

价格上涨3%”和“沥青损耗率超出标准1.5%”，而不是单一因素造成的；③偏差预警，设置不同偏差预警阈值（轻度偏差 $\pm 3\%$ 含以内，中度偏差 $\pm 3\%$ 至 $\pm 5\%$ ，重度偏差 $> \pm 5\%$ ），当偏差达到预警阈值时，平台会自动为项目管理团队发出预警信息，确保及时介入^[3]。

4.3 策略生成环节：基于数据驱动的差异化调整策略制定

策略生成环节要按照偏差原因和偏差等级来制订不同造价调整策略，不能“一刀切”：通过工程量偏差调整策略，由于设计方案优化导致工程量偏差，要结合BIM模型重新计算工程量，调整造价预算；由于施工浪费（比如材料损耗率过高）导致工程量偏差，要改进施工工艺，制定材料节约措施，调整后续阶段材料采购预算；同时，通过成本波动调整策略，由于材料价格上涨导致成本超支，可采用批量采购、长期协议采购等方式降低价格风险，或者在确保工程质量前提下更换性价比更高材料；由于人工成本上涨导致成本超支，可优化施工流程，增加机械化作业比例来降低人工需求；此外，外部因素调整策略，由于政策法规变化导致偏差，要重新核算合规成本，申请造价追加或者调整项目资金计划，由于自然灾害导致偏差，要启动应急预案，调整施工计划，核算修复成本，纳入造价调整范围。所有调整策略需通过数字化平台进行模拟测算，分析策略实施后造价变化，确保策略可行性。

4.4 执行反馈环节：构建动态跟踪与效果评估的闭环体系

执行反馈环节是确保调整策略落地见效重要环节，需对策略执行过程进行实时监控，并且要评价执行效果：在策略执行跟踪方面，利用数字化平台将调整策略拆分成具体任务，分发到相应部门和责任人，实时跟进任务完成进度，比如将“改进沥青采购计划”这个任务分为采购部门，跟进采购合同签订情况以及材料进场时间；在效果评定方面，在策略执行后，再次收集有关数据，将执行前后造价差异变化进行比较，以此来评估策略有效性，实行沥青采购改善策略后，若沥青成本偏差由原来+4%降低到+1%，那么就可以认为该策略是有效的；在机制改进方面，如果策略执行效果达不到预期（偏差仍然没有减小），就需重新分析偏差原因，对策略进行调整或优化数据采集、偏差分析环节参数（偏差预警阈值、归因算法等），形成闭环优化，确保机制适应性和科学性^[4]。此外，需要建立多部门协同反馈渠道，定期召开跨部门复盘会议，共享执行数据、经验教训。经由案例库搜集典型问题的解决办法，给后续类似策略改良给予参照，不断改善路面抗滑检测及改良工作的一般水平。

5 机制运行的保障措施

5.1 技术保障：加强数字化计量技术的集成与适配

一方面，需增加大数据技术集成投资，提高其与合同计量场景的适配性，保证模块精准交互核验、合同清单数据，满足计量审核需求；另一方面，开发高速EPC专用数字平台，改变数据采集频率和算法，根据计量关键点位优化，覆盖计量核心环节和施工全过程；此外，加强技术培训，提高项目团队数字化操作水平，发挥好技术工具的作用。

5.2 组织保障：建立跨部门协同的造价管控组织架构

通过成立设计、采购、施工、造价、技术等部门成员组成造价动态控制小组，确定各部门在数据采集、偏差分析、策略执行等方面职能分工，防止重复和遗漏；同时，建立定期联合会议制度，使用数字化平台展开线上会谈，即时共享造价偏差情况和对策方案，确保信息一致性；此外，健全绩效考核机制，将造价控制成效列入部门以及个人绩效考核指标中，促使团队参与动态调整。

5.3 风险保障：构建数字化造价风险防控体系

首先，创建造价风险数据库，利用数字化平台收集高速EPC项目历史造价风险案例（材料价格大幅波动、地质条件突然变化等），为风险预估提供参照；其次，利用数字化平台开展风险模拟，在项目开始前模拟各种风险因素对造价产生影响，制定相应风险应对措施；最后，加强数据安全管理工作，采用区块链技术对造价数据进行加密，防止数据泄露或者被篡改，确保数据真实性、完整性和安全性。

6 结语

本文以数字化计量技术优势为基础，针对高速EPC项目造价控制中痛点，构建数据采集、偏差分析、策略生成、执行反馈造价动态调整闭环，确定各个阶段主要内容和相应技术支持，并提出技术、组织、风险三个方面保障措施。将造价控制由静态核算变成动态调节，使控制更加及时准确。后续就人工智能算法在偏差归因以及策略生成应用展开研究，利用机器学习来改进模型；结合具体实践来验证机制可行性有效性，完善细节，形成可以复制推广经验。

参考文献

- [1] 马一格.公路工程造价动态调整机制及优化方法研究[J].汽车周刊,2025,(12):214-216.
- [2] 黄晓梅.建筑工程造价管理中数字化技术的应用[J].重庆建筑,2025,24(09):36-39.
- [3] 孙鲁楠,董通,任泽俭.建筑工程造价审核中材料价格动态调整机制探讨[J].建筑与预算,2025,(07):37-39.
- [4] 黎义琴.数字化转型的建筑工程造价精细化管理策略[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(02):139-141.

Comparison and Optimization of Anti-skid Test Methods for High-speed Asphalt Pavement

Yan Sun

Yunnan Yunling Expressway Engineering Consulting Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650000, China

Abstract

The anti-skid performance of highway asphalt pavements directly determines traffic safety, and the scientific accuracy of testing methods critically impacts pavement quality. This study systematically compares core anti-skid performance indicators, evaluating mainstream testing methods—including pendulum friction coefficient measurement, dynamic friction testing, and construction depth determination (manual sand-laying method and laser construction depth meter method)—in terms of their operational mechanisms, technical features, and application scenarios. A comprehensive analysis is conducted on each method's advantages and limitations regarding detection precision, operational efficiency, and environmental adaptability. Considering the complex service environments and diverse traffic loads of highway asphalt pavements, the paper proposes optimization strategies focusing on method combination, equipment upgrades, and standardized testing procedures. These recommendations provide theoretical support and practical references for enhancing the reliability and engineering applicability of anti-skid performance testing in asphalt pavement systems.

Keywords

highway; asphalt pavement; slip resistance; test and detection method; comparative analysis

沥青路面抗滑性能试验检测方法对比和优化

孙艳

云南云岭高速公路工程咨询有限公司, 中国·云南 昆明 650000

摘要

高速公路沥青路面抗滑性直接决定行车安全, 试验检测方法是否科学、准确直接影响到路面的使用质量。本文从路面抗滑性能核心指标入手, 对摆式摩擦系数测定法、动态摩擦测试法、构造深度测定法(手工铺砂法、激光构造深度仪法)等主流检测方法的原理机制、技术特点、适用场合进行系统比较, 对各种方法在检测精度、操作效率、环境适应性等方面的优缺点进行深入分析。根据高速公路沥青路面服役环境复杂、行车荷载多样的实际情况, 从检测方法组合优化、设备技术升级、检测流程规范化三个方面提出优化路径, 为提高沥青路面抗滑性能检测的可靠性、工程应用价值提供理论支持和实践参考。

关键词

高速公路; 沥青路面; 抗滑性能; 试验检测方法; 对比分析

1 引言

高速公路是交通运输的重要枢纽, 沥青路面由于平整度好、施工速度快等优点成为高速公路的主要结构形式, 但由于长期受到行车荷载和环境因素的影响, 抗滑性能会逐渐下降, 造成雨天侧滑等安全问题, 据估计超过 30% 的雨天交通事故是由这些原因导致的。路面抗滑性能取决于宏观构造与微观纹理, 现有的检测方法由于原理、技术存在差异, 因此表现出的相关性、适用性也不一样, 有些还存在操作复杂的弊端。因此, 系统比较各种主流检测方法的特性, 确定适用边界和局限性并提出优化方案, 对于提高检测精度、确保行车安全有着重大意义。本文通过系统对比与优化研究,

为路面抗滑检测实践提供更科学的技术指引。

2 高速公路沥青路面抗滑性能核心指标

沥青路面抗滑性能的评价要依靠量化指标来完成, 主要指标有摩擦系数和构造深度, 二者从不同角度体现路面抗滑能力, 一起形成抗滑性能评价体系。

摩擦系数是轮胎与路面接触时产生的切向摩擦力与法向压力之比, 直接体现路面抵抗轮胎滑动的能力, 是评价路面抗滑性能最重要的指标。根据测试条件的不同分为静态摩擦系数和动态摩擦系数, 动态摩擦系数更接近于车辆行驶过程中实际的工况, 更能真实的反映车速、路面湿度等对防滑性能的影响, 在高速公路路面检测中应用较多。

构造深度是路面表层凹凸不平的宏观纹理深度, 能体现路面对水分的截留作用, 间接影响摩擦系数的有效发挥。路面构造深度不够时, 雨天行驶容易产生水膜, 造成轮胎和

【作者简介】孙艳(1990-), 女, 中国云南普洱人, 本科, 工程师, 从事公路工程试验检测研究。

路面脱离,产生水漂现象,大大降低抗滑性能;合理的构造深度可以迅速排出接触面的雨水,确保轮胎和路面的有效接触,保持良好的抗滑效果。因此构造深度和摩擦系数一起决定沥青路面抗滑服役性能。

3 主流抗滑性能试验检测方法对比分析

3.1 摩擦系数检测方法

3.1.1 摆式摩擦系数测定法

摆式摩擦系数测定法是根据摆锤的摆动原理来测定的静态检测方法,模拟轮胎与路面的滑动摩擦过程,测量摆锤底部橡胶片在路面上滑动时的摩擦阻力,从而换算出路面的摩擦系数(BPN值)。该法的优点主要是设备结构简单,操作方便,成本低,既可进行室内试验又可用于现场局部检测,适合对路面局部破损、抗滑性能异常区等进行定位。

摆式摩擦系数测定法存在明显缺陷:第一,测试过程是静态的,不能反映车辆行驶时的动态摩擦特性,测试速度只有2.5km/h,和高速公路实际行车速度(60~120km/h)相差较大,检测结果与实际抗滑性能偏差大;第二,橡胶片的材质、硬度、磨损情况都会对测试结果产生很大影响,需要经常更换校准,否则容易造成系统误差;第三,受环境因素影响大,雨天、路面有积水或者灰尘时都会导致检测结果的差异性,且路面的表面温度不同也会使检测结果出现差异;第四,人为影响因素大,试验操作人员在仪器的调平、洒水量的大小、释放摆锤的力度和方式等都会对检测结果产生影响,且不同的操作人员之间存在系统系的偏差,而且检测范围有限,不能反映路面抗滑性能的整体分布特征。

3.1.2 动态摩擦测试法(DFT)

动态摩擦测试法是以动态摩擦原理为基础的一种新的检测方法,以20km/h到80km/h的速度驱动测试轮在路面上滚动,同时施加一定大小的法向力来测量轮胎和路面之间动态摩擦系数。该方法可以模拟不同的行车速度,获得更贴近实际行车工况的路面抗滑性能测试数据,检测效率高,可以实现连续式检测,能反映整个路段路面抗滑性能的空间变化规律。

动态摩擦试验法的优点主要有三点:第一,试速可调,可以观测车速变化对摩擦系数的影响,给不同的路段抗滑性能的评价提供更为准确的数据参数;第二,采用真胎或模拟轮胎材料进行实验,试验结果相关度高;第三,较强的环境适应性,在路面轻微积水、潮湿等条件下都能正常工作,适合各种天气下现场检测。但是该方法也存在不足之处,设备购置成本高,操作复杂,对操作人员的技术要求高;测试过程中受路面平整度影响较大,路面存在明显的起伏或者坑槽时,容易造成法向压力不稳定,影响检测精度。

3.2 构造深度检测方法

3.2.1 手工铺砂法

手工铺砂法是传统的构造深度检测方法,将一定体积

的标准砂均匀铺在路面上指定区域,测量砂粒覆盖的面积,用体积和面积的比值来计算构造深度(TD)。操作简单、设备成本低,不需要复杂的仪器,在基层养护、低等级公路检测中应用较多。

手工铺砂法存在明显的不足之处:首先,受人为因素影响很大,砂粒的铺洒均匀度、面积测量的准确程度显著影响检测结果的精度,不同操作人员的检测结果偏差可达15%以上,检测结果重复性较差;其次,检测效率低,每次检测需要单独划定区域、铺砂、测量,不能实现连续检测,不能反映路面构造深度的整体分布;再者,受路面杂物、积水的影响较大,检测前必须先清理路面,否则会导致检测结果失真。

3.2.2 激光构造深度仪法

激光构造深度仪法属于一种基于激光测距原理的新型检测方法,借助激光传感器对路面表面进行快速扫描,得到路面微观纹理的三维坐标数据,再通过图像处理技术来算出构造深度。该方法主要优点有:第一,检测效率高,可以实现连续性快速检测,在交通不受影响的情况下完成全路段检测;第二,检测精度高,激光传感器的测距精度可达0.01mm,能够准确捕捉到路面微观纹理特征,而且避免了人为操作误差;第三,数据处理自动化程度高,可以实时生成构造深度分布图谱,方便以后的分析评价。

激光构造深度仪法也存在一些局限性:一是设备购置和维护成本高,对基层检测单位的资金实力要求较高;二是受路面污染物影响较大,当路面存在油污、浮尘等覆盖物时,会遮挡激光信号,造成检测结果偏差;三是对检测环境的光照条件有一定要求,强光或者逆光环境下会影响传感器的信号接收精度。

3.3 各方法综合对比

从上面可知,传统的检测方法(摆式摩擦系数测定法、手工铺砂法)虽然检测成本低,操作简单,但是检测精度低,检测效率低,检测受人为因素和环境因素影响大,适合局部排查、基层养护和低等级公路检测;新型检测方法(动态摩擦测试法、激光构造深度仪法)检测精度高、检测效率高、检测数据代表性高,更适合高速公路全路段、精细化检测,但是设备成本高、技术门槛高。各方法的核心特性比较见表1。

4 抗滑性能试验检测方法优化策略

4.1 检测方法组合优化

为了克服单一检测方法的不足,应该用传统方法和新型方法相结合的方式来进行检测,达到优势互补。高速公路日常养护检测主要采用动态摩擦测试法、激光构造深度仪法,对全路段实施连续式检测,迅速取得路面抗滑性能的整体散布数据;对于检测过程中发现的抗滑性能异常地段,比如摩擦系数或者构造深度低于规范阈值的路段,使用摆式摩擦系数测定法和手工铺砂法开展局部精细复核,准确找到破