

# 全钢子午线轮胎的滚动阻力效应分析

王晓东, 孙佳佳\*, 孙宝余

(三角轮胎股份有限公司, 山东 威海 264202)

**摘要:** 研究轮胎的各项参数对轮胎滚动阻力系数的影响。结果表明: 轮胎的规格、花纹、行驶速度的平方、应力和轮胎胎面胶的损耗因子是影响轮胎滚动阻力系数的显著因子, 其中胎面配方对轮胎滚动阻力系数的影响随轮胎规格的增大而增大。

**关键词:** 全钢子午线轮胎; 滚动阻力系数; 回归分析; 失拟; 效应项; 损耗因子

**中图分类号:** U463.341; O242.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-8171(2021)01-0001-04

**DOI:** 10.12135/j.issn.1006-8171.2021.01.0001



OSID 开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

滚动阻力系数是轮胎性能表征的一个关键参数。随着欧盟标签法的深入推进, 终端客户及主机厂对轮胎滚动阻力的要求愈加严格, 对滚动阻力效应的研究也随着产品的更新换代而不断取得突破<sup>[1-3]</sup>。

为系统研究各效应项对轮胎滚动阻力的影响, 本工作对滚动阻力测试结果的相关参数进行统计分析, 验证轮胎的规格、花纹、应力( $F$ )、测试充气压力、胎面胶损耗因子( $\tan\delta$ )和行驶速度( $v$ )对滚动阻力系数的影响, 以为轮胎产品开发及优化提供预测依据和方向。

## 1 实验

### 1.1 测试设备

本次测试采用的是三角轮胎股份有限公司国家工程实验室的TS II 001型滚动阻力测试机床。

同一条轮胎测试的滚动阻力系数标准偏差( $\sigma_{RRC}$ )为0.09, 规格内稳健 $\sigma_{RRC}$ 为0.12, 规格内 $\sigma_{RRC}$ 为0.18, 设备检测范围为5.5~8.5; 检测的概然误差 $\sigma_{pe}$ (分布中相对于概率分布中点两侧对称区间内分布概率等于50%的点与中点的距离, 即概率分布从25%~75%区间所对应的随机变量区间长度的一半; 对于正态分布,  $\sigma_{pe}$ 与 $\sigma_{RRC}$ 具有固定的转换关系)主要判断在检测范围内误差主

要来自于设备还是来自于测量件。本试验 $\sigma_{pe} = 0.675\sigma_{RRC} \approx 0.06$ , 检测 $\sigma_{RRC}$ 与设备检测范围比例最大值为 $0.06 / (8.5 - 5.5) \times 100\% = 2\%$ 。

说明该设备满足测量条件的要求, 同时可确保测量的变差主要来自于产品而非设备。

### 1.2 测试方法

滚动阻力测试方法采用汽车轮胎滚动阻力检测标准<sup>[4]</sup>, 在不同速度和充气压力下对轮胎进行滚动阻力检测。

## 2 结果与讨论

对5个规格的82个产品进行滚动阻力系数检测, 并分别构建数学模型进行效应检验, 对其影响因素进行拟合分析。

### 2.1 数学回归模型构建

对滚动阻力系数( $R_{RC}$ )和轮胎的规格( $a_i$ )、花纹( $b_j$ )、 $v$ 、 $F$ 和 $\tan\delta$ 进行了回归分析, 所得数学模型如下。

$$R_{RC} = 4.75 + a_i + b_j + 2.2 \times 10^{-3}v + 5.5 \times 10^{-4}(v - 76.83)^2 - 0.0295F + 17.65 \tan\delta \quad (1)$$

式中,  $i$ 与 $j$ 分别取1—5,  $a_1, a_2, a_3, a_4$ 和 $a_5$ 对应的轮胎规格分别为205/75R17.5, 215/75R17.5, 225/70R19.5, 235/75R17.5和245/70R19.5,  $a_1$ — $a_5$ 分别取0.049, 0.062, 0.349, -0.102和-0.355;  $b_1$ — $b_5$ 分别对应5个不同花纹, 取值为-0.287, -0.086, 0.257, 0.332和-0.215。

**作者简介:** 王晓东(1987—), 男, 山东滨州市人, 三角轮胎股份有限公司工程师, 学士, 主要从事轮胎结构设计和工艺管理工作。

\*通信联系人(sunjiajia@triangle.com.cn)

### 2.1.1 显著性分析

各影响因子对滚动阻力系数影响的显著性结果如表1所示。

表1 滚动阻力系数影响因子显著性对比

影响因子	$p$ 值	影响因子	$p$ 值
$\tan\delta$	0.00	$v^2$	0.03
规格	0.00	$F$	0.05
花纹	0.00	$v$	0.58

注: $p$ 值是判定假设检验结果的重要参数,零假设通常是分析项随某个影响因子变化没有发生显著变化,通常认为 $p$ 值 $<0.05$ 的因子为显著影响因子。

从表1可以看出:对轮胎滚动阻力系数影响最大的3个因子分别为 $\tan\delta$ 、轮胎规格和花纹;其次是 $v$ 的二次项和 $F$ ,且其显著性水平较高;由于对 $v$ 采用了二次项回归,也就意味着不能简单删除进入回归模型但概率并不大的 $v$ 一次项。

### 2.1.2 方差分析

该模型的方差分析结果如表2所示。

表2 滚动阻力系数回归模型的方差分析

影响因子	模型	误差	校正总和
自由度	12	69	81
平方和	20.58	2.71	23.28
均方	1.715	0.039	
$F$ 比	43.7		
$p$ 值	$<0.0001$		

注: $F$ 比是方差分析中 $F$ 检验的一个重要指标,通常是在零假设下,统计值服从 $F$ 分布的检验;通常用来分析参数较多的统计模型,以判断其计算公式为模型的均方(差)与残差均方(差)的比值; $F$ 检验主要用于方差齐性检验、方差分析、线性回归方程整体的显著性检验。

从表2可以看出:该模型的无效 $p$ 值远小于统计值阈(0.05),因此该模型可以有效地反应滚动阻力系数的变异。

### 2.1.3 失拟分析

失拟检验是一种判断回归模型是否可以接受的假设检验, $H_0$ 为模型不存在失拟,主要通过残差方差进行分析。残差方差由随机误差和失拟误差两部分组成。失拟检验是失拟误差方差与随机误差方差的比值作为 $F$ 值来进行 $F$ 检验;若 $p$ 值 $<\alpha$ ,则模型无法与数据充分拟合,需要添加项(通常是二次项或更高次项)或对数据进行转换;若 $p$ 值 $>\alpha$ ,则不能断定模型与数据无法进行很好的拟合,接

受 $H_0$ 假设。

为防止出现滚动阻力效应因子的二次甚至更高次的效应项,应对模型进行失拟分析。该模型的失拟结果如表3所示。

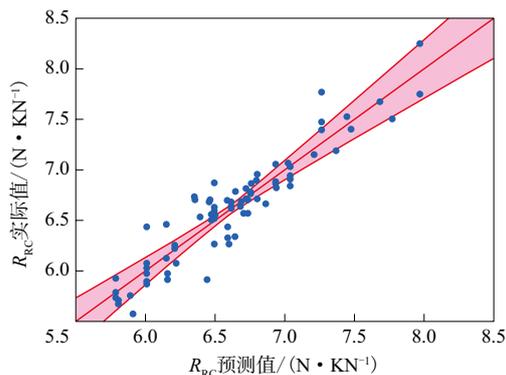
表3 滚动阻力系数回归模型的失拟分析

影响因子	失拟	纯误差	总误差
自由度	47	22	69
平方和	1.98	0.73	2.71
均方	0.042	0.033	
$F$ 比	1.3		
$p$ 值	0.2726		

从表3可以看出,失拟 $p$ 值 $>0.05$ ,则该模型可认为不存在失拟。

### 2.1.4 回归分析汇总

该模型的预测值与实际值的线性关系如图1所示。



阴影部分表示预测95%的置信区间。

图1 滚动阻力系数预测值与实测值的关系

从图1可以看出,通过构建模型得到的滚动阻力系数的预测值与实际值基本呈线性关系,不存在弯曲或者倾斜。经计算,该模型的相关因数( $R^2$ )和调整 $R^2$ 分别为0.884和0.864,说明该模型的变异比例明显高于随机误差,能有效反应滚动阻力系数的变化。

### 2.1.5 残差分析

回归模型的残差具有不可预测性和随机性,进行残差分析以验证回归模型的有效性。其中不可预测性使用残差图检查;随机性采用正态性分析以验证残差的随机性。

#### 2.1.5.1 不可预测性分析

对构建回归模型后的滚动阻力系数残差与预

测值作残差图,如图2所示。

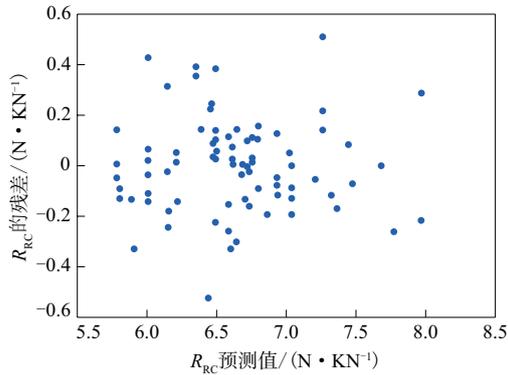


图2 滚动阻力系数回归模型的残差图

从图2可以看出,滚动阻力系数的残差与预测值之间不包含单一趋势或者弯曲信息。

### 2.1.5.2 随机性检验

回归模型的正态性检验是残差分析的数学公式之一,为保证残差的随机性,一般会对残差进行正态检验。经检验,该模型拟合的滚动阻力系数预测值与实际值的残差基本复合正态分布。

采用Shapiro-Wilk方法进行正态分布优度检验,可得 $W$ 值为0.983 469, $p$ 值为0.373 8。残差的正态检验显示滚动阻力系数实测值与模型预测值的残差符合正态分布,可认为拟合模型有效。

因残差不存在可预测性,同时符合正态分布,因此可以认为该回归模型很好地体现各效应项因子对滚动阻力系数的影响。

## 2.2 拟合 $v$ 二次项的探索

滚动阻力系数回归模型中除了常用的一次项拟合外,还增加了 $v$ 的二次项拟合,从而控制模型的失拟风险。

轮胎的滚动阻力系数与 $v$ 不呈现线性关系,当 $v$ 低于 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时滚动阻力系数与其呈负相关,当 $v$ 高于 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时滚动阻力系数与其呈正相关。为保证分析的严谨性,应先对 $v$ 进行线性分析,线性模型合理且存在失拟则证明确实存在 $v$ 的高阶效应项,反之应摒弃其高阶效应项。

### 2.2.1 均值和线性关系的显著性研究

为验证一次效应是否能够表征滚动阻力系数的变化,建立了滚动阻力系数和各效应项的线性回归模型,模型的效应分析和失拟分析分别如表4和5所示。

表4 均值和一次项拟合效应分析

影响因子	$p$ 值	影响因子	$p$ 值
$\tan\delta$	0.000 00	$F$	0.207 37
规格	0.000 00	$v$	0.608 69
花纹	0.000 81		

表5 均值线性模型的失拟分析

影响因子	失拟	纯误差	总误差
自由度	48	22	70
平方和	2.17	0.73	2.90
均方	0.045	0.033	
$F$ 比	1.37		
$p$ 值	0.21		

从表4和5可以看出:线性拟合模型中失拟不显著; $v$ 和 $F$ 的滚动阻力系数效应不显著,需要排除 $v$ 后重新进行回归分析。

### 2.2.2 排除效应不显著项目的回归分析

排除 $v$ 和 $F$ 后对回归模型进行效应分析,可得 $\tan\delta$ 、轮胎规格和花纹的 $p$ 值均为0,说明各影响因子对滚动阻力系数的影响显著。同时对排除 $v$ 和 $F$ 后的回归模型进行失拟分析,结果如表6所示。

表6 去除效应不显著的因素后模型的失拟分析

影响因子	失拟	纯误差	总误差
自由度	19	57	76
平方和	2.33	1.17	3.50
均方	0.122	0.021	
$F$ 比	5.97		
$p$ 值	<0.000 1		

从表6可以看出,排除 $v$ 和 $F$ 后的回归模型出现了明显的失拟。结合表4—6可以看出,回归模型应存在高次项。

### 2.2.3 滚动阻力系数测试的速度依赖性分析

在不同检测速度条件下对同一产品的滚动阻力系数进行回归分析,结果如图3所示。

从图3可以看出,同一产品的滚动阻力系数在一定速度范围内可以很好地采用二次项进行拟合,即滚动阻力系数与速度在一定范围内可以认为是二次相关的<sup>[5]</sup>。

### 2.2.4 滚动阻力系数与速度二次相关性的经验模型

依据ISO 28580:2018,在特定试验工况下,滚动阻力( $F_{RR}$ )的经验模型为<sup>[7]</sup>:

$$F_{RR} = [P^{\alpha} F_z^{\beta}](a + bv + cv^2) \quad (2)$$

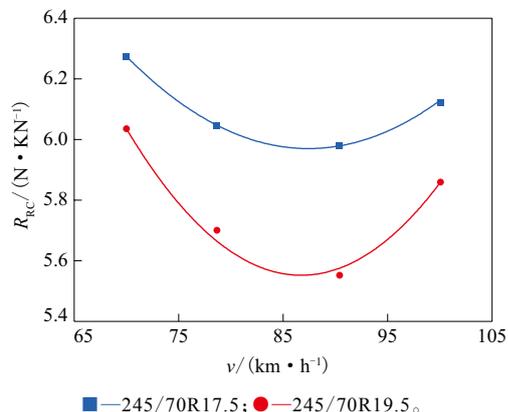


图3 滚动阻力系数与检测速度的相关性

式中,  $P$ 为充气压力,  $F_z$ 为垂直负荷,  $a$ 和 $\beta$ 为幂次系数,  $a$ ,  $b$ 和 $c$ 为滚动阻力系数与速度回归曲线系数。

结合统计分析的结论以及理论实践,在回归分析过程中考虑 $v$ 二次项符合实际情况,也利于降低统计失拟的风险。

### 2.3 胎面配方对滚动阻力效应贡献率分析

通过该回归模型可以评估 $\tan\delta$ 对轮胎滚动阻力的贡献率(即 $17.65\tan\delta/R_{RC}$ )。各规格轮胎的 $\tan\delta$ 对滚动阻力贡献率如表7所示。

表7 各规格轮胎 $\tan\delta$ 对滚动阻力贡献率 %

规格	贡献率	规格	贡献率
205/75R17.5	32	235/75R17.5	39
215/75R17.5	35	245/70R19.5	39
225/70R19.5	33		

从表7可以看出:轮胎大部分滚动阻力效应来

源于胎面配方的滞后损失,且随着轮胎规格的增大, $\tan\delta$ 对滚动阻力贡献率增大;随着轮胎角速度的降低,由密封气体压缩及流动的能量损耗以及轮胎其他部件所导致滚动阻力贡献率越来越小。理论上,充气轮胎滚动阻力的极限应为充气柔性轮胎的滚动阻力。

### 3 结论

采用回归模型分析轮胎规格和花纹对滚动阻力的影响,探索其他设计因素对滚动阻力的影响,而且构建回归模型的相对误差较小;回归模型的预测结果在后续的花纹扩展、产品抽样检测、品质控制和性能优化等方面具有很好的指导意义;同时将结构和配方设计的相关参数继续深入分解,最终体现在各种设计参数对轮胎滚动阻力的影响上;对探讨各种影响因素对滚动阻力的贡献率等方面提供了很好的借鉴。

### 参考文献:

- [1] 郑炳杰,田川超,李辉.滚动阻力系数的计算方法及其在整车道路行驶阻力计算中的应用[J].科技资讯,2018,16(27):68-69.
- [2] 王国林,陈晨,周海超,等.胎面与胎体间接触特性对轮胎滚动阻力影响的研究[J].橡胶工业,2020,67(6):403-409.
- [3] 王涛.轮胎滚动阻力系数影响因素的试验分析[D].青岛:青岛科技大学,2015.
- [4] WHEELER D J. EMP III using imperfect data[M]. Knoxville: SPC Press, 2006.
- [5] 危银涛.轮胎理论与技术[M].北京:清华大学出版社,2013.

收稿日期:2020-11-22

## Analysis of Rolling Resistance Effect of All-steel Radial Tire

WANG Xiaodong, SUN Jiajia, SUN Baoyu

(Triangle Tire Co., Ltd., Weihai 264202, China)

**Abstract:** The influence of various tire parameters on tire rolling resistance coefficient was studied. The results showed that tire size, pattern, driving speed square, stress and loss factor of tire tread compound were significant factors that affect the tire rolling resistance coefficient, and the influence of tread compound formula on tire rolling resistance coefficient increased with the increase of tire size.

**Key words:** all-steel radial tire; rolling resistance coefficient; regression analysis; lack of fit; effect term; loss factor