

车轮扁疤对高速列车传动齿轮动态特性影响<sup>\*</sup>

陈光圆

(柳州铁道职业技术学院运输管理学院, 545616, 柳州)

**摘 要** [目的] 车轮扁疤会引起列车传动齿轮振动加剧, 因此有必要研究车轮扁疤对高速列车传动齿轮的振动动态特性影响。[方法] 基于多体动力学理论和某高速列车传动齿轮的技术参数, 构建弯曲-扭转-轴向耦合斜齿轮和车轮扁疤的高速列车整车动力学模型; 对不同扁疤长度下, 高速列车传动齿轮的动态特性, 大、小齿轮接触面间的最大接触应力, 以及齿轮传递误差进行了计算与分析。[结果及结论] 当车轮扁疤长度为 0~30 mm 时, 高速列车大、小齿轮的振动加速度增长不明显; 当车轮扁疤长度为 30~60 mm 时, 高速列车大、小齿轮的振动加速度急剧增加, 大、小齿轮间的最大接触应力由 630 MPa 增加至了 1 250 MPa, 增长了 2.08 倍; 随着车轮扁疤长度的增加, 齿轮动态传递误差呈现增加的趋势; 当车轮扁疤长度为 0 时, 齿轮动态传递误差最大值为 9  $\mu\text{m}$ ; 当车轮扁疤长度为 60 mm 时, 齿轮动态传递误差最大值为 72  $\mu\text{m}$ , 齿轮传递误差增加了 8 倍。

**关键词** 高速列车; 车轮扁疤; 传动齿轮

**中图分类号** U270.33

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2024.07.006

## Influence of Wheel Flat Scars on High-speed Train Transmission Gear Dynamic Characteristics

CHEN Guangyuan

(School of Transportation Management, Liuzhou Railway Vocational and Technical College, 545616, Liuzhou, China)

**Abstract** [Objective] Wheel flat scars can exacerbate the vibration of train transmission gears. Therefore, it is necessary to study the impact of wheel flat scars on the vibrational dynamic characteristics of high-speed train transmission gears. [Method] Based on multi-body dynamics theory and transmission gear technical parameters of a certain high-speed train, a dynamic model of the entire high-speed train, including coupled helical gears in bending-torsional-axial direction and wheel flat scars, is constructed. For flat scars of different lengths, the dynamic characteristics of high-speed train transmission gears, the maximum contact stress between large and small gear contact surfaces, and gear transmission errors are calculated and

analyzed. [Result & Conclusion] When the lengths of wheel flat scar range from 0 to 30 mm, the vibration acceleration of large and small gears in high-speed train increases insignificantly; when the above lengths range from 30 to 60 mm, the vibration acceleration increases sharply, and the maximum contact stress between large and small gears increases from 630 MPa to 1 250 MPa, doubling by 2.08 times. As the length of wheel flat scars increases, the dynamic gear transmission error shows an increasing trend. When the length is 0, the maximum value of gear dynamic transmission error is 9  $\mu\text{m}$ , and when the length is 60 mm, the maximum gear dynamic transmission error is 72  $\mu\text{m}$ , increasing by 8 times.

**Key words** high-speed train; wheel flat scar; transmission gear

高速列车制动或车轮打滑时, 车轮与钢轨局部摩擦会导致车轮踏面擦伤<sup>[1]</sup>, 引发车轮扁疤病害, 同时轮轨外部环境也会诱发车轮扁疤病害<sup>[2]</sup>。为分析车轮扁疤对列车传动齿轮振动动态特性的影响, 已有学者进行了相关理论与试验研究<sup>[3-4]</sup>。文献[5]建立了轮轨接触有限元模型, 研究由车轮扁疤引起的轮轨冲击特性。文献[6]研究车轮扁疤损伤对高速列车轮轨冲击力、轮对振动及轮轨接触性能等方面的影响, 提出车轮扁疤伤损对轮轨系统垂向和横向均会产生一定的冲击作用, 且会显著增大轮对旋转振动频率及其倍频对应的振动能量。文献[7]研究了车轮扁疤对高速列车齿轮箱振动特性的影响, 研究结果表明, 车轮扁疤除了对列车齿轮箱的动应力影响较大之外, 还会对箱体裂纹产生较大的影响。已有文献大多考虑的是车轮扁疤对列车齿轮箱及列车结构动态响应的影响, 而实际上由车轮扁疤引发的列车传动齿轮振动加剧问题, 对高速列车传动齿轮振动的动态特性影响更为明显。

本文基于多体动力学理论和某高速列车传动齿轮技术参数, 建立了弯曲-扭转-轴向耦合斜齿轮

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(51565013); 江西省自然科学基金重点项目(20181ACB20007)

和车轮扁疤的高速列车整车动力学模型,将车轮扁疤伤损考虑为车轮轮径变化,对不同扁疤长度下的高速列车传动齿轮动态特性进行了计算与分析,通过 SIMPACK 软件进行仿真计算,分析在不同扁疤长度下的列车传动齿轮振动特性。

## 1 动力学仿真模型

### 1.1 车轮扁疤数值模型

引起车轮扁疤的主要原因是由于列车打滑和制动时车轮与轨道的不正常接触导致车轮踏面擦伤。根据车轮扁疤的形成时间,将其划分为车轮新扁疤与旧扁疤。新扁疤的擦伤区域为理想弦线,边缘存在棱角,但随着列车服役时间的增加,其棱角区域会很快被磨圆又变为旧扁疤。新扁疤在车轮检修时不易被检测到,因此,需建立能够描述车轮旧扁疤的数学模型,以仿真分析车轮扁疤的冲击作用。通常,车轮旧扁疤是由车轮扁疤长度与列车运行距离相关的余弦函数来表示的:

$$D_r = \frac{1}{2} D_f \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right] \quad (1)$$

$$D_f = \frac{L^2}{16R} \quad (2)$$

式中:

$L$ ——踏面擦伤长度,单位 mm;

$D_r$ ——最大擦伤深度,单位 mm;

$D_f$ ——有效擦伤深度,单位 mm;

$x$ ——列车运行距离,单位 m;

$R$ ——车轮滚动圆半径,单位 m。

在多体动力学软件 SIMPACK 中,将车轮扁疤转换为车轮半径的变化量  $R(\beta)$ ,则有:

$$R(\beta) = R - \frac{Ra^2}{8} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi\beta}{a}\right) \right] \quad (3)$$

$$a = \frac{L}{2R} \quad (4)$$

式中:

$\beta$ ——车轮旋转角度,单位 rad。

反映车轮半径变化的旧扁疤模型同扁疤长度和车轮旋转角度相关。不同踏面擦伤长度条件下,扁疤长度与扁疤深度之间的关系如图 1 所示。

### 1.2 整车模型

为研究传动齿轮系统在整车环境中的振动响应特性,建立包含弯曲-扭转-轴向耦合斜齿轮模型的列车-轨道空间耦合动力学模型,整车动力学模型

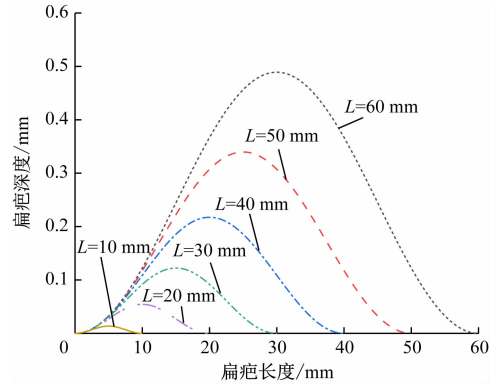
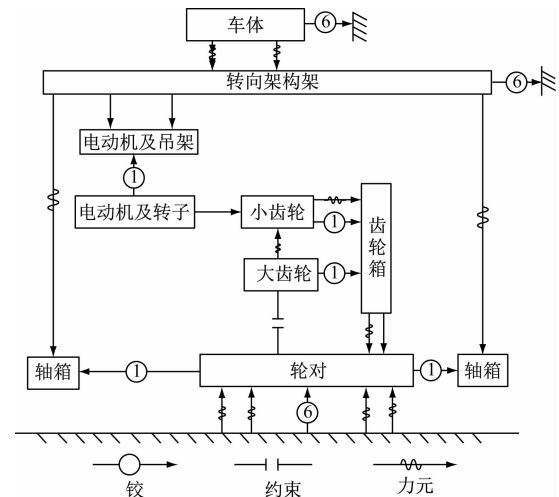


图 1 不同踏面擦伤长度条件下扁疤长度与扁疤深度之间的关系

Fig. 1 Relation between flat scar length and flat scar depth under different tread scratch length conditions

主要包括车体、转向架构架、轮对、牵引电动机、转子、小齿轮和大齿轮等 78 个刚体。其中,转子、小齿轮和大齿轮只有旋转自由度,其他每个刚体均考虑纵向、横向、垂向、侧滚、摇头和点头 6 个自由度。整车动力学拓扑结构示意图如图 2 所示。



注: 1 表示 1 个自由度; 6 表示 6 个自由度。

图 2 整车动力学拓扑结构示意图

Fig. 2 Diagram of vehicle dynamics topology structure

在 SIMPACK 软件中,基于上述整车动力学拓扑图中建立包含传动齿轮的整车模型,其示意图如图 3 所示。仿真计算时,将第一位车轮和第二位车轮同时设置为扁疤车轮,将扁疤深度与扁疤长度的关系折算为车轮扁疤深度与车轮旋转角度之间的关系,用车轮半径减去扁疤深度即可获得旧扁疤的车轮周向半径。

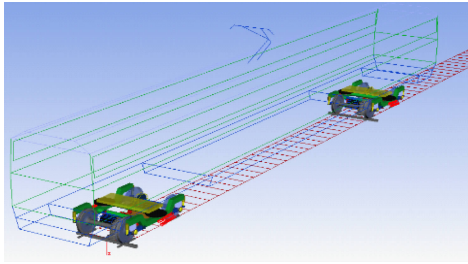
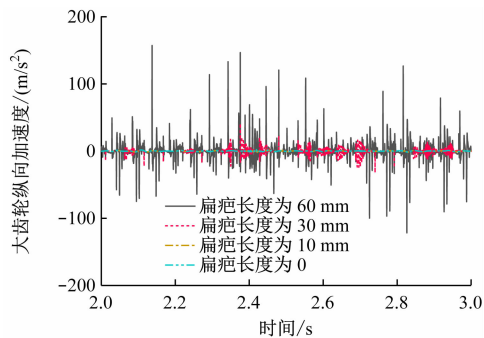
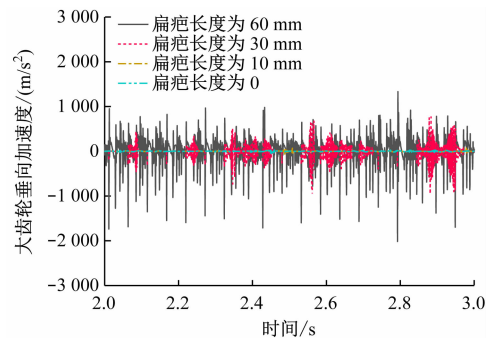


图3 整车动力学模型示意图

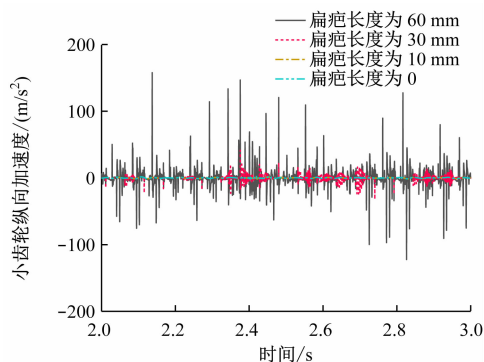
Fig. 3 Diagram of vehicle dynamics model



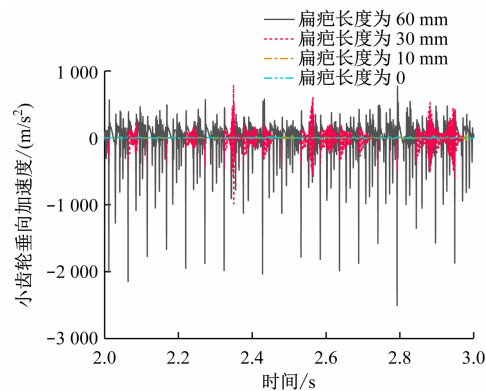
a) 大齿轮纵向加速度



b) 大齿轮垂向加速度



c) 小齿轮纵向加速度



d) 小齿轮垂向加速度

图4 不同扁疤长度下大、小齿轮的动力学响应特性

Fig. 4 Dynamics response characteristics of large and small gears under different flat scar length conditions

击影响;当扁疤长度为 0 ~ 30 mm 时,大、小齿轮的振动加速度增长不明显;当扁疤长度为 60 mm 时,大、小齿轮的振动加速度变化最大。

为进一步分析车轮扁疤长度对齿轮振动加速度的影响,以小齿轮为例,分析不同扁疤长度下,小齿轮的纵向和垂向加速度,如图 5 所示。由图 5 可知:当扁疤长度小于 30 mm 时,扁疤长度对小齿轮的加速度影响较小;当扁疤长度超过 30 mm 时,随着扁疤长度的增加,小齿轮加速度的变化幅度较大;相较于纵向加速度,扁疤长度对小齿轮垂向加速度的影响更大。

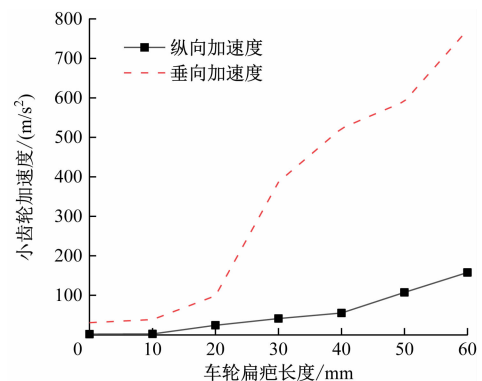


图5 不同扁疤长度下小齿轮的垂向和纵向加速度

Fig. 5 Vertical and longitudinal acceleration of small gears under different flat scar length conditions

## 2.2 齿轮接触应力分析

最大接触应力可以反映齿轮副啮合的力学状态。不同扁疤长度下,大、小齿轮接触面间的最大接触应力如图6所示。在车轮踏面正常的弧长范围内,最大接触应力呈正弦函数变化,一旦进入扁疤区域,齿轮接触面最大接触应力迅速增大。当扁疤长度为10 mm时,大、小齿轮接触面间的最大接触应力变化较小;当扁疤长度为30 mm和60 mm时,大、小齿轮接触面间的最大接触应力分别为630 MPa和1 250 MPa,表明扁疤对大、小齿轮接触面间最大接触应力的影响较大。

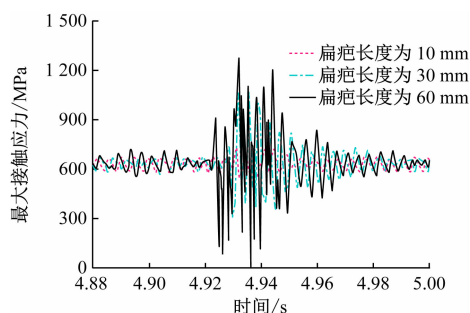


图6 不同扁疤长度下大、小齿轮接触面间的最大接触应力  
Fig.6 Maximum contact stress between large and small gear contact surfaces under different flat scar length conditions

## 2.3 齿轮传递误差分析

在齿轮传动过程中由于存在制造误差、安装误差及外部激励等因素,使得轮齿在啮合线上的位移相对理想啮合点存在一定的偏移,这种偏移被称为动态传递误差。动态传递误差是用于描述齿轮传动平稳性的参数,在车轮扁疤下引入该参数,可以反映车轮扁疤对齿轮传动平稳性的影响。动态传递误差  $e(t)$  可以表示为:

$$e(t) = r_{b1}\varphi_1 - r_{b2}\varphi_2 \quad (5)$$

式中:

$r_{b1}$ 、 $r_{b2}$ ——大、小齿轮的基圆半径;

$\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ——大、小齿轮的转动角度。

不同扁疤长度下的动态传递误差如图7所示。由图7可知:当扁疤长度为0和10 mm时,动态传递误差变化不大;当扁疤长度为30~60 mm时,动态传递误差变化较大;当扁疤长度为0时,动态传递误差最大值为9  $\mu\text{m}$ ,而当扁疤长度为60 mm时,动态传递误差最大值为72  $\mu\text{m}$ ,即传递误差最大值增大了8倍,表明车轮扁疤对齿轮间的传动平稳性产生了显著的影响。

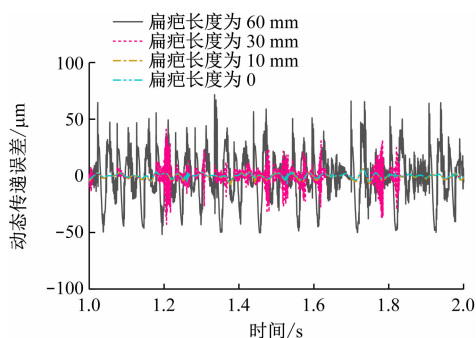


图7 不同扁疤长度下的动态传递误差

Fig.7 Dynamic transmission error under different flat scar length conditions

## 3 结论

1) 当扁疤长度为0~30 mm时,车轮扁疤对大、小齿轮的振动加速度影响不明显;当扁疤长度为30~60 mm时,大、小齿轮的振动加速度急剧增加。

2) 一旦进入扁疤区域,大、小齿轮接触面间的最大接触应力迅速增大。当扁疤长度为10~30 mm时,大、小齿轮接触面间的最大接触应力变化较小;当扁疤长度为30 mm和60 mm时,大、小齿轮接触面间的最大接触应力由630 MPa增加到了1 250 MPa,即增加了2.08倍。

3) 当扁疤长度为60 mm时,动态传递误差最大值为72  $\mu\text{m}$ ;当扁疤长度为0时,动态传递误差最大值为9  $\mu\text{m}$ ,即传递误差最大值增大了8倍,表明车轮扁疤对动态传递误差产生了显著的影响。故在车辆运维时,建议合理控制扁疤长度,这对传动齿轮有着非常重要的影响。

## 参考文献

- [1] 李夫忠, 杜红梅. 车轮扁疤对铁道车辆齿轮箱动态特性影响[J]. 机械工程与自动化, 2019(3): 33.  
LI Fuzhong, DU Hongmei. Effects of wheel flat on gearbox of railway vehicle [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019 (3): 33.
- [2] 任尊松. 车轮踏面三维扁疤轮轨系统冲击振动研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(15): 78.  
REN Zunsong. Study on wheel/rail impact dynamics with three dimensional wheel flat model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(15): 78.
- [3] 林凤涛, 王瑞涛, 杨洋, 等. 车轮扁疤对轮轨冲击的影响分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(3): 140.

(下转第42页)

- status of surface settlement of a bored subway tunnel with a shallow overburden [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54 (4): 25.
- [3] 师刚, 袁浩旭, 张澄宏, 等. 基于 Peck 公式的双线隧道地面沉降模型及参数研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25 (1): 161.
- SHI Gang, YUAN Haoxu, ZHANG Chengxuan, et al. Study on ground settlement model and parameters of twin-line tunnel based on Peck's formula[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(1): 161.
- [4] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Géotechnique, 1996, 46(4): 753.
- [5] 马险峰, 王俊淞, 李削云, 等. 盾构隧道引起地层损失和地表沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (5): 942.
- MA Xianfeng, WANG Junsong, LI Xiaoyun, et al. Centrifuge modeling of ground loss and settlement caused by shield tunnelling in soft ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(5): 942.
- [6] BURD H J, HOULSBY G T, AUGARDE C E, et al. Modelling tunnelling-induced settlement of masonry buildings[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2000, 143(1): 17.
- [7] 朱语聪, 曾彬, 叶四桥, 等. 双圆盾构隧道开挖引起邻近桩土位移试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2023, 19 (5): 1504.
- ZHU Yucong, ZENG Bin, YE Siqiao, et al. Experimental research on double-O-tube shield tunneling-induced adjacent pile-soil displacement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(5): 1504.
- 收稿日期:2022-01-13 修回日期:2022-05-24 出版日期:2024-07-10  
Received:2022-01-13 Revised:2022-05-24 Published:2024-07-10  
· 通信作者:曹元均,高级工程师,374184892@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 33 页)

- [8] GAO X, SHI M, SONG X, et al. Recurrent neural networks for real-time prediction of TBM operating parameters[J]. Automation in Construction, 2019, 98: 225.
- [9] 王飞, 龚国芳, 段理文, 等. 基于 XGBoost 的隧道掘进机操作参数智能决策系统设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(4): 633.
- WANG Fei, GONG Guofang, DUAN Liwen, et al. XGBoost based intelligent determination system design of tunnel boring machine operation parameters[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(4): 633.
- 收稿日期:2022-02-22 修回日期:2022-03-22 出版日期:2024-07-10  
Received:2022-02-22 Revised:2022-03-22 Published:2024-07-10  
· 第一作者:王伯芝,正高级工程师,740825286@qq.com  
通信作者:丁爽,工程师,dingshuang525@hotmail.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 37 页)

- LIN Fengtao, WANG Ruitao, YANG Yang, et al. Analysis on the influence of flat spot on wheel-rail impact[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(3): 140.
- [4] 凌亮, 曹亚博, 肖新标, 等. 车轮擦伤对高速轮轨接触行为的影响[J]. 铁道学报, 2015, 37(7): 32.
- LING Liang, CAO Yabo, XIAO Xinbiao, et al. Effect of wheel flats on the high-speed wheel-rail contact behavior[J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(7): 32.
- [5] 刘国云, 曾京, 郭平波, 等. 车轮扁疤所引起的车辆系统振动特性分析[J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 182.
- LIU Guoyun, ZENG Jing, WU Pingbo, et al. Vibration characteristic analysis of vehicle systems due to wheel flat[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 182.
- [6] 杨光, 任尊松, 袁雨青. 车轮扁疤损伤对高速列车轮对动力学性能影响[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(3): 103.
- YANG Guang, REN Zunsong, YUAN Yuqing. Influence of wheel flat on dynamic performance of high-speed train wheelset [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(3): 103.
- [7] 邹航宇, 张卫华, 王志伟. 车轮扁疤对高速列车齿轮箱动态特性影响分析[J]. 铁道机车车辆, 2018, 38(3): 29.
- ZOU Hangyu, ZHANG Weihua, WANG Zhiwei. Influence analysis of wheel flat on dynamic characteristics of high-speed train gearbox[J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(3): 29.
- 收稿日期:2021-07-27 修回日期:2021-09-01 出版日期:2024-07-10  
Received:2021-07-27 Revised:2021-09-01 Published:2024-07-10  
· 通信作者:陈光圆,讲师,1513879549@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license