

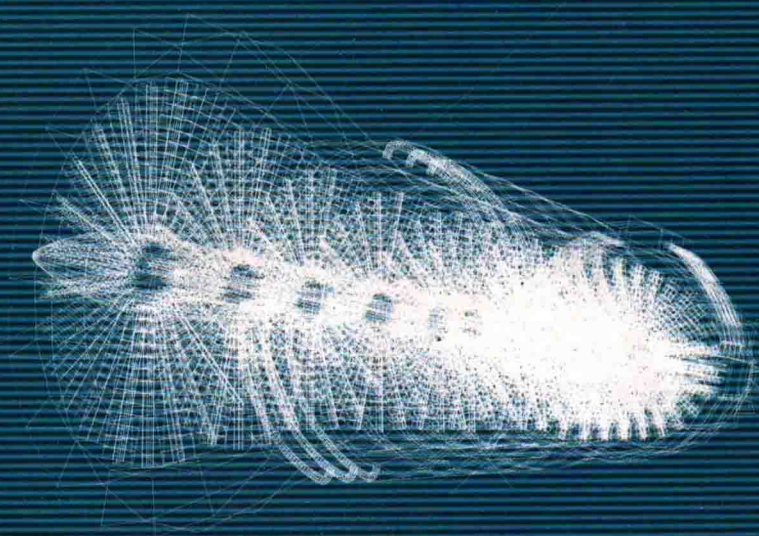
动力机械及工程热物理



国防科工委「十五」
规划教材

航空发动机结构分析

●刘长福 邓明 主编



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材. 动力机械及工程热物理

航空发动机结构分析

主编 刘长福 邓 明
编者 邓 明 方昌德 赵 明
阎国华 赵晓蓓 刘美玲

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书是根据国防科学技术工业委员会“十五”规划教材的要求编写的。

本书较系统、全面地介绍了航空燃气涡轮发动机结构的基本知识,各主要部件的功能和主要设计要求、结构分析和典型结构,主要工作系统和附件传动机构的简况,燃气涡轮发动机的新概念、新技术、新材料的发展动向,航空燃气涡轮发动机在地面燃机和弹用燃机方面的应用概况。为方便读者学习,书中提供了思考题。教材按计划学时 80 学时编写,可根据不同专业要求删减选用。

本书为高等学校航空动力工程专业的专业教科书,还可供有关专业学生和从事航空发动机研究、制造和使用维护工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机结构分析/刘长福,邓明主编. —西安:西北工业大学出版社,2006.3

国防科工委“十五”规划教材. 动力机械及工程热物理

ISBN 7-5612-2059-6

I. 航… II. ①刘… ②邓… III. 航空发动机:燃气轮机—结构分析—教材 IV. V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 013879 号

航空发动机结构分析

刘长福 邓 明 主编

责任编辑 季苏平 傅高明

责任校对 韩书琪

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号

市场部电话:029-88493844

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:30.875 字数:649 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-2059-6 定价:40.00 元(平装) 55.00 元(精装)

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山

编 委：王 祁

乔少杰

杨志宏

陈国平

贺安之

郭黎利

陈懋章

王文生

仲顺安

肖锦清

陈懋章

夏人伟

屠森林

屠森林

王泽山

张华祝

苏秀华

庞思勤

徐德民

崔锐捷

田 蔚

张近乐

辛玖林

武博祎

聂 宏

黄文良

史仪凯

张耀春

陈光禔

金鸿章

贾宝山

葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新



世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,产生和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,



对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

人类有动力飞行的历史已经 100 年了。100 年来,航空器的动力装置已经发生了巨大的变化。特别是近 20 年来,航空燃气涡轮发动机作为航空器动力装置家族的重要成员,其技术上的进步则更加突出。似乎不久前我们还在为 JT3D 发动机的设计而惊叹,如今却已经走过了 JT8D, JT9D,到了 PW4000。

在航空器及其动力装置技术迅猛发展的今天,在编写航空发动机构造教材的时候,要及时地反映航空发动机结构设计的最新进展是很困难的。我们必须考虑这个问题:如何使我们的教材内容能不断跟上航空发动机的技术进步?我们认为,这个问题应该从两个方面来解决:一是要靠教材内容的更新,包括技术的更新、机型的更新和素材的更新;二是要靠对航空发动机结构设计的理解,因为只有具备扎实的理论基础和全面的专业知识,对结构的功能、功用和设计的目的和要求理解得透彻,才能在分析结构时抓住航空发动机结构设计的精髓。

航空发动机结构的技术进步一直是在“需要—可能—现实”的矛盾中进步和发展的。例如:发动机结构的焊接技术在 20 世纪 50 年代的 WP7 上就已经采用了,但由于当时技术水平的限制,有很多问题没有得到普遍应用。现在技术发展了,成熟了,问题就解决了,先进的技术就得到了成功的、普遍的应用。机械加工出来的散热片式火焰筒,曾经因为它的种种缺点被钣金结构的气膜式火焰筒所取代。现在整体机械加工出来的火焰筒又由于它具有均匀的刚性,因而在现今的环形燃烧室里得到了广泛的应用。再比如离心式压气机在中小型双转子涡轮风扇发动机上的应用等,都说明了任何结构形式或结构方案都没有绝对的优点和缺点,都是在“需要—可能—现实”的矛盾中寻求统一,以达到最优的效果。有很多结



构上的设计思想,早就提出来了,但却一直没有得到实际应用,例如发汗式的涡轮冷却叶片,也正在等待技术水平的突破。

本教材是在国防工业出版社1989年出版的《航空发动机构造》(刘长福主编)的基础上编写,根据现代航空发动机结构设计技术的发展,更新、补充、调整了大部分内容。在分析方法上,本教材根据零、组件的功用和工作条件提出结构设计中所要解决的基本问题,然后对典型方案进行分析,最后得到若干概括性的规律。我们认为,发动机的结构方案不存在过时的问题。新方案总是要不断地取代旧方案,具体的方案总是要“陈旧”的,但其中规律性的东西能永远指导我们去分析制定新的方案,我们也只能在具体的条件下才能比较并确定哪种方案是最优的方案。只有辩证地对待方案,才不会被已往的方案所束缚,才能在已有方案的基础上有所突破。学习航空发动机结构分析的主要目的和方法就是通过对具体方案的分析,掌握共同性的规律,也就是掌握发动机结构设计的原则。设计原则是发动机结构设计的纲。

至20世纪末,航空燃气涡轮发动机的发展有两个突出的特点:一是技术水平的巨大进步;二是应用范围的不断拓展。不仅它在技术上已经涵盖了机械、热工气动、自动控制、计算机、电子技术、材料科学、人工智能等广泛的学科领域,成为名副其实的代表国家综合技术水平的复杂系统,而且其应用范围亦由空中到地面,从陆地到海洋,从飞机到导弹,从军用飞机到民用飞机,再到直升机。所以,我们把这本教材由原来的以军用型航空发动机为主,拓展到在民用航空发动机、直升机以及巡航导弹上使用的航空发动机。在教材的内容和构架上也引入了新的理念,不仅满足航空发动机结构设计专业教材的需要,也满足航空院所、陆军航空兵、二炮部队和民用航空运输培训教材的要求,扩展了教材的使用对象。

全书共分13章。第1章和第13章由中国航空发展研究中心方昌德编写;第2章、第3章、第5章至第7章和第9章由西北工业大学邓明编写;第4章和第8章由西北工业大学赵明编写;第10章由中国民用航空学



院阎国华编写;第11章由西北工业大学赵晓蓓编写;第12章由天津科技协作中心刘美玲编写。全书由刘长福和邓明负责统稿并最终定稿。

感谢沈阳航空发动机公司董书惠,贵州航空发动机研究所邹龙政,中国民航罗·罗公司培训中心赵洪利,北京飞机维修公司刘晓明、杜生忠,中国国际航空西南分公司维修基地马力和二炮部队某部马润庚等同仁为本书提供的许多帮助。

由于编者水平有限,书中错漏之处在所难免,恳请广大读者不吝指正。

编 者

2005年8月



目 录

第1章 概 论

1.1 航空燃气涡轮发动机的作用与要求	1
1.2 航空燃气涡轮发动机的基本类型	4
1.3 航空发动机的发展概况	12
思考题	14

第2章 典型发动机

2.1 涡轮喷气发动机	15
2.2 涡轮风扇发动机	18
2.3 涡轮轴和涡轮螺旋桨发动机	29
2.4 单元体结构设计	31
思考题	35

第3章 压气机

3.1 概述	36
3.2 轴流式压气机转子	39
3.3 轴流式压气机静子	60
3.4 压气机防喘系统	71
3.5 压气机附属装置	80
3.6 压气机主要零件的常用材料	88
3.7 离心式压气机	91
思考题	98

第4章 燃气涡轮

4.1 概述	100
4.2 涡轮转子	104
4.3 涡轮静子	117
4.4 涡轮部件的冷却	130
4.5 涡轮主要零件的常用材料	142
思考题	146

第5章 燃烧室

5.1 概述	147
5.2 燃烧室的基本类型	148
5.3 燃烧室基本构件的结构	161



5.4 排气污染及减少排气污染的主要措施	181
5.5 燃烧室主要零件常用材料及防护涂层	186
思考题	188
第6章 加力燃烧室	
6.1 概述	189
6.2 加力燃烧室的工作特点和构造要求	191
6.3 加力燃烧室的基本构件	192
6.4 加力燃烧室的预燃系统	203
6.5 加力燃烧室主要零件常用材料	207
思考题	207
第7章 排气装置	
7.1 尾喷管	209
7.2 反推力装置	219
7.3 噪声及消声措施	223
思考题	230
第8章 航空发动机的总体结构	
8.1 转子联接与联轴器	232
8.2 转子支承方案	239
8.3 支承结构	247
8.4 静子承力系统	263
8.5 发动机的受力分析	268
8.6 总体结构与发动机振动	275
8.7 发动机在飞机上的安装	280
思考题	284
第9章 附件传动装置和减速器	
9.1 附件在发动机上的安装和传动	286
9.2 恒速传动装置	293
9.3 二速传动装置	298
9.4 WS9 发动机的起动离合器	302
9.5 减速器	303
思考题	320
第10章 航空发动机工作系统	
10.1 发动机控制系统	321
10.2 滑油系统	338
10.3 起动/点火系统	353
10.4 喷水系统	361
思考题	363



第 11 章 航空发动机数据系统

11.1 概述	364
11.2 典型机的机载测试与显示系统	367
11.3 航空发动机的主要测试参数和传感器	380
11.4 航空发动机的整机平衡	393
11.5 航空发动机的状态监视与故障诊断	395
思考题	399

第 12 章 航机他用

12.1 概述	400
12.2 燃气发生器	403
12.3 动力涡轮	407
12.4 排气蜗壳	412
12.5 机组的总体结构	414
12.6 弹用燃气涡轮发动机	420

第 13 章 航空燃气发动机的发展、研制、使用与维护

13.1 航空燃气涡轮发动机技术的发展现状	436
13.2 未来航空燃气涡轮发动机技术的发展趋势	443
13.3 航空发动机的可靠性	456
13.4 航空发动机的结构完整性	461
13.5 航空发动机的维修性与维修性设计	466
13.6 航空发动机的研制费用与价格	474

参考文献	477
------------	-----

第 1 章 概 论

航空动力装置的功能是为航空器提供动力,推动航空器前进,所以航空动力装置也称为航空推进系统。它包括航空发动机,以及为保证其正常工作所必需的系统和附件,如燃油系统、滑油系统、点火系统、起动系统和防火系统等,通常简称为航空发动机。

1.1 航空燃气涡轮发动机的作用与要求

一、作用

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟实现了人类历史上首次有动力、载人、持续、稳定和可操作的重于空气的飞行器的飞行。这使得几千年来由少数人从事的飞行探索事业在后来的百年中发展成为对世界政治、军事、经济和技术以至人们的生活方式都有重要影响的航空业。因此,从狭义上,航空发动机是航空器飞行的动力,从广义上,也是航空事业发展的推动力。

航空发动机是飞机性能、可靠性和成本的决定性因素,发动机加燃油的重量占战斗机/轰炸机/运输机起飞总重量的 40%~60%,其寿命期费用占整个飞机的 20%~40%。特别是涡轮喷气发动机发明以后,推进技术的进展更是突飞猛进,使飞机的性能和任务能力取得了重大突破。战斗机发动机本身的推重比从 2 提高到 8,在保持发动机重量占飞机总重量百分比一定的条件下,使战斗机推重比由 0.4 提高到 1.1~1.2(见图 1.1),从而大大提高了战斗机的性能和作战能力。图 1.1 所示为发动机推重比与飞机推重比之间的关系。

但由于人和飞机能承受过载的限制,飞机推重比没有必要超过 1.2。因此,发动机推重比的进一步提高可以用来增加飞机的有效载荷。喷气运输机的燃油效率(人一千米耗油量)已改善了 60%,其中 3/4 是发动机耗油率下降的贡献。新的发动机技术为飞机提供了新的任务能力。例如加力燃烧室的采用,使军用飞机突破声障并直逼 3 倍声速,旅客机实现 2 倍声速的巡航飞行;旋转喷管发动机和升力发动机使垂直起落飞机成为可能;大推力的高涵道比涡扇发动机开创了巨型远程客机的新时代;矢量喷管为飞机提供直接力控制,从而使战斗机具有过失速超机动性;很高的涡轮前燃气温度使战斗机不开加力进行超声速巡航,大大增大航程和提高突防能力;正在研究中的涡轮-冲压组合动力装置将使实现各种高超声速飞行器成为可能。

由于航空发动机对飞机性能起着决定性的作用,而且它自身具有很高的经济价值,因而对国防和国民经济也可产生很高的效益。据估计,在实现了美国正在实施的高性能涡轮发动机技术(IHPTET)计划的目标后,打一场像海湾战争那样规模的仗,美国所需的飞机机队规模可



以缩小 1/2。在经济方面,据统计,以单位重量计,航空发动机、旅客机、计算机、轿车和轮船的价值比为 1 400 : 800 : 300 : 9 : 1。由此可见,航空发动机是一种高附加值的产品。航空发动机的价格和航空发动机工业的产值分别占飞机和航空工业的 20%~30%。根据预测,1998—2007 年世界航空发动机销售和维修市场总值为 3 500 亿美元,此外还有相当规模的航空改型燃气轮机市场。作为一种高技术产品,航空发动机的发展对其他如冶金、机械、电子、仪表、化工、石油非航空动力工业也有重要的带动和促进作用。

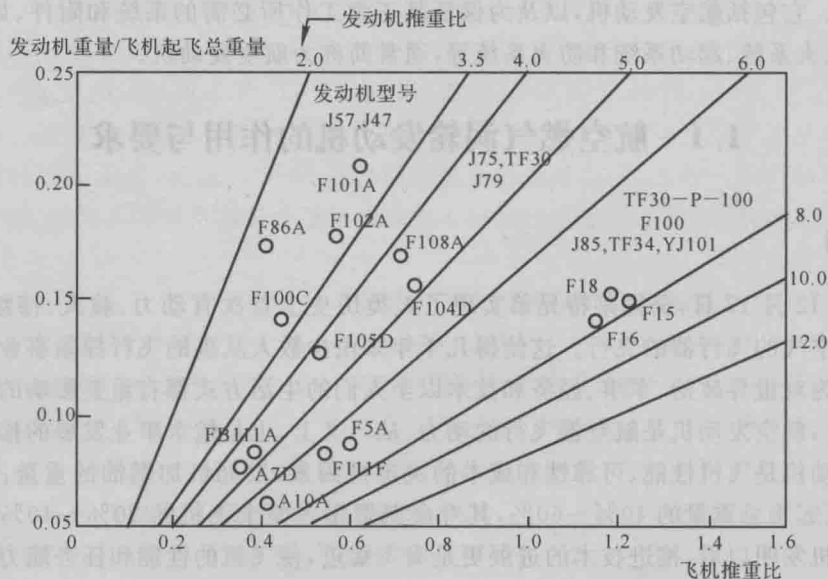


图 1.1 发动机推重比与战斗机推重比的关系

发动机的研制进度是整个飞机研制进度的决定性因素。当一种新飞机处于概念研究阶段时,发动机应处于演示/验证阶段,飞机试飞时必须有一台相当成熟的发动机与之配套,在地面要积累 2 000~4 000 h 的试验时间。因此,航空事业发达的国家都认为先进的发动机技术对保持军事和商业竞争优势发挥着重要作用,把优先发展发动机技术作为国策,制定了长远的、高投入的发动机技术发展计划,并严禁向别国转移发动机技术。

二、研究工作的特点

航空燃气涡轮发动机是当代最精密的机械产品之一,其研究和发展工作具有以下特点:

(1) 技术难度大。由于航空燃气涡轮发动机涉及气动、热工、结构与强度、控制、测试、计算机、制造技术和材料等多种学科,一台发动机内有十几个部件和系统及数以万计的零件,其温度、压力、应力、转速、振动、间隙和腐蚀等工作条件远比飞机其他分系统复杂和苛刻,而且对性能、重量、适用性、可靠性、耐久性和环境特性等又有极高的要求,因此,传统的研制过程是一个



设计、制造、试验、修改设计的多次迭代过程。在有良好技术储备的基础上,研制一种新的发动机尚要做1万小时的整机试验和10万小时的部件和系统试验,需要庞大而精密的试验设备。例如,发动机模拟高空试车台的建设本身就是一项复杂的高科技工程。在美国的国家关键技术计划中,把航空发动机描绘成一个“技术上精深得使新手难以进入的领域,它需要国家充分保护并利用该领域的成果,长期的数据和经验积累,以及国家的大量投资。”

(2)周期长。经验表明,发动机从方案论证到定型投入使用的周期比飞机机体长3~5年。美国空军有关发动机研究和发展管理的条例建议先进发动机的研制周期为9~15年。实际上,美国第四代战斗机发动机F119从1986年开始型号验证机研制,1991年开始原型机的工程和制造研制,到2004—2005年投入使用,前后共达18~19年。而相关的先进技术预研工作在20世纪70年代初就已开始,70年代中期进行部件制造和实验,80年代初进行核心机和技术验证机的试验研究。因此,研究和发展的全周期长达30年。而且,飞机试飞时就需要一台比较可靠的发动机,因此发动机必须相对独立地领先于整个飞机系统的发展,才能与飞机的其他各部分的进度协调。

(3)费用高。这与技术难度大和周期长密切相关。研制一台新发动机究竟花多少钱?为了可以比较,给出下面两个例子。一是与航天工业的火箭发动机相比,早期研制一台推力为11 000 daN*、推重比为5.5的涡轮喷气发动机的费用与装在“阿波罗”登月飞船的第一级助推火箭发动机的研制费用相当,而后的推力是前者的60倍。二是与造船工业相比,据20世纪60年代的估计,上述这台涡轮喷气发动机的研制费用要超过研制并建造58 000 t级的“玛丽皇后”号豪华客轮的后继船费用的2倍。随着技术的发展,航空发动机的研制费用增长特别快,在80年代研制一台10 000 daN的涡轮风扇发动机需10~15亿美元,为更豪华的同吨位“玛丽公主”号的研制费用的6~8倍。到90年代,F119的研制费用超过20亿美元,而当前联合攻击战斗机F-35的动力装置F136的计划研制费用竟高达50亿美元。从宏观上说,在航空均衡发展的国家,发动机的研究和发展费用约占航空研究总费用的1/4,占发动机销售额的12%~15%,远高于机械制造业3%~4%的比例。

三、设计要求

对航空发动机的一般要求是在推力满足飞机需要的前提下,推重比高、耗油率低、操纵性好、可靠性高、维修性好和环境特性满足有关条例的要求,但具体发动机的设计要求是按所装飞机的特点和要求来确定的。

1. 军用发动机

对于军用发动机来说,通常军方根据飞机的战术技术要求,拟定发动机使用要求,作为发动机总体方案设计和型号规范制定的基本依据。发动机设计部门对此要求必须认真领会,并贯

* daN 为非法定计量单位 kgf 的近似值,1 kgf $\approx$ 1 daN=10 N。



处于研制过程中。对发动机的要求主要有:

(1) 性能要求,包括地面台架性能和空中飞行性能(推力和耗油率)、起动性能、加减速性能、引气量、功率提取和过载。

(2) 适用性要求,包括发动机在飞行包线内稳定工作和油门杆使用不受限制,加力接通、切断不受限制,飞行状态变化、极限机动状态和吸入机载武器的排气时发动机稳定工作。

(3) 结构和安装要求,包括安装节位置、外廓尺寸、重量和重心位置。

(4) 可靠性要求,包括发动机寿命和工作循环、发动机各状态连续工作时间和平均故障时间。

(5) 维修性要求,包括发动机可达性、可检测性、防差错性、难易度等非常丰富的内涵。衡量维修性的主要技术指标有外场可更换件的更换时间、每飞行小时的平均维修工时和更换发动机时间等。

(6) 其他要求,如满足飞机隐身要求的红外信号和雷达反射横截面,以及飞行控制的矢量推力。

2. 民用发动机

对于民用发动机来说,在满足适航性条例的前提下,要根据飞机制造部门或航空公司的要求,进行发动机总体方案设计,以满足用户的要求。对发动机的要求主要有:

(1) 起飞推力和推重比,要满足要求。

(2) 巡航耗油率,尽可能低。

(3) 发动机结构和安装,包括安装节、外廓尺寸、重量和重心位置。

(4) 可靠性、寿命和维修性,包括空中停车率、航班准点率、计划外返修率、机上寿命和每飞行小时维修工时等。

(5) 污染物排放,满足机场当地环境保护局的规定。

(6) 噪声,满足国际民航组织(ICAO)的规定。

对燃气涡轮发动机的要求是一个矛盾的统一体,结构设计成功与否就表现在设计者所采用的各种技术措施是否能妥善处理这些既有联系又互相矛盾的要求上。它要求设计者既要有丰富的经验,又要有辩证的思想方法。

1.2 航空燃气涡轮发动机的基本类型

一、概述

航空推进系统按其组成和工作原理可分为两大类:一类是直接反作用推进系统,另一类是间接反作用推进系统,如图 1.2 所示。

直接反作用推进系统中,发动机直接将工质加速产生反作用推力,属于这一类的航空发动