

五轴联动数控机床加工轨迹规划与误差控制

周立¹ 王磊² 李奕霖²

1. 齐重数控装备股份有限公司 黑龙江齐齐哈尔 161000

2. 霍尼韦尔(天津)有限公司 天津 300000

摘要: 五轴联动数控机床是高端加工装备,因其优异的复杂曲面加工能力,在航空航天和能源装备等行业具有举足轻重的地位,是当今世界最重要的装备之一。与传统三轴联动数控系统相比,五轴数控系统由于存在两个转轴,其运动学关系更加复杂,使五轴联动数控机床加工轨迹规划与误差控制成为影响数控系统精度和效能提升的重要环节。本文阐述了五轴联动数控机床加工误差构成,并对五轴联动数控机床加工轨迹规划策略与误差控制进行了探讨。

关键词: 五轴联动; 数控机床加工; 轨迹规划; 误差控制

在“中国加工2025”战略实施的背景下,我国的加工业正在向着高端化、精细化和智能化方向迈进。发动机叶片、飞行器结构件等零件形状复杂,材料加工困难,精度要求极高。在五轴联动数控机床加工误差控制过程中,根据始端刀轴矢量计算加工误差时,旋转轴角位移使单位矢量误差增大,导致误差补偿量偏离理想值。即使经过定位误差补偿,误差仍然偏大,影响加工质量。五轴数控加工中心采用双轴(A/C、B/C等)与三条直轴(X、Y、Z)轴的协同,可实现对加工过程中各轴位置及位姿的精确调控。该方法能保证工具总是处于最佳加工条件,有效降低加工干扰,提高加工效率,提高表面质量。

一、五轴联动数控机床加工轨迹规划策略

(一) 参数化刀轨的光顺性设计

参数化刀轨的光顺性设计即将刀位点与加工过程中的各步骤的位置进行转换,从而将加工轨迹由不连续的直线过渡到C²型的曲面。基于切削编码的刀具尖端坐标和刀具轴线向量的新思路,利用非均匀有理B样条(NURBS)建立刀具刃口面和刀轴位姿的5D联合参量曲线,并对其进行优化,在保证精度要求的情况下,达到最大曲率的目的。将弦长精度限制和各轴转速和速度极限作为约束,构建兼顾加工效率和运行平滑度的多目标优化模型。采取曲面的曲面嵌入方法,通过对通道的高曲率区域进行加密,使其保持原有的几何特性,而对于平面的部分则采用稀疏化的方法,提高算法的求解速度。为了解决转动轴线和平移轴线之间存在的尺度不一致所引起的约束矛盾,提出了一种标准化加权矩阵来完成多坐标协调的方法。同时,利用球面直线内插法(SLERP)

实现刀轴向量的位姿修正,保证刀轴的轴向改变速率是连续的,避免运动学奇异点的产生^[1]。

例如,某航空发动机整体叶盘加工,采用参数化刀轨的光顺性设计。应用钛合金Ti-6Al-4V加工,单个叶高85mm,采用高可调的自由曲面。在三坐标测量机上采用常规的直线插值方式进行加工,发现其在进气道边界处的形貌差达到了±0.08mm,并且产生了周期振动,其粗糙度Ra达到0.8μm。为了提高加工品质,加工小组在原来0.5mm的点云数据基础上,利用NURBS曲线重建了切割后的刀具位置,得到了一条C²的连续的联合参数曲线。在实际实现中,将弦高度的偏差控制在0.005mm以内,并限定机器转轴的最大角加速度不能超过1.2rad/s^[2]。在叶背曲率不超过5mm的情况下,采用多目标优化方法,将这一范围内的参数化强度提高3个百分点,实现对叶片表面曲率半径不超过5mm的局部区域内的参数化。利用四元数表示刀轴向量,通过球心直线插补,使刀轴最大位姿角度由优化之前的7度降低到2.5度(见表1)。

表1 实际加工对比数据

性能指标	传统线性插补	NURBS参数化刀轨	提升幅度
轮廓误差(mm)	±0.08	±0.03	62.5%
表面粗糙度Ra(μm)	0.8	0.4	50%
加工时间(min)	47	39	17%
机床振动加速度(g)	0.35	0.18	48.6%

(二) 多轴动力学约束的自适应进给率规划

基于多坐标耦合的刀具运动轨迹优化方法,通过建立刀具运动轨迹和刀具轨迹参数的耦合关系,以提高刀

具运动轨迹的整体高效性和局部平滑性。以预测窗内的刀具轨迹曲率变化和轴的摆角率等为基础,预测各个轴的合成速度和加速度的界限,构建逆扫和正插补的双向限制转换机理。在逆扫相扫时,根据航迹末端分段求出符合各轴动态限制的最大容许速度,而前向插补则根据当前的真实速度和前视路径的限制,得到S形或五次样条的速度曲线。在理论上,基于Jacobian矩阵伪逆变换的方法,将刀具运动速度转换为多轴共同约束下的可行转速空间,并采用反函数来抑制逼近极限的轴向推进加速度。建立以加工时间、加速度平方积分和加加速度最大为目标的多个优化指标,采用拉格朗日乘子法进行优化。根据主轴载荷、切削力波动和温度等因素的积累,在粗加工过程中降低了加减速极限,在精整过程中通过拉紧来保证零件的成形质量^[3]。

例如,某航空发动机的全叶盘采用GH4169为主要材质,利用DMU80五轴数控机床,选择 $\phi 12\text{mm}$ 硬质合金球头铣刀作为切削工具,以 4500r/min 、插补时间 0.001s 为目标。采用叶盘流道表面的螺旋线刀具轨迹,轨迹全长 12.8m ,包括三个曲率突变区($5\text{--}8\text{mm}$)和两个大摆角区(A轴摆角 $45^\circ\text{--}60^\circ$,C轴摆角 $120^\circ\text{--}150^\circ$),预计窗长50个刀具位置。采用新的进给方式,即以最大的X/Y/Z轴加速度 8m/s^2 ,加加速度 400m/s^3 ,A/C轴线最大角增量速率(10rad/s^2)和最大角加加速度(500rad/s^3)。逆扫段以轨道末端转速0为起点,分段计算每一刀点的最大容许转速,将曲线突变区的理论转速降低到 800mm/min ,而在大摆角区由于动态限制将其降低到 600mm/min 。采用Kistler9257B型压力传感器实时获取的切削力信息,在前插补过程中产生5次样条速度曲线,在粗加工过程中,将X、Y、Z方向的加速极限降低到 7m/s^2 ,使材料去除效率提高18%。在加工过程中,在切割力不超过 2000N 的情况下,将最大限度地提高到 5m/s 。在大摆动角度范围内,送料速度可被自动降低到 780mm/min (1200mm/min),而伺服跟踪精度由 0.012mm 下降到 0.005mm ^[4]。

(三) 以运动性能为导向的刀位优化和奇异性规避

以运动特性为导向的刀位轨迹规划和奇异性规避为研究目标,通过构建五轴运动参数与刀位向量的解析映射关系,以提高加工的平滑度和可达程度。基于多目标优化算法,即采用原始刀具轴线的角速度等参数的多目标优化算法。以连续二次规划为基础,在保证刀轴光滑且不受刀体干扰的前提下,通过对刀轴的球面参量坐标

进行迭代修正,使评估函数达到最优,进而得到各刀位点的优化姿态配置。为解决因转动轴奇点引起的自由度退化等问题,利用Jacobian矩阵损失秩次识别的方法,在状态个数超出预定阈值时,主动启动避让策略,并通过刀轴矢向量的细微调节或通过虚拟转轴的移动来重建可行解域,保证机床不受奇异性影响。在CAM过程中进行脱机工艺设计,产生含有最优刀轴向量的工艺编码,实现对每一坐标系运动负荷的预估计,为下一步的进给量计划提供约束条件。数控系统在实际生产过程中只需要进行预先设定姿态,省去大量的在线计算^[5]。

例如,某水轮机叶片五轴精加工中,基于运动特性的刀位寻优和避免奇异性的方法。该刀片的材质是 $0\text{Cr}13\text{Ni}5\text{Mo}$ 型马氏体钢,其加段区域的曲率有很大的改变,其最大的特点是其长 3.2m 。当基于等参量线方法进行刀具轨迹规划时,因A/C型双摆头数控系统C轴线趋近 $\pm 90^\circ$,其Jacobi矩阵状态数突增至35,造成实际切削过程中主轴角速的反常变化高达180%,并触发了显著的伺服预警和过切割痕迹,面型精度高达 0.15mm 。针对上述问题,采用二次规划方法对加工过程进行姿态优化,建立刀具轴线与加工表面法向偏离小于 5° 的最优控制模型。基于虚转动轴线的控制方法,使C轴的移动范围保持在 $[-85, 85^\circ]$ 以内,并通过调节A轴线来对对应的转角进行补偿(见表2)。

表2 优化后的运动学性能对比

性能指标	初始刀轨	优化后刀轨	改善幅度
最大角速度 (rad/s)	3.2	1.8	43.8%
最大角加速度 (rad/s ²)	18.5	9.6	48.1%
雅可比矩阵条件数	35	2.5	92.9%
轮廓误差 (mm)	0.15	0.05	66.7%
加工振动 (g)	0.25	0.12	52%

二、五轴联动数控机床加工误差控制体系构建

(一) 多源误差耦合机理和统一张量表征模型

五轴联动数控机床加工误差不是单一的多个误差来源的简单相加,而是经过一系列非线性耦合、传递并最终在刀尖点(TCP)上被进一步放大的过程。现有的误差模型将几何误差和力致误差分别建立和补偿,忽视其相互影响,难以满足高精度、长时间加工的要求。比如,丝杠的热延伸可以使其节距偏差发生变化,从而导致的伺服参量不匹配,从而使伺服系统的追踪误差更加严重;而在加工过程中,所产生的组织形变,也会引起热-液界面的变化,从而对温度场产生一定的作用。由于两者

之间存在着强烈的耦合，单个误差的线性校正作用受到限制，而且由于不恰当的补偿，还会带来新的误差。为了对这一系统进行系统性刻画，建立可以同时反映多物理场和多源误差的高精度张量建模方法。基于整体机构运动学的方法，将刀具在加工过程中的任一点的定位精度，转化成张量场的几何、热和力等多维度的误差。将21个几何误差单元和刚度阵，进行集成，形成高精度的集成误差张量。基于三维坐标系的三维坐标系模型，将其分解为三维坐标系，其各组成部分既能体现单个误差来源的尺寸，通过张量相乘和缩并操作，准确刻画不同位置等环节的误差成分在运动链上的传输和相互耦合，从而得到三维立体坐标系的空间容积误差。该模式具有较强的系统性和较强的可计算性。通过一次精确测试和识别试验，确定合成的误差张量的起始成分^[6]。

（二）RTCP动态标定和分轴协同补偿控制架构

旋转刀具中心点控制功能作为五轴数控机床的核心部件，其动态精度将影响到整个空间的加工精度。以节距补偿为代表的常规静态几何误差补偿方法均以刚体形式存在，不能有效地解决由于运动惯性和温度升高等因素导致的运动偏差。通过对RTCP动力学校准和轴间协调的自适应补偿方法的研究，由“静态几何空间”向“动态工作空间”转化。其核心包括两个闭环，即RTCP动力学精确校准回路和基于前馈建模的多轴协作校正回路。在该试验过程中，在进行RTCP试验路径的过程中，通过将无接触位移传感器与工件平台上的标准球体结合，实现刀具尖端与工件平台之间的真实空间位置信息。然后，利用反向运动建模方法，在线识别当前运动状态等工况下三条直线动力学误差参量。该方法实现了从传统的离线静态实验室模型向实时的、动态的加工场景转移。基于数控加工中心插补指令的新型自适应补偿装置，利用其正交运动建模求取期望的刀尖点位姿，并将其与动力学误差模型相结合得到实际位置偏差向量进行迭代。

（三）深度学习驱动的时变误差预测和强化学习参数自整定

五轴数控机床时变误差是由热变形等多源耦合引起的，具有强烈的非线性特性，使常规的离线补偿方法很难适用于复杂多变的环境。建立“预测-自整定-反馈”

闭环控制策略，是解决准确性瓶颈的关键途径。利用LSTM神经网络获取时间相关性，结合红外热成像和切削力传感器构成的复合探测网络，实现多物理场信息的实时获取。采用高分辨率的张量分解方法，将热、力和运动误差融合为三阶矩阵，通过抽取主要分量，建立整体误差预报模型，实现多源误差的有效融合，使其预报准确率提高15%以上。采用基于增强学习的方法对系统进行参数的动态优化：以轨迹误差最小为目标，建立基于预测误差等信息的深层Q值神经网络模型，并将反馈的权值修正值设置为行为空间。采用基于RTCP的在线校正方法对运动轨迹的偏差进行校正，实现“预报误差—自整定参数—在线校正”闭环。

结论

总之，五轴联动数控机床的加工轨迹规划和误差控制包括机械、控制和材料等多学科领域。该研究的开展，将为解决高质量精密加工设备的精度瓶颈，提高我国大型设备的自主生产水平提供科学依据。为实现误差“治已病”，需建立多源误差耦合机理和统一张量表征模型等，采取针对性的协同补偿方法，实现对复杂立体尺寸误差的抑制。

参考文献

- [1] 肖鹏. 五轴联动数控机床加工非线性误差补偿控制技术研究[J]. 中国机械, 2025, (26): 56-60.
- [2] 吉琳. 五轴联动数控机床技术分析与优化[J]. 机械管理开发, 2025, 40(07): 210-211+214.
- [3] 徐兆华, 李建平, 凌兆勇, 等. 三维五轴联动激光设备研究进展与发展趋势[J]. 应用激光, 2025, 45(07): 129-144.
- [4] 陈有伟, 简小军, 黄纪元, 等. 基于六轴联动的抛光轨迹刀具位姿误差优化[J]. 计算机集成制造系统, 1-19.
- [5] 王守峰. 数控五轴联动技术在汽车模具复杂曲面加工中的应用[J]. 汽车测试报告, 2025, (11): 64-66.
- [6] 唐永忠, 叶家福, 卢健, 等. 基于最小二乘法的五轴联动数控机床加工误差补偿方法[J]. 机床与液压, 2024, 52(22): 98-102.