

轮轨型面对车辆曲线通过性及磨耗影响

沈 钢, 王 捷

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

摘要: 对比初始与实测轮轨型面对上海地铁 A 型车的曲线通过性能的影响, 并分析不同的轮轨型面匹配对轮轨磨耗、钢轨波浪形磨耗、接触疲劳的影响。结果表明 4 种不同的轮轨匹配下, 车辆的曲线通过性能都能满足车辆动力学性能要求, 但新车轮运行在已磨损的轨面上时, 曲线通过性能略差, 其轮轨横向力和脱轨系数偏高。初始轮轨匹配在过小半径曲线时其外轨具有较大的自旋功, 且内外轨上高的纵向蠕滑率将导致车轮产生粘滑振动, 易形成波磨, 经过滚动接触疲劳分析, 磨损后的车轮踏面易对小半径曲线外轨造成表面接触疲劳破坏。

关键词: 曲线通过性; 轮轨磨耗; 地铁车辆; 轮轨型面

中图分类号: TP15

文献标志码: A

Wheel/Rail Profiles' Effects on Vehicle Curving Behaviors and Wear

SHEN Gang, WANG Jie

(Urban Mass Transit Railway Research Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The effects of the measured and the designed wheel/rail profiles on Shanghai Metro's curving behaviors, flange wear, rail wear, corrugation, rolling contact fatigue (RCF) were investigated by modeling a nonlinear vehicle model. The results show that curving behaviors in all four wheel/rail matches satisfy the vehicle dynamics requirements, but the curving behaviors in the designed wheel profile and worn rail profile are less satisfactory. Wheel climbing ratio and value of wheel guiding force in this kind of wheel/rail match are higher. The spinning power of LM/UIC60 on outer rail is very high, leading to side wear of outer rail. The high longitudinal creepages on LM/UIC60 which the outer locates on the negative section of creep force-creepage curve and the inner is around saturated point cause stick-slip fluctuation easily, then forming corrugation. Besides, by analyzing the RCF, the worn wheel profile damages the outer rail on sharp curve.

Key words: curving behaviors; wheel/rail wear; metro

vehicle; wheel/rail profiles

轮轨型面作为轮轨关系中的一重要内容, 与车辆动力学性能、轮轨损伤、轮轨疲劳、轮轨噪声有着直接的关系。铁路部门一般通过镟轮来改变车轮型面或者通过钢轨打磨来改变钢轨型面, 虽然对车轮镟修和钢轨打磨方法进行了很多研究^[1-3], 但是镟轮和打磨只是轮轨严重磨损后的修补措施。目前对轮轨目标型面优化设计的研究却越来越多^[4-6], 既能从一开始优化轮轨匹配, 又能为镟轮打磨提供型面参考。然而地铁线路中高频次的轮轨接触使得实际运营中的踏面外形和钢轨轨头外形已经不是初始设计的形状, 特别是曲线段的钢轨型面。磨损后的轮轨匹配导致的轮轨冲撞和轮轨噪声严重影响了车辆运营的平稳性、安全性、环保性, 也引发了内轨波磨^[7-8], 轮轨疲劳^[9-10]等问题。

我国绝大部分地铁线路采用 LM 磨耗型踏面与 60 kg·m⁻¹ 钢轨的轮轨匹配组合。通过对比其他车轮踏面的车辆动力学性能, 城市轨道交通线路采用 LM 磨耗型踏面有利于车辆顺利通过曲线^[11-13], 符合城市轨道交通线路曲线多的特点。实测镟轮前的车轮踏面外形和曲线上磨损较为严重的左右轨轨头外形, 对比 4 种不同轮轨匹配(初始踏面外形 LM(磨耗型踏面)与初始轨头外形 UIC60, 初始踏面外形与磨损轨头外形, 磨损踏面外形与初始轨头外形, 磨损的轮轨外形)下地铁 A 型车的曲线通过性能, 并分析不同轮轨匹配条件下, 轮轨磨耗及接触疲劳等情况。

1 轨道与车辆模型建立

对上海地铁某号线某区段曲线分布情况进行实际调研, 可得到该区段的线路分布情况, 如图 1 所示。该区段线路情况较为复杂, 曲线半径小于 500 m

的路段占全区段的比率大,最小半径达到 350 m,这需要运行在该线路上的地铁车辆有良好的曲线通过性能.选取半径为 350 m 的路段分析地铁 A 型车的曲线通过性能,该路段圆曲线段长 166 m,进出缓和曲线为 60 m,超高为 120 mm.

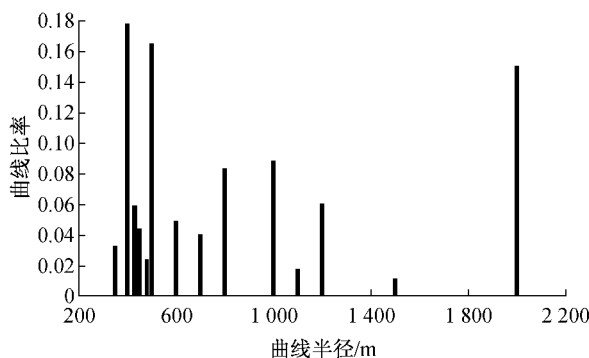


图 1 上海地铁某号线曲线段分布

Fig.1 The curves' radius distribution of Shanghai metro

利用多刚体动力学软件 Gensys 对上海地铁某 A 型车进行建模仿真.车辆为含有抗侧滚拉杆,垂向、横向止挡的非线性模型,具有 132 个自由度.为节省仿真时长,进行长距离的仿真,轨道结构采用移动式轨道模型.轮轨接触几何计算采用基于 Winkler 模型的 GENSYNS 预处理程序 KPF (contact point functions),其使用 Kalker 的 FASTSIM 计算轮轨之间的蠕滑力和蠕滑率.

2 轮轨接触几何分析

利用轮轨型面测量仪 WS2009, RM2008 分别测得初始的车轮踏面外形 LM、初始钢轨轨头外形 UIC60、磨损后一位轮对左右车轮的踏面外形 W142 与曲线半径 350 m 轨道内外轨轨头外形 R800.从图 2 的对比中可知,W142 左右踏面的磨损情况相差不多,轮缘与踏面都有不同程度的磨损量,在名义滚动圆半径位置处,车轮磨损量最大,但从整个踏面上来看,磨损较为均匀.对比 UIC60 标准轨头,R800 的外轨在轨距角处磨损量大,R800 的内轨的磨损集中在轨头面,磨损较为均匀.

图 3 为 4 组不同轮轨外形匹配下的左右车轮滚动圆半径差曲线图.对比 LM/UIC60 的轮径差曲线图,LM/R800 的轮径差曲线图与 LM/UIC60 走势基本相同,但在横移量为 0 mm 处,出现了一个正偏差,由于外轨轨头内侧有磨损,使左轮轨接触点处于钢轨轨顶面位置处,轮对横移量达到 10 mm 处,车轮轮缘开始爬轨;W142/UIC60 匹配下,横移量 0

mm 处,轮径差曲线没有出现偏移,等效锥度小于 LM/UIC60,但在 ± 10 mm 处,轮径差曲线突跳,表示此处轮轨接触点有个较大的跳跃,横移量达到 15 mm 处,车轮轮缘开始爬轨;W142/R800 匹配状态下,轮径差曲线在踏面接触区内较为平滑,在横移量为 0 mm 处,出现了一个正偏差,横移量达到 15 mm 后,车轮轮缘开始爬上钢轨.

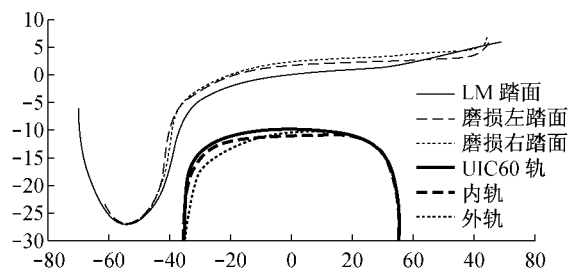


图 2 踏面外形与钢轨轨头外形对比

Fig.2 Wheel/rail profiles comparison

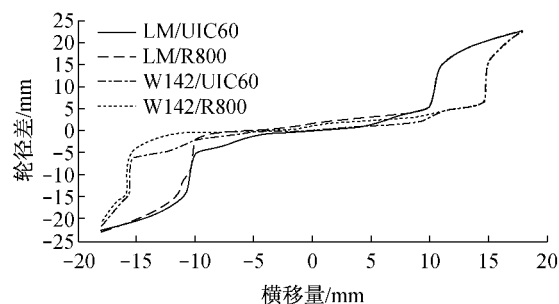


图 3 不同轮轨匹配下左右车轮滚动圆半径差

Fig.3 Comparison of rolling radii differences

3 曲线通过性能分析

图 4 为该 A 型车通过半径为 350 m 的曲线线路仿真得到的曲线通过性能指标,包括脱轨系数,轮对冲角,轮轨横向力,轮重减载率.线路不平顺为理想状态,并假设该车辆 4 组轮对的磨损情况一致,缓和曲线和圆曲线上的钢轨外形一致,仿真车速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

从图中可以看到,4 种不同轮轨匹配下,导向轮轮对对冲角偏转大小相差不多,在圆曲线段,冲角集中在 5.2 mrad 到 5.6 mrad, W142/UIC60 略大. LM/R800 的导向轮轮重减载率略高,但与其他轮轨型面匹配下的轮重减载率大小相差不大. LM/R800 匹配下,导向轮外轮的脱轨系数最高,在进入后缓和曲线最高达到 0.506,稳态下为 0.41 左右. LM/R800 在通过该 350 m 曲线半径时,外车轮踏面区域出现了两点接触状态,导致轮轨间的横向蠕滑率增大,故使

LM/R800 的导向轮轮轨横向力在圆曲线段达到了 30 kN,而其他轮轨型面匹配的轮轨横向力都小于 38 kN,而其他轮轨型面匹配的轮轨横向力都小于

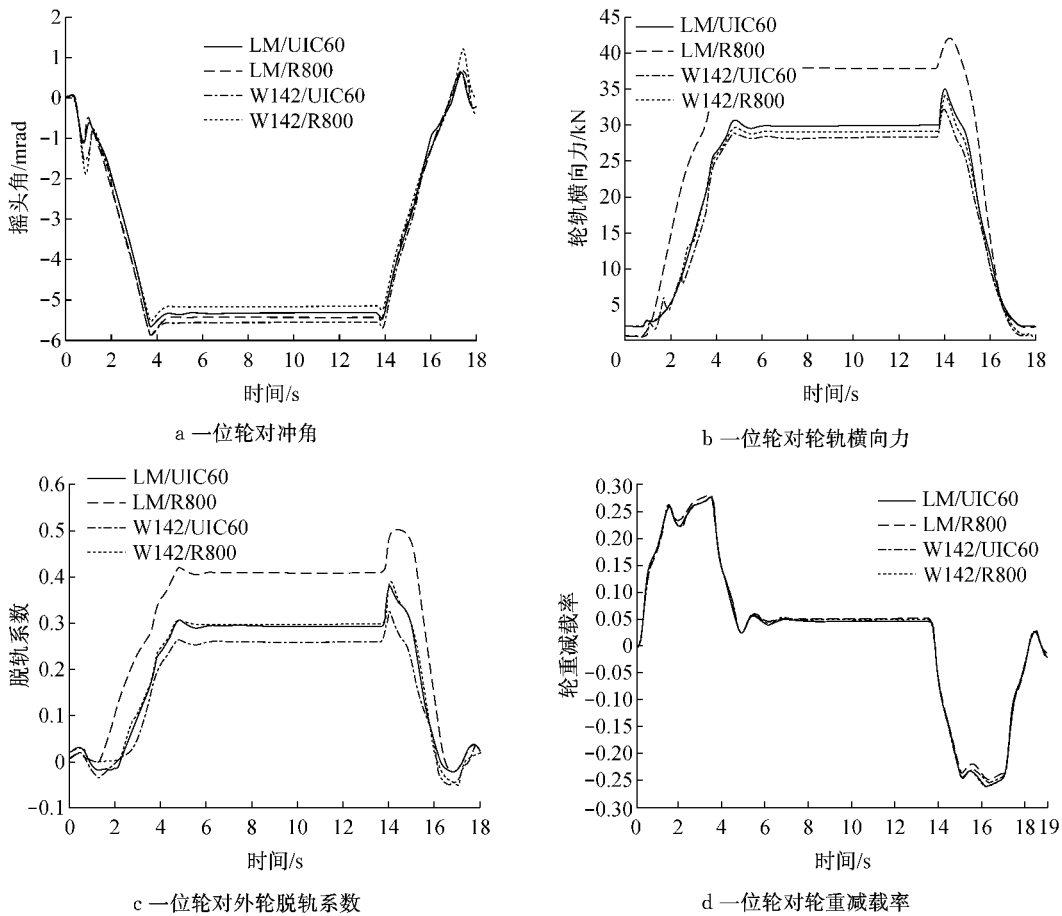


图 4 导向轮对曲线通过性能评价指标
Fig.4 Guiding wheel-sets curving behaviors

4 轮轨滚动接触损伤分析

4.1 轮轨磨耗分析

图 5 为不同轮轨型面匹配下外轮轨自旋功大小. 相比于 LM/R800 和 W142/R800 的自旋功, LM/UIC60 接触时自旋功最大, 在圆曲线段的自旋功达到 $32 \text{ Nm} \cdot \text{m}^{-1}$, 这是因为 LM/UIC60 匹配通过小半径曲线时, 车轮轮缘和钢轨内侧轨头小半径曲线段相接触, 过大的法向角度造成大的自旋蠕滑, 导致自旋功较大, 这使车轮轮缘和外轨内侧轨头产生大的侧磨, 反观 W142/UIC60, 其自旋功最小, 说明此处轮轨型面接近共形. 图 6 为内外轨的磨耗功计算, 可以看到 4 种轮轨匹配在内轨上的磨耗功大小相差不多, 为 $140 \sim 160 \text{ Nm} \cdot \text{m}^{-1}$, 处于可以接受的范围, 而外轨上 LM/UIC60 的磨耗功最小, 但随着型面的破坏, 外轨磨耗功增加, W142/UIC60 已经

达到 $380 \text{ Nm} \cdot \text{m}^{-1}$.

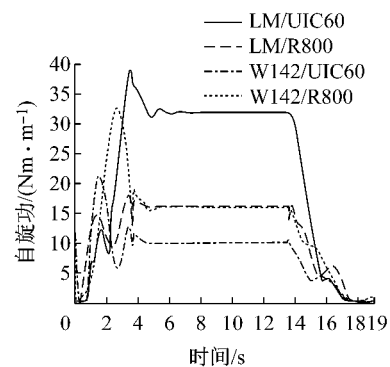


图 5 不同轮轨型面匹配下外轮轨自旋功
Fig.5 Spin powers of outer wheel/rail

4.2 波浪形磨耗初析

利用钢轨波浪形磨耗测量仪在 350 m 半径曲线上获得波浪形磨耗实测数据, 经 1/3 倍频程处理后如图 7. 可以发现该曲线上的波浪形磨耗的特征波长

为 50 mm 左右,波磨深度在 0.1 mm 以上,处于较为严重的情况. 根据 Grassie^[14]对钢轨波浪形磨耗的分类及原因论述,该种波磨类属于车辙型波磨,极易由于轮轨系统的自激振动引起. 在小曲线工况下,轮轨系统中被激起的模态易造成轮轨切向力形成周期性的波动,从而使轮轨接触在粘着状态和滑动状态间相互转换,形成粘滑振动. Clark^[15]和 Brockley^[16]都做了该方面的研究, Sun^[17]在假设轮轨系统处于轮轨蠕滑力-蠕滑率函数曲线负梯度段下,研究钢轨波磨产生的原因, Matsumoto^[18]和 Ishida^[19]分别建立比例模型试验装置和进行现场测试来说明了自激引

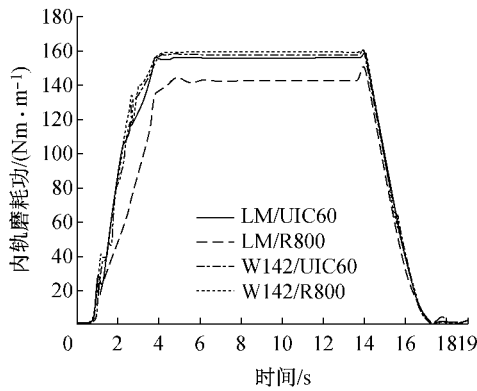
起的粘滑振动对波磨形成的影响.

根据轮轨蠕滑力-蠕滑率函数曲线特性,曲线上有一个蠕滑饱和点,蠕滑饱和点之前的曲线表示车轮与钢轨保持粘着接触状态,在蠕滑饱和点处表示蠕滑力达到最大值,即可以用库伦摩擦力来表示,此时轮轨间会出现滑动趋势,当蠕滑率进一步增大时,蠕滑力下降,轮轨间的接触方式为滑动. 当轮轨接触情况处于这一负梯度段时,微弱的扰动将使轮轨系统出现振荡,轮轨粘着与滑动现象交替出现,导致不均匀磨耗,造成钢轨周期性磨损^[8]. Polach^[20]提出了一种考虑牵引状态的轮轨切向力的计算方法以减小由于轨面第三介质导致轮轨接触面摩擦状态的影响.

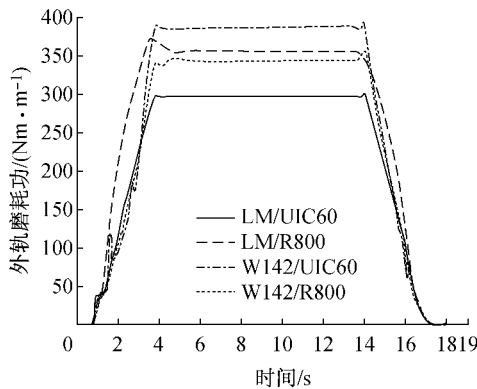
$$F = \frac{2Q\mu}{\pi} \left(\frac{k_A \zeta}{1 + (k_A \zeta)^2} + \arctan(k_S \zeta) \right) \quad (1)$$

式中: Q 为轮重; μ 为摩擦系数; 考虑滑动速度对摩擦系数的影响, $\mu = \mu_0 [(1-A)e^{-B\omega} + A]$, 其中, μ_0 为无滑动条件下轮轨间最大摩擦系数, $A = \mu_\infty / \mu_0$, μ_∞ 为无穷滑动速度下轮轨间的摩擦系数, B 为摩擦衰减指数, ω 为蠕滑速度, $s \cdot m^{-1}$; ζ 为粘着区的切向应力梯度, $\zeta = \frac{2}{3} \cdot \frac{c\pi a^2 b}{Q\mu}$ ^[20], 其中, a, b 分别为接触斑长、短轴, c 为剪切刚度比例常数, $N \cdot m^{-3}$; k_A, k_S 分别为粘着区和滑动区的衰减系数, 且 $k_S \leq k_A \leq 1$.

采用仿真模型中的参数得到 LM/UIC60 匹配条件下分别用 FASTSIM 模型和 Polach 公式(1)计算出的纵向蠕滑率与蠕滑力之间的关系曲线(图 8). 图 9 为 LM/UIC60 匹配下通过 350 m 曲线时内外轨蠕滑率大小. 可以看到外轮轨纵向蠕滑率在圆曲线段接近 0.8%, 已经处于关系曲线负梯度段, 表明该条件下, 外轮轨间处于滑动状态, 而内轮轨纵向蠕滑率大小处于关系曲线饱和点附近, 一旦当有钢轨



a 内轨



b 外轨

图 6 磨耗功

Fig.6 The energy dissipation

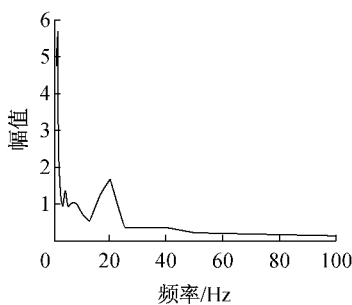


图 7 实测波磨

Fig.7 The measured corrugation on the track

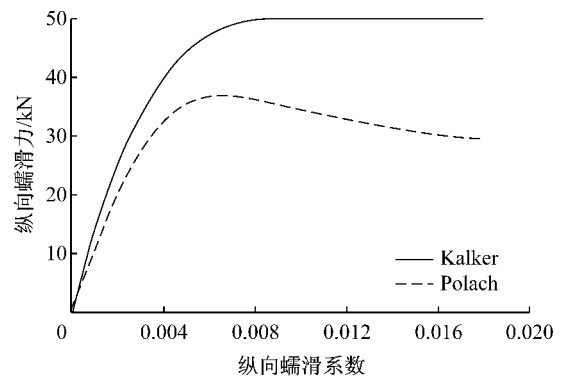


图 8 纵向蠕滑率-蠕滑力关系图

Fig.8 The relationship between longitudinal creepage and longitudinal creep force

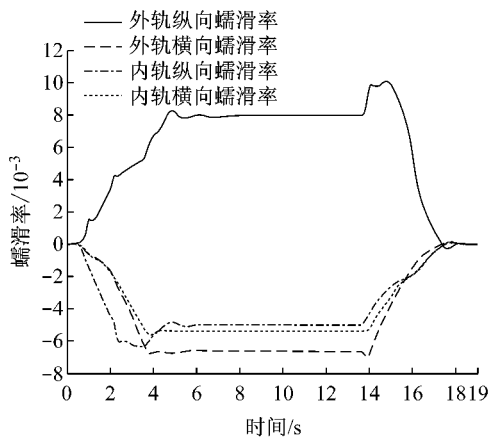


图 9 LM/UIC60 匹配下内外轨蠕滑率

Fig. 9 LM/UIC60 longitudinal and lateral creepages

或车轮不平顺激励时,将迫使车轮在内外钢轨表面产生粘滑振动,导致周期性磨损.车辆通常以外轮缘紧贴钢轨的形式通过小半径曲线,故粘滑振动引起的相对错动更容易发生在内侧的自由端,最终曲线内轨上形成周期性不平顺.

4.3 滚动接触疲劳分析

滚动接触疲劳与车轮剥离,钢轨裂纹,轮轨压溃,波磨,轮缘磨损等有着直接的关系.表面接触疲

劳一般是由低频率循环接触疲劳引起,将造成轮轨表面裂纹,将对行车安全,车辆运行平稳性造成巨大的影响.根据材料特性安定图,由最大赫兹接触应力与摩擦系数、剪切屈服应力之间的关系,可得到表面接触疲劳系数 $F_{L,surf}$ [21]:

$$F_{L,surf} = u - \frac{2\pi abk}{3F_z} \quad (2)$$

式中: F_z 为垂向载荷; k 为剪切屈服应力.

当表面接触疲劳系数 $F_{L,surf} > 0$ 时,认为此时轮轨间易产生塑性变形.利用 GENSYS 集成的滚动接触疲劳分析模块对 4 种不同的轮轨外形匹配情况进行仿真分析.

图 10 为仿真得到的内外轨表面滚动接触疲劳系数,在内轨中,新的车轮踏面和磨损后的车轮踏面对缓和曲线形成滚动接触疲劳破坏,而缓和曲线上的钢轨外形有磨损,反而不利于形成新的塑性变形,在圆曲线段,4 种轮轨外形匹配均不造成表面滚动接触疲劳破坏.在圆曲线段外轨, W142/UIC60, W142/R800 的表面接触疲劳系数均大于 0,说明车轮踏面外形对外轨塑性变形有直接的影响,4 种情况都将造成缓和曲线外轨滚动接触疲劳破坏.

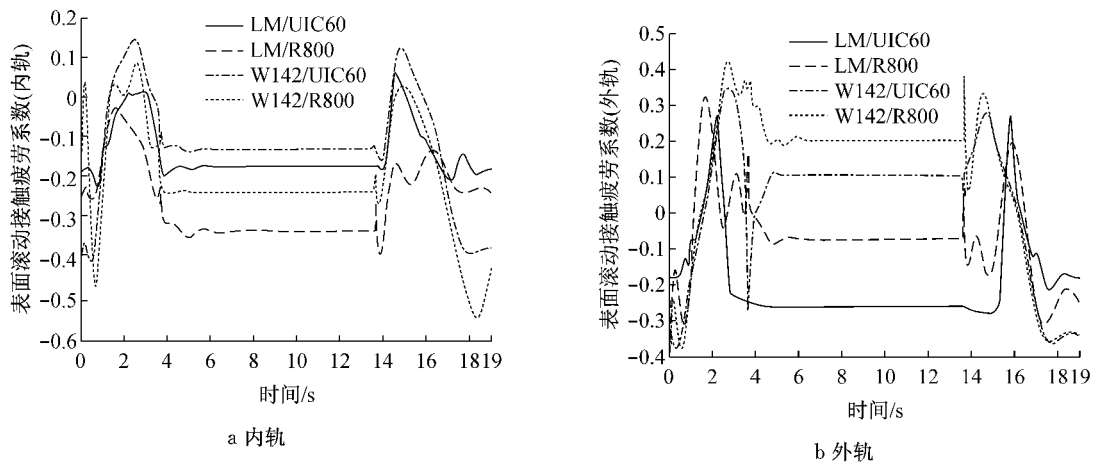


图 10 表面接触疲劳系数

Fig. 10 Surface rolling contact function index

5 结论

本文利用瑞典开发的 GENSYS 软件对上海地铁车辆进行建模仿真,模型中分别采用了设计与实测磨损后的车轮踏面外形和钢轨轨面外形,分析其曲线通过性能及钢轨磨损,波磨,滚动接触疲劳等情况.

(1) 从曲线通过性能来看,4 种轮轨匹配模型仿

真得到的摇头角,轮重减载率,脱轨系数,轮轨横向力指标均符合安全规定,其中 LM 踏面与磨损后的钢轨型面 R800 匹配时,其动力学性能略差.

(2) 经过轮轨磨损分析,外轮轨之间较大的自旋功易导致外轨轨距角处与轮缘内侧的磨损.仿真计算得到 LM/UIC60 匹配下内外轮轨蠕滑率大小,并根据 Polach 模型得到的轮轨蠕滑力-蠕滑率关系特性,可以论证上海地铁小半径曲线内轨波磨很大一部分原因是由于轮轨间的粘滑振动.对比分析了 4

组轮轨匹配条件下的滚动接触疲劳,结果表明磨损后的车轮踏面极易对小半径曲线外轨产生接触疲劳破坏,在缓和曲线段钢轨内轨轨头有少许磨损,有利于减小接触疲劳对钢轨的破坏。

参考文献:

- [1] 许宏,员华,王凌,等. 基于高斯过程的地铁车辆轮对磨损建模及其维修策略优化[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 88. XU Hong, YUAN Hua, WANG Ling, et al. Modeling of metro wheel wear and optimization of the wheel re-profiling strategy based on Gaussian processes [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 88.
- [2] Sroba P, Magel E, Prah F. Getting the most from rail grinding [J]. Railway Track and Structures, 2003, 99(12): 30.
- [3] Lewis R, Olofsson U. Wheel-rail interface handbook [M]. [S. l.]: CRC Press Inc, 2009.
- [4] Shen G, Zhong X B. A design method for wheel profiles according to the rolling radius difference function[J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2011, 225(5): 457.
- [5] Shevtsov I Y, Markine V L, Esveld C. Optimal design of wheel profile for railway vehicles [J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1022.
- [6] Persson I, Nilsson R, Bik U. Use of a genetic algorithm to improve the rail profile on Stockholm underground [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48 (Supplement): 89.
- [7] Torstensson P T, Nielsen J C O. Simulation of dynamic vehicle/track interaction on small radius curves [J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49(11): 1711.
- [8] 沈钢,张学华,郭满鸿. 地铁曲线波浪型磨损的机理分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2011, 39(3): 381. SHEN Gang, ZHANG Xuehua, GUO Manhong. Theoretical study on rail corrugation on curved track of Metro systems [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(3): 381.
- [9] Ekberg A, Kabo E. Fatigue of railway wheels and rails under rolling contact and thermal loading—an overview [J]. Wear, 2005, 258(7/8): 1288.
- [10] Iwnicki S D. The effect of profiles on wheel and rail damage [J]. International Journal of Vehicle Structures and Systems, 2009, 1(4): 99.
- [11] 王开云,翟婉明,蔡成标. 两种类型踏面的车辆与轨道耦合动力学性能比较[J]. 西南交通大学学报, 2002, 37(3): 227. WANG Kaiyun, ZHAI Wangming, CAI Chengbao. Comparison between vehicle-Track coupling dynamic performances of railway vehicles with two types of wheel profiles [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2002, 37(3): 227.
- [12] 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. ZHOU Rui, LUO Ren. Research on wheel-rail matching relation of Metro vehicles [J]. Rolling Stock, 2010, 48(9): 1.
- [13] 黄运华,李芾,傅茂海. 踏面形状对地铁车辆动力学性能的影响[J]. 机车电传动, 2007, (1): 39. HUANG Yunhua, LI Fu, FU Maohai. Influence of tread shape on dynamic performance of Metro Vvehicles [J]. Electric Drive for Locomotives, 2007(1): 39.
- [14] Grassie S L. Rail corrugation: characteristics, causes and treatments [J]. Journal of Rail and Rapid Transit, 2009, 223(6): 581.
- [15] Clark R A, Scott G A, Poole W. Short wave corrugation—an explanation based on stick-slip vibrations [J]. Symposium on Applied Mechanics Rail Transportation, 1988, 92(2): 141.
- [16] Brockley C A. An investigation of rail corrugation using friction-induced vibration theory [J]. Wear, 1988, 128(1): 99.
- [17] Sun Y Q, Simson S. Wagon-track modeling and parametric study on rail corrugation initiation due to wheel stick-slip process on curved track [J]. Wear, 2008, 265(9/10): 1193.
- [18] Matsumoto A, Sato Y, Nakata M, et al. Wheel-rail contact mechanics at full scale on the test stand [J]. Wear, 1996, 191(1/2): 101.
- [19] Ishida M, Moto T, Takikawa M. The effect of lateral creepage force on rail corrugation on low rail at sharp curves [J]. Wear, 2002, 253(1/2): 172.
- [20] Polach O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit [J]. Wear, 2005, 258(7/8): 992.
- [21] 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.