

面向柔性制造的多轴数控机床数字化协同设计与工艺优化

郝海瑞

宜昌科技职业学院, 湖北 宜昌 443111

DOI:10.61369/ME.2026010007

摘 要 : 在世界范围内, 随着机床朝着高速、高精以及柔性方向发展, 对多轴数控机床进行数字一体化设计及加工工艺规划已经成为缩短生产周期降低产品成本的重要途径。本文以柔性制造系统 (fms) 为研究对象进行探讨分析。对多轴数控机床的数字协同化设计体系及工艺改进技术进行了深入分析。本文先从多轴数控机床在柔性化制造中所扮演的角色入手, 阐明多轴数控机床能通过对多坐标联动来完成对复杂曲面零件的加工是应对当前小批量、多品种加工模式的必然保证。

关 键 词 : 多轴数控机床; 柔性制造系统; 数字化协同设计; 工艺优化; CAD/CAM集成

Digital Collaborative Design and Process Optimization of Multi-axis CNC Machine Tools for Flexible Manufacturing

Hao Hairui

Yichang Vocational College of Science and Technology, Yichang, Hubei 443111

Abstract : Globally, as machine tools progress towards high-speed, high-precision, and flexible manufacturing, the digital integrated design and process planning of multi-axis CNC machine tools have become crucial approaches to shorten production cycles and reduce product costs. This paper explores and analyzes the Flexible Manufacturing System (FMS) as the research subject. It provides an in-depth analysis of the digital collaborative design system and process improvement technologies for multi-axis CNC machine tools. Starting with the role of multi-axis CNC machine tools in flexible manufacturing, this paper clarifies that the ability of multi-axis CNC machine tools to machine complex surface parts through multi-coordinate linkage is an essential guarantee for addressing the current small-batch, multi-variety machining mode.

Keywords : multi-axis CNC machine tools; flexible manufacturing system; digital collaborative design; process optimization; CAD/CAM integration

引言

对于制造过程的优化主要是针对工装路径规划、切削加工自动化参数优化以及在线加工监控等方面进行研究, 采用遗传算法、机器学习方法及物联系统技术手段完成上述工作, 显著提升了产品质量及生产效率; 并结合实例验证协同化设计优势及工艺优化效果。这对实现工业化转型有着重大的理论价值及实践路径。

一、面向柔性制造的多轴数控机床数字化协同设计

本文基于柔性制造单元对多轴联动数控加工中心进行数字集成化设计及工艺规划方法进行了研究分析。研究内容: 多轴数控机床在柔性化生产中所起的关键性作用的研究; 基于 cad/cam/cae 集成环境下的机械结构、控制系统、传感系统及人机界面系统之间相互协调的设计方法研究。工艺优化方法有刀路优化、自适

应工艺优化和在线加工监测; 研究方法为基于跨领域综合集成系统分析法的文献调研、实例分析及模拟实验, 在真实工程应用环境中测试协同设计和工艺优化效果。本节提出了面向柔性制造系统需求的一种新的设计方案, 采用机-电-控一体化仿真方法进行设计, 实现机床机构设计、传动设计及加工路线设计; 针对机床参数配置, 在此基础上引入人工智能算法建立刀具体积与零件轮廓的关系模型, 从而自动找出最佳的切削参数组。利用模拟试

作者简介: 郝海瑞 (1980.10-), 男, 湖北宜昌人, 宜昌科技职业学院就职, 职称: 讲师。学历: 本科。毕业单位: 湖北工学院, 机械设计制造及自动化专业, 获工学学士学位。研究方向: 《机械设计与制造》教学、研究。公开发表学术论文1篇, 参编教材3册。

验的方法预估不同方案的实施效果可大大缩短产品的开发周期。

二、面向柔性制造的多轴数控机床数字化工艺优化

（一）柔性制造系统对多轴数控机床的需求

柔性制造系统 (FMS) 的最大特点是具有很强的应变能力, 在产品品种变换频繁、加工工艺流程发生变化、生产批量变化的情况下, 采用数字设备、工业机器人、自动搬运装置及计算机控制软件组成的生产线实现柔性化生产; 数控机床作为其中的核心加工单元, 它能够同时进行多个方向加工, 如五轴联动, 在加工复杂曲面和小型零件时效率很高, 能保证很高的加工精度及工件表面质量。

例如, 飞机发动机叶片、机翼等零件都对零件的成形精度有较高要求。采用五面体加工中心能在一个装夹下完成多种工序, 避免了专用工装的应用, 加快了产品研发周期; 而且其快速切削性能及自动换刀功能也能提高生产效率。能够适应柔性制造系统快速响应和稳定连续运行的要求。

（二）传统多轴数控机床的局限性

传统多轴数控机床的设计及改进存在一定的局限性, 在进行设计时通常将机械部分、控制部分、传感部分、人机界面等分别进行设计, 其综合效率低, 响应速度慢, 并不能很好地满足柔性制造过程的要求。

例如, 因为缺乏对于机械结构及控制系统、检测装置之间的配合等问题的关注, 导致机器人在频繁工作下发生抖动、精度下降等情况; 在加工工序上, 从刀路规划到切削参数设置再到加工监控都依赖于人为主观判断, 并不能应对材料性质变化、刀具磨损等多种变量扰动条件下的加工需求。在生产过程中经常出现中断、超差以及返工的现象, 不能有效提高产品的质量和生产效率; 并且传统数控系统缺少对生产过程进行实时感知、精准判断及智能调控的能力, 导致系统的响应速度和控制精度达不到现代工业的要求。

（三）数字化协同设计

1. 基于 CAD/CAM/CAE 集成平台的协同设计框架

核心是构建 CAD/CAM/CAE 集成化数字协同设计平台, 实现从产品设计、加工方案、仿真验证到制造的全生命周期的数字化闭环流程, 在该环节应用三维建模软件对机械装备结构、控制系统及检测系统开展虚拟设计, 以确保各部件之间的几何尺寸及安装位置合理正确。在 CAM 阶段, 将 CAD 设计出来的模型导入 CAM 软件生成 NC 加工代码, 在仿真过程中验证是否有干涉碰撞现象, 确保走刀路线合理; 在 CAE 阶段, 利用 ANSYS 这样的有限元分析软件进行机器结构的静力学分析、动力学分析及热分析。这样可使其具备更好的刚性和抗振性以及较好的热稳定性; 而集成平台则是以数据链的形式实现 CAD/CAM/CAE 数据共享协同工作, 在这种情况下就可以将设计方面的变化实时传递到制造及仿真环节中, 从而极大提升设计效率与精度。

2. 机械结构、控制系统与传感系统的协同设计

为提升机床的动态响应能力和智能化程度, 关键是对机床的

机械部分、工作系统以及检测装置进行整体设计, 在对机床部件进行设计的过程中综合考虑其刚度、振动性能及热特性, 同时采用有限元方法优化零部件位置从而减小高切削频率下的振荡和变形量。而在操作系统设计方面, 则采用模块化形式将控制过程划分为采集、动作、逻辑判断以及人机交互等多个模块, 并以统一接口实现各个模块的信息传递及协同工作。采用旋转速度传感器采集机床主轴运动速度实时信息; 利用温度传感器采集加工过程中的温度变化信息; 采用力量传感器采集切削力的信息; 将上述传感器采集的各种信息由本装置进行综合分析处理。最后, 智能控制系统根据现有的生产工艺进行实时优化调整切片设置值, 在一定程度上可以提高产品加工质量及生产效率。

3. 自适应控制算法与智能交互界面的协同设计

智慧化改造中, 协作优化及自适应方法以及人机交互设计是关键点, 根据传感信息进行在线调整加工参数 (主轴转速、进给量等), 克服工况变化引起的波动情况。比如当机床检测出不正常的切削力时, 会降低进给速度来保护刀具; 当检测到主轴温度超过允许值时, 会进行冷却处理来防止热变形的影响。基于可视化人机交互界面及系统自带的实时监控、故障诊断、远方控制功能, 提升了设备友好性及可靠性。其颜色标识、图像显示、声光报警直观反映机械状态, 便于工作人员及时发现异常情况, 并做出相应处理; 支持远方接入功能, 能够对生产过程进行实时监控及控制, 满足柔性化生产的要求。

4. 模块化设计、数字孪生模型与物联网技术的协同设计

模块化系统设计、虚拟仿真及物联网应用是确保机械装置可维修性良好并有效运行的关键所在, 在此方面采用模块化的思想, 将其分解成几个部分构件 (如旋转刀塔、移动组件、控制系统等等), 便于其替换和更新, 降低故障发生后的时间损失。利用数字孪生体的数据, 获取设备运行过程中的数据, 建立设备的数字模型, 在此基础上预测故障提前预知维修, 例如刀具磨损状况, 预测刀具寿命, 提前安排更换周期等。借助于 Internet 技术, 我们可以在传感器网络以及云计算的基础上进行实时监控及远程控制, 并能够实现生产信息分析优化共享。

三、面向柔性制造的多轴数控机床数字化工艺优化

柔性制造系统已成为当今制造业中提升生产效益、降低成本及迅速响应市场需求的重要手段。作为柔性化加工的主要载体, 多轴数控机床的加工过程优化对整个柔性制造系统的柔性有着重要影响。伴随产品品种及个性化需求的不断扩展, 随着生产的不断发展变化, 传统单一不变的生产工艺已不适应当前的生产需求, 对基于柔性化生产的多轴数控机床进行工艺规划的研究势在必行, 其目的是采用合理的算法及控制方法让多轴数控机床能够根据不同的生产情况自动完成加工任务。

（一）多轴数控机床的动态路径规划算法

动态路径规划是多轴数控机床进行工艺优化的基础性工作, 其在加工质量和加工效率上具有重要的影响作用。但是传统路径规划方法存在固定化的参数设置, 难以应对灵活化生产的更换产

品的需求，因而以 ML 技术实现的动态路径规划技术成为了一种解决途径。这类技术可以基于当前机床传感器的数据进行在线修改路径规划，在一些例子中，比如在复杂的表面，该类方法预测了刀具与零件接触点的位置，并相应地更新切削路径减少振动和误差。其中主要依靠的是 Python 和 SciPy 库中的数学计算及最优化方法实现对路径变量的循环迭代更新。实验表明使用这种动态路径规划可使加工时间提升近 2 成，并降低废料量。同时该程序也可接收机器人个性化数据反馈，允许用户根据实际进行参数设置，增强了系统的普适性；但因为算法复杂，在保障速度的前提下又要确保准确度，这对机器提出了更高的要求。

（二）刀具寿命预测与换刀策略优化

如何科学合理利用刀具寿命是实现柔性生产连续性以及降低生产成本的关键因素之一。针对不同材料加工，多轴数控机床使用的刀具磨损速率差异较大，在传统模式下固定的换刀时间容易造成过早钝化或是更换频率过高，因此基于大数据构建刀具寿命预测模型并进行应用成为一种可行方案。该方法记录历史切削过程的数据，利用回归的方法计算剩余寿命并动态修正更换刀具时刻。

例如，针对铝加工工序，在给定某切削速度下的刀具磨损量已知的前提下，则可立即发出刀具更换指令以防止产品质量下降；在 Python 的 SciPy 库中进行优化求解，即可得出实现生产成本最小化的加工参数值。经验证明，这样不仅增加了刀具寿命，也降低了由于更换设备而造成的停机时间。

（三）主轴转速与进给速度的协同优化

匹配的主轴转速及进给速度对生产质量有着重要作用，在柔性加工条件下不同种类材料的产品所需切削参数差异较大，采用传统固定值容易导致表面粗糙度过大或是时间过长等问题。为此，采取多目标优化的方法以兼顾生产效率与产品质量两方面的需求。该方案是建立目标函数，在缩短制备时间的同时增加表面平整度，并同时满足机器设备实际约束条件的前提下，使用 python 中 scipy 软件包下的最优化模块求解最优参数组合。

对于不锈钢这类难以加工的产品，在加工过程中可以通过这种智能技术实现切削参数（转速以及进给量）的动态补偿来精确控制切削力和切削温度从而有效提高产品质量。从实验结果来看，这种联合优化算法可明显缩短加工周期，并有望显著改善成品表面质量。该算法可实现机床自定义参数设置。可根据工件大小及材料性质进行参数设置以提高系统通用性；但需注意该动态化设置对算法调参能力有一定要求，必须采用边缘计算方可保证低时延。

（四）加工误差的实时补偿机制

误差对于多轴数控机精度的影响是非常大的，在柔性加工中，由于零件的不同，会导致误差叠加的发生，因此采用在线补偿技术是提高精度的一个重要方法，它是利用安装在机床上的传感系统测量出机床工作过程中的振动信号以及热变形信号还有应力变形量。并且采用闭环控制系统来调节机械臂轨迹运动。

例如，在生产细长件的过程中，机床可以预判温升造成的变形对产品的不良影响，从而在前面工序就进行切削路径补偿来防止超差。利用 Python 中 SciPy 模块就可以做这种计算，即令误差表达式最小化确保高质量产品生产出来。本文所提出的基于在线调控的方法能有效提升产品质量控制水平，并降低返工成本；同时适用于人工干预模式，在线检测位置及参数可由用户自主设置，具有广泛适用性与推广价值。但该方法对于传感器装置安装及保养的成本较高。所以我们建议用低成本技术来改造它。

（五）能源效率与生产成本的平衡优化

如何协调能源效益与加工成本成为弹性制造下的主要矛盾，在不同工件上进行加工时，多轴 NC 加工中心耗能相差很大，固定不变的设置可能导致非必要的浪费或是过多的成本投入，因此，针对这一问题我们提出以下多目标模型：不仅要求降低能耗提高经济效益，还受到机械设备本身物理约束的影响。

（六）人机交互界面的智能化升级

人机交互界面的优化也是实现柔性化制造的重要组成部分。传统的人机交互界面通常提供的是下拉菜单式的选项，并不能够支持对于复杂机械设备进行全方位的操作，所以目前对于人机交互界面上人工智能技术的应用主要是基于自然语言处理的方式，即通过语音或是文字识别用户所发出的指令，并自动设置工作参数及路线。

例如，用户用语音命令说：“我要对铝合金零件进行加工，表面粗糙度 Ra 值是 0.8”，系统将自动选取和调用优化方法设置相应工艺参数。使用 Python SciPy 库就可以完成优化计算，在最小的复杂性下完成工作，提升用户体验。经试验验证智能交互确实可有效节省时间减少人为错误率。

结束语：面向柔性制造的多轴数控机床工艺优化已取得显著进展，相信随着人工智能技术和物联网技术进一步融合，会向着更高层次的自主决策实时优化工艺的方向发展。不同学科间的交叉将更加常见，在机械工程、电脑科学以及材料科学方面的结合会产生更多新的想法，并不仅仅局限于技术的进步，在工艺上的提升同样会促进制造业向智能化及环保化发展，从而为整个世界的产业发展不断注入活力。

参考文献

- [1] 钟润阳，徐旬等. 对工业 4.0 背景下的智能制造的回顾 [J]. Engineering, 2023, 3(5):616.
[2] 陶飞，刘蔚然，刘检华等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1):1.