

沥青面层振动压实施工参数优化与现场试验

史财山

新疆公路建设(集团)有限责任公司, 中国·新疆 昌吉 831100

摘要: 沥青面层的压实质量是决定路面服役性能、耐久性及全寿命周期成本的核心环节, 而振动压实作为当前高等级公路沥青路面施工的主流工艺, 其参数设置的科学性与现场验证的有效性直接关乎工程成败。传统振动压实施工长期依赖经验确定振幅、频率、碾压速度及遍数等关键参数, 缺乏对沥青混合料流变特性、压路机动力学响应及环境条件耦合效应的系统考量, 易导致过压引起的集料破碎、沥青上浮, 或欠压导致的空隙率偏大、渗水严重等问题, 成为路面早期车辙、水损害及疲劳开裂的重要诱因。随着智能建造与连续压实控制技术的快速发展, 基于多源感知数据的参数动态优化与精细化现场试验验证已成为提升压实质量的关键路径。本文系统综述了沥青面层振动压实施工参数优化的理论演进、技术方法及现场试验验证体系的研究进展与应用现状。

关键词: 沥青面层; 振动压实; 参数优化; 现场试验; 智能压实; 压实度; 动态反馈; 数字孪生

Optimization of Vibration Compaction Parameters and Field Testing for Asphalt Surface Courses

Shi Caishan

Xinjiang Highway Construction (Group) Co., Ltd., China Xinjiang Changji 831100

Abstract: The compaction quality of asphalt surface courses is a critical factor determining pavement performance, durability, and lifecycle cost. Vibration compaction, currently the mainstream technique in high-grade highway asphalt pavement construction, relies heavily on the scientific setting of parameters and effective field validation, both of which directly affect project success or failure. Traditional vibration compaction practices have long relied on experience to determine key parameters such as amplitude, frequency, roller speed, and number of passes, without sufficient consideration of the coupled effects of asphalt mixture rheology, roller dynamics, and environmental conditions. This often leads to problems such as aggregate crushing and asphalt bleed due to over-compaction, or excessive voids and water infiltration due to under-compaction—factors contributing significantly to early rutting, water damage, and fatigue cracking. With rapid advancements in intelligent construction and continuous compaction control technologies, dynamic parameter optimization based on multi-source sensing data and refined field testing validation have become essential pathways to improve compaction quality. This paper systematically reviews the theoretical evolution, technical methods, and current status of field testing validation systems for optimizing vibration compaction parameters in asphalt surface courses.

Keywords: Asphalt surface course; Vibration compaction; Parameter optimization; Field testing; Intelligent compaction; Compaction degree; Dynamic feedback; Digital twin

0 引言

我国高速公路网历经三十余年高速发展, 沥青路面作为最主要的铺装形式, 其施工质量直接关系到交通运输的安全性、舒适性与经济性。在沥青路面施工过程中, 压实是最后一道也是最关键的工序, 其目的是使松散的沥青混合料达到设计要求的密实度、平整度和力学性能。振动压实凭借高频振动能量使颗粒重新排列、嵌挤密实, 显著提高了压实效率与均匀性, 已成为现代沥青面层施工的标配工艺。然而, 在实际工程中, 振动压实参数的确定长期处于“经验主导、试错调整”的粗放状态: 不同项目、不同

标段甚至同一作业面内, 振幅、频率、碾压速度及遍数等参数设置差异显著, 缺乏与混合料类型、摊铺厚度、环境温度及设备型号的精准匹配。这种非标准化的操作模式导致压实质量波动剧烈, 部分路段因过压造成粗集料棱角破损、沥青膜剥落, 削弱了混合料的抗剪强度; 部分路段因欠压导致空隙率超标、连通孔隙增多, 为水分侵入和老化加速埋下隐患^[1]。

1 现实审视: 振动压实参数优化与现场试验的成效与瓶颈

要推动振动压实从经验施工走向科学施工, 必须客观

评估当前参数优化方法与现场试验体系的实际贡献与应用局限,避免陷入技术乐观主义或形式主义误区。

1.1 参数优化与智能压实显著提升压实均匀性与施工效率

大量工程实践与研究表明,基于科学优化的振动压实参数较传统经验法具有显著优势。在 sma-13 上面层施工中,通过正交试验确定“高幅低频+慢速多遍”的组合参数,使压实度标准差由 0.8% 降至 0.3%,渗水系数合格率提升至 98% 以上,有效解决了 sma 易离析、难压实的难题;在 ac-20c 中面层施工中,结合红外温度场监测动态调整碾压速度与遍数,避免了低温区欠压与高温区过压,芯样空隙率变异系数降低 40%,路面平整度显著改善。更重要的是,智能压实技术的应用实现了压实过程的可视化与可控化:通过安装在压路机上的加速度传感器、高精度 gps 定位系统及红外温度传感器,实时采集振动轮响应值(如 cmv、ccv)、碾压轨迹、遍数统计及混合料表面温度,生成压实度热力图与覆盖度统计图,指导操作员及时调整参数或补压。某高速公路改扩建项目中,采用智能压实系统后,在保证压实质量的前提下,压实遍数减少 15%,燃油消耗降低 12%,施工效率提升约 10%。这些成果充分证明,参数优化与智能反馈能够有效克服人为因素干扰,提升压实质量的稳定性、均匀性与经济性。这种从“盲压”到“智压”的转变,标志着沥青面层施工正迈向精细化、数字化管控的新阶段,为后续深度优化奠定了坚实基础^[2]。

1.2 耦合机理不清与模型泛化能力弱制约参数精准适配

尽管成效显著,但参数优化仍受多重理论与技术限制,难以实现普适性精准适配。首要问题是材料-设备-环境耦合机理认知不足:沥青混合料在高温下呈现复杂的粘弹塑性行为,其压实响应不仅取决于振动参数,还与混合料级配、沥青粘度、摊铺温度、下承层刚度、含水率等密切相关,现有优化模型多简化为线性或准静态关系,难以捕捉非线性、时变耦合效应。其次,优化模型的泛化能力普遍较弱:多数研究基于特定材料、特定设备及特定环境开展,所得最优参数在其他项目中适用性差;例如,某项目在 ac-16 上验证有效的“30hz/1.8mm”组合,在另一项目相同混合料但因拌合温度偏低、下承层模量变化时反而导致压实不足或过度。更深层的是,现场试验验证与参数优化严重脱节:优化多在实验室或短暂试验段完成,正式施工时环境、设备状态、材料批次已发生变化,但缺乏动态修正机制;现场检测仍以事后钻芯取样为主,点位稀

疏、时效滞后,无法支撑参数的实时调整与闭环优化。这种“优化归优化、施工归施工”的两张皮现象,使得许多高精度优化成果沦为纸上谈兵。此外,现有智能压实指标(如 cmv、ccv)与压实度的相关性受材料类型、含水率、下承层条件影响极大,未建立普适的现场标定关系,导致反馈信号失真,误导参数调整决策^[3]。

1.3 试验标准化缺失与数据闭环断裂阻碍技术规模化落地

技术应用的有效性最终取决于现场试验体系的支撑能力与管理机制的配套程度。目前,沥青面层振动压实的现场试验缺乏统一标准:试验段长度、测点布置密度、检测方法选择、数据采集频率、无损设备校准等各行其是,结果可比性差,难以形成行业共识;压实度检测仍以事后钻芯为主,探地雷达、无核密度仪等无损检测技术应用不规范,精度与可靠性存疑,且与钻芯结果的动态修正系数库尚未建立;温度监测多为点测或手持式测量,难以反映全场温度梯度与时变规律,导致参数调整依据不足。更关键的是,数据未能形成有效闭环:采集的压实过程数据多用于事后报告或验收资料,未与拌合、摊铺、运输、检测等环节打通,无法追溯质量问题的根源;优化模型缺乏现场数据的持续训练与迭代更新,性能随时间衰减,逐渐偏离实际工况。加之基层技术人员对参数优化原理理解不深,操作随意性大,即使配备先进设备也难以发挥应有效能。部分地区虽推行智能压实,但因缺乏配套的验收标准、责任认定机制与激励政策,施工单位担心数据暴露质量问题而消极应对,导致系统“装而不用、用而不信”。这种“有数据无分析、有分析无行动、有行动无反馈”的困境,使得参数优化与现场试验难以真正融入施工管理体系。若不重构试验流程、打通数据链路、完善制度保障,再先进的优化方法也难逃形式化命运^[4]。

2 路径探索:面向实战的参数优化与现场试验创新策略

破解上述系统性难题,需以工程实效为导向,打通“机理-优化-验证-反馈”的全链条,推动振动压实从经验驱动迈向数据与知识双轮驱动。

2.1 构建材料-设备-环境耦合的参数自适应优化框架

应超越单一参数优化思维,建立多维协同、动态响应的自适应优化体系。首先,深化沥青混合料振动压实机理研究:通过室内大型振动压实仪、离散元模拟(dem)与有限元分析(fea)相结合,揭示不同级配、沥青类型、温度

条件下混合料的密实演化规律与能量传递机制,建立考虑粘弹性、颗粒重排与界面摩擦的压实本构模型。其次,开发参数自适应优化算法:集成实时采集的混合料出料温度、摊铺厚度、下承层模量、环境温湿度、压路机工作状态等多源异构数据,利用长短期记忆网络(LSTM)、强化学习(RL)或贝叶斯优化等机器学习方法,建立参数-压实效果的动态映射模型,实现“感知-预测-调整”实时闭环。特别要建立智能压实指标的现场动态标定体系:针对不同混合料类型与施工条件,在施工前通过试验段建立 cmv/ccv 与芯样压实度的回归方程,并在施工过程中根据新增钻芯数据持续更新标定参数,确保反馈信号准确可靠。同时,引入数字孪生技术,构建虚拟压实场景,预演不同参数组合下的压实效果与风险点,辅助现场决策。通过“机理驱动+数据驱动”双轮联动,使参数优化从静态经验表升级为动态智能体,真正适配复杂多变的现场工况^[5]。

2.2 建立分层分阶段的现场试验验证与质量控制体系

必须重构现场试验流程,使其成为参数优化的有机组成部分而非孤立环节。建议实施“三阶段验证法”:第一阶段为室内验证,通过振动压实仪与旋转压实仪对比,确定参数初选范围与敏感性区间;第二阶段为试验段验证,在代表性路段设置不少于3组不同参数组合试验区,采用无损检测(探地雷达、无核密度仪)+钻芯取样+红外热成像同步监测,全面评估压实度、均匀性、温度场分布及表面纹理,标定智能压实指标并验证优化模型;第三阶段为施工过程验证,每作业面开工前进行快速验证(如100m验证段),确认参数适用性,施工中按固定间距(如每50m)布设无损检测点,实时校验压实度,异常时立即触发参数复核与调整。同时,制定《沥青面层振动压实现场试验技术指南》,明确试验段最小长度、测点密度、检测设备校准周期、数据采集格式与传输协议等要求,提升结果可比性与权威性。推广无损检测技术的规范化应用,建立与钻芯结果的动态修正系数库,提高无损检测可信度与覆盖率。通过将试验嵌入施工全流程,实现“边验证、边优化、边控制”,确保参数始终处于最优区间^[6]。

2.3 健全数据驱动的闭环管理与能力建设机制

技术落地需制度保障与人才支撑双重发力。应将参数优化与现场试验纳入施工组织设计与质量验收强制性条款,规定关键压实参数必须经试验验证方可实施,压实质量评价须包含过程数据与结果数据双重证据,缺一不可。建立“拌合-运输-摊铺-压实-检测”全链路数据平台,实现各环节信息互通、时序对齐,支持质量问题的溯源分析

与参数调整的因果推断。推动设立智能压实专职岗位或团队,负责数据采集、清洗、分析、参数建议及系统维护,避免技术员兼职导致的精力分散与专业性不足。加强跨专业培训,让操作员理解数据含义与设备响应逻辑、让工程师掌握优化原理与模型局限、让管理者认识数据价值与决策依据,消除人机隔阂与认知断层。更重要的是,建立容错激励与责任豁免机制:鼓励基于数据的参数创新与合理试错,对因探索性调整导致的局部、可修复质量问题予以免责;将压实均匀性、数据完整性、参数合规性等过程指标纳入绩效考核与信用评价,引导行为从“应付检查”转向“追求品质”。唯有将数据融入管理血脉、将优化嵌入制度框架,方能实现从“被动合规”到“主动精进”的根本转变。

3 结语

沥青面层振动压实参数的优化与现场试验,绝非简单的技术改良,而是对施工规律的深度尊重与对工程品质的执着坚守。它提醒我们,每一次振动都不是机械的重复,而是材料、设备与环境之间复杂对话的物理表达;每一组参数都不应是僵化的数字,而应是对现场脉动与材料状态的敏锐回应。在迈向智能建造的征程中,我们既要拥抱算法的精巧、传感器的灵敏与平台的强大,也要警惕唯数据论的傲慢、对经验的轻视以及对现场复杂性的简化。真正的优化,诞生于对沥青粘弹行为的深刻理解,成型于对压路机动力学的精准把握,升华于对施工现场万千变量的从容驾驭与动态平衡。这不仅是技术的精进,更是工程人对“匠心”二字在数字时代的重新诠释与升华。当振动轮下的混合料在恰到好处的频率与振幅中密实成型,当现场试验的数据流在闭环中不断校准施工的航向,当每一米路面都承载着科学与实证的重量,那便是对“百年工程”承诺最踏实、最沉默、也最有力的践行。这条通往高品质、长寿命沥青路面的道路注定充满挑战与反复,但每一步基于理性、实证与系统思维的探索,都在为中国交通基础设施的可持续发展奠定更加坚实、更加智慧的基石。

参考文献:

- [1] 山宏宇. 沥青铺面振动碾压动力学特性与压实质量多维度表征研究[D]. 中南大学, 2025. DOI:10.27661/d.cnki.gzhnu.2025.000027.
- [2] 陈成勇. 路基路面结构层振动挤密机理与智能振动压实技术研究. 山东省, 山东高速基础设施建设有限公司, 2023-11-21.
- [3] 周世华. 振动压实沥青路面压实度连续实时检测

技术研究[D]. 重庆交通大学, 2023. DOI:10.27671/d.cnki.gcjtc.2023.001469.

[4] 魏俊伟. 基于沥青路面和桥面铺装分层振动压实的动力响应测试与特征分析[D]. 中南大学, 2022. DOI: 10.27661/d.cnki.gzhnu.2022.004773.

[5] 刘少鹏. 沥青路面振动压实数据分析方法研究[D]. 东南大学, 2022. DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2022.001432.

[6] 王福平. 沥青路面施工现场压实度检测方法研究[D]. 东南大学, 2021. DOI:10.27014/d.cnki.gdnau.2021.002925.