

耐摩擦机器人关节轴承研究

徐荣敬, 王 妍

(山东福马轴承有限公司, 山东 聊城 252000)

摘 要 机器人关节轴承的性能对机器人的整体性能、寿命和可靠性起着决定性作用。在现代工业、医疗、航空航天等领域, 机器人应用愈发广泛, 本文探讨了耐摩擦机器人关节轴承的研究进展, 涵盖材料、结构设计、润滑技术等多个方面, 深入剖析了当前研究面临的挑战, 并对未来发展趋势进行了展望, 以为耐摩擦机器人关节轴承的后续研究与发展提供有价值的参考, 有助于推动机器人技术在各领域的深入应用。

关键词 机器人关节轴承; 摩擦性能; 材料; 结构设计; 润滑技术

中图分类号: TB383.4; TP242.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.20.021

0 引言

机器人在当今社会的各个领域发挥着日益重要的作用, 从工业生产中的精密装配、焊接, 到医疗领域的手术辅助、康复治疗, 再到航空航天领域的太空探索、卫星维护等, 其应用范围不断拓展^[1]。关节轴承作为机器人机械系统的核心部件, 直接关系到机器人的运动精度、负载能力以及使用寿命^[2]。在机器人运行过程中, 关节轴承不可避免地承受着复杂的载荷和摩擦作用。摩擦不仅会造成能量的大量损耗, 导致机器人运行效率降低, 还可能引发磨损、发热等问题, 进而影响机器人的运动精度和稳定性, 严重时甚至会引发故障, 造成巨大的经济损失^[3]。因此, 深入开展耐摩擦机器人关节轴承的研究, 对于提升机器人的整体性能、拓展其应用边界具有至关重要的现实意义。

1 耐摩擦机器人关节轴承的研究现状

1.1 材料研究

材料是决定机器人关节轴承耐摩擦性能的关键因素之一。近年来, 在高性能金属材料、陶瓷材料和高分子材料等方面的研究取得了显著进展。

在高性能金属材料领域, 新型合金材料不断涌现。研究人员通过添加特殊合金元素, 并对成分进行精确调控, 研发出一系列具有优异性能的合金钢。例如: 在某些合金钢中添加适量的铬、钼、钒等元素, 能够形成细小而弥散的碳化物, 有效提高材料的硬度和耐磨性^[4]。同时, 这些合金元素还能增强材料的抗疲劳性能, 使轴承在承受交变载荷时, 不易产生疲劳裂纹, 从而延长使用寿命。在航空航天领域, 对机器人关节轴承的性能要求极高, 此类高性能合金钢的应用, 显著提升了轴承在极端工况下的耐摩擦性能, 确保了航天机器人在太空环境中的可靠运行。

陶瓷材料凭借其独特的性能优势, 在机器人关节轴承领域受到了广泛关注。氮化硅陶瓷具有高硬度、低摩擦系数、良好的耐高温性能和化学稳定性等优点。在高速、高温的工作环境下, 氮化硅陶瓷轴承表现出卓越的摩擦学性能, 其低摩擦系数使得机器人关节的运动更加顺畅, 能量损耗大幅降低。

高分子材料以其自润滑性、轻量化、耐腐蚀等特点, 成为耐摩擦轴承材料的重要选择。聚四氟乙烯 (PTFE) 及其复合材料在一些对负载要求相对较低、但对摩擦系数和轻量化有较高要求的机器人关节中得到了广泛应用^[5]。PTFE 具有极低的摩擦系数, 能够有效减少关节之间的摩擦阻力, 提高机器人的运动灵活性。同时, 通过在 PTFE 中添加碳纤维、玻璃纤维等增强材料, 可以显著提高其机械强度和耐磨性, 拓宽其应用范围。在服务型机器人领域, 如家用清洁机器人、医疗护理机器人等, PTFE 复合材料轴承的应用能够降低噪声、提高运行平稳性, 为用户提供更好的使用体验。

1.2 结构设计优化

结构设计的优化是提升机器人关节轴承耐摩擦性能的重要手段, 特殊几何形状设计和多自由度结构设计是其中的关键方向。

特殊几何形状设计能够有效改善轴承的受力分布, 从而降低摩擦。一些研究采用非对称结构或特殊的曲面设计, 使载荷能够更加均匀地分布在轴承表面。通过对轴承滚道进行特殊的曲面优化, 能够减少局部应力集中现象, 降低摩擦和磨损。这种设计不仅提高了轴承的承载能力, 还延长了其使用寿命。在重载机器人关节中, 合理的几何形状设计能够确保轴承在承受较大载荷时依然保持良好的摩擦性能, 保障机器人的稳定运行。

多自由度结构设计为机器人关节提供了更灵活的运动方式，同时有助于减少摩擦。球面或万向节结构的关节轴承能够在多个方向上实现相对运动，避免了单一方向运动带来的集中摩擦。这种结构设计使得机器人在执行复杂任务时，关节能够更加灵活地调整姿态，减少了因摩擦而产生的能量损耗和磨损。在一些需要进行复杂空间运动的机器人中，如救援机器人、特种作业机器人等，多自由度关节轴承的应用能够显著提高机器人的适应性和工作效率。

1.3 润滑技术改进

润滑技术对于降低机器人关节轴承的摩擦、提高其性能和寿命起着不可或缺的作用，涵盖润滑脂和润滑油的选择与应用、自润滑材料的使用以及新型润滑技术的研究等方面。

润滑脂和润滑油的合理选择与应用是常见且重要的润滑方式。在不同的工况下，需要根据轴承的工作条件，如温度、转速、负载等，精确选择合适的润滑脂或润滑油。在高温环境下，应选择具有高滴点和良好热稳定性的润滑脂，以确保在高温下润滑脂不会流失，保持良好的润滑性能。在高速运转的情况下，低粘度、高抗剪切性能的润滑油更为合适，能够有效减少因润滑油内部摩擦而产生的能量损耗。此外，润滑油的添加剂配方也在不断优化，通过添加抗磨剂、抗氧化剂等添加剂，可以进一步提高润滑油的润滑性能和使用寿命。

自润滑材料的应用为机器人关节轴承的润滑提供了新的解决方案。含有固体润滑剂的复合材料，如石墨、二硫化钼填充的聚合物材料，能够在无外部润滑条件下，通过自身释放的润滑剂实现自润滑。这种自润滑特性使得轴承在运行过程中能够持续保持较低的摩擦系数，减少了维护成本和停机时间。在一些难以进行定期润滑维护的机器人应用场景中，如深海探测机器人、太空机器人等，自润滑材料轴承的应用具有显著的优势。

气体润滑和磁悬浮润滑等新型润滑技术在机器人关节轴承中的研究也取得了一定进展。气体润滑利用气体的低粘性和良好的散热性能，实现了近乎无摩擦的运动。在高精度机器人关节中，气体润滑轴承能够提供极高的运动精度和稳定性，适用于对精度要求极高的任务，如芯片制造、精密仪器装配等。磁悬浮润滑则通过磁场使轴承悬浮，完全避免了直接接触，极大地降低了摩擦和磨损。这种润滑技术为高速、高负载机器人关节的发展提供了新的方向，有望在未来的高端制造业中得到广泛应用。

2 耐摩擦机器人关节轴承研究面临的挑战

2.1 复杂工况下的摩擦问题

机器人在实际应用中面临着极为复杂多样的工况，如高温、低温、高湿度、强腐蚀等极端环境，以及重载、冲击载荷等复杂载荷条件，这些都对关节轴承的耐摩擦性能提出了严峻的挑战。

在高温环境下，轴承材料的性能会发生显著变化。材料的硬度可能会降低，导致耐磨性下降；润滑脂或润滑油的粘度会降低，甚至会发生氧化和分解，使润滑效果大幅下降，摩擦系数增大。在钢铁冶炼、玻璃制造等高温工业生产场景中，机器人关节轴承长期处于高温环境，摩擦加剧，磨损严重，频繁的维护和更换轴承不仅增加了生产成本，还影响了生产效率。

在低温环境下，材料的脆性增加，容易出现裂纹和断裂。同时，润滑介质的流动性变差，无法在轴承表面形成良好的润滑膜，导致摩擦增大，甚至可能出现卡顿现象。在极地科考机器人、低温冷冻仓储机器人等应用中，关节轴承在低温下的摩擦问题严重限制了机器人的工作效率和可靠性。极地科考机器人需要在极低的温度下执行任务，关节轴承的摩擦问题可能导致机器人的运动精度下降，甚至无法正常工作。

2.2 多物理场耦合作用的影响

机器人关节轴承在工作过程中，往往受到多种物理场的耦合作用，如温度场、电磁场、力场等，这些物理场的相互作用会对轴承的摩擦性能产生复杂而微妙的影响。

温度场和力场的耦合会导致轴承材料产生热应力和变形。在高速旋转的机器人关节中，由于摩擦生热产生的温度场与机械载荷产生的力场相互作用，会使轴承的局部温度升高，材料膨胀，进而影响轴承的间隙和接触状态，改变摩擦系数。这种热-力耦合作用会加速轴承的磨损，降低其耐摩擦性能，缩短使用寿命。在一些高速加工机器人中，由于热-力耦合作用，关节轴承的磨损速度明显加快，需要频繁更换轴承，增加了维护成本和停机时间。

2.3 寿命预测与可靠性评估

准确预测耐摩擦机器人关节轴承的寿命和评估其可靠性是当前研究中的一个难点。由于轴承在实际工作中的工况复杂多变，受到多种因素的综合影响，现有的寿命预测模型和可靠性评估方法难以准确反映其真实的使用寿命和可靠性。

传统的寿命预测模型大多基于经验公式或简单的力学分析，这些模型往往忽略了材料的微观结构变化、

复杂工况以及多物理场耦合等因素的影响。在实际应用中,这些模型预测的寿命与轴承的实际使用寿命存在较大偏差。一些基于经验公式的寿命预测模型,没有考虑到材料在长期使用过程中的微观结构演变,如晶粒长大、位错运动等,导致预测结果与实际情况不符。

3 耐摩擦机器人关节轴承的未来发展趋势

3.1 新型材料的研发与应用

耐摩擦机器人关节轴承的材料将朝着高性能、多功能的方向不断发展。持续研发新型高性能合金材料,通过添加稀有元素、采用先进的制备工艺,如粉末冶金、快速凝固等,进一步提高材料的强度、硬度、耐磨性和抗疲劳性能。研发具有自修复功能的材料,使轴承在出现轻微磨损时,能够通过自身的物理或化学反应自动修复损伤部位,延长使用寿命。在一些关键领域,如航空航天、高端制造业等,自修复材料的应用将极大地提高机器人的可靠性和维护性。

加强对纳米材料、智能材料等新型材料的研究和应用。纳米材料具有独特的尺寸效应和表面效应,将纳米颗粒添加到轴承材料中,可以显著改善材料的摩擦学性能。纳米氧化铝、纳米碳化硅等颗粒能够有效提高材料的硬度和耐磨性,降低摩擦系数。智能材料能够根据外部环境的变化自动调整自身性能,如形状记忆合金在温度变化时能够恢复到预定形状,可用于制造自适应的关节轴承。在机器人运行过程中,当关节轴承受到不同的载荷或温度变化时,形状记忆合金能够自动调整结构,优化受力分布,降低摩擦和磨损。

3.2 结构创新与优化设计

随着计算机辅助设计、计算机辅助工技术的不断进步,机器人关节轴承的结构设计将更加创新和优化。利用先进的仿真软件对轴承的结构进行多物理场耦合分析,能够更准确地预测轴承在不同工况下的性能,为结构设计提供更科学的依据。通过拓扑优化、参数化设计等方法,在满足轴承强度和刚度要求的前提下,实现结构的轻量化和高性能化。在设计过程中,要考虑材料的分布和结构的合理性,使轴承在承受载荷时能够更加均匀地分散应力,减少局部应力集中。

设计更加复杂和高效的多自由度关节轴承结构,以满足机器人在复杂任务中的运动需求。研发具有自适应结构的关节轴承,能够根据工作载荷和环境条件自动调整结构参数,优化受力分布,降低摩擦和磨损。采用智能材料或传感器与结构相结合的方式,使关节轴承能够实时感知外部环境的变化,并自动调整结构,提高机器人的适应性和性能。

3.3 智能润滑与监测技术

智能润滑与监测技术将成为耐摩擦机器人关节轴承未来发展的重要方向。开发智能润滑系统,能够根据轴承的工作状态,如温度、转速、负载等参数,实时调整润滑剂量和润滑方式,实现精准润滑。利用传感器监测轴承的运行状态,通过智能算法分析这些参数,及时调整润滑系统的工作状态,确保轴承在最佳润滑条件下运行。在轴承温度升高或转速变化时,智能润滑系统能够自动增加润滑剂量或调整润滑油的喷射位置,保证良好的润滑效果。

结合物联网技术,实现对机器人关节轴承的远程监测和故障预警。通过将传感器采集的数据上传至云端,利用大数据分析和人工智能技术对数据进行处理和分析,能够提前预测轴承的故障,及时采取维护措施,提高机器人的运行可靠性和安全性,降低维护成本。通过对大量运行数据的分析,建立故障预测模型,提前发现轴承的潜在故障隐患,安排预防性维护,避免因突发故障导致的生产中断和损失。

4 结束语

耐摩擦机器人关节轴承的研究对于提升机器人的性能和可靠性具有举足轻重的意义。当前,在材料、结构设计和润滑技术等方面的研究虽然已经取得了一定的成果,但在复杂工况下的摩擦问题、多物理场耦合作用的影响以及寿命预测与可靠性评估等方面仍面临诸多挑战。未来,应加大在新型材料研发与应用、结构创新与优化设计、智能润滑与监测技术等方面的研究力度,以应对这些挑战,进一步提高机器人关节轴承的耐摩擦性能,满足不同领域对机器人日益增长的高性能需求,推动机器人技术在各领域的深入发展和广泛应用。

参考文献:

- [1] 安小康.低重力模拟装置关节滚动轴承摩擦力矩建模与补偿[D].福州:福州大学,2021.
- [2] 潘云龙.面向轴承车削加工的机器人上下料系统三维设计与工艺优化[D].银川:北方民族大学,2018.
- [3] 闫鸽,魏瑾,王少楠.基于HOSVD的工业机器人多关节轴承故障诊断分析[J].现代工业经济和信息化,2024,14(10):85-86,90.
- [4] 刘星雄.工业机器人异常监测系统的设计与实现[D].南京:南京航空航天大学,2022.
- [5] 李鹏飞.四足机器人结构设计与运动学仿真分析[D].昆明:昆明理工大学,2019.