

不同检测设备对路面横向力系数影响分析

徐志豪 卢文银

江苏现代路桥有限责任公司, 江苏 南京 210000

[摘要]为解决高速公路沥青路面抗滑性能检测结果异常波动问题,保障检测数据的准确性与客观性,本论文围绕横向力系数(SFC)这一核心抗滑指标,系统调研国内外连续式摩擦系数检测方法与设备,重点分析不同检测设备对检测结果的影响规律。研究表明,三种不同种类的横向力系数检测设备,以不同横向力系数检测设备的得到的稳定的检测数据均值作为标准,检测结果准确度大小的设备类别排序为:国产单轮>进口双轮>国产双轮。以变异系数为标准,检测结果稳定性大小的设备类别排序为:进口双轮>国产单轮>国产双轮。研究成果为高速公路沥青路面抗滑性能精准检测提供了技术支撑,对提升行车安全与养护决策科学性具有重要意义。

[关键词]抗滑性能;单轮式;双轮式;路面横向力系数;影响分析

DOI: 10.33142/sca.v9i1.18959

中图分类号: U416.03

文献标识码: A

Analysis of the Influence of Different Testing Equipment on Pavement Sideway Force Coefficient

XU Zhihao, LU Wenyin

Jiangsu Xiandai Road and Bridge Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract: To address the issue of abnormal fluctuations in the test results of anti-skid performance of expressway asphalt pavements and ensure the accuracy and objectivity of test data, this paper systematically investigates the continuous friction coefficient testing methods and equipment at home and abroad, focusing on the influence law of different testing equipment on the test results with the Sideway Force Coefficient (SFC) as the core anti-skid index. The results show that, taking the stable mean value of test data obtained by three different types of SFC testing equipment as the standard, the order of equipment categories in terms of test result accuracy is: domestic single-wheel > imported dual-wheel > domestic dual-wheel. Taking the coefficient of variation as the standard, the order of equipment categories in terms of test result stability is: imported dual-wheel > domestic single-wheel > domestic dual-wheel. The research results provide technical support for the accurate testing of anti-skid performance of expressway asphalt pavements, which is of great significance for improving driving safety and the scientificity of maintenance decision-making.

Keywords: anti-skid performance; single-wheel type; dual-wheel type; pavement sideway force coefficient (SFC); influence analysis

引言

在过去的二十年里,我国高速公路经历了建设高潮期,公路总里程接近 550 万公里,其中 90% 的路段已接近或超过设计使用年限(15 年),路面老龄化问题突出。沥青路面通车 5~6 年后抗滑性能会明显下滑,而抗滑指标直接关系到行车安全,是交通事故鉴定与养护决策的核心依据^[1]。路面抗滑指标检测结果的客观性、准确性、代表性一方面直接影响高速公路经营管理对路面安全服役状态的准确性评判,另一方面影响路面养护决策方案的可靠性^[2]。

然而沥青路面抗滑检测结果受多方面主客观因素影响,研究人员针对路面抗滑性能检测过程中的驾驶平稳性(车速变化、刹车情况等)、喷水量、轮胎状况(新旧程度)、检测位置(轮迹带、非轮迹带)、环境温度等因素开展了大量研究工作^[3-7],并基于横向力系数测试系统及其测试结果的分析,提出了针对不同地区的温度、速度修正值,以此指导本地区的路面横向力系数检测,从而提高检测数据可靠性^[8-10]。

通过调研发现,影响连续式抗滑检测的因素众多,包含了人、车、路三大方面。现有研究成果主要针对外界环境影响及检测人员的检测行为,针对不同检测设备对路面横向力系数检测结果的影响研究较少。因此本文基于相同检测条件下,对国产单轮、国产双轮、进口双轮三类检测设备进行分析研究,为不同类型检测设备对路面横向力系数的影响提供量化参考,从而提升沥青路面抗滑性能检测结果的准确性。

1 横向力系数检测方法

当车辆以恒定速度改变方向,比如驶过弯道时,车辆行驶方向和前轮指向方向产生了一个滑移角 δ ,可使用下式计算:

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{L_{\text{shear}} + L_{\text{slip}}}{L_C} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{\Delta L_S}{L_C} \right) \quad (1)$$

式中, δ 为前轮轨迹滑移角; L_{shear} 为剪切胎面橡胶的长度; L_{slip} 为胎面橡胶滑移长度; ΔL_S 为胎面橡胶的剪切滑移组合长度; L_C 为轮胎路面接触区域总长度。

滑移角 δ 导致轮胎胎面橡胶块在进入轮胎-路面接触区时发生剪切,然后在离开时发生滑移,剪切作用引起的应力产生如图1所示的横向摩擦力 F_T ,横向摩擦系数 η 表示为横向摩擦力 F_T 与竖向荷载 F_W 之比。

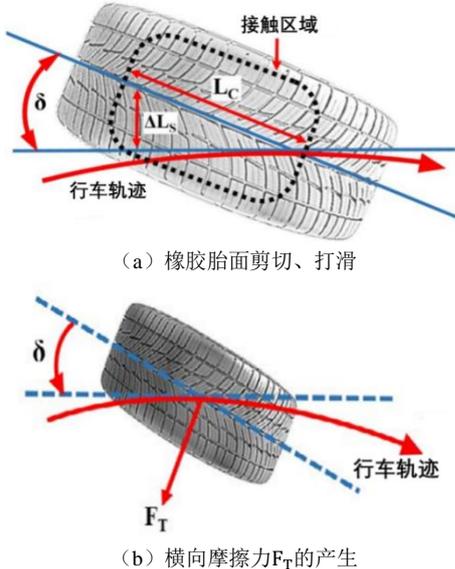


图1 滑移角 δ 与产生横向摩擦力的原理示意图

1.1 双轮横向力系数检测

双轮式横向力系数设备的代表是由英国制造的 Mu-Meter 横向力测试仪,常用于欧洲、北美机场跑道与公路检测,我国也将其引入《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)中并规定了 Mu-Meter 测试规程,作为横向力系数测试的另一种方法。Mu-Meter 测试通常在湿路面上以恒定速度(我国为 40~60km/h,美国为 65km/h 以上)拖动两个自由旋转、与行车方向成 7.5° 并且处于恒定的静载荷下的测试轮,滑移率为 13%,从而测量路面的向摩擦力,测量结果以 MuN (Mu Number) 表示。

Mu-Meter 的两个测试轮相对于 Mu-Meter 的中心线展开成 7.50±0.75° 偏角,两个测试轮之间形成 15° 夹角;单个测试轮被施加一定的竖向静荷载,我国规范选用 1.27kN,美国标准(ASTM E670-09(2020))采用 761±9N;在两个测试轮后方的居中位置为测距轮,配置速度距离传感器,我国规范并未规定其承受的竖向荷载大小,美国规范给出后轮承载值为 525~614N;我国规范规定测试轮与测距轮均为尺寸 4/4.8-8 的光面轮胎,胎压 70±3.5kPa,而美国规范中测试轮胎可以是光滑的或带肋的,但必须保持一致,胎压 69±3kPa,测距轮则需使用与测试轮尺寸相同的带肋轮胎,胎压 207±14kPa(我国规范测距轮胎压为 210±13.7kPa)。

路面洒水方面,美国标准规定喷嘴中心线与路面成 25±2° 指向路面,水流应在测试轮垂直中心线前方 150

至 200mm 处接触路面。建议水膜厚度为 0.5mm,宽度至少比测试轮与路面接触区域宽 25mm,并在实际测试中使轮胎位于润湿边缘之间的中心位置。

需要注意的是,我国规范《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)指出 Mu-Mete 的测量直接结果 MuN 需要参照单轮横向力系数测试(SCRIM 测试车)进行车速与温度修正,并基于相关性试验换算为 SFC 值后方可用于我国公路工程评价。

1.2 单轮式横向力系数检测

双轮式横向力系数设备的代表 SCRIM 测试车于上世纪 80 年代末引入我国,目前已进入交通运输行业标准体系。测试车辆配备标准试验轮胎,与车辆行驶方向偏转 20°,当汽车在潮湿路面上以一定速度行驶时,测试轮胎受到侧向摩擦,测得摩擦阻力除以试验轮上的载荷即为横向力系数(SFC 值)。测试结果符合车辆实际制动或打滑的情况,且不影响其他车辆的正常行驶。目前我国已普遍使用横向力系数测试系统作为高等级公路抗滑能力检测设备,现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)、《公路技术状况评定标准》(JTG 5210—2018)、《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2017)、和《公路养护技术规范》(JTG 5142—2019)中分别使用横向力系数(SFC)作为设计、状况检测、质量评定及养护评价标准,《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)中引入并规定了 SCRIM 系统测试规程。

我国现行的《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中规定新建高速公路、一级公路的沥青路面横向力系数测试在 60±1km/h 下进行,早先规范中规定的横向力系数测试 SFC 值的标准速度为 50±4km/h。在新版现行规范《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)中,考虑到用于不同目的的测试所采用的速度往往是不同的,所以不再规定标准测试速度,而以测试结果所需的速度作为标准测试速度,其他测试速度下的 SFC 值根据式 2 进行换算。

$$SFC_{\text{标}} = SFC_{\text{测}} - 0.22(V_{\text{标}} - V_{\text{测}}) \quad (2)$$

式中, SFC_标 为标准测试速度下的等效 SFC 值; SFC_测 为现场实际测试速度下的 SFC 测试值; V_标 为标准测试速度; V_测 为实际测试速度。

环境温度对横向力系数测试结果有的影响主要集中在测试轮胎橡胶模量的变化,从而使测得的摩擦系数值发生偏差。进行现场测试时应尽量选择温差较小的时间并且记录测试时的现场温度。我国规范《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019)规定测试的标准温度为 20±5°C,其他温度下测试的横向力系数值应按照表 1 换算成标准温度下的等效 SFC 值。

表 1 SFC 值温度修正

温度 (°C)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
修正	-3	-1	0	+1	+3	+4	+6	+7	+8	+9	+10

该设备检测结果符合实际行车状况,不影响交通,广泛应用于高等级公路抗滑检测,可用于直线路段、曲线和陡坡路段,对路面微观纹理变化敏感,但对路面质量状况要求较高,裂缝和坑洞对轮胎损害较大。在整个测试段中连续测量摩擦的能力是横向力系数测量装置的主要优势,确保了低摩擦区域不会因采样过程而被跳过。

2 试验方案

本文采取的试验方案为选取江苏省内 7 家公司不同横向力系数检测设备进行比对试验,包括现代检测(进口双轮)、华设(进口双轮)、苏信(国产双轮)、恒信(国产双轮)、中路交科(国产单轮)、高养(国产单轮)、科研所(国产单轮)。其中包含了单轮式横向力系数检测车和双轮式横向力系数检测车,进口双轮检测车和国产双轮检测车的不同。

2.1 检测人员

在试验开展前,对驾驶员和检测人员进行培训。配备驾驶员 1 人,具有 2 年以上驾驶经验;公路水运试验检测工程师 1 人,具有 2 年以上检测经验,熟练掌握检测设备状态检查、数据采集与检测数据简单处理。

2.2 设备标定

试验开展前,对同类型检测设备进行同一批次标定,且双轮式横向力系数检测设备和单轮式横向力系数标定日期相近。

双轮式横向力系数检测标定主要包含八个项目,具体为外观、测试轮轴台端面之间的夹角、测试轮和测距轮的轮胎气压、测试轮静态垂直荷载、温度测量装置示值误差、距离测量装置示值相对误差、横向摩擦力示值相对误差以及横向摩擦力测量重复性。具体标定流程参照《JJG100—2020 双轮式横向力系数自动测试系统》检定规程。

单轮式横向力系数检测标定主要包含六个项目,具体为测试轮偏角、垂直荷载、水平荷载误差、距离测量误差、动态重复测量变异系数、温度测量误差。具体标定流程参照《JJT 921—2014 单轮式横向力系数测试仪》规程。

2.3 检测速度

试验过程中路面横向力系数检测速度为 50km/h±1km/h,检测车配备定速巡航,以保证检测速度保持不变。

2.4 检测温度

选取路表温度基本保持在 40°C±5 摄氏度的时间段,避免路表温度波动较大影响试验结果。

2.5 检测轮胎

双轮式横向力系数检测车采用同一批次轮胎,新轮胎在检测前进行试用 100km,检测里程超过 1000km 的旧轮胎停止使用。单轮式横向力系数检测车采用同一批次 T

型轮胎,新轮胎在检测前进行试用 10km,且测试轮胎至少提前 500m 降至路面上进行预跑。

2.6 检测轨迹

路面横向力系数检测轨迹以右侧轮迹带为依据,路面横向力系数检测车配备车后影像监控装置,在检测中通过监控设备对行驶轨迹进行实时监控,以保证检测轨迹保持稳定。

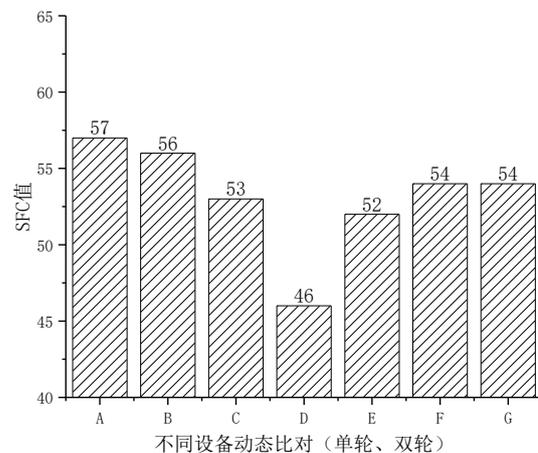
3 不同设备检测结果分析

3.1 标准场地比对分析

在标准场地江苏省内 7 家公司不同横向力系数检测设备,动态比对时,各单位保持 50km/h 的测试速度,现场温度在 40°C 左右,各单位统一测试右轮迹带。因各单位在动态比对测值时基本保持在同一条件下重复测试 5 次,在标准场地动态比对时,均采用原始值(不进行温度修正)进行比较。因各单位在动态比对测值时基本保持在同一条件下重复测试 5 次,在标准场地动态比对时,均采用原始值(不进行温度修正)进行比较。具体检测数据见表 2。

表 2 各单位设备横向力系数测值变异系数情况(原始值)

序号	检测单位(设备)	SFC 平均值	变异系数 (%)	变异系数规范要求 (%)
1	A 公司(进口双轮)	57	0.97	≤5
2	B 公司(进口双轮)	56	1.26	
3	C 公司(国产双轮)	53	2.31	
4	D 公司(国产双轮)	46	4.96	
5	E 公司(国产单轮)	52	3.17	
6	F 高养(国产单轮)	54	1.31	
7	G 公司(国产单轮)	54	2.74	


图 2 不同设备动态比对检测数据均值图

从图 2 可以看出,7 家公司不同的横向力系数检测设备检测结果存在一定差异,其中最大 SFC 值是 57,由 A 公司的进口双轮式检测车测得;最小 SFC 值是 46,由 D 的国产双轮式检测车测得。SFC 值两者相差 11。7 家公司检测车的均值为 53。

将 7 家单位的检测值与 SFC 均值对比发现,2 家进口

的双轮式检测车检测结果比较接近，但均高于均值；2家国产的双轮式检测车检测结果相差较大，C公司检测结果等于均值，D公司检测结果比均值小7个单位。3家国产单轮式检测车检测结果相近，均值与均值的差距较少。从检测设备类别角度，以均值为标准，检测结果准确度大小的设备类别排序为：国产单轮>进口双轮>国产双轮。

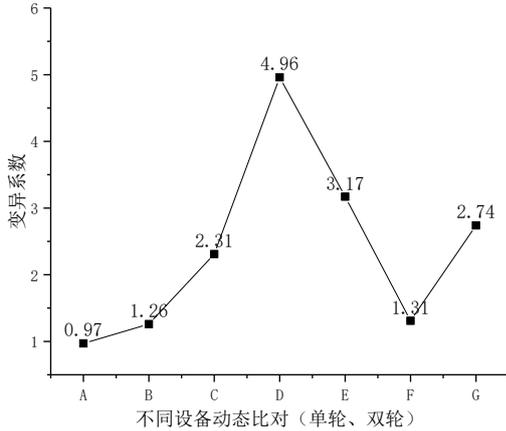


图3 不同设备动态比对检测数据变异系数

变异系数体现了检测设备自身的稳定性，从图3可以看出，7家公司不同的横向力系数检测设备检测结果变异系数存在一定差异。C公司（国产双轮）检测结果接近均值的设备，但其变异系数相对并没有较小；A公司（进口双轮）检测结果较高于均值，其变异系数在7家设备中最小；最明显的是，D公司（国产双轮）检测结果与均值差距最大，同时变异系数最大。从检测设备类别角度，以变异系数为标准，检测结果稳定性大小的设备类别排序为：进口双轮>国产单轮>国产双轮。

3.2 实路比对分析

在沪宁高速，江苏省内6家公司不同横向力系数检测设备实路比对试验，包括A公司（进口双轮）、C公司（国产双轮）、D公司（国产双轮）、E公司（国产单轮）、F公司（国产单轮）、G公司（国产单轮）。其中包含了单轮式横向力系数检测车和双轮式横向力系数检测车，进口双轮检测车和国产双轮检测车的不同。用变异系数验证每台设备实路比对5次测值的稳定性，从而确认每台设备在满足要求前提下进行比对工作。具体检测数据见表3。

表3 各单位设备横向力系数实路比对测值变异系数情况(原始值)

序号	设备情况	SFC 平均值	变异系数 (%)	变异系数规范要求 (%)
1	现代检测 (进口双轮)	51	1.11	≤5
2	苏信 (国产双轮)	48	1.19	
3	恒信 (国产双轮)	46	1.30	
4	中路交科 (国产单轮)	50	1.10	
5	高养 (国产单轮)	49	1.16	
6	科研院所 (国产单轮)	50	2.96	

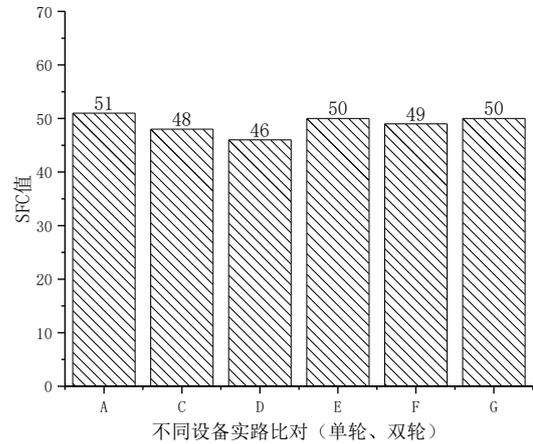


图4 不同设备实路比对检测数据均值图

从图4可以看出，6家公司不同的横向力系数检测设备检测结果存在一定差异，其中最大SFC值是51，由A公司的进口双轮式检测车测得；最小SFC值是46，由D公司的国产双轮式检测车测得。SFC值两者相差5，与动态比对极差相比较小，分析原因为实路比对距离更长，检测数据较稳定。6家公司检测车的均值为49。

将6家单位的检测值与SFC均值对比发现，1家进口的双轮式检测车检测结果比较接近，高于均值；2家国产的双轮式检测车检测结果相差较大，检测结果均低于均值，其中D公司（国产双轮）检测结果低于均值最大，为3。3家国产单轮式检测车检测结果相近，均值与均值的差距较少。

因此从检测设备类别角度，以均值为标准，检测结果准确度大小的设备类别排序为：国产单轮>进口双轮>国产双轮，与动态比对结论一致。

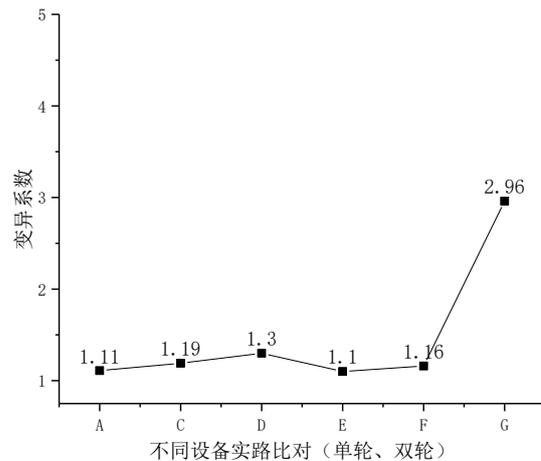


图5 不同设备实路比对检测数据变异系数

变异系数体现了检测设备自身的稳定性，从图5可以看出，6家公司不同的横向力系数检测设备检测结果变异系数存在一定差异。G公司（国产双轮）检测结果接近均值的设备，但其变异系数相对并没有较小；A公司（进口双轮）检

测结果较高于均值,其变异系数在6家设备中最小。

4 研究结论

(1) 横向力系数检测严格意义上的真值难以确定,可以将不同横向力系数检测设备的得到的稳定的检测数据均值作为均值,以评价不同横向力系数检测设备的稳定性和准确性。

(2) 三种不同种类的横向力系数检测设备,从检测设备类别角度,以均值为标准,检测结果准确度大小的设备类别排序为:国产单轮>进口双轮>国产双轮。

(3) 以变异系数为标准,检测结果稳定性大小的设备类别排序为:进口双轮>国产单轮>国产双轮。

[参考文献]

- [1]卢川川.湖北省高速公路通车试运营期间沥青路面抗滑性能影响因素及横向力系数衰减情况分析[J].中国水运,2024(9):148-150.
- [2]黄晓明,郑彬双.沥青路面抗滑性能研究现状与展望[J].中国公路学报,2019,32(4):32-49.
- [3]吴秋展.沥青路面抗滑性能影响因素相关性分析[J].公路与汽运,2024,40(1):68-71.
- [4]和松,钱敬之.路面横向力系数温度影响研究[J].公路交通科技,2005(12):32-34.
- [5]张永利.沥青路面抗滑性能的影响因素分析[J].河南科技,2013(5):130-131.
- [6]王曦光.影响横向力系数测试系统 MU METER MK6 准确性的原因分析与对策[J].北方交通,2013(1):4-6.
- [7]王建刚.横向力系数测试系统在公路工程检测中的应用[D].湖南:长沙理工大学,2015.
- [8]和松,常成利,钱敬之.路面横向力系数速度修正试验研究[J].公路交通科技,2005(6):54-56.
- [9]周文辉.单轮式横向力系数测试系统测定路面摩擦系数关于 SFC 值温度修正方法的探讨[J].交通世界,2019(19):18-19.
- [10]康韩辉.基于广东气候特点的沥青路面横向力系数温度修正研究[D].广州:广州大学,2015.

作者简介:徐志豪(1995.12—),男,毕业院校:常州工学院,所学专业:土木工程,当前就职单位:江苏现代路桥有限责任公司,职务:公路水运试验检测工程师,职称级别:助理工程师。