

工业机器人机械结构优化设计与分析

王 响¹ 陈琼光² 张志远²

1. 沈阳鑫伟仁邦自动化设备有限公司 辽宁沈阳 110078

2. 沈阳庆恒华泰自动化成套设备有限公司 辽宁沈阳 110026

摘 要: 本文围绕工业机器人机械结构展开研究, 深入探讨其优化设计与分析方法。详细阐述工业机器人机械结构的基本组成、常见类型及设计关键要素, 分析影响结构性能的多种因素, 介绍多种优化设计方法, 并通过软件实例展示优化流程与效果。同时探讨优化设计在工业领域的应用及未来发展趋势, 旨在为提升工业机器人性能提供理论支持与实践参考。

关键词: 工业机器人; 机械结构; 优化设计; 结构性能

一、工业机器人机械结构概述

(一) 工业机器人的基本组成

工业机器人主要由机械本体、驱动系统、控制系统和传感器系统四大部分构成。机械本体是机器人的执行机构, 为机器人的运动提供支撑和基础, 通常包括基座、腰部、手臂、手腕和末端执行器等部件。驱动系统为机械本体的运动提供动力, 常见的驱动方式有电机驱动、液压驱动和气动驱动等。控制系统负责对机器人的运动和动作进行精确控制, 根据预设程序实现各种任务。传感器系统则用于获取机器人自身状态以及工作环境信息, 使机器人能够实时感知外界变化并做出相应调整, 确保作业的准确性和安全性^[1]。

(二) 常见机械结构类型

常见的工业机器人机械结构类型包括直角坐标型、圆柱坐标型、极坐标型和关节型等。直角坐标型机器人通过沿三个相互垂直的坐标轴进行直线运动来实现末端执行器的定位, 具有结构简单、运动精度高的优点, 常用于精度要求较高的装配作业。圆柱坐标型机器人在垂直轴上进行升降运动, 同时在水平面上进行回转和径向移动, 工作空间呈圆柱形, 其结构紧凑, 适用于搬运、焊接等任务。极坐标型机器人以极坐标方式确定末端执

行器的位置, 具有较大的工作空间和灵活性, 常用于大型工件的加工和搬运。关节型机器人模仿人类手臂的关节结构, 由多个旋转关节连接而成, 具有动作灵活、工作空间大、能实现复杂运动轨迹等优势, 是目前应用最为广泛的工业机器人结构类型。

(三) 机械结构设计的关键要素

在工业机器人机械结构设计过程中, 有多个关键要素需要重点考虑。首先是刚度设计, 足够的刚度能够保证机器人在运动过程中抵抗外力变形, 确保运动精度和稳定性。其次是强度设计, 机械结构必须具备足够的强度, 以承受工作过程中的各种载荷, 避免发生断裂等失效形式。此外, 轻量化设计也是重要要素之一, 减轻机器人的重量不仅可以降低能源消耗, 还能提高机器人的运动速度和响应性能。同时, 还要考虑结构的可制造性和可装配性, 便于在实际生产中进行制造和装配, 降低生产成本和周期。

二、工业机器人机械结构性能影响因素

(一) 材料特性的影响

材料特性对工业机器人机械结构性能有着显著影响。不同材料的密度、弹性模量、强度等性能参数差异较大。例如, 选用密度小、强度高的铝合金材料, 可以在保证机械结构强度的同时减轻机器人的重量, 提高运动性能。而材料的弹性模量则影响结构的刚度, 弹性模量越高, 结构在受力时的变形越小, 有助于提高机器人的精度。此外, 材料的疲劳性能也不容忽视, 长期在交变载荷作用下工作, 材料的疲劳特性决定了机械结构的使用寿命^[2]。

作者简介:

1. 王响 (1996.09--), 男, 汉族, 辽宁锦州人, 学历: 本科, 研究方向: 机械设计。

2. 陈琼光 (1981.03--), 女, 汉族, 辽宁沈阳人, 职务/职称: 中级职称, 学历: 本科, 研究方向: 机械设计。

（二）关节与传动机构的影响

关节和传动机构是工业机器人实现运动的关键部件，其性能直接影响机器人的运动精度、平稳性和效率。关节的精度和间隙会导致机器人运动时产生累积误差，影响末端执行器的定位精度。传动机构的类型和质量也至关重要，如齿轮传动、丝杠传动等，不同传动方式具有不同的传动效率、传动精度和承载能力。齿轮传动传动效率高，但存在齿侧间隙，会影响精度；丝杠传动精度高，但承载能力相对有限。同时，传动机构的润滑和磨损情况也会影响机器人的性能和使用寿命。

（三）结构布局的影响

结构布局是影响工业机器人机械结构性能的重要因素。合理的结构布局可以优化机器人的受力情况，减少应力集中，提高结构的整体强度和刚度。例如，将主要承载部件布置在受力较大的部位，使结构受力更加均匀。此外，结构布局还会影响机器人的工作空间和运动灵活性。紧凑合理的布局能够扩大机器人的工作空间，同时避免运动部件之间的干涉，提高机器人的运动性能。

（四）制造与装配误差的影响

制造与装配误差不可避免地会对工业机器人机械结构性能产生影响。制造过程中的尺寸偏差、形状误差等会导致零件的实际尺寸与设计尺寸不符，影响机械结构的配合精度和整体性能。装配过程中的误差，如零件装配位置不准确、拧紧力矩不一致等，会进一步加剧机器人的运动误差，降低精度和稳定性。这些误差在机器人长期运行过程中还可能逐渐累积，导致性能下降甚至故障发生。

三、工业机器人机械结构优化设计方法

（一）优化设计的目标与原则

工业机器人机械结构优化设计的目标是在满足各项性能指标要求的前提下，实现结构的轻量化、低成本和高可靠性。在优化设计过程中，需要遵循一些基本原则。首先是可行性原则，优化方案必须在实际生产条件下能够实现，考虑制造工艺、材料供应等因素。其次是经济性原则，在保证性能的同时，尽量降低成本，提高经济效益。此外，还要遵循综合性原则，全面考虑机器人的各项性能指标，避免片面追求某一指标而忽视其他方面。

（二）拓扑优化

拓扑优化是一种基于结构力学和数学优化算法的设计方法，通过在给定的设计空间内寻找材料的最佳分布方式，以实现结构性能的优化。在工业机器人机械结构

设计中，拓扑优化可以帮助确定结构的基本形状和布局，去除不必要的材料，在不影响结构强度和刚度的前提下减轻重量。例如，通过拓扑优化可以确定机械臂的内部筋板布局，使结构在受力时能够更加合理地传递载荷，提高材料利用率^[3]。

（三）尺寸优化

尺寸优化是对工业机器人机械结构中各零部件的尺寸参数进行优化调整，以满足结构性能要求。通过建立结构的力学模型，结合约束条件和目标函数，利用优化算法求解出各零部件的最佳尺寸。例如，对机械臂的杆件直径、壁厚等尺寸进行优化，在保证强度和刚度的基础上，减小杆件的重量，提高机器人的运动性能。尺寸优化通常在拓扑优化确定结构基本形状后进行，进一步细化结构设计。

（四）形状优化

形状优化是对工业机器人机械结构的外形轮廓进行优化设计，以改善结构的受力状态和性能。与尺寸优化不同，形状优化不仅改变尺寸参数，还对结构的几何形状进行调整。例如，通过优化机械臂关节处的过渡圆角、加强筋的形状等，减少应力集中，提高结构的疲劳寿命。形状优化需要借助计算机辅助设计软件和优化算法，对多种形状方案进行分析和比较，确定最优形状。

（五）多目标优化

工业机器人机械结构的性能往往涉及多个目标，如轻量化、高强度、高刚度等，这些目标之间可能存在相互冲突。多目标优化方法旨在同时考虑多个目标，通过一定的算法找到一组非劣解，即帕累托最优解集。设计师可以根据实际需求从帕累托最优解集中选择最合适的方案。常用的多目标优化算法有遗传算法、粒子群优化算法等，这些算法能够在复杂的设计空间中快速搜索到较优的解，为工业机器人机械结构的优化设计提供了有效手段^[4]。

四、基于软件的工业机器人机械结构优化设计实例

（一）建模与分析软件介绍

在工业机器人机械结构优化设计中，常用的建模与分析软件有ANSYS、SolidWorks Simulation等。ANSYS是一款功能强大的有限元分析软件，能够对复杂结构进行精确的力学分析，包括结构强度、刚度、振动等方面的分析。它提供了丰富的材料库和单元类型，支持多种优化算法，可用于工业机器人机械结构的拓扑优化、尺寸优化和形状优化。SolidWorks Simulation是与SolidWorks

三维建模软件集成的分析工具，操作相对简单，易于上手，能够方便地对在SolidWorks中创建的机械结构模型进行静态、动态和热分析等，并进行优化设计。

（二）机械臂结构优化设计流程

以某工业机器人机械臂为例，阐述基于软件的优化设计流程。首先，在SolidWorks中建立机械臂的三维模型，根据实际尺寸和结构特点进行精确建模。然后，将模型导入ANSYS软件中，定义材料属性、约束条件和载荷工况。例如，设定机械臂的材料为铝合金，在固定端添加固定约束，根据实际工作情况施加相应的力和扭矩。接着，进行初始结构的有限元分析，得到机械臂的应力、应变分布情况以及变形量等结果。根据分析结果，确定优化目标 and 设计变量，如以减轻重量为目标，将机械臂杆件的壁厚作为设计变量。选择合适的优化算法，如ANSYS中的一阶优化算法，进行优化计算。在优化过程中，软件会不断调整设计变量，重新进行有限元分析，直到满足优化目标或收敛条件。

（三）优化结果与分析

经过优化计算后，得到优化后的机械臂结构。对比优化前后的结果，发现优化后的机械臂重量明显减轻，同时应力分布更加均匀，最大应力值有所降低，满足强度要求。在刚度方面，优化后的机械臂变形量减小，提高了运动精度。通过优化设计，实现了机械臂结构性能的提升和轻量化目标。对优化结果进行进一步分析，总结优化过程中的经验和教训，为后续的工业机器人机械结构设计提供参考。

五、工业机器人机械结构优化设计的应用与展望

（一）优化设计在不同工业领域的应用

工业机器人机械结构优化设计在众多工业领域都有广泛应用。在汽车制造领域，优化后的工业机器人能够更精准地完成焊接、装配等任务，提高汽车生产质量和效率，同时降低生产成本。在电子制造领域，轻量化、高精度的工业机器人可以满足微小零部件的精密装配需求，提升电子产品的生产精度和良品率。在物流仓储领域，优化设计的机器人能够提高搬运效率，减少能源消耗，实现智能化仓储管理。此外，在航空航天、食品加工等领域，工业机器人机械结构优化设计也发挥着重要作用，推动各行业的发展^[5]。

（二）未来发展趋势

随着科技的不断进步，工业机器人机械结构优化

设计将呈现出一些新的发展趋势。一方面，多学科交叉融合将更加深入，结合材料科学、力学、计算机科学等多学科知识，开发更加先进的优化设计方法和技术。例如，利用新型智能材料，实现机器人结构的自感知、自修复功能，进一步提升机器人的性能和可靠性。另一方面，随着人工智能和大数据技术的发展，优化设计将更加智能化。通过对大量工业机器人运行数据的分析，建立更加准确的性能预测模型，实现基于数据驱动的优化设计，提高优化效率和准确性。此外，随着对环保要求的提高，绿色设计理念将在工业机器人机械结构优化设计中得到更广泛的应用，注重材料的可回收性和能源的高效利用。

结论

工业机器人机械结构的优化设计与分析是提升机器人性能的关键环节。通过对工业机器人机械结构的基本组成、常见类型、设计关键要素以及性能影响因素的深入研究，掌握了优化设计的重要性和必要性。多种优化设计方法，如拓扑优化、尺寸优化、形状优化和多目标优化等，为实现机器人结构的轻量化、高性能提供了有效手段。基于软件的优化设计实例展示了优化设计的实际应用流程和良好效果。工业机器人机械结构优化设计在不同工业领域的广泛应用，推动了各行业的发展。未来，随着多学科交叉融合、智能化技术和绿色设计理念的不断发展，工业机器人机械结构优化设计将迎来更广阔的发展空间，为制造业的转型升级提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 李路可, 张伟燕, 许利君. 智能激光除草机器人机械结构的设计与优化[J]. 河北农机, 2025, (06): 12-14.
- [2] 武益安. 工件打磨机器人控制系统的设计与应用经济性分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15 (02): 77-78+81.
- [3] 王秀云, 蒋东霖, 邵丽颖. 一种树枝修剪机器人机械结构设计[J]. 长春师范大学学报, 2025, 44 (02): 179-184.
- [4] 杜冰, 王焜. 工业机器人机械臂结构设计优化策略[J]. 模具制造, 2024, 24 (07): 201-203+206.
- [5] 张鑫. 工业机器人机械设计方法与机器人算法研究[J]. 农家参谋, 2020, (22): 176-177.