

钢轨三维擦伤状态对波磨发展的影响研究

吴彦龙*, 崔大宾#

西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年8月27日; 录用日期: 2024年9月20日; 发布日期: 2024年9月27日

摘要

建立一种可计算沿钢轨纵向和横向三维分布的钢轨磨耗演化预测模型, 利用车辆-轨道耦合动力学计算轮轨动态相互作用, 基于Hertz滚动接触理论进行轮轨滚动接触分析, 轮轨切向接触选用Fastsim理论, 选用USFD磨耗模型计算材料磨耗。运用该模型计算分析我国某型动车组以180 km/h速度在通过轨面擦伤后钢轨磨耗的演变形态, 结果表明, 车辆通过擦伤后形成波长约为210 mm的钢轨波磨, 其频率236 Hz与车辆中一系悬挂弹簧的固有频率相符合。通过对比考虑与不考虑擦伤三维状态的钢轨擦伤发现, 当考虑钢轨三维擦伤状态时, 所获得的预测结果更加接近实际情况, 能够更准确地预测车辆通过擦伤后的磨耗情况。

关键词

钢轨擦伤, 钢轨波磨, 磨耗预测

Investigation into the Effect of 3D Rail Squat on Rail Corruguation

Yanlong Wu*, Dabin Cui#

School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 27th, 2024; accepted: Sep. 20th, 2024; published: Sep. 27th, 2024

Abstract

A model has been established to predict the evolution of rail abrasion. This model can calculate the longitudinal and transverse three-dimensional distribution along the rail. The model uses vehicle-rail coupled dynamics to calculate the dynamic interaction between the wheel and rail. The Hertz rolling contact theory is used for rolling contact analysis of the wheel and rail, and Fastsim

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 吴彦龙, 崔大宾. 钢轨三维擦伤状态对波磨发展的影响研究[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(5): 363-372.
DOI: 10.12677/met.2024.135042

theory is used for tangential contact of the wheel and rail. The USFD abrasion model is used for calculating the abrasion of the material. When using this model to calculate and analyze the train at a speed of 180 km/h, the results show that the vehicle causes rail wear through scuffing, resulting in a wavelength of approximately 210 mm and a frequency of 236 Hz. The vehicle's intrinsic frequency is in line with a series of suspension springs. By comparing rail abrasion with and without considering its three-dimensional state, it was found that the prediction results obtained when considering the three-dimensional state were closer to the actual situation. This allows for a more accurate prediction of vehicle wear after passing through the abrasion.

Keywords

Rail Squats, Rail Corrugation, Wear Prediction

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 中国的高速铁路发展取得了举世瞩目的成就, 随着高铁的迅猛发展, 许多的工程问题也逐渐暴露了出来, 轨面擦伤与钢轨波浪形磨耗都是当前限制高速铁路发展的问题[1]。在轨道交通系统中, 由于车辆运行过程中的冲击或侧向磨损, 钢轨顶面内侧常出现压溃或磨损, 形成擦伤。擦伤作为钢轨滚动疲劳损伤的主要形式之一, 在全球范围内广泛存在。当车辆经过擦伤时, 会引发强烈的车辆振动, 轮对和钢轨之间发生瞬态冲击振动, 影响轮轨接触状态, 引起钢轨接触面产生不均匀磨损而形成钢轨波磨, 从而影响列车运行平稳性, 严重情况下会引起列车脱轨事故的发生, 严重威胁行车安全[2] [3]。因此, 研究钢轨擦伤不同程度对钢轨波磨演化的影响, 了解何种程度的钢轨擦伤更易演化成钢轨波磨, 不仅具有重大的理论意义, 而且在实际工程中也极为必要(图 1)。

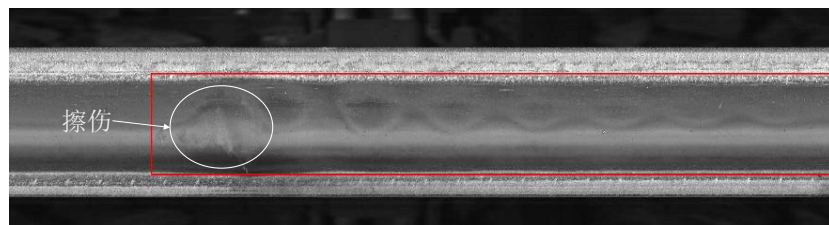


Figure 1. Rail wear diagram after squat

图 1. 擦伤后的钢轨磨损图

钢轨波磨的研究方法与车轮多边形有相似之处, 对于车轮多边形的研究, 传统研究中只考虑车轮横截面或车轮半径这两个参数, 崔大宾等[4]考虑车轮真实的三维磨耗外形, 仿真分析了不同程度的车轮对车辆系统动力学的影响。对于钢轨磨耗的研究, 当前主要通过现场实验和模型仿真来探究。周素霞等[5]建立轮轨瞬态接触模型, 使用 Abaqus 求解单个轮对通过凹坑时车轮的滚动状态, 计算车轮驶过凹坑后钢轨的 Mises 应力等信息, 得到凹坑的扩大以及进一步形成波磨的趋势。熊嘉阳等[6]建立了车辆-轨道耦合动力学、轮轨滚动接触力学和钢轨材料摩擦磨损模型为一体的钢轨磨耗计算模型, 分析了一个转向架通过曲线钢轨内侧具有横向凹坑对初始波磨形成的影响, 研究表明当车辆通过具有横向凹坑的曲线钢轨

时, 轮对和钢轨之间发生瞬态冲击振动引起钢轨接触面产生不均匀磨损而形成初始波磨。Li 等[7] [8]基于荷兰铁路中钢轨擦伤的实测数据进行了相关性分析, 并建立了车辆-轨道瞬态有限元模型, 分析了轮轨瞬态接触力, 研究了轨道参数对钢轨擦伤与钢轨波浪形磨耗的产生与发展的影响。数值结果与现场实测数据具有较高的一致性, 研究表明轨道擦伤的发展与车辆-轨道系统的特征频率之间存在一定的关系。李响等[9]建立了地铁车辆-轨道耦合动力学模型, 研究了中国某地铁小半径曲线段钢弹簧浮置板轨道钢轨波磨, 发现列车通过曲线轨道时, 降低车辆速度和曲线超高均能有效降低轮轨间作用力, 轮轨间横向滑动造成的钢轨磨耗和轨道结构的垂向振动可能是造成曲线钢轨波磨的主要原因。刘学毅等[10]对钢轨波磨成因理论和我国重载线路钢轨波磨的特征进行了总结, 发展了一个适用于波磨成因分析的轮轨空间耦合振动模型, 并建立了“轮对粘滑振动-钢轨不均匀磨损”的成因理论。

在传统的钢轨磨耗研究中, 一般将钢轨擦伤问题考虑为轮轨界面中的轨道垂向不平顺, 而忽略了钢轨擦伤对钢轨横向截面的影响, 这与实际磨耗形式存在较大差异。本文通过 SIMPACK 变截面钢轨的功能, 建立了一种考虑钢轨三维擦伤状态的钢轨磨耗演化预测模型, 有别于现阶段钢轨磨耗预测的研究大多假设钢轨磨耗在一段区域是相同的, 该模型考虑了钢轨擦伤沿钢轨纵向和横向的三维状态, 计算钢轨磨耗时考虑其沿钢轨纵向和横向的三维分布, 更贴近工程实际。分析了考虑与不考虑钢轨三维擦伤状态时的钢轨磨耗特性, 证明了研究钢轨磨耗预测问题时, 考虑钢轨三维擦伤状态的必要性。

2. 计算模型

2.1. 车辆动力学模型

根据我国某型动车组列车在 SIMPACK 中建立车辆模型, 车辆模型由三个子模型组成, 包括一个车体, 两个转向架。每一个转向架由一个构架, 两条轮对, 四个轴箱构成。每组构件均视为刚性体, 其中车体, 构架, 轮对, 都考虑横向, 垂向, 纵向, 点头, 摇头, 和侧滚方向的运动, 轴箱只考虑垂向的自由度, 最终在仿真软件中建立了由 15 个刚体构成的非线性多刚体车辆系统动力学模型, 整车刚体自由度共 50 个。根据上述的设置, 在 SIMPACK 里建立得到了车辆多刚体动力学模型, 车辆拓扑结构图如图 2 所示。

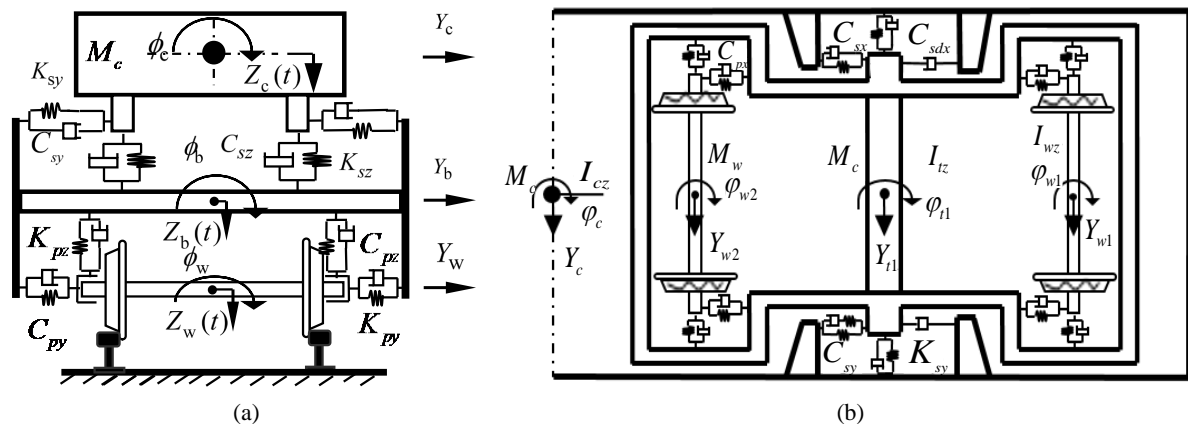


Figure 2. Vehicle dynamics model: (a) Front view, (b) Vertical view

图 2. 车辆动力学模型: (a) 正视图, (b) 俯视图

2.2. 钢轨磨耗模型

英国谢菲尔德大学, 提出了一种基于能量耗散原理的磨耗计算算法(USFD)来计算轮轨接触斑处的材

料损失, 仿真得到的磨耗分布与实验结果具有较高的一致性, 本文的钢轨磨耗分析采用 USFD 磨耗模型。USFD 磨耗函数根据磨耗功的不同, 将磨损状态定义为三个等级, 即轻度磨损, 重度磨损, 灾难性磨损, 分别对应相应的磨耗率 K_1 、 K_2 、 K_3 如图 3 所示。

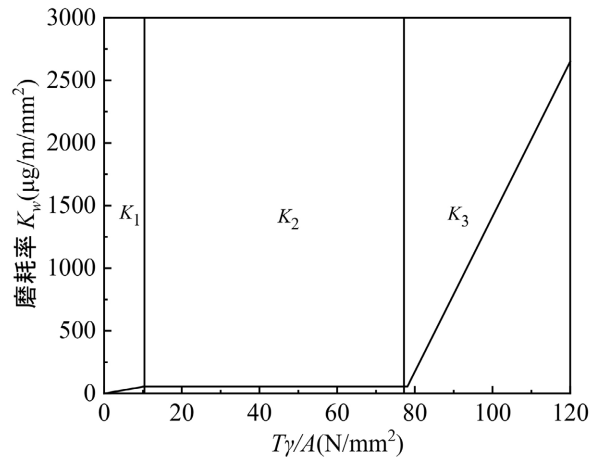


Figure 3. The relationship between wear rate and wear index
图 3. 磨损率与磨损指数关系图

磨耗率的计算需要通过计算接触斑内磨耗功 I_w , 其表达式为:

$$I_w(x, y) = \begin{cases} p_{total}(x, y) \cdot s_{total}(x, y) & (x, y) \in U_s \\ 0 & (x, y) \notin U_s \end{cases} \quad (1)$$

式中, $p_{total}(x, y)$ 是接触斑内滑动区单元的切向合应力; $s_{total}(x, y)$ 是接触斑滑动区单元的合蠕滑率。

磨耗率的表达式 K_s ($s=1, 2, 3$) 表示滚动单位距离的车轮单位面积上的材料质量损失, 根据不同的磨耗功 I_w 可由公式(2)得到磨耗率的值。

$$K_s = \begin{cases} 5.3 \times I_w & I_w < 10.4 \\ 55.0 & 10.4 \leq I_w \leq 77.2 \\ 61.9 \times I_w - 4778.7 & I_w > 77.2 \end{cases} \quad (2)$$

USFD 全局模型可以准确地估算出接触点的磨耗深度, 具体表现为:

$$Z_p = \frac{K(I_w)}{\rho} \cdot 2a_0 \quad (3)$$

在应用局部磨耗算法计算材料磨耗时, 在确定磨耗率 I_w 之后, USFD 磨耗模型接触斑单个各网格处的磨耗量其表达式如公式(4)所示:

$$Z_{p(t)}(x, y) = \frac{K(I_w)}{\rho} \Delta x \quad (4)$$

式中, ρ 是钢轨材料的密度, Δx 是接触斑内纵向网格的长度。

之后, 在纵向对于接触斑内所有网格的磨耗进行求和, 其表达式为:

$$Z_{p(t)}^{tot}(y) = \int_{-a(y)}^{+a(y)} Z_{p(t)}(x, y) dx \quad (5)$$

最后对仿真过程中所产生的磨耗进行求解, 由此计算出对应钢轨型面的磨耗。

$$W_d(y) = \int_{T_s}^{T_e} Z_{p(t)}^{tot}(y) V dt \quad (6)$$

式中, V 是车辆的前进速度, T_e 是离开该钢轨型面的时间, T_s 是进入该钢轨型面的时间。

2.3. 擦伤设置

对钢轨擦伤的设置参照文献[13], 二维状态下擦伤仅考虑为沿轨道纵向的垂向不平顺激励, 擦伤在纵向上为余弦函数分布, 形状如图4所示, 根据下式(7)生成擦伤激励:

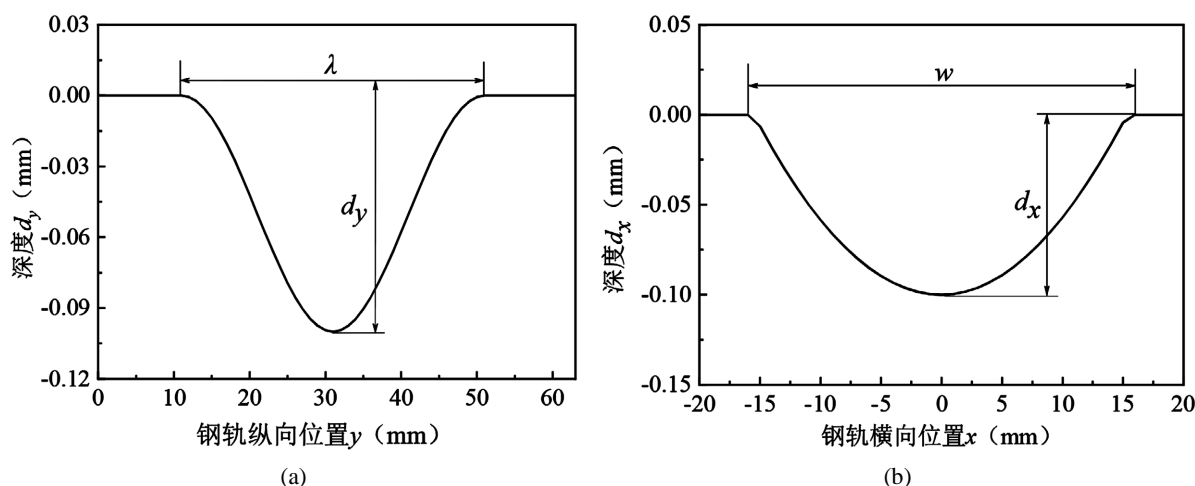


Figure 4. Longitudinal and lateral distribution of rail squat: (a) Longitudinal distribution, (b) Lateral distribution

图4. 钢轨擦伤纵横向分布: (a) 擦伤纵向分布, (b) 擦伤横向分布

$$d = 0.5d_m \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{y - y_0}{\lambda} \right) \right) \quad (7)$$

式中: d_m 为擦伤最大深度; y 为钢轨纵向位置; y_0 为擦伤开始位置; λ 为擦伤的长度。

三维状态下由于考虑了钢轨截面情况, 在设置轨面擦伤时需要考虑擦伤的横向宽度以及横向位置等信息, 将擦伤在沿着钢轨纵向方向同二维一样以余弦函数形式设置, 在钢轨横向位置上(即钢轨横截面上)以抛物线函数设置, 擦伤形式如图4所示, 擦伤激励按照下式(8)生成:

$$d = 0.5d_m \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{y - y_0}{\lambda} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{2x - 2x_0}{w} \right)^2 \right] \quad (8)$$

式中: d_m 为擦伤最大深度; y 为钢轨纵向位置; y_0 为擦伤开始位置; w 为擦伤横向宽度; x 为钢轨横向位置; x_0 为轮轨接触斑中心位置。

2.4. 钢轨型面设置

SIMPACK 的前处理界面提供了可变截面钢轨设置的功能, 根据不同大小的擦伤状态, 利用 SIMPACK 软件的前处理功能生成了随轨道长度变化的变截面钢轨线路文件, 并进行了分析计算[14]。按照二维情况和三维情况设置擦伤段的钢轨, 建立沿着线路方向上不同位置处的轨道文件, 相邻两截面之间的参数采用线性插值的原理进行处理[15] [16], 具体步骤如下:

1) 将实测截面数据转化为平滑的三次样条曲线, 并获得标准化的弧-长度参数。这些参数包括横向截面坐标 y 和垂向截面坐标 z 。每个点的弧-长度坐标可以用标准参数公式 $y(u)$, $z(u)$ 来表示。

2) 在轨道截面上, 根据标准化的弧 - 长度参数将三次样条曲线进行离散化, 并进行插值。对于每个截面, 需要使用相同的标准化弧 - 长度参数进行离散化。

3) 计算插值截面的三次样条曲线, 得到给定参数 u 下截面函数各点的坐标 $y(u)$, $z(u)$, 并将其存储在文件中。

如图 5(a)所示, 在前一个钢轨横截面 $s(n)$ 和后一个钢轨横截面 $s(n+1)$ 之间按照上述插值原理生成中间型面, 在图 5(b)中, 40 mm 的凹坑在 SIMPACK 中以 9 个钢轨截面文件输入, 确保动力学计算中每一个采样步长都有对应的钢轨型面。

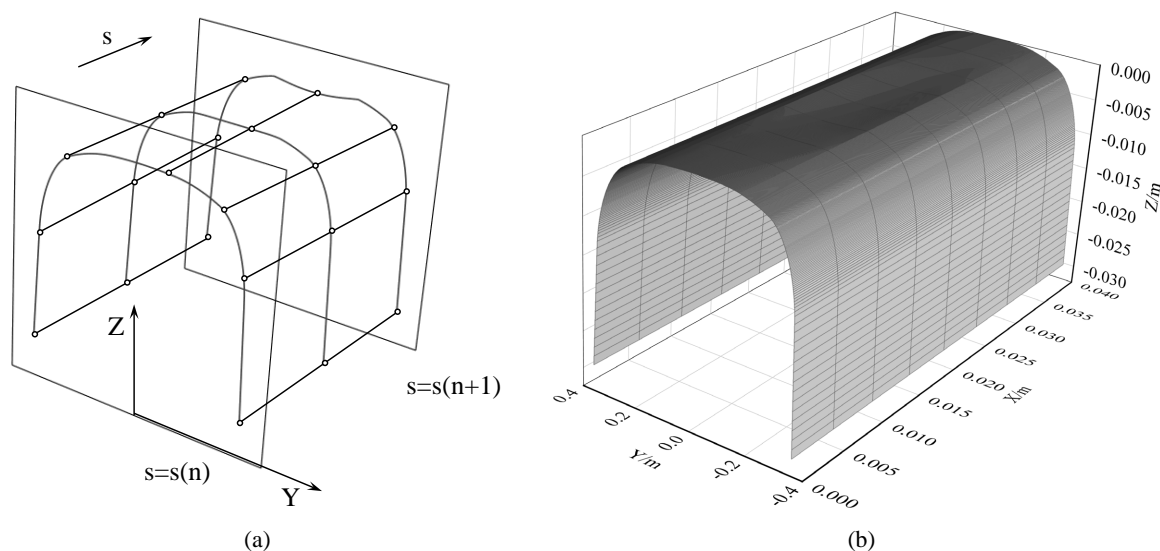


Figure 5. Variable rail: (a) Interpolation principle, (b) Rail profile of squat

图 5. 变截面钢轨的插值原理: (a) 插值原理, (b) 擦伤段钢轨型面

通过上述处理, 每个轨道文件可以分别表示一段变截面轨道。将所有的轨道文件组合在一起, 就可以表示整个擦伤区段的钢轨。通过将钢轨文件应用于轮轨接触, 可以进行仿真分析, 并得到车辆通过擦伤后的动力学响应。

2.5. 磨耗计算流程

磨耗预测流程如图 6 所示, 主要思路为: 首先将带擦伤激励的钢轨型面文件输入到 SIMPACK 里, 通过车辆动力学计算得到轮轨动态相互作用关系[11]; 通过轮轨滚动接触模型以及法向接触理论 Hertz, 切向接触理论 Fastsim 计算得到轮轨滚动接触分析结果[12]; 利用 USFD 轮轨磨耗模型计算钢轨上的磨耗深度分布; 采用移动平均法对计算得到的磨耗进行平滑并将磨耗叠加在钢轨型面上对型面进行更新。利用更新后的钢轨型面进行车辆动力学计算和钢轨磨耗计算, 得到新一轮的钢轨型面, 如此反复迭代就可以得到钢轨磨耗发展情况。

3. 算例分析

3.1. 计算条件

仿真计算中, 本文仅考虑一种车辆以一种速度通过轨道时钢轨的磨耗情况, 车辆选用我国某型高速动车组, 参照京沪交路曲线半径大、线路条件较好的特点, 这里根据高速铁路线路设计规范设置本文曲线轨道半径为 6000 m, 外轨超高为 40 mm, 根据车辆行驶速度 180 km/h, 擦伤施加在圆曲线轨道上。

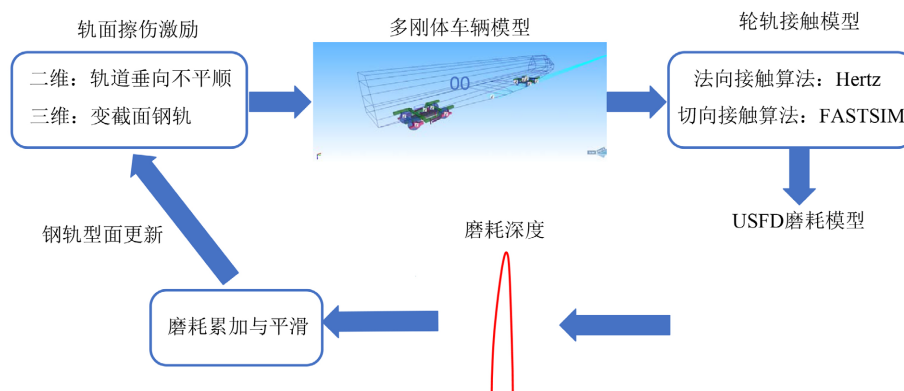


Figure 6. Wear prediction simulation process
图 6. 磨损预测仿真流程

3.2. 轮对振动特性分析

车辆通过轨面擦伤后会引引起车辆某固有频率的变化, 对后续钢轨的波磨的形成产生影响, 求解车辆以 180 km/h 滚动速度通过擦伤不平顺激励时轮对的垂向振动响应, 如图 7 所示。由图(a)可看出, 车辆通过擦伤时轮轨响应出现瞬态冲击振动, 在车轮离开擦伤附近时轮对垂向振动加速度达到最大。对其进行频域变化, 得到图(b), 从图(b)中发现不同擦伤长度的车轮垂向振动加速度均在 236 Hz 处响应显著, 与车辆中一系悬挂弹簧的固有频率相符合。由此我们可以发现通过擦伤时车轮与钢轨之间未形成紧密贴靠, 由此产生冲击振动引发的轮对垂向浮沉将会导致钢轨磨损的发展。

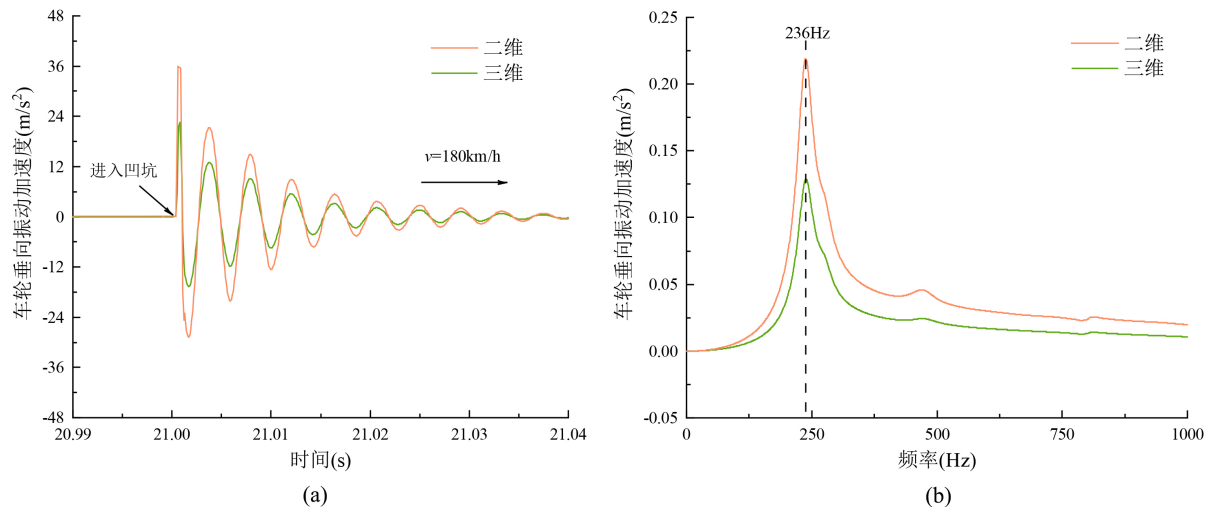


Figure 7. Vertical vibration acceleration of guide wheel set of front bogie: (a) Time domain, (b) Frequency domain
图 7. 前转向架导向轮对的垂向振动加速度: (a) 时域图, (b) 频域图

3.3. 钢轨磨损深度分布

根据磨损计算流程, 我们知道轮轨接触参数是计算钢轨磨损的输入量, 而这些参数的变化直接影响钢轨通过擦伤后的磨损情况。研究发现, 这些参数在通过擦伤后的 1.5 m 内变化最为显著, 然后逐渐衰减。因此, 本文选择了通过擦伤后的 2.5 m 作为磨损计算的长度。为了更准确地捕捉擦伤的影响, 研究中在擦伤前额外增加了 0.5 m 的钢轨磨损初始计算长度, 总计为 3 m。

钢轨的磨耗情况随着车辆通过次数的增加不断变化, 图 8、图 9 分别给出了 1500 辆列车和 15,000 辆列车通过后曲线外轨的钢轨磨耗分布, 颜色的变化表示磨耗深度的变化, 各图中钢轨横向位置坐标轴中 0 位置处代表钢轨的轨顶中心处, 值为正代表轨头内侧, 值为负代表轨头外侧。通过观察图(a)可以发现, 当车轮的外侧通过擦伤时, 会出现短暂的轮轨分离。这是由于擦伤通过垂向线路不平顺输入, 仅在轨道的一个方向上引起变化, 当车轮快速通过时无法与擦伤底部保持接触。因此, 在车轮通过擦伤的前沿时会发生轮轨分离现象, 而在经过无法接触的擦伤底部后又会与擦伤的后沿发生碰撞, 随后磨耗表现出波浪形变化, 这个波磨波长大约为 210 mm, 以 180 km/h 的速度计算, 对应的频率约为 238 Hz。从图(b)中可以看出, 曲线外钢轨的磨耗区域基本是平行于轨顶中心线的平直光带, 主要分布在钢轨外侧的轨距角处。当第一次更新钢轨型面后, 外轨的初始波磨已基本形成, 随着车辆通过次数增加不断更新钢轨型面后, 除了钢轨表面平均磨耗量越来越大之外, 钢轨磨耗光带也有略微扩宽, 有着由中心向两边扩宽的趋势, 通过形成的钢轨磨耗波长是一个常数, 大小约为 210 mm, 所对应波磨通过频率为 236 Hz, 与二维情况下相同。

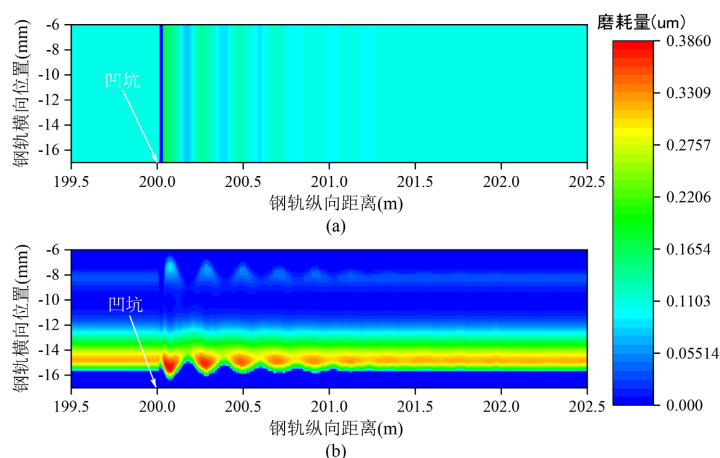


Figure 8. Rail wear distribution of outer rail after 1500 trains: (a) 2D, (b) 3D
图 8. 1500 辆列车通过后外轨磨耗深度分布: (a) 二维情况, (b) 三维情况

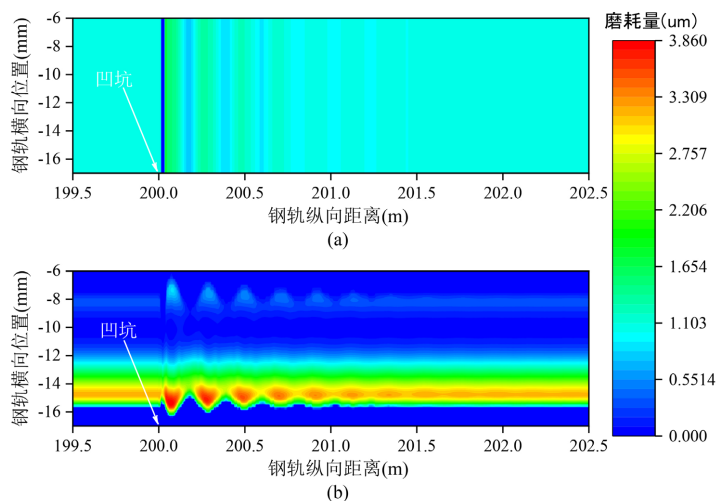


Figure 9. Rail wear distribution of outer rail after 15,000 trains: (a) 2D, (b) 3D
图 9. 15,000 辆列车通过后外轨磨耗深度分布: (a) 二维情况, (b) 三维情况

图 10、图 11 分别给出了 1500 辆列车和 15,000 辆列车通过后曲线内轨的钢轨磨耗分布, 由于两侧车轮之间是通过刚性车轴连接的, 因此外轨侧车轮通过曲线外轨擦伤时产生的振动会传递到另一侧车轮, 从而使车轮与内轨的轮轨接触状态发生变化, 内侧钢轨磨耗也会产生变化。由于擦伤设置在外轨, 从图中可以看出内侧钢轨磨耗深度的波动远小于外侧, 且内侧车轮的轮轨垂向力衰减速度更快。从图中可以看出, 曲线内侧钢轨的磨耗区域基本是平行于轨顶中心线的平直光带, 内轨的磨耗区域分布在靠近钢轨中心的轨头内侧。

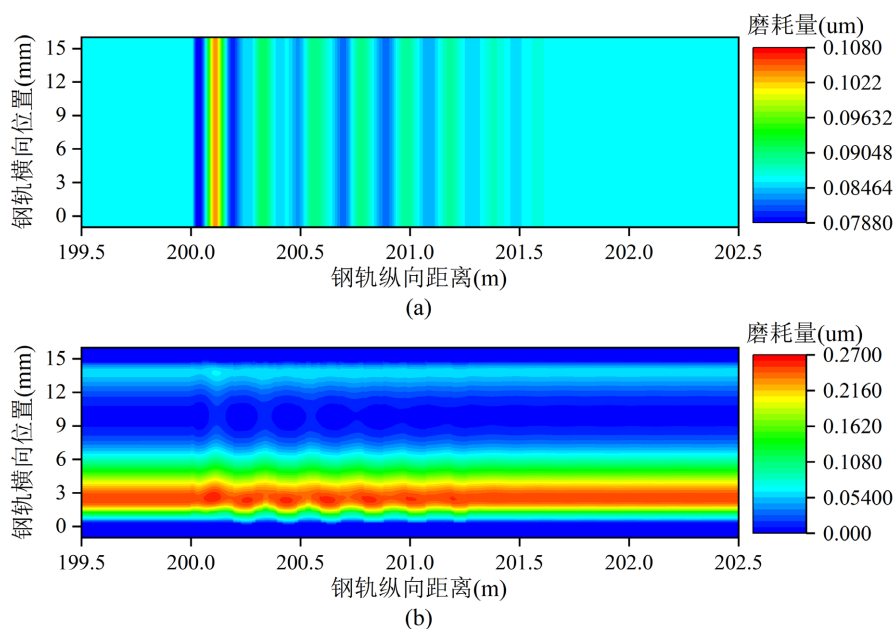


Figure 10. Rail wear distribution of inner rail after 1500 trains: (a) 2D, (b) 3D

图 10. 1500 辆列车通过后内轨磨耗深度分布: (a) 二维情况, (b) 三维情况

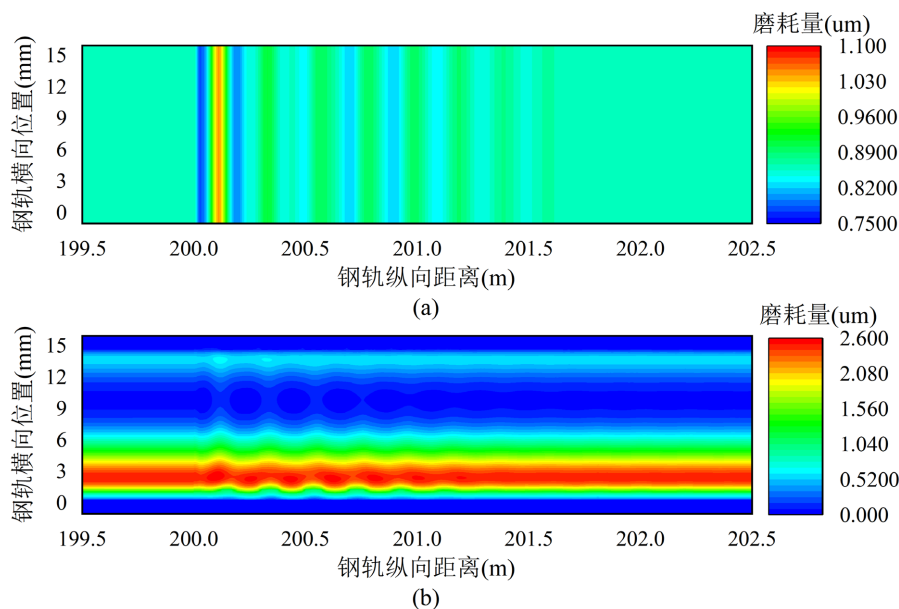


Figure 11. Rail wear distribution of inner rail after 15,000 trains: (a) 2D, (b) 3D

图 11. 15,000 辆列车通过后内轨磨耗深度分布: (a) 二维情况, (b) 三维情况

4. 结论

1) 基于钢轨的实际磨耗状态, 在考虑变截面钢轨型面的基础上, 建立了一种三维钢轨型面模型, 模型可用于表达实际的三维钢轨磨耗。通过将三维钢轨型面模型与车辆系统动力学模型相结合, 构建了一种包含三维钢轨型面的车辆系统动力学模型。

2) 车辆通过擦伤后形成的钢轨波磨波长为 210 mm, 其频率为 236 Hz, 是车轮通过擦伤后引发的轮对垂向点头引起的。

3) 对比分析考虑与不考虑擦伤三维状态时的钢轨磨耗计算结果, 结果表明, 当考虑钢轨三维磨耗时, 所获得的结果更加接近实际情形, 可以更准确地预测车辆通过擦伤后的磨耗情况。

基金项目

四川省自然科学基金创新研究群体项目(2023NSFSC1975); 四川省科技计划资助(2024YFHZ0280)。

参考文献

- [1] 温泽峰. 钢轨波浪形磨损研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [2] 丁军君, 李东宇, 王军平, 等. 钢轨磨耗对轮轨滚动接触关系的影响研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 142-149.
- [3] 梁喜仁, 陶功权, 陆文教, 等. 地铁钢轨滚动接触疲劳损伤研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 147-155.
- [4] Cui, D., Zhang, X., Wang, R., An, B., Li, L. (2022) The Effect of 3D Wear State of Wheel Polygon on Wheel—Rail System Dynamics. *Vehicle System Dynamics*, **60**, 3109-3126. <https://doi.org/10.1080/00423114.2021.1939064>
- [5] 周素霞, 孙锐, 刘金朝, 等. 轨道车辆通过钢轨凹坑时的响应分析[J]. 铁道学报, 2020, 42(12): 36-41.
- [6] 熊嘉阳, 金学松. 铁路曲线钢轨横向凹坑对初始波磨形成的影响[J]. 工程力学, 2006(6): 135-141+134.
- [7] Li, Z., Zhao, X., Esveld, C., Dollevoet, R., Molodova, M. (2008) An Investigation into the Causes of Squats—Correlation Analysis and Numerical Modeling. *Wear*, **265**, 1349-1355. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.02.037>
- [8] Li, Z., Dollevoet, R., Molodova, M., Zhao, X. (2011) Squat Growth—Some Observations and the Validation of Numerical Predictions. *Wear*, **271**, 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.10.051>
- [9] 李响, 任尊松, 徐宁. 地铁小半径曲线段钢弹簧浮置板轨道的钢轨波磨研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(8): 70-76.
- [10] 刘学毅, 王平, 万复光. 重载线路钢轨波形磨耗成因研究[J]. 铁道学报, 2000(1): 98-103.
- [11] 金学松, 刘启跃. 轮轨摩擦学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.
- [12] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学[M]. 第3版. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] 周志军. 基于轮轨瞬态滚动接触行为模拟的地铁钢轨短波长波磨形成机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [14] Schupp, G., Weidemann, C. and Mauer, L. (2004) Modelling the Contact between Wheel and Rail within Multibody System Simulation. *Vehicle System Dynamics*, **41**, 349-364. <https://doi.org/10.1080/00423110412331300326>
- [15] 吴安伟, 罗赟. 变截面道岔振动特性研究[J]. 铁道建筑, 2006(4): 82-85.
- [16] 陈雨, 安博洋, 潘自立, 等. 考虑尖轨变截面廓形的轮轨接触与磨耗分析[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(6): 1250-1258.