

沥青路面平整度试验检测技术应用

苟 樾

(四川川交路桥有限责任公司, 四川 广汉 618300)

摘 要 平整度是沥青路面核心服役性能指标, 其通过车路耦合振动效应直接决定行车安全舒适性、路面结构动力响应特性及全生命周期服役寿命, 试验检测技术的精准应用是路面施工质量全流程管控的核心。本文以某一级公路沥青路面工程为依托, 系统阐释 3 m 直尺法、连续式平整度仪法、激光平整度仪法、颠簸累积仪法的检测机理与数学模型, 开展各技术的测量不确定度评定与数据相关性分析, 完成检测全流程的误差溯源, 最终提出检测技术优化与精度管控体系, 旨在为沥青路面平整度精准检测、质量科学评价提供工程实践参考。

关键词 沥青路面; 平整度; 试验检测技术; 测量不确定度

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.014

0 引言

沥青路面因行车平顺性好、抗滑性能优异、施工便捷等优势, 已成为我国高等级公路的主流路面结构形式。路面平整度是表征路面纵断面凹凸特性的核心指标, 不仅直接影响行车安全与舒适性, 更会通过车路耦合振动放大路面动荷载冲击, 加速结构层疲劳开裂、车辙等病害发展, 大幅缩短路面服役年限^[1]。试验检测是沥青路面平整度量化管控的核心手段, 当前常用检测技术分为断面类直接检测与响应类间接检测两大体系, 各类技术的精度、效率与适用场景差异显著, 工程中普遍存在仪器校准不规范、操作流程不标准等问题, 导致检测结果偏差超标, 引发质量评价争议^[2]。基于此, 本文依托实际工程开展系统分析, 以期为深化平整度检测技术的工程应用提供参考。

1 工程概况

本文依托某一级公路沥青路面新建工程, 项目设计时速 80 km/h, 双向四车道, 路线全长 5.2 km。项目所在区域为亚热带季风气候, 夏季高温多雨, 对沥青路面平整度控制要求较高。路面采用半刚性基层沥青路面结构, 自上而下为 4 cm AC-13C 改性沥青上面层、6 cm AC-20C 中面层、8 cm AC-25C 下面层, 基层为 20 cm 水泥稳定碎石, 底基层为 18 cm 级配碎石^[3]。

根据《公路工程质量检验评定标准 第一册 土建工程》(JTG F80/1-2017) 规范与设计要求, 上面层平整度控制标准为: 国际平整度指数 $IRI \leq 2.0$ m/km, 连续式平整度仪标准差 $\sigma \leq 1.2$ mm, 3 m 直尺最大间隙 ≤ 2.5 mm。施工过程中对各结构层开展递进式平整

度检测, 结合施工工序需求, 采用 3 m 直尺法、连续式平整度仪法、激光平整度仪法、颠簸累积仪法, 构建“局部检测—整体检测—验收检测—快速筛查”的全流程检测体系。

2 沥青路面平整度核心检测技术的机理与应用

2.1 3 m 直尺法

3 m 直尺法是断面类直接检测的基础方法, 核心适用于施工过程局部质量控制, 尤其针对沥青路面施工缝、摊铺机搭接带等关键部位的细节检测。其检测机理为几何基准测量法, 以 3 m 长刚性直尺为纵向基准, 贴合路面后通过塞尺测量直尺与路面的最大间隙, 即为该测点平整度偏差值, 数学模型为:

$$h_{\max} = \max |z(x) - z_{\text{ref}}(x)|, x \in [0, 3m] \quad (1)$$

式(1)中: $h_{\max}$ 为最大间隙 (mm); $z(x)$ 为路面实测高程函数; $z_{\text{ref}}(x)$ 为直尺基准线高程函数。

该技术操作简便、成本低廉, 适用于局部点位检测, 工程应用中每个测点重复检测 3 次取平均值, 每 200 m 设置 1 个检测断面, 每个断面布设 5 个检测点位, 重点管控施工接缝等薄弱部位的平整度。其误差主要来源于直尺自身形位偏差、人工操作不规范与环境干扰, 需通过标准化操作降低随机误差。

2.2 连续式平整度仪法

连续式平整度仪法属于连续式断面类检测技术, 检测效率与数据全面性优于 3 m 直尺法, 适用于各结构层施工后的大面积整体平整度检测, 是工程中最常用的过程管控技术。其检测机理为位移传感连续测量, 通过牵引设备带动仪器匀速行驶, 测量轮随路面凹凸

作者简介: 苟樾 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

产生的垂直位移,经传感器转化为电信号后,输出平整度标准差 σ 、IRI 等核心指标,标准差计算模型为:

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^N(d_i-\bar{d})^2}\quad(2)$$

式(2)中: σ 为平整度标准差(mm); d_i 为第*i*个采样点位移测量值; $\bar{d}$ 为测量值算术平均值; N 为采样点总数。

本工程采用 3.6 m 轨式连续式平整度仪,采样间距 100 mm,检测前完成测量轮、位移传感器与数据采集系统的校准,检测时牵引速度严格控制在 5 km/h 匀速行驶,避免加减速引发的测量轮弹跳误差,每 100 m 输出一组平整度指标,实现路面平整度的连续化定量化表征。

2.3 激光平整度仪法

激光平整度仪法是高等级公路验收阶段的主流高精度检测技术,属于非接触式断面类检测技术,依托激光测距实现路面高程的高速、高精度连续测量,检测结果是路面平整度验收的核心依据。其检测机理为激光三角测距原理,车载激光传感器向路面发射激光脉冲,经反射后被传感器接收,结合激光传播时间差与三角几何关系计算垂直距离,再通过惯性导航单元修正车辆姿态误差,还原路面真实纵断面高程,最终通过 1/4 车模型计算 IRI,核心高程模型为:

$$h(x)=H-L(x)-\Delta h_{pose}(x)\quad(3)$$

式(3)中: $h(x)$ 为路面真实高程(mm); H 为传感器安装基准高度; $L(x)$ 为传感器实测距离; $\Delta h_{pose}(x)$ 为车辆姿态误差修正值。

本工程采用车载式八激光束平整度仪,采样频率 10 kHz,纵向采样间距 10 mm,检测前完成传感器测距精度校准与系统级精度验证,检测时车辆以 80 km/h 匀速行驶,每 10 m 输出一组检测数据。该技术检测效率较传统技术提升 15 倍以上,测量不确定度降低 30% 以上,是目前精度最高的路面平整度检测技术^[4]。

2.4 颠簸累积仪法

颠簸累积仪法属于响应类间接检测技术,通过车辆行驶振动响应间接表征路面平整度,检测效率高、成本低,适用于施工质量快速巡检与养护阶段大范围筛查,

可快速定位平整度超标路段。其检测机理基于车路耦合振动理论,路面凹凸引发车辆悬架垂直振动,通过位移传感器采集振动相对位移累积值(VBI),VBI 值与路面平整度呈正相关,核心单自由度车路耦合振动模型为:

$$m\ddot{y}+c\dot{y}+ky=kq(x)+c\dot{q}(x)\quad(4)$$

式(4)中: m 为车辆非悬挂质量; c 为悬架阻尼系数; k 为悬架刚度; y 为车身垂直位移; $q(x)$ 为路面高程激励。

在工程应用中,检测前完成传感器校准与 VBI-IRI 相关性标定,检测时车辆以 50 km/h 匀速行驶,每 100 m 输出一组 VBI 数据,通过标定模型转换为 IRI 值。该技术无法精准表征局部平整度细节,但可高效完成全路段整体评价,弥补了其他技术大范围巡检效率不足的短板。

3 检测技术的测量不确定度评定与数据相关性分析

3.1 测量不确定度评定

测量不确定度是表征检测结果分散性的核心参数,本文依据《测量不确定度评定与表示》(JJF 1059.1-2012)规范,采用 A 类与 B 类结合的方法,对四种技术的测量不确定度进行系统评定。A 类不确定度由重复测量随机误差导致,通过贝塞尔公式计算;B 类不确定度由系统误差导致,来源于仪器示值误差、校准误差、环境影响等,最终合成标准不确定度。

以本工程上面层 IRI 值检测为例,四种技术的扩展不确定度($k=2$,置信概率 95%)评定结果见表 1。结果显示,激光平整度仪法测量不确定度最小,检测精度最高,适用于验收阶段精准评价;3 m 直尺法相对不确定度最大,仅适用于局部施工过程控制;连续式平整度仪法与颠簸累积仪法精度居中,适用于施工过程大面积检测与快速筛查。

3.2 数据相关性分析

基于本工程全路段 52 组检测数据,采用最小二乘法建立各技术检测结果的线性回归模型,分析数据相关性,结果见表 2。

分析表明,四种技术的检测结果均具有显著线性相关性;3 m 直尺法与其他技术相关性相对较低,源于其局部检测的特性,无法反映路段整体平整度水平。

表 1 不同平整度检测技术的扩展不确定度评定结果

检测技术	测量平均值 (IRI, m/km)	合成标准不确定度 (m/km)	扩展不确定度 (m/km)	相对扩展不确定度
3 m 直尺法	1.82	0.164	0.328	18.02%
连续式平整度仪法	1.76	0.087	0.174	9.89%
激光平整度仪法	1.74	0.032	0.064	3.68%
颠簸累积仪法	1.85	0.126	0.252	13.62%

表 2 不同检测技术检测结果的相关性分析

回归模型	拟合方程	相关系数 R^2	显著性水平 P
激光 IRI- 连续式 σ	$IRI=0.862\sigma+0.714$	0.972	< 0.001
激光 IRI-3 m 直尺 h_{max}	$IRI=0.527h_{max}+0.486$	0.895	< 0.001
激光 IRI- 颠簸累积 VBI	$IRI=0.0021VBI+0.328$	0.926	< 0.001

工程中可通过拟合方程实现不同技术检测结果的相互转换，建立统一的平整度评价尺度。

4 沥青路面平整度检测精度提升的管控体系

4.1 仪器校准与性能验证体系

仪器性能是保障检测精度的核心前提，需构建“日常核查—周期校准—工程前标定”的三级管控体系。明确各类仪器校准周期：3 m 直尺每 3 个月开展日常核查，每年第三方校准；连续式平整度仪、激光平整度仪、颠簸累积仪每 6 个月开展第三方计量校准。每次检测前，在标准校准路段完成仪器性能验证，以校准后的激光平整度仪结果为基准，确保检测偏差在规范允许范围内，同时建立仪器全生命周期管理档案，实现仪器性能可追溯管控^[5]。

4.2 基于路面功率谱密度的检测数据处理与异常值识别技术

数据处理方法的科学性直接决定平整度评价结果的准确性，需摒弃传统的简单数据统计方法，构建基于路面功率谱密度（PSD）的精细化数据处理体系。

路面功率谱密度可表征路面纵断面凹凸不平度在空间频率上的分布特性，是比 IRI、 σ 更全面的平整度评价指标，可精准识别不同波长的路面不平顺成分。通过对检测得到的路面纵断面高程数据进行傅里叶变换，计算路面功率谱密度，划分短波长（ $< 0.5\text{ m}$ ）、中波长（ $0.5\text{ m} \sim 10\text{ m}$ ）、长波长（ $> 10\text{ m}$ ）不平顺成分，分别对应行车舒适性、车辆动荷载、路面结构响应的核心影响频段，实现平整度的多维度精细化评价。

同时，建立基于格拉布斯准则的异常值识别与剔除机制，对检测数据进行显著性检验，剔除仪器故障、操作失误、路面异物干扰导致的异常数据，避免无效数据影响整体评价结果。规范数据记录与存档要求，完整留存检测原始数据、环境参数、仪器校准记录、操作过程影像资料，建立检测数据电子档案，实现检测全流程的可追溯、可复核。

4.3 多技术融合的沥青路面平整度全施工周期动态管控体系

基于不同检测技术的技术特性与适用场景，构建“递进式、多维度、全周期”的平整度动态管控体系。

在底基层、基层施工阶段，采用 3 m 直尺法与连续式平整度仪法组合检测；在下面层、中面层施工阶段，采用连续式平整度仪法与颠簸累积仪法组合检测，实现大面积施工质量的连续管控与快速筛查，及时整改平整度超标路段；在上面层施工完成后，采用激光平整度仪法开展全路段高精度验收检测，结合 3 m 直尺法对施工接缝、局部点位进行细节复核，确保路面平整度全面满足设计与规范要求。

同时，建立平整度施工偏差溯源机制，根据检测结果分析平整度超标原因，针对性优化沥青混合料摊铺、碾压施工工艺，形成“检测—分析—优化—再检测”的闭环管控体系。

5 结束语

本文系统阐释了四类沥青路面平整度检测技术的检测机理与数学模型，依托实际工程完成了测量不确定度评定与数据相关性分析，最终构建了平整度检测精度提升的全流程管控体系。结果表明，激光平整度仪法检测精度最高，四类技术检测结果具有显著线性相关性，可通过拟合模型实现结果转换；通过仪器校准、操作标准化、全周期管控等措施，可有效降低检测结果的不确定度，提升检测精准性。未来，需进一步深化平整度检测与智能化技术的融合，建立平整度与路面服役寿命的量化关联模型，推动平整度检测从质量验收指标向全生命周期管控核心参数升级。

参考文献：

[1] 贺登高.高速公路沥青路面试验检测技术的应用[J].大众标准化,2025(19):179-181.
[2] 申万青.基于多传感器融合的路面平整度检测探析[J].交通世界,2025(17):40-42.
[3] 李文.沥青公路路面试验检测技术应用分析[J].运输经理世界,2025(12):29-31.
[4] 储浩.沥青路面平整度影响因素及控制措施[J].交通世界,2024(14):54-56.
[5] 刘务波.公路工程沥青路面施工现场试验检测技术[J].工程建设与设计,2023(14):112-114.