

城市轨道交通车辆车轮轮缘磨耗分析

王永蓬¹, 尚慧琳², 董其炜¹, 郑颖¹, 唐茂林¹

1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620
2. 上海应用技术学院机械工程学院, 上海 200235

摘要 阐述了轮缘高度、轮缘厚度以及轮缘综合值 3 个参数对城市轨道交通车辆车轮的作用以及重要性, 基于城市轨道交通某线路车轮的实际磨耗数据, 分别对这 3 个参数进行重点研究, 分析了各参数对车辆车轮磨耗的影响, 主要结果表明: 该线路属于典型的踏面磨损线路, 存在较普遍的轮缘虚增厚问题, 拖车的第一轴和第四轴存在一定同轴左、右车轮轮缘磨损不均匀现象。有针对性地提出延长该线路车轮使用寿命的建议, 认为可以通过适当调节轮轨硬度比、定期反向运行、调整拖车空气制动力和动车电制动力的分配比例、降低空气制动切入点速度等方法有效降低车轮磨耗, 提高车辆的安全运营。

关键词 城市轨道交通车辆; 车轮磨耗; 轮缘高; 轮缘厚; 轮缘综合值

中图分类号 U270.33

文献标志码 A

doi 10.3891/j.issn.1000-7857.2013.26.005

Wear of Wheel Flange of Urban Rail Vehicle

WEN Yongpeng¹, SHANG Huilin², DONG Qiwei¹, ZHENG Ying¹, TANG Maolin¹

1. College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China

Abstract This paper discusses the role and the importance of three parameters, that is, the flange height, the flange thickness and the comprehensive value of the flange. Based on the actual wear data of the wheel flange in some urban rail line, the effects of the three parameters on the wear of wheels of a vehicle are analysed. It is shown that this line is a typical tread wear line; the virtual thickening flange is common for the vehicles of the line, the asymmetric wear on the wheel flange can be found in the first and fourth shafts of the trailer car. Finally, some suggestions on how to improve the service life of the line are proposed. For example, the proper adjustment of the wheel-rail hardness ratio, the regular reverse operation, the adjustment of the force distribution for the trailer air braking and moter car electric braking, reducing the proportion of the air braking point velocity and other methods to reduce the wheel wear, improve the safe operation of the urban rail vehicle.

Keywords urban rail vehicle; wheel wear; flange height; flange thickness; the comprehensive value of the flang

0 引言

车轮是保证轨道车辆安全运行的关键部件, 对于城市轨道交通而言, 由于列车的启动、加速、制动、过弯非常频繁, 对车轮的寿命影响很大, 引起的车轮缺陷会给安全运营造成隐患^[1]。轮缘是车轮上的重要组成部分, 使车轮能可靠地通过曲线和道岔, 对列车行驶的安全性及稳定性具有重要作用, 轮缘的异常磨耗往往会使正常的轮轨关系发生改变, 降低车辆动力性能和乘车舒适度, 大大增加维修工作量和运营成本^[2]。

近年来, 对城市轨道交通车辆车轮损伤的研究越来越多^[3-6]。王生华^[4]对上海地铁 4 号线车轮的材料、机械性能进行

调研, 通过研究轮轨系统稳定性、环形线路、车轮及轨道硬度匹配以及一系定位刚度等, 提出了解决车轮异常磨耗的一系列解决措施。邱伟明等^[5]分析了广州地铁 3 号线车轮轮缘异常磨耗, 发现该线路车轮主要问题是轮缘厚度过小、同一轴左右轮径超差。郭春晖^[6]介绍了北京地铁 1 号线车轮的异常磨耗情况, 指出该线路 SFM04 型车辆的拖车车轮踏面磨耗相比轮缘磨耗严重, DKZ4 型车辆动车的一轴和四轴轮缘磨耗严重。在上述研究中, 由于线路特点、车型、材料等不同, 车轮的磨耗特征具有随机性, 呈现出不同的磨耗特点, 从车轮轮缘的参数变化角度进行数据分析的研究比较少。

收稿日期: 2013-06-27; 修回日期: 2013-07-20

基金项目: 上海高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金项目 (GJD10010); 上海市教育委员会重点学科建设项目 (J51401); 上海市教育委员会 085 内涵建设项目 (0852011XKZY12); 上海市大学生创新活动计划项目 (CS1110001); 上海工程技术大学高水平项目培育专项 (2012gp36)

作者简介: 王永蓬, 博士, 研究方向为轨道交通车辆结构设计方法与动力学, 电子邮箱: yp_wen@163.com

本文针对某线路的轮缘磨耗问题进行研究,通过长期实际测量,获得了正线运营车轮的轮缘高度、轮缘厚度以及轮缘综合值 3 个参数,利用一系列数据分析方法对轨道交通车辆车轮轮缘数据进行定量研究,从而获得该线路主要车轮的主要磨耗特征,为进一步有针对性地提出提高该线路车轮使用寿命的措施打下坚实的基础。

1 车轮轮缘的关键参数

1.1 轮缘高度

轮缘高度^[7,8]是轮缘的一个重要参数,其作用为保护列车在行驶中的安全性,维护其稳定性,防止列车在过弯及爬坡可能引起的脱轨。

轮缘高度一般用 S_h 表示,正常情况下轮缘高度的磨损往往由过道岔时车轮爬轨造成。在实际车辆运行过程中,轮缘高度的数值大小会出现 3 种情况:轮缘高度数值过小,车辆过弯及上坡时容易脱轨,尤其是当轮缘异常磨损并逐渐锋利后,在轮对通过道岔时,会挤开尖轨而造成脱轨事故;轮缘高度数值过大,即发生“轮缘虚增高”现象,会使车轮较难通过道岔,并且有可能切断鱼尾板螺栓而造成车辆颠覆,轮缘虚增高一般是轮缘踏面磨耗速度不匹配造成的,踏面磨耗远大于轮缘高度磨耗,使轮缘尺测量基点发生偏移,导致轮缘测量点更靠近轮缘根部,从而造成测量轮缘高度数值偏大;同轴两轮的轮缘高度差过大,即轮对的一侧车轮轮缘磨损过大,会影响另一侧车轮与钢轨的安全搭载量,同样可能造成脱轨事故,给行车安全带来一定隐患。

1.2 轮缘厚度

轮缘厚度^[7,9]是另一个重要轮缘参数,其作用主要在于防止列车在行驶过程中出现过大的横向移动,以实现蛇形运动的抑制。

轮缘厚度一般用 S_d 表示,正常情况下当车辆经常通过曲线时会造成轮缘厚度的磨损。在实际车辆运行过程中主要出现过过大、过小两种情况:轮缘厚度数值过小,则轮缘磨损过量,使轮对与钢轨间的导向间隙过大,增加列车在运行时发生的横向移动,引起较剧烈蛇形运动,对列车运行的稳定性、舒适性造成一定影响;轮缘厚度数值过大,即发生“轮缘虚增厚”现象,造成的主要原因和“轮缘虚增高”现象类似,仍然是轮缘踏面磨耗速度不匹配,踏面的异常磨耗带来轮缘厚度增加,造成的直接后果是车辆在曲线运行时车轮与钢轨容易发生“卡死”现象,造成较大的异常转弯噪声。

1.3 轮缘综合值

轮缘综合值^[7,10]是车辆运行安全的一个关键指标,用于判断线路车轮的踏面和轮缘磨损速度是否一致,其定义为滚动圆踏面基准线向下 10mm 引垂线与轮缘内侧有一交点,轮缘顶部向上 2mm 引垂线与轮缘内侧有一交点,这两个交点之间的水平距离即为轮缘综合值。因此,可以将轮缘综合值理解为和轮缘高度有关的轮缘厚度值。

轮缘综合值一般用 Q 表示,轮缘综合值过大,则相比起

轮缘磨耗,踏面磨耗更大;轮缘综合值过小,相比起踏面磨耗,轮缘磨耗则大的多,2 种情况都会使列车安全性下降;此外,如果同轴两轮轮缘综合值一边偏大一边偏小,则轮对一边踏面磨损过大,可能会使列车倾斜运行并最终导致脱轨。

2 关键参数数据分析

2.1 轮缘高度分析

研究数据来自某地铁线路,共 160 列车次,分析线路的轮缘高度 S_h 规定范围为 $26\text{mm} \leq S_h \leq 33\text{mm}$,取

$$|\Delta S_h| = |S_{hL} - S_{hR}| \quad (1)$$

式中, S_{hL} 、 S_{hR} 分别为同轴左边、右边车轮轮缘高, $|\Delta S_h|$ 为车辆同轴左、右车轮的轮缘高度差的绝对值。

据式 (1) 针对所有同轴车轮进行轮缘高度分析,获得 $|\Delta S_h|$ 在不同区段的统计图,如图 1 所示,同轴轮缘高度差较小的范围即 $0\text{mm} < |\Delta S_h| < 1\text{mm}$ 占了绝大部分,总体磨耗量不大。但是需注意具有一定磨耗量的区间共占 19% 之多。

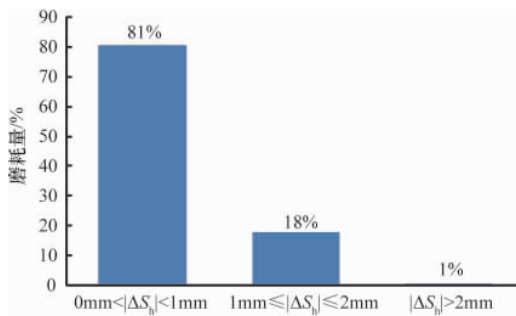


图 1 $|\Delta S_h|$ 各磨耗区段百分比

Fig. 1 Percentage statistics of the wear section for $|\Delta S_h|$

为了进一步了解按照车型分类的磨耗量情况,下面对 $|\Delta S_h| \geq 1\text{mm}$ 进一步分析(图 2)可知,拖车的同轴左右轮缘高度差 $|\Delta S_h| \geq 1\text{mm}$ 占总数据的 50%,由于该线路列车为 6 节编组,其中拖车、不带受电弓动车、带受电弓动车的数量各为 2 辆,因此,综合图 1 和图 2,可以判断该线路拖车的轮对更容易出现同轴两轮的轮缘高度差过大的问题。

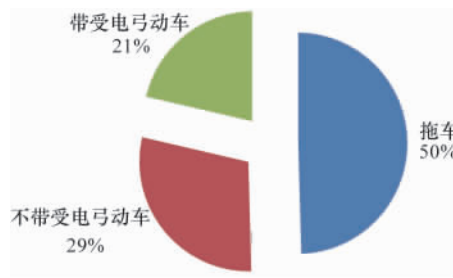


图 2 $|\Delta S_h| \geq 1\text{mm}$ 时按车型统计图

Fig. 2 Vehicle type statistics when $|\Delta S_h| \geq 1\text{mm}$

2.2 轮缘厚度分析

分析线路的轮缘厚度 S_d 规定范围为 $22\text{mm} \leq S_d \leq 33\text{mm}$,标准值为 32mm。轮缘高度分析中, ΔS_h 取的是绝对值,对轮缘是否有虚增加现象无法判断,因此,在轮缘厚度的分析中,取



$$\Delta S_d = S'_d - S_d \quad (2)$$

式中, S'_d 、 S_d 分别为轮缘厚度标准值、轮缘厚度实际值, ΔS_d 为车辆车轮轮缘厚度标准值与实际值的差值, 其值为正表示轮缘厚度的正常磨损, 其值为负数表示轮缘虚增厚。根据式(2)针对所有车轮进行轮缘厚度分析, 获得 ΔS_d 在不同区段的统计图, 如图 3 所示, 该条线路 ΔS_d 大部分集中于 $-1\text{mm} < \Delta S_d < 1\text{mm}$, 其中 $-1\text{mm} < \Delta S_d < 0\text{mm}$ 的部分占到 51.1%, 这说明一半以上的车轮存在虚增厚现象; 但是 ΔS_d 未出现小于 -1mm 数据, 这说明虚厚车轮仍在许可的范围内。此外, 正常少量磨损即 ΔS_d 在 $0\text{mm} \leq \Delta S_d < 1\text{mm}$ 区间仅仅占到 36.9%, 这说明轮缘虚增厚情况比轮缘正常磨损情况严重。

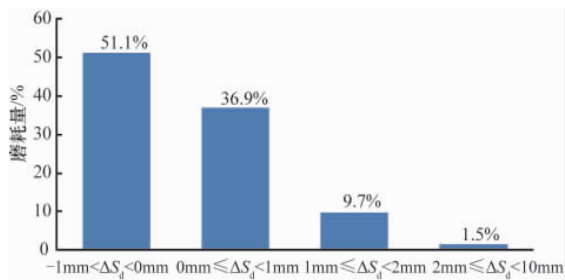


图 3 ΔS_d 各磨损区段百分比统计图

Fig. 3 Percentage statistics of the wear section for ΔS_d

由于 $\Delta S_d \geq 1\text{mm}$ 属于磨损较为严重的区域, 按照车轴和车型分类进行数据分析, 结果见图 4 和图 5。

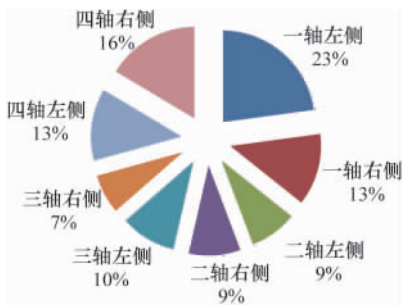


图 4 $\Delta S_d \geq 1\text{mm}$ 数据按车轴统计图

Fig. 4 Shaft statistics when $\Delta S_d \geq 1\text{mm}$

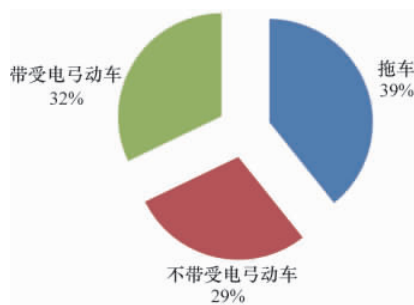


图 5 $\Delta S_d \geq 1\text{mm}$ 数据按车型统计图

Fig. 5 Vehicle type statistics when $\Delta S_d \geq 1\text{mm}$

图 4 为 $\Delta S_d \geq 1\text{mm}$ 数据按照车轴统计图, 由图 4 中可以看出, 一轴和四轴都超过 12.5% 的平均值, 其中一轴左侧磨损最为严重。图 5 为 $\Delta S_d \geq 1\text{mm}$ 数据按照车型统计图, 由图 5 中可以看出, 拖车的轮缘厚度增大情况更容易出现。

综合图 3 至图 5, 可以判断该线路车辆存在一定的轮缘虚增厚问题, 拖车的轮缘正常磨损较动车大, 其中拖车的第一轴和第四轴的轮缘厚度磨损偏大的问题需要引起重视。

2.3 轮缘综合值分析

分析线路的轮缘综合值 Q_r 规定范围为 $6.5\text{mm} \leq Q_r \leq 12.7\text{mm}$, 标准值为 9mm , 取

$$\Delta Q_r = Q'_r - Q_r \quad (3)$$

式中, Q'_r 、 Q_r 分别为轮缘综合值标准值、轮缘综合值实际值, ΔQ_r 为车辆车轮综合值标准值与实际值的差值。

根据式(3), 同轴左、右车轮的 ΔQ_r 存在如下 3 种情况:

- (1) 同轴左、右车轮的 ΔQ_r 均大于 0 的数据, 这类数据表明车轴左、右轮均为轮缘磨损较大。
- (2) 同轴左、右车轮的 ΔQ_r 均小于 0 的数据, 这类数据表明车轴左、右轮均为踏面磨损较大。
- (3) 同轴左、右车轮的 ΔQ_r 一边大于 0 一边小于 0 的数据, 这类数据表明车轴左、右车轮一边轮缘磨损一边踏面磨损, 故称为“轮缘踏面磨损”这些车轮有一定磨损差异, 需重点关注。

对所有同轴车轮数据进行处理, 获得如图 6 所示的车轮情况图, 从图 6 中可知: 75% 的车轮磨损属于踏面磨损, 远大于 6% 的轮缘磨损, 说明该线路车轮普遍踏面磨损较车轮磨损快。同时有 19% 的车轮为轮缘踏面磨损, 这类数据由于左、右车轮磨损差异较大, 出现了轮缘磨损不均匀现象, 尽管这些车轮本身没有超标, 但同轴左右轮磨损差异较大会导致列车倾斜, 运行不稳定, 甚至可能导致车辆脱轨造成不可弥补的严重后果。

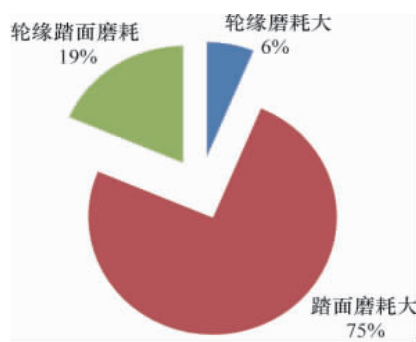


图 6 ΔQ_r 各磨损情况百分比图

Fig. 6 Percentage figure of the wear for ΔQ_r

为了进一步分析该线路轮缘磨损不均匀现象, 取

$$|\Delta Q_r| = |Q_{rl} - Q_{rr}| \quad (4)$$

式中, Q_{rl} 、 Q_{rr} 分别为同轴左边、右边车轮轮缘综合值, $|\Delta Q_r|$ 为车辆同轴左、右车轮的轮缘高度差的绝对值。

根据式(4)针对所有同轴车轮进行轮缘综合值分析, 获得 $|\Delta Q_r|$ 在不同区段的统计图(图 7), 同轴轮缘综合值差较小的 $0\text{mm} < |\Delta Q_r| < 1\text{mm}$ 占 62.2%, 差值稍大的区间 $1\text{mm} \leq |\Delta Q_r| \leq 2\text{mm}$ 占 29.0%, 有 91.2% 的 $|\Delta Q_r|$ 在 2mm 以内, 这说明该线路轮对轮缘磨损不均匀现象并不明显。

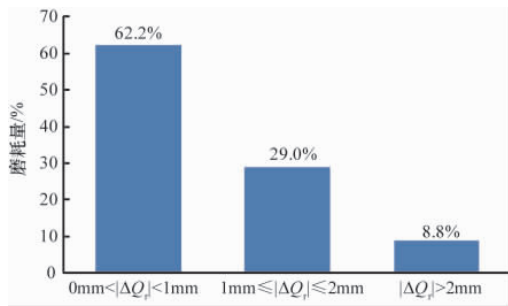


图 7 |ΔQ_r|各磨损区段百分比统计图

Fig. 7 Percentage statistics of the wear section for |ΔQ_r|

当 |ΔQ_r| > 2mm 时, 轮对轮缘磨损较为严重, 这一区域的数据占 8.8%, 按照车轴和车型对该组数据进行进一步分析, 结果见图 8 和图 9。

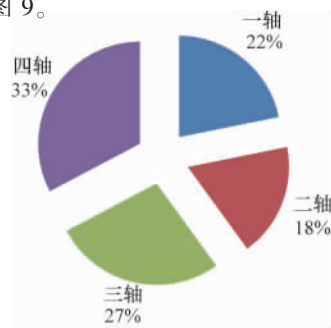


图 8 |ΔQ_r| > 2mm 数据分车轴统计图

Fig. 8 Shaft statistics when |ΔQ_r| > 2mm

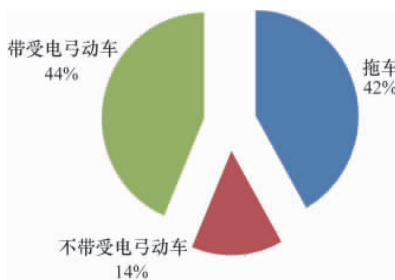


图 9 |ΔQ_r| > 2mm 数据分车型统计图

Fig. 9 Vehicle type statistics when |ΔQ_r| > 2mm

图 8 为 |ΔQ_r| > 2mm 数据按照车轴分类的统计图, 可以看出, 四轴车轮轮缘综合值磨损最严重。

图 9 为 |ΔQ_r| > 2mm 数据按照车型统计图, 可以看出, 拖车、带受电弓的动车存在较为严重的轮缘综合值磨损不均匀现象。

综合图 6 至图 9, 认为该线路踏面较轮缘而言偏软, 属于典型的踏面磨损线路, 从统计学角度发现, 该线路拖车第四轴容易发生左、右车轮磨损不均匀现象。

3 延长车轮寿命的建议

针对该线路的磨损特点, 相应的减少磨损的建议如下:

(1) 该线路踏面磨损情况要远大于轮缘磨损情况。建议对该线路的踏面进行改良, 采用硬度更高的材料, 适当调节轮轨硬度比, 减小踏面磨损情况, 实现踏面和轮缘较为平均的磨损, 从而使车轮更具有经济性。

(2) 轮缘虚增厚较为普遍, 同轴左、右车轮轮缘磨损不均匀现象较严重。建议对车轮单独进行针对性改良减小其虚增厚情况, 并且定期反向运行, 使列车同轴左、右车轮磨损差异减小, 消除不对称磨损, 增加列车运行稳定性。

(3) 拖车磨损量远大于动车。建议对列车制动形式进行改良, 调整拖车空气制动力和动车电制动力的分配比例, 降低空气制动切入点速度, 从而让动车、拖车均匀磨损。

(4) 第四轴车轮存在一定安全隐患。建议格外注意第四轴的疲劳磨损情况, 尤其是拖车的第四轴, 增加检修频率, 发现超标车轮, 及时进行维修以保证行车安全。

4 结论

由于每一条线路具有不同的线路条件、轮轨匹配特性以及车辆结构, 因此, 各条线路的轨道车辆车轮轮缘磨损特征并不相同。本文基于长期测量的车轮轮缘 3 个参数数据进行分析, 获得了该线路的车轮轮缘磨损特征, 判断出该线路属于典型的踏面磨损线路, 存在较普遍的轮缘虚增厚问题, 拖车的轮缘第一轴和第四轴存在一定同轴左、右车轮磨损不均匀现象。这些磨损特征决定了这条线路应采用减少磨损的方法, 从而有的放矢地进行车轮的维修保养工作, 消除车轮存在的安全隐患, 从而保障列车运行的安全。

参考文献 (References)

- [1] 李霞, 温泽峰, 金学松. 地铁车轮踏面异常磨损原因分析[J]. 机械工程学, 2010, 46(16): 60-66.
Li Xia, Wen Zefeng, Jin Xuesong. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(16): 60-66.
- [2] 方宇, 穆华东, 朱祺. 上海地铁 3 号线车轮踏面异常磨损分析[J]. 机电传动, 2010(2): 45-46.
Fang Yu, Mu Huadong, Zhu Qi. Electric Drive for Locomotives, 2010(2): 45-46.
- [3] 文永蓬, 郑颖, 张泽宇, 等. 现代有轨电车混合轮对动力转向架初步设计[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(9): 108-111.
Wen Yongpeng, Zheng Ying, Zhang Zeyu, et al. Urban Mass Transit, 2012, 15(9): 108-111.
- [4] 王生华. 上海地铁 4 号线车轮轮缘异常磨损原因分析及解决措施[J]. 铁道车辆, 2007, 45(6): 32-34.
Wang Shenghua. Rolling Stock, 2007, 45(6): 32-34.
- [5] 邱伟明, 朱永波. 广州地铁三号线车辆轮缘异常磨损原因分析及解决措施[J]. 电力机车与城轨车辆, 2011, 34(4): 80-81.
Qiu Weiming, Zhu Yongbo. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2011, 34(4): 80-81.
- [6] 邹春晖. 北京地铁 1 号线车轮异常磨损分析及其解决措施[J]. 铁道车辆, 2013, 51(1): 40-42.
Wu Chunhui. Rolling Stock, 2013, 51(1): 40-42.
- [7] TB/T 449-2003 机车车辆车轮轮缘踏面外形[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
TB/T 449-2003 Locomotive wheel tread shape[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.
- [8] 李洪, 宗清泉, 吴井冰, 等. 南京地铁列车车轮踏面非正常磨损初析[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(7): 54-57.
Li Hong, Zong Qingquan, Wu Jingbing, et al. Urban Mass Transit, 2007, 10(7): 54-57.
- [9] 宗清泉, 吴井冰, 沈钢. 驾驶模式对轮对异常磨损的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2007, 10(7): 47-48.
Zong Qingquan, Wu Jingbing, Shen Gang. Urban Mass Transit, 2007, 10(7): 47-48.
- [10] 吴井冰. 对南京地铁电客车轮缘综合值(Q_r)的一点思考[J]. 铁道机车车辆, 2008, 28(1): 49-50.
Wu Jingbing. Railway Locomotive & Car, 2008, 28(1): 49-50.

(责任编辑 田恬)