

城市轨道交通车辆车轮失圆的机理研究及仿真分析

沈 钢¹ 王兴远¹ 毛 鑫¹ 楚永萍²

(1. 同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 201804, 上海; 2. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京//第一作者, 教授)

摘 要 城市轨道交通车辆车轮不圆顺(又称“失圆”)引起走行部伤损的问题已被广泛重视。对产生车轮失圆的内在机理进行分析,建立了单个轮和轨的垂向模型。分析了在制动力和牵引力作用下,当轮周存在不圆顺时垂向正压力的变化,以及垂向正压力与轮周纵向蠕滑力之间的关系,获得了轨下刚度阻尼参数、车辆一系垂向悬挂参数对车轮失圆的影响。研究表明:与车辆参数相比,轨下参数对车轮不圆顺发展的影响更大,并起主导作用。轨下参数趋向刚性将会抑制车轮异常磨耗,使车轮圆顺;轨下参数趋向弹性,将会进一步恶化和加速车轮的失圆。

关键词 城市轨道交通; 车辆; 车轮失圆; 多边形磨耗

中图分类号 U260.331⁺.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.07.017

Key words urban rail transit; vehicle; wheel unroundness; polygonal wear

First-author's address Institute of Rail Transit, Tongji University, 201804, Shanghai, China

城市轨道交通发展至今,人们越来越关心其振动和噪声对环境的影响,但由于多种原因,城市轨道交通产生的振动在持续加剧。其中,除了钢轨的波浪型磨耗外,城市轨道交通车辆车轮的失圆(又可称为“不圆顺”或“多边形磨耗”)对车辆及轨道的破坏也相当严重^[1]。为此,本文对车轮失圆的轮轨相互作用进行了探讨性研究,期望获得其内在的机理和影响因素,为改善和解决这个问题做铺垫。

Mechanism Study and Simulation Analysis of Wheel Unroundness for Urban Rail Transit Vehicle

SHEN Gang, WANG Xingyuan, MAO Xin, CHU Yongping

Abstract The problem that the wheel unroundness of urban rail transit vehicle causes damage to running parts has been widely recognized. The internal mechanism of wheel unroundness is analyzed, and a vertical model of single wheel and rail is established. Under the action of braking force and traction force, the change of the vertical positive pressure when the wheel circumference is out of shape, the relationship between the vertical positive pressure and the longitudinal creep force of the wheel circumference are analyzed. The stiffness and damping parameters under the rail, and the effect of vehicle primary vertical suspension parameters on wheel unroundness are obtained. Research shows that compared with vehicle parameters, under-rail parameters have a greater impact on the development of wheel unroundness and play a leading role. When the parameters under the rail tend to be rigid, abnormal wear of the wheel will be restrained and the wheel will be round and smooth. When the parameters under the rail tend to be elastic, the unroundness of the wheels will be further aggravated and accelerated.

1 城市轨道交通车辆车轮不圆的情况分析

图1为某地铁车辆转向架测试车轮的不圆廓形(以5号车为例),可见每个轮的廓形均以低阶为主,偏心的幅值大于多边形高阶的幅值。

图2为该实测车辆的车轮失圆粗糙度分析结果,参照ISO 3095—2013《铁路·声学设施·有轨车辆噪声粗糙度标准》^[2],各分图中基于该标准的粗糙度等级限制值已用“ISO 3095”标注,用以与实测得到的粗糙度进行对比。由图2可见,3位轮的粗糙度最大。

图3为该实测车辆因车轮失圆引起的振动信号经由傅里叶变换(FFT)得到的分析结果,可见3号轴箱的振动最大,其在44.4 Hz时的幅值达到0.064。

2 城市轨道交通轮轨垂向局部细化分析模型

为突出主要的研究要素,本文建立了轮轨垂向动态模型,并对城市轨道交通车辆作如下假定^[3-4]:
① 所有刚度和阻尼参数呈线性;② 钢轨平顺;③ 车轮和钢轨在接触区的弹性要远大于一系悬挂和轨

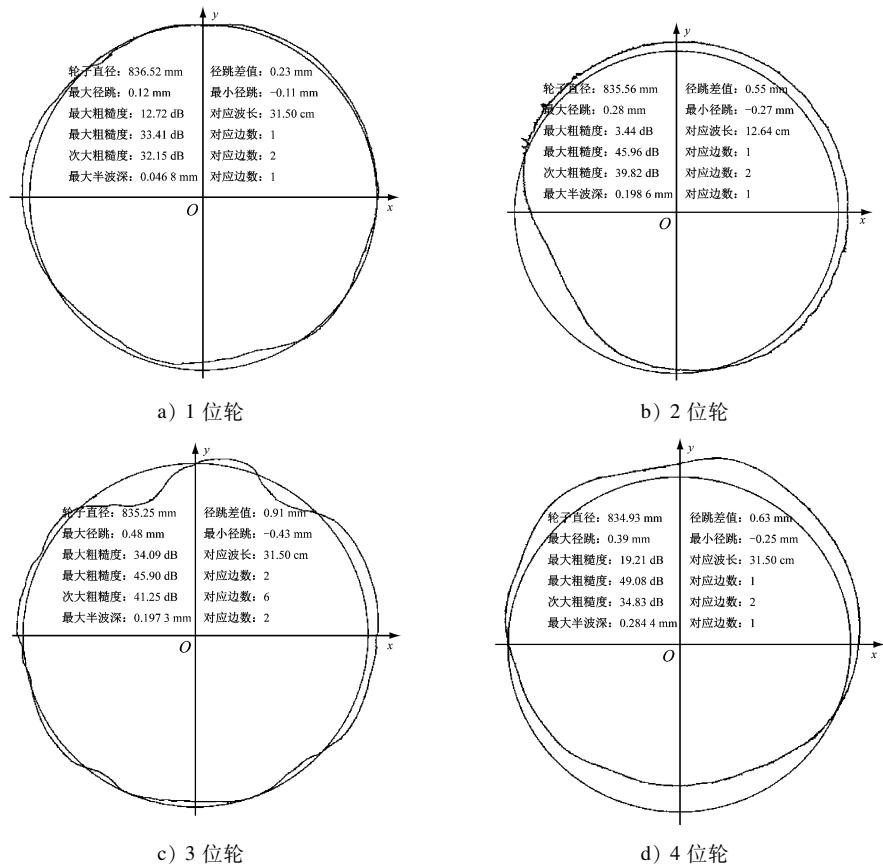


图 1 实测某地铁车辆的车轮不圆廓形截图

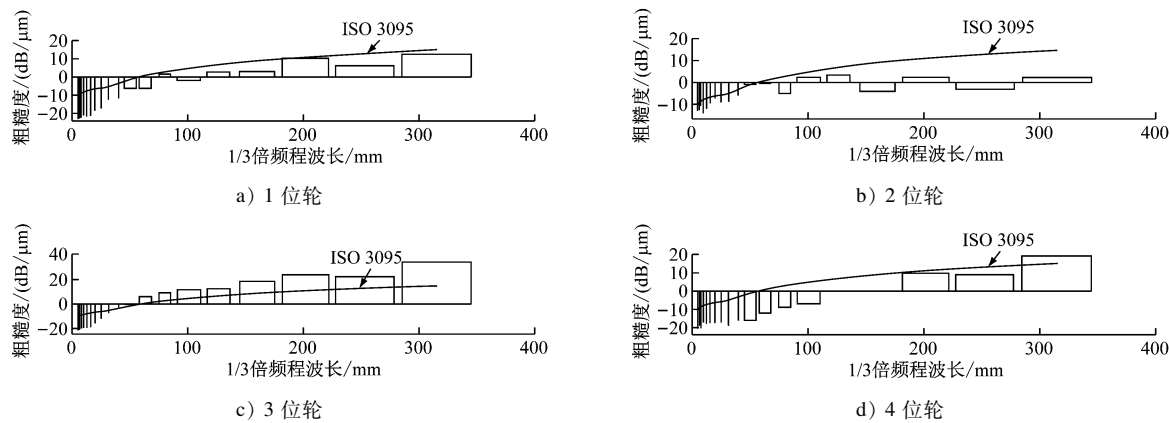


图 2 实测某地铁车辆的车轮失圆粗糙度分析截图

下垫板的弹性,接触点无垂向弹性变形和塑性变形;④ 横向轮轨蠕滑磨损均匀,不计入对周期性不圆的影响;⑤ 仅考虑车轮的轮周向失圆缺陷;⑥ 考虑车轮在纵向制动力和牵引力作用下的纵向蠕滑磨损。

车轮失圆的机理研究的重点^[5-6] 在于分析当轮周向存在周期性或局部不顺圆时,轮轨的垂向作用力和轮轨的纵向蠕滑磨损在轮周向的变化规律对已有失圆状态的影响,以及轮轨接触区上下的刚度

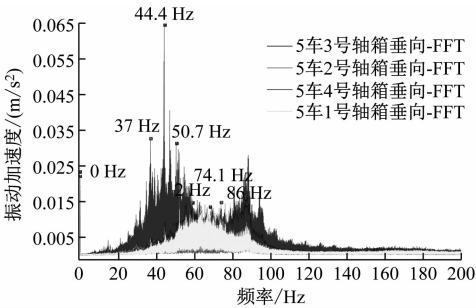
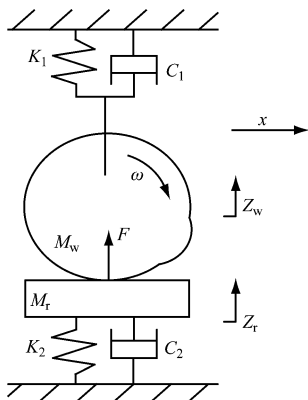


图 3 实测某地铁车辆因车轮不圆引起的振动加速度谱

和阻尼对影响趋势的发展起到的作用。

包含轨下刚度的单自由度(轮轨不分离)车轮通用模型如图4所示,其中的凸起部分为不圆示意。



注: M_w ——车轮质量; M_r ——钢轨等效质量; C_1 ——系悬挂阻尼; C_2 ——轨下悬挂阻尼; K_1 ——系悬挂刚度; K_2 ——轨下悬挂刚度; Z_w ——车轮垂向位移; Z_r ——钢轨垂向位移; x ——车轮平动方向(纵向); ω ——转动角速度。

图4 单自由度轮轨垂向耦合振动模型

以系统静平衡位置为随体坐标系原点进行建模(这样可以忽略重力等静平衡力),根据牛顿力学平衡方程,有:

$$\begin{cases} M_w \ddot{Z}_w + C_1 \dot{Z}_w + K_1 Z_w = \Delta F \\ M_r \ddot{Z}_r + C_2 \dot{Z}_r + K_2 Z_r = -\Delta F \end{cases} \quad (1)$$

式中:

ΔF ——轮轨间动态附加法向力。

假定车轮具有任意形式的失圆,且接触点处车轮失圆随时间的变化函数为 $r=r(t)$,则有:

$$Z_w = Z_r + r(t) \quad (2)$$

将式(1)上下相加,可得:

$$M_w \ddot{Z}_w + M_r \ddot{Z}_r + C_1 \dot{Z}_w + C_2 \dot{Z}_r + K_1 Z_w + K_2 Z_r = 0 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可得:

$$M_w \ddot{Z}_w + M_r (\ddot{Z}_w - \ddot{r}) + C_1 \dot{Z}_w + C_2 (\dot{Z}_w - \dot{r}) + K_1 Z_w + K_2 (Z_w - r) = 0 \quad (4)$$

将式(4)移项变换后可得:

$$(M_w + M_r) \ddot{Z}_w + (C_1 + C_2) \dot{Z}_w + (K_1 + K_2) Z_w = M_r \ddot{r} + C_2 \dot{r} + K_2 r \quad (5)$$

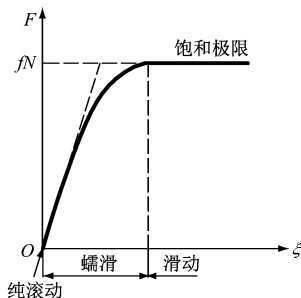
根据式(5)可以得到车轮的垂向振动规律,反代回式(1),可以得到 ΔF 的计算式为:

$$\Delta F = M_w \ddot{Z}_w + C_1 \dot{Z}_w + K_1 Z_w \quad (6)$$

轮轨间的实际法向力除了 ΔF 外,还需要加上轮轨间的(轴重)静平衡法向力 F_0 。

如图5所示,轮轨间的蠕滑率-蠕滑力关系由线性段和饱和段组成。如图6所示,在不同的正压力

下,轮轨间的蠕滑率-蠕滑力关系曲线有所不同。



注: ξ ——蠕滑率; F ——蠕滑力; f ——滑动摩擦系数; N ——正压力。

图5 轮轨间的蠕滑率-蠕滑力关系

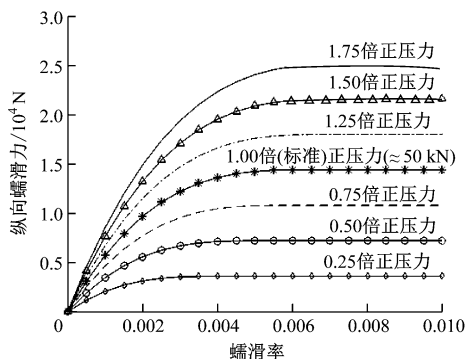


图6 不同正压力下轮轨间的蠕滑率-蠕滑力关系曲线

由此轮轨摩擦功率 P_r 的计算式为^[7]:

$$P_r = \xi_x T_x v \quad (7)$$

式中:

ξ_x ——纵向蠕滑率;

T_x ——纵向蠕滑力;

v ——车轮的前进速度。

车轮每滚过1圈,接触点处的轮径损失量 Δr 的计算式为^[8]:

$$\Delta r = k P_r / (\rho b v) \quad (8)$$

式中:

k ——磨耗系数,一般取 $7 \times 10^{-10} \sim 20 \times 10^{-10}$;

ρ ——车轮的材料密度;

b ——接触斑沿轴向的半径。

考虑到车轮滚过1圈产生的磨耗量非常小,可以将每 n 圈作为1个周期来计算车轮的磨耗,即每间隔 n 圈更新1次车轮轮径,从而得到车轮不圆的变化规律^[9]。

3 轮周磨耗规律的计算机仿真

图7为采用MATLAB/Simulink软件得到的仿真模型框图截图。图8为理想化的6阶正弦状态下的失圆车轮的廓形,其中车轮周向的径跳幅值为

0.2 mm,“参考基准”为车轮正常磨损的标准圆形廓形;“200 倍不圆”表示车轮的不圆在径向方向放大了 200 倍^[10]。

形;“200 倍不圆”表示车轮的不圆在径向方向放大

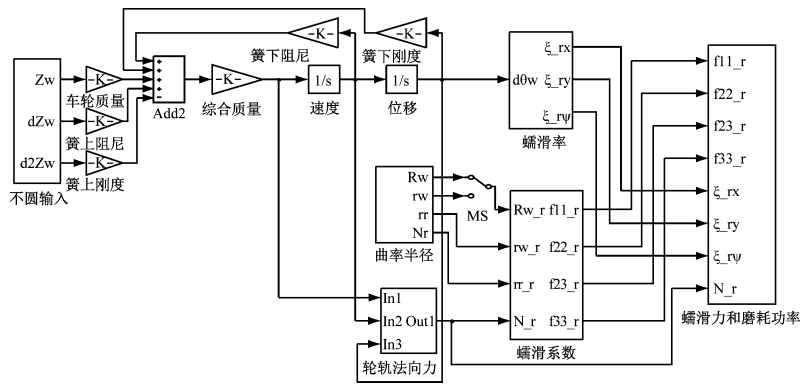
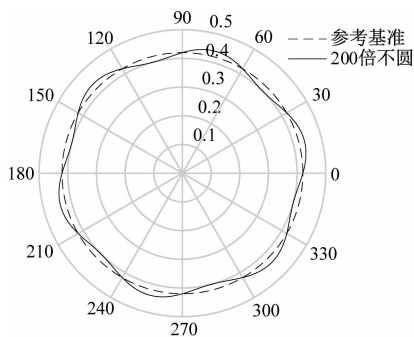
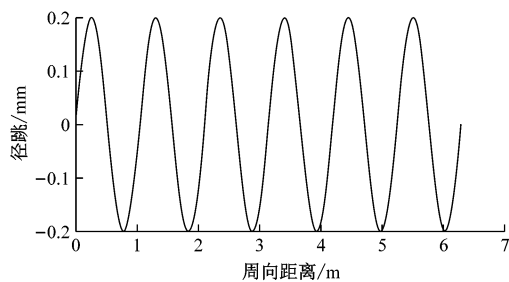


图 7 采用 Simulink 软件的仿真模型框图截图



a) 正弦不圆车轮廓形示意图



b) 正弦不圆车轮周向径跳示意图

图 8 正弦不圆车轮廓形及周向径跳示意图

当假定轨下完全刚性时,车轮每转动 1 圈,轮轨间法向力、蠕滑率和磨损功率的变化情况分别如图 9~11 所示。其中,“ $1/10^6$ 正压力”表示将正压力数值缩小至真实值的 $1/10^6$,以方便在图中显示。从图 9~11 可以看出,凸点(不圆顺的波峰)的法向力大于凹点(不圆顺的波谷)的法向力,凸点的蠕滑率大于凹点的蠕滑率,凸点的磨损功率也大于凹点的磨损功率,因此最终将使车轮变圆顺。

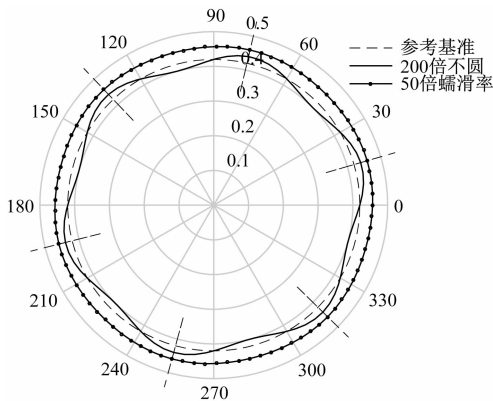


图 10 轨下完全刚性时的蠕滑率变化

考虑轨下弹性情况时^[11],因轨下刚度远大于一系悬挂刚度,而轨下阻尼通常较小,由此结合实际情况,取轨下刚度为 40 MN/m,轨下阻尼为 1 000 Ns/m。车轮每转动 1 圈,轮轨间法向力、蠕滑率和磨损功率的变化情况分别如图 12~14 所示。由图 12~14 可以看出,凸点的法向力小于凹点的法向力,凸点的蠕滑率小于凹点的蠕滑率,凸点的磨损

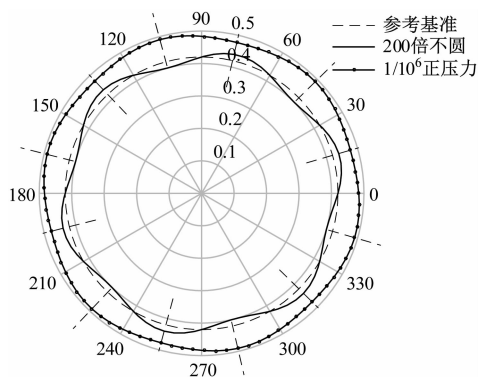


图 9 轨下完全刚性时的法向力变化

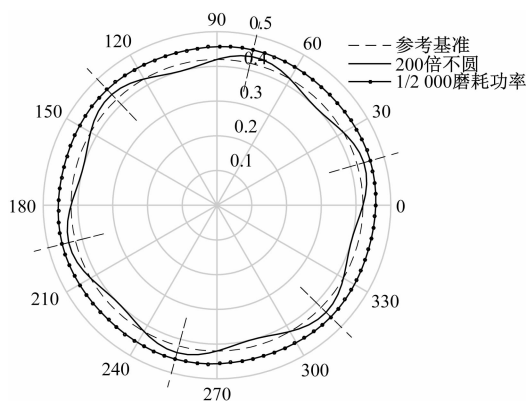


图 11 轨下完全刚性时的磨耗功率变化

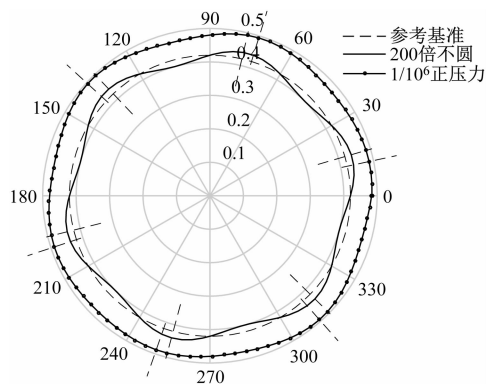


图 12 轨下弹性情况下的法向力变化

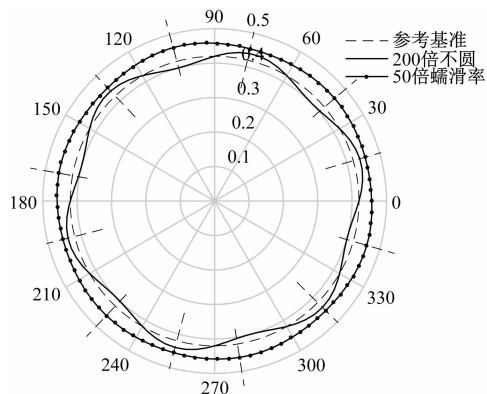


图 13 轨下弹性情况下的蠕滑率变化

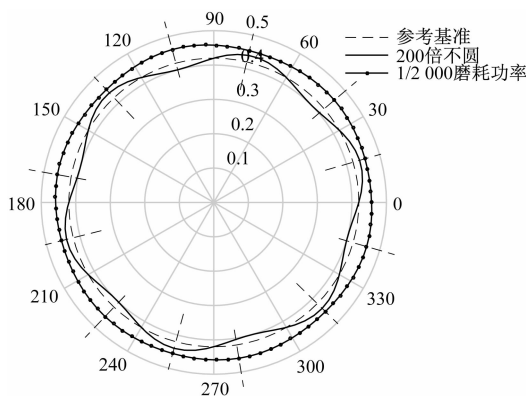


图 14 轨下弹性情况下的磨耗功率变化

功率也小于凹点的磨耗功率,因此最终将使车轮变得更不圆顺。

4 结语

综上分析,目前发生在城市轨道交通车辆上车轮的失圆问题是由于在制动力和牵引力作用下,轮轨耦合振动导致轮轴的磨耗作用在凸凹点相异产生的。而此磨耗相异以轨下刚度、轨下阻尼等参数为主导,因此可以从优化这些轨下参数着手,寻找解决失圆问题的具体方法,也可对浮置板的隔振刚度和阻尼进行进一步的分析和优化。

参考文献

- [1] 张洁娟,商跃进,王红,等. 车轮多边形对高速动车组动力学性能影响[J]. 机械强度,2020(5):1045.
- [2] European committee for standardization. Railway applications-Acoustics-Measurement of noise emitted by railbound vehicles; ISO 3095—2013[S]. London:British standards institution,2013.
- [3] 陈光雄,金学松,郭平波,等. 车轮多边形磨耗机理的有限元研究[J]. 铁道学报,2011(1):14.
- [4] 罗仁,曾京,郭平波,等. 高速列车车轮不圆顺磨耗仿真及分析[J]. 铁道学报,2010(5):30.
- [5] 杨润芝,曾京. 高阶车轮多边形对轮轨系统振动影响分析[J]. 振动与冲击,2020(21):101.
- [6] 金学松,吴越,梁树林,等. 车轮非圆化磨耗问题研究进展[J]. 西南交通大学学报,2018(1):1.
- [7] 王璞. 重载铁路轮轨磨耗预测及钢轨型面优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2017.
- [8] MORYS B. Enlargement of out-of-round wheel profiles on high speed trains[J]. Journal of Sound & Vibration, 1999, 227(5):965.
- [9] CAI W B, CHI M R, WU X W, et al. Experimental and numerical analysis of the polygonal wear of high-speed trains[J]. Wear, 2019, 440-441:1.
- [10] 邢远,阚前华,徐祥. CRH3 型动车组车轮多边形化对轮轨接触力的影响[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2020(3):74.
- [11] WU X W, RAKHEJA S, CAI W B, et al. A study of formation of high order wheel polygonization[J]. Wear, 2019, 424-425:1.

(收稿日期:2020-12-21)