

三维胎 - 路接触包络轮廓计算及其对抗滑性能的影响

葛海¹, 关佳希², 肖神清³

¹武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

²湖北省计量测试技术研究院, 湖北 武汉

³武汉科技大学城市建设学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年8月6日; 发布日期: 2024年8月13日

摘要

为了分析轮胎与路表的接触特性及其对路面的抗滑性能影响, 基于胎 - 路接触印痕法理论, 提取了胎 - 路接触的三维包络轮廓, 并计算了路面区域的三维纹理表征参数。进一步, 分析了初始轮廓的三维特征参数与路面摩擦系数之间的相关性, 并筛选出与摩擦系数相关性较高且彼此相对独立的特征参数, 对这些参数在初始轮廓与包络轮廓中独立进行了多元回归分析。结果表明, 尽管SMTD、 S_{pd} 和 V_{mc} 这三个常用纹理特征参数在相关性分析决定系数有所提升(包络轮廓相较于初始轮廓提升8%), 但决定系数未达到强相关水平, 表明这些参数未能有效反映与路面抗滑性能的关系。然而, 通过筛选出的特征参数进行分析显示, 初始轮廓与路面摩擦系数的相关性提升了49%, 而包络轮廓提升了85%, 且包络轮廓相较于初始轮廓的决定系数提升了34%, 二者均达到了强相关水平。经这一结果可证实——新的回归模型可以更好地反映纹理特征与抗滑性能的关系, 并且应用三维包络轮廓可以显著提升路面纹理参数与抗滑性能间的相关性, 为路面摩擦系数的精确预测提供了更为有效的方法。

关键词

路面纹理, 三维包络轮廓, 胎 - 路接触, 印痕法, 抗滑

Calculation of Three-Dimensional Tire-Road Contact Envelope and Its Influence on Anti-Skid Performance

Hai Ge¹, Jiayi Guan², Shenqin Xiao³

¹School of Automobile and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

²Hubei Provincial Institute of Metrology and Testing Technology, Wuhan Hubei

³School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

文章引用: 葛海, 关佳希, 肖神清. 三维胎-路接触包络轮廓计算及其对抗滑性能的影响[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(4): 286-299. DOI: 10.12677/orf.2024.144397

Abstract

In order to analyze the contact characteristics between tire and road surface and its influence on the anti-skid performance of the road surface, the three-dimensional envelope profile of tire-road contact was extracted based on the tire-road contact imprint method theory, and the three-dimensional texture characterization parameters of the road surface area were calculated. Furthermore, the correlation between the three-dimensional characteristic parameters of the initial profile and the road friction coefficient was analyzed, and the characteristic parameters with high correlation with the friction coefficient and relatively independent of each other were screened out. These parameters were independently subjected to multivariate regression analysis in the initial profile and the envelope profile. The results show that although the three commonly used texture characteristic parameters $SMTD$, S_{pd} and V_{mc} have improved in the correlation analysis determination coefficient (the envelope profile increased by 8% compared with the initial profile), the determination coefficient did not reach the strong correlation level, indicating that these parameters failed to effectively reflect the relationship with the anti-skid performance of the road surface. However, the analysis of the selected characteristic parameters showed that the correlation between the initial profile and the road friction coefficient increased by 49%, while the envelope profile increased by 85%, and the determination coefficient of the envelope profile increased by 34% compared with the initial profile, both of which reached a strong correlation level. This result proves that the new regression model can better reflect the relationship between texture characteristics and anti-skid performance, and the application of three-dimensional envelope profile can significantly improve the correlation between pavement texture parameters and anti-skid performance, providing a more effective method for the accurate prediction of pavement friction coefficient.

Keywords

Pavement Texture, Three-Dimensional Envelope Profile, Tire-Road Contact, Impression Method, Anti-Skid

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

监测与预估路面抗滑性能对制定道路养护方案和保障交通安全意义重大[1]。随着表面纹理获取方法的发展,以路面纹理为测试对象的非接触抗滑性能评价的应用潜力日益明显[2] [3]。当前已有的非接触评价法计算路面纹理参数(表面功率谱密度、分形维数、平均构造深度等)时,大多数使用全深度路面纹理,并通过这些指标与抗滑性能建立起关联[4] [5]。轮胎橡胶胎面是半弹性材料,当轮胎与道路表面接触时,胎路接触界面处于非完全接触状态,只有顶部纹理与胎面进行接触。Kanafi 等认为,胎路接触所产生的摩擦主要与路表顶部部分相关,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素的相关性系数可达 80% [6]。张淑文等认为,胎-路实际接触是路面凸出部分的微凸体与胎面橡胶真实接触,实际上的接触面积远小于名义接触面积[7]。Carbone 等认为,在微凸接触理论中实际接触面积可以通过轮胎参数与路表参数进行预测[8]。

为了计算胎-路接触的包络轮廓, Clapp 将轮胎胎面与路面纹理分别定义为粗糙刚体与半无限弹性体, 并将其接触定义为单一接触, 基于胎-路接触压力分布理论, 利用接触边界两 endpoint 之间的接触线进行二维建模, 通过接触边界上方的应力分布曲线, 计算出胎-路接触包络轮廓[9]。陈德等基于 HHT (Hilbert-Huang transform)理论, 在计算沥青混合料表面构造固有模量分量(Intrinsic Model Function, IMF)的基础上, 计算总联合固有模态(Total Bind Intrinsic Model Function, TBIMF), 从而得到胎-路接触表面构造包络轮廓线[10][11]。上述研究所采用计算包络轮廓的数学模型主要集中于道路表面纹理的特性分析, 而未充分考虑轮胎与粗糙路面的实际接触特性。这致使模型在描绘轮胎与路面之间的真实接触状态存在偏差。

为了模拟胎-路接触实际接触情况, Goubert 等采用塑性橡皮泥填充的方式, 模拟车轮从路面压过, 橡皮泥因不足以承受车轮的重量而被压入三角形凹槽中, 从而反映出轮胎与路面接触时橡胶轮胎因变形而嵌入路面的情况, 并且提出了一种简单且较为准确的计算方法——印痕法(indentor method) [12][13]。相较于 Clapp [9]等包络轮廓, 对比发现印痕法计算所得到的包络轮廓能够更好地反映轮胎与路面的实际接触情况。区域三维参数(3D areal surface parameters)是近年提出的改进路面三维纹理表征方法。该参数体系直接从三维视角出发[14], 分别采用高度参数、体积参数、混合参数、空间参数及特征参数来表征物体表面纹理信息, 丰富了物体表面特征评价指标体系。

从非接触式的路面抗滑性能评价方法来看, 现有的轮胎与路面接触的包络轮廓研究主要集中在二维分析层面。本文认为三维包络轮廓模型能够更全面地反映轮胎与路面的接触状况, 对于深入研究路面的抗滑特性具有重要意义。基于此, 本文对二维印痕法进行了拓展, 建立了三维包络轮廓的计算模型, 并将其与区域三维参数表征技术相结合, 对比计算了初始轮廓与包络轮廓的区域纹理三维特征参数。确定三维特征参数后, 采用相关性分析方法, 筛选出那些与路面摩擦系数具有高度相关性且彼此之间相关性较低的特征参数。然后, 利用筛选出的特征参数, 对初始轮廓与包络轮廓的三维特征参数与路面摩擦系数分别进行多元回归分析, 分析路表纹理包络轮廓对路面抗滑性能的影响, 为后续研究提供理论支持。

2. 基于印痕法原理的胎路接触三维包络轮廓计算

为了分析胎-路接触特性, Goubert [12][13]提出了印痕法来计算胎-路接触二维包括轮廓。本文在此理论基础上, 将此方法向三维空间进行拓展。具体如下:

设轮胎与路面纹理顶部的接触是印痕式接触, 轮胎胎面与路表纹理锐谷之间的变形光滑, 三维初始轮廓 P 已知, 并且可以用离散坐标 (x_i, y_i, z_i) 表示, 即 $P = (x_i, y_i, z_i)$, 则包络轮廓计算步骤如下:

(1) 路表三维纹理数据获取。首先, 要确定胎-路接触中的名义接触面积。根据我国城市道路设计规范 CJJ37-2012, 单轴轮迹当量圆的半径 r 定为 10.65 cm, 由此计算得到单轴轮迹当量圆的面积为 356.14 cm²。鉴于激光扫描仪的扫描区域为矩形, 本研究采用 18 cm × 18 cm 的测量面积, 以代表胎-路接触中的名义接触面积。

(2) 根据微凸计算理论, 计算出评价段的实际接触面积 A_c 。计算公式为:

$$A_c = \frac{2}{\pi} \frac{1}{E'} \left(\frac{\pi}{m_2} \right)^{1/2} F \quad (1)$$

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (2)$$

$$m_2 = \frac{\nabla h^2}{2} \quad (3)$$

E 为轮胎的弹性模量, ν 为轮胎的泊松比, F 为轮胎对路面的压力, ∇h 为初始轮廓的均方根梯度。从式(1)可以看出, 实际接触面积与轮胎特性、路面状况和车辆行驶状况有关。我国城市道路设计规范

CJJ37-2012 规定标准测试车辆轮胎胎面橡胶的弹性模量为 2 MPa、泊松比为 0.5、标准测试车辆车重为 1.5 t。

(3) 根据评价段 P_i 的最高点高程为 z_{\max} ，设置一个高度为 $h = z_{\max} - k$ ($k \geq 0$) 的水平面， k 为高程下降参数， k 的起始值设置为 0。

(4) 计算路面轮廓与水平面的接触面积为 S 对比 S 与 A_c 的大小关系。如果 $S < A_c$ ，则将 k 的步长增加 $\Delta k = \frac{\Delta h}{50}$ m，其中 Δh 为表面形貌最大高度，即表面形貌最大峰高于最大谷深的差值，并返回步骤(3)。

(5) 如果 $S \geq A_c$ 则将平面上方的点 ($z_i \geq h$) 保留，即可得到与三维纹理初始轮廓相对应的三维表面纹理包络轮廓 (x_i, y_i, z_i) ，并将水平面上方的图形一并输出为数值矩阵。

其计算流程图如图 1 所示。

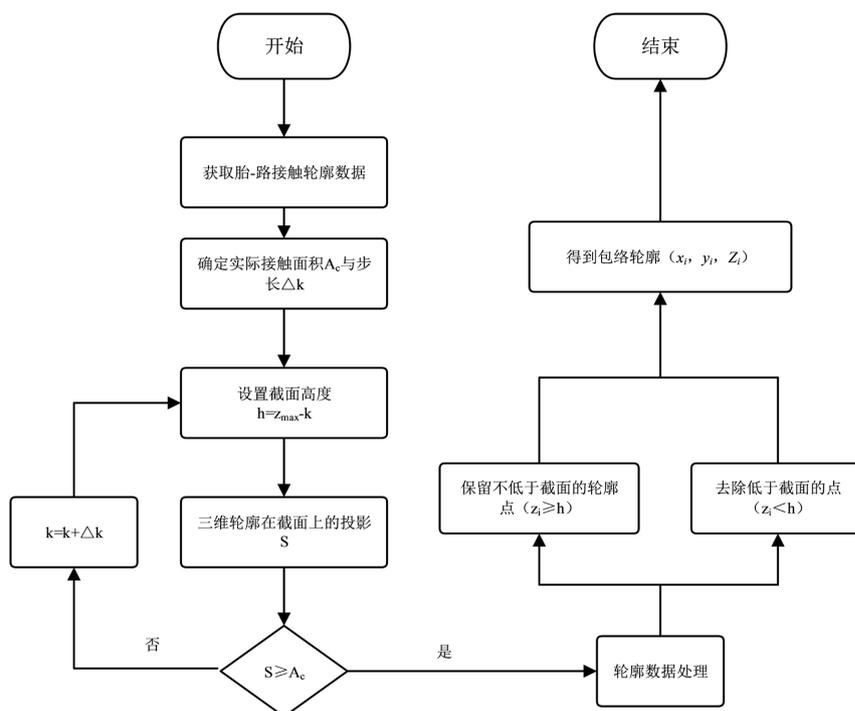


Figure 1. Process for calculating 3D surface textures and envelope profiles using the imprint method

图 1. 印痕法计算三维表面纹理包络轮廓流程

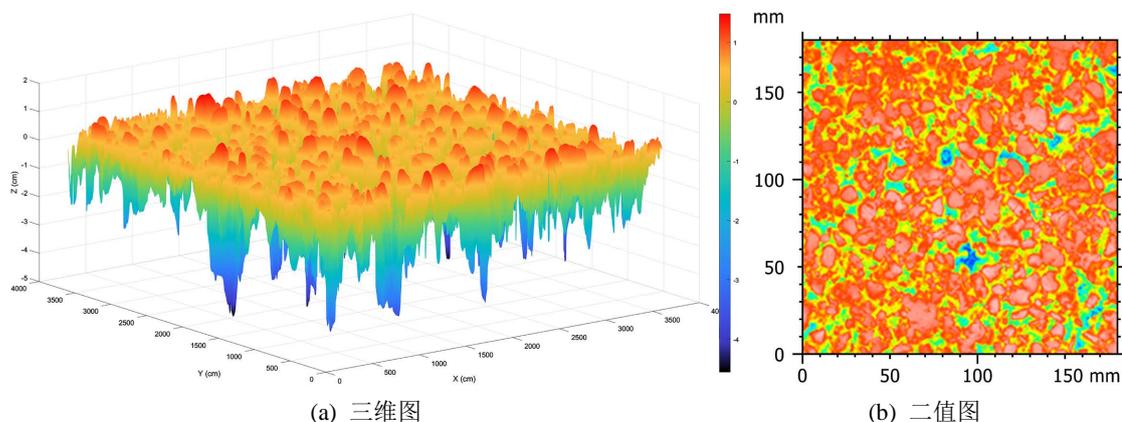


Figure 2. Initial outline appearance diagram

图 2. 初始轮廓形貌图

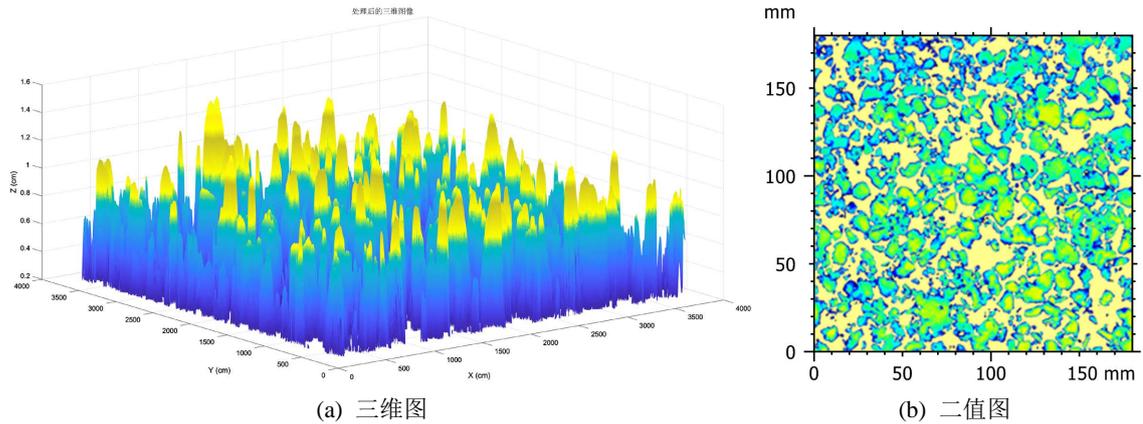


Figure 3. Encourse contour appearance diagram
图 3. 包络轮廓形貌图

借用 MATLAB 软件进行计算，得到初始轮廓和与之对应的包络轮廓的形貌图分别如图 2、图 3 所示。

3. 数据采集

3.1. 路面纹理信息采集

本文采用激光三维扫描仪进行纹理测量，测量数据共 8 组，其中 AC (沥青混凝土)路面 4 组，SMA (石英岩沥青)路面 2 组，OGFC (开级配摩擦层)路面 2 组，如图 4 所示。根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005)，8 组测量路面的集配信息如表 1 所示。

Table 1. Collection information of different road surfaces
表 1. 不同路面的集配信息

指标	AC-1	AC-2	AC-3	AC-4	SMA-1	SAM-2	OGFC-1	OGFC-2
粗集料含量(%)	65	65	70	70	75	75	80	80
油石比(%)	5.04	5.11	5.06	4.98	5.78	5.59	4.76	4.86
毛体积密度(g/cm ³)	2.554	2.523	2.511	2.567	2.470	2.486	2.245	2.250
VV (%)	1.88	3.17	2.84	2.56	4.52	4.36	15.02	13.64
VMA (%)	14.01	15.37	15.55	14.49	17.26	18.04	24.07	22.84
VCA (%)	44.33	41.28	43.47	43.76	38.41	38.78	39.46	40.11
VFA (%)	86.51	79.36	85.41	82.83	73.43	72.73	37.83	42.46



Figure 4. Road table texture measurement road section
图 4. 路表纹理测量路段

为了获取沥青路面的三维形貌数据, 本文采用 ZGSCAN-717 手持式三维激光扫描仪(如图 5 所示)进行路表纹理的快速测量。该扫描仪具有高精度, 其在 X、Y、Z 三个方向的扫描精度分别为 0.05 mm、0.05 mm 和 0.03 mm, 能够满足表面纹理测量的要求。此设备配备专用处理软件, 具有纹理均匀化处理和无缝拼接功能, 能够自动生成 STL 三角网格面, 并自动对三角网格数据进行补洞、平滑和特征处理。导出的表面纹理数据结果输出为 STL 格式, 方便直接导入 Geomagic 等三维逆向工程软件进行进一步分析。



Figure 5. ZGSCAN-717 handheld three-dimensional laser scanner
图 5. ZGSCAN-717 手持三维激光扫描仪

3.2. 路面纹理信息预处理

将上述 STL 文件导入 Geomagic 等软件后, 可以生成高程点云图(见图 6(a))。然而, 在实际操作中, 通常会出现一些数据缺失、孔洞以及定位板上的毛边等问题。为了解决这些问题, 利用 Geomagic 软件对高程点云数据进行填洞、平滑和裁剪等处理, 从而获得更为精确的路表纹理三维高程点云数据(见图 6(b))。随后, 将三维高程点云数据以 txt 形式导出, 以便于后续进行预处理和数据分析。通过以上处理, 可以提高数据的完整性和精确度, 为后续的分析 and 应用提供更可靠的数据基础。

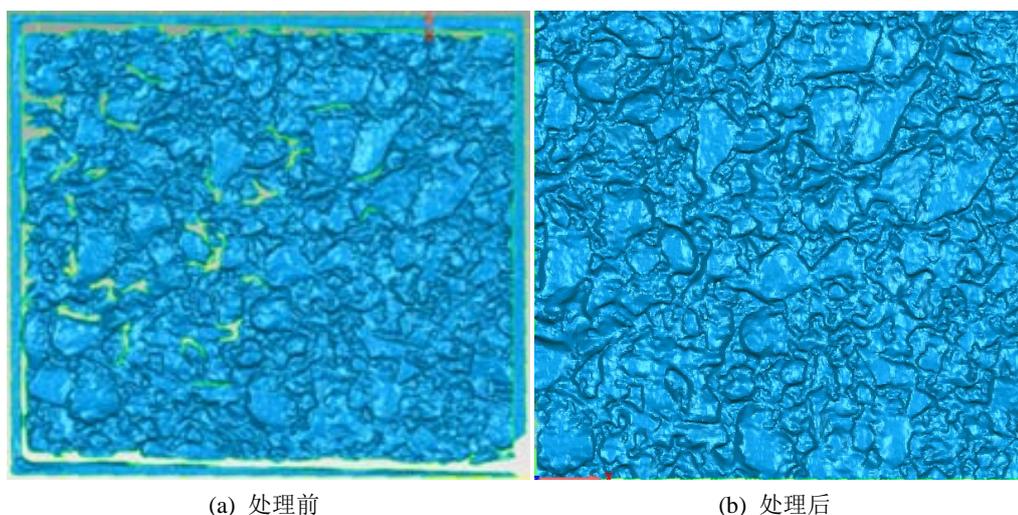


Figure 6. Treatment of the road surface lines before and after the cloud map
图 6. 处理前后的路表纹理点云图

为了消除高程异常数据的影响,使用限幅滤波器对路面纹理数据进行预处理[15]。该方法对每一个路面三维云点高度数据从小到大排序,再依次确定高度数据中的上四分位数、中位数和下四分位数。如果某一个云点的高度数据大于上四分位数的 1.5 倍或小于下四分位数的 1.5 倍,则被视为异常值,并将该高度值替换为其临近的上四分位数或者下四分位数。即:

$$H_{new} = \begin{cases} Q_u & H_0 > 1.5Q_u \\ H_0 & 1.5Q_l \leq H_0 \leq 1.5Q_u \\ Q_l & H_0 < 1.5Q_l \end{cases} \quad (4)$$

其中, Q_u 为上四分位数、 H_0 为原始高度数据、 Q_l 为下四分位数、 H_{new} 为校正后的高度数据。

处理完成后的点云数据在 MATLAB 软件中的路面纹理三维特征云图,如图 7 所示。

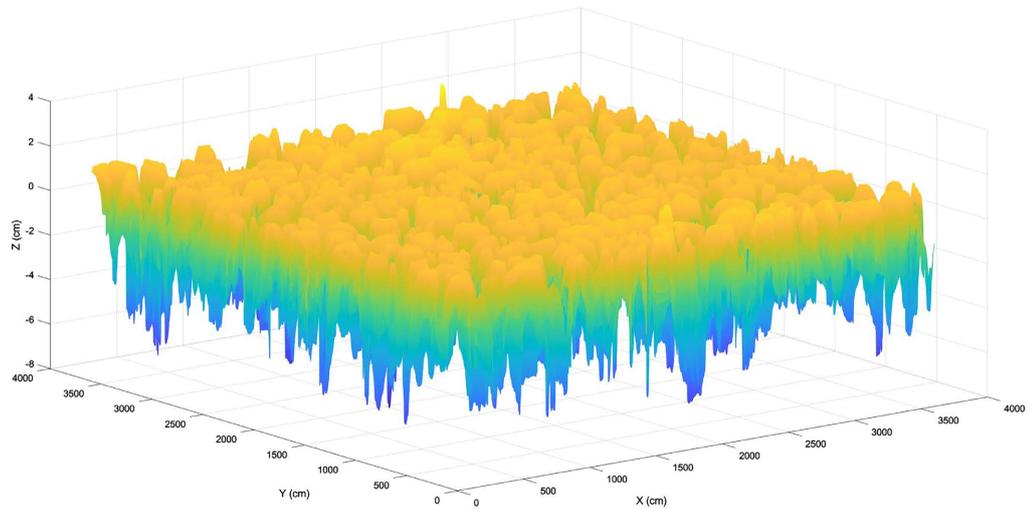


Figure 7. Three-dimensional special symbols of pavement texture for processing completed
图 7. 处理完成的路面纹理三维特征云图

3.3. 路面抗滑性能数据采集



Figure 8. Swing instrument determines the road surface friction coefficient
图 8. 摆式仪测定路面摩擦系数

本文采用 BM-III 摆式摩擦系数测定仪对上文所述纹理测量路面区域进行摩擦系数的测试,如图 8 所示。该仪器其基本工作原理是通过摆动的位能损失来测量路面表面与橡胶片接触时的摩擦系数。具体而言,摆臂末端的橡胶片在摆动过程中与路面发生摩擦,从而克服路面摩擦力所做的功,以此来测定路面的摩擦系数。测定的摩擦系数结果如表 1 所示,其结果为同一路段测量五次的平均值。

Table 2. Path friction coefficient measurement results

表 2. 路面摩擦系数测定结果

名称	平均值	最大值	最小值
AC-1	83.3	85.6	82.1
AC-2	78.4	80.3	76.7
AC-3	78.2	79.6	76.1
AC-4	76.1	78.4	75.4
SMA-1	78.2	79.7	77.4
SMA-2	82.5	84.6	79.6
OGFC-1	74.3	76.1	42.8
OGFC-2	84.4	86.7	83.4

4. 路面纹理参数计算与对比分析

4.1. 参数计算方法

路面的区域三维特征评价是通过测量限定表面的一小块区域,获得包含 X、Y、Z 三个维度的路表三维信息,从而量化路面纹理空间特征和功能特征。路面区域三维纹理特征参数主要包括高度参数、体积参数、混合参数、空间参数、特征参数、功能参数等,如表 3 所示。

特征参数用来表征特定表面的区域特征、线特征和点特征。表面峰顶密度(S_{pd})定义单位采样面积内的表面峰顶点数。其中纹理表面高于周围区域的点称为峰,可以先反转纹理表面,应用分水岭分割算法,再应用变换树的指定修剪因子对纹理表面显著的峰进行分割[16]。其计算公式如下:

$$S_{pd} = \frac{\text{波峰数量}}{\text{水平投影面积}} \quad (5)$$

峰密度可用于表征路面纹理与轮胎表面的接触状态,以及实验室条件下量化表征轮胎磨耗相关的纹理参数。

体积参数可以用来描述轮胎滚动过程中路面纹理与轮胎的接触和磨损特性。支承率 β 代表了路面纹理二维断面轮廓中磨耗表面长度占轮廓总长度的百分比,同时也反映了与轮胎相互作用下的路面三维接触面的形态。核支承体积 V_{mc} 是两种支承率 β_1 和 β_2 对应支承体积的差值[17],即

$$V_{mc} = V_m(\beta_1) - V_m(\beta_2) \quad (6)$$

高度参数三维平均构造深度(SMTD)是常用的路面纹理评价指标,指在采样范围内,表面各点到表面峰顶面距离总和的算术平均值。其中,表面峰顶面是指平行于基准面并具有最高点的面。三维平均构造深度 SMTD 计算公式如下[18]:

$$SMTD = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [z_p(x_i, y_j) - z(x_i, y_j)] \quad (7)$$

式中, $z(x_i, y_i)$ 为点 (x_i, y_i) 所对应的高程, M 、 N 表示在取样范围内 x 、 y 方向上的离散采样点的个数, $z_p(x_i, y_i)$ 为采样点中的最大高程值。

Table 3. Three-dimensional texture feature parameters

表 3. 三维纹理特征参数

类别	名称	单位
高度参数	平均构造深度 $SMTD$	mm
	均方根高度 S_q	mm
	偏斜度 S_{sk}	
	陡峭度 S_{ku}	
	最大峰高 S_p	mm
	最大谷深 S_v	mm
	最大高度 S_z	mm
空间参数	算数平均高度 S_a	mm
	自相关长度 S_{al}	mm
	结构方位比 S_{tr}	
混合参数	纹理方向 S_{td}	
	均方根梯度 S_{dq}	
体积参数	展开表面面积比 S_{dr}	%
	支承体积 V_m	mm^3/mm^2
	空体积 V_v	mm^3/mm^2
	峰区支承体积 V_{mp}	mm^3/mm^2
	核支承体积 V_{mc}	mm^3/mm^2
	核空体积 V_{vc}	mm^3/mm^2
特征参数	谷空体积 V_{vv}	mm^3/mm^2
	峰密度 S_{pd}	$1/\text{mm}^2$
	峰曲率算术平均值 S_{pc}	$1/\text{mm}$
	十点高度 S_{10z}	mm
	五点峰高 S_{5p}	mm
	五点谷深 S_{5v}	mm
	谷区平均面积 S_{da}	mm^2
	峰区平均面积 S_{ha}	mm^2
功能参数	谷区平均体积 S_{dv}	mm^3
	峰区平均体积 S_{hv}	mm^3
	核心高度 S_k	mm
	折算峰高 S_{pk}	mm
	折算谷深 S_{vk}	mm
	上支承率 S_{mrk1}	%
	下支承率 S_{mrk2}	%

4.2. 计算结果

本文使用 MATLAB 软件编辑计算得到各个初始轮廓三维纹理表征参数。依据第一节介绍的三维印痕法原理, 本文首先基于每个三维初始轮廓的均方根梯度、最大峰高与最大谷深计算实际接触面积 A_c 。随后, 再利用 MATLAB 软件进行每个三维初始轮廓的三维包络轮廓计算, 并获取包络轮廓的三维纹理表征参数。相关的参数计算结果详见表 4。

Table 4. Regional three-dimensional texture feature parameter calculation results

表 4. 区域三维纹理特征参数计算结果

类别	名称	初始轮廓平均值	包络轮廓平均值
高度	平均构造深度	1.992	0.731
	均方根高度 S_q/mm	0.91	16.835
	偏斜度 S_{sk}	-1.501	0.346
	陡峭度 S_{ku}	6.579	2.611
	最大峰高 S_p/mm	1.832	70.672
	最大谷深 S_v/mm	5.898	23.883
	最大高度 S_z/mm	7.729	94.543
	算数平均高度 S_a/mm	0.689	13.999
空间参数	自相关长度 S_{al}/mm	4.148	13.051
	结构方位比 S_{tr}	0.901	0.791
	纹理方向 S_{td}	82.243	102.388
混合参数	均方根梯度 S_{dq}	1.566	0.583
	展开表面面积比 $S_{dr}/\%$	39.665	11.902
体积参数	支承体积 $V_m/(\text{mm}^3/\text{mm}^2)$	0.0159	0.013
	空体积 $V_v/(\text{mm}^3/\text{mm}^2)$	0.919	0.423
	峰区支承体积 $V_{mp}/(\text{mm}^3/\text{mm}^2)$	0.016	0.013
	核支承体积 $V_{mc}/(\text{mm}^3/\text{mm}^2)$	0.771	0.299
	核空体积 $V_{vc}/(\text{mm}^3/\text{mm}^2)$	0.751	0.401
	谷空体积 $V_{vv}/(\text{mm}^3/\text{mm}^2)$	0.168	0.022
特征参数	峰密度 $S_{pd}/(1/\text{mm}^2)$	0.018	0.042
	峰曲率算术平均值 $S_{pc}/(1/\text{mm})$	4.973	2.385
	十点高度 S_{10z}/mm	7.089	87.269
	五点峰高 S_{5p}/mm	1.599	63.398
	五点谷深 S_{5v}/mm	5.49	23.883
	谷区平均面积 S_{da}/mm^2	46.01	4.754
	峰区平均面积 S_{ha}/mm^2	68.327	14.181
	谷区平均体积 S_{dv}/mm^3	2.775	0.053
	峰区平均体积 S_{hv}/mm^3	10.001	1.525

续表

功能参数	核心高度 S_k/mm	1.519	39.602
	折算峰高 S_{pk}/mm	0.269	21.169
	折算谷深 S_{vk}/mm	1.739	0.087
	上支承率 $S_{mrk1}/%$	5.438	11.511
	下支承率 $S_{mrk2}/%$	78.241	94.101
其它	路面摩擦系数 BPN	79.425	79.425

4.3. 三维包络轮廓对路面抗滑性能的影响分析

4.3.1. SMTD 相关性分析

经计算得到各路段的初始轮廓 $SMTD$ 值、包络轮廓的 $SMTD$ 值的相对值和二者的相关性,如图 9 所示。

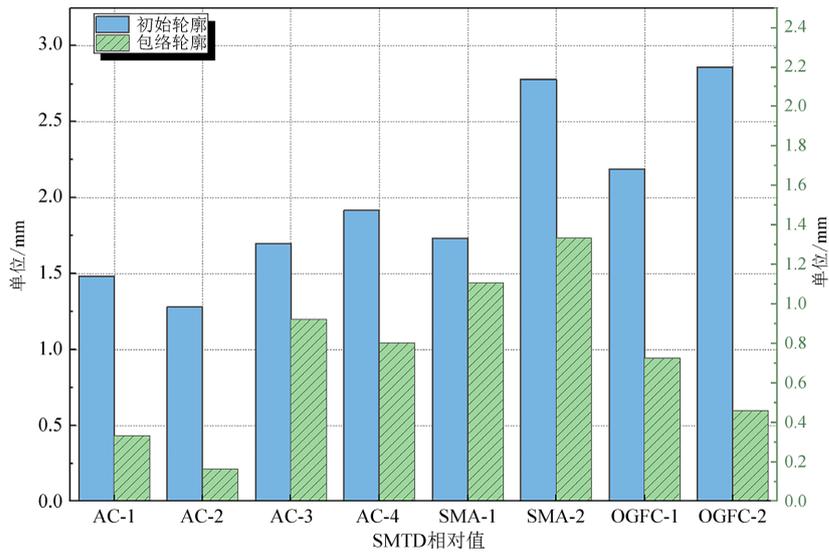


Figure 9. SMTD relative value
图 9. SMTD 相对值

Table 5. SMTD correlation analysis
表 5. SMTD 相关性分析

	显著性	相关性	N
SMTD 相关性	0.289	0.429	8

由图可知,各测量路段的包络轮廓 $SMTD$ 值较初始轮廓 $SMTD$ 值有明显降低,即相对值均远小于 1。由图 9 可以看出路面初始 $SMTD$ 值与包络轮廓 $SMTD$ 二者并无明显关系,从表 5 中二者的相关性仅有 0.429 也可以体现。这与二维计算中初始轮廓与包络轮廓的平均断面深度的相对值,有着明显区别。在二维计算中,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 值降低幅度越小[19]。这一差异主要因为在二维印痕法中,各测量路段的实际接触面积 S 是一个固定值,通常为 6 mm^2 或 10 mm^2 。相反,在三维印痕法中,各测量路段的实际接触面积 S 与其特征参数——均方根梯度 S_{dq} 相关,导致三维包络轮廓与初始三维轮廓

的形貌走势不能完全一致，这与二维印痕法有着本质上的区别。

4.3.2. 区域三维纹理特征与路面摩擦系数线性关系分析

在已知研究中[20]，认为区域三维纹理表征参数中的 $SMTD$ 、 S_{pd} 、 V_{mc} 这三个纹理特征参数与路面抗滑性能关系最为紧密。因此首先进行 $SMTD$ 、 S_{pd} 、 V_{mc} 与摩擦系数 BPN 之间的多元线性回归分析。

多元线性回归分析表达式为：

$$f_r = \varphi_0 + \sum_{j=1}^k \varphi_j x_j + \xi \quad (8)$$

式中， f_r 为回归计算得出的路面摩擦系数； φ_0 为截距； φ_j 为回归系数； ξ 为随机误差项。

回归分析计算结果如表 6、表 7 所示。

Table 6. Feature parameters and pavement friction coefficient regression analysis

表 6. 特征参数与路面摩擦系数回归分析

	R	R^2	调整后的 R^2	标准估算的误差
初始特征参数	0.687	0.472	0.076	3.45833
包络特征参数	0.715	0.511	0.143	3.32960

由表 6 可知，与初始轮廓相比，包络轮廓的决定系数 R^2 有所提高，提升程度为 8%。然而，尽管有所提升，包络轮廓的决定系数 R^2 仍未达到 0.8，这表明当前模型尚不能充分解释路面摩擦系数。

初始轮廓特征参数相相关性分析

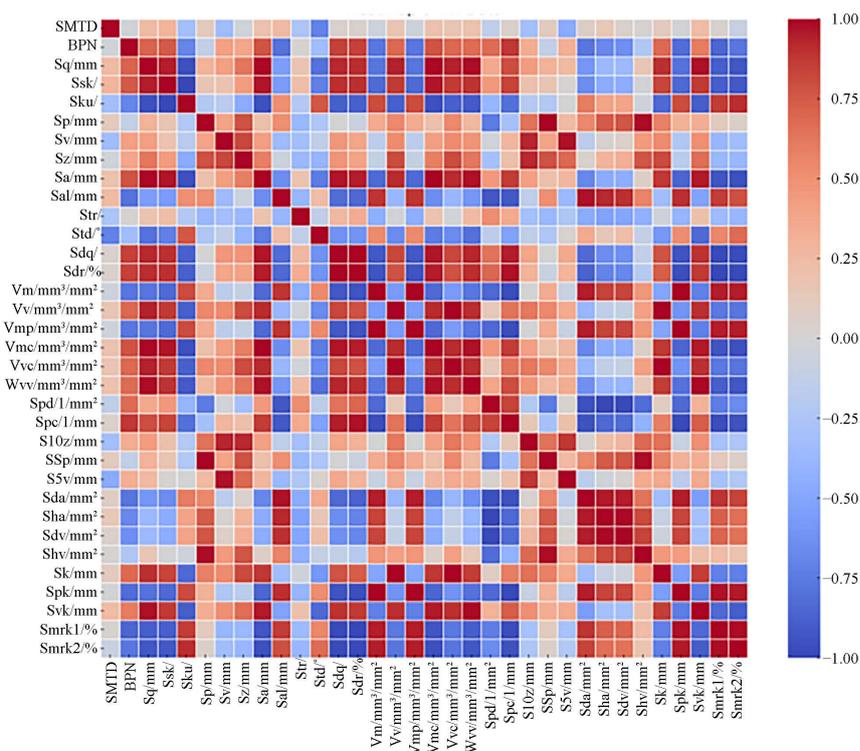


Figure 10. Analysis diagram of the initial contour texture parameter correlation

图 10. 初始轮廓纹理参数相关性分析图

鉴于 $SMTD$ 、 S_{pd} 、 V_{mc} 这三个纹理特征参数与路面摩擦系数的线性对应关系并不明显, 本文重新挑选出三个特征参数对路面摩擦系数进行多元回归分析。首先对与初始轮廓的区域纹理三维特征参数这 33 个纹理参数与路面摩擦系数 BPN 之间进行相关性分析。选择与 BPN 相关性系数绝对值大于 0.3 呈相关, 且彼此之间的相关性系数绝对值小于 0.3 呈不相关的 3 个特征参数。经过分析, 这三个参数分别是空间参数 S_{ir} 、特征参数 S_{pc} 和 S_{10z} 。相关性分析结果以热力图的形式在图 10 中呈现。接下来, 对于初始轮廓和包络轮廓取挑选出来的相同的 3 个特征参数与 BPN 进行多元回归分析, 回归分析计算结果如表 7 所示。

Table 7. Feature parameters and pavement friction coefficient regression analysis
表 7. 特征参数与路面摩擦系数回归分析

	R	R^2	调整后的 R^2	标准估算的误差
初始特征参数	0.841	0.707	0.488	2.57430
包络特征参数	0.974	0.949	0.910	1.07748

由表 7 的结果可知, 在重新挑选参数建立的新的回归模型下, 初始轮廓与包络轮廓所挑选的特征参数与路面摩擦系数的决定系数 R^2 分别提升了 49% 和 85%, 这显著表明空间参数 S_{ir} 、特征参数 S_{pc} 和 S_{10z} 这三个纹理特征参数与路面摩擦系数之间具有更强的相关性。

包络轮廓的决定系数 R^2 相较于初始轮廓的决定系数 R^2 提升了 34%, 并且达到了大于 0.8 具有强相关性的水平。这表明在该回归模型下, 包络轮廓的 S_{ir} 、 S_{pc} 和 S_{10z} 这三个纹理特征参数与路面摩擦系数 BPN 呈显著相关, 说明该模型足以充分解释路面摩擦系数的变化。

综上所述, 通过对比不同轮廓的回归分析结果, 我们得出结论, 三维胎-路接触包络轮廓在描述路面摩擦因数与纹理参数之间的关系上更为精确, 为路面抗滑性能的评估提供了更为可靠的工具。

5. 结论

(1) 基于二维印痕法计算三维包络轮廓, 并将其推广到了三维空间, 根据微凸接触理论, 计算出了三维包络轮廓。三维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。随着实际接触面积 A_c 的减小, 与轮胎接触的表面纹理微凸体个数也减少。

(2) 对于初始轮廓和包络轮廓的三维纹理参数 $SMTD$ 、特征参数 S_{pd} 和体积参数 V_{mc} 同路面摩擦因数 BPN 进行了多元回归分析, 包络轮廓的决定系数 R^2 相较于初始轮廓的决定系数 R^2 有所提升, 但二者的决定系数均小于 0.8, 说明该模型不足以充分解释路面摩擦系数与这三个特征参数之间的关系。

(3) 对于初始轮廓的区域纹理三维特征参数这 33 个纹理参数与路面摩擦系数 BPN 之间进行相关性分析, 选择空间参数 S_{ir} 和特征参数 S_{pc} 、 S_{10z} 这三个参数建立新的回归模型。在新的回归模型下, 包络轮廓的决定系数 R^2 相较于初始轮廓的决定系数 R^2 提升了 34%。同时, 初始轮廓包络始轮廓相较于之前的回归模型决定系数 R^2 分别提升了 49% 和 85%。这表明在该回归模型下, 包络轮廓的 S_{ir} 、 S_{pc} 和 S_{10z} 这三个纹理特征参数与路面摩擦系数 BPN 呈显著相关, 足以解释路面的摩擦系数。包络轮廓纹理参数的改善是由于其能更好地捕捉路面特性, 如微观纹理和材料组成的变化, 能够更好地反应胎路的实际接触状况。

(4) 本文利用三维包络轮廓反映轮胎与路面的真实接触状态, 基于三维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, 并且还的道路表面的评估和维护提供了有价值的参考。其中, 对于截取平面下半部分, 可以使用更加接近实际情况的算法进行拟合, 已达到更好的计算效果, 从而可以更加准确地对路面的抗滑性能进行评判。

参考文献

- [1] 谭忆秋, 肖神清, 熊学堂. 路面抗滑性能检测与预估方法综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(4): 32-47.
- [2] Jain, S., Das, A. and Venkatesh, K.S. (2021) Automated and Contactless Approaches for Pavement Surface Texture Measurement and Analysis—A Review. *Construction and Building Materials*, **301**, Article ID: 124235. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124235>
- [3] Yang, G., Li, Q.J., Zhan, Y., Fei, Y. and Zhang, A. (2018) Convolutional Neural Network-Based Friction Model Using Pavement Texture Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, **32**, Article No. 04018052. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cp.1943-5487.0000797](https://doi.org/10.1061/(asce)cp.1943-5487.0000797)
- [4] Hartikainen, L., Petry, F. and Westermann, S. (2014) Frequency-Wise Correlation of the Power Spectral Density of Asphalt Surface Roughness and Tire Wet Friction. *Wear*, **317**, 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2014.05.017>
- [5] Kogbara, R.B., Masad, E.A., Woodward, D. and Millar, P. (2018) Relating Surface Texture Parameters from Close Range Photogrammetry to Grip-Tester Pavement Friction Measurements. *Construction and Building Materials*, **166**, 227-240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.102>
- [6] Mahboob Kanafi, M. and Tuononen, A.J. (2017) Top Topography Surface Roughness Power Spectrum for Pavement Friction Evaluation. *Tribology International*, **107**, 240-249. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.11.038>
- [7] 张淑文. 基于界面接触特性的多尺度沥青路面抗滑性能评价及应用研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [8] Carbone, G. and Bottiglione, F. (2008) Asperity Contact Theories: Do They Predict Linearity between Contact Area and Load? *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **56**, 2555-2572. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2008.03.011>
- [9] Clapp, T.G., Eberhardt, A.C. and Kelley, C.T. (1988) Development and Validation of a Method for Approximating Road Surface Texture-Induced Contact Pressure in Tire-Pavement Interaction. *Tire Science and Technology*, **16**, 2-17. <https://doi.org/10.2346/1.2148796>
- [10] 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]: [博士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [11] 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.
- [12] 蒋难得. 基于激光视觉的沥青路面构造深度测量方法研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [13] 祝媛媛. 基于分段变维的沥青路表纹理磨光行为分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [14] 杨洁, 李乐. 基于机器视觉的表面粗糙度测量与三维评定[J]. 光学技术, 2016, 42(6): 491-495.
- [15] Kampstra, P. (2008) Beanplot: A Boxplot Alternative for Visual Comparison of Distributions. *Journal of Statistical Software*, **28**, 1-9. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.c01>
- [16] Leach, R. (2012) *Characterisation of Areal Surface Texture*. Springer-Verlag, Berlin.
- [17] Geometrical Product Specifications (GPS) (2012) *Surface Texture: Areal. Part 2: Terms, Definitions and Surface Texture Parameters: EN ISO 25178-2-2012*.
- [18] 冉茂平. 基于包络轮廓的沥青路表纹理表征及路用性能研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [19] 冉茂平, 周兴林, 肖神清, 等. 路表纹理包络轮廓计算及其对抗滑性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(5): 11-19.
- [20] Li, Q., Yang, G., Wang, K.C.P., Zhan, Y. and Wang, C. (2017) Novel Macro- and Microtexture Indicators for Pavement Friction by Using High-Resolution Three-Dimensional Surface Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **2641**, 164-176. <https://doi.org/10.3141/2641-19>