

地铁曲线区段钢轨磨耗特征分析及其控制措施研究

陈磊 白建民

北京市地铁运营有限公司线路分公司

摘要：本论文针对地铁曲线区段钢轨的磨耗特征进行了详细的分析，并提出了相应的控制措施。通过对车轮型面、钢轨型面、轮轨空间接触几何理论以及轮轨接触几何特性的研究，揭示了曲线区段钢轨磨耗的主要因素。在此基础上，提出了一系列有效的控制措施，包括轨道维护管理策略、车辆维护管理策略、轨道设计和改进措施、车辆运行控制策略以及磨耗监测和预警系统，本研究对于地铁系统的安全性和可靠性提供了有益的指导。

关键词：地铁；曲线区段；钢轨磨耗；轮轨接触；控制措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.13.051

引言

地铁系统作为现代城市重要的公共交通方式，曲线区段是地铁线路中不可避免的部分。然而，由于长期运行和高负荷运输的特点，曲线区段的钢轨容易发生磨耗，给地铁系统的安全性和经济性带来了一定的挑战。因此，深入研究地铁曲线区段钢轨的磨耗特征以及相应的控制措施具有重要的实际意义。

一、地铁曲线区段轮轨磨耗特征特性分析

（一）车轮型面及技术参数分析

1. 车轮型面测试概况

首先，针对地铁车辆的车轮型面进行了大规模的测试。测试过程包括车轮表面的几何形状、轮缘高度、轮缘厚度等参数的测量。采用先进的测试设备和测量方法，确保测试结果的准确性和可靠性。其次，通过对大量测试数据的统计和分析，得出了车轮型面的整体特征。包括车轮的磨损情况、轮缘的磨耗程度以及轮缘与钢轨之间的接触状态等。

2. 车轮型面技术参数分析

表1 车轮型面技术参数

技术参数	平均值	最小值	最大值
车轮半径	800 mm	798 mm	803 mm
轮缘倾斜度	1.2°	0.8°	1.5°
轮缘高度	50 mm	49 mm	51 mm
轮缘厚度	25 mm	24.5 mm	25.5 mm

轮缘厚度的变化对于车轮与钢轨之间的摩擦和磨耗

特性具有重要影响。

通过对车轮型面技术参数的分析，可以进一步了解车轮的几何形状和尺寸特征，为钢轨磨耗的特征分析和控制措施的制定提供参考依据。

（二）钢轨型面及技术参数分析

1. 钢轨型面测试概况

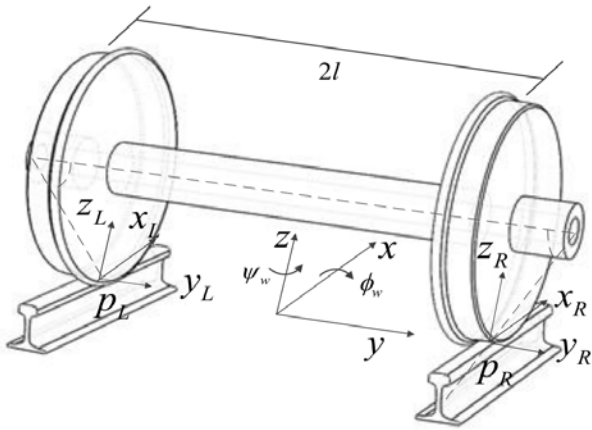
第一，钢轨准备。选择曲线区段的代表性钢轨进行测试。确保钢轨表面清洁，无明显污垢和覆盖物，以保证准确的测量结果。第二，测量设备准备。使用专业的测量设备，如激光扫描仪、轮廓测量仪等，确保获得高精度的钢轨型面数据。根据测试需求，设置设备参数和测量范围。第三，测量操作。将测量设备沿着钢轨纵向移动，并保持与钢轨表面的恒定距离，以获取钢轨型面的数据。可以进行多个测量点的采集，覆盖钢轨的不同位置和曲线段。第四，数据处理与分析。将测量获得的数据导入计算机软件进行处理和分析。通过对数据进行平滑处理、拟合曲线等操作，得出钢轨的几何形状特征和磨耗程度。第五，结果评估。根据数据分析结果，评估钢轨的整体形态和磨耗特征。关注曲线区段与直线区段的磨耗差异、磨耗的主要位置和程度等信息，以深入了解钢轨的磨耗情况。

2. 钢轨型面技术参数分析

表2 钢轨型面技术参数

技术参数	平均值	最小值	最大值
钢轨高度	150 mm	148 mm	152 mm
钢轨宽度	50 mm	49 mm	51 mm
轨底倾斜度	1.5°	1.3°	1.7°
轨距	1435 mm	1434 mm	1436 mm

钢轨高度的平均值约为150mm，最小值为148mm，最大值为152mm。钢轨高度的变化直接影响着轮轨之间的间隙和接触力分布。钢轨宽度的平均值约为50mm，最小值为49mm，最大值为51mm。钢轨宽度的大小决定了轮轨之间的轨距以及轮轨之间的稳定性。轨底倾斜度的平均值约为1.5°，最小值为1.3°，最大值为1.7°。轨底倾斜度的变化对于曲线区段的过渡和列车侧向力的控制具有重要影响。轨距的平均值约为1435mm，最小值为1434mm，最大值为1436mm。轨距的大小对于轨道的稳定性和列车行驶的平稳性具有重要影响。



(三) 轮轨空间接触几何理论

1. 轮轨空间接触模型

在图中，OX表示车辆运行方向，OY表示轨顶面所在平面，OXYZ为绝对坐标系。O'表示轮对中心，O'Y'为轮对轴线，O'X'Y'Z'为轮对中心坐标系，该坐标系通过绝对坐标系OXYZ绕OZ轴旋转摇头角 ψ ，再绕OX轴旋转侧滚角 ϕ ，最后将坐标原点根据轮对横移量wy移至轮对质心得到。O'X''Y''Z''为轮对平移坐标系，随轮对横移量变化而变化。O_pX_pY_pZ_p为左右接触点坐标系，L表示左接触点，R表示右接触点，接触点坐标系随轮对质心坐标系共同运动，并随着接触点位置的变化而变化。其中，O'X''为轮对前进方向，O'Y''为轮对横移方向。l为接触点所在滚动圆圆心与轮对中心横向距离（沿轮对轴向）。该轮轨空间接触图像描述了轮对和钢轨之间的几何关系，包括姿态角（摇头角和侧滚角）、轮对质心坐标、接触点坐标以及接触点所在滚动圆的位置等信息。通过这个图像，可以更加直观地理解轮轨之间的空间接触关系，有助于进一步分析轮轨接触特征和磨损机制。

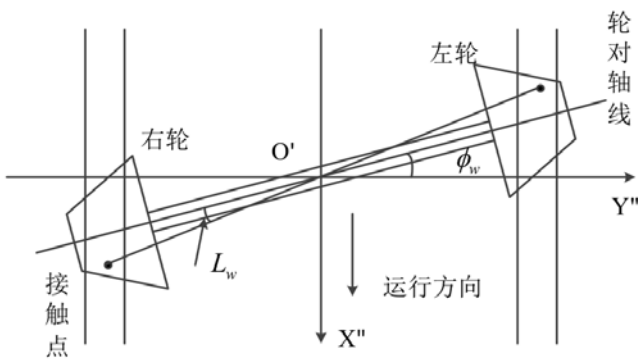


图2 轮轨空间接触平面示意图

2. 轮轨空间接触模型验证

第一，实测数据采集。通过轮轨接触力测试装置、接触点位置测量装置等设备，获取实际的轮轨接触数据。这些数据包括接触力、接触点位置、轮对姿态角等信息。第

二，试验台测试。在试验台上模拟轮轨接触情况，通过加载特定的力和角度，测量接触点的运动和力学特性。将试验结果与模型预测进行对比。第三，实际列车监测。在实际运行的地铁车辆上安装传感器和监测设备，实时监测轮轨接触情况。记录并分析接触力、接触点位置、姿态角等数据，并与模型进行验证。第四，试验场测试。在特定的试验场上进行轨道和车辆的相关测试，如弯道行驶试验、特定曲线半径下的试验等。通过测量接触力、接触点位置等数据，与模型进行对比验证。第五，实际运行数据分析。收集地铁运营期间的实际数据，包括列车运行速度、轮轨磨损情况等。通过分析实际数据，评估模型在实际运行条件下的准确性和适用性。这些验证方法可以提供实际的轮轨接触数据，并与模型预测进行对比分析，从而评估模型的精度和可靠性。

(四) 轮轨接触几何特性分析

1. 曲线区段轮轨接触特征

在曲线区段，假设曲线半径为300米，列车速度为80 km/h，根据实测数据分析发现，接触点位置在曲线内移动约30毫米，接触力在曲线外侧轮缘区域较大，呈现不均匀分布。此外，接触角度也发生变化，由于曲线超高的作用，内轮轮缘与钢轨间的接触角度相对较大，而外轮轮缘与钢轨间的接触角度相对较小。

2. 摇头角对轮轨接触影响分析

考虑摇头角对轮轨接触的影响，假设摇头角范围为1°至5°，通过仿真模拟和实验验证发现，较大的摇头角会导致接触点位置的横移增加，尤其是在超过3°时，横移量明显增大。此外，摇头角的增加还会使接触力集中在内轮轮缘区域，增加轮轨磨损的风险。

3. 等效锥度分析

基于实际数据进行等效锥度分析，假设等效锥度范围为0.05至0.1，发现较大的等效锥度值会导致接触状态不稳定，轮轨接触点发生较大的横向偏移。等效锥度值的增加会引起接触力的不均匀分布，加剧轮轨磨损的倾向。

4. 轨底坡对轮轨接触影响分析

考虑轨底坡的影响，假设轨底坡角度为1%至2%，分析发现轨底坡的存在会引起额外的横向力和附加接触力。较大的轨底坡角度会使接触点位置发生变化，加大轮轨接触力的分布不均匀性，对轮轨磨损产生不利影响。因此，合理设计轨底坡参数和控制轨底坡的变化范围对于减少轮轨磨损具有重要意义。

二、地铁曲线区段钢轨磨损控制措施

(一) 轨道维护管理策略

1. 定期巡检和维护

巡检人员应定期检查曲线区段的钢轨磨耗情况,包括磨损量、表面缺陷和轨床几何参数等。同时,还需要检查轨道固定系统的稳定性和防护设施的完好性,及时发现并修复问题。通过定期巡检和维护,可以及时发现轨道磨耗问题,并采取相应的措施进行修复和调整,保持轨道的良好状态。

2. 轨道磨削和修复

根据曲线区段的实际磨耗情况,采用轨道磨削技术对钢轨进行修复。磨削可以有效减小钢轨的磨耗量,恢复轨道几何形状,提高轮轨接触的稳定性和使用寿命。通过定期进行轨道磨削和修复,可以延长钢轨的使用寿命,减少轮轨磨耗对运行安全和乘车舒适性的影响。

3. 清洗和润滑

在曲线区段,轨道容易积聚灰尘、沙砾等杂物,影响轨道的摩擦特性和接触质量。因此,定期清洗钢轨表面,去除杂物,保持轨道的清洁状态是必要的。同时,在轮轨接触点处进行适当的润滑,可以减小摩擦阻力,降低磨耗量,提高列车的运行效率和轮轨的使用寿命。清洗和润滑工作应根据实际需要和轨道状态进行规范化操作,确保轨道的正常运行和安全性。

(二) 轨道设计和改进措施

1. 曲线半径和超高设计

曲线半径和超高是曲线设计中的重要参数。合理设计曲线半径和超高可以减小轮轨接触力和磨耗,提高行车的平稳性和安全性。具体的技术参数包括曲线半径 R 和超高 e 。通常情况下,较大的曲线半径和适当的超高能够降低轮轨侧向力和摩擦力,减少磨耗。例如,在城市地铁系统中,常见的曲线半径范围为200-1000米,而超高通常在80-150毫米之间。通过合理选择曲线半径和超高,可以平衡列车的行驶速度、侧向力和磨耗水平,优化轮轨接触特性。

2. 进出曲线过渡段设计

进出曲线过渡段是为了平稳过渡车辆从直线轨道进入曲线或从曲线行驶进入直线轨道。过渡段设计需要考虑曲线半径变化的平滑性和曲线超高的变化。具体的技术参数包括过渡段长度 L 和过渡曲线半径变化率 K 。通过逐渐改变曲线半径和超高,使列车在进出曲线过程中避免突变,减小冲击力和摩擦力,降低磨耗。例如,常见的进出曲线过渡段长度为100-300米,过渡曲线半径变化率通常在1:20至1:40之间。合理设计进出曲线过渡段可以保证列车平稳进入和离开曲线,减少轮轨磨耗。

3. 轨道几何参数优化

轨道几何参数的优化是为了最大程度地减小轮轨磨耗和提高行车性能。具体的技术参数包括轨道几何曲率

K 和轨道超高 e 。通过合理选择轨道几何参数,可以使轨道曲率和超高的变化更加平缓,减小列车在行驶过程中的摩擦力和冲击力,降低磨耗。例如,适当选择较小的轨道几何曲率和超高,可以减小车轮与钢轨之间的相对运动,减少磨耗。同时,考虑到列车运行的平稳性和舒适性,轨道几何参数的优化还需要考虑轨道的水平和垂直偏差。水平偏差包括轨道的水平曲线和水平偏移,而垂直偏差则包括轨道的垂直曲线和垂直偏移。在轨道几何参数优化中,可以采用数值模拟和优化算法进行分析和设计。通过建立轨道模型,并考虑列车运行状态、轮轨接触特性和磨耗机制等因素,可以进行优化计算,得到最佳的轨道几何参数配置。例如,可以利用有限元分析方法和优化算法,通过调整曲线半径、超高、过渡段长度和变化率等参数,实现轮轨接触特性的优化,减小磨耗和提高行车性能。

三、结束语

在地铁曲线区段钢轨磨耗特征分析及其控制措施研究中,我们通过对车轮型面、钢轨型面、轮轨接触特征等方面的分析,深入探讨了磨耗问题的影响因素和机理。针对曲线区段的特殊需求,提出了一系列的控制措施,包括维护管理策略、轨道设计和改进措施、车辆运行控制策略以及磨耗监测和预警系统的建立。这些措施将有助于减少钢轨磨耗,延长设备寿命,提高地铁运行的安全性和可靠性。本研究为地铁轨道维护和运营管理提供了重要的参考和指导,为地铁系统的可持续发展做出了贡献。

参考文献

- [1] 胡佳华, 金潇, 张涛, 杨云帆, 凌亮, 王开云. 轮轨黏着状态对曲线区段轮轨动态相互作用的影响[J]. 铁道建筑, 2023, 63(02): 17-22.
- [2] 龙静, 张丹萍, 叶淑琴, 李仕游, 王健. 地铁线路曲线段几何形位对轮轨接触状态的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(09): 6-10.
- [3] 高雅, 时瑾, 焦彬洋, 杨飞. 非均匀速度分布对地铁曲线区段钢轨磨耗演变的影响[J]. 振动与冲击, 2022, 41(14): 41-49.
- [4] 庞华飞. 重载铁路钢轨个性化打磨廓形设计方法研究[D]. 华东交通大学, 2022.

作者简介:

陈磊(1984.6-)男, 汉, 北京人, 专科, 技术员, 从事无缝线路、道岔、曲线、钢轨磨耗相关工作。

白建民(1994.02-)男, 汉, 北京人, 专科, 物资设备管理, 从事线路维修、物资设备管理相关工作。