

伺服驱动系统在高精度加工中的性能提升与控制策略分析

陈猛 任维友 张兆中

沈阳中科数控技术股份有限公司, 中国·辽宁 沈阳 110168

摘要: 伺服驱动系统是现代高精度加工装备的核心构成, 其工作性能直接左右加工质量与生产效率水平。智能制造持续推进背景下, 机械加工流程对驱动精度指标、动态响应速率及系统稳定性能提出了更为严苛的标准。传统伺服驱动方案在高速运行、高负载工况及复杂作业环境中, 易出现跟踪误差扩大、振动现象凸显、非线性扰动影响加剧等问题, 故而迫切需要探寻先进控制策略以全面提升系统综合性能。本文聚焦伺服驱动系统在高精度加工场景中的关键性能诉求, 深入剖析其影响因素与技术瓶颈, 重点探究前馈补偿、自适应控制及智能控制等策略的核心原理与实际应用价值, 通过对比各类策略在精度改善与动态性能提升方面的实际成效, 为高端制造装备驱动技术的优化升级提供有益参考。

关键词: 伺服驱动; 高精度加工; 控制策略; 前馈补偿; 自适应控制

Performance Enhancement and Control Strategy Analysis of Servo Drive Systems in High-Precision Machining

Chen Meng, Ren Weiyou, Zhang Zhaozhong

Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, China Liaoning Shenyang 110168

Abstract: Servo drive systems are the core components of modern high-precision machining equipment, and their working performance directly affects the quality of processing and production efficiency. Against the backdrop of the continuous advancement of intelligent manufacturing, the mechanical processing process has put forward more stringent standards for drive accuracy indicators, dynamic response rates, and system stability. Traditional servo drive solutions are prone to problems such as increased tracking errors, prominent vibration phenomena, and intensified nonlinear disturbance effects in high-speed operation, high-load conditions, and complex working environments. Therefore, there is an urgent need to explore advanced control strategies to comprehensively enhance the system's overall performance. This paper focuses on the key performance requirements of servo drive systems in high-precision machining scenarios, deeply analyzes the influencing factors and technical bottlenecks, and mainly explores the core principles and practical application values of feedforward compensation, adaptive control, and intelligent control strategies. By comparing the actual effects of various strategies in improving accuracy and enhancing dynamic performance, it provides a useful reference for the optimization and upgrading of drive technology in high-end manufacturing equipment.

Keywords: Servo drive; High-precision machining; Control strategy; Feedforward compensation; Adaptive control

0 引言

高精度加工是先进制造业的核心组成部分, 伺服驱动系统作为关键执行单元, 其控制效能直接关联加工精度、表面质量与生产效率表现。复杂工况条件下, 伺服系统需满足高速响应特性、抗干扰能力与高稳定状态的多重要求, 传统控制方式已难以充分适配实际需求。数控技术与智能控制技术的持续发展, 推动伺服驱动系统性能提升成为当前研究的重点方向、为有效支撑航空航天、精密模具、光电制造等行业的高质量发展, 有必要对伺服系统的性能诉

求、现存问题及先进控制方法开展系统性梳理与分析。

1 伺服驱动系统在高精度加工中的性能要求

1.1 动态响应性能需求分析

高精度加工场景中, 伺服驱动系统的动态响应水平直接决定其指令轨迹跟踪的精准度, 是实现高速高精加工的核心前提。快速捕捉指令变化是保障系统响应质量的基础条件, 当加工曲线涉及频繁加减速或复杂轮廓形态时, 伺服系统需以极低延迟跟随指令信号, 一旦响应滞后便会产生显著路径偏差, 进而影响加工表面的光洁度与几何尺寸

精度、高速运动状态下,系统易受控制延迟、超调量上升等因素制约,若响应速度过缓或超调幅度偏大,将造成刀具路径偏移,甚至破坏加工过程的稳定性,因此高带宽伺服控制器的应用以及速度环、位置环参数的优化调整成为必要举措。

1.2 稳定性与鲁棒性要求

伺服系统在多变工况下的运行稳定性,是保障加工过程可靠性的关键所在。负载波动、速度调整、切削力突变等工况变化,都会对伺服控制器的稳定运行产生干扰,若系统控制裕度不足,可能引发振荡乃至失控现象,严重威胁加工精度与设备安全、高精度加工对系统抗外界扰动能力提出了更高标准,切削力波动、机械振动、摩擦系数变化等外部因素均会干扰伺服系统的实时响应,而自适应控制、鲁棒控制等具备强鲁棒性的控制算法,能够在参数波动或扰动作用下维持稳定运行状态,有效降低加工误差、此外,系统增益的波动以及模型参数的不确定性,也是影响伺服系统稳定性的重要因素,需在控制策略设计中重点考量。

1.3 位置与速度精度要求

超精密加工领域对伺服驱动系统的定位控制与速度控制提出了极高标准。纳米级定位精度的要求对伺服系统的性能构成严峻挑战,机械结构误差、编码器分辨率限制、控制算法效能等因素均可能导致定位偏差,因此必须配备高分辨率检测元件,并采用精细化伺服控制策略,以实现极小范围的定位误差、稳速控制能力在光学加工、微细加工等超精密应用场景中至关重要,加工过程中的速度波动会造成表面纹理不均、切削力变化加剧等问题,进而影响工件表面完整性与光学性能,而高精度速度环的设计以及对外界扰动的补偿能力,是实现稳速控制的核心保障。

2 伺服驱动系统性能影响因素分析

2.1 机械结构与传动链特性影响

伺服驱动系统的运行性能很大程度上受机械结构与传动链特性的约束、机械结构的整体刚性是决定控制精度的关键,若刚性不足,加工过程中易产生弹性形变,导致伺服执行机构的实际位移与指令位移出现偏差,形成低频跟踪误差;而当结构固有频率偏低时,高速运动状态下极易诱发共振,进而限制伺服带宽的提升空间。摩擦与间隙问题同样会削弱系统性能,导轨摩擦力的波动会引发爬行效应与非线性扰动,丝杠、齿轮等传动部件存在的 $1-5\text{ }\mu\text{m}$ 微小间隙则会使系统产生反向死区,造成定位误差增大、结构振动也是干扰伺服控制精度的重要因素,高速加工时

切削力的周期性变化会对机械部件形成激振,引发振动响应,这不仅会破坏位置环与速度环控制的稳定性,还会直接导致加工表面质量下降、此外,传动系统自身存在的误差,如丝杠螺距偏差、滚珠循环不均匀等,会直接引入周期性误差,通常表现为 $\pm 2-5\text{ }\mu\text{m}$ 的重复性波动,对高精度加工造成不利影响。

2.2 伺服电机与驱动器特性影响

伺服电机与驱动器的自身特性,是影响系统动态性能与稳定性的核心因素、电机的电磁特性会直接限制其动态响应能力,电感值越大,电流上升时间越长,系统对高频指令的响应速度就越慢;同时,电机反电势常数、转矩常数等参数的不一致性,会增加速度环与电流环的调节难度。驱动器的开关特性及控制频率对伺服性能也有着显著影响,其 PWM 开关频率通常处于 $8-20\text{ kHz}$ 区间,若频率设置不足,会加剧电流波动,影响电机运行平稳性,同时限制控制环路带宽,降低系统在高响应场景下的运行效率、驱动器的采样频率(一般为 $4-10\text{ kHz}$)直接决定了位置环与速度环的实时控制效果、热效应同样不可忽视,电机运行过程中产生的热量会导致内部电阻、电感及磁钢性能发生改变,造成电机输出转矩漂移;当温升超过 60°C 时,系统参数会出现明显偏移,导致控制模型失配,最终削弱伺服系统的稳定性与重复精度。

2.3 负载与外部扰动对系统性能的影响

实际加工工况中,伺服系统常面临高负载环境与多种扰动源,这些因素会显著影响其控制性能。高负载加工条件下,切削力变化、材料硬度波动及进给速度调整都会引入扰动,使系统承受额外动态冲击;尤其在重切削或大扭矩加工场景中,负载波动幅度可能达到额定负载的 $30\%-60\%$,导致执行机构产生明显位置误差、切削力的动态变化是引发跟踪误差的主要原因,高速铣削过程中,刀具与工件的接触状态持续变化,使得切削力呈周期性波动,频率可高达数百赫兹,这会导致伺服系统产生随动偏差,同时增加位置环与速度环的调节难度、外部环境因素也会带来随机扰动,环境温度变化 $5-10^{\circ}\text{C}$ 就可能引发机械结构热膨胀,引入微米级误差;而周围设备产生的振动则可能通过机床结构耦合至伺服系统,引发共振或导致噪声增大。

3 高精度加工中的伺服控制策略分析

3.1 前馈补偿控制策略

前馈补偿是强化伺服系统动态跟踪性能的关键技术,其核心逻辑在于提前预判系统可能出现的偏差并施加针对性补偿,进而削弱滞后误差的影响、速度前馈与加速度前

馈是工程中应用最广泛的两类补偿形式：速度前馈通过将指令速度信号直接接入控制系统，推动执行机构更快速地响应指令变化，以此缩减速度环的跟踪偏差；加速度前馈则依据加速度指令生成额外补偿分量，助力系统在高加速度加工场景下维持稳定的动态表现。

轨迹跟踪过程中，前馈补偿对抑制伺服系统因滞后特性与惯性效应引发的偏差效果显著、高速铣削作业时，刀具轨迹转角位置的速度突变极易诱发加工误差，前馈控制可提前对该类变化进行补偿，促使系统近乎同步地响应指令，进而降低尖角误差与轮廓变形问题、针对伺服系统中存在的摩擦、间隙、饱和等非线性因素，传统前馈控制难以实现全面处理，因此基于辨识模型的改进型前馈方案被逐步提出。

3.2 自适应控制技术应用

自适应控制具备根据系统运行状态与加工工况变化自动调整控制参数的能力，适用于结构参数漂移、负载波动及材料不均匀等复杂加工场景、基于参数估计的自适应控制方法通常采用在线辨识技术实时更新系统模型参数。

加工工况发生波动时，自适应调节机制的作用更为突出、高速加工过程中，切削力会随运动速度与材料形变持续发生改变，自适应控制通过即时更新控制参数，能够防止系统出现振荡或响应滞后现象、对于多轴联动伺服系统而言，自适应协调算法还可进一步提升多轴间的同步精度，减少联动加工过程中产生的耦合误差。

3.3 智能控制策略探索

智能控制策略融合人工智能算法优势，为伺服系统赋予更强的学习与非线性处理能力，神经网络与模糊控制的融合是典型的智能伺服控制方案、模糊控制具有规则化表述、无需精确数学模型的特点，神经网络则具备强大的自主学习能力，二者结合可实现模糊规则的自适应优化，进而达成更精准的控制效果。

随着数据采集技术与计算能力的提升，数据驱动控制已成为伺服控制领域的重要发展方向、伺服系统运行过程中会产生海量电流、速度、位置误差等数据信息，借助大数据分析技术可构建系统行为模型，实现控制参数预测、自适应调节及异常状态检测，从而在缺乏精确物理模型的情况下实现高精度控制。

深度学习在误差预测与补偿领域的应用潜力正逐步显现、通过构建时序神经网络（如 LSTM），可对伺服系统未来的误差信号进行预测，并提前生成补偿指令，有效降低动态误差影响；同时，卷积神经网络（CNN）可用于识

别加工表面纹理变化与系统振动模式，为系统状态监测与自适应策略更新提供支撑。

4 伺服驱动性能提升的工程优化实践

4.1 系统建模与误差分析方法

高精度伺服系统的优化升级，离不开精准的系统建模与全面的误差分析、借助数学模型的构建，能够更清晰地刻画伺服系统的动态特性及误差产生根源、实际工程实践中，常选用二阶伺服模型或包含电流环、速度环、位置环的三环控制模型，来表征系统的动态行为、开展系统建模工作时，需获取电机转矩常数 K_t （常规范范围为 $0.5 - 2.5 \text{ N} \cdot \text{m/A}$ ）、电机反电势常数 K_e （ $20 - 70 \text{ V/krpm}$ ）以及丝杠导程误差（通常为 $\pm 2 - 8 \text{ } \mu\text{m}/300 \text{ mm}$ ）等关键参数，以此保障模型的精准度。

误差分析环节，FFT 频谱分析与误差分布统计方法是诊断伺服误差的常用手段、比如，通过对 4 kHz 采样频率下的位置误差数据进行分析，能够识别出 $20 - 200 \text{ Hz}$ 的结构振动频率区间，以及由滚珠循环产生的 1 周期 / 循环的丝杠周期误差。

4.2 振动抑制与动态补偿技术

要提升高速加工场景下伺服系统的稳定性，振动抑制技术成为关键的优化方向、无源抑制手段涵盖提高结构刚度、优化支撑布局等，采用这些方法可将设备固有频率从 $80 - 120 \text{ Hz}$ 提升至 $150 - 180 \text{ Hz}$ ，进而避免与加工频率形成耦合干扰、主动抑振技术如加速度前馈、谐波补偿及 Notch 滤波（陷波滤波），则在高性能伺服系统中得到广泛应用，典型的 Notch 滤波器能将特定频段的振幅衰减 $10 - 25 \text{ dB}$ ，有效压制共振峰值。

动态补偿方面，当加工速度达到 $20 - 40 \text{ m/min}$ 的高速区间时，系统惯性会显著增大，易产生 $10 - 30 \text{ } \mu\text{m}$ 的瞬态误差、通过将速度前馈系数比例设定在 $0.9 - 1.1$ 、加速度前馈参数设置为 $0.05 - 0.2$ ，可使动态跟踪误差降低 40% 以上、此外，部分系统采用基于 IMU 或加速度计的实时振动补偿方案，能将高频振动（ $>300 \text{ Hz}$ ）的影响削弱 $20\% - 40\%$ ，从而改善加工表面粗糙度，典型情况下表面粗糙度 R_a 可从 $0.4 \text{ } \mu\text{m}$ 降至 $0.25 \text{ } \mu\text{m}$ 水平。

4.3 多轴协同控制优化方式

在五轴或多轴联动加工过程中，多轴之间的同步误差会直接影响复杂曲面的加工精度、通常而言，多轴伺服系统的同步误差可达到 $10 - 30 \text{ } \mu\text{m}$ ，尤其在高速插补运动时，这一误差更为突出、为减小同步偏差，可采用耦合补偿、交叉前馈及多轴协调控制算法等策略、以 X-Y 双轴

加工为例,引入交叉前馈补偿后,轮廓误差可从 $20\ \mu\text{m}$ 降至约 $6-8\ \mu\text{m}$ 。

除此之外,利用模型预测控制(MPC)技术,能够提前计算多轴之间的动作趋势,并对各轴的速度、加速度进行协同调度、实测数据表明,在涉及复杂曲线轨迹的加工任务中,MPC 技术可将多轴轮廓误差降低 $40\%-50\%$ 。

5 结语

伺服驱动系统作为高精度加工设备的核心组成部分,其性能水平直接决定加工质量与加工效率的高低、通过对系统性能需求、机械结构特性、电机驱动性能及外部扰动等影响因素的分析可知,伺服系统精度的提升需要机械设计、控制技术与智能算法的综合优化、前馈补偿、自适应控制及智能控制等先进策略,在提高跟踪精度、增强系统鲁棒性与抑制振动方面展现出显著优势、未来,随着数据驱动技术与深度学习的深入应用,伺服驱动系统将能在更复杂的工况下实现更高的响应速度与运行稳定性,为高端制造产业与智能装备的发展提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 王甜. 伺服驱动系统机械谐振与外部扰动的自检测及自调整补偿研究[D]. 深圳大学, 2023.DOI:10.27321/d.cnki.gszdu.2023.001925.
- [2] 刘金亮. 基于模糊自适应可调增益的伺服驱动系统全阶状态观测器设计[D]. 深圳大学[1]2023.DOI:10.27321/d.cnki.gszdu.2023.001931.
- [3] 陈天航. 永磁同步伺服驱动系统高响应控制及振动抑制策略研究[D]. 华中科技大学, 2021.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2021.006514.
- [4] 倪启南. 全闭环伺服驱动系统位置控制误差补偿技术研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020.DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2020.004835.
- [5] 李向阳. 光纤熔接机高精度伺服驱动控制系统用芯片及其控制方法.陕西省, 西安光谷防务技术股份有限公司, 2019-04-30.

作者简介: 陈猛(1982.06-), 男, 满族, 辽宁锦州, 研究员, 研究生, 研究方向: 嵌入式技术。