

## 更高速下轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为及中/短波不平顺临界限值研究

Zhao, Xin; Huang, Shuangchao; Yang, Jizhong; Yang, Zhen; Wen, Zefeng

### DOI

[10.3969/j.issn.1001-8360.2024.10.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2024.10.003)

### Publication date

2024

### Document Version

Final published version

### Published in

Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society

### Citation (APA)

Zhao, X., Huang, S., Yang, J., Yang, Z., & Wen, Z. (2024). 更高速下轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为及中/短波不平顺临界限值研究. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*, 46(10), 21-32.  
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2024.10.003>

### Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).  
Please check the document version above.

### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

### Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.  
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

***Green Open Access added to TU Delft Institutional Repository***

***'You share, we take care!' - Taverne project***

**<https://www.openaccess.nl/en/you-share-we-take-care>**

Otherwise as indicated in the copyright section: the publisher is the copyright holder of this work and the author uses the Dutch legislation to make this work public.

文章编号: 1001-8360(2024)10-0021-12

# 更高速下轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为及 中/短波不平顺临界限值研究

赵 鑫<sup>1</sup>, 黄双超<sup>1</sup>, 杨吉忠<sup>2</sup>, Zhen YANG<sup>3</sup>, 温泽峰<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031;  
3. Section of Railway Engineering, Delft University of Technology, Zuid-Holland Delft 2628CN)

**摘 要:** 简述轮轨滚动接触行为预测方法现状的基础上, 选择最适于 400 km/h 及以上更高速和中/短波不平顺激励下轮轨“滚-滑-跳”接触行为分析的瞬态滚动接触显式有限元建模方法, 建立更高速轮轨三维瞬态滚动接触时域分析模型, 数值模拟了轮对在典型曲线轨道上的瞬态曲线通过行为。根据现营高速轮轨的中/短波不平顺调研, 以波长 30~210 mm 钢轨波磨为典型不平顺, 考虑波磨激励下左右两侧轮轨动力作用相互影响, 分析波磨几何等因素对速度 500 km/h 及以下轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为的影响。考虑低、中频动力减载等因素的前提下, 仅从轮轨接触脱离角度, 提出轮轨中/短波不平顺的临界管理限值建议, 讨论其重要性、合理性和应用局限, 并与《高速铁路钢轨打磨管理办法》规定的波磨整治限度进行对比。

**关键词:** 更高速铁路; 轮轨滚动接触; 中/短波不平顺; 轮轨脱离; 临界限值; 显式有限元

中图分类号: U211 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2024.10.003

## On Transient Wheel-Rail Rolling-Sliding-Jumping Contact and Critical Sizes of Short/Medium-wave Irregularities at Higher Speeds

ZHAO Xin<sup>1</sup>, HUANG Shuangchao<sup>1</sup>, YANG Jizhong<sup>2</sup>, YANG Zhen<sup>3</sup>, WEN Zefeng<sup>1</sup>

(1. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu 610031, China; 3. Section of Railway Engineering, Delft University of Technology, Delft 2628CN, The Netherlands)

**Abstract:** A review of prediction methods for wheel-rail rolling contact was first presented. It is found that the 3-D transient rolling contact model developed using the explicit finite element method seems to be the most suitable approach for analyses of transient wheel-rail rolling-sliding-jumping contact at 400 km/h, or at higher speeds, and in the presence of short/medium-wave irregularities. Therefore, a transient rolling contact model was developed to simulate the dynamic curving of a wheelset on a typical curved track in the time domain. Harmonic or ideal rail corrugation was taken as the typical short/medium-wave irregularity to study its influences on transient rolling-sliding-jumping contact, with a wavelength range of 30~210 mm considered on the basis of field observations of high-speed wheels and rails in operation. Besides corrugation geometry, corrugation occurring on the high and/or the low rails was also taken into account properly, with the speed up to 500 km/h. Considering dynamic unloading caused by dynamics of low and medium frequency, the critical sizes of short/medium-wave irregularities were determined, at which the wheel-rail contact loss just occurred. Finally, proposals for management of wheel-rail short/medium-wave irregularities were discussed from the aspects of importance, rationality and application limitations, and compared with the corrugation limit recommended for rail grinding operations in *Management Measures of High-speed Railway Rail Grinding*.

**Key words:** higher speed railway; wheel-rail rolling contact; short/medium-wave irregularities; wheel-rail contact loss; critical sizes; explicit finite element method

收稿日期: 2022-08-05; 修回日期: 2023-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(52027807); 四川省国际科技创新合作项目(2021YFH0006); 牵引动力国家重点实验室自主课题(2022TPL\_T06)

第一作者: 赵 鑫(1981—), 男, 山东泰安人, 研究员, 博士。E-mail: xinzhao@swjtu.edu.cn

通信作者: 赵 鑫(1981—), 男, 山东泰安人, 研究员, 博士。E-mail: xinzhao@swjtu.edu.cn

目前,CR450 创新工程已全面展开,具备 400 km/h 运行潜力的成渝中线也已开建,标志着中国高速铁路即将迈入时速 400 公里商业运营时代,更高速铁路呼之欲出。法国曾于 2007 年 4 月 3 日创造了 574.8 km/h 的世界最高试验速度,日本、德国和西班牙等国也曾开展 400 km/h 以上的更高速线路试验。2010 年 12 月 3 日,我国在京沪高铁实现了 486.1 km/h 的铁路运营试验速度。这类线路试验通常采取很多非常规的保障措,以确保成功,试验条件与全天候商业运营条件存在不可忽略的差异,测试数据不能完全满足商业运营需求。所以,更高速铁路仍然需要系统性研究与论证。

轮轨滚动接触副,仍然是更高速铁路的关键子系统。能否实现更高速下轮轨平稳滚动接触,仍直接决定更高速铁路的成败。世界范围内暂无成熟研究成果与经验,因此,亟需就更高速下轮轨动态滚动接触行为开展系统研究,揭示广波长界面不平顺等复杂因素的影响机制,为更高速运营提供基础支撑。本文以现营高速铁路中频发的轮轨中/短波不平顺<sup>[1-3]</sup>为研究对象,模拟分析更高速动车组通过曲线时的轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触,从接触脱离角度提出中/短波不平顺的临界限值,为未来更高速轮轨不平顺管理提供参考。

## 1 轮轨滚动接触行为预测方法现状与选择

轮轨滚动接触,本质上是一个移动旋转体的高频动力学问题,与车轮旋转和平移、轮轨变形等紧密相关。接触边界沿表面迅速移动,滚动接触状态因轮轨材质高刚度而对接触几何、材料行为和系统宽频振动等高度敏感,尤其是在高频动力行为更为重要的高速、更高速条件下。现场服役条件下,轮轨整体会发生毫米级结构变形,但轮轨接触斑附近材料的弹性变形通常小于亚毫米级,接触斑具有面积狭小、应力高、应变低、应力应变梯度大及应变率较高等特征,见图 1。图 1 中, $G_n$  和  $G_t$  为刚性和弹性前提下轮轨接触几何; $t$  为时刻; $p_{\max}$  为最大接触压力; $\phi$  为直径。欲精确求解这一问题,需在考虑高速移动载荷边界的前提下,实现轮轨刚体运动和数量级差异的轮轨结构、弹性变形的精确计算,即轮轨滚动接触是一个内含车轮刚体大位移、轮轨系统宽频结构振动和局部连续体振动的时变动力学难题,尤其广波长轮轨不平顺存在时。材料非线性、多变黏着、滚动效应、速度效应等复杂因素,也会使问题进一步复杂化。

目前,尚无接触斑内动态应力应变的成熟测量技术<sup>[4]</sup>,基于车轮变形测量的现有测力轮对技术<sup>[5]</sup>,一

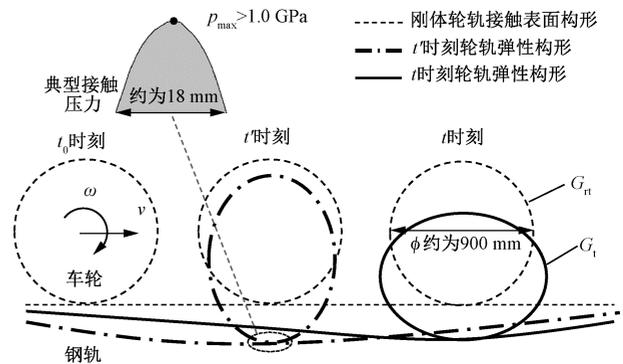


图 1 轮轨滚动接触行为特点示意(椭圆车轮夸张示意了车轮的不同振动状态)

般认为仅适于 30 Hz 以下的低频动态轮轨力测量。所以,以往的轮轨滚动接触行为研究,一直以理论和数值方法为主。

传统滚动接触理论,包括基于解析法的 Vermeulen-Johnson 理论、沈氏理论等,以及基于数值法的 Kalker 系列理论<sup>[6-7]</sup>,普遍采用稳态滚动假设,不适用于真实几何轮轨间的非稳态/瞬态滚动接触行为分析。解析法通常以 Hertz 法向接触理论<sup>[8]</sup>为基础,隐含 Hertz 型接触、线弹性材料、无限半空间接触体、库伦摩擦和简化黏着-滑移区分布等假设,其主要目的是导出蠕滑率/力关系,用于系统动力学分析,无法得到精确的接触应力,不适用于轮轨伤损等研究。Kalker 系列数值算法中,最具代表性的是精确理论(Contact 程序),采用边界元思想,舍弃了 Hertz 型接触和简化黏着-滑移区分布等假设,但沿用了解析法中其他假设。Kalker 精确理论的拓展数值算法见文献[9-12],不再隐含无限半空间假设。近来,也发展了考虑横向非 Hertz 接触几何特征的滚动接触快速求解算法<sup>[13-16]</sup>,沿用了 Kalker 的切向接触快速求解方法<sup>[17]</sup>,依然隐含上述众多假设。

有限元法便于考虑轮轨真实几何和材料非线性等复杂特征,是目前最可行的瞬态滚动接触行为建模方法。其控制方程与一般固体力学动态问题大致相同,通常利用不引入额外变量的罚函数法,将任一时刻的法、切向接触控制不等式引入原问题的等效泛函。静态或准静态轮轨接触有限元模型<sup>[18-19]</sup>计算可得到接触斑和法向接触应力分布,但无法得到准确的动态结果,尤其切向动态接触解。表征车轮滚动、轮轨滚滑等行为,主要有 ALE 或纯 Lagrangian 描述建模两种方法。

从现有文献看,ALE 模型仅能求解稳态滚动<sup>[20-21]</sup>,基于纯 Lagrangian 描述和显式时间积分的显式滚动接触有限元模型<sup>[22]</sup>,才能实现动/瞬态滚动接

触行为模拟。早期显式有限元模型,仅限于普速轮轨纯滚动下的法向接触分析<sup>[23-24]</sup>,未分析切向接触,且假设轮轨接触表面平顺。Zhao 等<sup>[22,25]</sup>利用显式有限元法建立的三维轮轨瞬态滚动接触模型,舍弃了传统滚动接触理论的诸多假设,考虑轮轨真实几何、与轮轨高频动力行为紧密相关的车辆和轨道结构等因素,内含不平顺激励等因素造成的法向接触力波动(即“跳”)和切向波动,首次实现了不同蠕滑率、复杂黏着和任意三维中/短波不平顺下轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为模拟。

三维轮轨瞬态滚动接触模型,始于欧洲普速(160 km/h)钢轨隐伤(Squats)研究<sup>[26]</sup>。以 Hertz 型接触和平顺表面为前提的典型牵引工况为例,通过对比 Contact 计算结果,完成了三维轮轨瞬态滚动接触模型的法/切向接触解验证,发现特征尺寸为 1 mm 左右的网格才能得到足够精确的接触解<sup>[22]</sup>。同时,完成针对静态、Spence 型和 Cattaneo 型接触的法/切向接触解验证<sup>[27]</sup>。

普速下三维轮轨瞬态滚动接触模型,揭示了绝缘接头处刚度突变引发隐伤的机理<sup>[28]</sup>,研究了典型钢轨隐伤引发的高频法/切向轮轨力、高频法向轮轨力在轨道内的动态传递及扣件模型的影响<sup>[29-30]</sup>,分析了轮轨表面塑性变形<sup>[41]</sup>和随滑动速度变化的摩擦系数<sup>[25]</sup>对瞬态滚动接触解的影响。文献[31-32]在该模型预测的基础上,开发了基于轴箱加速度的钢轨隐伤和绝缘接头螺栓松动检测方法,并进行了现场试验验证,侧面验证了三维轮轨瞬态滚动接触模型的可靠性。针对轴重高至 40 t 的重载铁路,结合适于低、中频动力分析的车辆-轨道耦合动力学模型,研究了广波长不平顺激励下轮轨法向轮轨力,提出了重载铁路动态系数设计建议<sup>[33]</sup>和 40 t 轴重重载铁路的最佳扣件刚度<sup>[34]</sup>。

以中国高速铁路为背景,有研究学者建立了最高速度 500 km/h 的三维高速轮轨瞬态滚动接触模型<sup>[35]</sup>,引入考虑应变率效应的材料非线性本构<sup>[2,36]</sup>,并拓展至对滚试验台<sup>[37]</sup>和全轮对<sup>[38]</sup>建模,分析了短低黏着区<sup>[39]</sup>、波磨<sup>[3]</sup>、车轮硌伤与擦伤<sup>[40]</sup>、车轮多边形<sup>[41]</sup>等中/短波不平顺和钢轨脱碳层<sup>[42]</sup>对高速轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触的影响,并预测了轮轨摩擦功的三维分布,估计了轮轨表面材料的应变率水平<sup>[43]</sup>,为高速轮轨损伤等研究提供了关键手段。以钢轨波磨下高速轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为预测为参照,发现车辆-轨道耦合动力学模型会显著高估高频轮轨力<sup>[3]</sup>,提出适于高速轮轨高频动力分析的 Hertz 弹簧修正<sup>[44]</sup>,实现了车辆-轨道耦合动力学模型计算成本基本不变前提下的计算精度提升。进一步引入 Archard、

Ty 和 Zobory 等磨损模型<sup>[45]</sup>,以及虚拟裂纹闭合法<sup>[46-47]</sup>,分别实现了高速轮轨动态磨损和宏观裂纹瞬态扩展行为预测。值得指出,上述瞬态滚动接触建模方法,也扩展至高速变轨距轮对花键副<sup>[48]</sup>和机车牵引齿轮副<sup>[49]</sup>的瞬态接触建模,实现了各自服役条件下的瞬态接触行为预测。

表 1 更精炼地展示了现有轮轨滚动接触行为分析方法的特点和适用性。鉴于此现状,本文采用显式有限元法,建立了更高速轮轨的三维瞬态滚动接触模型,预测更高速和中/短波不平顺条件下轮轨通过曲线时的瞬态“滚-滑-跳”接触行为。

## 2 更高速轮轨的三维瞬态滚动接触模型

### 2.1 模型简介

以我国某高速铁路系统为背景,利用 Ansys LS-DYNA 建立考虑全轮对和曲线轨道的更高速轮轨的三维瞬态滚动接触有限元模型,见图 2。相较于以往建立的半轮对直线轨道模型,其内含轮对左右两侧轮轨动力作用的相互影响,将横移、摇头和侧滚等因素考虑在内,可模拟横向和自旋蠕滑显著的复杂运行工况,能更准确和全面模拟高速轮轨服役条件下的高频振动行为和瞬态“滚-滑-跳”接触。为便于表述,建立如图 2 所示的固定笛卡尔坐标系  $oxyz$ ,坐标原点位于轮对初始位置正下方的轨道板表面中心处。

接触界面之上,考虑一个动力轮对及其一系悬挂,动车组其余部件简化为相互耦合的质点,通过一系悬挂与车轴轴线相连,轴重默认取运营条件下低值 15 t,车轮廓形 LMA。接触界面之下,考虑曲线轨道的圆曲线段,由 CN60 钢轨、扣件、轨道板、轨道板间隙填料和砂浆层等组成,轨道长度 15.2 m。轨道设为右曲线,曲线半径取现营 350 km/h 速度级高速铁路的最小值 7 000 m,参考现场典型值,超高取 133 mm,轨底坡取 1:40,扣件间距和宽度分别为 0.65、0.13 m。轮对、钢轨、轨道板、间隙填料和砂浆层等均采用 8 节点六面体单元离散,以充分考虑其三维几何,利用连续网格离散轨道板、间隙填料和砂浆层,忽略其间接触界面。一系悬挂和扣件由弹簧阻尼单元组模拟,簧上质量由质量单元表征。牵引电机、制动盘和轴箱等轮对附属构件,通过施加于轴线相应位置处的质量单元表征,即仅考虑其质量属性。更多模型参数见表 2。

采用不均匀网格划分策略,需要高精度的轮轨接触区内采用 1.0 mm 单元尺寸,其他区域尽可能稀疏,以降低模型规模,最终总节点和单元数分别为  $6.544 \times 10^6$  和  $5.899 \times 10^6$ 。任一时刻下,轮轨间法、切向接触由基于罚函数的“面-面”接触算法求解,摩擦系数取

表 1 轮轨滚动接触行为主要预测方法的特点和适用性

滚动接触预测方法	代表理论、算法或模型	假设或前提	适用性
传统滚动接触理论	解析理论	Hertz 法向接触解、简化黏着-滑移区分布 无限半空间、平面接触斑 稳态滚动、线弹性材料、库伦摩擦等	用于 Hertz 接触,重在蠕滑率/力关系,用于动力行为预测
	Kalker 数值算法	简化理论 (Fastsim)、精确理论 (Contact) 边界元或简化方法 无限半空间、平面接触斑 稳态滚动、线弹性材料、库伦摩擦等	可用于非 Hertz 接触,得到斑内黏着滑移区分布,适于动力行为、准稳态损伤等预测
	Kalker 算法拓展	Contact 拓展 <sup>[10]</sup> 、复杂几何法向接触 + 切向 Kalker 简化或条带理论 <sup>[13-17]</sup> 边界元或简化方法 1/4 空间 <sup>[10]</sup> 、横向复杂几何 <sup>[13-17]</sup> 、平面接触斑 稳态滚动、线弹性材料、库伦摩擦等	较于 Kalker 算法,主要改进了复杂接触几何的处理能力
有限元接触模型	静态或准静态模型	隐式有限元法、连续介质 静或稳态接触、库伦摩擦	较于传统理论,舍弃了几何、材料相关假设,但无法模拟滚滑,仅适于法向接触求解
	稳态滚动接触模型	ALE 描述、隐式有限元法、连续介质 稳态接触、库伦摩擦	用于稳态滚滑模拟,无时间变量,故无法处理轮轨不平顺
	瞬态滚动接触模型	Lagrangian 描述、隐-显式结合有限元法、连续介质 网格离散后施加擦伤、波磨、多边形等三维不平顺 考虑材料塑性 <sup>[4]</sup> 及其不均匀 <sup>[42]</sup> 、应变率效应 <sup>[2]</sup> 等复杂材料特性,随滑动速度变化 <sup>[25]</sup> 及低黏着 <sup>[39]</sup> 等复杂摩擦特性的瞬态模型	模拟真实轮轨几何、任意三维不平顺、牵引/制动等条件下轮轨中/高频动力作用和瞬态“滚-滑-跳”接触行为 分析材料、摩擦等复杂特性与不同几何、振动及运行条件下轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触间相互影响
	拓展模型:轮轨瞬态磨耗 <sup>[45]</sup> 和裂纹瞬态扩展 <sup>[46]</sup> 分析模型	基于瞬态法、切向接触解,引入磨耗和裂纹扩展分析模型	分析瞬态滚动接触载荷下轮轨磨耗和宏观裂纹扩展行为

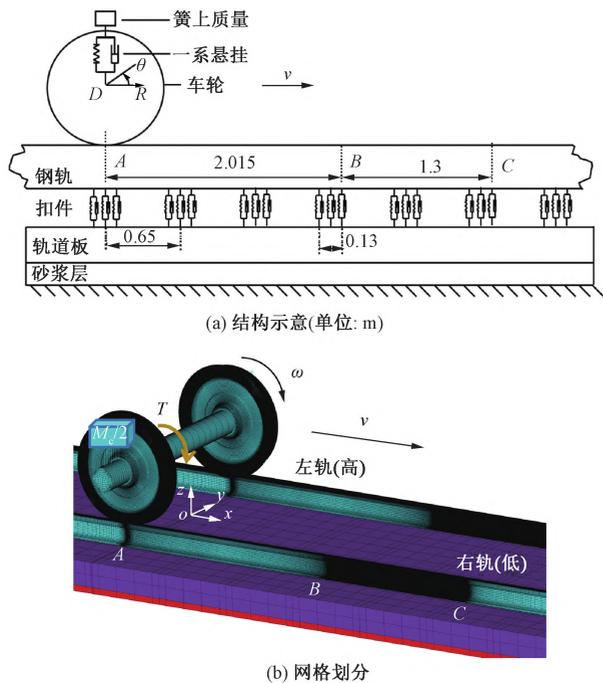


图 2 曲线段全轮对三维轮轨瞬态滚动接触有限元模型

干态下典型值 0.45。模拟分析之前,先利用 Simpack 开展动车组动力学分析,得到稳态通过曲线时导向轮对的横移、侧滚角和摇头角,见表 3,作为瞬态滚动接触模型的初始条件。之后,利用隐式求解器,求得系统在重力和离心力作用下的静态位移场,用于初始化瞬态分析,施加初始速度、牵引扭矩及约束边界等条件

表 2 模型中主要参数的取值

参数	数值	
簧上质量 $M_c$ /kg	13 220	
车轮半径/mm	430	
簧下质量	轮对质量/kg	1 019
	附属质量/kg	761
一系悬挂	刚度系数/(MN · m <sup>-1</sup> )	0.88
	阻尼/(kN · s · m <sup>-1</sup> )	4
扣件	刚度系数/(MN · m <sup>-1</sup> )	22
	阻尼/(kN · s · m <sup>-1</sup> )	200
车轮钢轨材料	弹性模量/GPa	205.9
	泊松比	0.3
	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	7 790
	阻尼常数 $\beta$	$1.0 \times 10^{-4}$
轨道板	弹性模量/GPa	34.5
	泊松比	0.25
砂浆层	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	2 400
	弹性模量/GPa	8
轨道板间隙材料	泊松比	0.2
	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	1 600
	弹性模量/GPa	29.5
	泊松比	0.25
	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	2 400

后,进行瞬态滚动接触分析。瞬态分析在时域内开展,采用显式时间积分法,具体为中心差分格式,由最小网格尺寸决定的时间积分步长取  $6.92 \times 10^{-8}$  s,其足以捕捉更高速轮轨滚动接触的瞬态和低频行为。模型设置长 2.015 m 的动态松弛区(图 2 所示 AB 段),以耗散

不完美初始条件引发的初始激扰能量,使得轮对在进入求解区(图 2 所示 BC 段)时近似达到稳态滚动。主要边界条件设置如下:在牵引电机位置施加图 3 所示的时变牵引扭矩  $T$ ,默认牵引系数(轮对纵向牵引力与轮重之比)取极限值  $0.1^{[39]}$ ,牵引扭矩在最初  $0.005\text{ s}$  内线性增加到预设值  $T_m$ ,之后保持稳定,即忽略了现实中牵引扭矩的动态波动;轨道砂浆层底面固结,轨道纵向两端面施加对称约束,耦合一系悬挂和扣件两端节点的横、纵向自由度(即仅可发生垂向相对位移)。

表 3 动车组稳态通过 R7 000 m 曲线时导向轮对的横移、侧滚角和摇头角预测结果

速度/( $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	横移/mm	侧滚角/( $^\circ$ )	摇头角/( $^\circ$ )
350	3.889	0.008 48	0.008 6
400	4.148	0.005 62	0.009 2
450	4.400	0.006 88	0.009 9
500	4.823	0.002 92	0.010 8

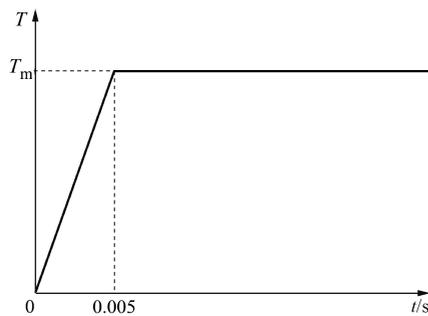


图 3 模型中施加的时变牵引扭矩

轮对、钢轨、轨道板、轨道板间隙材料和砂浆层均采用线弹性材料模型,轮对和钢轨中引入了 Rayleigh 阻尼  $c_m$ ,其计算式为

$$c_m = \alpha m + \beta k \quad (1)$$

式中: $\alpha$  和  $\beta$  分别为与质量  $m$  和刚度  $k$  成正比的阻尼常数,本文主要考虑与瞬态接触和低频振动相关的后者,即  $\alpha$  取  $0$ , $\beta$  取自试验数据的逆向结果<sup>[51]</sup>,具体参数见表 2。更多模型细节,请参照文献[3, 45]。

### 2.2 中/短波不平顺模型

现场服役中,高速轮轨会发生钢轨波磨、钢轨焊接接头不平顺、轮轨擦伤、车轮多边形等多种中/短波不平顺。通过修改表面相关节点坐标,可将各种三维不平顺施加于轮轨瞬态滚动接触模型中<sup>[3,36]</sup>。计算表明,相同尺寸的不平顺分别施加于车轮和钢轨侧,得到的结果相同。故本文以连续发生的钢轨波磨为典型中/短波不平顺,系统分析不平顺波长  $L$ 、波深  $d_m$  和宽度  $W$  等对更高速轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为的影响。为方便分析,将现场波磨几何进行一般化和抽象化,其纵、横向几何分别由三角函数和抛物线表征,即波磨区内任一点  $(x, y)$  处的深度  $d$  为

$$d = d_x [1 - (y/W)^2] \quad (2)$$

$$d_x = -0.5d_m \{1 - \sin[2\pi(x - x_s)/L + \pi/2]\} \quad (3)$$

式中: $d_x$  为纵向位置  $x$  处的最大深度(位于波磨横向中心);宽度  $W$  默认取足够大的  $30\text{ mm}$ ;  $x_s$  为波磨起点纵坐标,取  $1.5\text{ m}$ 。具体施加时,波磨横向中心(即横向最大深度位置)与轮轨接触斑中心迹线重合,保证实际波深等于其名义值。图 4 展示了施于左(高)轨的波深  $0.1\text{ mm}$ 、波长  $90\text{ mm}$  的波磨纵、横向几何。

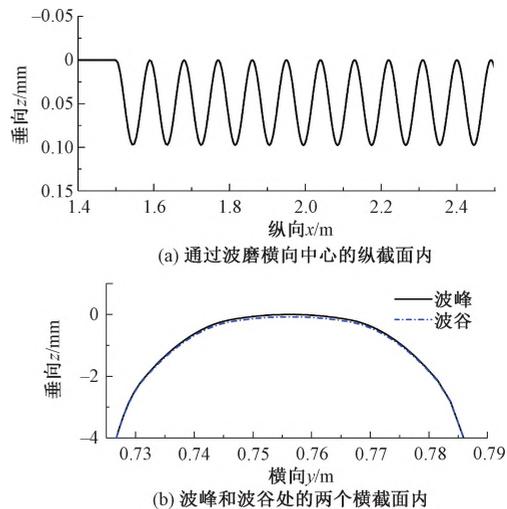


图 4 施加波深  $0.1\text{ mm}$ 、波长  $90\text{ mm}$  波磨后的钢轨表面几何

## 3 中/短波不平顺下轮轨瞬态动力作用

### 3.1 平顺轮轨表面工况

保持轮轨表面平顺,即不施加任何轮轨不平顺,速度  $v = 400\text{ km/h}$ 、摩擦系数  $f = 0.45$  和牵引系数  $\mu = 0.1$  条件下的两侧动态轮轨力结果见图 5。图中所示结果,本质上是随时间变化的,但为方便起见,将横坐标设置为与时间线性相关的轮对滚动距离,下文类似结果亦如此处理。

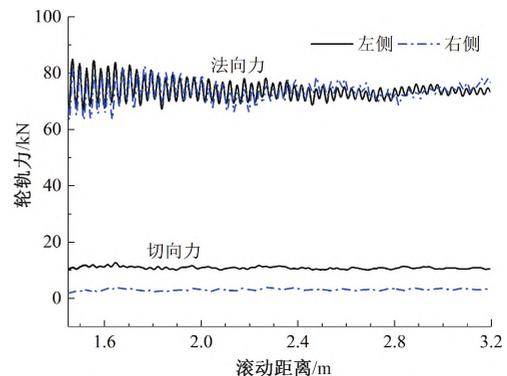


图 5 平顺轮轨下动态轮轨力 ( $v = 400\text{ km/h}$ ,  $f = 0.45$ ,  $\mu = 0.1$ )

由图 5 可见:上述运行条件下,左(高)、右(低)轨侧的法向轮轨力均基本进入了稳态,且幅值大致相同,在静轮重  $73.5\text{ kN}$  上下小副波动;因曲线通过时两侧

轮径差导致的纵向蠕滑力分量,在左右轨上方向相反,即轮径差所致的左侧车轮纵向蠕滑力与牵引力方向相同,右侧则相反,所以左侧切向轮轨力要显著高于右侧。需指出,所模拟曲线半径高达7 000 m,接触法向可大致认为与垂向重合,而切向轮轨力由牵引和曲线通过导致的纵向蠕滑力主导。

### 3.2 单侧波磨

在 3.1 节中工况的基础上,于左(高)轨或右(低)轨上施加波长 90 mm、波深 0.1 mm 的波磨,起始点对应轮对滚动距离 1.5 m,得到的动态轮轨力见图 6 和图 7。图中动态轮轨力沿用文献[29-30]的定义,即为带波磨工况的轮轨力与无波磨工况相应结果之差。

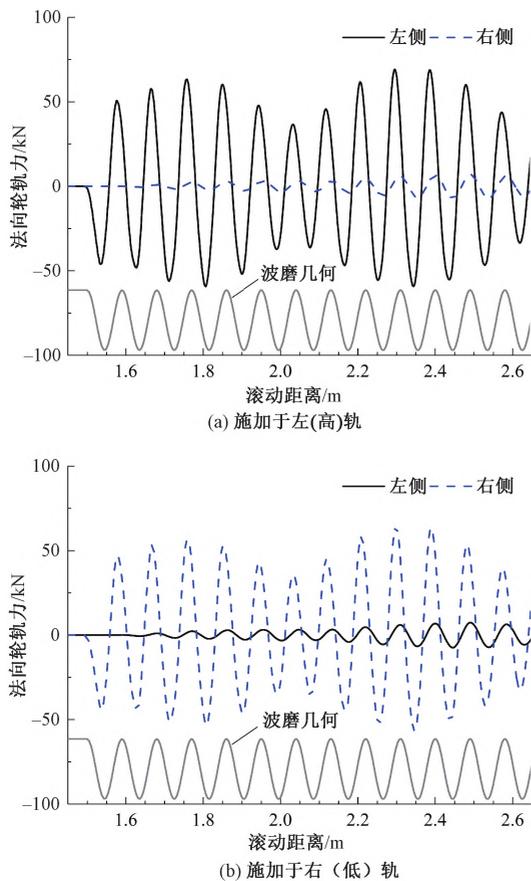


图 6 波长 90 mm、波深 0.1 mm 单侧波磨激励下法向动态轮轨力 ( $v=400$  km/h,  $f=0.45$ ,  $\mu=0.1$ )

由图 6(a)可见,当波磨施加于左轨时,两侧轮轨力均呈现出随波磨几何的周期性波动,但波磨侧的波动幅值要大得多,例如左侧最大法向减载量为-59.2 kN,是右侧相应值-7.3 kN 的 8.11 倍。这说明波磨所致振动可以由波磨侧传递至无波磨侧,但激烈程度大大降低,与文献[38]中的地铁分析结果类似。需指出,非波磨侧轮轨力波动起始时刻晚于波磨侧,其时间差对应波磨所致振动在两侧之间的传递过程,期间轮对滚动了约 0.1 m。就相位而言,左侧动态轮轨力超前于

波磨几何约  $0.34\pi$  rad,而右侧滞后于波磨几何约  $0.07\pi$  rad(“超前”即轮轨力波峰早于波磨几何波峰出现,反之“滞后”),使得两侧轮轨力波动存在约  $0.41\pi$  rad 的相位差。因模型充分考虑了系统柔性,所以振动传递过程的影响隐含在结果之中,相关分析见文献[52]。

波磨施加于右轨时的相应结果如图 6(b)所示,其特征与施加于左轨时非常相近,仅幅值略有差异,例如,左、右侧最大法向减载量分别为-7.3、-56.8 kN。这说明,无论波磨发生在哪一侧,其所激励振动的传递过程及所引发的动态轮轨力结果均基本一致。

图 7 进一步展示了图 6 工况对应的切向动态轮轨力结果。对比图 6 中的法向轮轨力可见,切向动态力的波动趋势并非跟随法向力,且切向轮轨力的波动范围远远小于法向轮轨力,但依然存在波磨侧波动范围大于非波磨侧的现象。另外,波磨施加于稳态切向轮轨力更大的高轨时,所引发的切向动态轮轨力幅值更大。相关机理详见文献[3]。

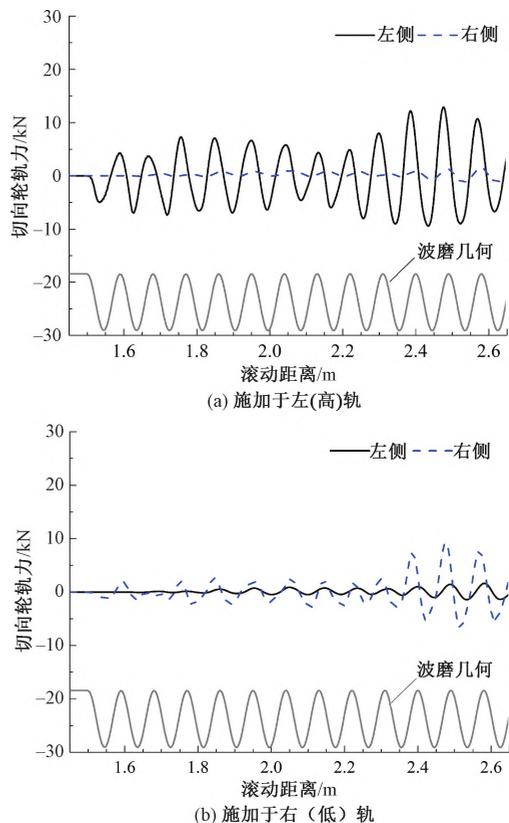


图 7 波长 90 mm、波深 0.1 mm 单侧波磨激励下切向动态轮轨力 ( $v=400$  km/h,  $f=0.45$ ,  $\mu=0.1$ )

### 3.3 双侧波磨

3.2 节单侧波磨的结果表明,波磨所致振动可以由波磨侧传递至非波磨侧,虽然传递效率不高。由此可以推测,双侧波磨工况下,任一侧轮轨力的动态波动应该由本侧波磨振动和传递过来的对侧波磨振动共同

决定,其叠加效果与上述两振动的相位差紧密相关,同相位时振动最为剧烈。本节以3.2节中动态轮轨力更大的左侧波磨工况为基础,在右侧钢轨上也施加相同波长和波深的波磨,但其起始点较左侧更早或更晚出现,分析其所激发振动对左侧动态轮轨力的影响。

定义两侧波磨起始点间纵向距离  $\Delta x_s$  为

$$\Delta x_s = x_s^r - x_s^l \quad (4)$$

式中:  $x_s^r$  为右侧波磨起点纵坐标;  $x_s^l$  为左侧波磨起点纵坐标。由3.2小节可知,400 km/h 速度下一侧波磨所致振动传递至另一侧的时间内,轮对滚过距离约为0.1 m。这意味着,当  $\Delta x_s = 0.1$  m 时,两侧波磨所致振动在左侧刚好处于同相位。考虑波磨波长为90 mm,当  $\Delta x_s = 0.055$  m ( $\Delta x_s = (0.1 - 0.09/2)$  m) 时,相位差达到  $\pi$  rad,意味着从右侧传递过来的振动会在左侧与左侧自身振动形成最强的抑制作用。图8展示了  $\Delta x_s$  分别取0.1、0.055、0 m 及仅左侧存在波磨的条件下,左侧法向动态轮轨力随滚动距离的变化。可见,不同条件下的法向动态轮轨力波动趋势基本保持不变,  $\Delta x_s = 0$  m 和单侧波磨的结果,位于  $\Delta x_s = 0.1$  m 和  $\Delta x_s = 0.055$  m 之间,4个工况中法向轮轨力最大减载的差异最高约9.19 kN,为静轮重73.5 kN的12.5%。需说明,图8(b)中最大减载量由图8(a)所示时段内结果得到。

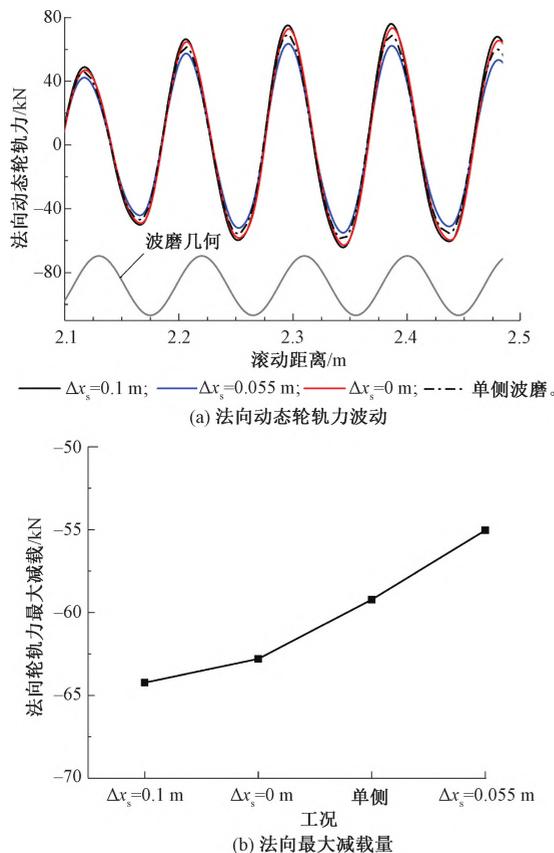


图8 波长90 mm、波深0.1 mm波磨激励下两侧波磨相位差对左侧法向动态轮轨力的影响

## 4 轮轨脱离临界限值

当法向轮轨力减载量等于静轮重时,轮轨会处于接触脱离状态。此时,轮轨牵引、制动及导向等力均消失,轮对一定程度上处于失控状态。所以,上述分析中,重点提及了法向轮轨力减载。应指出,波磨引发的轮轨脱离,持续时间往往很短,即仅导致轮对短时失控。

### 4.1 临界波深确定方法

以小节3中分析的轮对400 km/h速度通过波长90 mm波磨为例,考虑  $\Delta x_s = 0.1$  m 的最危险双侧波磨工况,预测了波深在0.05~0.2 mm范围内变化时的轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为,得到的左侧法向动态轮轨力随滚动距离变化见图9(a),所示时段内最大减载量随波深的变化见图9(b)。可见,波深小于0.1 mm时,发生在波谷附近的法向最大减载量与波深近似呈线性关系,增至0.15 mm时,最大减载已达静轮重73.5 kN,即轮轨发生脱离。基于波深小于等于0.1 mm工况的结果,进行如图9(b)所示的线性外插,得到刚好发生轮轨脱离的临界波深  $d_c$  为0.118 mm。由图9(c)所示的波深0.118 mm下法向轮轨力原始结果可见,最小法向轮轨力仅为1.45 kN,非常接近于零。这说明,上述线性外插方法可以较精确地确定临界波深,下文临界波深均采用此法确定。

### 4.2 临界波深随参数变化

假设双侧钢轨波磨的波长相同,并设定双侧波磨动力响应同相位,依据现场轮轨不平顺情况<sup>[1-3,53]</sup>,波长变化范围确定为30~210 mm,最高速度500 km/h,得到临界波深随波长和速度的变化结果,如图10所示。

由图10可见,同一速度下,临界波深先随着波长的增加而大致减小,在60~120 mm内某波长处达到最小值后,大致随波长的继续增加而增大。波长大于150 mm时,临界波深随着速度的增加而减小,但更小波长下,速度的影响并不明显。这些复杂现象背后的原因,大致如下:当某些波长下通过频率与系统某阶模态重合或相近时,会导致更强的动态轮轨力,导致更小的临界深度;固定波长下通过频率随速度变化,系统存在多阶模态等因素,使得图10中结果呈现出一些不可忽略的反复现象。关于速度、波磨波长等因素的影响分析,详见文献[3]。由图10可见,所分析的速度和波长工况中,最小波磨临界波深发生在速度450 km/h和波长120 mm时,具体为0.105 mm。

需指出,上述临界波深分析中,仅考虑了钢轨波磨

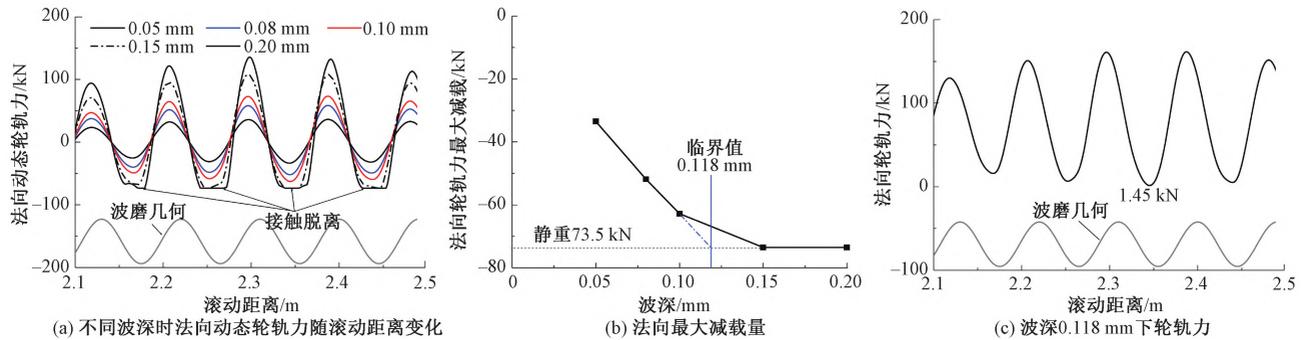


图 9 两侧波磨振动同相位条件下波深对左侧轮轨力的影响

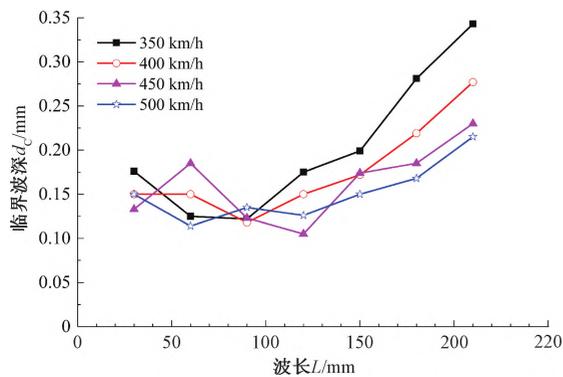


图 10 默认轴重下临界波深随波长和速度的变化

这一中/短波不平顺导致的中、高频动力减载,但实际上广泛存在的长波不平顺也会造成低频动力减载,从而影响临界波深结果。文献[33]中重载线轨道谱(波长 0.5~100 m)激励下低、中频动力减载率(轮轨力减载幅值与静轮重的比值)约为 30%,300 km/h 高铁实测不平顺下约为 41% (去掉了或有中/短波不平顺对应的局部峰值)<sup>[1,54]</sup>,甚至超过 50%<sup>[55]</sup>。考虑低频动力作用下,相关振动有足够时间向上传递至动车组所有构件,在轮轨高速瞬态滚动接触模型中,低频减载可通过降低簧上质量的方式近似模拟,进一步叠加轮轨界面上模拟的中/短波不平顺,最终实现宽频动力减载

分析。除低频动力作用外,轴际差异、空载、偏载、轴重转移、不平衡超高等因素,也可能导致轴重降低,其均由簧上质量降低模拟。

以往研究及试算表明,轮轨间高频动力作用主要由轮对和轨道决定,簧上质量的影响可忽略<sup>[33,56-57]</sup>。所以,低、中频动力作用所致减载及其他轴重降低等对临界波深的影响,可通过简单降低临界动力减载幅值的方式考虑在内,即使用更低的静轮重作为临界减载量。值得指出:如图 9(a)所示,轮对滚过波磨时,会在波谷附近发生动力减载,而在波峰附近发生动力加载,此交替加、减载的周期性现象,同样存在于低、中频动力作用中;低、中频动力减载会加大波磨区段轮轨短时脱离的风险,而加载则会抑制轮轨脱离。本文仅考虑更危险的低、中频动力减载对临界波深的影响,相应动力加载的影响,因模拟结果中最大法向减载量为静轮重,即-7.5 t 或-73.5 kN,无法用上述简化方法分析。

考虑低、中频动力减载和轮重波动等因素,临界减载量取 3.5~6 t (原静轮重的 46.7%~80%)时,得到的临界波深分布如图 11 所示。可见,轴重降低幅值越大,临界波深越小。降低 53.3%时(图 11(c)),最小临界波深已经低于 0.05 mm。

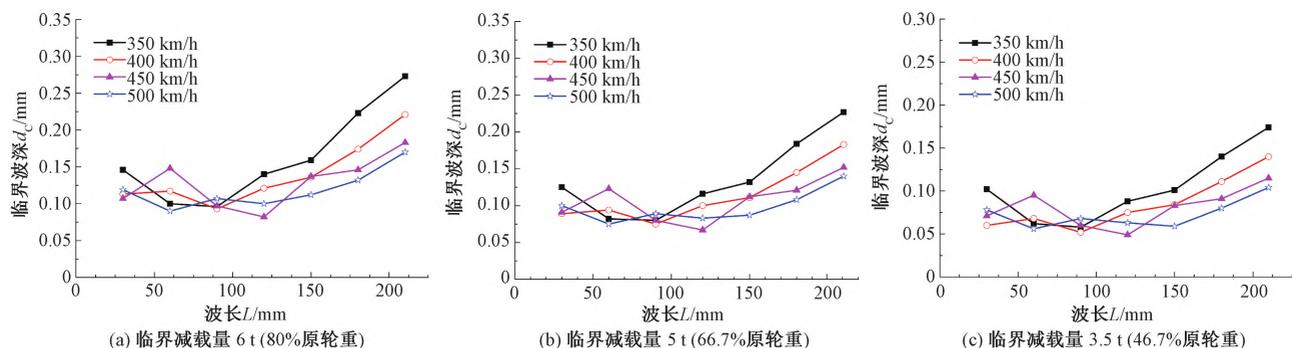


图 11 不同临界减载量下得到的临界波磨深度

#### 4.3 临界波深管理限值建议

考虑上文提到的轨道谱激励下典型动力减载幅值,从避免发生轮轨脱离角度,建议以图 11(b)中的临

界波深作为现场轮轨中/短波不平顺的管理限值,即低、中频动力作用及其他轴重降低所致减载率取 33.3%。通过二次多项式拟合,得到速度为 350、400、

450、500 km/h 对应的临界波深  $d_{C1}$ 、 $d_{C2}$ 、 $d_{C3}$  及  $d_{C4}$  分别为

$$d_{C1} = 0.149 - 1.43 \times 10^{-3}L + 8.73 \times 10^{-6}L^2 \quad (5)$$

$$d_{C2} = 0.111 - 7.76 \times 10^{-4}L + 5.32 \times 10^{-6}L^2 \quad (6)$$

$$d_{C3} = 0.129 - 9.27 \times 10^{-4}L + 4.91 \times 10^{-6}L^2 \quad (7)$$

$$d_{C4} = 0.120 - 8.60 \times 10^{-4}L + 4.50 \times 10^{-6}L^2 \quad (8)$$

式中:波长  $L$  的取值范围为 30~210 mm。

图 12 展示了由式(5)~式(8)计算的临界波深变化结果。

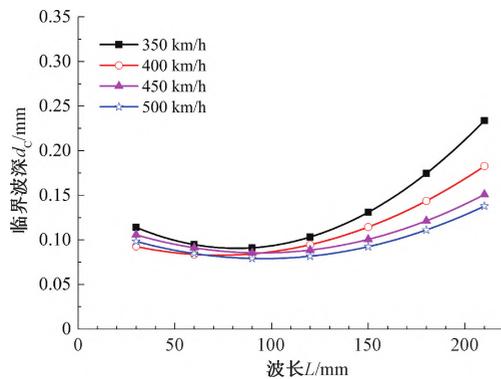


图 12 不同速度下临界波深管理限值建议

## 5 讨论

中/短波不平顺条件下,一旦发生轮轨短时脱离,轮轨法向轮轨力会降为零,源自法向轮轨力的牵引、制动和导向轮轨力也降为零,故无法平衡施于轮对的牵引和制动扭矩,也无法实现轮对导向。其后果之一是文中提及的短时失控,具体如下:首先,轮对无法有效执行来自列车控制系统的加速、减速指令;其次,接触脱离时段内,不平衡的牵引和制动扭矩会导致轮轨蠕滑率随时增大,叠加期间轮轨导向行为缺失,从而再接触时产生过大的蠕滑力,恶化轮轨接触状态,使得轮轨实际滚动接触状态与理想状态差异巨大,造成轮对动力行为控制困难。需要说明,因持续时间很短,上述短时失控所引发的接触状态变化有限,尤其是在运行速度低的普速、城际和城轨铁路上,故以往并未引起行业的重视,但在追求高安全性、高稳定性、高舒适性、高智能的更高速铁路系统上,或许已成为一个重要因素。

在确定中/短波不平顺限值时,本文只考虑轮轨法向接触,且以极端的接触脱离作为判定依据。若以保障最大法向力减载条件下轮轨黏着需求为目标,则图 12 中给出的中/短波不平顺管理限值建议需进一步降

低。鉴于轮轨切向滚动接触问题本身的复杂性,例如,黏着系数随轮轨第三介质、速度、环境等因素剧烈变化<sup>[58-62]</sup>,动态法向力和蠕滑力异相波动<sup>[3]</sup>,黏着需求随车型和运行、线路条件等因素变化等,文中未给出考虑切向黏着需求的不平顺管理限值建议。

此研究的必要性,在 300 km/h 高速铁路运营中得以初步体现。具体如下:在强雨雪天气运行时,存在严重的轮轨黏着不足或低黏着问题,使得动车组车轮发生严重的滚动接触疲劳裂纹和剥离,大多集中在施加牵引力的动车车轮上,部分疲劳车轮并无大蠕滑率引发的空转、打滑记录,意味着其根本原因是与法向动力减载相关的短时低黏着问题,重在抑制长时低黏着下大蠕滑的现有牵引/制动控制系统,不能满足强雨雪天气下 300 km/h 的运营需求,类似现象未见于低速动车组和普速列车上<sup>[52]</sup>。更高速条件下,问题会随着动力作用更强、低黏着问题更严峻等因素而进一步恶化。

本文考虑了低、中频动力减载及其他轴重降低导致的法向力降低,即考虑了最危险工况,动力加载等导致法向力增加条件,从本文关注角度而言,其接触状态趋于安全,在此不予考虑。另外,本文考虑两侧相同波长波磨的振动叠加,现场更可能的情况是两侧波磨波长不同,考虑两侧振动影响有限(图 8),相关分析的精度应该是足够的。需强调,制定实际运营中轮轨中/短波不平顺管理限值,或许还应考虑不平顺对车辆/轨道部件振动疲劳<sup>[63-64]</sup>、车轴强度<sup>[65]</sup>和轮轨噪声<sup>[66]</sup>等的影响。

铁总运〔2014〕357 号《高速铁路钢轨打磨管理办法》<sup>[67]</sup>中规定,对于运营速度 250~350 km/h 的高速铁路,波长 300 mm 以下的钢轨波磨深度超过 0.08 mm 时,应进行打磨修复。从图 12 中最低临界波深在 0.08 mm 上下的结果来看,现行波磨整治限度刚好可以避免轴重 15 t、最高 500 km/h 条件下轮轨脱离的发生,但不能完全满足减载条件下轮轨黏着需求。

## 6 结论

基于显式有限元法的轮轨三维瞬态滚动接触时域建模方法,可充分考虑真实三维几何、材料非线性、复杂摩擦、接触表面任意三维不平顺、结构和连续体振动以及瞬态滚滑行为等因素,最适于 400 km/h 及以上更高速和中/短波不平顺激励下的轮轨瞬态“滚-滑-跳”接触行为分析。以我国某高速铁路系统为背景,建立了更高速轮轨的三维瞬态滚动接触模型,数值模拟了动力轮对通过带钢轨波磨的 R7 000 m 曲线轨道时的瞬态接触行为,考虑了 30~210 mm 的波磨波长范围和 350~500 km/h 的速度范围,得到如下结论:

1) 轮轨表面平顺条件下, 两侧法、切向轮轨力结果均大致处于稳定状态, 准确捕捉了曲线通过时滚动轮径差导致的两侧纵向蠕滑力差异, 为波磨激励下研究奠定了基础。

2) 单侧波磨结果表明, 波磨所致振动可以传递至无波磨侧, 但激烈程度较波磨侧大大降低, 非波磨侧响应因振动传递过程而存在一定的滞后, 400 km/h 下轮对在滞后时段内约滚动 0.1 m。

3) 双侧设置同波长波磨, 一侧波磨振动和传过来的对侧波磨振动同相位时, 法向轮轨力波动幅值最大。考虑上述最恶劣工况, 发现轮轨接触脱离对应的临界波深随速度和波长呈复杂的非线性变化。进一步考虑低、中频动力作用及其他因素导致的典型法向减载率 33.3%, 提出了仅考虑轮轨脱离的轮轨中/短波不平顺的临界管理限值建议。发现现行波磨整治限度刚好可以避免轴重 15 t、最高速度 500 km/h 条件下轮轨脱离的发生, 但不能完全满足减载条件下的轮轨黏着需求。

#### 参考文献:

- [1] ZHAI W M, JIN X S, WEN Z F, et al. Wear Problems of High-speed Wheel/Rail Systems: Observations, Causes, and Countermeasures in China [J]. Applied Mechanics Reviews, 2020, 72 (6): 060801.
- [2] ZHAO X, AN B Y, ZHAO X G, et al. Local Rolling Contact Fatigue and Indentations on High-speed Railway Wheels: Observations and Numerical Simulations [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 5-16.
- [3] ZHAO X, WEN Z F, WANG H Y, et al. Modeling of High-Speed Wheel-Rail Rolling Contact on a Corrugated Rail and Corrugation Development [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2014, 15: 946-963.
- [4] ZHAO X, LI Z L. A Three-Dimensional Finite Element Solution of Frictional Wheel-Rail Rolling Contact in Elasto-Plasticity [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2015, 229 (1): 86-100.
- [5] GULLERS P, ANDERSSON L, LUNDÉN R. High-frequency Vertical Wheel-Rail Contact Forces; Field Measurements and Influence of Track Irregularities [J]. Wear, 2008, 265(9/10): 1472-1478.
- [6] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.  
JIN Xuesong, LIU Qiyue. Tribology of Wheel and Rail [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [7] AYASSE J B, CHOLLET H. Wheel-Rail Contact [M]// IWNICKI S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. Boca Raton: CRC Press and Taylor & Francis Group, 2006.
- [8] HERTZ H. Ueber Die Berührung Fester Elastischer Körper [J]. Journal für die Reine und Angewandte Mathematik, 1882, 92: 156-171.
- [9] 金学松. 轮轨蠕滑理论及其试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 1999.  
JIN Xuesong. Creep theory and experimental study of wheel hub [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999.
- [10] LI Z L. Wheel-Rail Rolling Contact and Its Application to Wear Simulation [D]. Delft: Delft University of Technology, 2002.
- [11] BURGELMAN N, LI Z, DOLLEVOET R. A New Rolling Contact Method Applied to Conformal Contact and the Train-Turnout Interaction [J]. Wear, 2014, 321: 94-105.
- [12] VOLLEBREGT E, SEGAL G. Solving Conformal Wheel-Rail Rolling Contact Problems [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(S1): 455-468.
- [13] PIOTROWSKI J, KIK W. A Simplified Model of Wheel/Rail Contact Mechanics for Non-Hertzian Problems and Its Application in Rail Vehicle Dynamic Simulations [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(1/2): 27-48.
- [14] AYASSE J B, CHOLLET H. Determination of the Wheel Rail Contact Patch in Semi-Hertzian Conditions [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(3): 161-172.
- [15] ALONSO A, GIMÉNEZ J G. A New Method for the Solution of the Normal Contact Problem in the Dynamic Simulation of Railway Vehicles [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43 (2): 149-160.
- [16] SH SICHANI M, ENBLOM R, BERG M. A Novel Method to Model Wheel-Rail Normal Contact in Vehicle Dynamics Simulation [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52 (12): 1752-1764.
- [17] TAO G Q, WEN Z F, ZHAO X, et al. Effects of Wheel-Rail Contact Modelling on Wheel Wear Simulation [J]. Wear, 2016, 366/367: 146-156.
- [18] TELLISKIVI T, OLOFSSON U. Contact Mechanics Analysis of Measured Wheel-Rail Profiles Using the Finite Element Method [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2001, 215 (2): 65-72.
- [19] 张军, 吴昌华. 轮轨接触问题的弹塑性分析 [J]. 铁道学报, 2000, 22(3): 16-21.  
ZHANG Jun, WU Changhua. Elasto Plastic Analysis of Wheel Rail Contact Problem [J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(3): 16-21.
- [20] NACKENHORST U. The ALE-Formulation of Bodies in Rolling Contact [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2004, 193(39/40/41): 4299-4322.
- [21] 肖乾. 轮轨滚动接触弹塑性分析及疲劳损伤研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2012.  
XIAO Qian. The Elasto-Plastic Analysis and Fatigue Damage Research of Wheel/Rail Rolling Contact [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2012.
- [22] ZHAO X, LI Z L. The Solution of Frictional Wheel-Rail Rolling Contact with a 3D Transient Finite Element Model: Validation and Error Analysis [J]. Wear, 2011, 271 (1/2): 444-452.

- [23] WEN Z F, JIN X S, ZHANG W H. Contact-Impact Stress Analysis of Rail Joint Region Using the Dynamic Finite Element Method [J]. *Wear*, 2005, 258(7/8): 1301-1309.
- [24] PLETZ M, DAVES W, FISCHER F D, et al. A Dynamic Wheel Set-Crossing Model Regarding Impact, Sliding and Deformation [C]//Proceedings of 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. New York: Elsevier, 2009: 801-808.
- [25] ZHAO X, LI Z L. A Solution of Transient Rolling Contact with Velocity Dependent Friction by the Explicit Finite Element Method [J]. *Engineering Computations*, 2016, 33(4): 1033-1050.
- [26] LI Z L, ZHAO X, ESVELD C, et al. An Investigation into the Causes of Squats: Correlation Analysis and Numerical Modeling [J]. *Wear*, 2008, 265(9/10): 1349-1355.
- [27] WEI Z L, LI Z L, QIAN Z W, et al. 3D FE Modelling and Validation of Frictional Contact with Partial Slip in Compression-Shift-Rolling Evolution [J]. *International Journal of Rail Transportation*, 2016, 4(1): 20-36.
- [28] LI Z L, ZHAO X, DOLLEVOET R, et al. Differential Wear and Plastic Deformation as Causes of Squat at Track Local Stiffness Change Combined with other Track Short Defects [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, 46(S1): 237-246.
- [29] ZHAO X, LI Z L, DOLLEVOET R. Influence of the Fastening Modeling on the Vehicle-Track Interaction at Singular Rail Surface Defects [J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2014, 9(3): 031002.
- [30] ZHAO X, LI Z, LIU J. Wheel-Rail Impact and the Dynamic Forces at Discrete Supports of Rails in the Presence of Singular Rail Surface Defects [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2012, 226(2): 124-139.
- [31] MOLODOVA M, LI Z L, DOLLEVOET R. Axle Box Acceleration: Measurement and Simulation for Detection of Short Track Defects [J]. *Wear*, 2011, 271(1/2): 349-356.
- [32] OREGUI M, LI S, NÚÑEZ A, et al. Monitoring Bolt Tightness of Rail Joints Using Axle Box Acceleration Measurements [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2017, 24(2): e1848.
- [33] ZHAO X, YANG J Z, AN B Y, et al. Determination of Dynamic Amplification Factors for Heavy Haul Railways [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2018, 232(2): 514-528.
- [34] 杨吉忠, 赵鑫, 胡连军, 等. 40 t 轴重重载铁路扣件刚度研究 [J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(10): 55-60.  
YANG Jizhong, ZHAO Xin, HU Lianjun, et al. Research on the Fastener Stiffness of Heavy Haul Railway Running 40 t Axleload Trains [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2016, 33(10): 55-60.
- [35] 赵鑫, 温泽峰, 王衡禹, 等. 三维高速轮轨瞬态滚动接触有限元模型及其应用 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(18): 1-7.  
ZHAO Xin, WEN Zefeng, WANG Hengyu, et al. 3D Transient Finite Element Model for High-speed Wheel-Rail Rolling Contact and Its Application [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(18): 1-7.
- [36] 金学松. 973 项目高速列车基础力学问题研究课题三 (2011CB711103) 结题报告: 高速列车轮轨接触行为与黏着机理研究 [R]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
JIN Xuesong. Final Report of Sub-project 3 of the 973 Project of Studies on Fundamental Mechanics Problems of High Speed Trains: Research on Wheel-Rail Contact Behavior and Adhesion Mechanisms for High Speed Trains [R]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [37] 王晗, 刘超, 赵鑫, 等. 单轮对高速滚动试验台的动态有限元模拟研究 [J]. *电力机车与城轨车辆*, 2015, 38(3): 16-19, 24.  
WANG Han, LIU Chao, ZHAO Xin, et al. Simulation Research of Dynamic Finite Element Based on Single Wheel Set High Speed Rolling Test Rig [J]. *Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles*, 2015, 38(3): 16-19, 24.
- [38] 刘超, 赵鑫, 赵小罡, 等. 单侧钢轨波磨对两侧轮轨瞬态响应的分析 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(22): 117-124.  
LIU Chao, ZHAO Xin, ZHAO Xiaogang, et al. Analyses of Transient Wheel-Rail Interactions Excited by Unilateral Rail Corrugation [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(22): 117-124.
- [39] ZHAO X, WEN Z F, ZHU M H, et al. A Study on High-speed Rolling Contact between a Wheel and a Contaminated Rail [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2014, 52(10): 1270-1287.
- [40] 安博洋, 赵鑫, 刘超, 等. 车轮踏面硌伤处的瞬态滚动接触应力分析 [J]. *润滑与密封*, 2014, 39(12): 69-74, 79.  
AN Boyang, ZHAO Xin, LIU Chao, et al. Analysis of Transient Rolling Contact Stresses at Wheel Indentation [J]. *Lubrication Engineering*, 2014, 39(12): 69-74, 79.
- [41] 黄双超, 赵鑫, 张笃超, 等. 高阶多边形车轮的瞬态磨耗行为分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(2): 648-658.  
HUANG Shuangchao, ZHAO Xin, ZHANG Duchao, et al. Analysis on Transient Wear of High-order Polygonal Wheels [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(2): 648-658.
- [42] 寇峻瑜, 王衡禹, 赵鑫, 等. 钢轨脱碳层对轮轨瞬态滚动接触行为的影响分析 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(4): 101-108.  
KOU Junyu, WANG Hengyu, ZHAO Xin, et al. Influence of Rail Decarburization Layer on Wheel-Rail Transient Rolling Contact Behavior [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(4): 101-108.
- [43] 寇峻瑜, 赵鑫, 张鹏, 等. 高速滚滑下轮轨表层材料的应变率水平估计 [J]. *工程力学*, 2019, 36(4): 239-247.  
KOU Junyu, ZHAO Xin, ZHANG Peng, et al. Estimation of Strain Rates for Wheel-Rail Surface Materials under High-speed Rolling-Sliding Contact [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(4): 239-247.
- [44] ZHAO X, HUANG S C, ZHANG P, et al. On the Modelling of Normal Wheel-Rail Contact for High-frequency Vehicle-Track

- Dynamics Analyses [J]. International Journal of Rail Transportation, 2022, 10(6) : 695-716.
- [45] ZHAO X, ZHANG P, WEN Z F. On the Coupling of the Vertical, Lateral and Longitudinal Wheel-Rail Interactions at High Frequencies and the Resulting Irregular Wear [J]. Wear, 2019, 430/431 : 317-326.
- [46] ZHAO X, ZHAO X G, LIU C, et al. A Study on Dynamic Stress Intensity Factors of Rail Cracks at High Speeds by a 3D Explicit Finite Element Model of Rolling Contact [J]. Wear, 2016, 366/367 : 60-70.
- [47] 赵小罡, 赵鑫, 温泽峰, 等. 轮轨黏着系数对钢轨直裂纹瞬态扩展行为的影响 [J]. 工程力学, 2018, 35(5) : 239-245.  
ZHAO Xiaogang, ZHAO Xin, WEN Zefeng, et al. Influence of Wheel-Rail Adhesion Coefficient on Transient Propagation of a Vertical Rail Crack [J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(5) : 239-245.
- [48] 么超凡, 于子良, 齐洪峰, 等. 间隙配合变轨距轮对与轨道间瞬态滚滑接触模拟研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(24) : 115-124.  
YAO Chaofan, YU Ziliang, QI Hongfeng, et al. Transient Simulations of Gauge-adjustable Wheelset-Rail Rolling-Sliding Contact in Consideration of the Clearance Fit [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(24) : 115-124.
- [49] 范伟, 赵鑫, 罗易飞, 等. 机车牵引齿轮瞬态啮合接触模拟研究 [J]. 机械工程学报, 2023, 59(22) : 401-410.  
FAN Wei, ZHAO Xin, LUO Yifei, et al. Transient Meshing Contact Simulation of Locomotive Traction Helical Gear [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(22) : 401-410.
- [50] 许黎明, 刘超, 赵鑫, 等. 全轮对曲线通过时的瞬态滚滑接触行为模拟研究 [J]. 工程力学, 2019, 36(11) : 203-211.  
XU Liming, LIU Chao, ZHAO Xin, et al. Analyses of Transient Wheel-Rail Rolling Contact Behavior during Curving [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11) : 203-211.
- [51] KAZYMYROVYCH V, BERGSTRÖM J, THUVANDER F. Local Stresses and Material Damping in very High Cycle Fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(10) : 1669-1674.
- [52] ZHAO X, HUANG S C, YIN S, et al. Influence of Unilateral Low Adhesion on Transient Wheel-Rail Rolling Contact and Wheel Damages [J]. Wear, 2023, 530/531 : 205053.
- [53] 谷永磊. 高速铁路无砟轨道钢轨波浪形磨损机理研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.  
GU Yonglei. Study on the Mechanism of Rail Corrugation on High-speed Railway Unballasted Track [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [54] WANG K Y, LIU P F, ZHAI W M, et al. Wheel/Rail Dynamic Interaction Due to Excitation of Rail Corrugation in High-speed Railway [J]. Science China Technological Sciences, 2015, 58(2) : 226-235.
- [55] 张卫华. 高速列车耦合大系统动力学理论与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
ZHANG Weihua. Dynamics of Coupled Systems in High-speed Trains: Theory and Practice [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [56] CHAAR N, BERG M. Simulation of Vehicle-Track Interaction with Flexible Wheelsets, Moving Track Models and Field Tests [J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(S1) : 921-931.
- [57] GRASSIE S L, GREGORY R W, HARRISON D, et al. The Dynamic Response of Railway Track to High Frequency Vertical Excitation [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1982, 24(2) : 77-90.
- [58] ARIAS-CUEVAS O. Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact [D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [59] WANG W J, SHEN P, SONG J H, et al. Experimental Study on Adhesion Behavior of Wheel/Rail under Dry and Water Conditions [J]. Wear, 2011, 271(9/10) : 2699-2705.
- [60] CHANG C Y, CHEN B, CAI Y W, et al. An Experimental Study of High Speed Wheel-Rail Adhesion Characteristics in Wet Condition on Full Scale Roller Rig [J]. Wear, 2019, 440/441 : 203092.
- [61] 张振先, 谭江, 黄双超, 等. 复杂运行环境下高速轮轨最佳撒砂增黏策略试验 [J]. 中国铁道科学, 2020, 41(2) : 123-130.  
ZHANG Zhenxian, TAN Jiang, HUANG Shuangchao, et al. Experimental Study on Optimum Sanding and Adhesion Enhancement Strategy for High-speed Wheel and Rail under Complicated Operation Environments [J]. China Railway Science, 2020, 41(2) : 123-130.
- [62] ZHOU J J, WU M L, TIAN C, et al. Experimental Investigation on Wheel-Rail Adhesion Characteristics under Water and Large Sliding Conditions [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2020, 73(2) : 366-372.
- [63] WANG P, LU J, ZHAO C Y, et al. Numerical Investigation of the Fatigue Performance of Elastic Rail Clips Considering Rail Corrugation and Dynamic Axle Load [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2021, 235(3) : 339-352.
- [64] TAO G Q, XIE C X, WANG H Y, et al. An Investigation into the Mechanism of High-order Polygonal Wear of Metro Train Wheels and Its Mitigation Measures [J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(10) : 1557-1572.
- [65] 张富兵, 邬平波, 吴兴文, 等. 高速列车车轮多边形磨耗安全限值研究 [J]. 铁道学报, 2021, 43(3) : 42-51.  
ZHANG Fubing, WU Pingbo, WU Xingwen, et al. Research on Safety Limit of Wheel Polygonalization of High-speed Train [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(3) : 42-51.
- [66] 冯陈程, 刘晓龙, 李伟, 等. 短波长钢轨波磨对地铁车辆车内噪声的影响 [J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(6) : 113-117.  
FENG Chencheng, LIU Xiaolong, LI Wei, et al. Influence of Short Pitch Rail Corrugation on Interior Noise of Metro Vehicles [J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(6) : 113-117.
- [67] 中国铁路总公司. 高速铁路钢轨打磨管理办法: 铁总运〔2014〕357号 [S]. 北京: 中国铁路总公司, 2014.  
China Railway Corporation. Guideline for High Speed Rail Grinding Management: China Railway [2014] No. 357 [S]. Beijing: China Railway Corporation, 2014.

(责任编辑 贾红梅 范静)