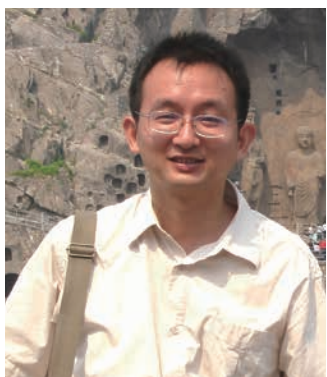


航空关键零部件制造工艺及未来 先进工艺发展趋势

■ 中航工业空空导弹院凯迈机电公司制造部主管工程师 刘仁春

摘要：航空航天制造业作为一个国家实力的体现，在“工业4.0”和《中国制造2025》的驱动下，毋庸置疑地成为了国家工业制造的核心产业。2016年是国家“十三五”规划开局之年，本文在总结现代航空产品制造特点和难点的基础上，结合本公司在智能制造方面的情况，综述现代航空产品的智能制造特点和未来发展的趋势，为航空制造业的同行提供帮助和借鉴。



现代航空产品的制造特点和难点

1. 航空产品制造加工难点

(1) 难加工材料切削应用：

航空、航天零部件常采用钛合金、高温合金及复合材料等难加工材料，如何保证零件的加工要求，既要有高的质量又要兼顾生产效率是航空制造企业面临的一个课题。

(2) 工艺及零件精度要求：

航空、航天零部大都采用复杂曲面和高结构效率的整体、轻量化结构，加工中为避免产生切削变形和提高效率，这对制造工艺以

及制造设备提出了更高的要求。如何在生产实际中解决这些问题，对航空工艺和加工设备提出了新的挑战。

(3) 过程控制及检测要求：

零件加工过程控制是对其满足设计尺寸特性要求而进行的一些检测等，检测的结果用来验证在制造中结果反映与设计要求的相符的一致性。而现在航空企业对工艺过程控制、零件表面完整性控制等环节比较薄弱。今后这方面是航空制造企业的改进方向之一。

2. 现代航空产品制造特点

(1) 产品高性能和精密化。

航空产品因为使用环境特殊，产品性能要求和可靠性要求高，产品在加工时使用钛合金、复合材料等特殊材料较为普遍。同时，多数航空零件几何外形复杂制造加工精度要求更高，测量要求也较高。

(2) 产品轻量化和大型化。

航空产品如发动机压缩机转子、飞机发动机叶片、飞机的整体舱

段、起落架、机匣和天线罩大量使用钛合金、高强度材料及高温合金等；同时在飞机机身、机翼上也广泛使用复合材料。这些材料的使用有航空设计中要求飞行器既要有高强度，同时零部件又必须质量轻；机翼壁板、梁、叶盘和发动机壳体要求整体结构加工，减少了不必要联接，增加了零件的整体刚性。这种零件大型化结构要求是大型飞行器和宇航工业零件设计和制造的需求。

(3) 产品数字化和制造过程的智能化。

航空产品零部件数字化设计及制造等先进制造技术，应用工艺CAPP和CAD/CAM软件；西门子公司Teamcenter三维工艺软件的应用柔性制造FMS技术也是发展的方向；基于数控加工工厂的数字化车间管理系统MES应用。航空产品零部件设计、制造及装配与装配协调关系要求简单、准确、协调，如柔性工装和自动化装配线及设备。

航空智能制造的应用

(1) MES生产制造执行系统是一种基于精益制造的航空制造企业在生产管理上的一种智能化系统(软件)。它的工作流程如图1所示。这种软件在生产中应用,极大简化了生产管理的流程,方便了全流程的监控管理对零件和产品的出产,可以按节拍进行管理控制,大大提高了管理的即时性和有效性。使用MES的用户,可以对下达的任务作出快速的反应,处理紧急任务有弹性空间,对生产流程做到精细化管理,帮助企业降低生产成本,缩短制造时间,提高产品质量。MES使用为公司生产管理带来了全新的管理模式,在科研试制及生产制造管理中效果较好。

(2) 《中国制造2025》和国家“十三五”规划的背景下,如何更好地发挥数控机床的作用?随着CAD/CAM技术的发展,机械制造业取得了飞速的发展,体现在航空航天产品的智能制造向着敏捷化、柔性化、数字化和网络化方向发展。但早期我国生产的数控系统及现有的数控改造系统,大多都不拥有大容量存储设备(硬盘)。随着复杂航空航天产品在计算机辅助设计/制造(CAD/CAM)的应用,公



图1 自动排产流程

司需要加工复杂零件产生的加工程序越来越大,早期的数控系统及现有的数控改造系统,大多都只有RS232串口通信功能,工人手工输入几乎不能完成这样的工作,即使完成这样的输入,也极易产生错误。因此需要解决数控程序的串口传输问题。

我公司结合实际情况立足自身开展技术攻关,解决了这个难题。其解决办法是在Microsoft VisualC++中编写串口通信程序,具体方法是使用Microsoft Communications Control的通信控件,只要通过对此控件的属性和事件进行相应的编程操作,就可以实现串口通信(注:具体技术细节可见后续在《金属加工(冷加工)》中的文章介绍)。利用该方法已经成功解决了公司所用数控机床的数控程序的串口传输问题。该成果获得了公司2015年度技术攻关一等奖(见图2),现已申报中航工业空空导弹研究院科技成果。

(3) 复杂航空航天产品智能制造需要对产品和零件加工进行过程控制及检测。其产品及零件向着轻量化、大型化和外形复杂化发展,零件加工过程中和完成后进行的一些检测,检测的结果用来验证在制造中结果反映与



图2 该技术成果公司获奖证书

设计要求相符的一致性。这样在零件工序过程中的在线检测和加工完成后的终检都有十分重要的现实意义。对于复杂的零件过程控制中我们需要是在加工状态下在机床上对其进行在线测量。这种要求反应在机床上就是使机床带有类似三坐标测量机的部分功能,从而能在线测量零件的尺寸,并将测量的结果通过机床的接口传输到网络,或者通过无线网络传输到主控计算机,对加工的各部尺寸进行监控记录;同时还可以对加工测量结果用质量软件 and 工具进行分析(见图3)。分析结果可以帮助我们找到对零件加工的工艺方案的优化和尺寸控制的策略。根据在线测量反馈结果及时将工艺调整方案在后续零件中应用。这样就可以较好地保持零件加工尺寸的一致性。零件完成后需要在要求更高的三坐标测量机投影仪等高性能的先进仪器上进行测量,以完成高要求的



(a)



(b)

图3 数控加工中心

测量需要。目前公司在这方面进行了部分尝试,实现了部分简单在线测量功能,如一些线性尺寸的测量。今后随着日益复杂的加工要求,这方面仍然是我们需要努力的方向。

现代航空制造中新材料、新技术、新工艺的应用分析

1. 现代航空制造业对材料的应用

目前航空装备向着轻量化方向发展,即材料必需具有高强度要求下材料要尽量轻。这与宇航工业和产品的工作环境及产品完成的各种任务要求有关。这样我们就会大量应用强度高、重量轻的材料,如钛合金材料、碳纤维;由于飞行器高速飞行产生大量的热,这就需要各种耐热材料,如耐热涂料、金属陶瓷等。为了延长取得航空器滞空时间,取得更好战术效果,提高能效比,需对未来超导材料、石墨烯材料、隐身材料进行研究和应用。另外,电子设备上使用纳米级大规模积成电路及相关电子产品,以提高处理信息的效率;用机载探测设备探测距离。

2. 现代航空制造业对机器人技术的应用

目前我国工业机器人主要是满足国内市场,而且主要应用于汽车行业,包括焊接、检测、搬运、研磨抛光和装配等复杂作业,在其他领域仍有发展的空间和市场前景。我们可以抓住《中国制造2025》和国家“十三五”规划中对工业机器人和航空制造

业支持,结合各自的特点,在航空制造业中发展机器人技术和数控机床技术,使其在制造、航空器装配上发挥机器人技术优点,提高航空产品质量和效率。

3. 现代航空制造业对高速加工技术的应用

高速切削技术具有加工效率高、切削负荷低、传入工件的切削热少及加工变形小等显著优点,20世纪90年代中期已成功应用于航空制造业,并取得了显著的经济效益。

飞机结构件中有很多薄壁件及难加工材料,在加工中极易产生变形。航空零件复杂,其加工余量大,结构件尺寸精度和表面粗糙度质量要求较高,高速切削加工飞机薄壁零件有助于降低切削力,减小切削变形,提高加工精度和加工效率。高速切削时切屑排出速度快,切屑可带走大部分切削热,使散热效率提高,减小工件表面的切削热。

4. 现代航空产品对3D打印技术的应用

3D打印技术实属于增材制造技术,它以低成本和短周期的特性,能满足制造中超大、超厚和复杂型腔等特殊结构及极其复杂外形的小型零件的加工需要,已经成为现代航空航天等产品制造工艺先进性的重要标志之一。

钛合金、高温合金和超高强度钢等大型复杂整体高性能金属结构件的激光(电子束)快速成型技术,以金属粉末为原料,通过激光熔化堆积,从零件数模直接完成全致密和整体复杂的高性能金属零件近净成型。与传统锻造技术相比,

具有无需锻造设备及锻造模具,材料利用率高、周期短、成本低、柔性高及相应快等特点,该技术在飞机、发动机等的研制中有着重要的应用前景。

美国RLM工业公司利用3D打印技术制造“爱国者”防空系统齿轮组件,其制造成本由原来传统工艺的2~4万元减低至1250美元。通用电气公司采用3D打印技术制造发动机钛合金零件,使每台发动机成本节省了2.5万美元。

叶盘是发动机中的重要部件,整体叶盘将发动机转子叶片和轮盘形成一体,可以简化结构,减轻质量,并可以提高气动性能。贵阳黎阳航空动力有限公司采用激光快速成型工艺,成功研制出了符合性能要求的钛合金整体叶盘。

大长径比、难加工材料薄壁壳体类零件自动化智能化制造的解决方案

我公司加工部分难加工零件,其是大长径比 $L/D > 10 \sim 15$ 、直径80~120mm、壁厚1~15mm的薄壁壳体类零件。材料为不锈钢、铝合金、钛合金和高强度钢,加工部位为筒状零件的外圆面和内表面,加工内容是在薄壁壳体外圆上开孔、加工窗口、攻螺纹及孔内壁反拉孔等,主要使用数控车、数控铣、线切割等设备。

该类零件加工的难点主要有3点:①加工材料特殊,多为难加工材料,刀具切削效率低、刀具寿命差,极易影响产品尺寸的一致性和外观质量。②大长径比 $L/D > 10 \sim 15$ 、直径80~120mm、

壁厚1~15mm的薄壁壳体类零件，在加工中容易变形，装夹测量困难。③零件加工部位几何尺寸及形状和加工要素相互之间位置公差要求较严。

解决方案：①粗车车削加工时考虑使用普通设备（普车）将零件内外圆余量去除，采用软包爪装夹零件外圆和内孔。②数控车半精车加工零件外圆和孔，编程实现方式有在线编程加工、计算机控制编程加工。选择软包爪装夹零件外圆和内孔。③中间热处理或时效工序改变材料组织结构、去除应力等要求。④数控车精车加工零件外圆和孔，编程实现方式有在线编程加工、计算机控制编程加工。选择软包爪装夹零件外圆和内孔。必要时在机床上安排测量软件和辅助侧头，完成对零件孔、外圆及形状位置公差的测量；也可以将零件取下，用专用的仪器检测。以上检测是为后续工序做技术上的准备工作。⑤数控铣或加工中心完成零件外圆上的孔、开窗、槽、螺纹和孔内壁反拉孔的加工等内容。装夹方式为自制夹具软爪、顶盖配合上数控分度头，对零件进行加工。加工过程中需要注意软爪夹紧零件时，力的大小要合适，防止零件变形；同时又要保证装夹零件牢固可靠。加工中编程需要考虑零件薄壁特性，在孔、开窗、槽加工数控编程中选择插铣等方式，减小切削力，减小零件变形。必要时需对切削力的大小用软件进行仿真，结合有限元的软件分析零件变形程度，确定铣切削的加工程序优化及切削参数的选配。加工完成后零件不要拆下，操作者将零件上的毛刺去干净后，在机床上测量软件和辅助侧头，完成对零件各加工部位几何要素尺寸、形位公差的测量，并将测量结果传输到计算机，进行处理和分析；计算机记录本批次加工零件的尺寸一致性、表面粗糙度值等要求。

参考文献：

- [1] 汤科，张维生，刘京威，等. MES关键技术在航天制造企业应用研究[J]. 新技术新工艺，2013（12）：10.
- [2] 李丙才，张宏良. 高速加工技术及其应用进展[J]. 新技术新工艺，2015（1）：18.
- [3] 王毅，王瑞新，邹林，等. 先进净成型技术在军工领域的推广研究[J]. 新技术新工艺，2013（12）：13.
- [4] 吕日红，樊国福. TC11钛合金整体叶盘应用3D激光快速成型技术研究[J]. 新技术新工艺，2014（3）：25-27.

MW （收稿日期：20160617）

ToolScope加工过程监控系统

ToolScope加工过程监控系统能够赋予机床智慧，自主地判断设备、装夹、加工过程和刀具是否正常，在发生断刀、撞刀等异常情况时立即控制停机，保证过程安全稳定。同时还能智能地调节进给倍率和判断刀具是否磨损，优化加工效率和降低刀具成本。

同时基于工业4.0的理念，ToolScope开放性地将机床及加工过程的信息数据化，融入集中的信息化管理软件和数字化工厂网络。



- | | | | |
|--|---------------|--|--------|
| | 加工过程监控 | | 碰撞监测 |
| | 自适应进给控制 | | 机床状况监控 |
| | 刀具磨损监控 | | 换刀日志记录 |
| | 加工过程质量监控及文档记录 | | 轮班日志记录 |
| | 工艺改进服务 | | 私有云服务 |

高迈特精密刀具（太仓）有限公司
江苏省苏州市太仓经济开发区苏州路5号
Tel: +86(0)512 5357 5758
Email: info.cn@kometgroup.com

◆广告 查询编号：3055



官方微信