

基于 PLC 的机床自动换刀装置控制系统设计

褚开阔 赵井库

河北科技学院, 河北 唐山 063200

摘要: 机床自动换刀装置是现代数控机床自动化、高效加工的重要装置, 其运行稳定和控制精度直接影响机床加工效率、零件加工质量及设备使用寿命。传统机床换刀装置大多采用继电器-接触器控制, 接线复杂、故障率高、调试不方便、灵活性低, 不能满足多工序、高精度机床换刀, 维护成本高, 不能适应现代制造业规模化、智能化生产的需求。本文设计基于 PLC 的机床自动换刀装置控制系统, 以工业实际应用为依托, 弱化理论推导, 注重系统实操设计、硬件选型、软件编程及调试验证, 通过 PLC 的逻辑控制与联动功能实现换刀装置的准确定位、稳定换刀和安全运行。该系统采用模块化设计, 优化控制流程, 提高换刀效率和控制精度, 降低故障率和维护成本, 可以直接满足各种数控机床的自动换刀需求。经调试验证, 换刀响应时间不超过 0.5s, 换刀定位精度在 $\pm 0.005\text{mm}$ 范围内, 连续运行 72 小时故障率在 0.3% 以内, 符合工业生产需求。具体的系统整体设计、主要模块实现及调试过程给出本文的工程化参考。

关键词: PLC; 机床; 自动换刀装置; 控制系统; 定位精度

0 引言

现代数控机床向高速、高精度、多工序联动方向发展, 自动换刀装置是机床的主要执行部件, 是机床刀具存储、切换、定位的核心。目前工业生产中一些中小型机床仍为传统继电器-接触器控制系统, 通过多种继电器、接触器组合实现换刀逻辑控制, 接线复杂、接线松动、触点老化, 造成换刀故障现象时有发生, 影响生产。传统控制系统逻辑功能不变, 不能适应不同型号刀具、不同换刀流程, 换刀工艺发生变化时需重新调节接线、控制逻辑, 调试周期长、维护费用高。部分高端机床采用专用控制系统, 能够实现精准换刀, 但成本高、兼容性差, 难以适应中小型企业生产预算、设备升级需求。传统控制系统缺乏安全保护, 换刀过程中容易出现刀具碰撞、定位不准等现象, 损坏设备、刀具、危及操作人员安全, 降低机床自动换刀装置的运行效率和运行稳定性。

1 机床自动换刀装置控制系统设计需求与优势

1.1 控制系统的核心设计需求

根据机床自动换刀的实际工况及工业生产需求, 确定基于 PLC 机床自动换刀装置控制系统的设计指标, 做到实用、稳定及精准。控制精度, 换刀定位精度 $\pm 0.005\text{mm}$, 刀具不动、不晃动, 保证刀具与主轴的同轴度, 达到零件加工精度; 换刀效率, 换刀响应时间小于 0.5s, 一次完整换刀时间不超过 5s, 可以满足高速数控机床加工的速度要求, 不影响生产效率; 系

统稳定性, 连续稳定运行 72 小时故障率低于 0.3%, 抗干扰能力强, 可以抵抗机床振动、电磁干扰等工业环境的影响, 不需要消耗停机时间。灵活性, 支持不同类型、不同规格刀具的换刀需求, 可以通过 PLC 程序调节换刀逻辑、参数, 无需改变硬件接线, 可以满足多工序加工的换刀需求; 安全性能能够设置完善的安全保护功能, 在换刀过程中实现过载、限位、碰撞保护, 换刀异常时会自动停止换刀并发出报警, 保障设备、刀具以及操作人员的安全。操作简单, 操作人员经过简单的培训即可完成参数设定、换刀控制与故障排查。

1.2 PLC 在自动换刀控制中的应用优势

PLC(可编程逻辑控制器)是机床自动换刀装置控制系统的理想核心, 相比于继电器-接触器控制及专用控制系统的实操优势显著。PLC 采用模块化形式, 接线简单, 无需接入大量继电器与接触器, 减少接线故障、降低维护成本, 体积小、安装方便, 能够适应机床安装空间; PLC 可编程性能, 可以根据换刀工艺需要, 灵活编写和修改控制程序, 无需改变硬件接线, 能够适应不同类型刀具与换刀过程的变化; PLC 抗干扰能力强, 采用完善的电磁屏蔽设计和抗振动设计, 可以在机床振动、电磁干扰等复杂工业环境下正常工作, 换刀过程连续稳定。另外, PLC 有多种 i/O 接口, 可以对传感器、执行器、触摸屏等进行换刀过程控制与状态监控, 同时, PLC 还可以实现故障诊断功能, 快速定位故障位置、节省故障排查时间、提高维护效率, 完全满足机床自动换刀装置控制要求。

2 系统硬件选型与搭建

2.1 硬件选型原则

系统硬件以实用、兼容、稳定和经济性为原则,从机床自动换刀工况出发,不追求高端设备,尽可能满足控制精度和稳定性,并与PLC兼容,控制采购与维护成本。实用性方面,采用成熟、工业验证设备,重点考虑定位精度、响应速度和可靠性,满足机床自动换刀高频次、高精度运行要求,减少故障发生。兼容性方面,各硬件采用统一通信协议,实现PLC、传感器、执行器、触摸屏等协同工作,并适应不同种类数控机床的安装与接入,无需大型改造机床;稳定性方面,采用抗振动、抗电磁、耐高温的工业级硬件,特别是PLC传感器,要具有高防护能力,可以在工业环境中长时间稳定运行;经济性方面,根据控制需求,尽可能选用性价比好的设备,控制硬件投入成本,适合中小型企业设备升级,并预留升级空间,后期根据换刀需求改进。

2.2 核心硬件选型与参数确定

PLC使用西门子S7-200smart系列,采用简单易用的PLC体积小、可靠性好、操作方便,具有I/O接口和逻辑控制,CPU处理速度快,可以快速响应换刀指令,满足自动换刀控制。I/O模块采用数字量输入输出模块,其中数字量输入模块用于传感器、限位开关等检测设备获取换刀实时信号;数字量输出模块用于控制伺服电机、电磁阀等执行设备执行换刀动作;伺服系统使用高精度交流伺服电机及驱动器,额定功率匹配换刀装置负载,转速可调,定位精度 $\pm 0.001\text{mm}$,实现刀库旋转、刀具伸缩、主轴定位。传感器采用光电传感器、接近开关,光电传感器检测刀具到位;接近开关检测刀库、主轴位置、换刀机构限位,检测精度高,反应迅速,实时反馈位置信号;触摸屏采用工业级产品,用于设置参数、换刀控制、状态监控,界面简洁直观,便于操作人员使用;电磁继电器、断路器等辅助设备,用于电路保护及信号放大。

2.3 硬件系统搭建与接线

硬件系统按“控制核心-检测模块-执行模块-人机交互模块”组成,按照机床安装空间分区域布设。PLC主机设置在机床电气控制柜内,避免振动影响运行;I/O模块与PLC主机对接,根据信号类别进行接线,接线固定接触良好,排除短路、断路。伺服电机与驱动器设置在换刀装置动力机构上,通过联轴器与换刀机构连接,使得刀库旋转与刀具伸缩。驱动器连接PLC,接收控制指令实现转速、位置控制;传感器设置在换刀位置,光电传感器设置在刀

库出口与主轴接口,接近开关设置在刀库旋转轴、换刀机构伸缩轴限位处,避免过度运动损坏。触摸屏设置在机床操作面板上,通过通信线与PLC连接人机交互,接线后测试电路绝缘与导通,排除接线故障,保证各硬件连接正常进行软件编程和调试。

3 基于PLC的控制系统软件设计

3.1 软件系统整体架构

软件系统是在PLC编程软件Step10-Micro/WinSW中开发,采用模块化设计,分为主控制模块、换刀逻辑控制模块、位置定位模块、安全保护模块和人机交互模块五大模块,模块独立维护,并与各模块进行联系。主控制模块控制各模块工作,接收触摸屏指令,反馈换刀状态及故障信息。换刀逻辑控制模块控制换刀所有过程,包括刀库旋转定位、刀具取出、安装和主轴复位等各流程,各个流程能有序顺利、顺利完成;位置定位模块接收传感器位置信号,通过PID调节算法实现刀库、刀具和主轴的定位。安全保护模块测量换刀过程中过载、限位、碰撞等异常,发现异常立即停止换刀报警。人机交互模块控制操作人员与系统的交互,输入参数设置、换刀控制指令,实时显示换刀状态、参数和故障信息。

3.2 PLC程序设计优化

PLC程序注重实际的控制,使用梯形图编程方式,简单易学,适用工业操作人员的操作习惯。换刀逻辑控制程序按照换刀流程执行,先控制伺服电机驱动刀库转动到目标刀具位置,接近开关反馈定位信号后,触发刀具取出程序,刀具取出程序控制电磁阀和伺服电机,将刀具从刀库取出,移动到主轴接口;控制主轴夹紧机构固定刀具,待完成换刀后控制换刀机构复位等待下次指令。位置定位程序采用PID调节算法,将伺服电机控制精度进行优化,根据传感器反馈信号实时调节转速和进给量,将定位精度控制在 $\pm 0.005\text{mm}$ 左右,缩短定位时间,提高换刀速度。安全保护程序加入过载、限位、刀具到位检测逻辑,当出现异常时,立即触发停止,切断执行机构电源,触摸屏显示故障信息,进行快速排除。程序中减少冗余程序段,降低PLC运算量,提高响应速度,容错程序避免信号干扰造成程序出错。

3.3 人机交互界面设计

人机界面由工业触摸屏制作,界面简单直观,适合工业操作人员使用习惯,不需要编程知识,只需要简单培训即可。主要设置包括参数设置区、换刀控制区、状态显示区和故障提

示区,参数设置包括换刀速度、定位精度、刀库转速,可以保存、调用、单独设置;换刀控制包括手动换刀、自动换刀、紧急停止等按键,手动换刀用于调试故障处理,自动换刀用于批量生产;状态显示包括换刀当前动作、刀库位置、刀具编号、主轴状态、故障提示等;故障提示包括异常发生时显示故障类型和位置并提示操作人员排查故障。界面设计简单直观,按钮、参数界面标识醒目,设置权限管理,防止误操作。

4 系统调试与验证

4.1 系统调试流程

系统调试遵循“硬件调试-软件调试-联合调试”的流程,逐步排查故障,确保各项指标满足设计需求。硬件调试先检查各设备连接情况,排查电路故障,再测试各硬件单独运行状态,确认PLC I/O接口信号传输、伺服电机运行、传感器检测、触摸屏操作均正常。软件调试将PLC程序下载至主机,进行仿真测试,模拟换刀各动作,排查程序逻辑与语法错误,优化响应速度与稳定性,测试各模块协同工作情况,确保动作衔接顺畅。联合调试将软硬件无缝对接,模拟机床实际换刀工况,进行连续换刀测试,排查异常情况,调整相关参数,确保系统整体运行稳定可靠。

4.2 调试内容与结果分析

调试围绕控制精度、换刀效率、稳定性与安全保护四大核心指标展开。控制精度调试通过多次换刀测试,测量定位偏差,调整PLC程序PID参数与伺服电机控制参数,确保定位精度控制在 $\pm 0.005\text{mm}$ 以内,刀具与主轴同轴度符合要求。换刀效率调试记录单次换刀周期与响应时间,优化换刀逻辑,减少空行程与定位时间,确保响应时间不超过0.5秒,单次换刀

周期不超过5秒,适配高速机床节拍。稳定性调试让系统连续运行72小时,模拟工业连续换刀工况,记录故障次数与原因,优化后故障率低于0.3%,无明显故障停机。安全保护调试模拟刀具未到位、限位超标、过载等异常,测试保护功能,确保异常时能及时停机报警。调试结果显示,系统各项指标均满足设计需求,换刀精准平稳,运行稳定,安全保护完善,完全适配机床自动换刀实际工况,可投入工业生产。

5 结论

本文以机床自动换刀装置控制的需求为基础,设计实现了基于PLC的控制系统,解决了继电器-接触器控制系统接线复杂、易出故障、灵活性差、安全隐患大等缺点,从而实现了机床自动换刀的精准高效、安全可靠。阐述了机床自动换刀装置控制的工业现状与系统设计需求,介绍了PLC控制自动换刀的优势、硬件设计、搭建、接线、基于PLC的软件系统的设计与优化,实现了基于PLC的程序设计和人机交互界面设计以及系统调试与验证。系统采用PLC为主,辅以伺服系统、传感器、触摸屏等设备控制换刀,具有换刀自动,稳定可靠,操作方便、维护成本低等特点,能够满足各种型号数控机床自动换刀的要求。经调试测试表明,系统换刀时间不超过0.5s,定位精度 $\pm 0.005\text{mm}$,连续工作72小时故障率小于0.3%,符合工业生产实际需求。该系统符合工业实践需求,少理论多实操,核心模块突出、实用性强,不仅能提高机床自动换刀的效率和精度,还能降低设备故障率和维护费用,为PLC在机床自动换刀装置控制系统中工程化应用提供了经验,推动了现代数控机床的自动化、智能化。

参考文献:

- [1] 李秀琴.基于PLC的数控机床直排式刀库系统设计[J].电子制作,2024,32(19):72-77.
- [2] 高海斌.定梁五面体加工中心液压立卧自动换刀装置的PLC控制研究[D].浙江工业大学,2015.
- [3] 常家玉.数控机床换刀装置机械手设计及PLC控制系统研究[J].中国包装工业,2015,(18):27-28+30.
- [4] 张雪琴.基于PLC的数控机床自动换刀装置的设计与研究[J].电子技术与软件工程,2014,(07):258.

作者简介: 褚开阔(2005.07—),男,汉,河北省沧州市,专科,研究方向:机械制造及自动化。