

# 弯道复合工况下走行轮胎偏磨损数值分析

杜子学,陈 亮,文孝霞

(重庆交通大学 机电与车辆工程学院,重庆 400074)

**摘 要:**针对弯道工况下,跨座式单轨车辆走行轮胎偏磨损严重,造成车辆运营成本增大,并影响单轨车辆行驶安全性的现象,建立了轮轨接触有限元模型,并对比走行轮胎 3 个方向刚度的试验值和仿真值验证了模型的有效性。采用单轨车辆动力学仿真模型来获得弯道复合工况参数,采用数值方法分析了弯道复合工况下走行轮胎相对滑移量、接地压力 2 个接地状态量,并采用摩擦功总和及摩擦功偏度值评价走行轮胎磨损和偏磨损,研究走行轮胎的摩擦功分布规律、摩擦功总和及摩擦功偏度。研究结果表明:走行轮胎相对滑移量较大值出现在前左和前右胎肩部位,且纵向节点相对滑移量平均值沿横向呈两端大、中间小的分布规律;走行轮胎接地压力在纵向呈对称分布,较大值出现在侧倾方向一侧胎肩处,且中心节点接地压力沿横向分布规律为先减小后保持不变,在靠近侧倾一侧时迅速增大;走行轮胎摩擦功分布不规则,较大值出现在侧倾方向一侧,且纵向节点摩擦功总和及沿横向分布呈先减小然后缓慢增大的规律,在靠近侧倾一侧时基本呈指数增长;走行轮胎摩擦功总和及摩擦功偏度值都很大,侧倾是引起走行轮胎偏磨损的主要原因之一,走行轮胎在侧倾一侧的磨损较其他部位大,发生严重偏磨损。研究揭示了走行轮胎过弯时的偏磨损规律,对如何减轻走行轮胎的偏磨损,提高其使用寿命提供了理论依据。

**关键词:**汽车工程;跨座式单轨车辆;数值分析;走行轮胎;摩擦功;偏磨损

**中图分类号:**U463.341

**文献标志码:**A

## Numerical analysis of running tire uneven wear under curved complex condition

DU Zi-xue, CHEN Liang, WEN Xiao-xia

(School of Mechanotronics & Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Under curved complex condition, the uneven wear of straddle-type monorail vehicle running tire is serious. Uneven wear will not only increase operating costs, but also affect the safety of monorail vehicles. For this problem, a finite element model of tire and rail contact was established. Validity of the model was verified by comparing stiffness of experimental values with simulation values of running tire in three directions. Parameters of curved complex conditions were obtained from dynamic simulation model of monorail vehicle. By using numerical method, two ground states named relative slip and ground pressure of tire were analyzed under curved complex condition. Wear and uneven of running tire wear were evaluated by using total friction work and its skewness. Distribution rule of friction work, total friction work and friction work skewness were obtained. The results show that relative slip values of running tire is larger in the

front left and right of tire shoulder, and average relative slip values of longitudinal nodes are larger in both ends and smaller in the middle along transverse direction. Ground pressure of running tire is symmetrically distributed in longitudinal direction. The larger values appear in tire shoulder of rolling side. Ground pressure of center nodes along transverse direction have a distribution rule of decreasing at first, then keeping constant, and increasing rapidly near rolling side. Friction work distribution of running tire is irregular, larger values appear in rolling side, and the total friction work of longitudinal nodes along transverse direction have a distribution rule of decreasing at first, then increasing slowly, and growing exponentially near the rolling side. Total value of friction work and skewness of friction work are very large. The rolling is one of the main reasons caused running tire uneven wear. Wear of running tire in rolling side is larger than that in other parts, and there is a serious uneven wear in rolling side. The uneven wear rule of running tire in a corner provides a theoretical basis for how to reduce uneven wear and improve service life of running tire. 3 tabs, 9 figs, 22 refs.

**Key words:** automobile engineering; straddle-type monorail vehicle; numerical analysis; running tire; friction work; uneven wear

## 0 引言

作为一种新的城市轨道交通方式,跨座式单轨交通具有转弯半径小、爬坡能力强、占地面积少、造价低等优点<sup>[1]</sup>,目前正在被广泛推广使用。跨座式单轨车辆轮系复杂,包括走行轮、导向轮和稳定轮。中国首条跨座式单轨交通线路——重庆跨座式单轨车辆运营实践发现,走行轮胎偏磨损现象较严重。走行轮胎更换频繁,不仅造成大量人力物力的消耗,还影响了单轨车辆运行的安全性。

对于汽车轮胎磨损、偏磨损,国内外学者已进行了深入的研究。庄继德等详细阐述了轮胎磨损机理<sup>[2-3]</sup>;Walters 等从轮胎本身、车轮定位角、悬架定位参数等方面对轮胎磨损进行了研究<sup>[4-6]</sup>;Li 等采用有限单元法、轮胎磨损能量算法、单位磨损里程表示法来计算轮胎数值磨损量<sup>[7-9]</sup>;李钊等从理论、试验等方面研究了轮胎接触摩擦行为<sup>[10-11]</sup>。跨座式单轨车辆转向架结构与汽车底盘结构存在本质上的不同,因此走行轮胎偏磨损影响因素及偏磨损机理均与汽车轮胎偏磨损存在较大差异,而目前针对单轨车辆走行轮胎偏磨损的研究较少。贺观研究了走行轮胎偏磨损现象,对偏磨损进行了一定的经验分析,并提出了改良措施<sup>[12]</sup>;Du 等从单轨车辆动力学角度对走行轮胎偏磨损进行了研究<sup>[13-14]</sup>。然而,国内外从有限元的角度分析单轨车辆走行轮胎偏磨损的相关文献较少。

跨座式单轨车辆行驶轨道分为直道和弯道。单轨车辆行驶在直道上时,走行轮胎处于自由滚动、驱

动、制动中的某单一工况,因此其基本不存在偏磨损。单轨车辆行驶在弯道上时,走行轮胎处于纵滑、侧偏、侧倾综合作用下的复合工况<sup>[15]</sup>,在此情况下,走行轮胎偏磨损较大。本文采用数值方法分析单轨车辆行驶在弯道上时走行轮胎的接地压力和相对滑移量,并用摩擦功及摩擦功偏度值表征走行轮胎的磨损和偏磨损,对走行轮胎偏磨损进行了较为深入的研究。

## 1 单轨车辆走行轮胎有限元模型

### 1.1 模型的建立

走行轮胎几何参数及各部分橡胶密度参数由轮胎制造公司提供。有限元模型中,钢丝帘布采用 re-bar 加强筋单元模拟,橡胶材料的力学性能采用 Mooney-Rivlin 本构模型描述,表达式为

$$U = C_{10} (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} (\bar{I}_2 - 3) \quad (1)$$

式中: $U$  为应变能; $C_{10}$ 、 $C_{01}$  为材料剪切特性参数; $\bar{I}_1$ 、 $\bar{I}_2$  为材料扭曲度量。

跨座式单轨交通轨道梁采用预应力混凝土,由专用模板制成。在轮轨接触过程中轨道梁变形很小,不影响走行轮胎的相关分析,为提高计算效率,本文采用刚性面模拟轨道梁。

将三维走行轮胎模型与轨道梁模型结合起来,得到轮轨接触有限元模型,如下页图 1 所示。

### 1.2 模型验证

走行轮胎受载后的变形程度直接影响轮轨接触状态和胎面磨损情况。因此,走行轮胎刚度是衡量轮轨有限元模型准确性的重要指标。对走行轮胎进

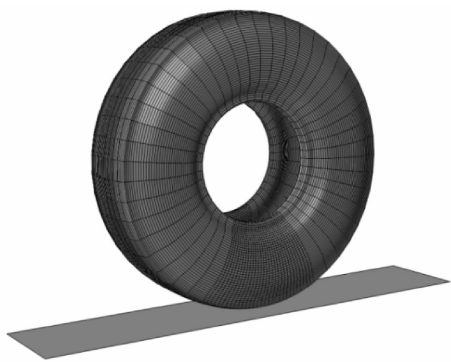


图 1 轮轨接触有限元模型

Fig. 1 Finite element model of tire and rail contact

行刚度试验,如图 2 所示,得到走行轮胎刚度试验数据。有限元仿真和试验获得的 3 个方向的力与位移结果如图 3 所示。图 3 中,曲线斜率即为走行轮胎刚度值,对数据进行线性拟合,得到仿真和试验刚度值如表 1 所示。



图 2 走行轮胎刚度试验

Fig. 2 Stiffness test of running tire

由表 1 可得出,走行轮胎刚度计算结果与试验数据的相对误差在允许范围内,因此本文轮轨有限元模型是有效的。

1.3 工况参数

单轨车辆运行时,走行轮胎的额定胎压为 0.95 MPa。胎压在温度、湿度等环境因素的影响下波动很小,对轮胎偏磨损的影响基本可忽略不计,因此本文充气胎压取额定胎压,并保持胎压不变。

走行轮胎弯道复合工况分析的相关参数可由单轨车辆动力学仿真模型获得<sup>[16-17]</sup>。本文分析的弯道工况有 3 种,弯道半径  $R$  分别为 100、150、200 m,对应运行速度分别为 36、45、50 km/h。走行轮胎的工况参数如表 2 所示。

2 仿真结果及分析

2.1 接地状态分析

轮胎磨损是多种条件共同作用的结果,包括路

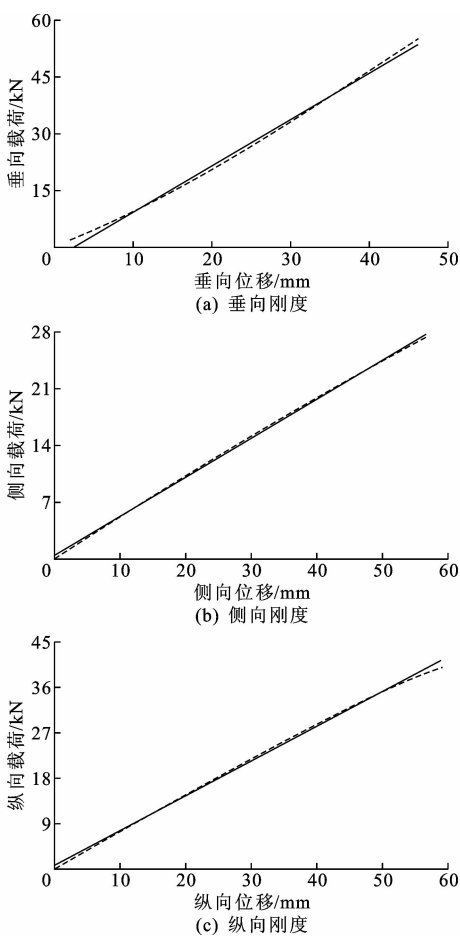


图 3 走行轮胎刚度拟合结果

Fig. 3 Fitting results of running tire stiffness

表 1 试验结果与仿真结果对比

Tab. 1 Comparisons between experimental results and simulation results

参数	纵向刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	侧向刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	垂向刚度/ ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ )
计算结果	701.90	496.40	1221.30
试验数据	719.80	514.60	1280.50
相对误差/%	2.49	3.54	4.62

表 2 走行轮胎工况参数

Tab. 2 Parameters of working condition of running tire

参数	半径/m	垂向力/N	滑移率	侧偏角/(°)	侧倾角/(°)
参数 值	100	63 382	-0.024 0	0.446 9	3.108 1
	150	64 935	-0.026 3	0.375 5	3.459 9
	200	63 765	-0.024 1	0.287 6	3.183 9

面条件(如路面温度、微观纹理以及路面是否湿润)、轮胎滑移和载荷、轮胎结构和胎面用胶等<sup>[18-19]</sup>。轨道梁和走行轮胎结构在完成设计和制造后一般较难变动,因此本文首先从走行轮胎滑移和接地压力 2 个方面来分析走行轮胎的磨损。

3 种弯道上走行轮胎弯道复合工况下的相对滑

移量如图 4 所示。接地压力如图 5 所示。其中,前进方向向下,侧偏方向向左,侧倾方向向右。沿走行轮胎轴线方向接地区域各列节点相对滑移量平均值(去除沟槽处节点)分布如图 6 所示,中心节点压力分布如图 7 所示。

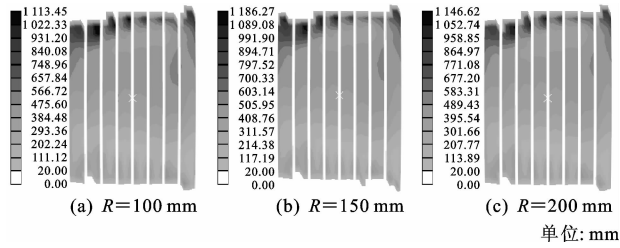


图 4 走行轮胎相对滑移量

Fig. 4 Relative slips of running tire

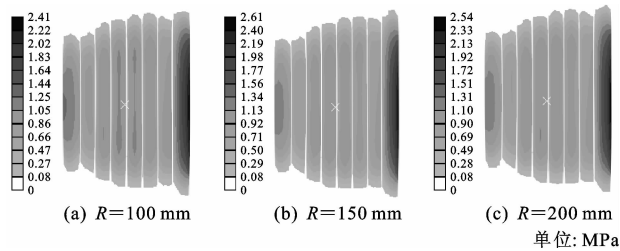


图 5 走行轮胎接地压力

Fig. 5 Ground pressures of running tire

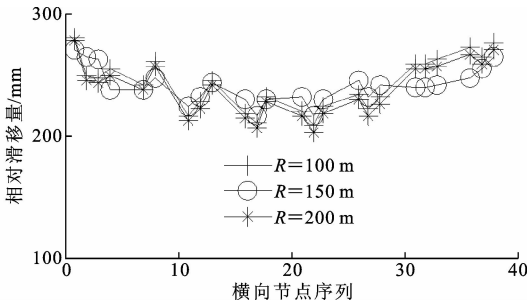


图 6 走行轮胎相对滑移量横向分布

Fig. 6 Relative slip distributions of running tire along transverse direction

由图 4~图 7 可得如下结论:

(1)弯道下走行轮胎的相对滑移量分布极不均匀,其中较大相对滑移量集中在接地区域的左上和右上胎肩部位,接地区域纵向节点相对滑移量的平均值在横向的分布呈中间小、两端大的规律。

(2)弯道下走行轮胎接地的印迹在纵向基本呈对称状态,而在横向呈右侧大左侧小的规律。接地压力较大值分布在走行轮胎右侧边沿处,其在横向(从左到右)分布规律为先减小后基本不变,然后在右侧迅速增大。因此可知,侧倾是引起接地压力分布不均的主要原因之一。

(3)由于走行轮胎胎肩部位相对滑移量和接地压力都比中部大,因此可以预测走行轮胎胎肩部位

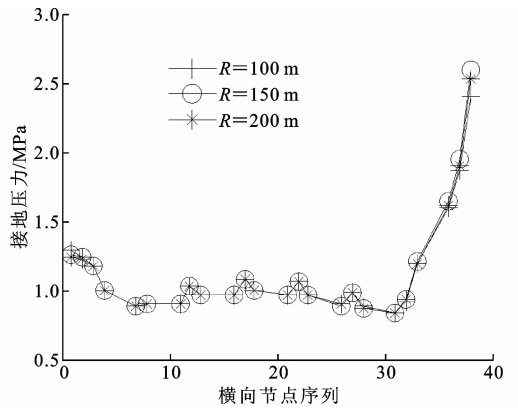


图 7 走行轮胎接地压力横向分布

Fig. 7 Ground pressure distributions of running tire along transverse direction

将出现较大磨损,走行轮胎存在偏磨损。

## 2.2 偏磨损分析

走行轮胎摩擦功是走行轮胎与轨面相互接触并产生滑移时,走行轮胎受到来自轨面摩擦应力所作的功,其与走行轮胎的磨损正相关<sup>[20]</sup>。磨损体积速率  $v$  与摩擦功率  $W_f$  的关系可以表示为<sup>[21]</sup>

$$v = b_0 W_f^{b_1} \quad (2)$$

式中:  $b_0$ 、 $b_1$  分别为轮胎、接触面的相关参数。

因摩擦功与磨损正相关,因此本文采用走行轮胎摩擦功来衡量走行轮胎的磨损量,并通过摩擦功偏度值来衡量走行轮胎的偏磨损。

在有限元分析结果中,走行轮胎胎面局部摩擦功可通过胎面接地区域节点的剪力和相对滑移量计算得到

$$\omega_{ij} = \sqrt{\tau_{ij-x}^2 + \tau_{ij-y}^2} \sqrt{l_{ij-x}^2 + l_{ij-y}^2} \quad (3)$$

式中:  $i = (1, 2, \dots, n_y)$ ,  $n_y$  为行数,即纵向节点数;  $j = (1, 2, \dots, n_x)$ ,  $n_x$  为列数,即横向节点数;  $\omega_{ij}$  为  $i$  行  $j$  列处节点的摩擦功;  $\tau_{ij-x}$  为该处纵向剪力;  $\tau_{ij-y}$  为该处侧向剪力;  $l_{ij-x}$  为该处纵向相对滑移量;  $l_{ij-y}$  为该处侧向相对滑移量。

走行轮胎摩擦功在横向的分布可以看成是走行轮胎接地区域各纵向序列摩擦功之和在横向的分布,计算公式为

$$\omega_j = \sum_{i=1}^{n_y} \omega_{ij} \quad (4)$$

式中:  $\omega_j$  为接地区域第  $j$  列的摩擦功总和。

摩擦功总和  $W$  表示为

$$W = \sum_{j=1}^{n_x} \omega_j \quad (5)$$

此时,轮胎偏磨损可以采用横向分布的摩擦功  $\omega_j$  的偏度值来衡量<sup>[22]</sup>,计算公式为

$$f(y)=\sqrt{(n_y-1)^{-1}\sum_{j=1}^{n_y}(\omega_j-\overline{\omega})^2}\tag{6}$$

式中: $f(y)$ 为摩擦功偏度值; $\overline{\omega}$ 为接地区域所有节点摩擦功的平均值。

3种弯道上走行轮胎摩擦功如图8所示。沿走行轮胎轴线方向的每列节点(去除沟槽处节点)摩擦功总和的分布如图9所示。其中,前进方向、侧偏方向和侧倾方向与图4、图5相同。通过式(4)计算得到3种弯道偏度值,如表3所示。

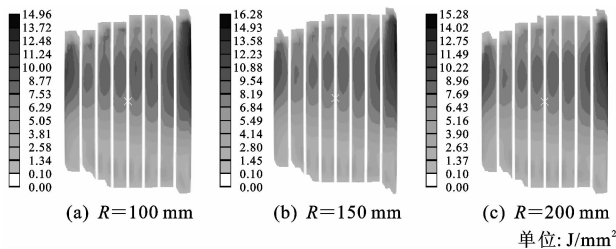


图8 走行轮胎摩擦功

Fig.8 Friction works of running tire

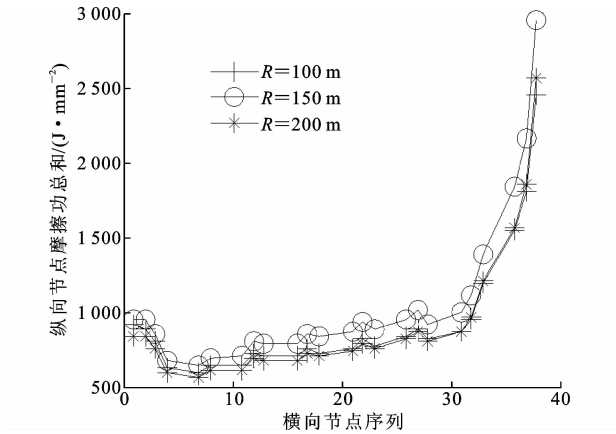


图9 走行轮胎纵向摩擦功总和横向分布

Fig.9 Total friction work distributions of running tire along transverse direction

表3 摩擦功总和及摩擦功偏度值

Tab.3 Total friction work and skewness

参数	弯道半径/m	摩擦功总和/ (J·mm <sup>-2</sup> )	摩擦功偏度值/ (J·mm <sup>-2</sup> )
参数值	100	22 312.24	429.57
	150	25 420.68	535.30
	200	21 897.73	459.81

由图8、图9和表3可得如下结论:

(1)弯道上接地区域摩擦功分布呈右侧大、左侧小的规律。其中,走行轮胎右侧胎肩分布的摩擦功最大,其次为轮胎右侧胎肩。

(2)走行轮胎接地区域纵向节点总和在横向的分布规律为随着节点序列的增大,摩擦功先减小然后缓慢增加,最后呈指数增长,并在右端点处达到最

大值。因此可知,侧倾是引起走行轮胎摩擦功分布不均的主要原因之一。

(3)走行轮胎在弯道处的摩擦功总和及摩擦功偏度值很大,因此根据式(2)可知,走行轮胎在弯道处磨损很大,且在侧倾一侧存在严重的偏磨损。

### 3 结 语

(1)弯道上走行轮胎接地区域的相对滑移量分布不均匀,走行轮胎接地区域纵向节点的相对滑移量平均值在横向的分布呈中间小、两端大的规律,胎肩两端出现较大磨损。

(2)弯道上走行轮胎接地区域的接地压力在纵向基本对称,在侧向差异很大,走行轮胎在横向出现偏磨损。

(3)弯道上走行轮胎接地区域摩擦功分布不规律,摩擦功较大值集中在走行轮胎右侧,摩擦功偏度值很大,走行轮胎存在严重的偏磨损。

(4)跨座式单轨车辆在弯道上运行时,走行轮胎存在严重偏磨损。为减轻走行轮胎的偏磨损,应尽可能减小跨座式单轨车辆的过弯速度,从而减小轮胎的滑移率、侧偏和侧倾,达到减小走行轮胎偏磨损的目的。

(5)后续可考虑在单轨车辆转向架再设计时增加差速机构,减小轮胎过弯时的滑移率,从而减小走行轮胎的磨损量。

### 参考文献:

#### References:

[1] 仲建华,杜子学,何希和.跨座式单轨交通车辆道岔结构及分析[M].北京:人民交通出版社,2013.  
ZHONG Jian-hua, DU Zi-xue, HE Xi-he. Turnout structure and analysis of straddle-type monorail vehicle[M]. Beijing:China Communications Press,2013.

[2] 庄继德.现代汽车轮胎技术[M].北京:北京理工大学出版社,2001.  
ZHUANG Ji-de. Modern automobile tire technology [M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2001.

[3] 黄海波,靳晓雄,丁玉兰.轮胎偏磨损机理及数值解析方法研究[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(2):234-238.  
HUANG Hai-bo, JIN Xiao-xiong, DING Yu-lan. Mechanism of uneven wear and its numerical methods evaluation[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2006,34(2):234-238.

[4] WALTERS M H. Uneven wear of vehicle tires[J].

- Tire Science and Technology, 1993, 21(4): 202-219.
- [5] ZHENG D. Prediction of tire tread wear with FEM steady state rolling contact simulation[J]. Tire Science and Technology, 2003, 31(3): 189-202.
- [6] 郭伟, 何仁. 基于减少轮胎磨损的悬架初始定位参数的优化[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2002, 23(5): 49-53.
- GUO Wei, HE Ren. Optimization of suspension initial alignment parameters based on reducing tire wear[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science, 2002, 23(5): 49-53.
- [7] LI Z, LI Z R, XIA Y M. An implicit to explicit FEA solving of tire F & M with detailed tread blocks[J]. Tire Science and Technology, 2012, 40(2): 83-107.
- [8] 方庆红, 路金林, 赵立群, 等. 轮胎磨损分析中接地能量损失的有限元计算模型研究[J]. 沈阳化工学院学报, 2002, 16(3): 228-231.
- FANG Qing-hong, LU Jin-lin, ZHAO Li-qun, et al. Study on model for energy dissipation in finite element analysis of tire wear[J]. Journal of Shenyang Institute of Chemical Technology, 2002, 16(3): 228-231.
- [9] 李文辉, 魏宏, 吴光强. 轮胎磨损解析研究[J]. 汽车技术, 2002(6): 13-15.
- LI Wen-hui, WEI Hong, WU Guang-qiang. Analytical research on tire wear[J]. Automobile Technology, 2002(6): 13-15.
- [10] 李钊, 李子然, 夏源明. 滚动轮胎接触摩擦行为的实验研究和数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(5): 817-821.
- LI Zhao, LI Zi-ran, XIA Yuan-ming. Experimental and numerical study of frictional contact behavior of rolling tire[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(5): 817-821.
- [11] 张绍国, 高峰, 杭柏林, 等. 汽车轮胎滚动阻力试验机测试方法分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 146-151.
- ZHANG Shao-guo, GAO Feng, HANG Bai-lin, et al. Analysis of test method of vehicle tire rolling resistance tester[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 146-151.
- [12] 贺观. 重庆单轨车走行轮胎胎面磨损分析研究与对策[J]. 城市轨道交通研究, 2010(6): 63-67.
- HE Guan. Measures against tread wear of monorail travelling tires in Chongqing[J]. Urban Mass Transit, 2010(6): 63-67.
- [13] DU Z X, WEN X X, SHEN Z. The impact analysis of tire parameter for tire wear when monorail vehicle curve driving[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 470: 529-533.
- [14] 文孝霞, 杜子学, 左长永, 等. 曲线工况下跨座式单轨走行轮侧偏刚度对轮胎磨损的影响[J]. 交通运输工程学报, 2014, 14(2): 41-48.
- WEN Xiao-xia, DU Zi-xue, ZUO Chang-yong, et al. Influence of cornering stiffness of straddle-type monorail running wheel on tire wear under curve negotiating[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(2): 41-48.
- [15] 王国林, 樊旭峰, 江浩斌. 外倾和侧偏联合作用下轮胎接地印迹研究[J]. 汽车工程, 2004, 26(1): 54-56.
- WANG Guo-lin, FAN Xu-feng, JIANG Hao-bin. A study on contact patch of tire with camber and sideslip[J]. Automotive Engineering, 2004, 26(1): 54-56.
- [16] 杜子学, 李云川, 梁志华, 等. 跨座式单轨车辆曲线通过安全性研究[J]. 机车电传动, 2016(1): 79-83.
- DU Zi-xue, LI Yun-chuan, LIANG Zhi-hua, et al. Research on curve through safety of straddle-type monorail vehicle[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(1): 79-83.
- [17] 郑凯峰, 杜子学. 车速和轨道半径对跨座式单轨车辆曲线通过性的影响[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(3): 23-24, 30.
- ZHENG Kai-feng, DU Zi-xue. Impact of speed and curve at curve negotiation performance of straddle-type monorail vehicle[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2011, 34(3): 23-24, 30.
- [18] VEIRH A G. A review of important factors affecting treadwear[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1992, 65(3): 601-659.
- [19] 彭旭东, 郭孔辉, 丁玉华, 等. 轮胎磨损的影响因素[J]. 橡胶工业, 2003, 50(10): 619-624.
- PENG Xu-dong, GUO Kong-hui, DING Yu-hua, et al. Influencing factors on tire wear[J]. China Rubber Industry, 2003, 50(10): 619-624.
- [20] CHO J R, CHOI J H, KIM Y S. Abrasive wear amount estimate for 3D patterned tire utilizing frictional dynamic rolling analysis[J]. Tribology International, 2011, 44(7/8): 850-858.
- [21] NHTSA. The pneumatic tire[R]. Washington DC: NHTSA, 2005.
- [22] 王国林, 王晨, 张建, 等. 基于有限元分析的轮胎磨损性能优化[J]. 汽车工程, 2009, 31(9): 867-870.
- WANG Guo-lin, WANG Chen, ZHANG Jian, et al. Tire wear performance optimization based on finite element analysis[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(9): 867-870.