

Study on lightweight structure design and material optimization of mechanical arm

Tao Zhang

Nanjing Huayan Dynamic Seal Technology Co.,Ltd., Nanjing, Jiangsu, 211100, China

Abstract

Lightweight robotic arm design and material optimization are important research directions to improve the performance of robot system. Due to the complex structure and large quality, the traditional mechanical arm affects the movement accuracy and energy consumption efficiency, and the lightweight design can effectively improve these problems. This paper focuses on the design method, material selection and manufacturing technology of lightweight mechanical arm. First, analyze lightweight design principles and explore the role of topology optimization and finite element analysis in structure optimization. Secondly, the performance requirements of lightweight materials are studied, and the application of high strength metals, composite materials and new materials in the mechanical arm is discussed. Finally, the advanced manufacturing technology, including additive manufacturing, composite molding and assembly precision control. Through systematic research, it provides theoretical support and technical basis for the lightweight of the mechanical arm, promotes the development of high-performance mechanical arm, and improves its application value in industrial and special operations.

Keywords

robotic arm; lightweight design; topology optimization; composite materials; additive manufacturing

机械臂轻量化结构设计与材料优化研究

张涛

南京华研动密封科技有限公司, 中国·江苏·南京 211100

摘要

机械臂轻量化设计与材料优化是提高机器人系统性能的重要研究方向。传统机械臂因结构复杂、质量较大,影响运动精度与能耗效率,轻量化设计能够有效改善这些问题。本文围绕机械臂轻量化结构设计方法、材料选择及制造技术展开研究。首先,分析轻量化设计原则,并探讨拓扑优化及有限元分析在结构优化中的作用。其次,研究轻量化材料的性能要求,讨论高强度金属、复合材料及新型材料在机械臂中的应用。最后,重点介绍先进制造工艺,包括增材制造、复合材料成型及装配精度控制等技术。通过系统性研究,为机械臂轻量化提供理论支持和技术依据,推动高性能机械臂的发展,提高其在工业及特种作业中的应用价值。

关键词

机械臂;轻量化设计;拓扑优化;复合材料;增材制造

1 引言

机械臂作为自动化系统的关键部件,在工业制造、航空航天及医疗机器人等领域广泛应用。随着应用场景的复杂化,对机械臂的运动精度、能耗效率及负载能力提出更高要求。传统机械臂因结构设计和材料选择的限制,往往存在质量大、惯性大、能耗高等问题,影响其动态性能及长期运行的可靠性。结构优化方面,拓扑优化和有限元分析是常用的设计方法,可在保证强度和刚度的前提下去除冗余材料。材料优化方面,轻量化材料如高强度铝合金、碳纤维复合材

料及钛合金在机械臂中逐步推广,以降低质量并提高承载能力。制造技术方面,增材制造和复合材料成型工艺的发展,为轻量化结构的实现提供新的可能。

2 机械臂轻量化结构设计方法

2.1 轻量化设计原则与评价指标

机械臂轻量化设计需要在降低质量的同时确保结构的强度、刚度和稳定性,以满足复杂工作环境下的动态性能要求。优化过程中需考虑材料利用率、承载能力、振动特性及制造可行性,通过合理的结构设计减少冗余部分并优化受力路径。比强度和比刚度是衡量轻量化效果的重要指标,确保在减重的同时维持必要的刚性。模态分析用于评估机械臂的振动响应,避免共振影响系统稳定性。疲劳寿命分析用于预测结构长期受载情况下的耐久性,确保材料减重不会引发早

【作者简介】张涛(1986-),男,中国江苏淮安人,硕士,工程师,从事机械工程研究。

期损坏。运动惯性评估可优化机械臂的动态响应，提高精度和控制稳定性。综合应用这些评价指标，实现质量、性能和成本的最优平衡，确保机械臂在高效运行的同时满足轻量化需求^[1]。

2.2 结构拓扑优化与形态优化方法

拓扑优化通过数学优化算法计算最优材料分布，使机械臂在最小质量条件下满足受力需求，避免无效材料的存在，提高整体轻量化水平。优化过程基于给定的边界条件、载荷工况及制造约束，通过有限元分析迭代计算最优拓扑结构。形态优化在拓扑优化基础上进一步调整关键部位的几何形态，提高局部结构的承载能力和刚度分布。薄壁结构和空心截面设计可降低质量，提高结构的抗扭刚度和抗弯刚度，避免局部屈曲失效。

2.3 机械臂关节与连杆结构优化策略

关节与连杆是机械臂的核心运动部件，优化设计可有效降低质量并提升整体运动性能。关节优化设计重点在于降低负载力矩、减少运动惯性并提高疲劳寿命，通过轻质高强度材料替代传统金属，提高强度的同时减轻质量。空心轴结构能够降低旋转惯量，提高运动响应速度并减少驱动系统的负荷。连杆优化主要通过截面设计和材料分布调整，以提高抗弯刚度和抗扭性能，同时减少冗余材料。蜂窝结构与仿生结构在连杆中可减少质量，同时保持优异的受力特性。采用一体化制造方式减少紧固件数量，降低连接部位的局部应力集中，提高整体结构强度与可靠性。

3 机械臂轻量化材料优化策略

3.1 轻量化材料的性能需求与选择标准

机械臂轻量化材料需要在降低质量的同时保持足够的强度、刚度和耐久性，以满足长期稳定运行的需求。密度是关键指标，传统钢材的密度为 7.8 g/cm³，而铝合金仅为 2.7 g/cm³，可减重 65%。比强度和比刚度决定了材料在单位质量下的承载能力，碳纤维复合材料的比强度可达 1500 MPa/(g/cm³)，比铝合金提高 3 倍以上。疲劳性能影响机械臂的长期使用寿命，钛合金的疲劳极限为 600 MPa，是铝合金的 2 倍，提高了高负载工况下的稳定性。材料的弹性

模量决定了刚度，铝合金为 70 GPa，而碳纤维增强复合材料可达 150 GPa，在轻量化的同时保持高刚性。综合考虑密度、强度、刚度、疲劳寿命、热稳定性和抗腐蚀能力，可优化材料选择，提高机械臂的轻量化和耐久性^[2]。

3.2 高强度金属材料在轻量化结构中的应用

高强度金属材料在轻量化机械臂中起到关键作用，通过降低密度和提高强度实现减重和结构优化。铝合金是最常用的轻量化金属，7 系铝合金的屈服强度可达 500 MPa，比普通钢材降低 65% 质量的同时保持较高承载能力。钛合金因其密度为 4.5 g/cm³，比钢轻 40%，但强度可达 1000 MPa，适用于机械臂关键承载部位，如关节轴和负载端结构，提高耐冲击性和疲劳寿命。镁合金因密度低至 1.8 g/cm³，是最轻的金属结构材料，但抗蚀性较差，需要采用表面氧化或涂层技术提高耐久性。在超高强度钢应用中，马氏体时效钢的屈服强度可达 1400 MPa，适用于需要极高刚度的支撑部件，同时减少壁厚优化轻量化效果。铝锂合金作为新型高强度轻质材料，其密度比传统铝合金降低 10%，但刚度提高 20%，已逐步应用于高性能机械臂。高强度金属的应用不仅优化了机械臂的承载能力，也提升了使用寿命和环境适应性，为轻量化结构提供更好的工程解决方案。

3.3 材料与制造工艺的适配性优化

机械臂轻量化设计不仅依赖材料选择，还需考虑制造工艺的适配性，以确保材料的性能得到最大化发挥。高强度铝合金采用热冲压成形工艺可提升成形精度，并减少壁厚至 1.5 mm，同时保证强度不低于 500 MPa。钛合金的传统加工难度较大，但通过超塑成形 - 扩散连接技术，可在降低加工成本的同时提高结构完整性，使疲劳寿命提升 30%。镁合金材料由于高温易氧化，可采用半固态成形工艺减少缺陷，提高成形精度，使力学性能提升 15%。碳纤维复合材料的自动铺丝成型技术可实现复杂结构的高精度制造，使材料利用率提高至 85%，减少加工废料并优化力学性能。合理匹配材料与制造工艺，不仅能降低制造成本，还能提高轻量化结构的工程适用性，确保机械臂的长期可靠性和高性能运行，详情见表 1。

表 1 机械臂轻量化材料性能参数对比与应用分析表

材料	密度 g/cm ³	比强度 MPa/(g/cm ³)	疲劳极限 MPa	弹性模量 GPa	热膨胀系数 10 ⁻⁶ /K	耐腐蚀性	典型应用
传统钢材	7.8	低	300	210	12	良好	高负载支撑结构
铝合金	2.7	中等	300	70	22	良好	臂杆、关节连接件
钛合金	4.5	高	600	110	8.6	优异	关键承载部位、关节轴
镁合金	1.8	中等	200	45	26	较差（需表面处理）	轻量化外壳、非关键结构
碳纤维复合材料	1.5-1.6	1500	500	150	1.5	优异	复杂曲面外壳、高刚性部件
铝锂合金	2.5	高	350	80	20	良好	高性能机械臂结构
马氏体时效钢	7.8	超高	1000	190	12	良好	超高刚度支撑部件

4 轻量化制造与装配技术在机械臂中的应用

4.1 轻量化结构的高效制造工艺选择

机械臂轻量化结构的制造工艺选择需要根据具体的结构特点、材料特性以及性能要求进行优化。首先,对于机械臂中需要高精度配合的部件,如关节连接件、底座等,高精度数控加工是理想的选择。该工艺能够将铝合金零件的加工精度控制在 ± 0.01 mm范围内,同时减少30%的材料损耗,非常适合形状相对简单但对精度要求极高的零件。其次,机械臂的臂杆和支撑结构通常需要高强度和轻量化设计,此时热冲压成形技术是更优的选择。该技术适用于高强度铝合金部件,能够在保持屈服强度500 MPa以上的同时,将壁厚减少至1.5 mm,材料利用率高达90%,非常适合薄壁设计的轻量化结构。对于机械臂中复杂曲面结构的外壳或关节连接件,尤其是钛合金材料,超塑成形技术是更好的选择。该技术能够在900℃的高温下实现复杂曲面零件的高精度制造,同时将疲劳寿命提高25%,非常适合对疲劳性能要求较高的部件。该工艺能够将接头强度提高至母材的85%,同时减少传统焊接导致的热影响区域,使焊接变形降低50%,非常适合需要高强度和低变形的连接部位。通过合理选择制造工艺,可以在保证机械臂轻量化结构精度和强度的同时,最大限度地提高材料利用率和生产效率,为机械臂的大规模制造提供可行性保障^[3]。

4.2 复合材料轻量化部件的制造优化

复合材料轻量化部件的制造优化主要涉及成型工艺、材料铺层和加工精度,以实现高强度、低密度和稳定耐久的结构特性。热压罐成型技术适用于碳纤维复合材料,压力可达1.5 MPa,孔隙率降低至1%以下,提高层间剪切强度20%。树脂传递模塑成型(RTM)技术可实现复杂几何结构的高精度制造,纤维体积分数可达65%,提高抗弯刚度15%。自动铺丝(AFP)和自动铺带(ATL)技术可控制碳纤维层间铺设精度至 ± 0.2 mm,减少手工铺设误差,提高整体结构的受力均匀性。激光辅助固化技术可加快树脂固化速度50%,减少成型时间,提高生产效率。复合材料的加工过程中易产生分层和毛刺,采用超声振动辅助切削技术可降低切削力30%,减少界面损伤,提高表面光洁度至Ra 0.8 μ m。复合材料轻量化部件的制造优化不仅提高了力学性能和耐久性,也降低了制造成本,使其在高性能机械臂中得

到更广泛应用^[4]。

4.3 机械臂轻量化部件的装配精度控制

机械臂轻量化部件的装配精度直接影响其运动性能、稳定性和使用寿命,精确控制装配公差是确保系统可靠性的关键。高精度测量设备如三坐标测量机(CMM)可控制关键部件的尺寸误差至 ± 0.005 mm,提高装配一致性。浮动定位系统用于复杂装配过程中,可自动调整偏差,减少装配应力50%,防止因安装误差导致的局部应力集中问题。而机器人自动装配技术可减少人为误差,使机械臂关节部件的对齐精度提升30%,提高整体装配效率。碳纤维复合材料与金属的混合结构装配需采用粘接与机械连接结合方式,界面结合强度可提高40%,避免层间剥离现象。高精度装配控制确保了机械臂的稳定运行,使其在高精度工业机器人、航空航天和医疗机器人领域具备更高的可靠性^[5]。

5 结语

机械臂轻量化设计是提高性能、降低能耗和提升动态响应能力的重要技术方向。通过优化结构设计,采用拓扑优化、有限元分析等方法,可在确保刚度和强度的同时减少质量。高强度金属材料、复合材料及新型材料的应用,使机械臂在承载能力和耐久性方面得到优化。先进制造工艺结合增材制造技术,使复杂轻量化结构的实现更加高效,并提高材料利用率和制造精度。装配精度控制在机械臂轻量化设计中至关重要,确保运动精度和长期稳定性。轻量化技术的发展不仅提升了机械臂的工作效率,也拓展了其在工业制造、航空航天及医疗等领域的应用范围。未来随着新材料和智能制造技术的进步,轻量化机械臂将在更多复杂环境中发挥更大作用。

参考文献

- [1] 顾寅,付东翔.机械臂抓取无人机视觉检测方法[J].电子科技,
- [2] 杨天玲,朱蕾,刘菲.基于Altair Inspire的机械臂手爪结构轻量化设计及3D打印制造[J].机电工程,
- [3] 胡明珠,刘怀举,张秀华,朱才朝.空间机械臂关节双电机-行星齿轮传动系统的多目标优化[J].宇航学报,2024,45(12):2009-2023.
- [4] 叶霜,唐萌,陈斌,周志冰.面向增材制造技术的机械臂轻量化设计与工艺仿真[J].南方农机,2024,55(24):36-39.
- [5] 张大鹏,王雪桃,肖扬.基于Altair Inspire的码垛机器人手臂轻量化设计研究[J].内燃机与配件,2024,(24):89-91.