

路表纹理包络轮廓计算及其对抗滑性能的影响

冉茂平^{1,2}, 周兴林¹, 肖神清³, VIEIRA Tiago², SANDBERG Ulf²

(1. 武汉科技大学 汽车与交通工程学院, 湖北 武汉 430065; 2. 瑞典国家道路与运输研究所, 东约特兰 林雪平 58235; 3. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要:为了分析轮胎与路表的接触特性及其对路面抗滑性能的影响,采用路面纹理测量车(road surface tester)获取路表纹理二维轮廓离散数据,运用印痕法模型,利用 MATLAB 软件计算路表纹理包络轮廓,进一步计算了包络轮廓对应的平均断面深度(mean profile depth,MPD)、宏观纹理表面构造水平指数 L_{Ma} (macro texture indices calculated with texture level)、粗大纹理表面构造水平指数 L_{Me} (mega texture indices calculated with texture level)等纹理指标,并与初始轮廓纹理指标进行对比;最后计算包络轮廓、初始轮廓纹理参数 MPD、 L_{Ma} 与路面摩擦因数(longitudinal frictional coefficient,LFC)的相关性系数,分析了路表纹理包络轮廓对路面抗滑性能的影响。研究表明:包络轮廓纹理参数与初始轮廓纹理参数相关性良好(判定系数 $R^2 > 0.85$);包络轮廓 MPD 值较初始轮廓 MPD 值有明显下降,且初始轮廓 MPD 值越大,包络轮廓 MPD 值下降幅度也越大;包络轮廓表面构造水平指数较初始轮廓表面构造水平指数下降, L_{Ma} 的下降幅度比 L_{Me} 的下降幅度高 10%左右;印痕法参数 S 取值对包络轮廓纹理参数有较大影响, S 值越小,其对应的包络轮廓纹理参数值较初始轮廓纹理参数值下降的幅度越大;此外,包络轮廓纹理参数与摩擦因数的判定系数较初始轮廓纹理参数与摩擦因数的判定系数有较大提升,其中 MPD 与摩擦因数的判定系数提高了约 35%, L_{Ma} 与摩擦因数的判定系数提高了约 23%;印痕法参数 S 值越小,包络纹理参数与摩擦因数的判定系数越高。该结果可为研究胎-路接触特性对路用性能的影响提供参考。

关键词:道路工程;包络轮廓;印痕法;胎-路接触;抗滑

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A **DOI:**10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.05.002

Pavement enveloped texture profile calculation and its impact on pavement skid resistance

RAN Mao-ping^{1,2}, ZHOU Xing-lin¹, XIAO Shen-qing³, VIEIRA Tiago², SANDBERG Ulf²

(1. School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, Hubei, China; 2. Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linköping 58235, Östergötland, Sweden; 3. School of Traffic Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

Abstract: To analyze tire-road contact characteristics and the effect of the contact on pavement skid resistance, the two-dimensional discrete data of the road texture profile was measured using

收稿日期:2019-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51778509,51578430);湖北省自然科学基金项目(2018CFB293);
湖北省教育厅科研项目(B2016011)

作者简介:冉茂平(1981-),女,重庆铜梁人,讲师,工学博士,E-mail:mpran@163.com。

通讯作者:周兴林(1965-),男,湖北荆州人,教授,博士研究生导师,E-mail:zx165@163.com。

the road surface tester, and the enveloped profile was calculated using the indenter method in MATLAB. Based on the enveloped profile, texture parameters such as mean profile depth (MPD), macro texture indices calculated with texture level (L_{Ma}), and mega texture indices calculated with texture level (L_{Mc}) were calculated, and comparisons were made between these and the original profile. Then, the correlation between the friction value (longitudinal friction coefficient, LFC), and the calculated texture parameters considering the original and enveloped texture profiles were analyzed. The results show that the calculated texture parameters with the enveloped profile have a high correlation with those calculated with the original profile, the determination coefficient R^2 is higher than 0.85. The calculated MPD value with the enveloped profile shows a significant decrease, compared to that calculated with the original profile, and the larger the original MPD value, the greater the decrease in the envelope contour MPD value. The calculated texture level indices with the enveloped profile are also reduced when compared to the original. The decline rate of L_{Ma} is about 10% higher than L_{Mc} . The variable parameter S from the indenter method has a significant impact on the enveloped texture parameters, texture parameters with a smaller S show a higher decline. The determination coefficients between friction value LFC and calculated pavement texture parameters with the enveloped profile improved significantly compared with the original, with an increase of approximately 35% in MPD and 23% in L_{Ma} . The research results can provide a reference for studying the effect of tire-road contact characteristics on road performance. 2 tabs, 14 figs, 27 refs.

Key words: road engineering; enveloped profile; indenter method; tire-road interaction; skid resistance

0 引言

沥青路面与轮胎的接触状态对行车安全十分重要^[1-3]。胎-路接触特性对路表功能,如路面抗滑、胎-路噪声以及胎-路滚动阻力有重要作用^[4]。轮胎橡胶胎面并非完全弹性的材料,当轮胎与道路表面接触时,其接触并非完全接触,而是胎面橡胶与道路表面凸出体的部分接触,特别是当道路表面具有较深的不规则锐谷(如多孔沥青路面)或者较深的规则沟槽(如横向沟槽混凝土路面)时,这种接触现象表现得更突出^[5]。Kanafi 等认为,胎-路摩擦主要与路表顶部部分的粗糙程度有较大关系,在一定尺度内(表面纹理水平波长小于 1 mm),20%的顶部纹理功率谱与摩擦因数相关性可达到 80%左右^[6]。研究表明,胎-路实际接触是路面凸出部位的微凸体与胎面橡胶真实接触,真实的接触面积远小于名义接触面积^[7-10]。在简化的二维空间下,胎-路实际接触区域可用胎-路接触包络线表示,胎-路接触包络线即为胎-路接触包络轮廓(简称包络轮廓)。因此,包络轮廓较路表纹理实际测量轮廓更贴近轮胎与路面的真实接触状况,是分析胎-路接触特性对路面性能影响的重要因素。

Clapp 将路面和轮胎分别简化为粗糙刚体与半无限空间弹性体,基于胎-路接触压力分布理论,通过建立胎-路接触压力分布解析模型来计算表面轮廓的压力分布情况,通过直线连接压力分布轮廓曲线,得到包络轮廓^[11-12]。随后,Fong 等对 Clapp 模型进行了改进^[13]。Hamet 等在 Clapp 模型的基础上,将轮胎简化为半无限弹性介质,用独立弹簧张力板模拟轮胎花纹,提出了包络轮廓的静态与动态计算方法;基于包络轮廓计算平均断面深度(MPD),分析了路面纹理特性对胎-路噪声影响,并进一步将包络轮廓向三维空间扩展,提出了三维包络面的计算方法^[14-17]。上述基于胎-路接触压力分布的解析模型求解包络轮廓的计算方法,需要根据轮胎橡胶材料的性能参数(如弹性模量 E 、泊松比 ν 等)来决定采用何种数学函数或方法对包络轮廓进行计算,导致表面纹理包络轮廓的处理比较复杂,且不利于理论模型的扩展计算。

Von Meier 等提出一种基于路表轮廓二阶偏导的包络轮廓计算方法,并在包络轮廓基础上分析了路表纹理与胎-路噪声的关系^[18]。Pinnington 将路表轮廓划分为相等的搜索间隔以识别最高峰值,从而获得峰值包络(线)、接触直径和峰值之间的间距

等参数^[19]。陈德等利用 HHT (Hilbert-Huang transform) 理论,基于混合料表面构造的联合固有模态 (intrinsic mode function),计算了表面构造包络线^[20-21]。上述研究采用数学方法计算包络轮廓时,着重考虑路表纹理特性而忽略了轮胎与粗糙路面接触时的变形特性,得到的包络轮廓不能较好地反映轮胎与路面真实的接触状态。

Goubert 等采用塑性橡皮泥填充方法,基于轮胎与路表纹理顶部部分完全接触的假设以及路面印痕的模拟试验,提出了一种简单、较为准确的包络轮廓计算方法——印痕法 (indentor method)^[22-25]。通过与 Von Meier 等包络轮廓^[18]对比,发现印痕法计算所得包络轮廓能更为准确地反映轮胎与路面接触的实际情况,基于包络轮廓计算的 MPD 与胎-路噪声、滚动阻力的相关性较好。

综上可知,基于包络轮廓开展路面抗滑性能的研究甚少。为此,本文采用印痕法计算包络轮廓,基于包络轮廓计算路表纹理参数并与初始轮廓纹理参数进行对比,对包络轮廓纹理参数与路面摩擦因数的相关性进行分析,研究包络轮廓对路面抗滑性能的影响,为开展胎-路接触下路面性能的研究提供理论支持。

1 包络轮廓印痕法

假设轮胎与路面表面纹理顶部部分接触,且接触是完全紧密的印痕式接触,接触面积为 S 。假定路面纹理二维初始轮廓 P 已知,并且可以用离散坐标点 (x_i, y_i) 来表示,即 $P = (x_i, y_i)$ 。其中: i 为纹理轮廓离散点编号; x_i 为第 i 个离散点的横坐标; y_i 为第 i 个离散点的纵坐标,即该点的轮廓高程值。印痕法计算包络轮廓流程如图 1 所示,计算步骤如下^[22-25]。

(1) 将路面纹理初始轮廓平均等分,等分长度 L 与胎-路接触区域有关,主要取决于轮胎尺寸,本文令 $L = 90 \text{ mm}$; 等分后,可以得到多个初始轮廓 P_n ($n = 1, 2, 3, \dots, m$)。

(2) 对初始轮廓 P_n 进行倾斜与偏移校正。参照规范 (ISO/TS 13473-4)^[26],根据式 (1) 消除初始轮廓的倾斜与偏移误差,倾斜与偏移校正后的纹理轮廓用 $P'_n = (x_i, z_i)$ 表示。

$$z_i = y_i - b_1 i - b_0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (1)$$

式中: z_i 为第 i 个离散点倾斜与偏移误差消除后的轮廓高程值; N 为校正轮廓包含的离散数据点; b_1 为斜率校正系数; b_0 为偏移校正系数, b_1 、 b_0 计算分别为

$$b_1 = \frac{12 \sum_{i=0}^{N-1} i y_i - 6(N-1) \sum_{i=0}^{N-1} y_i}{N(N+1)(N-1)} \quad (2)$$

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i - \frac{1}{2} b_1 (N-1) \quad (3)$$

(3) 根据轮廓对应的最大高程值 z_m , 设置 1 条高度 $h = z_m - k$ 的水平线, k 为高程下降参数, $k \geq 0$ 且 k 的初始值为 0。

(4) 计算轮廓与所绘水平线围成的面积 A 。判断 A 与接触面积 S (预先设定) 的关系, 若 $A < S$, 则 k 值增加 1 步 Δk , 即 $k = k + \Delta k$ (Δk 的取值可根据离散轮廓的采样间距确定, 本文取 0.01 mm), 同时返回步骤 (3)。

(5) 如果 $A \geq S$, 保留纹理轮廓中高程值大于或等于所绘水平线高程的点 ($z_i \geq h$), 并将其标记为保留点; 将纹理轮廓中高程值小于所绘水平线高度的点 ($z_i < h$) 标记为内插点。

(6) 重复步骤 (2)~(5), 处理下 1 个初始纹理轮廓, 直至所有分段的初始纹理轮廓均被处理。

(7) 计算表面纹理包络轮廓 (x_i, Y_i) 。返回初始轮廓 (x_i, y_i) , 对所有保留点 i , 令其包络轮廓高程值 Y_i 等于初始轮廓高程值 y_i , 即 $Y_i = y_i$; 对所有内插点, 其包络轮廓高程值 Y_i 需根据与之邻近的前后 2 个保留点的高程值 y_i 进行内插计算。内插计算时, 尽量使用平滑线将内插点与相邻的保留点连接, 可选用 3 次 Hermite 样条插值法。经计算后, 即可得与纹理初始轮廓相对应的表面纹理包络轮廓 (x_i, Y_i) 。

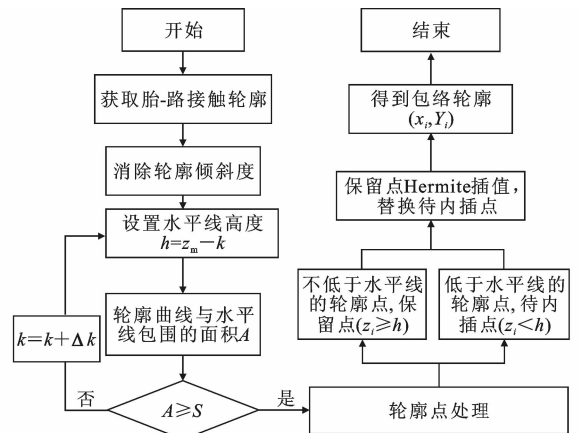


图 1 印痕法计算表面纹理包络轮廓流程

Fig. 1 Procedures of pavement enveloped texture profile calculation of indentor method

图 2 为包络轮廓的示意^[22], 细实线表示路表纹理初始轮廓; 粗虚线表示经过计算后得到的包络轮廓; 细虚线表示计算过程中绘制的辅助水平线。

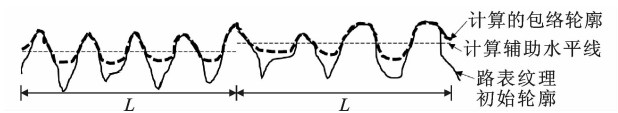


图 2 包络轮廓示意

Fig. 2 Illustration of enveloped profile

参数 S 的取值是印痕法计算的关键。参数 S 与轮胎的橡胶特性、胎压以及行驶速度有关。文献[22]、文献[23]采用直观实测对比法,讨论了不同轮胎在不同胎压、不同速度下 S 的取值情况,并计算不同 S 值(S 取 2、4、6、8、10、20、30、50 mm^2)对应的包络轮廓,与不同条件下实测包络轮廓进行对比,将最接近实测值的计算包络轮廓对应的 S 值作为该条件下的推荐值。根据研究结果,推荐标准测试轮胎(standard reference testing tire, SRTT)在胎压为 0.2 MPa、速度约 20 km/h 的情况下, S 取值 6 mm^2 。

2 表面纹理包络轮廓对纹理参数的影响分析

采用瑞典国家道路与运输研究所的路面纹理测试车(road surface tester, RST),如图 3 所示。实地测量了 12 个路段的轮廓数据,路段的位置分布情况

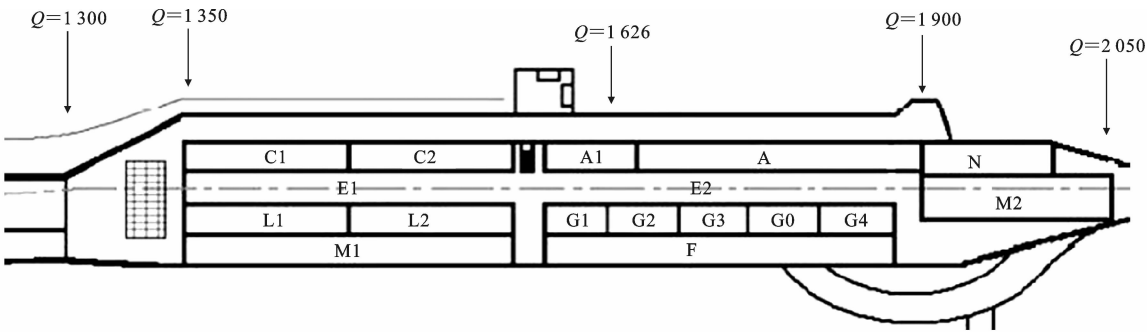
见图 4,图中 Q 为测量点距测试起点的距离。RST 采样间距为 0.2 mm,测量速度为 50 km/h,每个路段测量 3 次。纹理参数计算时,取 3 次计算的平均值作为该路段纹理参数的最终值。测量路段相关信息如表 1 所示。



图 3 路面纹理测试车

Fig. 3 Road surface tester

根据印痕法原理,借助 MATLAB 软件,采用 3 次 Hermite 插值法编程计算各测试路段的包络轮廓。综合考虑文献[22]、文献[23]的研究结果与实际测量轮胎的条件,本文 S 值除了取推荐值 6 mm^2 外,同时还取 10 mm^2 进行对比分析。图 5 为测量路段 A 部分初始轮廓与包络轮廓。



单位: m

图 4 测试路段位置分布

Fig. 4 Testing pavement surface location

表 1 测试路段编号及相应的初始轮廓 MPD 值

Tab. 1 Testing sections No. and corresponding original MPD values

测试路段编号	A	A1	C1	C2	E1	E2	F	L1	L2	M1	M2	N
测试长度/m	220	50	140	100	252	250	250	128	116	244	150	186
计算长度/m	100	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
初始轮廓 MPD 值/mm	1.27	2.95	0.35	4.03	0.94	1.17	1.56	0.14	0.81	1.44	1.27	0.45

由图 5 可以看出,包络轮廓较初始轮廓小, S 值越大,与之对应的包络轮廓越接近初始轮廓。从包络轮廓可以看出,轮胎与路表纹理的接触并非完全接触,而是与纹理微凸体顶部部分接触。 S 值越小,与轮胎接触的表面微凸体数量与接触

部分越少,表明轮胎与路表实际接触面积也越小。

2.1 MPD 对比分析

依据规范(ISO/DIS 13473-1)^[27],分别计算各测试路段初始轮廓与包络轮廓对应的 MPD 值为

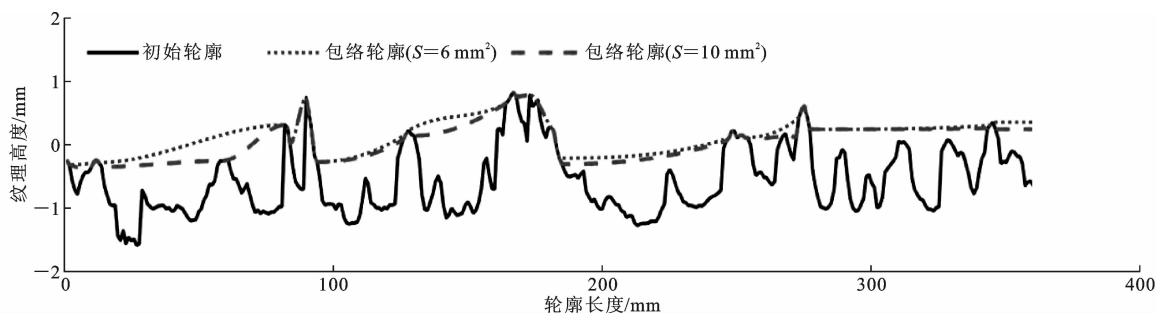


图 5 测试路段 A 部分初始轮廓与包络轮廓

Fig. 5 Original and enveloped profile of testing section A (only a part)

$$M_{\text{MSD}} = \frac{\max(y_1, y_2, \dots, y_n) + \max(y_{\frac{n}{2}+1}, \dots, y_n)}{2} - y_{\text{ave}} \quad (4)$$

式中: M_{MSD} 为长度 100 mm 的纹理轮廓的 MPD 值;

y_{ave} 为计算轮廓所有点高程的平均值。

经计算得到各测试路段包络轮廓 MPD 值与初始轮廓 MPD 值(表 1)的相对值(包络轮廓 MPD 值除以初始轮廓 MPD 值),如图 6 所示。

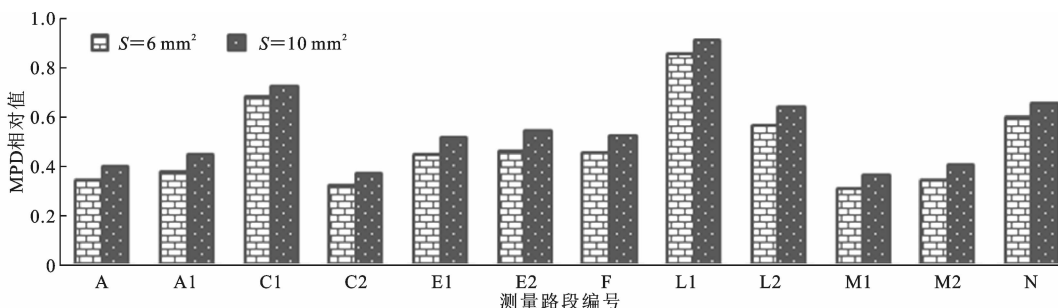


图 6 测量路段包络轮廓 MPD 的相对值

Fig. 6 Relative values of MPD for different testing sections calculated with enveloped profile

由图 6 可以看出:各测量路段的包络轮廓 MPD 值较初始轮廓 MPD 值有明显降低,即相对值均小于 1;在 S 一定的情况,初始 MPD 值越大,包络轮廓 MPD 相对值越小,即包络轮廓 MPD 值降低幅度越大;初始 MPD 值越小,包络轮廓 MPD 相对值越大,包络轮廓 MPD 值下降幅度越小; S 值越小,对应的包络轮廓 MPD 值也越小。

对包络轮廓 MPD 值与初始轮廓 MPD 值进行相关性分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,包络轮廓 MPD 值与初始 MPD 值之间的判定系数 R^2 高达 0.95 以上,表明二者具有良好的相关性。

2.2 表面纹理构造水平的对比分析

依据规范(ISO/TS 13473-4)^[26]中纹理轮廓表面构造水平计算方法,计算了初始轮廓与包络轮廓的表面构造水平分布。图 8 为测试路段 A 初始轮廓与包络轮廓的表面构造水平分布。对比初始轮廓与包络轮廓的表面构造水平发现,各测试路段包络轮廓表面构造水平在波长 $\lambda < 100$ mm 范围内较初始轮廓表面构造水平都有明显下降。

基于轮廓表面构造水平,进一步计算表征路表

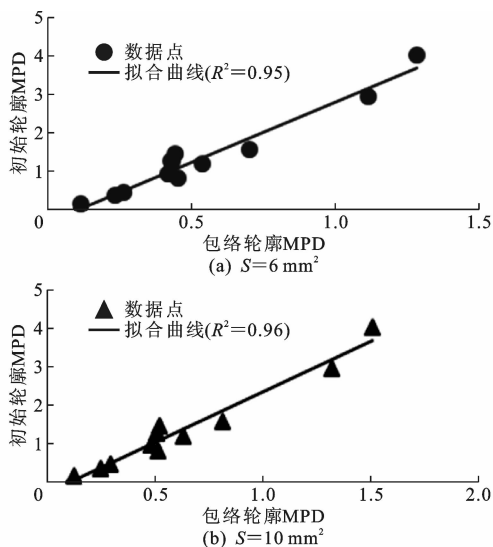


图 7 初始轮廓 MPD 值与包络轮廓 MPD 值的相关性

Fig. 7 Correlations between MPD values calculated with original and enveloped profiles

粗大纹理、宏观纹理的表面构造水平指数 L_{Me} 、 L_{Ma} , 其计算为

$$L_{\text{Me}} = L_{\text{tx}, 63-500} = 10 \lg \left(\sum_{\lambda=63}^{500} 10 \frac{L_{\text{tx}, \lambda}}{10} \right) \quad (5)$$

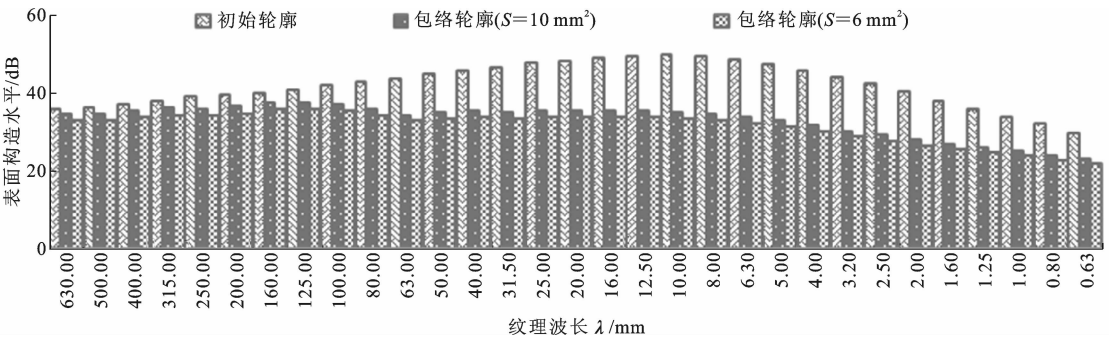


图 8 测量路段 A 初始轮廓与包络轮廓表面构造水平分布

Fig. 8 Texture levels calculated with original and enveloped profile for testing track A

$$L_{Ma} = L_{tx,0.63-50} = 10\lg\left(\sum_{\lambda=0.63}^{50} 10 \frac{L_{tx,\lambda}}{10}\right) \quad (6)$$

式中： $L_{tx,0.63-50}$ 为波长 0.63 ~ 50 mm 范围内三分之一倍频带对应的表面构造水平，表征路面宏观构造水平； $L_{tx,63-500}$ 为波长 63 ~ 500 mm 范围内三分之一倍频带对应的表面构造水平，表征路面粗大构造

水平； $L_{tx,\lambda}$ 为波长 λ 处三分之一倍频带对应的表面构造水平。

由于纹理数据采集精度的原因，本文未计算表征路面微观纹理($\lambda < 0.5$ mm)的表面构造水平分布指数。计算得到包络轮廓 L_{Ma} 、 L_{Me} 与初始轮廓 L_{Ma} 、 L_{Me} 的相对值如图 9、图 10 所示。

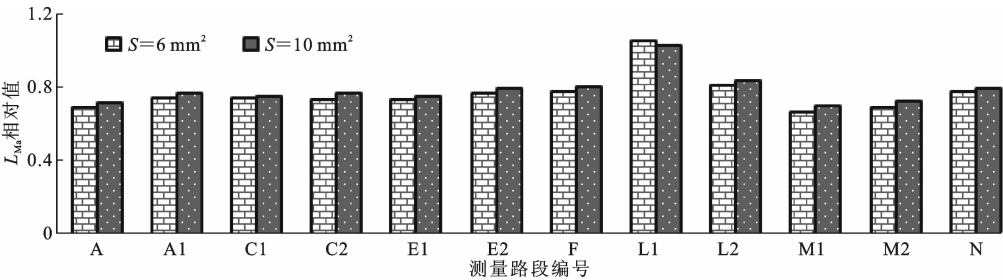


图 9 测量路段包络轮廓 L_{Ma} 的相对值

Fig. 9 Relative values of L_{Ma} for different test sections calculated with enveloped profile

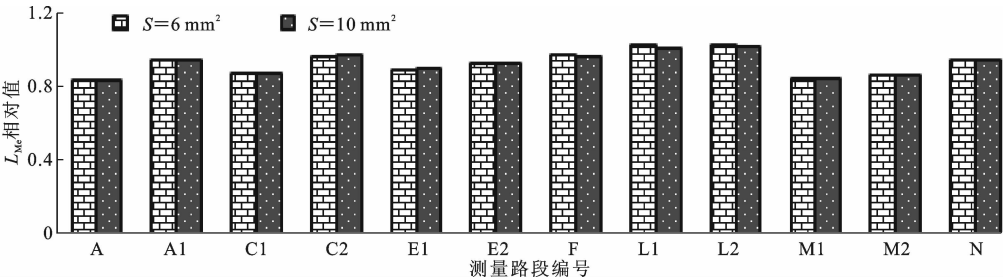


图 10 测量路段包络轮廓 L_{Me} 相对值

Fig. 10 Relative values of L_{Me} for different test sections calculated with enveloped profile

由图 9、图 10 可以看出：除测试路段 L1 外，包络轮廓较初始轮廓的 L_{Ma} 、 L_{Me} 均有下降；在 S 相同情况下， L_{Ma} 下降幅度比 L_{Me} 下降幅度约大 10%； S 对包络轮廓 L_{Ma} 的影响非常小， $S=6 \text{ mm}^2$ 时包络轮廓与初始轮廓的 L_{Ma} 相对值的平均值为 0.766， $S=10 \text{ mm}^2$ 时包络轮廓与初始轮廓 L_{Ma} 相对值的平均值为 0.789； S 对包络轮廓 L_{Me} 值几乎没有影响， $S=6 \text{ mm}^2$ 时包络轮廓与初始轮廓 L_{Me} 相对值的平均值为 0.926， $S=10 \text{ mm}^2$ 时包络轮廓与初始轮廓 L_{Me}

相对值的平均值为 0.925。

对包络轮廓与初始轮廓的 L_{Ma} 、 L_{Me} 进行相关性分析，结果如图 11、图 12 所示。由图 11、图 12 可知： S 分别为 6、10 mm^2 时，包络轮廓与初始轮廓 L_{Ma} 的判定系数 R^2 分别为 0.87、0.89； S 分别为 6、10 mm^2 时，包络轮廓与初始轮廓 L_{Me} 的 R^2 分别为 0.86 与 0.88。说明包络轮廓与初始轮廓 L_{Ma} 、 L_{Me} 之间具有良好的相关性。

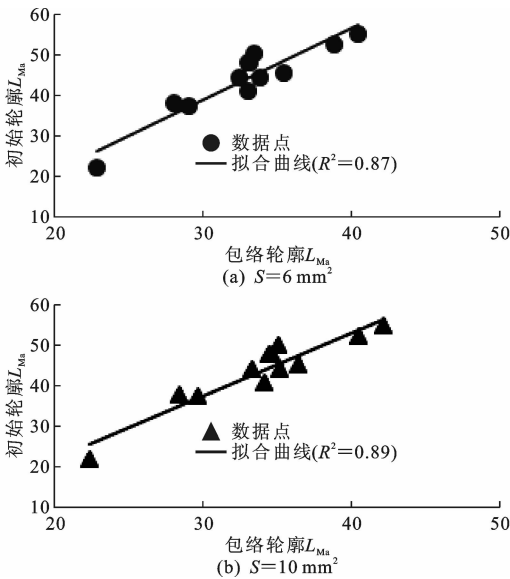


图 11 初始轮廓 L_{Ma} 与包络轮廓 L_{Ma} 的相关性
Fig. 11 Correlations between L_{Ma} values with original and enveloped profiles

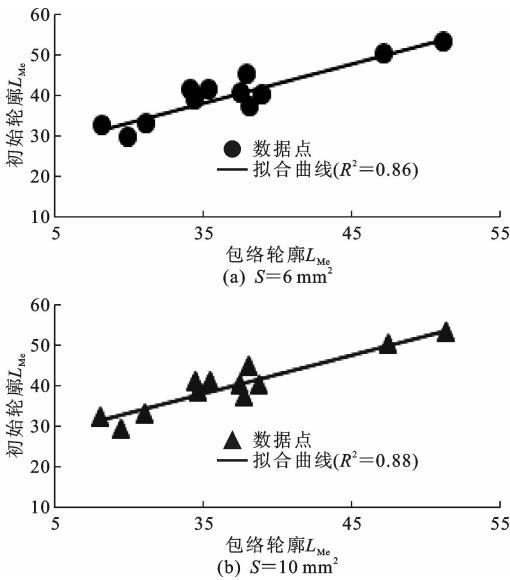


图 12 初始轮廓 L_{Me} 与包络轮廓 L_{Me} 的相关性
Fig. 12 Correlations between L_{Me} values with original and enveloped profiles

3 表面纹理包络轮廓对路面抗滑性能的影响

为了研究包络轮廓对路面抗滑性能的影响,本文对部分纹理测试路段进行了抗滑摩擦因数的测量。测试设备为 Roadstar(滑移率 18%),测量速度为 60 km/h,测量时摩擦因数(longitudinal friction coefficient,LFC)的记录间距为 10 m。每个测量路段的测量长度与纹理计算长度一致,有效测量次数为 5。测量后,取每个路段有效测试次数下摩擦因

数的平均值作为该路段的摩擦因数。各测量路段摩擦因数如表 2 所示。

表 2 测量路段摩擦因数

Tab. 2 LFC values of testing sections

测试路段编号	A	E1	E2	F	L2	M2	L1
摩擦因数均值	0.53	0.52	0.51	0.85	0.65	0.49	0.21

在路面抗滑性能研究中,MPD 是最常用的纹理分析参数, L_{Ma} 是路表宏观纹理的反映。本文主要分析 MPD、 L_{Ma} 与路面摩擦因数的关系。不同纹理轮廓对应的 MPD、 L_{Ma} 与摩擦因数的相关性分析结果如图 13、图 14 所示。

由图 13、图 14 可以看出:摩擦因数与初始轮廓 MPD 值的判定系数为 0.62, S 分别为 10、6 mm^2 时摩擦因数与包络轮廓 MPD 值的判定系数 R^2 分别为 0.84、0.86, R^2 提高了约 35%;摩擦因数与初始轮廓 L_{Ma} 的 R^2 为 0.69, S 分别为 10、6 mm^2 时摩擦因数与包络轮廓 L_{Ma} 的判定系数分别为 0.85、0.89, R^2 提高了约 23%。由此可知,经印痕法计算后,表面纹理参数与路面摩擦因数间的 R^2 有明显提高, $S=6 \text{ mm}^2$ 对应的 R^2 稍大于 $S=10 \text{ mm}^2$ 对应的 R^2 ;总体来说, S 在本文中的取值对纹理参数与摩擦因数的判定系数影响不大。

4 结 语

(1)基于印痕法计算了包络轮廓。包络轮廓小于初始轮廓,是轮胎与路表纹理微凸体顶部部分接触的结果,反映了轮胎与路表纹理的实际接触状况。随着包络轮廓参数 S 的减小,与轮胎接触的表面纹理微凸体个数及相应的部分也减少。

(2)包络轮廓纹理参数 MPD、 L_{Ma} 、 L_{Me} 均较初始轮廓对应的纹理参数均有下降,初始轮廓纹理参数值越大,包络轮廓纹理参数下降幅度也越大,包络轮廓纹理参数与初始轮廓纹理参数相关性判定系数高达 85% 以上。

(3)对包络轮廓纹理参数与路面摩擦因数进行线性相关性分析,其判定系数较初始轮廓纹理参数与路面摩擦因数的线性判定系数有明显提升,上升幅度达 20% 以上。

(4)本文利用包络轮廓反映轮胎与路面的真实接触状态,基于包络轮廓对路面抗滑性能进行分析能更精确地反映路表纹理与路面抗滑性能间的关系,研究结果可为路面抗滑性能的预测与评价提供良好的理论基础。印痕法参数 S 对包络轮廓纹理参数以及路面抗滑性能的评价均有影响,后续可进

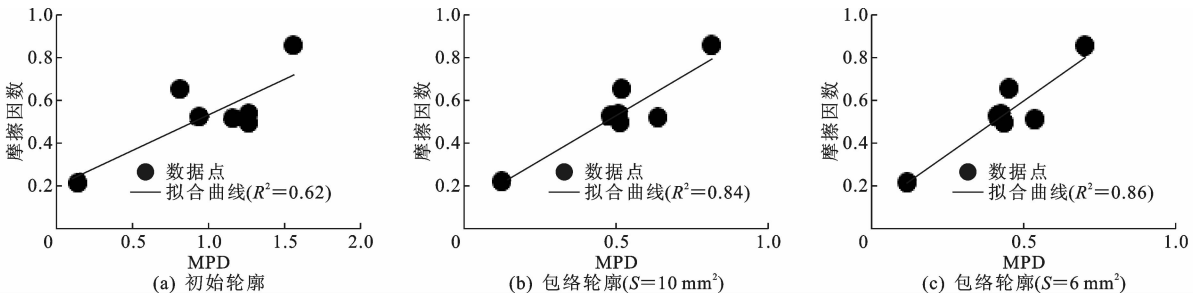


图 13 摩擦因数与不同轮廓 MPD 值的相关性

Fig. 13 Correlations between LFC and MPD values with original and enveloped profiles

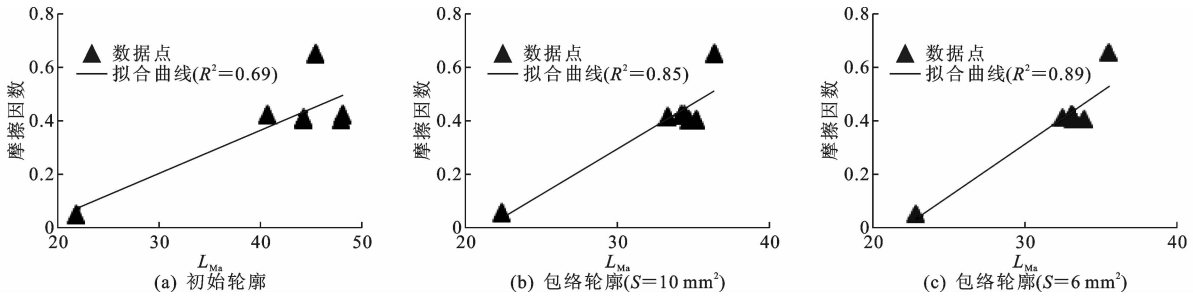


图 14 摩擦因数与不同轮廓 L_{Ma} 值的相关性

Fig. 14 Correlations between LFC and L_{Ma} values with original and enveloped profiles

一步讨论 S 的取值情况,同时开展包络轮廓对胎-路噪声、胎-路滚动阻力等路用性能的影响研究。

参考文献:

References:

[1] HALL J W, SMITH K L, TITUS-GLOVER L, et al. Guide for pavement friction[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 2009.

[2] AUSTRoads, Guidelines for the management of road surface skid resistance[S].

[3] FARBER E, JANOFF M S, CRISTINZIO S, et al. Determining pavement skid-resistance requirements at intersections and braking sites[R]. Washington DC: Transportation Research Board, 1974.

[4] CESBRON J, ANFOSSO-LEDEE F, YIN H P, et al. Influence of road texture on tyre/road contact in static conditions: Numerical and experimental comparison[J]. Road Materials and Pavement Design, 2008, 9 (4): 689-710.

[5] SANDBERG U, BERGIERS A, EJSBOM J A, et al. Road surface influence on tyre/road rolling resistance[R]. Linköping: Swedish Road and Transport Research Institute, 2011.

[6] KANAFI M M, TUONONEN A J. Top topography surface roughness power spectrum for pavement friction evaluation [J]. Tribology International, 2017, 107: 240-249.

[7] PERSSON B N J. Theory of rubber friction and contact mechanics[J]. Journal of Chemical Physics, 2001, 115(8): 3840-3861.

[8] PERSSON B N J, VOLOKITIN A I. Rubber friction on smooth surfaces[J]. The European Physical Journal, 2006, 21: 69-81.

[9] 张淑文. 基于界接触特性的多尺度沥青路面抗滑性能评价及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.

ZHANG Shu-wen. Research on multi-scale asphalt pavement skid resistance based on interface contact performance[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

[10] 王端宜, 王 刚, 李 智, 等. 基于压力胶片技术的沥青混合料抗滑耐久性评价[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 1-9.

WANG Duan-yi, WANG Gang, LI Zhi, et al. Evaluation of anti-sliding durability of asphalt mixture based on pressure film technology [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(9): 1-9.

[11] CLAPP T G. Spectral correlation of the surface profile in the development of a tire and pavement interaction force model[D]. Raleigh: North Carolina State University, 1983.

[12] CLAPP T G. Development and validation of a method for approximating road surface texture-induced contact pressure in tire-pavement interaction[J]. Tire Science & Technology, 1988, 16(1): 2-17.

- [13] FONG S. Tyre noise predictions from computed road surface texture induced contact pressure[C]//INCE-USA. Proceedings of Inter-noise and Noise-con Congress and Conference. Reston; Institute of Noise Control Engineering, 1998; 828-831.
- [14] HAMET J F, KLEIN P. Road texture and tire noise [C]//INCE-USA. Proceedings of the 29th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Reston; Institute of Noise Control Engineering, 2000; 1-6.
- [15] KLEIN P, HAMET J F. Road texture and rolling noise; An envelopment procedure for tire-road contact [R]. Lyon; INRETS-LTE, 2004.
- [16] KLEIN P, HAMET J F, ANFOSSO-LEDEE F. An envelopment procedure for tire/road contact [C]//ARRB. Proceedings of Pavement Surface Characteristics of Roads and Airports. Melbourne; ARRB, 2004; 1-8.
- [17] KLEIN P, CESBRON J. A 3D envelopment procedure for tyre belt radiated noise level prediction [C]//INCE-USA. Proceedings of Inter-noise and Noise-con Congress and Conference. Reston; Institute of Noise Control Engineering, 2016; 3823-3834.
- [18] VON MEIER A, VAN BLOKLAND G J, DESCOMET G. The influence of texture and sound absorption on the noise of porous road surfaces [C]//ISRSC. Proceedings of the Second International Symposium on Road Surface Characteristics. Berlin; ISRSC, 1992; 7-19.
- [19] PINNINGTON R J. Tyre-road contact using a particle-envelope surface model[J]. Journal of Sound & Vibration, 2013, 332(26): 7055-7075.
- [20] 陈 德. 沥青混合料表面构造图像评价方法及抗滑降噪性能预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
CHEN De. Study on image-based texture analysis method and prediction of skid-resistance & tire/pavement noise reduction of HMA [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [21] 陈 德, 韩 森, 凌 诚, 等. 沥青混合料表面构造水平及分布特性测试方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 25-31, 38.
CHEN De, HAN Sen, LING Cheng, et al. Test method of level and distribution of hot mixed asphalt surface texture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 25-31, 38.
- [22] GOUBERT L, SANDBERG U. Enveloping texture profile for better modeling of the rolling resistance and acoustic qualities of road pavements[R]. Washington DC; Transportation Research Board, 2018.
- [23] GOTTAUT C, GOUBERT L. Texture-based descriptors for road surface properties and how they can be used in the appropriate standards [R]. Linköping: Road and Transport Research Institute, 2016.
- [24] 周兴林, 蒋难得, 肖旺新, 等. 基于激光视觉的沥青路面构造深度测量方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 11-16.
ZHOU Xing-lin, JIANG Nan-de, XIAO Wang-xin, et al. Measurement method for mean texture depth of asphalt pavement based on laser vision [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3): 11-16.
- [25] 周兴林, 祝媛媛, 冉茂平, 等. 基于分段变维的沥青路表纹理磨光行为分析[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 187-195, 242.
ZHOU Xing-lin, ZHU Yuan-yuan, RAN Mao-ping, et al. Polishing behavior analysis of asphalt pavement surface texture based on piecewise variable dimension fractal[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 187-195, 242.
- [26] ISO/TS 13473-4, Characterization of pavement texture by use of surface profiles—Part 4: Spectral analysis of texture profiles[S].
- [27] ISO/DIS 13473-1, Characterization of pavement texture by use of surface profiles—Part 1: Determination of mean profile depth[S].