

轴承润滑技术的最新进展与实践应用

马盈月

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要: 本文聚焦轴承润滑技术, 阐述其基础理论, 包括润滑基本原理、润滑剂分类及特性、润滑方式概述。分析最新进展, 涵盖新型润滑材料研发、先进润滑技术创新、润滑系统智能化发展。结合工业、航空航天、汽车行业的应用案例, 探讨该技术多学科交叉融合、绿色环保可持续发展以及面向极端工况的发展趋势与挑战, 旨在为轴承润滑技术的进一步发展提供参考。

关键词: 轴承润滑技术; 新型润滑材料; 发展趋势

1 轴承润滑基础理论

1.1 润滑基本原理

轴承在运转过程中, 其滚动体与内外圈之间会产生相对运动, 进而引发摩擦。摩擦不仅会消耗能量, 导致轴承温度升高, 还会引起磨损, 缩短轴承的使用寿命。润滑的基本原理就是在轴承的运动部件之间引入一层润滑介质, 将原本的直接金属接触转变为润滑介质之间的内摩擦, 从而大幅降低摩擦系数, 减少磨损和能量损耗。这层润滑介质可以形成润滑膜, 根据润滑膜的形成方式和厚度不同, 可分为流体动压润滑、流体静压润滑和边界润滑等不同状态。在流体动压润滑中, 借助运动部件的相对运动, 使润滑剂产生压力, 形成足够厚的润滑膜, 将运动部件完全隔开; 流体静压润滑则是通过外部油泵将高压润滑剂注入摩擦副之间, 形成润滑膜; 而边界润滑是在润滑剂供应不足或工况较为恶劣时, 润滑剂中的添加剂在金属表面形成一层边界膜, 起到减少磨损的作用。

1.2 润滑剂分类及特性

润滑剂主要分为润滑油、润滑脂和固体润滑剂三大类。(1) 润滑油具有良好的流动性, 能够迅速到达摩擦部位, 形成均匀的润滑膜, 散热性能优异, 适用于高速、高温的工况。常见的润滑油有矿物油、合成油等, 矿物油来源广泛、成本较低, 但性能相对有限; 合成油则具有更好的高温稳定性、低温流动性和抗氧化性能, 能满足更苛刻的工作条件。(2) 润滑脂是由润滑油和稠化剂混合而成的一种半固体润滑剂, 具有良好的粘附性和密封性, 能够在较长时间内保持润滑效果, 减少润滑剂的泄漏和消耗, 常用于低速、重载或不易频繁添加润滑剂的场合。不同类型的稠化剂赋予润滑脂不同的特性, 如钙基润滑脂具有良好的抗水性, 锂基润滑脂则具有较好的高温性能和机械安定性。(3) 固体润滑剂是

通过在摩擦表面形成固体润滑膜来减少磨损的, 常见的固体润滑剂有石墨、二硫化钼等。固体润滑剂具有耐高温、耐化学腐蚀等优点, 适用于高温、高压、真空等极端工况, 但其润滑效果受环境因素影响较大, 且难以形成均匀的润滑膜^[1]。

1.3 润滑方式概述

常见的润滑方式有滴油润滑、油浴润滑、喷油润滑、油气润滑和脂润滑等。滴油润滑是通过滴油装置将润滑油一滴一滴地滴到摩擦部位, 适用于轻载、低速的场合; 油浴润滑是将轴承的一部分浸入润滑油中, 依靠轴承的转动将润滑油带到摩擦部位, 结构简单, 但润滑油的搅拌损失较大; 喷油润滑是利用油泵将润滑油以一定的压力喷射到摩擦部位, 冷却和润滑效果好, 适用于高速、高温的轴承; 油气润滑是将压缩空气与微量的润滑油混合后, 通过管道输送到摩擦部位, 既能保证良好的润滑效果, 又能减少润滑油的消耗和对环境的污染; 脂润滑则是将润滑脂填充到轴承内部, 依靠润滑脂的粘附性和缓慢释放特性来实现润滑, 适用于不宜频繁添加润滑剂的场合。

2 轴承润滑技术最新进展

2.1 新型润滑材料研发

2.1.1 纳米润滑材料

纳米技术在润滑领域的应用为轴承润滑带来新的突破。纳米颗粒作为润滑油添加剂, 具有独特的减摩抗磨机制。纳米颗粒可以在摩擦表面形成一层类似“滚珠轴承”的滚动层, 将滑动摩擦转变为滚动摩擦, 从而显著降低摩擦系数。同时, 纳米颗粒还能填充摩擦表面的微凹坑, 修复磨损表面, 提高表面的平整度和光洁度。例如, 纳米二氧化钛颗粒添加到润滑油中, 能有效提高轴承的耐磨性和使用寿命, 在高速、重载的工况下表现尤为突出。

2.1.2 生物基润滑材料

随着环保意识的增强，生物基润滑材料受到广泛关注。生物基润滑材料是以可再生资源为原料制备的，具有良好的生物降解性和环境友好性。与传统的矿物油基润滑剂相比，生物基润滑材料在低温流动性、粘度指数和润滑性能等方面具有优势。例如，以植物油为基础的生物基润滑油，其粘度指数高，能在较宽的温度范围内保持良好的润滑性能，而且可生物降解，对环境无污染，在食品加工、纺织等对环境要求较高的行业具有广阔的应用前景。

2.1.3 离子液体润滑材料

离子液体是一种由阴阳离子组成的室温下呈液态的盐，具有独特的物理化学性质，如低挥发性、高热稳定性、良好的导电性和溶解性等。作为润滑剂，离子液体能够在摩擦表面形成稳定的润滑膜，有效减少磨损。其低挥发性使得离子液体在高温环境下也能保持良好的润滑性能，不易挥发损失。另外，离子液体还可以通过结构设计来调节其性能，满足不同工况的需求，在航空航天、电子等高端领域具有潜在的应用价值。

2.2 先进润滑技术创新

2.2.1 微量润滑技术 (MQL)

微量润滑技术是一种将润滑油与压缩空气混合后，以微量、精确的方式输送到摩擦部位的润滑技术。与传统的润滑方式相比，MQL技术能够显著减少润滑油的消耗，降低生产成本，同时减少了对环境的污染。在切削加工领域，MQL技术可以有效降低刀具与工件之间的摩擦和温度，提高加工精度和表面质量，延长刀具使用寿命。在轴承制造和运行过程中，MQL技术也逐渐得到应用，特别是在高速、精密轴承的加工和装配环节，能够提高轴承的加工质量和运行稳定性。

2.2.2 超声波润滑技术

超声波润滑技术是利用超声波的空化效应和机械振动作用来改善润滑效果的一种新技术。超声波在润滑剂中传播时，会产生空化气泡，这些气泡在破裂时会产生强大的冲击力和微射流，能够清除摩擦表面的污垢和磨损产物，改善润滑剂的流动性和渗透性，使润滑剂更好地附着在摩擦表面，形成更均匀、更稳定的润滑膜。研究表明，超声波润滑技术能够显著降低轴承的摩擦系数和磨损率，提高轴承的运转效率和可靠性^[2]。

2.3 润滑系统智能化发展

智能润滑系统集成了传感器技术、自动控制技术和信息技术，能够实时监测轴承的运行状态，如温度、振动、转速等参数，并根据监测数据自动调整润滑剂的

供给量和供给时间，实现按需润滑。智能润滑系统还可以对润滑剂的剩余量、质量等进行监测和预警，及时提醒维护人员添加或更换润滑剂，避免因润滑不足或润滑剂变质导致的轴承故障。例如，在一些大型工业设备的轴承润滑中，智能润滑系统能够根据设备的实际运行工况，精确控制润滑油的供给，提高润滑效率，降低维护成本，保障设备的稳定运行。

3 轴承润滑技术应用案例

3.1 工业领域应用案例

在工业领域，轴承润滑技术的应用广泛，针对不同设备的工况特点，选择合适的润滑技术和润滑剂，能有效提升设备性能，保障生产的稳定进行。制造业中的机床设备对轴承润滑要求较高，机床主轴轴承在高速运转时会产生大量热量，且对加工精度影响较大。某机床厂在精密数控机床的主轴轴承上采用了油雾润滑技术和合成油润滑剂，油雾润滑能将润滑油雾化成微小颗粒，均匀分布在轴承摩擦表面，提高润滑效果；合成油具有良好的耐高温性能，在主轴转速达到12000r/min时，轴承温度仍能控制在50°C以内，确保了机床的加工精度，产品的尺寸误差从±0.02mm降低到±0.01mm，生产效率也提升了15%。能源行业的风力发电机轴承所处工况复杂，面临高海拔、海上高盐雾、强台风等恶劣环境，对润滑技术提出了严峻挑战。某海上风电场的风机轴承采用了复合润滑技术，结合润滑脂和固体润滑剂，润滑脂具有良好的密封性能，能阻挡海水和盐雾的侵蚀；固体润滑剂则在极端温度下提供稳定的润滑效果。同时，应用了智能润滑系统，实时监测轴承的运行状态，根据工况变化调整润滑脂的供给量，使风机轴承在复杂环境下的使用寿命延长了3年以上，维护次数减少了40%，显著降低了维护成本。

3.2 航空航天领域应用案例

航空航天领域对轴承润滑技术的要求极为严苛，轴承需在高转速、高温、高负荷等极端工况下稳定运行，先进的润滑技术为航空航天设备的可靠运行提供了重要保障。航空发动机轴承是航空发动机的关键部件，其转速可达数万转每分钟，温度超过200°C，承受着巨大的载荷。为满足航空发动机轴承的润滑需求，采用了高性能合成油和特殊固体润滑剂相结合的润滑技术，高性能合成油具有优良的耐高温和抗剪切性能，能在高温高转速下形成稳定的润滑膜；特殊固体润滑剂如二硫化钼涂层涂覆在轴承表面，起到辅助润滑的作用。某型号航空发动机采用该润滑技术后，轴承的摩擦系数降低了25%，在连续运行1000小时后，磨损量仅为原来的1/3，

显著提高了发动机的性能和可靠性,保障了飞行安全。飞行器的起落架轴承在着陆时承受巨大的冲击载荷,且面临频繁的启停工况,润滑条件较为恶劣^[3]。针对这一情况,采用了润滑脂和油气润滑相结合的润滑方式,润滑脂能在轴承表面形成持久的保护膜,油气润滑则在起落架动作时提供额外的润滑,确保轴承灵活运转。某飞行器起落架轴承应用该润滑解决方案后,在多次起降过程中未出现润滑失效问题,轴承的维护周期从原来的50次起降延长到80次起降,有效降低了维护成本。

3.3 汽车行业应用案例

在汽车发动机的精密构造里,曲轴轴承和连杆轴承等关键部件的润滑状况,直接关乎发动机的整体性能与使用寿命,其重要性不言而喻。当下,汽车发动机正朝着高功率、高转速、低排放的方向加速迈进,这一发展趋势对润滑技术提出了更为严苛的要求。为了应对这些挑战,部分高端汽车发动机率先采用智能润滑系统。该系统在轴承部位巧妙安装了各类传感器,能够实时、精准地监测轴承的温度、压力以及振动等关键参数,并将这些数据迅速传输至发动机控制单元(ECU)。ECU凭借强大的计算能力,依据监测数据精确调控润滑油的供给量和供给时间,让轴承时刻处于最佳的润滑状态。智能润滑系统的应用成效显著,不仅大幅提升发动机的性能和可靠性,还有效降低油耗和排放,完美契合了日益严格的环保标准。

4 轴承润滑技术发展趋势与展望

4.1 多学科交叉融合趋势

轴承润滑技术的发展将越来越多地与其他学科进行交叉融合,如材料科学、化学、物理学、机械工程、电子信息技术等。通过材料科学的进步,研发出性能更优异的新型润滑材料;利用化学方法对润滑剂进行改性,提高其润滑性能和环境适应性;借助物理学原理开发先进的润滑技术和检测方法;结合机械工程和电子信息技术,实现润滑系统的智能化和自动化控制。多学科的交叉融合将为轴承润滑技术的创新发展提供强大的动力。

4.2 绿色环保可持续发展需求

随着全球对环境保护的重视程度不断提高,轴承润滑技术将朝着绿色环保、可持续发展的方向发展。研发可生物降解的润滑材料,减少对环境的污染;优化润滑方式和润滑系统,降低润滑剂的消耗和能耗;推广循环经济模式,实现润滑剂的回收和再利用。绿色环保的轴承润滑技术将成为未来市场的主流,满足社会对可持续发展的要求^[4]。

4.3 面向极端工况的技术挑战与突破

在航空航天、深海探测、新能源等领域,轴承面临着极端工况的挑战,如高温、高压、高速、强辐射、强腐蚀等。为了满足这些极端工况下的使用要求,需要研发新型的润滑材料和润滑技术。例如,开发能够在高温下保持稳定性能的润滑材料,研究适用于深海环境的防腐润滑技术,探索在强辐射条件下轴承的润滑解决方案等。面向极端工况的技术突破将拓展轴承的应用领域,推动相关行业的快速发展。

结束语

轴承润滑技术作为保障轴承正常运行的关键因素,在机械工业的发展中起着不可或缺的作用。近年来,随着科技的不断进步,新型润滑材料的研发、先进润滑技术的创新以及润滑系统的智能化发展取得了显著成果,并在工业、航空航天、汽车等多个领域得到了广泛应用。未来,轴承润滑技术将朝着多学科交叉融合、绿色环保可持续发展以及面向极端工况的方向发展。

参考文献

- [1]吴宝杰,杨洪滨,杜森森,等.高速铁路动车组轴箱轴承润滑技术现状与展望[J].高速铁路新材料,2022,1(3):7-10.
- [2]刘振侠,朱泽韬,姜乐,等.航空发动机主轴轴承高效润滑冷却技术研究进展[J].航空工程进展,2024,15(6):86-96.
- [3]曾小牛.安泰水电厂灯泡贯流式机组轴承润滑油系统技术改进[J].水电站机电技术,2024,47(7):32-35.
- [4]惠节,左迁,刘昭亮,等.弹性流体润滑技术在船用滑动轴承的应用[J].舰船科学技术,2022,44(24):35-38.