

高原公路路面平整度检测方法研究

张雪 吴欣航 帅逸诚 达瓦

西藏大学工学院 西藏 拉萨 850000

摘要: 路面平整度是评估道路质量的关键指标。文章介绍了高原公路战略意义及高原公路路面平整度检测的特殊挑战,探讨了常用检测方法,包括3m直尺法、连续式平整度仪法、车载式颠簸累积仪法、车载激光雷达扫描和机载激光雷达检测的定义以及在高原应用的优缺点;此外,文章研究了机载激光雷达现场检测的操作过程、数据处理和结果生成,从而确保准确的平整度评估。

关键词: 高原公路; 路面平整度; 检测方法

引言:

随着国家“交通强国”战略与区域协调发展政策的深度推进,高原地区作为边疆治理与经济开发的关键节点,其交通基础设施建设取得显著突破。以西藏自治区为例,克服了高寒、冻土、复杂地形等极端条件,截至2022年公路总里程已突破12万公里。西藏高原的特殊性对路面平整度构成多重挑战,年均3000小时以上的强紫外线加速沥青老化,昼夜25℃以上的温差引发冻融循环,导致路基冻胀融沉的速率较平原地区快2-3倍,叠加冻土区热稳定性波动,加剧路面不均匀沉降。路面平整度作为表征高原公路服役性能的核心指标,其量化水平直接关联多维度价值。从行车安全看,平整度劣化会导致车辆竖向振动幅值增加,显著提升操控风险;从经济成本看,基于国际平整度指数(IRI)测算,路面不平整会使车辆燃油消耗增加;从全生命周期看,平整度衰减速率与路面病害演化呈正相关,未及时干预将使养护成本攀升。

在此背景下,公路路面平整度检测成为预防性养护的关键环节,其通过精准捕捉早期缺陷,可为养护决策提供预警。本研究聚焦西藏高原场景,系统梳理不同平整度检测方法的高原适配性,优化检测步骤与操作规范,保障数据准确性与可靠性,为高原公路长效运维提供技术支撑。

一、高原环境干扰机理研究

(一) 温度影响

高原地区,白天太阳辐射强烈,路面吸收大量热量,温度迅速升高使得路面材料膨胀;而到了夜晚,气温急剧下降导致路面材料快速收缩。剧烈的周期性胀缩行为在路面内部形成交变应力,经长期作用后,材料微观结构逐渐劣化,最终表现为开裂、沉陷等损伤形态,直接降低道路平整性。青藏高原部分地区,昼夜温差可达20℃以上,这种显著的温差变化对路面的损害尤为严重。

季节温差同样不可忽视。寒冷季节铺装材料脆性增大,抗变形能力减弱,在车辆反复碾压下易产生结构性破坏;温暖时期沥青混合料软化,易形成永久性车辙变形。青海高原公路监测数据显示,冬季普遍存在低温开裂现象,夏季则多发车辙病害,两者均显著影响行车平顺性。

(二) 降水影响

高原地区降水虽然相对较少,但降水的集中性较强。强

降雨时,雨水迅速在路面形成径流,如果路面排水不畅,积水会对路面产生冲刷作用。一方面,水流的冲刷会带走路面的细集料,使路面表面变得粗糙不平;另一方面,长期的冲刷可能导致路面基层被淘空,进而引发路面塌陷,破坏路面平整度。其湿度的变化也会对路面产生影响。在湿度较高的季节,路面材料会吸收一定水分,导致其强度降低;而在干燥季节,水分散失又会使路面材料收缩,产生裂缝。

(三) 风蚀影响

高原地区多风,且风力较大,风携带的沙尘等颗粒对面会产生磨蚀作用。长期的风蚀会使路面表面的集料逐渐磨损,导致路面粗糙度增加,平整度下降。风蚀还可能将路面上的松散材料吹走,造成路面局部凹陷,进一步影响路面平整度。

(四) 冻融影响

在高海拔的高原地区,气温经常在0℃上下波动,容

易出现冻融循环现象。当路面中的水分冻结时，体积会膨胀，对路面结构产生向上的冻胀力，使路面隆起；而当冰融化后，路面又会因失去支撑而发生沉降。反复的冻融循环会导致路面出现高低不平的现象，严重破坏路面平整度。在青藏高原的一些冻土路段，冻融循环对路面的损害尤为突出，是影响路面平整度的关键因素之一。

这些高原环境影响因素均会对路面平整度产生不同程度的影响甚至是加剧路面损坏，因此寻找适应高原环境的路面平整度检测技术至关重要。

二、路面平整度检测方法及其高原适用性

高原公路所处地理环境具有特殊性，具体表现为植被覆盖率低、日照时数较长且线路里程较长，且部分路段处于无人区区域。不同的路面平整度检测方法对于高原公路都具有差异性。

(一) 3m直尺法

3m直尺法是指将标准3m长刚性直尺置于路面表面，使用塞尺测量尺底与路面之间的最大垂直间隙值（单位：mm，精度±0.5mm），依据《公路路基路面现场测试规程》（JTG3450-2019）T0931条款，计算单点平整度，单点平整度值为最大间隙值，通过统计全线间隙值标准差σ评价整体平整度。在高原地区，传统依赖人工的3m直尺法效率严重受限，人工检测速度≤200m/人日，海拔>4000m时缺氧环境使劳动效率再降；无法反映波长>3m的长波不平整，难以满足高原公路网级评价需求；安全风险高，高海拔环境下人工长时间作业易诱发高原反应。

(二) 连续式平整度仪

连续式平整度仪是指牵引车拖动测量轮与加速度计组成的检测系统，沿行车方向以≤10km/h速度连续采集路面纵断面高程数据，采样间距≤10cm，通过标准差σ或国际平整度指数IRI（单位：m/km）评价平整度，符合《车载式路面平整度仪》（JT/T676-2009）技术要求。在高原地区，连续式平整度仪属于半自动化接触式测量，高原强风环境下，导致加速度计信号漂移，需修正风振误差，存在一定的误差性；在海拔>4500m区域发动机功率衰减，动力制约，导致牵引车速波动较大，数据可靠性下降；地形适应性较差，例如冻融翻浆路段牵引车易打滑，无法覆盖陡坡路段。

(三) 车载式颠簸累计仪法

车载式颠簸累计仪法是指通过车辆底盘安装的单轴加速度传感器，测量车辆以恒定速度，通常为80km/h±5%，行驶时因路面不平整引起的垂直振动加速度，经时域积分处理转换为位移量，计算颠簸累计值VBI（Vibration Bump

Index，单位cm/km），间接反映路面平整度状况。符合《车载式路面平整度仪》（JT/T676-2009）技术规范。在高原地区，车载式颠簸累计仪器在高原公路行驶时，汽油燃烧会因缺氧而导致燃烧不充分，高原冻融区域局部刚度差异也会影响其对平整度检测的精度。低气压环境悬挂阻尼下降，VBI值虚高，致使悬挂参数漂移；频响不足，传感器有效频带在2-25Hz范围内，无法捕捉超过30Hz的冻融网裂特征高频振动。

(四) 车载激光雷达扫描

车载激光雷达扫描是指搭载于车辆的激光雷达（LiDAR）系统，通过飞行时间法（Time of Flight）获取路面三维点云，密度≥500点/m²，经布料模拟滤波（Cloth Simulation Filtering）分离路面点云后，提取轮迹线纵断面高程计算IRI。在高原地区，采用车载激光雷达扫描系统虽然可以采集完整的三维路面信息，但实际应用中仍面临诸多技术限制。当检测车辆行驶在持续上坡路段时，必须适当降低车速以确保点云采集质量；在-20℃低温环境使锂电池容量下降，车辆电池续航衰减，会限制连续作业时间。

(五) 机载激光雷达检测

机载激光雷达检测是指无人机搭载轻量化激光雷达，通过GNSS/IMU紧耦合定位获取高精度位姿数据，平面精度5cm，高程精度8cm，生成倾斜点云，密度50-200点/m²，利用移动最小二乘法（MLS）插值生成数字高程模型（DEM），提取虚拟断面计算IRI。在高原地区，机载激光雷达检测能够适应复杂的地形，在空旷地形上更有其优势，检测时因高原风扰，有时会引起俯仰角误差，需位姿防抖补偿。

表1 平整度检测方法高原检测优劣势对比

检测方法	优势	高原劣势	高原修正对策
三米直尺法	局部精度±0.5mm，设备成本低	检测效率≤200m/工作日，仅能测量短波不平整	无成熟技术方案
连续式平整度仪	符合规范标准，成本适中	强风环境下信号稳定性下降，高海拔牵引车动力不足	风振补偿算法
车载颠簸累计仪	单公里成本低，检测速度快	悬挂系统受海拔影响，高频振动信号捕获不足	悬挂参数的海拔标定
车载激光雷达	三维点云密度高，全断面检测	连续作业点云密度衰减，低温电池性能下降	点云密度衰减补偿
机载激光雷达	地形适应性强，检测范围广	点云密度50-150点/m ² ，强风环境定位精度下降	紧耦合平差算法 姿态抖动滤波

三、机载激光雷达路面平整度检测的操作流程

(一) 检测操作过程

采用机载激光雷达(LiDAR)进行路面平整度检测时,需遵循系统化的操作流程以确保数据质量。设备选型需充分考虑高原环境特性,无人机平台应选择具备高海拔适应性、抗风阻以及续航能力更强的型号;激光点云传感器则需满足点云密度不低于200点/m²、扫描频率≥100Hz,且具备-20℃至50℃的宽温工作范围,以适应高原昼夜温差大的特点。

航线规划需结合检测路段的地形与路面特征,依据《机载激光雷达测量技术规范》(CH/T8024-2011),飞行高度应根据传感器量程与路面宽度确定,通常设为50-100m,确保地面分辨率优于2cm,飞行速度需控制在每小时30千米至50千米,航向重叠率应大于或等于80%,旁向重叠率应大于或等于60%,以减少数据拼接误差。

检测路段选择需涵盖典型路面结构及路面病害区域,采用等距分段的采集模式。数据采集时,在进行数据采集时,需要对海拔、温度、气压、风速等环境参数进行同步记录。为保证路段拼接完整性,相邻路段需设置10%-15%的重叠区域,重叠部分内至少包含2个共面点云,以通过迭代最近点算法实现精准配准。

(二) 数据处理与分析

对于机载激光雷达检测法,要进行点云预处理,对获得的路段点云数据进行位姿补偿、入射角强度校正、提取

路面点云等提高点云精度;沿路面中线两侧提取轮迹线点云,生成高程剖面,基于高程数据采用最小二乘法拟合基准线,计算各采样点的高程偏差,利用国际平整度指数(IRI)模型:

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{d^2y}{ds^2} \right| ds$$

其中y为高程偏差,s为空间距离变量,L为路段长度;进行平整度值的计算。

针对高原环境,可以考虑引入高原冻融循环次数和紫外线强度作为修正系数,对高原公路路面平整度值进行修正,以量化冻融循环导致的路面结构损伤及紫外线老化对平整度衰减的影响。

四、结论

总体而言,精准检测高原公路的路面平整状况,对维持道路品质、保障行车安全意义重大。当前常用的检测手段包括3m直尺法、连续式平整度仪法、车载式颠簸累积仪法以及激光平整度仪法等,这些方法在实际应用中各有长短。经对比各类检测方式,考虑到高原环境的特殊之处,激光雷达检测表现出更明显的优势,不过具体测量时仍需结合实际场景选用恰当方法。借助标准化的现场检测步骤与数据解析工作,能够对路面平整程度做出有效评判,进而为后续的养护及修复作业提供指导。

参考文献:

[1]李梅英.2022年西藏公路通车里程增长720公里[N].西藏日报(汉),2023-03-19(001).DOI:10.38227/n.cnki.nxzrb.2023.000636.

[2]张效骞,熊蒲宏.高速公路路面平整度检测方法研究[J].散装水泥,2025,(02):242-244.

[3]孙前燕.高速公路沥青路面平整度多指标变化规律分析[J].四川水泥,2025,(04):274-276.DOI:10.20198/j.cnki.scsn.2025.04.026.

[4]冯雷.路面寿命周期评价及养护决策探讨[J].福建交通科技,2021,(06):53-56.

[5]张宁瑾,肖天贵,假拉.1979—2016年青藏高原降水时空特征[J].干旱气象,2018,36(03):373-382.

[6]杨晨辉.三维激光雷达在公路施工质量控制中的应用研究[D].交通运输部公路科学研究所,2021.DOI:10.27181/d.cnki.gjtgs.2021.000001.

[7]刘鸿.道路检测中三维激光扫描技术的应用[J].交通世界,2023,(Z1):128-130.DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2023.z1.042.