

城轨车辆磨耗后轮轨型面接触关系分析

魏晓晖

中国铁路郑州局焦作车辆段, 中国·河南 焦作 454450

摘要: 城市市轨道车辆在小曲线半径运行时构架、轴箱、轨道横向谐波振动显著增大, 该现象通常与车辆轮轨关系有直接的关联。作为一个高容量的快速客运系统, 地铁在城市轨道交通中扮演着重要角色。本文研究某 B 型地铁列车轮轨接触关系, 基于 UM 软件建立该地铁车辆动力学仿真模型和磨耗预测模型, 重点研究磨耗后轮轨带来的车辆运行稳定性与平稳性的变化。

关键词: 车轮磨耗; 轮轨关系; 等效锥度; 稳定性; 钢轨廓形

Analysis of Rail-Wheel Contact Relationship After Wear in Urban Rail Vehicles

Wei Xiaohui

Jiaozuo Rolling Stock Depot, Zhengzhou Railway Bureau, China Henan Jiaozuo 454450

Abstract: When urban rail vehicles operate on curves with small radii, significant increases in lateral harmonic vibrations of the bogies, axle boxes, and rails are observed, a phenomenon typically directly related to the wheel-rail interaction. As a high-capacity rapid transit system, the subway plays a crucial role in urban rail transit. This study investigates the wheel-rail contact relationship of a Type B subway train, establishes a dynamic simulation model and wear prediction model for the subway vehicle using UM software, and focuses on analyzing the changes in operational stability and smoothness of the vehicle caused by post-wear wheel-rail interactions.

Keywords: Wheel wear; Wheel-rail interaction; Equivalent conicity; Stability; Rail profile

1 引言

本文通过对比不同轮轨匹配的仿真结果来分析该地铁车辆发生轮缘和踏面异常磨耗的原因, 进而提出相应的控制措施。主要包括: 抗蛇行运动、稳定性、防止脱轨的稳定性、车辆倾覆的稳定性、安全运行速度以及安全制动距离。这些主要是依靠轮轴横向力限值、脱轨系数、轮轨垂向力限值等指标来评定。本论文着重研究轮轨磨耗后列车轮轨接触关系中发生改变的参数, 并进一步分析稳定性与平稳性。

1.1 研究背景与目的

在地铁车辆的运行过程中, 由车轮与轨面磨耗所导致的严重振动和噪声会影响地铁车辆的舒适度、平稳性和稳定性, 并可能导致车辆脱轨, 从而影响乘客的人身和财产安全。不同国家对地铁车辆的类型和构造各不相同, 而且地铁线路的规划和建设也会有所不同, 这导致了地铁车辆在运行中遇到的曲线类型和数量的差异, 以及不同的运行环境。

1.2 主要研究内容

本文在 UM 软件中建立某 B 型地铁车轮轨磨耗模型, 并进行轮轨磨耗仿真分析。

(1) 基于 B 型地铁车辆的参数, 在 UM Input 中建立一个简化的车辆动力学模型。将模型导入到 UM Simulation 中, 并建立一个工况线路模型来模拟实际线路。将 Archard 磨耗模型和基于虚拟渗透的非赫兹接触 Kik Piotrowski 方法结合, 建立一个轮轨磨耗预测模型。

(2) 为了研究轮轨接触关系, 本文选取 200,000 km 里程的轮轨磨耗仿真来获得数据, 并重点关注三个不同运营里程点 (60,000 km、120,000 km、200,000 km) 下轮对各踏面位置的磨耗深度。

(3) 通过 UM 软件的仿真计算, 获得车辆的等效锥度变化、蛇行失稳临界速度和 Sperling 平稳性指标。通过等效锥度和蛇行失稳临界速度可以分析出车辆运行稳定性的变化, 横向和垂向 Sperling 平稳性指标。综上所述, 本文通过 UM 多体动力学软件的仿真技术, 对标准与磨耗后的

车轮踏面进行动力学性能对比分析和接触关系分析, 主要分析稳定性与平稳性。

2 车辆动力学模型建立

综合考虑轮轨的材料特性、几何特性、动力学特性, 以及与环境因素(如线路工况、运营里程等)的相互作用, 建立真实的车辆动力学模型。

2.1 模型构建概述

车辆系统动力学模型主要包括车体动力学模型与线路模型, 其中车体动力学模型在 UM Input 中建立, 而线路模型在 UM Simulation 中设置。

2.2 车体动力学模型细节

本文以某 B 型地铁车辆作为研究对象, 基于某 B 型地铁车辆的实际参数, 在确保精度的前提下进行了适当简化, 进而在 UM Input 软件中构建了车辆动力学仿真模型。该动力学模型结构由车身、两个框架、四个轮对和八个轴箱等关键部件组成, 这些部件通过主悬挂和次悬挂系统紧密连接。本节详细阐述了地铁车辆系统动态模型的建立过程。基于 B 型地铁车辆的参数, 在 UM Input 中建立一个简化的车辆动力学模型。将模型导入到 UM Simulation 中, 并建立一个工况线路模型来模拟实际线路。

3 轮轨磨耗模型理论

车轮与轨道的磨耗问题在铁路车辆系统研究中占据关键地位。磨耗导致的车轮与轨道变形, 会直接对轮轨接触几何关系和力学特性产生影响, 进而波及车辆系统的动态表现。这种变化不仅关乎车辆的操作质量, 更牵涉到其安全性。特别是在极端天气或复杂道路条件下, 车辆的运行变得尤为困难, 脱轨事故的风险显著上升。因此, 对轮轨磨耗进行精准的预测与分析显得尤为重要。本节深入探讨几种轮轨磨耗模型, 为相关研究与实践提供有益的参考。

3.1 材料磨耗模型

在使用 UM 软件进行车轮与轨道磨耗的模拟和预测时, 主要涉及三种磨耗模型: Archard 模型、Specht 模型, 以及 Archard model with wearcoefficient map 模型。

Archard 模型是经典的磨耗预测模型之一, 在车轮与轨道磨耗的模拟中, Archard 模型能够提供较为准确的预测结果, 尤其是在摩擦条件相对稳定的情况下。在 Archard 模型中, 轮轨磨耗体积和轮轨摩擦功呈线性关系, 表示如下:

$$W = k_v A \quad (3-1)$$

式中, k_v ——轮轨磨耗系数;

W ——轮轨磨耗体积;

A ——轮轨摩擦功。

$$A = \int_0^t P dt \quad (3-2)$$

式中, P ——摩擦功率。

$$P = \int_F \tau ds F \quad (3-3)$$

式中, τ ——接触单元内的切向应力;

S ——滑动速度,

F ——轮轨接触斑面积。

图 4-1 所示, x 方向为椭圆接触斑长轴方向, y 方向为椭圆接触斑短轴方向, j 为单元坐标。整个接触斑的磨耗功计算如下:

$$A = v \Delta t \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \tau_{ij} w_{ij} dF_{ij} \quad (3-4)$$

式中, v ——轮对速度;

Δt ——时间步长;

w ——蠕滑率。

3.2 轮轨磨耗预测原理

在 UM 软件中, 应用多点非赫兹接触理论和算法能精准高效地分析车轮与轨道的接触关系。它将接触点视为位于同一平面, 并进一步将这些接触点离散化为多个矩形元素, 将复杂的几何关系简化, 并能统一处理。

在进行磨耗计算时, 本文采用了 Archard 磨耗模型。具体来说, 首先通过多点非赫兹接触理论确定接触区域内的压力分布, 然后利用这些压力数据作为输入, 结合 Archard 模型进行磨耗量的计算。

轮轨接触斑内每个单元上的轮轨磨耗体积可表示为:

$$W_{ij} = k_v \tau_{ij} v w_{ij} \Delta F_{ij} \Delta t \quad (3-5)$$

式中, W_{ij} ——轮轨接触单元中心处的蠕滑率;

V ——车轮滚动速度;

ΔF_{ij} ——轮轨接触单元面积;

Δt ——时间积分步长。

先将车轮与轨道的轮轨型面分割成若干等间距的区段, 从而更精细地捕捉和分析磨耗在不同轮廓位置的具体情况。通过对轮轨型面进行等分, 能够在后续的模拟计算中, 精准分析每一个区段。

完成模拟计算后, 对每个区段的磨耗体积进行详细的统计分析。通过统计, 可以量化每个区段的磨耗程度, 并分析磨耗在不同踏面位置的分布情况。

车轮型面磨耗后轮廓任意一点的磨耗深度可以如下表示:

$$\delta_r(S) = \frac{W(S)}{2\pi R(s)h} \quad (3-6)$$

式中, S ——弧坐标;

R ——车轮滚动圆半径;

W ——车轮磨耗体积。

车轮型面磨耗深度可表示为:

$$\delta_p(r) = \frac{w(s)}{Lh} \quad (3-7)$$

式中, L ——型面区段的车轮的平均圆周长度。

在轮轨磨耗的计算方面, 本章采用了 Archard 磨耗模型。该模型能够综合考虑多种磨耗影响因素, 如材料硬度、接触压力及滑动速度等, 从而提供精准的磨耗预测结果。通过运用 Archard 模型, 本章对轮轨磨耗情况进行了深入的分析与预测。

4 轮轨磨耗仿真结果与分析

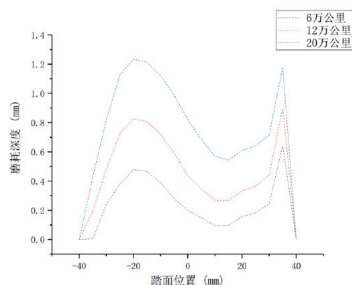
4.1 仿真条件与设置

如上述所讲, 本文构建了 B 型地铁车辆动力学模型。模型高度还原了实际车辆的动力学特性, 并根据实际运行条件, 整合了相应的轨道线路模型。该轨道模型中 43% 为直线部分, 57% 为曲线部分, 这样的比例分配能更真实地模拟地铁车辆在实际运行中的复杂工况。为了进一步提升模拟的逼真度和精度, 在轨道模型上添加美国 V 级随机不平顺谱的轨道激励。这一激励能够模拟地铁车辆在实际运营中遇到的轨道上的各种微小不平整, 从而更准确地反映轮轨接触状态及磨耗过程。设定车轮初始踏面为 LMA 型磨耗踏面, 轨道选用 CN60 钢轨, 并与轮轨接触模型和磨耗模型相结合来预测车轮型面的磨耗演变。对本文所构建的轮轨预测模拟模型在模拟线路上, 进行 200,000 km 里程的轮轨磨耗仿真。

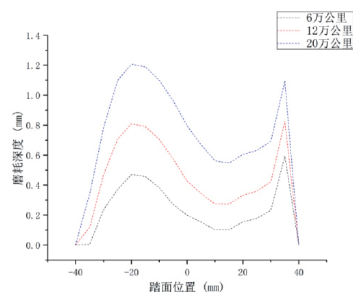
4.2 磨耗深度结果

在 200,000 km 轮轨磨耗预测里程中, 选择 60,000 km、120,000 km 和 200,000 km 三个里程节点, 来进行细致的轮轨磨耗分析。通过对这些节点数据的对比和分析, 能够分析轮轨在不同运行阶段的磨耗特征, 以及各种轨道条件对磨耗过程的具体影响, 见图 1。

车轮磨耗深度分布如图 4-1 所示。可以看出: 磨耗位置覆盖面比较大, 包括踏面和轮缘。由图 1 (a)、(b) 可知, 踏面磨耗位置大致相同, 磨耗深度上 1 位轮对整体大于 2 位轮对, 在运行里程达到 200,000 km 时, 1 位轮对磨耗深度最高可达 1.23 mm, 2 位轮对磨耗深度最高可达 1.20 mm, 但是演化趋势几乎相同。



(a) 1位轮对



(b) 2位轮对

图1 车辆运行不同里程的车轮磨耗深度分布

4.3 磨耗对动力学性能的影响分析

本节对建立的轮轨磨耗预测模型进行了仿真预测。研究表明:

由图 1 (a)、图 1 (b) 可知, 都在 $-40 \text{ mm} \sim +40 \text{ mm}$ 之间, 磨耗深度上 1 位轮对整体大于 2 位轮对, 在运行里程达到 200,000 km 时, 1 位轮对磨耗深度最高可达 1.23 mm, 2 位轮对磨耗深度最高可达 1.20 mm, 但是演化趋势几乎相同, 踏面磨耗位置也大致相同, 轮轨磨耗后车辆的蛇行失稳临界速度减小, 运行稳定性降低, 轮轨匹配的等效锥度变大, 导致地铁车辆运行稳定性降低。

5 结语

在地铁车辆的运行过程中, 小半径曲线轨道线路占比多, 客流量带来的大负载和频繁减速工矿, 导致车轮与轨面产生异常磨耗。本文基于 B 型地铁车辆的参数, 在 UM Input 中建立一个简化的某 B 型车辆动力学模型。将模型导入到 UM Simulation 中, 并建立一个工况线路模型来模拟实际线路。基于 KP 算法和 Archard 磨耗模型, 建立了轮轨磨耗预测仿真模型。在 UM Simulation 中对地铁车辆动力学模型进行 200,000 km 里程的轮轨磨耗仿真计算预测, 最后分析了轮轨磨耗对地铁车辆动力学性能的影响。通过上述大量计算和分析工作得出如下结论:

由图 1 (a)、图 1 (b) 可知, 都在 $-40 \text{ mm} \sim +40 \text{ mm}$ 之间, 磨耗深度上 1 位轮对整体大于 2 位轮对, 在运行里程达到 200,000 km 时, 1 位轮对磨耗深度最高可达 1.23 mm, 2 位轮对磨耗深度最高可达 1.20 mm, 但是演化趋势几乎相同, 踏面磨耗位置也大致相同, 轮轨磨耗后车辆的蛇行失稳临界速度减小, 运行稳定性降低, 轮轨匹配的等效锥度变大, 导致地铁车辆运行稳定性降低。

参考文献:

[1] 刘瑞家. 基于 UM 的地铁车辆轮轨磨耗预测及其动力学性能分析[D]. 2021,(02).

[2] 常崇义, 王成国, 金鹰. 基于三维动态有限元模型

的轮轨磨耗数值分析[J]. 中国铁道科学, 2008,29(4):89-95.

[3] 李霞, 金学松, 胡东. 车轮磨耗计算模型及其数值方法[J]. 机械工程学报, 2009,45(09):193-200.

[4] 罗仁, 曾京, 戴焕云等. 高速列车车轮磨耗预测仿真[J]. 摩擦学学报, 2009,29(06):551-558.

[5] 李响, 任尊松, 张军. 不同磨耗阶段动车车轮的动力学性能分析[J]. 铁道学报, 2016,38(12):14-18.

作者简介: 魏晓晖 (2002.06-), 男, 汉族, 本科, 助理工程师, 研究方向: 车辆工程。