

车轮磨耗对地铁车辆动力学性能影响研究

董超

神铁二号线(天津)轨道交通运营有限公司 天津 300300

摘要:为揭示车轮磨耗对地铁车辆动力学性能的影响规律,为地铁车辆轮轨维护及悬挂参数优化提供理论依据,以某型80 km/h地铁车辆为研究对象,建立车辆系统动力学模型,对比分析车轮磨耗前后、不同载荷工况下车辆的非线性临界速度、运行平稳性及曲线通过安全性。结果表明:车轮磨耗使轮轨等效锥度增大,导致车辆临界速度下降,空车载荷下临界速度低于超载,且动车空载工况的横向平稳性下降;空载工况的动力学性能整体劣于超载工况,但磨耗后各指标均未超出限值,车辆运行仍安全稳定。研究结果可为地铁车辆轮轨维护及参数优化提供理论参考。

关键词:车轮磨耗;地铁车辆;动力学性能;载荷工况

引言

车轮磨耗是地铁车辆长期服役过程中不可避免的物理现象,其通过改变轮轨接触几何关系持续影响车辆动力学性能。随着我国城市轨道交通运营里程的持续增长,车轮磨耗问题日益凸显,成为制约车辆乘坐舒适性与运行安全性的关键因素,开展车轮磨耗对地铁车辆动力学性能的影响规律研究,对优化轮轨匹配设计、车辆悬挂参数及制定科学的运维策略具有重要的理论意义和工程应用价值。

在城市轨道交通领域,车轮磨耗已开展大量相关工作:在轮轨匹配与型面优化方面,合理的轮轨型面匹配可有效改善轮缘磨耗^[1],综合考虑车轮磨耗演变的轨底坡优化可提升车辆曲线通过性能^[2,3];在动力学性能演变方面,车轮磨耗引发的等效锥度突变易导致车辆蛇行失稳,抗蛇行减振器可有效提高磨耗状态下车辆的临界速度^[4,5];在多因素耦合影响方面,车轮型面磨耗与多边形磨耗的叠加会进一步恶化动力学性能^[6],踏面制动温升会加剧磨耗^[7],凹陷磨耗引发的接触应力集中是踏面剥离损伤的重要诱因^[8];在运维策略方面,镟修策略优化可有效延长车轮寿命、降低运维成本。

现有研究多聚焦于型面演化机理及轮轨匹配优化等方面,针对80 km/h标准地铁车辆车轮磨耗前后动力学性能的系统性对比研究仍有待深入。为此,本文以某型80 km/h地铁车辆为研究对象,构建车辆系统动力学模型,从非线性临界速度、运行平稳性、曲线通过安全性三个方面,系统分析车轮磨耗及不同载荷工况对车辆动力学性能的影响,为地铁车辆轮轨系统维护提供理论支撑。

1 地铁车辆动力学模型建立

1.1 车辆结构特点

研究对象为某型最高运行速度80 km/h的地铁车辆,采用2200 mm轴距转向架,转向架借鉴日系传统设计,取消抗侧滚扭杆装置,二系垂向减振器与空气弹簧集成设计;轮对采用两侧圆锥橡胶金属件定位,轴箱纵向、横向及垂向定位由两个橡胶金属件的合成刚度实现;二系横向止挡设置10 mm自由间隙与15 mm弹性间隙,横向减振器阻尼值需同时满足振动加速度抑制与位移抑制要求,避免快速运行时横向止挡的弹性接触。

1.2 动力学模型构建

根据车辆结构特点,建立地铁车辆系统动力学仿真模型如图1所示。坐标系设定为:x轴为车辆的前进方向;y轴平行于轨道平面指向右方;z轴垂直轨道平面向下如图1所示。

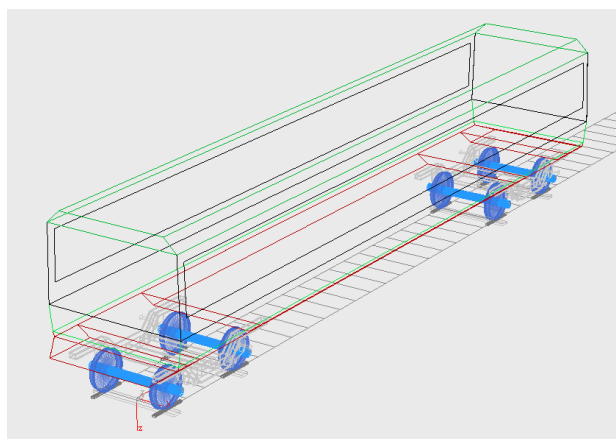


图1 地铁车辆动力学模型

当车轮发生磨耗,轮轨匹配的等效锥度将加大。选取一个磨耗轮对,它与新轮的外形对比如图2所示,通过计算可知,新轮与钢轨匹配时等效锥度约为0.12,磨耗后轮轨等效锥度增至0.25,轮轨接触几何关系的变化成为车辆动力学性能演变的核心因素如图2所示。

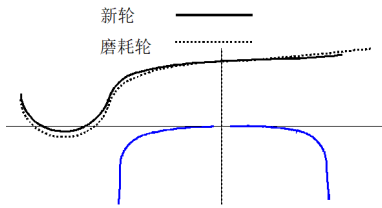


图2 新轮与磨损轮外形对比

2 非线性临界速度分析

2.1 非线性临界速度计算方法

车辆非线性临界速度计算遵循以下原则：首先给导

向轮对施加横向位移，在高速度下使轮对产生不收敛的蛇行运动，将该状态作为下一次计算的初始状态，逐步降低速度至轮对蛇行运动收敛，此时的速度即为车辆的非线性临界速度。设计要求车辆非线性临界速度大于88 km/h，以保障80 km/h运行速度下的稳定性^[2]。

2.2 不同工况下非线性临界速度计算

分别计算动车、拖车在新踏面、磨损踏面状态下，AW0（空载）、AW3（超载）载荷工况的的车辆非线性临界速度如图3所示。

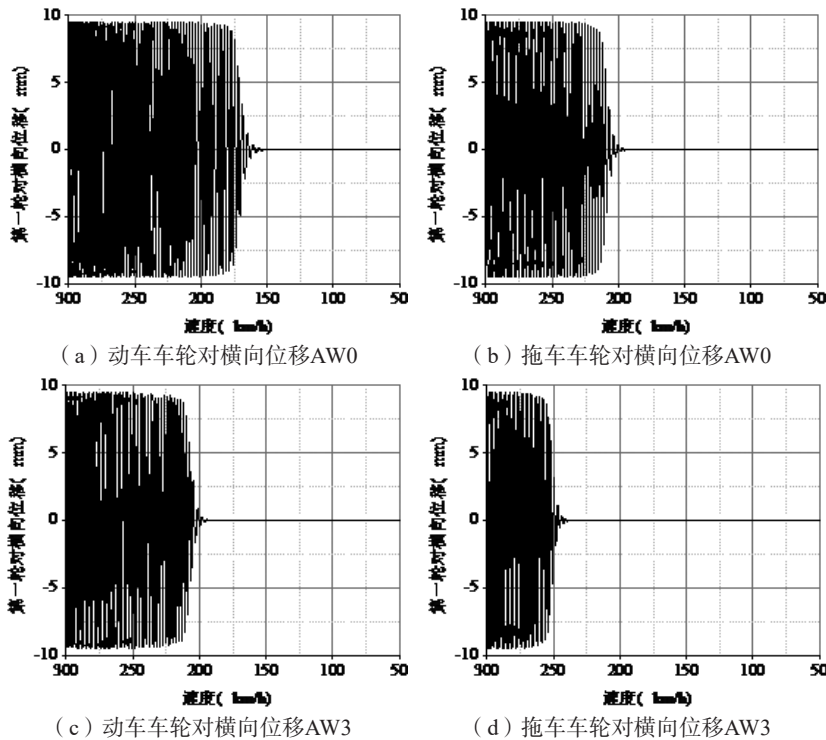


图3 新轮非线性临界速度

汇总车辆的非线性临界速度如表1所示，由表可以看出，车轮磨损后，动车、拖车在各载荷工况下的非线性临界速度均出现不同程度下降，但其数值仍远高于设计要求的88 km/h，车辆运行稳定性仍能得到保障；相同踏面状态下，AW3载荷工况的临界速度显著高于AW0工况，表明载荷增加可提升车辆的蛇行运动稳定性^[3]如表1所示。

表1 非线性临界速度（单位：km/h）

车型	动车				拖车			
	新踏面		磨损踏面		新踏面		磨损踏面	
载荷工况	AW0	AW3	AW0	AW3	AW0	AW3	AW0	AW3
临界速度	150	190	140	180	190	235	180	220

3 运行平稳性分析

3.1 平稳性指标等级

平稳性指标是对旅客和乘员乘坐舒适性、运送货物

完好性的度量方法，依据《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》（GB/T 5599-2019），以车体振动加速度为基础，从横向、垂向两个维度评定车辆运行平稳性，平稳性指标等级划分如表2所示。

表2 平稳性指标等级表

平稳性等级	平稳性指标	评定
1级	优秀	< 2.5
2级	良好	2.5~2.75
3级	合格	2.75~3.0

3.2 不同工况下平稳性指标计算

以AAR5级轨道谱为轨道不平顺激励，计算新踏面、磨损踏面状态下，动车、拖车在AW0、AW3载荷工况下，不同运行速度的横向、垂向平稳性指标，如图4所示。

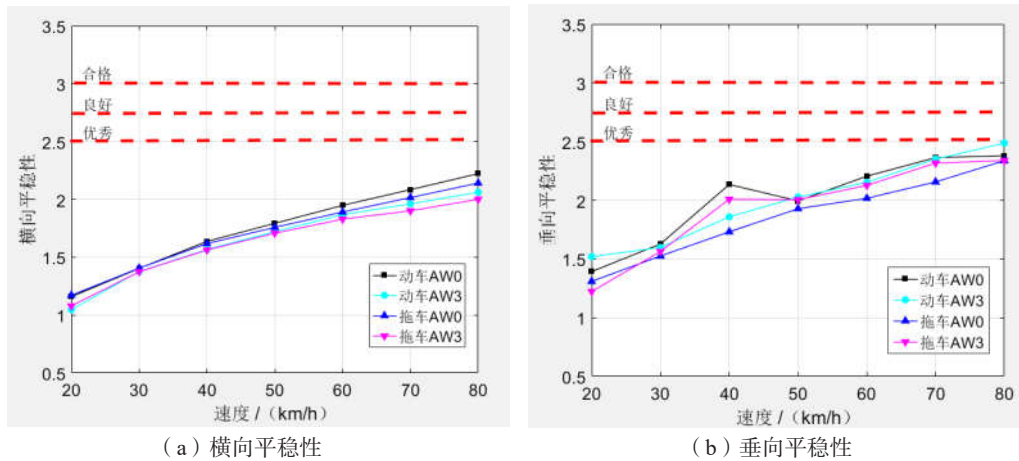


图4 新轮运行平稳性

由图5可以看出, 车轮磨耗对车辆垂向平稳性几乎无影响, 主要影响动车AW0载荷工况的横向平稳性, 使其指标略有上升, 但仍处于优秀范围内; 相同踏面状态下, AW0载荷工况的横向平稳性整体劣于AW3载荷工况, 拖车横向平稳性整体优于动车, 且受磨耗影响更小; 随着运行速度提升, 各工况下平稳性指标均呈缓慢上升趋势, 但在80 km/h设计最高速度下, 所有指标均未超出优秀限值^[4]。

4 曲线通过安全性

4.1 不同工况下安全性指标计算

结合研究对象运营正线实际, 选取最小曲线半径R300 m、最大超高120 mm、最大欠超高75 mm的恶劣工况, 为此设定车辆运行速度为70 km/h, 以AAR5级轨道谱为轨道不平顺激励, 计算新踏面、磨耗踏面状态下, 动车、拖车在AW0、AW3载荷工况的安全性指标, 汇总计算结果如表3所示。

表3 安全性指标计算

车型	动车				拖车			
	新踏面		磨耗踏面		新踏面		磨耗踏面	
载荷工况	AW0	AW3	AW0	AW3	AW0	AW3	AW0	AW3
脱轨系数	0.59	0.49	0.61	0.49	0.51	0.45	0.55	0.47
轮重减载率	0.43	0.35	0.41	0.35	0.42	0.35	0.41	0.36
轮轴横向力/kN	20	21	20	25	13	20	15	22

由表3可知, 车轮磨耗后, 动车、拖车的轮轴横向力略有增大, 脱轨系数和轮重减载率略有波动; 相同踏面状态下, AW0载荷工况的脱轨系数、轮重减载率均高于AW3工况, 安全裕度更低, 拖车的指标优于动车, 受车轮磨耗的影响程度也 smaller; 所有工况下, 脱轨系数、轮重减载率、轮轴横向力均未超出安全限值, 车轮磨耗虽使安全性指标劣化, 但未影响车辆曲线通过的安全性^[5]。

5 结论

(1) 车轮磨耗使轮轨等效锥度从0.12增至0.25, 导致动车、拖车在各载荷工况下的非线性临界速度不同程度下降, 但磨耗后临界速度仍远高于88 km/h的设计要求, 车辆运行稳定性可得到保障; 相同踏面状态下, AW3载荷工况临界速度显著高于AW0工况, 载荷增加可提升车辆蛇行运动稳定性。

(2) 车轮磨耗对车辆垂向平稳性无明显影响, 主要劣化动车AW0载荷工况的横向平稳性, 但所有指标仍在优秀范围内; AW0载荷工况横向平稳性整体差于AW3工况, 拖车平稳性受磨耗影响更小且整体优于动车。

(3) 车轮磨耗对车辆曲线通过安全性指标的影响主要体现为轮轴横向力略有增大, 脱轨系数与轮重减载率仅有小幅变化; AW0载荷工况下脱轨系数、轮重减载率指标安全裕度低于AW3工况, 但所有工况下各安全性指标均未超出限值要求。

参考文献

- [1] 陈玉洪, 黎嘉欣, 张更娥, 等. 基于多目标优化的地铁车轮低轮缘磨耗型面设计[J]. 机械工程学报, 2025, 61(8):261-271.
- [2] 朱爱华, 李宇航, 孟宇轩, 等. 考虑车轮型面动态变化的轨底坡设置研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(3):114-122.
- [3] 李书玉, 陈小平. 考虑轮轨匹配的地铁车轮磨耗分析[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(5):140-144.
- [4] 周慧, 文永蓬, 钟硕乔, 等. 提速地铁在车轮磨耗条件下的曲线运行稳定性研究[J]. 振动与冲击, 2025, 44(17):262-271.
- [5] 成军强, 杨陈, 贾小平, 苏文静. 抗蛇行减振器对车轮磨耗后转向架稳定性的影响研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(12):244-249.