

基于在线测量的盘轴类零件镗铣加工编程技术研究

Technical Research of Boring and Milling Programing Based on On-Line Measurement for Discs and Shafts

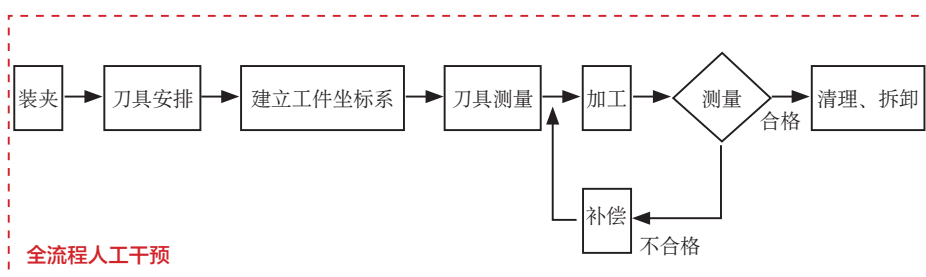
■ 韩健 吴海涛 何昊 葛守兴 焦江涛 杜大成 周宝辉 夏野 张栋 赵磊 刘星/中国航发西航

通过对加工中心在线测量系统进行深入研究，完成盘轴类零件自动化、数字化镗铣加工技术的方案设计、技术提升和流程优化，从而保证零件加工过程的高效性、准确性和安全性。

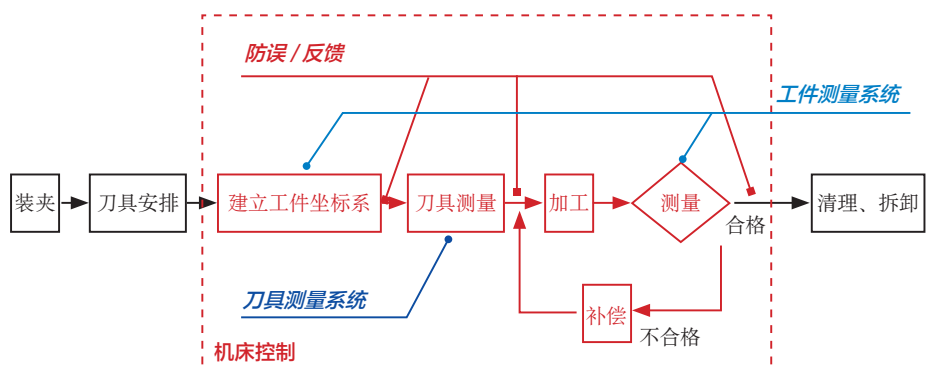
盘轴类零件是航空发动机转子的关键组成部分，具有结构特征复杂、加工精度要求高、材料加工难度大等特点，多采用高精度、高效率的数控加工技术。而在实际加工过程中，工序前的装夹找正、工序中的测量补偿、刀具更换以及工序后的停机检测和刀具检查占据了大量的加工时间。传统加工及检测手段不仅没有将机床的自动化功能充分发挥出来，还影响了零件加工效率和设备利用率，甚至还可能因为过多的人为参与而导致产品加工质量的降低。中国航发西航的创新团队，利用数控加工在线检测技术，使原先由人工完成的工件找正、试切、刀具磨损（破损）检测所耗费的生产准备时间减少了50%以上。

在此基础上，结合盘轴类零件加工特点对数控机床测量功能进行二次开发，完成测量程序深度定制，搭建模块化程序结构，最终形成涵盖初始模型重构、刀具

信息决策、加工测量数据在线采集与响应的深度集成数字化编程技术，在一定程度上实现“无人干预”加工，改进前后的加工流程如图1所示。



(a) 改进前



(b) 改进后

图1 改进前后的镗铣加工流程

总体方案和控制流程

项目以数控机床在线测量系统为主要研究对象，在对盘轴类零件典型结构特征进行分析的基础上，使用工件测量系统及刀具测量系统对传统加工过程中人为数据提取和处理的环节进行置换，并在其中关键节点引入防错、反馈机制。在

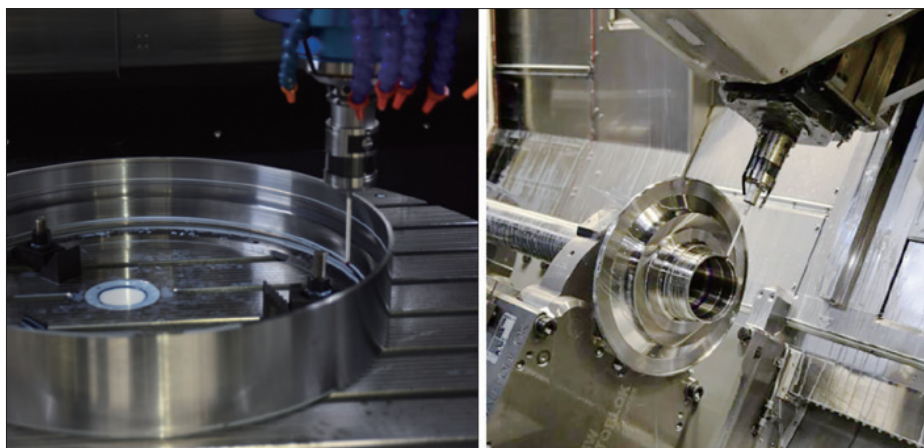


图2 盘轴类零件的加工前模型重构测量

基准面以及对后续加工有干扰的关键特征进行测量，构建零件初始加工模型并进行判断，消除装夹状态和零件个体差异的影响，如图2所示。对于基准面倾斜的工件，通过构建基准平面并计算其法向量 N ，将法向量与水平面的夹角分解至机床A、C轴上，最后旋转A、C轴将零件调整至理想状态。对于带榫齿结构的盘轴类零件，编程控制测头对榫槽轮廓重复进行测量—对正—复核的操作过程，从而完成轮盘榫槽角向的校正，如图3所示。

刀具机内自适应测量与监控

如图4所示，在使用刀具测量系统时，机内对刀仪将采集到的刀具最大回转轮廓的长度和半径作为刀具实际长度和半径写入刀具列表中。若刀具装夹偏摆量过大，测得的刀具参数将偏离刀具半径实际值。另外，已使用的刀具上黏结铁屑、冷却液等细小杂物对刀具测量结果也有一定影响。为解决此类问题，在测量刀具前，须编程控制高压冷却液对刀具进行冲刷，并用压缩空气吹干。测量时根据加工部位的尺寸要求和刀具自身状态自动选取合适的测量参数，配合防误程序对刀具参数进行限定。对于较精密的孔、槽加工，采用柔性夹头或液压刀柄代替卡簧进行装夹，避免因刀具装夹造成的装配误差，减小刀具偏摆。加工完成后，编程控制刀具测量系统对刀具磨损状况进行评价，配合程序中的计数器对刀具寿命进行管理。如果刀具超出设定的加工时长或加工次数，程序自动调取备用刀具加工。通过上述方案的实施，可以有效加强刀具使用过程中的监控，提高产品加工过程的自动化水平。

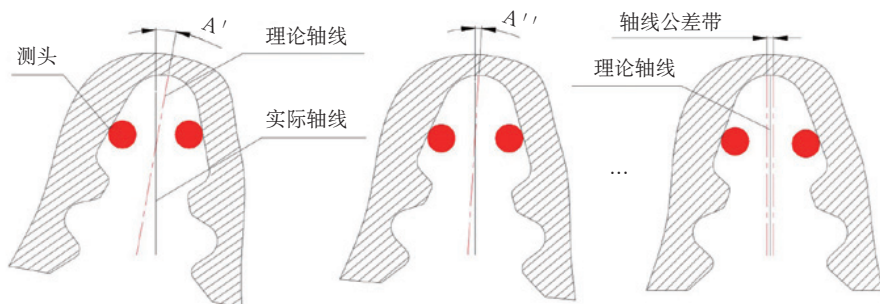


图3 榫齿找正原理示意图

关键技术实施情况

盘轴类零件模型重构程序设计

盘轴类零件在夹具限位作用下，工件坐标系在微小范围内波动。因

此，将测头坐标系附着在夹具上，以此为基准建立测头工作初始坐标系，可切实解决测头运动无参照的问题。加工前，对零件的基准圆、

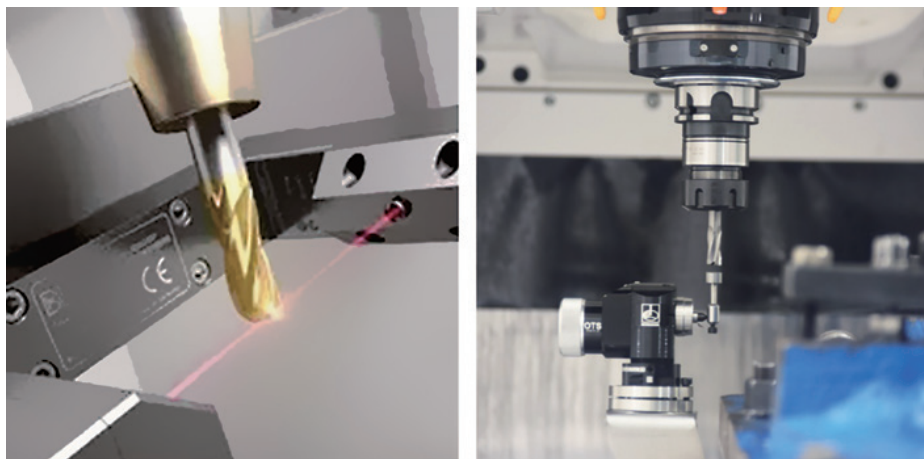


图4 刀具在线测量

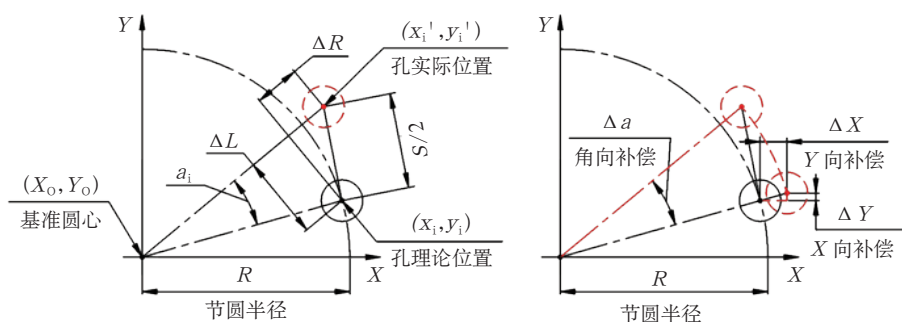


图5 位置度补偿示意图

误差自动补偿与反馈

对于批产盘轴类零件，工序一般安排有固定装夹方案，基准零点一般在一定的误差范围内波动。通过基准零点误差判别防错，可有效避免测量过程中由于装夹状态、异物黏结等因素造成的测量误差。在零件加工过程中，零件受环境温度、材料应力、机床精度、刀具磨损等综合因素的影响，加工过程处于波动状态。使用工件测量系统可在加工过程中对零件状态进行实时监控，并根据测量数据的分析、判断、反馈对零件加工参数进行修正，进而解决传统加工中靠工人经验和机床精度保证尺寸及形位公差要求的问题。尤其是对于一些高价值零件，能够即时掌握零件状态、保证产品的加工质量。

以孔位置度偏差补偿为例，零件在钻镗孔过程中，孔的位置度公差带是以孔理论位置为中心，公差值 S 为直径的圆形区域。如图5所示，孔的基准坐标实际位置为 (X_0, Y_0) ，被测孔的孔中心理论位置为 (x_i, y_i) ($i=1, 2, 3, \dots, n$, n 为被测孔数)，实际位置为 (x_i', y_i') ，则孔实际位置与理论位置径向偏差 ΔR_i 与周向偏差 ΔL_i 算术平方根最

大值的 2 倍即为孔位置度的实际值 S_{max} 。通过在基准坐标系下对孔位置进行修正，可以实现孔位置的自动补偿。

模块化在线测量程序设计

加工中心在线测量系统是构成数控机床质量保证体系的一个重要环节，它将加工和检测集成在一起，减少了测量时间。但利用这种方法测量零件，其检测程序的编制往往含有大量的参数赋值、循环嵌套和逻辑判断，编程工作量巨大。因此，将模块化的编程思路引入到在线检测中，将零件的被测要素分解为点、线、面、圆孔、圆柱、凸台、凹槽、球体等基本几何特征，完成基本特征要素的分解、组合、嵌套及数学模型构建；实现基于系统高级编程语言的逻辑判断及设备系统参数的调取、运算、覆盖，并在满足检测精度的同时提高检测效率；自行开发出针对孔径、宽度、角度、位置度、对称度、垂直度等设计要素的模块化测量程序；利用参数对模块化程序赋值调用的方法，生成所需要的实际测量程序，由控制加工中心自动完成测量任务。对于复杂零件，该方法可以极大减少编程量，提高测量效率和准确性。

数字化编程技术的深度集成

在线测量技术的实际应用对数控加工流程产生了非常大的影响，主要体现在测量与加工的即时监控和反馈上。因此，通过在线测量技术的应用，将测量和反馈合理地安排在数控程序中，梳理出自动化加工的基本架构和编程流程，同时通过测量数据的运算对流程走向和结果进行判断，避免程序错误和死循环。在此基础上，基于测量和补偿数据的分批次、分类型统计，完成数模偏差、变形趋势、补偿修正等过程数据的积累，建立盘轴类零件镗铣加工数据库，进而发展出以数据为引导的深度集成的人机交互编程技术。简化了制造流程，使生产流程扁平化，大大提高了生产效率。

结束语

创新团队通过基于在线测量的盘轴类零件镗铣加工编程技术研究及加工试验，掌握了过程自适应、精度自保障、数据自集成的数字化镗铣加工技术，优化了典型工序的加工流程，提高零件加工过程自动化，为难加工和不易测量零件的生产提供更优化的加工解决方案。该技术在航空发动机涡轮盘、风扇盘、涡轮轴等零件中推广应用，缩短停机等待时间 50% 以上；零件加工效率提高 20% 以上。同时，实现了加工与测量的即时交互，为弱刚性零件、科研试制零件的交付提供了较为灵活的加工解决方案，零件测量过程与加工质量稳定；大幅减少加工过程中人为干预，降低劳动强度，并实现“一人多机”。

航空动力

(韩健，中国航发西航，工程师，主要从事盘环类、轴颈类零件的工艺设计工作)