

数控加工技术在机械设计中的应用探析

林金盛

(广东省机械技师学院, 广东 广州 510450)

摘要 当前中国制造业逐步朝着高精度、高效率、高柔性化发展, 数控(CNC)加工已渗透到机械设计领域, 起到联系设计与制造的纽带作用。应用数控加工技术可以大大提高加工质量、加工速度, 实现各种复杂零部件及结构件的高精度加工。鉴于此, 本文简要分析了数控加工技术的优势, 探讨了数控加工技术在机械设计中的典型应用, 并提出提升应用效果的优化建议, 以期为机械设计工程师和制造企业提供有益参考。

关键词 机械设计; 数控机加工技术; 高精密零件设计; 薄壁结构

中图分类号: TH122; TG659

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.36.038

0 引言

数控技术中的加工技术是指利用数控技术在实际加工的过程中充分地发挥作用, 提高加工的效率, 保证加工的精度水平。具体来说, 数控技术是在传统加工技术的基础上, 充分地利用数控技术, 以达到促进加工质量提高的目的。数控技术在加工技术中的应用反映了加工方式在形式上的一种变化, 是对加工的意义进行更加深入的研究。实践证明, 数控加工技术的应用促进了我国工程机械和装备制造业的健康发展, 促进了我国工程机械自动化水平的进一步提高, 为推动现代装备制造业的发展和进步提供了充足的空间和动力。

1 数控加工技术的优势

就中国的数控(CNC)加工技术而言, 目前其在机械设计方面的应用具有以下几个优点: 第一, 高精度和高重复性。在国产机床中的高精密型如数控立车等, 可以利用多体运动学建立误差模型, 对于几何误差(例如非线性误差), 采用反向补偿方法, 使得其加工误差减小, 在加工成形的复杂零件回转支承滚道微米级精度下可实现。第二, 柔性制造能力强。数控系统可以随时修改加工程序, 做到随时更换加工策略来匹配不同的批量、不同种类的产品加工要求。目前国内大量使用柔性数控车铣复合机床能够快速转换工艺来满足小批量、多品种产品的生产需求, 这种灵活性是机械设计上快速匹配客户需求变化的保障。第三, 缩短调试和研发周期。将设计转向制造, 设计人员能够借助仿真和数控加工相结合的数字化样机, 实现与数控加工公差概率分布模型相关的产品设计及加工过程的

虚拟加工验证, 实现调试和研发周期时间的缩短^[1]。

2 数控加工技术在机械设计中的典型应用

以下四个方面是数控加工在机械设计中具有代表性的典型应用。

2.1 高精密零件设计与制造

精密机械的设计(比如航空零件、微型齿轮、医疗器械等)需要微米级甚至是亚微米级的精度, 而利用中国自主研发的或者从国外引进的高精度数控机床(比如高刚性五轴加工中心), 并运用精密的程序控制与闭环反馈的方式, 将各种各样的曲面、微结构设计出来, 在数控加工上进行加工得到高质量的原型与小批量的生产。这样就能够使得设计的偏差进一步地减少, 将设计意图精准地转变为实际的产品, 并且保证了产品零件的尺寸稳定性以及表面质量。

2.2 复杂曲面和多轴结构件的加工

现在的产品机械设备越来越趋向于复杂曲面、多自由度(机器人关节、航空机体构件等), 传统的三轴加工已经不能满足一次性装夹、高效率的要求, 这就需要更多地采用加工设备, 通常为五轴加工机床, 在不重新装夹的情况下, 可以同时完成加工工件的多个面加工^[2]。设计人员可以根据需要任意构思出一个复杂的空间曲面, 然后借助数控加工来实现; 也可以通过多轴加工来消除人为的干涉和定位, 提高整个结构件的刚性以及质量的一致性。

2.3 重载与高强度结构件的机械设计

对于航天、船舶、工程机械等行业来说, 其结构件承受着较大的载荷, 比如支架、连接件以及框架,

所以机械设计人员就需要考虑到强度、刚度、重量。该类构件往往都是大尺寸、复杂轮廓以及内部有油道或者是减重孔等，在使用的过程中必须保证满足要求之后才能加工使用。而使用数控机床（比如龙门加工中心或者五轴加工中心）可以一次性或者分段来对大块的坯料进行精准加工，实现粗加工向精加工的方向转变。并通过自动刀具路径规划、自动进给参数优化的方法来保证切削质量和机械强度，确保能达到更高精度、更强性能的要求。

2.4 薄壁结构的变形控制加工

在切削环节，受集中荷载影响，薄壁件极易出现弹性偏移，使得其无法稳定成型。而数控加工技术通过分段控制刀具运动轨迹，能够均匀匹配切削力与结构刚度。具体来说，将变速区间设置于路径规划之中，对于壁厚较小的区域可将切削深度以及进给速度减小，让整体受力分布平缓、均匀。不仅如此，柔性夹具与实时监控模块可同步识别壁面偏移量，使系统及时调整刀位坐标，避免反弹位移造成的尺寸偏差。该方式确保了薄壁件的成形刚度在动态加工环境中得到有效维持。

3 数控加工技术在机械设计中的应用效果提升策略

3.1 强化精度来源管理与反馈控制机制

数控加工环境的精度来源管理及反馈控制实际上就是围绕多源误差进行识别、建模以及实时补偿，从而将设计时的几何意图还原到加工过程之中。首先，开展系统误差辨识工作，对机床的几何误差、热变形误差以及切削力误差进行量化计算。工作人员可采用激光干涉仪或者三坐标测量机来大批量检测各个运动轴线性定位误差、回程间隙、直线度、垂直度等情况，测量结束后用最小二乘法等数学方法进行误差的建模。其次，将误差补偿模型安装于数控系统内部，将误差识别的结果通过软件形式转化为补偿表格（例如：坐标轴误差查找表），将其导入数控系统参数中，并利用软件的插补（例如：逆插补、反向偏差补偿）方法来修正行程轨迹。我国数控加工行业也经常会对机床反向间隙（backlash）进行周期性测量并补偿，可以通过百分表或者双频激光干涉仪等高精度测量仪器，得到反向间隙的实际数据，并输入至数控系统的补偿寄存器中。最后，建立闭环反馈控制机制，利用机床测头或测量探针等在机测量装置监测工件关键尺寸偏差并及时反馈给控制器，由控制器触发进行补偿以实

现实时补偿调整。当前国内五轴加工中心普遍集成了在机测量功能，在零件加工完成后利用探头进行在机测量，再由系统基于测量的偏差值自动调节刀路纠正偏差。为了使补偿机制能够正常发挥其作用，还需要经常性开展校准—检验—补偿循环：根据加工周期（按月或者按季），利用激光干涉仪或测头校验定位精度与重复定位精度，记录由热变形及几何漂移导致的偏差值，并校正补偿模型；构建设计—制造协同平台，让机械设计师和加工工程师一起参与误差反馈分析。根据补偿后加工结果，设计师参加补偿模型复核以及工艺参数优化工作，并对以后的设计公差分配及部件的布局做出相应的修正，以减小以后的设计难以补偿的误差来源^[3]。

3.2 推广多轴复合加工中心在关键结构件设计中的应用

在关键结构件设计中推广多轴复合加工中心应以“设计兼容机床能力—工艺先导验证—装夹与刀路一体化—三段闭环工作流”为主线展开，具体做法如下：第一，在设计阶段即引入机床能力约束参数，将机床运动学（回转轴范围、摆角极限、转台直径与承载）、主轴动态响应（最大线加速度、速度曲线平滑性）及刀具伸长极限作为刚性约束写入设计变量集合，采用可达性检测方法对复杂曲面特征进行可加工性判定，必要时在 CAD 模型中嵌入多轴加工特征标记以引导后续编程，这一先导化设计流程已被国内机床出厂检验和复杂工件实践并承认。第二，在工艺筹备阶段实施“样件—工艺仿真—验证”三步法：以代表性复杂曲面工艺试件（如行业通行的 S 形试件）对目标机床进行性能验证，基于试件加工结果建立机床刚度、热漂移与回程误差的工艺参数库，再在 CAM 环境中开展五轴刀路的动力学仿真与碰撞试验，采用基于运动学逆解的刀位优化算法与刀轴倾斜约束策略，以最低角速度变化量保证插补平滑性并减少振动诱发误差。第三，在夹具与工装体系上推广模块化零点定位与多面装夹策略：根据零件分解后的加工面群设计可重定位夹具单元，采用零点定位系统与自适应定位垫圈实现装夹重复精度的线性化，针对大尺寸或非对称构件应用分段平台化装夹并结合局部刚性增强件以降低切削变形，夹具设计同时纳入测头对位基准，便于在机测量与补偿^[4]。第四，在刀路生成与工序编排上，明确区分“3+2 定位加工”与“五轴联动加工”两类工序的使用场景：以高曲率连续面优先采用五轴联动以减少装夹次数和

提高表面连贯性，而对特征化孔槽与端面则优先采用3+2定位以简化刀具轨迹与减少计算复杂度；同时基于切削力预测模型优化进给切削深度，使用多刀具并行换刀逻辑减少空刀与刀具空转时间。第五，建立机床—工艺—设计的闭环质量控制：在机床侧引入在线测量（机内测头）与自适应进给控制模块，实施工序间在机测量并回传至CAM进行刀路微调，形成“在机测量→偏差识别→刀路修正→复测”的循环，以仪器化的试件结果驱动工艺库更新。

3.3 加强高端本土数控设备与刀具研发能力

为实现高端本土数控设备与刀具能力的实质性跃迁，必须在装备体系、材料与涂层、功能部件、试验验证与产业化路径五个层面同步开展工程化方案与制度化保障工作。具体做法如下：

1. 在装备体系层面，应组织面向高刚性/高稳定性机床的系统化攻关项目，按模块化路线推进主机—主轴—传动—控制器协同设计，建立从基座铸件应力消除、机床机架模态优化到多体动力学仿真的闭环设计流程，并制定机床“能力说明书”（包括热变形曲线、刚度频谱、最小可控误差区间及长期精度保持性指标），用于设计可制造性匹配与工艺审查。

2. 在功能部件层面，应针对主轴（高速与恒定扭矩）、滚动/滑动导轨、丝杠及减速器实施材料—热处理—表面工程一体化开发，推进高阻尼、高耐磨材料的国产化替代，设立部件级加速寿命试验与热稳定性测试规范（例如：恒功率切削热载荷循环测试），并将测试数据以标准化模板供机床整机校验使用。

3. 在刀具与刀具材料层面，应构建由国家级研究所（如成都工具研究所）牵头的刀具牌号研发平台，按照“牌号设计—微观组织调控—涂层工艺—刀具几何优化—切削状态标定”的闭环工艺路线，开展碳化物基体成分微合金化、纳米多层涂层工艺和微凹槽自润滑结构的协同研发；同时基于工具显微硬度、摩擦学与断屑行为的量化试验（采用高频动力学切削测试台与在线力/温度/声学传感）建立材料性能—切削参数的参数化数据库以支撑设计端的刀具选型决策。为确保研发成果可产业化，应设立机床—刀具联合验证线：以典型工业零件（大尺寸薄壁件、复杂曲面关联件、难切削合金构件）为验证对象，实施从试制、在机测量、误差统计到过程能力（Cp/Cpk）评估的完整验证程序，并将验证结果纳入机床出厂能力证书与刀具牌号工作说明书；在认证流程中引入第三方测量

机构与行业协会能力评审，以形成可追溯的合格记录。此外，还应通过财政与产业政策激励（设立“高档数控与关键刀具”专项资金，支持攻关与中试设备采购）和产学研联合机制，推动“揭榜挂帅”式课题与企业导师制，加速技术向规模化生产的转移；并在行业内推广统一的部件接口与试验基准，从而使本土高端机床与刀具在可靠性、可维护性和配套生态上实现系统性提升。

3.4 建立数控加工以及机械设计协同人才培养与标准化体系

提高数控加工的应用程度，应注重加强人才建设和标准化建设。可与高校机械设计制造及其自动化等专业共同打造校企联合培养方式，设置误差分析、机床动态特性、刀具工艺学、多轴加工路径规划等课程，着眼于培养综合型人才，让其成为兼具机械设计知识基础以及数控编程、路径规划、刀具工艺等能力的复合型工程师^[5]。此外，推动行业协会（例如：中国机械工具协会）出台针对机械设计与数控加工协同的相关标准：公差分配规则、夹具标准、路径规划规范、设计可加工性评价等；并通过标准化导引设计方、制造方实现统一的技术接口、质量控制、工艺流程，以此来减少沟通摩擦、提升效率。

4 结束语

机械制造业对于国家的发展具有极为重要的意义，可以有效地促进国家经济的增长。在机械设计中，数控加工技术具有高精度、高柔性和高自动化等优势，在具体应用环节可以通过高精度反馈控制、多轴加工推广、高端设备与刀具自主研发以及协同人才与标准体系建设等策略，来进一步提升数控加工的应用效果，以更好地支撑中国制造向高端化、智能化迈进。

参考文献：

- [1] 樊圣.数控加工技术在机械设计中的应用及优化建议[J].工程技术与管理,2023(13):49-51.
- [2] 黄锟.机械设计与加工中CAD/CAM技术的应用[J].黑龙江科学,2023,14(04):133-135.
- [3] 杜宏宇,铁正.整体叶轮五轴数控加工技术研究[J].南方农机,2024,55(20):140-143.
- [4] 张楠,张洁.数控加工技术在机械工业设计与制造中的应用研究[J].装备制造技术,2025(01):123-125.
- [5] 杨勇考.零件数控车削加工工艺设计与仿真加工[J].内燃机与配件,2024(05):117-119.