轿车轮胎花纹参数对滚动阻力的影响分析

王国林1,安登峰2,吴 旭1*,梁 晨1

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 北京橡胶工业研究设计院有限公司, 北京 100143)

摘要:针对205/55R16轿车子午线轮胎,建立三维花纹有限元模型,采用回归分析的方法,研究花纹设计参数与滚动 阻力的关系。选取纵沟深度、纵沟宽度、横沟深度和横沟宽度作为设计参数,采用响应面设计方法进行方案设计。结果 表明,4个设计参数对滚动阻力的影响程度从大到小依次为纵沟宽度、纵沟深度、横沟宽度、横沟深度。利用最小二乘法 拟合花纹设计参数与滚动阻力的关系式,并且通过优化求解得到优化花纹设计参数。花纹设计参数优化后轮胎的滚动 阻力比花纹设计参数优化前降低3.89%。

关键词:轿车轮胎;胎面;花纹设计参数;滚动阻力;有限元模型;响应面设计方法		
中图分类号:TQ336.1;O241.82	文章编号:1000-890X(2019)02-0083-06	
文献标志码:A	DOI:10. 12136/j. issn. 1000-890X. 2019. 02. 0083	

轮胎作为车辆与地面接触的唯一部件,其滚动阻力直接影响汽车燃油消耗率^[1]。研究表明, 轮胎滚动阻力降低15%~30%,可节省燃料消耗 3%~6%^[2],同时还能减少一氧化碳和氮氧化物的 排放^[3]。随着能源危机和环境污染日益严重,通过 优化轮胎结构降低滚动阻力得到更多重视^[4]。

研究表明,胎面能量损耗约占整个轮胎能量 损耗的50%^[4],优化胎面结构对降低滚动阻力有 重要意义。而花纹设计是影响胎面结构的关键因 素,研究花纹设计参数与滚动阻力的关系十分重 要。J. R. Cho等^[5]以一个节距轮胎断面为基础,建 立带有复杂花纹的轮胎3D模型,得出花纹设计影 响轮胎滚动阻力。Y. Tanaka等^[6]提出一种花纹优 化方法,得出纵沟花纹偏向胎肩区域可使接地压 力均匀化。翟辉辉等^[7]运用有限元方法,通过纵沟 间距以及胎面弧度高度的正交方案设计,优选出 最低滚动阻力设计方案。冯琳阁等^[8]应用胎面与 胎体分离式建立轮胎模型,并进行有效性验证。

目前,关于胎面花纹深度和节距等对轮胎噪 声和滑水等性能影响的研究较多,但对花纹设计 参数与滚动阻力关系研究较少。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675240)

*通信联系人(386290287@qq.com)

本工作选取205/55R16轿车子午线轮胎作为 研究对象,通过建立不同三维花纹模型,研究花纹 设计参数对滚动阻力的影响,为花纹结构优化提 供参考依据。

1 模型与方法

1.1 滚动阻力计算原理

滚动阻力是指轮胎滚动单位距离的能量损失^[9],本工作采用文献[5]中的方法计算轮胎的滚动 阻力。

$$R_{\rm R} = E_{\rm I}/2\pi r \tag{1}$$

式中, R_R为滚动阻力, E 为轮胎总的滞后损失, r为轮胎滚动半径。

E₁计算公式为

$$E_1 = \sum Q_i V_i \tag{2}$$

$$Q_i = \sum_{n=1}^m n \vec{\sigma} \vec{\varepsilon} \sin \delta \tag{3}$$

式中,Q;为单位体积轮胎材料在每一个周期中的 能量损失;V;为轮胎材料体积; $\overline{\sigma}$ 和 $\overline{\varepsilon}$ 分别为傅里 叶变化后的应力和应变(轮胎在稳态自由滚动过 程中的等效应力-应变循环是非谐变的,通过傅里 叶变化将其分解成谐波的叠加);m为傅里叶展开 级数,取33;tan δ 为损耗因子,由试验测得。

1.2 3D轮胎花纹模型建立

205/55R16轿车子午线轮胎的整胎模型保留 纵沟花纹和胎肩区域横沟花纹。轮胎2D断面结构

作者简介:王国林(1965—),男,吉林伊通人,江苏大学教授, 博士,主要从事车辆动态性能、载运工具运行安全控制和汽车轮胎 力学研究。

如图1所示,其中冠带层、带束层、胎体层和胎圈为 橡胶-帘线复合材料。



图1 轮胎2D断面结构示意

205/55R16轿车子午线轮胎模型分为两个部分,一部分为胎面花纹,另一部分为胎体结构(包括除胎面外的所有结构)。两部分网格密度可以设定为不相同^[10]。

首先,建立轴对称胎体结构模型,其中橡胶-帘线结构由rebar模型描述^[11]。网格类型:四边 形单元为CGAX4R,三角形单元为CGAX3R,线 性单元为SFMGAX1。帘线定义为线弹性,以弹 性模量表征其性能。橡胶材料具有明显的非线 性特征,需通过试验方法测试其力学性能。参照 GB/T 2941—2006标准^[12],在中国台湾高铁科技股 份有限公司生产的AI-7000型电子拉伸试验机上, 对205/55R16轿车子午线轮胎所用8种胶料进行测 试,采用标准哑铃形试样,为提高测试精度,每种 胶料需制作3个试样进行重复试验。

橡胶材料具有非线性的力学性能,要描述其 性能,需选取合适的本构模型。目前常用的超弹 性材料本构模型有Neo-Hooke模型、Yeoh模型、 Mooney-Rivlin模型及Ogden模型等^[13]。基于试验 数据,利用Abaqus拟合橡胶材料应力-应变的非线 性关系。图2为胎面胶单轴拉伸试验数据与本构 模型拟合数据的对比结果。

由图2可知,Yeoh模型^[14]能够更为准确地描述 橡胶材料的应力-应变关系,具体公式如下:

 $U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$ (4) 式中, U为应变能密度; I_1 为Cauchy-Green变形张 量; C_{ij} 表示材料模型参数, 可通过Abaqus拟合试验 数据获得。橡胶材料设定为不可压缩材料。

其次,建立胎面花纹模型,分为两个步骤:



图2 胎面本构模型拟合曲线

(1)通过Catia形成带花纹的实体;(2)将花纹实体 导入Hypermesh中进行网格划分,单元和节点排序 时应避免与胎体结构重复。

最后,进行胎体结构与花纹结构的贴合,形 成三维的整胎模型。具体贴合过程如图3所示: 将胎体结构旋转一个花纹节距的角度,该角度需 参考花纹结构;使用*Tie命令,将旋转后的胎体与 胎面花纹贴合,形成一个节距的扇形模型;使用 *Symmetric model generation命令,旋转得到整胎 模型(旋转角度基于花纹节距角度调整)。





形成三维整胎模型后,采用文献[15]和[16]的 方法,在Abaqus中进行加载分析,如图4所示。加 载模型中轮辋和转鼓均设定为解析刚体,根据试 验条件,转鼓半径设定为0.8535m,充气压力和载 荷分别为80%标准气压和负荷,边界条件和材料参 数与文献[17]一致。

1.3 有限元模型有效性验证

滚动阻力试验在如图5所示的转鼓实验室中 进行(需具有TÜV SÜD授权许可),试验方法参照 ISO 28580:2018标准^[18],通过测力法测量轮胎滚 动阻力。选取同一规格不同结构的5条轮胎进行 测试和分析,仿真和试验结果如表1所示。

由表1可知,滚动阻力系数仿真值和试验值的





图5 转鼓实验室

表1 轮胎滚动阻力仿真和试验结果

试验轮	式验轮 滚动阻力系数/(N・k№ ⁻¹)		_
胎编号	仿真值	试验值	- 庆左/70
1#	10.9379	10.324 1	5.6
2#	11.038 5	10.521 1	4.7
3#	10.711 3	10.092 3	5.8
4#	10.781 0	10.173 4	5.6
5#	11.0219	10.416 8	5.5

变化趋势具有一致性,且误差控制在6%以内,说明 该模型有效,可以用于分析和计算滚动阻力^[19]。

2 方案设计与计算结果

205/55R16轿车子午线轮胎各结构能量损耗 计算结果表明,胎面能量损耗占据整个轮胎能量 损耗的48.9%,因此优化胎面花纹设计参数对降 低胎面能量损耗具有重要意义。统计目前市场上 205/55R16轿车子午线轮胎的几种不同花纹结构 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。为探究花纹设计参数与 滚动阻力关系,本工作选取花纹纵沟宽度、纵沟深 度、横沟宽度、横沟深度为设计变量,取值范围的 设定参照实际轮胎花纹的测量值,如表2所示。

因为响应面设计方法可以对连续的试验点进 行分析,并给出自变量与因变量之间关系图,同时

表2 设计变量的取值区间			
设计变量	变量名称	初始值/mm	取值范围/mm
А	纵沟宽度	8	6~10
В	纵沟深度	8	6~8
С	横沟宽度	5	4.25~5.80
D	横沟深度	4.6	3.0~4.6

可以减小计算量,提高计算效率,所以本研究选用 被广泛应用到各个领域的响应面设计方法。

对设计变量进行量化处理(数值代码化),使 回归模型中的系数具有可比性。代码值"-1"代 表因子的低水平,"1"代表因子的高水平,"0" 代表中间水平。中心值为高水平与低水平的平 均值。

设计变量代码值及水平如表3所示。方案设 计和计算结果如表4所示。

表3 设计变量代码值及水平

代码值	A/mm	<i>B</i> /mm	C/mm	D/mm
-1	6	6	4.25	3.0
0	8	7	5.03	3.8
1	10	8	5.80	4.6

3 结果讨论

分析设计变量和方案结果,得到各因子的主 效应和交互作用,如图6和7所示。

由图6和7可知,随着纵沟宽度和纵沟深度的 增大,滚动阻力增大,而横沟深度的增大会使滚动 阻力有所下降。从图6可以看出,轮胎滚动阻力随 着横沟宽度变化的过程中,中水平点处的变化趋 势线呈现了弯曲状,所以用含二次项的回归方程 拟合该关系是合理的。从图7可以看出,纵沟深度 和横沟宽度、纵沟深度和横沟深度、横沟宽度和横 沟深度对滚动阻力的影响是相互干扰的,在拟合 方程中,因子的交互作用项不可忽略,而其余因子 之间干扰性不明显,可以忽略。同时也说明在花 纹优化设计时要综合考虑纵沟深度与横沟深度、 纵沟深度与横沟宽度以及横沟深度与宽度之间的 交互影响。

为了更加简明且直观化地表达纵沟深度、横 沟宽度和横沟深度之间的关系,分别绘制了滚动 阻力与纵沟深度、横沟宽度和横沟深度的等值线 图,如图8—10所示。

表4 方案设计及滚动阻力计算结果					
方案		因	子		滚动阻
编号	A	В	С	D	力/N
1	0.000	-1.000	-1.000	0.000	48.7183
2	-1.000	-1.000	0.000	0.000	48.2032
3	0.000	0.000	0.000	0.000	49.8999
4	-1.000	1.000	0.000	0.000	48.9062
5	0.000	0.000	0.000	0.000	49.8999
6	0.000	1.000	1.000	0.000	49.5194
7	0.000	1.000	-1.000	0.000	49.7123
8	0.000	-1.000	1.000	0.000	49.3450
9	1.000	-1.000	0.000	0.000	50.2995
10	1.000	0.000	0.000	1.000	50.4971
11	-1.000	0.000	0.000	1.000	48.4934
12	0.000	-1.000	0.000	1.000	49.0854
13	0.000	0.000	-1.000	1.000	49.2765
14	0.000	1.000	0.000	1.000	49.9867
15	0.000	0.000	0.000	0.000	49.8999
16	0.000	0.000	-1.000	-1.000	49.6233
17	-1.000	0.000	1.000	0.000	48.0566
18	0.000	-1.000	0.000	-1.000	49.7387
19	1.000	1.000	0.000	0.000	50.8220
20	-1.000	0.000	0.000	-1.000	48.7887
21	1.000	0.000	0.000	-1.000	50.5907
22	0.000	0.000	1.000	-1.000	49.3805
23	-1.000	0.000	-1.000	0.000	48.2536
24	0.000	0.000	1.000	1.000	48.5897
25	1.000	0.000	1.000	0.000	49.8770
26	1.000	0.000	-1.000	0.000	50.1040



对比发现,图10等值线更接近圆形,说明横 沟宽度与横沟深度交互作用的显著程度弱于其他 两项。

基于上述计算和分析结果,采用最小二乘法 计算回归系数矩阵,得到滚动阻力与纵沟宽度、纵 沟深度、横沟宽度和横沟深度的代码表达式(包括 因子一次项、二次项和交互项):

 $R_{\rm R} = 4.49 + 0.96A + 0.23B - 0.077C - 0.012D - 0.2BC + 0.35BD - 0.11CD - 0.22A^2 - 0.13B^2 - 0.52C^2 - 0.17D^2$ (5)

代码表达式经过无量纲处理,因此表达式中 系数代表该因素的影响大小,"+"代表正相关, "-"代表负相关。可以得到,一次项中,影响程度 按大小的排序为*A*,*B*,*C*,*D*。*B*与*D*的交互项更为



图7 滚动阻力交互作用图

显著。

27

0.000

1.000

0.000

-1.000

49.2449

为了验证上述关系的精确性,建立预测值与 实际值的误差散点图,见图11。其中预测值通过 将响应面设计方法得到的27个方案代入拟合方程 中计算得到,实际值是通过仿真得到的数据。

由图11可得,实际值与预测值的相关系数为 0.9542,说明该拟合曲线具有较好的拟合优度,可 用于预测和分析纵沟深度和宽度、横沟深度和宽



图10 阀内见复和阀内床及交互作用等值线 度对滚动阻力的影响。

4 优化

将上述拟合得到的响应方程作为优化目标, 在合理范围内,对设计变量(纵沟深度和宽度、 横沟宽度和深度)进行优化,轮胎优化设计模型 如下:

$$\begin{cases} \min(R_{\rm R}) \\ s.t. \ x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max}, i = A, B, C, D \end{cases}$$
(6)

式中,xi为设计变量, ximin和 ximax 分别为约束条件的



上、下限值。

滚动阻力的实际表达式为

 $R_{\rm R} = 8.670 + 1.351A + 1.753B + 11.177C - 0.311D - 0.264BC + 0.436BD - 0.179CD - 0.0545A^2 - 0.132B^2 - 0.870C^2 - 0.262D^2$ (7)

利用得到的响应方程,在各个设计参数取值 范围内进行优化求解,得到最优解为*A*=6.14 mm, *B*=6.27 mm,*C*=5.77 mm,*D*=4.43 mm。

根据上述最优解,重新设计胎面花纹模型,与 相同胎体贴合后进行有限元分析,花纹设计参数 优化前后轮胎滚动阻力计算值对比如表5所示。

表5 花纹设计参数优化前后轮胎的滚动阻力

方 案	滚动阻力/N	滚动阻力变化/%
花纹设计参数优化前	49.9767	—
花纹设计参数优化后	48.0312	-3.89

表5对比结果说明,花纹设计参数优化后轮胎 滚动阻力比花纹设计参数优化前降低了3.89%,优 化达到了降低滚动阻力的目的。

5 结论

选取纵沟宽度、纵沟深度、横沟宽度和横沟深 度作为设计变量,通过响应面设计方法和最小二 乘法拟合出相关方程,该方程拟合度较好,可用于 分析花纹设计参数与滚动阻力关系以及优化花纹 结构。通过拟合方程得到:轮胎纵沟宽度对滚动 阻力的影响最为显著,纵沟深度次之,且均与滚动 阻力呈正相关性,因此优化轮胎滚动阻力的花纹 设计应优先考虑这两项花纹设计参数;而横沟深 度和横沟宽度对滚动阻力的影响不显著,但是横 沟深度与纵沟深度存在明显交互作用,因此在优 化纵沟深度时,需要考虑横沟深度。对比花纹设 计参数优化前后轮胎的滚动阻力结果可知,花纹 设计参数优化后轮胎的滚动阻力比花纹设计参数 优化前降低了3.89%。

参考文献:

- Jerome Barrand, Jason Bokar. Reducing Tire Rolling Resistance to Save Fuel and Lower Emissions[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-mechanical Systems, 2009, 1 (1):9–17.
- [2] Georgios Fontaras, Zissis Samaras. On the Way to 130 g CO₂/ km—Estimating the Future Characteristics of the Average European Passenger Car[J]. Energy Policy, 2010, 38 (4) : 1826–1833.
- [3] Regulation (EC) of European Parliament and of the Council No. 1222/2009, On the Labelling of Tyres with Respect to Fuel Efficiency and Other Essential Parameters[S].
- [4] 杨建,王国林,董自龙. 行驶面宽和行驶面高对子午线轮胎滚动阻力的影响[J]. 机械设计,2016(6):41-46.
- [5] Cho J R, Lee H W, Jeong W B, et al. Numerical Estimation of Rolling Resistance and Temperature Distribution of 3–D Periodic Patterned Tire[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(1): 86–96.
- [6] Tanaka Y, Ohishi K. Unified Approach to Optimization of Tread Pattern Shape and Cross-sectional Contour of Tires[J]. Tire Science and Technology, 2010, 38 (4) : 276–285.
- [7] 翟辉辉,张建,周海超.基于正交试验的轮胎胎冠花纹结构影响滚动阻力的分析[J]. 机械,2017,44(6):48-51.
- [8] 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.

- [9] Schuring D J. A New Look at the Definition of Tire Rolling Loss[J]. Tire Rolling Losses and Fuel Economy—an R and D Planning Workshop, 1977:31–37.
- [10] Cho J R, Kim K W, Yoo W S, et al. Mesh Generation Considering Detailed Tread Blocks for Reliable 3D Tire Analysis[J]. Advances in Engineering Software, 2004, 35 (2):105–113.
- [11] 陈芳. Rebar单元的载重子午胎有限元分析[D]. 镇江:江苏大学, 2007.
- [12] GB/T 2941—2006,橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序[S].
- [13] 张颖文,王国林,周海超,等.使用因素对滚动轮胎振动特性影响 的有限元分析[J].橡胶工业,2018,65(11):1306-1312.
- [14] 燕山,王伟. 橡胶类超弹性本构模型中材料参数的确定[J]. 橡胶 工业,2014,61(8):453-457.
- [15] 万治君.子午线轮胎胎体轮廓设计理论及对轮胎性能影响研 究[D].镇江:江苏大学,2013.
- [16] 许玉文.子午线轮胎刚度特性和滚动阻力仿真分析[D].广州:华 南理工大学,2011.
- [17] 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.
- [18] ISO 28580:2018, Passenger Car, Truck and Bus Tyres—Methods of Measuring Rolling Resistance—Single Point Test and Correlation of Measurement results[S].
- [19] Boere S, Arteaga I L, Kuijpers A, et al. Tyre/Road Interaction Model for the Prediction of Road Texture Influence on Rolling Rresistance[J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 65 (2):202-221.

收稿日期:2018-12-30

Effect of Tread Pattern Parameters on Rolling Resistance of PCR Tire

WANG Guolin¹, AN Dengfeng², WU Xu¹, LIANG Chen¹

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry Co., Ltd, Beijing 100143, China)

Abstract: A 3D pattern FEA model of 205/55R16 PCR tire was established. The regression analysis was used to analyze the relationship between the tread pattern design parameters and rolling resistance. The depth of vertical groove and horizontal groove, and the width of vertical groove and transverse groove were selected as the design parameters, and schemes were designed by response surface analysis method. The results showed that the influence degree of four design parameters on rolling resistance decreased in the order of: vertical groove width, vertical groove depth, horizontal groove width, and horizontal groove depth. The relationship formula between tread pattern design parameters and rolling resistance was fitted by the least squares method, which was used to predict and optimize the tire pattern design parameters. Compared the tire with original pattern design parameters, the rolling resistance of the tire with the optimized pattern design parameters was reduced by 3. 89%.

Key words: PCR tire; tread; pattern design parameters; rolling resistance; FEA model; response surface analysis method