

车床上下料机械手的设计与研究

巫均平

茂名职业技术学院, 广东 茂名 525000

摘要: 针对数控车床上下料作业中存在的人工操作强度大、生产效率低等问题, 提出并设计了一种采用气动驱动的龙门式自动上下料机械手。分析了机械手的总体技术方案, 采用气动技术与精密机械微调装置相结合的方式解决卡盘对中精度难题, 选用机械接合式无杆气缸实现水平方向多位置定位。详细设计了手部、腕部、直臂、横臂及支架等关键结构, 完成了气爪夹紧力、摆动气缸承载、微调装置传动及支架强度与稳定性等计算校核。结果表明, 所设计机械手结构合理, 定位精度满足要求, 成本较低, 可为数控车床自动化升级提供参考。

关键词: 上下料机械手; 数控车床; 结构设计

Design and Research of a Loading and Unloading Manipulator for Lathes

Wu Junping

Maoming Vocational and Technical College, Maoming, Guangdong, 525000, China

Abstract: To address the problems of high labor intensity and low production efficiency in manual loading and unloading operations for CNC lathes, a gantry-type automatic loading and unloading manipulator driven by pneumatics was proposed and designed. The overall technical scheme of the manipulator was analyzed. A method combining pneumatic technology with a precision mechanical micro-adjustment device was adopted to solve the precision challenge of chuck centering. A mechanically jointed rodless cylinder was selected to achieve multi-position positioning in the horizontal direction. Key structures such as the hand, wrist, straight arm, horizontal arm, and support frame were designed in detail. Calculations and verifications were carried out for the gripping force of the pneumatic gripper, the load capacity of the swing cylinder, the transmission of the micro-adjustment device, and the strength and stability of the support frame. The results show that the designed manipulator has a reasonable structure, meets the positioning accuracy requirements, and has a low cost, which can provide a reference for the automation upgrade of CNC lathes.

Keywords: Loading and unloading manipulator; CNC lathe; Structural design

DOI: 10.62639/sspis35.20260305

引言

数控车床作为现代机械加工的核心设备, 其上下料作业长期依赖人工完成, 不仅劳动强度大、效率低, 且在高温、噪声等恶劣环境下存在安全隐患^[1]。随着工业自动化的发展, 采用机械手替代人工完成上下料成为必然趋势。目前, 上下料机械手多采用伺服电机驱动, 虽定位精度高, 但成本昂贵, 限制了其在中小企业中的推广应用^[2]。气动机械手具有成本低、结构简单、抗干扰性强等优点, 但定位精度相对较低, 如何保证气动机械手在数控车床上的对中精度和重复定位精度是技术难点。

本文研制了一种以气动驱动为基础的龙门式上下料机械手。通过引入气缸驱动与精密机械微调装置相融合的技术路径, 攻克了卡盘对中的精度瓶颈; 在水平运动方面, 选用具备机械接合特性的无杆气缸来实现多点精准定位。对机械手的各个功能部件进行了深入设计, 并开展了必要的力学分析与校核, 为机械手在数控车床上的工程应用提供了具有参考价值的方案。

一、总体方案设计

(一) 技术需求

数控车床上下料机械手需完成工件的抓取、搬运和装卸动作。以圆柱形工件为例(质量约 1.8 kg, 最大直径 75 mm), 要求机械手具有以下功能: ① 能从工件装卸台抓取工件并送至车床卡盘; ② 能够同步完成毛坯上料与成品下料, 以提升作业效率; ③ 气爪夹持中心与卡盘中心的同轴度误差需控制在 0.1 mm 以内, 水平方向定位误差不超过 1 mm; ④ 整体结构应力求简洁, 成本可控, 便于现场安装与调试操作。

(二) 总体结构

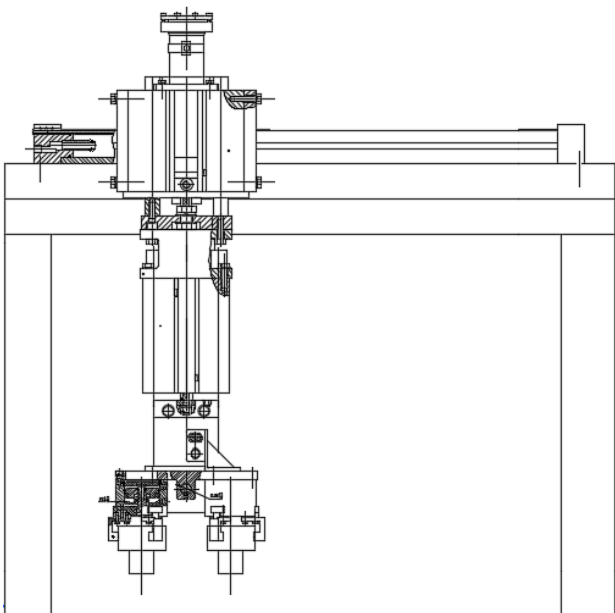
机械手采用龙门式结构, 主要由横臂、直臂、手腕、手爪及固定支架组成。横臂采用 SMC MY3B 系列机械接合式无杆气缸, 实现 Z 方向多位置定位, 定位精度可达 ± 0.5 mm。直臂部分由大行程导杆气缸与短行程导杆气缸串联构成, 用以实现 Y 轴方向的升降运动。腕部通过摆动气缸驱动, 可使手爪完成 90° 的翻转动作。手部采用两只气爪分别完成上料和下料, 两气爪中心距

(稿件编号: IS-26-5-F002)

作者简介: 巫均平(1982-), 男, 汉族, 广东梅县人, 讲师, 硕士, 研究方向: 机械工程。

基金项目: 茂名市科技计划立项项目: “机床自动上下料机械手的设计研究”(编号: 2024544)。

等于短行程气缸行程(150 mm), 以保证交替对中。



(三) 工作循环流程

机械手工作循环如下: ① 初始位置, 上气爪从工件装卸台抓取毛坯, 下气爪为空; ② 手腕顺时针旋转 90° , 使两气爪面向车床; ③ 横臂气缸带动整个机械手沿 Z 轴移动至机床加工区域上方; ④ 大行程气缸伸出, 带动直臂下降, 使下料气爪对准卡盘中心 (此时上料气爪处于较高位置); ⑤ 下料气爪伸入卡盘, 将已完成的加工件取出, 随后横臂向后回退; ⑥ 短行程气缸下降 150 mm, 使上料气爪对准卡盘中心; ⑦ 横臂再次前进, 上料气爪将毛坯工件送入卡盘; ⑧ 卡盘夹紧, 上气爪松开, 横臂后退, 大行程气缸上升, 手腕复位, 机械手返回原点, 完成一个循环。

二、关键部件设计

(一) 手部设计

手部采用气爪抓取工件。根据工件最大直径 75 mm, 选用 SMC MHSL3-63D 型气爪 (缸径 63 mm), 该型号采用楔形凸轮构造, 具有高度小、重量轻的特点, 重复精度可达 ± 0.01 mm。在 0.5 MPa 气压下单指夹紧力可达 330 N, 单爪总夹紧力约 990 N (三指), 手指最大开闭行程 16 mm, 闭合时手指间距离 30 mm。为使气爪能抓取 75 mm 工件, 设计专用手指, 使夹持面中心距气爪安装面 30 mm (最佳夹持点), 夹持面直径取 85 mm (大于工件直径), 采用圆弧面夹持, 保证三点线接触, 对中性好。

夹持力校核: 工件质量 1.8 kg, 重力 $G=17.64$ N。手指与工件摩擦系数 $\mu=0.15$, 三个手指产生的最大静摩擦力 $\Sigma f=3 \times 0.15 \times 330=148.5$ N, 取安全系数 6, 则允许最大工件重力为 $148.5/6=24.75$ N, 大于 17.64 N, 满足要求。

(二) 腕部设计

腕部选用摆动气缸来实现手爪的 90° 翻转动

作。选用 SMC CRB2 系列叶片式摆动气缸, 型号为 CRB2BW40-90D, 该系列具有结构紧凑、安装方便的特点。在 0.5 MPa 下输出扭矩为 $5.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ (叶片式), 允许径向负载 80 N, 轴向负载 60 N。摆动板与气爪、立板连接, 立板上装有直角挡板用于机械限位, 并开长槽实现微调。

承载校核: 单气爪抓取工件时, 摆动气缸受静扭矩 $M=G \times L=17.64 \times 0.075=1.323 \text{ N} \cdot \text{m}$, 小于 $5.0 \text{ N} \cdot \text{m}$; 惯性扭矩可忽略。双气爪抓取时, 径向负载约为手爪及工件总重的一半, 即 $(2 \times \text{气爪重} + 2 \times \text{工件重} + \text{联接件重})/2$, 气爪重 (MHSL3-63D) 约 0.8 kg/个 (7.84 N), 工件重 17.64 N/个, 联接件及手指总重约 20 N, 则径向负载 $\approx (2 \times 7.84 + 2 \times 17.64 + 20)/2 = (15.68 + 35.28 + 20)/2 = 35.48 \text{ N}$, 小于允许径向负载 80 N, 满足要求。立板与摆动气缸连接螺钉 (M6) 强度经校核安全。

(三) 直臂设计

垂直直臂负责实现手爪的升降运动, 由大行程导杆气缸、短行程导杆气缸以及精密微调装置三部分构成。大行程气缸行程设定为 550 mm, 其收缩时需要克服的负载包括手部、腕部及工件等部件的总重量, 估算约为 500 N。为此, 自行设计了缸径 50 mm、活塞杆直径 18 mm 的导杆气缸, 在 0.5 MPa 工作压力下计算得出其输出拉力为 825 N, 满足负载需求。短行程气缸选用 SMC MGP 系列薄型导杆气缸, 型号为 MGPM50-200Z, 缸径 50 mm, 标称行程 200 mm (实际使用 150 mm)。该系列产品由于优化了导杆长度和端板厚度, 相比传统型号重量减轻约 24%, 有利于实现紧凑化设计。在 0.5 MPa 压力下, 该气缸伸出时理论输出力为 1178 N, 缩回时为 990 N, 足以驱动约 220 N 的负载。

针对卡盘对中精度要求高的难题, 在大行程气缸的输出杆端部设计了精密微调装置。该装置采用丝杠螺母副与锥齿轮串联传动的结构形式, 通过手动调节实现微米级的位移调整。调整至合适位置后, 利用锁紧圈固定, 确保重复定位的稳定性。丝杠采用梯形螺纹, 经计算其螺旋升角小于当量摩擦角, 具备良好的自锁性能。

(四) 横臂设计

横臂采用 SMC MY3B 系列机械接合式无杆气缸, 该系列与 MY1B 系列比较, 高度最大降低了 36%, 长度最多缩短 140 mm, 可实现省空间设计。选用型号 MY3B32-1800A, 缸径 32 mm, 行程 1800 mm, 最高速度 500 mm/s, 与控制器配合使用可实现多点定位, 重复定位精度 ± 0.5 mm, 满足水平方向定位要求。气缸固定在龙门架横梁上, 为保证运动平稳, 横梁侧面安装滚动导轨副, 通过联接块与气缸滑块相连。

(五) 支架设计

支架采用龙门式结构, 由横梁、立柱和脚座组成。横梁跨距 2240 mm, 采用两根 14a 槽钢对焊; 立柱高度 2145 mm, 采用两根 14b 槽钢对焊, 侧面加焊钢板增强稳定性; 脚座通过地脚螺栓固定于地面, 并开长槽便于安装调整。

受力分析: 横梁承受移动载荷 $G = \text{手部} + \text{腕部} + \text{直臂} + \text{联接件} + \text{导轨滑块} + \text{工件}$, 各部件质量总和 61.302 kg , $G = 61.302 \times 9.8 = 600.76 \text{ N}$ 。横梁自重 $P = 65.1 \times 9.8 = 637.98 \text{ N}$ 。最大弯矩 $M_{\max} = M_{q\max} + M_{G\max}$, 其中 $M_{q\max} = 0.125 \times P \times L = 0.125 \times 637.98 \times 2.24 = 178.63 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_{G\max} = G \times L / 2 = 600.76 \times 2.24 / 2 = 672.85 \text{ N} \cdot \text{m}$, $M_{\max} = 851.48 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。横梁抗弯截面系数 $W = 26 \text{ cm}^3$, 最大弯曲应力 $\sigma = M_{\max} / W = 851.48 \times 10^3 / 26 \times 10^3 = 32.75 \text{ MPa} < 100 \text{ MPa}$ ($Q235$ 许用应力), 安全。立柱受压应力 $\sigma = F / A = (G + P) / A = (600.76 + 637.98) / 6503 \times 10^{-6} = 1238.74 / 0.006503 = 0.19 \text{ MPa} < 160 \text{ MPa}$, 且稳定性校核合格。

三、控制系统简介

机械手控制系统采用可编程逻辑控制器 (PLC) 作为核心, 实现全自动循环运行。选用西门子 S7-1200 系列紧凑型控制器, 该 CPU 集成 8 路数字量输入和 6 路数字量输出, 支持扩展信号模块, 并内置 PROFINET 接口, 便于编程、人机交互及多设备通信。为处理位移传感器的模拟量信号, 扩展了 SM1231 模拟量输入模块。控制程序基于 TIA Portal 平台开发, 采用模块化编程思想, 包含主程序、自动运行子程序、手动操作子程序等, 支持复位、手动、半自动、全自动四种工作模式。通过布置在各运动轴极限位置的接近开关和限位开关检测位置信号, 确保各动作按序执行并互锁, 保障设备和操作人员安全。

四、结论

本文设计了一种气动驱动的龙门式上下料机械手, 主要结论如下:

(一) 采用气动技术与精密机械微调装置结合, 解决了气爪与卡盘对中精度难题, 对中精度

可达 0.1 mm 以内。

(二) 选用 SMC MY3B 系列机械接合式无杆气缸实现水平方向多位置定位, 重复定位精度 $\pm 0.5 \text{ mm}$, 满足使用要求。

(三) 选用 SMC MHSL3 系列气爪和 MGP 系列薄型带导杆气缸等新型号, 在保证性能的同时实现了轻量化和省空间设计。

(四) 采用西门子 S7-1200 系列 PLC 作为控制器, 具有更好的扩展性和网络通信能力, 保证了系统的可靠性和可维护性。

(五) 设计了手部、腕部、直臂、横臂及支架等关键结构, 经计算校核, 强度和刚度均满足要求。

该机械手结构简单、成本较低, 可有效减轻工人劳动强度, 提高生产效率, 为数控车床自动化升级提供了一种可行的技术方案。后续可进一步开展有限元分析和控制系统的优化研究。

参考文献:

- [1] 康慧洋. 龙门式上下料机械手研究与设计 [D]. 大连交通大学, 2023.
- [2] 徐爱群, 芮鸿烨. 齿坯上下料桁架机械手结构设计与分析 [J]. 浙江科技学院学报, 2023, 35(3): 234-242.
- [3] 云立恒, 卢燕. 基于 PLC 的上下料机械手手臂设计 [J]. 济南玖源机电科技有限公司, 2022.
- [4] 西门子 (中国) 有限公司. S7-1200 可编程控制器系统手册 [Z]. 2024.
- [5] Kang Huiyang. Research and Design of Gantry-Type Loading and Unloading Manipulator [D]. Dalian Jiaotong University, 2023.
- [6] Xu Aiqun, Rui Hongye. Structural Design and Analysis of Truss Manipulator for Gear Blank Loading and Unloading [J]. Journal of Zhejiang University of Science and Technology, 2023, 35(3): 234-242.
- [7] Yun Liheng, Lu Yan. Design of Loading and Unloading Manipulator Arm Based on PLC [J]. Jinan Jiuyuan Electromechanical Technology Co., Ltd., 2022.
- [8] Siemens Ltd., China. S7-1200 Programmable Controller System Manual [Z]. 2024.