

机电一体化技术下的精密运动控制系统设计

王 瑞

(重庆移通学院, 重庆 400000)

摘 要 本文深入探讨了机电一体化技术下的精密运动控制系统设计。首先, 对机电一体化技术概念以及其对于精密运动控制的意义进行了说明; 其次, 对精密运动控制系统构成要素进行了深入分析, 包括驱动装置、传感器和控制器, 并论述各个组成部分的作用及原理; 最后, 重点对系统设计过程中高精度位置控制、速度控制算法等关键技术进行了研究, 并对如何改善系统稳定性及响应速度等问题进行了探讨。同时, 以实际工程为例说明精密运动控制系统设计主要包括设计思路、方案选型及调试过程等, 以期对精密运动控制系统性能的进一步完善提供理论参考与实践指导。

关键词 机电一体化; 精密运动控制系统; 高精度位置控制; 速度控制算法

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.003

0 引言

随着现代科学技术的飞速发展, 机电一体化技术已成为现代制造业中不可或缺的关键技术。精密运动控制系统是机电一体化技术中的一个核心应用领域, 它在工业自动化、精密仪器加工和航空航天等诸多领域都有着举足轻重的地位和作用。精密运动控制系统可以实现位置、速度及加速度的高精度控制, 以满足人们对于加工精度和产品性能方面越来越高的需求。因此, 对机电一体化技术中精密运动控制系统的设计进行深入研究具有重要的现实意义。

1 精密运动控制系统的关键技术

1.1 高精度位置控制

1.1.1 闭环位置控制策略

闭环位置控制是实现高精度位置控制的关键。在闭环位置控制系统下, 运动部件的真实位置由位置传感器进行实时探测, 真实位置信息被反馈到控制器。控制器依据所设定之目标位置与真实位置之差, 通过位置调节器计算所述控制量, 并将此控制量送至所述驱动装置对所述运动部件之位置进行调整, 使得二者趋于均等^[1]。

常见的位置调节器有比例—积分—微分 (PID) 调节器。PID 调节器采用比例、积分及微分来处理位置误差, 使位置控制更加准确稳定。在实践中, 针对不同系统的特点, 需合理整定 PID 参数。

1.1.2 插补算法在位置控制中的应用

插补算法在多轴联动精密运动控制系统中具有重

要作用。以数控加工为例, 要求刀具按预定轨迹移动。插补算法能够根据邻近加工点计算所述中间过渡点位置坐标以使得加工轨迹更光滑^[2]。

常见的插补算法有逐点比较插补和数字积分插补 (DDA) 等。逐点比较插补算法是通过比对当前点与目标点之间位置关系来判断刀具进给方向; 数字积分插补算法是一种通过对坐标轴位移进行积分运算来生成插补路径的方法。

1.2 速度控制算法

1.2.1 速度给定与跟踪算法

速度控制的主要目的是使运动部件的速度按照设定的速度曲线进行变化。速度给定值一般是上位机或者控制系统按照加工工艺和其他要求来给定的。速度跟踪算法负责比对驱动装置实际速度和速度给定值, 依据误差做出调整。

在实践中, 自适应速度控制算法等几种先进速度控制算法能够根据运动系统动态特性对控制参数进行自动调节, 从而提高速度控制的准确性与适应性。

1.2.2 加减速控制算法

合理的加减速控制对于精密运动控制系统至关重要。当动作启动后, 需加速操作以使得动作部件快速到达设定转速; 当动作完成或者速度发生变化时需做减速操作。

常用加减速控制算法是 S 形速度曲线控制算法。S 形速度曲线可实现运动部件加速与减速时的平稳过渡, 并避免过大冲击力及加速度突变现象, 提高系统稳定性及运动精度。

1.3 系统稳定性与响应速度的提高

1.3.1 系统的建模与分析

对精密运动控制系统进行准确的建模是提高系统稳定性和响应速度的基础。通过对系统进行动力学建模,可对系统固有频率和阻尼比进行响应特性分析。

常见的系统建模方法包括时域建模与频域建模两种。时域建模是通过建立微分方程,对系统状态进行描述;频域建模的方法是通过分析系统频率特性的分析,如传递函数等,来评定系统的稳定性。

1.3.2 控制策略的优化与改进

为提高系统的稳定性和响应速度,可以对现有的控制策略进行优化和改进。比如利用模糊控制和神经网络控制这类智能控制算法,就能够突破传统控制算法对复杂和非线性系统控制的限制。

该智能控制算法无需准确的系统模型并能根据系统运行状态及环境变化而自动调节控制策略,以提高运动控制系统运行的稳定性及响应速度,适用于非稳态系统或者复杂运行状态。

2 精密运动控制系统的设计要点

2.1 硬件设计

2.1.1 总体布局规划

根据系统的应用场景和空间限制,合理安排驱动装置、传感器和控制器的位置。例如:在空间有限的工业自动化设备中,要将各部件紧凑布置,同时要考虑散热、布线等因素,避免相互干扰^[3]。

对于多轴运动的精密运动控制系统,要确保各轴之间的空间布局合理,减少轴间的干涉和耦合影响,以保证运动的协调性和准确性。

2.1.2 接口设计

驱动装置和控制器间需设计一个可靠电气接口。例如:伺服电机或步进电机驱动器与运动控制卡或PLC之间要通过合适的通信接口(如脉冲接口、模拟量接口或者高速通信协议接口)进行连接,确保控制指令能准确无误地传输到驱动装置。

传感器和控制器还应设计配套电气接口。如光栅尺和编码器等位置传感器通常输出数字脉冲信号或模拟电压信号,需要通过信号调理电路(如放大、滤波等处理)将其转换为控制器能够识别的标准信号形式。

2.1.3 电气系统设计

在电源设计中,应针对不同元件的功率需求以及

电压、电流需求来选择适当的电源模块。在兼顾电源抗干扰能力的前提下,可以通过隔离变压器和滤波电容的方法改善电源质量,从而使整个系统获得稳定供电。

在电路板设计中,应注意布线规则以避免信号线间的相互交叉与干扰。对高速信号线路应使用差分信号线和屏蔽线以确保信号完整。同时在接地设计中应兼顾单点接地或者多点接地以降低接地环路引起的噪声问题。

2.2 软件设计

2.2.1 底层控制软件设计

针对控制器(如PLC、运动控制卡或微处理器等)编写底层控制程序。以运动控制卡为例,需要使用相应的开发环境(如C、C++或特定的运动控制编程语言等)编写程序,实现对驱动装置(电机)的精确控制。包括配置运动控制参数,如脉冲频率、方向控制等,以及实现对电机的启停、正反转控制、速度和位置调节等功能。同时,要设计软件的安全保护机制,如过流保护、过压保护、超程保护等,防止系统因异常情况受到损坏。

2.2.2 运动控制算法实现

将高精度位置控制算法(如闭环位置控制、插补算法等)和速度控制算法(如速度给定和跟踪算法、加减速控制算法等)转化为具体的软件代码。对于闭环位置控制,要在程序中实时采集位置传感器的数据,进行误差计算和处理,通过位置调节器(如PID调节器)计算出控制量并发送给驱动装置^[4]。

插补算法的实现需要根据系统的多轴运动要求,在程序中按照相应的算法逻辑(如逐点比较插补或者数字积分插补算法等)计算中间轨迹点坐标,以实现平滑的运动轨迹。为了实现速度控制算法,需要对电机的运行速度进行实时的监控和调节,以确保满足系统预设的速度标准。

2.2.3 上层监控与管理软件设计

通过开发上层监控与管理软件来实时监测与管理整个精密运动控制系统。软件可运行于工业计算机或者嵌入式系统中,并通过通信协议和底层控制器交互数据。

上层软件要有数据显示功能并能实时地显示出系统工作状态、电机位置、速度和误差等重要参数;本实用新型具有数据存储的功能,能够记录系统在工作时的重要信息,方便后续的分析与故障诊断;本实用新型具有人机界面的运行功能,便于运行人员对参数的设置和程序的修改。

3 精密运动控制系统的设计与实例

3.1 设计思路

3.1.1 需求分析

在设计精密运动控制系统时,首先要进行需求分析。明确系统应用场合,精度要求,速度范围和负载大小。例如:在精密模具加工中,需要较高的位置精度(如微米级)和较为平稳的速度控制;在对高速磁悬浮列车的轨道进行检测时,必须具备迅速反应的速度和精确的位置控制功能^[5]。

3.1.2 部件选型

根据需求分析的结果进行部件选型。对于驱动装置而言,若精度与稳定性都有极高要求,例如半导体芯片制造设备方面,可以选择高精度永磁同步伺服电机;在那些对成本有严格要求、负载相对较轻以及控制精度要求不高的应用场景中,步进电机是一个值得考虑的选项。对传感器而言,基于位置精度的需要可以选用光栅尺或者高分辨率编码器。控制器会根据系统的复杂度和性能需求来选择 PLC、运动控制卡或微处理器。

3.2 工程实例

3.2.1 实例背景

以一台五轴精密雕刻机为例,这台雕刻机的主要功能是对如金属和木材这样的材料进行高度精确的雕刻处理,其雕刻的精确度需要达到 $\pm 5 \mu\text{m}$,而雕刻的速度应控制在 $10 \sim 100 \text{ mm/s}$ 之间,并且其加工路径应为三维曲线。

3.2.2 方案设计

1. 电机的选择:在充分考虑精度要求及速度范围的基础上,选择 5 台永磁同步伺服电机为驱动装置。

2. 传感器选型:使用高精度光栅尺作为位置传感器安装于各轴运动导轨中,对运动部件进行实时准确定位。

3. 控制器的选择:选用以 PC 为核心的运动控制卡为控制器,该控制卡能与上位机软件通信,便于接收加工轨迹数据,计算运动控制算法及发出指令。

4. 控制算法设计:采用闭环位置控制算法。利用位置传感器回馈的真实位置信息。用 PID 调节器来调整位置误差。同时,在速度控制中,针对雕刻工艺的需要,设计合理的速度曲线并利用自适应速度控制算法实现速度的实时跟踪与调节。

3.2.3 调试过程

在系统安装完成后,要进行电机的单轴调试。利用上位机软件对电机运动参数进行设定,例如速度和加速度,并对电机正反转和定位精度进行检验。针对单轴调试时定位误差较大的问题,可通过整定 PID 参数来实现,例如增加比例系数可提高响应速度,但是太大则会导致系统振荡;适当提高积分系数可减小稳态误差,但是太大则会造成积分饱和。

在单轴调试正常后,进行多轴协调运动调试。由于五个轴在空间布局上存在联动效应,因此在调试阶段,特别需要关注这些轴之间的同步性以及运动的协调性。对于多轴协调运动时产生的轨迹偏差,可采用优化控制算法和调节传感器的安装精度来解决。

4 结束语

在机电一体化技术的发展背景下,对驱动装置、传感器及控制器进行合理的选型,并采用先进高精度位置控制和速度控制算法,以及对系统稳定性与响应速度进行持续优化等关键措施,可构造出性能优越的精密运动控制系统。通过工程实例说明,在具体设计过程中准确地掌握需求、合理地选择零件并对其进行有效的调试,是保证系统性能发挥的关键所在。在科学技术不断进步的背景下,精密运动控制系统会向着更加高精度、智能化、网络化以及集成化等方向发展,从而给现代制造业等相关领域带来更加高效的生产效率以及高质量产品,从而促进相关行业的深入发展。

参考文献:

- [1] 范婧婧. 试论机电一体化数控技术在机械制造中的运用[J]. 机电产品开发与创新, 2025, 38(01): 83-85, 88.
- [2] 曹城全. 基于机器视觉的机电一体化精密定位机械手设计[J]. 机械管理开发, 2024, 39(12): 133-135, 138.
- [3] 董程宏. 基于机电一体化技术的农业机械设计和试验[J]. 当代农机, 2024(12): 26-27, 29.
- [4] 张吉福. 机电一体化在可再生能源设备中的创新应用[J]. 产业科技创新, 2024, 06(04): 8-11.
- [5] 邹志丰, 邹爱妮. 机电一体化设计在设备制造中的应用[J]. 中国战略新兴产业, 2024(23): 158-160.