

基于正交试验设计的轮胎湿路面附着性能优化研究

张彬¹, 臧孟炎¹, 周涛², 黎杰³

(1. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广州市华南橡胶轮胎有限公司, 广东 番禺 511486; 3. 华南理工大学 机动车辆技术设备研究所, 广东 广州 510640)

摘要:采用制动过程离散化分析方法, 建立 205/55R16 子午线轮胎湿路面制动的有限元模型。以 80~20 km·h⁻¹ 速度范围内的平均减速度作为评价指标, 结合正交试验与有限元仿真, 通过少量的运算次数, 找出对轮胎湿路面附着性能影响的显著因素, 从而对胎面结构进行优化设计, 提高轮胎的湿路面制动性能。

关键词:子午线轮胎; 制动性能; 正交试验设计; 有限元分析; 湿路面

中图分类号:TQ336.1⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-890X(2014)03-0143-05

作为车辆与地面的唯一接触部件, 轮胎的各项性能对整车性能具有重大影响, 其中轮胎的湿路面附着性能对行车安全的影响更是毋庸置疑。欧盟出台的轮胎标签法规 EC 1222/2009(自 2012 年 11 月 1 日起实施)要求在欧盟销售的轿车和轻型载重轮胎及卡车和公共汽车轮胎必须加贴标签, 标示出轮胎的燃油效率、滚动噪声和湿抓着力等级。随着计算机技术的发展及求解软件的完善, 有限元仿真技术越来越普遍地运用于轮胎设计过程。J. R. Cho 等^[1-2]提出了离散化分析方法, 将轮胎制动过程按速度离散化, 通过显式有限元方法得到各离散速度下制动器摩擦热损失率和轮胎与路面摩擦能量损失率, 基于能量守恒定律得到制动时间和制动距离。臧孟炎等^[3-4]使用上述方法, 研究了轮胎干湿路面轮胎的制动性能, 并与试验结果进行了对比分析, 验证了此方法的有效性。

当汽车行驶在湿滑路面时, 由积水产生的滑水压力减小了轮胎与路面的接触压力, 降低了轮胎的牵引效率, 合理设计轮胎以提高汽车在湿滑路面的制动性能就显得尤为重要。

本工作采用有限元方法对 205/55R16 子午线轮胎制动过程进行仿真分析研究, 用正交试验

设计方法对影响轮胎湿路面附着性能的因素进行分析, 找出敏感因素, 有针对性地通过改变相关因素, 改善轮胎的湿路面附着性能。

1 湿路面制动有限元模型

205/55R16 子午线轮胎花纹的几何模型如图 1 所示, 为左右非对称变节距花纹形式。该款胎面花纹结构复杂, 胎面与胎体共节点网格划分难以实现^[3-4], 因此采用单独网格划分, 然后加以组装, 最后以在胎面和胎体的结合面添加固结(Tie)约束的方式完成。

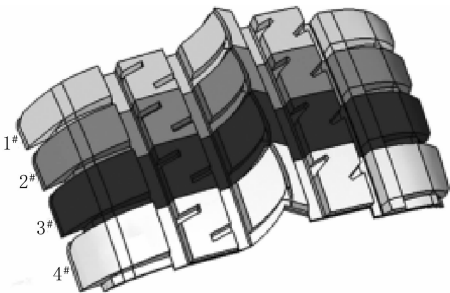


图 1 轮胎花纹几何模型

胎面花纹的有限元网格如图 2 所示, 胎面花纹与胎体结合的有限元模型如图 3 所示。

湿滑路面模型有两种类型, 分别为滚动轮胎模型和水流模型^[5]。本研究考虑轮胎模型的规模和计算效率, 选用水流模型, 如图 4 所示。

各离散速度下轮胎的制动过程仿真分析分充气、自重加载、加速和制动 4 个步骤, 制动距离的

基金项目:广州市科技支撑计划项目(2010J-D00041)
作者简介:张彬(1989—), 男, 安徽芜湖人, 华南理工大学在读硕士研究生, 主要从事汽车整车及零部件安全仿真与分析研究。

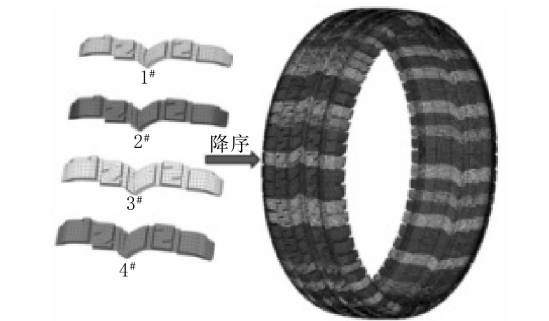


图 2 轮胎花纹有限元网格模型

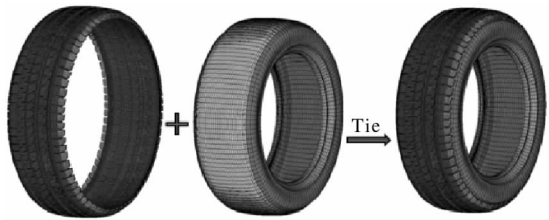


图 3 轮胎有限元模型

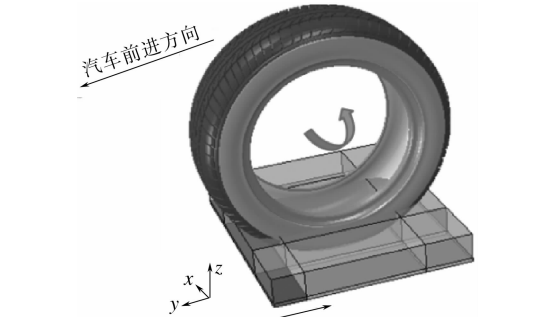


图 4 水流模型

仿真分析方法在相关文献中有详尽说明^[3-4],这里不再赘述。轮胎加载 1/4 车重,仿真相关参数如下:整车质量 1 784 kg,单条轮胎转动惯量 1.117 kg·m⁻²,轮胎半径 316 mm,轮胎数量 4 条,轮胎标准充气压力 230 kPa,路面摩擦因数 0.7,制动软管横截面积 0.002 56 m²,制动钳有效作用半径 0.101 m,制动盘摩擦因数 0.5。水膜厚度设为 1.5 mm,流体几何模型如图 5 所示。

对两种不同胎面花纹(花纹 A 左右反向对称,5 节变节距;花纹 B 左右非对称,4 节变节距)轮胎在上述条件下进行制动仿真分析,仿真结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,制动距离的仿真分析结果与整车试验的误差均在 16.5%左右,且大于试验结果,说明仿真分析方法和仿真模型的

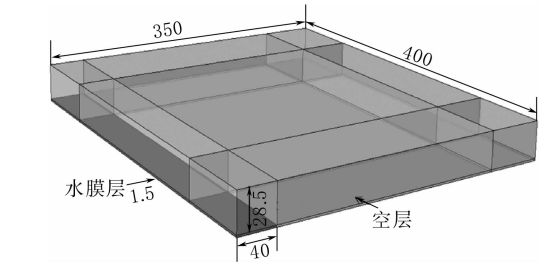


图 5 流体的几何模型

表 1 不同胎面花纹轮胎制动距离的
仿真与试验结果

项 目	花纹 A	花纹 B
仿真数据	36.81	37.15
试验结果	31.51	31.96
误差/%	16.82	16.20

注:速度区间为 80~0 km·h⁻¹。

有效性。仿真制动距离大于试验结果的原因在于仿真模型忽略了制动过程中风的阻力、传动系统摩擦损失和轮胎橡胶滞后损失等的影响。

2 轮胎湿路面制动仿真正交试验设计

2.1 正交试验设计方法

正交试验设计利用正交表科学地安排试验,并进行试验数据分析。正交试验具备均衡分散性和整齐可比性,用部分试验代替全面试验,大大地减少了试验的次数,由正交试验得到的最佳条件往往接近于全面试验的最佳条件。

2.2 轮胎湿路面附着性能评价指标

根据 GB/T 21910—2008《轿车轮胎湿路面相对抓着性能实验方法》,轮胎的湿路面附着性能通过测试轮胎在 0.5~1.5 mm 水膜厚度、80~20 km·h⁻¹之间的平均制动减速度来表征。平均制动减速度与制动距离的关系通过下式计算:

$$a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s} \tag{1}$$

式中,a 为平均制动减速度;v₂ 和 v₁ 分别为制动起始和终止速度,本研究分别取 80 和 20 km·h⁻¹;s 为制动距离。

2.3 设计变量及水平

影响轮胎湿滑性能的因素很多,如汽车行驶速度、水的深度、轮胎的充气压力与负荷、路面粗糙度、胎面花纹沟槽形式和磨损程度等。在车速

一定时,水的深度是影响轮胎湿滑性能的主要因素,但当水深一定时,行驶速度对湿滑性能的影响显著^[6]。这是因为水从轮胎与地面接触区域排挤出来是需要一定时间的,当轮胎在高速行驶时,本来要排挤出来的水却来不及排出,从而降低了轮胎与路面的附着系数。

就轮胎本身而言,胎面花纹对湿地牵引性能的影响至关重要,因为花纹中的沟槽既能给移动的水提供贮存空间,又能给排出的水提供通道。

S. Santosh 等^[7-8]对轮胎滑水现象以及影响轮胎滑水的因素做了较多研究,从花纹的形式、花纹沟槽的深度和宽度等因素着手,得到其对轮胎滑水速度的影响。

本研究以胎面花纹几何形状为考虑因素,选择 4 个主要沟槽的宽度为正交试验设计对象,如图 6 所示。

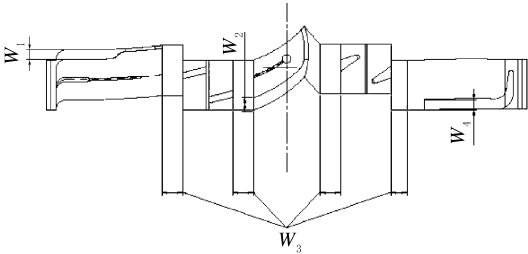


图 6 205/55R16 轮胎花纹节距 1 示意

表 2 所示为试验采用的因子与水平,水平表中的数值 0 表示维持轮胎对应因子的原值,正值表示增大对应因子宽度的数值。对该款花纹其他三节节距对应位置做同样处理。

表 2 因子水平表 mm

水 平	因 子			
	W ₁	W ₂	W ₃	W ₄
1	0	0	0	0
2	1	1.5	2.5	1

3 正交试验结果分析及优化方案

对于轮胎湿路面性能仿真算例,若进行全面试验,总共需要 16(2⁴)次试验,而应用该因子水平表,并考虑交互作用,构建 L₈(2⁷)正交表,只需要进行 8 次试验,对应的轮胎制动性能数值试验结果如表 3 所示。

性能指标中制动距离与平均减速度具有等效性,通过式(1)可以互相转换,本研究以平均减速度作为评价指标。

正交试验的极差分析是通过计算水平平均值与极差来确定因子的最佳水平组合和因子的主次顺序。表 3 中 T_{ij} 为第 i 列因子的第 j 个水平对应的平均减速度总值, $\bar{K}_{ij}$ 为其平均值, R 为平均减速度的极差。

表 3 L₈(2⁷)正交试验及结果

试 验	W ₃	W ₁	W ₃ ×W ₁	W ₄	空列	W ₃ ×W ₂	W ₂	性能指标	
	A	B	C	D	E	F	G	制动距离	平均减速度
1	1	1	1	1	1	1	1	36.935 8	6.267 1
2	1	1	1	2	2	2	2	36.537 5	6.335 4
3	1	2	2	1	1	2	2	36.453 7	6.350 0
4	1	2	2	2	2	1	1	36.650 1	6.316 0
5	2	1	2	1	2	1	2	35.975 8	6.434 4
6	2	1	2	2	1	2	1	36.088 2	6.414 3
7	2	2	1	1	2	2	1	36.032 2	6.424 3
8	2	2	1	2	1	1	2	35.952 8	6.438 5
T _{i1}	25.268 5	25.451 2	25.465 3	25.475 8	25.469 9	25.456 0	25.421 7		
T _{i2}	25.711 5	25.528 8	25.514 7	25.504 2	25.510 1	25.524 0	25.558 3		
$\bar{K}_{i1}$	6.317 1	6.362 8	6.366 3	6.368 9	6.367 5	6.364 0	6.355 4		
$\bar{K}_{i2}$	6.427 9	6.382 2	6.378 7	6.376 1	6.377 5	6.381 0	6.389 6		
R	0.110 8	0.019 4	0.012 4	0.007 1	0.010 0	0.017 0	0.034 2		

从表 3 中 R 值可以看出,各因子极差大小顺序为: $A>G>B>F>C>D$,且最佳水平组合为 $A_2B_2D_2G_2$,即 W_1, W_2, W_3 和 W_4 对应的水平都为第 2 水平,宽度都增大,影响的主次顺序为:

$W_3>W_2>W_1>W_3\times W_2>W_3\times W_1>W_4$ 。
极差分析法由于缺乏误差分析,因此不能给出误差预测,试验条件的改变与试验误差二者所引起的数据波动区分不开,也不能提供考察、判断

各因子的影响是否显著的标准。方差分析法尽管计算较为复杂,但由于可以弥补直观分析方法在这方面的不足,因此在正交试验中得到较为广泛的应用^[9]。试验结果方差分析如表 4 所示。

表 4 试验结果方差分析

方差来源	偏差平方和	自由度	方差估计值	F 值
A	0.024 6	1	0.024 6	112.48
B	0.000 753	1	0.000 753	3.443 1
C ^Δ	0.000 353	1		
D ^Δ	0.000 101	1		
F	0.000 578	1	0.000 578	2.642 9
G	0.002 332	1	0.002 332	10.663
误差 e	0.000 202	1		
误差 e ^Δ	0.000 656	3	0.000 218 7	
总和	0.028 8	7		

注: $F_{0.01}(1,3)=34.12,F_{0.05}(1,3)=10.13$ 。

从表 4 可以看出, F_A 远大于 $F_{0.01}$,因子 A 对试验结果影响高度显著; F_G 略大于 $F_{0.05}$,因子 G 对试验结果影响显著,同理,因子 B 和 F 不显著,因子 C 和 D 对试验结果无影响,各因子影响的主次顺序为: $A>G>B>F>C,D$ 。

综上所述,因子 A,即 W_3 对轮胎的湿路面制动性能影响高度显著,通过比较 $\bar{K}$ 值,其优水平为 A_2 ;因子 G,即 W_2 对轮胎的制动性能影响显著,通过比较 $\bar{K}$ 值,其优水平为 G_2 ,其余因子对轮胎制动性能影响不显著或没有影响,考虑到轮胎的饱和度,取其原值,即水平 1。因子 A 关于轮胎中心面是左右对称的,因子 G 也基本对称,对轮胎的饱和度基本无影响,因此优化结果为: $A_2B_1D_1G_2$,即 W_2 和 W_3 分别增大 1.5 和 2.5 mm, W_1 和 W_4 保持原值不变,对应的制动距离为 35.98 m,未进行优化前制动距离为 36.94 m,制动距离缩短了 0.96 m。

4 结语

将正交试验设计方法与有限元仿真数值试验相结合,对 205/55R16 子午线轮胎的湿路面附着性能进行优化研究。以较少的数值试验次数获得影响目标性能的敏感因素和优化的胎面结构。仿真分析结果表明,优化后的轮胎使整车湿路面制动距离比优化前缩短了近 1 m,达到了优化的目的。

参考文献:

[1] Cho J R,Choi J H,Yoo W S. Estimation of Dry Road Braking Distance Considering Frictional Energy of Patterned Tires [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2006, 42 (14-15):1248-1257.

[2] Cho J R,Lee H W,Yoo W S. A Wet-road Braking Distance Estimate Utilizing the Hydroplaning Analysis of Patterned Tire[J]. Int. J. Number Meth. Eng.,2007,69(7):1423-1445.

[3] 臧孟炎,陆波,陈玉祥. 干燥路面上轮胎制动距离的 FEM 仿真[J]. 汽车工程,2011,33(2):156-161.

[4] 臧孟炎,陈高军. 湿滑路面轮胎制动距离有限元仿真分析[J]. 中国机械工程,2012,23(10):1246-1250.

[5] 赵珍辉. 轮胎滑水显式动力学分析[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.

[6] 庄继德. 现代汽车轮胎技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2001:209-215.

[7] Santosh S,Anupam K,Fwa T F. Analyzing Effect of Tire Groove Patterns on Hydroplaning Speed[J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2010, 8: 2018-2031.

[8] Fwa T F,Santosh S,Anupam K,et al. Effectiveness of Tire-tread Patterns in Reducing the Risk of Hydroplaning[J]. Transportation Research Record,2009(2094):91-102.

[9] 何少华,文竹青,娄涛. 试验设计与数据处理[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2002:62-101.

收稿日期:2013-09-08

Optimization on Wet Grip Performance of Tires by
Orthogonal Experimental Design

ZHANG Bin¹, ZANG Meng-yan¹, ZHOU Tao², LI Jie¹

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. South China Tire and Rubber Co., Ltd., Panyu 511486, China)

Abstract:Based on discretization analysis method of the braking process, the finite element model about the braking process of 205/55R16 radial tire on wet road was established. Taking the average braking deceleration between 80 and 20 km · h⁻¹ as evaluation index, combining orthogonal experi-

mental design and finite element simulation, the significant influencing factors on the wet grip performance of tires were identified through only rather few experiments, and the tread pattern design was optimized to enhance the wet breaking performance of tires.

Key words: radial tire; braking performance; orthogonal experimental design; finite element simulation; wet road

橡胶防老剂新工艺突破技术封锁

中图分类号: TQ330.38+2 文献标志码: D

青岛科技大学开发的橡胶防老剂 4020 生产工艺关键环节已完成中试验证, 突破了国外的技术封锁。与现有技术相比, 新工艺大幅降低了生产成本, 实现了防老剂 4020 生产废水的零排放, 同时简化了工艺流程, 装置投资减少了 1/3。

据青岛科技大学丁军委教授介绍, 防老剂的产品质量对于轮胎使用寿命及安全性起着至关重要的作用。目前我国防老剂 4020 的生产主要存在两大问题: 一是关键中间体 4-氨基二苯胺(RT-培司)的生产技术尚有缺陷, 二是后续的 RT-培司与甲基异丁基酮反应生产防老剂 4020 急需新型催化剂。

RT-培司生产技术虽然近 10 年获得较大提升, 但仍存在着消耗高、能耗大、产生的少量高浓度苯胺废水需经处理才能达标排放等缺点。丁军委教授团队开发的新型 RT-培司生产工艺, 突破了专利封锁, 综合催化剂消耗只有原工艺的 20%, 杂质含量降低 50%, 能耗为原工艺的 40%, RT-培司吨成本降低了 1 500 元。此外, 新工艺还将苯胺废水与生产环节中的产物分离有机结合, 在基本不增加成本的情况下将废水全部回用到补水系统, 真正实现了废水的零排放。

在后续的 RT-培司与甲基异丁基酮反应生产防老剂 4020 过程中, 存在反应条件苛刻、产品质量差、投资大、溶剂分离能耗高和产品中铜含量对轮胎产生铜害等不足。此环节国外普遍采用贵金属催化反应, 反应条件温和, 产品质量好, 无铜害。但因技术含量高且国外进行技术封锁, 致使我国目前没有采用该催化剂技术的大规模生产装置。

针对防老剂 4020 生产技术上存在的难点, 丁军委教授带领课题组经过 3 年努力, 通过对催化剂反应机理和中毒机理的研究, 开发出新型多功

能高选择性加氢催化剂以及与此新型催化剂相适应的新工艺。新工艺可省去原防老剂 4020 后续溶剂分离的酮醇转换工艺, 简化了高压加氢工艺, 大幅降低了装置的能耗, 也使千吨级装置的投资减少了 600 万元。防老剂产品纯度稳定在 99.5% 以上, 结晶点在 47℃ 以上, 产品质量达到世界先进水平。原来外排需处理的含甲基异丁基酮废水经回收溶剂后补充入循环水系统, 此环节也实现了废水零排放。

(摘自《中国化工报》, 2014-01-27)

一种球胆橡胶及其制备方法

中图分类号: TQ333.6 文献标志码: D

由太仓冠联高分子材料有限公司申请的专利(公开号 CN 102850673A, 公开日期 2013-01-02)“一种球胆橡胶及其制备方法”, 涉及的球胆橡胶配方为: 溴化丁基橡胶 45~60, 炭黑 N326 20~30, 滑石粉 5~15, 油料 1~5, 防老剂(4010NA 或 4010 或 4010NA 与 AW 的混合物) 1~2, 硫化剂 1~3。该配方胶料硫化速度快, 能保证粘合性能, 有效提高了球胆的气密性, 延长了球胆的使用寿命。

(本刊编辑部 赵敏)

一种绝缘橡胶及其制备方法

中图分类号: TQ333.4 文献标志码: D

由太仓冠联高分子材料有限公司申请的专利(公开号 102850662A, 公开日期 2013-01-02)“一种绝缘橡胶及其制备方法”, 涉及的绝缘橡胶配方为: 三元乙丙橡胶 25~32, 炭黑 N774 1~2, 白炭黑 20~25, 增粘树脂 1~2, 软化剂 9~11, 微晶蜡 0.02~0.05。该绝缘橡胶具有良好的绝缘性能和耐臭氧老化性能, 使用寿命长, 成本低, 且能够满足环保方面的要求。

(本刊编辑部 赵敏)