DOI: 10.3901/JME.2020.16.137

非均衡速度下城际动车组车轮曲线磨耗特性^{*}

寇杰 张济民 周和超 王承萍

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院 上海 201804)

摘要: 通过调研发现运行于某线的 CRH6A 城际动车组车轮存在磨耗异常现象和较多以非均衡速度通过曲线的情况。基于运行线路曲线半径及列车运行速度数据,通过建立车辆动力学计算模型和车轮磨耗预测模型研究曲线上列车运行速度对车轮磨耗的影响。结果表明,该城际动车组曲线半径主要为 500~3 500 m,且运行于该线的城际动车组基本均以低于均衡速度的状态通过曲线。在均衡速度以下 70%至均衡速度以上 10%的范围内通过半径 500 m 曲线,车轮整体磨耗受速度影响较小。在 1 500 m 及以上半径曲线上运行时,随速度降低磨耗功指标及磨耗深度指标均呈现增大趋势,尤其是轮缘磨耗指标明显增大。在实际运营过程中应该综合考虑运行安全性和磨耗性能,设定车辆通过曲线速度。总结而言,该城际动车组运营线路曲线半径相对较小且车辆基本低于均衡速度通过曲线导致其车轮磨耗严重,轮缘磨耗尤其严重。

关键词: 城际动车组; 非均衡速度; 轮缘磨耗; 小半径曲线; 磨耗预测

中图分类号: U273

Wheel Wear of Intercity EMU at Non-equilibrium Speed on Curves

KOU Jie ZHANG Jimin ZHOU Hechao WANG Chengping

(Insitution of Rail Transnit, Tongji University, Shanghai 201804)

Abstract: Through research, it is found that the intercity EMU running on a certain line passes through the curve at non-equilibrium speed and abnormal wheel wear exists. Based on the radius of curve line and vehicle running speed, the vehicle dynamic models and the wear prediction model are built to study the effect of running speed on wheel wear. The results show that the curve radius is mainly between 500 m to 3 500 m; and the intercity EMU mostly negotiates the curves at a lower speed than the equilibrium speed; In the range of positive 10% and negative 70% of the equilibrium speed, the overall wear and flange wear of the outer guiding wheel are affected by the speed on the curve of 500 m radius slightly. On the curve of 1 500 m radius and above, when the vehicle runs at the speed of below the equilibrium speed, the wear power index and the wear depth index would increase with the decrease of speed, especially the flange wear index increases obviously. In the actual operation process, the speed of vehicle passing curve should be chosen under consideration of the running safety and wear performance. In summary, the curve radius of the intercity EMU line are relatively small and the vehicle negotiate the curve at a lower speed than the equilibrium speed, which results in serious wheel wear, especially the serious wheel flange wear.

Key words: intercity EMU; non-equilibrium speed; flange wear; small radius curve; wear prediction

0 前言

随着我国城市化进程的不断推进,国家规划的城市群不断增多,以 C 标记的城际动车组得到发展,相对一般高速铁路曲线半径设置均为 7~8 km 及以上,这种城际动车组运行线路采用相对较小半径的曲线,其半径较多为 4 km 以下,同时相对地铁和传统普速铁路线路车辆,城际动车组却有更高的运

行速度,其运行速度为 160~200 km/h,因此城际动车组的车轮磨耗问题具有一定的特殊性。本文调研发现运行于某线的 CRH6A 城际动车组车轮轮缘存在磨耗异常的情况,严重情况下出现每万 km 轮缘磨耗厚度达到 1.34 mm。为保障列车运行安全,轮缘厚度需要维持在一定的限制之上,轮对需定期镟修车轮,镟修车轮时一律要求恢复轮缘原形,轮缘厚度每增加 1 mm,踏面有用金属要镟去 2~3 mm。由于轮缘修复需要按约 1:6 的比例消耗轮径,大量的轮缘修复将导致运用动车组轮径快速下降、大量轮对轮径非正常磨耗到限,给动车组的运

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1201603-08)。20191015 收到初稿,20200206 收到修改稿

用检修工作造成被动同时也导致列车运用成本上升。城际动车组车轮轮缘异常磨耗现象与车辆的结构和动力学参数、运营工况以及线路特性均可能相关。国内已有相关研究针对铁路机车车辆、地铁车辆通过曲线以及高速列车通过动车所的小半径曲线的轮缘磨耗进行研究^[1-7]。LI等^[8]针对重载铁路曲线磨耗进行了数值仿真和线路测试,建立的数值仿真模型可以对曲线区段轨道磨耗进行预测。WANG等^[9]研究了重载铁路线路的曲线参数对钢轨磨损的影响,结果表明轨道超高和轨底坡设置和缓和曲线长度对钢轨磨耗均有较大影响。但针对城际动车组在常规运行线路上的轮缘磨耗问题的研究较少。本文通过调研测试发现,运行于某线的城际动车组运营过程中通过曲线的运行速度和线路设计的均衡速度基本均有差值,存在较多超过超高和欠超高工况通过曲线的现象,同时运行于该线路上的城际动车组车辆车轮均存在车轮快速磨耗现象,轮缘磨耗尤为严重。因此,研究车辆通过曲线速度与车轮磨耗之间的关系,可以更好地解释车轮快速磨耗现象,并为相关对策提供理论基础。

针对线路超高和轮轨磨耗问题,朱锦煜^[10]通过统计张掖工务段半径为300 m下的外轨磨耗数据,并结合了初步的动力学理论分析,得出了在小半径曲线上超高越大,外轨侧磨越严重的结论。通过减小超高值,减缓了外轨侧磨速度,验证了其分析的结论。练松良^[11]研究了曲线轨道超高对钢轨侧磨的影响,分析得出实设超高应小于根据平均速度计算的超高值使大部分列车以欠超高通过可以降低钢轨侧磨。ZHOU等^[12]研究了地铁车辆超高值对轮轨磨耗的影响。杨新文等^[13]提出的基于修正的轮轨非Hertz接触研究重载铁路曲线超高对钢轨磨耗的影响。现有研究主要集中于小半径曲线及重载线路超高对钢轨侧磨的影响^[14-16],对较大半径及较高速度下,车辆运行速度决定的超高状态对轮缘磨耗的影响的研究鲜有,因此本文对曲线线路半径及车辆通过各曲线的运行速度进行测量统计,利用理论分析和数值计算分析通过曲线时速度对城际动车组轮缘磨耗影响。

1 实测车轮磨耗及曲线分析

本文对运行于某线的CRH6A城际动车组的车辆运行初期(2万km)和车轮磨耗到限(25万km)后的车轮外形进行测量,并计算了磨耗到限后车轮的踏面和轮缘磨耗量。测得车轮型面与标准LMA型车

轮型面对比如图1所示。

图1 车轮外形对比图

由图1可以看出,磨耗到限车轮与该车初始的LMA型标准车轮型面相比车轮的轮缘根部出现了严重的磨耗,车轮的磨耗主要集中在轮缘侧磨及轮缘根部磨耗。根据测量数据,车轮型面最大磨耗深度达到10.25 mm,轮缘厚度磨耗量最大达到5 mm,踏面磨耗量为0.5 mm。

为研究该城际动车组车轮磨耗与车辆运行超高状态的关系,分析非均衡速度下通过曲线时轮轨磨耗特性,本文对城际动车组运行的实际线路曲线进行了记录和统计分析。进一步地记录了运行于线路的车辆在通过每个曲线时的实际运行速度,计算实际运行速度与均衡速度间的偏差,对速度的偏差进行统计分析。

图2的统计分析结果表明,该城际线路的曲线半径主要为500~3 500 m,总共有52条曲线半径在这个数据区间,这个半径区间的曲线占整条

图2 线路曲线半径统计图

线路曲线总量的 86.67%。普通高速列车运行线路的曲线半径基本均大于 4 km。在曲线半径设置上, 该条城际动车组线路明显小于普通高速列车线路, 且存在较多 500~3 500 m 的较小半径曲线段。曲线半径相对较小使运行于该线路的城际动车组相对于普通高速列车具有更大的轮缘磨耗量。

由各条曲线均衡速度减去实际运行速度计算出速度差值, 由图 3 通过各曲线的运行速度差值统计图可以分析出, 均衡速度与实际通过曲线的速度差值基本均为正值, 只有 6 个曲线的速度差值为负值。在所有曲线线路中, 车辆以低于均衡速度通过曲线段的占比为 90%, 可以分析得出运行于该线路的城际动车组主要以低于均衡速度的过超高状态通过曲线线路段, 实际运行速度均分布在均衡速度以下 70% 至均衡速度以上 10% 的范围内。这主要是由于实际运行过程中, 车辆运营和驾驶司机考虑, 在通过曲线时基本以低于线路设计的均衡速度的速度通过曲线。

图 3 速度偏差统计图

2 曲线动力学分析

轨道车辆在通过不同半径的曲线, 在超高值确定下, 均有一个通过曲线的均衡速度, 其速度可以使车辆的离心力和重力的横向分量相平衡。

当圆曲线一直延长时, 其轨道中心将形成一个水平圆, 故车辆所受到的向心力水平指向内轨, 并通过水平圆的圆心, 由牛顿第二定律可知

$$mg \cdot \tan \theta = \frac{mV^2}{R} \quad (1)$$

由于轨道的超高较小, 可近似认为 $\tan \theta = \sin \theta$, 而

$$\sin \theta = \frac{h}{1\,493} \quad (2)$$

式中, θ 是超高角, h 为超高值, 1 493 mm 为轮对接触点横向跨距。

由式(1)、(2)得

$$\frac{hg}{1\,493} = \frac{V^2}{R} \quad (3)$$

所以均衡速度

$$V = \sqrt{\frac{Rhg}{1\,493}} = \sqrt{\frac{Rh}{152}} \quad (4)$$

将速度单位由 m/s 转换为 km/h 可得

$$V = 3.6 \times \sqrt{\frac{Rh}{152}} = \sqrt{\frac{Rh}{11.8}} \quad (5)$$

本文中提及的非均衡速是指, 车辆在通过曲线时实际运行速度高于或低于根据式(5)计算出的均衡速度。在车辆通过曲线的速度高于均衡速度时, 线路设置的超高为欠超高状态, 线路的欠超高角 θ_0 可由式(6)计算

$$\theta_d = \frac{V^2}{Rg} - \theta_0 \quad (6)$$

转向架在超高不匹配下通过曲线如图 4 所示。

图 4 转向架过曲线位置示意图

因此对于 1、2 位轮对建立横向力平衡方程为^[17]

$$\begin{cases} 2f_y \psi_1 + k_y a \psi_b^* = -W \theta_d \\ -2f_x \frac{\lambda_e l_0}{r_0} y_1^* - k_\psi \psi_1 + k_\psi \psi_b^* + \frac{k_\psi}{2a} (y_1^* - y_2^*) = -k_\psi \frac{a}{R_0} \\ 2f_y \psi_2 - k_y a \psi_b^* = -W \theta_d \\ -2f_x \frac{\lambda_e l_0}{r_0} y_2^* - k_\psi \psi_2 + k_\psi \psi_b^* + \frac{k_\psi}{2a} (y_1^* - y_2^*) = -k_\psi \frac{a}{R_0} \\ k_\psi \psi_1 + k_\psi \psi_2 - (2k_\psi + k_{\psi b} + 2a^2 k_y) \psi_b^* - \\ (2k_y + k_{yb}) \frac{y_1^* - y_2^*}{2} = -k_{\psi b} \frac{a_b}{R_0} \end{cases} \quad (7)$$

轴重

$$W = \left[m_w + \frac{1}{2}(m_b + \frac{1}{2}m_c) \right] g \quad (8)$$

式中, m_b 和 m_c 分别为构架和车体质量, m_w 为轮对质量, y_1^* 、 y_2^* 分别为 1、2 位轮对质心相对于纯滚动线的横向位移, ψ_1 、 ψ_2 分别为 1、2 位轮对摇头角, ψ_b^* 为转向架纵向中心线相对于 1、2 位轮对连线角位移, a_b^* 为前后转向架中心连线距离之半, k_y 为一系悬挂横向刚度, k_ψ 为一系悬挂转矩刚度, k_{yb} 为二系悬挂横向刚度, $k_{\psi b}$ 为二系悬挂转矩刚度, λ_e 为车轮踏面等效锥度, a 为轴距之半, θ_d 为实设超高角, f_y 为横向蠕滑系数, R_0 为曲线半径。

当车辆悬挂结构参数确定下, 第一位轮对的轮对横向位移 y_1^* 和轮轨冲角 ψ_1 主要与车辆运行的速度、线路设计的超高角以及轨道半径相关, 其计算如下

$$y_1^* = K(A + BW(V^2 - R_0 g \theta_0)) \quad (9)$$

$$\psi_1 = C - K_2 W(V^2 - R_0 g \theta_0) \quad (10)$$

$$K = \frac{k_\psi r_0}{2f_x \lambda_e l_0 K_1} \quad (11)$$

$$A = \left(K_0 + \frac{k_\psi r_0}{2f_x \lambda_e l_0 a} \right) \frac{a}{R_0} + \frac{k_{\psi b}}{2} \left[\frac{1}{2f_y a} \left(1 + \frac{k_\psi r_0}{2f_x \lambda_e l_0 a} \right) + \frac{1}{k_y a^2} \right] \frac{a_b^*}{R_0} \quad (12)$$

$$B = \left(1 + \frac{k_{\psi b} k_\psi r_0}{8f_x \lambda_e l_0 f_y a^2} - \frac{k_\psi}{2f_y a} + \frac{k_{\psi b}}{2f_y a^2} \right) \quad (13)$$

$$C = \frac{1}{2f_y a K_1} \left[\frac{k_\psi (k_\psi + \frac{1}{2}k_{\psi b}) r_0}{2f_x \lambda_e l_0 a} \frac{a}{R_0} - \frac{k_{\psi b} a_b^*}{2 R_0} \right] \quad (14)$$

$$K_0 = 1 + \frac{2k_\psi + k_{\psi b}}{2k_y a^2} \quad (15)$$

$$K_1 = K_0 + \frac{(2k_\psi + k_{\psi b}) k_\psi r_0}{8f_x \lambda_e l_0 f_y a^2} \quad (16)$$

$$K_2 = \frac{R_0 g}{2f_y} \left(1 - \frac{k_\psi}{2f_y a K_1} \right) \quad (17)$$

从式(11)~(17)可以分析出 K 、 B 、 K_2 、 W 的值均大于 0, 因此在式(9)一位轮对的轮对横向位移和速度的平方值呈正相关, 和线路设置超高角呈负相关, 式(10)中一位轮对的轮轨冲角值和速度的平方值呈负相关, 和线路设置超高角呈正相关, 并且当速度 V 达到一定值后, 轮轨冲角转变为负值。因此在既定超高值线路上, 速度越高, 轮对横向位移越大, 但轮轨冲角越小。

3 速度对车轮磨耗影响分析

3.1 动力学模型

在多体动力学软件 UM 中建立城际 CRH6A 城际动车组单车动力学模型, 车辆动力学模型如图 5 所示, 主要建模参数见表 1。

模型由 1 个车体、2 个构架、4 个轮对和 8 个轴箱组成, 车体取 6 个自由度, 即纵向、横向、垂向、侧滚、点头、摇头; 构架取 6 个自由度, 即纵向、横向、垂向、摇头、点头; 轮对取 6 个自由度, 即纵向、横向、垂向、侧滚、点头、摇头(其中轮对垂向和侧滚运动是非独立运动); 轴箱取 1 个自由度, 即点头, 共有 46 个自由度。

图 5 车辆动力学模型

表 1 车辆主要建模参数

参数	数值
车辆定距/mm	17 500
轴距/mm	2 500
车轮滚动圆横向跨距/mm	1 493
车轮滚动圆直径/mm	920
轮对内侧距/mm	1 353
车体质量/t	28.476
构架质量/t	2.7
轮对质量/t	1.935
一系钢簧纵、横、垂向刚度/(kN/m)	980.0, 980.0, 1 252
一系垂向阻尼/[(kN · s)/m]	9.8
二系纵向, 横向, 垂向刚度/(kN/m)	130.0, 130.0, 278.2
二系横向, 垂向阻尼/[(kN · s)/m]	58.8, 55.0
钢轨外形	R60

由目前对该车实测数据的研究结果可知, 该线列车大多以非均衡速度尤其较多低于均衡速度通过曲线, 在通过曲线时车轮出现异常的磨耗现象概率较大。根据图 3 中实际运行速度的统计结果, 本文主要研究低于均衡速度 70% 至超过均衡速度 10% 范围内速度工况, 定义的速度比为实际速度与均衡速度间的比值。为研究车辆运行速度对轮轨磨耗的影响, 在 UM 中建立车辆动力学模型, 分析在表 2 所示四种半径曲线下车辆动力学性能及车轮磨耗指标, 并重点对轮缘磨耗进行分析研究。基于研究发现, 在新轮新轨相互作用中, 轮轨间两点接触不会出现, 但由于本文重点研究轮缘磨耗特性, 因此所有计算

均采用车辆实测运行初期, 运行里程 2 万 km 的车轮外形, 在这种型面和钢轨作用下, 轮轨间会出现两点接触现象, 车轮踏面外形如图 1 所示。

表 2 线路主要参数

半径/mm	速度/(km/h)	曲线长度/m	缓和曲线长度/m	超高值/mm
500	70	700	110	120
1 500	120	500	150	110
3 000	170	800	200	110
6 000	200	800	200	80

3.2 速度对曲线通过性能影响

计算四种曲线半径下不同速度通过曲线时导向轮的横向蠕滑力及导向轮外轮的轮缘导向力、轮轨冲角、轮对横向位移及 Vogel 磨耗指数, 以研究速度对曲线通过性能的影响。

其中根据参考文献[11]可知, Vogel 磨耗指数对于评价轮轨侧磨的规律性与实测数据比较一致, 因此本文采用 Vogel 磨耗指数作为轮缘磨耗的评价指标。Vogel 磨耗指数为轮缘导向力和轮轨冲角的乘积

$$Vogel = N_f \psi \quad (18)$$

式中, N_f 为轮缘处的法向接触力(轮缘导向力), ψ 为轮轨冲角。

从图 6 的数据结果可以看出, 在以不同速度通过曲线时, 在多种半径下导向轮的横向蠕滑力随速度增大而减小, 出现这种现象的主要原因为随着速度提高, 过超高角减小, 重力横向分力减小, 需要用于平衡重力横向分量的横向蠕滑力减小, 但是受自旋蠕滑等因素的影响, 横向蠕滑力一直存在。同时由图 7 可以看出运行速度增大, 轮轨冲角减小, 这一结果与第 2 节中理论分析结论相一致。根据图 8 结果, 在 500 m 和 1 500 m 半径下轮缘导向力均随速度增大而变大, 并且曲线半径越小, 速度对导向力的影响越大。而在 3 000 m 和 6 000 m 半径下, 轮缘导向力随速度增大而减小, 主要是此时轮对横向位移较小, 轮轨冲角也较小, 速度提高后, 轮轨冲角减小, 车轮主要依靠纵向蠕滑力导向, 轮缘接触力减小。从图 9 可以看出, 轮对横向位移均随速度增大而变大, 但轮对位移受速度变化影响较小。从图 7 可以看出在不同半径下轮轨冲角均随运行速度增大而减小, 在半径 500 m、1 500 m、3 000 m 和 6 000 m 下, 轮轨冲角的变化比例分别为 14.39%、42.28%、67.17% 和 47.98%。速度对半径为 1 500 m 和 3 000 m 的曲线的轮轨冲角影响相对较大。从图 10 可以看出, 轮轨 Vogel 磨耗指数均随速度增大而

减小, 减小比例分别为 4.33%、36.22%、85.24% 和 76.59%, 500 m 半径的曲线上, 速度对轮轨 Vogel 磨耗指数影响较小, 在 1 500 m、3 000 m 和 6 000 m 半径的曲线上, Vogel 磨耗指数随速度增大而变小, 且曲线半径越大, 轮缘磨耗受速度影响越明显。这是由于, 在极小半径 500 m 的曲线上速度增大, 轮轨导向力变化比例与冲角变化比例相当, 因此 Vogel 磨耗指数变化较小。而在 1 500 m 半径曲线上, 轮缘导向力增大比例为 21.38%, 轮轨冲角减小比例为 42.28%, 两种指标共同影响下使 Vogel 磨耗指数随速度增大而减小。因此, 在均衡速度以下, 半径 1 500 m 及以上的曲线线路运行时, 车辆运行速度升高, 轮缘磨耗相对减轻。

图 6 车轮横向蠕滑力与速度关系图

图 7 轮轨冲角与速度关系图

图 8 轮缘导向力与速度关系图

图9 轮对横向位移与速度关系图

图10 Vogel 磨耗指数与速度关系图

3.3 速度对磨耗性能影响

由于导向轮是车轮磨耗最严重的车轮，因此着重分析导向轮外侧车轮的磨耗。为研究速度对车轮整体磨耗及轮缘磨耗的影响，对不同曲线工况下车轮的各部分磨耗功进行计算分析。现有研究大部分采用相对蠕滑速度和蠕滑力乘积磨耗功率作为轮轨磨耗指标^[18]

$$W = F_1 v_1 + F_2 v_2 \quad (19)$$

式中， F_1 、 F_2 是轮轨接触面上沿轨道纵向和横向蠕滑力， v_1 、 v_2 是轮轨接触面上沿轨道纵向和横向的蠕滑速度。

但本文研究速度对轮轨磨耗的影响，速度与车轮通过曲线时间成反比，因此需要将车轮通过曲线

时间考虑在内，选取车轮的磨耗功 W 是磨耗功率的时间积分计算如式(20)所示^[19]

$$W = W_{cx1} + W_{cy1} + W_{cx2} + W_{cy2} = \int_0^t v \cdot (F_{cx1} \xi_{cx1} + F_{cy1} \xi_{cy1} + F_{cx2} \xi_{cx2} + F_{cy2} \xi_{cy2}) dt \quad (20)$$

式中， F_{cx1} 、 F_{cy1} 、 F_{cx2} 、 F_{cy2} 分别为轮轨踏面和轮缘处纵向和横向蠕滑力。 ξ_{cx1} 、 ξ_{cy1} 、 ξ_{cx2} 、 ξ_{cy2} 分别为轮轨踏面和轮缘处纵向和横向蠕滑率。 V 、 t 分别为车速和时间。轮轨蠕滑力和蠕滑率由 Kalker 轮轨接触理论的简化的 FASTSIM 算法计算所得。

由于轮轨两点接触出现，车轮踏面和轮缘处的磨耗对车轮的整体磨耗均有贡献，因此需要分别进行分析。根据式(20)将车轮磨耗功分为四部分，主要为踏面处纵向蠕滑力和横向蠕滑力所导致的磨耗功 W_{cx1} 和 W_{cy1} ，轮缘处纵向蠕滑力和横向蠕滑力所导致的磨耗功 W_{cx2} 和 W_{cy2} 。

根据图 11 各种曲线半径下车轮磨耗功与速度关系图可以看出，在 500 m 半径的曲线上，速度越高磨耗功越大，轮轨整体磨耗越严重，但整体磨耗功随速度变化较小。而在 1 500 m 半径以上时，速度变大车轮磨耗功反而下降，并且可以看出速度在这三种半径下对轮对整体的磨耗功影响较大。出现这种差异性的主要原因为，在 500 m 极小半径曲线上，车轮的横向位移较大，轮轨冲角和轮缘导向力均处于较高值状态，所以整体磨耗功变化不大。同时轮缘处导向力随速度增大而增大，导致轮缘处的纵向磨耗功 W_{cx2} 增大，整体磨耗功受轮缘处磨耗功增大影响，而呈现出增大的态势。在 3 000 m 半径曲线上，轮缘导向力受速度影响相对较小，但轮轨冲角受速度影响较大，此时在车轮磨耗中的轮缘处纵向磨耗功 W_{cx2} 和横向摩擦功 W_{cy2} 之和随速度增大而减小，轮缘处整体磨耗随速度增大而减小，这一结果与 Vogel 磨耗指数计算结果相吻合。同时轮轨

(a) 半径500 m

(b) 半径1 500 m

图 11 轮对磨耗功与速度关系图

横向蠕滑力也随速度增大而减小, 因此踏面处的横向磨耗功也随速度增大而减小, 两个主要部分磨耗功的下降导致车轮整体磨耗功随速度增大而减小。在 6 000 m 半径曲线上, 车轮踏面处纵向磨耗功 W_{cx1} 和横向磨耗功 W_{cy1} 均随速度增大而减小, 整体磨耗功随速度增大而减小。对比四种半径曲线的各种磨耗功分量计算结果可以看出, 踏面处的横向磨耗功 W_{cy1} 随着速度增大而减小, 并且半径越大减小的幅度越大。其原因是由于速度提高后, 离心力增大, 可以平衡车辆重力横向分量, 因此轮轨横向蠕滑减小, 横向磨耗功减小。

整体而言, 在小半径上, 由于半径较小, 车辆过曲线轮缘一直紧密贴靠钢轨, 轮对磨耗一直处于高水平值, 轮对磨耗和轮缘磨耗受速度影响较小。而在 1 500 m 及以上半径的曲线上, 轮轨冲角受速度影响较大, 随速度增大轮轨冲角减小, 轮缘与钢轨贴靠接触减弱, 轮对磨耗尤其是轮缘磨耗减小。

4 车轮磨耗预测

为研究在不同速度下车轮的磨耗特性以及车轮型面磨耗变化规律, 本文采用 FASTSIM 计算轮轨接触斑上轮轨接触蠕滑率和接触力, 采用 Archard 磨耗模型计算踏面的磨耗量, 进行车轮型面磨耗体积的累积和型面外形更新, 然后再进入下一个磨耗循环的计算。选取 LMA 作为磨耗初始模型, 车轮型面垂直磨耗 0.1 mm 为型面更新的条件, 预测车轮型面磨耗发展情况。

磨耗模型定义为

$$V_{wear} = \frac{kNd}{H} \quad (21)$$

$$\dot{h} = k \frac{pv_{slip}}{H} \quad (22)$$

式中, V_{wear} 为磨耗材料体积, d 为滑动距离, N 为法向力, v_{slip} 为节点相对蠕滑速度, $\dot{h}$ 为法向磨损速率, p 为法向接触应力, H 为两相接触物体中较软的材料硬度, k 为无量纲的磨耗系数。 k 的大小与轮轨接触压力和接触点相对滑动速度有关, 且变化范围很大, k 的取值如图 12 所示。

图 12 磨耗系数分布图

选取线路较多的 1 500 m 半径曲线, 计算以 80 km/h、120 km/h(均衡速度)和 160 km/h 三种速度运行 5 万 km 曲线线路后的车轮磨耗量。第二种计算工况为半径 3 000 m 曲线上, 以 140 km/h、170 km/h(均衡速度)和 200 km/h 三种速度运行 8 万 km 的曲线线路后的车轮磨耗量。计算车轮表面磨耗深度分布及磨耗深度累积之和结果如图 13、14 所示。

根据图 13 三种速度下的车轮磨耗深度曲线可以看出, 半径 1 500 m 曲线上运行时, 80 km/h 的低于均衡速度条件下, 车轮的磨耗深度在整个车轮踏面上基本均分布最深, 相对来看均衡速度以及高于均衡速度的运行条件下, 车轮的磨耗深度均小于低于均衡速度的运行条件。针对轮缘部分的磨耗深度进行分析可以看出, 80 km/h 的运行工况的最大

图13 车轮磨耗分布图

磨耗深度均高于另外两种工况。结合图14中车轮整体磨耗和轮缘磨耗深度之和的统计结果可以看出,两种指标值均随速度升高而减小,80 km/h工况下,车轮磨耗深度之和最大。同样的磨耗分布结果和磨耗深度统计结果也出现在半径3 000 m的曲线上,车轮整体磨耗和轮缘磨耗深度之和也随速度升高而减小,低于均衡速度的140 km/h运行速度工况的车轮磨耗明显高于均衡速度。因此,从车轮磨耗迭代计算结果分析得出,在1 500 m和3 000 m半径下,低于均衡速度较大值的速度通过曲线时,车轮的磨耗将会加剧,这一计算结果与第3节中磨耗功及Vogel磨耗指数的计算结果所得出的结论相吻合,同时进一步验证了通过1 500 m及以上半径曲线,车轮磨耗将会加剧这一结论,说明使用磨耗功和Vogel磨耗指标来评价速度对车轮整体磨耗及轮缘磨耗有较好的准确性。

在1 500 m及以上半径曲线上运行时,磨耗功指标及磨耗深度指标均随速度减小而增大,实际轮

轨磨耗随速度降低磨耗加剧。在以往研究中单纯采用磨耗指数进行计算,在分析速度对轮轨磨耗的影响时未考虑时间因素,从而分析结论不准确。因此,在分析速度对轮轨磨耗影响时,需要将时间因素考虑在内。

图14 车轮磨耗深度统计图

5 结论

本文调研发现某城际动车组车轮轮缘存在磨耗异常的情况,同时该城际动车组运营过程中曲线通过速度和线路设计的均衡速度有差异,存在较多过超高特性通过曲线的现象。基于对车轮磨耗测量和曲线线路及车辆运行速度数据的统计,通过建立车辆动力学计算模型和车轮磨耗预测模型研究曲线上列车运行速度对车轮磨耗的影响。得到以下结论。

(1) 根据理论分析,既定超高线路上,在一定速度范围内,速度越高,轮对横向位移越大,但轮轨冲角越小。

(2) 在低于均衡速度70%至超过均衡速度10%范围内,车辆在半径500 m的曲线上随运行速度增大轮缘的Vogel磨耗指数变化不大,轮缘磨耗受速

度影响较小。在 1 500 m 及以上半径曲线上轮缘 Vogel 磨耗指数随速度增大而减小,轮缘磨耗随速度增大而减小。

(3) 500 m 半径曲线上,轮对整体磨耗和轮缘磨耗受速度影响较小。而在 1 500 m 及以上半径的曲线上,随速度减小轮对整体磨耗功及磨耗深度值均增大,尤其是轮缘磨耗更加严重。

(4) 磨耗功指标及磨耗深度指标均表明在 1 500 m 及以上半径曲线上运行时,实际轮轨磨耗随速度降低磨耗加剧。因此,在通过曲线时采用降低速度的运行方式,虽然可以一定程度保障车辆的安全性,但是车辆的磨耗性能有可能会恶化。在实际运营过程中应该综合考虑运行安全性和磨耗性能,设定车辆通过曲线速度。

总结来看,该城际动车组运营线路曲线半径主要为 500~3 500 m 且基本低于均衡速度通过曲线导致其车轮磨耗加剧,轮缘磨耗尤其严重。

参 考 文 献

- [1] ORLOVA A, BORONENKO Y. The influence of the condition of three-piece freight bogies on wheel flange wear: Simulation and operation monitoring[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48: 37-53.
- [2] REZVANLI M A, OWHADI A, NIKSAI F. The effect of worn profile on wear progress of rail vehicle steel wheels over curved tracks[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 47(3): 325-342.
- [3] VO K D, ZHU H T, TIEU A K. FE method to predict damage formation on curved track for various worn status of wheel/rail profiles[J]. Wear, 2015, 322-323: 61-75.
- [4] WANG Ping, GAO Liang. Numerical simulation of wheel wear evolution for heavy haul railway[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(1): 196-207.
- [5] JIN Xuesong, WEN Zefeng, WANG Kaiyun, et al. Effect of passenger car curving on rail corrugation at a curved track[J]. Wear, 2006, 260: 619-33.
- [6] 任朝阳. 小曲线半径对动车组轮对轮缘磨耗的影响及对策[J]. 高速铁路, 2011(4): 11-14.
REN Chaoyang. Effect of small curve radius on wheel rim abrasion of EMU[J]. High-Speed Railway, 2011(4): 11-14.
- [7] 侯茂锐, 王卫东, 常崇义, 等. 动车所小半径曲线钢轨磨耗及减磨措施研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(3): 45-50.
HOU Maorui, WANG Weidong, CHANG Chongyi, et al. As study of rail wear on sharp curves in EMU maintenance depot[J]. Journal of Chinese Railway Society, 2018, 40(3): 45-50.
- [8] LI Xia, YANG Tao, ZHANG Jian, et al. Rail wear on the curve of a heavy haul line: Numerical simulations and comparison with field measurements[J]. Wear, 2016, 366-367: 131-138.
- [9] WANG Jianxi, CHEN Xi, LI Xiangguo, et al. Influence of heavy haul railway curve parameters on rail wear[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 57: 511-520.
- [10] 朱锦煜. 曲线超高与外轨侧面磨耗关系的探讨[J]. 铁道建筑, 1984(12): 15-18.
ZHU Jinyu. Discussion on the relationship between curve superelevation and outer rail side wear[J]. Railway Construction, 1984(12): 15-18.
- [11] 练松良. 改变超高对曲线钢轨侧磨的影响[J]. 铁道建筑, 1990(1): 5-8.
LIAN Songliang. Effect of changing superelevation on side wear of curved rail[J]. Railway Construction, 1990(1): 5-8.
- [12] ZHOU Suxia, XUE Rui. Analysis of the influence of superelevation of subway line act on wheel-rail wear[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 577: 135-139.
- [13] 杨新文, 姚一鸣, 周顺华, 等. 基于修正的轮轨非 Hertz 接触的重载铁路曲线超高对钢轨磨耗的影响[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 23-29.
YANG Xinwen, YAO Yiming, ZHOU Shunhua, et al. Influence of curve superelevation of heavy haul railway on rail wear based on revised wheel/rail non-hertz contact[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(4): 23-29.
- [14] 李伟, 马战国, 司道林. 重载铁路曲线几何参数对钢轨磨耗影响的研究[J]. 铁道建筑, 2013(6): 130-134.
LI Wei, MA Zhanguo, SI Daolin. Study on the influence of geometric parameters of heavy haul railway curve on rail wear[J]. Railway Construction, 2013(6): 130-134.
- [15] JENDEL T. Prediction of wheel profile wear-methodology and verification[J]. Wear, 2002, 253: 89-99.
- [16] 罗仁, 曾京, 戴焕云. 高速列车车轮磨耗预测仿真[J]. 摩擦学学报, 2009, 29(6): 551-557.
LUO Ren, ZENG Jing, DAI Huanyun. Simulation on wheel wear prediction of high-speed train[J]. Tribology, 2009, 29(6): 551-557.
- [17] 姚建伟, 孙丽霞. 机车车辆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
YAO Jianwei, SUN Lixia. Locomotive vehicle dynamics.

Beijing: Science Editions, 2014.

- [18] 段固敏. 轮轨磨耗指数的分析[J]. 西北民族学院学报, 1999, 20(1): 22-26.

DUAN Gumin. Analysis on the wear index between the rail and the wheel[J]. Journal of Northwest Minorities University, 1999, 20(1): 22-26.

- [19] NILSSON R. Wheel and rail wear-measured profile and hardness changes during 2. 5 years for Stockholm commuter

traffic[J]. Railway Engineering, 2000, 102: 229-236.

作者简介: 寇杰, 男, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: 838911823@qq.com

张济民, 男, 1969 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为车辆系统动力学及主动控制。

E-mail: zjm397a@163.com

周和超, 男, 1985 年出生, 博士, 助理教授。主要研究方向为车辆系统动力学。

E-mail: zhouhechao@tongji.edu.cn