

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.05.058

沥青路面智能压实技术研究动态

谢胜加^{1,2}, 张 德^{1,2}, 程志强^{1,2}

[1.上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433; 2.上海绿色路面材料工程技术研究中心,上海市 200433]

摘 要:随着道路施工机械化、信息化与数字化集成水平的提高,沥青路面智能压实技术也成为研究与应用热点。有效检测沥青路面压实状态,并且能够准确判别与控制压实质量是实现压实“智能化”的关键,也是实现科学提升路面路用性能和使用寿命的基础。从沥青路面智能压实质量控制原理上进行分类讨论,主要包括机械振动响应、雷达反射波以及智能颗粒细观响应。紧密结合工程实际分析优缺点,为后续沥青路面智能压实的技术发展方向提供借鉴。

关键词: 沥青路面;智能压实;振动响应;雷达反射波;智能颗粒

中图分类号: U415.6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)05-0228-04

0 引 言

压实是沥青路面施工过程中一个十分重要的环节,压实质量不仅直接影响行车舒适性和安全性,还会影响路面的路用性能和耐久性等。常规的施工压实质量检测一般通过单点控制,这类检测方式具有代表性不足、均匀性差、整体反映效果不充分等缺点^[1],如若发生质量问题,将直接影响施工进度和成本造价。现场压实质量往往依赖于一线作业人员的细心、耐心、责任感和施工经验,因而易受人为因素影响。监测监理单位的监管手段粗放,难以形成有效的质量监管,这极易造成质量难以追溯等问题。鉴于此,智能压实(Intelligent Compaction, IC)技术在国内外获得了很多支持和研究,IC 技术可以实现压实的全过程控制,既能注重作业过程,又能进行事后回顾分析。

智能压实基于压实机械,提高压实质量,是起源于 20 世纪 70 年代瑞典的连续振动压实技术^[2],并在美国得到了广泛的应用和良好的成效。随着国内铁路^[3]、公路与大坝等基础设施大规模建设的兴起,IC 技术在我国也得到了广泛应用和飞速发展。目前,智能压实已逐步演化为软硬件结合的集成体系架构,通过集成卫星定位、压实质量参数、多源传感器、信息传输分析以及协同联动等技术,可以直观方便地反映施工现场的压实状况。然而,沥青路面由于其料温度敏感性、层间厚度薄以及摊铺压实联动施工工艺复杂等特点^[4],导致该领域在智能压实技术应用中面临压实质量指标离散性大、相关性差以及

压实均匀性不足、压实质量难以控制等关键性问题。

1 沥青路面智能压实技术分类

智能压实通过压实机具的机载控制传感装置(硬件)与质量监控系统(软件)结合,发展形成出一个大致相似的体系架构:(1)网络传输体系,主要包括传感器信号传输、储存与分析等;(2)技术标准体系,包括压实质量控制指标、压实遍数、频率、速度等施工参数;(3)运行保障体系,包括机群联动施工、安全避障等。

其中,基于技术标准体系中压实质量指标主要可分为三类:基于机械动力响应原理、基于雷达反射波原理以及基于智能颗粒细观响应原理。

1.1 基于机械动力响应原理的压实质量控制

由于机械振动频率、加速度、位移等压实施工参数检测方便,目前主流的智能压实系统主要基于加速度动力响应原理。一般通过振动加速度频谱分析,构造谐波能量比等方法来建立动力响应值与压实度的关系,常用的动力压实指标见表 1。90 年代初,国内率先在兰新铁路、京沪高铁等铁路路基压实施工中,基于动力学原理开展了一系列连续智能压实的研究和应用^[5],并取得了一定效果。

许多国内外机械生产商也开发了相应的硬件设备与软件系统。其中,部分厂家还针对沥青路面,结合温度以及毫米波雷达等传感器,如图 1(a)所示,基于“无人化”理念为智能压实设备融入了温度离析识别、自动避障以及摊铺压实联动跟随的功能,并开发了相应的即时反馈平台,如图 1(b)所示。然而,在实际沥青路面智能压实应用中,研究者^[6]发现 CMV 值等动力指标与压实度的关联性会随着沥青面层厚度的减小而衰减,且所得相关性结果大多低于 80%,这可能

收稿日期: 2022-08-12

作者简介: 谢胜加(1990—),男,硕士,工程师,从事道路工程研究领域工作。

表 1 常用动力压实指标

动力指标	第一次提出时间	所用压路机生产厂家	确定指标所用机械运动参数
压实计值 CMV	1978 年	Dynapac,Caterpillarc, Hamm, Volvo	频率域内竖向加速度幅度在基频(工作频率)和一阶振的比率
能量指数 OMEGA	1982 年	Bomag	滚动阻力系数,机器驱动力
振动模量 E	1990 年	Bomag	竖向钢轮位移,钢轮土接触力
劲度模量 K	1999 年	Ammann, Case	竖向钢轮位移,钢轮土接触力
压实控制值 CCV	2004 年	Sakai	频率域内多个竖向振动幅度的代数关系,包括基频和多阶子频率

是沥青混合料随温度变化的材料非线性所致。因此,仍需要寻找其他方法或测试手段建立压实质量技术表征控制体系。

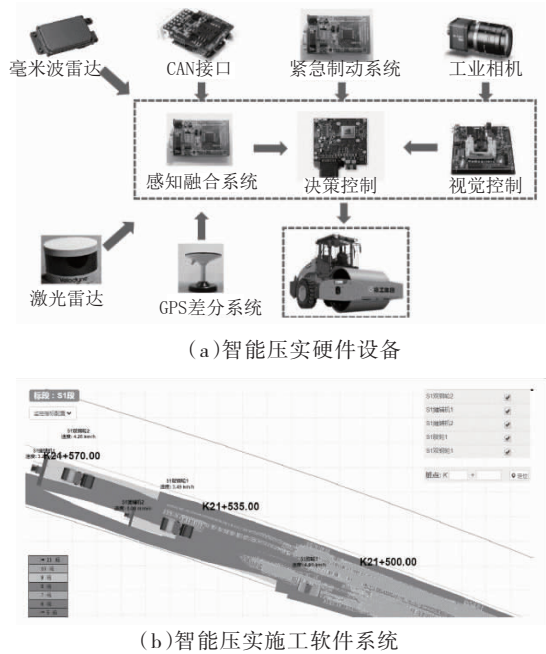


图 1 基于动力响应原理的智能压实硬件设备与软件系统^[2,10]

1.2 基于雷达反射波原理的压实质量控制

近年来,包括核子密度仪、探地雷达以及声波探测在内的无损检测方法逐渐崭露头角。其中,探地雷达(Ground penetrating radar, GPR)依据电磁波在不同介质中的反射信号和能量差异来反映材料介电常数特性,从而反映材料结构信息,具有抗干扰、高效、快速、准确且连续等特点,已广泛应用于考古学、军事和土木工程等多个领域^[7]。在公路领域,GPR 早期主要用于路面结构厚度测量、路基含水量测量、路面病害识别及隧桥病害检测等,如图 2 所示。实践表明,GPR 在界面识别、层厚与密度测试方面是可靠的,当沥青混凝土层厚度大于 5 cm 时,GPR 能够准确预测厚度和密度,误差小于 10%^[8]。相比基于机械动力响应原理的方法,基于 GPR 技术可直接探测路面材料结构密度特征,同时适用于振动钢轮与胶轮碾压施工场景。

然而,GPR 在沥青路面压实应用上仍面临两个



图 2 基于 GPR 干燥沥青密度静态检测^[8]

挑战,一方面是由于探地雷达入射信号的轴向分辨率有限,薄层沥青混凝土表面和底部反射信号重叠;另一方面则是受压实过程中受温度、沥青表面水分以及内部含金属物质掺料的影响,反射振幅会呈现放大失真现象^[8]。对此,研究者采用^[9]结合平均反射系数算法与数字滤波器设计方法改进 GPR 技术,获得了更高精确度(达 91%以上)的沥青混凝土密度与厚度测试结果。同时,将 GPR 安置于钢轮压路机前方随压实新进过程测试填筑材料介电常数值,如图 3(a)、图 3(b)所示;研究对比压实过程中 AC 沥青混合料与 SMA 沥青混合料路面 GPR 测试以及核子密度仪测试的介电常数随压实遍数的变化,如图 3(c)、图 3(d)所示,可以发现沥青路面压实过程中材料介电常数与压实遍数具有一定相关性,且 GPR 测试结果数值与规律均与核子密度仪测试结果相近。目前,基于 GPR 技术在沥青路面智能压实上的应用仍处于起步阶段,需要对更多的应用场景及影响因素进行分析。

1.3 基于智能颗粒细观响应原理的压实质量控制

随着一款针对散体介质受力、变形以及稳定性等监测需求研发的颗粒级传感器——智能颗粒(SmartRock)出现,研究者可以从细观尺度研究散体材料在荷载作用下的运动与力学行为。SmartRock 基础最小尺寸为 23 mm 立方体,并可自定义外壳形状,也可裹覆隔温层耐受沥青路面高温作业环境,如图 4 所示。它能够实时采集的主要细观参数包括:温度、应力、四元数(三维欧拉角)、加速度。

研究者等^[10]将智能颗粒引入到沥青路面现场压实试验,如图 5 所示,尝试通过测试颗粒旋转角来反映压路机对沥青混合料搓碾剪切作用的影响,并能

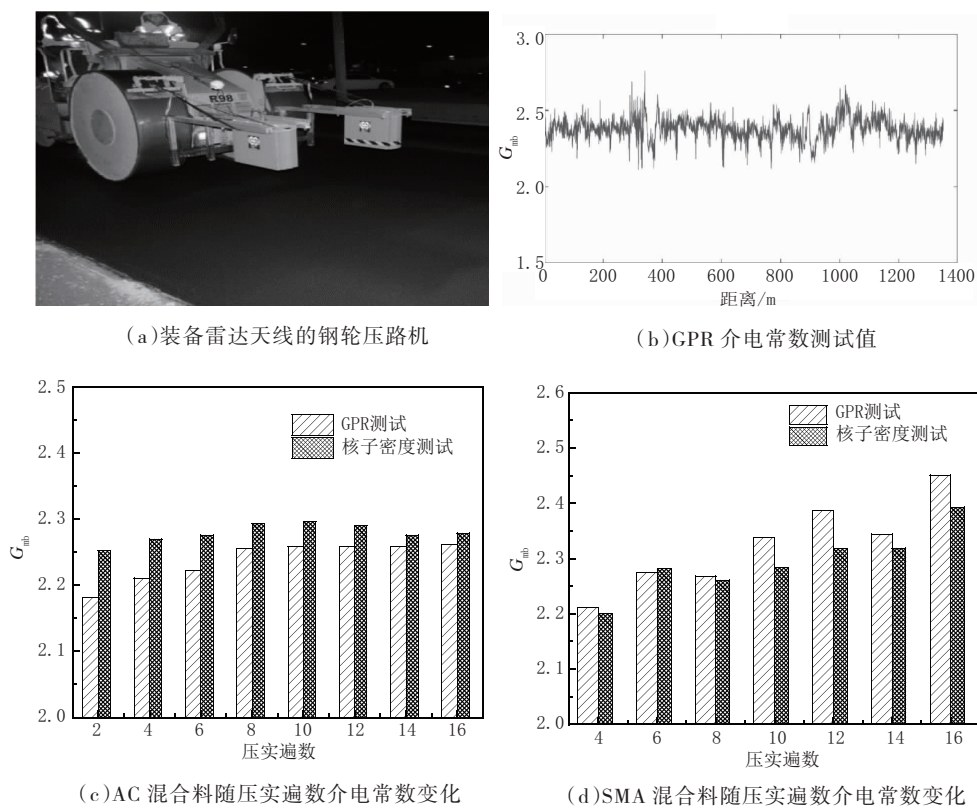


图 3 基于 GPR 的沥青路面压实检测^[9]

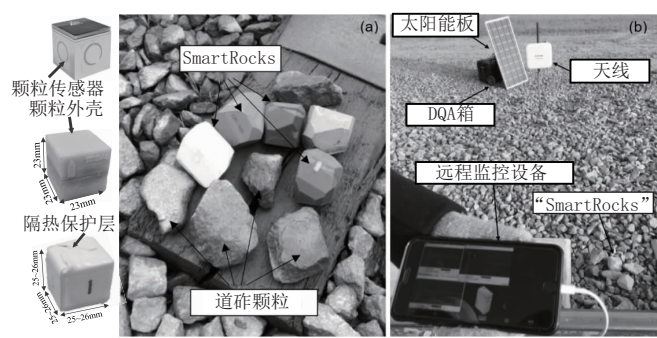


图 4 智能传感器 SmartRock

够表征沥青混合料随压实过程的状态。研究者^[11]通过 SmartRock 测试发现颗粒应力与加速度峰值响应变化均能随着沥青混合料压实的进行呈收敛趋势,如图 6 所示。相比前两类基于沥青路面整体力学与物理参数测试响应分析,智能颗粒则从颗粒细观尺度能够更加直接地反映沥青混合料在受荷作用下的响应行为特征,从而能够更准确地判断填筑材料压实状态,指导施工。

2 研究方向与展望

本文从沥青路面智能压实质量控制原理的角度进行分类讨论。

基于压实机具振动响应的压实质量控制技术相对成熟,但在沥青混合料压实应用中仍面临强非线性导致的相关性差的问题。

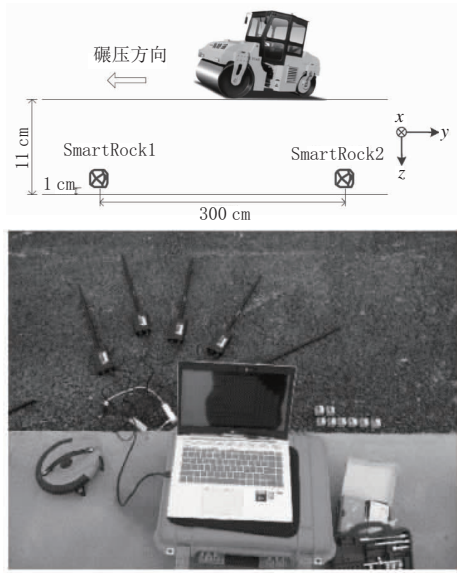


图 5 SmartRock 沥青路面现场测试

通过雷达等设备基于填筑材料反射参数进行压实状态识别技术在沥青路面压实应用的可行性也得到了一定验证,但面对沥青混合料受温度、金属掺料以及水分等影响,需要改进反射信号解析算法,减小对于填筑材料介电常数识别的噪声干扰。

基于智能颗粒传感器技术的测试方法从细观尺度直接获取沥青混合料施工压实过程中颗粒受力及动力学行为特征,使得沥青混合料压实指标能够在体积参数与力学参数上得到统一,可在未来现场施工中推广应用。

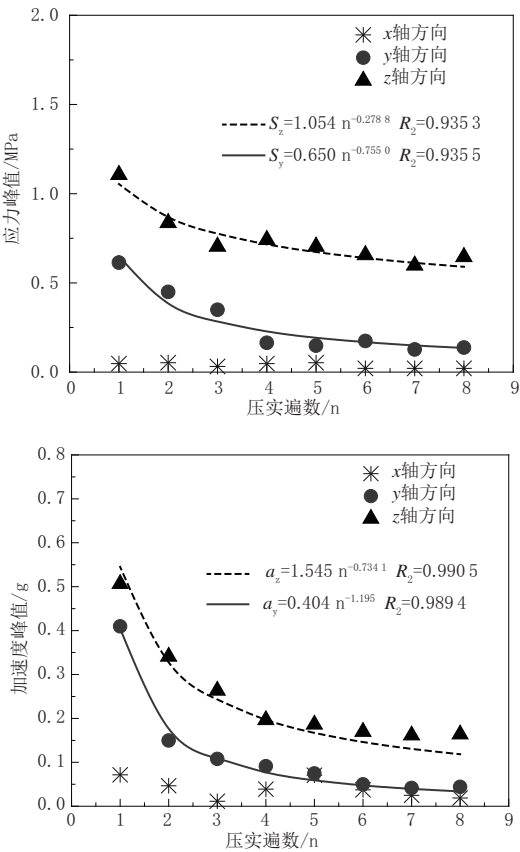


图 6 SmartRock 测试应力与加速度随压实遍数变化^[11]

事实上，对于包含众多影响因素的沥青路面施工场景，仅仅依靠单一理论模型或者传感器难以形成全面反映材料压实状态的压实指标。因此，本文建议可以针对不同压实场景，尝试联合多种传感器，例如振动加速度、温度传感器、探地雷达、智能颗粒以及图像法等，基于多源数据从宏观尺度构建外部机械施工参数与沥青混合料响应关系。在此基础上，结合机器学习等人工智能算法，建立自适应压实指

标，能够反映碾压层实际物理力学性能，以实现真正的智能反馈控制。

参考文献:

[1] 陈军,严红,汤东.基于连续振动压实度值的土石混填路基压实质量评价研究[J].路基工程,2020,213(6):173-176.

[2] 徐光辉,George Chang.智能压实测量值的发展方向[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(4):19-24.

[3] 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):11-21.

[4] 徐光辉,雒泽华,田波.连续压实控制技术综述[J].筑路机械与施工机械化,2015,32(8):1-5.

[5] 徐光辉,高辉,雒泽华,等.连续与智能压实控制技术在高速铁路建设中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(1):30-34.

[6] 张德,程志强,谢胜加.路基路面现场试验振动压实特性指标分析[J].上海公路,2021(4):12.

[7] Lai WWL, D é robert X, Annan P. A review of ground penetrating radar application in civil engineering: a 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis [J]. NDT & E Int,2018,96: 58-78.

[8] Zhao S, Al-Qadi IL.Development of regularization methods on simulated ground-penetrating radar signals to predict thin asphalt overlay thickness[J]. Sig Process,2017,132:261-271.

[9] Wang, S., Zhao, S. & Al-Qadi, I.L. Real-Time density and thickness estimation of thin asphalt pavement overlay during compaction using ground penetrating radar data[J]. Surv Geophys,2020(41):431-445.

[10] Wang, X, Shen, S, Huang, H, et al. Towards smart compaction: particle movement characteristics from laboratory to the field. Constr[J]. Build. Mater. 2019(218):323-332.

[11] Dan, H.-C, Yang, D, Liu, X, et al. Experimental investigation on dynamic response of asphalt pavement using SmartRock sensor under vibrating compaction loading[J]. Constr. Build. Mater.2020(247): 118592.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴，为您提供平台，携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com