

面向高精度加工的数控系统误差补偿与智能控制策略探究

胡华

湖州善迁机电科技有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i6.8143

[摘要] 面向高精度加工的数控系统正面临着日益严峻的挑战，其中主要包括环境扰动、机床自身结构缺陷以及加工过程中的动态误差等。为了应对这些挑战，误差补偿技术和智能控制策略显得至关重要。误差补偿通过预先测量或建模误差源，并对数控指令进行修正，从而显著降低系统误差。而智能控制策略则能够实时监测加工过程中的各种状态参数，利用先进的算法对进给速度、切削参数等进行自适应调整。基于此，本文主要论述了数控系统误差补偿与智能控制的重要性，并给出了有效策略，以期构建稳定可靠的数控系统提供参考。

[关键词] 数控系统；误差补偿；智能控制

Research on error compensation and intelligent control strategy of CNC system for high precision machining

Hu Hua

Huzhou Shanqian Electromechanical Technology Co., LTD.

[Abstract] CNC systems designed for high-precision machining are facing increasingly severe challenges, primarily including environmental disturbances, structural defects of the machine tool itself, and dynamic errors during the machining process. To address these challenges, error compensation techniques and intelligent control strategies have become crucial. Error compensation involves pre-measuring or modeling error sources and correcting CNC commands to significantly reduce system errors. Intelligent control strategies can monitor various state parameters in real-time during the machining process and use advanced algorithms to adaptively adjust feed rates, cutting parameters, and more. Based on this, this paper mainly discusses the importance of error compensation and intelligent control in CNC systems, and provides effective strategies to offer a reference for building stable and reliable CNC systems.

[Key words] CNC system; error compensation; intelligent control

在现代制造业中，高精度加工已成为提升产品质量与性能的关键环节。然而，数控系统在实际运行中不可避免地受到各种误差源的影响，严重制约了加工精度的进一步提升。针对这一问题，本研究聚焦于面向高精度加工的数控系统误差补偿与

智能控制策略研究。通过深入分析数控系统的误差特性，并结合先进的补偿算法与智能控制方法，旨在有效降低系统误差，提高加工精度和稳定性。

一、高精度加工的数控系统功能特点

面向高精度加工的数控系统利用先进科技手段达到对加工过程的细致把控，它的主要功能特性表现在诸多层面的共同改善之中。此系统运用精确驱动技术和动态补偿算法，在加工期间不断检测并且调整机械设备出现的细微差错，使得刀具路径同预先设定好的参数维持较高度的一致性，进而改善加工完成产品的尺寸准确度及其表面状况。它把高清晰度感应设备以及即时回馈体制整合进来，可以精确地掌握加工环境中诸如温度起伏，机械抖动之类的各种扰乱要素，并自动加以修正，如此一来就大大缩减了外部条件给加工精确度带来的不良影响。

系统自带标准化工艺数据库以及智能参数适应模块，能够按照加工材料特点自行调节主轴转速，进给速度等关键参数，最大程度缩减人工操作失误，经由改良加工路径规划削减非切削时间，突出改善生产效率。系统还具有灵活适应能力，凭借模块化程序体系做到多种加工模式的极速转换，既可以满足复杂曲面零件精确雕铣的需求，又可以符合批量产品的稳定加工，切实协调好个性化定制和规模化生产的技术需求。在维持稳定性上，数控系统依靠多级安全防护机制随时监测设备运行状况，一旦察觉到异常数据就会自动启动保护程序，并告知维修信息，从而有效地防止因设备故障造成的精度下降。

二、数控系统误差补偿与智能控制的重要性

高端制造要达成高精度加工，离不开数控系统的误差补偿及智能控制技术，这是现代制造业迈向高效，精密生产的关键所在。航空航天，精密模具，光学器件等行业对加工精度的要求日益提升，传统数控系统受机械结构误差，热变形误差，伺服控制偏差等诸多复杂因素制约，很难符合亚微米甚至纳米级别的加工需求。误差补偿技术经由创建多源误差模型，整合高精度传感器并采用数据融合算法，可以及时分析机床运动链中的几何误差，热致误差和动态误差，按照逆向补偿策略调整加工轨迹，大幅缩减系统性误差给加工质量带来的影响。在复杂曲面加工这种情形下，依靠数字孪生的误差预测与补偿系统能够超越传统试切法的限制，做到加工误差的动态缩减，这样就可以防止由于返工而产生的材料和时间损失，从而给高端装备制造赋予精度方面的保障。

智能控制技术被采用之后，数控系统朝着自适应，自决策的方向发展的进程得到了进一步加快。加工过程中的非线性扰动和随机干扰很难建模，依靠深度神经网络，加强学习等算法

的智能控制器，可以经由在线学习和参数改良，及时调整伺服系统的控制策略，使得加工系统即便受到负载波动，刀具磨损等变量的影响，其输出仍然维持稳定。智能控制系统把工艺知识库和多传感器的信息融合起来，就能自行规划最佳的进给速率，主轴转速之类的加工参数，从而既改善加工效率，又增长刀具的使用寿命。而且，智能控制技术还让数控系统具有多目标协同改良的能力，可以在加工精度，表面质量，能耗控制等方面达成动态兼顾，进而给智能制造向柔性化，绿色化转变给予关键技术支撑。

三、面向高精度加工的数控系统误差补偿策略

（一）几何误差补偿

面向高精度加工的数控系统误差补偿策略中，几何误差校正通过研究机床结构特性与运动轨迹偏移的关联性，建立误差预判机制并实施定向修正方案。具体操作中需依据各运动轴实时位置信息，综合温度波动、部件磨损等变量，建立涵盖直线度、垂直度、反向间隙等关键指标的误差评估模型。依托数控系统内部补偿机制，将预测误差转化为轴系位置调整值，实时修正刀具或工件的运动路径。以导轨装配偏差引发的定位误差为例，借助激光干涉仪等精密仪器测得实际位移偏差后，可通过调整数控程序坐标系偏移参数实现误差对冲。针对具有重复特征的系统性偏差，可在数控系统中预置补偿函数，在加工流程中自动施加逆向补偿信号。该技术方案无需改造机械本体结构，具备成本效益且便于操作，配合定期校准与参数优化，可显著提高机床定位精度与加工重复性，尤其适用于复杂型面高精度加工需求。实施过程中需要重点监控环境温控精度与机械组件保养状况对补偿效能的影响，融合在线检测技术形成动态误差校正体系。

（二）热误差补偿

在面向高精度加工的数控系统误差补偿策略当中，热误差补偿重点在于解决由于温度改变造成的机床结构变形和位移偏差情况，在加工的时候，电机运行，轴承摩擦以及切削都会产生热量，这些热量会使机床床身，主轴，丝杠等重要部件不均等地发生热胀冷缩现象，从而影响到刀具和工件之间的相对位置精度。要应对这种情况，一般会采用温度检测和动态补偿关联的办法：先是在机床那些对温度比较敏感的地方，比如主轴轴承，丝杠螺母之类的位置安装上温度传感器网络，随时获取温度分布的数据；然后再加上机床本身的热特性实验所得到

的数据，创建起温度-变形这种映射模型，把温度的变化值转换成各个运动轴上的热漂移误差数值。数控系统按照这样的计算得出的结果来发出反向补偿的指令，经由调节坐标的偏移量或者改动插补的参数，使得刀具的运动轨迹能够及时修正由热变形造成的偏差。热惯性误差长时间不断累积，针对这种情况，可以采用自适应补偿算法，遵照以往的加工数据去改良温度-变形关系模型的参数设置，通过改善散热结构设计，并用低热膨胀系数材料制作关键部件，能大幅缩减热误差产生的源头。

四、面向高精度加工的数控系统智能控制策略

（一）数控系统的精确控制

面向高精度加工的数控系统智能控制策略中，数控系统的精确控制依托于智能化算法的深度融合与动态优化机制。通过引入模糊逻辑控制与深度神经网络等自适应算法，系统可实时解析加工过程中的非线性特征与动态扰动，建立多维度运动参数间的耦合关系模型。基于模型预测控制框架，系统能够根据实时反馈的位移、速度及负载信息，动态调整伺服驱动参数与插补补偿量，有效抑制机械谐振、反向间隙等固有误差对加工精度的影响。在参数优化层面，采用遗传算法与粒子群优化相结合的方式，对伺服环路的比例积分微分系数、前馈补偿权重及滤波器截止频率进行协同整定，兼顾动态响应速度与稳态精度需求。同时，通过构建加工误差传播模型，系统可自动识别机床热变形、刀具磨损等时变因素对定位精度的影响规律，并生成补偿向量嵌入运动控制指令。

（二）工艺参数的优化

在面向高精度加工的数控系统智能控制策略当中，工艺参数的改良依靠立体度参数耦合分析框架以及自适应学习机制，系统把材料物理特性数据库同刀具动态性能模型融合起来，再加上切削过程中的力学仿真和热力耦合分析，创建起工艺参数与加工精度之间的非线性映射关系。利用深度学习算法从历史加工数据里获取特征，区分切削速度，进给速率，切深量这些关键参数对于表面粗糙度和形位公差的影响权重，从而创建出多目标改良评定函数。在加工期间，经由多传感器融合技术及实时获取切削力波动，振动频谱以及温度场分布之类的动态信息，凭借在线辨识算法来修正工艺参数的界限范围，达成切削参数的自适应适配和动态修正。刀具磨损会引发切削性能下降，针对这种情况，系统依靠时间序列预测模型来估算刀具寿命曲线，并且一同调节切削用量和冷却液供应策略，以此守住

加工的稳定性。工艺知识图谱和模糊推理规则库相互配合，系统就能遵照工件几何复杂程度以及精度等级需求，自动产生多层次的参数改良计划，而且按照在线检测的数据不断更新工艺知识库，创建起具备自身提升能力的参数决策系统。

（三）刀具路径的规划

面向高精度加工的数控系统智能控制策略中，刀具路径规划以几何特征智能解析与动态优化为核心。系统通过融合工件三维模型的拓扑特征分析与切削力学仿真，建立基于加工余量分布与刀具负载均衡的路径生成模型。采用曲率自适应算法对复杂曲面进行点云重构，结合刀具包络面与加工区域的动态干涉检测，生成满足轮廓精度与表面完整性的初始轨迹。针对路径冗余问题，引入时空协同优化机制，利用并行计算架构对刀具运动学约束进行多目标求解，消除非必要空行程并规划平滑过渡轨迹。通过切削力预测模型与振动抑制策略的协同作用，系统实时调整相邻路径间的衔接方式与进给方向，在保证切削连续性的同时降低动态冲击对定位精度的影响。此外，结合实时反馈的刀具磨损状态与机床振动频谱，采用模糊逻辑推理调整路径拐角处的速度前瞻参数与插补精度阈值，确保高曲率区域轨迹跟踪的一致性。

总结

综上所述，面向高精度加工的数控系统误差补偿与智能控制策略的探究之路，是一个不断发展和适应时代变化的过程。展望未来，数控系统将会朝着更加智能化、自适应化的方向发展，误差补偿技术也将更加精细和全面，能够实时感知并消除加工过程中的各种误差源，进一步提高加工质量和生产效率，推动高端制造业的转型升级。

[参考文献]

- [1]梁荫娟.数控机床热误差智能补偿系统设计与研究[J].中国新技术新产品, 2022(17): 106-108.
- [2]叶伯生, 黎晗, 谭帅, 等.基于数据驱动的数控系统热误差建模与补偿控制研究现状[J].机床与液压, 2021.
- [3]甘代伟.基于滤波技术的激光数控加工误差控制策略[J].机械设计与制造工程, 2024(9): 52-56.

作者简介：胡华，出生年月：1982年12月28日，性别：男，民族：汉，籍贯：江苏省阜宁县，学历：本科，职称：工程师，研究方向：机电。