

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.01.048

基于 TRIZ 理论的工业机器人机械爪创新设计

潘红恩, 马鲁强, 马云鹏, 张颖利, 耿以旭

(南京信息职业技术学院 智能制造学院, 江苏 南京 210023)

摘 要:针对工业机器人在机床零件上、下料作业因断电导致机械爪安全性降低以及机械爪柔性不高等问题,运用 TRIZ 理论,依据通用技术参数寻找设计过程中的矛盾问题,依据发明原理解决矛盾问题,提出碟形多线阿基米德螺旋机械爪创新设计,对机械爪模型所选关键点的运动轨迹曲线进行运动学仿真分析。研究结果表明:设计机构达到断电自锁、自定心功能,提升了机械爪可靠性与通用性。

关键词:TRIZ 理论;阿基米德螺旋线;机械爪;工业机器人

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)01-0235-05

New Design of Industrial Robot Mechanical Claw Based on TRIZ Theory

PANG Hongen, MA Luqiang, MA Yunpeng, ZHANG Yingli, GENG Yixu

(School of Intelligent Manufacturing, Nanjing Vocational College of Information Technology, Nanjing 210023, China)

Abstract:To improve the lower safety and poor flexibility of industrial robot manipulator in its loading and unloading of machine tool parts due to power failure, under the guideline of TRIZ theory, a new design of disc-shaped multiline Archimedes spiral mechanical claw is proposed, by probing into the contradiction problems in the design process and invention principle according to the general technical parameters. The kinematic simulation and analysis are carried out on the motion trajectory curve of the key points selected by the claw model. The research shows that the designed mechanism achieves the functions of power-off self-locking and self-centering, which improves the reliability and versatility of the claw.

Keywords:TRIZ; Archimedes spiral; manipulator; industrial robot

0 引言

工业机器人技术因作为促进“智能制造”快速发展的关键环节而发展迅猛,并逐步深化普及到生产加工中的各个环节^[1],柔性夹具和工业机器人是柔性生产线上的关键设备^[2]。目前机器人夹具方面的研究主要集中在专业应用中。机械爪是典型的工业机器人多功能夹具,可实现平面类及轴类加工件的装夹作业,被广泛应用于工业机器人集成系统及机器人工作站中^[3]。然而,大多机械手采用缸体或电机通过连杆机构直接驱动卡爪运动。一旦缸体或电机在遇到故障或者断电时,难以保证卡爪的安全性能。同时,机械手的低通用性也迫使其面对多样性的加工内容时需丰富机械手的多样性。这拉升了企业的生产成本与斜升时间,降低了工业机器人的工作效率。

为解决机械爪存在的问题,避免创新的随意性,工业机器人机械爪的创新设计应遵循一定的客

观规律。发明问题解决理论 (teoriya resheniya izobreatatelskikh zadatch, TRIZ) 是一种非常重要的技术创新理论,其归纳了可有效描述和解决绝大多数技术创新问题的 39 个工程参数和 40 条发明原理,可以显著地减少无效尝试次数,是基于多学科领域知识的产品创新设计理论及发明问题解决方法学^[4],被广泛应用于机械与机电类产品设计领域。因此,针对机械爪现有问题,开展以 TRIZ 理论为指导进行创新设计,对智能生产具有重要的现实意义。

1 TRIZ 理论指导的机械爪创新设计

1.1 TRIZ 理论

TRIZ 的操作流程如图 1 所示^[5]。首先设计者将所面临的特殊问题抽象化以形成 TRIZ 通用问题,然后将 TRIZ 通用问题与 TRIZ 通用解决方案进行匹配,确定通用解,最后将通用解具体化为原问题的特殊解^[6]。

基金项目:2022 年度江苏省教育科学“十四五”规划重点课题项目(B/2022/02/87)

第一作者简介:潘红恩(1973—),女,江苏南京人,副教授、高级工程师,硕士,研究方向为先进制造、数控加工、数字化设计与制造,panhg@njcit.cn。

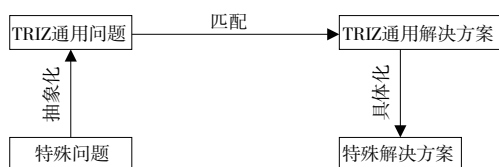


图1 TRIZ 操作流程

1.2 基于物-场的阿基米德螺旋机械爪创新设计

通过对现有文献分析并结合生产实际,目前工业机器人机械爪的问题主要集中在两个方面。一是以液压或气压为动力源的机械爪,当出现断电事件时,机械爪的抓取力可能会降低,使得生产过程中存在安全风险,同时液压或气压系统本身是较为复杂的系统,其可靠性受到多种因素的影响。二是机械爪的末端执行部件与工件接触面的形状往往需要与抓取工件表面形状相贴合,以提升抓取的准确性,从而使得工业机器人在生产过程中需频繁更换机械爪,从而导致机械爪的通用性不高。

运用TRIZ理论进行创新设计,首先需要确立技术矛盾。通过对工业机器人机械爪的问题分析,可运用TRIZ理论的39个工程参数表达设计矛盾,并描述希望改善的参数,设计矛盾参数转化如表1所示。

表1 设计矛盾参数转化

技术优化	工程参数转化
机械爪抓、放作业过程平稳、精准	稳定性(No.13)
机械爪整体结构设计紧凑且运动稳定	可靠性(No.27)
机械爪适用于多种工件的抓、放作业	适用性、通用性(No.35)

表1中工程参数的优化可能造成恶化的参数为:1)静止物体的质量(No.2);2)静止物体的体积(No.8);3)运动物体作用时间(No.15)。

通过表1所确定的描述矛盾的工程参数后,可用矛盾矩阵从40条发明原理^[7]中确定适合解决矛盾的方法,矛盾矩阵如表2所示。

表2 矛盾矩阵

优化参数	恶化参数		
	静止物体的质量(No.2)	静止物体的体积(No.8)	运动物体作用时间(No.15)
稳定性(No.13)	26,39,1,4	34,28,35,40	13,27,10,35
可靠性(No.27)	3,10,8,28	2,35,24	2,35,3,25
适用性、通用性(No.35)	19,15,29,16	—	13,1,35

在表2中,恶化参数和优化参数的交叉处即为发明原理所对应的序号。在矛盾矩阵中,一个方格内包含了多个发明原理序号。通过对发明原理的筛选,以获得应用的发明原理,如表3所示。

表3 应用的发明原理

原理	原理释义
局部质量原理(No.3)	1)从物体或外部的一致性结构转换为不一致结构; 2)物体的不同部分应具有不同功能; 3)物体每一部分都处于最有利于其工作的环境。
周期性作用原理(No.19)	a)从连续动作转变为周期性动作或脉冲动作; b)若是周期性动作则改变其频率; c)利用脉冲的间隙完成其他动作。

依据所确定的2条发明原理,对机械爪进行以解决安全与通用性问题为目的设计分析。

应用局部质量原理(No.3),将机械爪分为驱动组件、支撑组件以及执行组件3部分。驱动组件为机械爪提供动力与运动,可采用旋转气缸为机械手提供动力,以优化因电力原因产生的安全问题。支撑组件主要起到支撑机械爪各部分以及传递动力与运动的作用。执行组件主要实现工件的抓、放作业。同时,执行组件可实现在其最大开合尺寸范围内的多种类型工件的抓、放作业。

应用周期性作用原理(No.19),执行组件将通过周期性的运动实现机械爪的抓、放功能。在抓、放动作的时间间隙可进行工业机器人的姿态调整。

为实现机械爪的平稳、精准抓取,末端执行零件底端点在机械爪运动过程中应实时共面且自动定心,支撑组件应有助于执行组件实现作业要求。运用物-场模型来描述产品所具有的功能,可确定引起矛盾的根本原因,并通过TRIZ中的76个标准解优化该模型^[8]。

通过物-场分析理论,构建机械爪物-场模型如图2(a)所示。其中F为机械作业场,S1为支撑组件,S2为执行组件。现有的支撑组件主要通过杠杆的作用来传递运动,在执行组件完成规定作业的过程中共面性与自定心的实现较差,即S1对S2有害。设计采用76个标准解中S1.2.1,即引入S3消除有害作用来解决问题,如图2(b)所示。结合头脑风暴法与工程经验,引用可实现旋转对称性的阿基米德螺旋线来消除机械爪中共面性与

自动定心的问题。

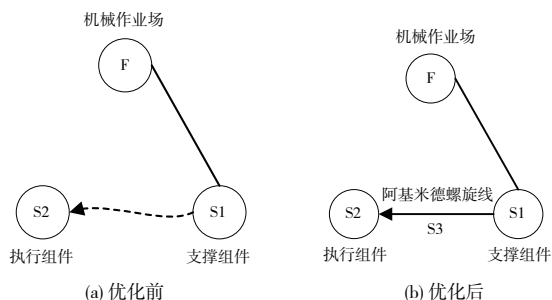


图2 机械爪物-场模型

2 阿基米德螺旋机械爪结构设计

通过2条发明原理与物-场模型的分析,可确定机械爪设计的结构模型与工作原理。

2.1 机械爪的设计

主要研究的是一种基于碟形多线阿基米德螺旋副的机械爪,以解决在缸体或电机遇到故障或者断电时难以保证卡爪安全性能的缺陷。设计后的机械爪主要包括驱动组件、支撑组件、碟形多线阿基米德螺旋盘以及执行组件等^[9]。驱动组件为机械爪开合运转提供动力。碟形多线阿基米德螺旋盘控制机械爪的开合运动轨迹。设计后的机械爪通过三维建模、装配及运动仿真调试,气缸驱动碟形多线阿基米德螺旋盘转动带动爪手开合,且具有断电自锁功能;爪手具有同步收拢自定心功能。

2.2 机械爪结构模型

驱动组件包括旋转气缸、气缸套、气缸盖板、放置板、连接件、轴套和快换盘。气缸套与支撑组件固定连接,旋转气缸与气缸套连接,轴套与旋转气缸的旋转轴与轴套连接,轴套用于带动碟形多线阿基米德螺旋盘转动。驱动组件结构模型如图3所示。

支撑组件包括支撑轴,支撑轴上设有与碟形多线阿基米德螺旋盘连接的轴承,支撑轴下部设有键槽、键和螺帽,用于固定执行组件。

对于碟形多线阿基米德螺旋盘,其内部设有多个弧形阿基米德螺旋槽,应用UG软件,根据阿基米德螺旋线公式则有:

$$\begin{cases} x = 100 \times t \times \cos(t \times 360 \times 2) \\ z = 100 \times t \times \sin(t \times 360 \times 2) \end{cases} \quad (1)$$

先设置表达式,再应用规律曲线创建阿基米德螺旋线,通过投影法把阿基米德螺旋线投影到

螺旋盘上形成螺旋槽,如图4所示。

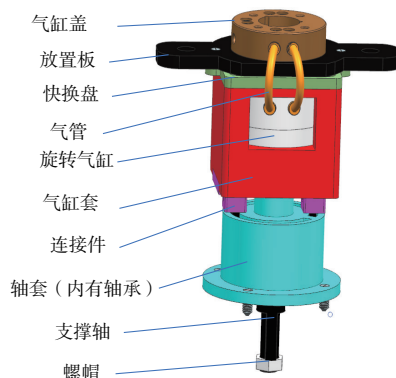


图3 驱动组件与支撑组件

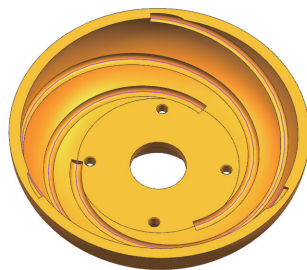


图4 阿基米德螺旋盘

阿基米德螺旋盘顶部设有螺纹孔和轴承凹槽。螺纹孔用于阿基米德螺旋盘与轴套连接,轴承凹槽用于放置轴承。通过气缸驱动碟形多线阿基米德螺旋盘转动带动爪手开合,具有断电自锁功能,安全性高。

执行组件包括爪臂限制器、爪臂、浮动块,如图5所示。爪臂限制器上部分周边均布设有导向叉,下部周边均布设有铰支座,爪臂中部与支座铰接,上部与导向叉滑动连接,上部设有小圆柱,圆柱之上设有与弧形阿基米德螺旋槽适配的半球球头。支座由中心圆形的固定板及周边均布的铰支座构成,弧形盘边的内弧圆心与铰支座的铰接中心重合,保证球头能够在弧形阿基米德螺旋槽顺畅移动。

2.3 机械爪臂的受力有限元分析

为了有效分析机械爪在受力时形变情况,选取关键部件机械爪臂进行有限元分析,如图6所示。分析中选用45钢,因该机械手主要用于夹取小型物料,其施加力设定为10 N。45钢的屈服极限是355 MPa,由分析结果可得出其平均受力最大值为5.927 MPa,远小于45钢的屈服极限。由此得出,爪臂在工作时不会发生塑性变形,说明该

爪臂设计合理。

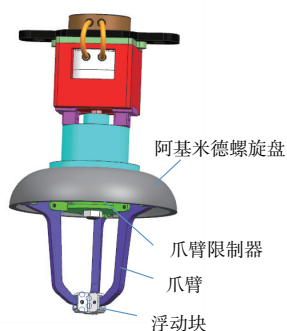
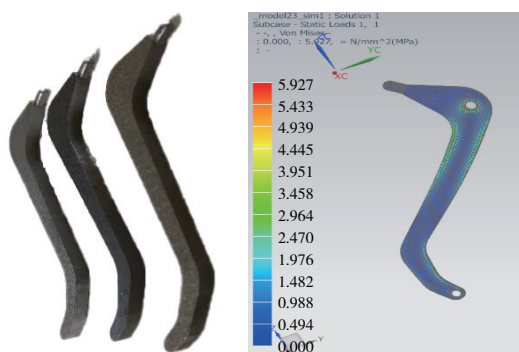


图5 机械爪造型图



(a) 机械爪臂

(b) 有限元分析图

图6 机械爪臂有限元分析

3 阿基米德螺旋机械爪工作原理

将机械手安装于机器人末端,应用于自动生产线上,如图7所示。气罐中的气体进入旋转气缸推动叶片带动旋转轴转动,从而带动阿基米德螺旋盘转动。螺旋盘顺时针转动时,各弧形阿基米德螺旋槽将爪手的后臂向外推动,爪手下端的小臂同步向心收拢,抱紧工件。螺旋盘逆时针转动时,各弧形阿基米德螺旋槽将爪手的后臂向内收拢,爪手下端的小臂同步向外张开,松开工件。

4 机械爪的 PLC 控制系统

根据机械爪的工作原理,结合传感器和 PLC 技术设计了机械爪的控制系统^[10]。通过对旋转气缸控制螺旋盘转动,机械爪抓取工件,当浮动块上压力传感器感应到预设的力时,机械爪停止运动。机械爪抓取工件到指定地点后,控制螺旋盘转动,机械爪转动松开工件,当压力传感器感应到力为0时,机械爪停顿3s后机械爪返回到原点位置。这就是机械爪运动所有控制流程。应用博图软件与 MCD 将机械爪模型和控制程序结合进行

运动仿真,如图8所示,对机械爪的功能进行实验,验证了机械爪控制的可行性。

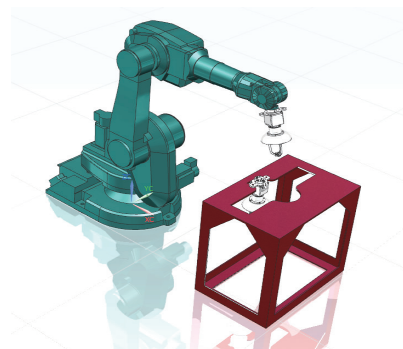
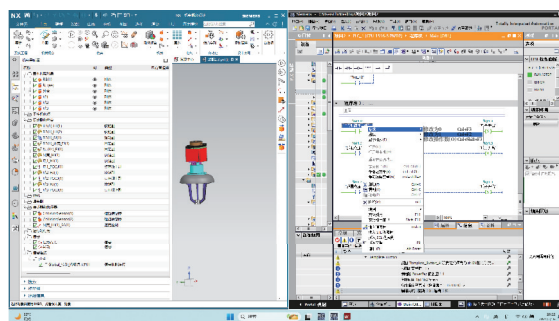


图7 机械手工作场合



(a) 程序仿真



(b) 仿真运行可视化

图8 控制系统仿真

5 机械爪运动学仿真与制作

为直观展示设计的碟形多线阿基米德螺旋机械爪的运动情况,应对其进行运动学分析。运用软件的仿真工具,选取机械爪执行部件中心为关键点,关键点的运动轨迹如图9(a)所示。通过关键点的运动轨迹可知,所设计的机械爪可实现在其轨迹范围内工件的抓、放,提升了机械爪的通用性。关键点垂直方向的位移曲线如图10所示,反映出机械爪执行部件一直处于共面状态,实现了自定心功能,可有效抓取工件,避免工件倾斜。运动学仿真说明模型与设计基本一致,解决了产品

设计的问题。同时,对机械爪进行制作,实物如图9(b)所示,抓取工件如图9(c)所示,验证了机械爪有自定心抓取工件和自锁功能。

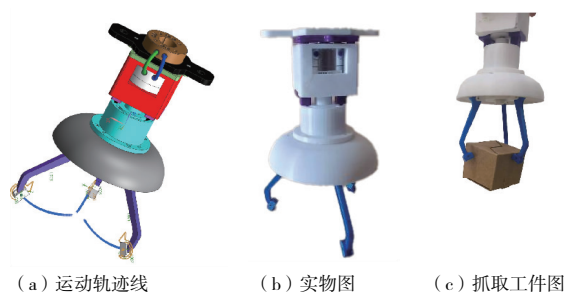


图9 运行轨迹与抓取工件图

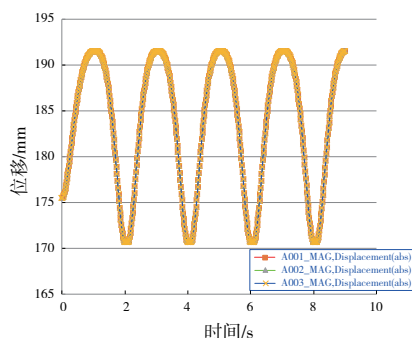


图10 三爪位移图

6 结语

在TRIZ理论的指导下,结合工程应用,研究了一种工业机器人通过碟形多线阿基米德螺旋盘控制的机械爪。

1)依据通用技术参数寻找机械爪设计过程中的矛盾问题,依据发明原理解决矛盾问题以开展机械爪创新设计,最后根据机械爪的物-场模型,确定机械爪支撑组件的具体设计方案。

2)运用UG软件构建了碟形多线阿基米德螺旋机械爪模型,运用博图软件与MCD构建了机械

爪的控制流程,通过运动学仿真验证了机械爪的可行性与有效性。

3)所设计的碟形多线阿基米德螺旋盘可控制机械爪的开合,结构简单;以气缸驱动碟形多线阿基米德螺旋盘转动带动爪手开合,具有断电自锁功能,安全性高;爪手同步收拢,具有自定心功能,解决了机械爪设计问题。

4)制作了机械爪实物,并应用于工业机器人抓取作业中,验证了机械爪的通用性与可靠性。

参考文献:

- [1] 李福运.基于六点定位原理的工业机器人通用夹具设计[J]. 机械,2017,44(6):77-80.
- [2] 龚集响.阵列式柔性夹具与工业机器人集成系统中工件定位的研究[D]. 厦门:厦门大学,2019.
- [3] 鲁霞,吴卓明.一种工业机器人多功能夹具[J]. 机床与液压,2020,48(1):113-115.
- [4] 祝志芳,袁斯宾,张志杰,等.基于TRIZ理论的自行车停车装置创新设计与试制[J]. 机械设计与制造,2021,364(6):258-261.
- [5] 王曰辉.基于TRIZ理论的齿轮装夹系统创新设计[J]. 制造技术与机床,2021(5):124-127.
- [6] NOOR AZAMMI A M, SAPUAN S M, ISHAK M R, et al. Conceptual design of automobile engine rubber mounting composite using TRIZ - Morphological chart - analytic network process technique [J]. Defence Technology, 2018,14(4):268-277.
- [7] 姜金刚,潘承怡. TRIZ 实战:机械创新设计方法及实例[M]. 北京:化学工业出版社,2109.
- [8] 成思源,周金平,杨杰. 技术创新方法:TRIZ 理论及应用[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2021.
- [9] 潘红恩,耿以旭,马鲁强,等. 一种基于碟形多线阿基米德螺旋副的机械爪:CN114193500B [P]. 2024-05-03.
- [10] 许超帆,汪振华,钟昇,等.基于PLC的柔性上下料生产线控制系统设计[J]. 机械制造与自动化,2024,53(2):129-133.

收稿日期:2024-06-06