



滚动轴承保持架动态特性 及疲劳寿命的分析方法

戴碧君^{1,2}, 武柯丞³, 刘佳^{1,2}, 关国华^{1,2}, 李伟^{1,2}, 任智军^{2,4}

(1. 中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502;

2. 轨道交通牵引电机山西省重点实验室, 山西 永济 044502;

3. 西安交通大学 现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;

4. 西安交通大学 前沿科学技术研究院, 陕西 西安 710049)

摘要: 滚动轴承作为轨道交通装备的核心基础部件, 其服役性能直接影响装备的运行安全。保持架作为滚动轴承内部的薄弱零部件, 在复杂苛刻的交变激励工况下极易发生变形、磨损与疲劳断裂, 是诱发轴承整体失效的主要原因之一。为了有效降低保持架的失效风险并指导其正向优化设计, 文章对滚动轴承保持架动态特性分析方法进行了全面且系统的综述。首先, 梳理了滚动轴承整体动力学特性分析方法的演进历程, 指出了其从自主编程数值求解向融合二次开发技术的混合建模发展的趋势。其次, 重点探讨了保持架的动态服役特性, 详细归纳了保持架在不同润滑状态及复杂变工况下(变速、启停等)的碰撞特性与运动稳定性演变规律, 并系统总结了相关的动态性能测试方法。再次, 回顾了保持架疲劳寿命评估方法从早期的物理断口溯源向依托动力学与有限元联合仿真的定量预测方向的转变。最后, 总结了现有研究在应对极端交变激励及多参数同步测量方面的不足, 并提出未来亟须在复杂变工况下的高保真耦合动力学机理、高抗干扰无损同步动态测试技术, 以及基于瞬态强冲击的动态疲劳损伤预估模型等方向寻求突破。文章研究成果可为高性能滚动轴承保持架的抗疲劳设计与全生命周期运维提供参考。

关键词: 轨道交通; 滚动轴承; 保持架; 动态特性; 疲劳寿命; 有限元法

中图分类号: TH133.33; U260.331⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2026)01-0001-12

0 引言

铁路是国民经济的“大动脉”, 在我国经济社会发展中的地位和作用至关重要^[1]。随着高速铁路建设成为国家重大发展战略, 我国已全面迈入“高铁时代”^[2]。滚动轴承作为轨道交通装备的核心基础零部件, 承担着传递整车重量和动力的重任, 是保障列车运行平稳性的关键基础件。然而, 列车在实际服役过程中的工况条件复杂且苛刻, 轴承不仅要承受垂向载荷(整车

重量), 还需应对启停阶段的速度突变、过弯时的变轴向载荷、不同运营情况引起的径向载荷波动, 以及行驶中因车轮磨损、扁疤等产生的强烈冲击载荷。在这些极端且剧烈交变的激励作用下, 轴承内部组件间的接触状态极其复杂, 严重影响行车安全。

保持架作为滚动轴承的核心部件, 主要功能是隔离并引导滚动体沿滚道正确运动。然而, 保持架在结构上属于轴承的薄弱环节, 在长期复杂交变载荷作用下, 易出现变形、磨损乃至断裂等失效形式, 是导致轴承整体故障的主要诱因之一。相关统计表明, 在高

基金项目: 山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202501110101009)

第一作者: 戴碧君, 男, 硕士, 总工程师, 正高级工程师, 主要从事电力牵引交流传动等方面的技术研究。

通信作者: 李伟, 男, 正高级工程师, 主要从事牵引电机轴承应用技术研究; E-mail: 156789934@163.com

引用格式: 戴碧君, 武柯丞, 刘佳, 等. 滚动轴承保持架动态特性及疲劳寿命的分析方法[J]. 机车电传动, 2026(1): 1-12. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.001.

Citation: DAI Bijun, WU Kecheng, LIU Jia, et al. Analysis methods for dynamic characteristics and fatigue life of rolling bearing cages[J]. Electric drive for locomotives, 2026(1): 1-12. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.01.001.

铁轴承的所有失效案例中,由保持架疲劳失效引发的故障占比高达20%。保持架一旦发生疲劳断裂,将导致滚动体失去约束,造成轴承提前失效。这不仅大幅增加了机车维护成本,而且可能对轨道交通的行车安全构成严重威胁。因此,针对保持架服役性能及动态特性进行深入分析,已成为保障轨道交通行车安全的重要基础研究方向^[3]。

为了降低保持架的失效风险、指导其正向优化设计,国内外学者针对保持架的动态特性与服役行为开展了大量卓有成效的研究。在动力学建模与分析方法上,相关技术经历了从自主编程数值求解到商业仿真软件应用,再到结合二次开发接口的混合建模,这为精确考虑润滑效应等复杂接触条件提供了日益完善的支撑;在保持架动态特性分析方面,针对碰撞规律与运动稳定性的研究逐渐从干摩擦、理想稳定工况向混合润滑、复杂变工况(如启停、轨道激扰等)深入,同时转速监测、质心轨迹追踪等非侵入式动态测试技术的进步也为理论仿真提供了关键的验证手段;在保持架疲劳寿命分析领域,研究方法已由早期的物理断口试验定性分析,迈向依托动力学与有限元联合仿真的定量预测阶段,实现了对极端冲击工况下保持架失效机制的深度解析。

为系统梳理该领域的研究脉络,本文开展了文献检索与分析,对滚动轴承保持架动态特性与疲劳寿命分析方法进行了全面综述。首先,对滚动轴承整体动力学特性分析方法的发展进行回顾;其次,重点探讨保持架的动态特性分析方法,包括其碰撞特性与运动稳定性的演变规律,以及对应的动态测试方法;再次,对保持架疲劳寿命分析与预测技术的发展进行总结;最后,针对该领域的未来研究趋势进行展望,以期为轨道交通装备高性能滚动轴承的自主化设计与性能提升提供参考。

1 滚动轴承动力学特性分析方法

保持架是滚动轴承核心组成元件之一,与滚动体和引导套圈之间均有接触,因此无法单独分析其动态性能。为准确评估保持架的服役状态,必须将其置于整体轴承系统中,建立多种轴承力学模型进行求解分析。国内外学者针对轴承各组件间的相互作用力模型展开了大量的研究与改进,这为后续开展保持架特定的动态性能分析奠定了基础。总体而言,动态特性分析经历了从自主化编程,到商业软件仿真,再到融合二次开发技术的混合建模的发展历程。

1.1 基于自主编程的数值分析方法

滚动轴承组件动态特性分析最早从自主化编程起步。为了确切表达轴承的实际接触条件,文献[4]构建

了保持架的6自由度动力学模型与微分方程,并采用4阶龙格-库塔法求解,但该模型的局限在于简化了润滑对轴承接触状态的影响。在此基础上,文献[5-7]的研究改进了球轴承动力学模型,开发了轴承动力学分析软件ADORE,并基于该软件完成了轴承保持架涡动数值模拟与瞬态碰撞特性的分析与验证;尽管该模型采用了赫兹(Hertz)接触计算,但仍简化了润滑剂黏滞阻尼和材料阻尼的影响。与之类似,文献[8]通过自主编程建立了圆锥滚子轴承的拟动力学模型,并就轴承载荷分布规律及保持架打滑现象进行了分析。

国内学者在滚动轴承动力学模型领域也取得了重要突破,针对接触力学与润滑机制进行了大量扩展。文献[9]基于经典赫兹接触理论构建了圆锥滚子轴承的数值计算模型,系统性分析了不同载荷参数对轴承服役性能的影响规律。文献[10]结合弹性流体动力润滑理论改进了数值分析模型,剖析了油膜压力分布特性以及轴承组件间运动副的动态耦合作用机制,但由于对保持架力学模型进行了简化处理,难以准确分析其动态载荷分布特性。文献[11]等基于接触力学理论构建了双列圆锥滚子轴承的拟动力学分析模型,探究了不同结构参数下滚动体与滚道的接触特性,但该模型未考虑保持架与滚动体的碰撞问题。在摩擦与碰撞机理的细化研究中,文献[12]建立了考虑润滑油黏滞阻力和油膜阻尼的动力学模型,研究了高速轻载工况下的滚动体打滑特性;文献[13]建立了二维圆柱轴承动力学模型,该模型考虑了轴承内部间隙,通过线弹簧理论分析了滚子与保持架之间的碰撞力,并揭示了保持架打滑现象的产生机理;文献[14]建立了考虑滚子倾斜、偏移以及接触润滑的圆柱滚子轴承动力学模型,并开发了相应的仿真平台,平台架构如图1所示。

1.2 基于商业仿真软件的动力学分析方法

国内外在滚动轴承专用仿真软件开发方面存在显著差距。受限于国内仿真软件研究的相对滞后,学者在采用自主编程方式求解时,常面临求解算法精度不足、收敛性差等技术瓶颈,因此,广泛采用了商用仿真软件开展分析。例如,文献[15]基于ADAMS软件构建了圆锥滚子轴承的刚柔耦合动力学仿真平台,通过数值仿真系统揭示了径向-轴向联合载荷作用下保持架质心轨迹稳定性的演变规律。文献[16]在ANSYS软件中建立了双列圆锥滚子轴承不同故障类型的有限元模型,系统分析了滚道故障等对轴承服役性能的影响。文献[17]基于显式动力学分析软件LS-DYNA建立了双列圆锥滚子轴承的有限元模型,系统开展了轴承组件内部缺陷的空间分布特征对轴承振动响应及动态载荷传递特性影响规律的量化研究。

针对复杂结构与复杂工况条件下的轴承动力学性能,相关研究仍相对匮乏。文献[18]基于ABAQUS软

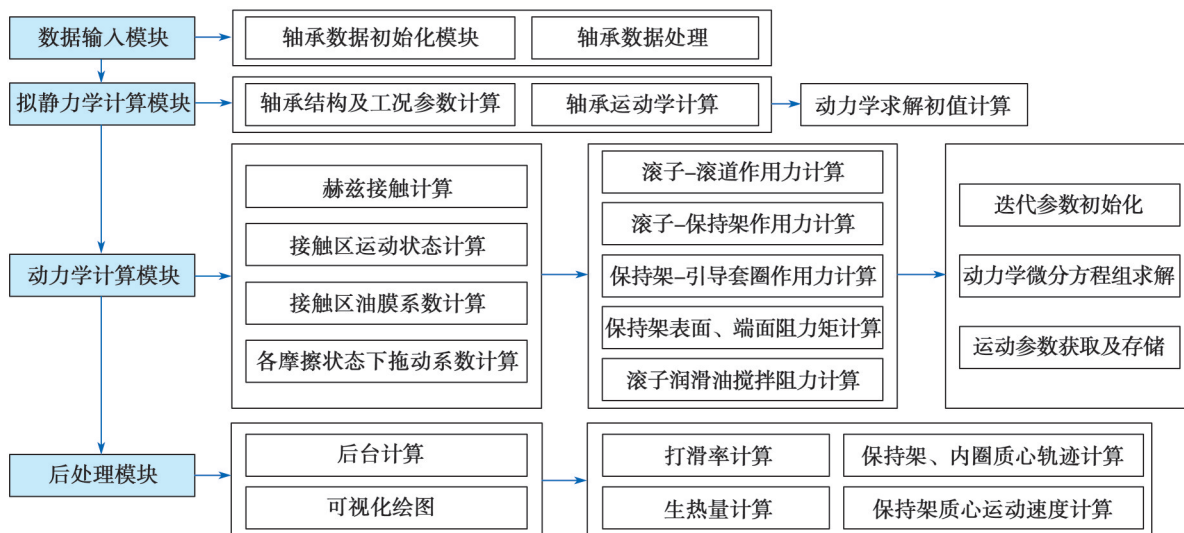


图1 圆柱滚子轴承动力学仿真平台架构

Fig. 1 Architecture of dynamics simulation platform for cylindrical roller bearings

件建立了铁路列车轴箱轴承仿真模型, 分析了内圈转速对轴承滚道接触应力的影响规律。文献[19]以高速列车轴箱轴承为研究对象, 基于赫兹线接触理论建立轴承动力学模型, 推导了运动微分方程; 进而利用多体动力学软件 SIMPACK 建立整车动力学模型, 以实测轨道谱获得的外载荷为激励, 并借助 CABA3D 软件建立轴承三维动力学模型, 对比分析了轨道不平顺对轴承内部接触力、应力及保持架稳定性的影响。文献[20]同样基于 ADAMS 建立了轴箱轴承的刚柔耦合动力学模型并分析了不同载荷下的动态特性, 但其研究并未结合高铁实际运行工况, 缺乏对复杂激励的探讨。文献[21]基于 ADAMS 平台构建了双列圆锥滚子轴承的刚柔耦合多体动力学模型, 并结合高铁运行工况进行了分析, 但该研究仅关注内外圈及滚道间的运动特性, 未对保持架的运动行为进行详细分析。

1.3 融合二次开发的混合建模方法

采用商用动力学仿真软件虽然降低了建模门槛, 但受限于固有功能模块的局限性, 难以完整、精确地模拟润滑状态等实际工况对轴承动态性能的影响。鉴于部分商用软件具备强大的二次开发功能, 众多学者开始探索将其与自主编程技术相融合的新研究路径。例如, 德国 MEGT 研究所的研究人员^[22]借助 ADAMS 二次开发接口, 采用自定义子程序改进了默认接触模型, 验证了子程序求解动力学模型的有效性。文献[23]建立了考虑滚子倾斜与歪斜的圆锥滚子轴承模型, 并基于 ADAMS 的二次开发功能, 成功开发了圆锥滚子轴承动力学分析软件。文献[24]建立了同时考虑接触变形及润滑效应的双列圆锥滚子轴承动力学计算模型, 并将其编制成子程序嵌入 ADAMS 中进行求解, 求解流程如图2所示; 还利用命令提示符 (CMD) 开发了参数化建模模块, 提高了混合建模与仿真的效率。

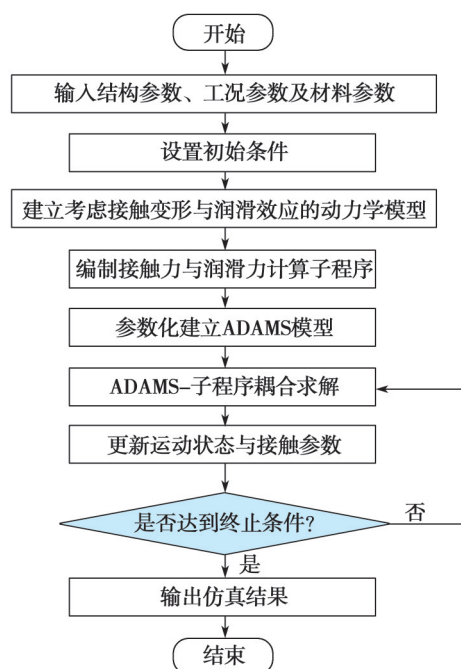


图2 双列圆锥滚子轴承动力学模型求解流程

Fig. 2 Solution process of dynamic model for double-row tapered roller bearings

1.4 小结

综上所述, 滚动轴承动力学分析方法经历了从自主编程数值求解到商业仿真软件广泛应用, 再到两者相融合的发展历程。早期学者主要依靠自主编程构建拟动力学或动力学计算模型, 该方法普遍面临求解算法精度及收敛性不足的技术瓶颈; 之后, 以 ADAMS 为代表的商业仿真软件极大降低了建模门槛, 但难以精准模拟实际复杂因素的影响; 因此, 利用商业软件二次开发接口与自主子程序相结合的混合建模方法, 已成为发展的新趋势。目前, 现有研究往往未充分结合实际运行中的极端变工况, 且大多聚焦于载荷宏观

分布或滚道接触特性,对保持架在复杂激励下的动态性能与运动机理分析相对匮乏,因此,亟须优化现有动力学模型以精确模拟实际工况,开展变工况下保持架的动态特性研究。

2 滚动轴承保持架动态特性分析方法

保持架的主要功能是隔离并引导滚动体在滚道内进行正确运动。作为滚动轴承中最薄弱的零部件之一,保持架在复杂工况下的动态服役性能已成为国内外学者的研究热点。目前,针对保持架动态特性的研究主要聚焦于以下3个方面:探讨保持架的碰撞接触特性、分析其运动稳定性机理以及研究动态性能的非侵入式测试技术。

2.1 保持架碰撞特性分析方法

保持架与滚动体间的碰撞接触规律是评估其动态性能的重要切入点。早期的碰撞特性分析多基于干摩擦假设开展。早在20世纪60年代,有学者通过搭建滚动轴承动态接触特性测试平台,系统分析了轴承中滚动体与保持架的碰撞接触行为,率先揭示了保持架冲击载荷的时频域特征及其与滚动体公转速度的关联机制^[25]。在数值求解方面,文献[4]基于MATLAB软件求解了深沟球轴承六自由度保持架动力学方程组,开展了滚动体与保持架兜孔碰撞机理研究。文献[26]通过构建球轴承多体动力学仿真模型,引入了保持架兜孔形貌参数与滚子姿态角的动态演化算法,发现保持架的运动稳定性与滚动体和保持架间的接触作用密切相关。文献[27]研究了保持架结构参数对其兜孔碰撞作用力的影响规律,如图3所示,但其模型尚未考虑流体动压力对接触特性的影响。总体而言,上述模型均是在干摩擦状态下分析轴承零部件结构参数对接触力的影响,其分析结果的准确度和可靠度受限。

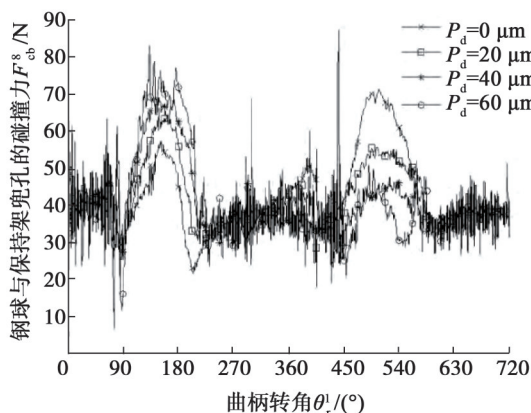


图3 不同径向游隙下钢球与保持架兜孔的碰撞力
Fig. 3 Impact force between ball and cage pocket under different radial clearances

随着润滑理论的发展,行业学者在碰撞力分析中

引入该因素。文献[28]对比分析了润滑、干摩擦接触和混合润滑3种不同状态下滚动体与保持架间的接触情况,探讨了不同保持架兜孔间隙及润滑参数下保持架接触力的变化规律。文献[29]建立了球轴承保持架动力学方程,通过数值计算分析了滚动体与保持架之间的接触状态,并在模型中充分考虑了润滑参数对保持架作用力的影响规律。此外,针对故障状态下的保持架接触作用力,文献[30]研究了保持架故障位置及故障严重程度对保持架与滚动体碰撞作用力的影响。文献[31]建立了考虑保持架故障影响的球轴承动力学模型,通过数值分析发现,故障保持架的碰撞作用力更大,会加速轴承的整体失效。在结构与受力参数影响方面,文献[32]建立了保持架的单自由度受迫振动力学模型,研究了保持架兜孔间隙及径向载荷对保持架冲击载荷的影响,结果表明间隙越大越容易造成保持架失效。文献[33]建立了保持架和滚子二自由度碰撞系统,其研究表明转速和载荷的增大均会加剧保持架与滚子之间的碰撞并导致保持架提前失效,但该模型未考虑润滑油的影响与变工况下碰撞力的变化规律。

针对变速变载等极端工况,文献[34]建立了轴承有限元分析模型,对比分析了稳定工况及变速工况下保持架的接触应力变化规律,其稳定工况下的等效应力变化曲线如图4所示。文献[35]建立了列车车辆-轨道耦合动力学模型,研究了有无轨道激励对保持架兜孔碰撞力的具体影响规律。文献[36]同样建立了轴箱轴承的车辆轨道耦合系统动力学模型,研究发现轮轨激励会导致保持架的径向碰撞变得明显,加剧其打滑效应。文献[37]基于ABAQUS软件建立了轴箱轴承有限元分析模型,系统研究了兜孔间隙与滚动体个数对保持架动态性能的影响,研究表明增大兜孔间隙虽能提高保持架运动的稳定性,但同时也增加了系统的共振风险。

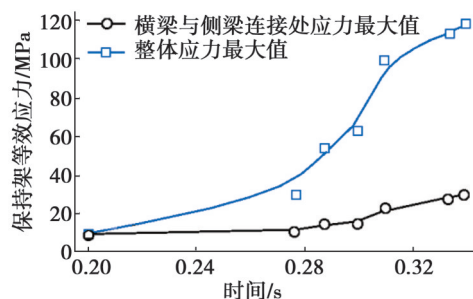


图4 保持架等效应力随时间的变化

Fig. 4 Change of effective stress in the cage over time

综上,当前学术界已高度关注保持架的碰撞接触特性,并通过建立多种动力学模型深入分析了结构及工况参数对碰撞接触特性的影响规律,但相关分析主要集中于稳定工况,无法精确解析轴承保持架在实际服役过程中的真实接触行为。

2.2 保持架运动稳定性分析方法

保持架与滚子及套圈之间复杂的相互作用力直接影响其运动稳定性, 相关稳定性指标主要为保持架质心稳定性与打滑率等。运行稳定性对轴承的整体动态特性及其疲劳寿命具有极大的影响。

对保持架稳定性的初步探索始于试验观测与基础数值仿真。1965年, 有学者^[38]率先通过搭建保持架动态性能试验台, 分析球轴承保持架的质心运动特性, 其试验结果表明保持架质心运动分为涡动和跳动等4种模式, 并揭示了保持架质心运动轨迹与轴承载荷波动之间有着较强的关联性。在理论仿真方面, 文献[4]率先建立了高速球轴承动力学分析模型, 研究保持架

的质心涡动问题, 并开发出球轴承分析软件BASDA。之后, 润滑因素被引入到稳定性分析中, 文献[39]建立了圆柱滚子轴承动力学模型, 该模型考虑了润滑对轴承组件间相互作用力的影响, 并重点探讨了润滑膜参数(黏度、膜厚)与保持架质心轨迹波动性之间的量化关系。在此基础上, 文献[40]建立了考虑润滑参数影响的圆柱滚子轴承动力学模型, 通过数值计算获取了保持架的质心运动轨迹和质心运动速度, 并创新性地提出了保持架稳定性的量化标准, 将质心瞬时速度样本标准差与均值的比值作为动态稳定性指标。其研究进一步表明, 在不同内部游隙及间隙比条件下, 保持架质心轨迹会表现出明显不同的运动形态, 如图5所示。

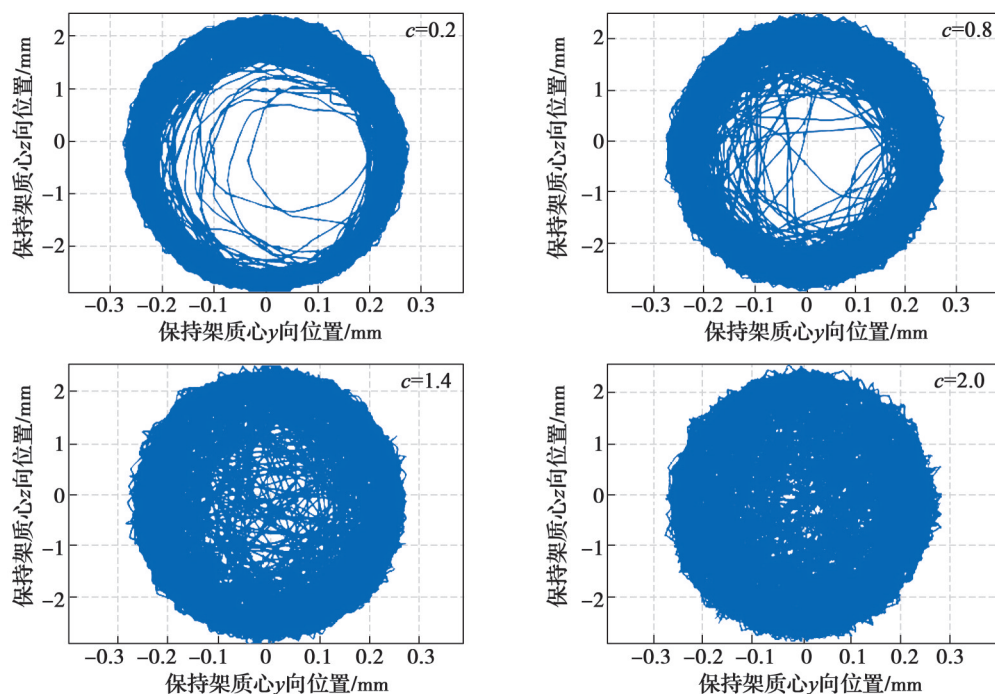


图5 20 μm 内部游隙下的保持架质心轨迹

Fig. 5 Trajectory of the cage's center of mass with a 20 μm internal clearance

随着滚动轴承理论从静力学向动力学发展, 考虑的因素愈发全面, 国内学者通过建立动力学模型在保持架稳定性研究方面取得了丰硕成果。文献[41]基于拟动力学理论构建了角接触球轴承非线性运动仿真模型, 系统分析了轴承接触角、兜孔间隙等几何参数与转速、载荷等工况参数对保持架质心轨迹波动特性的影响机制。文献[42]基于ADAMS商用仿真软件进行二次开发, 形成了圆柱滚子轴承动力学仿真平台, 并基于该平台开展了保持架打滑现象及轴承约束方式对运动稳定性影响的研究。文献[43]等构建了高速角接触球轴承多体动力学仿真模型, 系统研究了转子振动幅值、轴向载荷对保持架表面磨损深度和质心运动的具体影响。针对减速工况, 文献[44]基于ADAMS多体动力学平台, 通过刚柔耦合建模技术, 揭示了轴承减速阶段轴向力、径向力以及角加速度对打滑率以及质心运动稳

定性的影响规律。文献[45]建立了圆柱滚子轴承动力学模型, 采用GSTIFF刚性微分方程求解算法计算得到了不同轴承载荷条件和不同保持架兜孔间隙对保持架振动特性的影响, 其结果如图6和图7所示。

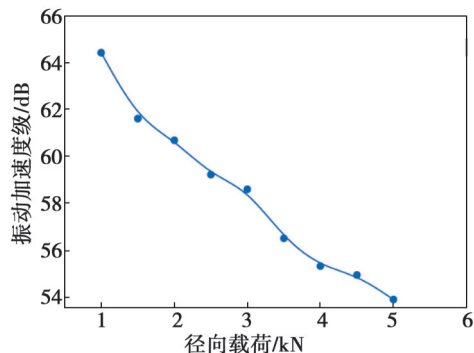


图6 径向载荷对保持架振动加速度的影响

Fig. 6 Effect of radial load on cage vibration acceleration

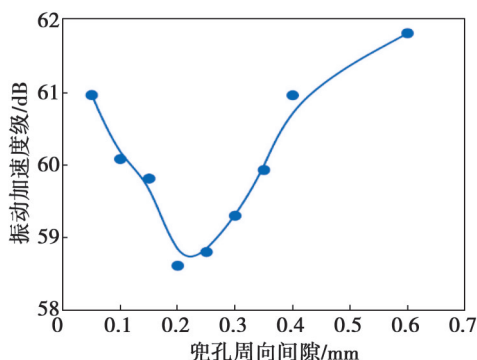


图7 兜孔周向间隙对保持架振动加速度的影响

Fig. 7 Effect of pocket circumferential clearance on cage vibration acceleration

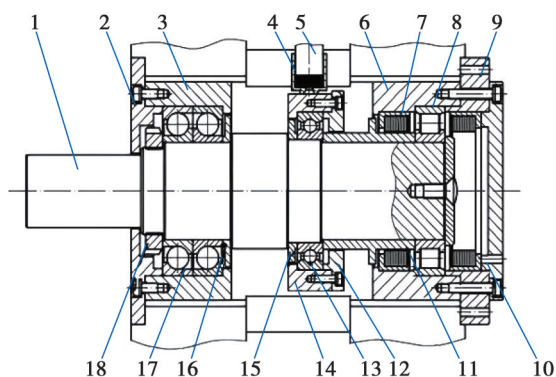
2.3 保持架动态性能测试技术

为确保仿真模型的准确性与可靠性,需将其与实际动态性能试验结果进行严格比对。然而,受限于轴承内部狭小空间及保持架复杂结构,其转速与质心轨迹的实际测量极为困难,这已成为轴承研究的技术瓶颈。

2.3.1 保持架转速测量技术

国内外学者先后对轴承保持架转速及打滑率的测量理论进行了深入探索,目前相关测量方法主要包括电磁感应法、光学与激光分析法、结构辅助位移传感法及超声检测法等。

在电磁感应测量方面,早在1965年就有学者^[46]率先利用电磁感应原理对保持架的实际转速进行了测量,该方法巧妙地将电磁感应探针与电子计数器相结合,当钢螺帽经过探针时,霍尔传感器会输出周期性脉冲序列,经高速计数模块实时量化脉冲频率即可获取实际转速。沿着这一思路,文献[47]提出一种基于电磁感应原理的同步测量方法,通过在轴承内部引入磁性滚子,精确测量轴承运行过程中产生的感应电动势,成功实现了保持架及滚动体打滑的同步监测,其采用的测试平台如图8所示。这类技术为转速测量奠定了坚实基础,



1—主轴;2—前端盖;3—支承轴承座;4—碟簧;5—加载机构;6—被测轴承座;7—线圈组件;8—圆柱滚子轴承;9—线圈安装套;10—后端盖;11—轴套;12—加载轴承盖;13—深沟球轴承;14—加载轴承座;15—加载轴承拉出环;16—支承轴承拉出环;17—角接触球轴承;18—锁紧螺母。

图8 圆柱滚子轴承测速与打滑测试平台

Fig. 8 Test platform for speed and slip of cylindrical roller bearing

基础,但其共性局限在于:轴承若长期处于电磁环境中或采用磁性滚子,易导致部件磁化并吸附金属微粒,从而增加轴承的磨损失效风险。

在光学与激光分析方面,文献[48]提出采用非接触式的脉冲法测量转速,其原理是在保持架端面粘贴黑白条纹并使用传感器进行扫描。文献[49]通过光纤发射器与接收器捕捉光源变化来计算转速。文献[50-51]提出基于光电传感器的测量方法,通过激光激发贴附在保持架端面的反光条,实现转速的高效提取,具体如图9所示。总体而言,光学与激光测试系统响应迅速、非侵入性好,但在复杂工业环境中,光纤易受电磁干扰而产生信号畸变;同时,轴承运转中的油气润滑及飞溅油污易造成光学条纹或反光条信号失真,影响测量的长期稳定性。

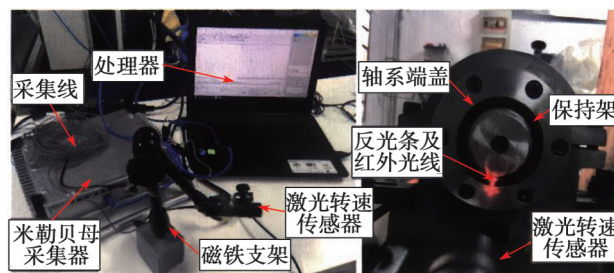


图9 保持架转速测量试验台

Fig. 9 Test rig for measuring cage speed

在结构辅助位移传感测试方面,为克服油污对光信号的干扰,行业学者尝试引入物理位移监测。文献[52]设计了一种航空轴承打滑测量装置,将信号发生元件直接安装在保持架端部,通过位移传感器探头稳定采集信号。文献[53]则巧妙设计了一种专属的转子码盘结构,通过搭建转速测试台并结合精度极高的电涡流位移传感器,成功且稳定地测量到保持架的实际打滑率。此外,文献[54]利用激光位移传感器获取保持架振动信号,并通过滤波处理系统研究变速变载等交变工况与质心轨迹变化的深层规律,为动态性能评估提供了直接的物理依据。采用这类物理位移与辅助结构法获取的信号极其稳定,但信号元件或码盘的加装在一定程度上破坏了保持架的原有结构特性与质量分布,可能对轴承的高速工作性能产生影响。

在超声波检测方面,有学者^[55]于2017年提出一种基于超声波测量保持架转速的新方法。该系统分别安装超声波脉冲发生器和接收器,当滚子经过超声探头下方时,通过提取信号中的脉冲峰值来计算转速,相关计算流程如图10所示。这一方法的提出极大拓宽了非侵入式测量的技术路径,但由于超声信号对环境噪声极为敏感,该方法在强振动、高噪声的高速工况下的适用性仍面临一定的挑战。

2.3.2 保持架质心轨迹测量技术

保持架的质心轨迹是评估其动态稳定性的核心指标,对验证动力学仿真模型的准确性至关重要。然而,

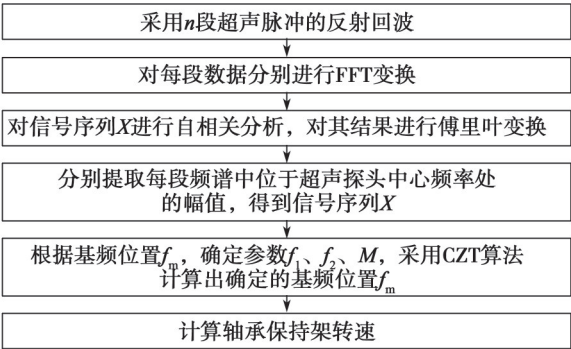


图 10 轴承保持架转速的计算流程
Fig. 10 Flowchart for calculation of speed of bearing cage

保持架在高速运转时处于完全自由的浮动状态, 这给质心轨迹的精确物理提取带来了极大挑战。有学者^[56]于1994年首次开展了角接触球轴承保持架的质心运动轨迹研究, 率先利用光纤传感器精准捕捉保持架微观位移, 成功获取了其涡动模型, 为后续轨迹测试奠定了基础。

针对不同尺度轴承与多参数集成的测试需求, 行业学者引入了更多样化的传感技术。文献[57]应用激光测量技术, 巧妙地在微型轴承保持架的端面安装了两个相互垂直的激光位移传感器以提取位移信号, 试验结果证明了非接触式激光传感器在微尺度轨迹测量中的高精度与优越性。文献[58]设计了一套高度集成的综合试验台, 基于电涡流位移传感器实现了对动态轨迹、打滑率及滚动体倾斜角和歪斜角的同步测量, 但高精度的集成测试系统对保持架材质的导磁性及试验环境的抗干扰要求极高。文献[59]搭建了专用的保持架动态性能试验台, 并将试验获取的轨迹数据与采用斯凯孚 (SKF) 公司自主开发的Beast轴承仿真软件计算结果进行了严密对比, 有效确立了此类试验台测试数据的可靠性标准。

为实现完全无损的测试效果, 文献[60]提出了一种基于机器视觉的非侵入式轨迹提取方法, 通过高速摄像机对高速运转的保持架进行连续拍照, 并采用亚像素处理算法精确提取质心轨迹, 试验台如图11所示。该技术的显著优势在于不需要改变轴承的原有结构特征; 但在实际工程应用中, 光学镜头和视场极易受到轴承内部润滑剂飞溅与油膜的遮挡, 从而影响轨迹识



图 11 保持架运动图像采集试验台
Fig. 11 Test rig for capturing cage motion images

别的连续性与准确度。

综上可知, 相较于转速测量, 保持架质心轨迹的提取难度更大。现有的各类测量方法在实际应用中均面临着局限性。因此, 探索一种无损、抗干扰且能实现转速与质心轨迹同步获取的新型测试技术, 已成为未来全面揭示保持架动态机理的重要研究方向。

2.4 小结

针对保持架的力学演变与运动规律, 学术界已取得了众多研究成果。

在碰撞特性方面, 研究焦点已从早期的理想化干摩擦接触模型, 逐步深化为囊括流体润滑、内部缺陷故障演化以及外部复杂激扰 (如轨道激扰、启停变载等) 的真实物理接触行为分析。在运动稳定性方面, 分析方法也从最初定性的质心轨迹模式 (涡动、跳动) 归纳, 发展为依托多体动力学联合仿真与专用物理试验台的定量打滑率及稳定性指标评估。在配套的动态性能测试技术方面, 积极探索了电磁感应、光学分析、超声波检测及机器视觉图像处理等多种非侵入或微侵入手段, 极大丰富了保持架转速与质心轨迹的测量方法, 为验证动力学仿真模型提供了关键的试验数据支撑。

现有的各类测试方法均存在一定的局限性, 如易受电磁与噪声干扰、存在油污遮挡, 或对轴承原有结构造成破坏等。迄今为止, 业界仍难以在完全无损的状态下实现保持架转速及质心轨迹的高精度同步测量。此外, 目前的理论与试验研究仍偏向于稳态或简单载荷工况, 面向轨道交通等高端装备在实际服役中所经历的极端交变激扰, 保持架内部复杂的耦合运动机理尚未被完全揭示。因此, 深入研究复杂工况下的保持架动态演变规律, 以及高抗干扰、非侵入式的多参数同步动态测试技术, 是该领域未来核心的研究方向。

3 滚动轴承保持架疲劳寿命分析方法

保持架作为轴承的核心部件, 在高速运转及复杂激扰下极易产生疲劳裂纹甚至发生疲劳断裂。一旦失效, 保持架将直接导致滚动体失去约束并划伤内外圈, 最终造成轴承整体失效; 反之, 若对保持架的寿命估计过于保守而提前更换轴承, 又会大大降低系统经济性并显著增加维护成本。因此, 如何实现轴承保持架服役寿命的精确预测, 是亟待深入研究的关键技术。

3.1 基于物理试验与断口分析的寿命评估

对保持架疲劳寿命的系统关注, 最早源于重大工程事故的经验教训。20世纪70至90年代, 航空发动机主轴承保持架因疲劳断裂导致滚珠失去引导、套圈抱轴, 引发多起严重飞行事故。这促使早期学者主要依赖物理试验与断口追踪技术开展寿命及失效分析。文

献[61]针对某型航空发动机球轴承失效开展了深入研究,结果显示,保持架表面的加工标记处极易成为裂纹萌生的源头,局部结构出现应力集中现象是导致其最终失效的根本原因。文献[62]通过提取圆柱滚子轴承保持架的振动频率成分,并结合保持架的应力水平测试,验证了保持架某特定位置的应力集中是引发疲劳断裂的主要原因。在针对非金属材质保持架的研究中,文献[63]综合运用了断口形貌分析、拉伸试验及红外光谱分析等方法,对轻轨轴箱轴承塑料保持架的疲劳断裂进行了全面的机理溯源。

3.2 基于动力学与有限元的联合仿真预测

随着计算机辅助工程技术的快速发展及各类工程分析软件功能的持续完善,保持架疲劳寿命研究逐渐从单纯的事后物理试验,转向基于动力学与有限元联合仿真的定量预测。在理论模型的构建与基础应用上,有学者^[64]率先搭建了球轴承的刚柔耦合动力学模型,通过提取保持架应力谱,并将其与材料的应力-寿命($S-N$)曲线相结合,成功实现了对保持架疲劳寿命的系统性数值仿真分析。文献[65]通过对球轴承保持架进行模态分析,深入探究了诱发失效的深层应力来源,揭示了套圈歪斜、系统共振以及多球共同耦合作用是导致保持架疲劳失效和断裂的核心诱因。文献[66]基于ABAQUS软件建立了圆柱滚子轴承的动力学模型,利用显式动力学模块进行仿真提取,将有限元应力结果与材料 $S-N$ 曲线深度融合以预估疲劳寿命,有效识别了设计薄弱环节,为保持架的正向优化提供科学指导,其中2 000 r/min时保持架的疲劳寿命云图如图12所示。

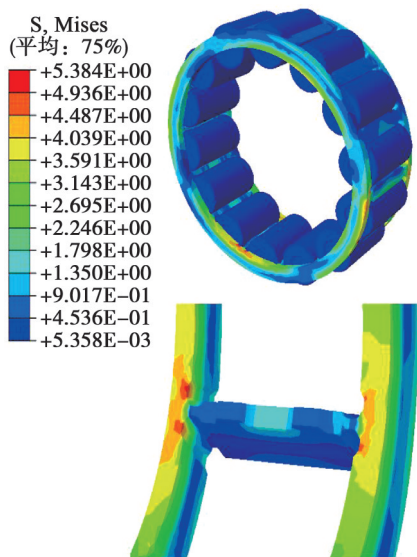


图12 2 000 r/min时保持架的疲劳寿命云图

Fig. 12 Fatigue life cloud map of cage at 2 000 r/min

针对复杂变工况与严苛服役环境下的寿命预测,文献[67]将高速列车动力学系统与轴箱轴承静力学模型相结合,在获取轴承真实动载荷边界的基础上,不仅

分析了保持架的失效形式,还精准评估了冲击工况下保持架的疲劳剩余寿命。文献[68]针对瞬态变工况,建立圆柱滚子轴承动力学计算模型,精确模拟了加减速工况下兜孔碰撞力的动态变化规律,并联合疲劳寿命分析软件,完成了轴承启停阶段保持架的疲劳寿命预测。

3.3 小结

国内外针对保持架疲劳寿命的分析方法主要包括试验法、有限元法和动力学法三大技术流派。早期的物理试验法在揭示疲劳断裂物理机理(如应力集中、加工缺陷)方面发挥了不可替代的作用,而将高精度的多体动力学动载荷提取与有限元应力谱分析($S-N$ 曲线)相结合的联合仿真技术,已成为当前实现疲劳寿命精准定量预估的主流方法。然而,面对轨道交通等高端装备日益复杂的变工况与极端交变激励,如何将实际运行中多变的高频碰撞冲击载荷更为真实地映射到疲劳累积损伤模型中,仍是实现寿命精确预估所必须突破的关键技术。

4 结束语

保持架作为轨道交通装备等高端轴承系统中的薄弱环节,其动态服役性能直接关系到整个装备的运行可靠性与安全性。近年来,国内外学者围绕保持架的动态特性与疲劳失效机理开展了大量卓有成效的研究,总体呈现出以下发展特征:在动力学建模方面,分析方法从早期的基础理论推导与自主编程数值求解,到以ADAMS等为代表的商业多体动力学软件的广泛应用,再到当前融合二次开发技术、能够更精确地引入实际润滑边界条件的混合建模,这为保持架的微观接触分析奠定了坚实的宏观系统模型基础;在保持架动态特性分析方面,对碰撞接触的认知已从理想的干摩擦状态发展至多相流体润滑及故障演化状态;对运动稳定性的评估也从定性的轨迹模式分类,发展为以打滑率、质心速度变异系数等为指标的定量评价体系;在动态性能测试技术方面,为验证理论仿真结果,业界积极探索了电磁、光学、超声波及机器视觉等多种测量手段,在单一参数(转速或质心轨迹)的非侵入式提取上取得了长足进步;在疲劳寿命预测方面,评估方法已从单纯依赖物理断口试验的滞后性定性分析,发展为基于系统动力学动载荷提取与有限元应力谱($S-N$ 曲线)分析的联合仿真定量预测。

尽管现阶段针对保持架服役性能的研究已取得了丰硕成果,但面对轨道交通等高端装备日益严苛的服役环境,现有研究在深度与广度上仍存在一定的局限性。综合全文分析,未来针对滚动轴承保持架动态特性分析方法的研究将重点聚焦于以下3个方向:

①复杂变工况下的高保真耦合动力学机理研究。目

前针对保持架动态特性的分析仍主要集中于稳态或常规载荷工况。然而, 实际服役中的轴承往往面临着启停瞬变、过弯变载、车轮扁疤冲击以及轮轨高频激励等复杂变工况。未来亟须建立能够充分反映这些极端交变激励的瞬态动力学模型, 深入研究多维变工况耦合作用下保持架真实的微观碰撞行为与非线性失稳机理。

②强抗干扰的多参数无损同步动态测试技术开发。现有的单一测试手段均面临易受电磁干扰、环境噪声敏感、存在润滑油污遮挡或需破坏轴承原有结构等问题, 难以实现高速运转状态下的精准测量。探索一种具有强抗干扰能力、完全非侵入式, 且能够实现保持架转速(打滑率)与质心三维空间轨迹高精度同步获取的新型传感与测试技术, 是未来全面验证保持架复杂动力学模型的基础。

③基于瞬态强冲击载荷的动态疲劳损伤演化预估。虽然联合仿真技术已初步应用于寿命预测, 但如何将复杂变工况诱发的高频、瞬态非线性碰撞冲击载荷, 精准映射并转化为材料微观的疲劳累积损伤, 仍是技术难点。未来需要进一步融合微观损伤力学与宏观动力学, 构建能够自适应极端工况的保持架动态疲劳寿命精准预估模型, 从而为高端装备滚动轴承保持架的抗疲劳正向设计与全生命周期运维提供更加可靠的理论支撑。

参考文献:

- [1] 张仁杰, 冯曦明. 城市高铁开通对数字经济发展的影响研究-基于要素流动视角[J]. 现代管理科学, 2022(4): 141-150.
ZHANG Renjie, FENG Ximing. Research on the impact of urban high-speed railway opening on digital economy development: based on the perspective of factor flow[J]. Modern management science, 2022(4): 141-150.
- [2] 蒋仁爱, 杨圣豪, 温军. 高铁开通与经济高质量发展-机制及效果[J]. 南开经济研究, 2023(7): 70-89.
JIANG Renai, YANG Shenghao, WEN Jun. High-speed railway opening and high-quality economic development: mechanism and effects[J]. Nankai economic studies, 2023(7): 70-89.
- [3] 丁叁叁, 陈大伟, 刘加利. 中国高速列车研发与展望[J]. 力学学报, 2021, 53(1): 35-50.
DING Sansan, CHEN Dawei, LIU Jiali. Research, development and prospect of China high-speed train[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2021, 53(1): 35-50.
- [4] WALTERS C T. The dynamics of ball bearings[J]. Journal of tribology, 1971, 93(1): 1-10.
- [5] GUPTA P K. Advanced dynamics of rolling elements[M]. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [6] GUPTA P K. Dynamics of rolling-element bearings—Part III: ball bearing analysis[J]. Journal of lubrication technology, 1979, 101(3): 312-318.
- [7] GUPTA P K. Dynamics of rolling-element bearings—Part I: cylindrical roller bearing analysis[J]. Journal of lubrication technology, 1979, 101(3): 293-302.
- [8] CREȚU S, MITU N, BERCEA I. A dynamic analysis of tapered roller bearings under fully flooded conditions Part 2: results[J]. Wear, 1995, 188(1/2): 11-18.
- [9] 罗继伟, 罗天宇. 滚动轴承分析计算与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
LUO Jiwei, LUO Tianyu. Analysis, calculation and application of rolling bearings[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [10] 陈国定, 李建华, 张成铁. 高速轴承元件间相互作用力的分析[J]. 机械科学与技术, 1998(2): 100-102.
CHEN Guoding, LI Jianhua, ZHANG Chengtie. Analysis of the interaction between high speed bearing components[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 1998(2): 100-102.
- [11] 商慧玲, 孙伟, 李震, 等. 双列圆锥滚子轴承拟动力学分析[J]. 机械设计与制造, 2019(4): 176-180.
SHANG Huiling, SUN Wei, LI Zhen, et al. Quasi-dynamic analysis of double-row tapered roller bearings[J]. Machinery design & manufacture, 2019(4): 176-180.
- [12] 刘秀海, 邓四二, 滕弘飞. 高速圆柱滚子轴承保持架运动分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(2): 31-38.
LIU Xiuhai, DENG Sier, TENG Hongfei. Kinematics analysis of cages in high-speed cylindrical roller bearings[J]. Aeroengine, 2013, 39(2): 31-38.
- [13] 涂文兵, 杨锦雯, 罗丫, 等. 高速列车轴箱圆柱滚子轴承启动过程的打滑动力学特性[J]. 振动与冲击, 2020, 39(10): 127-132.
TU Wenbing, YANG Jinwen, LUO Ya, et al. Skidding dynamic characteristics of axle box roller bearing of high-speed trains during start-up[J]. Journal of vibration and shock, 2020, 39(10): 127-132.
- [14] 汤强. 高铁列车转向架圆柱滚子轴承动力学模型及其服役性能研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2023.
TANG Qiang. Study on the dynamic model and service performance of cylindrical roller bearings for high-speed train bogies[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2023.
- [15] SAKAGUCHI T, HARADA K. Dynamic analysis of cage behavior in a tapered roller bearing[J]. Journal of tribology, 2006, 128(3): 604-611.
- [16] 郑涛. 铁路货车轴承的显式动力学仿真与故障特征分析[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2014.
ZHENG Tao. The explicit dynamics simulation and fault characteristics analysis of railway wagon bearing[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2014.
- [17] 朱成九, 朱爱华, 肖毅华, 等. 基于LS-DYNA铁路货车缺陷轴承动力学分析[J]. 轴承, 2015(6): 7-11.
ZHU Chengjiu, ZHU Aihua, XIAO Yihua, et al. Dynamics analysis on defect bearings for railway freight based on LS-

- DYNA[J]. Bearing, 2015(6): 7-11.
- [18] 郝焯江, 李强, 郑静. 基于 ABAQUS 的列车轴箱轴承动力学分析[J]. 轴承, 2014(3): 10-15.
HAO Yejiang, LI Qiang, ZHENG Jing. Dynamics analysis of train axle box bearings based on ABAQUS[J]. Bearing, 2014(3): 10-15.
- [19] 盖利森. 高速列车轴箱轴承动态行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
GEI Lisen. Research on dynamic behavior of axle box bearings of high-speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [20] 张军飞. 双列圆锥滚子轴承的动力学分析模型[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHANG Junfei. Dynamic analysis model of double-row tapered roller bearings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [21] 朱光绪. 变工况下的铁路货车轮对轴承动力学特性研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2024.
ZHU Guangxu. Research on dynamic characteristics of railway wagons wheel set bearing under variable operating conditions[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2024.
- [22] DAHIWAL R, THIELEN S, SAUER B. Modeling and simulation of cage wear in solid-lubricated rolling bearings[J]. Tribology online, 2020, 15(1): 25-35.
- [23] 顾金芳. 圆锥滚子轴承动力学仿真分析[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2013.
GU Jinfang. Dynamic analysis and simulation on the tapered roller bearing[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013.
- [24] 张焕森. 高铁轴箱双列圆锥滚子轴承保持架仿真方法及服役性能研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2025.
ZHANG Huansen. High-speed railway axle boxes double-row tapered roller bearings cage simulation method and service performance research[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2025.
- [25] KAKUTA K. The effects of misalignment on the forces acting on the retainer of ball bearings[J]. Journal of basic engineering, 1964, 86(3): 449-454.
- [26] RIVERA M P. Bearing-cage frictional instability—a mechanical model[J]. Tribology transactions, 1991, 34(1): 117-121.
- [27] 姚廷强, 王立华, 刘孝保, 等. 考虑保持架间隙碰撞的球轴承-机构系统动力学分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1725-1735.
YAO Tingqiang, WANG Lihua, LIU Xiaobao, et al. Dynamics analysis on ball bearing-mechanism with clearance and impact of cage[J]. Journal of aerospace power, 2016, 31(7): 1725-1735.
- [28] 胡于进, 余俊. 高速圆柱滚子轴承保持器动力分析[J]. 华中理工大学学报, 1989(4): 79-84.
HU Yujin, YU Jun. A dynamic analysis on the retainer of high-speed roller bearings[J]. Journal of huazhong university of science and technology, 1989(4): 79-84.
- [29] MEEKS C R, TRAN L. Ball bearing dynamic analysis using computer methods—Part I: analysis[J]. Journal of tribology, 1996, 118(1): 52-58.
- [30] SHI Z F, LIU J, LI H W, et al. Dynamic simulation of a planet roller bearing considering the cage bridge crack[J]. Engineering failure analysis, 2022, 131: 105849.
- [31] LI H, LIU H, LIU Y, et al. On the dynamic characteristics of ball bearing with cage broken[J]. Industrial lubrication and tribology, 2020, 72(7): 881-886.
- [32] 王春洁, 曾福明, 王东. 航空发动机主轴承中保持架的振动特性分析[J]. 轴承, 2004(4): 9-11.
WANG Chunjie, ZENG Fuming, WANG Dong. Analysis on vibration characteristic of cages of mainshaft bearings in aero engine[J]. Bearing, 2004(4): 9-11.
- [33] 姚譔. 航空发动机滚动轴承保持架的碰撞振动分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
YAO Xuan. Analysis of the impact of cage in aeroengine roller bearings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [34] 李红涛, 张文虎, 邓四二, 等. 停止阶段圆柱滚子轴承保持架应力分析[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(2): 172-179.
LI Hongtao, ZHANG Wenhui, DENG Sier, et al. Study on cage stress of cylindrical roller bearing at stop stage[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2018, 37(2): 172-179.
- [35] 慕鑫宇, 刘志明. 动车组轴箱轴承保持架动力响应与寿命分析[J]. 轴承, 2023(3): 18-26.
MU Xinyu, LIU Zhiming. Dynamic response and life analysis of axle box bearing cage for EMU[J]. Bearing, 2023(3): 18-26.
- [36] 查浩, 任尊松, 徐宁. 车轮扁疤激起的轴箱轴承冲击特性[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(4): 165-173.
ZHA Hao, REN Zunsong, XU Ning. Impact characteristics of axle box bearing due to wheel flat scars[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2020, 20(4): 165-173.
- [37] 刘冰洋, 谢兴会, 范强, 等. 高速角接触轴承保持架结构特性的数值模拟[J]. 太原科技大学学报, 2022, 43(5): 427-432.
- [38] LIU Bingyang, XIE Xinghui, FAN Qiang, et al. Analysis of dynamic characteristics of high-speed angular contact bearing cage with changing structural parameters[J]. Journal of Taiyuan university of science and technology, 2022, 43(5): 427-432.
- [39] KINGSBURY E P. Torque variations in instrument ball bearings[J]. Asle transactions, 1965, 8(4): 435-441.
- [40] GUPTA P G. Modeling of instabilities induced by cage clearances in cylindrical roller bearings[J]. Tribology transactions, 1991, 34(1): 1-8.
- [41] GHASIAS N, WASSGREN C R, SADEGHI F. Cage instabilities in cylindrical roller bearings[J]. Journal of tribology, 2004, 126(4): 681-689.

- [41] 邓四二, 郝建军, 滕弘飞, 等. 角接触球轴承保持架动力学分析[J]. 轴承, 2007(10): 1-5.
DENG Sier, HAO Jianjun, TENG Hongfei, et al. Dynamics analysis on cage of angular contact ball bearings[J]. Bearing, 2007(10): 1-5.
- [42] 邓四二, 顾金芳, 崔永存, 等. 高速圆柱滚子轴承保持架动力学特性分析[J]. 航空动力学报, 2014, 29(1): 207-215.
DENG Sier, GU Jinfang, CUI Yongcun, et al. Analysis on dynamic characteristics of cage in high-speed cylindrical roller bearing[J]. Journal of aerospace power, 2014, 29(1): 207-215.
- [43] 陈世金, 王瑞祥, 陈晓阳, 等. 不同工况下高速角接触球轴承-刚性转子系统动力学耦合特性分析[J]. 航空动力学报, 2022, 37(2): 344-355.
CHEN Shijin, WANG Ruixiang, CHEN Xiaoyang, et al. Analysis of dynamic coupling characteristics of high speed angular contact ball bearing-rigid rotor system under different working conditions[J]. Journal of aerospace power, 2022, 37(2): 344-355.
- [44] 涂文兵, 何海斌, 刘乐平, 等. 角接触球轴承在减速过程中的保持架动态特性分析[J]. 机械传动, 2019, 43(8): 125-129.
TU Wenbing, HE Haibin, LIU Leping, et al. Analysis on cage dynamic characteristic of angular contact ball bearing during deceleration[J]. Journal of mechanical transmission, 2019, 43(8): 125-129.
- [45] 张文虎, 胡余生, 邓四二, 等. 高速圆柱滚子轴承保持架振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(22): 85-94.
ZHANG Wenhui, HU Yusheng, DENG Sier, et al. Cage vibration behaviors of high-speed cylindrical roller bearings[J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38(22): 85-94.
- [46] GARNELL P, HIGGINSON G R. The mechanics of roller bearings[J]. Proceedings of the institution of mechanical engineers, 1965, 180(2): 197-205.
- [47] 李光明, 黎铭, 王虹淇, 等. 基于电磁感应原理的滚子转速测量方法[J]. 轴承, 2025(3): 46-53.
LI Guangming, LI Ming, WANG Hongqi, et al. Measurement method for rotational speed of rollers based on electromagnetic induction principle[J]. Bearing, 2025(3): 46-53.
- [48] GUPTA P K, DILL J F, BANDOW H E. Dynamics of rolling element-bearings experimental validation of the DREB and RAPIDREB computer programs[J]. Journal of tribology, 1985, 107(1): 132-137.
- [49] 束坤. 高速轻载航空轴承打滑监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
SHU Kun. Research on monitoring technologies of high-speed and light-load aero-bearings' skidding[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [50] 徐建东, 陈国定. 圆柱滚子轴承运动关系的试验研究[J]. 摩擦学学报, 1995, 15(4): 373-375.
XU Jiandong, CHEN Guoding. Experimental study on motion relations of cylindrical roller bearings[J]. Tribology, 1995, 15(4): 373-375.
- [51] 袁倩倩, 朱永生, 张进华, 等. 考虑润滑碰撞的精密轴承保持架动态特性[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(1): 110-117.
YUAN Qianqian, ZHU Yongsheng, ZHANG Jinhua, et al. Cage dynamic characteristic of precision rolling ball bearings considering lubrication collision[J]. Journal of Xi'an jiaotong university, 2021, 55(1): 110-117.
- [52] 生寿华. DZ-8208 轴承打滑仪的原理及使用[J]. 轴承, 1985(3): 29-32.
SHENG Shouhua. Principle and application of DZ-8208 bearing skidding instrument[J]. Bearing, 1985(3): 29-32.
- [53] 景新, 曹宏瑞, 陈雪峰. 保持架打滑对航空发动机主轴承故障特征频率的影响[J]. 航空动力学报, 2019, 34(5): 1145-1152.
JING Xin, CAO Hongrui, CHEN Xuefeng. Effect of cage slipping on fault characteristic frequencies of aeroengine main-shaft bearings[J]. Journal of aerospace power, 2019, 34(5): 1145-1152.
- [54] 黄迪山. 微型轴承保持架质心轨迹检测与特性分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(15): 1779-1784.
HUANG Dishan. Detection and characteristic analysis for mass center orbit of bearing cage[J]. China mechanical engineering, 2012, 23(15): 1779-1784.
- [55] 陈书恒, 李猛, 刘恒, 等. 采用频谱细化的超声法在线测量滚动轴承保持架转速[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(7): 139-145.
CHEN Shuheng, LI Meng, LIU Heng, et al. On-Line rotational speed measurement of rolling bearing cage based on ultrasonic measurement with spectrum refinement[J]. Journal of Xi'an jiaotong university, 2020, 54(7): 139-145.
- [56] KINGSBURY E P, WALKER R. Motions of an unstable retainer in an instrument ball bearing[J]. Journal of tribology, 1994, 116(2): 202-208.
- [57] 刘品, 黄迪山, 傅慧燕, 等. 轴承保持架质心运动轨迹测量[J]. 轴承, 2010(8): 43-45.
LIU Pin, HUANG Dishan, FU Huiyan, et al. Detection on mass center orbit of ball bearing cage[J]. Bearing, 2010(8): 43-45.
- [58] 陈后清, 王芳, 瞿庆春, 等. 保持架动态轨迹及滑动比测试试验机[J]. 轴承, 2012(7): 36-42.
CHEN Houqing, WANG Fang, QU Qingchun, et al. Tester for measuring cage dynamic trajectory and sliding ratio[J]. Bearing, 2012(7): 36-42.
- [59] STACHE L E, FRITZSON D. Dynamic behaviour of rolling bearings: simulations and experiments[J]. Journal of engineering tribology, 2001, 215(6): 499-508.
- [60] 刘逸林, 张盼, 晁奔, 等. 采用自主图像处理程序的非侵入式滚动轴承保持架运动轨迹提取方法[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(3): 95-105.
LIU Yilin, ZHANG Pan, CHAO Ben, et al. A non-intrusive rolling bearing cage trajectory extraction method using im-

- age processing program[J]. Journal of Xi'an jiaotong university, 2024, 58(3): 95-105.
- [61] EJAZ N, SALAM I, TAUQIR A. Failure analysis of an aero engine ball bearing[J]. Journal of failure analysis and prevention, 2006, 6(6): 25-31.
- [62] 姜维, 裴玉楠, 葛世东, 等. 高速圆柱滚子轴承保持架断裂原因分析[J]. 轴承, 2016(4): 40-42.
- JIANG Wei, PEI Yunan, GE Shidong, et al. Cause analysis on fracture of cages for high speed cylindrical roller bearings[J]. Bearing, 2016(4): 40-42.
- [63] 欧亮龙, 马越, 李鲁江. NJP3220TN1/HG2P54 圆柱滚子轴承保持架断裂原因分析[J]. 理化检验: 物理分册, 2016(1): 61-65.
- OU Lianglong, MA Yue, LI Lujang. Fracture cause analysis of the cage of NJP3220TN1/HG2P54 cylindrical roller bearing[J]. Physical testing and chemical analysis part a: physical testing, 2016(1): 61-65.
- [64] ASHTEKAR N, SADEGHI F. A new approach for including cage flexibility in dynamic bearing models by using combined explicit finite and discrete element methods[J]. Journal of tribology, 2012, 134(4): 041502.
- [65] 周延泽, 陆震, 沈心敏. 高速球轴承保持架疲劳断裂原因分析[J]. 机械设计与制造, 2001(1): 1-3.
- ZHOU Yanze, LU Zhen, SHEN Xinmin. The causes of fatigue fracture of cage in high speed ball bearing[J]. Machinery design & manufacture, 2001(1): 1-3.
- [66] 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 Guangbin. Fatigue life analysis of cylinder roller bearing cage for the high-speed rail traction engine[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019.
- [67] 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 Yunsheng. Research on fatigue life of high-speed train axle-box bearing under fluctuant impact load[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2017.
- [68] ZHANG W H, WU Z M, DENG S, et al. Safety characteristic evaluation of cage in cylindrical roller bearing at the stage of start-up and stop[J]. Shock and vibration, 2020, 2020(1): 8888065.

Analysis methods for dynamic characteristics and fatigue life of rolling bearing cages

DAI Bijun^{1,2}, WU Kecheng³, LIU Jia^{1,2}, GUAN Guohua^{1,2}, LI Wei^{1,2}, REN Zhijun^{2,4}

(1. CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji, Shanxi 044502, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Traction Motor for Rail Transit, Yongji, Shanxi 044502, China; 3. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 4. Frontier Institute of Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: The service performance of rolling bearings, as a kind of core fundamental component in rail transit equipment, directly impacts the operational safety of the equipment. The rolling bearing cages, as weak components within the bearings, are highly susceptible to deformation, wear, and fatigue fracture under complex and harsh alternating excitation conditions, so they are a primary source of overall bearing failure. To effectively mitigate the risk of cage failure and guide its forward optimal design, this paper provides a comprehensive and systematic review of analysis methods for dynamic characteristics of rolling bearing cages. Firstly, this paper outlines the evolution of overall dynamic analysis methods for rolling bearings, and highlights a transition from self-programmed numerical solutions towards hybrid modeling integrating secondary development technologies. Secondly, this paper explores in depth the dynamic service characteristics of cages, summarizes in detail the evolution of cage collision characteristics and motion stability under different lubrication states and complex variable conditions, and provides a systematic overview of related dynamic performance testing methods. Thirdly, this paper reviews the transition of cage fatigue life assessment methods from early-stage physical fracture tracing towards quantitative prediction based on co-simulation of dynamics and finite element analysis. Finally, this paper summarizes the shortcomings of existing research in addressing extreme alternating excitations and multi-parameter synchronous measurements. This paper proposes that future breakthroughs are urgently needed in areas such as high-fidelity coupled dynamics mechanisms under complex variable conditions, highly anti-interference, non-destructive, synchronous dynamic testing technologies, and dynamic fatigue damage prediction models based on transient strong impacts. This paper aims to provide a reference for the fatigue-resistant design and lifecycle operation and maintenance of high-performance rolling bearing cages.

Keywords: rail transit; rolling bearing; cage; dynamic characteristics; fatigue life; FEM