

高速滑动轴承动态特性分析及稳定性控制研究

周文锋 高金龙 沙承卓 郭富贵
浙江彰贵轴承科技有限公司 311800

【摘要】本文针对高速滑动轴承的动态特性及稳定性控制展开了研究,对高速滑动轴承在现代高速旋转设备中的重要性进行一定的了解,并经过理论分析来建立滑动轴承的动态特性模型,其中包括了刚度和阻尼系数计算等。利用数值模拟方法对不同状况下轴承的动态响应进行分析,得到转速、载荷等因素对轴承动态特性加具有一定的影响,从而提出了稳定性控制的方法。因此,通过优化轴承结构、改进润滑系统以及采用主动控制技术,能够提高高速滑动轴承的稳定性以及为运行提供一定的保障。

【关键词】高速滑动轴承; 动态特性; 稳定性控制

Analysis on dynamic characteristics and stability control of high-speed sliding bearings

Zhou Wenfeng Gao Jinlong Sha Chengzhuo Guo Fugui
Zhejiang Zhanggui Bearing Technology Co., Ltd. 311800

【Abstract】 This paper studies the dynamic characteristics and stability control of high-speed sliding bearings, understands the importance of high-speed sliding bearings in modern high-speed rotating equipment, and through theoretical analysis to establish the dynamic characteristics model of sliding bearings, including the calculation of stiffness and damping coefficient. Using the numerical simulation method to analyze the dynamic response of bearing under different conditions, the speed and load have a certain influence on the dynamic characteristics of bearing, so that the method of stability control is put forward. Therefore, by optimizing the bearing structure, improving the lubrication system and adopting the active control technology, the stability of the high-speed sliding bearing can be improved and provide a certain guarantee for the operation.

【Key words】 high-speed sliding bearing; dynamic characteristics; stability control

引言

滑动轴承作为多种设备中的核心支撑组件,承担着高速运转及承受复杂应力的功能。其动态性能对确保设备运行的稳定性和信赖性至关重要。且随着转速的不断提高,高速滑动轴承会遇到如油膜振荡、失稳等问题,严重时威胁到设备的安全运行;在高速旋转的条件下,滑动轴承的动态表现及其稳定性成为了衡量设备性能的重要指标;因此本文研究高速滑动轴承的动态特性及稳定性控制的成果,将为高速旋转机械的设计和优化提供一定的理论依据和技术支持。

1 高速滑动轴承工作原理与结构特点

1.1 工作原理

1.1.1 动压滑动轴承

当轴开始转动时,转速较低,轴颈在轴承中处于偏心位置,与轴承内壁直接接触,此时为边界润滑状态,摩擦较大。随着轴的转速逐渐升高,轴颈带动周围的润滑油一起旋转。由于轴承与轴颈之间的间隙是楔形的(轴颈与轴承的偏心布置导致),润滑油在楔形间隙中受到挤压,形成压力。依据流体力学的基本原理,流体流经逐渐变窄的楔形空间时,会生成动力压强。当旋转速度提升至某一临界值时,这种动力

压强足够强大,能够将轴颈托起,从而在轴颈与轴承之间构建出一个连续的油膜压力层,有效分隔开两者的接触表面,此时进入液体润滑状态,摩擦系数大幅降低,能有效支撑高速旋转的轴,减少磨损和发热。

1.1.2 静压滑动轴承

静压滑动轴承的工作原理是依赖外部供油系统供给的。无论轴承是静止不动还是处于旋转状态,高压油源都会通过节流器,把具有一定压力的润滑油送入轴承与轴颈之间的微小空隙里。这些高压油在间隙内均匀分布,强制性地使轴颈与轴承之间建立起一层具备充分承载能力的静态油膜。无论轴的转速如何,甚至在启动、停止阶段,静压油膜都能有效地将轴颈与轴承表面隔开,避免直接接触,大大降低了摩擦阻力,使轴能够平稳地运转。由于静压油膜的形成不依赖于轴的旋转速度,所以,在高速且高精度的设备应用中,静压滑动轴承展现出了出色的性能,它能够轻松应对较大的载荷变化,确保轴系运行平稳并维持极高的旋转精确度。

1.1.3 动静压滑动轴承

在启动和停止阶段,依靠外部供油系统提供的压力油,在轴颈与轴承之间形成静压油膜,确保轴能够顺利启动和停止,避免磨损。轴转速增至特定水平时,动压作用显现,轴颈牵引润滑油一同旋转,于轴承与轴颈构成的楔状空间内生成动压油膜,与既有的静压油膜协同支撑负载。这种工作方

式使得动静压滑动轴承在不同工况下都能保持良好的润滑状态和承载能力,适用于各种高速、重载且对精度要求较高的机械设备。

1.2 结构特点

1.2.1 轴瓦设计

轴瓦作为高速滑动轴承中直接与轴颈接触并支撑轴系运转的关键部件,其设计对于轴承的性能、可靠性和使用寿命起着决定性作用;而轴瓦设计不同结构形状使得轴瓦在运行过程的安全稳定,如整体式轴瓦、部分式轴瓦和多油楔轴瓦等,其中整体式轴瓦是由一个整体的轴套构成,常用于低速、轻载或间歇性工作的设备。如小型农业机械中的一些滑动轴承采用整体式轴瓦,其制造方便、成本较低;剖分式轴瓦由上下两片构成,通过螺栓在轴瓦的分割面处进行紧固连接,同时,一般会安装定位销来保障安装后上下两片轴瓦的相对位置准确无误。轴瓦的内表面与轴颈直接接触,为轴颈提供支撑和润滑,外表面则与轴承座紧密配合,以保证轴瓦在工作过程中的稳定性;多油楔轴瓦的内表面加工有多个油楔结构,当轴颈在多油楔轴瓦内旋转时,润滑油会被带入油楔中。由于油楔的收敛形状,根据流体动力学原理,润滑油在油楔内流动时会产生动压效应,形成多个相互独立又协同作用的动压油膜。这些动压油膜能够提供更强的承载能力和更好的稳定性,有效抑制轴的振动。

1.2.2 间隙控制

在高速滑动轴承的结构设计中,间隙控制是一项关键要素,对轴承的性能、稳定性以及使用寿命有着决定性的影响。高速滑动轴承的间隙分为径向和轴向两种,其中径向间隙对其性能有着重要影响。如果间隙过小,轴颈与轴瓦之间会因摩擦产生过多热量,可能导致它们粘合在一起,即发生胶合现象;间隙过大,则会使油膜厚度不稳定,降低轴承的承载能力和回转精度,增加振动。因此,需根据具体工况精确控制径向间隙,一般通过合理设计轴瓦尺寸和加工精度来保证。例如,在精密高速机床的滑动轴承中,径向间隙通常控制在几微米到几十微米之间,以确保轴的高精度运转;同时轴向间隙也需适当控制。恰当的轴向间隙能有效阻止轴在轴向上的移动,确保设备平稳无碍地运作。例如,在多级离心泵的滑动轴承中,通过设置轴向定位装置和控制轴向间隙,可避免叶轮与泵壳发生摩擦,提高泵的效率 and 稳定性。

2 高速滑动轴承动态特性分析

2.1 理论分析方法

理论分析方法是作为高速滑动轴承动态特性的基础,通过流体力学、弹性力学等理论构建出轴承内部物理现象的分析模型。雷诺方程通过对润滑油的连续性、粘性以及轴承几何形状等因素的综合考量,建立起了油膜压力与轴承各参数之间的定量关系。

理论分析方法的优势在于能够提供较为清晰的物理概念和理论依据,帮助研究人员深入理解高速滑动轴承的工作

原理和动态特性的内在机制。它能够在一定程度上预测轴承在不同工况下的性能表现,为轴承的初步设计和优化提供指导。该方法也存在一定的局限性。在实际应用中,由于轴承的结构和工作条件往往较为复杂,理论分析过程中不得不做出一些简化假设,这可能导致计算结果与实际情况存在一定的偏差。对于一些复杂的边界条件和多物理场耦合问题,理论分析方法的求解难度较大,甚至难以得到解析。

2.2 数值计算方法

数值计算方法在高速滑动轴承动态特性分析中发挥着关键作用,它能够有效处理理论分析中难以解决的复杂问题,为研究轴承性能提供了方法。在众多数值求解技术中,诸如 ANSYS、ABAQUS 等有限元分析软件被频繁且广泛地采纳。

数值计算方法能够直观地展示高速滑动轴承在各种工况下的内部力学行为,为深入理解轴承的动态特性提供了丰富的信息。通过数值计算得到的油膜压力分布云图,可以清晰地看到润滑油膜在轴承不同部位的压力变化情况,从而找出压力集中区域和可能出现油膜破裂的位置;通过分析轴颈的位移和速度曲线,可以了解轴颈在运动过程中的动态响应特性,为评估轴承的稳定性提供依据。数值计算方法还可以方便地进行参数化研究,通过调整轴承的结构参数、材料特性或运行环境等因素,能够迅速解析它们对轴承动态行为的影响模式,从而为轴承的优化设计工作提供有益的参考。

2.3 实验研究方法

实验研究方法是深入探究高速滑动轴承动态特性的重要途径,它能够为理论分析和数值计算提供直观且可靠的数据支持,从而有效验证和完善相关理论与模型。搭建实验平台是开展实验研究的基础,其过程需充分考虑高速滑动轴承的工作特性及实验需求。

在构建实验平台时,需精心挑选合适的电机作为驱动源,以确保能够为轴承提供稳定且可调节的转速,满足不同工况下的实验要求。为精确模拟轴承的实际工作载荷情况,需配备专业的加载装置,此设备需具备高精度的载荷调控能力,能够分别独立且精确地施加并调整径向与轴向的载荷。还需设置可靠的润滑系统,确保为轴承提供稳定且符合要求的润滑油供应,同时能够对润滑油的温度、压力等参数进行有效监测和控制。

在实验过程中,需严格按照预定的实验方案,逐步改变工况参数,如转速、载荷等,并同步采集传感器所测量的数据。在研究转速如何影响轴承的动态特性时,需要将转速从低速范围逐步上调至高速范围进行观察分析,在每个转速点稳定运行一段时间后,采集相应的油膜压力、轴颈位移和加速度等数据。同样,在研究载荷对轴承动态特性的影响时,需按照一定的增量逐步增加径向载荷和轴向载荷,分别采集不同载荷工况下的数据。

对采集到的数据进行深入分析,是获取高速滑动轴承动态特性参数的核心步骤。通过分析油膜压力的数据集,我们可以绘制出油膜压力的分布图,并据此推导出油膜的承载性能及其刚度系数。在分析轴颈位移和加速度数据时,可利用

信号处理技术,提取出轴颈振动的频率、幅值等特征参数,从而评估轴承的稳定性和阻尼特性。将实验数据与理论分析及数值计算结果进行对比,可以有力地验证理论模型的合理性以及数值计算的准确性。一旦发现实验结果与理论或数值计算结果存在出入,就需要深入探究背后的原因,并对理论模型和数值计算方法进行相应的调整和优化,从而提升对高速滑动轴承动态特性预测的准确性。

3 高速滑动轴承稳定性影响因素分析

3.1 轴承结构参数

轴承结构参数对其稳定性起着举足轻重的作用,其中长径比和间隙是两个关键因素。长径比作为轴承长度与直径的比值,对油膜的形成和分布有着深远的影响。当轴承的长径比增大时,其承载面积也会随之拓宽,从而能够支撑起更重的载荷。这类似于桥梁的情况:桥梁的跨度如果增大,那么它能够承受的车辆重量也会相应地提升。在大型船舶的推进系统中,由于需要承受巨大的轴向和径向载荷,通常会采用长径比较大的滑动轴承,以确保系统的稳定运行。过大的长径比也可能带来一些负面影响。润滑油在轴承中的流动路径变长,会导致端部泄油增加,使得油膜压力分布不均匀,容易引发油膜涡动等不稳定现象。

为了提升轴承结构的稳定性,需全面权衡设备运行环境、载荷特征及对精确度的需求等关键因素,以优化其设计参数。在设计阶段,可以通过理论分析、数值模拟等方法,对不同长径比和间隙的轴承进行性能评估,找到最佳的参数组合。在实际应用中,还可以根据设备的运行情况,对轴承的结构参数进行适当的调整和优化,以确保轴承在各种工况下都能保持良好的稳定性。

3.2 润滑油性质

润滑油性质对高速滑动轴承的稳定性起着关键作用,其中粘度和密度是两个重要的参数。粘度是润滑油的一个关键属性,它极大地影响着油膜的形成及其稳定性。如果润滑油的粘度太低,就会变得过于稀薄,导致在轴承与轴颈之间难以构建起稳定的油膜屏障。这就好比在光滑的冰面上,水很容易流动,无法形成有效的支撑。在高速滑动轴承中,低粘度的润滑油无法提供足够的承载能力,轴颈与轴承之间的摩擦和磨损会增加,容易引发油膜涡动等不稳定现象。在某高速旋转设备中,由于使用了粘度过低的润滑油,在设备启动后不久,滑动轴承就出现了异常振动,经检查发现是油膜不稳定导致的。

相反,粘度过高的润滑油虽然能够形成较厚的油膜,但会增加润滑油的内摩擦力,导致能量损耗增大,油温升高。这就好比在浓稠的糖浆中,物体的运动阻力会很大。油温过高会使得润滑油的粘度进一步减小,从而威胁到油膜的稳定性。在一些大型工业设备中,使用粘度过高的润滑油,在长时间运行后,油温明显升高,轴承的振动也随之增大,这表明油膜的稳定性受到了影响。

为了选择合适的润滑油,需要综合考虑设备的工作条件、轴承的结构参数以及对稳定性的要求等因素。在高速、重载的工况下,通常要选择粘度较高、密度适中的润滑油,以确保油膜的承载能力和稳定性。还可以根据设备的运行温度范围,选择具有合适粘温特性的润滑油,使其在不同温度下都能保持良好的润滑性能。在一些高温环境下工作的设备,需要选择耐高温、粘度指数高的润滑油,以保证在高温下润滑油的粘度不会过低,从而维持油膜的稳定性。

4 高速滑动轴承稳定性控制策略

4.1 主动控制技术

主动控制技术是提升高速滑动轴承稳定性的前沿手段,通过在轴承系统中巧妙引入主动控制元件,能够实时、精准地调整轴承的工作状态,有效抑制不稳定现象的发生。

智能材料在高速滑动轴承主动控制中的应用,为轴承稳定性控制开辟了新的路径。通过实时监测轴承的运行参数,并利用先进的控制算法对这些数据进行快速分析和处理,进而判断轴承的工作状态。一旦发现不稳定因素,控制系统会立即向主动控制元件发出指令,实现对轴承工作状态的快速调整。这种智能化的控制方式,能够根据不同的工况和运行条件,灵活、精准地优化轴承的性能,有效提高了轴承的稳定性和可靠性。

5 结论

本文围绕高速滑动轴承动态特性分析及稳定性控制展开深入探究,取得了一系列关键成果。在动态特性分析层面,明确了刚度系数与阻尼系数这两个核心参数对轴承性能的关键影响。在控制技术方面,引入主动控制技术,如利用压电陶瓷、磁流变液等主动控制元件,能够实时调整轴承的工作状态,有效抑制不稳定现象的发生。

参考文献

- [1]赵娟.高速滑动轴承-转子系统的动态分析[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2009.
- 王丽丽.新型高速滑动轴承的发展现状及其特性[J].农业装备与车辆工程,2007(05):35-38.
- 张勇.高速滑动轴承-转子系统动力学稳定性分析与试验验证[D].湖南:湘潭大学,2015.
- 刘云霞.高速齿轮传动系统动态性能分析研究[J].陕西:长安大学,2021.