

# 轨道交通车辆检修周期优化策略探讨

曾宪波

天津津轨轨道车辆有限公司 天津 300382

**摘要:** 本文聚焦轨道交通车辆检修周期优化策略,阐述了检修周期理论基础,涵盖检修模式分类、可靠性理论及全寿命周期成本理论应用。并分析车辆系统特性、运营环境、检修资源等影响因素。构建基于可靠性、LCC及多目标协同的优化模型。因此,提出分级分类检修、动态调整、智能化技术应用、标准化与差异化结合等优化策略,旨在实现检修周期科学合理,保障车辆安全运行,降低运营成本,提升运营效率。

**关键词:** 轨道交通车辆;检修周期;优化策略

引言:轨道交通作为城市交通的关键部分,其车辆检修周期的合理性至关重要。合理的检修周期既能保障车辆安全稳定运行,又能有效控制运营成本。然而,当前轨道交通车辆检修周期的制定面临诸多挑战,如不同部件损耗规律差异大、运营环境复杂多变、检修资源有限等。因此,深入探讨轨道交通车辆检修周期优化策略,构建科学合理的优化模型,提出切实可行的优化措施,具有重要的现实意义。

## 1 轨道交通车辆检修周期理论基础

### 1.1 检修模式分类

轨道交通车辆检修模式是制定检修周期的核心依据,主流模式分为四类。固定周期检修模式应用广泛,以运行里程或时间为基准预设检修节点,按计划作业,操作简单且能规避重大隐患,但缺乏灵活性,易出现过度或不足检修。状态修模式以车辆实际运行状态为核心,通过监测设备收集部件数据,判断损耗程度后针对性检修,能精准匹配需求、降低成本,但对监测与数据处理能力要求高。故障修模式属被动检修,仅在故障后维修,无需预设周期,成本低,但易致故障扩大,影响运营安全。预测性检修模式是智能化方向,结合大数据、物联网预测部件故障趋势,提前制定计划,兼顾安全性与经济性,已在部分城市轨道交通关键部件检修中试点,未来将全面推广。

### 1.2 可靠性理论应用

可靠性理论是轨道交通车辆检修周期优化的核心支撑,通过分析车辆及部件运行规律、故障模式,量化可靠性指标,为检修周期制定提供科学依据。部件随运行时间或里程增加而损耗,可靠性下降直至故障。该理论收集部件运行与故障数据,运用统计分析方法拟合寿命分布规律,常用模型包括Weibull分布、指数分布等,其中Weibull分布应用最广。基于可靠性理论,可明确部件平均无故障运行时间、故障发生率等指标,判断其损耗

阶段,进而确定合理检修周期,确保检修在故障前开展,避免资源浪费或安全隐患,实现检修周期与部件可靠性的精准匹配<sup>[1]</sup>。

### 1.3 全寿命周期成本(LCC)理论

全寿命周期成本理论统筹考虑轨道交通车辆从设计到报废全生命周期内的所有成本,以实现总成本最小化,为检修周期优化提供经济性支撑。车辆全寿命周期成本中,检修成本占比30%-40%,包括检修工时、备件采购、设备折旧、停工损失等成本,不同检修周期对应的成本差异显著。过短周期会增加直接成本,过长周期会增加间接成本。该理论通过量化不同周期下的各项成本,构建成本核算模型,平衡直接与间接成本,找到总成本最低的最优周期。优化过程中需结合可靠性理论,在保障车辆运行可靠性的前提下,核算不同周期的总成本,避免单纯追求安全性或经济性,实现安全性与经济性的协同平衡。

## 2 轨道交通车辆检修周期影响因素分析

### 2.1 车辆系统特性

车辆系统特性是影响检修周期的核心内在因素,涵盖车辆结构设计、部件质量及老化程度等,直接决定车辆及部件的损耗规律与故障发生率。轨道交通车辆由多个子系统构成,不同子系统部件特性差异大。转向架、制动系统等关键部件影响运行安全,损耗快、故障后果严重,检修周期需短;空调、照明等辅助部件故障影响小、损耗慢,检修周期可长。车辆制造工艺与部件质量也影响检修周期,优质材料和先进工艺的车辆部件可靠性高,可延长检修周期;质量差的则故障率高,需缩短周期。另外,车辆运营年限越长,部件老化越严重,可靠性下降、故障率上升,需逐步缩短检修周期,保障老旧车辆安全运行,防止因部件老化引发安全事故。

### 2.2 运营环境因素

运营环境因素是影响检修周期的重要外在因素,包括线路工况、气候条件和客流强度,会加速或减缓车辆部件损耗。线路工况上,不同线路的坡度、曲线半径、轨道平整度不同,坡度大、曲线半径小的线路,制动系统和转向架损耗快,检修周期要缩短;轨道不平整会使车辆振动加剧、部件磨损增加,也会缩短周期。气候条件方面,高温、严寒、多雨多风沙地区车辆部件损耗更快,高温加速电气部件老化,严寒影响制动性能,多雨多风沙导致部件腐蚀堵塞,此类地区检修周期比温和地区缩短10%-20%。客流强度上,高峰满负荷、日均客流量大的线路,部件运行负荷大、损耗快,检修周期需适当缩短,核心城区线路比郊区缩短约20%。

### 2.3 检修资源约束

检修资源约束是优化检修周期的重要现实因素,涉及检修人力、设备和备件储备,影响检修效率与质量,进而决定检修周期可行性。检修人力上,轨道交通车辆检修需专业技术人员,若人员数量不足、素养不高,会导致检修工时延长,无法按预设周期完成,需延长周期;专业团队充足、水平高的企业可缩短周期、提升效率。检修设备方面,先进设备能提高检修精度和效率,如智能化、自动化检修设备可精准检测和快速检修部件,为缩短周期提供支撑;缺乏专业设备的企业检修效率低,需延长周期<sup>[2]</sup>。备件储备上,充足备件可避免因短缺导致检修停滞,确保按期完成;储备不足时则需延长周期,预留备件采购调配时间。

## 3 轨道交通车辆检修周期优化模型构建

### 3.1 基于可靠性的检修周期优化

基于可靠性的检修周期优化模型,旨在让检修周期精准匹配部件损耗规律,控制故障发生率,保障车辆安全。构建该模型分三步:一是收集车辆关键部件运行与故障数据,如运行里程、故障时间等,经统计分析剔除异常数据,保证数据真实完整;二是用 Weibull 分布模型拟合部件寿命分布,估计参数,明确平均无故障运行时间等可靠性指标,判断部件损耗阶段;三是设定可靠性阈值,即部件可接受的最大故障发生率,结合寿命分布规律算出最优检修周期,在故障发生率大幅上升前检修。此模型约束条件是故障发生率不超预设阈值,求解可得不同部件最优周期,避免过度或不足检修,如转向架部件最优周期可设为平均无故障运行时间的70%-80%,兼顾安全与资源利用。

### 3.2 基于LCC的检修周期优化

基于LCC的检修周期优化模型,核心是统筹考虑检修全生命周期成本,实现总成本最小化,核心目标是平

衡检修直接成本与间接成本,在保障车辆运行基本安全的前提下,降低运营成本。该模型构建需首先明确成本构成,包括检修直接成本和间接成本,直接成本主要包括检修工时成本、备件采购成本、设备折旧成本,间接成本主要包括故障停工损失成本、部件更换成本、安全事故损失成本等;其次,量化不同检修周期下的各项成本,建立成本核算函数,其中直接成本随检修周期缩短而增加,间接成本随检修周期缩短而减少;最后,设定约束条件,包括部件故障发生率不超过最大可接受值、检修资源可满足检修需求等,通过模型求解,找到总成本最低的最优检修周期。该模型可结合车辆实际运营情况,动态调整各项成本权重,如核心线路车辆可适当提高安全权重,增加检修直接成本,降低间接成本;郊区线路车辆可适当提高经济性权重,优化成本结构,实现不同线路车辆的成本优化。

### 3.3 多目标协同优化模型

多目标协同优化模型,核心是整合基于可靠性和基于LCC的优化目标,实现安全性、经济性和高效性的协同平衡,解决单一目标优化存在的局限性。该模型的核心目标包括三个方面:一是安全性目标,将车辆关键部件故障发生率控制在预设阈值内,保障车辆运行安全;二是经济性目标,实现车辆检修全寿命周期总成本最小化,降低运营成本;三是高效性目标,优化检修周期安排,减少车辆停工时间,提升车辆运营效率。模型构建需首先设定各目标的权重,结合轨道交通运营企业的发展定位,核心线路可提高安全性目标权重,郊区线路可提高经济性目标权重;其次,整合可靠性约束、成本约束、检修资源约束等,构建多目标优化函数;最后,采用遗传算法、粒子群算法等优化算法求解模型,得到最优检修周期方案。该模型能兼顾多方面需求,避免单一目标优化导致的顾此失彼,如既确保部件故障发生率控制在合理范围,又实现检修成本降低,同时减少车辆停工时间,提升运营效益<sup>[3]</sup>。

## 4 轨道交通车辆检修周期优化策略

### 4.1 分级分类检修策略

分级分类检修策略是基于车辆部件重要程度和损耗规律,实现检修资源的精准配置,优化检修周期的核心策略。分级检修主要根据车辆部件的重要程度,将部件分为关键部件、重要部件和普通部件,关键部件包括转向架、制动系统、牵引系统等,直接影响车辆运行安全,采用短周期、高精度检修模式,缩短检修周期,增加检修频次,确保部件性能稳定;重要部件包括车门系统、空调系统等,故障影响较大,采用中周期检修模式,按优

化模型计算的周期开展检修；普通部件包括照明系统、扶手等，故障影响较小，采用长周期检修模式，适当延长检修周期，降低检修成本。分类检修主要根据车辆运营工况，将车辆分为核心线路车辆、郊区线路车辆和老旧车辆，核心线路车辆客流大、运行强度高，缩短检修周期；郊区线路车辆运行强度低，适当延长检修周期；老旧车辆部件老化严重，逐步缩短检修周期，实现不同类型车辆的差异化检修。

#### 4.2 动态调整机制

动态调整机制核心是打破固定检修周期的局限性，结合车辆实际运行状态、运营环境变化和检修资源情况，实时优化调整检修周期，确保检修周期的适配性。建立动态监测体系，通过物联网、传感器等技术，实时收集车辆部件运行数据、故障数据和运营环境数据，包括客流强度、气候条件、线路工况等，实现数据的实时更新；建立定期评估机制，每季度对检修周期的合理性进行评估，结合部件故障发生率、检修成本、运营效率等指标，判断现有检修周期是否适配实际需求；建立动态调整流程，针对评估发现的问题，结合优化模型，及时调整检修周期，如夏季高温天气，适当缩短电气部件检修周期；客流高峰时段，临时调整检修计划，避开高峰时段，减少对运营的影响；检修资源充足时，适当缩短检修周期，提升检修效率。通过动态调整机制，实现检修周期与实际需求的精准匹配，提升检修工作的灵活性和科学性<sup>[4]</sup>。

#### 4.3 智能化技术应用

智能化技术应用是提升检修周期优化科学性和效率的重要支撑，通过大数据、物联网、人工智能等技术，实现部件损耗的精准监测、故障的提前预测和检修工作的高效开展。搭建智能化监测平台，在车辆关键部件上安装传感器，实时采集部件运行数据，包括振动、温度、压力等，通过大数据技术分析数据，精准判断部件损耗程度和故障趋势，为检修周期优化提供数据支撑；引入人工智能预测模型，结合历史运行数据、故障数据，预测部件故障发生时间，提前制定检修计划，优化检修周期，实现从“被动检修”向“主动预测检修”转型；推广自动化检修设备，如智能化检修机器人、自动化检测设备等，提升检修精度和效率，缩短检修工时，为缩短检修周期提供支撑；搭建数据共享平台，实现运营、检修、制造等部门的数据

共享，打破数据壁垒，确保检修周期优化数据的全面性和准确性，提升优化效果。

#### 4.4 标准化与差异化结合

标准化与差异化结合策略，核心是建立统一的检修标准，同时兼顾不同类型车辆、不同运营工况的差异化需求，确保检修周期优化的规范性和适配性。建立标准化检修体系，制定统一的检修流程、检修标准和质量评估标准，明确不同部件的检修内容、检修精度和检修频次，确保检修工作的规范性和统一性，避免因检修标准不统一导致检修质量参差不齐，影响车辆运行安全；建立标准化数据收集和分析体系，统一数据采集指标、采集频率和分析方法，确保检修周期优化数据的可比性和准确性。在标准化基础上，实现差异化优化，结合不同线路的运营工况、不同类型车辆的特性和不同部件的损耗规律，制定差异化的检修周期，如核心线路与郊区线路、新车与老旧车辆的检修周期区分开来；结合不同运营企业的检修资源情况，调整检修周期，确保检修周期的可行性，实现标准化规范检修、差异化适配需求的协同优化。

#### 结束语

轨道交通车辆检修周期优化是一个复杂且系统的工程，涉及多方面因素。通过对其理论基础、影响因素的深入分析，构建多种优化模型，并从分级分类、动态调整、智能化应用、标准化与差异化结合等方面提出优化策略，为检修周期的科学制定提供了全面指导。未来，随着技术的不断进步和运营需求的持续变化，还需进一步探索和完善检修周期优化策略，以更好地适应轨道交通发展，提升运营效益和服务质量。

#### 参考文献

- [1]束长健,周黎明,吴强.提高轨道交通车辆检修服务质量的策略探讨[J].中国科技纵横,2025(12):162-164.
- [2]胡佳乔,王崇明.轨道交通车辆检修业务的信息化管理研究[J].中国科技纵横,2023(15):50-52.
- [3]张恕震,江美霞,李德林.城市轨道交通车辆检修模式及建议[J].工程与建设,2023,37(1):40-42,63.
- [4]王士刚.城市轨道交通车辆检修维护技术应用研究[J].时代汽车,2024(12):34-36.