

新型工业机器人机械结构创新设计及其电气驱动系统的协同优化

付廷贵, 孟祥达, 蔡建康

(青岛智电智能科技有限公司, 山东 青岛 266100)

摘要 在制造业持续升级的背景下, 工业机器人在生产流程中的应用越来越普遍和深入。本文重点研究了新型工业机器人机械结构的创新设计和电气驱动系统的协同优化, 通过深入剖析机械结构创新的轻量化、模块化、高刚度等原则, 以及拓扑优化、仿生设计等方法, 结合电气驱动系统高精度、快响应、高可靠的特点, 阐述了基于多体动力学、控制策略、能量效率等两者协同优化的策略, 明确实现途径, 全方位提升工业机器人的性能、精度与可靠性, 旨在为促进其发展提供实践参考。

关键词 工业机器人; 机械结构; 创新设计; 电气驱动

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.10.006

0 引言

工业机器人是现代制造业的关键装备, 其性能将直接影响生产效率、产品质量和企业的竞争力。工业机器人技术在过去几十年中取得了巨大的进步, 从最简单的重复操作设备发展到高度智能化, 高精度的自动化系统。但是随着制造业对工业机器人要求的不断提高, 例如更高的载荷能力、更快的运动速度、更高的定位精度和更好的适应性等, 传统的工业机器人设计已经难以满足这些要求。因此, 开展新型工业机器人机械结构创新设计及其电气驱动系统的协同优化研究, 具有重要的现实意义。

1 新型工业机器人机械结构创新设计

1.1 创新设计原则

1.1.1 轻量化原则

在保证机器人机械结构强度和刚度的同时, 尽量减轻其重量。轻量化设计不仅可以降低机器人运行过程中的能耗, 而且可以减少电机等驱动部件的负载, 提高机器人的运动速度和响应性能。譬如用铝合金、碳纤维复合材料等高强轻质材料替代传统的钢材, 而且设计时还需优化结构的形状, 去除不必要的材料, 采用空心结构、薄壁结构等。

1.1.2 模块化原则

将机器人的机械结构划分为很多功能模块, 每个功能模块有特定的功能和接口。模块化设计便于机器人的制造、装配、维护和升级。不同功能模块可以根据实际需求进行组合和搭配, 提高机器人的通用性和

适应性。比如, 将机器人的关节部分设计成独立的模块, 如关节壳体、减速器、电机安装座等, 不同类型的关节模块可以很容易地安装在机器人的手臂和底座上。

1.1.3 高刚度原则

高刚度的机械结构可以减少机器人在运动过程中的变形, 提高定位精度和运动稳定性。通过优化结构布局、增加加强筋、合理选择材料等手段提高机械结构刚度。例如, 在机器人手臂设计中, 可以使用封闭式的箱型结构取代开放式的框架结构, 显著增加手臂的抗弯、抗扭刚度。

1.2 创新设计方法

1.2.1 拓扑优化设计

拓扑优化是一种基于数学优化算法的结构设计方法, 它通过在给定的设计空间内寻找材料的最佳分布, 以达到优化结构性能的目的^[1]。在工业机器人机械结构设计中, 拓扑优化可以帮助设计师确定机械结构的最佳形状和布局, 去除不必要的材料, 提高结构的刚度和强度。例如, 在设计机器人的底座时, 通过拓扑优化可以找到在承受各种载荷情况下材料的最优分布, 从而设计出既满足强度和刚度要求又轻量化的底座结构。

1.2.2 仿生设计

仿生设计是模仿自然界生物的结构、功能和行为来设计产品的方法。在工业机器人机械结构设计中, 仿生设计可以为机器人的创新设计提供灵感。例如, 模仿昆虫的腿部结构设计机器人的关节, 昆虫腿部具有轻巧、灵活且能承受较大负载的特点, 通过借鉴其

结构和运动原理,可以设计出性能更优的机器人关节。又如,模仿蛇的身体结构设计柔性机器人,使其能够在复杂环境中灵活运动。

1.2.3 基于增材制造的设计

增材制造技术,又称 3D 打印技术,它可以根据设计模型直接制造出复杂形状的零部件。基于增材制造的设计允许设计师突破传统制造工艺的限制,设计出具有独特结构的机械零部件。例如,利用增材制造技术可以制造出内部具有复杂晶格结构的机器人手臂,这种晶格结构既减轻了手臂的重量又保证了其强度和刚度,同时增材制造还可以实现零部件的一体化制造,减少装配环节,提高生产效率。

2 新型工业机器人电气驱动系统

2.1 电气驱动系统的组成

工业机器人的电气驱动系统主要由电机、驱动器、控制器以及传感器等部分组成^[2]。电机是机器人的动力源,常见的电机类型有直流电机、交流伺服电机、步进电机等。驱动器用于控制电机的运行,将控制器发出的控制信号转换为电机所需的电压和电流信号。控制器负责对机器人的运动轨迹、速度、位置等进行规划和控制,它接收来自传感器的反馈信号,根据预设的控制算法对驱动器发出指令。

2.2 电气驱动系统的特点

2.2.1 高精度控制

现代工业机器人对定位精度和运动轨迹精度要求很高,电气驱动系统能够通过精确的控制算法和高分辨率的传感器实现高精度的控制。例如,交流伺服电机配合高精度的编码器,可以实现亚毫米甚至更高精度的定位控制。

2.2.2 快速响应

工业机器人在运行过程中需要快速地响应控制器的指令,电气驱动系统具有快速的动态响应特性。电机可在短时间内达到设定的转速和转矩,驱动器可以迅速调整输出信号,使机器人迅速启动,停止和改变运动方向。

3 机械结构与电气驱动系统的协同优化

3.1 协同优化的意义

工业机器人机械结构和电气驱动系统是一个相互关联,相互影响的整体。机械结构的性能直接影响到电气驱动系统的负载特性和控制效果,电气驱动系统性能又决定机械结构能够实现的运动性能^[3]。通过对两者进行协同优化,充分发挥两者的优势,提高机器人的整体性能。例如,机械结构的轻量化可以减轻电

气驱动系统的负载,使电机以更低的能耗运行,也有利于提高电机的动态响应性能;而电气驱动系统高精度的机械结构能更好地控制机械结构的运动,充分发挥机械结构的设计性能,提高机器人的定位精度和运动稳定性。

3.2 协同优化策略

3.2.1 基于多体动力学的协同优化

多体动力学专注于探究多个相互连接的刚体或弹性体在力与力矩作用下的运动规律。于工业机器人设计环节,借助多体动力学软件构建机器人的机械结构模型。在构建模型时,将电机的转矩、惯性等电气驱动系统的动力学特性纳入考量。通过对该多体动力学模型开展仿真分析,能够获取机器人在不同工况下的运动性能数据,如各关节的位移、速度、加速度,以及各部件所承受的受力情况,包括应力、应变分布等。这些数据为机械结构和电气驱动系统的协同优化提供关键依据。例如,依据仿真结果,通过调整机械结构的质量分布,改变各部件的质量占比,同时优化关节刚度,如选用不同刚度系数的关节轴承,并且在电机选型上综合考虑电机的功率、转速、转矩特性,以及对控制参数如 PID 控制参数进行优化调试,从而使机器人在满足工作要求,如完成特定搬运任务或复杂装配操作的前提下,具备最佳的运动性能,包括快速响应、平稳运行,以及最低的能耗指标^[4]。

3.2.2 考虑控制策略的协同优化

电气驱动系统的控制策略对机器人的性能影响显著。在机械结构设计初期,就应充分评估控制策略的实现难度与预期效果。以运动轨迹复杂的机器人为例,采用 MPC 策略通过建立机器人运动模型,对未来多个时刻的运动状态进行预测并计算出最优控制输入,能够有效提高控制精度和响应速度。但是,此策略的实施前提是机械结构具有较高的刚度,以抵抗运动过程中的变形,较低的惯性,便于快速改变运动状态,从而确保控制器能够精准地预测和控制机器人的运动。

3.2.3 基于能量效率的协同优化

工业生产是以降低能耗为重要目标,而机械结构和电气驱动系统的协同优化,可以有效地提高机器人的能量效率。一方面,采用轻量化的机械结构设计,如选用铝合金、碳纤维等轻质材料,减少机器人整体重量,同时搭配高效的驱动电机,如采用永磁同步电机,其具有较高的效率功率比,可降低机器人运行过程中的能量消耗。另一方面,制定合理的控制策略,优化电机的运行状态。例如,根据机器人负载的变化,实时调整电机的转速和转矩,使电机在不同负载下都能维持较高的效率。

3.3 协同优化的实现途径

3.3.1 跨学科团队合作

实现机械结构和电气驱动系统的协同优化,需要机械设计、电气控制、自动化等多个学科领域的专业人员共同参与。组建跨学科团队,团队成员涵盖机械工程师、电气工程师、自动化工程师等。在团队运作过程中,促进不同专业人员之间的沟通与协作,打破学科壁垒。例如,定期组织技术交流会议,机械工程师详细介绍机械结构设计的思路、难点及预期性能,电气工程师阐述电气驱动系统的设计方案、控制策略及对机械结构的要求,自动化工程师则从系统集成和自动化控制角度提出建议。

3.3.2 一体化设计平台

通过一体化设计平台,将机械结构设计软件、电气驱动系统设计软件、多体动力学仿真软件等集成在一起。平台上进行数据的共享与交互。在设计过程中,机械设计师使用机械结构设计软件进行机器人机械结构的设计,机械设计师的设计数据可以实时地传输到一体化平台上^[5]。电气工程师通过平台获取机械结构数据,在电气驱动系统设计软件中完成电机选型、驱动器设计等,并将电气参数反馈到平台。机械设计师和电气工程师可通过同一平台进行协同设计,实时查看、修改对方的设计参数,并根据仿真结果及时评估设计方案的可行性和性能。例如,仿真中机械结构的某一部分受力太大,机械设计师可以直接在平台上进行结构形状或者材料的调整,电气工程师与之同步评估该调整对电气驱动系统的影响,如电机负载的变化等,可以提高设计的效率和质量。

3.3.3 实验验证与优化

通过实验对协同优化后的机器人进行性能测试,验证设计方案的有效性,在实验过程中,通过专业的测试设备采集机器人的运动数据(如关节角度、运动速度、加速度等)、电气参数(如电机电流、电压、功率)等信息,并把采集到的数据和仿真结果做对比分析,找到存在的问题和不足之处。例如,如果实验测得的机器人定位精度低于仿真预期,可能由机械结构装配误差、电气驱动系统的控制精度不足等原因引起。根据实验结果,重新装配机械结构,调整部件间隙,重新校准电气驱动系统的控制参数,优化控制算法,不断完善设计方案,逐步提高机器人的性能,使其满足实际生产的需求。

4 案例分析

以某款新型焊接工业机器人为例,其要求具有较高的负载能力,较快的焊接速度以及高精度的焊缝跟

踪性能。在机械结构设计方面,选用轻质铝合金材料和拓扑优化设计方法设计了高刚度手臂结构。电气驱动系统:采用高功率密度的交流伺服电机,高性能的驱动器,采用基于视觉传感器的焊缝跟踪控制策略。通过协同优化机械结构和电气驱动系统,通过多体动力学仿真软件对机器人运动性能进行分析,调整机械结构的参数和电气驱动系统的控制参数。通过实验证明,优化后的焊接机器人负载能力提高了20%,焊接速度提高了30%,焊缝跟踪精度达到了 ± 0.2 mm,能耗降低了15%,满足了实际生产需求,取得了良好的应用效果。

5 结论

改进工业机器人机械结构的创新设计与电气驱动系统的协同优化是提高工业机器人性能的关键手段。根据轻量化、模块化、高刚度等创新设计原则,采用拓扑优化,仿生设计,基于增材制造的设计等创新设计方法,设计性能更好的机械结构。同时,认识电气驱动系统的组成和特点,通过基于多体动力学,考虑控制策略,基于能量效率等协同优化策略,借助跨学科团队合作、一体化设计平台、实验验证与优化等实现途径,实现机械结构和电气驱动系统的协同优化,可以显著提高工业机器人的性能、精度和可靠性,满足现代制造业不断发展的需要,为工业机器人技术的进一步发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 吴心梦,吴自燃,董西杰,等.一种工业机器人交流伺服电机结构的设计优化[J].科技与创新,2025(03):113-115,119.
- [2] 郝欣丽,刘涛.工业机器人用同轴磁齿轮结构参数响应面法优化[J].现代工业经济和信息化,2025,15(01):90-91,94.
- [3] 徐洋洋,李世豪.工业机器人机械臂结构拓扑优化设计研究[J].中国新技术新产品,2025(02):38-40,47.
- [4] 刘娜,蒋雨莹,冯亚男,等.创新链视角下创新主体跨层嵌入对创新质量的影响:以中国工业机器人产业为例[J/OL].科技进步与对策,1-12.https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=uXGtp3S0eCDcKHiStS2eDGniAgrdD-nR-UyIEcMudgnwfx6E-sTl28benHmDhltcC4qaF1jim3tUsvYdfbhaH5TCI_k_GgVfTkED_6yg3PT6fCYvWSQENCyVCjtYEXZKTgMvQVcM_vvJBcyDFyi7CZqyerVPavyzIVkXd1v7txMAGW2eyY2t_A==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [5] 胡艳,陈曦.人工智能、区域创新能力与产业结构升级:基于中国工业机器人的经验证据[J].商学研究,2023,30(04):60-71.