

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2024.01.012

# 沥青路面抗滑性能影响因素相关性分析

吴秋展

(广东能达公路养护股份有限公司, 广东 广州 510045)

**摘要:**以广东省某高速公路路面近5年的抗滑性能检测数据为基础,结合灰色关联理论,对路面抗滑性能影响因素间的关联度进行分析,确定最大关联度因素,同时进行路面横向力系数与车辆速度、路面构造深度与地表温度、路面横向力系数与构造深度的相关性分析,确定其相关性程度。结果表明,沥青路面横向力系数随着时间的推移逐渐减小,日均交通量、年降水量等影响因素并未呈现与时间的相关性;日均交通量与横向力系数的关联度最大,为抗滑性能的重要影响因素,其次是最低气温,最后是年降水量;横向力系数与行车速度、构造深度与地表温度具有高度相关性,横向力系数与路面构造深度具有中度相关性,随着道路运营时间的增长,横向力系数与路面构造深度的相关性逐渐降低;在道路运营中,应尽量将横向力系数和路面构造深度共同作为路面抗滑性能评价指标。

**关键词:**公路;沥青路面;抗滑性能;影响因素;相关性分析

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2024)01-0068-04

沥青路面的抗滑性能是确保车辆良好运行的关键,它受多种因素影响,主要包括沥青路面自身材料及外界因素两方面,如路面材料、环境温度、行车数量及行车速度、降雨量、车辆荷载等。但这些因素的影响程度不一致,且与抗滑性能指标横向力系数的相关性不一样,在路面抗滑数据不易采集的情况下,分析抗滑性能影响因素及影响因素与抗滑性能代表指标的相关性有助于掌握路面抗滑性能的现状和发展趋势<sup>[1]</sup>。

目前对沥青路面抗滑性能的研究集中在沥青路面抗滑性能影响机制、影响因素、发展规律及评价体系等方面。王永平等认为沥青路面抗滑性能影响因素包括沥青材料及外界车辆等,并通过分析沥青路面抗滑性能的衰减规律构建了预测分析模型<sup>[2]</sup>。王松林等制作不同级配沥青试件,对路面抗滑指数和磨耗指数进行测试,研究抗滑指数和磨耗指数之间的相关性,结果表明两者之间呈现较高的指数关系,可采用磨耗指数换算得到路面抗滑指数<sup>[3]</sup>。何俊辉等分析不同集料性能指标与路面抗滑性能指标的灰色关联关系,结果显示集料的形状因子对沥青路面构造深度和摆值的影响最大,集料棱角性等指标也与路面构造深度和摆值具有较好的关联性<sup>[4]</sup>。由于不同沥青路面的组成材料、所处环境等不同,已有研究成果很难复制到工程实践中,根据沥青路面特征

及多年积累的试验监测数据进行具体分析,才能准确反映路面抗滑性能与各因素之间的关系<sup>[5]</sup>。本文根据实际沥青路面多年来的检测数据和环境、车辆数据,结合灰色关联理论分析沥青路面抗滑性能影响因素,并进行因素间相关性分析,确定因素间的关联程度。

## 1 灰色关联理论

灰色关联理论已广泛用于目标对象的定量演化趋势分析,可实现小样本、不明显规律的模拟分析<sup>[6]</sup>。采用灰色关联理论分析沥青路面抗滑性能影响因素间的关联度,实际上是分析影响因素与横向力系数 $C_{SFC}$ 的关联度,属于单因素案例分析过程,横向力系数 $C_{SFC}$ 是系统的行为。记系统行为为 $x_0$ ,影响 $x_0$ 的多因素记为 $x_i (i=1,2,3,\dots,n)$ ,运用灰色关联理论分析 $x_i$ 对 $x_0$ 的影响。记 $x_0$ 为参考数列,表示为:

$$x_0 = \{x_0(k) | k=1,2,\dots,n\} = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)) \quad (1)$$

$x_i (i=1,2,\dots,n)$ 为 $x_0$ 的相关比较因素,则比较数列 $x_i$ 表示为:

$$x_i = \{x_i(k) | k=1,2,\dots,n\} = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)); i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$x_0$ 相对于 $x_i$ 的绝对差为:

$$\Delta_i(k) = |x_0(k) - x_i(k)|; \quad k=1, 2, \dots, n; 1 \leq i \leq m \quad (3)$$

记  $\Delta_i = (\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(n))$  为绝对差数列,  $\gamma$  为灰色关联系数, 则第  $k$  点对应的  $x_i$  对  $x_0$  的灰色关联系数为:

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + \alpha \max_i \max_k \Delta_i(k)}{\Delta_i(k) + \alpha \max_i \max_k \Delta_i(k)} \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为分辨率系数, 为常数, 取值区间为  $[0, 1]$ ,  $\alpha$  越大, 分辨率越大, 一般情况下  $\alpha = 0.5$ 。

当  $k=1, 2, \dots, n$  时,  $x_i$  对  $x_0$  的灰色关联度为:

$$\gamma_i = \gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)); \quad i=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式(5)为灰色关联度  $\gamma_i$  的表达式, 反映各影响因素  $x_i$  对行为因子  $x_0$  的关联程度。

## 2 沥青路面抗滑性能关联分析

### 2.1 工程概况

广东省某高速公路东段路面维修工程的标

表 1 某高速公路部分路段的横向力系数

桩号	$C_{SFC}$ 均值	$C_{SFC}$ 值最大集中范围	$C_{SFC}$ 值最大集中范围的占比/%	$C_{SFC} < 48$ 路段长度/m
K2665+400—K2666+400	51.5	[48, 54)	53.9	73
K2666+400—K2667+400	50.2	[48, 54)	51.6	66
K2667+400—K2668+400	49.3	[41, 48)	53.8	538
K2668+400—K2669+400	51.7	[48, 54)	51.3	102
K2669+400—K2670+400	53.2	[48, 54)	56.9	89

交通量、年降水量、最高气温和最低气温、车辆荷载、路面材料等<sup>[7-8]</sup>。收集该路段 2017—2021 年的日均交通量、年降水量、气温范围、横向力系数实测值(见表 2), 路面材料、地域性等因素假定未发生变化。2017 年该路段实施养护维修, 横向力系数最大, 随

表 2 K2665+400—K2695+400 路段 2017—2021 年横向力系数及影响因素实测数据

年份	横向力系数	日均交通量/辆	年降水量/mm	气温范围/°C
2017	51.3	32 799	1 567	(1.0, 39.7)
2018	50.9	33 187	1 428	(2.1, 40.3)
2019	49.8	34 176	1 679	(1.2, 39.3)
2020	49.9	33 289	1 723	(0.0, 40.2)
2021	48.3	33 167	1 560	(2.0, 40.0)

段 2, 桩号为 K2663+654—K2698+954, 长 35.3 km, 路面结构由上至下分别为 4 cm 改性沥青 GAC-16C 上面层+6 cm 改性沥青 GAC-20C 下面层+25 cm 水泥混凝土面板+18 cm 水泥稳定碎石基层。设计速度为 100 km/h, 采用沥青混凝土路面, 主线按双向四车道高速公路标准建设。

自建成通车以来, 在反复交通荷载及不利环境影响下, 路面网裂、连续坑槽、强度不足等病害显现, 行车安全度降低。2014 年初进行部分路段病害微表处罩面等养护, 2017 年实施较长路段维修改造。

以 2017—2021 年 K2665+400—K2670+400 路段路面抗滑性能实测数据为例, 以 1 km 为单位, 统计横向力系数  $C_{SFC}$  实测值,  $C_{SFC}$  实测值主要集中在  $[40, 60]$ ,  $C_{SFC} < 48$  路段(对应抗滑性能指数评分低于 90)的占比为 17.4% 左右(见表 1)。

### 2.2 沥青路面抗滑性能关联度分析

以 K2665+400—K2695+400 路段为例进行沥青路面抗滑性能关联度分析。

影响沥青路面抗滑性能的因素较多, 包括日均

后随着运营时间的推移, 横向力系数逐渐降低。

横向力系数与其影响因素的相关性分析属于单因素分析, 横向力系数记为  $x_0$ , 影响横向力系数的因素记为  $x_i (i=1, 2, 3, 4), m=4$ , 包括日均交通量、年降水量、最高气温、最低气温。研究时间跨度为 5 年,  $N=5$ 。为计算简便, 采用 MATLAB 软件按照灰色关联理论进行计算, 确定 4 项因素对横向力系数的关联度。

考虑到 4 项因素的量纲不同, 在进行因素关联度计算前按式(6)进行归一化处理。以 2017 年实测数据为基础数据, 对 2018—2021 年实测数据进行归一化。

$$x_i(k) = \frac{X_i(k)}{X_i(1)}; k=1, 2, \dots, n; i=0, 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: $X_i(1)$ 为 2017 年实测数据; $X_i(k)$ 为某项因素的第  $k$  年数据。

按式(3)进行各因素绝对差数列处理,分别按式(4)、式(5)计算各因素对横向力系数的灰色关联系数和灰色关联度。横向力系数和 4 项因素的归一化处理及关联度计算结果见表 3。

表 3 K2665+400—K2695+400 路段 2017—2021 年数据的归一化处理及关联度计算结果

年份	横向力系数	日均交通量	年降水量	最低气温	最高气温
2017	1.000	1.000	1.000	1	1.000
2018	0.992	1.060	0.911	2	1.015
2019	0.971	1.092	1.070	1	0.990
2020	0.973	1.064	1.100	0	1.012
2021	0.942	1.060	0.996	2	1.008
与横向力系数的关联度	0.951	0.803	0.913	0.817	

由表 3 可知:横向力系数随着时间的推移逐渐减小,4 项影响因素在不同年份均出现波动。4 项影响因素中,日均交通量与横向力系数的关联度最大,最低气温次之,年降水量最小。道路交通量是影响路面抗滑性能的最主要因素,其次是最低气温。

### 2.3 沥青路面抗滑性能关键影响因素的相关性分析

将 K2665+400—K2695+400 路段划分为 5 个路段,每个路段长 6 km,每个路段中设置 15 个测点,检测各测点在不同时间的路面温度、构造深度、横向力系数、行车速度等,分析路面抗滑性能影响因素间的相关关系。

#### 2.3.1 横向力系数与行车速度的相关性

在该路段前期运营中采用横向力系数车、手工铺砂法等测试路面性能,2019 年 10 月测试的不同车速下横向力系数见表 4、图 1。测试时地表温度为 15 ℃,日平均交通量为 3.45 万辆。从图 1 可以看出:随着行车速度的增加,路面横向力系数先增大后减小,60 km/h 速度下横向力系数最大,之后随着行车速度的增大,横向力系数减小,且下降趋势明显。

对横向力系数实测值与行车速度的关系进行回归分析,相关系数为 0.893。根据指标间相关程度(见表 5),沥青路面横向力系数与行车速度具有高度相关性。在进行沥青路面抗滑性能分析时,须考虑行车速度的影响。

表 4 沥青路面横向力系数与行车速度的关系

车行速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	微观纹理 系数 C <sub>SFC</sub>	宏观纹 理系数	车行速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	微观纹理 系数 C <sub>SFC</sub>	宏观纹 理系数
40	48.73		90	47.66	
50	49.12		100	47.19	0.596
60	51.67	0.596	110	46.21	
70	49.27		120	45.13	
80	49.12				

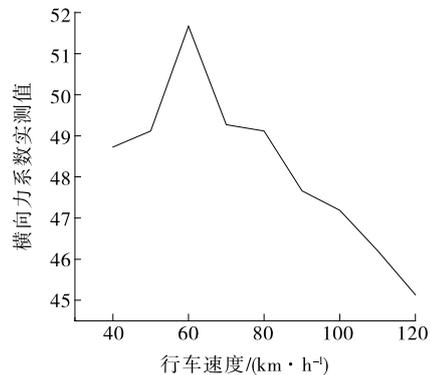


图 1 不同行车速度下路面横向力系数

表 5 指标因素之间的相关程度

相关程度	相关系数	相关程度	相关系数
不相关	<0.30	高度相关	[0.80, 0.95)
弱相关	[0.30, 0.50)	显著相关	[0.95, 1.00]
中度相关	[0.50, 0.80)		

#### 2.3.2 构造深度与地表温度的相关性

路面构造深度可间接反映路面的抗滑性能。路面构造深度受外界温度影响,为研究构造深度与外界温度的相关性,采用手工铺砂法测试不同地面温度下路面构造深度,并对不同温度下构造深度实测值进行回归分析,结果见图 2。

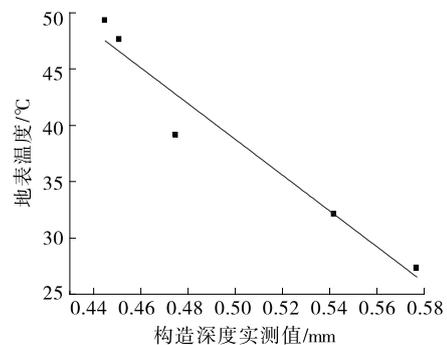


图 2 沥青路面构造深度与地表温度的关系

按照线性相关拟合,路面构造深度与地表温度的相关系数为 0.933,远大于 0.800,可认为构造深度

与地表温度具有高度相关性, 沥青路面构造深度与地表温度间的关系显著。

### 2.3.3 横向力系数与路面构造深度的相关性

对不同运营时间同一路段沥青路面进行横向力系数与构造深度相关性分析。构造深度为各测点实测值, 横向力系数为构造深度测点左右各 50 m 路段的均值。2017 年、2019 年横向力系数与构造深度的关系分别见图 3、图 4。

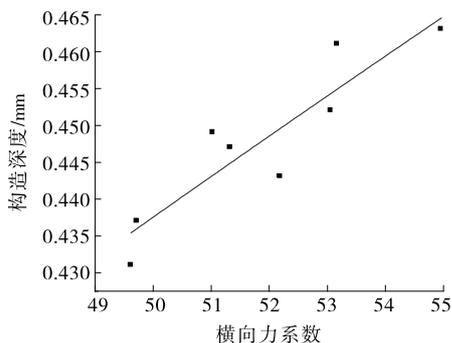


图 3 2017 年实测横向力系数与构造深度的关系

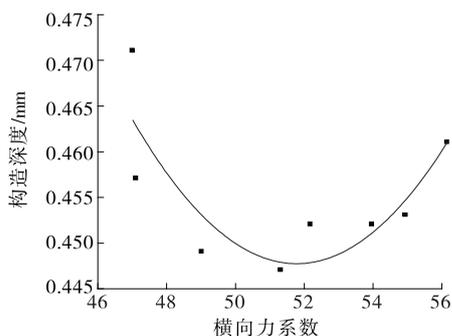


图 4 2019 年实测横向力系数与构造深度的关系

对 2017—2021 年该路段路面横向力系数与构造深度的关系进行拟合, 拟合结果见表 6。其中: 2017 年拟合数据更符合一次函数, 相关系数达 0.789; 2019 年拟合数据更符合二次函数, 相关系数仅为 0.467。

表 6 沥青路面横向力系数与构造深度的相关系数

年份	相关系数	年份	相关系数
2017	0.789	2020	0.375
2018	0.676	2021	0.305
2019	0.467		

由表 6 可知: 随着时间的增长, 路面横向力系数和构造深度的线性相关性越来越小。2017 年线性相关系数达 0.789, 而 2019 年逐渐趋向于非线性相

关, 相关系数仅为 0.467, 显著小于 2017 年实测数据的相关性。其原因是 2017 年对该路段进行了养护, 横向力系数与构造深度的相关性最大, 此后随着病害的出现, 横向力系数与构造深度的相关性逐渐减弱。

综上所述, 经过养护后, 路面横向力系数与路面构造深度的相关性得到加强, 但随着运营时间的增长, 横向力系数与构造深度的相关性减弱, 此时须同时进行横向力系数和构造深度检测, 不能单独以其中一项检测结果作为路面抗滑性能评价依据。尤其是对于新摊铺的路面, 在进行路面性能检测时, 若路面横向力系数超出规定值, 而构造深度满足要求, 则须加强对沥青路面原材料的控制, 选择优质的原材料; 若构造深度不满足要求, 而路面横向力系数满足要求, 则须分析路面原材料的配比并进行优化。在对运营路面进行检测时, 可将路面横向力系数和构造深度共同作为路面抗滑性能评价指标。

## 3 结论

(1) 横向力系数随着时间的增长逐渐减小, 4 项影响因素并未呈现出与时间的相关性。日均交通量与横向力系数的关联度最大, 为抗滑性能的重要影响因素, 其次是最低气温, 年降水量的影响最小。

(2) 沥青路面横向力系数与行车速度具有高度相关性, 随着行车速度的增加, 横向力系数先增大后减小, 速度为 60 km/h 时横向力系数最大, 速度大于 60 km/h 时横向力系数减小, 且下降趋势明显。

(3) 横向力系数与路面构造深度具有相关性。随着路面运营时间的增长, 横向力系数与构造深度的相关性逐渐降低。进行路面养护, 提高路面抗滑性能的同时, 也使横向力系数与构造深度的相关性得到增强。在道路运营中, 应尽量将横向力系数和构造深度共同作为路面抗滑性能评价指标。

## 参考文献:

- [1] 周磊. 影响沥青路面抗滑性能因素的研究[J]. 公路与汽运, 2016(2): 96-98.
- [2] 王永平, 黄维蓉. 室内沥青路面抗滑性能衰减规律研究及模型分析综述[J]. 中外公路, 2015, 35(3): 299-302.
- [3] 王松林, 张恺, 于晓贺, 等. 沥青路面磨损指数与抗滑性能指数相关性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(4): 752-756.

(下转第 76 页)