

# 航空发动机燃油控制系统复杂零件制造技术发展趋势

## Development Tendency of Complex Component Manufacturing of Aeroengine Fuel Control System

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 张晓东 吴宝海 罗明 张定华



张晓东

西北工业大学航空宇航制造工程专业博士研究生,西安航空动力控制科技有限公司高级工程师,主要从事数字化制造、数控加工技术以及智能加工技术研究。

燃油控制系统是航空发动机的重要组成部分,其3大核心部件——供油部件、计算部件和执行部件,分别被誉为航空发动机的“心脏”、“大脑”和“神经系统”,其工作原理如图1所示。燃油控制系统的作用主要是通过控制发动机燃油流量实现对发动机工作状态的控制,其中包括燃油流量的计量控制与分配、风扇与

航空发动机燃油控制系统是航空发动机的核心组成部分,其性能决定了航空发动机是否能正常有效的工作。高效、精密地制造出发动机燃油控制系统的复杂壳体、精密偶件等核心零部件,对于保障发动机的工作性能、提高发动机的工作效率有重要作用。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.12.055

压气机可调导叶的角度控制、加力泵的打开和关闭、矢量喷口方位的控制等,从而使得在整个飞行包线内实现发动机各种形式的位置控制、速度控制以及力控制等,以保证发动机在服役环境和工作状态下能够稳定、可靠运行。可见,燃油控制系统的工作状态对飞机的战术、技术和经济性能起着决定性的作用。

### 航空发动机燃油控制系统复杂零部件的制造工艺特点

航空发动机燃油控制系统通常由上千个零件组成,其结构复杂程度、加工精度要求以及装配关系较发动机其他零部件要求更为苛刻。随着我国航空发动机涵道比、推重比及服役寿命的不断提高,发动机燃油控

制系统的结构更趋复杂、材料更难加工、精度要求更高,这对制造工艺和装备技术提出了更为严峻的挑战。在航空发动机燃油控制系统中,最具代表性的两类零件是复杂壳体和精密偶件。

#### 1 复杂壳体零件制造特点

复杂壳体既是实现燃油系统高、中、低压油路导引的核心部件,也是发动机油泵、调节器以及各种控制元件的定位基准和承力构件,其制造结果直接影响着航空发动机的服役性能和寿命。航空发动机燃油控制系统壳体结构复杂、形位精度要求高且内部型腔、孔隙和油路繁多,具有薄壁、结构复杂(型腔复杂,孔系众多,空间、深孔多)、气密性要求高、加工效率低、检验难度大的特点(见图2)。

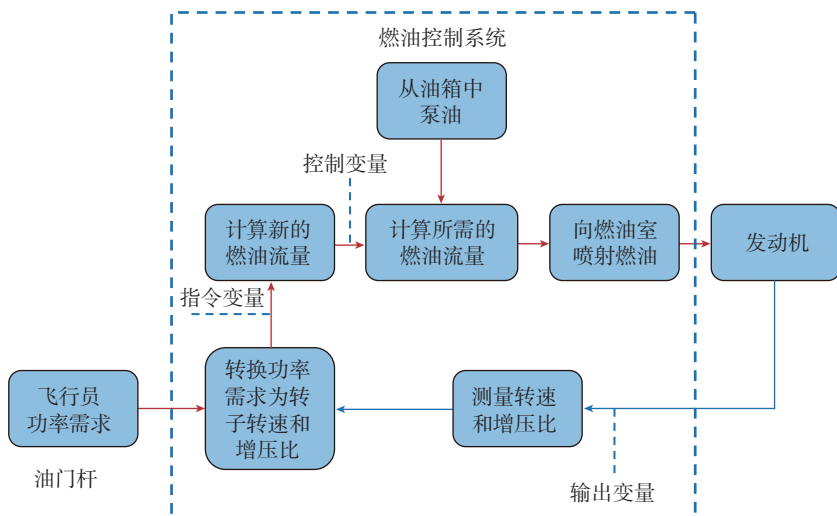


图1 航空发动机燃油控制系统工作原理

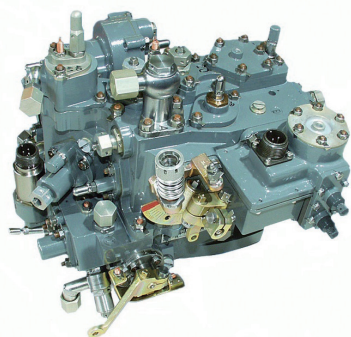


图2 航空发动机壳体零件

目前,壳体铸件主要采用金属型和砂型重力铸造的方法成形,由于结构复杂、壁厚不均以及常规成形工艺的局限,铸造成形过程中极易出现缩孔、缩松、裂纹等缺陷。壳体零件毛坯的铸造工艺流程如图3所示。

在机械加工方面,由于缺乏合理的数控加工策略和最优的切削参数,造成复杂壳体加工效率低,加工周期难以控制;同时,由于孔系种类众多,直径从1mm到几十毫米不等,且孔深与直径之比大(最高可达50:1以上),并且带有各种台阶孔、环形槽等结构,造成孔隙加工难度极大。这些问题导致目前复杂壳体制造中普遍存在铸件合格率低、生产效率低以及油路孔加工质量不稳定等问题,成为航空发动机燃油控制系统研制生产的技术瓶颈。机械加工阶段典型流程主要包括粗加工、半精加工、精加工及清理等过程,典型工艺流程如

图4所示。复杂壳体机械加工方式主要采用型腔铣和孔系加工,加工设备主要以3轴、4轴和5轴加工中心为主。

## 2 精密偶件制造技术特点

精密偶件是发动机燃油系统中保证液压信号准确、稳定传递的核心零部件,用于提供稳压油源、控制燃油流量压力、实现液压信号放大和逻辑转换控制等功能。精密偶件零件包括活门和衬套两大类(见图5),活门类零件具有端面型槽、径向小孔多、位置精度要求高等特点;衬套类零件表面存在形状各异的节流型孔、不对称的矩形、不同角度的型面、圆弧等组合而成的窗口,衬套类零件内孔的尺寸精度和形状精度要求高。活门和衬套需要进行组合配套以达到精密偶件性能要求,活门偶件组合配套关系复杂,衬套与活门配合间隙要求高,要求最小为0.001~0.003mm,活门和衬套需要进行配试才能完成组合配套,并需要在此基础上进行反复性能测试。以某些零件为例,该零

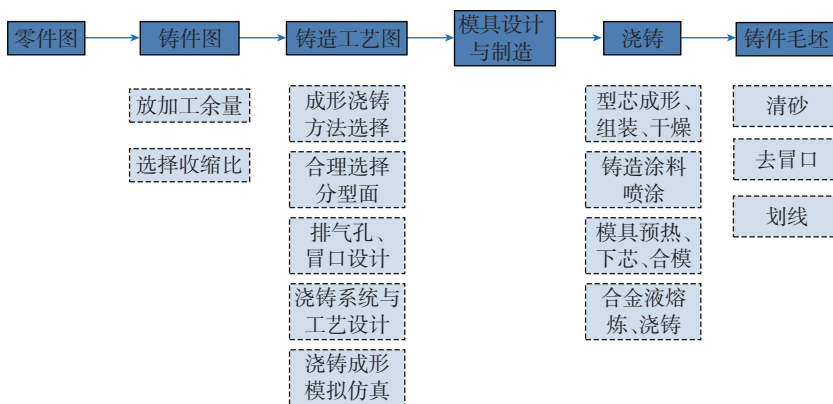


图3 壳体毛坯铸造工艺流程

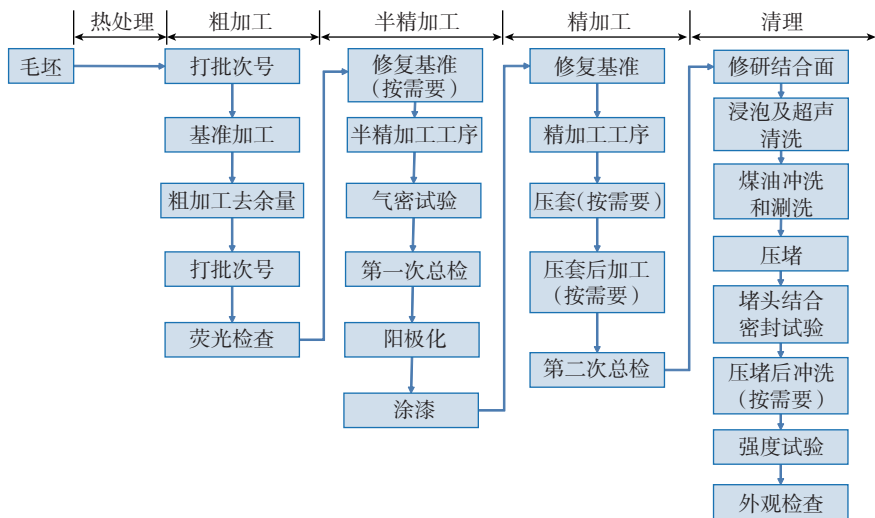


图4 壳体零件的机械加工工艺流程

件为回转类零件,以车削加工为主,其零件两端面存在型槽,在左端有4个直径2mm的小孔,在零件外圆上有4个直径1mm的小孔,这几个加工特征应采用铣削的加工方式来完成。左端面的型槽对基准B有0.1mm的对称度要求,右端面两个型槽中心连线与槽N的对称轴线的夹角为 $45^\circ \pm 5'$ ,该类位置度要求严格,车工工序与铣工工序分别完成加工时存在二次装夹造成的误差,难以保证位置度误差要求。

精密偶件目前主要采用电加工的方式进行,但由于电加工工艺与装备相对落后,导致电加工后表面质量差,难以满足产品性能要求;此外,精密活门衬套存在由内孔和环槽以及窗口形成的性能控制边,性能控制边要求保持光洁锐边,目前主要采用反复研磨的工艺方式,但尖边质量控制不稳定,严重影响产品性能。在新一代航空发动机燃油控制系统中,精密活门偶件精度等级显著提高,同时对精密偶件的寿命和可靠性也提出了更高的要求,迫切需要采用新的制造装备与工艺技术对该类零件进行加工,以满足我国新一代航空发动机的研制需求。精密偶件的加工工艺流程如图5所示。

## 航空发动机燃油控制系统复杂零件制造关键技术及发展趋势

航空发动机燃油控制系统复杂零件的制造技术涉及的种类多、工艺过程复杂、非常规制造技术(如研磨等)比重大,与航空发动机主机零部件的制造相比,特点明确。随着航空发动机设计、制造水平的不断提升,近年来对较少关注的航空发动机燃油控制系统的制造业提出了新的要求,各种新发展的制造技术也得到了不断的应用。以航空发动机燃油控制系统的壳体和精密偶件两类典型零件为例,涉及的关键制造技术及

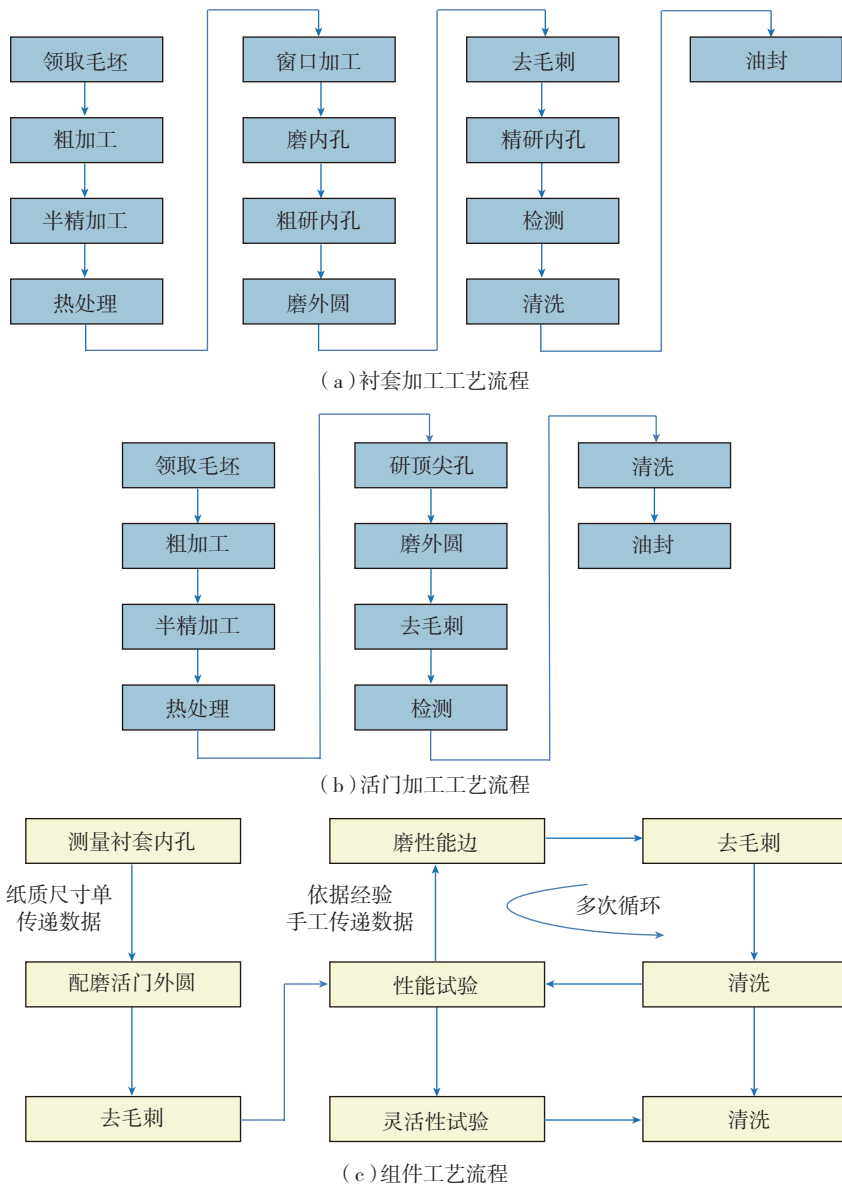


图5 精密偶件的加工工艺流程

正在发展的关键制造技术主要包括:复杂壳体内芯的快速原型制造技术、复杂壳体零件的高速高效加工技术、壳体深孔的加工-测量一体化技术、精密偶件的车铣复合加工技术、精密偶件的以珩代研技术等。

### 1 复杂壳体内芯的快速原型制造

复杂壳体内部空间结构复杂,其毛坯制造主要采用铸造技术。由于航空发动机壳体类零件种类多,内部结构各不相同,采用快速原型制造技术实现壳体内芯的制造,将有助于提高复杂壳体的制造效率。采用双光源选区激光烧结成形装备,同时使用

两台以上的激光器并行加工,可兼顾成形精度和制造效率,实现复杂结构零件的高效、高精度成形。在成形工艺上,建立激光选区烧结过程中温度场监测、补偿策略,提高成形精度;采用移出式成形腔体,实现全自动的后处理工艺,提高生产效率。此外,随着三维打印技术的不断发展,直接采用三维打印方式制造复杂壳体零件在将来也成为一种可能的选择。

### 2 复杂壳体的高速高效加工技术

针对目前航空发动机复杂壳体零件编程与加工效率低的问题,将高速高效加工工艺方法应用在壳体的

加工中,可以提升壳体加工的工艺水平。通过对壳体加工工艺特点的分析,对壳体加工的工艺过程知识进行梳理;根据壳体结构的特点和加工工序,以加工效率最大化为目标计算合适的刀具直径、长度等参数,实现刀具的优化选择;通过自动识别壳体特征进行模型的处理,并生成壳体零件加工的中间工序模型;在获得壳体加工工序模型的基础上,基于壳体结构特征与工艺知识自动生成各工序的加工轨迹;针对生成的加工轨迹,可以采用物理仿真软件预测沿加工轨迹的刀具切削状态和刀具负载;根据机床参数和刀具负载等进行进给速度和主轴转速的优化。高速高效加工技术的应用为复杂结构、多品种、小批量壳体零件的高品质生产提供了保障。

### 3 复杂壳体深孔的加工-测量一体化技术

复杂壳体的孔系多、空间结构复杂、深度大,故加工和测量难度大。在壳体深孔加工方面,可以通过物理仿真软件对钻孔过程进行仿真分析,通过对不同钻削参数、钻头参数等的对比,实现壳体深孔加工过程中的钻头参数选择、钻头寿命控制以及钻削参数优化。同时,通过对钻孔过程的物理仿真与对比分析,可以对钻孔过程中孔壁表面完整性进行控制,实现抗疲劳制造。在深孔的加工质量检测方面,目前检测过程中人工干预多、中间工序检测少、自动化检测措施缺乏。随着在机检测技术的发展,在壳体零件加工工序间实现孔系加工精度的检测与质量保证逐渐成为可能。通过在机检测实现孔系加工过程中质量的保证,最终再通过三坐标检测,实现孔系加工质量的最终检测。加工-测量一体化技术的应用大大降低了复杂壳体孔系质量检测中的手工工作量,为缩短复杂壳体零件的生产周期提供了保障。

### 4 精密偶件的车铣复合加工技术

目前,精密偶件的制造还主要是采用车、铣分开加工以及电加工成型的方式,车铣复合加工工艺方法的应用相对较少。精密偶件的结构特点决定了车铣复合加工技术可以在其制造过程中进行有效应用。针对车铣复合加工工艺在精密偶件中的应用,需要在车铣复合编程、后处理及加工过程仿真方面进行研究。在车铣复合加工编程方面,对精密偶件的加工特征进行自动划分与提取,建立面向不同加工特征的自动编程方法。结合精密偶件车铣复合加工工艺,连接不同加工特征的数控程序,并确定加工过程中机床非运动部件的位置。为进一步提高精密偶件车铣复合加工的效率,可以结合加工过程的仿真,进行切削参数的优化。在生成精密偶件车铣复合加工程序的基础上,自动识别车铣复合加工刀位文件中车、铣、钻等加工工艺以及非运动部件的位置,开发车铣复合加工专用后置处理软件,并实现与数控编程平台的无缝集成。针对生成的车铣复合加工代码,在现有商业软件的基础上进行加工仿真,以有效检测加工过程中可能存在的碰撞干涉等问题,保证加工过程的安全。

### 5 精密偶件电火花成形加工技术

精密偶件上通常分布有不规则型孔,这些孔结构里大外小,且呈空间分布状态。在加工精度上,这类不规则型孔的共面度及型孔尖边要求高,主要采用电火花成形技术进行加工。在精密偶件的电加工过程中,里大外小的型孔结构需要设计特定形状的电极进行加工。在型孔尖边质量的保证上,需要对电极的摇动、平动量进行控制,在保证加工尖边加工质量的同时,提高加工效率。此外,在精密偶件的电火花成形加工过程中,需要深入研究不同电极材料的电极损耗规律,降低电极损耗对加工精度的影响,找出电极损耗数控补偿的内在规律,在提高加工精度和工艺稳定性

的同时,降低工具电极的研制费用。

### 6 精密偶件的以珩代研技术

航空发动机精密偶件具有极高的尺寸精度、表面粗糙度和配合间隙的要求,目前主要采用手工研磨工艺,即采用简单的设备和工具,再配上各种研磨膏,就能得到准确的形状、较高的表面质量和精密的配合间隙。但是手工研磨工艺效率低、人工干预较多,且在粗研阶段研磨工作量大、质量不稳定。珩磨是用镶嵌在珩磨头上的油石,对精加工表面进行精整加工的技术,可以使工件加工表面达到高精度、高表面质量、高寿命,可有效地提高尺寸精度、形状精度和减小 $R_a$ 值。因此,可以采用珩磨工艺代替传统的手工研磨工艺实现对精密偶件的制造(见图6)。精密偶件珩磨过程中需要结合精密偶件的结构特点对精密偶件的珩磨工艺参数、精密偶件的夹持位置和装夹压力等进行优化。

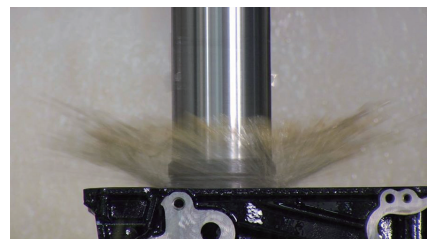


图6 珩磨

### 结束语

航空发动机燃油控制系统是航空发动机的核心组成部分,其性能决定了航空发动机是否能正常有效的工作。高效、精密地制造出发动机燃油控制系统的复杂壳体、精密偶件等核心零部件,对于保障发动机的工作性能、提高发动机的工作效率有重要作用。随着新型发动机的研制,对发动机燃油控制系统制造技术水平的提升也逐渐得到关注。各种先进制造技术的发展以及不断完善则为航空发动机燃油控制系统制造技术水平的提升提供了可能。(责编 玲犀)