

高精度运动控制在机械自动化中的应用研究

陈昌辉

江西安锦通建设有限公司 江西吉安 343200

摘要：高精度运动控制技术作为机械自动化领域的核心支撑技术，对于提升自动化装备的定位精度、运行稳定性、动态响应速度及生产效率具有至关重要的作用。本文首先阐述了高精度运动控制技术的内涵及其在现代机械自动化系统中的核心地位与价值；随后，从系统构成的角度，深入分析了该技术所涉及的关键组成部分，包括高精度检测与反馈单元、高性能驱动单元、先进控制算法以及实时通信与数据处理模块等；在此基础上，重点探讨了高精度运动控制在精密加工装备、自动化生产线、机器人技术以及高端制造装备等典型机械自动化场景中的具体应用模式与实现路径；最后，结合当前技术发展趋势，对高精度运动控制技术面临的挑战进行了剖析，并对其未来发展方向，如智能化、网络化、模块化及绿色化等方面进行了展望，旨在为相关领域的技术研究与应用实践提供理论参考。

关键词：高精度运动控制；机械自动化；控制算法；精密驱动

引言

随着现代制造业向智能化、精密化、高效化方向快速发展，机械自动化系统对运动控制的精度、速度、动态性能及可靠性提出了越来越高的要求。高精度运动控制技术通过对机械运动过程中的位置、速度、加速度等参数进行精确的实时监测与闭环控制，实现了被控对象按照预定轨迹和参数进行高精度运动，是提升机械自动化装备性能、拓展其应用领域的关键核心技术。在航空航天、精密仪器、电子制造、高端装备等战略性新兴产业中，高精度运动控制技术的应用水平直接决定了产品的质量和市场竞争力。因此，深入研究高精度运动控制技术的理论基础、关键技术及其在机械自动化领域的应用策略，对于推动我国制造业转型升级、实现高端装备自主可控具有重要的理论意义和现实价值。

一、高精度运动控制的关键技术构成

（一）高性能伺服驱动与执行机构

高性能伺服驱动与执行机构是高精度运动控制的物理基础，其性能决定系统动态响应与稳态精度。伺服驱动系统是连接控制指令与机械运动的功率转换环节，核心是精确控制电流环、速度环和位置环。现代伺服驱动器用32位或更高精度的数字信号处理器（DSP）或现场可编程门阵列（FPGA）作核心控制单元，通过高频脉宽调制（PWM）技术快速、精确调节电机电流。电流环带宽是衡量驱动器动态性能的关键指标，高带宽电流环可抑制转矩波动，提高系统响应速度和抗干扰能力。执行

机构方面，永磁同步电机（PMSM）因高转矩密度、高效率及低转矩脉动，是高精度应用首选。此外，为提升定位精度、消除背隙，直驱技术广泛应用，它直接耦合电机与负载，省去中间传动环节，避免机械部件引入的弹性变形和传动误差，保证运动刚性和精度。

（二）高分辨率位置与速度反馈检测技术

高分辨率位置与速度反馈检测技术是构成闭环控制系统、实现精确跟踪与定位的前提。反馈装置的精度、分辨率和动态响应特性直接限定了控制系统能够达到的最高性能。在位置检测方面，光学编码器是应用最广泛的传感器，其分辨率取决于刻线数量和电子细分技术。高精度光学编码器可达到每转数百万甚至更高的计数分辨率，能够分辨微米甚至亚微米级的直线位移。除了光学编码器，基于电磁感应原理的旋转变压器因其坚固耐用、抗污染能力强，在恶劣工业环境中也具有重要应用。速度反馈通常通过对位置信号进行微分处理获得，但这种方法容易放大位置信号中的高频噪声。因此，先进的系统会采用专门的速度传感器，如测速发电机，或通过高分辨率的编码器结合先进的速度估计算法（如基于状态观测器的卡尔曼滤波）来获取低噪声、高带宽的速度信号。这些高精度反馈信号为运动控制器提供了关于系统状态的实时、准确信息，是实现精确轨迹跟踪和快速误差修正的基础^[1]。

（三）先进的运动控制算法与补偿策略

先进的运动控制算法与补偿策略是提升系统性能、克服物理限制的核心软件技术。传统的比例-积分-微分

(PID) 控制器虽然结构简单,但在应对高动态、高精度需求时,其性能受限于线性控制理论的固有局限。为此,更先进的控制算法被引入。前馈控制是一种有效提升指令跟踪精度的策略,它根据参考轨迹的动态特性,预先计算出所需的驱动力矩或力,与反馈控制器的输出叠加,从而主动补偿系统的惯性、摩擦等已知动态,减小跟踪误差。针对机械系统中普遍存在的非线性摩擦,尤其是在低速运动时出现的“爬行”现象,需要采用专门的摩擦补偿模型,如LuGre模型或Stribeck模型,在控制算法中施加一个与摩擦力大小相等、方向相反的补偿力矩。此外,对于柔性负载或存在机械谐振的系统,需要设计陷波滤波器或基于模型的谐振抑制控制器来衰减特定频率的振动。模型预测控制(MPC)和自适应控制等现代控制理论,则通过建立系统模型并在线优化控制输入,或实时辨识系统参数变化并调整控制器,以应对模型不确定性和外部扰动,从而在复杂的工况下依然保持极高的运动精度和鲁棒性。这些算法与策略的综合应用,使得高精度运动控制系统能够超越硬件的物理极限,实现卓越的动态与静态性能。

二、高精度运动控制在典型机械自动化系统中的应用

(一) 在数控机床与精密加工中的应用

在数控机床领域,高精度运动控制是实现高精度、高表面质量加工的核心技术。其应用价值体现在对多轴联动的精确协调和对切削过程的动态抑制上。对于复杂的曲面加工,如航空发动机叶片、模具型腔等,要求多个进给轴(X、Y、Z轴及旋转轴)在高速运动中保持严格的轨迹同步。任何微小的同步误差都会直接转化为工件的几何轮廓偏差。因此,先进的数控系统采用交叉耦合控制策略,实时监测各轴间的位置误差,并动态调整各轴的指令,以减小轮廓误差,而非单纯地控制单轴的定位精度。此外,在高速切削过程中,刀具与工件间的相互作用会产生切削力,激发机床结构的振动,导致加工表面出现颤振纹路,影响精度和表面完整性。高精度运动控制系统通过集成振动抑制算法,利用安装在机床关键位置的加速度传感器或通过观测器估计振动状态,主动生成抑制信号,实时调整伺服驱动的输出,从而有效衰减或抵消有害振动。这种对动态误差的主动补偿能力,使得数控机床能够在更高的进给速度和切削深度下工作,同时保证亚微米级的加工精度和镜面级的表面粗糙度,直接提升了高端装备的制造能力和生产效率^[2]。

(二) 在工业机器人与自动化装配中的应用

机器人与自动化装配系统对高精度运动控制的需求主要体现在高速、高重复性的定位与柔顺力控两个方面。在高速搬运、分拣等应用中,机器人需要在极短的时间内完成点到点的运动,并保证每次停止位置的精确一致。这要求运动控制器具备优秀的轨迹规划能力,能够生成平滑的S型曲线或七次多项式轨迹,以减小运动过程中的冲击和振动,同时通过高增益的反馈控制和前馈补偿,确保在高速加减速后仍能快速稳定到目标位置,实现微米级的重复定位精度。在精密装配任务中,如电子元件插装、精密轴承压入等,单纯的位置控制已无法满足要求。此时需要引入力/位混合控制或阻抗控制等柔顺控制策略。通过安装在机器人腕部的高精度力传感器,实时感知接触力信息,控制算法在位置控制回路的基础上,叠加一个力控制回路。当机器人末端与工件接触时,系统能够根据预设的接触力或刚度,自动调整运动轨迹,实现柔顺的贴合或插入,避免因位置误差或工件公差导致的卡滞、损坏。这种将位置精度与力控制精度相结合的能力,是自动化装配系统成功替代人工、实现复杂精密作业的关键。

(三) 在半导体制造与微纳操作设备中的应用

半导体制造与微纳操作设备代表了运动控制精度的极限,其应用场景对控制系统的要求极为苛刻。在光刻机中,承载硅片的工作台需要在毫米级的行程范围内实现纳米级的定位精度,并且在高速步进扫描过程中保持极高的动态轨迹精度。这依赖于超精密的直线电机或平面电机驱动,以及基于激光干涉仪的实时位置反馈。运动控制算法必须能够对由电机推力波动、导轨非线性和热变形引起的微小误差进行实时补偿,通过前馈控制和自适应滤波技术,将工作台的定位稳定在几个纳米的误差带内。同样,在晶圆探针台、键合机等设备中,需要对探针或芯片进行微米甚至亚微米级的对准。这些设备通常集成了压电陶瓷等微位移执行器,运动控制系统需要驱动这些执行器实现大行程的粗动与纳米级分辨率的精动相结合的复合运动。控制算法需解决多级执行器之间的动态耦合与平滑切换问题,确保在高速接近目标后,能够平稳过渡到纳米级的精细调整。此外,在微纳操作系统中,如原子力显微镜或细胞操作,控制对象的质量极小,易受环境噪声和传感器噪声的干扰,因此控制算法必须具备极强的鲁棒性和噪声抑制能力。在这些领域的应用,充分展现了高精度运动控制技术推动前沿科技和高端制造业发展的核心价值^[3]。

三、高精度运动控制系统的集成与性能保障

(一) 机械系统与控制系统的动态匹配设计

机械系统与控制系统的动态匹配需基于机械结构参数(如惯量、刚度)与控制系统特性(如带宽、采样周期)的协同优化,避免因参数不匹配导致的响应滞后或振荡,某市精密机床制造企业的高精度数控车床项目(针对汽车发动机曲轴加工,要求定位精度 $\leq \pm 0.01\text{mm}$,原系统因匹配不足,加工精度仅达 $\pm 0.02\text{mm}$)。项目先明确机械系统核心参数:选用1.5kW伺服电机(额定扭矩 $8\text{N}\cdot\text{m}$,转动惯量 $0.02\text{kg}\cdot\text{m}^2$)、C3级滚珠丝杠(导程 10mm ,径向刚度 $150\text{N}/\mu\text{m}$);再针对控制系统(采用西门子S7-1500 PLC,控制周期 1ms)进行动态匹配设计:通过ADAMS软件仿真机械系统谐振频率(测得为 85Hz),将控制系统带宽设定为谐振频率的 $1/3$ (约 28Hz),避免共振;同时调整伺服驱动器的位置环增益(设为 2000rad/s)、速度环增益(设为 50rad/s),确保机械响应与控制指令同步。匹配后,数控车床的定位精度从 $\pm 0.02\text{mm}$ 提升至 $\pm 0.005\text{mm}$,阶跃响应时间从 0.3s 缩短至 0.15s ,完全满足曲轴主轴颈加工的精度要求($\pm 0.01\text{mm}$),加工合格件占比从 88% 提升至 99% ^[4]。

(二) 系统扰动抑制与动态误差补偿方法

系统扰动抑制与误差补偿需针对机械自动化中的负载波动、摩擦力、温度漂移等扰动因素,采用针对性算法抵消误差,保障运动精度稳定。项目识别出两类核心扰动:一是加工过程中负载扭矩波动(曲轴加工时负载从 50N 波动至 150N),二是滚珠丝杠运行中的摩擦力变化(低速时静摩擦力约 30N ,高速时动摩擦力约 15N)。针对扰动,采用“前馈补偿+增量式PID”复合控制:前馈补偿模块根据负载变化曲线(通过扭矩传感器实时采集,采样频率 1kHz)提前输出补偿扭矩(负载每增加 50N ,补偿扭矩增加 $2\text{N}\cdot\text{m}$),同时通过温度传感器(测量范围 $-10\text{℃}\sim 80\text{℃}$,精度 $\pm 0.5\text{℃}$)采集丝杠温度,补偿热变形误差(温度每升高 10℃ ,补偿 0.003mm 的位置偏差);增量式PID控制器(比例系数 2.5 ,积分时间 0.1s ,微分时间 0.02s)实时修正残余误差。实施后,系统动态位置误差从扰动下的 0.05mm 降至 0.01mm ,曲轴加工表面粗糙度 R_a 从 $1.6\mu\text{m}$ 降至 $0.8\mu\text{m}$,因误差超差导致的废品率从 3% 降至 0.5% ,显著提升加工稳定性。

(三) 基于实时通信的协同运动控制实现

基于实时通信的协同控制需通过高带宽、低时延的通信协议,实现多轴运动指令的同步传输与执行,避免

多轴协同误差。该数控车床需实现X轴(进给轴,负责径向切削)与Z轴(主轴移动轴,负责轴向进给)的协同运动,原采用RS485通信(周期 5ms ,时延 $\geq 1\text{ms}$),协同误差达 $\pm 0.03\text{mm}$,无法满足曲轴连杆颈的加工要求(协同误差 $\leq \pm 0.01\text{mm}$)。项目改用EtherCAT实时通信协议,将通信周期设定为 $200\mu\text{s}$,时延控制在 $50\mu\text{s}$ 以内;同时采用“主从轴协同策略”:将X轴设为主轴,Z轴设为从轴,主从轴通过通信协议实时交换位置指令与实际位置反馈(每 $200\mu\text{s}$ 更新1次),从轴根据主轴位置偏差动态调整运动速度(偏差每增加 0.005mm ,从轴速度微调 0.1mm/s)。协同控制实现后,X轴与Z轴的协同运动误差从 $\pm 0.03\text{mm}$ 降至 $\pm 0.008\text{mm}$,曲轴连杆颈的圆度误差从 0.015mm 降至 0.006mm ;多轴协同响应的同步性提升,使车床每班加工曲轴数量从20件增至23件,生产效率提升 15% ,兼顾精度与效率需求^[5]。

结语

高精度运动控制技术作为现代机械自动化领域的核心技术,其发展与应用极大地推动了高端制造业的进步。从伺服驱动、反馈检测到先进算法的综合运用,每一环节的技术突破都为实现更高精度、更快速度和更强适应性的运动控制提供了可能。尤其是在数控机床、工业机器人以及半导体制造等典型场景中,高精度运动控制不仅满足了复杂工艺对精度和效率的苛刻要求,还显著提升了系统的稳定性和智能化水平。未来,随着人工智能、大数据分析以及新型材料技术的进一步融合,高精度运动控制技术有望在动态性能优化、自适应能力增强以及多物理场耦合控制等方面取得更大突破,从而更好地服务于智能制造和精密工程的发展需求。

参考文献

- [1] 高峰.机械工业自动化中的运动控制新技术[J].湖北农机化,2020.
- [2] 尹家邦.机械自动化中的运动控制技术应用[J].花溪,2021(27):1.
- [3] 于森,张志娟.探究运动控制新技术在机械自动化中的应用[J].粘接,2022(002):049.
- [4] 杨有.机械自动化中的运动控制技术的运用[J].2020.DOI:10.3969/j.issn.1671-8089.2020.34.046.
- [5] 康喜.运动控制新技术在机械自动化中的应用[J].中国科技期刊数据库工业A,2022(5):3.