

# 基于 PLC 的数控机床机电一体化技术实现与应用

周润猛 崔晓玉 杜婵婵 孙倩

青岛城市学院 山东青岛 266106

**摘要:** 数控机床作为现代制造业的工业母机,是机械制造的核心。PLC 机电一体化技术在数控机床领域发挥着不可或缺的作用。本文围绕 PLC 在数控机床中的应用展开研究,分析其在控制系统设计、运动控制、I/O 接口、人机界面、自动换刀、传感器反馈以及现场总线通信等方面的实现方式,并探讨其对提高生产效率和工业智能化的推动作用。

**关键词:** PLC; 数控机床; 一体化技术

伴随着现代制造业对生产效率、加工精度、自动化程度的要求越来越高,数控机床在工业生产中扮演着越来越重要的角色。PLC 技术的引入不仅提高了数控机床的控制精度,还增强了其运行可靠性和系统可扩展性<sup>[1]</sup>。机电一体化技术的使用,一方面改善了机械结构和控制系统的耦合,另一方面推动了智能化制造的发展。本文以 PLC 技术为依托,对数控机床的机电一体化实现方式及其应用价值进行系统的分析。

## 1 PLC 与数控机床技术基础

### 1.1 PLC 系统结构与工作原理

PLC 是一种依托于计算机技术的控制设备,体积小,功能强大,对操作人员的技术要求较低,可提高机电一体化的进程。PLC 是工业控制系统的中枢,其结构高度模块化,一般由 CPU 单元、输入/输出(I/O)模块、存储器、电源模块和通信接口组成。CPU 执行梯形图、功能块图等控制程序,以高速的扫描周期不断读取输入信号、执行逻辑运算、输出控制指令。I/O 模块则实现与外部的传感器、继电器、执行器等进行物理上的连接,既可以是数字量,也可以是模拟量。内部存储器利用非易失性存储技术,即使断电以后也可以保持控制逻辑。冗余电源设计则可以提高系统的可靠性<sup>[2]</sup>。PLC 具有很强的抗环境能力,能抗电磁干扰、抗高温振动等恶劣的工业环境,保证控制系统正常工作。

### 1.2 机电一体化技术在自动化中的角色

机电一体化技术是机械工程、电子技术、控制理论、信息技术四者融合而形成的技术,为现代自动化系统提供结构紧凑、功能高度集成的解决方案。把传感器、执行器、控制单元和通信模块有机地集成在一起,机电一体化系统不仅

增强了系统响应速度和可靠性,还大幅提升了诊断能力和灵活性。尤其是在工业 4.0 的背景下,技术融合促使实时数据采集、预测性维护和智能决策机制得以实现,依靠现场总线等通讯协议来实现各个子系统之间的高效协同。PLC 作为机电一体化系统中的核心控制器,模块化设计加上强大的编程能力,使得系统具有了可扩展、可重构的特点,是实现智能制造、自主控制的重要基础。

## 2 基于 PLC 的数控机床控制机电一体化架构设计

### 2.1 控制系统总体设计

基于 PLC 的数控机床控制架构设计,总体控制系统所采用的结构往往是分层与模块化融合的方式,从逻辑上对运动、I/O 以及安全进行统一的管理。PLC 是控制中心,完成实时逻辑运算、状态监视、报警以及与上面的 CNC 或主控计算平台的通信。控制层依靠现场总线( PROFIBUS, EtherCAT 等)同下层的运动控制模块, I/O 模块展开快速的数据交流,保证系统可以实现高带宽、低延迟的协同工作。模块化设计使系统具有很好的可扩展性和可维护性,也使不同子系统(伺服驱动、测量反馈、安全保护等)之间结构上解耦,在保证系统整体性能的同时,提高系统灵活性。

### 2.2 运动控制与伺服驱动子系统

运动控制子系统是数控机床精密加工的中枢,它依靠 PLC 输出高速脉冲信号或者方向/使能信号驱动伺服电机,从而实现对各轴位置、速度以及加减速度的精确控制。PLC 可以集成专用的运动控制模块或运动卡,经过 G 代码解析、插补算法(如直线插补、圆弧插补)以及闭环位置反馈(编码器、光栅尺等),完成路径规划与轨迹执行<sup>[3]</sup>。伺服驱动器把 PLC 发出的控制信号变成电机电流,然后通过当前位

置反馈和设定值做PID或者更复杂的控制器计算,从而实现高动态响应和高稳态精度。该子系统的设计也要考虑机械结构的惯量、共振频率、摩擦特性,采用控制参数自适应调节(增益调节、滤波设计)等手段。另外,当采用现场总线协议时,运动模块可以实现多轴协调、分布式控制,提高复杂加工任务的同步性和效率。

### 2.3 I/O接口及人机界面设计

采用模块化的PLC架构,I/O模块可以按需扩展并与运动控制子系统、安全系统并行。与此同时,人机界面(HMI)一般用工业触摸屏或嵌入式操作面板,通过PLC或者工业PC实现参数输入、实时状态监控、报警提示、故障诊断。HMI界面要兼顾可视化、响应速度、安全性,使操作员在加工过程中直观地掌握轴状态、I/O状态和警示信息。通过将HMI与PLC中断机制、报警逻辑紧密连接,可以实现对异常状态的及时应对,在需要的时候执行停机或者切换策略,以此来保证机床操作效率和安全。

### 2.4 安全保护与故障处理机制

数控机床属于高精度、高惯量的复杂设备,安全设计不能马虎。PLC在此起到的作用是安全逻辑控制器,实现多重保护:急停响应、限位开关检测、过载监测、门锁联锁、温度、振动异常报警等。PLC可以利用专门的安全I/O模块和安全认证程序,实现关键I/O点的硬件隔离和逻辑冗余,完成“安全级别”控制。除此之外,故障处理机制中一般包含自诊断子模块,该子模块实时采集I/O状态和反馈信号,利用状态机或者顺序逻辑分析故障原因,根据错误代码和HMI显示界面,为维护人员提供清晰的故障定位和恢复途径。对于不可恢复或者重大故障,PLC会立刻启动安全停机程序,并且记载故障历史日志,从而给之后的故障分析以及系统改善给予数据支撑。

## 3 PLC在数控机床控制机电一体化中的应用

### 3.1 自动换刀与刀库管理

在基于PLC的机电一体化控制系统中,自动换刀(ATC)和刀库管理属于数控机床重要的逻辑以及动作配合部分<sup>[4]</sup>。利用高速逻辑运算及I/O接口,PLC控制刀库旋转、机械手抓刀、刀套翻折、主轴锁紧或解锁等。数控单元发出T代码指令调用换刀宏程序时,PLC接收到该指令之后,根据当前刀位和目标刀位的差值来确定刀库旋转的方向(就近选刀策略),缩短换刀时间。正向和反向的旋转控制信号由PLC输出,

通过驱动继电器或者伺服电机来实现。与此同时,PLC用位置检测开关或者编码器信号检测刀架是否到位,在到位后控制气缸驱动刀臂运动,实现机械手臂的伸出和缩回。PLC程序还要控制刀具的锁紧和解锁顺序:当主轴旋转到预设角度时,检测到锁紧信号之后,进行延时、确认,再释放机械臂,保证换刀过程中机械安全、刀具不丢失。

PLC可对刀库内各个刀位、刀号实施管理,并能实现刀具号同刀位的对应关系。不仅可以实现基础的换刀指令,还可以实现刀具预选,即在主轴加工时让PLC控制刀库旋转到即将被调用的刀具位置上,从而把换刀时间和加工时间重叠起来,最大程度地提高生产效率。PLC还可以记录刀具使用寿命、换刀次数甚至监视机械手、锁紧机构等的状态;当检测到异常(如锁紧失败、位置偏差、换刀超时)的时候,立即发出报警并执行预先设置好的恢复程序。

### 3.2 传感器与反馈检测技术

PLC在数控机床中不仅仅起到逻辑控制的作用,还起到传感器数据采集和闭环反馈的枢纽作用,将温度、位置、力等各种感知信息整合起来,从而实现高精度控制和运行监护。利用模拟量输入模块,PLC可以实时采集热电偶、热电阻(如PT100)等温度传感器的数据,再将数据转为数字信号进行PID控制。加工时,PLC根据实际温度与预设目标值之间的偏差,动态调节冷却液喷淋、主轴冷却或者加热策略,使刀具、工件温度处于最佳状态。温度控制系统常用到PLC内部的PID功能块,用4~20mA模拟量来调节执行器输出,从而实现闭环控制的目的。

位置反馈部分,PLC系统一般和编码器、光栅尺、限位开关等位置传感器一起使用,为运动控制子系统提供闭环校正<sup>[5]</sup>。位置数据被PLC读取之后,可以用来检测轴运动误差、检验插补路径是否偏离,也可以触发错误状态保护。对于要求精确定位的换刀机械手或者刀库旋转机构,PLC会根据位置传感器所输出的状态信号来判断刀具是否对准、握持是否牢固。在力或者扭矩监测上,PLC也可以接入力传感器(压力传感器或者荷重传感器),对加工或者夹紧过程中的加载情况进行监测。一些系统利用PLC内置的高速中断模块,实时采样力反馈信号,执行PID或者其他控制逻辑来调节比例阀、伺服电机输出,实现预定的力-位移曲线控制。

### 3.3 自动校准与测量系统

现代数控机床上,自动校准与测量系统对于保证高精

度加工、使重复定位误差最小起着重要作用。PLC 在这里起到逻辑控制、发出测量指令、处理反馈以及进行误差补偿运算的作用。PLC 利用 I/O 模块驱动测长仪或者测头, 定时对刀具长度、刀具直径或工件基准面进行自动测量。测量结束之后, 测头会把位置信号或者触发信号反馈给 PLC, PLC 载入预设的算法(补偿表、偏差计算逻辑), 计算出校准补偿值, 然后把补偿值写入数控系统(CNC 单元)的刀具偏置参数或者工件坐标系偏置中。

PLC 编程中还可以嵌入自校准子程序, 该子程序可以在机床开机、周期定期维护、刀具更换后自动执行测量校准流程。校准包含触发测头探针动作、采集测量信号、重复测量核实以及容差判定等步骤。对重复性不好或者环境温度变化大的机床, PLC 会根据温度传感器反馈来调节补偿策略, 如温度大于某阈值时, PLC 启动热误差补偿模块, 用温度-位置偏差映射曲线做坐标偏移补偿, 减少热膨胀对加工精度的影响<sup>[6]</sup>。PLC 的数据记录功能还可以用来储存校准历史以及误差趋势, 可以利用 HMI(人机界面)显示给操作人员或者工程师查看。根据测量数据趋势分析, 可以指导定期维护、预测性校准或者误差补偿模型优化。因此, PLC 驱动的自动校准系统不仅实现了无人干预下量具测量和误差补偿, 也为高精度数控加工提供智能反馈闭环, 在工业制造过程中大幅提升工件的一致性和机床运行的稳定性。

### 3.4 现场总线通信与模块集成

PLC 在机电一体化架构中起到通信枢纽的作用, 利用现场总线技术把运动控制模块、传感器、驱动器、I/O 单元集成成为高效协同的分布式系统。现场总线, 如 PROFIBUS、EtherCAT、Profinet 等, 大量运用于现代工业控制系统当中, 成为将 PLC 同各个现场设备联系起来的重要途径。

数控机床系统中, PLC 利用现场总线协议同伺服驱动器进行实时通信, 传送脉冲命令或者控制信号, 接收运动反馈(位置、速度、故障状态等)做闭环控制和状态监测。此种通信方式, 缩减了传统点-对-点布线的繁杂之处, 而且大幅度削减了延迟以及干扰的风险。利用高速以太网型现场总线(EtherCAT、Profinet 等), PLC 可以实现子系统间的多轴同步、协同插补、实时诊断。同时, PLC 还可以通过总线将传感器信号(温度、力、限位等)和执行器(气缸、冷却泵、换刀机构等)统一管理。集成方式使系统逻辑更加集中, 利于维护和扩展, 可以实现热插拔式模块升级。PLC 对

于现场总线上各模块具有自动寻址、状态检测功能, 能够在设备故障或模块插拔变动时实时刷新设备拓扑结构。PLC 还可以和上层控制系统(CNC 主控单元、工业 PC、MES 系统等)进行通信, 利用以太网或者工业协议(OPC UA)传递状态数据、报警信息、诊断日志。这种上下层无缝集成, 构成了一个统一的数据与控制网络, 实现机床自动化、数字化与智能化。

### 4 结语

在数控机床中应用 PLC 技术可以降低劳动力, 提高工厂的工作效率, 还能通过精确控制、自动管理来优化生产过程。PLC 同机电一体化技术相结合之后, 机床的可靠性以及加工精度都会得到提升, 可以支持自动换刀、传感器反馈、运动控制等功能模块。对工业企业来说, 使用 PLC 技术有利于降低生产成本, 提高资源利用效率, 推动工业智能化发展, 促使现代制造业向高效、智能、绿色转型。

### 参考文献:

- [1] 郭小军. 基于 PLC 机电一体化技术的数控机床改造研究[J]. 自动化应用, 2025,66(15):272-274.
- [2] 蒋学利. PLC 机电一体化技术在数控机床中的应用[J]. 机电产品开发与创新, 2024,37(04):143-145.
- [3] 杨增锐, 杨海森. PLC 机电一体化技术在数控机床中的应用[J]. 造纸装备及材料, 2024,53(06):91-93.
- [4] 唐涛. PLC 机电一体化技术在数控机床中的有效应用[J]. 现代工业经济和信息化, 2023,13(04):116-118.
- [5] 宋守斌. 基于 PLC 技术的机电一体化数控机床运行控制研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2023,(04):280-284+289.
- [6] 段美燕. PLC 机电一体化技术在数控机床中的应用[J]. 现代制造技术与装备, 2023,59(03):180-182.

**作者简介:** 第一作者: 周润猛(1998—), 男, 汉族, 山东省青岛市, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 机电一体化设计, 机械结构设计。

第二作者: 崔晓玉(1985—), 男, 汉族, 山东潍坊高密, 本科, 实验师, 研究方向: 机械设计制造及自动化。

第三作者: 杜婵婵(1995—)女, 汉族, 河南省周口市, 硕士研究生, 研究方向: 机械电子工程。

第四作者: 孙倩, (1985—)女, 汉族, 山东省菏泽市, 硕士研究生, 副教授, 研究方向: 材料加工工程。