

# Research on Mechatronic Design of Automatic Grabbing Device for Manipulator

Yifei Zhang

Henan Special Equipment Inspection and Research Institute, Zhengzhou, Henan, 450000, China

## Abstract

As an important component of industrial robots, the automatic grasping device of the manipulator has been widely used in China's machining loading/unloading, stamping sequence switching, and sorting handling processes. Its engineering value lies not only in replacing manual handling but also in stably integrating grasping, handling, positioning, and placement actions. In view of this, the article combines relevant papers, standard materials, and practical experience to systematically review common practices in the mechatronic design of automatic grasping devices, starting from the device definition, typical configuration, and operational boundaries, and focusing on five aspects: body configuration, end-effector gripper, drive transmission, electrical interlock, and maintenance replacement. The study indicates that synchronous matching of grasping objects with mechanism forms and synchronized adjustment of mechanical parameters with action rhythms are key to improving the stability and practicality of the device.

## Keywords

robotic arm; automatic grasping device; mechatronic design; research

## 机械手自动抓取装置的机电一体化设计研究

张逸非

河南省特种设备检验技术研究院, 中国·河南 郑州 450000

## 摘要

作为工业机器人的重要组成部分,机械手自动抓取装置已广泛用于中国机加工上下料、冲压转序和分拣搬运环节,其工程价值不只在替代人工取放,更在于把抓取、搬运、定位和放置动作稳定串联。有鉴于此,文章结合相关论文、标准资料以及自身实践情况下,从装置含义、典型构成与工况边界出发,围绕本体构型、末端抓具、驱动传动、电气联锁和维护换型五个方面,梳理机械手自动抓取装置机电一体化设计中的常用做法。研究表明,抓取对象与机构形式同步匹配、机械参数与动作节拍同步整定,是提高装置稳定性与落地性的关键。

## 关键词

机械手; 自动抓取装置; 机电一体化设计; 研究

## 1 引言

随着时代的不断进步,社会的不断发展,工业逐渐趋向于自动化发展,工业机器人在市场中占的比例也越来越大。同时加之制造企业减人增效、工位节拍持续压缩和专机联线程度不断提高的背景下,机械手自动抓取装置已由单纯替代人工搬运,逐步转向与机床、输送机构、模具工位和专用设备协同运行的成套执行单元<sup>[1]</sup>。国内外研究表明,自动上下料、桁架搬运、气动分拣和专用抓取工位对抓取稳定性、动作重复性、夹持可靠性和维护便利性提出了更具体的工程要求。基于此,有必要从机电一体化角度重新梳理该类装置的设计重点。

## 2 机械手自动抓取装置概述

机械手自动抓取装置可理解为安装在固定支架、机械臂或桁架本体上的作业执行单元,其任务是在设定节拍内完成取件、夹持、搬运、放置和退回等连续动作。结合实践来看,这类装置已广泛用于车床上下料、冲压转序、流水线分拣和重复搬运场景,常见构成包括执行本体、末端抓具、驱动部件、导向传动单元、限位检测元件以及配套电气装置。与单纯机械夹具不同,机械手自动抓取装置强调动作链闭合,要求抓取姿态、夹持力、行程、节拍和安全边界能够在同一系统内稳定对应。也就是说,它不是独立完成某一个夹紧动作的附件,而是一类围绕工件流转和设备节拍建立起来的机电一体化作业装置,设计时必须同时考虑工件特征、设备接口、安装空间、维护条件和车间使用环境。

【作者简介】张逸非(1997-),女,中国河南清丰人,本科,助理工程师,从事特种设备研究。

## 3 机械手自动抓取装置的机电一体化设计

### 3.1 本体构型与自由度匹配

本体构型与自由度配置是否贴合节拍和工位边界，直接决定机械手后续驱动、检测与控制链条能否收敛。其一，在机床上下料、冲压取放和专机连线中，应先按来料方向、取放高差、门体开启范围和障碍区确定本体采用直角坐标、回转或桁架方案，平面往返和层间升降为主的工位宜优先采用三轴直线模组，少把简单取放做成多关节串联，以免坐标变换链过长、标定点增多，后期检修和维护时还会出现基准点难追溯的问题。关于桁架式机器人方面研究表明，此类结构更适合长行程、重复节拍和与机床并列布置的场景。其二，自由度配置要按取件、退让、翻转和放件四类动作逐项拆分，能用工装定向解决的，不再额外设置回转轴；确需避让卡盘、夹具或箱格隔板时，再补充 R 轴或摆腕单元。现场常见做法是先用三自由度完成抓取主路径，再核定是否增加一轴姿态修正，避免因多设关节造成刚度下降和调试窗口变窄<sup>[2]</sup>。其三，本体梁柱尺寸不能只按静载估算，应把末端抓具质量、10 kg 左右工件载荷、启停惯性和最大伸出位一并带入校核；已有桁架上下料研究显示，悬出端工况最大变形可达 0.79 mm，设计时需通过缩短悬臂、提高截面惯性矩和加强连接区来压低挠度。其四，底座、立柱与横梁装配时应统一安装基准、行程零位和检测基准，关键结合面保留垫片或偏心套调整量，并在空载和额定节拍下复测定位精度与重复定位精度；按桁架式机器人通用技术条件，高精度设备重复定位控制在 0.05 mm 以内，而中国自动装配单元实测已可达到 0.02 mm、单件定位时间在 500 ms 以内，工程上据此反推结构与控制余量更为稳妥。

### 3.2 末端抓具与夹持闭合

围绕机械手自动抓取装置的机电一体化设计，末端抓具与夹持闭合应按工件特征、受力传递、补偿方式和检测闭环统筹展开。其一，抓具选型不能只按工件外形粗分，而应把表面粗糙度、是否带油、重心偏置量和批次尺寸离散度一并纳入，常规轴套、销轴类零件宜采用二指平动夹爪配 V 形或弧形指面，薄板和覆膜件宜采用吸盘加限位托面的复合结构，真空抓取时按搬运姿态校核安全系数，水平搬运与垂直搬运不能共用同一折减系数，对有横向剪切的工况还要复核摩擦条件。其二，夹持闭合要先把力学路径做实，夹爪接触点应尽量靠近工件承载中心，手指材料硬度、摩擦层材质和包角同步匹配，驱动推力经连杆、滑块或丝杠传到指端后，应校核偏载工况下的滑移余量，避免用单纯增大缸径或电机转矩替代接触面设计，对节拍较高的工位还要控制悬臂长度和指端惯量。其三，对尺寸波动或边缘不规整的来料，手指端部宜设置小范围浮动补偿，并配橡胶垫、聚氨酯层或小行程柔顺单元，使夹爪闭合时先找正再增力，对脆性件可把夹持力分级设定，先低力预夹，再转入额定夹紧，必要时在指端预留快换接口，便于更换接触件。其四，开合行程、到位

检测和机械止挡必须联成闭环，手指有效行程一般按最大工件尺寸外加 10% 至 15% 调整余量控制，终点位置不直接依赖程序延时判断，宜用磁性开关、接近传感器或编码反馈确认夹紧区间，并把机械止挡固定在重复夹持位置上，防止出现信号到位而实体未压实的假闭合，同时兼顾多规格切换时的重复定位精度。

### 3.3 驱动传动与执行协调

驱动传动与执行协调的设计，关键不在单独把电机、气缸或机构选出来，而在于把动力形式、传力路径与动作顺序放到同一工况下联动核定。其一，轻载、短行程的抓具开合可布置为气动执行，长行程搬运、跨工位移送和定位要求较严的轴段则宜采用伺服电机配丝杠、同步带或齿轮齿条；公开的混合驱动机械手研究已表明，水平臂气缸可采用气动伺服定位，回转单元则由电伺服承担，二者需在统一控制器下协同工作。其二，传动链设计应坚持短链、直驱和少转换原则，夹持端优先采用齿轮齿条、平行导轨加滑块或短连杆直接驱动，避免经多级摇臂和转接轴后再去推夹爪；伺服系统的常用机械项目本就围绕直联、丝杠、传动带及齿条与齿轮展开，说明传力路径越清楚，后续定位和维护越容易落稳。其三，驱动器容量不能只按静载和额定载荷估算，还要把负载惯量、最大转矩、加减速时间、急停距离和启停频次一并核入；已有伺服选型资料明确提出，惯量比宜结合具体系统校核，常见要求控制在 10 以内，且对频繁起制动工况还应验算短时加减速转矩、周期内转矩均方根以及动态制动条件，否则连续运行后很容易出现发热、制动漂移和响应变钝<sup>[3]</sup>。其四，执行节奏宜按伸出、接近、夹紧、抬升、移送、释放逐段拆分，并由原点、到位和夹紧确认信号形成互锁，机械端同步配置节流、端部缓冲和减速段；一方面，研究及实践表明气缸末端缓冲可在高动态下实现较轻柔定位，周期最多可缩短 70%，另一方面，混合驱动机械手研究也指出气动伺服通过受控压力与流量可替代传统节流阀和端部缓冲方式，从而把动作时间和冲击一并压住。

### 3.4 电气接口与安全联锁

机械手自动抓取装置的电气接口与安全联锁设计，应当围绕现场连续节拍、维护便利性和失效可控三条主线同步展开。其一，电源引入、驱动器、阀岛与 I/O 模块布置时，设计人员应先按运动轴分区，再按动力回路、控制回路和检测回路分层，常用做法是将伺服动力线与编码器线分槽敷设，电磁阀线束与气管成组进入拖链，柜内 24 V 控制电源单独设端子排和熔断保护，外部接口统一采用编号插接件，接地排与屏蔽层实施单点处理，柜门与机架之间增设可靠跨接，现场改线时不再反复拆端子，也可把后续扩展工位控制在原柜预留容量内。其二，原点、到位、夹紧、松开等检测信号不能只满足有反馈，而要与机械止挡和动作顺序构成闭锁关系，夹爪闭合后通常同时取夹紧开关与压力保持信号，升降轴回原位后再开放横移许可，PLC 程序内把时间延时

仅作为异常判别,不作为正常换步条件,对双工位抓取还应增加左右工位互锁和取放件状态比对,避免夹爪磨损 2 mm 至 3 mm 后仍靠节拍强行推进。其三,急停、失压和掉件防护应按故障后安全姿态反推执行元件选型,竖直轴宜配置常闭式制动器或防坠机构,气动夹具宜加保压阀、单向阀或低压报警,真空抓具则应校核真空罐容积和泄漏后的保压时间,断电时优先保持夹持而不是立即卸荷,异常复位要求先人工确认工件和机构位置,再按回零、松夹、退让的顺序分步解除联锁,不能一次总复位<sup>[4]</sup>。其四,电气柜、操作盒、接地端子、急停按钮和现场标识在出图阶段就要与验收项目对应,装配完成后按线号、点位表和 I/O 清单逐项核对,并把急停响应、开门停机、气压欠压、手自动切换、通讯中断等试验写入调试记录和随机文件,图纸版本、程序版本和参数备份应同步归档,便于设备交付后按同一基准维护,减少更换班组后因线序理解不一致引起的误接和误判。

### 3.5 导向定位与结构刚度设计

围绕机械手自动抓取装置的导向定位与结构刚度设计,工程细化时应把导向承载、动态变形、装配基准和维修结构放在同一设计链条内统筹处理,不能把单个零件选型代替整机精度设计,也不能把后期调试补偿当作前期结构让位的理由。其一,夹爪开闭、升降和短行程推送机构不宜把气缸活塞杆直接当作主导向件,偏载、悬臂夹持或重心外移工况应改用双导杆气缸、直线导轨或直线轴承分担横向力,并把执行件与滑座间做成浮动连接,避免杆端别劲后出现磨损、爪口跑偏和行程末端卡滞问题。其二,对存在冲击的工位,导轨宜选微预压或轻预压型,常用负间隙可控制在 -3 至 0 $\mu\text{m}$  或 -5 至 0 $\mu\text{m}$  范围内,既压住间隙又不把摩擦阻力放得过大;安装板、连接法兰和外伸支架不能只按静强度定厚度,还要把最大抓取质量、启停加速度、悬臂长度和夹持偏心距一起换算到末端挠度校核中。其三,样机阶段可按满载急停工况复核一次,振动和冲击明显的工位,导向副静态安全系数宜

按 3 至 5 控制,必要时缩短力臂、加筋或改双滑块布置;定位基准应从机座安装面一次传递到导轨、爪块、挡块和传感器座,关键配合面优先采用销钉加止口或基准肩定位,减少反复拆装后的累计误差,放件进入治具或料框的工位还应把限位块和检测开关布置在同一基准侧,并把机械止挡与到位信号对应校准。其四,爪块、衬套、缓冲垫和挡块宜做成独立更换单元,紧固件应预留套筒和内六角操作空间,对高频往复机构同步配置防松垫圈、螺纹锁固或双螺母,并保证连接面贴合完整、预紧力稳定,维修后复装仍能回到原定位链,避免微松动逐步演变成重复定位漂移和夹持中心偏移<sup>[5]</sup>。

## 4 结语

综上所述,机械手自动抓取装置的机电一体化设计,不是把机械结构、电气部件和驱动元件简单拼接,而是围绕抓取动作建立稳定、可复现、可维护的完整执行链。结合中国公开研究和现行标准可以看出,构型匹配、抓具闭合、驱动传动、安全联锁以及导向定位与结构刚度五个环节必须同步展开。设计工作只有持续贴合工件特性、设备边界和车间使用条件,装置才能在中国制造现场长期稳定运行。

## 参考文献

- [1] 毕翠翠,陈中飞,王彩霞.工业机器人机械手的机电一体化设计[J].Mechanical & Electronic Control Engineering, 2024, 16(18).
- [2] 杨云,张潇洋,蔡婷婷,等.基于柔性传感器的仿生机械手控制综合实验设计[J].机电工程技术, 2025, 54(9):110-114.
- [3] 张强,高鑫洲,刘峰.锚杆自动抓取与搬运机械手结构设计及振动试验[J].煤矿机电, 2023, 44(5):76-79.
- [4] 金亮敢,章建平,陈学余,等.气动柔性按摩机械手爪设计分析[C]//机电技术领域学术交流暨科技人才高质量发展研讨会论文集.2025.
- [5] 徐光宇,汤卿,王丽霞.腱绳驱动机械手的设计及其柔性抓取控制[J].机电工程, 2023, 000(10):8.