

工业机器人末端执行器的机械创新与性能分析

王 禾

衢州市技师学院（衢州市工程技术学校） 浙江 衢州 324000

摘要：工业机器人末端执行器是机器人与作业对象交互的核心部件，直接决定作业精度与效率。本文基于末端执行器基础理论，从机械结构、材料应用、驱动方式三方面开展创新设计，整合模块化、轻量化及混合驱动理念，完成创新方案建模与仿真。通过对照测试分析夹持力、精度等核心指标，明确创新执行器综合性能较传统产品提升28%，指出现存短板并提出优化策略，为其工程应用与技术升级提供理论与实践支撑。

关键词：工业机器人；末端执行器；机械创新；性能

引言：智能制造与柔性生产快速发展背景下，工业机器人对末端执行器的灵活性、精度与适应性提出更高要求。传统末端执行器存在结构刚性强、适配性差、性能单一等问题，难以满足复杂工况需求。本文聚焦末端执行器机械创新与性能优化，结合拓扑优化、新型材料及先进驱动技术，开展创新设计与测试分析，破解行业痛点，助力工业机器人向高精度、高柔性、高可靠性升级。

1 工业机器人末端执行器相关基础理论

1.1 末端执行器的基本概念与分类

(1) 基本概念：末端执行器是工业机器人实现作业功能的终端部件，核心定义为连接机器人手臂末端、直接与作业对象接触并完成抓取、搬运、装配等操作的装置。其结构主要由夹持机构、传动机构、连接机构组成，夹持机构负责固定作业对象，传动机构传递动力，连接机构实现与机器人手臂的精准对接。作为机器人与作业对象交互的关键部件，它直接决定作业精度与效率，是机器人完成各类工业任务的核心载体。(2) 分类方式：按驱动方式可分为气动式（结构简单、成本低，适用于轻负载作业）、电动式（控制精度高、响应稳定，适配高精度作业）、液压式（负载能力强，用于重载场景）；按夹持方式可分为夹持式（适用于规则固体工件）、吸附式（适配板材、薄片等工件）；按应用场景可分为通用型（适配多种工件，通用性强）、专用型（针对特定工件定制，作业效率高）。

1.2 末端执行器的核心技术要求

(1) 机械性能要求：重复定位精度需符合行业规范，确保每次作业位置偏差在允许范围；负载能力需匹配作业需求，兼顾承载效率与结构稳定性；响应速度需满足生产节拍，耐久性需达到行业使用寿命标准，保障长期稳定运行。(2) 环境与适配要求：需适应工业现场-20℃至60℃的工作温度范围，具备良好的抗磨损、抗冲击性

能，能抵御电磁干扰，同时需与主流机器人控制系统兼容，实现信号精准传输与协同控制。(3) 智能化要求：需集成力反馈功能，实时感知夹持力度避免工件损坏；具备视觉定位能力，适配柔性制造与复杂作业场景，实现工件精准抓取与装配^[1]。

1.3 机械创新设计的基础理论

(1) 结构优化设计理论：借助拓扑优化、有限元分析原理，在满足强度要求的前提下，优化结构布局，提升结构刚度与轻量化水平，降低制造成本。(2) 传动技术基础：链传动、连杆传动、腱绳传动等核心方式各有优势，链传动传动稳定，连杆传动精度高，腱绳传动适配柔性结构，为末端执行器创新设计提供理论支撑。(3) 材料应用理论：合理选用碳纤维复合材料、记忆合金、高强度合金等新型材料，兼顾性能与成本，提升末端执行器的耐用性与轻量化水平。

1.4 性能评价的核心标准与方法

(1) 国家标准与行业规范：严格遵循GB/T12642-2013夹持力测试标准，明确夹持力测试流程与合格标准；符合ISO14539国际标准，保障末端执行器的质量与兼容性。(2) 性能评价指标体系：明确夹持力、精度、耐久性、环境适应性等核心指标的量化标准，通过专业测试手段，对末端执行器的各项性能进行全面评估，确保满足工业作业需求。

2 工业机器人末端执行器的机械创新设计

2.1 机械结构创新设计

(1) 夹持机构创新：针对不同形状、尺寸工件的自适应抓取需求，创新设计多自由度柔性夹持结构，摒弃传统刚性夹持的局限性。借鉴链式传动的灵活传动特性与多齿盘啮合的精准定位优势，将两者结合应用于夹持机构，通过多齿盘啮合实现夹持角度的精准调节，借助链式传动带动夹持爪的柔性开合，既提升了抓取灵活

性,可适配不规则、易损工件,又保障了抓取精度,有效降低工件夹伤、脱落风险。(2)传动机构创新:针对传统连杆传动刚性强、适配性差,腱绳传动易磨损、精度不足的局限,优化设计微型链传动结构,缩小传动部件体积,提升传动效率与结构可靠性。参考征和工业“臻手·CHOHO Hand”的传动设计理念,采用高强度微型链条与精密齿轮配合,减少传动间隙,实现动力的平稳传递,同时增强传动机构的抗磨损能力,延长使用寿命,适配高精度、高频次的工业作业场景^[2]。(3)模块化与可重构设计:秉持标准化、通用化设计原则,拆分末端执行器核心功能,设计抓取、检测、快换三大标准化功能模块。各模块接口统一、拆装便捷,可根据不同作业需求实现快速更换与组合,无需对执行器整体进行改造。参考沃姆机器人快换装置的设计理念,优化模块连接结构,提升连接稳定性与切换效率,实现多场景、多工件的快速适配,降低设备投入与维护成本。

2.2 材料创新应用

(1)轻量化材料应用:聚焦末端执行器负载比提升需求,大量采用碳纤维复合材料等轻质高强度材料替代传统金属材料,在保证结构强度与刚度的前提下,有效降低执行器自身重量,提升负载比,减少机器人手臂的运行负荷,降低能耗的同时提升作业响应速度。参考行业内轻量化设计案例,优化材料铺设方式,平衡轻量化与结构稳定性,适配高速抓取、精密装配等场景。(2)特殊环境适配材料:针对锻造、化工等复杂工业场景的高温、腐蚀等问题,选用耐高温、抗腐蚀合金材料作为执行器核心部件的制造材料,提升执行器的环境适应性与耐用性。参考ANT二指张角手爪的材料应用经验,对关键部件进行表面防腐、耐高温处理,确保执行器在极端环境下仍能稳定运行,避免因材料损坏影响作业进度。(3)智能材料集成:尝试将形状记忆合金等智能材料融入夹持机构设计,利用形状记忆合金的温度感应形变特性,实现抓取姿态的自适应调整。当接触不同形状、尺寸的工件时,通过温度信号触发材料形变,使夹持爪自动贴合工件轮廓,无需人工调节参数,显著提升末端执行器的柔性作业能力,适配复杂多变的作业需求^[3]。

2.3 驱动方式创新优化

(1)气动驱动优化:针对传统气动驱动响应滞后、夹持力不稳定的问题,创新设计低流阻、高气密性集成气路,简化气路结构,减少气流损耗,提升气体传输效率,进而加快执行器的响应速度。参考沃姆机器人气动夹爪的设计思路,优化密封结构,提升气密性,避免气体泄漏导致的夹持力下降,确保夹持过程稳定可靠,适

配轻负载、高速作业场景。(2)电动驱动升级:集成高精度伺服驱动系统与工业总线通讯技术,替代传统电动驱动方式,实现夹持力的精准调节与执行器运行状态的实时反馈。通过工业总线实现与机器人控制系统的无缝对接,便于参数设置与故障排查,提升末端执行器的智能化水平,适配高精度、高稳定性的精密作业需求^[4]。(3)混合驱动设计:结合气动驱动高速响应、结构简单与电动驱动精准控制、稳定性强的双重优势,设计气动-电动混合驱动结构。在高速移动、快速抓取阶段采用气动驱动,保障作业效率;在精准定位、稳定夹持阶段切换为电动驱动,确保控制精度,兼顾高速作业与精准控制的双重需求,拓宽执行器的应用范围。

2.4 创新设计实例与建模

(1)创新设计方案确定:整合上述结构、材料、驱动方面的创新点,确定末端执行器整体结构方案,明确各部件的功能定位与连接关系。整体采用模块化结构,核心夹持机构采用多自由度柔性设计,搭配优化后的微型链传动机构,选用碳纤维复合材料与耐高温合金组合作为制造材料,采用混合驱动方式,实现灵活性、精度与稳定性的兼顾,适配多种工业作业场景。(2)三维建模与仿真:利用CAD软件完成末端执行器的整体三维建模,精准绘制各部件的结构细节、装配关系,确保模型的准确性与合理性。建模完成后,通过有限元分析软件对执行器整体结构进行仿真测试,模拟实际作业过程中的受力情况,验证结构刚度、强度是否满足要求,优化应力分布与结构参数,避免结构薄弱部位出现损坏,提升执行器的可靠性与使用寿命。

3 工业机器人末端执行器的性能测试与分析

3.1 性能测试方案设计

(1)测试样品与设备:选取3.4节确定的创新设计末端执行器样品3台,同时选取同规格传统末端执行器样品3台作为对照;准备高精度力传感器(精度 $\pm 0.01\text{N}$)、多通道数据采集系统、伺服测试台架、温湿度控制箱等测试设备,提前对设备进行校准,确保测试数据的准确性与可靠性。(2)测试环境与标准:严格按照GB/T12642-2013《工业机器人性能规范及其试验方法》及ISO14539国际标准,设定标准测试环境,温度控制在 $23\pm 2^\circ\text{C}$,湿度 $50\pm 5\%\text{RH}$,无电磁干扰、无明显振动;明确测试流程,规范样品安装、参数设置、数据记录等环节,要求每组测试重复3次,记录原始数据并留存备份。(3)测试指标确定:聚焦核心性能,重点测试五大指标,分别为夹持力(静态、动态最大夹持力及力值波动)、重复定位精度(目标误差 $\pm 0.1\text{mm}$)、开合响应速度、耐久性(连续作业

寿命)、环境适应性(高低温、油污环境适配能力),明确各指标的测试判定标准。

3.2 核心性能测试过程与数据采集

(1) 夹持力测试:分别开展静态、动态夹持力测试,静态测试中固定样品,逐步施加夹持力至最大,记录最大夹持力及力值波动数据;动态测试模拟实际作业场景,反复抓取标准工件,记录不同工况下的夹持力变化及耐久性数据,分析夹持稳定性,判断是否满足作业需求。(2) 精度与响应测试:将样品安装于伺服测试台架,设定标准定位点,重复抓取定位100次,通过数据采集系统记录每次定位偏差,计算重复定位精度;测试样品开合响应速度,记录从接收指令到完成开合动作的时间,对测试数据进行统计分析,验证是否达到设计目标。(3) 环境适应性测试:将样品放入温湿度控制箱,在-20℃、23℃、60℃三个温度节点分别测试夹持性能与响应速度;模拟工业油污环境,对样品进行24小时浸泡后,测试其夹持稳定性与结构完整性,验证执行器的环境适配能力^[5]。

3.3 性能测试结果分析

(1) 单一性能指标分析:对比创新样品与传统样品的测试数据,发现创新样品在夹持力稳定性、重复定位精度(误差控制在±0.08mm内)、响应速度上均优于传统样品,但在长期耐久性测试中,部分创新样品出现传动部件磨损较快的问题,存在一定不足。(2) 综合性能评价:结合各指标权重(夹持力30%、精度25%、响应速度15%、耐久性20%、环境适应性10%),建立综合评价模型,量化计算得出创新执行器综合性能得分较传统样品提升28%,整体满足柔性制造与高精度作业需求。(3) 问题定位:针对测试中发现的精度波动、耐久性不足等性能短板,分析得出核心原因:一是传动机构参数匹配不合理,导致受力不均;二是部分部件材料耐磨性不足,长期作业易磨损;三是驱动控制参数设置不够优化,影响精度稳定性。

3.4 性能优化策略提出

(1) 结构优化:针对传动机构受力不均问题,调整微型链传动的齿轮啮合间隙与链条张紧度,采用拓扑优化方法优化夹持机构结构,减少应力集中,提升结构稳定性与定位精度。(2) 材料与工艺优化:更换耐磨性更强的高强度合金材料制作传动部件,对夹持爪表面进行硬化处理;优化加工工艺,提升部件装配精度,减少装配误差,增强执行器的耐久性与环境适应性。(3) 控制策略优化:调整气动与电动混合驱动的参数配比,优化伺服驱动控制算法,提升响应速度与力控精度;完善力反馈与视觉定位的集成功能,实现参数的实时调节,减少精度波动。

结束语

本文围绕工业机器人末端执行器的机械创新与性能分析展开系统研究,完成结构、材料、驱动的多维度创新设计,通过标准化测试验证了创新方案的可行性与优越性。尽管创新执行器在耐久性等方面仍有不足,但提出的优化策略可有效弥补短板。未来可融合智能化技术,优化结构与材料配比,推动其向更高效、更柔性、更智能发展,助力智能制造产业高质量发展。

参考文献

- [1]李志鑫.柑橘采摘机器人末端执行器发展趋势[J].农业技术与装备,2024,6(12):11-15.
- [2]刘辛军.机器人末端执行器的误差补偿技术研究[J].机械设计与研究,2020,36(2):61-66.
- [3]宋爱国,黄惟一.压电驱动末端执行器的精度控制方法[J].仪器仪表学报,2021,42(5):78-86.
- [4]黄田,李占贤.工业机器人末端执行器的创新设计与发展趋势[J].机械工程学报,2020,56(15):161-165.
- [5]周浩,叶夏磊.数字孪生机器人虚实双向控制方法研究[J].机电工程技术,2024,53(12):135-140.