

基于槽型轨的有轨电车动力学性能研究

杨 阳¹, 李 芾², 李金城², 丁军君²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;

2. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 通过建立使用槽型轨和无槽轨轨道的70%低地板有轨电车动力学模型, 分析了发生轮背接触的条件, 研究轮背接触对槽型轨的动力学影响, 优化滚动圆横向跨距。计算结果表明, 轮背接触对轮对十分不利, 在设计车辆时应保证轮对与槽轨尽量不发生接触; 增大滚动圆横向跨距是避免轮背接触的有效方法, 且适当地增大滚动圆横向跨距对车辆动力学性能有益。

关键词: 槽型轨; 轮背接触; 有轨电车; 动力学性能; 滚动圆横向跨距

中图分类号: U482.1; U260.11

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.02.026

Dynamic Performance of Trams Based on Grooved Track

YANG Yang¹, LI Fu², LI Jincheng², DING Junjun²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China;

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

Abstract: The dynamic models of 70% low-floor trams using groove track and non-groove track were established respectively. Several aspects were discussed including analysis of the condition which occurs flange contact, exploring flange contact effects on dynamic of groove track, optimizing the distance of rolling tread circle. The results of the dynamic performance of trams based on groove rail showed that: flange contact is very unfavorable to wheel alignment, so it is necessary to ensure that the wheel is not in contact with the groove track in vehicle design; increasing the distance of rolling tread circle is a quick way to avoid the flange contact and proper increasing the distance of rolling tread circle is beneficial to vehicle dynamic property.

Keywords: groove track; flange contact; tram; dynamic performance; distance of rolling tread circle

0 引言

城市有轨电车由于其运载能力强、建设成本低、环保无污染等优点在越来越多的城市投入使用, 如沈阳、大连、珠海、淮安等, 目前国内有轨电车线路上均使用槽型轨。槽型轨和普通钢轨的主要区别在于其轨头有一个不对称的槽型。由于槽型轨的特殊结构, 在使用过程中对车辆的动力学响应与普通钢轨有很大差异。国内槽型轨使用较晚, 对槽型轨的研究较少, 故对槽型轨进行研究具有重要的意义。

1 槽型轨

槽型轨在国外低地板有轨电车线路中被大量使用^[1]。槽型轨设置轨槽, 在铺设时可保证轨道与普通公路路面平顺衔接(如图1所示), 避免了传统钢轨影响其他车辆通行的缺点。槽型轨的内侧轨槽能够起到一定的安全作用, 轨槽可以限制轮对的横向运动, 防止车辆脱轨, 车辆行驶稳定

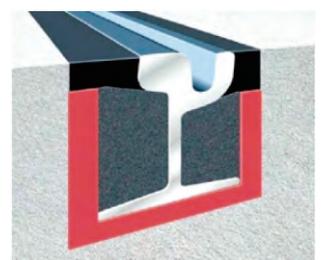


图1 植入式轨道设计

收稿日期: 2018-01-12; 修回日期: 2018-02-05

性强,运行噪声低,是有轨电车线路的最佳选择。

2012年我国自行研制生产了59R2槽型轨,并应用于沈阳浑南新区现代有轨电车一期工程项目中。目前,我国槽型轨还处于起步阶段,尚无槽型轨的技术标准,主要参照欧洲标准化委员会颁布的Railway applications-Track-Special purpose rail- Grooved and associated construction。随着我国有轨电车标准和车轮踏面参数的定型,需要开展槽型轨材质、性能、生产工艺等关键技术及装备的科技攻关,逐步建立我国自己的槽型轨标准,为槽型轨生产验收和管理提供指导^[2]。

2 动力学分析

目前关于槽型轨的动力学研究较少,文献[3]根据槽型轨的结构特点,提出了槽型轨与车轮的接触几何关系的计算方法,得到了轮轨接触几何参数,但未对轮轨的动态作用进行研究。文献[4]研究了槽型轨及普通钢轨对独立轮轻轨车辆轮轨动力特性的影响,在比较2种钢轨的动力学分析结果时未考虑2种轨道在轨距测量基准线及轨低坡的影响,未对轮背与槽轨接触力进行研究。针对上述问题本文以国内自主研发的某70%低地板有轨电车为研究对象,分析槽型轨对车辆动力学性能的影响。

2.1 动力学模型

车辆采用M+T+M“2动1拖”的编组形式,2个车体模块之间使用上下铰接使其形成静定结构,如图2所示,两端车支承在动力转向架上,中间车支承在非动力转向架上。

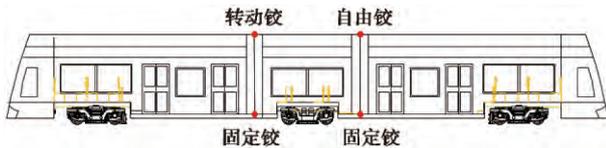
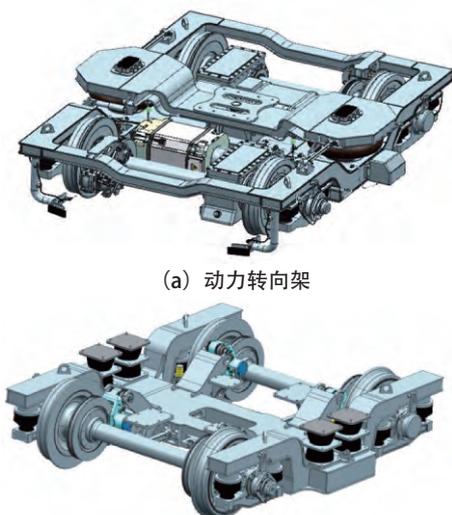


图2 车体结构图

动力转向架采用轴箱外置式带摇枕结构,如图3(a)所示,能够适应动力转向架与车体之间的大转角和大位移;非动力转向架采用轴箱外置式无摇枕结构,如图3(b)所示。2种转向架一系采用锥形叠层橡胶弹簧定位,动力转向架二系采用空气弹簧,非动力转向架二系采用沙漏橡



(a) 动力转向架
(b) 非动力转向架
图3 转向架结构图

胶堆。驱动装置采用空心轴全悬挂方式,可有效降低簧下质量并改善轮轨关系。采用装有弹性车轮的传统轮对模式,可提高车辆降噪性能和运行安全可靠。

该有轨电车轨道选择59R2槽型轨,车轮踏面是专为槽型轨设计的非标准踏面,槽型轨配合踏面与S1002标准踏面对比如图4所示。槽型轨踏面轮缘厚度比标准踏面略小,且在同样的滚动圆横向跨距时其轮轨间隙要小于标准踏面。因此按照普通铁路的相关标准来设计轮对的滚动圆横向跨距并不合理,对槽型轨及其踏面匹配关系进行深入研究是十分必要的。

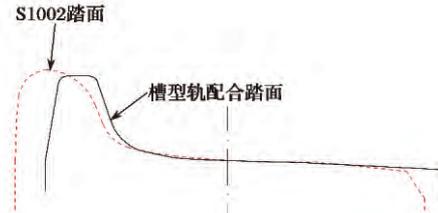


图4 踏面对比图

轮轨接触关系是车辆动力学的基础,其涉及到轨道车辆运行的安全性、经济性和舒适性问题。任意几何型面轮轨接触几何参数确定方法主要有试凑逼近法和迹线法^[5]。本文采用试凑逼近法计算轮轨接触参数,其基本原理如下: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可以用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: $W_l(y)$ 和 $W_r(y)$ 分别为左、右车轮在坐标系中的垂向坐标值; $R_l(y)$ 和 $R_r(y)$ 分别为左、右轨面在坐标系中的垂向坐标值。

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,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, $\gamma^{(1)}$ 通过下式计算:

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

当有 $|\Delta z_{l \min}^{(n)} - \Delta z_{r \min}^{(n)}| < \epsilon$ (给定精度)时,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。基于上述理论对某低地板有轨电车轮轨接触几何关系进行分析,结果如图5所示。

由于某低地板车辆两端车相对于中间车体对称,在建立车辆系统模型时将端车与中间车体铰接处简化为弹簧阻尼单元,端车的系统模型如图6所示。图6中,车辆的自由度分别为车体的浮沉 Z_c 和点头 J_c 、构架的浮沉 Z_b 和点头 J_b 、两轮对的浮沉 Z_{w1} 和 Z_{w2} ; P_w 表示表示轮轨间的作用力; M_c, J_c 分别表示车体的质量和转

动惯量; M_b, J_b 分别表示构架的质量和转动惯量; M_w 为车轮的质量; K_1, K_2, K_3 分别为一系、二系悬挂及车间等效弹簧单元的刚度; C_1, C_2, C_3 分别为一系、二系悬挂及车间等效弹簧单元的阻尼。

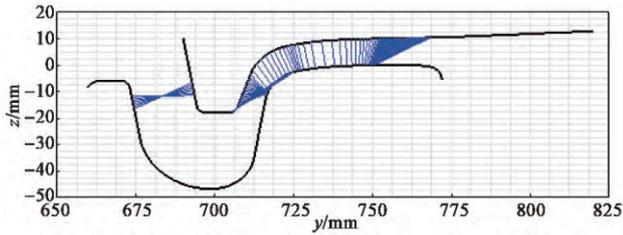


图 5 轮轨接触示意图

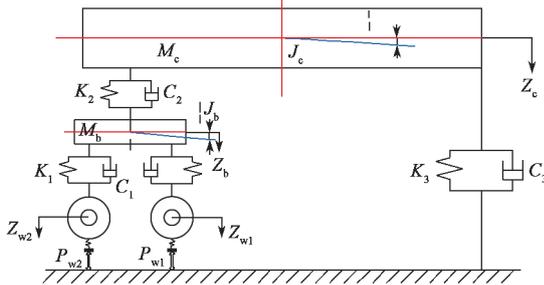


图 6 端车系统模型

基于多刚体动力学理论, 在 Simpack 中建立具有 153 个自由度的整车横向 - 垂向 - 纵向耦合动力学模型, 模型中考虑了非线性的轮轨接触关系和车辆悬挂系统。采用多点接触理论进行分析^[6-7], 其动力学模型如图 7 所示。

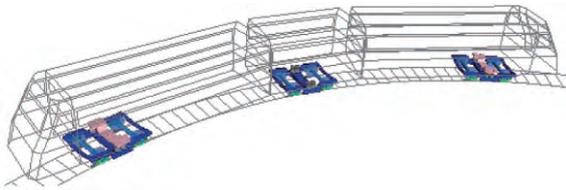


图 7 车辆动力学模型

研究槽型轨轨槽对车辆动力学的影响, 需要选择一种没有轨槽的轨道与槽型轨进行比较分析。为避免轨道其他参数对动力学性能产生影响, 将 59R2 槽型轨轨槽去掉形成新轨道如图 8 所示。

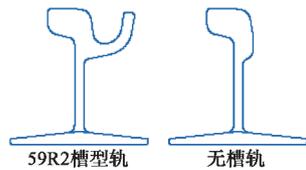


图 8 轨道示意图

2.2 轮背接触确定方法

槽型轨对车辆动力学的影响主要是因轮对产生横移时轮背与轨槽内侧接触引起的, 研究槽型轨对车辆动力学的影响必须准确地确定轮背是否接触。本文提出了一种根据轮轨接触点到轮对中心的横向距离来确定是否发生轮背接触的方法。具体方法为: 轮对与钢轨在横向的剖面如图 9 所示, 设轮缘顶端到轮对中心的纵向距离为 l , 测量轮轨接触点到轮对中心横向距离, 若该距离小于 l 则说明发生轮背接触, 若该距离大于 l 则表示接触点在踏面上, 未发生轮背接触。

轮背与轨槽接触主要发生在小半径曲线上。研究

发现车辆以 18 km/h 速度通过半径为 50 m 曲线时, 滚动圆横向跨距为 1490 mm, 是轮背与轨槽发生接触的临界状态。当滚动圆跨距小于 1490 mm, 轮背与轨槽发生接触; 大于 1490 mm 则不发生接触。当滚动圆横向跨距为 1490 mm 时, 图 9 中 l 为 700 mm。图 10 为接触点与轮对中心距离图, 在计算时认为接触点 1 位于踏面, 接触点 2 位于轮缘或者轮背。图 10 中接触点 2 在 10.6 s 时与轮对中心的纵向距离为 689 mm, 小于 l , 故此时轮背与轨槽发生接触。计算在安全速度以内不同速度及不同滚动圆横向跨距时的轮轨接触情况, 结果表明, 滚动圆横向跨距是影响轮背接触的主要因素, 速度对其影响较小。

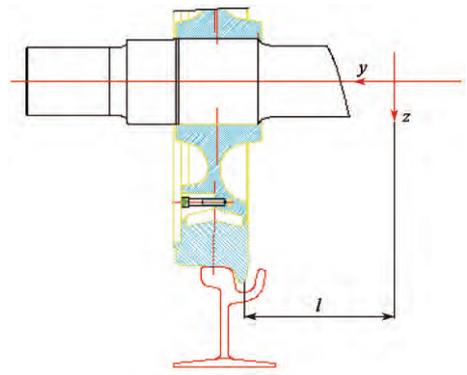


图 9 轮轨接触图

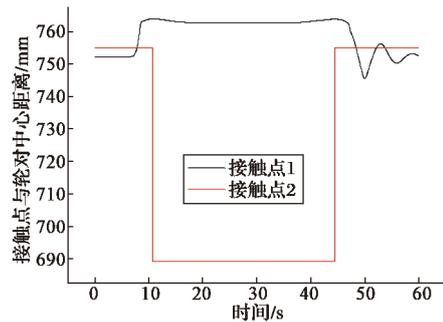


图 10 接触点与轮对中心距离图

2.3 动力学分析结果

车辆通过 50 m 曲线半径时内侧车轮轮轨横向力曲线如图 11 所示, 在踏面上的接触点的轮轨横向力槽型轨相对于无槽轨有一定程度的降低, 但在轮背接触点上有较大的轮轨横向力, 这主要是由于通过曲线时车辆受到离心力的作用, 有向轨道外侧运行的趋势, 而槽型轨对其有一定的限制作用, 所以该接触点的横向力较大。

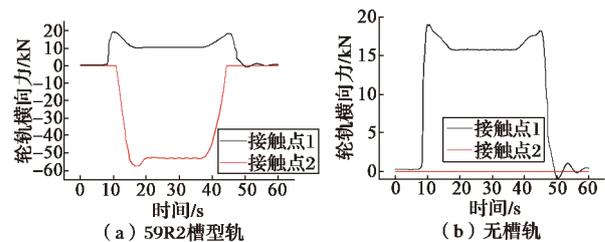


图 11 内侧车轮轮轨横向力曲线

车辆通过曲线时外侧车轮轮轨横向力曲线如图 12 所示, 使用槽型轨车辆在 8.2 s 时接触点 2 的轮轨横向力不再为 0, 即发生了两点接触车辆开始进入缓和曲线, 随后轮轨横向力逐渐增加, 在 10.6 s 时轮轨横向力开

始下降,内侧车轮发生了轮背接触。对图 12 分析可知,车辆在曲线上运行即 15~35 s 这一时间段外侧车轮槽型轨与无槽轨轮轨横向力的差值与槽型轨轮背接触点的轮轨横向力相似,因为外侧车轮提供的轮轨横向力在使用槽型轨之后由内侧车轮轮背接触点提供。

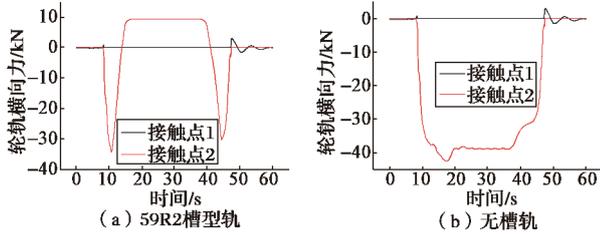


图 12 外侧车轮轮轨横向力曲线

轮轴横向力曲线如图 13 所示,59R2 槽型轨的轮轴横向力大于无槽轨,这是由于内侧车轮轮背接触点处有一个较大的横向力的原因而导致的。

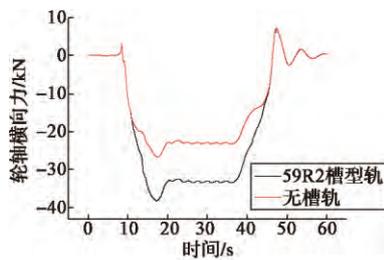


图 13 轮轴横向力曲线

车辆通过曲线时内侧车轮的轮轨垂向力曲线如图 14 所示,59R2 槽型轨踏面接触点与轮背接触点共同承受垂向力,2 个接触点的垂向力与无槽轨的轮轨垂向力基本相同。外侧车轮轮轨垂向力变化不大,如图 15 所示,直线运行时仅发生踏面接触,接触点 2 的垂向力为 0,当进入曲线时接触点转移到轮缘,踏面上轮轨接触点垂向力变为 0。

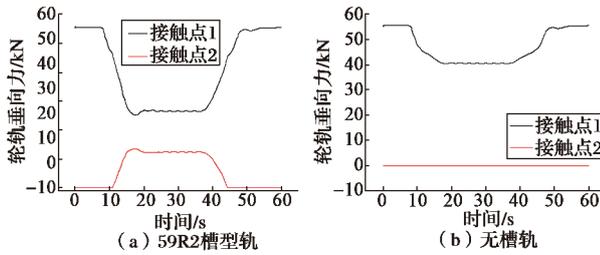


图 14 内侧车轮轮轨垂向力曲线

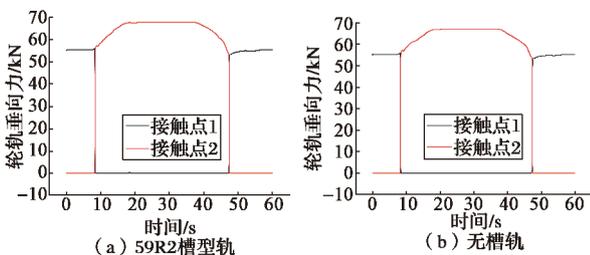


图 15 外侧车轮轮轨垂向力曲线

脱轨系数作为评价脱轨稳定性的重要指标,其定义为轮轨横向力与轮轨垂向力的比值。由于槽型轨在发生轮背接触时会有较大的轮轨横向力,脱轨系数会大于安全值,当产生轮背接触时再用脱轨系数进行评价并不合理,故对脱轨系数不再研究。

通过研究槽型轨发生轮背接触时对车辆动力学的

影响发现,轮背接触点处有很大的轮轨横向力,且发生轮背接触时轮轨横向力变大。从保护轮对方面考虑,在车辆设计时应保证轮对与槽轨不发生接触。

2.4 滚动圆横向跨距研究

由于槽型轨设计的踏面与标准踏面有一定的差异,若完全沿用标准踏面的相关标准不完全合理,所以研究滚动圆横向跨距对车辆动力学的影响,对车辆的动力学性能进行优化。

不同滚动圆横向跨距对车辆的动力学影响如图 16 所示,随着滚动圆横向跨距逐渐增大左右车轮的轮轨横向力、轮轴横向力、脱轨系数和横向平稳性指标逐渐降低,垂向平稳性指标升高。当滚动圆横向跨距较小时车辆稳定性较差,随着跨距增大车辆稳定性变好。适当增大滚动圆横向跨距对车辆动力学性能有益,但是增大横动量的同时也会带来一系列的问题,如轮缘间隙变小、磨损加重^[8]。滚动圆的横向跨距将会影响车辆通过道岔,应当在不影响通过道岔的情况下根据车辆动力学性能等问题综合选取滚动圆横向跨距,建议该 70% 低地板有轨电车滚动圆横向跨距取 1 500 mm。

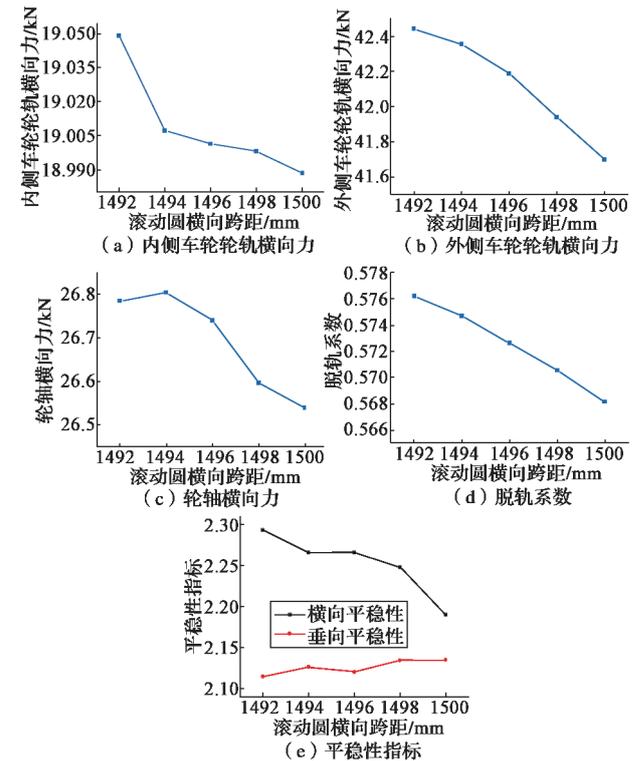


图 16 滚动圆跨距对车辆动力学影响

3 结语

本文以一种新型 70% 低地板有轨电车为研究对象,分别建立了 59R2 槽型轨和无槽轨轨道 2 种动力学模型,分析了槽型轨在发生轮背接触时动力学响应变化情况,通过分析可得出以下结论:

- ① 滚动圆横向跨距是影响轮背接触的主要因素,速度的影响较小。
- ② 对于内侧车轮,在发生轮背接触时轮背接触点

上有较大的轮轨横向力, 外侧车轮轮轨横向力较小且与无槽轨方向相反。

③ 59R2 槽型轨的轮轴横向力大于无槽轨。

④ 轮背接触时在轮背接触点和踏面接触点共同承担轮轨垂向力。

综上所述, 从保护轮对方面考虑, 在车辆设计时应保证轮对与槽轨不发生接触, 增大滚动圆横向跨距是避免轮背接触的有效方法。对于 59R2 槽型轨适当地增大滚动圆横向跨距对车辆动力学性能有益, 但在确定滚动圆横向跨距时应当考虑轮轨间隙、道岔等因素的影响, 以保证车辆整体动力学性能。

参考文献:

- [1] 李刚, 李芾, 黄运华. 100% 低地板轻轨车辆的发展与运用 [J]. 机车电传动, 2013 (4): 51-55.
- [2] 李秋义. 我国现代有轨电车轨道系统技术发展的思考 [J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(10): 122-125.

- [3] 张兵舰, 沈钢. 槽型轨与车轮接触几何关系初步研究 [J]. 铁道车辆, 2006, 44(12): 1-3.
- [4] 陈鹏. 槽型轨及普通钢轨对独立轮对轻轨车辆轮轨动力特性的影响 [J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(2): 65-68.
- [5] 干锋, 戴焕云, 高浩, 等. 铁道车辆不同踏面等效锥度和轮轨接触关系计算 [J]. 铁道学报, 2013, 35(9): 19-24.
- [6] PIOTROWSKI J, CHOLLET H. Wheel-rail contact models for vehicle system dynamics including multi-point contact [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(6/7): 455-483.
- [7] JOAO P, JORGE A. A computational efficient general wheel-rail contact detection method [J]. Journal of mechanical science and technology, 2005, 19(S1): 411-421.
- [8] 丁军君, 李芾, 黄运华. 基于半赫兹接触的车轮磨损计算 [J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(2): 195-199.

作者简介: 杨阳 (1991—), 男, 工程师, 主要研究方向为机车车辆设计理论、轨道交通车辆系统动力学理论、轮轨接触理论。

(上接第 110 页) 停车功能, 提高了车辆自动驾驶的精确性、稳定性和安全性。

4.3 未来发展趋势

机器视觉是通过传感器及相机来代替人类双眼的功能进行测量和判断, 而这也是未来车辆发展的趋势, 对标停车只是机器视觉可以完成的一个功能。未来, 通过在车辆上安装摄像头可以实现轨道交通的机器视觉, 实时掌握路面信息, 如同人类的双眼般感知周围环境, 而且更加可靠、稳定, 也是车辆实现自动驾驶技术的必然要求。

5 结语

通过研究与分析车辆对标停车技术, 运用基于摄像机系统的机器视觉识别车标或信号灯并判断车辆距离。在 ATO 系统逐步完善与发展的前提下, 机器视觉将进一步发展并融入车辆自动驾驶系统, 提高车辆的安全性和冗余性, 为未来基于机器视觉的车辆自动驾驶技术准备条件。同时在提升城市交通效率、提升能

量利用率等方面发挥越来越大的作用。

参考文献:

- [1] 彭金帅. 浅析无人驾驶汽车的关键技术及其未来商业化应用 [J]. 科技创新与应用, 2015 (25): 46.
- [2] 张强, 陈德旺, 于振宇. 城市轨道交通 ATO 系统性能指标评价 [J]. 都市快轨交通, 2011, 24 (4): 26-29.
- [3] 王鹏. 地铁列车 ATO 模式对标停车不准故障分析 [J]. 铁道机车车辆, 2015, 35 (1): 118-120.
- [4] 王鹏飞, 樊贵新, 王新海, 等. 城轨车辆在 ATO 模式下停车精度问题的分析与讨论 [J]. 铁道机车车辆, 2011, 31 (6): 77-79.
- [5] 王耀南, 李树涛, 毛建旭. 计算机图像处理与识别技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [6] 孙即祥. 现代模式识别 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001.
- [7] 牛欣, 沈兰荪. 基于特征的车辆牌照定位算法 [J]. 交通与计算机, 2000, 18(1): 31-33.

作者简介: 王睿 (1991—), 男, 硕士, 研究方向为城市车辆自动驾驶与无人驾驶。