

# 轮胎有效滚动半径与负荷半径特性研究

张保军 李论 吕满意 王伟 冯勇

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

**【摘要】**为分析轮胎有效滚动半径和负荷半径特性,利用均匀设计方法,对不同条件下的有效滚动半径、负荷半径进行了试验研究,结果表明,滚动半径、负荷半径受速度、气压、载荷影响的趋势基本一致,影响程度不同;外倾角、侧偏角对有效滚动半径和负荷半径的影响规律不同;随着胎面磨损的增加,滚动半径和负荷半径均减小。采用偏最小二乘回归方法获得了有效滚动半径和负荷半径的回归方程,验证结果表明,回归方程精度较高。

**关键词:** 轮胎 有效滚动半径 负荷半径 均匀设计 偏最小二乘回归

**中图分类号:** U461.6; U463.341 **文献标志码:** A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230020

## Research on the Properties of Tire Effective Rolling Radius and Loaded Radius

Zhang Baojun, Li Lun, Lü Manyi, Wang Wei, Feng Yong

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

**【Abstract】**In order to analyze the properties of tire effective rolling radius and load radius, the uniform design method was used to test the effective rolling radius and loaded radius under different conditions. The results show that the trend of the rolling radius and load radius affected by speed, air pressure and load is basically the same, but the influence degree is different; the influences of camber angle and side slip angle on effective rolling radius and load radius are different; with the increase of tread wear, rolling radius and load radius decrease. Using the partial least square regression method, the regression equations about effective rolling radius and loaded radius are obtained. It is proved that the regression equations have high accuracy.

**Key words:** Tire, Effective rolling radius, Loaded radius, Uniform design, Partial least-squares regression

**【引用格式】**张保军,李论,吕满意,等.轮胎有效滚动半径与负荷半径特性研究[J].汽车工程师,2023(4):26-32.

ZHANG B J, LI L, LÜ M Y, et al. Research on the Properties of Tire Effective Rolling Radius and Loaded Radius[J]. Automotive Engineer, 2023(4): 26-32.

## 1 前言

轮胎有效滚动半径(简称滚动半径)和负荷半径是轮胎的2个重要基本参数,在轮胎模型研究、轮胎性能试验、整车性能仿真、车辆设计和车辆控制系统开发中有着广泛应用。部分间接式胎压监测系统基于滚动半径进行监测,其原理是轮胎的气压变化影响轮胎滚动半径的大小,进而影响轮速,通过分析轮速信号即可反映滚动半径的变化,完成对轮胎气压的监测<sup>[1]</sup>。

目前对滚动半径和负荷半径的研究一般只考

虑载荷、速度、气压的影响,侧偏角和外倾角的影响考虑较少。MF-Tyre模型中给出了滚动半径的经验公式<sup>[2]</sup>,但试验量要求较大<sup>[3]</sup>。

为完善对滚动半径和负荷半径变化规律的认识,减少试验工作量,本文从试验和回归模型2个方面对滚动半径和负荷半径进行研究,采用均匀试验设计方法设计试验方案,借助偏最小二乘回归方法建立回归模型。

## 2 偏最小二乘回归

当自变量间存在严重多重相关性时,普通最小

二乘法失效,采用此方法计算时会破坏参数估计,扩大模型误差,并使模型丧失稳健性。为解决此问题,有学者提出了偏最小二乘回归方法。偏最小二乘回归能够在自变量存在严重多重相关性的情况下进行回归建模,并允许在样本点数量少于自变量数量的情况下进行回归建模<sup>[4]</sup>。

MATLAB 软件提供了偏最小二乘回归函数 Plsregress,偏最小二乘回归的应用步骤为:

- a. 对数据进行标准化处理。
- b. 使用 MATLAB 函数 Plsregress 进行偏最小二乘回归。
- c. 对回归模型的参数进行检验,检验方法可采用 Bootstrap 法<sup>[4]</sup>。如有未通过检验的自变量,将其删除,重复步骤 b。
- d. 将关于标准化变量的回归模型转化为关于原始变量的回归模型。

### 3 滚动半径和负荷半径特性

影响轮胎半径的因素很多,如轮胎的载荷、气压、速度、外倾角、侧偏角、路面曲率、所用轮辋规格等。本文暂不考虑后 2 种因素的影响,在 MTS Flat-Trac CT III 高速平带试验台上进行试验,使用的轮胎规格为 205/55 R16。

#### 3.1 载荷、气压、速度的影响

通常,研究人员最关心轮胎的载荷、气压、速度对半径的影响,此时不考虑侧向力和纵向力的影响。

为减少试验次数,部分因子设计是常用的方法,其中正交试验设计和均匀试验设计应用最为广泛。

对于大部分试验,特别是探索性试验,试验人员对试验的统计模型往往所知甚少,需要通过试验获得近似模型,需采用均匀试验设计(简称均匀设计)方法进行试验设计。

正交设计假定模型的形式已知,需要通过试验来估计模型中的未知参数,且试验的次数(强烈依赖于未知参数的数量)随因素数量的增加呈指数增长<sup>[5]</sup>。

根据实际情况采用均匀设计表  $U_{25}(5^3)$ <sup>[5]</sup>,试验设计情况如表 1、表 2 所示。

轮胎充气压力采用调压方式,试验过程中充气压力保持不变。

滚动半径测量采用轮胎移动距离与旋转角度计算获得,负荷半径为轮轴中心到接地印迹中心的距离。

利用偏最小二乘回归法,得到滚动半径的回归模型为:

$$r_e = 304.05 - 2.64 \times 10^{-3} \cdot v + 0.0167 \cdot p - 6.54 \times 10^{-4} \cdot F_z + 7.44 \times 10^{-7} \cdot v F_z - 2.31 \times 10^{-6} \cdot p F_z + 7.60 \times 10^{-5} \cdot v^2 + 2.81 \times 10^{-5} \cdot p^2 + 6.86 \times 10^{-8} \cdot F_z^2 \quad (1)$$

同样可得负荷半径回归模型为:

$$r_l = 305.25 + 1.94 \times 10^{-2} \cdot v + 0.0443 \cdot p - 7.34 \times 10^{-3} \cdot F_z - 2.04 \times 10^{-5} \cdot v p + 2.20 \times 10^{-6} \cdot v F_z + 1.26 \times 10^{-5} \cdot p F_z - 6.32 \times 10^{-5} \cdot p^2 \quad (2)$$

式中,  $r_e$ 、 $r_l$  分别为滚动半径和负荷半径;  $v$  为速度;  $p$  为气压;  $F_z$  为载荷。

表 1 三因素水平表

水平	因素		
	载荷/N	气压/kPa	速度/km·h <sup>-1</sup>
1	2 410.8	170	20
2	3 616.2	200	50
3	4 821.6	230	80
4	6 027.0	260	110
5	7 232.4	290	140

表 2 均匀设计表  $U_{25}(5^3)$

试验序号	载荷水平	气压水平	速度水平
1	1	1	4
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	1
5	1	5	5
6	2	1	1
7	2	2	5
8	2	3	4
9	2	4	3
10	2	5	2
11	3	1	2
12	3	2	4
13	3	3	1
14	3	4	5
15	3	5	3
16	4	1	5
17	4	2	3
18	4	3	2
19	4	4	4
20	4	5	1
21	5	1	3
22	5	2	1
23	5	3	5
24	5	4	2
25	5	5	4

图1所示为三因素回归模型的残差统计结果。由图1可知,滚动半径和负荷半径的残差均很小,最大绝对值分别为0.21 mm和0.52 mm,误差平方和分别为0.30 mm<sup>2</sup>和1.72 mm<sup>2</sup>,所得回归模型的精度较高。

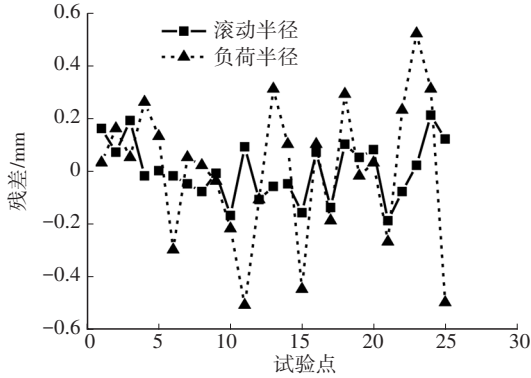


图1 三因素回归模型残差

在MF-Tyre 6.2模型中,没有显式的负荷半径公式,提供了如下滚动半径公式<sup>[2]</sup>:

$$C_{z0} = F_{z0} \cdot R_0^{-1} \cdot \sqrt{q_{Fz1}^2 + 4q_{Fz2}} \quad (3)$$

$$C_z = C_{z0} (1 + p_{Fz1} \cdot dp_i) \quad (4)$$

$$r_e = R_0 - F_{z0} \cdot C_z^{-1} \cdot \left( D_{\text{reff}} \cdot \arctan \left( B_{\text{reff}} \cdot F_z / F_{z0} \right) + F_{\text{reff}} \cdot F_z / F_{z0} \right) \quad (5)$$

式中, $C_{z0}$ 为名义载荷和名义气压下的垂直刚度; $F_{z0}$ 为名义载荷; $R_0$ 为自由半径; $R_0$ 为离心力作用下的自由半径; $C_z$ 为垂直刚度; $dp_i$ 为气压无量纲增量; $q_{Fz1}$ 、 $q_{Fz2}$ 分别为载荷与变形的一阶系数、二阶系数; $p_{Fz1}$ 为垂直刚度的气压影响系数; $D_{\text{reff}}$ 为滚动半径的峰值系数; $B_{\text{reff}}$ 、 $F_{\text{reff}}$ 分别为滚动半径的低刚度系数、高刚度系数。

根据试验数据对MF-Tyre模型进行参数辨识,得到参数为 $p_{Fz1}=0.85$ 、 $q_{Fz1}=10.57$ 、 $q_{Fz2}=9.82$ 、 $D_{\text{reff}}=0.23$ 、 $B_{\text{reff}}=4.67$ 、 $F_{\text{reff}}=0.026$ 。图2所示为MF-Tyre模型的滚动半径残差结果。由图2可知,残差最大绝对值为1.05 mm,误差平方和为5.98 mm<sup>2</sup>,所得模型的精度较回归模型的精度低。

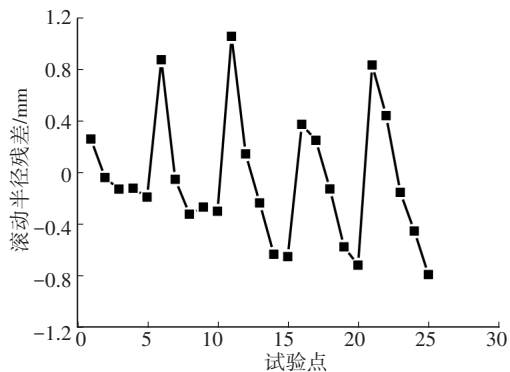
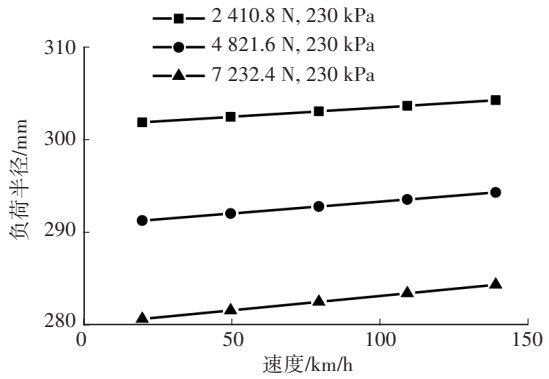
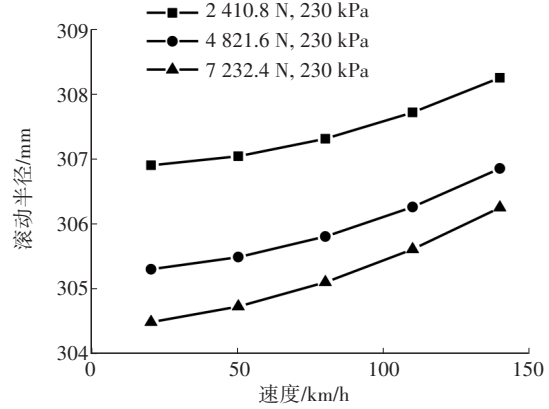
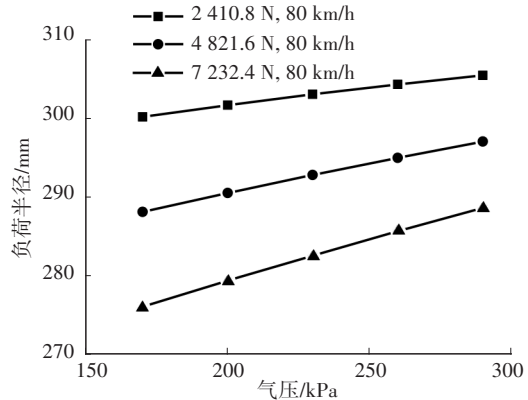
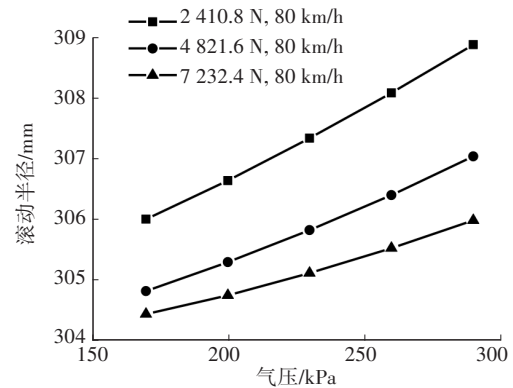


图2 MF-Tyre模型残差

为分析载荷、气压、速度对半径的影响,采用上述回归模型进行模拟,结果如图3所示。



(a)速度的影响



(b)气压的影响

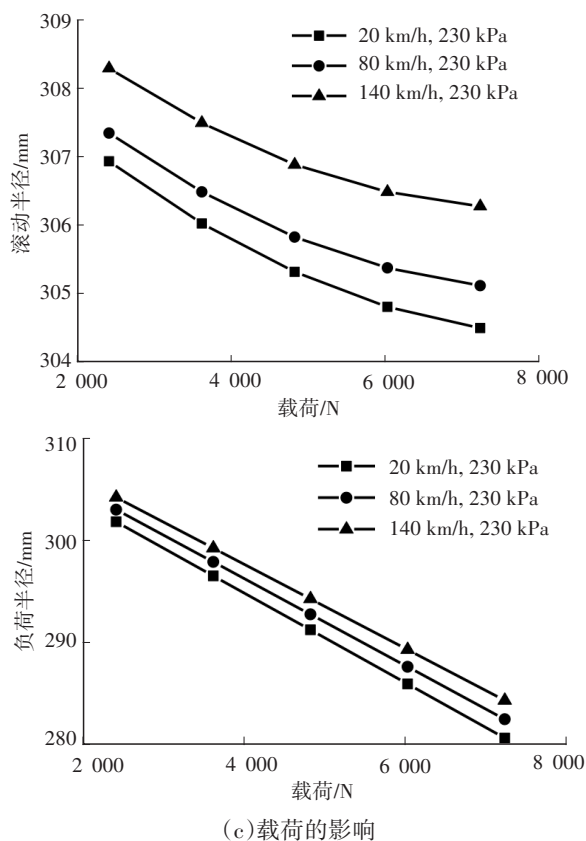


图3 回归模型模拟曲线

由模拟结果可知:滚动半径、负荷半径随速度提高而增大,随气压提高而增大,随载荷增加而减小;滚动半径对速度、气压、载荷不敏感,负荷半径对速度、气压不敏感,对载荷敏感。如:在速度为80 km/h、载荷为4 821.6 N的条件下,气压从170 kPa增加到290 kPa,滚动半径仅增加2.23 mm,负荷半径却增加了8.95 mm;在速度为80 km/h、气压为230 kPa的条件下,载荷从2 410.8 N增加到7 232.4 N,滚动半径仅减小2.23 mm,负荷半径却减小20.54 mm。

由式(2)和图3可知,负荷半径与速度、载荷成线性,与气压近似成线性。

### 3.2 外倾角的影响

为分析外倾角对滚动半径和负荷半径的影响,进行试验研究。试验载荷分别为2 410.8 N、4 821.6 N、7 232.4 N;气压为230 kPa;速度为80 km/h;侧偏角为0°;外倾角分别为-10°、-6°、-4°、-2°、-1°、0°、1°、2°、4°、6°、10°。试验结果如图4所示。

由图4可知:外倾角的存在使得滚动半径减小、负荷半径增大;随着外倾角绝对值的增加,滚动半径逐渐减小、负荷半径逐渐增大,正、负外倾角的影响基本相等;随着载荷的增加,外倾角对滚

动半径和负荷半径的影响变小。本文所得结果与文献[6]所述趋势基本一致,但该文献只给出了单一载荷条件下负荷半径曲线,未给出滚动半径曲线。

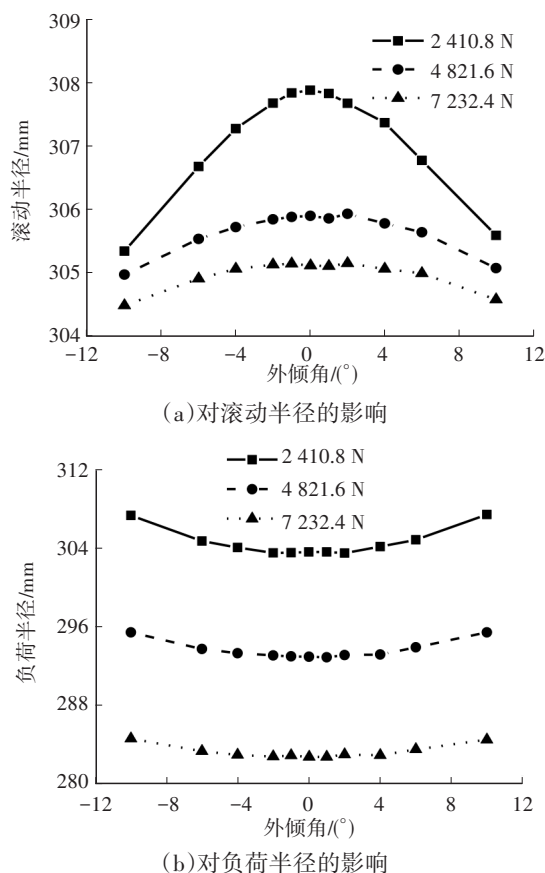
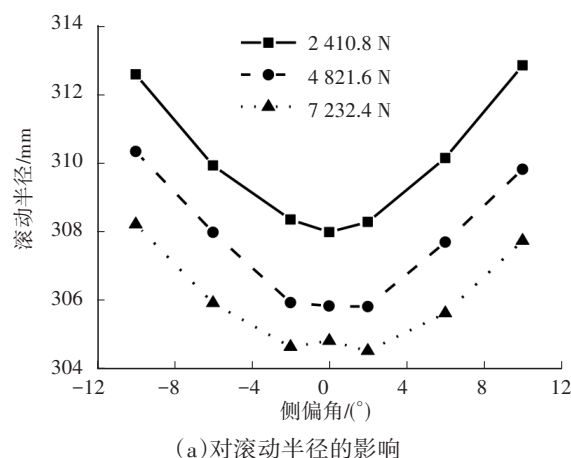


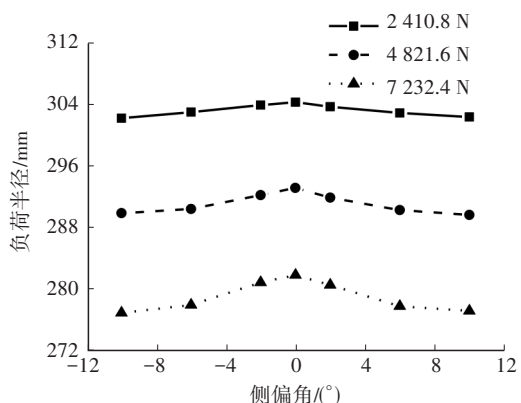
图4 外倾角对滚动半径和负荷半径的影响

### 3.3 侧偏角的影响

为分析侧偏角对滚动半径和负荷半径的影响,进行试验研究。试验载荷分别为2 410.8 N、4 821.6 N、7 232.4 N;气压为230 kPa;速度为80 km/h;侧偏角分别为-10°、-6°、-2°、0°、2°、6°、10°;外倾角为0°。试验结果如图5所示。



(a)对滚动半径的影响



(b)对负荷半径的影响

图5 侧偏角对滚动半径和负荷半径的影响

由图5可知:侧偏角的存在使得滚动半径增大、负荷半径减小;随着侧偏角绝对值的增加,滚动半径增大、负荷半径减小,正、负侧偏角的影响基本相等;随着载荷的增加,侧偏角对负荷半径的影响变大。所得结果与文献[6]所述趋势基本一致,但该文献只给出了滚动半径曲线,未给出负荷半径曲线。

为观察胎面磨损对半径的影响大小,进行如下试验:试验1,测试 $0^\circ$ 侧偏角下的滚动半径和负荷半径;试验2,进行不同载荷、侧偏角不为 $0^\circ$ 的试验;试验3,重复试验1。由试验1、试验3测得半径的减少量,如表3所示。

表3 磨损对半径影响

磨损量/mm	载荷/N	滚动半径减少量/mm	负荷半径减少量/mm
1.12	2 410.8	0.31	1.08
0.77	4 821.6	0.09	1.65
1.15	7 232.4	0.10	1.61

由表3可知:随着胎面磨损的增加,滚动半径和负荷半径均减小,磨损对滚动半径影响小,滚动半径的减小量小于磨损量;磨损对负荷半径影响更大;磨损量不等于半径的减少量。为减少干扰因素,提高试验精度,在进行侧偏角不为 $0^\circ$ 的试验时,要尽量减小轮胎磨损。

### 3.4 四因素综合影响

四因素包括载荷、气压、速度、外倾角,试验中侧偏角为 $0^\circ$ 。为全面分析四因素的影响,选用均匀设计表 $U_{25}(5^4)$ 进行试验设计,试验设计情况如表4、表5所示。

利用偏最小二乘回归法,得到关于滚动半径的回归模型为:

$$r_e = 303.93 + 2.82 \times 10^{-3} \cdot v + 0.0117 \cdot p - 3.92 \times 10^{-4} \cdot F_z + 3.22 \times 10^{-4} \cdot v\gamma - 5.77 \times 10^{-7} \cdot vF_z - 4.80 \times 10^{-5} \cdot p\gamma - 2.12 \times 10^{-6} \cdot pF_z + 9.30 \times 10^{-5} \cdot v^2 + 3.68 \times 10^{-5} \cdot p^2 - 0.0106 \cdot \gamma^2 + 5.14 \times 10^{-8} \cdot F_z^2 \quad (6)$$

同样可得负荷半径回归模型为:

$$r_l = 293.94 + 0.152 \cdot p - 7.34 \times 10^{-3} \cdot F_z + 1.71 \times 10^{-6} \cdot vF_z + 1.23 \times 10^{-5} \cdot pF_z + 1.05 \times 10^{-4} \cdot v^2 - 2.88 \times 10^{-4} \cdot p^2 + 0.0223 \cdot \gamma^2 \quad (7)$$

式中, $\gamma$ 为外倾角。

表4 四因素水平表

水平	因素			
	载荷/N	气压/kPa	速度/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	外倾角/ $^\circ$
1	2 410.8	170	20	-6
2	3 616.2	200	50	-3
3	4 821.6	230	80	0
4	6 027.0	260	110	3
5	7 232.4	290	140	6

表5 均匀设计表 $U_{25}(5^4)$ 

试验序号	载荷水平	气压水平	速度水平	外倾角水平
1	1	1	1	2
2	1	2	4	4
3	1	3	5	1
4	1	4	3	5
5	1	5	2	3
6	2	1	3	4
7	2	2	2	1
8	2	3	1	5
9	2	4	4	3
10	2	5	5	2
11	3	1	4	1
12	3	2	5	5
13	3	3	3	3
14	3	4	2	2
15	3	5	1	4
16	4	1	2	5
17	4	2	1	3
18	4	3	4	2
19	4	4	5	4
20	4	5	3	1
21	5	1	5	3
22	5	2	3	2
23	5	3	2	4
24	5	4	1	1
25	5	5	4	5

图6所示为四因素回归模型的残差。由图6可知,滚动半径和负荷半径的残差均较小,最大绝对值分别为0.47 mm和0.44 mm,误差平方和分别为 $0.62 \text{ mm}^2$ 和 $0.90 \text{ mm}^2$ ,所得回归模型的精度较高。

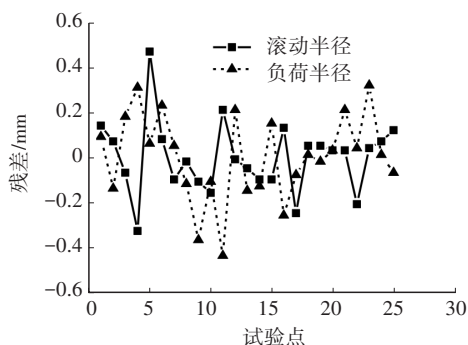
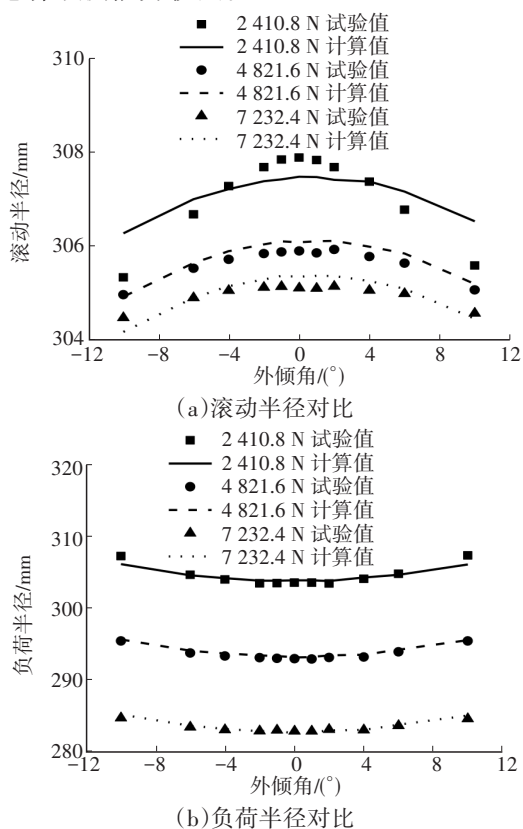


图6 四因素回归模型残差

为验证回归模型的预测能力,利用式(6)、(7),对3.2节中的试验进行仿真,并与试验结果进行对比,如图7所示。由图7c可知:二者差别较小,除了2个点外,残差绝对值均小于0.5 mm;滚动半径和负荷半径残差的最大绝对值分别为0.94 mm和1.25 mm(均发生在载荷为2 410.8 N、外倾角为 $\pm 10^\circ$ 处)。此处残差大的原因包括:外倾角超出试验范围,计算属于外推;小载荷时滚动半径变化剧烈,是建模的难点。所得回归模型在小载荷条件下预测误差稍大,总体预测能力较强。



(a)滚动半径对比

(b)负荷半径对比

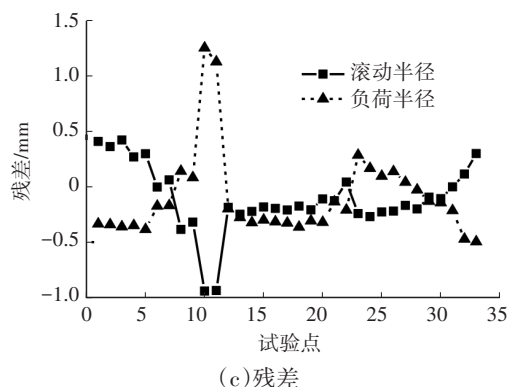


图7 外倾角对滚动半径和负荷半径影响的试验与仿真对比

## 4 结束语

通过以上研究,得出以下结论:

a. 本文采用均匀设计方法设计了试验方案,减少了试验次数;采用偏最小二乘回归方法得到的回归模型精度较高,在不考虑侧向力和纵向力影响的工况下,精度要高于MF-Tyre模型,预测能力较强,较好地描述了各因素与滚动半径(负荷半径)的关系。

b. 滚动半径、负荷半径受速度、气压、载荷影响的趋势基本一致,影响程度不同,负荷半径与速度、载荷成线性相关。

c. 外倾角和侧偏角对滚动半径、负荷半径的影响不同。外倾角的存在使得滚动半径减小、负荷半径增大;侧偏角的存在使得滚动半径增大、负荷半径减小。

d. 随着胎面磨损的增加,滚动半径和负荷半径均减小,磨损对滚动半径影响小,对负荷半径影响更大;磨损量不等于半径的减少量。

## 参考文献

- [1] 彭加耕,王宇岱,韩宗奇,等. 高速工况下间接式胎压监测的影响因素研究与优化[J]. 汽车技术, 2020(9):45-51. Peng J G, Wang Y D, Han Z Q, et al. Research and Optimization on Influencing Factors on Indirect Tire Pressure Monitoring in High Speed Driving Conditions[J]. Automobile Technology, 2020(9):45-51.
- [2] TNO. MF-Tyre/MF-Swift 6.2 Equation Manual[CP/DK]. 2013: 23.
- [3] TNO. Measurement Requirements and TYDEX File Generation for MF-Swift[CP/DK]. 2014: 10-12.
- [4] 王惠文,吴载斌,孟洁. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006. WANG H W, WU Z B, MENG J. Partial Least-Squares Regression—Linear and Nonlinear Methods[M]. Beijing:

- National Defense Industry Press, 2006.
- [5] 方开泰,刘民千,周永道. 试验设计与建模[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- FANG K T, LIU M Q, ZHOU Y D. Design and Modeling of Experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011.
- [6] 詹特,沃特. 轮胎理论与技术[M]. 危银涛,李勇,冯希金,等译. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- GENT A N, WALTER J D. The Pneumatic Tire[M]. WEI Y T, LI Y, FENG X J, et al. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- (责任编辑 斛 畔)
- 修改稿收到日期为2023年1月31日。

## 《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主,并兼有理论研究内容,是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下,把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势,努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域,新能源汽车和互联智能汽车技术领域,大力吸收优质稿源,为广大科研和工程技术人员服务,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求:

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内;
2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处;
4. 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
6. 请勿一稿多投;
7. 本刊使用网站投稿,请先登陆网站注册成功后投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏目的“作者指南”,网址:<http://qcjs.cbpt.cnki.net>。

《汽车技术》编辑部