

• 机械电子工程 •



动车组轴承及其可靠性研究进展

黄洪钟^{1,2*}, 蔡吴斌^{1,2}, 杨圆鉴³, 周宏明⁴, 邓智铭^{1,2}, 黄土地^{1,2}

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731; 2. 电子科技大学系统可靠性与安全性研究中心 成都 611731;
3. 重庆科技学院安全工程学院 重庆 沙坪坝区 401331; 4. 温州大学机电工程学院 浙江 温州 325035)

【摘要】滚动轴承是动车组列车的关键基础零部件,我国动车组高速、长时间持续运行的特点,以及多变的运行环境,使得动车组轴承的工作环境及其内部受力状态较一般轴承更为复杂,这对轴承的设计制造及可靠性提出了更高的要求。为实现我国高速铁路核心技术完全自主化,近年来针对动车组轴承的研究众多。该文首先介绍了动车组轴承的设计制造与工艺,阐述了动车组轴承在服役过程中的典型失效模式、机理及其影响,随后归纳了动车组轴承故障诊断方法与技术,并对轴承可靠性建模与寿命评估方法的研究现状进行论述,最后简要阐述了动车组轴承的可靠性试验研究。通过对动车组轴承及其可靠性研究进展的总结,可为我国轴承的自主设计理论及制造技术提供参考。

关键词 动车组轴承; 失效分析; 故障诊断; 寿命评估; 可靠性

中图分类号 TH133 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2022216

A Review of Research on Bearing and Its Reliability for EMU Trains

HUANG Hongzhong^{1,2*}, CAI Wubin^{1,2}, YANG Yuanjian³, ZHOU Hongming⁴,
DENG Zhiming^{1,2}, and HUANG Tudi^{1,2}

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;
2. Center for System Reliability and Safety, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;
3. School of Safety Engineering, Chongqing University of Science and Technology Shapingba Chongqing 401331;
4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wenzhou University Wenzhou Zhejiang 325035)

Abstract Rolling bearing is regarded as the key component of high-speed trains. The characteristics of high-speed, long-term and continuous operation of China's Electric Multiple Units (EMUs), as well as the variable operating environment, make the working environment and internal stress state of EMUs' bearing more complex than those of general bearing, which puts forward higher requirements for the design, manufacture and reliability of bearing. To realize the localization of China's high-speed railway core technology, a number of researches were carried out on the EMUs' bearing in recent years. This paper firstly introduces the design and manufacturing technology of the EMUs' bearing, and discusses the typical in-service failure modes of the EMUs' bearing, as well as the failure mechanisms and effects. Consequently, the fault diagnosis methods of the EMUs' bearing are classified and summarized, and the reliability modeling and life evaluation methods of the EMUs' bearing are reviewed. Finally, the reliability test of the EMUs' bearing is briefly described. This paper summarizes the research of bearing and its reliability for EMU trains, which can provide a reference for the design and manufacturing technology of the bearing of China's high-speed EMUs.

Key words EMUs' bearing; failure analysis; fault diagnosis; life evaluation; reliability

高速铁路是铁路现代化的重要标志,我国采取引进-吸收-消化-再创新的研制思路,在十几年间建造完成了世界上里程最长的高速铁路网络,截止 2021 年,我国高铁线路总长突破 4 万公里。在动车组研发方面,保有量达到 4 000 标准组以上,

形成了具有自主知识产权的复兴号系列动车组。然而,目前高速动车组仍有部分关键技术被国外垄断,其中,滚动轴承是决定动车组健康状态与寿命的关键部件,却长期依赖进口,动车组轴承市场主要被德国 FAG、瑞典 SKF 和日本 NTN 等国外企

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2023-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(52272376); 牵引动力国家重点实验室开放基金(TPL2110)

作者简介: 黄洪钟(1963-),男,博士,教授,主要从事可靠性、设计优化设计、状态监测、人工智能与机器人技术等方面的研究。

*通信作者: 黄洪钟, E-mail: hzhuang@uestc.edu.cn

业把持,是一个典型的“卡脖子”难题。

我国幅员辽阔,高铁线路跨度大,动车组长大交路、长时间、高速、持续运行,同时还会面临低温、环境腐蚀、风沙侵害等恶劣运行环境,这使得动车组轴承系统的服役环境异常复杂,由此导致动车组轴承(包括轴箱轴承、牵引电机轴承和齿轮箱轴承)的失效情况严重,其可靠性面临严峻考验,给动车组轴承的设计制造带来了挑战。因此,研究动车组轴承的设计制造及其在服役过程中的可靠性问题具有十分重要的意义。本文总结了近年来关于动车组轴承设计制造及其可靠性的相关研究成果,从动车组轴承设计制造及工艺、故障模式机理及影响分析、故障诊断与状态监测、可靠性建模和评估、可靠性试验5个方面对动车组轴承的研究现状进行综述。

1 动车组轴承设计制造与工艺

轴承的结构设计、制造工艺和材料质量是决定轴承质量和可靠度的主要影响因素。本节将针对动车组轴承结构设计、材料与热处理、加工工艺、润滑与密封等方面的研究内容分别进行阐述。

1.1 动车组轴承的结构设计

高速动车组转向架关键轴承主要包括轴箱轴承、牵引电机轴承和齿轮箱轴承^[1-2],如图1所示。对于轴箱轴承来说,大部分采用密封型双排圆锥滚子轴承,其优点是维护方便,同时具有较强的承压能力,且重量相较于其他结构有所降低,因而轴承的设计成本和生产成本也可以降低,这种密封型轴承较小的间隙在应用过程中也可保证车辆的稳定性。牵引电机通常采用圆柱滚子轴承和深沟球轴承,在工作过程中主要承受转向架振动力,由于电流产生的电蚀具有较高危害性,所以通常采用混合陶瓷轴承、陶瓷喷涂轴承和树脂覆膜轴承。考虑到高转速、高承载和高装配精度的要求,齿轮箱轴承通常应用两个圆锥滚子轴承构成的组合式轴承,其功能是支撑和传递振动力与旋转力,此外,齿轮箱轴承在装配的过程中对间隙度有较高要求,可以通过对小齿轮结构的优化改进来实现间隙的缩小。保持架是轴承的重要结构,目前动车组轴箱轴承采用塑料保持架,并且在窗口上留有独特的检查孔洞,以方便在运行过程中对运行状态做出相应检查。牵引电机轴承采用以滚动体引导的保持架,可以降低高速旋转所造成的磨损以及温度升高,也可以有效改善润滑脂机油的流动性^[3]。齿轮箱的中小齿轮轴

作为输入端轴在高速旋转过程中也会承受来自连轴器的压力,一旦压力过大很容易导致出现断裂,因此齿轮箱采用的是带软氮化设计的加强型保护架^[4]。

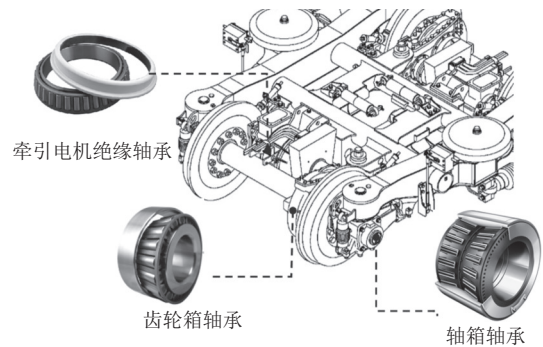


图1 高速动车组的主要轴承

1.2 动车组轴承的材料与热处理

当前我国时速超过200公里的高速动车组,其轴承市场主要被德国FAG、瑞典SKF和日本NTN等国外企业所把持^[1]。国内企业在轴承的设计制造与工艺上,与国际先进水平仍存在一定的差距。轴承钢是决定轴承可靠性和寿命长短的重要因素,所以要求其轴承用钢具备更高质量和性能,主要包括^[5-6]:高的冶金质量、高的接触疲劳强度、高的耐磨性、适宜的硬度以及心部高强度和高韧性。

文献[6]对动车组轴承用20CrNiMoV渗碳钢的热处理工艺开展了详细研究,通过渗碳层和心部的组织性能的合理匹配,得到渗碳后热处理工艺制度,提出了二次淬火、深冷处理匹配低温回火工艺制度,提高了实验钢的耐磨性能和接触疲劳性能。文献[7]对国外动车组轴承零部件进行了全面的质量分析,掌握了不同型号轴承中套圈、滚动体材料、非金属垫层和碳化物分布、热处理组织、硬度、晶粒度和残留奥氏体含量等指标。文献[8]测试确定了NSK公司的R70型轴承套圈的材料化学成分、碳含量、显微组织与硬度等参数,并且针对轴承套圈材料G20CrNi2MoA轴承钢开展了本构关系研究,构建了渗碳仿真模型,深入探讨了渗碳温度、碳浓度以及渗碳时间3个工艺参数对热处理结果的影响规律。文献[9]综述了国内外铁路机车轴承制造代表钢种GCr15钢的常规热处理工艺,论述了提高轴承性能的热处理新工艺技术,并指出TD渗金属技术和高能束表面热处理技术可以有效提高轴承的可靠性。文献[10]以GCr15轴承钢为研究对象,通过对轴承钢在转炉冶炼生产过程的研究分析,建立了转炉冶炼过程保碳、脱磷、控温的

协同控制工艺模型,并应用于轴承钢冶炼生产,实现了钢液纯净度的提高。此外,还研究了精炼过程中超低氧控制工艺,揭示了轴承钢精炼过程渣-金间氧的传输规律,研制了新型复合脱氧剂,最终提升了 GCr15 轴承钢的产品质量。文献 [11] 对 GCr15 轴承钢电渣重熔工艺进行仿真与试验,对溶质的不同形状变化做出总结,分析了不同工艺参数的发展过程。文献 [12] 以动车组轴箱轴承套圈为研究对象,通过试验和仿真分析方法,研究并确立了渗碳轴承钢的热处理关键控制指标参数的控制规范,并基于此开展了热处理工艺仿真优化研究。

1.3 动车组轴承的加工工艺

文献 [13] 对动车组轴承零件的加工工艺进行研究,提出了动车组轴承关键零部件的剪切增稠化学复合抛光新方法,结果显示可以有效改善轴承关键零部件的加工制造精度不足导致的传动失真问题,并且提出在轴承摩擦副外圈零件内表面-织物衬套层之间的界面粘结新工艺,可利用特定的零件表面微结构来提升界面结合强度。文献 [14] 提出应用化学机械抛光工艺对动车组轴承钢进行超精密加工,研究了工况参数和抛光液组成成分对抛光性能的影响,应用正交法对轴承钢的化学机械抛光参数进行了优化,分别将过氧化氢和硅酸盐作为氧化剂,揭示了轴承抛光机理。文献 [15] 利用 deform 软件设计优化了一种动车组轴承内外圈锻造成形方法,获得了分布合理的金属流线,提高了动车组轴承产品的力学性能和接触疲劳寿命。文献 [16] 采用理论分析、有限元模拟和成形试验的方法,较为系统地研究了动车组轴承环成形过程,揭示了轴承环金属流线的演变规律及缺陷形成机理,分析了坯形状尺寸以及不同参数对金属流线的影响规律,提出对轴承环的金属流线控制进行全方面的优化,最终提高轴承的可靠性和承载性能。文献 [17] 通过试验探讨了磷化工艺中对动车组轴承性能影响的关键因素,确定了磷化工艺的最优参数,指出脱脂剂应为皂类物质,并给出了合理的清洗温度和清洗时间。

1.4 动车组轴承的润滑

选择合适的轴承润滑对轴承的服役性能至关重要,高速动车组的轴承大多将脂润滑作为主要润滑模式^[18],润滑脂性能也会直接影响轴承的寿命以及可靠性。润滑剂在轴承零件中的使用寿命是最低的,因此分析轴承的润滑脂状态,能够对车辆的维修周期制定提供依据^[2],日立公司的研究指出,轴

承本身、润滑脂以及轴箱结构三者都会对轴箱轴承的润滑品质产生影响,因而在改进轴承和轴箱结构的基础上,研发了新型合成油润滑脂,应用该润滑脂产品可以让轴承的寿命得到大幅提高,能够保证实现 120 万公里非解体运行的标准^[18]。NTN 开发了高性能的润滑脂 UPG2,可提升车辆轴承的寿命^[3]。文献 [19] 建立了多界面接触力学模型和润滑模型,研究了轴箱轴承的接触润滑行为,结果表明挠曲对轴承润滑影响较小,而运行速度对润滑性能影响较大。此外,载荷使得润滑接触压力增加,会导致滚动体对管道的润滑机制处于边界润滑状态,因此载荷的增加也会对润滑性能产生比较重要的影响。文献 [20] 对高速动车组轴承的纳米润滑脂开展了研究,该润滑脂以轴箱轴承国产润滑脂作为基础,将二硫化钨和氮化硅纳米颗粒作为添加剂。采用析因试验方案探究了超声波功率、超声波频率和水浴温度对纳米颗粒在基础润滑脂中分散均匀程度影响,确定了纳米润滑脂最优制备方案。文献 [21] 分析了双列圆柱滚子轴承的温度分布和润滑脂劣化的挥发特性及其劣化特征物,研究表明润滑脂劣化过程中有机气体的挥发浓度随着轴承摩擦力矩波动而波动,此外,有机气体的挥发浓度变化相比于轴承温度的变化能更敏感地反映轴承摩擦力矩的变化。文献 [22] 结合台架和线路试验,研究了润滑脂对高速动车组轴箱温度的影响,并分析润滑油脂的最优填充量,研究表明在当润滑油脂占空间比例 20% 左右时能够满足充分润滑的需求,同时降低轴承的维护成本。文献 [23] 对高速动车组轴箱轴承润滑开展了高温耐久性试验,试验表明当温度高于轴承稳定运转阶段 15℃ 后,可以判定轴承发生润滑失效,这对于高速动车组轴承润滑剂的实际运用维护有参考意义。文献 [24] 设计了一种固定轮对的全新轴承匀脂跑合机,可以让轴承内部的润滑脂分布更加均匀,也能够有效减少由于匀脂不充分引起的暖轴情况发生,降低运营成本。

1.5 动车组轴承的密封与装配

轴承的密封装置作用不仅是防止润滑剂向外泄漏,还可以防止灰尘进入导致润滑剂失效^[2]。文献 [25] 通过对和谐号动车组轴箱轴承的检查、压装和游隙测量等压装工艺进行阐述,针对环境温度控制、清洁度控制、压力曲线判定提出了相应的标准及建议。文献 [26] 描述了一种高速动车组轴箱轴承轻接触式密封结构,分析了密封压装中经常出

现的轴承内部各零部件制造精度、配合关系,解决了润滑脂在应用过程中可能会出现残留问题。文献[27]研究了动车组轴箱轴承的过盈配合接触性能,发现随机圆度误差是造成轴承过盈联接接触应力分布不均的主要原因。在动车组运行过程中,不均匀应力造成的循环载荷和交变外载荷会加剧轴承的局部疲劳失效。

总体来说,当前动车组轴承的结构形式相对固定,轴承的高可靠性制造主要取决于轴承材料的合理选择和加工工艺,以及高质量的轴承润滑、密封和装配。然而,目前国内的轴承材料性能指标离散度较大,一致性也较低;尚缺乏针对滚动轴承在高速极限工况下的润滑介质研究;此外,在尺寸和精度控制方面,对高速精密轴承的精细指标研究也存在不足。以上是导致动车组的高性能轴承市场仍被外国企业所垄断的重要原因。

2 动车组轴承故障模式、机理及影响

2.1 典型失效模式

我国高速动车组轴承目前要求的寿命为240万公里,检修周期为120万公里^[28],但是在规定的检修里程内,仍然不可避免地出现各种故障。图2给出了我国动车组在服役过程中出现的主要轴承故障模式,故障不仅涵盖了各类轴承,且轴承的失效形式和破损形貌也不尽相同。按滚动轴承的损伤机理大致分为^[29]:接触疲劳失效、磨损失效、断裂失效、塑性变形失效、腐蚀失效和游隙变化失效。SKF公司给出的动车组轴承失效分析矩阵也具有相似的失效模式^[30]。通过对国内动车组轴承检修数据的统计可以得出,出现频率最高的损伤类型是轴承外圈滚道材料的剥离^[31],且剥离基本都集中在外圈滚道中的承载区域。

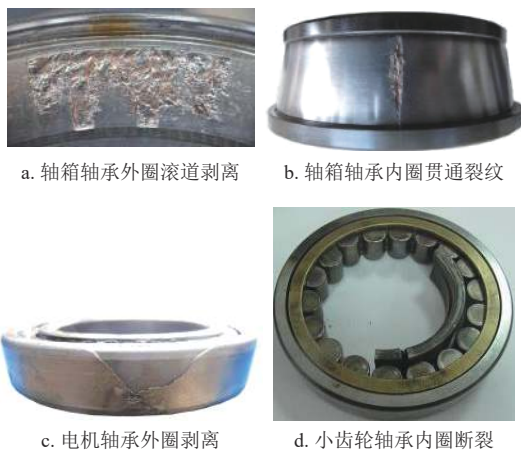


图2 我国高速动车组轴承典型故障模式

2.2 失效机理分析

我国动车组轴承失效的主要外因在于:1)我国高速动车组长距离、大交路的高速持续运行;2)高速铁路线路条件复杂多样,动车组单次运行可能穿过平原、丘陵、山区等众多地形,这些多样的线路条件带来了复杂的外部激励;3)动车组运行环境多变,低温、环境腐蚀、风沙侵害等都是我国高速铁路所特有的运营环境,我国南北地区温差可能超过 50°C 。而动车组轴承失效的内因则相对复杂,文献[32]探测了轴承宏观形貌、裂纹源微伤特征和显微组织,进一步分析了非金属类型夹杂物造成轴承剥离的机理,研究显示,轴承外圈滚道的剥离是典型的接触疲劳损伤,疲劳裂纹起源处均存在破碎和残留的非金属夹杂物,且主要呈现大尺寸、尖锐状和聚集态,在轴承的服役载荷作用下,这些缺陷使得轴承材料出现应力集中,进而诱发和促进了疲劳裂纹的萌生和扩展,最终发展为剥离失效。文献[33]将轮轴与轴承过盈配合的影响考虑在内,计算了轴承在静态过盈装配和运行时的接触应力,结果表明过盈配合表面的圆柱度误差会使轴承内圈的接触预应力和变形分布不均匀,在周向和轴向上的分布具有随机性。圆柱度误差还会增大轴承动应力的波动,使轴承各位置接触应力的不均匀性增大,进一步促进裂纹萌生,引起局部疲劳损伤,因此认为圆柱度误差是造成轴承内外圈滚道产生随机局部疲劳损伤的主要原因。文献[34]分析了不同典型服役工况对轴承疲劳损伤的影响度,结果显示,在单位里程内,对轴承疲劳损伤贡献度依次为:道岔工况、小曲线工况和振动冲击工况,但道岔工况的影响要显著大于后两者。文献[35]采用宏观照相机和扫描电镜等不同手段对动车组轴箱失效轴承外环的金相显微组织、滚道面及其人为断口宏观微观形貌进行对比分析,结果显示轴承失效的主要原因是由于存在异物进入,同时轴承外环的热处理不当,也会导致轴承出现过早的疲劳失效。

文献[36]认为高速动车组轴箱轴承保持架磨损是因为轴承温升异常后,膨胀引起保持架和外圈挡边发生全接触,进一步促使保持架产生异常磨损。所以在保证轴承使用性能的前提下可适当增大保持架的引导间隙,以减少保持架磨损。文献[37]统计了2016至2019年期间CRH3动车组轴箱轴承的升温故障情况,根据故障原因排查结果,认为轴承润滑脂黏度不合适、长大交路持续运行、外界环境温度过高为轴箱升温故障的不可排除因素。文

文献 [38] 持相似的观点, 认为轴承油脂的性能可能是导致轴承温升故障的主要因素。

文献 [28] 指出轴承内部零件的滚滑行为和滚动接触载荷可以看作是高速动车组轴承出现磨损^[39]和疲劳剥离^[40]的根本原因。对于高速动车组轴承内部的滚滑行为研究, 文献 [41] 建立了车辆轨道耦合动力学模型, 并在模型中考虑了轴承与车辆系统的耦合关系, 在有无轨道激励下仿真分析了轴承内部的滚动滑动行为, 结果显示, 高速运行下的轴承内部都存在一定的打滑现象, 但轨道激励会加剧打滑。

轴承内部承载区中间的外圈内滚道是疲劳剥落或裂纹发生频次最多的区域^[31], 因此研究该区域的接触载荷对轴承的可靠性和疲劳寿命预测评估十分重要。文献 [42] 建立了高速列车轴承的有限元模型, 在模型中施加径向和轴向联合载荷, 分析了轴承的动态响应, 结果显示, 接触应力的大小与距离滚子承载区的距离有关, 距离越近, 接触应力越大, 这也是轴承外圈易发生破坏的原因。文献 [43-44] 在轴承-车辆-轨道耦合动力学模型的基础上, 通过施加不同大小的轨道激励和车速, 对比分析了滚子滚道的接触载荷特征, 结果显示, 承载区内的载荷分布对轨道激励不敏感, 但对于非承载区, 轨道激励会使得内滚子和外圈滚道更容易发生接触, 从而提升了非承载区的载荷。考虑了较为复杂的边界条件, 文献 [45] 的研究表明随机轨道激励和齿轮啮合对轴箱轴承的滚子和滚道的接触应力有不可忽略的影响, 随机风载会加剧轴箱轴承的内部接触应力, 同时造成左右轮轴箱轴承的接触应力偏载^[46]。文献 [47] 还分析了车轮多边形磨耗下, 轴箱轴承滚子与外圈滚道间的接触应力, 结果表明当动车组高速运行时, 高阶多边形相比于低阶多边形对接触应力的影响更大, 特别是当车轮多边形的幅值达到 0.1 mm 时, 轴承滚子和外圈滚道间的接触应力峰值可以达到无多边形激励时的两倍。文献 [48] 采用 Hertz 接触理论和滚子切片理论, 对动车组圆锥滚子轴承的滚子和滚道之间的接触问题开展了数值仿真分析, 指出滚子的应力集中程度和载荷水平存在关联, 滚子的对数曲线型虽然可以减小应力集中情况, 但并不能完全消除。文献 [49] 利用有限元方法建立了轴箱轴承模型, 专门针对接触区域附近的网格进行细化, 并对接触模型做出修正, 仿真分析表明, 轴箱轴承内圈与滚子法向的接触中, 只有部分滚子受到载荷, 且接触载荷呈现出从中部向

两侧减小的总体趋势。文献 [50] 在不同的输入转速和转矩的工况下, 应用应变计测量了高速动车组齿轮箱轴承的动态接触载荷分布, 确定最大载荷位置, 分析了该位置的接触载荷变化特点。

2.3 失效影响分析

高速动车组轴承故障或失效后的影响不仅关系到动车组的安全运行, 还可为动车组轴承在线故障预警方法提供理论依据。在对振动特性的影响方面, 文献 [51] 针对动车组轴承, 建立了包括内外圈和滚动体故障的动力学模型, 在各种轴承故障条件下分析了轴承的典型振动特征, 并利用试验数据对计算结果作出验证。仿真和实验结果表明, 不同故障类型体现出不同的故障特征, 内圈和滚动体故障时的响应频率均可以受到调制, 且在不同的故障发展阶段, 振动频谱存在较大区别。文献 [52] 建立了高速动车组轴箱圆锥滚子轴承的有限元分析模型, 对不同零件的运动关系以及故障相对应的频率进行详细分析, 仿真结果和理论值基本保持一致: 外圈的故障特征频率较为明显, 并没有出现调制现象; 而对于内圈和滚子, 其故障频率存在幅值调制, 主要是由自转频率产生的边频谱, 且不同的轴承缺陷水平对故障调制结果会产生不同的影响。文献 [53] 在 ANSYS/LS-DYNA 中建立了考虑轴承的高速动车组整车动力学模型, 对比了双列圆锥滚子轴承在正常工况下和滚动体剥落情况下的动态响应, 结果表明接触应力主要集中在滚动体和内外圈接触部位, 且承载区域主要是轴箱轴承的上半区。文献 [54] 针对 CRH3 动车组的轴箱轴承, 开展了混合剥落下的故障仿真与试验研究, 结果显示不同部位的剥落均会造成滚子应力的升高, 但是影响程度不同, 外圈剥落和滚子剥落对自身应力的影响较为显著, 内圈剥落则是对其他部件的影响较大, 内圈剥落会降低滚子和内圈的速度, 若外圈和滚子同时剥落, 则应力水平将会急剧升高。文献 [55-57] 考虑了高速动车组轴箱轴承的组合误差, 分析了轴箱轴承存在局部缺陷或是组合误差时的振动响应, 结果表明高速下轴箱轴承的缺陷对动车组动力学性能有较大影响, 按照对轮对振动水平的影响程度排序依次为: 外圈故障大于内圈故障, 内圈故障大于滚子故障。文献 [58-59] 利用多体动力学软件, 研究了轴承发生滚子滚道故障和表面波纹度对车辆动力学性能的影响, 结果显示轴箱轴承的早期缺陷就可对轴箱加速度产生较大影响, 而对构架的影响较

小,对车辆平稳性更是几乎没有影响。在相同的缺陷尺寸下,轴承外圈缺陷对轴箱加速度的影响最大,其次是内圈缺陷,再次是滚子缺陷,这与文献[56]的研究结果相吻合。文献[60]研究了动车组轴承故障对温度的影响,通过建立高速动车组轴箱轴承的温度三维模型,仿真计算了轴承温度的分布情况,以及在故障状态下温度分布的变化趋势,结果表明,影响轴承温度的三大因素是润滑、受力和轴承早期表面磨损。

总而言之,由于我国动车组特有的长大交路高速运行,以及覆盖多种气候地理条件的复杂运行环境,使得动车组轴承的服役边界条件异常恶劣,在高频高幅值的载荷作用下,轴承出现了以外圈滚道材料剥离为代表的各类运行故障,而分析轴承故障发生机理的关键在于掌握服役轴承的内部滚滑行为和载荷分布规律。目前的研究主要是通过建立车辆-轴承耦合动力学模型开展仿真分析,虽已取得了不少有意义的结果,但由于缺乏检测手段,无法对仿真分析结果进行验证,因此使得部分失效机理仍未完全揭示。后续研究应该更多加强理论与实测(包括线路与台架测试)的结合,提升轴承失效机理分析结果的可信度,才能更为有效地指导我国动车组轴承的故障监测、可靠性评估以及正向设计。

3 动车组轴承故障诊断与状态监测

3.1 铁道车辆轴承监测系统

轴承损伤故障通常会生成特定的故障特征,按照轴承诊断手段可将其分为:基于连续温度信号的分析技术、基于声学信号的分析技术和基于振动信号的分析技术^[61]。而按照铁路轴承的监测方法可以分为:轨旁检测系统和车载监测系统。

轨旁检测系统主要是基于温度信号和声学信号,滚动轴承在正常运行时也处于发热状态,但一旦出现磨损或者剥离,温度会大幅增加。EN12082:2007中规定^[62],在铁道车辆的运行过程中,轴承温度是重要的监测指标。在20世纪70年代,美国Servo公司最先开发了一套以热辐射原理为基础的轴承温度探测系统,并且得到了广泛应用^[63]。法国TGV线上每隔40~50 km就会安装一个轴温报警器,截止2013年英国已经安装的检测装置超过200套。动车组运行过程中,轴承需要在足够的温度下才会触发报警机制,此时轴承往往已经失效,因而无法对轴承的情况进行早期及时诊断。而以声学信号为基础的诊断模式,能够较快地发现轴承故

障。90年代中期,美国TTCI^[64]开发了轴箱轴承的轨旁声学监测系统,并结合神经网络算法,大幅提升了轴箱轴承监测的准确性。随后,澳大利亚铁路部门通过研究轴承的声学特征,也开发了地面铁路轴箱声学监测系统,在铁路和环形铁道进行了试验验证^[65]。我国的铁路轴承监测体系的研制起步相对较晚,但发展较快。20世纪70年代,开发的第1代温度探测设备,采用人工记录的方式,尚无法实现联网跟踪的要求。到了20世纪80年代,第2代温度探测设备利用计算机和人工智能,能够实现联网追踪的要求,也能够实现动态监测和进行智能判别。20世纪90年代,哈铁研制的HTK-499型红外线温度探测系统已经能够满足我国铁路的提速需求,能够满足时速360公里的温度监测要求^[66]。2003年,在对国外研究成果总结的基础上,结合我国铁路运营的发展现状,研制成功了滚动轴承故障轨边声学诊断系统TADS。

车载监测系统相比于轨旁检测系统能更及时地发现轴承故障,英国铁路利用加速度传感器监控每个轴箱轴承的实时振动状态,研制了铁路轴承车载监测系统^[66]。20世纪90年代,SKF公司开发了BOMO车载转向架监测系统,利用温度和振动复合传感器获取更为全面的轴承信息,以提升车载轴承状态评价的准确性,并实现了故障预警功能^[67]。2001年,德国铁路系统技术公司开发的车载转向架状态监测系统同样采用振动与温度联合监测技术对轴箱轴承进行故障诊断,在ICE2动车组上进行试验后,安装于ICE3动车组正式使用^[68]。目前我国的高速动车组均配备有轴温监测系统^[64],温度传感器安装在转向架各个轴端的轴箱上,而监测装置则安装在列车电气柜内,同时具备传感器状态自诊断、温度采集及数据的分析与处理功能。

3.2 动车组轴承故障诊断技术

轴承故障诊断本质上是模式识别问题,所以主要包含特征提取和分类两个步骤,基于振动信号的诊断当前应用最为广泛。对于动车组轴承的故障诊断技术,本文将分为基于数据分析和基于人工智能两种主流方法进行综述。

3.2.1 基于数据统计特征的诊断方法

从时域角度对动车组轴承进行故障诊断,是通过直接对原始采集信号进行研究和分析,不对信号进行滤波缩放处理,时域数据可最大程度还原信号所具备的能量信息,直观且易于理解。其中,时域

信号的有量纲参数主要有：峰值、均方根值。有量纲指标值表征了信号在各时刻的统计特性。时域信号的无量纲参数指标主要包括了：峰值因子、峭度、峭度因子、波形因子、脉冲因子和裕度因子等^[69]。文献 [70] 对每一个时域统计参数进行了研究，指出无量纲参数受旋转机械转速、载荷以及信号绝对水平等影响较大，所以对诊断精度有较好的鲁棒性。均方根值能够很好反映轴承全寿命周期，在失效不同阶段中的加速度信号中能量变化^[71]，适合描述轴承从正常到失效的过程中，轴承振动水平和局部损伤程度之间的变化关系^[72-73]。峭度和峰值指标对信号的波形变化非常敏感，能够反映出轴承缺陷发展趋势，偏斜度适用于不对称、非线性信号，可以描述滚动轴承的故障特征。鉴于峭度对周期信号转速和频率带宽在高频、窄带范围的有效性，文献 [74] 利用峭度值作为评估标准，选择合适参数对小波多分辨率分析完成优化，成功运用到了动车组滚动轴承早期故障诊断中。文献 [75] 提出了一种基于时延峰度的自适应边界确定方法，并通过动车组故障模拟信号和实际轴箱轴承振动信号验证了该方法的有效性。结果表明，该方法能自适应地确定含有故障信息共振带的合理边界。虽然时域统计指标在故障诊断中应用广泛，但是极易受

噪声等干扰成分的影响，而我国高速动车组轴承的服役环境复杂多变，势必存在较多的噪声干扰成分，因此时域统计指标在高速动车组轴承实际故障诊断中的应用并不多。

与时域分析法相比，频域分析法和时频域分析法能够更有效地提取故障响应特征，可以更多地滤除噪声干扰对诊断的负面影响。动车组滚动轴承匀速运行过程中，轴承缺陷与滚道或滚动体发生周期碰撞引起周期性的响应，采用傅里叶变换可将振动信号变换到频域，在频域中识别目标故障特征频率。但傅里叶变换只适用于平稳信号分析，而动车组滚动轴承故障信号是非平稳信号，只分析其频域全局特性存在局限性。此外，动车组轴承的服役环境恶劣，承受来自轨道、环境等多源激励，轴承的振动信号的频率成分十分复杂，轴承故障信号中幅值较小的故障特征频率极易被其他干扰频率成分掩盖，所以仅依靠傅里叶变换对动车组轴承进行故障诊断效果往往并不好。当前动车组轴承故障信号分析，通常采用以离散小波变换、小波包分解等为代表的时频分析方法，或以包络谱分析、Teager 能量算子、导数包络算子以及倒谱分析、倒包络谱分析为代表的调制频率识别方法。表 1 为近年来国内外基于数据统计特征的动车组轴承故障诊断方法。

表 1 基于数据统计特征的动车组轴承故障诊断方法

分类	方法	参考文献
时频分析方法	短时傅里叶变换	文献[76]
	希尔伯特黄变换	文献[77-79]
	经验模态分解	文献[64, 80]
	集合经验模态分解	文献[81-84]
	小波包分解	文献[66, 83, 85]
非平稳信号分析方法	局部特征尺度分解	文献[86]
	完备集合经验模态分解	文献[87]
	变分模态分解算法	文献[88-90]
	奇异值分解包	文献[91]
谱分析方法	峭度图法	文献[92-93]
	共振解调分析	文献[94-95]
	最小熵反褶积	文献[96]
其他方法	局部离群因子算法	文献[97]
	时间重新分配的多同步变换	文献[98]
	冲击响应卷积稀疏编码技术	文献[99]
	循环平稳盲反褶积	文献[100]

3.2.2 基于人工智能的诊断方法

人工智能和模式识别等学科的兴起使得智能化的故障诊断成为可能，智能诊断技术的大量应用减

少了对人工的依赖性，而且提高了诊断效率。因此动车组轴承的故障诊断也朝着人工智能的方向发展，当前用于动车组滚动轴承的智能诊断技术主要

有神经网络、专家系统、模糊逻辑和支持向量机等, 表2列举了近年来国内外基于人工智能的动车组轴承故障诊断技术。

目前针对动车组轴承故障诊断的研究处在快速发展阶段, 在大数据和人工智能背景下, 轴承故障诊断的算法也愈加丰富, 但是真正能够运用到工程实际, 即在线运行动车组轴承故障诊断的方法却很少。原因主要可能在于, 目前多数训练集采用的是

实验室台架实验获得的故障数据, 如何将变量可控的台架实验数据迁移至复杂的实际振动环境中是难点。此外, 实际动车组轴承的部分监测信号(包括振动、温度等)往往采样率偏低, 可能无法完全覆盖高速旋转轴承故障的特征频带, 且不同信号源间的采样率也有所差异, 因此, 如何有效融合多维度多源信号也是实现动车组轴承在途故障诊断的关键。

表2 基于人工智能的动车组轴承故障诊断方法

分类	方法	参考文献
支持向量机	支持向量机	文献[85, 87, 101-102]
	BP神经网络	文献[75, 103-104]
	遗传神经网络	文献[105]
	长短期记忆网络	文献[84, 106-108]
	卷积神经网络	文献[109-112]
神经网络	概率神经网络	文献[89]
	改进的深层信念网络	文献[113]
	迁移学习	文献[114]
	受限玻尔兹曼机	文献[115]
模糊逻辑	模糊熵	文献[88, 116]
其他	Shapelets学习	文献[117-118]

4 动车组轴承可靠性建模和评估

4.1 疲劳寿命评估

在动车组轴承的疲劳寿命评估方面, 目前大多是基于L-P寿命计算理论^[119]或ISO-281标准^[120]进行计算。文献[121]通过对动车组一系悬挂弹簧和转臂载荷测试, 基于ISO-281标准, 对动车组轴箱轴承的寿命做出了预测。文献[44]基于考虑轴承的车辆-轨道耦合动力学模型, 结合L-P理论和Palmgren-Miner理论对动车组轴箱轴承进行了损伤计算和寿命分析。文献[122]对比了L-P寿命计算和ISO-281标准预测动车组轴箱轴承寿命时的区别, 结果表明两种方法的计算结果差异会随着负游隙的增大而增大, 并提出了改进的L-P方法, 改进方法对负游隙有较强的稳健性。文献[123]建立考虑柔性振动的轴承-车辆-轨道耦合动力学模型, 在模型中输入实测车轮多边形数据, 计算了多边形激励下的轴箱轴承滚道接触载荷变化, 并采用L-P方法仿真预测了轴承的疲劳寿命。文献[124]研究了变轨距动车组轴承, 并在偏载时圆锥轴承的应力1.6倍下计算了轴承的寿命。文献[125]基于修正的L-P理论, 同时考虑电磁载荷和机械载荷, 对动车组牵引电机轴承寿命进行预测, 并利用电机额

定参数、轴承额定参数建立了牵引电机轴承寿命的新算法。根据牵引电机轴承的特殊性, 采用润滑和污染等级参数对疲劳寿命计算中的环境系数进行修正, 使得寿命预测更为普适。文献[126]同样利用L-P公式分析了结构参数及外部工况对动车组轴承寿命的影响。结果表明, 外接触角、滚子有效长度和滚子数目增加有利于轴承寿命的增加, 而外部载荷和速度的增加则会使轴承的寿命降低。文献[127]采集了激扰状态下滚子与保持架间的作用力, 分析了动车组轴箱轴承滚子与保持架间的应力分布, 结果显示较大的轮轨冲击会造成塑料保持架直接断裂, 并基于此提出了轴箱轴承的寿命经验公式。

基于疲劳损伤累积理论的评估方法也是轴承寿命预测的主流方法之一, 文献[128]结合车辆动力学与有限元方法, 首先获得动车组运行时轴承的一维应力谱, 并依据Miner线性损伤理论估计了轴承的寿命。文献[129]采用雨流计数法编制了动车组轴箱轴承保持架不同危险部位的应力谱, 并根据Miner线性累积损伤理论和材料S-N曲线, 计算了轴承各危险部位的寿命。文献[130]基于FORTRAN语言和多体动力学仿真软件ADAMS, 搭建了动车组牵引电机圆柱滚子轴承的动力学模型, 在不同载

荷水平和结构参数下计算了圆柱滚子轴承的动态响应,然后基于有限元分析软件 ABAQUS 研究了轴承在不同工况下保持架与滚子的碰撞应力,最后通过雨流计数和 Miner 线性损伤累积理论方法预测了保持架的疲劳寿命。文献 [131] 通过线路测试测量了动车组轴箱弹簧以及转臂处的载荷,并结合累积损伤理论提出了基于实测载荷的轴承寿命预测方法。

文献 [132] 考虑受力最大的管子和轴承套圈,利用局部应力-应变方法和 Basquin 公式分析了夹杂物的位置、大小和数量对动车组轴承疲劳寿命的影响,并构建了动车组轴承钢中非金属夹杂物与轴承寿命之间的定量关系。文献 [133] 还利用 I-H 寿命计算模型,在不同的滚子长度、滚子平均直径及轴承节圆直径下,分析动车组轴承的次表面 Von Mises 应力及疲劳寿命。文献 [134] 基于动车组轴承材料的 S-N 曲线,采用名义应力法,采用轴承接触应力值计算了轴承的疲劳寿命值,并将计算结果与经典 L-P 寿命理论进行比较,表明两种方法的结果一致性较好。文献 [135-136] 基于模糊数学,考虑了影响动车组轴箱轴承寿命的模糊因素,分别利用集对分析理论和模糊集理论评估了轴箱轴承的可靠性寿命。文献 [137] 分别基于有限元仿真和失效物理加速寿命模型、统计加速寿命模型和循环神经网络预测模型进行动车组轴箱轴承疲劳寿命可靠性评估,并运用 D-S 证据理论充分挖掘数据信息,最终融合这 3 种方法对轴箱轴承在不同工况下的疲劳寿命可靠性进行评估。

4.2 剩余寿命预测

对动车组轴承开展剩余寿命预测,可以据此实施健康管理,对保障动车组的运行安全性、可靠性与经济性具有重要意义。目前,对于动车组轴承的剩余寿命预测主要采用数据驱动的方法,而数据驱动又可分为基于传统数据统计和基于机器学习两类。文献 [138] 基于威布尔分布的比例故障率模型,通过灰色预测模型对动车组轴箱轴承在未来时刻的性能退化指标进行预测,并将预测得到的剩余寿命与轴承真实寿命对比,验证了模型的有效性。文献 [139] 通过具有时移的非线性维纳过程,来模拟动车组轴承的退化过程,并结合比例风险模型来描述动车组轴箱轴承故障时间的分布,将退化路径和时间轴进行离散化,通过转移概率矩阵获得可靠性量的闭式解,实现对动车组轴箱轴承剩余使用寿命的预测。在采用机器学习方法进行剩余寿命预测

方面,文献 [140] 提出了一种基于连续监测和轴承状态分类的可延长使用寿命的混合模型。从振动信号和声信号中提取了典型时域特征的统计特性,将一批不同程度自然缺陷的轴承作为样本,设计了测试程序,在不同车速下对轴承的故障诊断方法进行验证,同时搭建了轴承状态评估数据库和知识库,用于动车组轴承的剩余寿命预测。文献 [141] 分别基于序列对序列预测、长短时记忆网络和三参数威布尔模型对动车组牵引电机风机轴承剩余寿命进行研究,结果表明预测方法具有较高精度。文献 [142] 根据特征指标与动车组轴承故障的敏感程度,从时域和频域中筛选了 19 个指标进行分析。首先基于核主元构建了动车组轴承性能退化的表征指标,并采用遗传算法、经验模态分解与 BP 神经网络相结合的方法,对动车组轴承剩余寿命进行预测。文献 [143] 以动车组牵引电机中风机轴承为对象,首先将经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 算法分解后的 IMF 分量作为特征参数输入到支持向量回归模型 (support vector regression, SVR) 中,搭建了 EMD-SVR 模型,并通过 EMD-SVR 模型对滚动轴承的剩余使用寿命进行了预测,结果表明,该模型得到的预测寿命精度可以达到 97.85%。文献 [144] 提取了高速动车组牵引电机滚动轴承的振动信号特征参数,并基于深度堆叠去噪自编码器累积进行降维,构建健康指标,随后将健康指标作为训练数据,搭建了时滞最小二乘支持向量机模型,通过对健康指标的预测实现了对牵引电机轴承健康状态和剩余使用寿命的评估。文献 [145] 基于改进的高斯混合模型,构建了一个新的动车组轴承健康指标,引入 Jensen-Renyi 散度对改进的高斯混合模型的概率输出进行融合,并利用 tanh 函数指标进行归一化,最终基于优化相关向量机搭建了动车组轴承的剩余寿命预测方法。

总体来讲,目前动车组轴承的寿命计算主要依赖各类轴承寿命计算模型,这些模型大都由经典的 L-P 公式改进和发展而来,但此类方法通常难以考虑轨道车辆轴承的实际载荷变化情况。而采用疲劳损伤累积理论进行寿命评估虽然可以在一定程度上引入运行动车组的轴承服役载荷,但由于动车组轴承实际载荷、工况、运行环境等具有时变或动态特性,传统的静态可靠性分析理论也难以满足需求,因而发展动车组轴承的时变疲劳可靠性分析方法十分必要。同时,当前对于动车组轴承剩余寿命预测研究更多地集中在机器学习领域:首先采用传

统统计方法对轴承的振动、噪声或温度信号进行预处理并提取健康因子,再结合深度学习从监测数据中自主学习性能退化模式,预测剩余寿命。其中,动车组轴承的健康因子往往存在趋势性不高、失效阈值难以确定的问题,如何结合专家先验知识和深度学习方法构建合理的健康因子是关键。此外,采用智能算法预测剩余寿命时,为了提高剩余寿命精度并尽可能减小剩余寿命预测区间范围,不仅要提高数据的质量和数量,还需要提高预测方法和算法的性能。

5 动车组轴承可靠性试验

可靠性试验可以在有限的样本和时间下,找出产品薄弱环节,研究产品的失效机理,达到提升产品可靠度的目的,但国内外关于动车组轴承可靠性试验的研究还较少。文献[146]对动车组轴箱轴承的耐久性试验台进行了详细介绍,主要包括机械系统、液压加载系统、风冷系统、润滑系统和电气测控系统。该试验台可对轴承两端施加径向和轴向的载荷,冷却风机可以模拟实际工况的风冷条件,当动车组轴承完成120万公里的试验后,通过对轴承的外观和润滑脂的检查,以判断轴承是否满足免维护的要求。文献[147]研究了服役过程中动车组轴箱的载荷谱编制方法,通过测量不同运行工况下的载荷数据,采用雨流计数法建立了轴箱轴承试验的振动谱,并根据核密度雨流外推方法获取了疲劳加速度载荷谱。对轴箱箱体在运营载荷工况下进行了应力分析,基于实测轴箱的应力数据,分析了轴箱的疲劳寿命。文献[148]通过测量动车组在线路上运行时的轴承载荷信号,获得了轴承径向和轴向载荷的时间历程数据,并基于轴承载荷分析理论,编制了动车组轴箱轴承试验载荷谱,最后还利用编制的试验载荷谱,依据损伤一致性原则计算了等效载荷,可用于试验台的轴承加速寿命试验。文献[31]针对不同运营里程下的动车组轴承进行研究,通过实验,得到了外圈滚道材料微观结构的演化特征以及外圈材料力学性能随里程的变化规律,并建立了滚动接触疲劳快速试验方法,从而获得了滚动接触疲劳裂纹扩展规律。可见,目前国内动车组轴承可靠性的针对性试验还较少,尤其是实际线路跟踪测试,受限于动车组轴承尚未国产化,因而难以获取一手的现场测试数据。不过仍可借助实验室台架测试,或是较低速的轨道车辆用轴承现场测试,积累完善轴承的可靠性数据,掌握轨道车辆服役轴承的

性能退化规律,进一步支撑高速轴承的可靠性评估。

6 结束语

我国高速动车组轴承在高转速、长时间持续服役的工作条件下,还面临着复杂多变的运行环境,动车组轴承只有具备长寿命、高可靠性,才能保证动车组的安全运行。当前,动车组高端轴承仍依赖国外企业,我国应尽快掌握高速动车组轴承设计、制造、使用和维护中的关键技术。为此,本文从设计制造与工艺、故障模式、机理与影响、故障诊断与状态监测、可靠性建模与评估以及可靠性试验等方面,归纳总结了近年国内外对动车组轴承及其可靠性的研究成果,旨在为我国动车组轴承的自主设计理论及制造技术提供参考。高端轴承是我国需要重点攻关的“卡脖子”领域,目前动车组轴承的研究已取得不少成果,本文认为在动车组轴承可靠性的研究还需在以下几方面加强。

1) 加强动车组轴承在使用环境下滚滑力学行为的机理理论研究。一方面,有必要从车辆大系统动力学的角度出发,充分考虑轴承服役环境的影响,研究在复杂服役环境下的轴承载荷特性和温度变化规律。另一方面,针对轴承内部的载荷分布特征,考虑轴承各个子系统在润滑状态下的动态微接触及动力学行为、热效应、摩擦学行为、弹塑性形变等问题,进一步探明服役载荷对轴承失效行为和疲劳寿命的影响关系。

2) 加强动车组轴承的状态监测和剩余寿命预测算法的实际应用研究。由于动车组轴承的多元性能退化现象广泛存在,如疲劳失效、磨损失效和腐蚀失效等,对多元性能退化进行合理的描述和可靠性建模是关键。同时,高速动车组轴承在复杂服役环境下的故障模式及故障机理具有随机性和不确定性,如何将人工智能方法和传统寿命预测模型有机结合,发展更为高效、物理意义更为明确的可解释性故障诊断和剩余寿命预测方法是实现算法实际应用的關鍵。

3) 加强动车组轴承测试技术的研究。一方面,针对不同的轴承类型,改造并开发对应的轴承内部传感器,实时测量轴承内部动态载荷分布情况,尤其是轴承外滚道承载区等重点失效位置的交变载荷实时测试,根据实测结果编制动车组轴承载荷谱是进行可靠性评估的基础。另一方面,由于动车组线路条件复杂多变,轴承所承载荷不仅频率范围宽,幅值水平高,且存在各种冲击载荷,利用实验室轴

承台架实验还原实际线路载荷谱的特征是难点, 合理有效的轴承载台架测试可为实现动车组轴承疲劳可靠性评估提供支撑。

参 考 文 献

- [1] 彭飞, 张尧. 轨道交通轴承故障诊断与寿命预测技术综述[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 162-168.
PENG F, ZHANG Y. General review of rail transit bearing fault diagnosis and lifespan prediction technology[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 162-168.
- [2] 叶军, 杨立芳. 发展中的轨道交通车辆用轴承[J]. 轴承, 2013(12): 61-65.
YE J, YANG L F. Development of bearings for rail transit vehicles[J]. Bearing, 2013(12): 61-65.
- [3] 施洪生, 张奕黄, 高培庆. 高速牵引电机轴承关键技术的发展趋势[J]. 机车电传动, 2007(2): 1-5.
SHI H S, ZHANG Y H, GAO P Q. Development trend of critical technologies for bearing of high-speed traction motor[J]. Electric Drive for Locomotives, 2007(2): 1-5.
- [4] ITO N. Technological trends of railway rolling stock bearings[J]. NSK Technical Journal, 2009, 683: 2-7.
- [5] 杨才福, 苏航, 惠卫军, 等. 高速列车用车轮钢、轴承钢和弹簧钢的发展[J]. 机车电传动, 2003(S1): 32-36.
YANG C F, SU H, HUI W J, et al. Development of wheel steel, bearing wheel and spring steel for high speed train[J]. Electric Drive for Locomotives, 2003(S1): 32-36.
- [6] 李彬周. 高铁渗碳轴承钢热处理工艺及组织性能研究[D]. 长春: 东北大学, 2019.
LI B Z. Research on heat treatment technology, microstructure and mechanical properties of carburizing bearing steel for high-speed railway[D]. Changchun: Northeastern University, 2019.
- [7] 张玲, 仵永刚, 廉小敏. 国外高铁轴箱轴承原材料及热处理质量分析[J]. 轴承, 2017(7): 38-42.
ZHANG L, WU Y G, LIAN X M. Analysis on raw material and heat treatment quality for foreign high-speed railway axle box bearings[J]. Bearing, 2017(7): 38-42.
- [8] 刘潇. 高铁轴承套圈渗碳热处理仿真技术及工艺研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
LIU X. Research on simulation technology and process of carburizing heat treatment for bearing rings of high-speed rail[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [9] 张毅, 柴哲, 孙慧丽, 等. 高铁用 GCr15 轴承钢的热处理工艺研究进展[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(6): 356-362.
ZHANG Y, CHAI Z, SUN H L, et al. Research progress on heat treatment technology of GCr15 bearing steel used for high-speed railway[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2017, 38(6): 356-362.
- [10] 邓爱军. 高铁用轴承钢冶金过程的关键技术研究[D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
DENG A J. Research on the key technology of metallurgical process of bearing steel for high-speed rail[D]. Maanshan: Anhui University of Technology, 2019.
- [11] 吕斌. 高铁用 GCr15 轴承钢电渣重熔工艺仿真与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LYU B. Simulation and experiment studies on electroslag remelting process of GCr15 bearing steel for high-speed railway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [12] 邹胜超. G20CrNi2MoA 轴承套圈热处理仿真优化与试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
ZOU S C. Simulation optimization and experimental study on heat treatment of G20CrNi2MoA bearing rings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [13] 黄振荣. 高铁轴承零件抛光新方法及摩擦副微结构-织物界面特性研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2020.
HUANG Z R. New ultra-precision polishing method for bearing parts in high-speed train and interface characteristics of microstructure-fabric for the frictional pair[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2020.
- [14] 王玉松. 高性能轴承钢化学机械抛光工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
WANG Y S. Research on chemical mechanical polishing process of high performance bearing steel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [15] 庞碧涛, 王玉杰, 张玲, 等. 一种流线分布合理的动车组轴承内外圈锻造成形方法: CN108465770A[P]. 2018-08-31.
PANG B T, WANG Y J, ZHANG L, et al. A method for forging inner and outer rings of multiple unit bearings with reasonable streamline distribution: CN108465770A[P]. 2018-08-31.
- [16] 胡博奎. 高铁轴承环成形过程金属流线演变及控制优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
HU B K. Research on metal flowline evolution and process optimization of bearing ring for high-speed rail[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [17] 段欣生, 邱明. 高铁轴承磷化工艺影响因素分析[J]. 轴承, 2019(2): 27-30.
DUAN X S, QIU M. Analysis on influencing factors of phosphating process for high speed railway bearings[J]. Bearing, 2019(2): 27-30.
- [18] 姚立丹, 杨海宁. 国外轨道交通车辆润滑脂进展[C]// 2006 全国摩擦学学术会议论文集(三). 哈尔滨: [s.n.], 2006: 150-153.
YAO L D, YANG H N. The trend of greases for railway overseas[C]// Proceedings of the 2006 National Tribology Academic Conference (III). Haerbin: [s.n.], 2006: 150-153.
- [19] 胡欣. 铁路客车轴箱轴承接触润滑机理[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
HU X. Contact loading distribution of axle bearing assembly and lubrication performance of bearings[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [20] 尹延经. 高速铁路轴箱轴承润滑脂性能试验研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.
YIN Y J. Experimental investigation on performance of grease for high-speed railway axleboxes bearings[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013.

- [21] 杨奉霖. 高速机车轴箱轴承温度场分析与润滑脂劣化机理研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
YANG F L. Research on temperature field and grease degradation mechanism of high-speed locomotive axle box bearing[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [22] 韩庆利, 范军, 刘超, 等. 润滑脂对高速动车组轴箱轴承温度的影响研究[J]. 轴承, 2019(8): 42-45.
HAN Q L, FAN J, LIU C, et al. Study on influence of grease on temperature of axle box bearings for high speed EMU[J]. Bearing, 2019(8): 42-45.
- [23] 赵伟桦, 马聪, 曾献智, 等. 高速铁路轴箱轴承用润滑脂耐久性试验研究[J]. 轴承, 2017(6): 37-41.
ZHAO W H, MA C, ZENG X Z, et al. Experimental study on durability of grease for high-speed railway axle box bearings[J]. Bearing, 2017(6): 37-41.
- [24] 周海泉, 周文锦. 一种新型动车组轴承匀脂跑合机[J]. 轴承, 2021(7): 32-35.
ZHOU H Q, ZHOU W J. A new bearing grease homogenizer for EMU[J]. Bearing, 2021(7): 32-35.
- [25] 赵言贵. 和谐动车组轴箱轴承压装工艺研究[J]. 中国新技术新产品, 2014(9): 103.
ZHAO Y G. Research on the press assembly process of axle box bearing of CRH EMUs[J]. China New Technologies and Products, 2014(9): 103.
- [26] 方芳, 高武正, 曾献智, 等. 高铁用轴箱轴承轻接触式密封压装工艺[J]. 轴承, 2019(10): 19-22.
FANG F, GAO W Z, ZENG X Z, et al. Pressing assembly process for light contact seal of axle box bearings for high-speed railway[J]. Bearing, 2019(10): 19-22.
- [27] 申林. 高铁轮轴轴承过盈配合接触性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
SHEN L. Research on interference fit behavior of CRH wheel axle and bearing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [28] 王曦, 侯宇, 孙守光, 等. 高速列车轴承可靠性评估关键力学参量研究进展[J]. 力学学报, 2021, 53(1): 19-34.
WANG X, HOU N, SUN S G, et al. Advances in key mechanical parameters for reliability assessment of high-speed train bearings[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(1): 19-34.
- [29] 赵传国. 滚动轴承失效分析概论[J]. 轴承, 1996(1): 39-46+18.
ZHAO C G. Introduction to failure analysis of rolling bearings[J]. Bearing, 1996(1): 39-46+18.
- [30] SKF. Railway technical handbook vol 2: Drive systems: Traction motor and gearbox bearings, sensors, condition monitoring and services[M]. Sweden: SKF Group, 2011.
- [31] 芮如兵. 高速列车轴箱轴承材料微观结构及力学性能演化规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
GUO R B. Study on evolution of microstructure and mechanical properties of high-speed train axle box bearing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [32] 张恒, 张关震, 丛韬, 等. 非金属夹杂物对动车组轴箱轴承剥离的影响[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(6): 127-134.
ZHANG H, ZHANG G Z, CONG T, et al. Effect of non-metallic inclusions on the peeling of axle box bearing in EMUs[J]. China Railway Science, 2020, 41(6): 127-134.
- [33] 孔凡爽. 基于圆柱度的动车组轴承过盈配合三维建模及损伤机理分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
KONG F S. Three-dimensional modeling of EMU bearing interference fit and damage mechanism analysis based on cylindricity[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [34] 潘碧琳, 杨兴宽, 赵方伟. 典型服役工况对高铁轴箱轴承疲劳损伤的影响度研究[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(2): 1-7.
PAN B L, YANG X K, ZHAO F W. Influence of typical service conditions on fatigue damage of axle box bearing of high-speed railway[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(2): 1-7.
- [35] 杜凤贞, 马通达, 刘安生. 高铁轴箱轴承疲劳剥蚀失效分析[C]// 2015年全国失效分析学术会议论文集. 北京: [s.n.], 2015: 41-44.
DU F Z, MA T D, LIU A S. Failure analysis of axle box tapered roller bearing for high speed railway train[C]// Proceedings of the 2015 National Failure Analysis Academic Conference. Beijing: [s.n.], 2015: 41-44.
- [36] 范军, 韩庆利, 刘超, 等. 高速动车组轴箱轴承保持架磨损原因分析[J]. 轴承, 2019(6): 31-32+37.
FAN J, HAN Q L, LIU C, et al. Analysis on wear of axle box bearing cages for high speed EMU[J]. Bearing, 2019(6): 31-32+37.
- [37] 许红江, 张隶新, 张庆华, 等. 高速动车组轴箱轴承温升原因探究[J]. 铁道车辆, 2020, 58(9): 29-32+6.
XU H J, ZHANG L X, ZHANG Q H, et al. Exploring the causes to temperature rise of axle box bearings for high speed multiple units[J]. Rolling Stock, 2020, 58(9): 29-32+6.
- [38] 韩庆利, 李国栋, 赵文学. 高速动车组轴箱轴承温升故障分析[J]. 机车电传动, 2017(1): 115-117.
HAN Q L, LI G D, ZHAO X W. Analysis on temperature rise failure of axle box bearing of high speed EMU[J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(1): 115-117.
- [39] GUO R, LEI X, ZHANG D, et al. Case study: The effect of running distance on the microstructure and properties of railroad axle bearings[J]. Wear, 2018, 394-395: 159-165.
- [40] GUO R, YANG G, LI Z, et al. Statistical analysis on rolling contact fatigue in railroad axle bearing steel[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Material & Structures, 2019, 42: 651-663.
- [41] 查浩, 任尊松, 徐宁. 高速动车组轴箱轴承振动特性[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 144-151.
ZHA H, REN Z S, XU N. Vibration performance of high-speed vehicles with axle box bearing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 144-151.
- [42] 蔡森, 周璇, 孔奎, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的高铁轴承动态仿真[J]. 轴承, 2017(10): 5-9.
CAI S, ZHOU D, KONG K, et al. Dynamic simulation of high-speed railway bearings based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Bearing, 2017(10): 5-9.
- [43] 查浩, 任尊松, 徐宁. 高速动车组轴箱轴承滚道载荷特性研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(4): 135-142.
ZHA H, REN Z S, XU N. Load characteristics of axle box

- bearing raceway of high-speed EMU[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(4): 135-142.
- [44] 查浩, 任尊松, 薛蕊, 等. 高速动车组轴箱轴承累积损伤与疲劳寿命研究[J]. *铁道学报*, 2018, 40(10): 30-35.
ZHA H, REN Z S, XUE R, et al. Study on cumulative damage and fatigue life of axle box bearings in high-speed EMU[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2018, 40(10): 30-35.
- [45] WANG Z, ZHANG W, YIN Z, et al. Effect of vehicle vibration environment of high-speed train on dynamic performance of axle box bearing[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2019, 57(4): 543-563.
- [46] WANG Z, SONG Y, YIN Z, et al. Random response analysis of axle-box bearing of a high-speed train excited by crosswinds and track irregularities[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019(99): 10607-10617.
- [47] WANG Z, ALLEN P, MEI G, et al. Influence of wheel-polygonal wear on the dynamic forces within the axle-box bearing of a high-speed train[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2020, 58(9): 1385-1406.
- [48] 王超. 高铁圆锥滚子轴承滚子与滚道间的接触分析[J]. *北京交通大学学报*, 2017, 41(4): 91-97.
WANG C. Contact analysis between roller and raceway of tapered roller bearing of high-speed rail[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017, 41(4): 91-97.
- [49] 赵方伟. 高速动车组轴箱轴承接触模型的建立与分析[J]. *轴承*, 2019(3): 1-6.
ZHAO F W. Establishment and analysis on contact model of axle box bearings for high speed EMU[J]. *Bearing*, 2019(3): 1-6.
- [50] HOU Y, WANG X, QUE H, et al. Variation in contact load at the most loaded position of the outer raceway of a bearing in high-speed train gearbox[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2021, 37(11): 1683-1695.
- [51] 杨天蕴, 丁千, 郭涛, 等. 动车组转向架轴承局部损伤振动特性分析[J]. *振动. 测试与诊断*, 2016, 36(4): 665-673+808.
YANG T Y, DING Q, GUO T, et al. Vibration characteristics analysis of localized fault on emu train bogie bearing[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(4): 665-673+808.
- [52] 杜志伟, 甄广川, 田冉, 等. 高速动车组轴箱轴承故障动态特性仿真分析[J]. *铁道技术监督*, 2021, 49(9): 31-36+41.
DU Z W, ZHEN G C, TIAN R, et al. Simulation analysis on dynamic characteristics of axle box bearing failure of high-speed EMU[J]. *Railway Quality Control*, 2021, 49(9): 31-36+41.
- [53] 汤武初, 陈光东, 孙玉超, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 高速列车轴箱轴承动力学分析与故障模拟[J]. *现代机械*, 2015(5): 5-10.
TANG W C, CHEN G D, SUN Y C, et al. Dynamic research and fault simulation on high-speed railway axle box bearings based on ANSYS/LS-DYNA[J]. *Modern Manufacturing*, 2015(5): 5-10.
- [54] 张火车. 高速列车轴箱轴承故障仿真及试验研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
ZHANG H C. Fault simulation and experimental study for axle box bearing of high speed EMUs[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [55] LIU J. A dynamic modelling method of a rotor-roller bearing-housing system with a localized fault including the additional excitation zone[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 469: 115144.
- [56] LIU J, DU S. Dynamic analysis of a high-speed railway train with the defective axle bearing[J]. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 2020, 25(4): 525-531.
- [57] LIU J, LI X, YU W. Vibration analysis of the axle bearings considering the combined errors for a high-speed train[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part K-Journal of Multi-body Dynamics*, 2020, 234(3): 481-497.
- [58] 刘国云, 曾京, 戴焕云, 等. 考虑轴箱轴承表面波纹度的高速车辆振动特性分析[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(14): 147-156.
LIU G Y, ZENG J, DAI H Y, et al. Vibration performance of high-speed vehicles under axle box bearing surface waviness[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(14): 147-156.
- [59] 刘国云, 曾京, 罗仁, 等. 轴箱轴承缺陷状态下的高速车辆振动特性分析[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(9): 37-42+51.
LIU G Y, ZENG J, LUO R, et al. Vibration performance of high-speed vehicles with axle box bearing defects[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(9): 37-42+51.
- [60] 汤武初, 王敏杰, 陈光东, 等. 高速列车故障轴箱轴承的温度分布研究[J]. *铁道学报*, 2016, 38(7): 50-56.
TANG W C, WANG M J, CHEN G D, et al. Analysis on temperature distribution of failure axle box bearings of high speed train[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(7): 50-56.
- [61] 胡飞. 列车轴承故障轨边声学检测系统关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
Hu F. Research on the key techniques of the wayside acoustic defective train bearing detector system[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
- [62] European Committee for Standardization. BS EN 12082: 2017 railway applications-axleboxes-performance testing[S]//Technical Committee CEN/TC 256. British: BSI Standards Publication, 2017.
- [63] BAMBARA J, 吴礼本. 美国热轴探测器的的发展简况[J]. *国外铁道车辆*, 1990(4): 8.
BAMBARA J, WU L B. Development of hot box detector in USA[J]. *Foreign Rolling Stock*, 1990(4): 8.
- [64] 易彩. 高速列车轮对轴承状态表征与故障诊断方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
YI C. State characterization and fault diagnosis research on wheel bearing of high-speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [65] SOUTHERN C, RENNISON D, KOPKE U. RailBAM-An advanced bearing acoustic monitor: initial operational performance results[C]//CORE 2004: New Horizons for Rail. Darwin, NT: Railway Technical Society of Australasia, 2004: 1-7.

- [66] 聂晔. 动车组转向架轴承可靠性分析与故障诊断的技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Nie Y. Technical research on reliability analysis and fault diagnosis of bearings for bogie of EMUs[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [67] OWEN R. No bearing on acoustics? Think again[J]. *Acoustics Bulletin*, 2014, 39(4): 35-37.
- [68] HEINZ KURZ, 阎锋, 李国平. 为德国联邦铁路制造的一代电动车组——ICE3 和 ICE-T[J]. *国外铁道车辆*, 2001(3): 25-31+35.
HEINZ KURZ, YAN F, LI G P. ICE 3 and ICE-T — A new generation of emus for german federal railway[J]. *Foreign Rolling Stock*, 2001(3): 25-31+35.
- [69] 林能祥. 声音诊断技术在铁路客车滚动轴承检修中的应用[J]. *海峡科学*, 2015(3): 31-32.
LIN N X. Application of sound diagnosis technology in rolling bearing maintenance of railway passenger cars[J]. *Straits Science*, 2015(3): 31-32.
- [70] 雷亚国. 混合智能技术及其在故障诊断中的应用研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2007.
LEI Y G. Research on hybrid intelligent technique and its applications in fault diagnosis[D]. Xian: Xian Jiaotong University, 2007.
- [71] ZHANG Z Q, LI G L, WANG H D, et al. Investigation of rolling contact fatigue damage process of the coating by acoustics emission and vibration signals[J]. *Tribology International*, 2012, 47: 25-31.
- [72] JANTUNEN E. How to diagnose the wear of roiling element bearings based on indirect condition monitoring methods[J]. *International Journal of Comadem*, 2006, 9(3): 24-38.
- [73] HARVEY T J, WOOD R, POWRIE H. Electrostatic wear monitoring of rolling element bearings[J]. *Wear*, 2007, 263(7-12): 1492-1501.
- [74] DJEBALA A, OUELAA N, HAMZAOUI N. Detection of rolling bearing defects using discrete wavelet analysis[J]. *Meccanica*, 2008, 43(3): 339-348.
- [75] ZHANG Q, DING J, ZHAO W. An adaptive boundary determination method for empirical wavelet transform and its application in wheelset-bearing fault detection in high-speed trains[J]. *Measurement*, 2021, 171(1): 108746.
- [76] 韩俊臣, 崔利通, 李晓峰, 等. 动车组轴承异响故障诊断与研究[J]. *机车电传动*, 2020, (1): 149-153.
HAN J C, CUI L T, LI X F, et al. Diagnosis and study on abnormal noise of emus bearing[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2020, (1): 149-153.
- [77] 李佳睿. 动车组轴箱轴承早期故障诊断算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LI J R. Research on early fault diagnosis algorithm for the bearings of the axle box of EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [78] 李佳睿, 岳建海. 基于 HHT 及共振解调方法的动车组走行部轴箱轴承故障诊断算法[J]. *北京交通大学学报*, 2017, 41(4): 85-90.
LI J R, YUE J H. Fault diagnosis algorithm for the axle box bearing of walking unit in EMU based on HHT and resonance demodulation method[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2017, 41(4): 85-90.
- [79] ZHUANG Z, DING J, TAN A C, et al. Fault detection of high-speed train wheelset bearing based on impulse-envelope manifold[J]. *Shock and Vibration*, 2017, 2017: 2104720.
- [80] 岳建海, 林恩田. 基于 EMD 的动车组滚动轴承故障诊断的研究[C]// 铁路车辆轮轴技术交流会论文集. 大连: [s.n.], 2016: 259-264.
YUE J H, LIN E T. Research on emd-based fault diagnosis of rolling bearings in EMUs[C]// *Proceedings of the Railway Vehicle Wheel Axle Technology Conference*. Dalian: [s.n.], 2016: 259-264.
- [81] 刘良峰. 动车组机械传动系统轴承振动信号分析与故障诊断[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LIU L F. Electric multiple unit mechanical transmission bearing vibration signal analysis and fault diagnosis[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [82] 李欢欢. 动车组机械传动系统轴承故障检测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
LI H H. Study on bearing fault detection method of EMU mechanical transmission system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [83] 韩威. 基于 EEMD 和小波包的动车组轴箱轴承故障诊断系统的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
HAN W. Research on fault diagnosis system of EMU bearing based on EEMD and wavelet packet[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [84] 陈胜男. 基于深度学习的动车组关键部件故障分类方法的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
CHEN S N. Research on fault classification method for key components of EMU based on deep learning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [85] 武明泽. 基于小波包分解和 FPA-SVM 的动车组轴箱轴承故障诊断研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
WU M Z. Research on fault diagnosis of EMU axle box bearing based on wavelet packet decomposition and FPA-SVM[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [86] 余忠潇. 基于 LCD 和模糊聚类的滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2020.
YU Z X. Research on fault diagnosis method of rolling bearing based on LCD and fuzzy clustering[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2020.
- [87] 杨帅. 基于模态分解技术的轴承故障诊断方法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
YANG S. Research on bearing fault diagnosis based on modal decomposition technology[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [88] 郭贝贝. 基于变分模态分解与熵值的滚动轴承故障诊断研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
GUO B B. Research on rolling bearing fault diagnosis based on variational mode decomposition and entropy[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [89] 张建财. 基于轨道交通列车滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
ZHANG J C. Research on fault diagnosis method for rolling bearings of rail transit trains[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.

- [90] 潘碧琳. 基于优化共振稀疏分解和变分模式分解的动车组轴箱轴承故障诊断方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2021.
PAN B L. Research on fault diagnosis method of EMU axle box bearing based on optimized RSSD and VMD[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2021.
- [91] 黄晨光. 基于奇异值特征提取的高速列车轴箱轴承故障诊断方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
HUANG C G. Investigation of fault diagnosis based on singular value feature extraction for high speed train axle box bearing[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong university, 2019.
- [92] 张海峰. 基于改进峭度图的动车组转向架轴承故障诊断方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
ZHANG H F. Research on fault diagnosis of EMU bogie bearing based on improved Kurtogram[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [93] 彭畅, 李海涛, 李宁, 等. 基于谱峭度图和递归定量分析的动车组轴箱轴承故障识别与分类方法研究[C]// 铁路车辆轮轴技术交流会论文集. 大连: [s.n.], 2016: 253-258.
PENG C, LI H T, LI N, et al. Research on fault identification and classification method for axle box bearings of emus based on spectral kurtosis graph and recursive quantitative analysis[C]// Proceedings of the Railway Vehicle Wheel Axle Technology Conference. Dalian: [s.n.], 2016: 253-258.
- [94] 葛洪胜. 基于共振解调法和声发射法的圆锥滚子轴承故障分析研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2020.
GE H S. Research on fault analysis of tapered roller bearings and bearings based on resonance demodulation and acoustic emission[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2020.
- [95] 刘文朋, 杨绍普, 李强, 等. 一种自适应共振解调方法及其在铁路轴承故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2021, 40(18): 86-93.
LIU W M, YANG S P, LI Q, et al. Adaptive resonance demodulation method and its application in the fault diagnosis of railway bearings[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(18): 86-93.
- [96] 李伟. 基于最小熵反褶积的动车组牵引电动机轴承故障诊断方法[J]. 轴承, 2021(12): 56-60+64.
LI W. Fault diagnosis method for EMU traction motor bearings based on minimum entropy deconvolution[J]. Bearing, 2021(12): 56-60+64.
- [97] CHENG Y, WANG Z, ZHANG W. A novel condition-monitoring method for axle-box bearings of high-speed trains using temperature sensor signals[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(1): 205-213.
- [98] DENG F, LIU C, LIU Y, et al. A hybrid svd-based denoising and self-adaptive tmsst for high-speed train axle bearing fault detection[J]. *Sensors*, 2021, 21(18): 6025.
- [99] DING J. Fault detection of a wheelset bearing in a high-speed train using the shock-response convolutional sparse-coding technique[J]. *Measurement*, 2018, 117: 108-124.
- [100] HOU D, QI H, LUO H, et al. Comparative study on the use of acoustic emission and vibration analyses for the bearing fault diagnosis of high-speed trains[J]. *Structural Health Monitoring-An International Journal*, 2022, 21(4): 1518-1540.
- [101] 舒敏. 动车组轴箱轴承健康状态评估与趋势分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
SHU M. Health assessment and trend analysis of axle box bearing of high speed EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [102] 杨帅, 郝如江. 基于 CEEMDAN-SVM 的高铁轴承故障诊断研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2021, 34(2): 116-122.
YANG S, HE R J. Research on high speed rail bearing fault diagnosis based on CEEMDAN-SVM[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition), 2021, 34(2): 116-122.
- [103] 邢成梁. 动车组转向架健康评估及故障诊断[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
XING C L. EMU bogie health assessment and fault diagnosis[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
- [104] 张宇. 高速列车轴承故障诊断系统的研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2017.
ZHANG Y. Study on fault diagnosis system of high-speed train bearings[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2017.
- [105] 邸伟强. 高速列车自动化生产线智能监测技术—滚动轴承故障诊断方法的研究与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
DI W Q. Intelligent monitoring technology for high speed train automatic production line—research and realization of rolling bearing fault diagnosis method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [106] 陈耀华. 面向高速动车组牵引电机轴承故障预警的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
CHEN Y H. Research on bearing fault early warning of traction motor for high speed EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [107] 赵敬娇. 基于 LSTM 的轴承故障诊断方法研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
ZHAO J J. Research on bearing fault diagnosis method based on LSTM[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [108] 刘冠男, 常振臣, 高明亮, 等. 基于长短期记忆网络的动车组轴箱轴承故障诊断预测模型研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 86-91.
LIU G N, CHANG Z C, GAO M L, et al. Fault diagnosis model for EMU bogie bearing based on LSTM[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 86-91.
- [109] 荆云建. 基于改进型卷积神经网络的动车组滚动轴承故障诊断方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
JIN Y J. Research on fault diagnosis method for rolling bearing of EMU based on improved convolutional neural network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [110] 周红全. 基于深度学习的动车组轴箱轴承故障诊断与系统开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
ZHOU Q H. Fault diagnosis and system development of axle box bearing of EMU based on deep learning[D].

- Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [111] LUO H, BO L, PENG C, et al. Fault diagnosis for high-speed train axle-box bearing using simplified shallow information fusion convolutional neural network[J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4930.
- [112] PENG D, LIU Z, WANG H, et al. A novel deeper one-dimensional CNN with residual learning for fault diagnosis of wheelset bearings in high-speed trains[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 10278-10293.
- [113] ZOU Y, ZHANG Y, MAO H. Fault diagnosis on the bearing of traction motor in high-speed trains based on deep learning[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2021, 60(1): 1209-1219.
- [114] 王晓东. 基于迁移学习的动车组轴承故障诊断方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
WANG X D. Research on fault diagnosis of EMU bearings based on transfer learning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [115] 施文锐. 基于深度学习的滚动轴承早期故障诊断研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.
SHI W R. Research on early fault diagnosis of rolling bearings based on deep learning[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [116] 李永健. 高速列车轴箱轴承智能故障诊断技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
LI Y J. Research on intelligent fault diagnosis technique of axle box bearing of high speed train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [117] 徐立成. 基于 shapelets 学习算法的动车组轴箱轴承早期故障识别方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
XU L C. Research on the method of early fault recognition of axlebox bearing of EMU based on shapelets learning algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [118] 宋志坤, 徐立成, 胡晓依, 等. 基于改进型 shapelets 算法的动车组轴箱轴承故障诊断方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(2): 66-74.
SONG Z K, XU L C, HU X Y, et al. Research on fault diagnosis method of axle box bearing of EMU based on improved shapelets algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(2): 66-74.
- [119] LUNDBERG G, PALMGREN A. Dynamic capacity of rolling bearings[J]. *Acta Polytechnica. Mechanical Engineering Series*, 1947, 1(3): 5-50.
- [120] ISO Technical Committees. ISO 281 method of calculating dynamic load ratings and rating life of rolling bearings[S]// Technical Committee ISO/TC 4. Geneva: International Organization for Standardization, 2007.
- [121] 刘德昆, 李强, 王曦, 等. 动车组轴箱轴承基于实测载荷的寿命预测方法[J]. *机械工程学报*, 2016, 52(22): 45-54.
LIU D K, LI Q, WANG X, et al. Life prediction method for EMU axle box bearings based on actual measured loadings[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(22): 45-54.
- [122] 李震, 商慧玲, 张旭, 等. 高速动车轴箱轴承疲劳寿命计算方法[J]. *铁道学报*, 2020, 42(3): 55-62.
LI Z, SHANG H L, ZHANG X, et al. Fatigue life calculation method for axle box bearing of high-speed train[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(3): 55-62.
- [123] 杨晨, 池茂儒, 吴兴文, 等. 考虑车轮多边形演化的动车组轴箱轴承载荷及寿命分析[EB/OL][2022-03-21] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20220318.0954.002.html>.
YANG C, CHI M R, WU X W, et al. Analysis of load and life of EMU axle box bearing considering wheel polygonization evolution [EB/OL][2022-03-21] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1349.TB.20220318.0954.002.html>.
- [124] 韩光旭, 周殿买, 黄志辉. 高速变轨距转向架轴箱轴承选型及寿命评估[J]. *机车电传动*, 2018(4): 6-9.
HAN G X, ZHOU D M, HUANG Z H. Type selection and life assessment of high-speed gauge-changeable bogie axle box bearing[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2018(4): 6-9.
- [125] 李晓阳. 动车组牵引电机轴承游隙对载荷的影响及轴承寿命分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
LI X Y. Influence of clearance on bearing load and analysis of bearing life of CRH traction motor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [126] 郭正松. 高铁轴承承载能力与疲劳寿命研究[D]. 上海: 上海应用技术学院, 2015.
GUO Z S. Research on bearing capacity and fatigue life of high-speed railway bearings[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2015.
- [127] 黄运生. 波动冲击载荷下高速列车轴箱轴承疲劳寿命研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2017.
HUANG Y S. Research on fatigue life of high-speed train axle-box bearing under fluctuant impact load[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [128] 郑静. 高速列车轴箱轴承疲劳寿命研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
ZHENG J. Study on the fatigue life of the axle box bearing for high speed train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [129] 慕鑫宇. 动车组轴箱轴承保持架振动特性与寿命分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
MU X Y. Vibration performance and life analysis of axle box bearing cage for the EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [130] 王光斌. 高铁牵引电机圆柱滚子轴承保持架寿命分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2019.
WANG G B. Fatigue life analysis of cylinder roller bearing cage for the high-speed rail traction engine[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019.
- [131] LIU D, LI Q, HU W, et al. Fatigue life prediction of the axle box bearings for high-speed trains[J]. *Dyna*, 2017, 92(5): 538-544.
- [132] 杨凯, 王永武, 张钢, 等. 非金属夹杂物对高铁轴承载荷寿命的影响[J]. *计量与测试技术*, 2019, 46(2): 24-28.
YANG K, WANG Y W, ZHANG G, et al. Effect of non-

- metallic inclusions on the fatigue life of high-speed railway bearing[J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2019, 46(2): 24-28.
- [133] 杨凯, 王永武, 马灿阳, 等. 结构设计参数对高铁轴承疲劳寿命的影响[J]. *工业控制计算机*, 2019, 32(5): 108-110+113.
YANG K, WANG Y W, MA C Y, et al. Effect of structural design parameters on fatigue life of high-speed railway bearing[J]. *Industrial Control Computer*, 2019, 32(5): 108-110+113.
- [134] 蔡森, 杨凯, 王永武, 等. 基于接触应力的高铁轴承疲劳寿命预测[J]. *工业控制计算机*, 2018, 31(8): 88-89+92.
CAI S, YANG K, WANG Y W, et al. Prediction of fatigue life of high speed railway bearing based on contact stress[J]. *Industrial Control Computer*, 2018, 31(8): 88-89+92.
- [135] 李永华, 智鹏鹏, 宫琦, 等. 高速动车组轴箱轴承疲劳可靠性分析[J]. *计算机仿真*, 2018, 35(3): 88-92.
LI Y H, ZHI P P, GONG Q, et al. Fatigue reliability analysis for axle box bearing of high speed EMU[J]. *Computer Simulation*, 2018, 35(3): 88-92.
- [136] 李永华, 智鹏鹏, 陈秉智. 动车组轴箱轴承模糊可靠性寿命评估[J]. *大连交通大学学报*, 2017, 38(4): 104-109+115.
LI Y H, ZHI P P, CHEN B Z. Effect of modification on dynamic characteristics of locomotive gear system[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2017, 38(4): 104-109+115.
- [137] 刘嘉庆. 基于多源信息融合的高铁轴承疲劳寿命可靠性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
LIU J Q. Fatigue life reliability research of high-speed railway bearing based on multi-source information fusion[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [138] 袁韬. 动车组轴箱轴承剩余寿命预测方法研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
YUAN T. Study on prediction method of remaining useful life for axle box bearings in EMU[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [139] 高明亮, 赵明, 高珊, 等. 动车组轴箱轴承在线监测可靠性评估模型研究[J]. *城市轨道交通研究*, 2022, 25(2): 22-25.
GAO M L, ZHAO M, GAO S, et al. Online reliability evaluation model of emu axle box bearing[J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(2): 22-25.
- [140] XU G, HOU D, QI H, et al. High-speed train wheel set bearing fault diagnosis and prognostics: A new prognostic model based on extendable useful life[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 107050.
- [141] 王健. 动车组牵引电机风机轴承剩余寿命研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WANG J. Research on remaining life of fan bearing of electrical multiple unit traction motor[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [142] 曾宇. 滚动轴承多域退化表征指标提取及寿命预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZENG Y. Research on extraction of multi-domain degradation characterization indicators and life prediction of rolling bearing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [143] 曲松. 动车组牵引电机中风机轴承寿命的预测评估方法[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
QU S. Prediction and assessment method of fan bearing life in traction motor of EMU[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [144] 牛齐明, 刘峰, 张奕黄. 基于PHM的高速铁路牵引电机滚动轴承健康状态预测[J]. *铁道学报*, 2020, 42(7): 95-101.
NIU Q M, LIU F, ZHANG Y H. Health condition prediction of rolling element bearings of high-speed train traction motor based on PHM[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2020, 42(7): 95-101.
- [145] 何茂. 基于改进高斯混合模型与优化RVM的滚动轴承剩余寿命预测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
HE M. Research on bearing remaining useful life prediction method based on improved gaussian mix model and optimal relevance vector machine[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [146] 庞碧涛, 董美娟, 徐玲玲. 高速铁路轴箱轴承试验技术研究[C]// 铁路车辆轮轴技术交流会论文集. 大连: [s.n.], 2016: 199-203.
PANG B T, DONG M J, XU L L. Research on testing technology of high speed railway axle box bearings[C]// Proceedings of the Railway Vehicle Wheel Axle Technology Conference. Dalian: [s.n.], 2016: 199-203.
- [147] 牛治慧. 高速列车轴箱系统振动特性及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
NIU Z H. Vibration characteristics and experimental study of axle box system of high speed train[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [148] 赵方伟, 张弘, 张澎湃, 等. 基于实测载荷的动车组轴箱轴承试验谱编制研究[C]// 2019铁道车辆轮轴学术交流会论文集. 北京: [s.n.], 2019: 255-258.
ZHAO F W, ZHANG H, ZHANG P P, et al. Research on compilation of test spectrum for axle box bearings of multiple unit based on measured load[C]// Proceedings of the 2019 Academic Conference on Railway Vehicle Axles. Beijing: [s.n.], 2019: 255-258.

编辑 刘飞阳