

# 航空发动机数控技术现状及发展趋势分析

■ 中航工业沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司 （辽宁 110043） 郑艳铭 卢成玉 孙洪昌

**摘要：**本文对国内外航空发动机制造行业数控加工技术的现状进行了分析，对目前存在的问题进行了详细的论述。同时介绍了各种数控新技术，并就数控技术的发展趋势进行展望。



高级工程师 郑艳铭

1952年，世界上第一台数控机床诞生了，这标志着人类在制造技术上进入了新的时代。历经半个多世纪的发展，数控技术已经成为航空发动机制造的关键技术。数控技术的进步和发展使航空发动机的设计理念发生了转变，零件的设计逐渐向整体化、复杂化和精细化方向发展，这也对数控技术的发展提出了新的要求和挑战。

## 1. 现状分析

（1）数控设备基本普及，但自动化程度不高。提到数控技

术，人们往往首先想到数控机床。国内发动机零部件65%以上都实现了数控加工，目前在用的普通设备主要是考虑加工类型、加工能力及设备利用率等问题，随着时间的推移，普通设备被数控设备代替是必然趋势。

国内尽管已经普及使用数控设备，但是在自动化程度上跟欧美先进发动机制造企业相比，差距还很大。整个数控加工过程如零件装夹、加工和换刀等都需要操作人员进行繁琐的操作，而像罗罗公司、GE等知名公司，航空

用维护队伍的建设，摒弃“习惯了就是好用，不习惯就是难用”的观念，唯有用好方可产生最佳效益。

如何才能从国外数控系统的习惯应用中快速跳至国产数控系统的娴熟使用呢？笔者认为，一是操作者认真学习机床制造商提供的系统操作说明书，要像试玩游戏一样接受其画面操作；二是维修者仔细研读随机资料，善于

借助网络和电话求助，能够按照“机床故障→看报警说明书/维护说明书→阅电气说明书/机械说明书（含液压、气动原理图）→查参数说明书→调参数换配件”的顺序进行故障排除，系统故障时咨询系统制造商，机床故障时咨询机床制造商；三是系统制造商应像SIEMENS公司一样加大其官网的资料容量，提升知识共享性和公开性；四是机床制造商应强

化售后服务队伍，建立故障立即反应机制，嵌入远程诊断软件。

## 参考文献：

- [1] 刘胜勇. 数控机床FANUC系统模块化维修[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
- [2] 刘胜勇. 数控机床SINUMERIK系统模块化维修[M]. 北京：机械工业出版社，2014.

**MW**（收稿日期：20170209）

零件的加工过程普遍实现了高度专业化、信息化和自动化,基本实现了全过程无人干预,对关键零件的加工也已经实现了过程监控。

尽管拥有大量的先进数控设备,但是由于发动机零部件较之其他零件结构复杂,材料加工性差,同时由于加工过程中人工干预较多,造成了生产效率低、加工成本高的尴尬局面。

(2) 国产数控系统发展滞后。国际上最大的数控系统生产商是日本FANUC公司,1年生产5万套以上数控系统,全球市场占有率约40%左右;其次是德国的西门子公司,全球市场占有率约15%以上;再次是德国海德汉、意大利菲迪亚、法国的NUM以及日本的三菱、安川等。国产数控系统厂家主要有华中数控、北京航天机床数控集团、北京凯恩帝、北京凯奇、沈阳艺天、广州数控、南京新方达及成都广泰等。

由于航空发动机零件结构复杂,技术要求高,国产数控系统和机床部件难以保证加工要求。目前国内航空发动机企业使用的数控设备80%以上使用的是进口数控系统。而设备的功能部件国内市场总体占有率也仅仅为30%左右,这无疑使我们的加工成本大大提高。

(3) 计算机辅助软件促进数控技术发展。近些年来,计算机辅助软件技术的出现大大促进了数控技术的飞速发展。各种商用计算机软件越来越完善,一些通用软件功能越来越强大,如UGNX、VERICUT、CATIA和

PROE等。还有一些专用软件,比如叶片叶轮类零件就有诸多专用的软件,如OpenMind公司的HyperMill、美国STARRAG公司的STARRAG程序、美国Concepts NREC公司的MAX-PAC以及意大利Ferrari的TS80系列等,这些软件不仅针对特殊类型的零件具有造型功能,还具有精确的复杂曲面编程功能,这些专用软件的出现,大大加快了复杂叶片型面的加工过程。

(4) 关键技术成熟度低。数控技术已经不仅仅局限于单纯的机械加工,而是包含电火花加工、电化学加工和激光加工等特殊加工方式,由于数控技术的发展,都已经实现了数控加工。发动机零部件从毛坯到过程制造、再到装配,整个产品生命周期处离不开数控技术。尽管数控技术已经涵盖发动机加工的各个领域,但是我们在一些高精尖技术的掌握成熟度上,与国际先进水平相比,还存在很大差距。尽管有一些关键技术在典型零件上取得了很大进步,如整体叶盘的数控加工技术。但是很多技术在拓展应用的过程中仍然存在很多问题,需要继续开展研究工作并成熟掌握,如高速高精运动控制技术、动态综合补偿技术、多轴联动和复合加工技术、智能化技术以及薄壁零件变形控制技术等尚需进一步突破。

## 2. 发展趋势

近些年来,航空发动机型号研制任务越来越多,发动机的性能不断提高,零部件的结构设计也越来越复杂,零件精密度越来越

越高,同时有很多新型材料应用在新机种上。这些变化给发动机数控加工提出了新的要求。未来数控加工技术必须在以下关键技术上开展重点研究工作,才能使航空发动机的制造技术得到迅猛发展。

(1) 高速切削技术。很多整体结构的零件从毛坯状态到加工成零件,金属去除率达75%以上。随着型号研制任务的增多,急需采用高效的数控铣切加工技术。高速切削主要是通过较高的切削速度,实现较高的表面质量和加工效率。

高速切削与常规切削相比具有明显的优点:加工时间减少约60%~80%,进给速度提高5~10倍,材料去除率提高3~5倍,刀具寿命提高70%,切削力减少约30%,工件温升低,热变形、热膨胀减小,适宜加工细长、复杂薄壁零件等。高速切削需要通过高速切削机床来实现。通常主轴转速超过12 000r/min的机床才称之为高速机床。而目前高速切削所发挥的经济效益只有很小的部分。高速切削技术未来发展方向可以概括为以下3个方面:①更低的加工成本。这就要求降低机床投资成本,同时提高刀具的使用寿命,进一步提高切削速度,以减少加工时间。②更高的加工质量。高速切削将更多地应用于薄壁件的加工和微小精密零件的加工,同时尽量减少后续的打磨、抛光等修整工序,直接获得较高的表面质量。③更高的加工效率。要想获得较高的加工效率,必须对产品的加工工艺及工艺流程进行简化。

(2) 自适应数控加工技术。各种复杂自由曲面的加工和修复、精密零件的制造对数控加工提出了更高的要求,加工过程中刀具磨损、刀轴变化和机床振动等多种因素会引起零件变形、表面质量不好等不利现象的产生,如何对加工过程进行优化,尽可能地排除这些不利因素,多年来一直依靠人工经验来进行,稳定性差、效率低下。自适应技术的出现,使得这些问题通过自动化的手段来解决。如图1所示的自适应软件系统能够在运行过程中,实时收集系统和环境的变化信息,并根据预先设定好的策略,在必要时对自身的结构或者行为进行自动调整,以更好地适应外部环境和需求的变化。对于像整体叶盘等复杂型面的加工,自适应数控技术能够在加工过程中根据切削力实时优化切削的进给速度,在保证刀具不受损坏的前提下提高加工效率。

以色列OMATIVE公司1995年开发出投入实际应用的成熟产品——OMATIVE ACM自适应控制系统。OMATIVE自适应控制系统因其实用性效果显著,现已被国外许多著名公司如Siemens、Boeing和GeneralElectric等使用。

国内航空企业也陆续使用该产品,并开展响应研究工作。这种越来越少地依靠人工干预的自动化技术将成为未来航空发动机制造技术的发展趋势。

(3) 物理仿真技术。仿真加工是在计算机中通过虚拟的形式模拟加工过程,对加工过程中可能出现的问题进行预测。仿真加工可以分为几何仿真和物理仿真。在航空发动机制造企业,仿真加工目前基本停留在几何仿真阶段。几何仿真模拟的是机床的运动及刀具切削工件的过程,可以检查数控程序代码的正确性,避免机床在加工过程中产生过切、欠切和碰撞等不良现象的产生。同时对工艺顺序安排的合理性进行预评估。以VERICUT为代表的仿真软件在各大航空发动机制造企业已经得到广泛的应用,通过仿真加工,减少了机床上试切的时间,提高了机床的有效工作时间,同时降低了刀具、机床等的使用成本。

几何仿真的缺点是无法验证切削参数的正确性。目前只能依靠真实零件试切来获得。近些年新材料层出不穷,依靠真实零件试切造成了极大的成本浪费。因此急需开展物理仿真研究工

作。物理仿真通过模拟零件、刀具材料特性和装夹状态等,得到零件在加工过程中的受力、温度和应力等物理特性,从而进一步优化加工参数(见图2)。物理仿真实际上已经在设计部门得以应用,如力学仿真、温度预测等,同时也是借助ANSYS、DEFORM等专业的仿真软件来实现。美国TWS公司的AdventEdge FEM通过模拟数控加工程序,可以得到加工中的切削力、温度和功率等结果,并对NC程序中进给量及切削速度等进行优化。比利时的Morfoe可以预测零件变形及残余应力,并为制定工艺提供参考。对数控加工过程的物理仿真,主要是高等院校或专业研究机构应用各类型物理仿真软件进行理论研究,国内各大航空发动机制造企业也都只是处于刚刚起步阶段。由于缺乏大量的经验数据库的支撑,物理仿真将是一个艰难而漫长的研究过程。

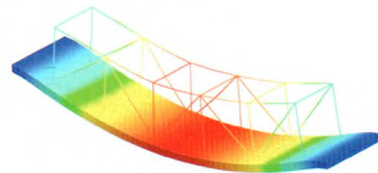


图2 物理仿真分析示例

(4) 多轴联动与复合化数控加工技术。航空发动机的零件结构复杂,加工工艺复杂,加工周期长。缩短工序、合并工序,减少装夹次数是缩短加工周期的有效方式,同时,由于产品设计要求越来越精密,很多技术条件必须一次装夹加工完成,才能满足设计要求。五轴联动铣加工中心(见图3)在各大大型航空发动机制造企业已经基本普及,但是,目

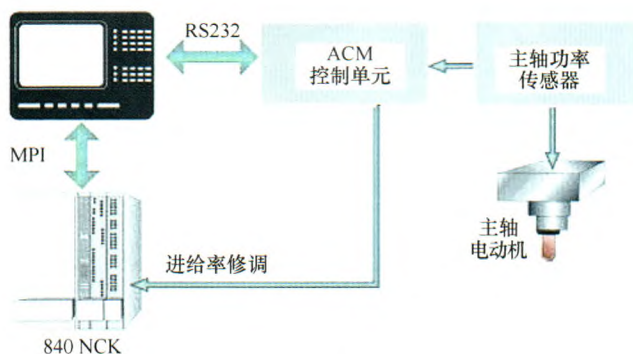


图1 自适应技术原理

前加工类型还仅仅是以铣加工为主。未来车铣复合和铣车复合加工中心的应用将越来越广泛。

车铣（铣车）复合加工是将两种不同的加工方式有机结合在一起，在一台设备上完成加工，是一种先进的制造技术，非常适合零件整体设计及制造的理念。复合加工技术使得复杂零件的加工变得更为轻松，同时也促进了零件结构的改进。但是并不是说一台车铣（铣车）设备能够完成零件的所有车加工和铣加工工序，这同样需要根据企业零件加工的特点，合理选择加工设备及加工工艺，充分发挥设备的有效利用率。目前国际上较为先进的车铣设备如德国德马吉GMX系列车铣复合数控机床、奥地利WFL车铣复合加工中心等在航空发动机制造企业越来越多地被使用。

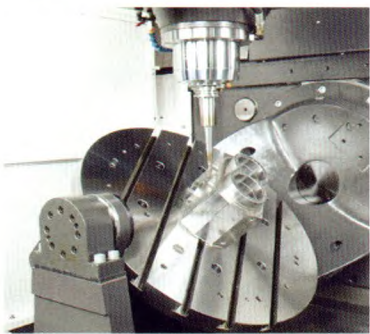


图3 五轴联动加工

（5）数控特种加工技术。特种加工是指利用电能、热能、光能、化学能和声能等进行加工的方法。主要用于高强度、高硬度、高韧性、高脆性、耐高温和耐磁性等难切削材料，以及精密细小和复杂形状零件的加工。随着数控技术的发展，这些技术也都已经实现了数控化加工。近些年数控特种加工在航空发动机零件的制造过程中发挥了越来越重

要的作用。实际上很多国外先进制造企业已经广泛应用这些技术，但是由于技术封锁，我们在关键技术的掌握上还需要进一步的努力。

很多难加工材料在机械加工中出现刀具磨损严重、加工应力大，变形严重等难以解决的问题，而特种加工不会产生强烈的塑性变形及切削应力，并且通过反复研究也能达到较高的加工精度。研究人员在难加工材料、精密小孔和复杂型面的加工上开展了大量的研究工作。例如，封闭型腔由于受铣刀悬臂限制，通过机械加工很难完成，而通过电火花成型数控铣就可以很轻松地完成加工。精密电解在整体叶盘的加工中也取得了一定的效果。电极的设计与制造以及加工参数的控制将是未来电加工研究的重点。

（6）在线测量应用技术。航空发动机制造企业使用的数控机床，很多都配备了在线测量系统，如图4所示。但是从目前使用情况来看，利用率较低。很多企业只是在典型零件的线性尺寸的测量方面开展过研究工作，并没有大面积地进行大范围的应用。究其原因使用过程中，由于缺乏应用经验没有充分体现在线测量的优势，测量方法选择不当、测量过程复杂、测量结果不稳定和测量精度差等严重制约了在线测量技术的发展。因此，随着数控技术的不断发展，解决在线测量的精度及检测效率将成为在线测量技术发展的重要趋势。高精度非接触式测量是未来的发展方向，结合在线测量技术，发展非

接触式在线测量能够大大提高测量效率。同时，在线测量技术能够充分发挥真空铣夹、柔性工装等先进装夹方式的优势，大幅度降低生产成本，提高生产效率。

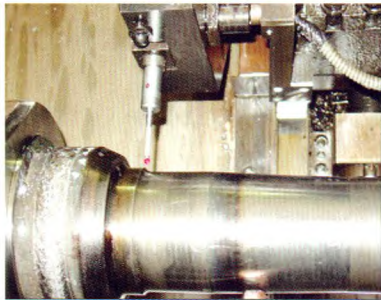


图4 在线测量

### 3. 结语

航空发动机行业数控加工技术的发展任重而道远。尽管我们的数控技术基本能够满足目前的生产需求，但是与国外先进制造企业的差距还很大，因此我们必须不断努力，缩小这种差距。同时发动机设计技术也在不断前进，零件设计逐渐向整体化、精密化方向发展，我们必须不断地更新数控技术才能满足产品的设计要求。未来的数控技术将更加的智能化和精密化。

### 参考文献：

- [1] 唐树群. 数控技术的进展及我国数控技术发展现状[J]. 科技视界, 2014 (2) : 214.
- [2] 李琳, 陈宏鑫. 数控技术研究现状及发展趋势[J]. 科技创业月刊, 2010 (9) : 85.
- [3] 李可. 我国数控技术的现状及发展趋势[J]. 中小企业管理与科技, 2012 (12) : 251.
- [4] 韩淑敏. 特种加工的几种方法介绍[J]. 煤矿机械, 2009 (6) : 116.

MW (收稿日期: 20170104)