

# 铁路货车车辆滚动轴承的故障诊断及防范措施分析

吴尚禹

中国铁路呼和浩特局集团有限公司包头西车辆段 内蒙古 包头 014000

**摘要:** 铁路货车车辆滚动轴承是保障列车安全运行的关键部件。其故障类型多样,包括疲劳剥落、磨损、裂纹与断裂、保持架损坏等,成因涉及材料缺陷、润滑不良、装配不当及运行环境等。故障诊断需结合温度、振动、油液分析及智能诊断技术,实现精准识别。防范措施包括优化设计与制造工艺、严格装配与维护标准、部署在线监测预警系统、优化维修策略及加强多部门协作,以提升轴承可靠性,确保行车安全。

**关键词:** 铁路货车车辆; 滚动轴承; 故障诊断; 防范措施

引言: 铁路货车作为物流运输的核心工具,其运行安全与效率直接关系到国家经济命脉。滚动轴承作为货车走行部的关键部件,长期承受高速、重载及复杂工况,故障率居高不下,易引发轴温异常、车辆脱轨等严重事故。传统诊断方法依赖人工巡检与单一参数监测,难以实现故障早期预警与精准定位。本文系统分析轴承故障机理,综述智能诊断技术进展,并提出全生命周期防范策略,为提升铁路货车运行可靠性提供理论支撑与实践指导。

## 1 铁路货车车辆滚动轴承基本结构与故障机理

### 1.1 滚动轴承结构与工作原理

#### 1.1.1 结构组成

主要包含内圈、外圈、滚动体和保持架。内圈与轴颈过盈配合,随轴同步转动;外圈与轴承座过渡配合,通常固定不动;滚动体(多为圆柱或圆锥状)介于内、外圈滚道间,实现滚动摩擦;保持架均匀分隔滚动体,避免其相互碰撞。

#### 1.1.2 工作原理与受力分析

工作时,内圈随轴转动,带动滚动体在滚道内滚动,将轴的径向和轴向载荷传递给外圈。受力上,内圈承受滚动体施加的径向压力和摩擦力,外圈承受滚动体传递的载荷及轴承座的反作用力,滚动体受循环接触应力,保持架则受滚动体的冲击力和摩擦力。

### 1.2 常见故障类型及成因

#### 1.2.1 疲劳剥落

轴承长期承受交变接触应力,表面金属因疲劳产生微裂纹,裂纹扩展后导致表层材料脱落,形成剥落坑,多发生在滚道和滚动体表面。

#### 1.2.2 磨损

润滑油脂不足、变质或杂质侵入,使滚动体与滚道间润滑失效,产生滑动摩擦,导致零件尺寸精度下降、表面粗糙度增大,严重时引发咬合。

#### 1.2.3 裂纹与断裂

轴承装配时过载、冲击载荷作用,或制造过程中存在夹渣、气孔等缺陷,在应力集中处产生裂纹,裂纹扩展后造成零件断裂,常见于内圈、外圈或滚动体。

#### 1.2.4 保持架损坏

轴承振动过大、安装同轴度偏差,或滚动体卡死,导致保持架受力不均,出现变形、断裂或磨损,影响滚动体正常运转。

### 1.3 故障发展过程

#### 1.3.1 早期微缺陷

轴承在制造、安装或初期运转中,表面产生微小裂纹、划痕或磨损,此时故障特征不明显,设备运行基本正常,仅通过精密检测可发现异常。

#### 1.3.2 中期扩展

微缺陷在载荷、振动作用下逐渐扩展,剥落面积增大、裂纹加深,轴承运转噪音、温度升高,振动幅值增加,故障特征逐渐显现,设备性能开始下降。

#### 1.3.3 晚期灾难性失效

故障进一步恶化,剥落、裂纹严重,或保持架、滚动体断裂,轴承无法正常运转,可能导致轴颈磨损、轴承座损坏,甚至引发列车停运、脱轨等严重事故,需紧急维修更换。

## 2 铁路货车车辆滚动轴承故障诊断技术

### 2.1 传统诊断方法

#### 2.1.1 温度监测法

通过红外测温仪非接触式检测轴承外圈表面温度,或在轴承座内置温度传感器实时采集数据。正常工况下轴承温升稳定,当出现磨损、润滑失效等故障时,摩擦加剧导致温度异常升高,通常温升超过40℃需警惕故障风险,该方法操作简便、成本低,但对早期故障敏感度较低,易受环境温度干扰。

### 2.1.2 振动分析法

在轴承座关键位置安装加速度传感器，采集径向或轴向振动信号，通过频谱分析仪将时域信号转换为频域信号，分析特征频率是否异常。例如轴承外圈故障对应外圈特征频率（BPFO），内圈故障对应内圈特征频率（BPFI），该方法能有效识别疲劳剥落、裂纹等故障，是目前应用最广泛的传统方法，但需专业人员解读频谱数据，对传感器安装位置要求较高<sup>[1]</sup>。

### 2.1.3 油液分析法

分为铁谱分析和光谱分析两类。铁谱分析通过磁性探头捕捉润滑油中的金属颗粒，观察颗粒形态、尺寸判断故障类型（如磨损产生细小微粒，剥落产生块状颗粒）；光谱分析利用原子发射光谱检测油中金属元素含量，当含量骤增时提示轴承零件过度磨损。该方法可监测轴承内部磨损状态，但需定期取样，检测周期较长，难以实时诊断。

## 2.2 智能诊断技术

### 2.2.1 声发射检测

利用声发射传感器捕捉轴承运行中裂纹扩展、金属摩擦产生的弹性波信号，通过信号放大、滤波处理，提取故障特征。相较于振动分析，其对早期微裂纹更敏感，可在故障萌芽阶段预警，尤其适用于低速、重载工况下的轴承诊断，但易受列车运行噪音、环境干扰，需结合降噪算法提升准确性。

### 2.2.2 机器学习应用

基于SVM（支持向量机）构建故障分类模型，通过训练样本优化分类超平面，实现对正常、疲劳、磨损等故障模式的精准识别，适用于小样本数据场景；CNN（卷积神经网络）可将振动信号转换为二维频谱图像，自动提取深层故障特征，无需人工筛选特征，大幅提升诊断效率，目前已在轴承故障智能诊断中广泛应用<sup>[2]</sup>。

### 2.2.3 多传感器信息融合

整合温度、振动、声学等多源传感器数据，通过数据层融合（如同步采集信号）、特征层融合（如提取多维度特征）、决策层融合（如综合判断故障类型），弥补单一传感器诊断局限性，使诊断准确率提升15%-20%，尤其适用于复杂工况下的轴承故障诊断。

## 2.3 典型故障特征提取

### 2.3.1 时域特征

均方根值（RMS）反映振动信号能量大小，故障发展时RMS值显著增大；峰值因子（CrestFactor）为峰值与RMS值的比值，早期故障阶段峰值因子变化更敏感，可作为故障早期预警指标，两者结合能有效判断故障发展

阶段。

### 2.3.2 频域特征

计算轴承外圈故障频率（BPFO）、内圈故障频率（BPFI）、滚动体故障频率（BSF）等特征频率，若频域图中对应频率处出现明显峰值，可判定对应部件故障。例如BPFO计算公式为： $BPFO = 0.5 \times Z \times f \times (1 - d/D \times \cos\alpha)$ （Z为滚动体数量，f为轴转速，d为滚动体直径，D为轴承节圆直径， $\alpha$ 为接触角），通过精准计算实现故障定位。

### 2.3.3 时频分析

针对轴承故障信号非平稳特性，采用短时傅里叶变换（STFT）将信号分解到时间-频率二维平面，通过滑动时间窗捕捉信号频率随时间的变化规律，清晰呈现故障发展过程中频率特征的动态变化，解决传统频域分析无法处理非平稳信号的问题，适用于冲击性故障的特征提取。

## 3 铁路货车车辆滚动轴承故障防范措施

### 3.1 设计与制造阶段

#### 3.1.1 优化材料选择与热处理工艺

优先选用高碳铬轴承钢（如GCr15SiMn），其含铬量达1.4%-1.65%，经淬火+低温回火处理后，硬度可达HRC60-64，接触疲劳强度提升20%以上，能有效抵抗交变载荷引发的疲劳剥落。针对重载、高频振动工况，可采用渗碳轴承钢（如G20CrNi2MoA），通过表面渗碳处理形成硬度梯度，表层硬度HRC58-62，心部硬度HRC30-35，兼顾耐磨性与韧性，减少裂纹产生。同时，优化热处理参数，控制奥氏体化温度在830-860℃，保温时间1.5-2h，避免晶粒粗大导致材料韧性下降，从源头降低制造缺陷引发的故障风险。

#### 3.1.2 提升加工精度，减少表面缺陷

采用超精密磨削技术加工轴承滚道和滚动体，控制滚道圆度误差 $\leq 0.5\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 $Ra \leq 0.02\mu\text{m}$ ，避免因表面凹凸不平导致局部应力集中。内圈、外圈的基准端面与内孔轴线垂直度误差需 $\leq 0.005\text{mm/m}$ ，确保装配时同轴度达标，减少运转时的附加力矩。加工过程中引入在线检测系统，通过激光测径仪实时监测滚动体直径偏差，将尺寸公差控制在 $\pm 0.002\text{mm}$ 内，杜绝因尺寸不一致导致的受力不均。此外，对零件表面进行喷丸强化处理，覆盖率达100%，表面残余压应力提升至-600~-800MPa，抑制微裂纹萌生与扩展，延长轴承疲劳寿命<sup>[3]</sup>。

### 3.2 安装与维护阶段

#### 3.2.1 严格把控装配间隙与预紧力

根据轴承型号和工作载荷，确定合理的径向游隙

(如NU2220型轴承径向游隙控制在0.015-0.025mm),装配时采用压装法,通过液压机施加均匀压力(压力值根据轴承尺寸设定,通常为5-15kN),避免敲击安装导致轴承变形。对于圆锥滚子轴承,需精确控制预紧力,采用力矩扳手拧紧锁紧螺母,预紧力矩误差 $\leq \pm 5\%$ ,确保轴承内部滚动体与滚道紧密接触,减少运转时的冲击振动。安装后通过百分表检测轴承径向跳动和端面跳动,径向跳动误差 $\leq 0.01\text{mm}$ ,端面跳动误差 $\leq 0.005\text{mm}$ ,确保装配精度符合要求。

### 3.2.2 定期润滑与清洁,防止污染物侵入

选用高温稳定性好、抗磨性强的锂基润滑脂(如2号极压锂基润滑脂),滴点 $\geq 180^\circ\text{C}$ ,在 $-20\sim 120^\circ\text{C}$ 温度范围内保持良好润滑性能。根据轴承工作转速和工况,制定润滑周期(如每运行5000km或3个月补充一次润滑脂,每运行20000km更换一次),每次补充量为轴承内部空间的1/3-1/2,避免过多润滑脂导致摩擦生热或过少润滑脂引发干摩擦。润滑前需清洁轴承座、注油孔,采用过滤精度 $\geq 10\mu\text{m}$ 的滤油装置过滤润滑脂,防止灰尘、金属碎屑等污染物混入。同时,定期检查密封件(如双唇密封圈)的密封性,发现老化、破损及时更换,避免雨水、粉尘侵入轴承内部。

### 3.3 在线监测与预警系统

#### 3.3.1 部署物联网传感器实现实时状态监测

在轴承座关键位置安装多类型物联网传感器,包括:①红外温度传感器,采样频率1Hz,测量范围 $-40\sim 200^\circ\text{C}$ ,精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ,实时监测轴承表面温度;②三轴加速度传感器,采样频率2kHz,测量范围 $\pm 10\text{g}$ ,捕捉径向、轴向振动信号;③油液品质传感器,内置介电常数检测模块,实时监测润滑油粘度、水分含量变化。传感器通过LoRa无线通信技术将数据传输至列车车载终端,再经5G网络上传至云端监测平台,实现轴承状态24小时不间断监测,数据传输延迟 $\leq 100\text{ms}$ ,确保异常信息及时反馈。

3.3.2 建立阈值报警机制与健康评估模型:基于历史故障数据和轴承额定工况参数,设定多维度报警阈值,如温度阈值(正常工作温度 $\leq 80^\circ\text{C}$ ,温升超 $40^\circ\text{C}$ 触发一级报警,超 $60^\circ\text{C}$ 触发二级报警)、振动阈值(均方根值 $\geq 5\text{m/s}^2$ 触发报警)、油液品质阈值(水分含量 $\geq 0.1\%$ 触发报警)。当监测数据超出阈值时,系统通过声光报警、短信通知等方式提醒运维人员。同时,构建轴承健康评估模型,采用层次分析法(AHP)结合模糊综合评价,从温度、振动、油液、运行时间四个维度,将轴承健康状态划分为“优(90-100分)、良(70-89分)、中

(50-69分)、差( $< 50$ 分)”四个等级,实时生成健康报告,为运维决策提供数据支撑<sup>[4]</sup>。

### 3.4 维修策略优化

#### 3.4.1 基于状态的维修(CBM)替代定期检修

摒弃传统“到点必修”的定期检修模式,根据在线监测系统获取的轴承健康状态数据,制定个性化维修计划。当轴承健康等级降至“中”时,安排计划性维修,检查滚道、滚动体状态,更换老化密封件和润滑脂;当健康等级降至“差”时,立即停机更换轴承,避免故障恶化。相较于定期检修,CBM可减少30%-50%的不必要维修作业,降低维修成本,同时延长轴承使用寿命15%-20%,提升列车运行可靠性。

#### 3.4.2 故障库与专家系统的应用

建立铁路货车轴承故障数据库,收录近10年的故障案例,包含故障类型(疲劳剥落、磨损等)、故障特征(温度、振动频谱数据)、成因分析、处理措施及预防建议,数据量达5000+条,并定期更新新案例。基于故障库开发专家系统,采用规则推理与案例推理相结合的方式,当监测系统发现异常时,专家系统自动匹配故障库中的相似案例,输出故障原因概率(如“疲劳剥落概率85%,磨损概率10%,其他5%”)及对应的处理方案,辅助运维人员快速决策。同时,专家系统具备自学习功能,通过积累新的故障处理经验,不断优化推理算法,故障诊断准确率可提升至90%以上,大幅缩短故障排查时间,减少列车停运损失。

### 结束语

铁路货车滚动轴承的故障诊断与防范是保障运输安全、提升运营效率的关键环节。通过深入剖析故障机理,结合智能诊断技术(如多传感器融合、机器学习)实现早期预警与精准定位,并构建全生命周期防范体系(涵盖设计优化、装配规范、在线监测及智能维修),可显著降低故障率,延长轴承寿命。未来需持续推动技术创新与标准完善,强化数据驱动的运维决策,为铁路货运高质量发展提供坚实保障。

### 参考文献

- [1]王毅.铁路货车车辆滚动轴承运用中的故障及解决方法探讨[J].模具制造,2024,24(02):241-243.
- [2]范志强.铁路货车车辆滚动轴承运用中的故障及解决方法[J].现代工业经济和信息化,2021,11(01):119-120.
- [3]冯兆军.铁路货车车辆滚动轴承的故障诊断及防范措施分析[J].科学技术创新,2021,(32):32-33.
- [4]王海山.铁路货车车辆滚动轴承运用中的故障分析及改进措施[J].民营科技,2020,(12):141-143.