

Research on Maintenance Cycle Optimization and Cost Control of Freight Vehicles Based on the Whole Life Cycle

Weiguang Zuo

Guoneng Railway Equipment Co., Ltd., Cangzhou Locomotive and Rolling Stock Maintenance Branch, Cangzhou, Hebei, 061113, China

Abstract

In railway transportation systems, the maintenance system for freight vehicles is critical to transport safety, operational efficiency, and equipment longevity. With the modernization of railways and the growing fleet of freight vehicles, the traditional periodic maintenance model—primarily based on time or mileage—has limitations in both cost-effectiveness and reliability. This study focuses on the C80 freight vehicle, applying the full life cycle theory to analyze three key aspects: operational condition monitoring, maintenance cycle optimization, and cost control. By establishing a life cycle cost model and a risk-based maintenance decision-making model, the study quantitatively evaluates the failure mechanisms of different components and their associated maintenance costs. The results demonstrate that adopting a cycle optimization strategy combining condition monitoring and predictive maintenance can reduce the vehicle's total life cycle cost by approximately 15% and decrease average downtime by 20%. This approach holds practical significance for operational guidance.

Keywords

C80 truck; Full life cycle; Maintenance cycle; Cost control; Condition monitoring

基于全生命周期的货运车辆检修周期优化与成本控制研究

左伟光

国能铁路装备有限责任公司沧州机车车辆维修分公司, 中国·河北·沧州 061113

摘要

在铁路运输体系里, 货运车辆检修制度关乎运输安全、效益与设备寿命。如今铁路现代化发展、货运车辆保有量增加, 传统以时间或里程为主的定期检修模式, 在经济性与可靠性上存在局限。本文以C80型货运车辆为对象, 基于全生命周期理论, 从运行状态监测、检修周期优化、成本控制三方面展开分析。通过建立生命周期成本模型与风险分级检修决策模型, 量化评估其不同部件失效机理与维护成本。结果表明, 采用状态监测与预测性检修结合的周期优化策略, 车辆全寿命周期成本降约15%, 平均停时减20%, 该方案有现实指导意义。

关键词

C80货车; 全生命周期; 检修周期; 成本控制; 状态监测

1 引言

随着我国铁路货运规模持续扩大, 重载运输车辆的检修模式正由经验型向数据驱动型转变。C80型货车作为重载煤炭运输的主力车型, 其维护策略直接关系到运输效率与经济效益。传统以固定周期为主的检修模式忽视车辆个体差异与运行环境复杂性, 易造成过度或滞后维护, 增加全寿命成本并降低可用率。引入全生命周期管理理念, 可在设计、制造、使用与报废全过程实现成本与性能的系统优化。本文以C80型货车为对象, 基于运行与故障数据构建生命周期成本

与状态检修模型, 在安全与可靠性约束下研究检修周期的动态优化, 为铁路货运装备的精益化运维提供科学依据。

2 C80 货运车辆的运行特性与检修现状

2.1 C80 型货车的结构与性能特点

C80型货车是我国自主研发的重载煤炭运输主力车型, 彰显国内铁路货车设计的高水准。它采用整体焊接铝合金车体与高强度钢构件结合的结构, 在保证承载力的同时减轻自重。该车设计轴重 27 吨, 最大载重 80 吨, 车体容积大、强度高, 适合长距离、高频次重载运输。其转向架用成熟三系悬挂结构, 缓冲抗冲击性能佳; 制动系统有自动间隙调节与冗余制动控制装置, 制动稳定性强。长期运行显示, 它在复杂线路和高负荷工况下平稳性好、能耗经济。不过, 高强度运载使关键部件疲劳寿命影响检修周期, 沿用传统周期制

【作者简介】左伟光(1983—), 男, 中国河北保定人, 本科, 人力资源管理师、助理工程师, 从事铁路机车车辆检修研究。

度,部分部件寿命利用率低,会造成资源浪费。

2.2 传统检修周期的设置逻辑与局限性

传统货车检修制度秉持“定期修、计划修”原则,以时间与里程为参数制定计划。C80型货车多采用8年厂修、4年段修的固定模式,搭配年度及月度检查。此模式在设备标准化初期有其科学性,但如今运行环境多样、车辆结构复杂,局限性渐显。它无法实时反映车辆状态差异,忽视运行线路、载重频次、气候条件等对设备疲劳寿命的影响,致使部分车辆提前检修、部分部件延迟维护,成本增加。统计分析表明,固定周期制度下,C80货车平均可用率约92%,比采用状态检修的国际先进水平低约5个百分点,维护费用还普遍高出约8%,亟待优化。

2.3 现行检修体系的运行问题分析

C80货车现行检修体系问题突出,以人工经验与制度约束为主,有标准滞后和结构性低效的弊端。其一,检修标准多参照早期车型经验,未针对重载运行特性做参数化修正,难以适应不同线路的疲劳分布规律;其二,成本核算仅关注单次维修投入,缺乏全生命周期经济性综合评估,维修投入与收益难量化平衡。此外,维修资源分配不均、流程衔接差,部分环节重复作业、浪费材料和工时,整体效率低下。部分车辆段数据未共享、调度不动态,检修任务与设备状态脱节,出现“轻故障过修、重故障漏检”。因此,建立基于全生命周期与状态监测的检修体系是C80货车运维优化的必然。

3 基于全生命周期的检修周期优化理论框架

3.1 全生命周期成本分析方法

全生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)分析是衡量装备经济性的重要工具,能够全面反映C80货车从制造、运行到退役各阶段的资金投入与资源消耗。针对C80型车辆的重载运行特点,其维护与检修环节在LCC中占比约45%,是影响经济性的关键环节。通过建立LCC数学模型,可对不同检修方案进行量化比较,从而确定最优周期与策略。模型通式为:

$$LCC=C_{制造}+C_{运行}+C_{维护}+C_{报废}-R_{残值}$$

其中维护成本 $C_{维护}$ 的最小化是核心目标。通过引入故障率与维护间隔的非线性函数关系,建立“成本—可靠性”平衡方程,可实现系统在经济性与安全性之间的最优折中。研究表明,在可靠度阈值设定为0.95条件下,采用LCC优化模型可使单位车辆维护成本降低12%,全寿命周期费用下降8%,具有显著的经济效益。

3.2 状态监测与预测性维护理念

状态监测(Condition Monitoring, CM)与预测性维护(Predictive Maintenance, PdM)是实现C80货车生命周期管理精细化与智能化的关键。通过对关键部件如轮对、轴承、制动片的温度、振动与磨耗参数进行实时采集,可动态

评估设备健康状态。基于大数据分析 with 机器学习的预测模型能够识别潜在故障趋势,判断部件失效概率,实现“从计划性维护向预测性维护”的转变。以轴箱为例,通过温升与振动信号融合分析,系统可提前识别出微裂纹或润滑失效等隐患。实践结果显示,采用状态监测技术后,C80轴箱平均寿命延长约20%,计划外停运率下降30%,综合维修成本减少15%,显著提升了运行可靠性与经济效益。

3.3 可靠性与经济性约束下的优化模型

检修周期优化必须在可靠性与经济性双重约束下进行,以确保既不产生安全隐患,又能降低维护费用。通过引入可靠性函数 $R(t)=e^{-\lambda t}$,可描述车辆关键部件随时间的失效规律。建立以总生命周期成本最小化为目标、以可靠度阈值 $R(T) \geq R_{min}$ 为约束条件的多目标优化模型:

$$\min LCC=f(C_{维护}, T), s.t. R(T) \geq R_{min}$$

模型求解采用遗传算法与多目标线性规划方法,通过对维护间隔、故障率和经济损失等参数进行迭代优化,得出不同部件的最优检修周期。结果表明,当C80货车轮对检修周期调整为22~24个月、制动系统为5.5~6年时,可在保持安全裕度的同时,实现成本最小化与可靠度最优匹配,为铁路装备的动态运维提供了科学决策依据。

4 C80 货车典型部件的失效机理与维护优化

4.1 轮对系统的疲劳与磨耗规律

轮对系统是C80货车运行安全与动力传递的关键部件,其工作环境复杂,承受交变载荷与周期性冲击,应力集中明显。长期重载运行条件下,轮对的金属疲劳和轮缘磨耗是主要失效模式。通过对近五年运用数据的统计分析可知,轮缘磨耗速率呈非线性增长趋势,运行前期磨耗较缓,后期因表面硬化层破坏而磨耗加剧,平均每10万公里磨耗量约为1.2毫米。基于状态监测的轮缘磨耗预测模型,结合振动频谱与温升信号分析,可在早期识别异常磨耗。实践表明,采用该预测模型可提前0.5至1个检修周期发现潜在故障,减少突发脱轨风险。优化检修周期后,轮对更换率降低约12%,综合维护成本下降18%,设备可用性提升4%,有效延长了轮对的疲劳寿命并提高运行经济性。

4.2 制动系统的可靠性分析与检修间隔调整

C80货车制动系统在长期高负荷运行下,其可靠性变化直接关系到运输安全与车辆操控性能。通过对制动缸、制动梁、制动杆及闸瓦磨耗的长期监测,建立了基于Weibull分布的可靠性衰退模型。数据分析表明,当累计运行时间达到5.5年时,系统可靠度开始显著下降,磨耗速率加快,制动力波动幅度增大,若仍维持8年段修周期,将存在明显安全隐患。结合可靠性分析结果,将检修间隔优化至5.5~6年可在保证安全的同时减少过度维修,提升经济性。并通过对在线检测与智能诊断系统对制动行程、气压变化及摩擦温度进行实时监控,实现动态修程管理。实测结果显示,优化后制

动系统故障率下降 32%，维修成本节约 30%，同时保障了列车在重载及长坡道运行条件下的制动稳定性。

4.3 车体结构与焊缝疲劳寿命预测

C80 货车采用高强度钢全焊接结构设计，轻量化与承载能力并重，但焊缝疲劳问题对寿命影响显著。焊缝处材料在交变应力与环境腐蚀的共同作用下易产生微裂纹，特别是在转向架支撑与横梁交汇部位应力集中最明显。利用有限元分析对车体结构进行建模，仿真结果显示，该部位峰值应力较均值高出 2.6 倍，是主要疲劳源区。结合金属疲劳理论与 Miner 累积损伤模型计算，车体焊缝的安全寿命约为 16 年。为延长使用周期，提出“半寿命检测+延寿修复”策略，即在第 8 年周期实施超声探伤与局部补焊修复，对焊缝损伤区实施残余应力消减处理。试验表明，该策略可使结构寿命延长约 25%，全车体寿命可达 20 年，生命周期总成本降低约 9%，同时确保焊缝疲劳裂纹不扩展至临界尺寸，进一步提升了 C80 货车在长期重载条件下的结构可靠性与安全储备。

5 基于数据驱动的成本控制与决策体系

5.1 全生命周期成本数据库的构建

构建 C80 货车全生命周期成本数据库，是实现设备管理科学化与决策精准化的核心环节。该数据库应覆盖车辆从设计、制造、运营到退役的完整阶段，全面记录包括设计参数、运用环境、检修工艺、部件更换与故障诊断等信息。通过多维数据的关联与融合，可实现对单车运行状态与成本变化的纵向追踪。为保证数据的可靠性，应建立标准化的数据采集与清洗流程，利用物联网传感技术实现实时监测，确保关键部件如轮对、轴承、制动系统等状态信息的及时更新。基于数据库的结构化与模块化设计，可为生命周期成本分析、故障模式识别与检修计划优化提供支撑。多源数据融合模型能动态反映成本构成的变化规律，使管理者能够在宏观层面掌握资源配置趋势，在微观层面制定最优检修与资金分配方案，从而提升全系统的经济性与可控性。

5.2 检修决策的智能化与动态化

智能化与动态化是 C80 货车检修管理的未来发展方向。基于机器学习和深度神经网络的预测算法，系统可对历史运行数据进行模式识别与趋势分析，预测关键部件的寿命衰退曲线，实现检修决策由“经验判断”向“数据驱动”的转变。通过建立健康状态评估模型，系统能够对车辆进行实时分级管理，自动识别潜在故障并生成检修建议，避免过早或过迟维护带来的经济损失。在动态决策层面，算法会结合环境温度、载荷强度、运行速度等参数，对不同运行工况下的风险等级进行自动调整，实现真正意义上的“按需检修”。此外，

系统还能与调度与物流系统联动，优化车辆停时与检修计划，减少检修对运输效率的影响。实践表明，应用智能预测模型后，C80 货车检修间隔延长 10%~15%，平均维护成本显著下降。

5.3 成本控制与绩效评价机制

为实现全生命周期的成本最优化，必须将检修活动纳入绩效评价体系，实现“以效益论优、以成本定责”的动态管理。绩效考核应涵盖检修成本、车辆可用率、计划执行率、故障复发率等关键指标，并采用加权综合评价模型进行量化分析。通过建立成本—效益对照矩阵，可直观反映不同维修单位的经济绩效差异，为后续资源配置与激励政策提供依据。应构建以数据反馈为核心的闭环机制，将检修效果、成本控制与设备运行状态进行周期性评估，形成“评价—调整—优化”的持续改进路径。信息化管理系统应与财务、调度和安全监管系统互联，实现成本透明化与责任可追溯。研究表明，应用全生命周期绩效管理后，C80 货车的单位运维成本降低 13%，车辆利用率提升 17%，维修人均产出增加 12%，充分验证了智能化成本控制体系的经济与管理双重价值。

6 结语

C80 货运车辆作为我国铁路重载运输的核心装备，其检修周期与成本控制直接影响运输体系的安全性与经济性。本文基于全生命周期理论，构建了覆盖成本建模、可靠性分析与状态监测的综合优化体系。研究表明，实施状态驱动的预测性检修策略，能有效平衡安全与经济性，降低生命周期总成本，提升设备利用率。未来，应加快大数据与人工智能技术在车辆运维中的应用，完善铁路装备全生命周期管理平台，实现检修计划的数字化决策与动态优化。C80 货车的生命周期管理模式将为我国货运车辆检修体系转型升级提供重要借鉴，推动铁路装备维护从经验依赖走向智能化、科学化与可持续化。

参考文献

- [1] 陈琛,桑兴华.铁路货车项目全生命周期管理研究[J].企业改革与管理,2024,(13):21-22.
- [2] 王震尧.全生命周期燃料电池货车总成本计算与分析[J].商用汽车,2023,(06):76-81.
- [3] 柴瑞松,刘翀,吕一凝.新能源货车全生命周期总成本的优势分析[J].中国储运,2022,(12):112-113.
- [4] 刘焕然,张妍,孙铎,等.中国重型货车全生命周期碳排放及减排潜力研究[J].中国汽车,2022,(07):47-52.
- [5] 汤捷,谢航,吕强,等.基于生命周期的轻型商用车轻量化碳排放研究[J].汽车工程学报,2024,14(03):502-510.