

DOI: 10.3901/JME.2014.16.186

子午线轮胎接地特性与滚动阻力关系的研究

王国林 董自龙 梁晨 杨建 万治君
(江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 以载重子午线轮胎 385/55R22.5 为研究对象, 结合子午线轮胎的胎体结构设计理论, 采用数值仿真技术对比分析不同胎体结构设计对稳态滚动状态下轮胎滚动阻力的影响以及轮胎各部位能量损失变化, 研究接地特性参数与滚动阻力间的关联关系。结果表明, 轮胎结构参数对滚动阻力有较大影响, 内轮廓对滚动阻力影响尤为显著; 4 层带束层结构滚动阻力性能优于“3+0”结构; 接地面积、印痕面积、平均接地压力、接地压力偏度值、硬度系数、滚动半径等 6 个参数与滚动阻力关联性较高, 呈现较强的线性关系; 接地面积和印痕面积与滚动阻力关系为负相关, 其余参数为正相关; 接地面积、硬度系数对滚动阻力影响较大。应用主成分回归法建立该型号轮胎的滚动阻力值与接地特性参数间的回归方程, 研究结果具有较高的工程应用价值。

关键词: 子午线轮胎; 滚动阻力; 接地压力特性; 主成分回归; 有限元分析

中图分类号: U463

Study on Relationship between Grounding Characteristics and Rolling Resistance of Radial Tire

WANG Guolin DONG Zilong LIANG Chen YANG Jian WAN Zhijun
(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: Take TBR tire 385/55R22.5 as the research object, combining the structure design theories of radial tire. Make comparative analysis of rolling resistance as well as energy loss in various parts of the tires with different structural design by numerical simulation method. Make a study on the relationship between ground-pressure characteristic parameters and the rolling resistance. The results show that, tire structural parameters have significant influences on the rolling resistance, and the inner contour is particularly significant; Rolling resistance performance of the tires with 4-layer belt structure is better than that which has “3+0” belt structure; Ground contact area, imprint areas, average ground pressure, ground pressure skewness values, hardness coefficient, rolling radius are highly associated with rolling resistance, and each one shows a strong linear relationship with rolling resistance; Ground contact areas as well as imprint areas is negatively related with rolling resistance, the others are positively correlated; Ground contact area and hardness coefficient have more significant influences on the rolling resistance than other characteristic parameters. The linear equation of rolling resistance and grounding characteristic parameters is established by principal component regression method, which have a high value in engineering.

Key words: radial tire; rolling resistance; ground-pressure characteristics; principal component regression; finite element analysis

0 前言

能源与环境问题已经成为当今世界关注的两大焦点。汽车尾气是 PM2.5 的重要来源之一; 汽车的二氧化碳排放量约占全世界二氧化碳排放总量的 10%~15%^[1]; 24% 的道路车辆二氧化碳排放量与轮胎滚动阻力相关; 降低轮胎滚动阻力可以有效减少汽车尾气排放, 节省燃料。试验证明, 轮胎滚动阻

力降低 15%~30%, 可相应节省燃料消耗 3%~6%^[2]。为了节约能源和环境保护, 欧盟于 2012 年开始执行轮胎标签法, 对滚动阻力性能提出了具体分类限值和要求。

滚动阻力性能是轮胎的重要使用性能, 对轮胎滚动阻力的研究主要集中在胎面材料配方上^[3-4], 而轮胎结构与滚动阻力存在必然联系^[5-7], 但这方面的研究还很不充分: 文献[5-7]中均分析了轮胎胎面花纹结构对滚动阻力性能的影响规律, 指出花纹结构设计对滚动阻力影响的重要性, 文献[8]的研究

表明,带束层结构、胎面弧型式以及内轮廓结构均对轮胎的滚动阻力性能产生重要影响,可是以上研究局限于轮胎单一结构对滚动阻力性能的影响,忽略了胎体各部位结构的综合作用。因此,本文寻找中间变量评价轮胎的滚动阻力性能。轮胎是汽车与地面接触的唯一部件,其诸多性能均通过路面与轮胎间相互作用实现,接地区橡胶形变是产生迟滞能量损失的直接原因。本文尝试研究轮胎接地特性对滚动阻力的影响,进而对轮胎的滚动阻力性能进行评价和预测。轮胎的接地特性可以用接地特性参数描述,探索接地特性参数与滚动阻力的关系可以在轮胎设计初期根据其接地特性评估其滚动阻力性能。

1 轮胎接地特性描述

轮胎胎体结构不同,在相同的使用条件下,其接地压力特性也不同^[8]。轮胎接地特性直接影响轮胎滚动阻力等使用性能。科学合理地对其进行描述,是研究接地特性与滚动阻力关系的前提。

文献[8]给出了轮胎接地特性参数的详细定义,将轮胎接地特性分为两类:① 轮胎接地几何特性,描述接触区域的形状特征;② 轮胎接触力学特性,描述接触区域的接地力学特征。

描述接地几何特性的参数包括接地面积、印痕面积、接地面积比、接地海陆比、胎面接地长度、胎面接地宽度、接地系数、接地形状系数、接地长轴系数(第二长轴系数,第三长轴系数)、形状对称度;描述接地力学特性的参数包括硬度系数、接地压力偏度值、接地偏心距、平均接地压力。通过采用自编的应用软件 TFAS^[8]对试验结果或有限元分析结果进行处理,可以准确获得描述轮胎接地特性参数的特征和规律。同时,鉴于滚动半径与轮胎滚动阻力性能有密切联系,本文引入轮胎自由滚动半径(自由滚动时轮胎中心点到路面的距离)和滚动下沉量(充气半径与自由滚动半径的差值)作为轮胎接地特性评价参数。共 17 个轮胎接地特性参数。

2 数值仿真试验

2.1 有限元分析模型

有限元分析方法模拟轮胎滚动阻力得到了广泛的应用,仿真精度可以满足工程需要^[9]。本文研

究对象为某公司生产的 385/55R22.5 型载重子午线轮胎,其断面如图 1 所示。

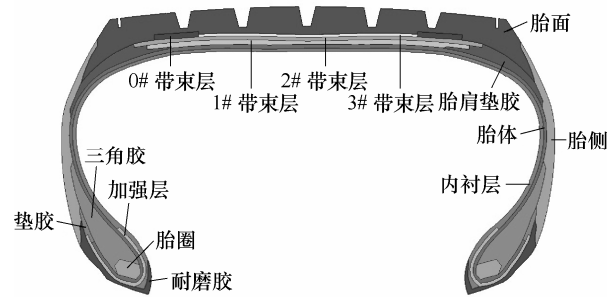


图 1 385/55R22.5 轮胎结构与材料分布

有限元分析时对轮胎橡胶部分采用 CGAX3H 与 CGAX4H 单元来模拟,轮胎帘线部分用 SFMGAX1 单元来模拟。所建立的二维模型如图 2 所示,单元总数为 1 552,节点总数为 1 708。稳态自由滚动状态下滚动阻力分析时路面附着系数取 0.7,滚动速度为 60 km/h。滚动阻力计算采用文献[9]的方法。

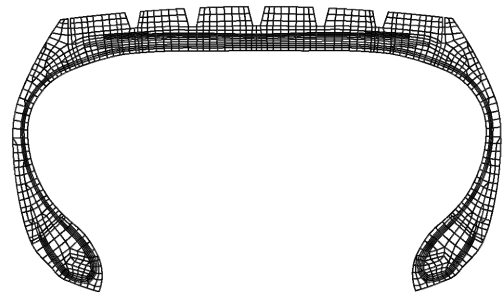


图 2 二维有限元模型

2.2 结构设计方案

子午线轮胎的主要受力部件是带束层,其结构设计主要是指钢丝帘线结构、角度、密度及带束层厚度和宽度等。设计参数决定了轮胎刚度特性,直接影响子午线轮胎的耐磨性能、操纵稳定性、噪声、安全和节油等使用性能^[10]。轮胎轮廓设计是轮胎设计一个非常重要的环节,轮胎性能与其轮廓存在密切联系^[11]。为对比分析轮胎结构对滚动阻力的影响,本文采用的轮胎带束层结构和轮廓设计及载荷条件如表 1 所示。该型号轮胎的标准载荷和气压分别为 42 500 N 和 830 kPa。其中,现行理论设计断面为该型号轮胎设计断面;新非平衡轮廓设计断面为采用文献[12]中的方法设计的断面;胎面弧设计方案用文献[13]中的方法进行设计。本文涉及的内轮廓设计、胎面弧设计和带束层结构见图 3。

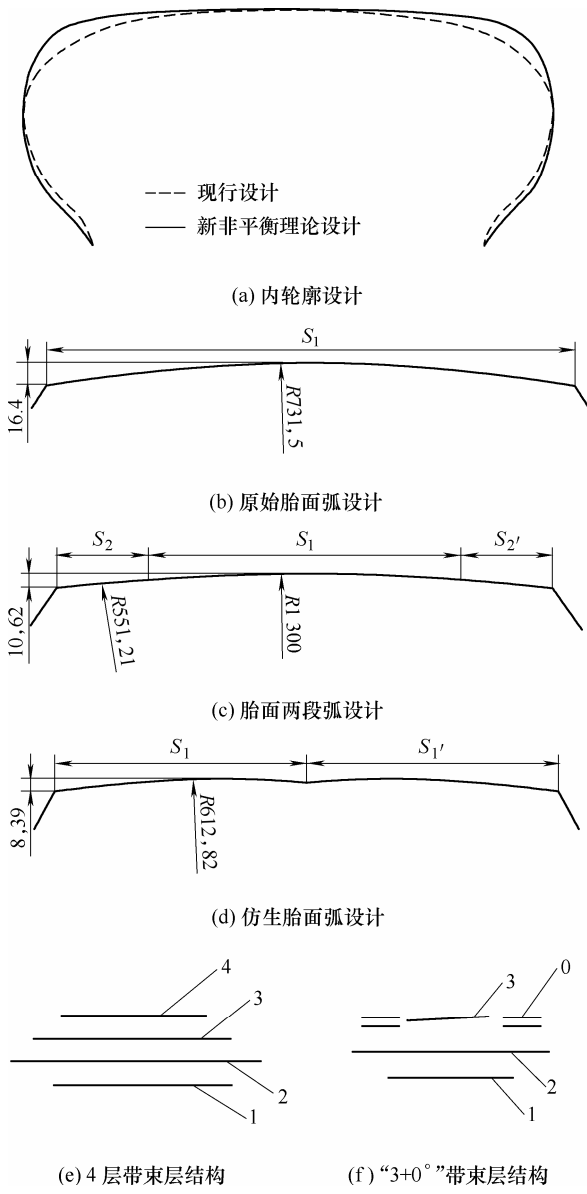


图 3 结构设计形式

表 1 仿真试验结构设计方案

轮胎模型	方案	气压/kPa	载荷/N	备注说明
现行理论 设计断面	1	830	20 000	—
	2	830	42 500	—
	3	600	42 500	—
现行理论 设计断面	4	830	42 500	带束层加宽
	5	830	42 500	带束层角度变大
	6	830	42 500	带束层宽度、角度增加
	7	830	42 500	四层带束层
现行理论 设计断面	8	830	42 500	胎面弧高增加
	9	830	42 500	胎面两段弧设计
	10	830	42 500	仿生胎面弧设计
新非平衡 轮廓设计 断面	11	830	42 500	“3+0°”带束层结构
	12	830	42 500	4层带束层结构
	13	830	42 500	“3+0°”带束层结构、 仿生胎面弧设计
	14	830	42 500	4层带束层、仿生 胎面弧设计

3 数据分析

对表 1 的 14 个设计方案, 利用 ABAQUS 软件分别进行滚动阻力有限元分析, 结果如表 2 所示; 限于篇幅, 14 个方案的部分接地特性参数(本文选择的评价指标参数, 选择方法见下文分析)如表 3 所示。

表 2 不同设计方案的滚动阻力

方案编号	滚动阻力/N	方案编号	滚动阻力/N
1	143.4	8	343.5
2	380.8	9	364.4
3	458.0	10	353.1
4	372.3	11	303.8
5	336.0	12	270.4
6	340.8	13	303.9
7	323.0	14	269.7

表 3 不同结构设计方案所对应的部分接地特性参数和滚动阻力仿真分析结果

方案编号	滚动阻力/N	接地面积/cm ²	印痕面积/cm ²	平均接地压力/kPa	接地压力偏度值/kPa	硬度系数	滚动半径/mm
1	143.4	324	351	596	322	0.74	483.90
2	380.8	534	568	854	567	0.94	467.09
3	458.0	622	679	776	684	1.12	456.69
4	372.3	536	595	834	524	0.94	464.58
5	336.0	547	578	831	550	0.92	467.86
6	340.8	542	583	820	501	0.93	465.30
7	323.0	532	563	868	625	0.94	465.15
8	343.5	546	578	792	458	0.92	461.45
9	364.4	540	571	820	463	0.93	464.97
10	353.1	529	566	841	495	0.95	464.18
11	303.8	569	605	714	345	0.88	462.47
12	270.4	569	614	720	340	0.88	460.09
13	303.8	557	600	715	375	0.90	460.12
14	269.7	570	612	706	364	0.88	460.30

由表 2 可知, 轮胎结构设计参数对滚动阻力均有较大影响, 内轮廓对其影响尤为显著。标准载荷

和标准气压条件下, 方案 14 的滚动阻力最小; 方案 2 的滚动阻力最大。在相同气压下, 滚动阻力随载

荷的增加而增加；在相同载荷下，滚动阻力随着充气压力的减小而增大；对比方案2与7、方案11与12、方案13与14的分析数据，4层带束层结构滚动阻力性能优于“3+0°”带束层结构。

3.1 分析方法

寻找轮胎接地特性参数与滚动阻力性能之间的关系，必须有正确合理的数学方法。相关分析法是研究随机变量之间相关关系的一种统计方法，研究变量之间是否存在某种依存关系，并对具有依存关系的变量探讨其相关方向以及相关程度；主成分分析是以降维为主要目的的分析方法，即用少数几个主成分表达原始多变量的大部分信息，将包含相同信息的变量用一个变量表达，新变量之间相互独立^[14]；主成分回归是以主成分分析为基础的数学分析方法，它可以避免自变量间多重共线性对回归结果的不良影响，得到稳定的回归方程^[15]。

3.2 评价指标参数选择

由于轮胎在低于标准气压以及高于标准载荷的使用条件下，滚动阻力出现较为明显的波动，这

将对回归分析造成不利影响。而且，要探索轮胎接地特性参数与滚动性能之间的关系，载荷和气压不是直接研究对象，因此本文采用方案2、4~14分析结果，探索分析相同使用条件时接地特性参数与滚动阻力性能之间的关系。

对12个结构设计方案所对应的17个接地特性参数指标量，1个目标量(滚动阻力)，采用相关分析法进行双变量相关分析，剔除与目标量相关性弱的指标量，选择相关系数高于0.7(具有明显相关性)的指标量作为滚动阻力的评价指标参数。

当显著水平为0.05(可信度高)时，本文研究数据的相关系数临界值分别为0.576。由表4可以看出，所选择6个接地特性参数，即接地面积 x_1 、印痕面积 x_2 、平均接地压力 x_3 、接地压力偏度值 x_4 、硬度系数 x_5 和滚动半径 x_6 ，均与滚动阻力 y 具有很强的相关性。相关系数绝对值最小为|0.707|，高于0.576，故显著性水平均高于0.05，具有很高的可信度。而且，各参数之间也有较强的相关性。

表4 评价指标参数和滚动阻力间的相关系数

	滚动阻力 y	接地面积 x_1	印痕面积 x_2	平均接地压力 x_3	接地压力偏度值 x_4	硬度系数 x_5	滚动半径 x_6
滚动阻力 y	1	—	—	—	—	—	—
接地面积 x_1	-0.860	1	—	—	—	—	—
印痕面积 x_2	-0.755	0.898	1	—	—	—	—
平均接地压力 x_3	0.824	-0.950	-0.894	1	—	—	—
接地压力偏度值 x_4	0.707	-0.878	-0.840	0.955	1	—	—
硬度系数 x_5	0.875	-0.997	-0.879	0.948	0.870	1	—
滚动半径 x_6	0.741	-0.712	-0.730	0.850	0.837	0.722	1

图4示出了评价指标参数与滚动阻力之间的关系。可见，滚动阻力与所选择的特性参数之间均有较强的线性关系：与接地面积、印痕面积、滚动半径以及硬度系数为负相关关系，即随着参数值的增大滚动阻力值呈现减小的趋势；与接地压力和接地压力偏度值为正相关关系，说明随着接地压力的变大以及接地压力分布不均匀性的增加，滚动阻力值有上升的趋势。

轮胎在滚动过程中各部位的不规则形变是其生成滚动阻力的直接原因，轮胎形变的宏观表现形式主要有弯曲、压缩和剪切三种。在图4示出的接地特性参数中，接地面积、印痕面积、滚动半径和硬度系数都是表达轮胎形变的直接物理量；接地压力偏度值表达了轮胎与路面接触微小形变；平均接地压力是对轮胎受载与接地面积的综合表达。所以，以上参数与轮胎滚动阻力之间存在必然的相关关系。

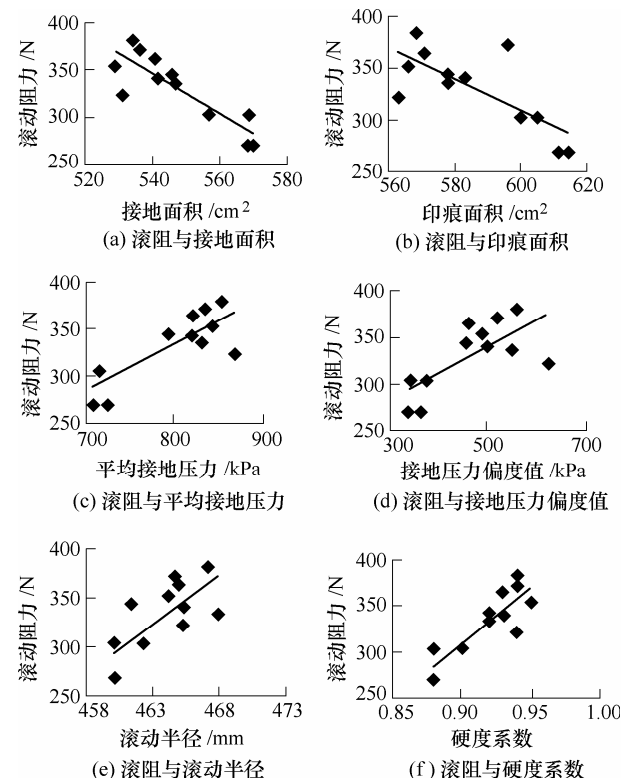


图4 评价指标参数与滚动阻力之间的关系

3.3 接地特性参数与滚动阻力的关系

由表 3 所示,各接地特性参数之间有较强的相关性,线性关系显著,可以应用主成分分析法对数据进行降维处理。由于特性参数具有不同的量纲和数量级,当各参数间的水平相差很大时,如果直接用原始参数值进行分析,就会突出数值较高的参数在综合分析中的作用,相对削弱数值水平较低参数的作用。因此,为了保证结果的可靠性,需要对数据进行标准化处理。对所选择数据采用 z-score 标准化方法进行标准化处理,其计算公式为

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\text{Var}(x_j)} \quad i=1,2,\dots,n \quad j=1,2,\dots,p \quad (1)$$

式中 \bar{x}_j ——指标量平均值;

$\text{Var}(x_j)$ ——方差。

标准化数据如表 5 所示。对 6 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率不低于 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完整信息)。分析结果见表 6~8。

表 7 主成分得分

主成分	主成分得分											
F_1	-2.471	-1.153	-1.442	-0.988	-2.721	0.085	-1.094	-2.007	2.854	3.357	2.276	3.304
F_2	0.410	-0.060	1.310	0.235	-0.139	-0.836	-0.141	-0.903	0.621	0.020	-0.645	0.127

表 8 主成分系数(特征矢量)

主成分系数	接地面积 X_1	印痕面积 X_2	平均接地压力 X_3	接地压力偏度值 X_4	硬度系数 X_5	滚动半径 X_6
R_1	0.418	0.402	-0.429	-0.412	-0.416	-0.370
R_2	0.382	0.222	0.040	0.205	-0.355	0.797

由表 6 所示,主成分 F_1 贡献率为 0.889, F_2 贡献率为 0.065, 累计贡献率为 0.953 9>0.9, 故选择主成分 F_1 、 F_2 。由表 8 所示,主成分 F_1 、 F_2 与指标量(标准化后的接地特性参数)之间的关系可以表示为

$$F_1 = 0.418X_1 + 0.402X_2 - 0.429X_3 - 0.412X_4 - 0.416X_5 - 0.370X_6 \quad (2)$$

$$F_2 = 0.382X_1 + 0.222X_2 + 0.040X_3 + 0.205X_4 - 0.355X_5 + 0.797X_6 \quad (3)$$

可见,主成分 F_1 包含了指标量的大部分信息,各部分的系数均较大。 F_2 主要表达了滚动半径的信息,接地面积、硬度系数所占比例也较为显著。

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

表 9 中 Sig 为回归系数的显著性水平。本研究数据的 t 查表值为 4.025(显著性水平为 0.001)。

表 5 标准化数据

滚动阻力 Y	接地面积 X_1	印痕面积 X_2	平均接地压力 X_3	接地压力偏度值 X_4	硬度系数 X_5	滚动半径 X_6
1.371	-0.900	-0.984	0.995	1.061	0.866	1.283
1.141	-0.767	0.485	0.669	0.604	0.866	0.354
0.159	-0.039	-0.440	0.620	0.880	0.096	1.570
0.289	-0.370	-0.168	0.441	0.359	0.481	0.618
-0.193	-1.032	-1.256	1.223	1.678	0.866	0.563
0.362	-0.105	-0.440	-0.015	-0.098	0.096	-0.807
0.927	-0.502	-0.821	0.441	-0.045	0.481	0.496
0.621	-1.231	-1.093	0.783	0.295	1.251	0.203
-0.712	1.419	1.030	-1.285	-1.300	-1.443	-0.430
-1.616	1.419	1.520	-1.188	-1.354	-1.443	-1.313
-0.712	0.624	0.757	-1.269	-0.981	-0.674	-1.302
-1.635	1.485	1.411	-1.416	-1.098	-1.443	-1.234

表 6 主成分累计贡献率

主成分	特征值	贡献率	累计贡献率
F_1	5.331 0	0.888 5	0.888 5
F_2	0.392 2	0.065 4	0.953 9
F_3	0.153 6	0.025 6	0.979 5
F_4	0.106 0	0.017 7	0.997 1
F_5	0.016 0	0.002 7	0.999 8
F_6	0.001 2	0.000 2	1.000 0

表 9 回归系数及检验参数

模型	非标准化系数	标准误差	回归系数零假设检验统计量	Sig
常量	-3.39×10^{-10}	0.171	0	1
F_1	-0.365	0.077	-4.725	0.001
F_2	-0.097	0.285	-0.342	0.740

由表 9 可以看出, F_1 的 t 值绝对值 $| -4.725 | > 4.025$, 显著性很高; F_2 的 t 值绝对值明显低于查表值, 显著性很差。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(4)

$$Y = -0.365F_1 - 0.097F_2 - 3.39 \times 10^{-10} \quad (4)$$

将式(2)、(3)代入式(4)可得标准化后滚动阻力与接地特性参数的关系, 如式(5)所示

$$Y = -0.189X_1 - 0.168X_2 + 0.153X_3 + 0.131X_4 + 0.186X_5 + 0.058X_6 - 3.39 \times 10^{-10} \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 接地面积、印痕面积是滚动阻力的负向指标, 其余参数为正向指标, 与图 4 所示的相关趋势一致。式(5)为数据标准化后的关系方程, 可以用来分析不同接地特性参数对滚动阻力影响的大小。其中, 对滚动阻力影响较大的参数是接

地面积、硬度系数; 印痕面积、平均接地压力与接地压力偏度值次之; 滚动半径对滚动阻力的影响较小。

滚动阻力产生的主要原因为橡胶材料的黏弹性形变, 接地面积与硬度系数正是与轮胎变形直接相关的物理量。相同的使用条件下, 大的接地面积必有小的平均接地压力; 较大的硬度系数表明轮胎材料承受的负荷较小。以上两点均可以使滚动阻力降低。由此可见, 回归方程符合现实情况。

将式(1)代入式(5), 得到原始数据之间的关系如式(6)所示

$$y = -0.464x_1 - 0.339x_2 + 0.092x_3 + 0.051x_4 + 265.085x_5 + 0.790x_6 + 76.221 \quad (6)$$

回归方程拟合误差如表 10 所示。

表 10 回归方程拟合误差

方案	试验值	拟合值	绝对误差	相对误差(%)
2	380.8	361.558	-19.242	-5.053
4	372.3	345.465	-26.835	-7.208
5	336	344.462	8.462	2.519
6	340.8	342.200	1.400	0.411
7	323	366.894	43.894	13.589
8	343.5	331.583	-11.917	-3.469
9	364.4	344.997	-19.403	-5.325
10	353.1	360.037	6.937	1.965
11	303.8	289.018	-14.782	-4.866
12	270.4	284.383	13.983	5.171
13	303.8	301.346	-2.454	-0.808
14	269.7	284.701	15.001	5.562

由表 10 可知, 除方案 7 误差高于 10%外, 其他拟合误差均在 5%左右, 精度较高。因此在相同使用条件下可以利用式(6)预测具有不同接地特性轮胎滚动阻力性能的差异。

4 结论

本文采用数值仿真技术对比分析了载重子午线轮胎 385/55R22.5 的 14 个不同结构设计方案的滚动阻力性能。利用 TFAS 软件得到了不同方案的接地特性参数, 并研究了滚动阻力与接地特性参数之间的关联关系, 得出以下结论。

(1) 385/55R22.5 轮胎 4 层带束层结构滚动阻力性能优于原始“3+0°”结构, 载重子午线轮胎带束层以及胎面弧结构设计参数与轮胎滚动阻力性能密切相关, 内轮廓设计参数对滚动阻力性能影响显著。

(2) 轮胎接地特性参数中, 接地面积、硬度系数对滚动阻力影响较大; 印痕面积、平均接地压力与接地压力偏度值次之; 滚动半径对其影响较小。

其中接地面积、印痕面积为负向指标, 其余为正向指标。

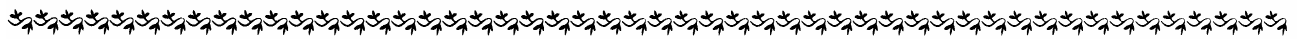
(3) 滚动阻力与评价指标参数有较强的线性关系。同一型号轮胎, 相同使用条件下, 可以得到滚动阻力与接地特性参数的线性回归方程, 用以预测和评价滚动阻力性能。

参 考 文 献

- [1] 曲凌夫. 汽车与环境污染[J]. 生态经济, 2010(7): 146-149.
QU Lingfu. Automobile and environmental pollution[J]. Ecological Economy, 2010(7): 146-149.
- [2] 于清溪. 轮胎滚动阻力特性的探讨[J]. 橡胶技术与装备, 2013(2): 7-18.
YU Qingxi. Discussion of tire rolling resistance[J]. China Rubber/Plastics Technology & Equipment, 2013(2): 7-18.
- [3] THIEL K H, RUEHMER T. Novel functionalized synthetic rubbers for tire applications[J]. KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe, 2013, 66(2): 38-44.
- [4] REVERBERI F. What 2013 and beyond holds for SSBR[J]. Rubber World, 2013, 247(4): 6-8.
- [5] DING J P, JIA D M, YU Q. The relationship between the tire construction and rolling resistance using FEM[J]. Journal of Guangxi University, 2007, 32(4): 398-402.
- [6] WIES B, ROEGER B, MUNDL R. Influence of pattern void on hydroplaning and related target conflicts 4[J]. Tire Science and Technology, 2009, 37(3): 187-206.
- [7] RANDAL C. Rolling resistance basic foundation[R/OL]. [2011-10-14]. <http://wenku.baidu.com/view/168e420c59eef8c75fbfb3fb.html>.
- [8] 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.
LIANG Chen. Research on radial tire comprehensive ground performance evaluation system and method[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013.
- [9] 伍建军. 载重子午线轮胎滚动阻力有限元仿真分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2011.
WU Jianjun. Finite element analysis of radial truck tire rolling resistance[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2011.
- [10] 刘占村, 李明, 刘杰, 等. 带束层结构对轿车子午线轮胎接地印痕, 径向刚度及噪声的影响[J]. 轮胎工业, 2011, 31(9): 534-536.
LIU Zhancun, LI Ming, LIU Jie, et al. Effect of belt structure on footprint, radial stiffness and noise of PCR tire[J]. Tire Industry, 2011, 31(9): 534-536.

- [11] LEE D W, KIM J K, KIM S R, et al. Shape design of a tire contour based on approximation model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(1): 149-155.
- [12] 王国林, 万治君, 梁晨, 等. 基于非平衡轮廓理论的子午线轮胎结构设计[J]. 机械工程学报, 2012, 48(24): 116-122.
WANG Guolin, WAN Zhijun, LIANG Chen, et al. Structural design of radial tire based on non-balanced outline theory[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(24): 116-122.
- [13] 马银伟. 基于接地特性的轮胎结构设计研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
MA Yinwei. Tire crown structure design on tire-ground contact characters[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013.
- [14] 孙慧, 戴磊, 任巍. 基于主成分分析的西部 12 省市对外开放竞争力研究[J]. 新疆社会科学, 2013(1): 20-25.
SUN Hui, DAI Lei, REN Wei. The study of outside opening competitiveness of the cities in 12 western provinces based on principal component analysis[J]. Social Sciences in Xinjiang, 2013(1): 20-25.
- [15] 郭呈全, 陈希镇. 主成分回归的 SPSS 实现[J]. 统计与决策, 2011(5): 157-159.
GUO Chengquan, CHEN Xizhen. Using SPSS to achieve principal component regression[J]. Statistics and Decision, 2011(5): 157-159.

作者简介: 王国林, 男, 1965 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为车辆动态性能、载运工具运行安全控制和汽车轮胎力学。
E-mail: glwang@ujs.edu.cn
董自龙, 男, 1989 年出生。主要研究方向为轮胎滚动阻力性能。
E-mail: dzlstone@163.com



国家自然科学基金委员会机械工程学科 2012/2013 年度优秀结题项目简介

车辆多目标自适应巡航控制系统(ACC)动力学与控制方法研究*

项目负责人: 李克强(E-mail: likq@tsinghua.edu.cn)

依托单位: 清华大学

项目批准号: 50975155

1. 项目简介

代表现代汽车主动安全技术发展趋势的自适应巡航控制系统(ACC), 涉及车辆系统动力学与控制研究领域的国际前沿与难点问题。本项目探索建立一种基于“人-车-路”广义机械动力学系统集成及多目标(安全距离跟踪、燃油消耗经济及驾驶感觉舒适)协调控制的车辆 ACC 新概念系统, 重点研究车辆非线性系统动力学与控制所涉及的基础理论及共性技术: 揭示目标车运动干扰、自车动力学不确定性、驾驶员个体行为特征与跟踪性能、燃油消耗和驾驶员感受之间的内在关系; 建立适用于低速行驶和频繁起停等复杂工况的人车耦合驾驶行为的数学描述方法; 提出一种具有安全距离跟踪、燃油消耗经济和驾驶感觉舒适功能的车辆多目标协调式自适应巡航控制方法。以上研究为国际上 ACC 系统尚未解决的机械系统动力学难点问题及系统功能结构变革, 提供新的理论及技术支持。

2. 主要创新点及其主要研究进展

(1) 提出了基于“人-车-路”广义机械结构的 ACC 跟车系统集成动力学建模方法, 揭示目标车运动干扰和自车非线性动力学特性之间内在联系, 探明驾驶个体行为特征对 ACC 系统特性的影响。

(2) 建立了基于驾驶跟随特性试验的人车耦合动态驾驶行为的非线性描述方法, 阐明车辆非线性动力学特性与驾驶员动态驾驶行为的耦合关系, 为 ACC 系统的多目标控制奠定基础。

(3) 确定车辆安全距离跟踪、燃油消耗经济和驾驶感受舒适三目标的协调机制, 建立基于非线性模型预测控制理论的车辆多目标协调式自适应巡航系统动力学及控制体系结构, 系统具有优化跟踪误差、燃油消耗和驾驶员特性误差的特点, 达到协调控制行驶性能多目标的目的。

* 此项目在“第十一届设计与制造前沿国际会议(ICFDM2014)”上被评为优秀结题项目。