车铣复合机床在航空零件加工中的效率提升研究

龙邵安 尚耀龙 吴海鹏 邢小强

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要: 车铣复合机床在航空零件加工中展现出显著优势,但其效率受多种因素影响。本文分析了车铣复合机床的工作原理,并探讨了加工工艺、刀具选择、数控编程、机床设备等因素对加工效率的影响。针对这些问题,提出了优化加工工艺、合理选择刀具、改进数控编程、加强机床设备管理与维护以及引入智能监控系统与动态优化等策略。旨在通过这些措施,提升车铣复合机床在航空零件加工中的效率,满足航空制造业的高精度、高效率需求。

关键词: 车铣复合机床;航空零件加工;效率提升

引言

随着航空制造业的快速发展,对零件加工精度和效率的要求日益提高。车铣复合机床作为一种集车削和铣削于一体的先进加工设备,在航空零件加工中发挥着重要作用。在实际应用中,车铣复合机床的加工效率受到多种因素的制约。深入研究车铣复合机床的工作原理及其影响因素,探索提升加工效率的有效策略,对于推动航空制造业的发展具有重要意义。本文将围绕这一主题展开探讨,以期对航空零件加工提供有益的参考。

1 车铣复合机床的工作原理

车铣复合机床的工作原理融合了车削与铣削这两种基础加工方式,并通过数控系统的精确调控,实现复杂零件的高效加工。在车削环节,以工件自身的旋转作为主运动,此时刀具沿着特定轨迹作进给运动,进而对工件外圆、内孔等回转体表面进行切削加工^[1]。加工航空发动机的轴类零件时,通过车削能精准控制轴颈的尺寸精度与表面粗糙度。铣削则以刀具的高速旋转充当主运动,工件或者刀具承担进给运动的角色。这一过程适用于加工平面、沟槽、复杂轮廓等特征。像在制造航空发动机机匣时,铣削可用于精确加工机匣上的安装平面以及各类异形槽。数控系统对机床各坐标轴的运动进行精密控制。操作人员提前依据零件图纸与加工工艺要求,编写包含各种运动指令的数控程序。数控系统读取并解析该程序后,精准控制电机驱动各坐标轴,让刀具与工件按照既定轨迹运动。例如在加工带有复杂曲面的航空叶片时,数控系统协调多个坐标轴联动,使得车削与铣削工艺有序衔接。先用车削完成叶片轴颈部分的初步成型,紧接着切换至铣削模式,刀具在数控系统指挥下,通过多轴联动,依据复杂的曲面数据,逐点切削,最终塑造出符合设计要求的叶片曲面轮廓。这种车削与铣削的复合运动模式,配合数控系统的精确操控,极大地拓

展了机床的加工能力,能在一台设备上完成过去需多台机床、多道工序才能达成的复杂零件加工任务,显著提升了加工效率与精度。

2 影响车铣复合机床在航空零件加工中效率的因素

2.1 加工工艺因素

车铣复合加工工艺设计的合理性直接决定加工效率。工序规划若未充分整合车削、铣削、钻削等流程,可能导致多次装夹与基准转换,增加非切削时间。刀具路径优化不足时,复杂曲面加工易产生空行程或冗余运动,五轴联动潜力未充分释放。刀具选型与材料匹配度不足(如未针对钛合金选用高硬质合金刀具)会加剧磨损,迫使频繁换刀或降速。冷却方案选择不当(如未采用高压冷却抑制切屑粘连)易引发断刀风险,中断加工连续性。参数设置若缺乏动态调整(如恒定进给率未适配余量波动),可能导致局部过切或效率低下。

2.2 刀具因素

刀具性能与适配性对车铣复合加工效率具有显著影响。航空零件材料的高硬度与韧性对刀具磨损极为敏感,若未选用高硬质合金或涂层刀具(如TiAlN涂层),切削力将增大30%以上,刀具寿命缩短50%,导致频繁换刀中断加工。刀具几何参数设计不合理(如前角过小、主偏角不当)会加剧切屑形成阻力,迫使降低进给速度20-40%。多刃刀具或可转位刀片未优化排布时,换刀时间占比可能超过总加工周期的8%。刀具装夹刚性不足易引发振动,表面质量达标需额外增加光刀工序,效率损失达15%。未采用模块化刀具系统时,刀具更换依赖人工调整,进一步延长辅助时间。刀具路径若未规避干涉区域,可能触发机床保护停机,单次调试耗时平均增加10分钟。

2.3 数控编程因素

数控编程的效能直接影响车铣复合机床的加工效

率。若编程策略未针对五轴联动特性优化, 刀具路径易产生冗余空行程, 动态响应速度受限。传统编程方式依赖保守参数(如恒定进给率), 未结合材料硬度波动动态调整, 导致切削效率降低20%-35%^[2]。后置处理算法若未匹配机床运动学特性, 可能生成非最优G代码, 触发速度限制或轴超程。复杂零件编程若缺乏特征识别与自动化工具, 手动调整耗时占比超30%。未集成碰撞检测与振动仿真, 加工中突发异常风险增加, 单次调试耗时平均延长15分钟。未利用CAM软件的高级算法(如在位测量数据反馈优化路径), 难以实现工艺参数的闭环调整, 制约效率持续提升。

3 车铣复合机床在航空零件加工中效率提升策略

3.1 优化加工工艺

车铣复合加工工艺的优化需从全局视角重构加工流程, 通过深度整合工序、精简非必要环节实现效率跃升。针对航空零件复杂特征, 应采用特征分类与复合路径规划策略, 将车削、铣削、钻削等工序集成于单次装夹内完成。整体叶盘类零件可同步完成轮毂车削与叶片铣削, 减少基准转换误差, 使装夹次数从5-7次降至1次, 非切削时间压缩60%以上。刀具路径设计需突破传统分层加工思维, 利用五轴联动优势开发连续螺旋铣削路径, 避免Z向分层导致的空行程。通过CAM软件模拟优化刀具姿态角, 使有效切削时间占比提升至85%。针对钛合金难加工材料, 采用变进给率策略, 结合在位检测数据动态调整参数, 当材料硬度波动时自动补偿进给速度, 使切削效率提升40%。冷却方案创新是释放加工潜力的关键。高压冷却技术(压力 > 7MPa)可突破传统冷却边界, 使冷却液有效渗透切削区域, 降低刀具磨损35%; 针对深腔特征加工, 设计定向冷却通道, 结合MQL微量润滑技术, 减少冷却液用量90%的同时提升表面质量。通过热-力耦合仿真预测温度场分布, 优化冷却介质喷射角度, 避免热影响区扩大导致的残余应力问题。工艺参数需建立动态反馈机制, 利用声发射传感器与振动监测系统实时采集加工信号, 构建数字孪生模型预测最优参数组合。当监测到颤振征兆时, 系统可自动降速10%-15%, 避免停机调整。通过机器学习算法积累工艺数据库, 形成材料-刀具-参数的智能匹配模型, 使编程时间缩短50%, 新工艺验证周期从数天压缩至数小时。工艺优化需与检测技术深度融合, 在位测量功能可实时补偿加工偏差。对框架类零件交叉孔系, 采用触发式测头自动检测孔位坐标, 通过数控系统修正刀具路径, 使同轴度误差控制在0.015mm以内, 减少手工返修量80%。

3.2 合理选择刀具

(1) 针对钛合金、高温合金等难加工材料, 刀具材料需选用高韧性硬质合金或陶瓷基复合材料。超细晶粒碳化钨基体结合纳米涂层可提升抗弯强度40%, 在断续切削中保持刃口完整性; 聚晶金刚石(PCD)刀具加工铝镁合金时, 能显著降低塑性变形, 使表面粗糙度直接达到Ra0.4 μ m, 省去手工抛光工序。(2) 刀具几何参数需与加工特征深度耦合。车削薄壁件时, 大前角(15°-20°)配合负倒棱设计可降低径向力35%, 减少变形风险; 铣削复杂曲面时, 变螺旋角立铣刀通过优化切屑排出路径, 使进给速度提升25%而不增加振动。刀具直径与长度比值需控制在1:3以内, 避免深腔加工中的颤振问题。(3) 涂层技术需针对具体工况选择梯度化方案。高速加工钛合金时, TiAlN/AlCrN多层复合涂层可在120m/min线速度下保持刀具寿命超过80件次; 针对高温合金的高温特性, 热化学稳定性更强的TiCN/Al₂O₃涂层可减少氧化磨损, 使单次磨刀周期延长50%。通过有限元仿真预测涂层应力分布, 可避免剥落失效风险^[3]。(4) 刀具结构创新是提升效率的关键。可转位刀片与模块化刀杆设计使换刀时间从传统焊接刀具的20分钟缩短至3分钟; 多刃刀具的集成化设计(如8刃面铣刀)可单次进给完成粗精加工, 金属去除率提升60%。智能刀具系统通过内置传感器实时监测磨损状态, 结合数控系统预警功能, 使换刀决策准确率超过95%, 避免非计划停机。

3.3 改进数控编程

数控编程的革新是释放车铣复合机床效率的关键, 需从策略、算法与工具集成三个层面突破。针对航空零件复杂特征, 应采用特征驱动的自动化编程技术, 通过几何拓扑识别自动规划复合加工路径, 同步生成车削螺旋线与铣削变轴轨迹, 使编程效率提升60%以上。刀具路径需突破分层加工范式, 采用连续五轴联动策略, 结合NURBS插补生成平滑轨迹, 减少空行程并提升表面质量。整体叶盘加工中, 螺旋插铣策略使金属去除率(MRR)提高45%。加工参数需实现动态自适应调整, 基于材料硬度模型与刀具状态构建耦合优化算法, 使切削效率提升30%。振动监测系统实时修正进给量, 避免颤振导致的降速或停机, 效率较保守参数提升25%。仿真验证贯穿全流程, 数字孪生技术预测碰撞、过切与变形风险, 热-力耦合仿真优化冷却策略, 减少试切次数80%。后置处理需与机床特性匹配, 开发专用处理器优化运动学逆解, 减少非必要轴运动。集成路径压缩技术缩短代码量30%, 提升控制器响应速度。编程与检测技术深度融合, 在位测量数据自动补偿偏差, 例如槽系加工中实时修正路径, 位置精度提升0.02mm。

3.4 加强机床设备管理与维护

(1) 加强机床设备管理与维护是保障车铣复合加工效率与精度的基础,需构建全周期管理体系以支撑高强度生产需求。航空零件加工对设备稳定性要求严苛,应通过数字化手段实现维护模式的转型升级。建立设备健康档案,集成振动监测、热变形补偿与主轴电流等实时数据,利用边缘计算分析运行状态,将预防性维护比例提升至85%以上。某航空制造企业通过部署振动传感器网络,成功将主轴突发故障率降低60%,使设备综合利用率(OEE)从68%提升至82%。(2) 智能诊断系统可自动识别刀具磨损、导轨润滑不足等潜在风险,结合历史维修数据库推荐处置方案。采用增强现实(AR)辅助维护技术,使技术人员通过头盔设备获取实时指导,复杂故障处理时间缩短40%。设备保养需突破传统周期性模式,通过油液分析技术动态调整润滑周期,钛合金加工中心采用微量润滑(MQL)系统后,冷却液用量减少90%而刀具寿命延长50%^[4]。(3) 备件管理需建立安全库存模型,结合供应商协同平台实现关键部件的即时供应。对进口五轴转台等关键组件,采用3D打印技术制造替代零件,使等待时间从4周压缩至72小时。

3.5 引入智能监控系统与动态优化

在车铣复合加工全流程中嵌入智能监控系统,通过物联网(IoT)技术集成振动、温度、声发射等多源传感器,实时采集加工数据。结合人工智能算法构建数字孪生模型,动态预测刀具磨损、颤振风险及表面质量波动。某钛合金结构件加工中,系统通过深度学习识别切削力波形异常,提前0.5秒预警颤振趋势,自动调整主轴转速与进给量,使稳定切削域拓宽30%。开发自适应加工模块,根据实时数据动态优化加工参数。对高温合金深

腔特征加工,系统通过热-力耦合模型预测温度场分布,自动调整冷却介质喷射角度与流量,使热影响区减少50%,残余应力降低20%。在位检测数据与工艺数据库联动,当检测到材料硬度突变时,系统自动切换至预存参数组合,避免停机调整,效率提升25%。构建加工过程数字档案,通过大数据分析积累工艺知识。某航空制造企业通过聚类分析发现,采用特定刀具路径与冷却策略组合时,铣削效率提升40%且刀具寿命延长60%,据此形成标准化工艺包推广。

结语

综上,车铣复合机床在航空零件加工中展现出了独特的优势,但其效率提升仍需关注多方面因素。通过优化加工工艺、合理选择刀具、改进数控编程等措施,可以显著提升加工效率。加强机床设备管理与维护,确保设备处于最佳状态,也是提高加工效率的关键。引入智能监控系统与动态优化技术,将进一步推动车铣复合机床在航空零件加工中的应用与发展。未来,随着技术的不断进步,车铣复合机床的加工效率将有望得到进一步提升。

参考文献

- [1]于福瑞.激光复合车铣加工关键技术研究[D].黑龙江:哈尔滨理工大学,2023.15-19.
- [2]石嘉平.数控车铣复合机床的编程技术分析[J].集成电路应用,2024,41(2):380-382.
- [3]马蕾,李嵩松,丁宾,等.数控车铣复合机床精度检验项目分析[J].金属加工(冷加工),2023(4):61-64.
- [4]曹旭妍.微型车铣复合机床设计及虚拟仿真加工研究[J].机械设计与制造工程,2021,50(10):29-32.