

道路表面抗滑性能检测与评估方法研究

陈炳嘉

广州建设工程质量安全检测中心有限公司 广东 广州 510440

摘要：道路表面抗滑性能的检测与评估是保障行车安全的核心技术，其研究涵盖检测方法、评价指标及影响因素等多维度体系，横向力系数测试（SFC）：通过测试车以固定速度（如50km/h）行驶，测量轮胎受侧向力时的摩擦阻力与轮载比值，反映高速行驶条件下的抗滑能力。可实现长路段连续检测，效率高。利用摆锤底面橡胶滑块滑过湿润路面后的回摆高度计算摩擦系数，适用于低速场景（如20km/h）的定点检测。

关键词：道路；表面抗滑；性能检测；评估方法

当前研究聚焦于多源数据融合的智能评估系统，结合摩擦机理深化与新型检测设备开发，以提升抗滑性能预测的精准性和工程适用性。

1 道路表面抗滑性能检测方法

1.1 直接测量法（摩擦系数测试）。横向力系数测试法（SFC），原理：测试车以固定速度（通常50km/h或60km/h）行驶，轮胎与行驶方向偏转一定角度（如20°），测量轮胎受到的侧向摩擦力与垂直载荷的比值。特点：适用于长路段连续检测，模拟高速行驶工况。摆式仪法（BPN），原理：摆锤末端的橡胶滑块滑过湿润路面后损耗能量，通过回摆高度换算摩擦系数（BPN值）。特点：适用于定点低速检测（约20km/h场景），操作简便但效率低。动态旋转摩擦测试法（DF Tester），原理：旋转式传感器模拟轮胎与路面的动态摩擦过程，实时输出摩擦系数。特点：精度高，可动态监测摩擦变化。连续式摩擦系数测定仪法（SCRIM），原理：测试车洒水模拟潮湿路面，连续测定纵向/横向摩擦系数，原理与横向力系数测试法类似。特点：适用于模拟实际潮湿工况的大规模检测。制动距离法。原理：通过车辆紧急制动后的滑移距离反推摩擦系数。特点：操作简单，但受环境因素（如风速、坡度）干扰大，应用较少。

1.2 间接测量法（构造深度检测）。铺砂法（TD），原理：将已知体积的标准砂摊铺在路表，测量覆盖面积，砂体积与面积的比值即为构造深度。分类：包括手工铺砂法和电动铺砂法，后者自动化程度更高。激光构造深度仪法，原理：利用激光非接触式扫描路面纹理，计算宏观构造深度（MTD）。特点：快速、自动化，适用于大范围检测。三维激光扫描与数字图像技术。原理：通过三维建模量化路面纹理空间分布，结合摩擦系数预测抗滑性能。特点：高精度分析微观/宏观纹理的协同作用。

2 摆式摩擦仪如何检测路面抗滑性能

2.1 检测原理。依据能量守恒定律：摆锤从固定高度自由下摆时，橡胶片与路面摩擦消耗能量，导致回摆高度降低。摩擦阻力越大，能量损耗越多，回摆高度越低，仪器显示的摆值（BPN）越高，表明路面抗滑性越强。

2.2 检测步骤。前期准备，选点：沿行车方向左轮轮迹选取代表性测点，每点间距5~10m，每处平行测3次。清洁路面：清除测点松散颗粒及污染物。仪器校准，调平：置仪器于测点，调整底座螺丝使水准泡居中，确保摆的摆动方向与行车方向一致。调零：释放摆锤自由摆动，指针应指零（允许误差±1BPN）；若偏离零点，调节摆的螺母修正。校核滑动长度：调整升降把手，使橡胶片两次接触路面的距离为126±0.5mm（通过标尺校准）；微调时需保持水准泡居中。湿润路面与测试，洒水清洁：用水浇洒路面，橡胶刮板刮除泥浆，再二次洒水保持湿润。释放摆锤：按下释放开关，摆锤滑过路面，记录指针最大摆值（首次数据弃用）；重复5次，每次间隔洒水，单点5次读数极差 ≤ 3BPN。结果处理，取单点5次有效读数的平均值作为该点摆值（精确至整数）；同一处3个测点结果再取均值，作为最终抗滑值；需记录路表温度，必要时换算至标准温度20℃的摆值。

2.3 局限性。效率低：仅支持单点检测，长路段需多次操作；人为误差：调零、铺水操作影响精度，误差可达20%；速度限制：仅模拟低速摩擦，不适用高速公路评估。

3 铺砂法测量路面构造深度的方法

3.1 手工铺砂法步骤。前期准备，选点：在行车轮迹带上（距路面边缘 ≥ 1m）选取测点，每处间距3~5m，同一处平行测定 ≥ 3次。清洁：清扫测点附近区域（面积 ≥ 30cm×30cm），移除松散颗粒与浮尘。量砂：采用干燥洁净的匀质砂（粒径0.15~0.30mm），单次

使用禁止回收。装砂与摊铺，装砂：手提量砂筒（容积 $25\pm 0.15\text{mL}$ ）轻轻叩击硬质路面3次，使砂密实，钢尺刮平筒口砂面。摊铺：将砂倾倒入路面，用底面黏贴橡胶片的推平板由内向外做旋转摊铺运动，使砂填满路面空隙。摊铺成圆形，表面无浮动余砂，避免用力推挤导致砂层变形。测量与计算，直径测量：钢板尺测量摊铺圆两个垂直方向的直径（精确至5mm）。

3.2 电动铺砂法步骤（补充优化）。仪器校准：调整电动铺砂仪，确保砂量输出均匀。自动摊铺：仪器沿直线匀速摊铺量砂，形成标准宽度砂带。深度测量：专用构造深度尺垂直砂带测量多个点深度，取平均值。路段评价：每500m路段选5个测点，取均值作为该路段构造深度。

3.3 注意事项。环境控制：风力较大时需设置挡风板，防止砂被吹散。误差来源：手工法人为误差可达20%，电动法精度更高；摊铺时用力不均导致砂层厚度变异。适用范围：适用于沥青/水泥路面宏观纹理评价，不反映微观摩擦特性；需结合摩擦系数测试（如BPN）综合评估抗滑性能。电动铺砂法因自动化程度高，可显著减少人为误差，适用于大规模路网检测。

4 道路表面抗滑性能评估指标

4.1 摩擦系数类指标。横向力系数（SFC），定义：车辆在潮湿路面上行驶时，轮胎受到的侧向摩擦力与垂直载荷的比值。物理意义：反映车辆制动或转向时抵抗侧滑的能力，与高速行驶安全性直接相关。适用场景：高速公路、干线公路等高速路段连续检测。摆值（BPN），定义：通过摆式摩擦仪测得的橡胶滑块在湿润路面滑动时的能量损失换算值。物理意义：表征低速（约20km/h）潮湿条件下轮胎与路面的摩擦力，如交叉口、坡道等场景。适用场景：城市道路、弯道等低速区域定点检测。纵向摩擦系数（PFC），定义：车辆制动时轮胎与路面间的纵向摩擦力与垂直载荷之比。物理意义：评价紧急制动工况下的抗滑性能，与制动距离直接关联。适用场景：安全关键路段（如隧道、长下坡）的制动性能评估。

4.2 构造深度类指标。构造深度（TD），定义：通过铺砂法测量路面单位面积内砂的体积推算的宏观纹理平均深度。物理意义：反映路面排水能力，减少高速行驶时的“水膜效应”。适用场景：沥青/水泥路面宏观纹理验收评价。平均断面深度（MPD），定义：激光扫描仪获取的路面断面轮廓深度的算术平均值。物理意义：量化微观纹理对轮胎-路面接触的咬合作用，补充TD的局限性。适用场景：高精度路面纹理数字化分析。

4.3 指标间关联性。协同作用：宏观构造深度（TD/

MPD）保障雨天排水，微观纹理与摩擦系数（SFC/BPN）共同决定轮胎-路面有效接触。速度依赖性：低速抗滑性主要由BPN和微观纹理主导；高速抗滑性依赖SFC和宏观排水能力（TD）。实际评估需结合道路等级、车速及环境条件综合选用指标，高速路段优先采用SFC+TD组合，城市道路可选用BPN+局部TD检测。

5 影响道路表面抗滑性能的因素

5.1 内在因素。路面材料特性，集料性能：集料的磨光值、棱角性及硬度直接影响微观纹理的耐久性，高磨光值集料可长期维持抗滑能力。沥青类型与用量：过量沥青易导致泛油，覆盖集料纹理；沥青黏附性不足则易引发集料剥落，削弱摩擦力。混合料级配：粗集料占比高的开级配（如OGFC）可形成宏观构造，增强排水性；细集料过多则降低纹理深度。路面表面纹理，宏观构造（垂直波长0.2~50mm）：集料间空隙形成的凹凸结构，决定高速行驶时排水能力，减少水膜效应。微观构造（垂直波长0.01~0.2mm）：集料表面微凸体提供基础摩擦力，尤其在潮湿路面上穿透水膜的关键。

5.2 污染物如何影响SFC值。污染物对路面横向力系数（SFC）的影响主要体现在改变轮胎与路面的接触状态和材料特性，液态污染物（水、油污），水膜润滑效应，积水或潮湿路面形成水膜，隔离轮胎与路面微观纹理的直接接触，导致摩擦阻力显著下降。实验表明，积水路面SFC值较干燥状态降低可达40%以上，尤其在车速超过50km/h时衰减更明显。宏观构造深度（TD）不足的路面排水能力差，加剧水膜效应，进一步削弱抗滑性能。油污附着，车辆泄漏的机油、润滑油等污染物覆盖路面，形成低摩擦油膜层，直接降低SFC值至安全阈值以下。油污与灰尘混合后形成粘稠污泥，长期渗透至沥青孔隙中，破坏材料表面粗糙度。固态污染物（冰雪、粉尘），冰雪覆盖，积雪或结冰路面摩擦系数降至0.3左右（干燥沥青路面通常为0.9），SFC值下降约60%~70%，车辆极易失控。低温环境下冰雪反复冻融，加速路面微裂缝扩展，削弱集料嵌锁结构。粉尘堆积，大气颗粒物（如PM2.5、沙尘）在路面沉积，填充宏观纹理空隙，降低排水效率及轮胎抓地力。可溶性粉尘（如盐分）吸湿后形成电解质溶液，腐蚀集料表面微观构造，长期降低摩擦系数。胶态污染物（有机物粘附），有机污染物凝胶化，轮胎磨损碎屑、工业排放有机物等在路面累积，遇湿形成胶状物，显著减少有效接触面积。此类污染物可通过超临界流体色谱（SFC）技术检测，其对摩擦系数的负面影响与浓度呈正相关。复合污染协同效应，污染物交互作用：油污与粉尘混合加剧路面打滑风险（泥

泞土路摩擦系数可降至0.05~0.15)；吸湿性颗粒物(如 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)在潮湿环境下膨胀，填充纹理并促进水膜形成。车速依赖性：污染物导致的SFC衰减随车速提升呈指数级加剧，高速工况下风险倍增。

5.3 车速如何影响路面摩擦系数。车速对路面摩擦系数的影响呈现显著非线性特征，其作用机制随路面干湿状态呈现本质差异，干燥路面摩擦系数变化规律，低速区间($< 50\text{km/h}$)，摩擦系数基本稳定，经典摩擦理论成立：摩擦系数主要取决于轮胎材质与路面粗糙度，与车速无直接关联。轮胎与路面微观构造充分接触，摩擦系数维持在较高水平(沥青路面通常为0.7-0.9)。高速区间($> 80\text{km/h}$)，摩擦系数轻微衰减(降幅约5%-15%)，主要源于：轮胎升温导致橡胶软化，微观抓地力下降；空气动力学升力减小轮胎接地压力。典型数据：车速从80km/h升至120km/h，刹车片摩擦系数从0.40降至0.35，制动距离增加12%。特殊路面车速敏感性对比。冰雪路面：摩擦系数始终低于0.3，且随车速提升持续下降，60km/h时摩擦系数较20km/h再降30%；粗糙纹理路面：刻槽隧道(5mm×5mm沟槽)可提升临界速度15%，延迟水滑现象发生；沥青vs水泥：水泥路面微观构造更稳定，高速衰减幅度比沥青路面低约8%。

6 改善道路表面抗滑性能的方法

6.1 材料改性增强摩擦性能。添加高抗滑集料，采用陶瓷颗粒(莫氏硬度 ≥ 6 ，粒径1~4mm)嵌入路面表层，显著提升微观粗糙度，湿态摩擦系数提高40%以上。使用玄武岩、辉绿岩等坚硬集料替代普通石材，其棱角分明的表面结构可增强轮胎抓地力。聚合物改性粘结剂，在沥青中掺入SBS/SBR聚合物或天然岩沥青，提升

高温稳定性(软化点 $\geq 80^\circ\text{C}$)和低温抗裂性(5°C 延度 $\geq 35\text{cm}$)，延缓车辙变形。采用HVE特种复合改性乳化沥青，其25℃拉拔强度 $\geq 1.0\text{MPa}$ ，显著提高层间粘结力与耐久性。

6.2 表面纹理优化设计。宏观构造强化，刻槽处理：在水泥路面纵向刻槽(5mm深×5mm宽@25mm间距)，提升排水效率，摩擦系数增加15%。超薄磨耗层：铺设2cm厚HVE超粘磨耗层(辉绿岩骨料)，抗滑系数可达61BPN，兼具降噪功能。微观纹理精细化，微表处技术：喷涂聚合物改性乳化沥青混合料，形成抗滑密封层，填补微观缺陷。拉毛/压槽工艺：水泥路面初凝时用帆布拖拽或钢刷刷毛，增强细观纹理。

6.3 智能监测与规范控制。实时性能评估，嵌入物联网传感器，监测路面温度、湿度及摩擦系数，预警滑移风险。标准化施工验收，快速路/主干路验收要求：横向力系数SFC $\geq$ 设计值，构造深度TD $\geq 0.7\text{mm}$ (沥青路面)。重交通荷载路段必须采用刻槽法，轻交通路段可用拉槽法。

总之，车速对摩擦系数的影响在湿滑路面上呈非线性剧变，其衰减幅度远大于干燥路面，且存在明确的临界速度阈值(通常50-60km/h)。道路抗滑设计中需重点控制该阈值区间的风险。

参考文献

- [1]王浩宇.道路表面抗滑性能检测与评估方法探讨.2023.
- [2]张慧园.关于道路表面抗滑性能检测与评估方法研究.2022.