

文章编号: 1005-0523(2019)06-0025-07

## 杭深线钢轨交替侧磨成因探究

白鲁锋, 张 续, 毛 鑫, 沈 钢

(同济大学铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 杭深线有砟轨道客运专线局部路段直线钢轨出现了钢轨交替侧磨现象, 动车组通过该侧磨区段时会发生晃车, 运行不稳等问题。从长大线列车的轮轨动力学角度对交替侧磨成因进行研究, 给出钢轨交替侧磨的整治措施。通过建立 MATLAB/SIMULINK 仿真模型, 对动车组通过存在纯滚动线偏距直线钢轨的运行情况进行研究, 发现钢轨交替侧磨的形成受到轮对纯滚动线偏距的影响。当钢轨由于非对称打磨等因素造成两侧磨耗不均匀时, 轮对在钢轨上的纯滚动线会产生偏移, 进而造成列车轮对的周期性偏摆现象, 最终导致长大线列车的整体横向低频晃动。

**关键词:** 交替侧磨; 列车仿真; 纯滚动线偏距; 整治措施

**中图分类号:** U211.5      **文献标志码:** A

**DOI:** 10.16749/j.cnki.jecjtu.2019.06.005

从 2014 年 3 月开始, 宁波工务段有砟轨道段陆续出现钢轨轨头内侧边沿交替磨耗现象。截止 2017 年 10 月, 该工务段检查发现钢轨交替磨耗总计 155 处, 交替磨耗长度 25~800 m 不等, 平均波长为 20~30 m。动车组在通过交替侧磨路段时, 晃车较为严重, 降低了旅客的乘坐舒适度和动车组运行的平稳性。杭深线有砟轨道客运专线出现的交替侧磨现象主要有如下几点特征:

- 1) 多处出现钢轨交替侧磨, 波长为 20~30 m;
- 2) 钢轨交替侧磨大多出现在出曲线后的直线段, 侧磨区域曲线较多;
- 3) 钢轨交替侧磨主要出现在隧道外, 隧道内侧磨极少。

国内外一些学者对钢轨磨耗问题进行了诸多研究。Zhong W 等<sup>[1]</sup>介绍了钢轨滚动接触疲劳损伤与磨耗之间存在着竞争关系。Povilaitiene I 等<sup>[2]</sup>研究了轨距对曲线轨道钢轨侧磨的影响, 提出了通过适度的轨距加宽来减少曲线轨道侧面磨耗的可能性。刘丁阳<sup>[3]</sup>研究了客运专线的钢轨磨耗, 认为曲线外轨磨耗比较大, 需要重点维护。姚玉侠<sup>[4]</sup>综述了曲线钢轨发生侧磨的原因, 并提出了可以通过改善圆顺度和调整轨距来减小曲线侧磨。谭立成<sup>[5]</sup>研究了直线段钢轨发生的长波交替侧磨, 认为该磨耗主要原因是机车的蛇行失稳导致。柴雪松等<sup>[6]</sup>认为货车在直线上的交替侧磨, 其根本原因是货车在直线上运行会发生蛇行失稳, 使轮缘和钢轨轨侧发生接触, 从而形成光带。练松良<sup>[7]</sup>研究认为线路上局部直线钢轨发生的侧磨, 源于轨道上的激扰, 可以通过改善线路条件, 减少车辆蛇行, 从而减少侧磨。曹建新, 周锡祺<sup>[8]</sup>认为交替侧磨对车辆的干扰属于周期性激扰, 要重视早期的检查和防治。史小坤<sup>[9]</sup>认为钢轨不均匀侧磨的防治措施主要有提高曲线的圆顺度, 改善钢轨连接处的接头, 减少激扰源, 局部调整钢轨的轨底坡等。

现有的研究大多集中在曲线轨道的侧磨以及货运铁路的钢轨侧磨, 而对高速直线轨道发生的交替侧磨研究较少。目前, 杭深线直线轨道交替侧磨严重影响了动车组的运行, 制约了动车组的运行速度, 降低了车辆运行的稳定性和乘客的乘坐舒适性。本文从长大线列车动力学角度出发, 研究纯滚动线偏距对钢轨交替侧磨的影响, 最后讨论交替侧磨的预防措施以及整治方法。

收稿日期: 2019-03-35

作者简介: 白鲁锋(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为轨道车辆系统动力学。

通讯作者: 沈钢(1963—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为轨道车辆系统动力学。

### 1 轨道车辆仿真模型

#### 1.1 模型假设<sup>[10]</sup>

- 1) 假设轮对和钢轨为刚体,不考虑弹性作用对轮轨接触点的影响;
- 2) 只考虑轮轨始终接触的状况,不考虑车轮脱离钢轨的情况;
- 3) 对于轨道,只考虑由于轨道不平顺所引起的轨道的不平顺位移;
- 4) 对于车辆模型,进行线性化处理,并假设其为刚体。

#### 1.2 整车模型

在建模过程中,由于只是进行直线上的仿真,所以整车模型主要分为:轮轨模块、悬挂模块以及刚体模块。本文在建立轮轨模块时,法向接触斑采用的是 Hertz 接触理论,轮轨切向接触采用的是 Polach 理论,而蠕滑力矩则是采用 V-J 理论进行修正<sup>[11]</sup>。

对于悬挂力和刚体两个模块,主要基于式(1)与式(2)进行计算

$$F=Kx+Cx \tag{1}$$

$$x= \int_0^T \left( \int_0^t M^{-1}Fdt \right) dT \tag{2}$$

式中: $F$ 表示悬挂力; $K$ 为刚度矩阵; $C$ 为阻尼矩阵; $M$ 为质量矩阵; $x$ 为悬挂元件压缩或者伸长的长度; $t, T$ 为仿真时间。图 1 所示为基于 SIMULINK 建立的整车模型。

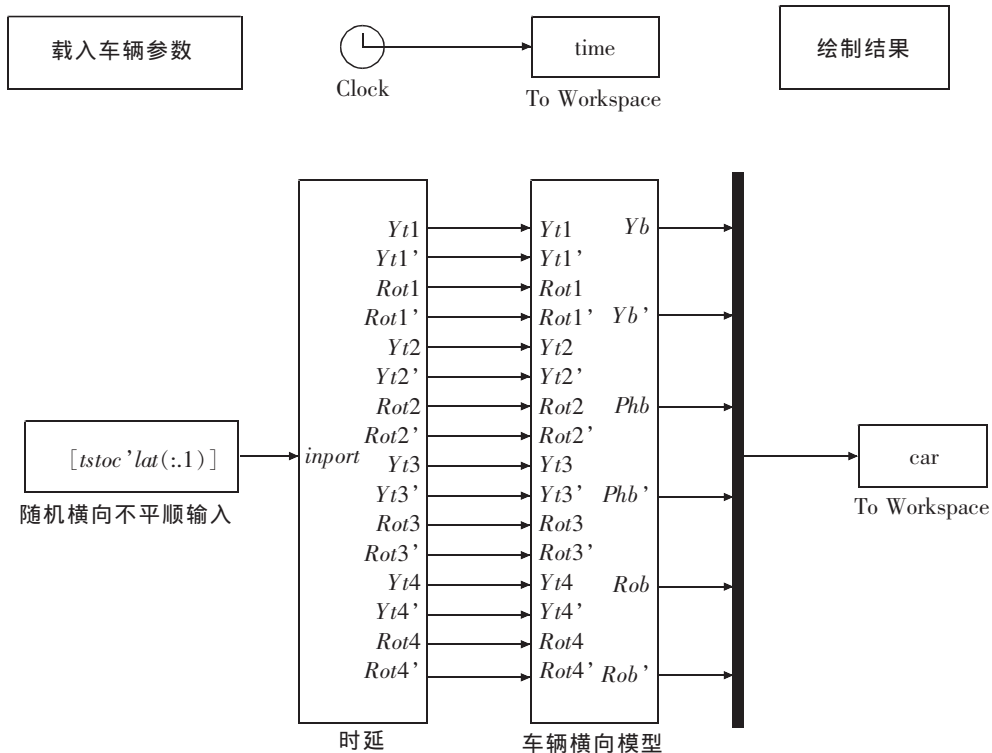


图 1 单车横向基于 SIMULINK 的动力学模型图

Fig.1 The dynamic model diagram of single vehicle based on SIMULINK

### 2 变截面轮轨接触模型

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

在用 SIMULINK 软件搭建轨道车辆动力学仿真模型时,通常是输入一个标准的钢轨外形和车轮外形,然后进行轮轨接触匹配计算,制作轮轨接触计算表。进行车辆运行仿真时,根据动力学仿真得到的轮对横移

量,代入到轮轨几何接触表中,通过一维插值得到轮轨接触几何参数,代入到后续求轮轨力的计算程序中。

由于本文要探究钢轨发生交替侧磨的成因,所以采用变截面钢轨,在仿真时需要切换钢轨截面,这就需要对上述方法进行变通。由于钢轨截面是根据列车运行的里程进行变化的,所以需要将列车运行的里程代入计算中<sup>[12]</sup>,得到新的钢轨截面,然后再根据轮对横移量进行插值。

此时,可以采取二维插值的方法。在仿真前,将里程和钢轨截面廓形进行映射,之后再计算在不同轮对横移量下的轮轨接触参数。仿真时,先通过里程插值得到对应钢轨截面,再根据实时仿真得到的轮对横移量插值得到轮轨接触参数,从而计算得到轮轨接触参数,进行后续的仿真。图 2 所示为采用二维插值方法建立的轮轨接触参数框图。

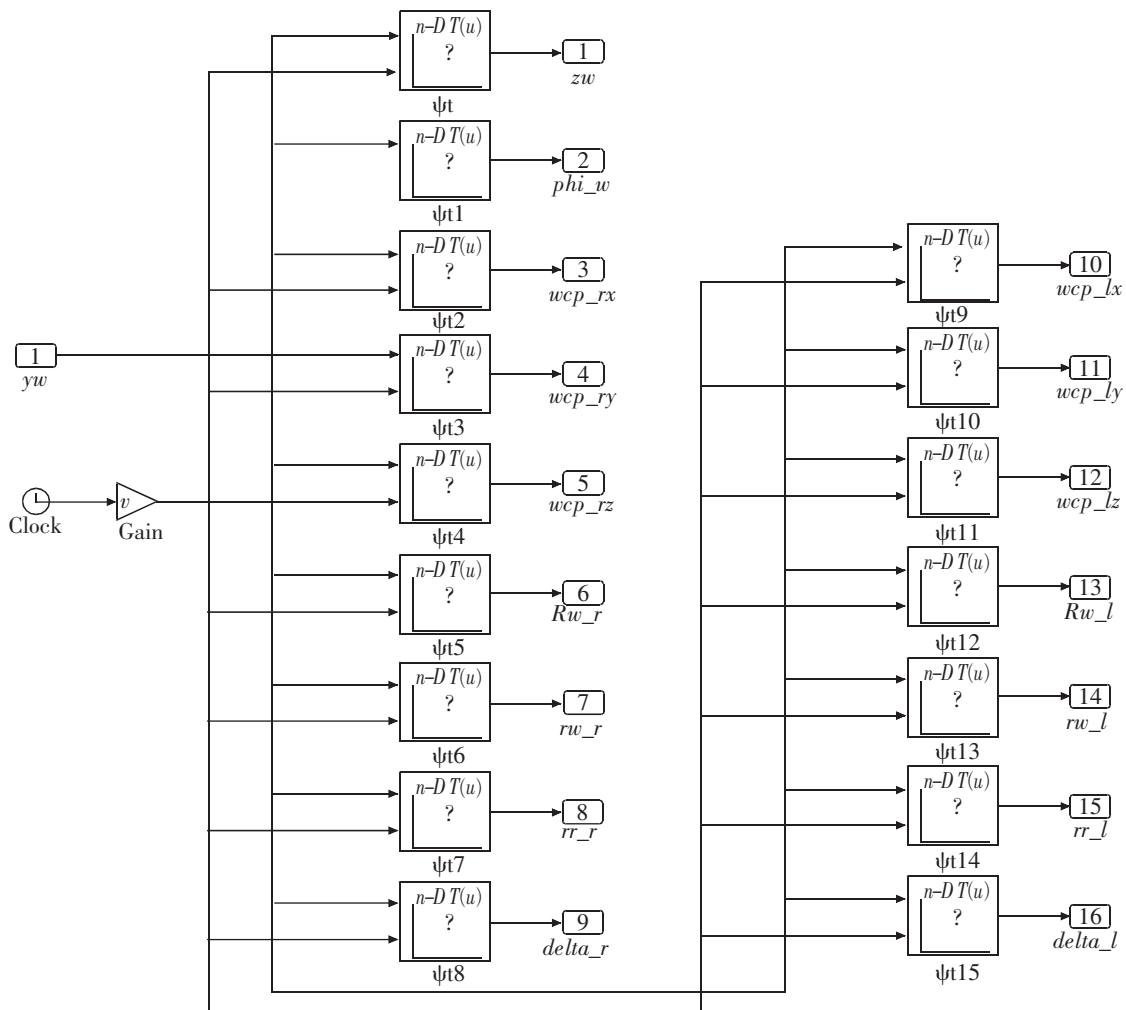


图 2 变截面轮轨接触参数计算模型

Fig.2 Calculation model of wheel-rail contact parameters for variable cross section

### 3 车钩模型

由于本文在后续仿真时,还进行了列车的仿真,所以还需要建立车钩模型<sup>[13]</sup>,由于本文重点只考察车辆及轮对的横向运动状况,所以对车钩进行简化,不考虑车钩的纵向运动与垂向运动,仅考虑其横向运动,所以车钩力仅与前后连接车辆的横移与摇头运动相关。将车钩简化为横向刚度和横向阻尼,其 SIMULINK 框图如图 3 所示。

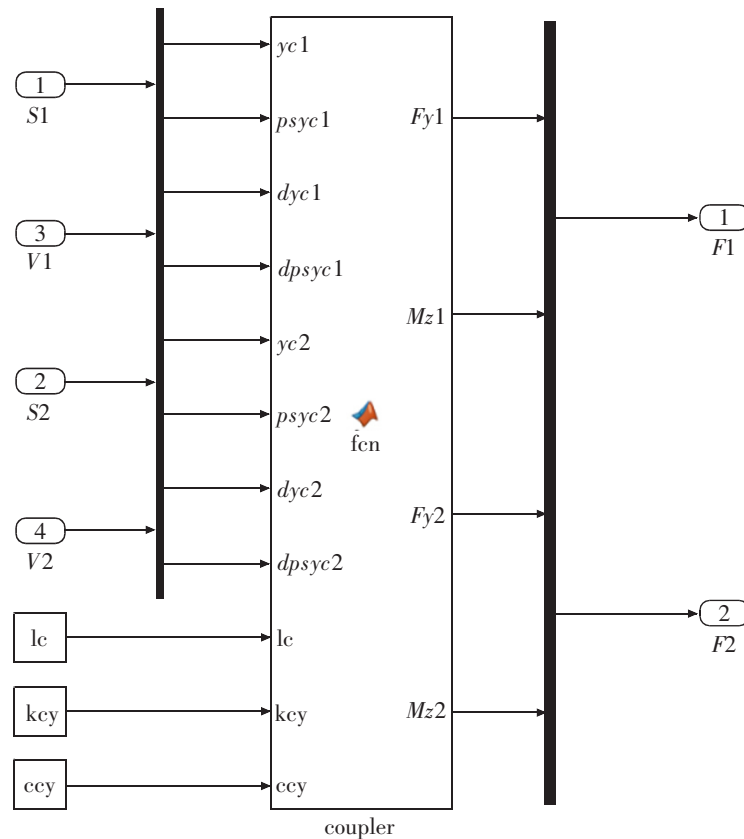


图3 车钩简化模型

Fig.3 The simplified coupling model

#### 4 纯滚动线偏距对车辆运行的影响

对于杭深线有砟轨道客运专线所出现的钢轨交替侧磨现象,结合列车动力学仿真分析,可以从运行环境、动车组车辆以及轨道状况 3 个方面进行研究。

对于运行环境方面,由于检查过轨道地基的情况,并没有发现异常,对于海风,由于风比较随机,而侧磨情况比较有规律,所以也基本可以排除。

对于车辆方面,可能是轮对廓形的改变,或者车辆悬挂参数设置的不合理,导致了动车组的晃车,引发钢轨的交替磨耗。但是根据研究发现,钢轨交替侧磨分布位置比较固定。如果是由于车辆原因导致钢轨的交替侧磨,那么该列车在线路全线,晃车都应该比较剧烈,而实际情况是,列车只是在局部路段晃车比较严重,所以可以排除车辆方面的影响。

对于轨道方面,经过动检车排查,轨道不平顺一切正常。对于轨道的曲线因素,设置也是按照国家标准,所以也可以排除。由于杭深线早期打磨存在对轨头过打磨现象,所以下文主要研究,打磨引起的非对称钢轨对列车运行的影响,是否会导致钢轨的交替侧磨。

此处引用纯滚动线偏距的概念,通过纯滚动线偏距衡量钢轨的非对称状况,关于纯滚动线偏距的定义,详见参考文献[10]。基于上述所介绍的整车仿真模型和车钩模型,建立列车的仿真模型,仿真参数采用 CRH2 型动车组车辆的参数。

##### 4.1 单边纯滚动线偏距

仿真的线路条件设置为:全线为直线段,无轨道不平顺。先是 20 m 的标准的 60 kg/m 对称钢轨,之后是长度为 200 m 的非对称钢轨,其轮轨匹配的纯滚动线偏距大约为 5 mm,最后是对称钢轨。单节车和

8节车仿真结果分别如图 4 和图 5 所示,单节车仿真的结果和 8 节车仿真的结果类似。在纯滚动线偏距偏向一侧的非对称钢轨的情况下,轮对会向磨损较多,纯滚动线偏距偏移的一侧钢轨偏移。

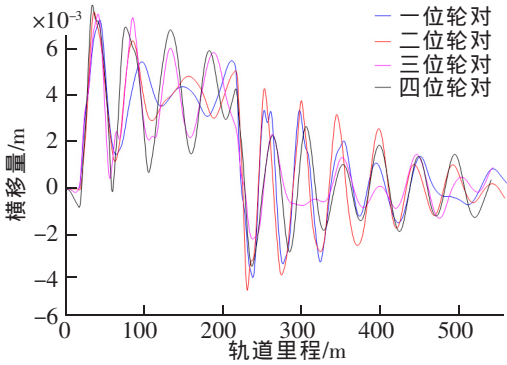


图 4 1 节车仿真

Fig.4 Single vehicle simulation

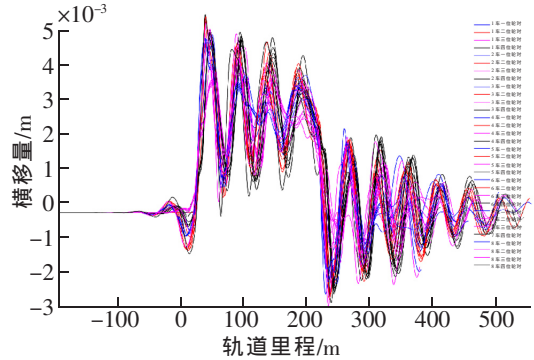


图 5 8 节车仿真

Fig.5 Simulation of eight-car trains

### 4.2 多个双侧的纯滚动线偏距

此节仿真两侧均存在纯滚动线偏距的情况,线路设置为 30 m 一侧纯滚动线偏距,左右交替,左右侧的纯滚动线偏距共设置了 7 处。仿真结果如图 6。

从图 6 中,可以发现单节车辆的轮对横移出现左右交替,且同时偏向一侧,与轨道的交替性的纯滚动线偏距相吻合。所以交替的纯滚动线偏距会导致轮对集体的左右侧的交替横移,由于轮轨的相互作用,会导致钢轨的交替侧磨。

### 4.3 不同的纯滚动线偏距

如果改变纯滚动线偏距,分别采取纯滚动线偏距为 4 mm 和 2 mm。由于多节车和单节车的仿真结果类似,所以可以仅采用单节车仿真,结果分别如图 7 和图 8 所示。

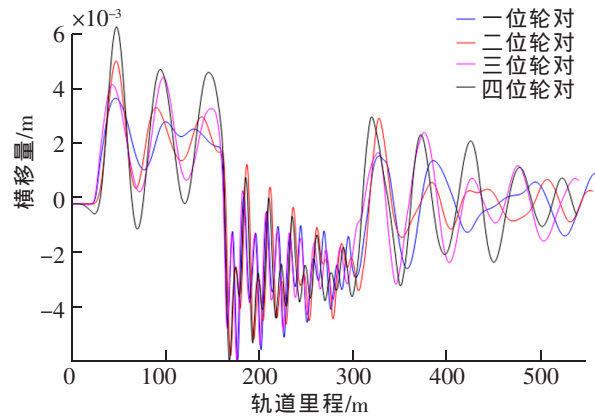


图 6 左右多个纯滚动线偏距交替

Fig.6 Offset alternation of multiple pure rolling lines

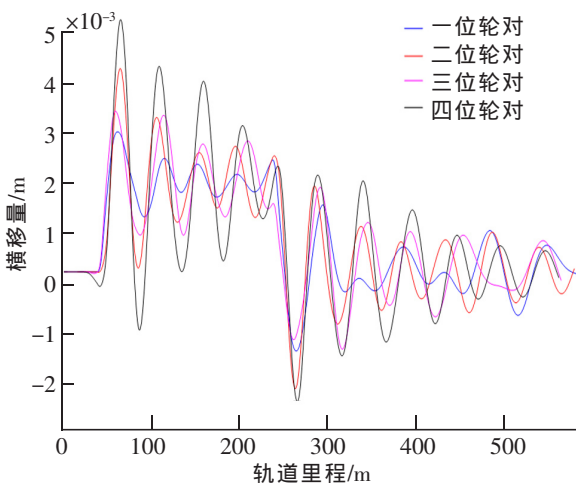


图 7 纯滚动线偏距为 4 mm

Fig.7 The offset of the pure rolling line:4 mm

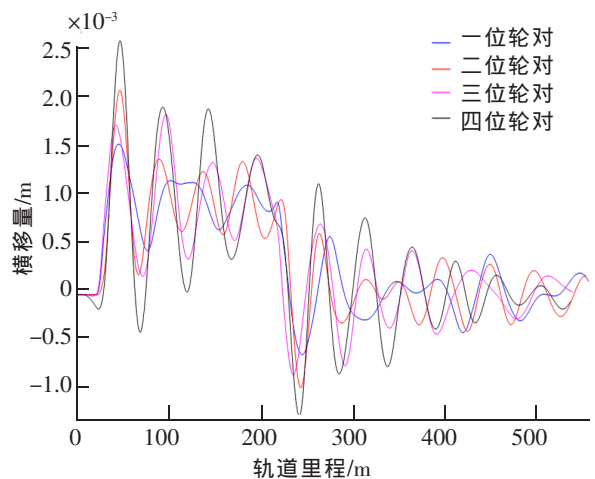


图 8 纯滚动线偏距为 2 mm

Fig.8 The offset of the pure rolling line:2 mm

从图中可知,减小纯滚动线偏距,轮对的横移量明显减小。所以打磨引起的非对称钢轨的纯滚动线偏距过大,会导致轮对横移量明显增大,进而可能会导致轮对的相互作用,加剧钢轨的磨损。

## 5 钢轨交替侧磨整治措施

通过上文对直线段钢轨交替侧磨的成因探究可知,并非所有直线段钢轨存在交替侧磨的现象。对于钢轨交替侧磨的整治必须通过现场调研确定引起交替侧磨的原因,才能给出正确的整治措施。故本文只能给出一些普遍适用的交替侧磨整治措施。首先,采用更精密的打磨仪器对钢轨进行打磨;其次,可以根据轮对设计更适用的钢轨廓形;最后,对于交替侧磨路段,可以钢轨换边使用。针对不同的钢轨交替侧磨,应该现场调研找出正确的成因,然后采取更有效、更简单的整治措施。

## 6 结论

1) 本文从长大线列车动力学分析出发,以 SIMULINK 为建模手段,研究了纯滚线偏距对钢轨交替侧磨成因的影响。通过仿真发现,随着列车编组的增加,各车轮对的运动规律具有周期性,且周期基本一致。

2) 在纯滚动线偏距偏向一侧的非对称钢轨的情况下进行仿真,纯滚动线偏距偏向一侧的非对称钢轨,会使得轮对偏向过打磨一侧,其波长与过打磨有关,而轮对的横移量与纯滚动线偏距相关。

3) 对于多个交替的纯滚动线偏距的线路进行仿真,轮对会一致地朝钢轨左右侧进行交替性的横移,此时,多个轮对的偏向相同,这种偏移以及轮轨的相互作用,会导致钢轨的交替侧磨。

4) 本文的研究可以解释杭深线上隧道外侧的钢轨侧磨成因机理,对于隧道内的侧磨现象则需要进一步的研究。根据当前的研究结论,对于杭深线已经存在的钢轨交替侧磨区域,可行的整治措施为钢轨修复性打磨,以及进行钢轨廓形设计,来改善车辆的运行状况。

## 参考文献:

- [1] ZHONG W, HU J J, LI Z B, et al. A study of rolling contact fatigue crack growth in U75V and U71Mn rails[J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 388-392.
- [2] POVILAITIENE I, KANAITIS I Z, PODAGELIS I. Influence of gauge width on rail side wear on track curves [J]. *Journal of Civil Engineering & Management*, 2006, 12(3): 255-260.
- [3] 刘丁阳. CRH\_2 动车组通过曲线时的钢轨磨耗及蛇形运动分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [4] 姚玉侠. 铁路曲线钢轨侧面磨耗原因及减缓措施[J]. *铁道运营技术*, 2006, 12(2): 24-25.
- [5] 谭立成. 长波长直线钢轨交替侧磨和机车轮缘磨耗的形成和防治[J]. *中国铁道科学*, 2002, 23(4): 67-71.
- [6] 柴雪松, 罗林. 提速区段直线钢轨交替不均匀侧磨的成因及其影响[J]. *铁道学报*, 2002, 24(3): 49-56.
- [7] 练松良. 直线轨道钢轨交替侧磨成因分析[J]. *中国铁道科学*, 2001, 22(2): 107-112.
- [8] 曹建新, 周锡祺. 交替侧磨移位新生原因初探[J]. *铁道标准设计*, 2001, 21(2): 15-17.
- [9] 史小坤. 曲线地段钢轨不均匀侧磨原因分析及防治措施[J]. *铁道标准设计*, 2002(3): 54-55.
- [10] 沈钢. 轨道车辆系统动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [11] VERMUELEN P J, JOHNSON K L. Contact of nonspherical elastic bodies transmitting tangential forces. *J Appl Mech*, 1964, 31: 338-340.
- [12] 杨辉, 付雅婷. 列车运行建模与速度控制方法综述[J]. *华东交通大学学报*, 2018, 35(5): 1-8.
- [13] 黎琳. 城轨列车曲线撞击的动力学特性研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.

## Research on Linear Alternating Side Grinding of High Speed Rail

Bai Lufeng, Zhang Xu, Mao Xin, Shen Gang

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

**Abstract:** On the linear section of the Hangzhou–Shenzhen passenger rail line, there exists alternating side grinding on the linear rails. When the EMU passes through the grinding section, the truck will be swayed in an unstable state. This paper studies this problem from the perspective of wheel–rail dynamics of long trains, and gives some harnessing measures about the alternating side grinding. By building a simulation model of trains based on MATLAB/SIMULINK software, the operation of the EMU through the existence of pure rolling line offset straight rail is carried out. It is found that the formation of alternate side grinding of the rail is affected by the wheel–to–pure rolling line offset. When the rail is unevenly worn due to factors such as asymmetric grinding, the pure rolling line of the wheel pair on the rail will be offset, which will cause the periodic polarization phenomenon of the train wheel pair, thus eventually leading to the overall lateral low–frequency shaking of the long trains.

**Key words:** alternating side wear; simulation; pure rolling line offset; harnessing measure