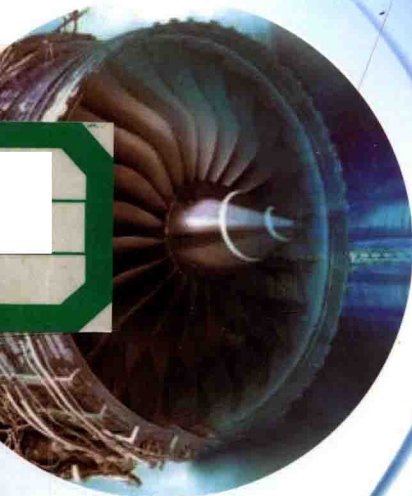


航空发动机控制系统

典型壳体加工技术

吕玮明 金 波 刘荣萍 编著
张建杰 王毅力 吴刚胜
邓卫华 主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

航空发动机控制系统 典型壳体加工技术

吕玮明 金 波 刘荣萍 编著
张建杰 王毅力 吴刚胜 主审
邓卫华

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从航空发动机控制系统壳体的重要性出发,本着实用原则,以典型壳体机械加工为主线,从加工工艺准备、加工工艺路线、加工主要工序、加工工艺装备、数控设备的运用、数控加工编程技巧及壳体加工新技术展望等几个方面进行了论述。

本书可作为壳体加工企业的研究学习材料和培训教程,也可作为普通高等院校机械加工专业教学辅导材料。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机控制系统典型壳体加工技术/吕玮明等
编著. —北京:国防工业出版社,2018.3

ISBN 978-7-118-11568-0

I. ①航… II. ①吕… III. ①航空发动机—控制系统
—壳体(结构)—加工 IV. ①V232.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第042813号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张8 $\frac{3}{4}$ 字数164千字

2018年3月第1版第1次印刷 印数1—5000册 定价68.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

编审委员会

主 任 邓卫华

副 主 任 潘 健 贾建中

委 员 吕玮明 王毅力 刘荣萍 张建杰

张 娟 王 俊 庞汉文 易振海

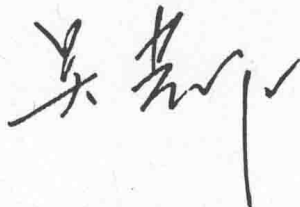
金 波 吴刚胜

序 言

航空发动机控制系统被誉为发动机的“大脑”，是决定航空发动机性能的关键功能系统，而控制器壳体是各种控制元件的定位和承力构件，是航空发动机控制系统的核心部件。中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司（中国航发红林）是长期从事航空发动机控制系统产品设计和制造的专业企业，经多年探索和实践，在航空燃油控制附件壳体的加工方面积累了丰富的经验，为沉淀和总结经验，公司组织部分技术骨干、专家共同整理编写了本书。该书较为详细地叙述了控制器壳体传统机械加工方法以及新技术展望，让读者阅读后对航空发动机燃油控制的基本构成、主要附件结构及工作原理、典型壳体加工工艺技术等有一定的了解，希望能够为从事相关工作的专业人员提供帮助和启迪，这也是我们编写本书的初衷和目的。

控制附件壳体是决定燃油控制系统性能和结构的一个关键部件，占有举足轻重的地位，其加工质量和集成的好坏决定着控制系统能否正常发挥作用。由于控制系统附件既要满足中高压力和规定流量，又对附件重量、体积、寿命有严格的要求，这就导致其结构非常复杂。例如某液压机械调节器，由动力部件、计算部件、执行部件、感受部件等组成，包含一级燃油泵和三级滑油泵于一体，另配有几十个调节功能部件，其外形最大尺寸不足 250mm，大小油路 80 余条，最深油路孔直径仅为 4mm，而长度达 165mm，直径为 3~4mm 的小孔总长度接近 4000mm，加工工序有 1000 多道，内部装配零部件间隙公差只有 3~4 μm ，精度要求很高，制造加工难度非常大。

经过中国航发红林技术骨干、专家的努力，我们在公司技术人员培训学习教材的基础上，秉承实用和通俗易懂的原则，提炼加工成本书，本书的出版也丰富了航空发动机行业机械加工技术丛书系列，对此我们能尽绵薄之力深感欣慰。



2018 年 1 月

前 言

航空发动机控制附件工作环境恶劣,需在 $-55\sim 215^{\circ}\text{C}$ 的宽温度范围,最高 22MPa 压力下工作,而且控制附件精度要求高、自动化程度高、控制模块多、工作状态复杂,同时对重量有严格的限制,这就导致了航空发动机控制系统技术含量高、难度大。壳体是航空发动机控制附件的关键部件,它在控制附件中起支撑和功能集成的作用。因发动机对控制附件的严格要求,导致控制附件壳体结构复杂,壁厚较薄,加工难度大,是航空发动机控制系统加工行业内公认的关键技术。

中国航发贵州红林航空动力控制科技有限公司(中国航发红林)经多年探索和实践,在航空燃油控制附件壳体的加工方面积累了丰富的经验,为了深层次的梳理关键技术,沉淀和总结经验,实现知识和经验显性化、系统化及有效传承,中国航发红林科技委组织公司技术专家、骨干收集了大量资料,共同整理编著成书。该书以典型壳体机械加工为主线,从加工工艺准备、加工工艺路线、加工主要工序、加工工艺装备、数控设备的运用、数控加工编程技巧及壳体加工新技术展望等几个方面进行了论述。

本书由贾建中、潘健构思和搭建框架,全书共分8章,第1章由王毅力撰写,参与编写工作的还有吴刚胜;第2章、第3章、第5章由吕玮明撰写;参与编写工作的还有金波;第4章由张建杰撰写;第6章、第7章、第8章由刘荣萍撰写;吴刚胜负责全书的统稿和文字、图表整理工作,邓卫华负责全书的审定。

该书可作为壳体加工企业的研究学习材料和培训教程,也可以作为普通高等院校机械加工专业教学辅导材料。

因航空发动机控制系统结构复杂、零部件种类繁多,壳体多种多样,本书以最复杂的机械液压调节器的壳体作为典型,在总结目前生产过程中的机械加工技术的基础之上进行叙述,不当之处,敬请读者不吝指正。

编审委员会
2017年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航空发动机控制系统概述	2
1.2 壳体在控制器中的作用	5
1.3 航空发动机控制器壳体的特点	7
1.3.1 壳体的工作环境严酷、性能要求高	7
1.3.2 壳体的内部结构复杂、集成零部件多	8
1.3.3 制造方法复杂、工艺控制严格	8
1.3.4 所用材料品种多、性能要求高	9
1.3.5 装配精度要求高,对环境要求严格	9
1.3.6 需经过严格的试验考核	10
1.4 壳体毛坯常用的成型技术	11
1.5 壳体机械加工的难点及注意事项	12
第 2 章 壳体加工工艺准备	14
2.1 壳体结构特点及技术要求	14
2.1.1 壳体的结构特点	14
2.1.2 壳体技术要求	14
2.2 壳体的材料及毛坯	15
2.2.1 壳体的材料	15
2.2.2 壳体的毛坯	15
2.3 壳体机械加工工艺准备	17
2.3.1 生产任务书识别	17
2.3.2 设计图纸消化	17
第 3 章 壳体加工工艺路线	19
3.1 工艺定位基准的选择	19
3.1.1 定义	19
3.1.2 毛坯定位基准的选择	19
3.1.3 主定位基准的选择	23
3.1.4 辅助定位基准的选择	28

3.2	工艺阶段划分	32
3.3	工艺规程的编制	33
第4章	壳体加工主要工序	34
4.1	壳体的划线	34
4.1.1	壳体的划线步骤	34
4.1.2	壳体的划线工序	35
4.2	壳体结合面的加工	37
4.3	壳体附件安装孔或压套孔的加工	37
4.4	壳体定位销孔的加工	39
4.5	壳体的油路孔及型腔加工	39
4.6	壳体的清洁度工艺	40
4.6.1	航空燃油清洁度标准	40
4.6.2	壳体的毛刺工艺	43
4.6.3	壳体的冲洗工艺	56
第5章	壳体加工简易工装设计	59
5.1	标准槽系列柔性元件的基本特性	60
5.1.1	正方形包括长方形基础板	60
5.1.2	基础角铁(垂直板)	61
5.1.3	垂直圆基础板	61
5.1.4	合件基础板,正弦台	61
5.1.5	定位件和导向件	62
5.1.6	组合基础件,立卧分度盘	65
5.2	槽式柔性元件夹具的组合	66
5.2.1	支点定位组合法	66
5.2.2	组合操作方法	69
5.2.3	常用定位销标准系列	71
5.2.4	圆盘定中心组合法	72
5.2.5	定位板组合法	73
5.2.6	加工部位成角度定位板的组合法	75
5.3	产品特殊部位的夹具组合	76
5.3.1	产品特殊部位组合夹具分析	77
5.3.2	特殊定位投影角度和销孔位置的确定	78
5.3.3	特殊定位板的制作	79
5.4	孔系柔性元件的夹具组合	79
5.4.1	孔系列柔性元件的优缺点	79

5.4.2	孔系列夹具组合夹紧方式	81
第6章	数控设备的运用与一般规范	82
6.1	数控设备应用现状	83
6.1.1	国外数控加工技术研究与发展状况	83
6.1.2	国内数控加工技术研究与发展状况	84
6.2	数控技术应用原则	86
6.2.1	工艺路线设计原则	86
6.2.2	工序内容设计原则	87
6.3	数控加工工艺过程仿真校验及加工程序的生成	90
6.3.1	数控加工工艺过程仿真校验	90
6.3.2	数控加工程序的生成	91
第7章	典型结构数控工艺规划实例	93
7.1	端面环形槽数控加工编程技巧	93
7.1.1	端面环形槽数控加工工艺方法分析	93
7.1.2	端面环形槽数控加工实例研究	94
7.2	壳体成型模具数控加工编程技巧	99
7.2.1	复杂型面数控加工工艺流程	99
7.2.2	数据模型的建立	100
7.2.3	数控加工工艺方案规划	104
7.3	壳体复杂型面数控加工编程技巧	112
7.3.1	航空发动机控制器壳体外型面加工背景	112
7.3.2	航空发动机控制器壳体数学模型的建立	113
7.3.3	航空发动机控制器壳体外型加工工艺路线的确定	113
7.3.4	壳体加工坐标系的确定	114
7.3.5	壳体加工路径的规划	115
第8章	增材制造技术在壳体加工中的应用	122
	参考文献	125

第1章 绪 论

航空技术发达的国家,长期以来都将航空发动机的发展作为国策,列为国家高科技战略性产业。近年来,伴随着中国航空工业的迅速发展,航空发动机也进入快速发展阶段。以前国内航空发动机的研制和生产,主要是以测绘、仿制、改进为主。随着三代机、四代机的出现,国内航空发动机的研制形式也发生了本质的变化,向自行设计转变。

近代,航空发动机控制领域以在役机型为基础,针对使用中出现的問題不断改进,引入了电子控制的手段,经历了从复杂液压机械式到液压机械+电子混合式,再到全权限数字电子控制(又称 FADEC)的发展过程,取得了长足的进步。目前,我国已经构建了比较完善的航空发动机燃油系统与液压机械装置研发体系,积累了大量的科研经验,具备了航空发动机燃油控制系统的设计能力,开展了第四代发动机和大涵道比发动机等多型发动机 FADEC 系统的技术验证和工程实践工作,取得了可喜的进步。但也应该看到,在世界范围内,航空发动机呈加速发展态势,不断向高性能、高可靠性、高推重比、更宽使用范围、更长的寿命、多任务能力和低油耗、低成本、低污染、低噪声方向发展。

相比于传统的机械液压调节器,现代航空发动机数控系统中,计算部件的功能用电子控制器和软件实现,控制信号的采集用各种传感器实现,机械液压装置作为 FADEC 系统中的执行机构,主要由动力部件(各种泵)、电液转换部件(电液伺服阀、电磁阀、步进电机等)和执行机构(各种活门、作动器等)三部分组成。取消了原有的机械计算部件(凸轮、杠杆)和信号感受部件(离心配重、膜盒、钢索等),用电子控制器和传感器实现了信号采集和运算这两部分的功能。从而提高了控制精度,机械部分结构简单,零件数减少,质量减轻,研制周期缩短。尤其是近年来,国防需求呈现多样化,变化周期更快,产品的更新换代频繁,这就要求发动机燃油控制系统要在原有技术的基础上,适应和跟踪发动机技术的更新迭代,用数控系统的技术优势,提高发动机的性能、精度、寿命和可靠性,解决多参数控制、减轻重量、便于维护、耐恶劣环境、健康管理等诸多问题。

航空发动机主要涉及空气动力学、流体力学、固体力学、热力学、化学、材料学等学科,是人类有史以来最有效的动力之一,也是最复杂的机械之一。航空发动机工作过程是极其复杂的气动热力过程,在规定的飞行包线内,随着环境

条件和工作状态的变化,通过控制系统保证发动机安全可靠地工作,从而满足飞机对发动机提出的各种性能要求。航空发动机的控制主要由燃油控制系统、滑油系统、启动系统、涡轮冷却系统、可变几何通道控制系统、预防和消除喘振系统和防冰等系统组成。在这些系统中燃油控制系统和可变几何通道控制系统起至关重要的作用,燃油控制系统的目的,就是使发动机在各种工作状态下,对飞机来油进行增压,以满足发动机和控制系统对燃油压力的各种需要;完成发动机主燃烧室燃油流量的自动控制、主燃油流量的分配;压气机静子导流叶片的控制、风扇静子导流叶片的控制;加力泵的打开和关闭、加力燃烧室燃油流量计量和控制、加力燃油流量的分配;喷口喉道面积的控制、矢量喷口方向的控制;以及发动机的起动、加速、减速、停车、消喘防喘等静态和动态控制。使发动机在全包线范围内准确、稳定、快速、安全、可靠地工作,并充分发挥其性能。航空发动机控制系统是一个复杂的电子、机械、液压系统,根据发动机燃油调节器的控制方式,发动机控制系统一般可以分为机械液压式、电子模拟式和电子数字式三种。航空发动机控制系统一般由增压泵、主燃油泵、主燃油控制装置、压气机静子可调导叶角度控制装置、风扇静子可调导叶角度控制装置、主燃油分布器、加力泵、加力燃油控制装置、加力燃油分布器、喷口油源泵、喷口油源泵控制附件、喷口喉道面积控制装置、矢量喷口控制装置、应急放油装置、射流点火装置等组成。无论是机械液压控制器,还是电子控制系统里的机械液压执行装置,都需要把许多机、电、液功能部件集成在壳体上,再用油路、气路、电路连接起来,完成预先设计好的功能和性能。壳体就是一个集成平台,是决定燃油控制系统性能和结构的一个关键部件,占有举足轻重的地位,其加工质量和集成的好坏决定了控制装置能否发挥应有的作用。它的加工过程难度很大、周期很长,是一项细致而艰巨的工作。因此,有必要讨论、研究高效率高质量的壳体加工,给从事这项工作的同行们提供一些方法和思路。

1.1 航空发动机控制系统概述

航空发动机控制系统的主要任务是:发动机在整个飞行包线范围内,在各种飞行工况下,控制系统的若干传感器感受发动机的飞行数据,以及飞行员的指令,进行综合运算、选择最优参数、通过执行机构自动控制发动机的供油量和可变几何通道等,使发动机在气动极限、热力极限和机械极限范围内安全、稳定、可靠地工作,并获得低的耗油率、优良的性能。

航空发动机控制系统经历了简单的开环机械液压、闭环机械液压、复杂的闭环机械液压,高度复杂的、闭环、多变量、非线性、多功能的计算机电子控制系统。将来向数字化、分布控制、主动控制、多变量控制、容错控制和智能控制方

向发展,成为集液压、机、电、信息与控制技术为一体的高科技产品。典型的控制系统有机械液压控制系统、FADEC 系统。

机械液压控制系统由传感器(压力、转速、高度、速度、温度、油门角度等信号),运算部件(信号处理装置,伺服机构,凸轮、杠杆和齿轮等),放大部件(喷嘴挡板活门、滑阀式活门、摆锤活门和活塞等),反馈部件(弹簧、齿轮和杠杆等),执行机构(活塞、杠杆、作动筒、电磁阀等),还有节流器、功能转换部件,机械、电器、液压接口等组成。机械液压控制系统的主要功能是完成发动机起动、加速、减速过渡态的控制;完成发动机转速的稳态控制;保持落压比的加力工作状态;超转、超温、超压限制以及防喘保护;进气道、风扇和压气机导叶、喷口喉道面积、矢量喷口等可变几何通道控制;防冰及涡轮冷却控制等组成。一个或几个功能构成一个控制器,所有控制器构成控制系统。

FADEC 系统由传感器(压力、转速、高度、速度、温度、油门角度等信号),电子控制器(硬件、软件),电液转换器(电磁阀、高速电磁阀、电液伺服阀、位移传感器、接近开关、信号器等),机械液压执行装置(壳体、喷嘴挡板活门、滑阀式活门、弹簧、节流器和活塞等),机械、电器、液压接口等组成。FADEC 系统除了包含机械液压控制系统的功能外,利用计算机强大的功能和运算速度,可以采集更多的发动机信号。完成传感器数据的采集、控制规律和逻辑运算的处理,选择最佳的控制模式,实现发动机多变量控制;自动推力设定,自动压力和温度限制;发动机健康状态管理,控制系统的容错;发动机与飞机其他电子系统进行通信,从而实现综合控制。如飞行/动力综合控制,火力/飞行/动力综合控制。数字电子控制器可以提高控制精度,充分发挥发动机的性能,增加发动机的可靠性,是发动机控制系统的必然选择。

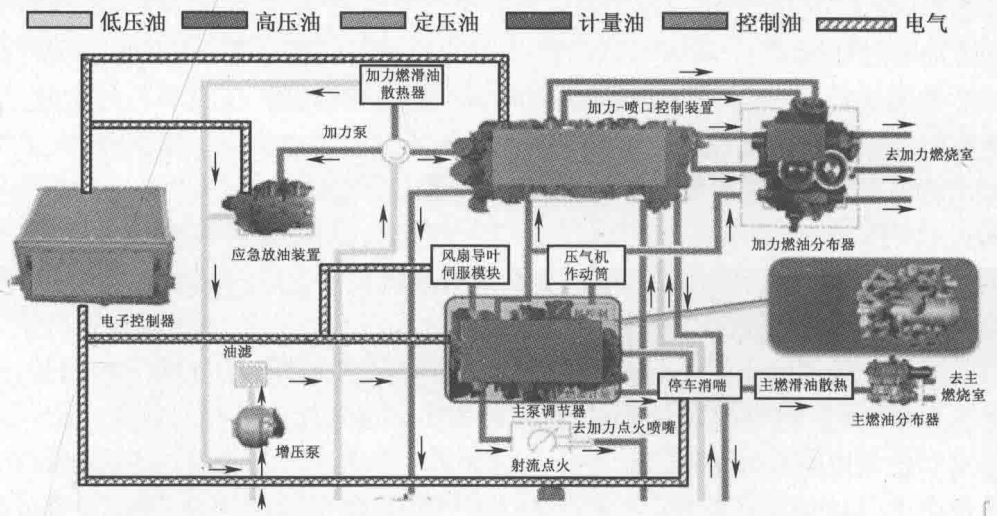
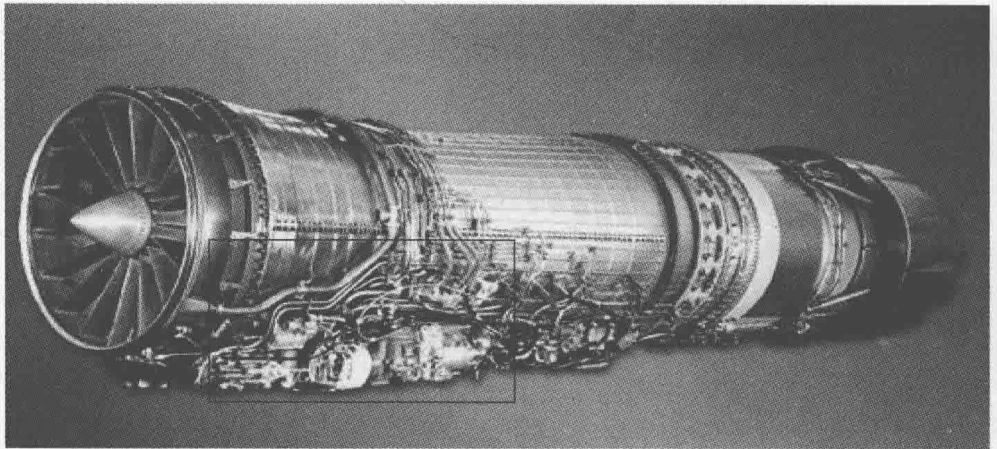
按照功能来划分,航空燃油控制系统主要有供油泵、燃油控制器、限制器、传感器、放大器、执行元件、反馈元件等。供油泵含高、低压油泵,将飞机油箱来的燃油经过低压增压、高压增压后供给燃油控制器或调节器。燃油控制器:也叫燃油调节器,是通过传感器感受发动机转速、温度、高度、压力等各种参数,按照油门杆角度和设定程序自动调节燃油量供给发动机燃烧室。限制器:为了保证发动机安全可靠工作而设置,对发动机转速、压气机出口压力、发动机排气和涡轮前后温度、扭矩等进行最大负荷限制的装置。执行元件:可分为液压式、气动式和电液转换三大类,执行元件主要是将液压能、气压能、机械能,进行转换去执行规定的动作。

航空发动机燃油系统中的油泵类型很多,各自具有原理、结构、性能上的特点。它按结构形式主要有柱塞泵、齿轮泵、离心泵和旋板泵,它们均具有良好的使用性能和较高的可靠性。其中柱塞泵相对于齿轮泵、离心泵和旋板泵而言,功重比小(泵功率/泵重量),结构复杂,加工成本高,抗污染能力比离心泵和旋

板泵差。它的优点在于非常方便地调节斜盘角度使供油量等于需油量,解决了小供油量状态下的油泵温升问题,齿轮泵结构简单,可靠性高,在高空小流量时温升高是个问题。离心泵功重比大,缺点是低转速下效率低,使用范围受到限制。

在油泵的输出端,设置了调节器。它接受来自发动机的转速、压气机的压力、落压比、油门杆角度,以及飞行高度和速度、大气压力等信号;通过计算,自动调节供给发动机主、加力燃烧室的供油量;同时调节发动机的喷口直径、风扇和压气机导叶角度;保证发动机在不同高度、不同速度以及各种飞行姿态下,都能可靠、安全、充分发挥效能地工作。

特别是机械液压控制器,通过对这类产品的了解可以看出,控制系统工作环境严酷、性能要求高,结构复杂、零组件多,制造难度大、工艺控制严格,所用材料品种多、性能要求高,精密偶件多、严格的试验验证考核以及高效安全的使用要求等,是典型的技术含量很高的复杂产品。航空发动机控制系统图和外形图如图 1-1 所示。



1.2 壳体在控制器中的作用

任何智能产品,如手机、冰箱、电视、轮船、飞机、卫星等,都需要各种各样的控制器,复杂产品需要若干控制器构成控制系统,才能完成预定的功能,就像人离不开大脑一样。一般控制器最基本的构成元件是传感器、运算器、放大器、执行机构、动力源。把这些元部件安装在一个称为壳体部件(机械产品)或电路板中(电器产品),再把它们互相连接起来,装配到产品上,完成产品的控制功能,带这些自动控制器的产品称为智能产品。

电子控制器最基本的做法,是将预先选好的电子元器件,包括集成电路、电感、电容、电阻等安装在电路板上,按设计好的电路图连接起来,植入软件,就构成了电子控制器。

机电液构成的控制器,是将已经选好的元件,包括薄膜、膜盒、转速传感器、电液转换装置、机电转换装置、凸轮、杠杆、活门、弹簧、节流器、活塞、伺服机构、位移传感器等装在壳体内,按设计好的原理图通过电路、气路、油路互相连接起来,就构成了机械液压控制器。航空发动机控制器的壳体是发动机控制系统的核心部件,对控制附件起到支承和功能集成的作用。控制器的功能越多,结构越复杂,集成化难度就越大,壳体就越复杂越难加工。

动力装置是复杂的智能产品,如空气轮机、蒸汽轮机、燃气轮机、涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轴发动机、涡桨发动机、超燃冲压发动机等。这些产品也离不开若干多功能、高智能化、高精度、高可靠性的控制器构成控制系统,来保证发动机在各种复杂的工况下安全可靠地工作,并追求尽可能高的效率。这些动力装置的控制器就比较复杂,功能模块多,控制精度要求高,难度也比较大,壳体也非常复杂。航空发动机控制系统典型壳体模型图如图1-2所示。

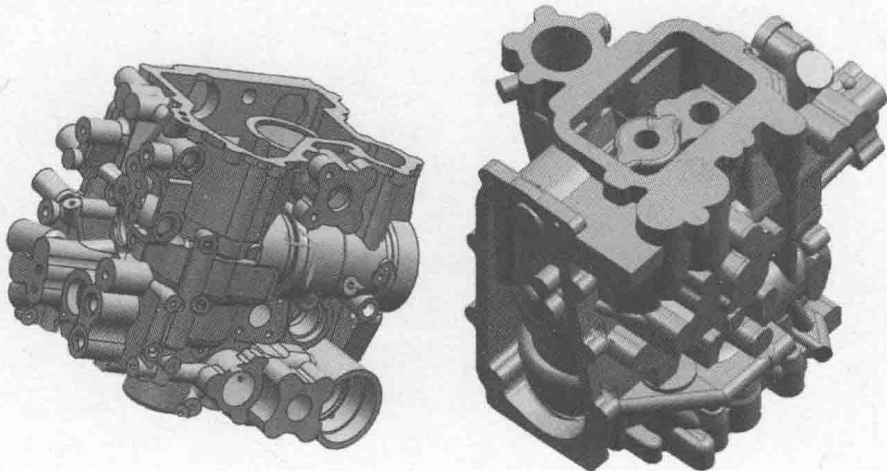


图1-2 航空发动机控制系统典型壳体模型图

航空发动机控制系统典型控制器外形图如图 1-3 所示。航空发动机控制系统典型控制器模型图如图 1-4 所示。

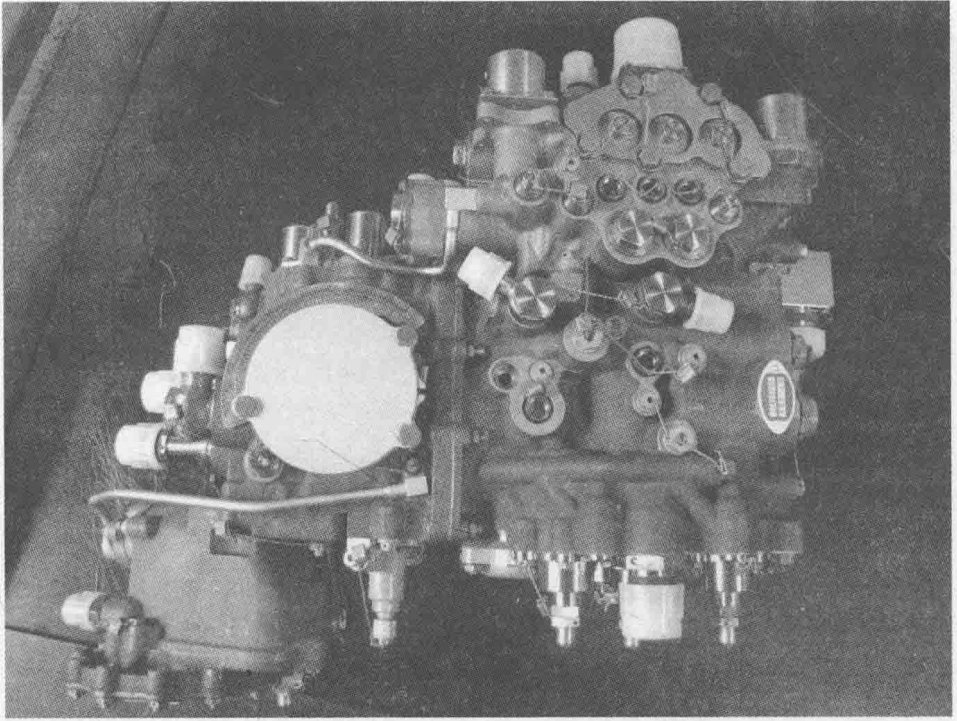


图 1-3 航空发动机控制系统典型控制器外形图

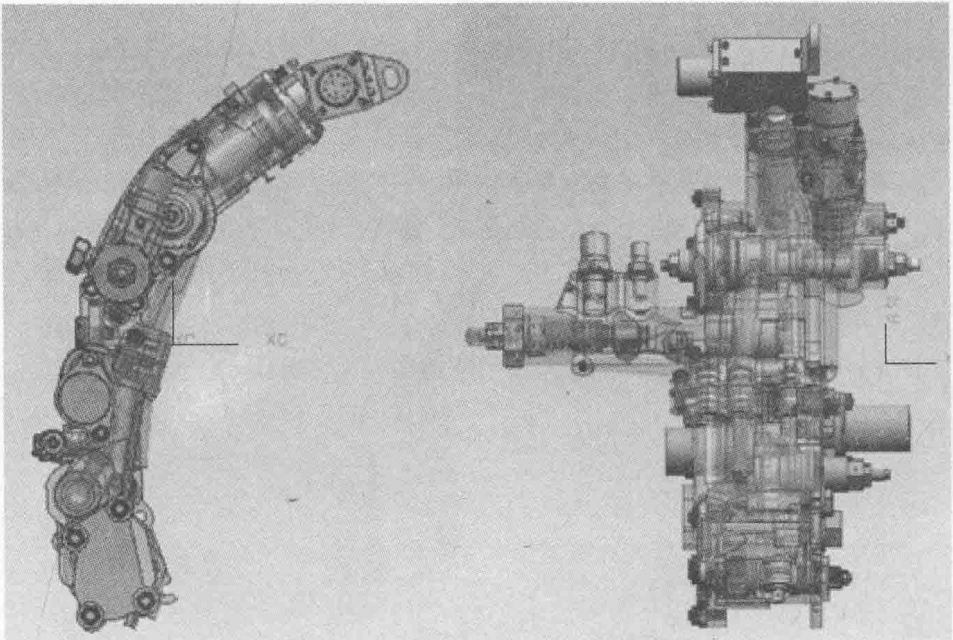


图 1-4 航空发动机控制系统典型控制器模型图

1.3 航空发动机控制器壳体的特点

航空发动机主要是指涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轴发动机、涡桨发动机、超燃冲压发动机等。还有就是与航空发动机工作原理一脉相承的地面或船用的燃气轮机,其核心机结构没有什么本质区别。目前,我国这些发动机主流技术已经是比较成熟的第三代了,控制器是极其复杂的机械液压结构;下一代发动机控制参数增多、功能增加、精度提高,控制器全面进入全权限数字式电子控制时代。

这些控制器主要完成的功能是起动控制、慢车控制、加速控制、减速控制、转速控制、油门控制、可变几何通道控制、加力控制、防喘控制、叶尖主动间隙控制、停车控制、健康管理、热管理等模块。在飞行包线范围内,各控制器模块自动调节发动机的参数,保证发动机安全、稳定、可靠、高效地工作。

随着科学技术的发展,新材料的应用,发动机的推力不断增大、推重比不断提高、耗油率不断下降。发动机对控制器的要求是:转速越来越高、压力越来越大、介质和环境温度逐次提高、寿命大幅延长;再考虑重量尽量轻、体积尽量小,重要部位设置故障诊断;还要追求高精度的动态、静态调节品质,非线性、时变、多功能、数字化,综合控制、分布控制、主动控制、多变量控制、容错控制和智能控制等;控制系统的任务是越来越重。所以发动机的控制器非常复杂,特别是航空发动机控制器的设计和制造难度,都是不言而喻的。

从航空发动机控制器的工作环境、结构特点、航空发动机对控制器的技术要求等方面来看,航空发动机控制器壳体具有以下特点。

1.3.1 壳体的工作环境严酷、性能要求高

航空发动机控制器壳体是发动机控制系统的主要部件,对控制器起到功能集成的作用。工作环境和条件是十分严酷的。如工作环境温度一般为 $-55\sim 215^{\circ}\text{C}$;燃油温度 $-40\sim 135^{\circ}\text{C}$,振动值大于 $20g$,机械冲击 $20g$ 、加速度 $10g$,还需通过抗污染、霉菌、沙尘、太阳辐射、湿热、盐雾、防火、低气压、高压冲击等试验。性能方面油泵等旋转部件转速高达 $27600\text{r}/\text{min}$,供油量达 $37000\text{kg}/\text{h}$,系统压力最高达 22MPa ;计量活门全程移动时间公差值为 0.05s ,分油活门全程移动时间公差值为 0.02s ,控制发动机转速的精度不大于 0.4% ,控制涡轮落压比的精度为 0.1 ;高速电磁阀响应时间为 7ms 。部分产品MBTF要求达到 20000h ,少量产品要求达到 100000h 。如此高转速、大流量、技术参数多、性能指标高的要求使得燃油泵调节器面临着高速、高压、强载、高低温等恶劣的工况条件。因此,在发动机燃油系统中油泵至今故障率较高、寿命偏低,是直接影响发动机工

作性能及安全的关键产品,也是当前推行可靠性研究所急需解决的重要课题。

1.3.2 壳体的内部结构复杂、集成零部件多

对燃油泵设计的基本要求是,在中高压时满足规定流量的前提下,重量尽可能轻、体积尽可能小、寿命尽可能长以及结构尽可能的紧凑。而发动机控制器壳体在控制器中起到支承和功能集成作用,这就使其结构具有复杂的特点。燃油控制系统由于功能多,结构复杂,例如液压机械调节器,由动力部件(各种泵)、计算部件(凸轮、杠杆)、执行部件(活门、作动筒)、感受部件(离心配重、膜盒、薄膜、钢索等)等组成。据统计三代发动机的液压机械调节器由十多个燃油附件、近 6000 个零件组成,其中主泵调节器就包含有 2600 多个零件。在如此多的零件中,高精度配偶件、多油路件、高性能的调节元件、敏感元件、长线件以及关重件占相当比例。例如,某涡轮起动机燃滑油泵调节器外形尺寸约为 $250\text{mm}\times 200\text{mm}\times 150\text{mm}$,包含一级燃油泵和三级滑油泵于一体,另配几十个调节功能部件,结构十分复杂,零件尺寸小,精度和形位公差要求很高。某主燃油调节器壳体上共组合有精密偶件 10 多个,大小油路 88 条,其中最深油路孔为 $\phi 4\times 165\text{mm}$, $\phi 3\sim\phi 4$ 的小孔总长大约为 3958mm ,其加工工序长达 1055 道之多、制造成本很高。产品活门与衬套的配合间隙公差只有 $0.003\sim 0.004\text{mm}$,而且不仅仅是单一间隙配合要求,而是多台阶间隙配合,配合后必须保证每个台阶配合副的间隙要求,并在温度为 -50°C 的燃油中通过灵活性试验;零件形状复杂、形位公差要求严。又如有的油泵壳体与法兰盘配合的位置公差为 0.04mm 。有的产品由上千项零组件构成,其中壳体、杠杆类零件、精密活门偶件、凸轮类零件、空气减压器、双重差动活门、摆锤活门组件、落压比调节机构等都是生产、装配和调试中的难点,这些零组件结构复杂,有的尺寸、粗糙度和形位公差精度要求很高。

燃油控制器中零组件多,关键件和异形件精度高、要求严、加工工作量大,它们的性能指标、几何精度、装配要求都很高,环环紧扣、一丝不苟,往往某一个零件的设计偏差或制造质量失控都会造成牵一发而动全身。

1.3.3 制造方法复杂、工艺控制严格

由于燃油泵调节器结构复杂、零件在制造工艺上都有非常严格的要求。如起动机油泵调节器壳体一个面上有近 60 个孔。某壳体要求端面(距离 130mm)平行度 0.02mm ,端面平面度 $0.01(100\times 105)\text{mm}$,四台阶孔在 107mm 长的轴线上同轴度 0.02mm 。起动机油泵壳体中齿轮安装孔的孔距公差 0.02mm ,圆柱度公差 0.02mm ,轴线不平行度公差 0.005mm 。壳体中还装有大量的精密偶件和各种高精度机械零件,这就必然导致壳体的制造方法复杂,工艺控制困难。功