DOI: 10.3901/JME.2020.21.177

湿滑状态下轮胎路面摩擦特性的数值分析方法*

周海超 王国林 姜震 陈幸鹏

(江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 为研究湿滑状态下轮胎路面的摩擦特性,以胎面橡胶和沥青路面作为研究对象,利用谐波叠加法建立三维粗糙路面模型,采用“伪”流体动力轴承作用等效反映路面水膜“密封”作用,综合使用有限元软件 ABAQUS 和计算流体动力学软件 Fluent 得到湿滑状态下橡胶与路面滑动接触时的橡胶接触压力、滞后摩擦力及路面水膜承载力,由此形成了综合兼顾橡胶材料、接触压力、滑动速度、路面形貌和路面水膜等多因素的轮胎与湿路面摩擦特性的仿真方法。通过橡胶与干-湿路面摩擦特性的变化与公开的试验对比,证明本方法的合理性和可行性,并进一步分析滑动速度、接触压力和路面特征对湿滑状态下轮胎路面摩擦特性的影响规律。研究结果为轮胎和路面的抗湿滑性设计及优化提供理论依据。

关键词: 胎面橡胶; 湿摩擦特性; 沥青路面; 数值方法

中图分类号: U463; O35

Numerical Analysis Method for Friction Characteristics of Tire-pavement under Wet Slip Condition

ZHOU Haichao WANG Guolin JIANG Zhen CHEN Xingpeng

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: In order to study the friction characteristics of tire pavement under wet conditions, tread rubber and asphalt pavement are chosen the research objects. Three-dimensional rough pavement is established by virtue of the harmonic superposition method, and the "sealing" effect of water film is equivalent to "pseudo" hydrodynamic lubrication effect. For the contact pressure, hysteresis friction and water film bearing capacity under wet slip condition are obtained by ABAQUS and Fluent software, and the numerical analysis method for friction characteristics of tire-pavement friction coefficient under wet slip condition is established, which takes into account the rubber material, contact pressure, sliding speed, road profile and water film. From comparing the numerical results with published experimental results, the results show that this analysis method is practical and reasonable. Based on that, the effects of sliding speeds, contact pressures and road profiles on friction characteristics were investigated. The research provides theoretical basis of design and optimization for the wet-skid resistance of tires and roads.

Key words: tire rubber; wet friction characteristics; asphalt pavement; numerical method

0 前言

当汽车在湿滑路面制动过程时,轮胎接地区域内的水膜充当“润滑剂”,致使轮胎发生打滑现象。此时轮胎与路面的摩擦力显著降低,轮胎获得的抓地力减小,汽车制动性能下降,容易发生交通事故^[1]。因此,研究轮胎与湿滑路面摩擦行为对保证车辆在湿滑路面上行驶稳定性和安全性具有重要意义。

为了探究湿滑状态下橡胶的摩擦特性,研究人员主要通过试验测定和理论计算等手段对其进行分析。SABEY 等^[2]通过对球形橡胶块进行摩擦试验,得到了接触压力与湿摩擦因数之间的关系。GROSCH 等^[3]系统地研究了温度、速度等因素对湿摩擦因数的影响,得到了橡胶抗湿滑性能主曲线;NAHMIAS 等^[4]通过轮胎制动试验,得到胎面胶料黏弹性与湿摩擦因数间的关系;DELEAU 等^[5]研究了橡胶在湿润玻璃上的摩擦情况,得到滑动速度和载荷对湿摩擦因数的影响情况。赵鸿铎等^[6]通过室内试验获得了水膜厚度与摩擦因数之间定量函数关系。虽然试验方法是研究胎面橡胶-路面摩擦行为最直接的研究手段,但该方法存在测试设备费用昂贵、

* 国家自然科学基金(52072156, 51605198, 51675240)、江苏省青年科学基金(KB20160528)和江苏省“六大人才”高峰项目(JXQC-011)资助项目。20191112 收到初稿,20200214 收到修改稿

周期长、难度大等缺点,并且很难呈现湿滑状态下橡胶-路面接触摩擦的微观特性。

为此,研究人员开展了理论力学方面的研究。**GREENWOOD**等^[7]研究了球形橡胶体的摩擦因数,发现湿摩擦力主要源于橡胶变形时的滞后损失。**王国林**等^[8]采用修正的衰减指数摩擦模型研究了胎面变形与抓地力之间的关系。**PERSSON**等^[9]基于路表分形摩擦理论,计算出橡胶-路面的湿摩擦因数。**季天剑**等^[10]根据能量守恒原理,得到了湿摩擦因数与水膜厚度、行车速度的关系式。**SCARAGGI**等^[11]采用多尺度平均场理论研究了橡胶与粗糙刚性面的润滑接触,结果表明基底沟槽方向对摩擦力影响很大。**KANE**等^[12-13]基于橡胶黏弹性物理属性,建立了橡胶与粗糙路面摩擦分析模型,分析了滑动速度、载荷等因素对橡胶湿摩擦特性的影响。但由于理论力学在求解过程较为复杂,也常常需要对模型进行简化处理,还需要借助试验手段来确定模型中的有关参数,如路面粗糙度,致使该计算方法的普适性受到限制。

随着计算能力提升和数值仿真软件的快速发展,数值仿真分析为更高效、便捷、准确地研究轮胎各项性能提供了可行性。**CHO**等^[14]采用制动过程中速度离散化的方法,利用能量守恒定律,研究了汽车在干湿路面上的制动距离,但是在计算过程中路面因素的影响却被忽略了。为反映粗糙路面积水对橡胶摩擦特性的影响,**黄晓明**^[15]基于表面分形摩擦理论开展了沥青路面与胎面橡胶之间的摩擦特性研究,但是潮湿路面特性需要通过试验测试获得,在一定程度上限制了湿滑状态下橡胶路面摩擦因数计算的方便性和高效性。为此,本文建立一种胎面橡胶-湿滑路面摩擦行为的数值分析方法,突破试验测试技术的限制,实现轮胎与湿滑路面摩擦特性计算。首先,基于谐波叠加法重构三维粗糙路面,通过仿真分析方法获得胎面橡胶与粗糙路面滑动接触时的

滞后摩擦力和“水槽”体积;然后,采用“伪”流体动力轴承等效反映路面水膜“密封”作用,从而计算出水膜承载力;最后,基于橡胶在湿滑路面滑动摩擦特性,计算橡胶-湿滑路面摩擦因数,并进一步分析滑动速度、接触压力和路面特征对湿滑状态下轮胎路面摩擦特性的影响规律。

1 轮胎与湿滑路面摩擦接触特性

汽车轮胎与路面摩擦接触特性主要包括两部分,一是由于橡胶分子键的断裂和重组形成的黏附摩擦,一是在受到外在激励作用下橡胶发生黏弹性能量损失而形成滞后摩擦。汽车在薄水膜路面制动时,路面水膜一方面充当“润滑剂”降低橡胶与路面之间的黏附效应,另一方面水膜填充路面间隙减少橡胶与路面的接触面积,减弱了滞后摩擦作用。因此,当汽车在湿滑路面制动时,应主要考虑橡胶-湿滑路面相互作用时滞后摩擦力对制动性的影响。

1.1 滞后摩擦力

黏弹性橡胶的滞后摩擦力可以通过**KANE**等^[12]提出的黏弹性-粗糙表面接触模型进行计算,该模型具有参数易识别的优势。由于橡胶具有黏弹性属性,胎面橡胶与粗糙路面滑动接触时会产生不对称的接触压力分布,故橡胶滞后摩擦力可通过路面轮廓和橡胶块滑移接触时不同时刻的受力平衡分析获得。橡胶与粗糙路面接触状态如图1a所示,对接触区域进行受力分解,如图1b所示,可建立接触区域内的受力平衡方程式(1)

$$\mathbf{F}_i + \mathbf{T}_i + \mathbf{R}_i + \mathbf{FR}_i = \mathbf{0} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{F}_i$ 表示橡胶与路面接触力, $\mathbf{T}_i$ 表示橡胶的驱动力, $\mathbf{R}_i$ 表示路面作用反力, $\mathbf{FR}_i$ 表示接触区局部摩擦力, $\mathbf{FR}_i = \mu_{loc} \mathbf{R}_i$, 其中 μ_{loc} 为局部摩擦因数。

图1 胎面橡胶在粗糙路面上滑移示意图

将受力方程式(1)分解在局部接触区的 x 轴和 z 轴上, 则式(1)可改写为式(2)

$$\begin{cases} -F_i + R_i \cos \alpha_i - FR_i \sin \alpha_i = 0 \\ T_i - R_i \sin \alpha_i - FR_i \cos \alpha_i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

在二维平面内 $\mathbf{FR}_{ij} = \mu_{loc} \mathbf{R}_{ij}$, 则方程式(2)可改写为方程式(3)

$$T_i = F_i \frac{\sin \alpha_i + \mu_{loc} \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i - \mu_{loc} \sin \alpha_i} \quad (3)$$

此时, 离散后的单元橡胶滑动所需最小的驱动力与局部接触区摩擦力相等

$$FF_i = T_i = F_i \frac{\sin \alpha_i + \mu_{loc} \cos \alpha_i}{\cos \alpha_i - \mu_{loc} \sin \alpha_i} \quad (4)$$

因此, 胎面橡胶与路面摩擦因数为

$$\mu = \frac{\sum_i^N FF_i}{W} \quad (5)$$

$$W = \sum_i^N F_i \quad (6)$$

式中, N 表示橡胶块离散单元数量; W 表示作用橡胶块上的压力。

图2 胎面橡胶-粗糙湿滑路面接触示意图

综上所述, 在研究湿滑状态下轮胎与湿路面摩擦特性时, 必须综合考虑橡胶材料、接触压力、滑动速度、路面形貌和路面水膜等多因素。

2 三维路面重构及其模型建立

不同路面对于轮胎具有显著差异的摩擦特性, 其主要原因是不同路面的波纹度、表面形貌等具有随机性。因此, 为确保轮胎路面摩擦特性数值分析的准确性, 必须对路面形貌进行有效表征。研究表明^[16], 沥青路面和水泥路面的表面形貌均具有统计自仿射分形特性。虽然路面轮廓特征具有随机性, 难以获得准确具体表达式, 但通常采用功率谱密度函数对路面特性进行统计描述

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-w} \quad (10)$$

1.2 粗糙路面水膜“密封”作用

当橡胶与湿滑路面上滑动接触时, 水膜会填充路面纹理间隙形成“水槽”, 产生承载能力, 减弱了路面粗糙纹理穿刺橡胶的程度, 致使橡胶滞后摩擦力降低。为考虑水膜“密封”作用的影响, KANE^[13]采用连续润滑膜的“伪”流体动力轴承等效反映接触区内不连续的“水槽”(图2), 以“伪”流体动力轴承的水量等同“水槽”体积为前提, 利用方程式(7)获得作用于橡胶的流体动压力 p_h

$$\frac{d}{dx} \left(H(x)^3 \frac{dp_h(x)}{dx} \right) = 6\eta V \frac{dH(x)}{dx} \quad (7)$$

式中, $H(x)$ 表示轴承中 x 处的水膜厚度; η 表示流体黏度; V 表示橡胶滑移速度。

根据方程式(7)并结合橡胶接触面积可得到动水升力 W_h , 此时在湿滑路面上橡胶滑移所受到的总压力 W_{total} 和湿摩擦因数 μ_{wet} 分别为

$$W_{total} = W + W_h \quad (8)$$

$$\mu_{wet} = \frac{\sum_i^N FF_i}{W_{total}} \quad (9)$$

式中, $G_q(n_0)$ 为路面不平度系数; w 为频率指数; n_0 为参考空间频率。

本文参照文献[17]的研究方法, 基于谐波叠加法, 取 $G_q(n_0)=1.6 \times 10^{-5}$, 利用 Matlab 软件输出沥青路面宏观轮廓的三维坐标。但在数值分析过程中, 若接触区路面模型存在过小或者尖角等特征单元时, 这不仅需要更为精细的网格, 而且尖角等特征还会穿透橡胶单元从而导致接触计算不收敛等问题。因此, 为准确反映路面轮廓特征, 借助 Matlab 软件中的 cubic 插值函数对路面宏观轮廓的尖角等特征进行平滑处理, 从而得到路面轮廓的特征点, 并获得对应的点云坐标图, 如图3所示。

为建立三维路面有限元模型, 首先利用 CATIA 软件的 Digitized Shape Editor 模块和 Mesh Creation 命令依次导入路面点云坐标并生成网格面, 再通过 Automatic Surface 命令对网格面拟合合成三维表面, 通过对其拉伸

建立三维路面几何模型,如图 4a 所示;然后,利用 HYPERMESH 软件对三维路面模型进行外表面网格划分,如图 4b 所示,从而得到路面有限元模型。

图 3 路面坐标点云图

(a) 三维几何模型

(b) 有限元网格模型

图 4 三维路面有限元模型

3 胎面橡胶-湿滑路面摩擦特性仿真

3.1 胎面橡胶-粗糙路面滑动接触仿真分析

图 5 为在有限元软件 ABAQUS 的 Explicit 模块中建立的粗糙路面与胎面橡胶接触模型,模型尺寸如表 1 所示。在接触模型中,采用离散刚体模拟路面,橡胶的超弹性和黏弹性则分别采用 Neo-Hookean 超弹性模型和 Prony 模型表征^[18],不同模型参数详见表 2。为避免橡胶与粗糙路面接触不稳定、高速滑动时数据震荡等问题,采用文献[19]的边界条件施加方法进行设置:路面采用固定约束,胎面橡胶与路面采用库伦摩擦接触,胎面顶部施加均布压力,待静态加载计算完成后,施加路面 Y 向滑动速度,模拟粗糙路面和胎面橡胶的相对滑动。

图 5 粗糙路面-胎面橡胶滑动接触有限元模型

表 1 有限元建模参数

部件名称	高度/mm	宽度/mm	长度/mm	单元类型	单元数量
胎面橡胶	6	24	60	C3D8R	208 000
粗糙路面	...	20	20	R3D3、R4D4	10 531

表 2 胎面橡胶模型参数

胶料名称	Neo-Hookean 模型参数		Prony 级数模型参数		
	C_{10}	D_1	$\bar{g}_1^p$	$\bar{k}_1^p$	$\bar{\tau}_1^p$
胎面橡胶	0.58	0.035	0.137 2	0	6.321 1

为准确获得橡胶滞后摩擦力,以文献[20]采用

的橡胶摩擦模型描述橡胶与路面的切向接触特性。该模型在宏观唯象摩擦模型的基础上添加了反映橡胶特性相关项,可准确地反映摩擦因数与接触变量(滑动速度、接触压力)的关系,其表达式如式(11)所示

$$\mu(p, v) = k \frac{\alpha p^d + \beta}{a + \frac{1}{v^m} + \frac{c}{v^m}} \left| \frac{E(f)}{1 - v^2} \right| \quad (11)$$

式中, v 表示滑动速度; p 表示接触压力; a 、 b 、 c 、 d 和 m 分别表示拟合系数; k 表示修正系数; v 表示橡胶泊松比; $E(f)$ 表示橡胶复模量,具体各参

数值如表 3 所示。利用 Fortran 语言对式(11)进行编写翻译，调用 ABAQUS 用户子程序，嵌入仿真分析中进行数值仿真。

表 3 摩擦模型参数^[20]

变量	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>m</i>	α	β	<i>k</i>
数值	13.08	-14.06	34.32	-0.284	-0.38	6.014	0.469 6	0.019 3

通过滑动接触分析获得橡胶的接触压力和滞后摩擦力，并将分析完成后的橡胶-路面接触模型以 inp 文件格式重新导入到 HYPERMESH 软件中。为提取橡胶与粗糙路面纹理之间的空隙体积，即“水

槽”体积，通过手动删除方式仅保留路面和橡胶互相接触区域网格，之后输出该部分网格节点坐标，在 Matlab 中利用定积分方法得到“水槽”体积。

依据文献[15]的测试条件，分析路面滑动速度为 3 m/s、6 m/s、9 m/s、12 m/s、15 m/s、18 m/s，橡胶压力(接触压力和流体动压力之和)在 0.2~0.6 MPa 范围内，橡胶的滞后摩擦力和“水槽”体积的变化特性，具体结果如表 4 所示。由表 4 可知，路面滑动速度相同时，接触压力的增大会增加橡胶滞后摩擦力，减小“水槽”体积，该现象与橡胶路面滑动接触实际情况相一致。

表 4 不同速度不同压力作用下的计算结果

滑动速度 3 m/s						
接触压力/N	70.9	105.3	140.0	175.4	210.1	244.7
滞后摩擦力/N	76.5	108.7	138.2	164.2	190.4	213.2
“水槽”体积/mm ³	209.8	163.6	130.5	103.9	83.2	65.1
滑动速度 6 m/s						
接触压力/N	68.7	106.2	140.1	174.9	210.8	241.9
滞后摩擦力/N	68.0	100.0	126.0	150.6	175.5	193.7
“水槽”体积/mm ³	213.5	163.0	130.5	104.2	82.4	66.4
滑动速度 9 m/s						
接触压力/N	70.3	100.0	129.5	161.6	190.0	221.0
滞后摩擦力/N	64.3	89.0	111.1	133.0	151.5	170.5
“水槽”体积/mm ³	210.7	170.0	139.4	113.5	94.7	77.0
滑动速度 12 m/s						
接触压力/N	70.2	100.4	128.4	160.1	191.3	219.2
滞后摩擦力/N	60.8	83.8	103.9	124.7	144.7	163.2
“水槽”体积/mm ³	210.8	169.1	140.3	115.5	93.8	77.9
滑动速度 15 m/s						
接触压力/N	50.0	80.3	111.0	140.8	169.6	201.1
滞后摩擦力/N	43.2	66.2	90.1	110.8	128.0	145.9
“水槽”体积/mm ³	252.4	193.5	157.4	129.6	107.9	87.9
滑动速度 18 m/s						
接触压力/N	50.3	80.0	109.2	140.2	170.0	198.2
滞后摩擦力/N	42.7	64.7	86.1	106.4	126.1	143.0
“水槽”体积/mm ³	252.9	193.6	159.3	130.1	107.7	89.7

3.2 胎面橡胶-湿滑路面摩擦因数分析

3.2.1 计算方法

胎面橡胶与湿滑的粗糙路面接触时，路面波谷会被水流覆盖形成“水槽”，在密封作用下会对胎面橡胶产生流体动压力，对胎面橡胶起支撑作用，从而降低了路面与橡胶的相互作用力。为考虑“水槽”的流体动压力，根据表 1 所示的路面长度和宽度来确定流体域模型的底面的长、宽尺，将 KANE^[13]提出的二维等效“伪”流体动力轴承拓展到三维空间，建立如图 6 所示的流体计算域。定义模型为速度入口、

压力出口以及固定壁面三种形式，并考虑重力作用，其中速度入口依据路面滑动速度而定。湍流模型采用 Realizable k-epsilon 模型，采用稳态压力基求解器。

由图 6 可知，水膜承载力与楔角角度和水流速度存在密切关系。假定不同滑动速度和橡胶压力作用下，流体计算域的楔角为定值，那么选择合适的楔角才会反映出橡胶湿滑路面的接触特性。由于干路面和湿路面所提供的摩擦因数不同，致使汽车在干、湿路面的制动距离存在显著差异，依据文献[20-23]在干、湿路面实车制动距离的分析，湿摩擦因数下降呈

近似正态分布,均值在 25%左右,如图 7 所示。因此,为准确设定本文流体计算域楔角,假设相对于

路面摩擦因数而言,湿路面摩擦因数下降率设定为 20%~30%。

图 6 流体计算域及边界条件

图 7 湿摩擦因数降低情况

在路面滑动速度一定下,由方程式(8)和(9)可得到湿路面摩擦因数下降率 Q ,如式(12)和(13)所示

$$\mu_{wet} \approx \frac{\mu_{dry} F_{road}}{F_{road} + F_{water}} \quad (12)$$

$$Q = 1 - \frac{\mu_{dry}}{\mu_{wet}} \approx 1 - \frac{F_{road}}{F_{road} + F_{water}} \quad (13)$$

式中, μ_{dry} 和 μ_{wet} 分别表示干、湿摩擦因数, F_{road} 和 F_{water} 分别表示路面接触力和水膜承载力。

以表 4 中滑动速度 18 m/s 为例,通过分析不同橡胶接触压力(50.3 N、109.2 N、198.2 N)和不同“水槽”体积(252.9 mm³, 159.3 mm³, 89.7 mm³)作用下摩擦因数降率 Q 的变化,如图 8 所示,从而得到了不同楔角对摩擦因数下降率 Q 的影响。

(b) 压力 109.15 N, 体积 159.34 mm³

(c) 压力 198.19 N, 体积 89.66 mm³

图 8 楔角变化对摩擦因数下降率的影响

由图 8 可知,不同的楔角对摩擦因数下降率具有显著影响,当且仅当楔角在 0.4° 时,满足湿路面摩擦因数下降率在 20%~30%之间的条件,因此,流体计算域模型的楔角设定为 0.4°。一旦“水槽”体积和楔角确定后,就可推算出流体计算域模型的水入口和出口高度,从而计算水膜承载力。

根据不同“水槽”体积及水流速度计算得到的水膜承载力如图 9 所示。由图 9 可知,水膜承载力和“水槽”体积呈负相关,和速度呈正相关,即橡胶块在高速、大压力情况下,受水膜影响明显。

(a) 压力 50.28 N, 体积 252.89 mm³

图9 不同滑动速度对水膜承载力影响

参照方程(8)和(9), 本文采用方程式(14)和(15)计算胎面橡胶-湿滑路面摩擦因数

$$F_{total} = F_{road} + F_{water} \quad (14)$$

$$\mu_{wet} = \frac{F_{hys}}{F_{total}} \quad (15)$$

式中, F_{hys} 表示橡胶滞后摩擦力, F_{total} 表示总压力, 总压强 $P = \frac{F_{total}}{S}$ (S 为路面试样投影面积 $S=400 \text{ mm}^2$)。

综合表4和图9的计算结果, 采用方程(14)和式(15), 即可得到不同滑动速度、不同接触压力作用下的胎面橡胶-湿滑路面摩擦因数。

3.2.2 计算结果分析

以接触压力 0.3 MPa 时胎面橡胶-路面摩擦因数随滑移速度的变化关系为例, 如图10所示, 进行本文所建模型的有效性检验。由图10可知, 不同滑动速度下, 湿滑状态下橡胶-路面摩擦因数相对干燥路面降低了 1.4%~21.0%, 下降幅度随滑动速度增加而变大, 该结果与文献[15]和文献[24]的研究结果相一致, 只是数值上略有差异, 这可能是由于橡胶

图10 干燥和湿滑状态下摩擦因数随滑动速度的变化曲线

材料及路面粗糙度不同, 以及数值仿真条件与试验条件不同等因素造成的。但总体上来说, 本文所建模型得到的数值结果与参考文献中的计算结果误差较小, 趋势一致, 具有可信性。

图11示出了在 3 m/s、6 m/s、9 m/s、12 m/s、15 m/s 和 18 m/s 等不同滑动速度下, 橡胶接触压力变化对胎面橡胶-湿滑路面摩擦因数的影响。由图11可知, 当滑动速度固定时, 随着接触压力的增大, 胎面橡胶-湿滑路面摩擦因数呈现降低的趋势, 并且滑动速度越小, 降低趋势越明显; 在较大的滑动速度内, 较大的接触压力作用下摩擦因数会有更明显的下降趋势。

图11 不同滑动速度下接触压力对摩擦因数的影响

对图11数据进行处理, 得到不同接触压力 0.2 MPa、0.25 MPa、0.3 MPa、0.4 MPa、0.5 MPa、0.6 MPa 作用下滑动速度对摩擦因数的影响, 如图12所示。接触压力一定时, 滑动速度的增加会使得胎面橡胶-湿滑路面摩擦因数呈现下降趋势; 在较小的接触压力作用下, 较小的滑动速度作用会使摩擦因数会有更明显的下降趋势。

图12 不同接触压力下速度对摩擦因数的影响

以 A、B 两种路面作为研究对象, 其路面不平

度系数分别为 $1.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ 、 $2.56 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 。橡胶接触压力 0.3 MPa 时, 图 13 示出了在干路面和湿路面两种不同状态下胎面橡胶-路面摩擦因数随滑动速度的变化关系。由图 13 可知, 在干路面上, 纹理粗糙的路面提供较大的摩擦因数, B 路面提供的摩擦因数比 A 路面大 4%~10%; 而在潮湿路面上, 随着滑动速度增加, 平坦纹理的路面 A 所提供的摩擦因数明显下降, 约为 2%~26%, 而粗糙纹理的路面 B 所提供的摩擦因数下降相对较小, 约为 1.4%~21%。这主要是在潮湿路面上, 胎面橡胶与粗糙度较高的道路接触时, “水槽” 动水压力所产生的承载力对橡胶接触影响较小, 从而保证实际接触面积变化很小, 加之路面凸起纹理可较深地穿透橡胶, 从而使胎面橡胶具有较大的滞后摩擦力。因此, 路面粗糙度适当增加, 可减弱水膜 “密封” 作用的影响, 确保胎面橡胶实际接触面积, 从而提升轮胎抗湿滑性能。

图 13 不同路面干-湿状态下摩擦因数对比图

4 结论

(1) 利用功率谱密度函数描述路面的形貌特征, 采用谐波叠加法重构了三维随机路面, 并基于 Matlab 软件获得了路面轮廓的三维点云坐标, 利用 CATIA 及 HYPERMESH 软件实现了三维粗糙路面的有限元建模。

(2) 采用数值分析方法建立了胎面橡胶-粗糙路面滑动接触模型, 获得了路面不同滑动速度及胎面橡胶接触压力下的滞后摩擦力, 并计算出胎面橡胶与粗糙路面滑动接触时橡胶与路面纹理之间的 “水槽” 体积。

(3) 基于 “伪” 流体动力轴承等效作用, 建立了胎面橡胶-湿滑路面摩擦因数的数值分析模型, 研究分析了不同橡胶接触压力、不同路面滑动速度和

不同特征路面下的橡胶-湿滑路面摩擦因数变化特性, 通过与文献中的计算结果对比, 其趋势一致。本文建立的湿滑状态下轮胎路面摩擦特性的数值分析方法具有有效性, 可以为后续轮胎湿抓地性能分析等研究提供良好基础。

参 考 文 献

- [1] 马彬, 许洪国, 刘宏飞. 路面分形和橡胶特性对轮胎滑动摩擦因数的影响[J]. 吉林大学学报, 2013, 43(2): 50-55.
MA Bin, XU Hongguo, LIU Hongfei. Effects of road surface fractal and rubber characteristics on tire sliding friction factor [J]. Journal of Jilin University, 2013, 43(2): 50-55.
- [2] SABEY E B. Pressure distributions beneath spherical and conical shapes pressed into a rubber plane, and their bearing on coefficients of friction under wet conditions[J]. Proceedings of the Physical Society, 1958, 71(6): 979-988.
- [3] GROSCH K A. The relation between the friction and visco elastic properties of rubber[J]. Proceedings of The Royal Society A, 1963, 274(1356): 21-39.
- [4] NAHMIAS M, 高静茹. 客车胎面胶料的黏弹性与轮胎在湿路面上的牵引性能的关系[J]. 橡胶参考资料, 1998(7): 1-7.
NAHMIAS M, GAO Jingru. The relationship between viscoelasticity of bus tread compound and traction performance of tire on wet road [J]. Rubber Reference Materials, 1998(7): 1-7.
- [5] DELEAU F, MAZUYER D, KOENEN A. Sliding friction at elastomer/glass contact: Influence of the wetting conditions and instability analysis [J]. Tribology International, 2009, 42(1): 149-159.
- [6] 赵鸿铎, 伍梦竹, 吴世涛. 沥青道面摩擦因数随水膜厚度的变化规律[J]. 中国民航大学学报, 2015, 33(2): 47-52.
ZHAO Hongyi, WU Mengzhu, WU Shitao. Variation of asphalt pavement friction coefficient with change of water film thickness [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2015, 33(2): 47-52.
- [7] GREENWOOD J A, TABOR D. The friction of hard sliders on lubricated rubber: The importance of deformation losses[J]. Proceedings of the Physical Society, 1960, 71(6): 989.
- [8] 王国林, 张婷, 周海超, 等. 胎面变形与刚度对轮胎抓地性能的影响研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 108-115.

- WANG Guolin, ZHANG Ping, ZHOU Haichao, et al. Effect of Tread Deformation and Stiffness on Road Holding Performance[J], Journal of Mechanical Engineering, 2017, 55(10): 108-115.
- [9] PERSSON B N J, TARTAGLINO U, ALBOHR O, et al. Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect[J]. Physical Review B, 2005, 71(3): 035428.
- [10] 季天剑, 黄晓明, 刘清泉. 部分滑水对路面附着系数的影响[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(4): 10-12.
- JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan. Part hydroplaning effect on pavement friction coefficient [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(4): 10-12.
- [11] SCARAGGI M, ANGERHAUSEN J, DOROGIN L, et al. Influence of anisotropic surface roughness on lubricated rubber friction: Extended theory and an application to hydraulic seals[J]. Wear, 2018: S0043164817305793.
- [12] KANE M, CERESO V. A contribution to tire/road friction modelling: From a simplified dynamic frictional contact model to a “dynamic friction tester” model[J]. Wear, 2015, 342: 163-171.
- [13] KANE M, DO M T, CERESO V, et al. Contribution to pavement friction modelling: An introduction of the wetting effect[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2017, 18(10): 1-12.
- [14] CHO J R, LEE H W, YOO W S. A wet - road braking distance estimate utilizing the hydroplaning analysis of patterned tire[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 69(7): 1423-1445.
- [15] 黄晓明, 曹青青, 刘修宇, 等. 基于路表分形摩擦理论的整车雨天制动性能模拟[J]. 吉林大学学报, 2003, 49(3): 757-765.
- HUANG Xiaoming, CAO Qingqing, LIU Xiuyu, et al. Simulation of vehicle braking performance on rainy days based on pavement surface friction theory[J]. Journal of Jilin University, 2003, 49(3): 757-765.
- [16] PERSSON B N J. On the fractal dimension of rough surfaces[J]. Tribology Letters, 2014, 54(1): 99-106.
- [17] 李鹏飞, 冯国胜, 邓晓龙, 等. 三维虚拟路面的谐波重构[J]. 汽车工程师, 2014(11): 24-27.
- LI Pengfei, FENG Guosheng, DENG Xiaolong, et al. Three-dimensional virtual roads harmonic reconstruction[J]. Journal of Auto Engineer, 2014(11): 24-27.
- [18] 周伟. 子午线轮胎成型过程仿真及工艺参数改进方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- ZHOU Wei. Study on radial tire building process simulation and technological parameters improvement method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [19] 付晶. 轮胎抓地性能仿真分析及胎冠结构对其影响研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- FU Jin. Research on analysis method of tire grip performance and its relationship with tire crown structure[D]. Zhenjiang: jiangsu University, 2016.
- [20] 张松. 跨式单轨列车走形轮胎工作模式与偏磨关系研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- ZHANG Song. Study on the relationship between working mode and eccentric wear of traveling wheel tire of straddle monorail train[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [21] 车比得. 中国轮胎海外测试 2017 年第一弹[EB/OL]. (2017-07-26). <https://chejiahao.autohome.com.cn/info/2023459/>.
- CHE Bide. Overseas testing of china's tyres for the first time in 2017[EB/OL]. (2017-07-26) <https://chejiahao.autohome.com.cn/info/2023459/>.
- [22] 杨淞文. 国内轮胎海外评测第二季[EB/OL]. (2015-07-27). http://news.bitauto.com/toupai/20150727/1706544681_all.html.
- YANG Songwen. Overseas evaluation of domestic tyres in the second quarter[EB/OL]. (2015-07-27). http://news.bitauto.com/toupai/20150727/1706544681_all.html.
- [23] 王啸辰. 国产多款轮胎海外评测[EB/OL]. (2014-09-23). <http://news.bitauto.com/others/20140922/0906483059.html>.
- WANG Xiaochen. Overseas evaluation of domestic tyres[EB/OL]. (2014-09-23). <http://news.bitauto.com/others/20140922/0906483059.html>, 2014-09-23.
- [24] PERSSON B N J, ALBOHR O, TARTAGLINO U, et al. On the nature of surface roughness with application to contact mechanics, sealing, rubber friction and adhesion [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2005, 17(1): R1-R62.

作者简介: 周海超, 男, 1984 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为汽车轮胎技术和轮胎空气动力学。

E-mail: hczhou@ujs.edu.cn

王国林(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车轮胎新技术、地面力学和汽车现代设计理论与方法。

E-mail: glwang@ujs.edu.cn