

特约来稿

胎面与胎体间接触特性对轮胎滚动阻力影响的研究

王国林, 陈晨*, 周海超, 梁晨

(江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:以205/55R16轿车子午线轮胎为例,建立轮胎三维有限元模型,对于同一胎体设计不同的胎面花纹,并采用主成分回归法建立轮胎滚动阻力和胎面与胎体间接触特性参数的线性回归方程,研究不同花纹胎面与胎体间接触特性参数对轮胎滚动阻力的影响。结果表明,第二长轴长度因数、第三长轴长度因数、接触因数和接触形状因数对轮胎滚动阻力影响较大,平均接触压力、第二长轴长度、第三长轴长度和接触长轴长度次之,最大接触压力和接触面积较小。

关键词:轿车子午线轮胎;滚动阻力;接触特性;胎面;胎体;主成分回归法

中图分类号:TQ336.1;U463.341⁺.6

文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2020)06-0403-07

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2020.06.0403



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

随着对汽车节能与环保关注度的日益增加,各种新技术的应用正在降低汽车的总能耗,而轮胎滚动阻力对汽车总能耗的贡献度仍然较大。研究发现,轮胎滚动阻力是阻碍汽车行驶的主要因素之一,特别是在高速行驶时,它会使汽车消耗更多的燃料^[1]。2012年欧盟开始实施轮胎标签法,将轮胎滚动阻力划分为7个等级,提高了轮胎的市场准入门槛。我国是全球轮胎的主要生产及消耗国之一,为了节约能源与保护环境,我国积极推进“低滚阻、低油耗、高安全性”的绿色轮胎产业化,对轮胎滚动阻力提出了更高要求。

研究^[2-3]表明,轮胎滚动阻力可消耗车辆总燃

料的20%~30%,且随着滚动阻力变化燃料消耗量呈近似线性变化。作为轮胎的重要性能之一,轮胎滚动阻力与胎面花纹和胎体结构之间存在必然的联系。曹冲振等^[4]采用均值分析法并选择7个轮胎结构设计参数,通过测力法对制作的6条试验轮胎进行滚动阻力测试,得到轮胎结构对滚动阻力有较大影响。梁晨^[5]对不同子午线轮胎胎面与路面间的接触压力分布进行了研究,建立了轮胎综合接地性能评价体系。王国林等^[6]通过轮胎接地试验测试了10个不同厂家生产的轮胎接地特性参数,描述了接地特性参数与轮胎滚动阻力之间的定量关系。

由于轮胎滚动阻力与轮胎其他性能之间的干扰性和复杂性,传统的轮胎滚动阻力试验研究成本高、周期长,且无法定量分析轮胎内部结构对其滚动阻力的影响,因此高效、精确的有限元分析技术越来越广泛地应用于轮胎滚动阻力的研究。冯琳阁等^[7]利用有限元分析软件Abaqus先分别建立胎面与胎体模型,再组合成带复杂花纹胎面的轮胎模型,并进行了有效性验证。孙砚田^[8]利用有限元分析软件模拟轮胎滚动阻力试验环境,分析轮胎温度场分布,提出一种滚动阻力数值计算方法,并验证其有效性。仇成群等^[9]利用有限元方法分析了轮胎结构参数对轮胎滚动阻力和辐射噪声的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605198,51675240);江苏省青年基金项目(KB20160528);江苏省“六大人才高峰”项目(JXQC-011)



作者简介:王国林(1965—),男,吉林伊通人,江苏大学教授,博士生导师,现任江苏大学汽车与交通工程学院副院长,中国农业机械学会地面机器系统分会副主任委员,中国大学生方程式赛车规则委员会委员,《轮胎工业》编委,主要从事汽车轮胎技术、汽车现代设计理论与方法、汽车动力学控制、地面力学等方面的研究工作,完成国家和省部级项目10余项,获得省部级科技进步奖3项,申请专利20余件,在国内外科技刊物上发表论文110余篇。

*通信联系人(1379630355@qq.com)

影响。以上研究均局限于轮胎单一结构对滚动阻力的影响,未对胎面与胎体间接触压力分布特性(接触特性)进行分析研究。

胎体是轮胎的主要受力部件,起支撑与保护作用;胎面是轮胎与路面接触的部件,通过不同的花纹设计达到排水、散热、抓地等作用。轮胎生产过程中,在胎体成型后再进行胎面与胎体贴合。目前,对轮胎滚动阻力的研究多局限于胎面与路面间接触特性及其对轮胎性能的影响,无法为高性能绿色轮胎提供更多的技术指导。

本研究对205/55R16轿车子午线轮胎进行有限元分析,设计不同花纹的胎面与胎体贴合,以胎面与胎体间接触特性参数为中间变量,研究不同花纹胎面与同一种胎体间接触特性及其对轮胎滚动阻力的影响,进而对轮胎滚动阻力性能进行评价和预测,为降低轮胎滚动阻力、优化胎面花纹及翻新轮胎提供参考依据。

1 数值仿真试验

1.1 有限元分析模型

205/55R16轮胎的结构如图1所示,其中胎面、胎侧、耐磨胶、三角胶和内衬层为橡胶材料,带束层、冠带层、胎体和胎圈为橡胶-帘线复合材料。将该轮胎分为胎面结构与胎体结构两个部分,胎体结构是除胎面外的所有结构,将胎面结构与胎体结构分开建立模型。

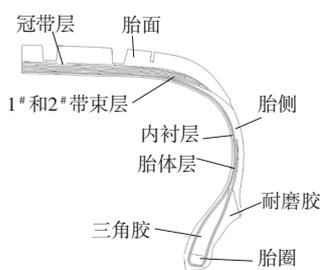


图1 205/55R16轮胎结构

橡胶材料采用Yeoh模型,橡胶-帘线复合材料采用Rebar模型。带复杂花纹轮胎的三维有限元模型建模流程如图2所示,该模型共有365 424个单元、463 764个节点,路面和轮辋定义为解析刚体。用固定路面、对轮辋中心参考点施加力的方法



图2 带复杂花纹轮胎的三维有限元模型建模流程
来模拟轮胎的受力接地过程,施加的额定负荷力为4 824 N,额定充气压力为0.21 MPa,采用文献[10]中的方法计算其轮胎滚动阻力值。

1.2 有限元模型的有效性验证

目前轮胎滚动阻力测试方法主要有室外测试法和室内测试法。室外测试法主要有拖车测量法、扭矩测量法和滑行测量法,室内测试法主要有直接测力法、功率测量法、扭矩测量法和减速度测量法。各种测量方法又分为在稳定状态和非稳定状态下进行,即轮胎在恒定或非恒定的负荷和速度下行驶升温至稳定状态时测量轮胎的滚动阻力^[11]。

对于205/55R16轮胎,采用直接测力法,在稳态自由滚动状态下,按照ISO 28580—2018,在具有南德意志集团授权许可的转鼓实验室中测得其滚动阻力因数试验值为10.52,而模型仿真值为11.04,误差为4.94%。由此可知,本研究所建立的有限元模型有效,可分析计算轮胎的滚动阻力性能^[12]。

2 胎面与胎体间接触特性参数

轮胎在标准充气压力下,当不承受负荷及与地面无挤压时,胎体因受到充气压力的作用而向外扩张;当承受负荷并与路面发生挤压时,轮胎与地面发生挤压的区域所受力的方向发生改变。将胎面与胎体间接触压力方向发生改变的区域称为接触区域,受轮胎使用工况不同、胎面花纹形式不同及胎体结构不同的影响,胎面与胎体间接触特性也会有所不同。探究胎面与胎体

间接触特性与轮胎滚动阻力性能的关系,需先对其接触特性进行科学描述,确定其描述参数。

胎面与胎体间接触特性包括几何特性和力学特性。描述接触几何特性的参数包括接触面积、接触长轴长度、接触短轴长度、第二长轴长度、第三长轴长度、第二长轴长度因数、第三长轴长度因数、接触因数和接触形状因数;描述接触力学特性的参数包括最大接触压力、平均接触压力和接触压力偏度值。胎面与胎体间接触特性参数如图3所示,含义如下。

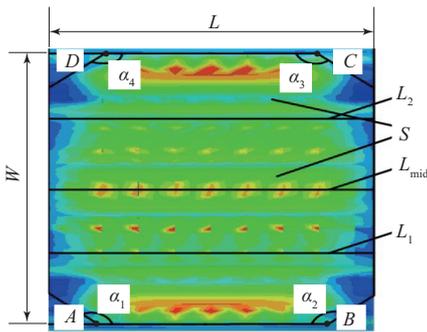


图3 胎面与胎体间接触特性参数

(1) 接触面积 (S)。轮胎在垂直负荷作用下,胎面与胎体间接触区域的面积。

(2) 接触长轴长度 (L)。轮胎在垂直负荷作用下,胎面与胎体间接触面积中沿轮胎圆周切线方向的最大距离。

(3) 接触短轴长度 (W)。轮胎在垂直负荷作用下,胎面与胎体间接触面积中沿轮轴方向的最大距离。

(4) 接触因数。接触长轴长度与接触短轴长度的比值。

(5) 第二长轴长度 (L_{sec})。接触面积中接触短轴长度的70%处接触长轴长度的均值,即

$$L_{sec} = \frac{L_1 + L_2}{2} \quad (1)$$

(6) 第三长轴长度 (L_{mid})。接触面积中接触短轴长度的50%处接触长轴长度。

(7) 第二长轴长度因数 (L_{sec}')。

$$\begin{cases} L_{AB}' = \frac{L_{AB}}{L_1} \\ L_{CD}' = \frac{L_{CD}}{L_2} \\ L_{sec}' = \frac{L_{AB}' + L_{CD}'}{2} \end{cases} \quad (2)$$

式中, L_{AB} 指 A 与 B 两点间距离, L_{CD} 指 C 与 D 两点间距离。

(8) 第三长轴长度因数 (L_{mid}')。

$$\begin{cases} L_1' = \frac{L_{mid}}{L_1} \\ L_2' = \frac{L_{mid}}{L_2} \\ L_{mid}' = \frac{L_1' + L_2'}{2} \end{cases} \quad (3)$$

(9) 接触形状因数 (η)。

$$\eta = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{2\pi} \quad (4)$$

式中, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 分别为 A, B, C, D 四点的内角弧度值。当 η 大于1时,表征接触区域形状为外凸;当 η 等于1时,表征接触区域形状为矩形;当 η 小于1时,表征接触区域形状为内凹。

(10) 最大接触压力。胎面与胎体间接触压力的最大值。

(11) 平均接触压力。负荷与接地面积之间的比值。

(12) 接触压力偏度值 (P')。表征胎面与胎体间接触压力分布离散程度的指标。

$$P' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (5)$$

式中, n 为接触面积内总节点数, P_i 为胎面与胎体接触面积内第 i 个节点的接触压力, \bar{P} 为接触面积内所有节点的压力平均值。

3 正交试验方案设计

统计目前市场上205/55R16轮胎的不同花纹,可以发现,其花纹纵沟位置、纵沟宽度和纵沟深度,胎肩区域横沟深度和横沟宽度,以及中间区域横沟花纹角度均有明显差异。

本研究正交试验的4个因子为纵沟宽度 (A')、纵沟深度 (B')、横沟宽度 (C') 和横沟深度 (D') ,如图4所示;其取值范围参照实际轮胎花纹的测量值,如表1所示。

设计四因子三水平正交试验(9个方案)并进行分析,其因子水平设计如表2所示,试验结果如表3所示。

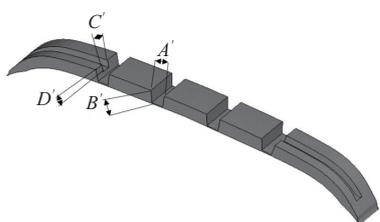


图4 正交试验的4个因子示意

表1 正交试验4个因子的取值范围

因子	因子名称	初始值/mm	取值范围/mm
A'	纵沟宽度	8.00	6.00~10.00
B'	纵沟深度	8.00	6.00~8.00
C'	横沟宽度	5.00	4.25~5.80
D'	横沟深度	4.60	3.00~4.60

表2 正交试验因子水平设计表

因子	水平		
	1	2	3
A'	6.00	8.00	10.00
B'	6.00	7.00	8.00
C'	4.25	5.03	5.80
D'	3.00	3.80	4.60

4 数据分析

4.1 胎面与胎体间接触特性参数选择

为使胎面与胎体间接触特性参数与轮胎滚动阻力之间建立关联关系,必须借助合理的数学方法进行分析研究。本研究利用相关分析法筛选与轮胎滚动阻力相关性较高的评价指标。

表3 正交试验结果

项 目	方案编号								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
滚动阻力/N	48.72	49.71	48.20	49.90	50.30	51.76	51.34	75.65	75.63
最大接触压力/kPa	591.57	608.70	445.78	452.94	454.75	584.68	561.35	415.56	424.50
平均接触压力/kPa	200.83	201.80	188.28	187.35	188.47	201.87	202.70	185.37	185.40
接触压力偏度值/kPa	74.64	74.28	63.01	65.46	64.60	83.04	82.53	74.83	75.42
第二长轴长度/mm	121.42	118.56	120.19	120.68	119.33	123.75	123.20	143.22	144.12
第三长轴长度/mm	147.09	149.40	148.53	146.39	146.44	160.59	160.14	185.50	185.17
第二长轴长度因数	0.780	0.729	0.755	0.778	0.764	0.690	0.688	0.693	0.704
第三长轴长度因数	1.211	1.260	1.236	1.213	1.227	1.298	1.300	1.295	1.285
接触长轴长度/mm	142.32	142.33	142.25	142.26	142.26	158.22	158.27	175.32	175.32
接触短轴长度/mm	179.76	179.59	179.56	179.44	179.46	179.78	179.78	179.77	179.76
接触因数	0.792	0.793	0.792	0.793	0.793	0.880	0.880	0.975	0.975
接触形状因数	0.663	0.610	0.635	0.663	0.648	0.555	0.554	0.512	0.521
接触面积/cm ²	232.03	229.88	231.36	230.74	229.13	242.60	241.67	280.56	281.48

选择9个设计方案所对应的12个接触特性参数为指标量,即 x_1 为最大接触压力(kPa), x_2 为平均接触压力(kPa), x_3 为接触压力偏度值(kPa), x_4 为第二长轴长度(mm), x_5 为第三长轴长度(mm), x_6 为第二长轴长度因数, x_7 为第三长轴长度因数, x_8 为接触长轴长度(mm), x_9 为接触短轴长度(mm), x_{10} 为接触因数, x_{11} 为接触形状因数, x_{12} 为接触面积(cm²)。将轮胎滚动阻力设为目标量,即 y 为轮胎滚动阻力(N),运用SPSS 20.0软件进行双变量相关分析,结果见表4。

由表4可以看出:在12个接触特性参数中,接触压力偏度值与轮胎滚动阻力微弱相关,说明胎面与胎体间接触压力分布均匀性对轮胎滚动阻力的影响较小;接触短轴长度与轮胎滚动阻力低

度相关,且9个设计方案中接触短轴长度相差不大,说明不同花纹胎面与胎体间接触短轴长度不会发生明显变化;最大接触压力、平均接触压力、第二长轴长度因数和接触形状因数与轮胎滚动阻力成负相关关系,即随着参数值的增大轮胎滚动阻力呈现减小趋势,其中接触形状因数与轮胎滚动阻力显著相关,说明轮胎滚动阻力越大,接触印痕形状外凸特征越明显;接触压力偏度值、第二长轴长度、第三长轴长度、第三长轴长度因数、接触长轴长度、接触短轴长度、接触因数和接触面积与轮胎滚动阻力成正相关关系,且第二长轴长度、第三长轴长度、接触长轴长度、接触因数和接触面积与轮胎滚动阻力相关参数均大于0.9,为高度相关,说明轮胎滚动阻力随着胎面与

表4 双变量相关因数分析表

参数	y	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	x ₆	x ₇	x ₈	x ₉	x ₁₀	x ₁₁	x ₁₂
y	1.000	-0.680	-0.670	0.220	0.991	0.961	-0.667	0.667	0.915	0.450	0.916	-0.780	0.985
x ₁	-0.680	1.000	0.970	0.560	-0.540	-0.430	-0.060	0.060	-0.370	0.290	-0.370	0.175	-0.500
x ₂	-0.670	0.970	1.000	0.647	-0.515	-0.370	-0.179	0.180	-0.288	0.379	-0.290	0.078	-0.457
x ₃	0.220	0.560	0.647	1.000	0.274	0.438	-0.767	0.767	0.531	0.857	0.527	-0.656	0.346
x ₄	0.991	-0.540	-0.515	0.274	1.000	0.972	-0.561	0.560	0.937	0.536	0.937	-0.801	0.995
x ₅	0.961	-0.430	-0.370	0.438	0.972	1.000	-0.739	0.738	0.987	0.636	0.988	-0.919	0.991
x ₆	-0.667	-0.060	-0.179	-0.767	-0.561	-0.739	1.000	-1.000	-0.798	-0.710	-0.796	0.945	-0.641
x ₇	0.667	0.060	0.180	0.767	0.560	0.738	-1.000	1.000	0.798	0.711	0.796	-0.945	0.641
x ₈	0.915	-0.370	-0.288	0.531	0.937	0.987	-0.798	0.798	1.000	0.689	1.000	-0.945	0.965
x ₉	0.450	0.290	0.379	0.857	0.536	0.636	-0.710	0.711	0.689	1.000	0.684	-0.721	0.583
x ₁₀	0.916	-0.370	-0.290	0.527	0.937	0.988	-0.796	0.796	1.000	0.684	1.000	-0.945	0.965
x ₁₁	-0.780	0.175	0.078	-0.656	-0.801	-0.919	0.945	-0.945	-0.945	-0.721	-0.945	1.000	-0.857
x ₁₂	0.985	-0.500	-0.457	0.346	0.995	0.991	-0.641	0.641	0.965	0.583	0.965	-0.857	1.000

胎体间接触压力印痕长轴长度和面积的增大而增大,且因接触短轴长度未发生明显变化,接触因数与接触长轴长度变化趋势相同。

将表4中各参数的相关因数绝对值进行排序,可反映接触特性参数与轮胎滚动阻力之间关联的密切程度,如表5所示。

表5 胎面与胎体间接触特性参数与轮胎滚动阻力相关度由大到小排序表

序号	参数	序号	参数
1	x ₄	7	x ₁
2	x ₁₂	8	x ₂
3	x ₅	9	x ₆
4	x ₁₀	10	x ₇
5	x ₈	11	x ₉
6	x ₁₁	12	x ₃

由表5可知,与轮胎滚动阻力相关度最高的接触特性参数为第二长轴长度,相关度最低的接触特性参数为接触压力偏度值。当自由度为7,显著性水平为0.05时,相关因数临界值为0.666,具有高可信度,且当皮尔森相关性因数大于0.5时为显著相关。剔除与目标量相关性弱的特征参数,选择最大接触压力、平均接触压力、第二长轴长度、第三长轴长度、第二长轴长度因数、第三长轴长度因数、接触长轴长度、接触因数、接触形状因数和接触面积为轮胎滚动阻力的评价参数。

4.2 胎面与胎体间接触特性参数与轮胎滚动阻力的关系

利用主成分回归法建立评价胎面与胎体间接

触特性参数与轮胎滚动阻力之间的回归方程。在12个接触特性参数中,接触短轴长度与接触压力偏度值与轮胎滚动阻力之间相关性较弱,因此剔除这两个参数,剩余的10个参数与轮胎滚动阻力之间有较强相关性,可以应用主成分分析法对数据进行降维处理。为保证结果的可靠性,在数据处理前需对数据进行标准化处理,其计算公式为

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\text{Var}(x_j)} \quad (6)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,n; j=1,2,3,\dots,p; \bar{x}_j$ 为参数平均值; $\text{Var}(x_j)$ 为方差。

胎面与胎体间接触特性参数的标准化数据如表6所示。

对10个标准化后的参数进行主成分分析,主成分选择依据为累计贡献度不低于0.9(累计贡献率高于0.9时,认为主成分可以表达原始数据的完整信息)。主成分分析结果见表7和8。

由表7可知:主成分 F_1 贡献率为0.72646; F_2 贡献率为0.23559,累计贡献率为0.96205 $>$ 0.9,故选择主成分 F_1 和 F_2 。主成分 F_1 和 F_2 与标准化后的接触特性参数之间的关系为

$$F_1 = -0.056X_1 - 0.045X_2 + 0.129X_4 + 0.136X_5 - 0.112X_6 + 0.112X_7 + 0.137X_8 + 0.137X_{10} - 0.132X_{11} + 0.133X_{12} \quad (7)$$

$$F_2 = 0.369X_1 + 0.393X_2 - 0.113X_4 + 0.030X_5 - 0.224X_6 + 0.224X_7 + 0.009X_8 + 0.007X_{10} - 0.116X_{11} - 0.078X_{12} \quad (8)$$

由式(7)和(8)可知 F_1 包含了指标量的大部分

表6 胎面与胎体间接触特性参数的标准化数据

Y	X_1	X_2	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_{10}	X_{11}	X_{12}
-0.613	1.092	0.920	-0.458	-0.732	1.262	-1.262	-0.761	-0.771	1.109	-0.578
-0.526	1.306	1.042	-0.740	-0.587	-0.048	0.047	-0.761	-0.761	0.234	-0.679
-0.659	-0.735	-0.670	-0.579	-0.642	0.608	-0.608	-0.766	-0.765	0.649	-0.610
-0.509	-0.645	-0.787	-0.530	-0.775	1.217	-1.215	-0.766	-0.758	1.110	-0.639
-0.474	-0.622	-0.645	-0.663	-0.772	0.838	-0.839	-0.766	-0.759	0.857	-0.715
-0.346	1.005	1.052	-0.228	0.112	-1.059	1.059	0.355	0.349	-0.666	-0.084
-0.383	0.713	1.157	-0.282	0.083	-1.117	1.118	0.358	0.353	-0.679	-0.127
1.756	-1.113	-1.037	1.695	1.667	-0.990	0.989	1.554	1.556	-1.384	1.695
1.754	-1.001	-1.033	1.784	1.647	-0.711	0.711	1.554	1.556	-1.229	1.737

表7 主成分累计贡献率

主成分	特征值	贡献率	累积贡献率
F_1	7.265	0.726 46	0.726 46
F_2	2.356	0.235 59	0.962 05
F_3	0.348	0.034 76	0.996 81
F_4	0.027	0.267×10^{-2}	0.999 48
F_5	0.005	0.051×10^{-2}	0.999 99
F_6	5.152×10^{-5}	0.001×10^{-2}	1.000 00
F_7	6.190×10^{-6}	6.190×10^{-7}	1.000 00
F_8	2.174×10^{-6}	2.174×10^{-7}	1.000 00
F_9	-2.049×10^{-17}	-2.049×10^{-18}	1.000 00
F_{10}	-2.238×10^{-16}	-2.238×10^{-17}	1.000 00

表8 主成分得分

主成分	X_1	X_2	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_{10}	X_{11}	X_{12}
F_1	-0.408	-0.327	0.934	0.990	-0.812	0.812	0.993	0.994	-0.957	0.965
F_2	0.870	0.927	-0.267	-0.070	-0.527	0.527	0.021	0.016	-0.273	-0.184

表9 回归因数及检验参数

模型参数	非标准化因数	标准误差	$t^{(1)}$	Sig ⁽²⁾
常量	-3.647×10^{-16}	0.096	0	1
F_1	0.922	0.102	9.077	0
F_2	-0.297	0.102	-2.919	0.027

注:1) t 为回归因数零检验统计量;2)Sig为回归因数的显著性水平。

将式(7)和(8)代入式(9)得到标准化后的轮胎滚动阻力与接触特性参数的关系,如式(10)所示

$$Y = -0.161X_1 - 0.158X_2 + 0.152X_4 + 0.134X_5 - 0.037X_6 + 0.037X_7 + 0.123X_8 + 0.124X_{10} - 0.087X_{11} + 0.146X_{12} - 3.647 \times 10^{-16} \quad (10)$$

根据 $y = Y\sqrt{D_y} + \bar{y}$ 和 $x = X\sqrt{D_x} + \bar{x}$ (D_y 和 D_x 为参数方差, \bar{y} 和 \bar{x} 为参数均值),还原到原始变量的关系如式(11)所示。

信息,各部分系数均较大。 F_2 主要表达了最大接触压力、平均接触压力所占的比例较为显著。

将标准化目标量 Y 作为因变量,主成分 F_1 和 F_2 作为自变量,进行多元线性回归,结果见表9。

当显著性水平为0.05时, t 查表为2.262。由表9可以看出: F_1 的 t 值绝对值明显高于查表值,显著性很高; F_2 的 t 值绝对值略高于查表值,显著性略差。但是如果去除变量 F_2 ,那么原始自变量的信息完整性必然受到影响,故保留 F_2 ,得到式(9)。

$$Y = 0.922F_1 - 0.297F_2 - 3.647 \times 10^{-16} \quad (9)$$

$$y = -0.023x_1 - 0.228x_2 + 0.171x_4 + 0.095x_5 - 10.759x_6 + 11.193x_7 + 0.096x_8 + 17.878x_{10} - 16.310x_{11} + 0.078x_{12} + 28.906 \quad (11)$$

由式(11)可以看出,最大接触压力、平均接触压力、第二长轴长度因数和接触形状因数与轮胎滚动阻力负相关,其余参数为正相关,与皮尔森得出的相关关系一致。其中,对轮胎滚动阻力影响较大的参数是第二长轴长度因数、第三长轴长度因数、接触因数和接触形状因数;平均接触压力、第二长轴长度、第三长轴长度和接触长轴长度次之;最大接触压力和接触面积对轮胎滚动阻力影响较小。

回归方程拟合误差如表10所示。从表10可以看出,回归方程拟合误差绝对值均在5%以下,拟合精度较高。

表10 回归方程拟合误差

拟合值	试验值	误差/%
47.742	48.72	-2.007 4
48.665	49.71	-2.102 2
49.826	48.20	3.373 4
48.753	49.90	-2.298 6
48.668	50.30	-3.244 5
52.001	51.76	0.465 6
52.209	51.34	1.692 6
75.326	75.65	-0.428 3
75.923	75.63	0.387 4

5 结论

本研究采用有限元技术对比分析了205/55R16轮胎的9个胎面花纹设计方案的滚动阻力性能,得到了不同花纹胎面与胎体间接触特性参数,利用主成分回归法研究了接触特性参数与轮胎滚动阻力性能之间的关系,结论如下。

(1) 胎面与胎体间接触特性参数与轮胎滚动阻力之间有较强的线性关系。同一规格的轮胎,在相同使用条件下,可以得到轮胎滚动阻力与接触特性参数的线性回归方程,用以预测和评价轮胎滚动阻力性能。

(2) 胎面与胎体间接触特性参数中最大接触压力、平均接触压力、第二长轴长度因数 and 接触形状因数与轮胎滚动阻力负相关,其余参数为正相关。其中,对轮胎滚动阻力影响较大的参数是第二长轴长度因数、第三长轴长度因数、接触因数和

接触形状因数;平均接触压力、第二长轴长度、第三长轴长度和接触长轴长度次之;最大接触压力和接触面积较小。

参考文献:

- [1] Aldhufairi Hamad Sarhan, Olatunbosun Oluremi Ayotunde. Developments in Tyre Design for Lower Rolling Resistance: A State of the Art Review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2018, 232(14): 1865-1882.
- [2] 张子鹏. 轮胎滚动阻力性能[J]. 世界汽车, 2015(9): 88-91.
- [3] 李昭, 韩冬礼, 朱华健, 等. 载重子午线轮胎滚动阻力的热力耦合分析及试验验证[J]. 橡胶工业, 2019, 66(10): 730-738.
- [4] 曹冲振, 阚常凯, 陈京邦, 等. 基于均值分析的若干轮胎结构设计变量对轮胎滚动阻力的影响试验研究[J]. 汽车技术, 2016(10): 36-38.
- [5] 梁晨. 子午线轮胎综合接地性能评价体系与方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
- [6] 王国林, 乔磊, 周海超, 等. PCR轮胎接地性态对噪声与轮胎滚动阻力影响研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(16): 123-131.
- [7] 冯琳阁, 朱作勇, 冯希金, 等. 带复杂胎面花纹的子午线轮胎有限元分析[J]. 轮胎工业, 2017, 37(4): 200-204.
- [8] 孙砚田. 轮胎滚动阻力分析及其性能优化方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [9] 仇成群, 王国林. 结构参数对轮胎滚动阻力和辐射噪声的影响研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(12): 97-100.
- [10] 董自龙. 轮胎滚动阻力分析及其性能优化方法研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [11] 伍江涛, 夏松茂. 汽车轮胎滚动阻力及其测试方法[J]. 中国橡胶, 2007, 23(21): 27-33.
- [12] Boere S, Arteaga I L, Kuijpers A, et al. Tyre/Road Interaction Model for the Prediction of Road Texture Influence on Rolling Resistance[J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 65(2): 202-221.

收稿日期: 2020-01-02

Study on Influence of Contact Characteristics between Tread and Carcass on Tire Rolling Resistance

WANG Guolin, CHEN Chen, ZHOU Haichao, LIANG Chen

(Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: By taking 205/55R 16 passenger car radial tire as an example, a three-dimensional finite element model of the tire was established. Different tread patterns were designed for the same carcass, and the linear regression equation between the tire rolling resistance and contact characteristic parameters between the tread and carcass was established by using the principal component regression method. The effect of contact characteristics on the tire rolling resistance was studied. The results showed that the length factor of the second long axle, length factor of the third long axle, contact factor and contact shape factor had significant impact on the tire rolling resistance, the average contact pressure, length of the second long axle, length of the third long axle and length of long contact axle also showed influence but with less significance, and the maximum contact pressure and contact area only had small influence.

Key words: passenger car radial tire; rolling resistance; contact characteristic; tread; carcass; principal component regression method