.
- [97] PEI H F, JING J H, ZHANG S Q. Experimental study on a new FBG-based and Terfenol-D inclinometer for slope displacement monitoring [J]. Measurement, 2020, 151: 107172. DOI: 10.1016/j. measurement. 2019.107172.

- [98] 孙义杰, 张丹, 童恒金, 等. 分布式光纤监测技术在三峡库区马家沟滑坡中的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 97-102. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.04.027.
- SUN Yijie, ZHANG Dan, TONG Hengjin, et al. Research of distributed fiber optic sensing technology in monitoring of Majiagou landslide of Three Gorges[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 97-102. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.04.027.
- [99] SMITH A, DIXON N, FOWMES G J. Early detection of first-time slope failures using acoustic emission measurements: large-scale physical modelling [J]. Géotechnique, 2017, 67(2): 138-152. DOI: 10.1680/jgeot.15.p.200.
- [100] 陈乔, 张阔, 陈吉龙, 等. 土剪破坏次声监测试验研究[J]. 力学学报, 2020, 52(3): 877-889. DOI: 10.6052/0459-1879-19-253.
- CHEN Qiao, ZHANG Kuo, CHEN Jilong, et al. Experimental study on infrasound monitoring during soil shear failure [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2020, 52(3): 877-889. DOI: 10.6052/0459-1879-19-253.
- [101] 魏平新, 李成钢, 徐峰, 等. 广东省滑坡灾害监测中 CORS 系统的应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(4): 562-570. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00562.
- WEI Pingxin, LI Chenggang, XU Feng, et al. Study on slope slide real-time monitoring system in Guangdong using GPS/CORS integration technique [J]. Journal of Geo-Information Science, 2011, 13(4): 562-570. DOI: 10.3724/SP.J.1047.2011.00562.
- [102] KOBAYASHI A, TSUYUKI T. Long-term slow slip event detected beneath the Shima Peninsula, central Japan, from GNSS data[J]. Earth, Planets and Space, 2019, 71(1): 60. DOI: 10.1186/s40623-019-1037-3.
- [103] 王慧敏, 罗忠行, 肖映城, 等. 基于 GNSS 技术的高速公路边坡自动化监测系统[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(6): 60-68. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.08.
- WANG Huimin, LUO Zhongxing, XIAO Yingcheng, et al. Automatic monitoring system on highway slopes based on GNSS technique [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(6): 60-68. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.06.08.
- [104] 谢谟文, 胡嫚, 王立伟. 基于三维激光扫描仪的滑坡表面变形监测方法: 以金坪子滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(4): 85-92. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.04.024.
- XIE Mowen, HU Man, WANG Liwei. Landslide monitoring by three-dimensional laser scanner-case study of the displacement detection of the Jinpingzi landslide (Southwest, China) [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(4): 85-92. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2013.04.024.
- [105] 许强. 对滑坡监测预警相关问题的认识与思考[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2): 360-374. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-025.
- XU Qiang. Understanding the landslide monitoring and early warning: consideration to practical issues [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(2): 360-374. DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2020-025.
- [106] 李彩林, 张剑清, 郭宝云. 利用近景摄影测量技术的滑坡监测新方法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(3): 6-8. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2011.03.002.
- LI Cailin, ZHANG Jianqing, GUO Baoyun. New method of landslide monitoring based on close-range photogrammetry [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(3): 6-8. DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2011.03.002.
- [107] NEUMAN S P. Galerkin approach to saturated-unsaturated flow in porous media[J]. Finite elements in fluids, 1975, 1(1): 201-217.
- [108] ZEHE E, MAURER T, IHRINGER J, et al. Modeling water flow and mass transport in a loess catchment[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2001, 26(7/8): 487-507. DOI: 10.1016/S1464-1909(01)00041-7.
- [109] 周志军. 土石混填路基压实质量控制方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- ZHOU Zhijun. Study on controlling methods of compactive quality of subgrade filled with earth-rock mixtures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [110] DA SILVA M, RAJCHENBACH J. Stress transmission through a model system of cohesionless elastic grains [J]. Nature, 2000, 406: 708-710. DOI: 10.1038/35021023.
- [111] LIANG R Y, RABAB'AH S, KHASAWNEH M. Predicting moisture-dependent resilient modulus of cohesive soils using soil suction concept [J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(1): 34-40. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2008)134:1(34).
- [112] CARY C E, ZAPATA C E. Resilient modulus for unsaturated unbound materials [J]. Road Materials and Pavement Design, 2011, 12(3): 615-638. DOI: 10.1080/14680629.2011.9695263.
- [113] PARK B S, LEE J, KIM S C, et al. Investigation of three-dimensional active earth pressure and load transfer according to aspect ratio [J]. Marine Georesources & Geotechnology, 2019, 37(3): 322-330. DOI: 10.1080/1064119x.2017.1420715.

- [114] RAHIM A, GEORGE K P. Falling weight deflectometer for estimating subgrade elastic moduli [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2003, 129 (1): 100-107. DOI: 10.1061/(ASCE) 0733-947X (2003)129: 1(100).
- [115] MOHAMMAD L N, HERATH A, ABU-FARSAKH M Y, et al. Prediction of resilient modulus of cohesive subgrade soils from dynamic cone penetrometer test parameters [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(11): 986-992. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19: 11(986).
- [116] BYUN Y H, KIM J H, LEE J S. Cone penetrometer with a helical-type outer screw rod for evaluation of the subgrade condition [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2013, 139(2): 115-122. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000504.
- [117] NORVELL J, GRILL J. The application and advantages of surface penetrating radar in subgrade void detection beneath slabs-on-grade [C]//*Forensic Engineering 2009*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2009: 647-656. DOI: 10.1061/41082 (362)66.
- [118] YANG F, PENG S P, FENG Z H, et al. Research on ground penetrating radar (GPR) exploration on subgrade failure based on spectrum profile [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2007, 2(2): 8-11. DOI: 10.1061/jhtrcq.0000185.
- [119] D'AMICO F, GUATTARI C, BENEDETTO A. GPR Signal processing in frequency domain using Artificial Neural Network for water content prediction in unsaturated subgrade [C]//*Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*. Lecce: IEEE, 2010: 1-6. DOI: 10.1109/ICGPR. 2010.5550076.
- [120] XU J B, YAN C G, ZHAO X, et al. Monitoring of train-induced vibrations on rock slopes [J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2017, 13(1): 71-79. DOI: 10.1177/1550147716687557.
- [121] XU J B, LI H, DU K, et al. Field investigation of force and displacement within a strata slope using a real-time remote monitoring system [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(15): 552. DOI: 10.1007/s12665-018-7729-3.
- [122] 王蒙. 季冻区路基水温状况监测及强度变化的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
WANG Meng. Research on moisture and temperature monitoring and intensity change of subgrade in seasonal frozen region [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [123] XU J Y, LI X, YANG J, et al. A remote subgrade settlement monitoring system based on optical method [J]. *Urban Rail Transit*, 2019, 5(3): 202-206. DOI: 10.1007/s40864-019-00110-6.
- [124] 赵世运, 刘华, 李先明, 等. 寒区高速铁路路基变形智能监测系统设计与实现 [J]. *冰川冻土*, 2014, 36 (4): 944-952. DOI: 10.7522/j. issn. 1000-0240. 2014.0114.
ZHAO Shiyun, LIU Hua, LI Xianming, et al. Intelligent monitoring system for embankment deformation of high-speed railway in cold regions: design and implementation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36 (4): 944-952. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0114.
- [125] 罗博仁, 余飞, 余绍淮. 基于星载InSAR的高寒地区公路路基形变监测 [J]. *中外公路*, 2023, 43(2): 22-25. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2023.02.004.
LUO Boren, YU Fei, YU Shaohuai. Deformation monitoring of highway subgrade in alpine area based on spaceborne InSAR [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43 (2): 22-25. DOI: 10.14048/j. issn.1671-2579.2023.02.004.
- [126] 宋竹兵, 李震, 朱宝山, 等. 冻土路基变形场光纤阵列监测体系研究 [J]. *中外公路*, 2021, 41(5): 22-26. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.005.
SONG Zhubing, LI Zhen, ZHU Baoshan, et al. Study on fiber optic array monitoring system of permafrost embankment displacement field [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021, 41 (5): 22-26. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.005.
- [127] 秦梓航. 膨胀土填方路基变形稳定特性及处治技术研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2021.
QIN Zihang. Study on deformation stability characteristics and treatment technology of expansive soil filled subgrade [D]. Nanning: Guangxi University, 2021.
- [128] MONTENEGRO R. Numerical modeling, characterization and monitoring of the seasonal behavior of expansive clays [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2020.
- [129] 蒋小珍, 雷明堂, 戴建玲, 等. 岩溶(土洞)塌陷TDR监测试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38 (1): 118-122. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665. 2011.01.017.
JIANG Xiaozhen, LEI Mingtang, DAI Jianling, et al. A study of the monitoring deformation of sinkhole collapse using TDR time domain reflectometry [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38 (1): 118-122. DOI: 10.16030/j. cnki. issn. 1000-3665. 2011.01.017.
- [130] 蒙彦, 管振德. 应用光纤传感技术进行岩溶塌陷监测预报的关键问题探讨 [J]. *中国岩溶*, 2011, 30 (2): 187-192. DOI: 10.3969/j. issn. 1001-4810. 2011.02.011.

- MENG Yan, GUAN Zhende. A discussion on the key technical problem in monitoring and predicting sinkhole with optical fiber sensing (BOTDR) technique [J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30 (2): 187-192. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4810.2011.02.011.
- [131] 王金晨. 基于MEMS的岩溶路基塌陷监测方法与模型试验研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2023. DOI: 10.27049/d.cnki.gglde.2022.000341.
- WANG Jinchun. MEMS-based karst roadbed collapse monitoring method and model test research [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Science and Technology, 2023. DOI: 10.27049/d.cnki.gglde.2022.000341.
- [132] 张森. 高速公路路基沉陷注浆处治技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- ZHANG Miao. Research on grouting treatment technology for subsidence in saturated highway subgrade [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [133] MARKOU I N, CHRISTODOULOU D N, PAPADOPOULOS B K. Penetrability of microfine cement grouts: experimental investigation and fuzzy regression modeling [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52 (7): 868-882. DOI: 10.1139/cgj-2013-0297.
- [134] MOZUMDER R A, LASKAR A I, HUSSAIN M. Penetrability prediction of microfine cement grout in granular soil using Artificial Intelligence techniques [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 72: 131-144. DOI: 10.1016/j.tust.2017.11.023.
- [135] HOANG N D, TIEN BUI D, LIAO K W. Groutability estimation of grouting processes with cement grouts using differential flower pollination optimized support vector machine [J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 45: 173-186. DOI: 10.1016/j.asoc.2016.04.031.
- [136] DENG S H, WANG X L, ZHU Y S, et al. Hybrid grey wolf optimization algorithm-based support vector machine for groutability prediction of fractured rock mass [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2019, 33 (2): 04018065. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000814.
- [137] TEKIN E, AKBAS S O. Predicting groutability of granular soils using adaptive neuro-fuzzy inference system [J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(4): 1091-1101. DOI: 10.1007/s00521-017-3140-3.
- [138] ZHAO W J, FENG S Y, LIU J X, et al. An explainable intelligent algorithm for the multiple performance prediction of cement-based grouting materials [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 366: 130146. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.130146.
- [139] 王超, 徐力生, 徐蒙, 等. 关键参数自适应灌浆测控系统的研制与应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4474-4482.
- WANG Chao, XU Lisheng, XU Meng, et al. Development and application of key parameters adaptive grouting detection and control system [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(11): 4474-4482.
- [140] 李利平, 曹阳阳, 丁传逵, 等. 基于渗率效应的可压缩智能同步注浆材料扩散机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(9): 1324-1333. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.23222.
- LI Liping, CAO Yangyang, DING Chuankui, et al. Diffusion mechanism of compressible synchronous grouting materials based on permeability effect [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2023, 51 (9): 1324-1333. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.23222.
- [141] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69-73. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2005.01.011.
- RUAN Wenjun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27 (1): 69-73. DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2005.01.011.
- [142] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709-2714. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.15.018.
- RUAN Wenjun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24 (15): 2709-2714. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.15.018.
- [143] 杨秀竹, 王星华, 雷金山. 宾汉体浆液扩散半径的研究及应用[J]. 水利学报, 2004, 35(6): 75-79. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2004.06.013.
- YANG Xiuzhu, WANG Xinghua, LEI Jinshan. Study on grouting diffusion radius of Bingham fluids [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35 (6): 75-79. DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2004.06.013.
- [144] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1803-1806. DOI: 10.16285/j.rsm.2005.11.023.
- YANG Xiuzhu, LEI Jinshan, XIA Linong, et al. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(11): 1803-1806. DOI: 10.16285/j.rsm.2005.11.023.
- [145] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 黏度时变性宾汉体浆液的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2697-2703. DOI: 10.16285/j.rsm.2011.09.037.
- YANG Zhiquan, HOU Kepeng, GUO Tingting, et al.

- Study of column-hemispherical penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior of viscosity [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32 (9): 2697-2703. DOI: 10.16285/j. rsm. 2011.09.037.
- [146] 邹金锋, 李亮, 杨小礼. 劈裂注浆扩散半径及压力衰减分析[J]. *水利学报*, 2006, 37(3): 314-319. DOI: 10.3321/j.issn: 0559-9350.2006.03.010.
- ZOU Jinfeng, LI Liang, YANG Xiaoli. Penetration radius and pressure attenuation law in fracturing grouting [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37 (3): 314-319. DOI: 10.3321/j. issn: 0559-9350. 2006.03.010.
- [147] 张伟杰. 隧道工程富水断层破碎带注浆加固机理及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- ZHANG Weijie. Mechanism of grouting reinforcement of water-rich fault fractured zone and its application in tunnel engineering [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014.
- [148] 曾胜, 李文, 李振存, 等. 路基沉陷劈裂注浆加固试验[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 10 (3): 1-5, 12. DOI: 10.3969/j.issn. 1672-9331. 2013. 03.001.
- ZENG Sheng, LI Wen, LI Zhencun, et al. Experiment of splitting grouting on subgrade subsidence [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2013, 10 (3): 1-5, 12. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2013.03.001.
- [149] 张忠苗, 邹健, 贺静漪, 等. 黏土中压密注浆及劈裂注浆室内模拟试验分析[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31 (12): 1818-1824. DOI: 10.3321/j. issn: 1000-4548.2009.12.003.
- ZHANG Zhongmiao, ZOU Jian, HE Jingyi, et al. Laboratory tests on compaction grouting and fracture grouting of clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31 (12): 1818-1824. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2009.12.003.
- [150] 张浩, 施成华, 彭立敏, 等. 模袋袖阀管压密注浆的注浆压力理论计算方法研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(4): 1313-1322. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0579.
- ZHANG Hao, SHI Chenghua, PENG Limin, et al. Study on theoretical calculation method of grouting pressure for compaction grouting of mold bag sleeve valve tube [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41 (4): 1313-1322. DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0579.
- [151] 李梦天. 基于Wankel泵及最优化注浆控制机理的智能注浆控制方法[D]. 济南: 山东大学, 2019. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2019.000235.
- LI Mengtian. Intelligent grouting control method based on Wankel pump and optimized grouting control mechanism [D]. Ji'nan: Shandong University, 2019. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2019.000235.
- [152] STILLE B, STILLE H, GUSTAFSON G, et al. Experience with the real time grouting control method [J]. *Geomechanics and Tunnelling*, 2009, 2(5): 447-459. DOI: 10.1002/geot.200900036.
- [153] 闫福根, 缪正建, 李明超, 等. 基于三维地质模型的坝基灌浆工程可视化分析[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(3): 567-572.
- YAN Fugen, MIAO Zhengjian, LI Mingchao, et al. Visual analysis for grouting engineering of dam foundation based on 3D geological model [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34 (3): 567-572.
- [154] 冯晓琳. 基于物联网技术的注浆监控系统设计[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.
- FENG Xiaolin. Design of grouting monitoring system based on internet of things [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.
- [155] 许增光, 熊伟, 柴军瑞, 等. 隧道裂隙突涌水过程中注浆技术研究进展及展望[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(2): 185-193, 201. DOI: 10.11705/j. issn.1672-643X.2021.02.27.
- XU Zengguang, XIONG Wei, CHAI Junrui, et al. Research progress and prospect of grouting techniques in tunnel fissure water inrush process [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32 (2): 185-193, 201. DOI: 10.11705/j. issn. 1672-643X.2021.02.27.
- [156] ZHU Y S, WANG X L, DENG S H, et al. Evaluation of curtain grouting efficiency by cloud model-based fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23 (7): 2852-2866. DOI: 10.1007/s12205-019-0519-y.
- [157] LI X C, ZHONG D H, REN B Y, et al. Prediction of curtain grouting efficiency based on ANFIS [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78 (1): 281-309. DOI: 10.1007/s10064-017-1039-y.
- [158] LIN C J, WANG X T, LI Y, et al. Forward modelling and GPR imaging in leakage detection and grouting evaluation in tunnel lining [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(1): 278-294. DOI: 10.1007/s12205-020-1530-z.
- [159] ZADHESH J, RASTEGAR F, SHARIFI F, et al. Consolidation grouting quality assessment using artificial neural network (ANN) [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2015, 45 (2): 136-144. DOI: 10.1007/s40098-014-0116-4.

(责任编辑: 刘平; 校对: 石月珍; 英文编辑: 吴高桥)