轨道列车轴箱轴承故障诊断研究综述

李 强

(1. 重庆交通大学 信息科学与工程学院，重庆 400074)

摘要：轨道交通是国家经济和社会发展的重要基础设施，对于推动区域经济一体化、提升公共交通服务质量以及促进绿色发展具有重要作用。随着我国铁路运营规模的不断扩大，确保轨道列车在复杂环境中长期安全、高效运行成为铁路行业面临的关键挑战。轴箱轴承作为轨道列车转向架中的核心部件，承担着承载、支撑和运动转换的重要功能，其性能状态直接影响列车的运行安全。本文综述了轴箱轴承故障的特征与类型，回顾了故障诊断方法的研究现状，并对未来技术的发展方向进行了展望。通过综合分析，本文旨在为轴箱轴承的故障诊断与健康管理提供理论依据和技术支持，以降低维护成本并提高列车运行的可靠性。

关 键 词：轴箱轴承；故障诊断；振动特征；信号处理；

Review of Fault Diagnosis in Railway Train Axle-Box Bearing

LI Qiang1

(1. School of Information Science & Engineering，Chongqing Jiaotong University，Chongqing 400074，P. R. China)

**Abstract：**Rail transit is a crucial infrastructure for the economic and social development of a nation, playing a significant role in promoting regional economic integration, enhancing the quality of public transportation services, and fostering green development. With the continuous expansion of railway operations in China, ensuring the safe and efficient operation of trains in complex environments has become a critical challenge for the railway industry. The axle-box bearing, as a core component of the train bogie, undertakes vital functions such as load-bearing, support, and motion conversion, and its performance directly affects the operational safety of the train. This paper reviews the characteristics and types of axle-box bearing failures, surveys the current state of research on fault diagnosis methods, and discusses the future direction of technological development. Through comprehensive analysis, this paper aims to provide a theoretical basis and technical support for the fault diagnosis and health management of axle-box bearings, in order to reduce maintenance costs and enhance the reliability of train operation.

**Key words**：axle-box bearing；fault diagnosis；vibration characteristics；signal processing

1 引言

轨道交通作为国家经济和社会发展的重要基础设施，其在促进区域经济一体化、提升公共交通服务质量和推动绿色发展等方面发挥着至关重要的作用。随着我国铁路运营规模的持续扩大，如何确保大量轨道列车在复杂环境中长期安全、高效地运行，已成为铁路行业亟待解决的重要问题。

在铁路系统中，轴箱是安装在轴颈上的关键部件，它连接着轮对和转向架或二轴车的车体。轴箱的主要功能是将车辆的重量和载荷传递给轮对，同时为轴颈提供润滑，减少摩擦力，从而降低列车运行时的阻力。轴箱轴承是轨道列车转向架中的核心旋转部件，类似于列车的“脚踝”，负责承载、支撑以及运动转换等至关重要的功能[1]。根据所使用的轴承类型，轴箱装置可以分为两大类：滑动轴承轴箱装置和滚动轴承轴箱装置。在早期，铁路机车和车辆普遍使用滑动轴承轴箱装置，但自20世纪初以来，滚动轴承轴箱装置开始被试用，并逐渐成为主流，取代了滑动轴承轴箱装置。在中国，所有的铁路客车以及柴油和电力机车都已经采用了滚动轴承轴箱装置，而在货车中，这种装置的使用也在逐步增加。轴箱及双列圆锥滚动轴承如图1所示，这种轴承由内圈、外圈、滚子和保持架组成，用于承受径向和/或轴向负荷。



**图1 轴箱及双列圆锥滚动轴承**

**Fig.1 Axle-box and double row tapered roller bearing**

在列车运行过程中，轴箱轴承会因工况的频繁变化和轨道的不平整而遭受磨损、疲劳甚至剥落，这直接影响了轴承的性能和寿命。据统计，机械设备故障的30%由滚动轴承故障所引起[2]，因此，科学地进行轴箱轴承的维护，确保其高效运行并降低维护成本，是铁路运输领域面临的关键挑战。本文将首先总结轴箱轴承故障的特征和类型，然后回顾国内外在故障诊断方法上的研究现状，最后展望轴箱轴承故障诊断与预测技术的未来发展趋势。

2 轴箱轴承故障的类型与振动特征

2.1 轴箱轴承故障的常见类型

滚动轴承的故障诊断主要分为两大类：定性诊断和定量诊断。定性诊断旨在识别轴承是否发生故障，并确定故障具体发生的位置（如内圈、外圈或滚动体等）；定量诊断则侧重于评估轴承故障的规模以及损伤部位的具体程度[3]。轴箱轴承的故障类型较为多样，主要包括以下几种：

1） 疲劳剥落：由于长期的循环载荷作用，轴承元件表面或次表面产生疲劳裂纹，最终导致材料剥落，这是轴箱轴承最主要的故障形式之一。

2） 擦伤磨损：由于润滑不良或过载，轴承元件表面产生相对滑动，导致擦伤磨损。

3） 疲劳裂纹：轴承元件在高应力集中区域产生疲劳裂纹，可能进一步扩展导致断裂。

4） 电蚀：由于电流通过轴承，产生电化学作用，导致材料损失。

2.2 故障的振动特征

2.1节介绍的几种常见故障都将对轴承运行状态产生影响，大量学者针对故障状态下的运行振动特征进行了动力学建模及特征分析，Petersen等人[4]构建了双列滚动轴承的动力学模型，深入探究了在轨道存在不同深度和长度缺陷时轴承的准静态载荷分布以及刚度变化的规律。他们的研究显示，当滚动体通过缺陷区域，内圈与滚动体间的接触力会经历重新分配，导致滚动体在加载方向的刚度降低，在卸载方向的刚度升高。此外，他们还分析了滚动体通过缺陷时静载荷力的变化情况，发现该方法得到的时频响应表现出明显的周期性和规律性特点，因此可以通过故障特征频率来进行故障诊断。Upadhyay等人[5]构建了一个非线性动力学模型，旨在探究滚动体直径变化和数量变化对高速旋转轴产生的非线性振动效应。在模型构建过程中，考虑到滚动体与内外圈之间的接触刚度具有非线性特性，并纳入了阻尼效应。通过应用Newmark-β数值方法来求解该动力学模型，研究结果揭示了随着滚动体数量的增加，系统的整体刚度得到提升，这有助于降低通过频率（Ball Passing Frequency, BPF）的影响。Ahmadi等人[6]构建了一个非线性动力学模型，专门用于模拟故障轴承的行为，并深入分析了当轴承出现线剥落故障时，滚动体与其接触所产生的振动特性。在模型的构建过程中，特别纳入了滚动元件的有限元尺寸，这一改进显著提高了模型对于故障振动响应预测的准确性。

基于以上分析，通过传感器采集轴承故障状态运行时的振动信号，经过一系列故障诊断方法处理后可实现故障的分类识别。

3 故障诊断方法

3.1 传统方法

在人工智能尚未普及之前，传统的故障诊断方法主要依赖信号处理。通常情况下，故障诊断的核心步骤包括信号提取、特征提取以及故障识别。从复杂多变的信号中提炼出有效的故障特征是开展故障诊断的关键条件。正如前文所述，当轴承出现故障时，其振动信号会呈现出周期性的冲击特性，但这些特征常常受到背景中轮轨噪声的干扰。因此，需借助信号处理技术来完成特征提取与故障识别。常见的信号处理方法主要包括基于带通滤波的技术和基于信号分解的技术。

基于带通滤波的共振解调技术在轴箱轴承故障诊断中得到了广泛应用，其关键在于准确选择包含故障特征的共振频率带，并通过构建带通滤波器进行特征提取。为此，许多研究者致力于优化共振频带的选择。其中Antoni提出的谱峭度方法[7]为该领域发展做出了巨大贡献。基于此方法，Lei等人[8] 发展了结合小波包分解的谱峭度方法，并通过实验验证了小波滤波器能够更有效地捕捉轴箱轴承故障的冲击特性，利用内积原理提升了故障诊断的效果。Yi等人[9]则进一步提出了一种基于广义分解算子的谱峭度方法，旨在提高在复杂干扰环境下识别最优共振频带的准确性。

针对解调频带划分和评价指标的问题，Liu等人[10]提出了一种基于尺度空间表征和相关峭度的快速滤波方法，有效解决了谱峭度方法在复合故障诊断上的不足。Cheng等人[11]则基于解卷积理论设计了最优滤波器，并利用粒子群优化和广义球面坐标变换自动匹配轴箱轴承故障冲击与滤波器系数，有效降低了噪声干扰，并增强了故障特征的提取效果。Yang等人[12] 针对复杂振动干扰下共振频带的自适应选择问题，提出了一种结合冲击性与循环平稳性的多目标故障特征提取方法，优化了轴箱轴承的早期故障诊断能力。

基于信号分解的方法包括经验模态分解（Empirical Mode Decomposition，EMD）、傅里叶变换、小波变换等基本算法。为了满足故障诊断领域的需求，众多研究者进行了大量相关研究，

3.2 基于机器学习的故障诊断

随着人工智能的发展，机器学习也逐渐被广泛应用于各种领域，

3.3 基于深度学习的故障诊断

法。

4 结论

。

参考文献(References)：

1. 顾晓辉，杨绍普，刘文朋，等．高速列车轴箱轴承健康监测与故障诊断研究综述[J]．力学学报，2022，54(07)：1780-1796．

GU Xiaohui, YANG Shaopu, LIU Wenpeng, et al. Review of Health Monitoring and Fault Diagnosis of Axle-Box Bearing of High-Speed Train[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(07): 1780-1796.

1. 任勇．变转速旋转机械关键零部件故障诊断研究[D]．徐州：中国矿业大学，2019．

REN Yong. *Fault Diagnosis for Key Components of Rotating Machinery under Varying Speeds*[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.

1. 王国彪，何正嘉，陈雪峰，等．机械故障诊断基础研究 “何去何从”[J]．机械工程学报，2013，49(1) : 63-72．

WANG Guobiao, HE Zhengjia, CHEN Xuefeng, et al. Basic Research on Machinery Fault Diagnosis—What is the Prescription[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(1): 63-72.

1. PETERSEN D, HOWARD C, SAWALHI N, et al. Analysis of bearing stiffness variations，contact forces and vibrations in radially loaded double row rolling element bearings with raceway defects[J]. *Mechanical systems and signal processing*, 2015, 50(51): 139-160．
2. UPADHYAY S H, JAIN S C, HARSHA S P. Non-linear vibration signature analysis of a high-speed rotating shaft due to ball size variations and varying number of balls[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 2009, 223(2): 83-105.
3. MOAZEN A A, PETERSEN D, HOWARD C. A nonlinear dynamic vibration model of defective bearings - The importance of modelling the finite size of rolling elements[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 52(53): 309-326.
4. Antoni J. Fast computation of the kurtogram for the detection of transient faults[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21(1): 108-124.
5. Lei Y, Lin J, He Z, et al. Application of an improved kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2011, 25(5): 1738-1749.
6. Yi C, Li Y, Huo X, et al. A promising new tool for fault diagnosis of railway wheelset bearings: SSO-based Kurtogram[C]. *ISA Transactions*, 2021, in press.
7. Liu Z, Yang S, Liu Y, et al. Adaptive correlated Kurtogram and its applications in wheelset-bearing system fault diagnosis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 154: 107511.
8. Cheng Y, Zhou N, Zhang W, et al. Application of an improved minimum entropy deconvolution method for railway rolling element bearing fault diagnosis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 425: 53-69.