

基于 RAMS-FTA-LCC 的车辆轴箱弹簧可靠性分析

廖林林, 邦小华, 邓春林, 周凌昊

(南昌轨道交通集团有限公司运营分公司, 南昌 333000)

摘要:本文针对地铁 B 型车辆轴箱弹簧的可靠性问题,以某线路 12 列车 1 152 个弹簧为研究对象,以 FC1 级芯轴断裂失效率不超过 0.000 1 FPKM 为目标,提出一种集成 RAMS、故障树分析(FTA)与全生命周期成本(LCC)的系统分析方法。通过建立 RAMS 指标模型,识别出 8 个最小割集,确定芯轴设计缺陷及高刚度材料缺陷为高风险因素;LCC 分析表明,橡胶部件是主导失效部件,其分配失效率达 0.006 89 FPKM。芯轴的材料与结构缺陷是导致其失效的关键因素,据此提出基于蠕变量的状态维护策略,在保证可靠性的同时降低维护成本。该方法实现了安全性与经济性的协同优化,适用于轨道交通关键部件及其他复杂工程系统的可靠性设计与成本管控。

关键词:RAMS; FTA; LCC; 地铁车辆; 轴箱弹簧; 可靠性分析

中图分类号:U270.33; TB114.3 **文献标志码:**A **DOI:**10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.02.009

Reliability Analysis of Vehicle Axle Box Spring Based on RAMS-FTA-LCC

LIAO Linlin, BANG Xiaohua, DENG Chunlin, ZHOU Linghao

(Nanchang Rail Transit Group Co., Ltd., Operation Branch, Nanchang 333000, China)

Abstract: This paper addresses the reliability problems of axle box springs in metro B-type vehicles. Taking 1 152 springs from 12 trains on a specific line as the research object, and based on the FC1-level safety target of a core shaft fracture failure rate no more than 0.000 1 FPKM, it proposes a systematic analysis method that integrates RAMS, Fault Tree Analysis (FTA), and Life Cycle Cost (LCC). By establishing a RAMS index model, it identifies eight minimal cut sets and determines core shaft design defects and high-stiffness material defects as high-risk factors. LCC analysis indicates that rubber components are the dominant failure components, with an allocated failure rate of 0.006 89 FPKM. The study results indicate that the core shaft material and structure are the primary factors in the key failure mode. Therefore, the study proposes a condition-based maintenance strategy based on creep for rubber components, which reduces maintenance costs while ensuring core shaft reliability. This method achieves synergistic optimization between safety and economy, serving as a reference for reliability design and cost control of key rail transit components and other complex engineering systems.

Key words: RAMS; FTA; LCC; metro vehicle; axle box spring; reliability analysis

地铁车辆轴箱弹簧作为转向架关键部件,其失效直接影响列车运行安全。某地铁项目采用的 B 型车辆(6 辆编组×12 列)共使用 1 152 个轴箱弹簧。运营数据显示,弹簧失效占该车型转向架故障的 32%。特别是 FC1 级失效(芯轴断裂)可导致列车停车,因此对该失效率有严格的安全目标要求,需不超过 0.000 1 FPKM。

国内外学者已对轴箱弹簧开展了大量研究。荣继刚等^[1]利用有限元分析技术对某型橡胶轴箱弹簧的垂向刚度特性、垂向蠕变量进行了有限元计算,获得了良好的计算结果;周新建等^[2]分析了弹簧所受载荷工况、车轮与轨道状态、簧丝直径等影响一系钢圆弹簧疲劳寿命的因素,提出定期钢轨打磨、提高弹簧刚度和限制超载量等减少一系钢圆弹簧内簧疲劳断

收稿日期:2025-08-26。

第一作者:廖林林(1993—),男,工程师,主要从事车辆技术研究工作。E-mail:1090105780@qq.com。

裂的有效措施;江现昌等^[3]针对基于深度学习的目标检测方法效果不佳的问题,在 YOLOv5 网络的基础上加以改进,有效提升了一系弹簧断裂检测能力,提高了轴箱弹簧的可靠性;冯后东^[4]建立了弹簧有限元模型,从刚度与应力角度验证了模型精度,并结合有限元分析结果和 S-N 曲线对其疲劳寿命进行了预测。

总体而言,国内外学者对弹簧的受力特性与疲劳寿命进行了广泛研究,取得了丰硕的成果,但对轴箱弹簧的可靠性及经济性仍缺乏深入研究。鉴于传统单一分析方法难以协调可靠性设计与经济性优化之间的矛盾,本文提出 RAMS-FTA-LCC 集成方法,通过 RAMS 可靠性指标量化可靠性要求,通过故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)识别关键失效路径,通过全生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)模型评估全周期成本,以期实现安全性与经济性的协同优化。

1 理论基础与集成模型

1.1 RAMS 可靠性指标

RAMS 是可靠性(Reliability)、可用性(Availability)、可维护性(Maintainability)和安全性(Safety)4个单词的英文首字母缩写。其中,可靠性是指产品在规定的规定使用环境与时间范围内完成规定功能的能力;若产品失去该功能,则称之为失效或故障。常用于衡量可靠性的指标包括失效率、平均故障间隔时间及可靠度。应用该理论可有效提升各部件的整体可靠性^[5-7]。

1.2 FTA 方法论

FTA 是一种分析系统故障的逻辑分析方法。其通过树形结构,形象地表达系统故障的各种影响因素及其构成关系,该结构直观明了,是现今应用广泛的故障分析技术之一^[8-9]。该方法首先确定影响最大的系统故障作为顶事件,然后将造成系统故障的原因逐级分解为中间事件,最后把不能或不需分解的基本事件作为底事件,从而构建出一张树状逻辑图,即故障树^[10-11]。

1.3 LCC 分解模型

LCC 是指产品在有效使用期间所发生的与该产品有关的所有成本。对于车辆而言,其 LCC 是指从车辆购置、投入运营直至最终报废的全过程中所发生的一切费用。在整个生命周期中,由运营费用与维护费用构成的使用成本,通常是 LCC 中占比最高的部

分^[12]。车辆 LCC 的具体构成如图 1 所示。

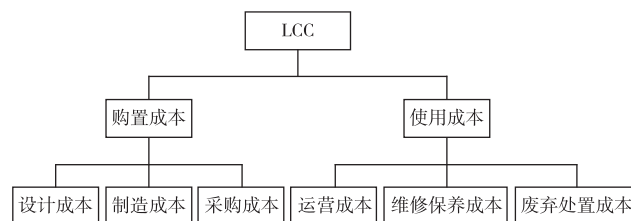


图1 车辆 LCC 构成统计图

1.4 RAMS-FTA-LCC 集成逻辑模型

集成逻辑的核心在于打破传统单一方法论的局限,通过 RAMS 可靠性指标设定系统目标,利用 FTA 识别关键失效路径,再通过 LCC 模型评估不同设计与维护策略的经济性,形成闭环优化。

1) RAMS 指标设定。本步骤的目标是基于系统安全要求和运营需求,明确轴箱弹簧的可靠性指标。该指标为整个分析提供了量化的基准与优化的方向。

2) FTA 系统分析。通过故障树识别导致顶事件(如轴箱弹簧失效)的所有可能路径,定位最小割集,尤其是发生概率高、后果严重的最小割集,以确定关键失效模式和根本原因。FTA 的输出为后续可靠性分配和设计改进提供了精准的靶点。

3) LCC 建模。基于 RAMS 指标和 FTA 识别的失效模式,构建详细的 LCC 模型。该模型可量化不同设计方案、不同维护策略对各项成本(包括预防性维护、纠正性维护、备件成本等)的影响。

4) 协同优化与验证。将 LCC 评估结果反馈至设计阶段和运维阶段,以验证改进后的设计或策略能否兼顾 RAMS 可靠性指标和 LCC 优化目标。集成逻辑模型如图 2 所示。

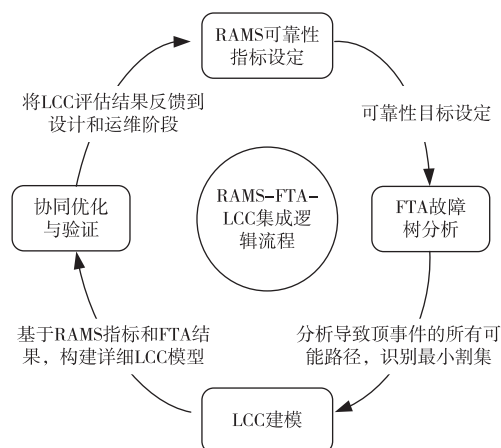


图2 RAMS-FTA-LCC 集成逻辑模型

2 系统分析与故障树建模

2.1 结构功能解析

轴箱弹簧是地铁车辆转向架一系悬挂的核心部件,其主要功能如下:①承载,承受车体及载重传递的垂向静载荷和动载荷;②缓冲减振,减少轨道不平顺引起的振动和冲击,保障运行平稳性和乘坐舒适性;③定位,提供一定的纵向和横向刚度,辅助维持轮对与构架间的相对位置;④回转,提供转向架过曲线所需的部分回转力矩。该弹簧关键设计要求是高疲劳强度,稳定的刚度特性,良好的耐环境老化性能,以及高可靠性。主要失效模式及后果为:刚度失效影响运行平稳性;疲劳断裂直接导致车轮定位失效,引发脱轨风险,属于最高安全等级失效。某地铁轴箱弹簧结构示意图如图 3 所示。

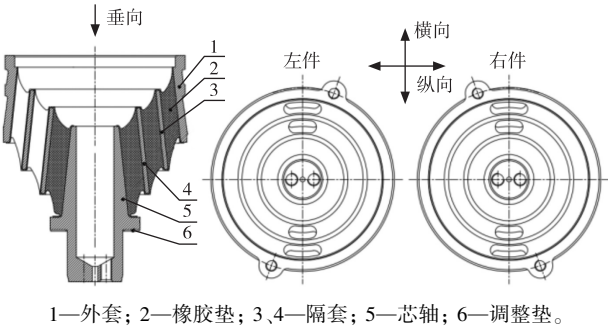


图 3 某地铁轴箱弹簧结构示意图

轴箱弹簧故障功能框图如图 4 所示,图中 λ_1 为外套失效率, λ_2 为隔套 1 失效率, λ_3 为隔套 2 失效率, λ_4 为芯轴失效率, λ_5 为调整垫失效率, λ_6 为橡胶失效率。根据该串联框图,系统的总失效率 $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5 + \lambda_6$ 。



图 4 某地铁轴箱弹簧故障功能框图

2.2 基于 RAMS 可靠性指标等级及目标值

根据厂家提供的维护手册及轴箱弹簧 RAMS 报告,轴箱弹簧导致列车停车的 FC1 级失效率要求 $\leq 0.000\ 1$ FPKM。具体指标等级与目标值见表 1。

表 1 轴箱弹簧 RAMS 指标等级及目标值

失效模式	失效分类	失效率/FPKM
导致列车停车	FC1	$\leq 0.000\ 1$
导致额外的维修	FC2	$\leq 0.004\ 2$
暂时无需处理的事项	FC3	$\leq 0.004\ 6$

各失效等级描述如下:①FC1 级失效影响为列车停车;失效判定依据为芯轴断裂。②FC2 级失效影响为功能丧失,需进行额外维修;失效判定依据为金属裂纹或橡胶断裂。③FC3 级失效影响轻微,可暂不处理;失效现象包括芯轴失效、外套生锈、橡胶轻微裂纹或开胶等。

2.3 故障树建模

将某地铁轴箱弹簧失效作为顶事件,分析所有可能导致产品故障的原因,建立故障树模型,如图 5 所示。

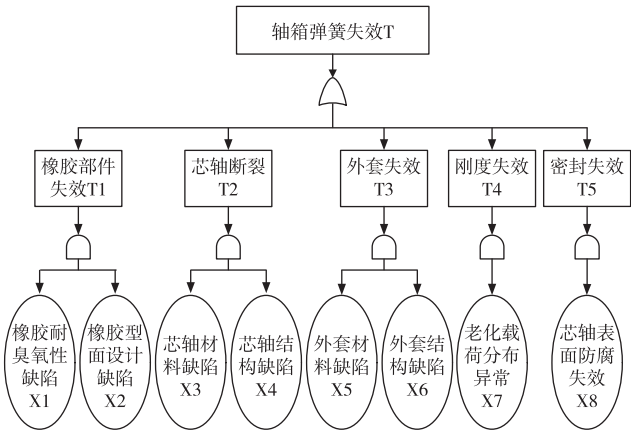


图 5 某地铁轴箱弹簧失效故障树

故障树分析以定性方法为主,通过对图 5 所示的轴箱弹簧故障树结构进行解析,识别出导致顶事件(轴箱弹簧失效故障)的 8 个最小割集,分别对应以下基本事件:X1 橡胶耐臭氧性缺陷、X2 橡胶型面设计缺陷、X3 芯轴材料缺陷、X4 芯轴结构缺陷、X5 外套材料缺陷、X6 外套结构缺陷、X7 老化载荷分布异常和 X8 芯轴表面防腐失效。

从各基本事件对顶事件发生的概率来看,这 8 类事件的发生概率较为接近,其概率重要度无明显差异。然而,若考虑故障后果的严重程度,X3、X4、X7 所代表的芯轴断裂与刚度失效,直接影响轴箱弹簧的核心承载与定位功能,可能引发导致列车停车的 FC1 级严重故障,因此具有较高的严重度重要等级;而 X1、X2、X5、X6、X8 多表现为密封防腐、外套失效和橡胶部件的功能性或渐进性失效,通常不直接威胁弹簧主功能,属于较低层级的失效事件。

基于以上分析,在产品的设计评审与可靠性验证阶段,需系统性地针对这 8 类事件制定预防与改进措施,尤其应加强对芯轴及高刚度部件的材料选型、结构设计及工艺控制,从设计源头杜绝高严重度故障的

发生,确保轴箱弹簧在全生命周期内满足 RAMS 指标要求。

3 RAMS-LCC 综合量化与优化

3.1 RAMS 可靠性指标评估

本文重点围绕可靠性指标展开分析,其他 RAMS 指标(如可用性、可维护性)在实际运维中同样重要,将在后续研究中进一步探讨。

产品的可靠性以失效率为衡量指标。对于各部件的可靠性分配,本文采用评分分配法。该方法是一种常用于系统可靠性工程的可靠性指标分配方法,以定性分析为主,在缺乏部件故障数据时尤为适用。其核心思想是根据一系列影响产品可靠性的因素,对系统的各个组成部分进行评分,再根据评分结果将系统

的整体可靠性指标(失效率)合理地分配至每个部件。

基于系统总失效率目标并预留 10%的安全余量,本次用于分配的总失效率为 0.008 FPKM。评分主要针对产品的重要度、复杂度、成熟度及环境条件四个维度进行,各维度分值范围为 1~10 分,评分标准见表 2 和表 3。各部件评分及失效率分配结果见表 4。

表 2 重要度分值表

分值	重要度评分标准
9~10	引起人员死亡、产品毁坏及重大环境损害
7~8	引起人员的严重伤害、重大经济损失
4~6	引起人员的轻度损害、一定的经济损失
1~3	不足以导致人员伤亡、经济损失或产品损坏

表 3 复杂度、成熟度及环境条件分值表

分值	复杂度评分标准	成熟度评分标准	环境条件评分标准
9~10	结构复杂,零部件多	成熟产品	最恶劣的环境
7~8	结构复杂,零部件较多	成熟的产品,有改进空间	较恶劣的环境中
5~6	结构简单,零部件较多	成熟的类似产品	适中的环境
3~4	结构简单,零部件较少	部分可以借鉴成熟产品	较好的环境
1~2	结构简单,零部件少	新型产品,基本无可借鉴的成熟产品	最好的环境

表 4 轴箱弹簧 RAMS 指标评估与失效率分配

部件	复杂度	成熟度	重要度	环境条件	各部件评分	评分系数	各部件失效率/FPKM
外套	2	3	3	3	54	0.044	0.000 35
隔套 1	1	3	3	3	27	0.022	0.000 18
隔套 2	1	3	3	3	27	0.022	0.000 18
芯轴	2	3	3	3	54	0.044	0.000 35
调整垫	1	2	2	2	8	0.007	0.000 05
橡胶	5	5	7	6	1050	0.861	0.006 89
合计	12	19	21	20	1 220	1.000	0.008

根据系统的失效率统计,计算得到某地铁轴箱弹簧的失效率 $\lambda = 0.000\ 35 + 0.000\ 18 + 0.000\ 18 + 0.000\ 35 + 0.000\ 05 + 0.006\ 89 = 0.008\ \text{FPKM}$,该结果 $\leq 0.008\ 9\ \text{FPKM}$,符合要求。

在构成轴箱弹簧的 6 个零部件中,橡胶部件的失效率(0.006 89 FPKM)远高于其他部件,占总失效率的 86.1%,是系统可靠性的最薄弱环节与关键件。因此,在设计中必须将其作为可靠性提升的重点,优化其材料与结构;在运营维护中,则需建立针对橡胶状态的定期专项检测机制。

3.2 LCC 成本分解

本次研究的轴箱弹簧在正常运营与检修条件下的设计使用寿命为 10 年或 125 万 km(以先到者为准)。基于所建立的 LCC 模型,分析得到的轴箱弹簧成本构成见表 5。其中,制造成本约占全生命周期成本的 50%,纠正性维护成本占比约为 48%。因此,降低 LCC 的重点应集中于两方面:一是通过设计、材料和工艺优化降低制造成本;二是通过提升产品可靠性,从根本上减少所需的纠正性维护及其成本。

表 5 轴箱弹簧 LCC 成本分解表 元

制造成本	附加成本	运营成本	预防性维护成本	纠正性维护成本	全生命周期成本合计
220 000	1 150	3 600	1 440	210 020	436 210

3.3 优化策略

在传统的地铁部件管理中,可靠性分析与维护策略制定通常依赖于经验或单一方法,且设计与运维环节相对独立。这种方法往往导致设计改进缺乏系统性风险指引,可能造成资源浪费;维护策略难以精准匹配部件的实际状态,这易导致过度维护(带来高成本)或维护不足(导致故障风险)。本文提出的 RAMS-FTA-LCC 集成方法,通过系统性量化分析与闭环反馈,有效克服了上述局限。

3.3.1 基于 FTA 的针对性改进优化

区别于传统的经验性设计或试错法优化,本文通过 FTA 系统性地识别出导致 FC1 级顶事件的 8 个最小割集,并明确将芯轴断裂定位为高严重度的关键失效模式。这一关键定位使设计优化具有明确的针对性。因此,建议重点通过优化芯轴与外套结构,以降低其应力集中系数。这种基于 FTA 精准靶向的改进,避免了传统方法的盲目性,能够将有限的研发资源投入到对系统安全影响最大的环节,从设计源头高效地降低高风险失效模式的发生概率。

3.3.2 基于 LCC 与状态监测的维护策略优化

传统的维护策略普遍采用固定的时间或里程周期进行预防性更换,缺乏对部件个体退化差异的考量。本文的 LCC 建模结果清晰地揭示,在传统维护模式下,纠正性维护成本约占总成本的 48%,占比极高。这印证了固定周期策略存在一定的弊端:一方面因更换过早造成备件和人工的浪费,另一方面因未能及时识别潜在故障而导致昂贵的纠正性维修。

为解决此问题,本文提出基于蠕变量变化的状态维护策略。该策略通过定期测量反映弹簧性能退化的轴箱间隙,并设定科学阈值(如超过设计值的 10%即需更换),实现从“计划驱动”到“状态驱动”的按需维护。该方法一方面可在潜在失效发展为功能失效前进行有效干预,防止代价高昂的 FC1 级故障发生;另一方面,通过避免不必要的定期更换,减少备件浪费和人工成本。

4 结 论

1) 本文通过对轴箱弹簧进行 FTA 分析,深入揭示了地铁车辆轴箱弹簧的失效逻辑,确认芯轴材料和结构是导致最严重后果(FC1 级失效)的关键模式之一。

2) 本文提出的基于蠕变量的状态维护策略,相较于传统的定期更换,有望将占总成本 48%的纠正性维护费用显著降低,实现可靠性与经济性的双赢。

3) 本文构建的 RAMS-FTA-LCC 集成方法具有推广价值。该方法已成功应用于地铁车辆轴箱弹簧系统,并可推广至其他轨道交通关键部件,乃至更广泛的复杂工程系统,为这些系统的可靠性设计与成本优化提供支持。

参考文献:

[1] 荣继刚,黄友剑,张亚新,等. 橡胶轴箱弹簧垂向刚度及蠕变特性的研究[J]. 特种橡胶制品,2009,30(2):60-63.

[2] 周新建,冯后东,张松兴. 实测工况下快速地铁车辆一系弹簧疲劳寿命分析[J]. 机械设计,2023,40(10):24-32.

[3] 江现昌,邹庆春,李翔泽,等. 引入卷积块注意力模块的 YOLOv5 网络在地铁车辆一系弹簧断裂检测中的应用[J]. 铁道技术监督,2023,51(10):29-33.

[4] 冯后东. 快速地铁车辆一系钢弹簧疲劳可靠性优化设计及可靠性增长技术[D]. 南昌:华东交通大学,2022.

[5] 宗志祥. 基于指数分布和 RAMS 的地铁列车车门可靠性研究[J]. 上海工程技术大学学报,2021,35(3):248-252.

[6] 戴杰,廖玻. 浅析基于 RAMS 的轨道交通车辆状态评估方法[J]. 中国设备工程,2024(7):272-273.

[7] 刘俊洁,徐永能,马文军,等. 基于 RAMS 的轨道交通转向架关键部件状态评估[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(9):83-89.

[8] 王萍,杨保年. 基于故障树的地铁车辆客室自动门系统可靠性分析[J]. 南京工业职业技术学院学报,2013,13(2):47-49.

[9] 李锋,沈金焕. 广州地铁 A5 型车车门系统故障树分析[J]. 轨道交通装备与技术,2021(3):38-41.

[10] 孙瑞. 故障树分析法在城市轨道交通车辆故障分析中的应用[J]. 科学大众,2021(6):220-221.

[11] 徐晗. 基于城轨牵引控制系统安全功能的故障树量化分析[J]. 铁道机车车辆,2025,45(2):139-146.

[12] 周颖. 城市轨道交通车辆产品使用寿命期内预计的维护成本分析[J]. 科技展望,2014(23):198.