

基于不同车轮直径的轮轨接触关系问题

张茂松, 李 芾, 杨 阳

(西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 针对不同车辆的车轮直径差异问题, 研究了车轮直径对轮轨接触几何关系、轮轨接触斑、轮轨最大接触应力、蠕滑率、车辆稳定性以及轮轨磨损等的影响。通过计算可以得出: 随着车轮直径增加, 左右车轮滚动圆半径差逐渐增大, 等效锥度随着车轮横移量逐渐增大; 接触斑面积逐渐变大, 轮轨接触最大应力显著下降; 轮轨的横向和纵向蠕滑率逐渐减少; 车辆的稳定性变好, 车辆过曲线时的磨损变大。

关键词: 车轮; 车轮直径; 轮轨接触关系; 铁道车辆

中图分类号: U260.11

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2016.06.007

Wheel-rail Contact Relation Based on Different Wheel Diameter

ZHANG Maosong, LI Fu, YANG Yang

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Aim at the wheel diameter difference problem, influence of wheel diameter on wheel-rail contact geometrical relationship, contact spot, the maximum contact stress, creepage, vehicle stability and wheel-rail abrasion was researched. The result of calculation showed that with the increase of wheel diameter: left and right wheel rolling radius difference increased, and the equivalent concity gradually increased with the wheel sliding; the contact spot area became large and the maximum stress decreased significantly; the wheel rail lateral and longitudinal creepage gradually decreased; the stability of the vehicle became better, and the wear became larger when the vehicle was over the curve.

Keywords: wheels; wheels diameter; wheel-rail contact relation; railway vehicle

0 引言

轮轨关系在车辆 / 轨道系统中起一种纽带作用, 其将车辆和轨道耦合起来二者相互作用、相互影响, 在一定程度上决定了铁道车辆的运行特性^[1]。轮轨接触关系是轮轨关系研究的基本内容, 在车辆的运行过程中, 车轮与钢轨之间的滚动接触构成一对基本的摩擦副, 也即轮轨接触系统, 轮轨接触系统是铁路运输工具的关键组成部分。轮轨滚动接触过程中的作用行为直接影响列车运动的稳定性、乘客的舒适度、运行的安全性、运营成本和周围环境^[2]。铁道车辆都是通过

轮轨之间的相互作用来完成牵引、制动和运行的, 因此研究轮轨之间的接触关系问题尤为重要。随着我国高速动车组运行速度的不断提高和重载货车载重的不断增加, 轮轨接触机理越来越复杂, 所以有必要深入研究轮轨之间的接触关系。

随着科学技术的发展, 铁道车辆的种类也变得多样化, 如机车、货车、客车、高速动车组、地铁车辆、低地板有轨电车、公铁两用车辆等。由于其使用环境与用途不同, 使用的车轮直径也并不相同, 但车轮直径的变化对轮轨接触关系的影响尚不十分清楚。本文基于轮轨接触理论研究车轮直径对轮轨接触关系的影响, 为不同车辆轮径的设计提供一些参考。

1 不同铁道车辆的轮径参数简介

常见铁道车辆的车轮直径如表 1 所示。从表 1 可以看出, 铁道车辆车轮直径的跨度范围很大, 比如机车的车轮直径达 1 250 mm, 动车组的车轮直径 800~900 mm, 而一些公铁两用车的车轮直径仅 400 mm 左右, 差异十分明显。

表 1 常见的铁道车辆车轮直径参数表

车辆类型	名义滚动圆直径/mm
电力机车	1 250
内燃机车	1 050
CRH1	915
CRH2	860
CRH3	920
CRH5	890
货车	840
低地板有轨电车	660/560
公铁两用车	400

2 车轮直径对轮轨接触几何关系的影响

对于任意几何型面轮轨接触几何参数数值计算方法主要有试凑逼近法和迹线法。本文采用试凑逼近法计算轮轨接触参数, 其基本原理为^[3]: 在轨道坐标系中左右车轮踏面的主轮廓线和左右钢轨的轮廓线采用曲线拟合方法用 4 根样条函数表示; 根据轮对横移量和侧滚角, 将轮对轮廓线的各点坐标转换到轨道坐标系中, 使用样条函数插值法分别计算左右轮与轨道之间的最小垂向间距 $\Delta z_{l \min}$ 和 $\Delta z_{r \min}$ 及其对应的横向坐标 $y_{l \min}$ 和 $y_{r \min}$:

$$\Delta z_{l \min} = \min[W_{l(y)} - R_{l(y)}] \quad (1)$$

$$\Delta z_{r \min} = \min[W_{r(y)} - R_{r(y)}] \quad (2)$$

式中: $W_{l(y)}$ 、 $W_{r(y)}$ 、 $R_{l(y)}$ 、 $R_{r(y)}$ 分别表示左右轮轨的纵坐标值。

给定一相应的横移量判断 $\Delta z_{l \min}^{(1)}$ 和 $\Delta z_{r \min}^{(1)}$ 是否相等, 如果相等, 则 $y_{l \min}^{(1)}$ 和 $y_{r \min}^{(1)}$ 分别是左右轮轨接触点的坐标; 如不相等, 则将轮对绕中心转动 $\gamma^{(1)}$ 角度:

$$\gamma^{(1)} = \frac{|\Delta z_{l \min} - \Delta z_{r \min}|}{|y_{l \min} - y_{r \min}|} \quad (3)$$

当有 $|\Delta z_{l \min}^{(n)} - \Delta z_{r \min}^{(n)}| < \varepsilon$ (给定精度) 时则对应 $y_{l \min}^{(n)}$ 和 $y_{r \min}^{(n)}$ 是轮对发生当前横移量的轮轨接触点坐标。左右车轮的实际滚动圆半径可以根据车轮接触点所在的位置求出与其对应的半径。

本文对采用 LMA 踏面的车轮在不同直径情况下的左右车轮滚动圆半径进行分析, 计算结果如图 1 所示, 随着车轮直径的增加, 左右车轮滚动圆半径差逐渐增

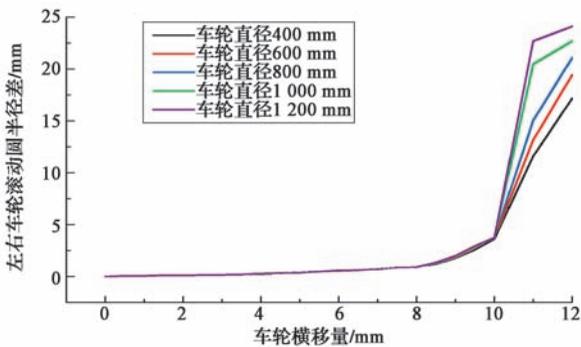


图 1 不同车轮直径的滚动圆半径差

大, 横移量在 0~10 mm 时左右车轮滚动圆半径差增加的趋势较小, 在横移量大于 10 mm 后左右车轮滚动圆半径差增加较快, 其主要是由于发生轮缘接触。

等效锥度是最能表示轮轨接触相互作用特性的参数^[4], 其是用于表征轮轨接触几何关系的重要参数之一, 能直接或间接地影响到轮对在直线上的对中、曲线通过, 踏面、轮缘和钢轨的磨耗, 高速运行的稳定性等方面的性能。将锥形踏面车轮滚动圆附近作成斜率为 λ 的直线段, 在直线段范围内车轮踏面斜度为常数, 对于磨耗型车轮踏面, 不存在直线段, λ 是随轮对横移量 y_w 变化而变化的函数, 因此引入等效锥度 λ_c 的概念, 其计算公式^[5]为

$$\lambda_c = \frac{R_l - R_r}{2y_w} \quad (4)$$

式中: R_l 和 R_r 分别表示左右车轮接触滚动圆半径。

根据此公式计算出不同直径情况下的轮对等效锥度, 如图 2 所示。图 2 中列出了横移量为 1~15 mm 时车轮的等效锥度。在实际运行过程中很少能够达到如此大的横移量, 为了更加明确地表示车轮直径对等效锥度的影响, 选择轮对横移量 6~10 mm 时的等效锥度, 如图 3 所示。从图 3 可以看出等效锥度随着车轮直径增大而逐渐增大。

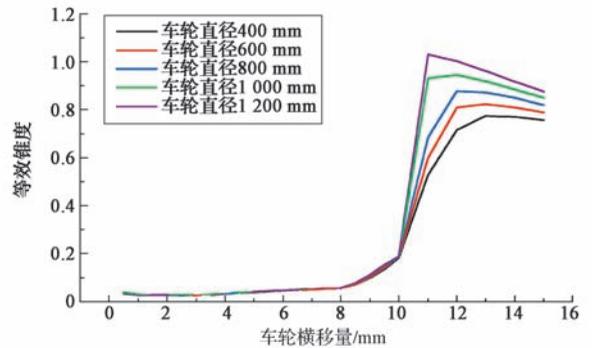


图 2 不同车轮直径的等效锥度

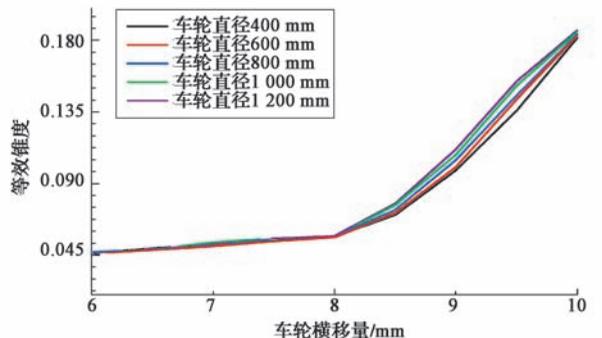


图 3 横移量 6~10 mm 时不同车轮直径的等效锥度

3 车轮直径对轮轨接触斑的影响

19 世纪, Hertz 用弹性力学理论研究了 2 个弹性体的接触问题, 其认为 2 个弹性体之间接触面的形状是个椭圆, 椭圆的大小可由其发展的弹性体接触理论计算得到。轮轨之间的接触可认为是 2 个曲面的弹性体

接触,如图4所示,在压力 P 作用下,接触点处将产生局部变形,出现椭圆接触斑。车轮踏面和轨头椭圆体的主要曲率对椭圆接触斑的尺寸和压力分配有重要影响^[6]。其中,车轮踏面椭圆体的主曲率半径为 R_{w1} 和 R_{w2} ,轨头椭圆体的主曲率半径为 R_{r1} 和 R_{r2} ,图4中主曲率半径分别沿轨道方向和垂直于轨道方向。

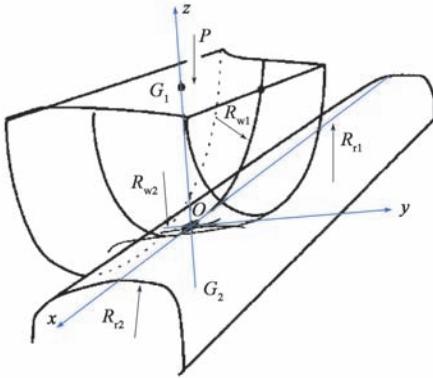


图4 轮轨接触示意图

轮轨接触范围内两点的未变形距离可用二次函数来表示:

$$h = Ax^2 + By^2 \quad (5)$$

式中: A 、 B 为具有相同符号的常系数,它们的数值取决于包含 R_{r1} 主曲率的平面和包含 R_{w1} 主曲率的平面之间的夹角 ψ 。

A 、 B 可由下式确定:

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{r1}} + \frac{1}{R_{r2}} + \frac{1}{R_{w1}} + \frac{1}{R_{w2}} \right) \quad (6)$$

$$B - A = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{R_{r1}} - \frac{1}{R_{r2}} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_{w1}} - \frac{1}{R_{w2}} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{R_{r1}} - \frac{1}{R_{r2}} \right) \left(\frac{1}{R_{w1}} - \frac{1}{R_{w2}} \right) \cos 2\psi \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

对于车轮与钢轨滚动接触的情况, ψ 角的大小为零。根据弹性力学规定,圆弧中心位于物体内部时,曲率半径符号取为正号,当计算凹形踏面车轮时, R_{w2} 为负值。轨头沿铁路轨道方向为平直的情况, R_{r1} 取为 ∞ ,因此上式可简化为

$$A + B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{r2}} + \frac{1}{R_{w1}} + \frac{1}{R_{w2}} \right) \quad (8)$$

$$B - A = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_{r2}} + \frac{1}{R_{w1}} - \frac{1}{R_{w2}} \right) \quad (9)$$

式中: $(B-A)/(B+A)$ 的符号确定接触椭圆长半轴 a 的方向,负值表示椭圆长半轴沿轨道方向,反之,沿车轮方向。

根据弹性力学的知识可得椭圆长半轴和短半轴的求解公式为

$$a = m \left[\frac{3\pi P(k_1 + k_2)}{4(A+B)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$b = n \left[\frac{3\pi P(k_1 + k_2)}{4(A+B)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

式中: P 为椭圆接触斑受到的法向载荷; m 、 n 都为与 $(B-A)/(B+A)$ 比值有关的常数;常数 k_1 和 k_2 为

$$k_1 = \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1}, \quad k_2 = \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \quad (12)$$

式中: ν 及 E 为车轮与钢轨材料的泊桑比与抗拉弹性模量。

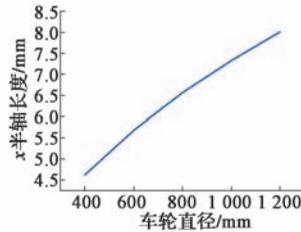


图5 接触斑x轴

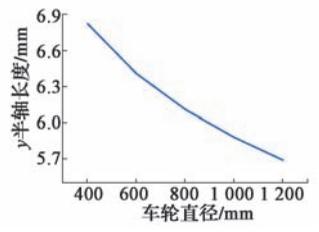


图6 接触斑y轴

根据以上的Hertz接触理论得到不同车轮直径时接触斑 x 及 y 半轴长度,如图5、图6所示。由图5、图6可知,对于接触斑内 x 半轴的长度随着车轮直径的增加而变大, y 半轴的长度随车轮直径的增大而减小。接触斑的面积如图7所示,接触斑面积随车轮直径增加而变大。

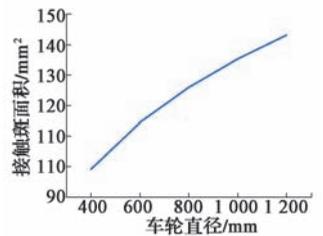


图7 接触斑面积

4 车轮直径对轮轨最大接触应力的影响

轮轨接触应力过大会导致如钢轨波磨、斜线状裂纹、表面塑性压溃、车轮剥离等轮轨滚动接触疲劳破坏现象^[7]。随着车辆的提速和重载货运的发展,轮轨间的疲劳损伤会越来越突出,因此要研究对轮轨接触应力的影响因素,以降低轮轨间的接触应力。本文研究不同车轮直径下,轮轨的最大接触应力变化情况。根据Hertz接触理论,轮轨接触面的压力是按椭圆体表面规则分布的,接触区上的压力 P 可写成^[3,8]:

$$P = P_0 \left[1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 - \left(\frac{y}{b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

其中最大的压力 P_0 在接触面的中心:

$$P_0 = \frac{3P}{2\pi ab} \quad (14)$$

在椭圆中心处的最大接触应力 $\sigma_{max} = -P_0$ 。由式(10)、

式(11)计算出 a 和 b ,代入式(14),计算得出在不同车轮直径时轮轨最大接触应力,如图8所示。由图8所得,随着车轮直径增加,轮轨接触最大

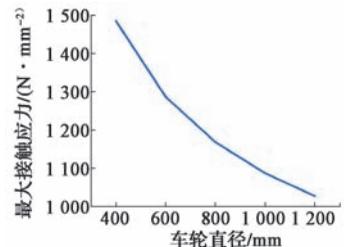


图8 最大接触应力

应力显著下降。

5 车轮直径对蠕滑率的影响

车轮在钢轨上以一定速度滚动时, 发生面接触, 车轮与钢轨的接触面间会产生相对运动, 形成轮轨蠕滑现象。轮轨间的蠕滑特性对车辆的牵引和制动性能等有很大的影响。蠕滑率的大小决定着蠕滑力的数值, 本文主要研究车辆在直线运行时, 轮径大小对车辆轮轨间的横向和纵向蠕滑率的影响。根据轮轨接触理论对横向和纵向的蠕滑率定义如下^[9-10]:

$$\varepsilon_{i1} = \frac{v_{wi1} - v_{ri1}}{v_0} = \frac{\Delta v_{i1}}{v_0} \quad (15)$$

$$\varepsilon_{i2} = \frac{v_{wi2} - v_{ri2}}{v_0} = \frac{\Delta v_{i2}}{v_0} \quad (16)$$

$$v_0 = v \cos \varphi$$

式中: ε_{i1} 和 ε_{i2} 分别为纵向和横向蠕滑率; v_{wi1} 和 v_{wi2} 分别为车轮接触点的纵向和横向速度; v_{ri1} 和 v_{ri2} 分别为钢轨接触点的纵向和横向速度; v_0 为轮对的名义速度; v 为轮对实际滚动速度; φ 为轮对摇头角; Δv_{i1} 和 Δv_{i2} 为轮轨接触点的纵向和横向相对速度。

车轮在直线线路上滚动时, 上式可略去高阶后为

$$\varepsilon_{i1} = \frac{1}{v_0} \left\{ v_0 \left[1 + (-1)^i \frac{r_i}{r_0} \right] + (-1)^i l_0 \dot{\varphi} \right\} \quad (17)$$

$$\varepsilon_{i2} = \frac{1}{v_0} (y + r_i \dot{\phi} - \varphi) \cos[\phi - (-1)^i] + [l_0 - (-1)^i \Delta_i] \frac{\dot{\phi}}{v_0} \sin \delta_i \quad (18)$$

式中: r_i 为左右轮瞬时滚动半径; r_0 为轮对对中时滚动圆半径; l_0 为轮对对中时轮对中心到滚动圆的距离; y 为轮对横移量; φ 为轮对侧滚角; Δ_i 为左右轮轨接触点在车轮踏面上的移动量; δ_i 为轮轨接触角。

本文以某地铁车为例建立动力学模型, 通过仿真计算, 得出不同轮径下轮轨的纵向和横向蠕滑率如图 9、图 10 所示。由图 9、图 10 可知, 随着车轮直径的增大, 轮轨之间的纵向和横向的蠕滑率逐渐减小, 减小的趋势逐渐平缓。

6 车轮直径对车辆稳定性的影响

车辆运行稳定性是车辆动力学重要指标之一, 其主要的评价指标是车辆蛇形失稳的临界速度。车辆发

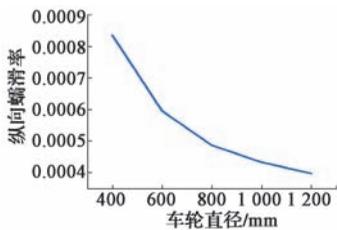


图 9 纵向蠕滑率

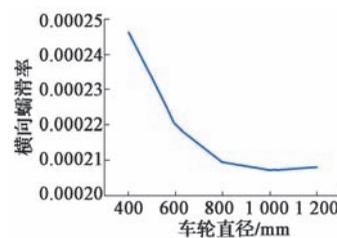


图 10 横向蠕滑率

生蛇形运动失稳后, 会使车辆的运行性能恶化, 旅客的舒适度下降, 作用在车辆各零部件的动载荷增大, 还将使轮对严重打击钢轨, 损坏车辆及线路, 甚至出现脱轨事故。自由轮对蛇形运动的波长公式为^[11]

$$L_w = 2\pi \sqrt{\frac{br_0}{\lambda_0}} \quad (19)$$

式中: L_w 为蛇形运动波长; r_0 为轮对滚动圆半径; λ_0 为踏面斜度。

由式 (19) 可见车轮的直径越大, 则轮对蛇形运动波长越长, 即蛇形运动越平缓。本文根据某地铁车辆建立动力学模型, 通过改变车轮的直径, 仿真计算出车辆的蛇形失稳速度, 结果如图 11 所示。由图 11 可知, 随着车轮半径的增大, 车辆的蛇形失稳的临界速度逐渐增大。

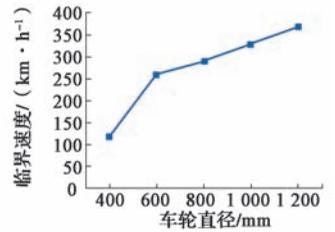


图 11 车辆稳定性

7 车轮直径对轮轨磨耗的影响

车辆通过曲线时, 车轮踏面、轮缘与钢轨之间的磨耗是评价轮轨接触技术经济指标的一项重要内容。本文采用磨耗功率来衡量不同轮径下轮轨的磨耗情况。

上世纪 80 年代, 英国铁路部门提出用轮轨接触斑消耗的功作为评价轮轨磨耗的指标, 其数值为蠕滑力和蠕滑率向量的数量积, 其物理意义是车辆通过曲线时沿轨道运行每单位长度所消耗的功^[3,12]:

$$W = F \cdot \varepsilon \quad (20)$$

式中: F 为轮轨接触的蠕滑力合力; ε 为轮轨接触的蠕滑率。

式 (20) 也可以表达为

$$W = F_x \varepsilon_x + F_y \varepsilon_y + M_{cp} \varepsilon_{cp} \quad (21)$$

式中: F_x 、 F_y 分别为纵向和横向蠕滑力的分量; M_{cp} 为法向蠕滑力矩; ε_x 、 ε_y 、 ε_{cp} 分别为纵向、横向和自旋蠕滑率。

忽略自旋蠕滑的影响, 式 (21) 简化为爱因斯 (Elkins) 磨耗指数:

$$W = F_x \varepsilon_x + F_y \varepsilon_y \quad (22)$$

在爱因斯磨耗指数模型上, 学者又提出了轮轨摩擦功率的算法:

$$P = W \cdot v \quad (23)$$

式中: P 为轮轨接触摩擦功率; v 为车辆运行速度。

本文根据某地铁车辆建立动力学模型, 通过改变车轮的直径, 仿真计算出车辆通过曲线半径 $R=400$ m 时车辆的轮轨摩擦功率, 结果如图 12 所示。由图 12 可知随着车轮半径的增大, 车辆车轮的磨耗功率逐渐减小。

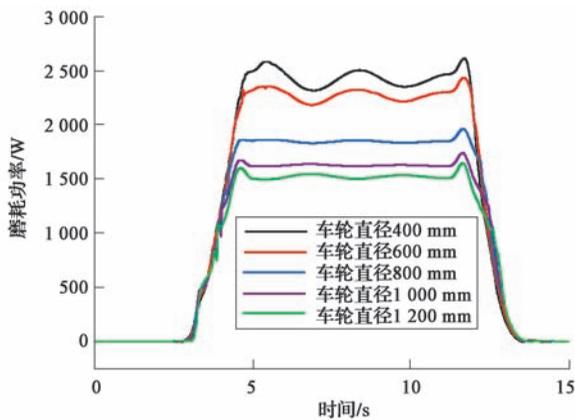


图 12 磨损功率

8 结 语

本文研究了基于不同车轮直径下的轮轨接触关系问题,认为在车辆的设计过程中,车轮直径要根据设计车辆的特点和要求,综合轮径对接触几何关系、车辆直线稳定性、曲线通过性、磨损等各个方面的影响,合理地进行选择。

参考文献:

- [1] 任尊松. 车辆系统动力学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007: 23-33.
- [2] 金学松, 沈志云. 轮轨滚动接触力学的发展 [J]. 力学进展, 2001(1): 33-46.
- [3] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 20-28.

- [4] International Union of Railways. Method for Determining the Equivalent Conicity: UIC Code 519 [S]. Paris: International Union of Railways, 2004.
- [5] International Union of Railways. Testing and Approval of Railway Vehicles from Point of View of their Dynamic Behavior – Safety – Track fatigue – Ride Quality: UIC Code 518 [S]. 3rd ed. Paris: International Union of Railways, 2005.
- [6] 姚建伟, 孙丽霞. 机车车辆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2014: 96-106.
- [7] 王文健, 郭俊, 刘启跃. 轨道结构参数对轮轨滚动接触应力影响 [J]. 机械工程学报, 2009 (5): 39-44.
- [8] 雷腾. 轮轨接触应力的计算与分析 [J]. 中国铁道科学, 1985(1): 53-66.
- [9] Garg V K, Dukkipai R V. Dynamics of Railway Vehicle System [M]. Orlando: Academic Press, 1984.
- [10] 肖乾, 徐红霞, 黄碧坤, 等. 轮对横移对高速轮轨稳态滚动接触蠕滑力和蠕滑率的影响 [J]. 中国铁道科学, 2014 (4): 88-93.
- [11] 严隽毫, 傅茂海. 车辆工程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012: 214-219.
- [12] 白雪. 踏面形状对地铁车辆动力学性能及轮轨磨损影响研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.



作者简介: 张茂松 (1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为城市轨道交通车辆工程。

动态消息

中车株洲所荣获 2016 年中国标准 创新贡献奖

10月14日,2016年世界标准日主题活动在国家质检总局隆重举行,并颁发了中国标准创新贡献奖。中车株洲所荣获2016年中国标准创新贡献奖组织奖,是湖南省以及全国轨道交通行业迄今为止唯一获此殊荣的企业,中车株洲所副总经理、总工程师冯江华出席颁奖仪式。

中国标准创新贡献奖是我国标准化领域的最高奖项,评选由国家质检总局和国家标准化管理委员会联合组织实施,该奖项分设项目奖、组织奖和个人奖,本届由中国电力科学研究院、中车株洲所、机械工业仪器仪表研究所等5个单位荣获中国标准创新贡献奖组织奖这一殊

荣。

中车株洲所坚持创新驱动战略,依托 IEC/TC9、SAC/TC278 和铁道行业标准 3 个平台,发挥国内领先、国际先进的牵引传动控制系统研发与检验能力,建立了高速列车交流传动电气系统技术标准体系,承担了 11 个国际标准工作组,成功孵化 8 项国际标准,参与制定了 68 项国际标准,牵头制修订国家标准 61 项、行业标准 109 项,全面支撑了我国高铁、城轨交通技术与产业发展。中车株洲所荣获 2016 年中国标准创新贡献奖,对内服务于国内轨道交通领域的发展,对外加强我国在轨道交通领域的话语权和影响力,提升中国轨道交通高端装备产品在国际上的地位,为中国高铁“走出去”战略提供强劲支撑。

(朱一迪)