

城轨车辆长期服役过程中关键部件疲劳寿命性能研究

姚 远 黄巍楠 何兴家
杭州地铁运营有限公司 浙江 杭州 311200

摘 要：城轨车辆作为城市公共交通的重要组成部分，其长期服役过程中关键部件的疲劳寿命性能研究对于保障车辆安全运行、降低运营成本具有重要意义。本文围绕城轨车辆转向架、车轴、制动系统等关键部件，深入分析材料选择与优化、结构设计改进、维护策略优化等因素对疲劳寿命的影响。通过理论分析与实验验证相结合的方法，提出提升关键部件疲劳寿命的有效措施，为城轨车辆的长期稳定运行提供理论依据和技术支持。

关键词：城轨车辆；关键部件；疲劳寿命；长期服役；性能研究

1 城轨车辆关键部件概述

1.1 关键部件定义

城轨车辆关键部件是指城市轨道交通车辆中起到至关重要作用的组件，它们共同确保车辆的安全、高效和稳定运行。作为城轨车辆的基础框架和主体，车体主要作用是运载乘客，为司机提供驾驶空间，并承受车辆的各种载荷。车体还是安装传动机构、电气设备和服务设施的平台。转向架是城轨车辆的走行装置，安装在车体与轨道之间，用于牵引和引导车辆沿轨道行驶。它承受并传递车体与轨道之间的各种载荷，同时缓和动力作用，是保证车辆运行品质的关键部件。制动装置用于控制车辆的速度和停车，确保车辆在需要时能够安全、迅速地减速或停止。牵引及电制动系统；提供车辆运行所需的动力，并在制动过程中回收能量。列车控制系统；包括列车监视控制系统和列车自动控制系统等，通过先进的通信技术和信号设备，实现对车辆的实时监控和精准控制。辅助电源系统；为车辆的电气设备提供稳定的电力供应。通风空调系统；根据车内温度自动调节，为乘客提供舒适的乘车环境。车门及机构；确保乘客安全上下车，同时保持车内的封闭性。

1.2 工作环境与载荷特点

城轨车辆的工作环境复杂多变，主要特点包括：第一，轨道限制。城轨车辆必须在固定的轨道上行驶，这就要求车辆的结构和部件能够适应轨道的几何尺寸和线路条件。第二，高密度运行。城轨车辆通常在城市内部或区间内高密度运行，要求车辆具有良好的加速性能、制动性能和运行稳定性^[1]。第三，载荷多样性。城轨车辆的载荷包括车辆自重、载重（乘客和货物）以及由运行产生的动载荷。这些载荷在车辆的不同部位和方向上分布不均，对车辆的结构强度和部件性能提出严格要求。第四，环境适应性。城轨车辆需要在不同的气候和天气条

件下运行，如高温、寒冷、潮湿、干燥等。这要求车辆的部件能够适应这些环境条件，保持良好的工作状态。第五，安全性要求。城轨车辆作为公共交通工具，承载着大量乘客的生命安全。车辆的关键部件必须具有高度的安全性和可靠性，能够在紧急情况下迅速作出反应，保障乘客安全。

2 影响城轨车辆关键部件疲劳寿命的因素

2.1 载荷因素

载荷因素是影响城轨车辆关键部件疲劳寿命的重要因素之一。城轨车辆在运行过程中，会受到各种动态和静态载荷的作用，这些载荷的大小和方向的变化都会对关键部件的疲劳寿命产生影响。动态载荷是城轨车辆在运行过程中最主要的载荷形式，由于车辆质量和速度的影响，城轨车辆在行驶过程中会对轨道产生冲击力，这种冲击力会随着车辆质量和速度的增加而增大，进而加速轨道和车辆关键部件的疲劳损伤。特别是在弯道、坡道等特殊路段，车辆受到的动态载荷会更加复杂和剧烈，对关键部件的疲劳寿命产生更大的影响。静态载荷也是不可忽视的因素，城轨车辆停靠在车站时，会受到车站轨道结构的支撑力，这种支撑力是静态的，但长期作用也会对车辆关键部件产生疲劳损伤。特别是在车站轨道结构的设计寿命接近末期时，静态载荷对车辆关键部件的疲劳寿命影响会更加显著。

2.2 材料因素

材料因素是影响城轨车辆关键部件疲劳寿命的另一个关键因素。城轨车辆关键部件的材料选择、材料性能和材料处理都会对其疲劳寿命产生影响。不同的材料具有不同的力学性能和疲劳寿命。例如，铝合金和不锈钢是城轨车辆常用的车体结构材料，它们具有良好的抗腐蚀性和抗疲劳性能。在长期承受运行过程中的震动、压力等作用力后，这些材料也会产生疲劳损伤。材料的

性能也会影响疲劳寿命,材料的断裂韧性、弹塑性、抗拉强度、抗蚀能力、抗热能力、耐磨性能等基本属性都会对材料的疲劳寿命产生影响。例如,通过微合金化提高材料的力学性能,可以显著提高材料的疲劳寿命。此外,材料的表面处理也会对疲劳寿命产生影响。

2.3 制造工艺因素

制造工艺因素也是影响城轨车辆关键部件疲劳寿命的重要因素之一。制造工艺的好坏直接影响到关键部件的质量和使用寿命。在制造过程中,需要严格控制加工精度和工艺参数,确保关键部件的尺寸和形状符合设计要求^[2]。同时还需要对制造过程进行稳定性控制,避免因为工艺波动而导致关键部件的质量不稳定。制造工艺的合理性也会影响疲劳寿命。例如,在焊接过程中,需要选择合适的焊接工艺和焊接参数,避免因为焊接缺陷而导致关键部件的疲劳寿命降低。

2.4 运行环境因素

运行环境因素也是影响城轨车辆关键部件疲劳寿命的重要因素之一。城轨车辆的运行环境包括气候、温度、湿度、风沙等多种因素,这些因素都会对关键部件的疲劳寿命产生影响。气候和温度的变化会对关键部件的材料性能产生影响。例如,在极端高温或低温环境下,材料的力学性能和疲劳寿命都会发生变化。湿度和风沙等环境因素也会对关键部件的疲劳寿命产生影响。湿度会加速金属的腐蚀过程,导致关键部件的表面出现锈蚀和裂纹;风沙则会加速关键部件的磨蚀过程,导致表面出现磨损和剥落。

3 城轨车辆长期服役过程中关键部件疲劳寿命预测

在城轨车辆长期服役过程中,关键部件的疲劳寿命预测是确保车辆安全运行和延长使用寿命的重要环节。

3.1 转向架疲劳寿命预测

转向架是城轨车辆的核心部件之一,它负责支撑车辆重量、传递牵引和制动力,以及确保车辆在轨道上的稳定运行。转向架的疲劳寿命预测对于保障车辆整体性能和安全性至关重要。转向架的疲劳寿命预测通常基于结构细节疲劳额定值法(RDFR)和有限元分析方法。首先,通过RDFR法,可以针对转向架的特殊结构细节,如焊缝、螺栓连接等,进行疲劳寿命评估。这种方法考虑了材料、载荷、应力集中等因素,能够较为准确地预测转向架在特定工况下的疲劳寿命。其次,有限元分析方法也被广泛应用于转向架的疲劳寿命预测中。通过建立转向架的有限元模型,可以模拟其在不同工况下的应力分布和变形情况,进而评估其疲劳寿命。在实际应用中,转向架的疲劳寿命预测还需要考虑多种因素的影

响,如轨道不平顺、车辆运行速度、载荷变化等。这些因素都会导致转向架在实际运行过程中承受复杂的动态载荷,从而影响其疲劳寿命。在进行转向架疲劳寿命预测时,需要综合考虑多种因素,以确保预测结果的准确性和可靠性。

3.2 车轴疲劳寿命预测

车轴是城轨车辆的另一个关键部件,它负责传递牵引力和制动力,并支撑车辆重量。车轴的疲劳寿命预测对于确保车辆行驶的安全性和稳定性具有重要意义。车轴的疲劳寿命预测通常采用准静态法和动力学仿真方法,准静态法通过计算车轴在静态载荷下的应力分布,结合材料的疲劳特性曲线,来预测车轴的疲劳寿命。这种方法简单易行,但忽略了动态载荷对车轴疲劳寿命的影响。因此在实际应用中,动力学仿真方法被更多地采用。动力学仿真方法通过建立车辆-轨道动力学模型,模拟车轴在实际运行过程中的动态载荷历程。然后,结合有限元分析方法,计算车轴在不同工况下的应力响应。根据材料的疲劳特性曲线和疲劳累积损伤理论,预测车轴的疲劳寿命。这种方法能够更准确地反映车轴在实际运行过程中的受力情况,从而更准确地预测其疲劳寿命^[3]。需要注意的是,车轴的疲劳寿命预测还需要考虑多种因素的影响,如车轮磨损、轨道不平顺、车辆运行速度等。这些因素都会导致车轴在实际运行过程中承受复杂的动态载荷,从而影响其疲劳寿命。因此,在进行车轴疲劳寿命预测时,需要综合考虑多种因素,以确保预测结果的准确性和可靠性。

3.3 制动系统疲劳寿命预测

制动系统是城轨车辆的重要组成部分,它负责确保车辆在紧急情况下能够迅速停车,从而保障乘客和车辆的安全。制动系统的疲劳寿命预测对于确保制动系统的可靠性和稳定性具有重要意义。制动系统的疲劳寿命预测通常采用多体动力学建模和雨流计数法。首先通过Matlab/Simpack等仿真软件,建立制动系统-车辆-轨道-控制耦合模型,模拟制动系统在不同工况下的时间-载荷历程。采用雨流计数法统计并给出载荷谱,运用Miner损伤理论进行疲劳寿命预测。在实际应用中,制动系统的疲劳寿命预测还需要考虑多种因素的影响,如制动方式、制动距离、制动时间等。这些因素都会导致制动系统在实际运行过程中承受复杂的动态载荷,从而影响其疲劳寿命。在进行制动系统疲劳寿命预测时,需要综合考虑多种因素,以确保预测结果的准确性和可靠性。

4 城轨车辆长期服役过程中关键部件疲劳寿命提升与维护策略

在城轨车辆长期服役的过程中,关键部件的疲劳寿命不仅影响着车辆的运行安全性和可靠性,还直接关系到运营成本和维修频率。因此通过材料选择与优化、结构设计优化、维护策略优化以及可持续发展与绿色维护等手段,可以有效提升关键部件的疲劳寿命,降低运营成本,实现城轨车辆的长期高效运行。

4.1 材料选择与优化

材料的选择与优化是提升城轨车辆关键部件疲劳寿命的基础。在材料选择上,应优先考虑具有高强度、高韧性、良好的抗疲劳性能和耐腐蚀性的材料。例如,对于转向架和车轴等关键部件,可以选用高强度合金钢或碳纤维复合材料,这些材料在保持轻量化的同时,能够显著提高部件的承载能力和抗疲劳性能。此外,对材料进行微观组织和性能的优化也是提升疲劳寿命的有效途径。通过热处理、表面强化等技术手段,可以改善材料的内部缺陷,提高材料的力学性能和抗疲劳性能。

4.2 结构设计优化

结构设计优化是提升城轨车辆关键部件疲劳寿命的关键。在结构设计上,应注重减少应力集中、优化载荷传递路径、提高部件的整体刚度和强度。例如,在转向架的设计中,可以采用流线型设计,减少空气阻力和振动,从而降低转向架的疲劳损伤。通过优化转向架各部件的连接方式,如采用高强度螺栓连接或焊接,可以提高转向架的整体刚度和强度,延长其使用寿命。另外,对关键部件进行疲劳寿命分析,根据分析结果对结构进行优化设计,也是提升疲劳寿命的重要手段。例如,利用有限元分析方法对车轴进行疲劳寿命分析,可以找出车轴上的应力集中区域和疲劳敏感部位,然后对这些区域进行优化设计,如增加圆角、改变截面形状等,以降低应力集中,提高车轴的抗疲劳性能。

4.3 维护策略优化

维护策略的优化是确保城轨车辆关键部件长期稳定运行的关键。在制定维护策略时,应综合考虑部件的使用环境、运行工况、历史维修记录等因素,制定合理的维护计划和维修周期。例如,对于转向架和车轴等关键部件,可以采用定期检查和预防性维护相结合的方式,及时发现并处理潜在故障,避免部件因长期磨损或疲劳损伤而失效^[4]。利用先进的监测技术和数据分析手段,对

关键部件的运行状态进行实时监测和分析,也是优化维护策略的重要手段。例如,通过安装传感器对车轴的振动、温度等参数进行实时监测,结合数据分析算法对车轴的运行状态进行评估和预测,可以及时发现车轴的异常状态,并采取相应的维护措施,避免车轴因疲劳损伤而引发安全事故。

4.4 可持续发展与绿色维护

在城轨车辆关键部件的疲劳寿命提升与维护策略中,可持续发展与绿色维护也是不可忽视的重要方面。随着环保意识的日益增强和绿色交通的发展要求,城轨车辆的维护也应注重节能减排和资源循环利用。例如,在维修过程中,应优先采用环保材料和工艺,减少维修过程中的废弃物排放和能源消耗。同时对于报废的关键部件,应进行分类回收和再利用,降低资源浪费和环境污染。在车辆设计和维护策略的制定中,也应注重提高车辆的能效和环保性能。例如,通过优化车辆的动力系统和制动系统,降低车辆的能耗和排放;通过采用先进的维护策略和管理手段,提高车辆的可靠性和运行效率,减少因故障停车和维修造成的能源浪费和环境污染。

结束语

本文通过对城轨车辆长期服役过程中关键部件疲劳寿命性能的研究,揭示材料、结构、维护等多因素对疲劳寿命的综合影响。研究成果不仅为城轨车辆关键部件的设计、制造和维护提供科学指导,也为推动城轨交通行业的可持续发展和绿色交通建设贡献力量。未来,随着技术的不断进步和城轨交通行业的快速发展,关键部件疲劳寿命性能的研究将更加深入,为城轨车辆的安全、高效运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1]马明,陈亮.基于大数据分析的城轨车辆关键部件故障预测技术研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(3):30-35.
- [2]高峰,李娜.深度学习在城轨车辆故障预测中的应用[J].铁道科学与工程学报,2021,19(2):560-566.
- [3]郭强,赵刚.城轨车辆关键部件维护策略与成本控制研究[J].交通运输系统工程与信息,2023,23(1):102-109.
- [4]刘宇曦,赵自强,张吉云.轨道车辆关键部件全寿命周期信息化设计与应用[J].设备管理与维修,2023,(14):16-17.