航空制造智能化技术与装备探索

■ 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司 （辽宁 110043） 杨金发 李家永 董 超 赵天杨
■ 中国航发沈阳发动机研究所 （辽宁 110015） 梁宏坤

摘要：以智能制造国外发展状况为切入点，探索提高航空发动机制造技术水平的有效途径。

高级工程师 杨金发

航空发动机是大国的战略性产业，航空发动机作为当代前沿理论和技术的集成者，一直是大国争雄的核心领域之一，是关系到国家安全、经济建设和科技发展的支柱产业，是一个国家综合国力、工业基础及科技水平的集中体现，对国家安全和发展具有全局意义和深远影响。新一代航空发动机大量采用高性能、轻量化复杂薄壁整体结构，以最小结构自重满足高性能比要求，其服役性能对制造偏差和应力集中极为敏感，对零件表面完整性、工艺过程质量可靠性和一致性要求极为苛刻。航空发动机对机床设备要求是具有数字化和前沿性的特征，软件功能强大，自动化程度高。柔性：设备通用程度高，生产适用性强。集成性：减少附加设备，设备高度集成，简化工序。精度：设备需具备精度高、精度保持时间长和技术成熟度高等特点。稳定性：故障率低。高的动态特性：瞬间达到高速和在高速运行中瞬间准停；高的控制精度、高的定位精度和重复定位精度以及较长的服役精度。

国外航空发动机

1. 智能制造国外发展状况

智能制造是在网络化、数字化基础上融入人工智能和机器人技术形成的人机物深度交互与融合的新一代制造系统。先进材料和制造技术保证了新材料构件及新型结构的实现，使发动机自重不断减轻，发动机的效率、使用寿命、稳定性和可靠性不断提高。智能加工技术已是现代高端制造装备的主要技术特征与国家战略重要发展方向。

智能化是节约人的脑力，智能化充分体现了知识经济的价值，它是在数字化、自动化的基础上发展的，是更前沿的阶段。智能制造要求能准确感知企业、车间及设备的实时运行状态。对获取的实时运行状态数据进行快速、准确的分析。执行决策，对设备状态、车间和生产线的运行做出调整。按照设定的规则，根据数据分析的结果，自主做出判断和选择。国外正在发展的精度、效率与系统成本的智能控制系统，成为提升企业竞争力的重要手段。产品个性化、定制批量化、流程虚拟化、工厂智能化和物流智慧化将成为新趋势。

2. 智能机床

数控机床是由各种功能部件在床身、立柱等基础机架上集装而成的，功能部件是数控机床的重要组成部分。数控机床整体技术与数控机床功能部件的发展是相互依赖、共同发展的，所以

功能部件的创新也影响着数控机床的发展。智能机床是充分发挥人工智能的作用，借助传感器、软件和大数据，在机床稳定可靠的基础上，实现机床对不同情况进行自主决策。例如将传感器及智能诊断和决策软件集成到机床中，通过实时补偿，实现高精度保持性。将编程、计划管理、刀具管理和远程监控等几个软件集成在一起，实现网络化制造，大大提高机床利用率。国外如德马吉的机床已经可实时监测机床振动。其把机床的振动分为几个档位。当机床振动达到一定程度时，就会立即停止机床运行，使机床和零件得到有效地保护。

智能技术还能监测机床温度升高引起变形的情况，即热伸长。热伸长影响加工精度，可能导致加工零件变成废品，而智能技术在自动检测到潜在问题后，能通过数控机床进行温度补偿，仍然加工出合格的产品。在智能技术下，机床还可通过加工程序的设置，实现按照最好的产品质量水平或者最大生产率运行。

智能机床的主要功能包括：自动抑制振动、自动测量和补偿、自动防刀具和零件碰撞、自动补充抑制噪音、人机对话数控系统、数控加工工艺过程模型 、加工过程仿真与优化、薄壁件加工变形控制和在机测量技术等。其中“主振动抑制控制”可将振动减少至最小，提高零件加工精度与表面加工质量；“智能安全屏障”可防止零件和部件碰撞或干涉，在发生碰撞和干涉前瞬间能自行停止运动；“虚拟加工”可对零件程序模拟加工，检查零件加工程序可能出现的干涉；“语音提示”可通过语音向操作者提示作业，减少或避免因操作失误而造成损失。

3. 智能制造的实践与探索

在零件加工过程中将加工刀具、加工参数和走刀路线在程序中设定并固化，以达到整个加工过程不需人为调整就能加工出合格零件的方法，称为全过程无干预技术。这种加工方式在国外的发动机制造行业已得到广泛的应用，相对于传统的数控加工模式，全过程无人干预数控加工技术的特点就是无人干预，是数控机床高智能化加工的完美体现。全过程无干预技术通过流程程序对包括装刀、换刀片在内的每一个细节流程进行控制，从而保证加工过程的规范性和稳定性。设备、工装：做好工装、辅助件的规范化管理及设备的维护保养，为数控加工全过程提供硬件基础，保证加工系统的稳定性。采用在线测量尺寸前，通过校对测量基准，消除装夹、主轴热膨胀等影响测量结果的随机误差，保证测量的准确性。机床加工零件所需的卸刀、装刀、主轴预热和机内对刀等所有动作都由流程程序控制，工人只需按照流程程序运行过程中的信息提示，完成必要的辅助操作，就能保证零件后续加工不间断进行。无人干预数控加工程序要达到以下几点要求：刀具不需人选择、路线不需人改变、参数不需人调整及尺寸不需人测量。

前3点要求已经可以通过固定的编程模式得以实现，而第4点要求则分为两种情况，一是加工尺寸精度要求不高的零件，可以由机床自身的精度保证零件尺寸合格。二是加工尺寸精度要求较高的零件，就不可以只靠机床精度了。我们可以利用测头测量零件实际加工尺寸，再由程序根据实际测量值继续上刀加工，直至尺寸合格。但如果有的立式车床现在还没有测头，不具备在线测量的功能，就需要工人测量精度较高的尺寸。可以在程序中调用工

车铣复合加工机

先进刀具

（下转第10页）

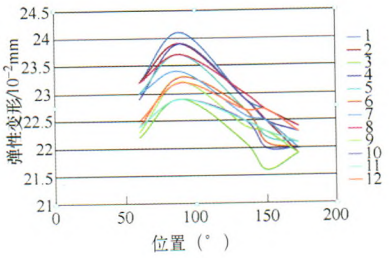

图7　数据拟合曲线

通过对合理工装选择准则（最大弹性变形量尽量小、不同位置变形量均匀）分析上图变形量曲线，第1、2、4、5、7和第8组零件的最大变形比较大，造成不同位置的变形变化量大，其他的试验组数基本符合合理工装选择准则。

4. 试验验证与结果对比

在机匣零件加工中，根据刀具运动轨迹情况，对实际变形数值进行采集，如图8所示。

图8　现场加工状态与数据采集图

零件在径向、轴向变形测量数据如图9、图10所示。

根据传感器标定的电压变化与位移变化的关系，计算出加工变形测量结果与理论计算如表4与表5所示。

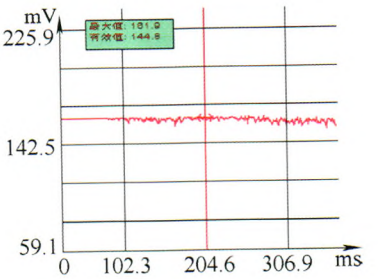

图9　径向变形量引起电压变化

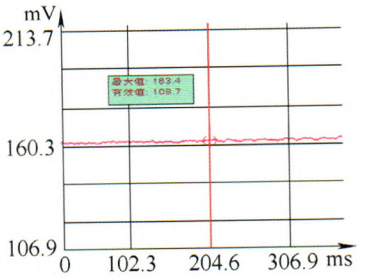

图10　轴向变形量引起电压变化

从表4与表5中可以看出，不管是径向还是轴向变形，其实际测量值与理论计算值之间的差距最大为0.008 75mm（3.375－2.500），最小为0.005 71mm（3.411－2.840），说明实验测量得出的数据与理论分析数据一致，是正确合理的。

表4　实验测量结果

变形方位	径向	轴向
应变(10^{-2}mm)	3.375	3.411

表5　有限元计算结果

变形方位	径向	轴向
应变(10^{-2}mm)	2.500	2.840

5. 结语

合理的工装参数对航空发动机薄壁零件的加工及其重要，本研究以机匣薄壁零件为载体，分析了工装设计中的定位、支承、夹紧的位置、数量、力的大小和作用力面积等因素对加工变形的影响，并通过试验　验证了分析的正确性，为此类型零件的工装结构设计与工艺加工参考，提供了重要依据。

参考文献：

[1] 王聪梅．航空发动机典型零件机械加工[M]．北京：航空工业出版社，2014.

[2] 《航空制造工程手册》总编委会．航空制造工程手册[M]．北京：航空工业出版社，1997.

[3] KOJH，Altintas Y．Time Domain Modal of Plunge Milling Operation[J]．Machine Tolls&Manufacture，2007(47)：1351-1361.

MW（收稿日期：20170803）

（上接第1页）

人输入的测量值，再编制防错语句判断工人输入值的正确性，若输入有误可提醒工人重新输入，起到防止工人出错的目的。

4. 结语

更加自动化、智能化和系统化的加工设备将会是未来工业发展的主流方向。我们应加强产、学、研和用的有效结合，探索基于机床-刀具-零件-工装形成的工艺系统，开展协同制造技术研究，实现工艺过程准确预测和精确调控，保障零件制造过程质量精度一致性和工艺过程的可控性。

参考文献：

[1] 王聪梅．航空发动机典型零件机械加工[M]．北京：航空工业出版社，2014.

MW（收稿日期：20170726）