

文章编号: 1000-4750(2017)08-0222-10

# 地铁车轮磨耗对轮轨接触特性及动力学性能的影响

陆文教, 陶功权, 王 鹏, 付青云, 关庆华, 温泽峰

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川, 成都 610031)

**摘 要:** 对某地铁线路轮轨磨耗进行测试, 分析实测型面与 CN60 钢轨匹配的轮轨接触几何关系, 并利用 Kalker 三维弹性体非赫兹滚动接触理论对轮轨接触力学特性进行分析。利用 UM 多体动力学软件建立某 B 型地铁车辆动力学仿真模型, 分析轮轨磨耗对车辆动力学性能及轮轨接触损伤特性的影响。结果表明: 该线路车轮踏面磨耗较均匀, 存在明显轮缘磨耗现象。不同运行里程下实测车轮踏面外形基本相似, 导致车轮磨耗对轮轨接触几何关系、轮轨接触力学特性及车辆动力学性能的影响较小。实测轮轨匹配下的动力学性能略有下降。随着运行里程增大磨耗指数变化不大, 表明车轮磨耗稳定。车轮磨耗后表面疲劳指数大于标准型面, 出现滚动接触疲劳的可能性增大。

**关键词:** 车轮磨耗; 轮轨接触; 动力学仿真; 磨耗指数; 滚动接触疲劳

中图分类号: U211.5 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.03.0161

## INFLUENCE OF WHEEL WEAR ON WHEEL-RAIL CONTACT BEHAVIOR AND DYNAMIC PERFORMANCE OF METRO VEHICLE

LU Wen-jiao, TAO Gong-quan, WANG Peng, FU Qing-yun, GUAN Qing-hua, WEN Ze-feng

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** The wear profiles of wheel-rail of a metro line were investigated. The contact geometry between worn wheel profile and new CN60 profile was analyzed. The wheel-rail contact mechanics such as contact patch area and contact pressure were calculated with Kalker's non-Hertzian theory of three-dimensional elastic bodies in rolling contact. A dynamic model of B-type metro vehicle was implemented in UM, an MBS dynamic software. The influence of wheel wear on metro vehicle dynamic performance and wheel-rail rolling contact fatigue properties was investigated. The results indicated that wheel tread wear was uniformly distributed, while the flange wear was severe. As the measured wheel profiles had almost the same shape in different running mileages, wheel wear had no significant effect on wheel-rail contact geometry, contact mechanics and vehicle dynamic performance. However, vehicle dynamic performance of the worn wheel and rail profiles was worse than that of measured wheel and new CN60 profiles. The values of wheel wear index slightly changed with the increase of running mileage, which indicated that the wheel wear was in a stable stage. The fatigue index of rolling contact surface of worn wheel was larger than that of the standard LM profile. Therefore, the rolling contact fatigue was more likely to occur on worn wheels.

**Key words:** wheel wear; wheel-rail contact; dynamic simulation; wear index; rolling contact fatigue

收稿日期: 2016-03-08; 修改日期: 2016-09-29

基金项目: 教育部博士点基金项目(20130184110005); 牵引动力国家重点实验室自主课题项目(2015TPL\_T01)

通讯作者: 温泽峰(1976—), 男, 广西南宁人, 研究员, 博士, 博导, 从事轮轨关系研究(E-mail: zfwen@home.swjtu.edu.cn).

作者简介: 陆文教(1987—), 男, 广西贵港人, 硕士生, 从事车轮磨耗与车辆动力学研究(E-mail: shilongwj@163.com);

陶功权(1989—), 男, 湖南长沙人, 博士生, 从事轮轨系统及其可靠性研究(E-mail: gq\_tao@163.com);

王 鹏(1990—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士生, 从事高速铁路检测研究(E-mail: 15298285012@163.com);

付青云(1991—), 男, 重庆丰都人, 硕士生, 从事轮轨关系及钢轨打磨研究(E-mail: qingyun.fu@foxmail.com);

关庆华(1981—), 男, 河南浉池人, 讲师, 博士, 从事车辆轨道动力学及轮轨关系研究(E-mail: gqh128@163.com).

近几年来我国各大城市开通运营的地铁线路不断增多,给城市居民的出行带来了极大方便,同时随着城市人口的增长,城市轨道交通的压力也越来越大。载客量大、线路复杂且小半径曲线多、频繁加速减速等特殊条件下,地铁车轮磨耗不断加剧。车轮磨耗对车辆运行安全性、稳定性、平稳性和舒适度等造成不同程度的影响。为保证运营安全,需定期对车轮进行镟修。车轮磨耗加剧使镟轮周期缩短,造成运营维护成本增大。因此,有必要研究车轮磨耗对地铁轮轨接触特性和车辆动力学性能的影响,为车轮镟修提供一定依据。

对车辆动力学性能的研究有试验和仿真手段。试验研究更能真实地反映车辆在线路上运行的实际情况,但耗费大量人力、物力和财力,且受到运营等条件的影响。相反,仿真分析相对来说更容易实现,并能较好地反映车辆的运行状态。黄运华等<sup>[1]</sup>对比了 LM 型和 DIN5573 型踏面对地铁车辆动力学性能的影响,指出 DIN5573 型面运动稳定性较优而曲线通过性能较差,他们在文献[2]中研究新轮和等效锥度分别为 0.3、0.35 的磨耗车轮对某 B 型地铁车辆运动稳定性的影响,并指出临界速度随等效锥度增大而减小。周睿等<sup>[3]</sup>研究了 S1002 型踏面和 LM 型踏面与不同轨底坡匹配对轮轨接触几何关系和车辆动力学性能的影响,指出 S1002 型踏面与 UIC60 钢轨匹配在 1/20 轨底坡条件下对车辆运行平稳性和踏面磨耗损伤有一定优点,但曲线通过性能和运行稳定性明显不足。文献[4—8]研究了车轮凹形磨耗、偏磨、轮径差等对车辆动力学性能的影响。沈钢等<sup>[9]</sup>对比了新轮、磨耗轮与新轨、磨耗轨匹配对车辆曲线通过性能、轮轨磨耗和滚动接触疲劳的影响。张剑等<sup>[10]</sup>对内侧距为 1353 mm 的 LM 型踏面和内侧距为 1358 mm、1360 mm 的 S1002 型踏面与 CN60 钢轨的 3 种轮轨匹配关系的轮轨接触几何、轮轨非赫兹滚动接触、车辆动力学性能等方面进行了研究。李艳等<sup>[11]</sup>研究了车轮型面磨耗对车辆服役性能的影响,指出车轮磨耗后等效锥度大于 0.4,型面下凹深度超过 2 mm 时车辆运行安全性和曲线通过性能明显下降。陶功权等<sup>[12]</sup>从静力学角度分析了不同轨底坡对我国常用于地铁车辆的 LM、S1002 和 DIN5573 型面与 CN60 钢轨匹配的轮轨接触特性的影响,指出对于 LM 型面直线段最优轨底坡为 1/20,而曲线段最优轨底坡为 1/40,对于 S1002 型面最大接触压力等参数随轨底坡减小而减小,最优

轨底坡为 1/40,对于 DIN5573 型面轨底坡在 1/40~1/30 较优。于春广等<sup>[13]</sup>对地铁车轮磨耗进行了跟踪测试,提出相应车轮减磨措施。肖楠等<sup>[14]</sup>分析了地铁车轮磨耗和踏面制动对热应力的影响,并结合机械应力对车轮疲劳失效评价提出新思路和方法。

目前大多数研究主要针对高速动车组或采用新轮新轨状态开展。本文对某地铁线路车轮磨耗进行了大量测试,分析了实测车轮型面与 CN60 钢轨匹配的轮轨接触几何关系和轮轨接触力学特性,建立了某 B 型地铁车辆动力学仿真模型,研究了实测车轮与标准 CN60 轨和实测钢轨匹配的车轮磨耗对车辆的直线运行性能、曲线通过性能、轮轨磨耗和轮轨滚动接触疲劳损伤的影响。

## 1 车轮磨耗对轮轨接触特性的影响

### 1.1 车轮磨耗测试

对某地铁线路不同运行里程的地铁车辆进行了车轮磨耗测试,测试时所有车轮均未进行过镟修。图 1 给出了列车运行里程分别为 10 万公里、15 万公里、20 万公里和 26 万公里的车轮型面测试结果。图中实测车轮型面为整列车 48 个车轮的平均型面,磨耗分布通过实测型面与 LM 标准型面向相减而得到。由于所测试车辆运行线路小半径曲线较多,导致车轮磨耗区域较宽,磨耗主要分布在 -45 mm~45 mm 范围内,并且存在明显轮缘磨耗。不同运行里程下实测车轮型面磨耗区域一致,且磨耗外形基本相似,踏面部分磨耗深度与运行里程之间几乎呈线性关系。

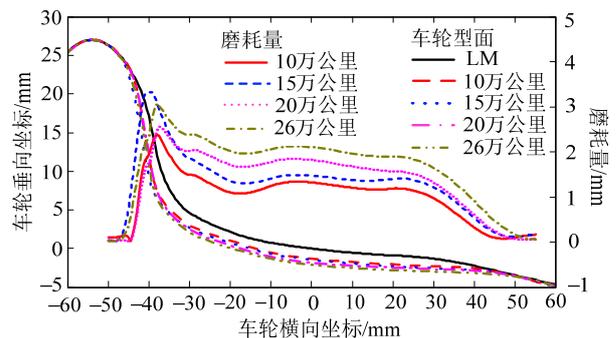


图 1 实测车轮型面及磨耗分布

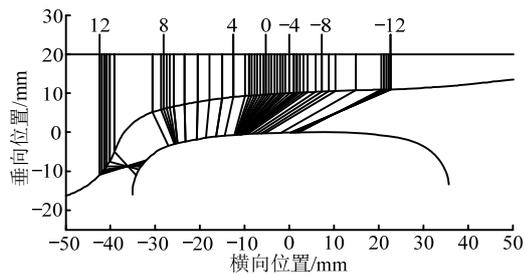
Fig.1 Measured wheel profiles and distribution of wear

### 1.2 轮轨接触几何关系分析

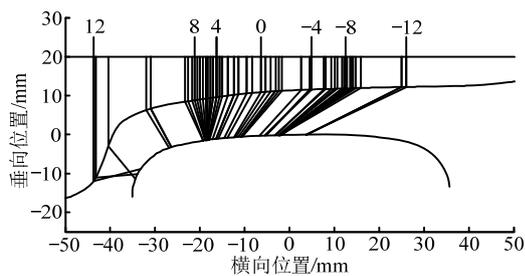
轮轨接触几何关系是分析车辆动力学、轮轨相互作用、轮轨磨耗、轮轨滚动接触疲劳等研究的基础。利用 LM 型面及实测车轮型面与地铁用 CN60

钢轨匹配进行轮轨接触几何分析。计算中车轮名义半径为 420 mm，轮对内侧距为 1353 mm，轨距为 1435 mm，轨底坡为 1/40，未考虑轮对摇头角的影响。考虑了轮对横移量为-12 mm~12 mm 的轮轨接触情形，间隔 0.5 mm 计算一个接触位置。

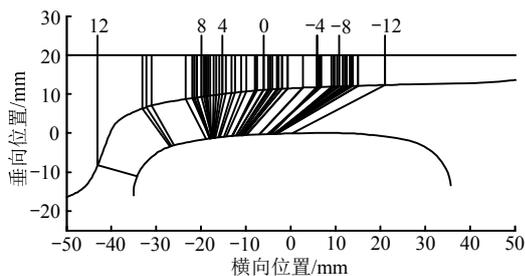
图 2 给出了轮轨接触点对分布，其中钢轨轨顶中心和车轮名义滚动圆均位于横坐标为零处。图中连接车轮与钢轨的细线表示在指定横移量下车轮与钢轨的接触点，车轮上方的数字表示轮对横移量。



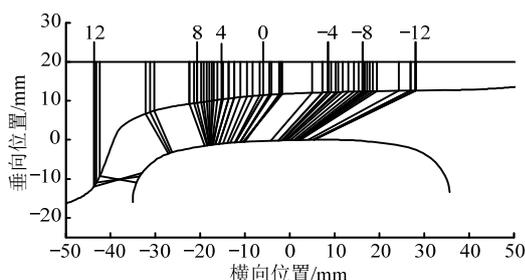
(a) LM 新轮



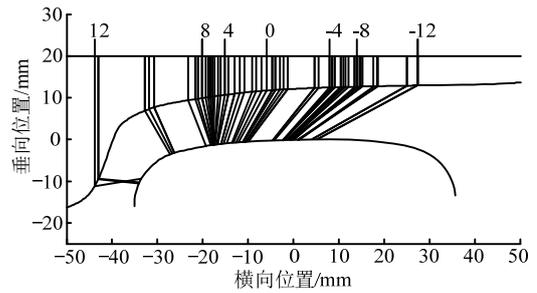
(b) 运行 10 万公里



(c) 运行 15 万公里



(d) 运行 20 万公里



(e) 运行 26 万公里

图 2 轮轨接触点对分布

Fig.2 Distribution of wheel-rail contact points

对于 LM 标准型面，轮轨横移量较小时车轮主要与轨肩 R80 圆弧相接触，随着轮对横移量的增加接触位置逐渐向轨距角移动。由于接触区钢轨曲率半径较小，可能会使得接触斑面积较小从而导致较高的接触压力。由于不同运行里程下车轮踏面部分磨损均匀，且踏面外形基本相似，导致实测型面接触点对分布基本一致。与 LM 标准型面类似，实测型面轮对横移量较小时钢轨接触点同样位于轨肩 R80 圆弧处。此外，实测型面轮缘部分存在明显磨损，轮缘厚度小于 LM 标准型面，使得轮轨游隙增大，从而发生轮缘贴靠时轮对横移量比 LM 标准型面大。

等效锥度是反映轮对恢复对中性能、曲线通过能力和蛇行失稳的关键参数之一<sup>[15]</sup>。等效锥度较大，轮对对中性能较好，利于曲线通过，但直线上运行稳定性会相应降低。图 3 给出 LM 型面及实测型面与 CN60 钢轨匹配的等效锥度，采用简化法计算，即利用车轮滚动圆半径之差半除以轮对横移量得到。由图 3 可知，对于 LM 标准型面，在轮对横移量小于 3.5 mm 时等效锥度几乎不变，约为 0.1。随着轮对横移量的增大等效锥度几乎呈线性增加，在轮对横移量大于 6.5 mm 至轮缘贴靠前等效锥度又几乎不随轮对横移量的变化而变化，约为 0.28。不同运行里程下实测车轮型面的等效锥度变化规律一致，且差别较小。在轮对横移量小于 3 mm 时等效锥度随轮对横移量的增加呈略微增加的变化趋势，在轮对横移量大于 3 mm 至轮缘贴靠前等效锥度随轮对横移量的增大呈略微减小的变化趋势。在轮对横移量小于 5 mm 时实测车轮型面的等效锥度大于 LM 型面，在 0.17~0.27 范围内，而轮对横移量大于 5 mm 时则刚好相反。

图 4 为轮轨接触角随轮对横移量变化结果，横移量为正表示向左移动，为负则向右移动。由图 4

可知, 轮对向左移动时, 不同运行里程下的左侧轮轨接触角随轮对横移量的变化规律与等效锥度相似, 向右移动时变化不明显。

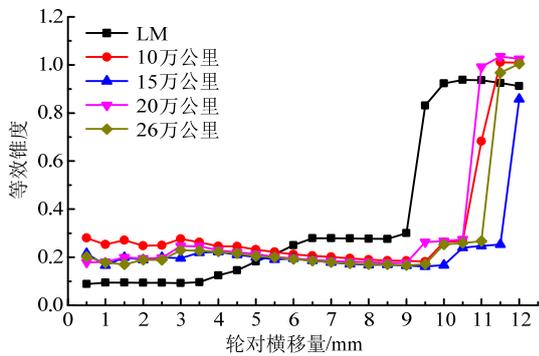


图3 轮对等效锥度

Fig.3 Equivalent conicity of wheelsets

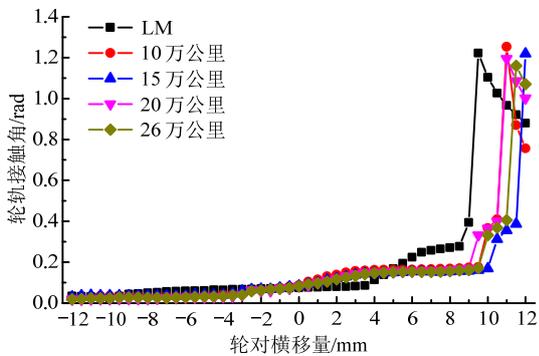


图4 轮轨接触角

Fig.4 Wheel-rail contact angle

### 1.3 轮轨接触力学特性分析

利用 Kalker 三维弹性体非赫兹滚动接触理论对不同轮轨型面匹配下的轮轨接触力学特性进行了分析。计算参数如下: 轴重为 12.6 t, 轮轨材料弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.28, 静摩擦系数为 0.3, 动摩擦系数为 0.29。

图 5 和图 6 分别给出了 LM 型面及实测型面与 CN60 钢轨匹配时接触斑面积和最大法向接触压力随轮对横移量的变化情况。由 5 可知, 对于 LM 型面, 接触斑面积随轮对横移量呈先增大后减小的变化趋势, 在轮对横移量较小时接触斑面积也较小, 约为  $60 \text{ mm}^2$ , 在轮对横移量为 5 mm 时接触斑面积最大, 约为  $96 \text{ mm}^2$ 。对于实测车轮型面, 不同运行里程下接触斑面积随轮对横移量的变化趋势一致, 在轮缘贴靠前接触斑面积随轮对横移量增大先减小再轻微增大。由于不同运行里程下实测型面的轮轨接触几何关系差别较小, 使得其轮轨接触力学特性的差异也较小。在轮对横移量小于 3 mm 时实测型面的接触斑面积明显大于 LM 标准型面, 在

$73 \text{ mm}^2 \sim 82 \text{ mm}^2$  范围内, 但在轮对横移量 3 mm~7 mm 范围则显著低于 LM 标准型面, 在  $55 \text{ mm}^2 \sim 70 \text{ mm}^2$  范围内, 较小的接触斑面积将导致较大的接触压力, 对轮轨磨耗和疲劳产生不利影响。由图 6 可知, 最大法向接触压力随横移量的变化趋势与接触斑面积刚好相反, 在此不再赘述。

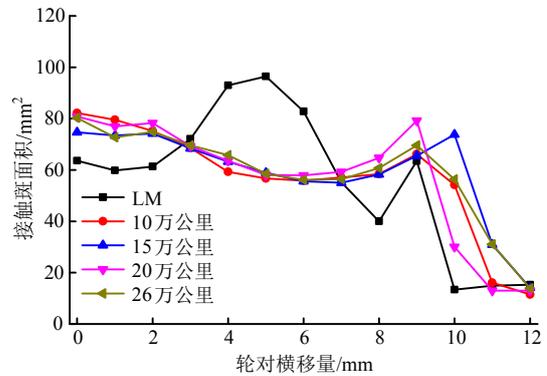


图5 接触斑面积

Fig.5 Area of contact patch

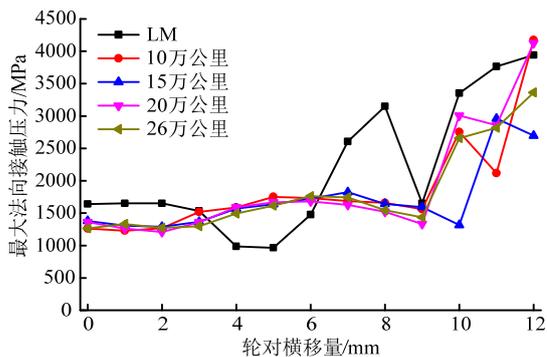


图6 最大法向接触压力

Fig.6 Maximum normal contact force

## 2 车轮磨耗对车辆动力学性能的影响

### 2.1 动力学仿真模型

铁道车辆是一个复杂的多体系统, 车辆各个结构部件之间存在相互作用力和相对运动。这种相互作用力或相对运动往往是复杂的、非线性的, 这是由车辆本身结构、悬挂系统参数非线性特性和复杂的轮轨相互作用关系等因素造成, 在研究所关注的问题时应根据需要做适当的简化。

本文根据某 B 型地铁车辆参数, 利用 UM 多体动力学软件建立了车辆动力学仿真模型。模型中包含 1 个车体、2 个构架、4 位轮对, 共 7 个刚体, 每个刚体考虑 6 个自由度, 即 3 个平动自由度(伸缩、横移、沉浮)和 3 个转动(侧滚、点头、摇头)自由度, 总共 42 个自由度; 一系悬挂包括钢弹簧、垂向减振器和转臂, 二系悬挂包括空气弹簧、横向减振器,

并且考虑了一系垂向减振器、二系横向减振器和横向止挡的非线性特性。地铁车辆整车模型如图 7 所示, 其空车(AW0)和重车(AW3)状态的主要参数如表 1 所示。

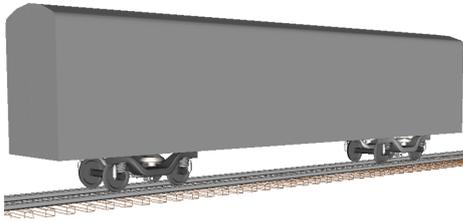


图 7 UM 地铁车辆模型

Fig.7 UM model of metro vehicle

表 1 地铁车辆主要参数

Table 1 Main parameters of metro vehicle

参数	空车	重车
车体质量/t	21.9	41.5
重心高度/m	1.91	1.77
地板高度/m	1.1	1.1
构架质量/kg	1910	1910
轮对质量/kg	1278	1278
车体侧滚转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	68400	75800
车体点头转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	595200	657300
车体摇头转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	560800	656000

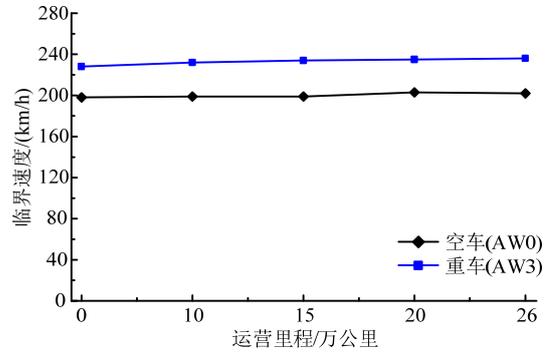
2.2 直线运行性能

车辆直线运行性能主要考察运行稳定性、平稳性和乘坐舒适度。蛇行运动是车辆系统本身的一种自激振动, 直接影响车辆运行的稳定性。车辆系统运行稳定性的评价指标是车辆失稳临界速度<sup>[16]</sup>。在分析车辆蛇行运动临界速度时, 先给一段线路激励, 紧接着运行到平直无激励线路上, 观察轮对横移量收敛与否来确定车辆是否达到蛇行失稳临界状态, 刚好不收敛时对应的速度称为车辆蛇行运动的临界速度。

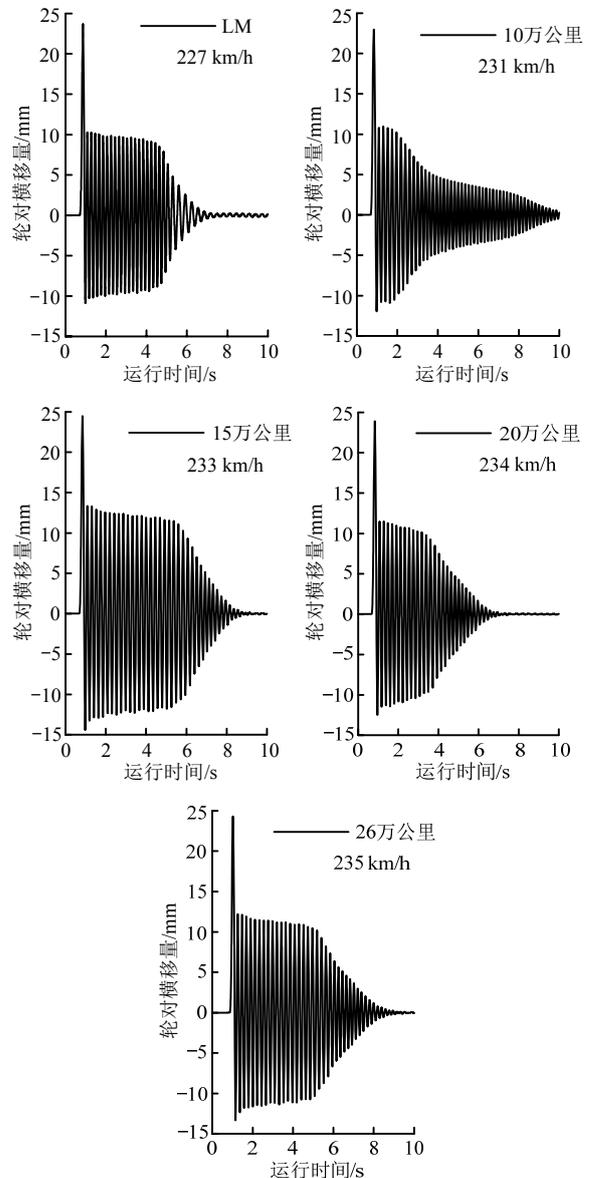
图 8(a)给出了重车和空车蛇行失稳临界速度, 图 8(b)为重车蛇行失稳前后轮对横移运动。本文所建立的地铁车辆的最高运行速度为 120 km/h, 预留 30%的安全余量, 因此其临界速度应高于 156 km/h。由计算结果可知, 重车和空车临界速度分别约为 230 km/h 和 200 km/h, 能满足车辆的稳定运行。此外, 由于不同运行里程下实测车轮踏面磨耗较均匀, 车轮等效锥度变化较小(见图 3), 从而导致临界速度几乎不随车轮的磨耗而变化。

车辆运行平稳性和乘坐舒适度是车辆动力学性能重要指标, 分别决定车辆的运行品质和乘客对振动感受的舒适度, 两者必须满足相关规范要求。

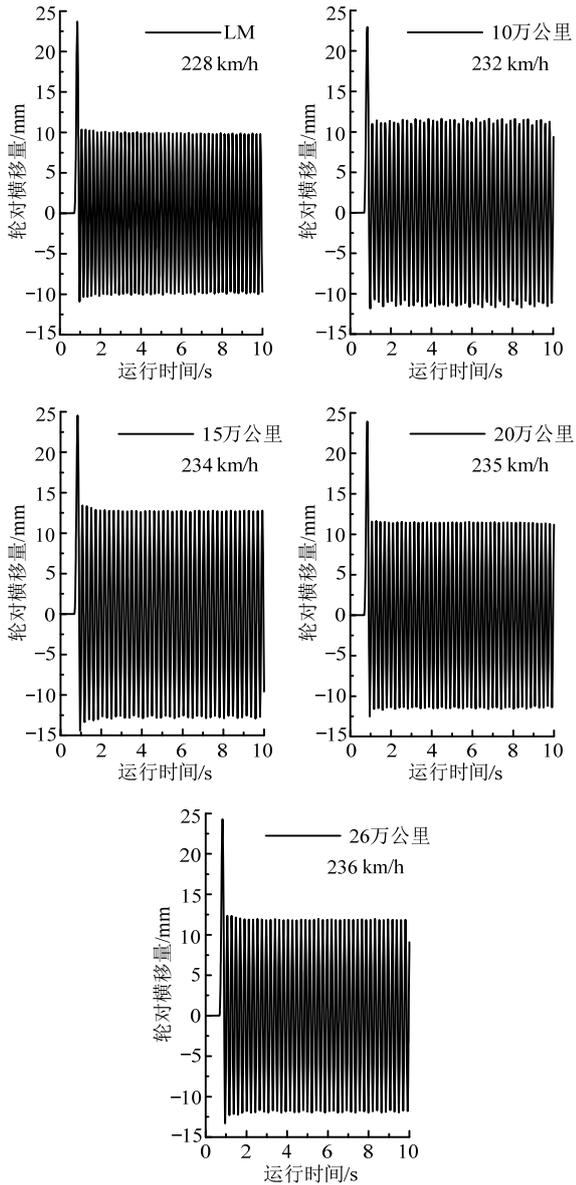
本文根据 GB5599-85《铁道车辆动力学性能评定与试验鉴定规范》(以下简称 GB 5599-85)<sup>[17]</sup>规定选取车体加速度测点, 并按照 Sperling 相关公式计算车辆垂向、横向运行平稳性指标。



(a) 蛇行失稳临界速度



(b) 亚临界状态下的轮对横移量(重车)



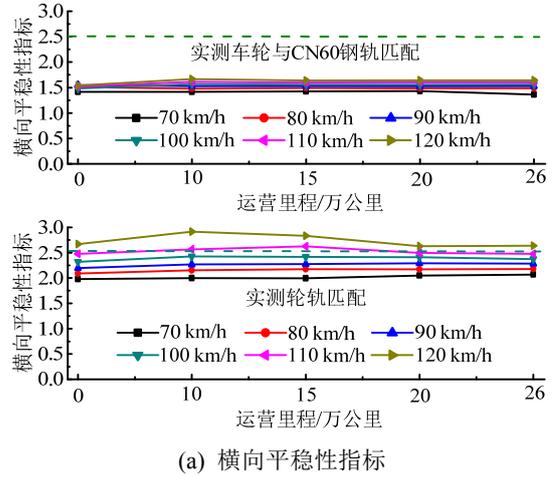
(c) 失稳临界状态下的轮对横移量(重车)

图8 车辆蛇行运动稳定性

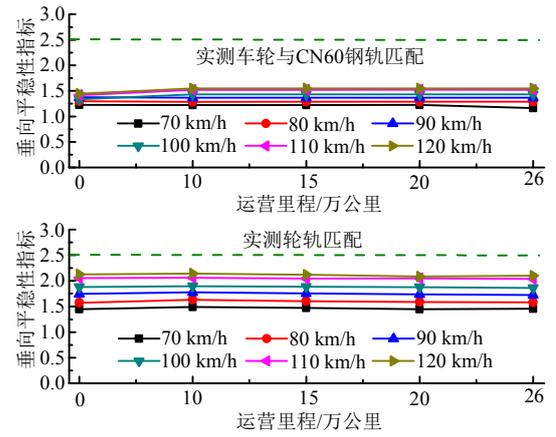
Fig.8 Hunting motion stability of vehicle

图9和图10分别给出了LM标准型面及不同运行里程下实测型面对车辆运行平稳性和乘坐舒适度的影响,计算中车辆速度变化范围为70 km/h~120 km/h,施加轨道不平顺为美国五级谱,该线路正线最高速度为100 km/h。通过计算发现,车辆运行平稳性随速度的增加呈线性增加;实测车轮与CN60钢轨匹配时,所有计算工况下车辆横向和垂向平稳性指标均小于2.5;实测轮轨匹配时,除速度大于100 km/h的横向平稳性大于2.5外,其他速度下横向和垂向平稳性均小于2.5,根据GB 5599-85对我国机车车辆平稳性评定等级的规定,该车在速度不大于100 km/h情况下的运行平稳性为“优”。

此外,车辆运行平稳性几乎不随车辆运行里程的变化而变化,即车轮的磨损几乎不影响车辆的运行平稳性。实测轮轨匹配的车辆运行平稳性指标较实测车轮与标准CN60钢轨匹配约高0.5,即实测轮轨匹配的车辆运行平稳性有所降低。在实测车轮与CN60钢轨匹配情形下,乘坐舒适度指标随车速和车辆运行里程的变化规律与平稳性指标一致,横向



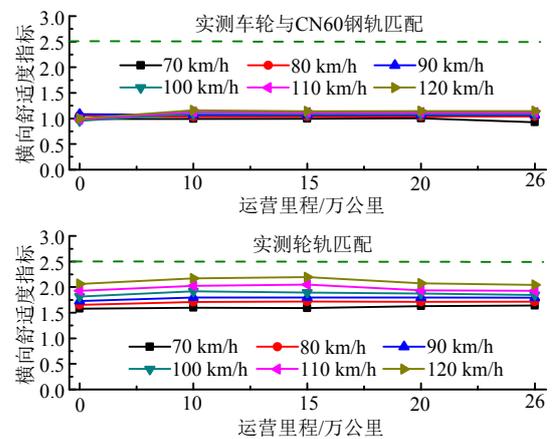
(a) 横向平稳性指标



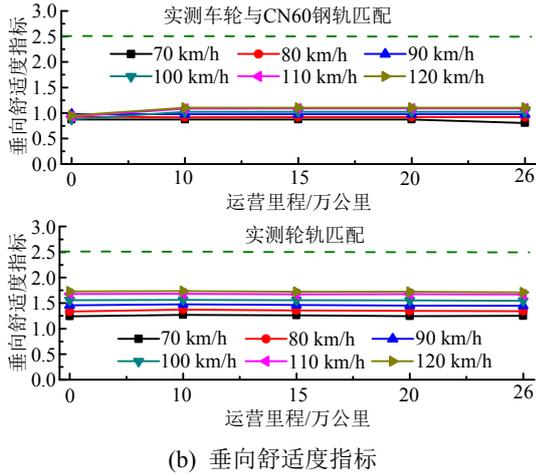
(b) 垂向平稳性指标

图9 平稳性指标

Fig.9 Stability index



(a) 横向舒适度指标



(b) 垂向舒适度指标

图 10 乘坐舒适度指标

和垂向乘坐舒适度指标均介于 0.8~1.2, 为“非常舒适”或“舒适”。这主要是因为车轮磨耗均匀, 车轮磨耗后对轮轨接触几何关系和等效锥度影响较小, 从而对车辆动力学性能影响较小。实测轮轨匹配时, 车辆不同运行里程的乘坐舒适度指标与实测车轮和 CN60 钢轨匹配情形相似, 但乘坐舒适度有所下降。

### 2.3 曲线通过性能

首先简要介绍曲线通过性能计算所采用的线路设置情况。按照《地铁设计规范》(GB 50157-2003)<sup>[18]</sup>中规定, 在正常情况下, 地铁车辆在圆曲线上允许未被平衡横向加速度为  $0.4 \text{ m/s}^2$ , 未被平衡横向加速度的计算公式如下式所示:

$$a_{nc} = \frac{V^2}{R} - g \frac{h}{s} \quad (1)$$

式中:  $a_{nc}$  为未被平衡横向加速度;  $V$  为车辆曲线通过速度;  $R$  为曲线半径;  $g$  为重力加速度( $9.81 \text{ m/s}^2$ );  $h$  为曲线超高;  $s$  为轮对对中时左右轮轨接触点之间的名义距离(1.5 m)。

根据地铁设计规范的要求, 先设置好曲线半径和超高, 再根据允许未被平衡横向加速度为  $0.4 \text{ m/s}^2$  来设置车辆曲线通过速度。根据以上原则所设计的车辆曲线通过计算的线路如表 2 所示。计算车辆曲线通过性能所施加轨道不平顺为美国五级谱, 车辆为重车(AW3)状态。

车辆运行安全性一直是铁路相关部门关心的问题。运行安全性的评价指标有脱轨系数、轮重减载率、轮轨横向力等。本文给出曲线上的脱轨系数、轮重减载率和轮轨横向力, 值得注意的是 GB5599-85 中轮重减载率是在静态或准静态条件下适用, 这

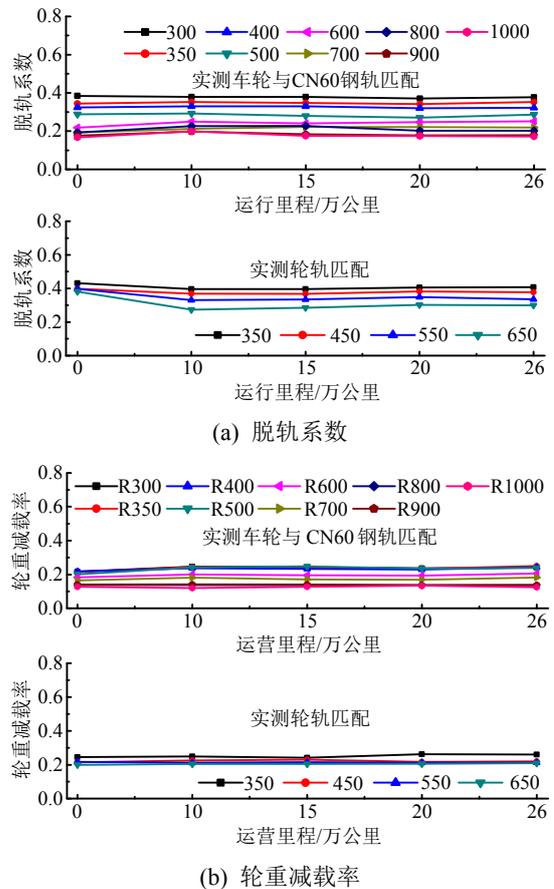
里仅作为参考。

表 2 曲线通过线路设置

Table 2 Configuration of tracks in curves

曲线编号	曲线半径/m	超高/mm	缓和曲线长度/m	圆曲线长度/m	速度/(km/h)
1	300	120	55	190	65
2	350	120	60	180	70
3	400	120	65	170	75
4	500	120	75	150	85
5	600	120	75	150	90
6	700	120	80	140	95
7	800	120	80	140	95
8	900	110	70	160	100
9	1000	100	70	160	100

图 11 给出了两种轮轨匹配下车辆通过不同半径曲线时最大脱轨系数和轮重减载率。由图 11(a)可知, 车轮型面相同时曲线半径越小脱轨系数越大, 曲线半径相同时脱轨系数几乎不随车轮的磨耗而发生变化。由图 11(b)知轮重减载率的变化趋势与脱轨系数相似, 但半径为 400 m、500 m 曲线稍大, 这是过曲线时速度设置的影响。不同计算工况下最大脱轨系数和轮重减载率分别小于 0.43 和 0.33, 均



(a) 脱轨系数

(b) 轮重减载率

图 11 最大脱轨系数和轮重减载率

Fig.11 Maximum derailment index and wheel unloading rate

满足 GB 5599-85 标准中规定的安全限值, 能保证车辆的安全运行。

图 12 给出了车辆通过不同半径曲线时最大轮轨横向力的变化情况。GB 5599-85 标准中规定轮轨横向力应满足  $Q \leq 19 + 0.3P_{st}$ , 式中  $Q/\text{kN}$  为轮轨横向力,  $P_{st}/\text{kN}$  为静轮重。计算中静轮重约为 61.8 kN, 因此轮轨横向力应小于 37.5 kN。通过计算发现, 在实测车轮与标准 CN60 钢轨匹配情形下, 车轮型面相同时最大轮轨横向力随曲线半径减小呈增大趋势, 曲线半径相同时最大轮轨横向力随车轮的磨损变化不明显。实测轮轨匹配与实测车轮与标准 CN60 钢轨匹配情形相似, 轮轨最大横向力有所增大, 但均小于限值 37.5 kN, 属于安全范围。

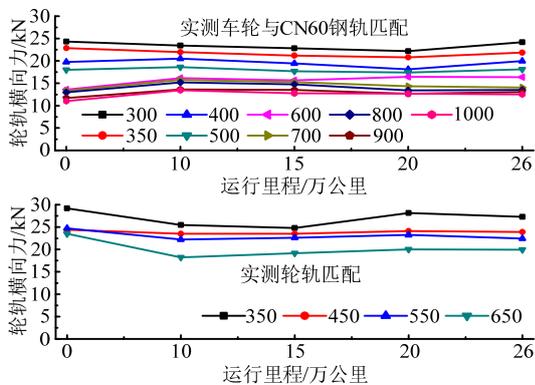


图 12 最大轮轨横向力

Fig.12 Maximum lateral force of leading wheelset

### 3 车轮磨耗对轮轨接触损伤的影响

#### 3.1 对轮轨磨耗的影响

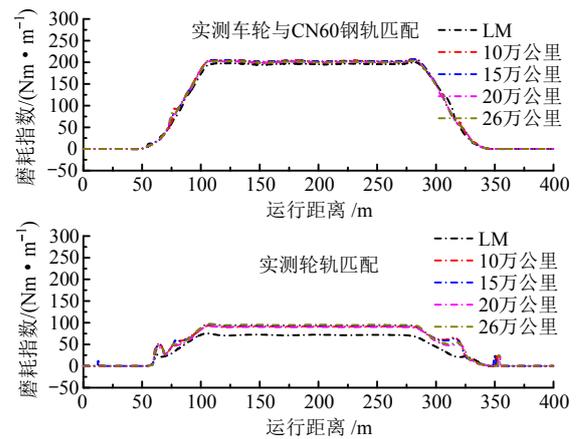
车辆通过小半径曲线时, 由于离心力和重力分量在半径方向上很难达到平衡状态, 车轮容易贴靠外轨侧而对轮轨造成严重磨耗。Ghonem 和 Kalousek<sup>[19]</sup>在预测钢轨表面失效时将接触斑内蠕滑力乘以蠕滑率来表示磨耗的强度, 称为磨耗指数或磨耗数, 如下式:

$$W = T_x \zeta_x + T_y \zeta_y \quad (2)$$

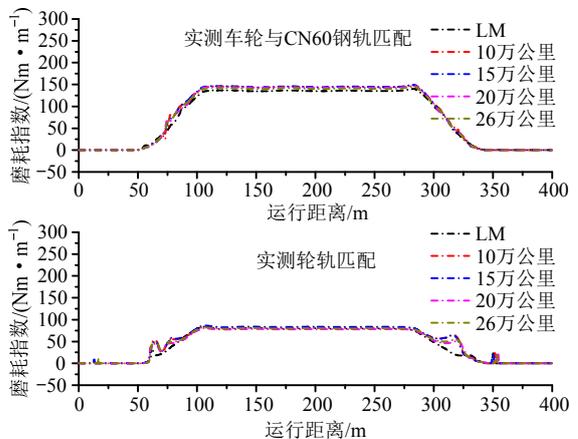
式中:  $T_x$  和  $T_y$  分别为轮轨纵向蠕滑力和横向蠕滑力;  $\zeta_x$  和  $\zeta_y$  分别为轮轨纵向蠕滑率和横向蠕滑率。

本文根据式(2)给出车辆以 70 km/h 速度通过半径为 350 m 曲线的磨耗指数, 如图 13(a)、图 13(b)所示, 计算时不考虑轨道不平顺的影响。由图 13(a)、图 13(b)可知, 实测车轮与标准 CN60 钢轨匹配和实测轮轨匹配的磨耗指数相似, 两种匹配情况下磨耗指数均较新轮略有增大, 但随运营里程变化不明显, 说明实测车轮型面的磨耗处于稳定阶段, 这与

图 1 给出的测试结果相吻合; 当车辆以 70 km/h 速度通过半径为 350 m 曲线时, 实测车轮与 CN60 钢轨匹配下外轨上磨耗指数约为  $210 \text{ Nm} \cdot \text{m}^{-1}$ , 内轨上约为  $150 \text{ Nm} \cdot \text{m}^{-1}$ , 而实测轮轨匹配下分别为  $100 \text{ Nm} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $90 \text{ Nm} \cdot \text{m}^{-1}$ , 表明外轨上轮轨磨耗更严重, 实测轮轨匹配的轮轨磨耗较实测车轮与标准 CN60 匹配的情形明显减轻。这是由于实测轮轨匹配的滚动圆半径差比较大, 有利于车辆通过曲线, 因而轮对摇头角较小, 使得纵向和横向蠕滑较小, 造成相应的蠕滑力较小, 最终使磨耗指数下降。



(a) 外轨车轮磨耗指数



(b) 内轨车轮磨耗指数

图 13 导向轮对磨耗指数

Fig.13 Wear index of leading wheelset

#### 3.2 对轮轨滚动接触疲劳的影响

采用 Ekberg 等<sup>[20]</sup>基于安定图提出的表面疲劳指数来评价轮轨的滚动接触疲劳特性。表面疲劳指数的定义如下式所示:

$$FI_{\text{surf}} = \mu - \frac{2\pi abk}{3F_z} \quad (3)$$

式中:  $a$ 、 $b$  分别为椭圆接触斑的短半轴和长半轴;  $k$  为材料纯剪切屈服强度, 取 303 MPa;  $F_z$  为轮轨

法向力； $\mu$ 为牵引系数，其值由下式确定：

$$\mu = \frac{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}}{F_z} \quad (4)$$

式中， $T_x$ 和 $T_y$ 分别为轮轨纵向蠕滑力和横向蠕滑力。若计算得到的表面疲劳指数 $FI_{\text{surf}}$ 为正值，则认为此时轮轨材料变形将发生棘轮效应，塑性变形会持续累积直至材料失去韧性而发生疲劳裂纹。值得注意的是，该方法是基于安定图提出的，因此不能预测轮轨材料的疲劳寿命。由表面疲劳指数的计算公式(3)可知，轮对较差的导向性能(牵引系数增大)或较糟糕的接触几何关系(接触斑面积小或轮轨法向力大)都会导致表面疲劳指数增大，加速轮轨材料的疲劳破坏。

图14为车辆以70 km/h速度通过半径为350 m曲线，导向轮对内轨和外轨上车轮表面疲劳指数随运行距离的变化图，计算时不考虑轨道不平顺的影响。由图14可知，实测车轮与标准CN60钢轨匹配时，对于外轨侧车轮，圆曲线上不同实测车轮型面

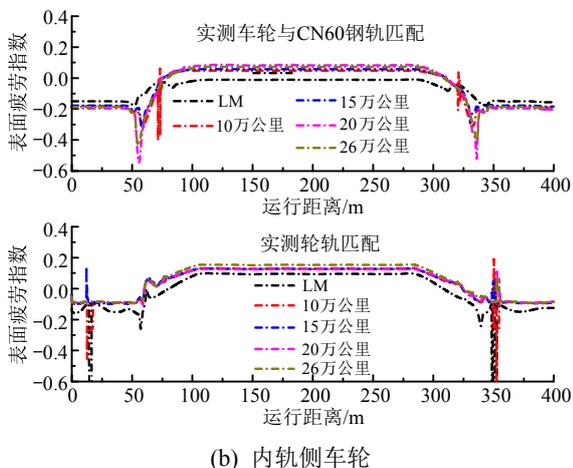
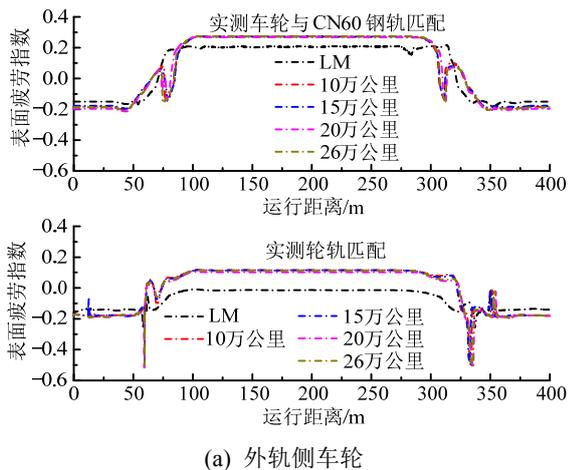


图14 导向轮对车轮表面疲劳指数

Fig.14 Surface fatigue index of leading wheelset

的表面疲劳指数基本相同，且均高于LM标准型面，说明实测车轮型面形成表面疲劳裂纹的可能性要大于LM标准型面。这是由于车辆通过曲线时磨耗车轮的轮轨接触斑面积和轮轨法向力相对LM标准型面均减小，但磨耗车轮的接触斑面积与轮轨法向力的比值(名义接触压力的倒数)较LM标准型面明显减小，而牵引系数大小相当，故由式(3)知磨耗车轮的轮轨接触表面疲劳指数较大；对于内轨侧车轮，LM标准型面的表面疲劳指数小于零，而实测型面表面疲劳指数大于零，说明标准型面不会产生表面疲劳裂纹，但随着车轮的磨耗，轮轨接触状态恶化，容易导致车轮轮缘根部和名义滚动圆外侧形成表面疲劳裂纹，如图15所示。对于实测轮轨匹配情形，车辆不同运行里程下的车轮表面疲劳指数与实测车轮与CN60钢轨匹配相似，但实测轮轨匹配时的外轨侧车轮表面疲劳指数有所降低，内轨侧车轮则增大。这是由于实测轮轨匹配时，外轨侧车轮的名义接触应力降低，而外轨侧车轮则增大，牵引系数相差不大。



图15 车轮踏面疲劳裂纹

Fig.15 Fatigue crack on wheel tread

## 4 结论

本文对某地铁线路轮轨磨耗进行了测试，分析了实测车轮型面与标准CN60钢轨匹配对轮轨接触特性的影响，以及实测车轮型面与标准CN60钢轨和实测钢轨型面匹配对车辆动力学性能和轮轨接触损伤的影响。得出以下结论：

(1) 该线路车轮磨耗较均匀，磨耗主要分布在 $-45\text{ mm} \sim 45\text{ mm}$ 范围内，并且存在明显轮缘磨耗。不同运行里程下实测车轮型面磨耗外形基本相似，踏面部分磨耗深度与运行里程之间几乎呈线性关系。

(2) 由于磨耗后车轮踏面外形基本相似，导致车轮磨耗对轮轨接触几何关系、轮轨接触力学特性以及车辆动力学性能的影响较小。实测轮轨匹配的车辆动力学性能较实测车轮与标准CN60钢轨匹配情形有所降低，但各项指标均较优。

(3) 不同运行里程下车轮磨耗指数几乎不变,说明车轮磨耗稳定,这与现场实测结果一致。车轮磨耗后表面疲劳指数增大,车轮形成表面疲劳裂纹的可能性增大。

对于不同的地铁线路,轮轨磨耗状态和磨耗规律可能有所差异。轮轨磨耗对轮轨接触力学行为及动力学性能的影响应当具体问题具体分析。

#### 参考文献:

- [1] 黄运华,李芾,傅茂海,等.踏面形状对地铁车辆动力学性能的影响[J].机电传动,2007(1):39-41.  
Huang Yunhua, Li Fu, Fu Maohai, et al. Influence of tread shape on dynamic performance of metro vehicles [J]. Electric Drive for Locomotives, 2007(1): 39-41. (in Chinese)
- [2] 黄运华,李芾,傅茂海,等.120 km/h B型地铁车辆动力学性能研究[J].机电传动,2009(5):27-29,43.  
Huang Yunhua, Li Fu, Fu Maohai, et al. Research on dynamic performance of 120 km/h B type metro vehicle [J]. Electric Drive for Locomotives, 2009(5): 27-29, 43. (in Chinese)
- [3] 周睿,罗仁.地铁车辆轮轨匹配关系研究[J].铁道车辆,2010,48(9):1-3,12.  
Zhou Rui, Luo Ren. Research on wheel-rail matching relation of metro vehicles [J]. Rolling Stock, 2010, 48(9): 1-3, 12. (in Chinese)
- [4] 李艳,张卫华,池茂儒,等.车轮踏面外形及轮径差对车辆动力学性能的影响[J].铁道学报,2010,32(1):104-108.  
Li Yan, Zhang Weihua, Chi Maoru, et al. Influence of wheel tread profile and rolling diameter difference on dynamic performance of vehicles [J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(1): 104-108. (in Chinese)
- [5] 黄照伟,崔大宾,杜星,等.车轮偏磨对高速列车直线运行性能的影响[J].铁道学报,2012,35(2):14-20.  
Huang Zhaowei, Cui Dabin, Du Xing, et al. Influence of deviated wear of wheel on performance of high-speed train running on straight tracks [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 35(2): 14-20. (in Chinese)
- [6] 李晓龙,马卫华,罗世辉.踏面下凹磨耗对地铁车辆动力学性能的影响[J].内燃机车,2013:17-20.  
Li Xiaolong, Ma Weihua, Luo Shihui. Influence of tread hollow wear on dynamic performance of metro vehicles [J]. Diesel Locomotive, 2013: 17-20. (in Chinese)
- [7] 池茂儒,张卫华,曾京,等.轮径差对车辆系统稳定性的影响[J].中国铁道科学,2008,29(6):65-69.  
Chi Maoru, Zhang Weihua, Zeng Jing, et al. Influence of wheel-diameter difference on running stability of vehicle system [J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 65-69. (in Chinese)
- [8] 池茂儒,张卫华,曾京,等.轮径差对行车安全性的影响[J].交通运输工程学报,2008,8(5):19-22.  
Chi Maoru, Zhang Weihua, Zeng Jing, et al. Influence of wheel-diameter difference on running security of vehicle system [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(5): 19-22. (in Chinese)
- [9] 沈钢,王捷.轮轨型面对车辆曲线通过性及磨耗影响[J].同济大学学报,2014,42(1):91-96.  
Shen Gang, Wang Jie. Wheel-rail profiles' effects on vehicle curving behaviors and wear [J]. Journal of Tongji University, 2014, 42(1): 91-96. (in Chinese)
- [10] 张剑,宋慧玲,王生武,等.地铁车辆轮轨型面匹配分析[J].大连交通大学学报,2012,33(5):1-6.  
Zhang Jian, Song Huiling, Wang Shengwu, et al. Analysis of matching relationship of metro vehicle wheel and rail profiles [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2012, 33(5): 1-6. (in Chinese)
- [11] 李艳,张卫华,周文祥.车轮型面磨耗对车辆服役性能的影响[J].西南交通大学学报,2010,45(4):549-554.  
Li Yan, Zhang Weihua, Zhou Wenxiang. Influence of wheel profile on dynamic performance of EMU [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(4): 549-554. (in Chinese)
- [12] 陶功权,温泽峰,陆文教,等.不同轨底坡下地铁车辆轮轨型面匹配的静态接触分析[J].铁道学报,2015,37(9):82-89.  
Tao Gongquan, Wen Zefeng, Lu Wenjiao, et al. Static contact analysis of matching relationship of metro vehicle wheel and rail profiles under different rail cant [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(9): 82-89. (in Chinese)
- [13] 于春广,陶功权.地铁车轮磨耗测试及数值仿真[J].工程力学,2016,33(1):201-208,245.  
Yu Chunguang, Tao Gongquan. Analysis of metro wheel wear based on field measurement and numerical simulation [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 201-208, 245. (in Chinese)
- [14] 肖楠,谢基龙,周素霞.地铁车轮踏面制动疲劳强度评价方法及应用[J].工程力学,2010,27(9):234-239.  
Xiao Nan, Xie Jilong, Zhou Suxia. Method to assess fatigue strength of tread braking of metro vehicle wheel and its application [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 234-239. (in Chinese)
- [15] 李霞,温泽峰,金学松.钢轨轨底坡对LM和LM\_A两种轮对接触行为的影响[J].机械工程学报,2008,44(3):64-69.  
Li Xia, Wen Zefeng, Jin Xuesong. Effect of rail cant on the rolling contact behavior of LM and LMA wheelsets [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(3): 64-69. (in Chinese)
- [16] 翟婉明.车辆-轨道耦合动力学[M].第3版.北京:科学出版社,2007:182.  
Zhai Wanming. Vehicle-track coupling dynamics [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2007: 182. (in Chinese)
- [17] GB 5599-85,铁道车辆动力学性能评定与试验鉴定规范[S].北京:中国标准出版社,1986.  
GB 5599-85, Railway vehicle specification for evaluation the dynamic performance and accreditation test [S]. Beijing: China Standard Press, 1986. (in Chinese)
- [18] GB 50157-2003,地铁设计规范[S].北京:中国计划出版社,2003.  
GB 50157-2003, Code for design of metro [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [19] Ghonem H, Kalousek J. A qualitative model to estimate rail surface failure [J]. Wear, 1984, 97(1): 65-81.
- [20] Ekberg A, Kabo E, Andersson H. An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 2002, 25(10): 899-909.