

公路基础设施智能建造发展与展望综述

郑健龙^{1,2}, 陈梦洁^{1,2}, 刘超超^{1,2}

(1. 湘江实验室, 长沙理工大学, 湖南长沙 410114; 2. 极端环境绿色长寿道路工程全国重点实验室, 长沙理工大学, 湖南长沙 410114)

摘要:随着智能建造的迅猛发展,公路基础设施智能建造逐渐成为研究热点。该文面向公路基础设施智能建造全寿命周期,从材料设计智能化、结构设计智能化、施工管理智能化、检测与监测智能化、维护管理智能化5个方面入手,系统阐述了公路基础设施智能建造的发展现状、面临难题及未来的发展方向。在材料智能化方面,探讨了路面材料基因组计划的应用及最新进展;在结构智能化方面,重点介绍了CAD(计算机辅助设计)在路面结构设计中的应用;在施工管理智能化方面,分析了智能监控系统在路面施工全过程的作用与重要性;在检测与监测智能化方面,讨论了路面内嵌感知单元的发展现状与前景;在维护管理智能化方面,评估了探地雷达无损检测技术在公路质量评估中的效果与潜力。结果表明:尽管智能建造技术在公路基础设施领域取得了一定进展,但仍面临技术体系不完善、数据集成度低、技术成本高等问题。未来,公路基础设施智能建造应以标准化建设、技术创新和跨领域协作为重点,致力于构建高效、安全、可持续的智能公路基础设施体系。

关键词:公路基础设施;智能建造;材料基因组;结构施工一体化;智能监测

中图分类号:U416.224

文献标志码:A

Review of Intelligent Construction Development of Highway Infrastructures and Its Prospects

ZHENG Jianlong^{1,2}, CHEN Mengjie^{1,2}, LIU Chaochao^{1,2}

(1. Xiangjiang Laboratory, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. National Key Laboratory of Green and Long-Life Road Engineering in Extreme Environment, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China)

Abstract: With the rapid advancement of intelligent construction, intelligent development of highway infrastructures has emerged as a key research focus. This paper focused on the whole life cycle of intelligent construction of highway infrastructures and provided a comprehensive analysis of its current status, challenges, and future directions. The discussion was organized into five key areas: intelligent material design, intelligent structural design, intelligent construction management, intelligent inspection and monitoring, and intelligent maintenance management. In intelligent materials, the paper explored the application and recent advancements of the pavement material genome program. Regarding intelligent structures, the role of computer-aided design (CAD) in pavement structural design was emphasized. For intelligent construction management, the importance and impact of intelligent monitoring systems throughout the pavement construction process were examined. In the area of inspection and monitoring intelligence, the current development and potential of embedded sensing units in pavements were discussed. Finally, in intelligent maintenance management, the paper evaluated the effectiveness and potential of ground-penetrating radar (GPR) non-destructive testing technology in highway quality assessment. The findings reveal that although intelligent construction technologies have made progress in highway infrastructures, challenges remain, including incomplete technical systems, limited data integration, and high technical costs. The future of intelligent highway infrastructure construction should focus on standardization, technological innovation, and cross-domain collaboration, so as to establish an efficient, safe, and sustainable intelligent highway infrastructure system.

收稿日期:2025-01-16(修改稿)

基金项目:国家重大科研仪器研制项目(编号:51927814);湘江实验室开发基金项目(编号:22XJ01009)

作者简介:郑健龙,男,博士,教授,中国工程院院士.E-mail:zjl@csust.edu.cn

Keywords: highway infrastructure; intelligent construction; material genome; integration of structural construction; intelligent monitoring

0 引言

智能建造,是指在建造的过程中利用先进的技术和智能化系统提高建造的效率与质量,进而达到提高建筑的可持续性、环保性、智能水平等目的。智慧建造,是指在建造领域中应用信息技术、数字化工具和数据分析等技术,从而提高整个建筑和基础设施生命周期的效率。智能建造与智慧建造的差异性在于:智能建造是按照设定的路径完成规定的任务,而智慧建造可以通过自主学习、决策并优化路径以达成目标。公路基础设施的智能建造是信息技术、数字技术等新技术革命成果与传统公路基础设施建养技术的融合,其目的是提高质量、实现降本增效。公路基础设施的智能建造能使工程师迅速感知甚至操纵以前难以感知和操控的对象。公路基础设施智能建造的发展过程分为4个阶段,各个阶段的主要特征分别是公路基础设施的计算机辅助设计及遥感航测技术在道路勘测设计中的应用;施工监控、施工管理信息化,以及基于GPS\GIS技术与平面地面数字模型在公路工程建设中的应用;BIM技术、健康监测,以及基于3S技术与三维地面数字模拟在公路工程建设中的应用;开发利用北斗系统的各项性能,实现公路基础设施设计、施工与运维一体的数字化和三维可视化,建设现场少人或无人的智慧工地的应用。《国家综合立体交通网规划纲要》明确要求:到2035年,基本建成便利通畅、经济高效、绿色集约、智慧先进、安全可靠的现代化高质量国家综合立体交通网。近期,交通运输部进一步强调:促进公路基础设施数字化转型是交通运输行业高质量发展的必然要求。公路基础设施的智能建造是实现数字化转型,建设交通强国的重要举措。

智能建造作为各国竞相研究的前沿科技领域,已经上升为国家战略技术。如图1所示,金字塔图中展示了道路基础设施智能建造中的5个关键环节及其智能化应用的比例分配。其中,材料设计作为道路建造的基础具有较高的占比,实现材料设计智能化,可以从根本上提高路面的性能和使用寿命;在材料设计实现智能化的基础上,路面结构设计、施工管理智能化确保了结构性能优化和高效的施工过程,通过BIM技术可以实现结构与施工管理一体化;监测与检测智能化,不仅可以实现施工全过程监

测,还可以应用到路面使用后的维修和养护过程中;维护管理智能化需要借助检测与监测智能化系统,因而占比较低。本文针对公路基础设施智能建造的重点研究方向,从材料、结构、施工、结构施工一体化以及健康监测与智慧养护5个方面系统阐述了国内外相关研究成果,并讨论了现有研究中所面临的技术难题及未来的发展趋势,为智能建造行业的科研工作提供技术指引。

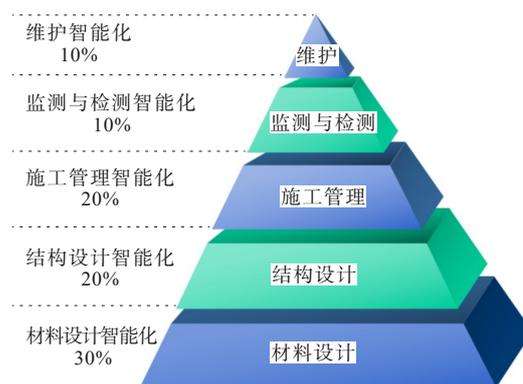


图1 道路基础设施智能建造中的5个关键环节
Figure 1 Five key stages in intelligent construction of highway infrastructure

1 公路工程材料设计的智能化发展现状

材料设计智能化是指通过利用人工智能和机器学习等先进技术来加速和优化新材料的开发过程。路面材料性能优化可以为长寿命路面、极端环境路面建设提供很大的便利,但材料种类多样、试验量大等问题仍难以突破。材料设计智能化旨在建立一个完整的体系来提高材料研究的效率、降低成本并推动创新^[1]。体系包括3个方面:材料多尺度分析、材料基因库与分子动力学模拟。实现材料设计智能化需要做以下3项工作:①对路面材料进行多尺度分析,经过大量试验得出材料的性质;②建立材料基因库并将各类材料突出性能作为关键词录入系统;③通过材料基因库筛选出目标材料,计算出合理配合比,建立模型进行分子动力学仿真模拟验证。材料基因组计划和分子动力学模拟已经成为国际道路领域的研究热点。随着材料基因组计划的推进和分子动力学模拟技术的不断完善,越来越多的国家开始

研究发展该技术,创建高效率、低成本的材料设计体系,推动社会 and 经济发展。

1.1 路面材料多尺度分析发展现状

沥青路面早已成为各国主要使用路面类型,对于沥青路面性能的改善,首先需要对沥青混合料的设计进行优化,沥青混合料是由沥青、集料以及外加剂等按照一定类型的结构方式组成的混合料。由于沥青、集料以及沥青与集料之间的空隙影响沥青混合料的性质,因此,国内外众多学者从这三方面入手,在不同层面开展了对提高沥青混合料使用性能的研究。

从宏观角度出发,对沥青混合料的研究主要集中在沥青化学组分方面。当前国际上常采用化学组分标准分离法将沥青组分划分为沥青质、胶质、芳香分和饱和分,典型四组分分子模型如图2所示。

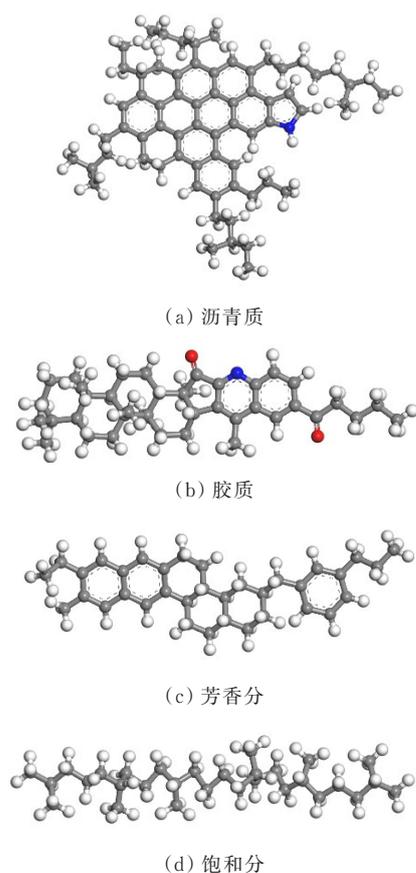


图2 沥青四组分分子模型示意图^[2]

Figure 2 Four-component molecular model of asphalt^[2]

沥青材料对温度的敏感性大,在夏季高温条件下易发生车辙病害,在冬季低温条件下易发生开裂破坏。因此,建立沥青组分与沥青宏观性能的关系成为众多学者的研究热点。Sultana等^[3]通过分离沥青的SARA组分,将不同组分按照设定的比例回掺

入基质沥青中制备成新的衍生沥青,经过不同流变学方法分析后发现,胶质与沥青质等极性组分含量与沥青硬度和复数模量成正比,极性组分的增加会引起沥青从溶胶型结构向凝胶型结构转化,从而改善了沥青的高温流变特性;陈华鑫等^[4]采用灰色关联分析方法,计算沥青组分与沥青性能的关联系数,发现胶质和芳香分分别对沥青的高温性能和低温性能有较大影响,而沥青质主要影响沥青老化前后黏度变化。研究发现,沥青质含量与沥青的高温流变特性成正比,与沥青的低温蠕变特性成反比,而芳香分可以显著改善沥青的低温性能。沥青组分对沥青性能的影响如图3所示,在实际使用过程中,可以通过调节沥青组分的占比使沥青适应不同环境状况。对沥青细微观的研究主要包括沥青的分子组成和细微观结构特征。沥青的分子组成直接影响沥青性质。杨震等^[5]采用元素分析法和凝胶渗透色谱从元素组成、分子结构以及相对分子量等多方面分析沥青老化前后的变化,研究发现,经过长期老化后,沥青内部元素组成和分子结构的变化能够提高沥青的温度稳定性,相对分子质量的变化提高了沥青的使用性能。对于沥青微观结构的研究,在1996年首次引入原子力显微镜AFM,研究者们通过AFM对沥青微观结构组成开展了大量研究,发现沥青表面呈现不同结构类型,包括蜂状结构、扁豆状结构、片状结构等,其中蜂状结构最为普遍;王鹏等^[6]利用分子模拟技术对沥青蜂状结构的成因展开研究,发现沥青的化学组成影响沥青蜂状结构的尺寸与高度,同时蜂状结构的分布受沥青质、硫化物等的影响;Veytskin等^[7]通过纳米压痕试验结果计算得到沥青模量主曲线,并与DSR测得的主曲线进行对比,证明AFM测试的微观流变性能可以反映沥青的宏观流变特性;Gong等^[8]采用AFM测得的黏附力研究了沥青与石料间的黏附性和自愈性。沥青的化学组分和细微观结构特征对沥青性能产生不同的影响,建立化学组分和细微观结构特征的联系,是研究沥青性能的关键问题。可以通过调整沥青四组分的含量改善沥青特定的性能,进而满足不同工程对沥青材料性能的要求。

集料种类丰富多样,从宏观角度看,不同集料的矿物成分与沥青的相互作用能力不同,导致沥青混合料在性能方面差异较大。从集料矿物组成方面研究集料与沥青之间的搭配是提高沥青混合料性能的关键。谭巍等^[9]分析了不同集料化学成分(SiO_2 、

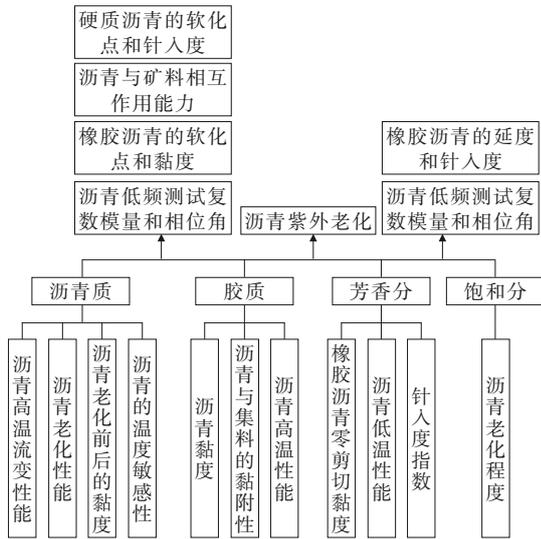
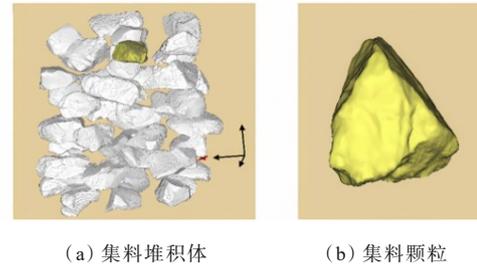


图3 沥青四组分对沥青性能的影响

Figure 3 Effect of four components of asphalt on asphalt properties

CaO、Al₂O₃、MgO、Fe₂O₃)对沥青高温性能的影响,结果显示,在65℃条件下,参加MgO后,车辙因子相较于未掺情况下提高4.5倍,参加SiO₂或CaO后,车辙因子相较于未掺情况下提高3倍;程永春等^[10]根据灰色关联度算法计算了矿料含量与沥青混合料力学性能的关联度,发现沥青混合料的松弛强度主要受细集料含量变化的影响,而松弛时间主要受较大粒径矿料的含量变化的影响;吴国雄等^[11]分析了粗集料分布形态对沥青混合料疲劳性能的影响,结果表明:粗集料接触对数量的增加在一定程度上可以改善沥青混合料的抗疲劳性能。从细微观方面来看,集料的表面纹理和粗糙度主要影响沥青与集料之间的黏附性和路面的抗滑性能;熊政勇等^[12]采用长细比指标评价粗集料颗粒形状对沥青混合料性能的影响,结果表明:粗集料长细比与沥青混合料性能呈负相关;袁峻等^[13]探究了粗集料形态特征对沥青混合料高温性能的影响,发现粗集料长宽比和偏心率越低,沥青混合料的高温抗剪强度越高;王凤等^[14]综述了集料形态特征对沥青混合料性能影响规律,总结分析了集料宏观形状、细观棱角和微观纹理参数对沥青混合料性能的影响,发现集料形状越接近立方体,混合料的抗车辙能力越强,其高温稳定性越好。集料的形貌特征影响集料与沥青黏结性能,进而影响沥青路面的抗滑性能;Wang等^[15]利用AIMS图像处理技术,得到了不同类型集料的棱角性、球度和表面纹理特征信息,进而研究Deval磨损试验过程中集料形貌特征演变过程,并建立集料形貌与其性能的联

系;唐伯明等^[16]采用动态颗粒图像分析技术提取集料球形度和粗糙度,并用于表征集料棱角特性,结果表明:再生沥青混合料高温稳定性与集料棱角性呈线性相关。如图4所示,研究集料形貌和纹理主要通过图像技术、CT和三维光学扫描仪等方法。



(a) 集料堆积体

(b) 集料颗粒

图4 工业CT获取集料颗粒信息^[2]Figure 4 Industrial CT to obtain aggregate particle information^[2]

从混合料结构上看,沥青化学组成与集料矿物组成之间的关系也会影响沥青混合料的性能,优质的沥青与优质的集料搭配不一定能够呈现出优质的沥青混合料。因此,建立沥青分子组成与集料矿物组成的联系,能够从结构组成方面优化沥青混合料的性能。Cui等^[17]通过剥离试验分析了不同岩性集料与沥青的黏附性,研究发现,在浸水条件下酸性集料(花岗岩)比碱性集料(石灰岩、大理石)黏附性损失更大;Yin等^[18]采用X射线衍射仪(XRD)分析了石灰岩和花岗岩骨料的主要化学成分,通过动态剪切流变仪(DSR)和X射线光电子能谱(XPS)检测发现,石灰石骨料与沥青的界面黏结强度高于花岗岩骨料与沥青的;郭猛^[19]通过分子模拟研究了集料中各晶体对界面吸附扩散行为的影响,发现沥青各组分在Al₂O₃表面的扩散速度最快,在CaO表面温度敏感性最大。以沥青和集料自身性能作为基础,开展沥青与集料界面状态的研究,从材料与材料的结构两方面提升沥青混合料的性能。

除了从宏观和微观角度研究路面材料的性质,近几年的研究更集中在多功能路面材料的研究,包括自愈合材料、自监测材料、降噪材料等。通过多尺度分析方法,可以更全面地了解路面材料的性能、结构和行为,为沥青路面的设计、施工和维护提供科学依据。多尺度分析有助于深入挖掘路面材料的特性,优化其配方,提高路面的耐久性和可持续性。

1.2 材料基因组发展现状

2011年,美国总统奥巴马提出了“材料基因组计划”(Materials Genome Initiative, MGI),其目的是通

过材料模拟计算、高通量试验和数据挖掘加速材料从发现到应用^[20]。奥巴马明确指出材料基因组计划的总目标是“将先进材料的发现、开发、制造和使用的速度提高1倍”。MGI的具体措施包括:①发展计算工具和方法,降低耗时耗资的试验量,加快对材料的筛选和设计;②发展高通量材料试验工具,对候选材料进行筛选和验证。快速、准确地取得材料计算所需要的关键数据;③补充和完善材料数据库内容,实现材料从发现到应用的完整数据链^[21]。材料基因组类比人类基因组,人类基因组中的DNA和RNA排列的不同决定人体主要性状的不同;将人类基因组的思想应用到材料中,即材料内分子组成和结构特征决定了材料性质的不同。人类基因组计划是为了将DNA和RNA的排序与人体性状建立联系,与此类比,材料基因组计划就是为了将材料从结构特征到表面特性与使用寿命建立联系。

将材料基因组思想应用到路面材料中,沥青混合料主要由沥青和集料组成,沥青和集料就类似于人体躯干,探究沥青和集料的“基因”是形成路面材料基因组的首要问题,如图5所示。沥青与集料之间的相互作用是影响路面材料性能的次要问题,性能好的沥青与集料结合不一定能够获得最佳路面材料,各材料之间的相互作用对材料性能影响的“基因”仍需要探究。此外,多功能材料和高性能路面材料也是近几年的研究热点,根据不同地区环境差异对路面性能的要求,应选择相应的功能材料。因此,将材料基因组思想应用到路面材料中所形成的材料基因库,包括沥青基因、集料基因、沥青与集料之间的结构基因及多功能与高性能材料基因。



图5 路面材料基因库计划内容

Figure 5 Elements of pavement materials genome program

沥青材料对沥青混合料的影响,包括沥青组分、分子组成和微观结构特征。在沥青材料的多尺度分析的发展中,通过大量试验发现,沥青质含量的增加能提升沥青的高温性能和抗老化性能,芳香分含量增加能够改善沥青的低温性能。在沥青基因层面,

使用各组分含量作为关键基因代表,在需要面临高温情况下筛选沥青质含量较高的沥青,在需要面临低温情况时筛选芳香分含量较高的沥青。在沥青混合料中,集料的棱角性越丰富,集料表面越粗糙,沥青混合料的高温稳定性就越好。谢兆星等^[22]以针片状颗粒为研究对象,分析了针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响,结果表明:随着针片状颗粒含量的增大,沥青混合料的孔隙率增大,其水稳定性、高温稳定性和疲劳性能均降低;袁峻等^[13]探究了粗集料形态特征对沥青混合料高温性能的影响,发现粗集料长宽比和偏心率越低,沥青混合料的高温抗剪强度就越高。因此,在集料基因层面,使用集料的棱角性、粗糙度作为关键基因代表。想要提高沥青路面的使用寿命,在选取材料时应该选择棱角丰富、粗糙度高的集料。此外,沥青混合料中的孔隙分布反映其结构特征,可作为结构基因因为沥青与集料的搭配提供选择;谭忆秋等^[23]利用正交试验和方差分析方法,确定了工业CT扫描沥青混合料微观结构的最佳采集参数,从而获取沥青混合料中孔隙的分布状态,同时建立了孔隙空间分布与颗粒级配之间的关系;徐慧宁等^[24]利用X-Ray CT技术和图像处理方法,对沥青混合料的三维空隙结构进行研究,发现级配类型在很大程度上影响空隙的形态结构,并提出了利用垂面内方向角和相邻垂面夹角来描述空隙骨架特征,以及利用圆度和丰度评估空隙截面特征的指标。建立材料基因库,就是采用材料的标志性功能作为代表录入数据库。将材料基因库技术应用到路面中,是将路面材料汇总为一个整体,不仅建立了各路面材料间的联系,还加速了新路面材料的研发与设计。

1.3 分子动力学模拟发展现状

分子动力学模拟从材料颗粒的微观角度出发,通过建立它们的分子结构模型,模拟路面材料中原子或分子的运动行为和相互作用。如图6所示,应用分子动力学模拟等数字方法对路面材料进行仿真,进行混合料力学行为研究及混合料优化,主要目的是建立材料配合比的智能设计方法。分子动力学模拟作为计算方法,将互联网技术与路面建立联系,从而预测材料性能并降低试验成本。目前,分子动力学模拟在沥青混合料中的应用研究主要包括沥青的扩散机理、改性剂与沥青的相互作用以及沥青与集料的界面行为等方面。

通过建立沥青分子模型,Sultana等^[3]采用动态剪

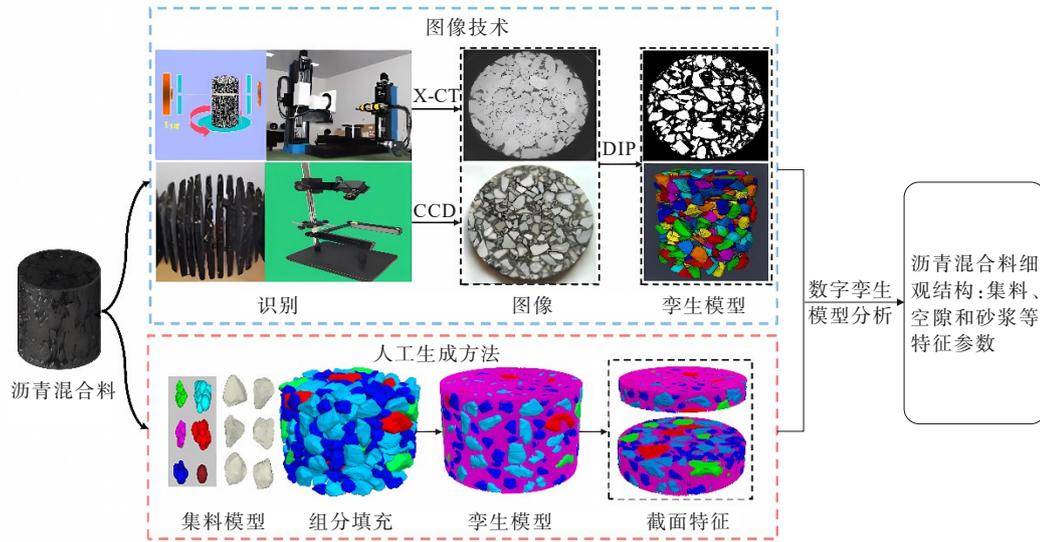


图6 沥青混合料微观结构的数字化提取与孪生模型^[25]

Figure 6 Digitized extraction and twin model of microscopic structure of asphalt mixture^[25]

切流变仪和拉压机测量了沥青结合料的动态剪切模量和拉伸强度,同时采用分子动力学模拟了沥青结合料的微观特性,发现沥青结合料的刚度和抗拉强度与树脂和沥青质的含量成正比关系。在研究SBS改性沥青与沥青之间的相溶机理时,丛玉凤等^[26]利用分子模拟技术,模拟数据的结论与前期试验结果完全吻合,证明了分子动力学模拟的合理性。此外,分子模拟还可用于研究改性剂对沥青抗老化性能的影响。崔亚楠等^[27]采用复合再生剂-老化沥青扩散体系的COMPASS II力场进行了基质沥青复合老化情况下的再生剂扩散研究,模拟结果与试验结果相近,验证了分子动力学用于研究再生剂-老化沥青扩散机理的可靠性和准确性;胡栋梁等^[28]通过使用AIMD模拟和DFT计算研究沥青热老化及紫外老化的原子机理,ATR-GFTIR测试表明紫外老化沥青试样中羰基峰的强度明显高于TFOT和PAV老化沥青试样,进一步验证了理论计算结果。集料模型一般由氧化物晶胞代替反应集料的特性,郭猛^[19]采用分子动力学模拟比较集料中5种代表性晶体对界面的吸附扩散作用,结果表明:沥青各组分在氧化铝表面扩散最快,沥青各组分扩散系数在氧化钙表面较敏感;Luo等^[29]建立了沥青与氧化铝晶胞的界面模型,利用分子动力学模拟研究沥青组分在氧化铝表面的扩散,根据分子质量排序,沥青组分的扩散速率为饱和分>芳香分>胶质>沥青质;Liu等^[30]建立了沥青-钢渣界面模型,利用分子动力学模拟测量沥青和钢渣的相互作用,研究发现沥青和矿物之间抵抗

水侵蚀的界面强度与骨料的化学成分相关,集料模型见图7^[31]。利用分子模拟技术模拟沥青与集料之间的黏附界面结构,模拟它们在不同温度、压力和湿度条件下的相互作用和黏附行为;Huang等^[32]建立了沥青-骨料界面模型,基于分子取向理论分析了沥青在集料表面的扩散规律,发现沥青与集料黏结的根本原因是沥青与集料的极性,沥青质和胶质包含沥青的极性部分,因此它们与集料接触有较好的黏附性;Xu等^[33]研究了沥青与集料之间的黏附机理,模拟推导不同环境下沥青与集料之间的黏附功,发现沥

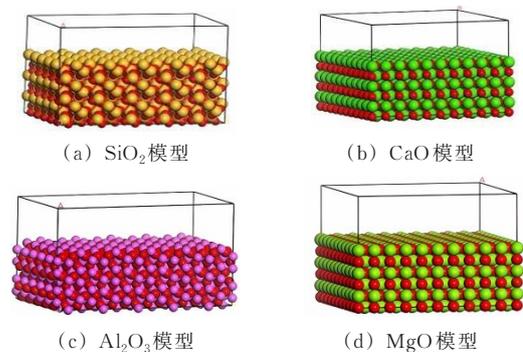


图7 集料模型^[31]

Figure 7 Aggregate model^[31]

青与集料之间的黏合力主要由不同环境条件下的集料矿物决定;赵胜前等^[34]对沥青与集料之间的黏附性能的发展情况进行了总结,采用分子动力学模拟沥青-集料的黏附性发现,当黏附功值为负值时,沥青与集料之间存在吸引力,当剥落功值为负值说明

水分存在条件下沥青与集料之间的脱黏过程是自发的。分子动力学方法可以建立沥青混合料模型并对沥青与集料的界面行为进行初步的动力学分析,但分子动力学模拟在沥青混合料中的应用较为片面,应结合其他模拟计算方法从多尺度方面研究沥青混合料的整体性能。

1.4 道路材料智能设计的发展与展望

路面材料设计智能化是指在路面设计最初阶段,考虑该地区路面所面临的环境因素、荷载因素以及极限状态下应满足的要求,通过在材料基因库中筛选出目标材料并计算出合理配合比,利用分子动力学模拟等计算方法,建立目标沥青混合料模型并预测其性能,最终完成路面在材料方面的设计。材料基因组技术思想在沥青路面材料研发中应用的主要内容包括:确定沥青混合料基因特征参数、建立沥青混合料数字化数据库、建立沥青混合料数字化性能预测平台,最终实现沥青混合料智能化按需设计平台的建立。因此,不论是多尺度分析,还是分子动力学模拟方法,在沥青混合料中的应用都是为了形成沥青混合料基因组做铺垫。表1比较了以上3种方法的优点和局限性。分子动力学模拟和多尺度分析综合考虑了不同尺度的信息,全面理解材料的性能,而高模量计算和材料基因组能够通过试验数据快速筛选材料。由于分子动力学模拟能够模拟材料在不同条件下的变化,它逐渐成为沥青材料智能设计的常用方法,但分子动力学模拟的计算成本高、需要大量资源,可能会限制其广泛使用。因此,开发更高效的设计方法和标准化材料基因库是实现材料智能化设计的突破点。

表1 材料设计方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of material design methods

设计方法	优点	缺点
多尺度分析	能够考虑材料的多层次特性	计算复杂度高
材料基因组技术	能够快速筛选大量材料	高通量试验成本较高
分子动力学模拟	能够模拟材料在不同条件下的变化	模拟结果依赖于模型的准确性

实现路面材料智能化设计需要通过合理的试验数据、高效的计算方法和建立数据库平台。然而,路面材料作为一种多尺度混合料,其设计都是通过反复试验、比较得到的相对较优的结果,新材料的开发很难从经验性、试错式、反复迭代的试验方法中脱颖

而出,传统的试验方法只能使材料得到局部优化,很难获得全域最优方案,此外,路面材料使用量大进一步增大了实现长寿命、高韧性、高效益、低成本的难度。想要实现材料设计智能化,需要做好以下几点:①寻求能够适应复杂物理场工作环境的高性能材料,例如聚合物改性路面材料、透水路面材料等;②研发能显著提升公路基础设施使用寿命与工程韧性的工程材料,例如再生材料、碳纤维增强聚合物等;③开发各种新型的可再生或人工合成的工程材料;例如纳米材料、可再生能源材料等;④研发可保障极端环境下公路基础设施安全运行的功能性材料,例如降噪路面材料、温控路面材料、光伏路面材料等。在未来一段时间内,开发与建设具有多相、多组分、多尺度混合料特征的公路工程材料基因库;研究多因素作用下多尺度混合料行为特征数字孪生及其算据、算法;建立多因素作用下多相、多组分、多尺度混合料行为特征的数字模型;利用相应模型算法开发专用软件,进行工程材料的优化与智能设计等相关方向将是材料设计理论与方法智能化发展的研究热点。

2 结构设计与施工监控智能化发展现状

2.1 公路基础设施结构设计的智能化发展现状

路面结构设计智能化是指利用先进的互联网技术、计算机技术以及智能计算方法对路面的结构设计进行优化和智能化改造的过程。路面结构实现智能化设计,可以提高路面设计效率和准确性,降低工程成本和延长路面使用寿命等。公路基础设施结构设计的智能化起步于CAD技术。CAD技术(计算机辅助设计,Computer-Aided Design)将传统的手工绘图设计过程数字化,通过计算机软件完成路面结构设计、绘图、模拟等工作,大大促进了工程设计的创新与发展。路面结构在进行设计时需要考虑承载能力、耐久性、安全和舒适性等,而CAD技术更多是在路面层厚度、路面纵横断面设计以及三维建模与仿真方面发挥作用。

图8展示了路面中CAD技术的发展历程。1964年,美国通用汽车公司推出第一个机械CAD系统,主要以二维线框建模为主,但便携性差且成本高。至20世纪70年代,以线框模型发展为实体模型的计算机辅助系统大量出现,如AutoCAD、Pro/E,这些系统具有建模、有限元分析等功能。20世纪90年代末,

随着互联网的发展,Web功能在CAD中得到应用,如内置Web的AutoCAD2000i,可以进行远程协助和多用户分享。近十年,随着人工智能技术发展,CAD技术趋于智能化,如2010年发布的Creo,实现了智能集成化、设计分析一体化等功能。在拓扑优化的基础上,CAD技术从平面图形设计发展为复杂结构构形设计,但工程服役环境越来越恶劣,结构越来越复杂,结构设计的力学模型相对简单,理论与实际偏差较大,设计精度偏低,因此对结构长期服役性能的深入研究以及延长结构的设计寿命成为众多学者的研究热点。

设计新型路面结构通常采用软件模拟进行验证。蒋鑫等^[35]评析了对沥青路面结构力学分析的4款典型专业软件,包括基于弹性层状体系理论研发的BISAR、基于轴对称有限元法研发的MICHPAVE、基于三维有限元法研发的Ever-Stress FE、基于三维连续体有限层法研发的3D-MoveAnalysis。BISAR最多可以考虑10层结构层,除土基外,各结构层可单独指定厚度,层间可设定为完全连续或者部分连续,各结构层均视为线弹性体,需要输入弹性模量、泊松比。MICHPAVE最多可考虑6层结构层,其中沥青面层只能看作线弹性体,视各结构层之间完全连续,不能考虑层间部分连续,土基厚度推荐取15~30 cm。EverStress FE软件最多可考虑4层结构层,每层均视为线弹性体,需要设定各层厚度、弹性模量和泊松比,其中最下一层土基的厚度宜通过一定的试算确定,以尽量避免边界条件的影响。3D-MoveAnalysis最多可考虑10层结构层,每层均视为线弹性体,各层需设定厚度、弹性模量、

泊松比和材料重度。直接视各结构层之间完全连续,不能考虑层间部分连续情况。

CAD技术有助于精确计算路面结构的各种参数,从而有效预测和分析路面结构的性能表现。在考虑车-路相互作用的情况下,Patil等^[36]基于有限元法提出了刚性路面的改进算法,发现计算结果与实测结果相吻合,认为此算法可以用来预测临界速度和相应的最大弯沉;孔令云等^[37]利用有限元软件,开发了模拟复合式路面疲劳裂纹扩展过程的子程序,以现场试验路面结构为例计算复合路面疲劳裂纹扩展寿命,计算结果与路面实际疲劳寿命较接近。在使用过程中,路面承受车辆荷载,通过模拟路面结构的动态响应,可以获得路面结构和材料组合的性能数据,从而优化设计以延长使用寿命并提高抗荷载能力;Cao等^[38]建立了三维车-路耦合模型来模拟路面的动态响应,结果表明:随着车速增加,动态弯沉大于静态弯沉。由于路面结构复杂程度较高,仅考虑各结构层材料各向同性特征已无法满足实际路面情况;Zhan等^[39]发现将地基土考虑为各向同性所得出的计算值小于实际动变形,造成结构安全性降低,采用横观各向同性理论,建立路基路面结构模型,预测路面结构性能更符合实际情况;颜可珍等^[40]认为将结构层材料考虑为各向同性,明显低估了路面结构永久变形及疲劳开裂等危害,在路面结构设计时应将结构层材料横观各向同性特征考虑在内;李霖等^[41]建立沥青路面结构三维有限元模型分析半刚性沥青路面结构的各项力学响应量,发现级配碎石层的设立可以明显减小沥青路面结构半刚性基层层底

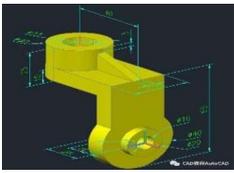
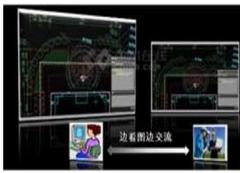
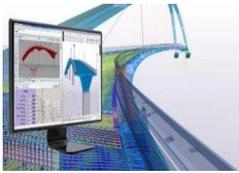
理论方法	计算机图形学、交互技术等	二维实体模型理论、参数化建模等	协同设计理论、数据库技术	智能集成化、设计分析一体化方法
特点	二维线框建模为主,便携性差、成本高	线框模型发展为实体模型、参数化等	远程协作、多用户分享	智能化和自动化设计
典型事件	 <p>Sketch pad绘图 1964年,美国通用汽车公司推出第一个机械CAD系统</p>	 <p>实体建模 计算机辅助系统大量出现,如AutoCAD、Pro/E,具有建模、有限元分析功能</p>	 <p>用户共享 随着互联网的发展,Web功能在CAD中得到应用,如内置Web的AutoCAD2000i</p>	 <p>智能设计 随着人工智能技术发展,CAD技术趋于智能化,如2010年发布的Cero</p>
时间	20世纪50年代至60年代	20世纪70年代至90年代	20世纪90年代末至21世纪初	近十年

图8 路面中CAD技术的发展历程

Figure 8 Development of CAD technology in pavement construction

拉应力和路基顶面压应变指标;马翔宇等^[42]建立沥青路面结构有限元模型,分析铺设在沥青面层和水泥混凝土之间的应力吸收层对路面的影响,研究发现应力吸收层厚度的增加可以降低路面结构整体的最大剪应力;任俊达等^[43]利用有限元软件分析路面结构在不同加载位置下的力学响应,发现沥青层、中面层和下面层是车辙常发生的部位,在结构设计时需要重点考虑;马立杰等^[44]利用有限元软件分析沥青路面结构层厚度对车辙变形的影响,车辙变形云图见图9,得出最佳结构层厚度组合为:上面层60 mm、中面层60 mm、下面层80 mm、水泥稳定碎石基层300 mm。

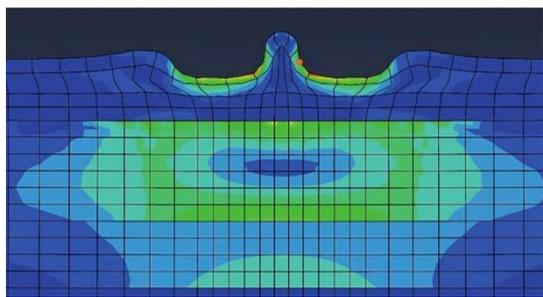


图9 有限元模拟车辙变形云图^[44]

Figure 9 Rutting deformation cloud map by finite element simulation^[44]

此外,由于路面结构受温度影响较大,众多学者利用有限元模拟分析路面结构受温度影响的演变规律。基于甘肃地区路面常发生横向裂缝,郭寅川等^[45]借助有限元软件建立相应路面结构模型,通过施加气温和太阳辐射,发现随着沥青面层厚度的增加,沥青层顶和层底的温度差越大,沥青层温度分布梯度就越小;基于广西地区气候特征,付宏渊等^[46]通过有限元软件计算了不同路面结构的温度梯度分布和车辙深度,发现沥青路面中面层是发生车辙的主要层,需要合理进行路面结构设计,以避免产生严重病害。综上所述,通过有限元软件可以模拟不同荷载和环境条件下各结构层的应力、应变和变形情况,对不同材料、厚度、层次结构等进行优化,以达到最优的性能和成本平衡。

由于工程环境恶劣造成结构越来越复杂,结构设计的力学模型相对简单,无法全面地评估路面结构实际响应。且对结构长期服役性能的演变缺乏深入系统的研究,不能准确地预估结构性能的演变趋势,难以显著延长结构的设计寿命。因此,对于公路工程结构智能化设计的发展方向,应做以下工作:首

先,开展全面深入的公路基础设施长期性能研究,才能更加深刻地认识公路工程结构性能的时空衍化规律;其次,要用更加精准的理论描述其行为特征,才可能应用数字孪生技术更加精确地预测其全寿命周期的性能演变规律;总之就是要优化重构其设计理论、力学模型、模型参数、计算方法和设计方法,并开发相应的计算机件。

2.2 公路基础设施施工监控的智能化

施工监控是指在施工过程中监控结构受力、变形及稳定,使施工中结构状态处于最优状态,保证施工过程安全和结构状态符合设计规范要求。传统的路面施工监控方法依赖于人工检测和经验判断,存在效率低、精度差、实时性不足等问题,难以满足现代交通运输系统对高质量、高效率施工的要求。智能化监控技术能够实时、准确地监测路面施工过程中的各种参数,及时发现和预防施工中的潜在问题,提高施工质量和效率。施工监控的智能化是智能建造的重要内容,施工控制的发展历程如图10所示,早在20世纪50年代,德国研究人员就提出了施工控制的概念。1982年,中国研究者首次将现代控制理论应用于桥梁施工控制,21世纪初,中国研究者开始出现自主设计的施工控制软件,现有的施工监控技术已广泛应用于路基路面、桥梁、隧道工程的建造。从发展历程来看,一是计算方法、计算软件的进步;二是数据采集、传输、处理等信息化、可视化与智能化方面的进步;三是定位精度方面的进步。

以往的施工方式,施工人员在施工过程中需要实时检查路面整体的施工质量,耗费了大量的人力物资。路面智能监控系统通过温度、振动传感器对路面施工进行实时监测,能够及时发现各施工阶段出现的问题,大幅提升施工作业水平。路面施工流程包括混合料拌和、运输、摊铺和压实4部分,相对应的智能施工监控系统包括混合料拌和监控系统、装车运输监控系统、摊铺和碾压监控系统^[47]。

智能施工监控系统如图11所示^[48],混合料拌和监控系统通过搭载在拌和站计算机的工控机对拌和料质量进行实时监测,利用温度传感器严格控制混合料的拌和温度,将接收到的数据通过软件分析得出油石比等指标参数,若指标参数不符合预定数值,软件能够及时通知管理员进行修正,从而保证混合料的施工质量。装料运输监控系统需要保证沥青混合料按“五部装料法”装车,实时记录出料、卸料时间、运输路线以及摊铺所在桩号。摊铺和碾压监控

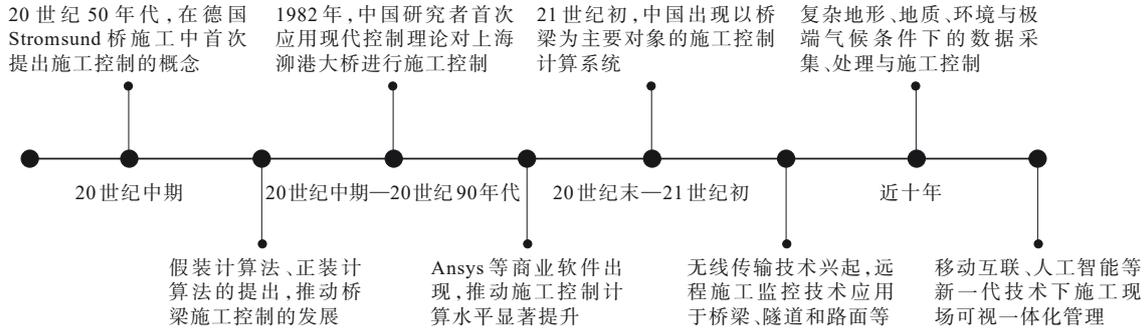


图 10 施工控制的发展历程

Figure 10 Development of construction monitoring

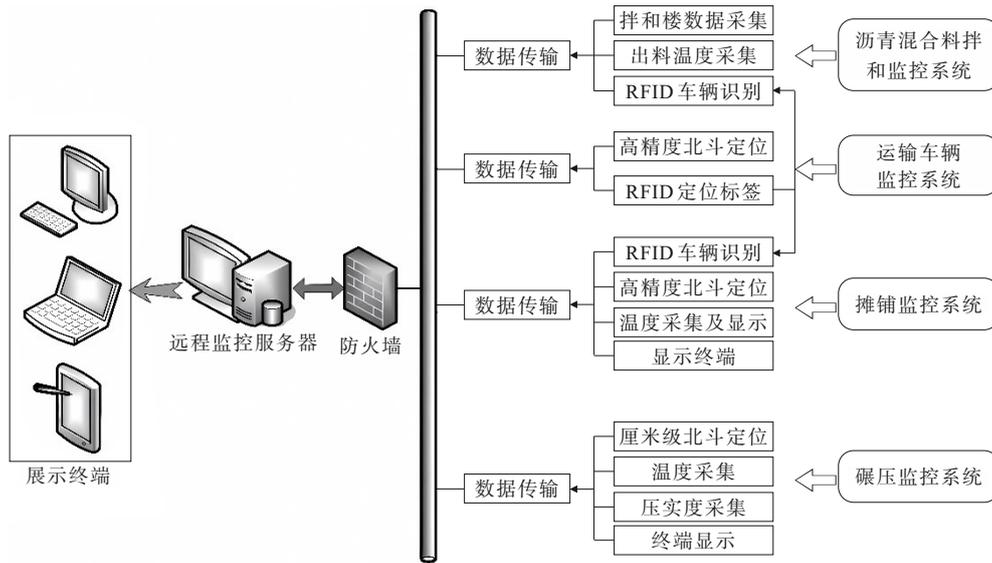


图 11 智能施工监控系统架构^[48]

Figure 11 Intelligent construction monitoring system architecture^[48]

系统分别采用了摊铺机运行监测和压路机碾压检测,在摊铺过程中实时监测温度、湿度、厚度等,在压实过程中收集碾压数据,最终将软件分析后的数据传输给施工管理人员。施工现场数据采集的准备工作包括基准站搭建、拌和站温度传感器安装、运输车GPS安装、摊铺机温度传感器安装和压路机振动传感器安装。Ma等^[49]结合数字化监测指标和路面使用性能指标,建立了全过程、全方位的数字化施工质量评价模型,该模型能够准确反映路面的施工质量,同时提出了一种能够准确反映路面质量的定量指标;Zhu等^[50]开发了一种沥青路面监控系统,该系统主要用于监控热拌沥青混合料的生产、压实和摊铺过程。它能够自动收集和传输数据,并将信息反馈给施工现场,从而实现对沥青路面施工质量的实时监控,这一监测系统方法有效地提升了沥青路面施工的质量;张宗兵等^[51]指出可以将施工采集的数据

分为一级指标和二级指标,其中一级指标是指传感器直接采集到的数据信息,如混合料拌和温度、摊铺温度等,二级指标是指通过一级指标计算得到的,如油石比、级配曲线等;方磊等^[52]提出了利用图形化界面展现沥青路面的摊铺碾压过程,压路机碾压过程包括初压、复压、终压3个阶段,分别采用不同颜色反映路面的碾压遍数,直观反映不同路段的碾压情况,有效避免了欠压、过压等情况的发生;周家祥^[53]认为智能压实监控系统虽然能够提高施工效率、节约成本,但是高速公路沥青路面施工位置都比较偏僻,GPS定位精度受到地形条件和气候条件的干扰,将会影响数据的连续性和准确性;吴炳堂^[54]设计了一套基于GPS定位和无线通信技术的智能压实监控系统,通过实例验证发现该系统可以有效控制施工速度和温度,使路面压实度高于设计指标,减少了非必要成本。

材料质量的不均匀性、感知系统的滞后性以及服役过程中环境变化导致结构性能变化的不可预见性都是路面智能施工控制所面临的难题。此外,随着工程的长大化、深海深地化等,桥梁、隧道拼接对空间位置的感知与控制精度要求越来越高,提高公路基础设施施工过程中的定位精度和性能检测精度刻不容缓。在未来一段时间里,应用高分辨率遥感航测技术,开发非接触性、高精度远程感知和定位技术;研发施工装备机载的智能检测、预警预报与智能调控技术;发展工厂化预制、智能化安装、数字化管理技术;建设智慧工地,从招投标开始,从进料、试验、备料、加工、施工等全过程对设计、施工、监理、试运行全过程可视化监管等相关方向将是公路基础设施施工控制与管理智能化的研究热点。

2.3 结构设计与施工一体化管理的BIM技术

建筑信息模型(BIM技术)就是利用数字技术存储、传递建筑结构和构造特征,并以3D模式直观表述,来实现工程设计、施工、养护、运营管理信息的传递、共享和协同工作。2002年Autodesk公司推出BIM软件,2003年中国引进BIM技术,并快速发展,陆续制定了系列BIM标准规范。目前中国已成为全球最大BIM服务市场,BIM技术也逐步从智慧工地和效果全景展示向全寿命周期集成应用发展。BIM技术为公路基础设施提供了一个实现信息化运营管理的平台。随着互联网技术的快速发展,BIM技术可与GIS、传感器监测技术、数据计算、激光扫描等结合,搭建道路设计、施工、养护以及维修的数字化整体,如图12所示,使路面结构建设的整个过程可视化。



图12 智慧施工管理平台^[55]

Figure 12 Intelligent construction management platform^[55]

Biancardo等^[55]介绍了BIM技术与软件结合的使用,可以通过程序建模软件实现道路基础设施结构的3D可视化,建立智慧施工管理平台,并通过BIM查看器评估BIM软件工具的互通能力;林江伟^[56]指

出采用BIM技术进行道路可视化仿真分为创建数字地形模型(DSM)、建立线性控制、创建路面三维模型、软件合并数字地形模型和路面三维模型等阶段,其中将路面三维模型和DSM导入到Navisworks中是BIM技术的应用场景;耿晓燕^[57]说明了BIM技术中需要建立的模型包括地形模型、路基路面模型、路线设计模型以及道路施工过程模型,通过BIM软件使项目人员进入到虚拟的路面建设全过程情境;彭欣等^[58]提出了一套适用于道路三维数字化的BIM正向设计流程方法,此方法在多条高速公路设计中取得了优异的效果和反响。路面结构设计是创建模型的准备工作,结构设计参数需要用于实现路面表层设计、基层设计以及中心预留设计的参数化建模;Vignali等^[59]认为I-BIM(基础设施建筑信息模型)的技术组件将建造物可视化可以识别潜在的设计、施工或管理问题,使路面结构设计、施工达到理想效果。此外,安装在I-BIM中的计算插件可以直接进行项目成本评估,减少了人为评估的工作量;雒泽华等^[60]在Dynamo中进行路面结构参数化设计,建立了路面结构参数化模型,如图13所示。根据不同路面结构设计参数计算路面永久变形,实现路面结构参数化建模和同步永久变形验算,解决了传统路面设计和结构分析相互孤立的问题。

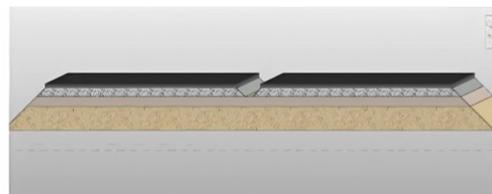


图13 路面结构参数输入与参数化模型建立^[60]

Figure 13 Input of pavement structure parameters and establishment of parameterized model^[60]

其次,BIM技术在路面施工中的应用是建立路面施工管理监控系统的关键。利用BIM技术创建路面施工的三维模型,将路面施工方案、施工进度和施工现场可视化,便于相关人员提前发现施工过程中的潜在问题,从而实现对路面施工全过程的精细化管理与控制。Zhao等^[61]通过试验确定沥青路面抗车辙主要施工管理指标,并提出采用BIM技术实时监测这些指标以评价路面施工质量;刘可欣等^[62]基于Navisworks开发了沥青路面施工的动画,展示了各个施工阶段的动态过程和细节;王正等^[63]将BIM模型分布到各施工机械数字化系统的数据库中,施工机

械在施工过程中可以实时获取作业部位的姿态和坐标,从而实现基于BIM的数字化全过程控制施工作业自动化。综上所述,BIM技术通过三维建模和可视化技术不仅可以优化路面结构设计,还可以实现路面施工全过程监测,使路面建设质量无限接近于理想状态。

路面结构施工一体化流程图如图14所示。

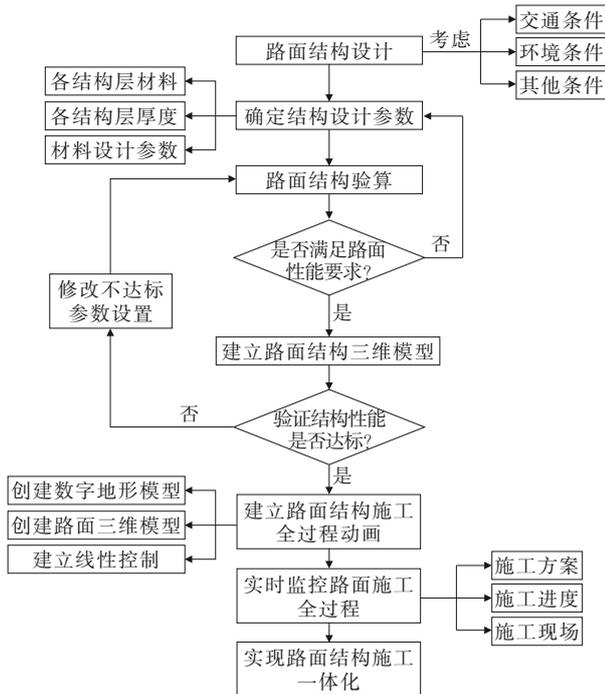


图14 路面结构施工一体化流程图

Figure 14 Flowchart for integration of pavement structural construction

由图14可知:在实际施工之前,通过BIM技术可以进行虚拟模拟路面结构,考虑该路面地区周围的环境、气候、荷载等因素,调整结构设计参数,优化结构设计方案;进行施工时,利用BIM技术可以对施工现场进行实时监控,结合物联网技术,将施工设备和传感器的数据实时反馈到BIM平台,实现智能化的施工监测;施工完成后,BIM模型可以用于路面后期的运维管理,通过对模型数据的分析进行路面结构的维护和管理。目前,BIM技术在路面工程中的应用尚未形成完整的行业标准,不同软件和平台之间的数据格式不统一导致数据共享困难,且不同BIM软件之间的兼容性问题会导致数据共享失败;缺乏相关专业人才,引入BIM技术成本较高;协同管理设计、施工以及监理等方面存在难度。因此,制定BIM技术在路面工程中的数据标准与规范,保证不同软

件和平台之间的数据格式一致;提升不同BIM软件之间的数据兼容性,实现BIM技术与其他管理软件的无缝集成;加强路面工程与建筑、桥梁等领域的跨行业交流与合作,分享BIM技术应用经验和最佳实践等将会是未来的研究热点。

3 公路基础设施健康监测与运维养护的智能化

随着公路网的大规模建设和应用,道路工程的运维养护越来越重要。路面的检测与养护是延长路面使用寿命任务中最有效的手段,传统的人工检测路面病害耗时且效率低,而无损检测方法效率高、准确性高,已经广泛应用于公路基础设施的健康监测与运维养护。通过从不同层面对路面进行检测,并将这些信息运送至数据收集站进行处理,使负责人及时采取合理的维修养护措施,进而延长路面的使用寿命。本节对路面健康监测与运维养护的智能化发展情况进行总结。

3.1 公路基础设施健康监测技术的智能化

公路基础设施健康监测技术的智能化是指利用现场的、无损的、实时的方式感知、采集结构的输入与响应信息,分析结构性能的劣化或损伤特征及其演化规律,并为管理和养护提供决策支持的技术。健康监测的概念也是起源于机械工程领域,20世纪80年代才逐步应用推广于路桥隧等公路基础设施领域,目前已发展为基于“天-空-地”立体感知系统的路桥隧及边坡等公路基础设施安全运维的保障技术。

道路领域健康监测技术的智能化起步较晚,如今对健康监测技术的智能化发展研究主要集中于将新型传感器埋设于路面结构内,对路面结构受力状态实时监测。如图15所示,目前在路面中使用的传感器分别有应变传感器、温度传感器、位移传感器等。

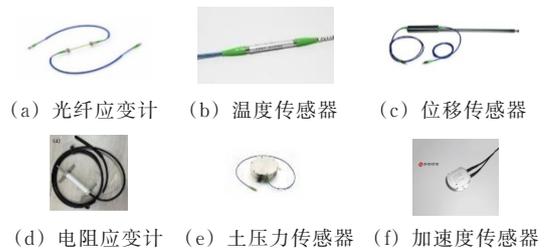


图15 路面常用传感器^[64-65]

Figure 15 Common sensors for pavement^[64-65]

应变传感器包括光纤光栅应变计、电阻应变计、压电应变计,光纤光栅应变计是利用光纤受到应变

时光栅周期发生变化,导致反射波长发生变化,通过波长变化反映应变;电阻应变计是在其受到外力作用时,其长度和横截面积发生变化导致电阻改变,通过电阻变化量反映应变。压电应变计通过压电材料在受力变形时产生的电荷变化反映应变。温度传感器包括热电偶、热敏电阻和红外温度传感器。热电偶由两种不同金属材料构成的接点,当接点处存在温差时,产生的电动势变化可以计算出温度;热敏电阻根据温度系数的不同,分为负温度系数热敏电阻(NTC)和正温度系数热敏电阻(PTC),NTC热敏电阻的电阻值随温度升高而减小,而PTC热敏电阻的电阻值随温度升高而增大。红外温度传感器通过检测物体发出红外辐射,并将其转换为电信号计算物体的温度。位移传感器包括激光位移传感器、LVDT和电涡流位移传感器。激光位移传感器利用激光三角测量或激光干涉原理,通过测量激光从目标表面反射回来的时间或干涉条纹的变化来确定位移;LVDT由一个初级线圈和两个次级线圈组成,中间有一个可动的铁芯,当铁芯在外力作用下移动时,初级线圈的电磁感应使得两个次级线圈产生的感应电压发生变化。通过测量次级线圈之间的电压差可以计算出铁芯的位移。电涡流位移传感器会产生一个高频交变磁场,当金属目标靠近传感器时,会在目标内部产生涡流,涡流反过来在传感器的线圈中产生一个反向的电磁场,导致线圈的电感量发生变化,通过测量线圈的电感变化可以计算出目标的位移。各传感器的优缺点如表2所示。

表2 传感器的类型及优缺点

Table 2 Types of sensors and their advantages and disadvantages

传感器类型	传感器名称	优点	缺点
应变传感器	光纤光栅应变计	高精度、抗电磁干扰	成本较高、寿命较短
	电阻应变计	灵敏度高、应用广泛	需要良好的黏结工艺
	压电应变计	适用于动态应变测量	温度依赖性强
温度传感器	热电偶	测温范围广	精度较低
	热敏电阻	灵敏度高	测温范围有限
位移传感器	红外温度传感器	适用于高温和移动物体的测温	成本较高
	激光位移传感器	非接触测量	对环境条件敏感
	LVDT	线性度高、稳定性好	安装需要对准
	电涡流位移传感器	适用于恶劣环境	只适用于导电材料

目前在路面结构中使用较多的是应变传感器,应变传感器能够直接反映路面结构受力状态,其中光纤光栅应变计可以埋设于路面结构内部,能够实时监测路面内部结构响应。为了使传感器在结构复杂的环境下有效地监测,众多研究者将关注点聚焦在验证传感器检测的准确性和延长传感器在路面中的使用寿命上。在验证传感器检测的准确性方面,从最初的对比有无埋设传感器的路面结构响应,到利用数字图像技术结合有限元模拟方法建设模型对比验证。赵鸿铎等^[66]提出了基于DIC的应变计测量准确度的比对方法,通过研究得到“不低于95%的置信度认为DIC法测量应变误差小于 12×10^{-6} ”的结论;Dong等^[67]通过有限元模拟研究了骨料形态和材料模量对应变计测量准确性的影响,并提出将模型计算应变转换为实际值的方法;Liu等^[68]将有限元模拟计算得出的应变与应变计实测应变进行对比分析,验证了应变计测量的有效性;Li等^[69]以DIC技术监测得到的数值作为应变参考值计算传感器的测量误差,发现加载方式、温度和传感器埋设位置偏移都会影响传感器与混合料的变形协调性;刘朝晖等^[70]提出设置模量过渡区来缩小传感器与沥青路面材料之间的模量差异,且通过DIC技术与有限元模型研究了应变计与不同基体材料之间的变形协调性,发现高模量沥青混合料中的应变计实测值更接近于DIC实测数据。除此之外,延长传感器在路面中的使用寿命也是应用传感器必须攻克的问题。光纤光栅传感器能够进行高精度、远距离监测,且具有无须电源、可多路复用等优点,已经成为现阶段结构健康监测的主要方式。由于裸光纤光栅非常脆弱,必须对其进行封装防护才能避免其在复杂的结构环境中受到损坏。封装防护技术包括封装材料和封装工艺两部分,常用的封装材料包括金属材料和聚合物材料,封装材料在长期服役过程中产生老化和锈蚀会影响传感器的使用性能;封装工艺中使用的高分子黏结剂极易发生老化,使传感器实测数据与被测结构的真实变形差异较大。因此,在延长传感器在路面中的使用寿命方面,研究学者多集中于研究性能更优的封装材料和封装工艺。Hu等^[71]分别采用钢壳和橡胶封装传感器得到刚性和柔性传感器,发现刚性传感器的温度稳定性优于柔性传感器;Hu等^[72]采用热塑性树脂聚丙烯封装光纤光栅传感器,将传感器内嵌于混凝土柱中测量其在连续7d的早期凝固过程中的应变和压缩应变,发现该传感器不仅适用于低

刚度材料,而且适用于高刚度材料;Xiang等^[73]开发了一种柔性沥青胶封装的光纤传感器,发现所提出的光纤传感器可以有效地检测沥青路面的分布应变;王花平等^[74]提出了以柔性原材料封装光纤光栅传感器的方式,通过试验和有限元计算确定封装尺寸,研究发现将结构自身的一部分用于光纤的封装方式是可行且有效的;钟阳等^[75]以沥青混凝土作为封装材料,将高分子黏结方式换为缠绕固定式使传感器实现无胶化封装,研究发现这种方式是可行的,且提高了封装传感器的有效性和耐久性。此外,传感器以导线作为桥梁在路面中使用,导线材料的老化也会影响传感器的使用寿命。近几年,无线传感器网络逐渐成为传统结构工程监测系统的备选方案,但是无线传感器的使用基于外部电源、电池或者太阳能等,对路面中的传感器定期进行电池更换显然是不切实际的。目前,自供电无线传感器在国内外研究较少,但其潜在的长续航和低维护需求使其在道路检测技术的发展中具有巨大的潜力,未来可能成为实现更高效、更可靠的路面结构健康监测的重要手段。

综上,传感器检测效率低、使用寿命短,且检测数据后台工作量大,导致评价预测与预警时间滞后都是监测技术所面临的主要问题。开发使用寿命长、存活率高且便于更换的适时监测并可远程传输信息的传感元器件;研究与开发自供电无线传感器;研发能够满足精度要求的道路表面病害快速无损检测技术和信息处理及远程传输技术将会是未来几年热点研究方向。

3.2 公路基础设施运维养护与大中修的智能化

道路的运维养护是提高路面耐久性的必要条件,在养护运维与大中修的智能化方面,在“八五”(1990—1995年)期间,中国开发了高等级公路养护管理智能化系统,该系统具有评价、预测及计算机辅助决策等功能。后来通过引进、消化、吸收、再创新,开发了系列的无损自动检测与预防性养护智能化技术装备,包括爬索、空心混凝土结构中穿行的检测机械人,无人机摄影、航测等装备。目前,交通运输部编制了公路养护技术规范,各省及自治区也在系统研究的基础上形成了各有特色的智能化管养模式。

传统的路面检测和维护方法,如视觉检查、核心取样和声波检测,虽然在一定程度上能够发现问题,但其破坏性、高成本和有限的覆盖范围,无法完全满足现代公路管理的需求。探地雷达(Ground

Penetrating Radar, GPR)作为一种先进的无损检测技术,能够有效克服传统方法的局限性(图16)。GPR通过发射和接收高频电磁波,能够快速、无损地获取路面和地下结构的详细信息。因其高效、精确和覆盖面广的特点,在公路基础设施的运维养护与大中修中展现出了巨大的应用潜力和前景。



图16 探地雷达技术在路面监测中的应用
Figure 16 Application of GPR technology in pavement monitoring

如图16所示,探地雷达可以用来检测路面的结构参数,例如密度、厚度、孔隙比等,也可以用来检测路面中的异常情况,例如路面的横向裂缝、局部松散等。Yang等^[76]总结了探地雷达技术在路面中的应用情况,指出该技术检测沥青路面内部损害的关键在于提取、分析探地雷达图像的回波特征;Solla等^[77]总结了路面无损检测技术的优缺点,指出探地雷达技术在路面中的应用主要有检测结构层厚度、路面下的裂缝与空隙、路面中的含水量变化等;Ling等^[78]基于二维探地雷达检测获取信息不充分、存在漏检等情况,开发了一种基于时间推移全覆盖三维探地雷达的路基监测技术,该技术采集效率高且实现了地下三维空间的精确成像;Liu等^[79]针对检测城市道路空洞问题,开发了一个车载三维探地雷达系统,该系统能够准确地预估空洞的尺寸和高度,从而避免路面塌陷而造成交通事故。为了提高探地雷达检测的效率,许多研究学者试图通过深度学习来取代人工检测,Liu等^[80]结合YOLO(You Only Look Once)系列和3D探地雷达图像识别沥青路面内部缺陷,发现与传统检测方法相比,探地雷达检测能够显著降低路面的养护成本;Liu等^[81]基于探地雷达图像中小尺寸缺陷的分布特点,提出一种针对不同尺度缺陷的双向目标检测模型,与初始模型相比,最终模型的小缺陷平均精度提高了17.9%、综合指数提高了

9.9%；Guo等^[82]结合探地雷达和机器视觉技术,使用目标检测算法的计算机视觉模型构建自动识别系统,对比分析4种模型的输出结果发现YOLOv8是实现准确检测结构损伤的最优项,提高了对路面结构损伤的类型与位置识别的平均精度；Ma等^[83]提出了一种新的基于GRP的沥青路面剥离损伤检测指标——累积层内峰值(P_{AIP}),结合现场数据验证了该指标在检测柔性路面剥离损伤方面是有效的；朱能发等^[84]利用地质雷达检测技术对比了正常道路和病害道路,分析了造成路面病害的原因,如图17所示。密实不均体界面处的定性方法是:依据在不均匀体边界处有连续的反射波同相轴中断或弯曲分布,其波长变长,波幅明显变化,波组特征也发生明显变化。路面局部脱空表现为反射界面明显、传播速度降低。基层裂隙的判断方法是:对不含水的基层裂隙雷达异常剖面图具有在裂隙处正常层面同相轴中断,幅值突然变小,或两侧同相轴不同程度错动。路面塌方的探地雷达检测图像表现为低值长波,或云斑状的色谱异常特征,正常层位的水平同相轴中断。

大量研究表明:探地雷达检测路面结构内部损伤是有效的,从最初人工观察分析路面结构探地雷达检测图像到结合计算机算法建立相应的模型,提高了探地雷达检测的效率和准确性。探地雷达检测

结果容易受到路面结构周围环境的影响;探地雷达检测技术对路面结构内的细微缺陷检测效果有限,需要结合其他检测手段才能开展路面全面检测;探地雷达检测数据量大,数据处理分析较为复杂,对相关专业人才要求较高;探地雷达检测技术在国际上没有统一的标准等,都是探地雷达检测技术未来重点需要解决的问题。

3.3 公路健康监测与运维养护的发展与展望

内嵌感知单元是一种用于检测路面结构内部的技术,而探地雷达检测则通过发射高频电磁波并接收从地下结构反射回来的信号来检测地下结构。通常,探地雷达需要安装在车辆或手推车上在路面上移动进行检测,属于外部无损检测方法。除了这两种方法外,还有激光扫描技术和超声波检测技术等。尽管中国每年在公路基础设施服役性能检测、监测和评价方面做了大量工作,但这些检测结果很少用于养护决策。此外,虽然积累了大量公路基础设施检测的历史数据,但这些数据很少被用于研究服役性能的演变规律,且用于指导养护规划的性能预测模型和决策模型也较少。未来,公路基础设施的运维与养护管理智能化技术的发展目标有两个:①保证所有高速公路的服役性能达到合格以上水平,以确保车辆能够在设计车速下安全、平稳地运行,这是

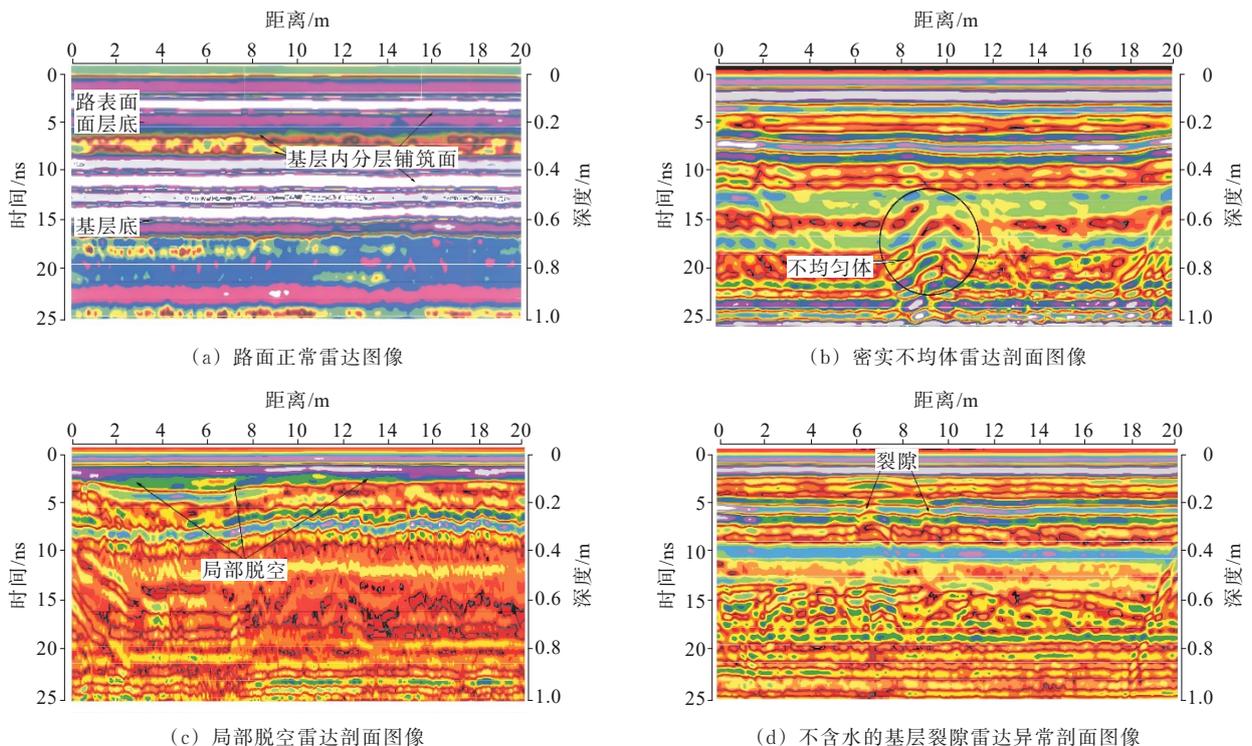


图17 探地雷达检测图像^[84]

Figure 17 GPR image^[84]

养护管理的最高目标;② 尽可能缩短设计基准期内公路基础设施的维养时间,以降低养护成本并提高运输效能。为了实现这些目标,首先要分省区开发公路基础设施建养全过程一体化的数字平台,然后开发搭载于该平台的公路基础设施服役性能检测与监测数字系统,最后利用这一系统开展公路基础设施的长期性能研究。

4 结论

本文分别从路面材料、结构、施工、监测、维养5个方面对公路基础设施智能建造的发展进行综述,首先阐述了公路智能建造的含义、发展现状与重要意义,然后分别从不同方面对公路基础设施的发展现状和未来的发展方向进行了回顾与综述。从公路基础设施智能建造5个方面的回顾综述中,可以看出现阶段各方面都取得了一定的进展,关于当下以及未来的研究目标和方向,如下所述:

(1) 在路面材料智能化方面,开发建设具有多相、多组分、多尺度混合料特征的公路工程材料基因库;建立多因素作用下多相、多组分、多尺度混合料行为特征的数字模型;开发多因素作用下多尺度混合料行为特征数字孪生及其算法,以掌握这种多相、多组分、多尺度混合料内部相互之间的作用机理和宏观特性形成的物理原理;利用相应模型算法开发专用软件,进行工程材料的优化与智能设计等都是公路工程材料设计理论与方法的智能化发展方向。

(2) 在路面结构智能化方面,优化重构其设计理论、力学模型、模型参数、计算方法和设计方法,并开发相应的计算机软件;开展更加全面深入的公路基础设施长期性能研究,能够更加深刻全面地认识公路工程结构性能的时空衍化规律;采用更加精准的理论来描述其行为特征,应用数字孪生技术预测其全寿命周期的性能演变规律时更精确等是公路工程结构智能化设计的未来发展方向。

(3) 在施工管理智能化方面,应用高分辨率遥感航测技术,开发非接触性、高精度远程感知和定位技术;研发施工装备机载的智能检测、预警预报与智能调控技术;发展工厂化预制、智能化安装、数字化管理技术;建设智慧工地,从招投标开始,从进料、试验、备料、加工、施工等全过程对设计、施工、监理、试行全过程可视化监管等是公路基础设施施工控制与管理智能化的发展方向。

(4) 在检测与监测技术智能化方面,开发可直接

搭载有自动检测与调控功能的施工装备,为智慧工地建设开发可靠的智能化施工装备;研发能够满足精度要求的道路表面病害快速无损检测技术和信息处理及远程传输技术;开发用于桥隧性能检测与监测的智能化专用装备;开发使用寿命长、存活率高且便于更换的适时监测并可远程传输信息的传感元器件;建立建养与运维管理一体化的公路基础设施养护管理智能化数字系统等是检测与监测智能化的发展方向。

(5) 在路面运维管理方面,分省区开发公路基础设施建养全过程一体化的数字平台;开发搭载于数字平台的公路基础设施服役性能检测与监测数字系统;借助于检测与监测数字系统,开展公路基础设施长期性能研究,在此基础上,分别建立桥、隧、路服役性能评估与预测模型;开发既可拆分为项目级,又可合并为局域网级的可视化公路运维与养护管理智能化系统等是公路基础设施运维与养护管理智能化的发展方向。

综上所述,公路基础设施智能建造在材料、结构、施工、检测及运维管理5个方面均取得了显著的进展。然而,仍面临技术集成度不足、标准体系不完善、数据管理与应用效率低等问题。未来的发展方向应着重于多学科交叉合作,推动技术标准化建设,提升数据处理和分析能力。

参考文献:

References:

- [1] 汪洪,项晓东,张澜庭.数据+人工智能是材料基因工程的核心[J].科技导报,2018,36(14):15-21.
WANG Hong, XIANG Xiaodong, ZHANG Lanting. Data+AI: The core of materials genomic engineering[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(14): 15-21.
- [2] 邢超,谭忆秋,张凯,等.基于材料基因组方法的沥青混合料基因特性综述及展望[J].中国公路学报,2020,33(10):76-90.
XING Chao, TAN Yiqiu, ZHANG Kai, et al. Review and prospect of genetic characteristics of asphalt mixture based on material genome method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 76-90.
- [3] SULTANA S, BHASIN A. Effect of chemical composition on rheology and mechanical properties of asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2014, 72: 293-300.
- [4] 陈华鑫,贺孟霜,纪鑫和,等.沥青性能与沥青组分的灰色关联分析[J].长安大学学报(自然科学版),2014,34(3):1-6.
CHEN Huaxin, HE Mengshuang, JI Xinhe, et al. Gray correlation analysis of asphalt performance and four fractions[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2014, 34(3): 1-6.

- [5] 杨震,张肖宁,虞将苗,等.基质沥青老化前后多尺度特性研究[J].建筑材料学报,2018,21(3):420-425.
YANG Zhen,ZHANG Xiaoning,YU Jiangmiao,et al.Study on multi-scale characteristics of matrix asphalt before and after aging[J].Journal of Building Materials,2018,21(3):420-425.
- [6] 王鹏,董泽蛟,谭忆秋,等.基于分子模拟的沥青蜂状结构成因探究[J].中国公路学报,2016,29(3):9-16.
WANG Peng,DONG Zejiao,TAN Yiqiu,et al.Research on the formation mechanism of bee-like structures in asphalt binders based on molecular simulations[J].China Journal of Highway and Transport,2016,29(3):9-16.
- [7] VEYTSKIN Y, BOBKO C, CASTORENA C. Nanoindentation and atomic force microscopy investigations of asphalt binder and mastic[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2016,28(6):04016019.
- [8] GONG M H, YANG J, WEI J M, et al. Characterization of adhesion and healing at the interface between asphalt binders and aggregate using atomic force microscopy[J].Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board,2015,2506(1):100-106.
- [9] 谭巍,徐霏.集料化学成分对沥青胶浆高温流变特性的影响[J].中外公路,2015,35(2):261-263.
TAN Wei,XU Pei.The influence of aggregate chemical composition on the high-temperature rheological properties of asphalt mastic[J].Journal of China & Foreign Highway,2015,35(2):261-263.
- [10] 程永春,李赫,李立顶,等.基于灰色关联度的矿料对沥青混合料力学性能的影响分析[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(3):925-935.
CHENG Yongchun,LI He,LI Liding,et al. Analysis of mechanical properties of asphalt mixture affected by aggregate based on grey relational degree[J].Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2021,51(3):925-935.
- [11] 吴国雄,姜勇,张伟,等.粗集料分布形态对沥青混合料疲劳性能影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(4):80-86.
WU Guoxiong,JIANG Yong,ZHANG Wei,et al. Influence of coarse aggregate distribution morphology on the fatigue performance of asphalt mixtures[J].Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2023,42(4):80-86.
- [12] 熊政勇,吴江林,车春海,等.粗集料颗粒形状对沥青混合料性能的影响[J].公路交通科技,2023,40(8):22-28.
XIONG Zhengyong,WU Jianglin,CHE Chunhai,et al. Influence of coarse aggregate particle shape on performance of asphalt mixture[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2023,40(8):22-28.
- [13] 袁峻,钱野.粗集料形态特征及其对沥青混合料高温抗剪强度的影响[J].交通运输工程学报,2011,11(4):17-22.
YUAN Jun,QIAN Ye.Morphological character of coarse aggregate and its influence on high-temperature shear strength of asphalt mixture[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering,2011,11(4):17-22.
- [14] 王凤,肖月,崔培德,等.集料形态特征对沥青混合料性能影响规律的研究进展[J].材料导报,2022,36(17):95-107.
WANG Feng,XIAO Yue,CUI Peide,et al. Review on the characterization of aggregate morphology and its influence on asphalt mixture properties[J].Materials Reports,2022,36(17):95-107.
- [15] WANG D W, WANG H N, BU Y, et al. Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques[J].Wear,2015,338:288-296.
- [16] 唐伯明,郭鹏,肖巧林,等.沥青混凝土再生集料的棱角性分析[J].中国公路学报,2015,28(1):24-29.
TANG Boming,GUO Peng,XIAO Qiaolin,et al. Analysis of angularity of asphalt concrete recycled aggregate[J].China Journal of Highway and Transport,2015,28(1):24-29.
- [17] CUI S, BLACKMAN B R K, KINLOCH A J, et al. Durability of asphalt mixtures: Effect of aggregate type and adhesion promoters[J].International Journal of Adhesion and Adhesives,2014,54:100-111.
- [18] YIN Y P, CHEN H X, KUANG D L, et al. Effect of chemical composition of aggregate on interfacial adhesion property between aggregate and asphalt[J].Construction and Building Materials,2017,146:231-237.
- [19] 郭猛.沥青与矿料界面作用机理及多尺度评价方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
GUO Meng. Study on mechanism and multiscale evaluation method of interfacial interaction between asphalt binder and mineral aggregate[D].Harbin: Harbin Institute of Technology,2016.
- [20] 汪洪,向勇,项晓东,等.材料基因组:材料研发新模式[J].科技导报,2015,33(10):13-19.
WANG Hong,XIANG Yong,XIANG Xiaodong,et al. Materials genome enables research and development revolution[J].Science & Technology Review,2015,33(10):13-19.
- [21] 谭忆秋,吕慧杰,徐慧宁.材料基因思想在沥青路面材料领域的应用展望[J].交通运输研究,2020,6(5):2-12.
TAN Yiqiu,LYU Huijie,XU Huining. Application prospect of material genetics idea in asphalt pavement materials[J].Transport Research,2020,6(5):2-12.
- [22] 谢兆星,李鼎乐,韩森,等.针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响[J].建筑材料学报,2007,10(6):736-739.
XIE Zhaoxing,LI Dingle,HAN Sen,et al. Influence of percentage of flat and elongated particles on performance of asphalt mixture[J].Journal of Building Materials,2007,10(6):736-739.
- [23] 谭忆秋,任俊达,纪伦,等.基于X-Ray CT的沥青混合料空隙测试精度影响因素分析[J].哈尔滨工业大学学报,2014,46(6):65-71.
TAN Yiqiu,REN Junda,JI Lun,et al. Analysis of influencing factors of the test precision of asphalt mixture voids based on X-Ray CT[J].Journal of Harbin Institute of Technology,2014,46(6):65-71.
- [24] 徐慧宁,石浩,谭忆秋.沥青混合料三维空隙形态特征评

- 价方法及分析[J].中国公路学报,2020,33(10):210-220.
- XU Huining, SHI Hao, TAN Yiqiu. Investigation and characterization of 3D void mesostructures in asphalt mixtures[J].China Journal of Highway and Transport,2020,33(10):210-220.
- [25] 于华南,姚丁,钱国平,等.基于微观结构特征的沥青混合料性能数字孪生模型研究综述[J].中国公路学报,2023,36(3):20-44.
- YU Huanan, YAO Ding, QIAN Guoping, et al. Review of digital twin model of asphalt mixture performance based on mesostructure characteristics[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(3):20-44.
- [26] 丛玉凤,廖克俭,翟玉春.分子模拟在SBS改性沥青中的应用[J].化工学报,2005,56(5):769-773.
- CONG Yufeng, LIAO Kejian, ZHAI Yuchun. Application of molecular simulation for study of SBS modified asphalt[J]. CIESC Journal,2005,56(5):769-773.
- [27] 崔亚楠,李雪杉,张淑艳.基于分子动力学模拟的再生剂-老化沥青扩散机理[J].建筑材料学报,2021,24(5):1105-1109.
- CUI Yanan, LI Xueshan, ZHANG Shuyan. Diffusion mechanism of regenerant aged asphalt based on molecular dynamics simulation[J]. Journal of Building Materials, 2021,24(5):1105-1109.
- [28] 胡栋梁,顾兴宇,孙丽君,等.基于量子化学的沥青热老化与紫外老化机理[J].交通运输工程学报,2023,23(2):141-152.
- HU Dongliang, GU Xingyu, SUN Lijun, et al. Quantum chemistry-based thermal and UV aging mechanism of asphalt[J].Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023,23(2):141-152.
- [29] LUO D S, GUO M, TAN Y Q. Molecular simulation of minerals-asphalt interfacial interaction[J].Minerals,2018,8(5):176.
- [30] LIU J Z, YU B, HONG Q Z. Molecular dynamics simulation of distribution and adhesion of asphalt components on steel slag[J]. Construction and Building Materials,2020,255:119332.
- [31] 谢娟,贺文,赵勳丞,等.分子动力学模拟在沥青体系中的应用研究进展[J].化工进展,2024,43(8):4432-4449.
- XIE Juan, HE Wen, ZHAO Xucheng, et al. Research progress on the application of molecular dynamics simulation in asphalt systems[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2024,43(8):4432-4449.
- [32] HUANG M, ZHANG H L, GAO Y, et al. Study of diffusion characteristics of asphalt-aggregate interface with molecular dynamics simulation[J].International Journal of Pavement Engineering,2021,22(3):319-330.
- [33] XU G J, WANG H. Molecular dynamics study of interfacial mechanical behavior between asphalt binder and mineral aggregate[J]. Construction and Building Materials,2016,121:246-254.
- [34] 赵胜前,丛卓红,游庆龙,等.沥青-集料黏附和剥落研究进展[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(9):2437-2464.
- ZHAO Shengqian, CONG Zhuohong, YOU Qinglong, et al. Adhesion and raveling property between asphalt and aggregate:A review[J].Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2023,53(9):2437-2464.
- [35] 蒋鑫,冯文青,吴朝阳,等.沥青路面结构力学分析四款典型专业软件评析[J].中外公路,2019,39(4):38-44.
- JIANG Xin, FENG Wenqing, WU Chaoyang, et al. Comparisons of four typical specific programs for mechanics analysis of asphalt pavement structure[J]. Journal of China & Foreign Highway,2019,39(4):38-44.
- [36] PATIL V A, SAWANT V A, DEB K. 2-D finite element analysis of rigid pavement considering dynamic vehicle - pavement interaction effects[J]. Applied Mathematical Modelling,2013,37(3):1282-1294.
- [37] 孔令云,阮庆松.复合式路面疲劳裂纹扩展寿命模型及子程序开发应用[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(1):53-59.
- KONG Lingyun, RUAN Qingsong. Development and application of fatigue crack propagation life model and subroutine for composite pavement[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2022,45(1):53-59.
- [38] CAO P, ZHOU C J, FENG D C, et al. A 3D direct vehicle-pavement coupling dynamic model and its application on analysis of asphalt pavement dynamic response[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013: 394704.
- [39] ZHAN Y X, YAO H L, LU Z. Dynamic response of the 3D pavement-transversely isotropic poroelastic ground system to a rectangular moving load[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2018,115:394-401.
- [40] 颜可珍,游凌云,葛冬冬,等.横观各向同性沥青路面结构力学行为分析[J].公路交通科技,2016,33(4):1-6.
- YAN Kezhen, YOU Lingyun, GE Dongdong, et al. Analysis of structural mechanical behavior of transverse isotropic asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2016,33(4):1-6.
- [41] 李霖,闫瑾.超载下倒装式沥青路面结构有限元分析[J].公路交通科技,2015,32(8):25-28,33.
- LI Lin, YAN Jin. Finite element analysis of asphalt pavement structure with inverted base layer under overload load[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2015,32(8):25-28,33.
- [42] 马翔宇,张乾,曲建涛,等.加铺应力吸收层对路面结构影响的有限元模拟[J].中国水运,2023(23):143-145.
- MA Xiangyu, ZHANG Qian, QU Jiantao, et al. Finite element simulation of the influence of stress absorption layer on pavement structure[J]. China Water Transport, 2023(23):143-145.
- [43] 任俊达,张怀志,谭忆秋.基于三维黏弹有限元法的沥青路面结构力学响应分析[J].公路交通科技,2017,34(1):15-23.
- REN Junda, ZHANG Huaizhi, TAN Yiqiu. Analysis on mechanical response of asphalt pavement structure based on 3D viscoelastic finite element method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017,34(1):15-23.

- [44] 马立杰,韩佩钢,韩子昂.基于ABAQUS沥青路面结构层厚度正交组合的车辙模拟分析[J].河北工业大学学报,2023,52(2):91-96.
MA Lijie, HAN Peigang, HAN Ziang. Rutting simulation analysis based on orthogonal combination of ABAQUS asphalt pavement structure layer thickness[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2023, 52(2): 91-96.
- [45] 郭寅川,王礼根,申爱琴,等.甘肃半刚性沥青路面结构的温度场及温度应力三维有限元分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(3):27-32,77.
GUO Yinchuan, WANG Ligen, SHEN Aiqin, et al. 3D finite element analysis of temperature field and temperature stress of semi-rigid asphalt pavement structure in Gansu Province[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(3): 27-32, 77.
- [46] 付宏渊,郭芳,邵腊庚.基于温度场的混合式基层沥青路面结构车辙数值模拟分析[J].公路交通科技,2015,32(12):46-52.
FU Hongyuan, GUO Fang, SHAO Lageng. Numerical analysis of rutting in composite base asphalt pavement structure based on temperature field[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(12): 46-52.
- [47] 田辉.智慧监控系统在提高沥青路面施工质量中的价值[J].中国高新科技,2022(23):72-73.
TIAN Hui. The value of intelligent monitoring system in improving the construction quality of asphalt pavement[J]. China High-Tech, 2022(23): 72-73.
- [48] 张波.智能监控系统在沥青路面摊铺施工中的应用[J].运输经理世界,2022(8):73-75.
ZHANG Bo. Application of intelligent monitoring system in asphalt pavement paving construction[J]. Transport Business China, 2022(8): 73-75.
- [49] MA Z Y, ZHANG J X, PHILBIN S P, et al. Dynamic quality monitoring system to assess the quality of asphalt concrete pavement[J]. Buildings, 2021, 11(12): 577.
- [50] ZHU S C, LI X D, WANG H Y, et al. Development of an automated remote asphalt paving quality control system [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2018, 2672(26): 28-39.
- [51] 张宗兵,王思尧,王云,等.基于物联网的高速公路沥青路面施工质量动态实时监控[J].宜春学院学报,2022,44(3):34-40,75.
ZHANG Zongbing, WANG Siyao, WANG Yun, et al. Dynamic real-time monitoring of highway asphalt pavement construction quality based on the internet of things[J]. Journal of Yichun University, 2022, 44(3): 34-40, 75.
- [52] 方磊,郭斌,郑永军,等.沥青路面施工智能监控技术研究[J].中国测试,2023,49(2):15-21.
FANG Lei, GUO Bin, ZHENG Yongjun, et al. Research on intelligent monitoring technology of asphalt pavement construction[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(2): 15-21.
- [53] 周家祥.智能压实监控技术在云湛高速公路沥青路面施工中的应用[J].交通世界,2020(增刊2):51-53.
ZHOU Jiaxiang. Application of intelligent compaction monitoring technology in asphalt pavement construction of Yunzhan Expressway[J]. TranspoWorld, 2020(sup 2): 51-53.
- [54] 吴炳堂.智能压实监控系统在公路路面施工中的应用[J].黑龙江交通科技,2024,47(3):177-181.
WU Bingtang. Application of intelligent compaction monitoring system in highway pavement construction[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2024, 47(3): 177-181.
- [55] BIANCARDI S A, CAPANO A, DE OLIVEIRA S G, et al. Integration of BIM and procedural modeling tools for road design[J]. Infrastructures, 2020, 5(4): 37.
- [56] 林江伟.智慧公路中BIM+GIS信息化模型的关键技术研究[J].建筑机械,2023(8):20-25.
LIN Jiangwei. Research on key technology of BIM+GIS information model in intelligent highway[J]. Construction Machinery, 2023(8): 20-25.
- [57] 耿晓燕.BIM技术在道路工程设计和施工中的应用[J].居舍,2022(18):97-99.
GENG Xiaoyan. Application of BIM technology in road engineering design and construction[J]. Ju She, 2022(18): 97-99.
- [58] 彭欣,庞聪,韦继宁,等.基于BIM技术的公路工程正向设计方法研究[J].西部交通科技,2020(4):32-36.
PENG Xin, PANG Cong, WEI Jining, et al. Research on forward design method of highway engineering based on BIM technology[J]. Western China Communications Science & Technology, 2020(4): 32-36.
- [59] VIGNALI V, ACERRA E M, LANTIERI C, et al. Building information modelling (BIM) application for an existing road infrastructure[J]. Automation in Construction, 2021, 128: 103752.
- [60] 雒泽华,韩涛,张阳,等.基于BIM的路面参数化设计与结构同步分析[J].施工技术(中英文),2023,52(5):20-25.
LUO Zehua, HAN Tao, ZHANG Yang, et al. Pavement parametric design and structural synchronization analysis based on BIM[J]. Construction Technology, 2023, 52(5): 20-25.
- [61] ZHAO Y L, REN J L, ZHANG K, et al. Construction quality control for rutting resistance of asphalt pavement using BIM technology[J]. Buildings, 2024, 14(1): 239.
- [62] 刘可欣,徐旻,李旭,等.BIM技术在沥青路面施工模拟中的应用研究[J].中外公路,2022,42(3):43-47.
LIU Kexin, XU Min, LI Xu, et al. Application research on BIM technology in construction simulation of asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 43-47.
- [63] 王正,周振东,陈书扬,等.数据驱动的数字全周期高速公路建设管理平台框架构建[J].施工技术(中英文),2022,51(23):1-8,18.
WANG Zheng, ZHOU Zhendong, CHEN Shuyang, et al. Data-driven platform framework construction for digital

- whole- process expressway construction management[J]. Construction Technology,2022,51(23):1-8, 18.
- [64] 葛冬冬,张文慧,吕松涛,等.智慧道路设计建造运维中的数字化技术综述[J].中国公路学报,2024,37(12):294-309. GE Dongdong, ZHANG Wenhui, LYU Songtao, et al. Digital technology in smart road design, construction, and maintenance: A review[J]. China Journal of Highway and Transport,2024,37(12):294-309.
- [65] 李文博,刘朝晖,柳力,等.内置传感器的沥青混合料变形协调及损伤行为研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(6):2272-2283. LI Wenbo, LIU Zhaohui, LIU Li, et al. Study on synergistic deformation and damage behavior of asphalt mixture with built-in sensors[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2024,21(6):2272-2283.
- [66] 赵鸿铎,谷松原,马鲁宽.基于数字图像关联技术的沥青应变计测量准确度比对方法[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(9):1211-1217. ZHAO Hongduo, GU Songyuan, MA Lukuan. Measurement accuracy comparison of in situ asphalt pavement strain sensors based on digital image correlation technique[J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2018,46(9): 1211-1217.
- [67] DONG Z J, MA X Y, GONG X B, et al. Theoretical evaluation of the measurement accuracy of fiber bragg grating strain sensors within randomly filled asphalt mixtures based on finite element simulation[J]. Structural Control and Health Monitoring,2018,25(1):e2057.
- [68] LIU Z, GU X Y, WU C Y, et al. Studies on the validity of strain sensors for pavement monitoring: A case study for a fiber bragg grating sensor and resistive sensor[J]. Construction and Building Materials,2022,321:126085.
- [69] LI W B, HUANG Y, LIU Z H, et al. Study on influencing factors of synergistic deformation between built-in strain sensor and asphalt mixture[J]. Case Studies in Construction Materials,2023,18:e01993.
- [70] 刘朝晖,郭志豪,黄优,等.高模量沥青混合料与应变计协调变形研究[J/OL].中外公路,1-11[2024-06-14].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240614.1612.005.html>. LIU Zhaohui, GUO Zhihao, HUANG You, et al. Study on coordinated deformation of high modulus asphalt mixture and strain gauge[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-11[2024-06-14]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240614.1612.005.html>.
- [71] HU Y, YU J H, ZHANG S, et al. Research on the application of fiber Bragg grating sensor in pavement monitoring[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,505/506:192-199.
- [72] HU Q L, WANG C, OU J P. Development and performance research of FBG strain sensor for monitoring on asphalt concrete pavement[C]//Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2010. San Diego, California, USA. SPIE, 2010.
- [73] XIANG P, WANG H P. Optical fibre-based sensors for distributed strain monitoring of asphalt pavements[J]. International Journal of Pavement Engineering,2018,19(9): 842-850.
- [74] 王花平,刘婉秋,周智,等.沥青混凝土路面监测用柔性原材料封装光纤传感器设计[J].公路,2014,59(1):205-209. WANG Huaping, LIU Wanqiu, ZHOU Zhi, et al. Design of flexible raw material encapsulated optical fiber sensor for asphalt concrete pavement monitoring[J]. Highway, 2014, 59(1):205-209.
- [75] 钟阳,尚冉冉.光纤光栅传感器的无胶化封装及蠕变规律研究[J].山西建筑,2015,41(14):138-139. ZHONG Yang, SHANG Ranran. Research on creep law of packaging machine without glue of optical fiber grating sensor[J]. Shanxi Architecture,2015,41(14):138-139.
- [76] YANG X L, HUANG R C, MENG Y J, et al. Overview of the application of ground-penetrating radar, laser, infrared thermal imaging, and ultrasonic in nondestructive testing of road surface[J]. Measurement,2024,224:113927.
- [77] SOLLA M, PÉREZ-GRACIA V, FONTUL S. A review of GPR application on transport infrastructures: Troubleshooting and best practices[J]. Remote Sensing, 2021,13(4):672.
- [78] LING J Y, QIAN R Y, SHANG K, et al. Research on the dynamic monitoring technology of road subgrades with time-lapse full-coverage 3D ground penetrating radar (GPR)[J]. Remote Sensing,2022,14(7):1593.
- [79] LIU H, SHI Z S, LI J H, et al. Detection of road cavities in urban cities by 3D ground-penetrating radar[J]. Geophysics,2021,86(3):WA25-WA33.
- [80] LIU Z, WU W X, GU X Y, et al. Application of combining YOLO models and 3D GPR images in road detection and maintenance[J]. Remote Sensing,2021,13(6):1081.
- [81] LIU W C, LUO R, XIAO M Z, et al. Intelligent detection of hidden distresses in asphalt pavement based on GPR and deep learning algorithm[J]. Construction and Building Materials,2024,416:135089.
- [82] GUO X G, WANG N. Automated identification of pavement structural distress using state-of-the-art object detection models and nondestructive testing[J]. Journal of Computing in Civil Engineering,2024,38(4):04024014.
- [83] MA Y, ELSEIFI M A, DHAKAL N, et al. Non-destructive detection of asphalt concrete stripping damage using ground penetrating radar[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021,2675(10):938-947.
- [84] 朱能发,孙士辉,陈坚.地质雷达在公路路面无损检测中的应用[J].工程地球物理学报,2014,11(4):522-527. ZHU Nengfa, SUN Shihui, CHEN Jian. The application of GPR to road non-destructive testing[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2014,11(4):522-527.