

航空发动机产业的数字化应用

■ 中国重汽集团济南桥箱有限公司高级工程师 刘胜勇

摘要：国内航空发动机产业正面临着设计、材料、制造和试验的“四难”考验。本文从信息技术和工业技术渗透融合的角度出发，围绕智能制造生态系统的构建，介绍了机匣类、盘轴类和叶片类等零部件的数字化加工。



航空发动机素有“工业之花”的美誉，它既是航空器性能、可靠性和成本的决定性因素，也是体现一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一。美国、英国、法国和俄罗斯等国在策略上对内优先发展、对外严密封锁。处于自主研发征途上的国内航空发动机，正面临着设计、材料、制造和试验的“四难”考验。曾有人说：资本积累至一定程度，科技创新是迟早的事。但在航空技术发展领域内，先进高端技术买不来，创新能力更是买不来。若要拥有强劲“中国心”的中国动力飞上蓝天，国内航空发动机必须牢固树

立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念，全面落实《中国制造2025》和推进供给侧结构性改革部署，并按GB/T 23001—2017信息化和工业化融合管理体系要求，推进信息技术和工业技术的不断渗透与深度融合，全力打造智能制造生态系统，使发动机产业从工程信息化走向全业务信息化，真正实现生产数字化、产品智能化、管理精细化和产业先进化的“四化”目标。在此，笔者将介绍航空发动机上机匣类、盘轴类及叶片类等零部件加工的数字化应用。

1. 机匣类零部件加工数字化

机匣是航空发动机上最关键、最重要的部件之一，它是支撑转子和固定定子的重要部件，其制造质量对发动机的整体性能影响很大。机匣作为多岛屿复杂薄壁（最薄处仅2~3mm）的大型（外径1~2m）结构件，因设计结构的不同，主要可分为环形机匣和箱体机匣（如附件机匣）两大类。环形机匣可细分为整体环形机匣（如燃烧室机匣和涡轮机匣）、对开环形机匣（如压气

机匣）和带整流支板的环形机匣（如进气机匣和扩散机匣），如图1所示。受结构、材料和毛坯等因素的影响，这些机匣的加工工艺和配套设备有所不同，有的甚至相差很大。

在整体环形机匣中，较为典型的有压气机三级机匣、导向器机匣和涡轮机匣。毛坯为锻件的压气机三级机匣的常用加工路线为：毛坯→粗车削后端→粗车削前端内外表面→热处理→修复前安装边→车削后安装边→车削内外表面→磁粉探伤检查→最终检验。毛坯为锻件的低压导向器机匣的常用加工路线为：毛坯→粗车削大端→粗车削小端→热处理→修复基准→车削大端和内形面→车削小端锥面→镗削大端孔→钻大端孔及铰倒角→钻小端安装边孔→钻小端孔及铰倒角→铣削花边→去毛刺并清洗→最终检验。毛坯为锻件的涡轮机匣的常用加工路线为：毛坯→粗车削小端外形→粗车削大端内形→热处理→车削大端基准→车削小端→车削大端内形→铣削外侧环形槽→铣削外侧凸台轮廓→铣削外侧



图1 航空发动机上各型机匣的外观

凸台面→外侧凸台轮廓清根→铣削内侧壁环形槽→铣削大端内侧壁环形槽→大端内壁环形槽轮廓清根→大端内壁精铣T形槽→精车削基准→精车削大端→去毛刺并清洗→最终检验。

对比上述3种整体环形机匣的加工路线，数字化应用方面存在某些相同之处。

(1) 在毛坯至热处理的流程中，可设置多台配有FANUC 0iTF、GSK 988TR等系统的姊妹刀式APC型数控立/卧式车床（见图2），集中进行毛坯锻件的粗车削加工。刀具优先选用刃口锋利的槽形陶瓷刀具（如外圆车刀CRSCR3232P09、端面车刀CRDNN3232P12），做到一次装夹全部粗加工，同时兼顾总体生产效率。

(2) 在车削大端、小端及内外形面的流程中，可设置多台配有华中8型全数字数控系统的立/卧式车床或SINUMERIK 828D系统的CKW数控双柱立式车铣复合中心（见图3）等，力求最少的装夹次数内完成多个部位的成品

式车削加工。刀具涉及标准车刀MDJNR3232P15、内/外形面直槽车刀、内/外形面异型槽非标车刀和球头刀等，随机夹具选用气压/液压自动控制，双/多工作台可自动交换，断刀检测并自动调取备用刀具继续切削，工件尺寸在机

检测并自动补偿至目标刀具，切削液温度受控可自动调节。

(3) 在磁粉探伤检查流程中，工件强力清洗、喷淋、转动、充磁和退磁等功能均可由计算机控制程序自动控制，工件运送为柔性线上的自动输送车，一次探伤可对工件各部实现有效磁粉检测，探伤部位和生产节拍可屏幕显示。资金和厂房等条件允许的情况下，也可采用X射线进行探伤。

(4) 在内壁、外形、凸台和凹槽的铣/钻/铰流程中，可设置多台配有SINUMERIK 840D solution line或蓝天GJ400等系统的带托盘交换装置的智能型龙门式5轴数控铣床（见图4），一次装夹下完成5面/轴的铣削与车削的复合加工。刀具涉及非标三面刃铣刀、小直径杆式立铣刀及

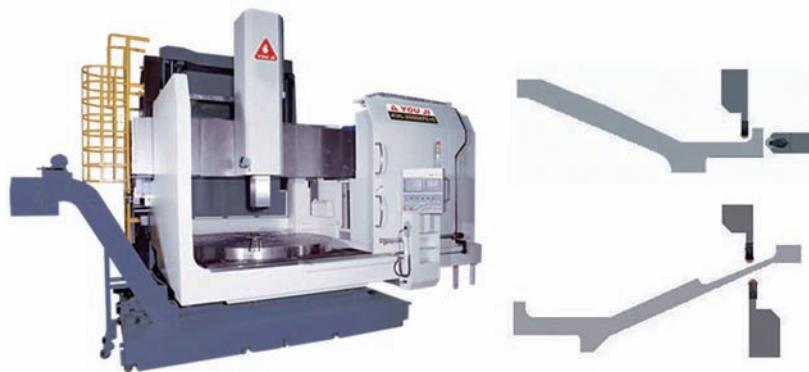


图2 KVL-1600数控立式车床外观及产品粗车削示意

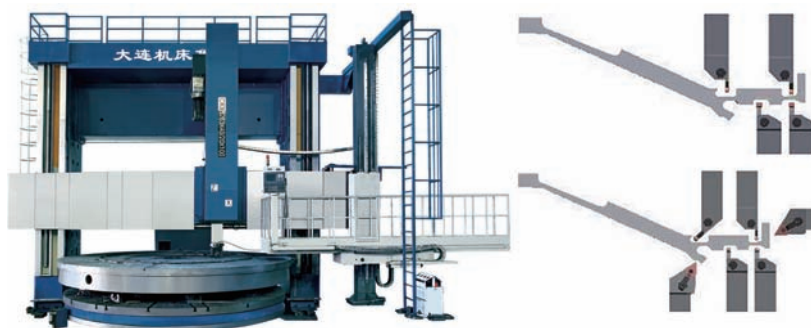


图3 CKW数控双柱立式车铣复合中心外观及产品加工示意

高温合金面铣刀等,随机刀具管理可据任务单配置和显示刀库内所需的全部刀具,并自动检测后续不需要的全部刀具形成卸刀清单。机床可配置回转托盘库,加装2~3个附加托盘,做到产品加工的同时装夹工件。机床配置3D红外线测头、无线测头或激光测头,在加工区内在线测量复合刀具和工件尺寸,据测量结果自动生成误差补偿数据后,反馈至数控系统,以保证成品件的实时尺寸精度及批量加工尺寸的一致性。机床可用条形图来监测加工过程,配置振动传感器检测铣削主轴的振动量,基于工件的振动自动调整切削速度;并经床身温度控制、直线导轨冷却、电控柜隔热、滚珠丝杠副冷却以及驱动电动机降温等措施,获得优异的温度稳定性,以获得高精度、高速度的复合加工。

2. 盘轴类零部件加工数字化

航空发动机上盘类零件主要指涡轮盘、压气机盘和风扇盘等,轴类零件主要指风扇轴、压气机轴和涡轮轴等,盘与轴、盘及叶片按一定的相互位置关系装配在一起,构成风扇转子、压气机转子和涡轮转子等部件。

(1) 盘类零部件。盘的结构一般由轮缘、腹板、轮毂和封严篦齿等部分组成,轮缘上有安装叶片的榫槽,腹板上有起均匀作用的小孔,有的轮盘具有盘心孔。此类零件的毛坯为模锻件,榫槽数量多,榫槽与定位孔的尺寸精度和位置精度要求高,各表面相互位置精度要求高,内腔壁薄,腹板形面复杂。其精加工应工序集中且一次装夹找正,加工宜采用高精度数控机床,测量宜采用全自动测量机,中大型批量生产时宜用柔性制造线。

典型涡轮盘的常用加工路线为:毛坯→粗车削外圆内孔→性能热处理→车超声波探伤面并探伤检查→车加工各表面→低倍腐蚀检查→热处理消除应力→精车削基准→精车削各表面→镗削端面上的精密定位孔和安装边上的螺栓孔→钻削端面上的螺纹孔并攻螺纹→钻削安装边上的径向孔→铣削上下安装边的减轻槽→枞树形榫槽加工→腹板形面抛光→荧光检验→最终检验→喷丸强化→修复加工。典型压气机盘的常用加工路线为:毛坯→车超声波探伤表面并探伤→车加工各表面→热处理消除应力→半精车各表面→低倍腐蚀检查→车加工

端面基准→研磨端面基准→精车基准面内孔及端面→精车腹板形面→加工端面螺栓孔→精车轮缘外表面、端面和卡圈槽→燕尾形榫槽加工→铣削轮缘两端面上槽口→腹板形面抛光→荧光检验→最终检验→喷丸强化→修复加工→静平衡。

基于涡轮盘和压气机盘的加工路线分析,数字化应用在盘类零件加工方面较广泛。例如,在涡轮盘柔性制造线中,可配置数控卧式车床、卧式加工中心、LK3125型数控榫槽拉床(见图5)、三坐标测量机及探伤机等数字化装备,并采用地轨机器人装/卸料。

(2) 轴类零件。轴的结构一般是空心轴,外表面通常由轴颈、花键、螺纹、键槽和封严篦齿等组成,内表面为台阶孔并带有内花键、球面和螺纹等。此类零件的毛坯为模锻件,配合表面多,尺寸精度和各相互位置精度要求高,内孔长,余量大,内外表面壁厚差要求严,轴上螺纹、槽、孔及特殊形面(花键、花边和斜齿等)多。

典型空心涡轮轴的常用加工路线为:毛坯→粗车削外表面→粗车削端部→镗削引导孔→钻扩内孔→热处理→车削端部修复基



图4 DMU/C系列智能型龙门式5轴数控铣床外观及产品加工示意



图5 LK3125型数控榫槽拉床外观

准→车削外唇→镗削内孔→车削外圆修正壁厚差→车削尾部顶尖孔→磨削外圆基准及外圆配合面→车削外形面→车削内形面→磨内孔各表面→抛光内外表面→发蓝处理→无损检测→成品检验。

基于空心涡轮轴的加工路线分析，数字化应用在轴类零件加工方面更普遍。例如，在空心涡轮轴柔性制造线中，除配置数控卧式车床、卧式加工中心、三坐标测量机、探伤机和机器人外，还需数控磨床（见图6）、数控落地镗铣床/车削中心等。

3. 叶片类零部件加工数字化

叶片是航空发动机中非常关键的一类典型零件，其份额是整

台发动机的1/4，其制造效率直接影响到发动机整体的制造效率，其制造品质直接影响到发动机的性能与寿命。由于叶片形状复杂（三维空间曲面）、尺寸跨度大（长度20~800mm不等）、技术质量要求高（准确形状、精确尺寸及严格表面完整性），加之

“工业4.0”时期第7代数控技术的快速发展及新常态阶段智能制造的趋势推动，叶片毛料后续精加工采用数字化技术，已成为当今发动机叶片制造手段的潮流与方向。

一般的叶片精加工工艺都有几十道工序，其常用的主要工艺



图6 达诺巴特HG系列重型磨床外观

股票代码:837971

10
years
2007—2017

孔加工刀具的领跑者



锦玛（苏州）精密工具股份有限公司
地址：苏州工业园区阳澄湖大道创投工业坊9号厂房
电话：0512-62927751/52/53
邮箱：dm-sales6@dmtools.com.cn
网址：http://www.dmtools.com.cn

◆广告 查询编号：3070

路线为：毛坯检查→打磨定位→粗铣定位面→磨削定位面→叶根粗加工→叶尖粗加工→形面粗加工→形面精加工→拉削叶片榫头→叶根精加工→叶尖精加工→形面抛光→钳修→交检入库。据此工艺路线，某公司建设了1条年

产1.8万片精锻叶片的数字化柔性制造线，涉及的主要设备及生产用途如附表所示。

4. 结语

在经济全球化深入发展和世界经济格局不断变化的今天，航空发动机产业唯有实施智能制造

工程，着重普及数字化制造，方可推进信息化与工业化的不断渗透与深度融合，才能发挥海量数据的创新驱动潜能，才能实现数据、技术、业务流程和组织结构四要素的互动创新和持续优化。只有这样，智能制造（见图7）才能作为一种具有自感知、自决策、自执行和自适应等功能的新生产方式，在航空发动机产业内绽放光芒。

参考文献：

- [1] 刘胜勇. 新常态下国产数控系统的发展对策及案例[J]. 金属加工（冷加工），2017（6）：VIII-6.
- [2] 刘胜勇. 先进金属加工技术的应用[J]. 金属加工（冷加工），2017（17）：9-14.

叶片数字化柔性制造线的主要设备及生产用途

序号	设备名称	设备型号	数量/台	生产用途
1	五坐标立式加工中心	VDU1000	2	加工叶根
2	四坐标立式加工中心	西普5000/6	4	加工叶尖
3	单滑枕外表面立式拉床	BMS BMPR25-48	2	加工形面
4	数控成形磨床	Smart-H/B 818 III	2	拉削叶片榫头
5	数控铣床	MDH125卧式加工中心	4	磨削叶片缘板及叶片相邻面
6		XK6040卧式升降台铣床	4	粗、精铣削进、排气边或阻尼台上下表面及径向圆弧
7	三坐标测量仪	Leitz PMM-G	1	各部尺寸检测
8	抛光机器人	大连誉洋机器人	4	叶片形面抛光



图7 Oerlikon锥齿轮副智造系统示意

MW (收稿日期：20171010)