

航空宇航科学与技术



国防科工委『十五』
规划教材

飞机部件与系统设计

● 酆正能 主 编
程小全 副主编
酆正能 程小全 编 著
方卫国 贾玉红



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

国防科工委“十五”规划教材
航空宇航科学与技术



责任编辑：胡 敏

书籍装帧：

ISBN 7-81077-603-7



9 787810 776035 >

ISBN 7-81077-603-7

定价：46.00 元



国防科工委“十五”规划教材·航空宇航科学与技术

飞机部件与系统设计

郦正能 主 编

程小全 副主编

郦正能 程小全 编 著
方卫国 贾玉红

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

ISBN 7-806-1118-5

内容简介

本书主要阐述了对于机身、机翼、尾翼以及起落架等部件的主要参数、形状和结构设计方案的选择,以及动力装置系统、操纵系统及液压系统等飞机系统的先进技术和设计原则。全书既注重阐述部件与系统设计的基本概念、原理及方法,也注重反映当前航空技术发展的新成果,并对新结构形式、新材料、先进系统及设计技术等进行了介绍。

本书可作为航空高等院校飞行器设计专业的教材,也可作为航空工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞机部件与系统设计/郦正能主编. —北京:北京航空航天大学出版社, 2006. 5

ISBN 7-81077-603-7

I. 飞… II. 郦… III. 飞机构件—系统设计
IV. V222

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 030272 号

飞机部件与系统设计

郦正能 主 编

程小全 副主编

郦正能 程小全 方卫国 贾玉红 编 著

责任编辑 胡 敏

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhp@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16

印张:36.25 字数:812 千字

2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷

印数:2 500 册

ISBN 7-81077-603-7 定价:46.00 元

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 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁	王文生	王泽山	田 蔚	史仪凯
乔少杰	仲顺安	张华祝	张近乐	张耀春
杨志宏	肖锦清	苏秀华	辛玖林	陈光祜
陈国平	陈懋章	庞思勤	武博祎	金鸿章
贺安之	夏人伟	徐德民	聂 宏	贾宝山
郭黎利	屠森林	崔锐捷	黄文良	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。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,为发展国民经济作出了重要贡献。

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,



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、仪器科学与技术、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

飞机设计过程大致可划分为总体设计、部件与系统设计和结构设计三个阶段。各阶段的工作相互影响,相互促进,因此必须协同发展才能很好地完成飞机设计的任务。

总体设计阐述飞机方案的形成,主要包括飞机的气动布局、重要参数的确定、性能分析及总体布置等内容。结构设计主要阐述飞机构造、传力分析以及零构件的结构设计原则与方法。部件与系统设计界于总体设计和结构设计之间,既是飞机总体设计的延伸,又是飞机结构设计的依据和出发点,起着连接总体设计与结构设计的桥梁作用。部件与系统设计内容,对于构建系统、全面的飞机设计领域的知识体系来说是一个不可缺少的重要组成部分。国内已有飞机总体设计和飞机结构设计的专业教材和著作。而现有相关的文献资料虽然也涉及到了部件与系统设计,但主要还是从结构设计角度阐述部件设计问题。实际上,目前国内还没有系统阐述飞机部件与系统设计方面的教材与著作。有鉴于此,我们编写了这本书,以填补国内有关部件与系统设计教材的空白,满足航空高等院校飞行器设计学科专业教材的需要,同时,也可作为航空工程技术人员的参考书。

本书主要阐述了对于机身、机翼、尾翼及起落架等部件的主要参数、形状以及结构设计方案的选择,同时还阐述动力装置系统、操纵系统及液压系统等飞机系统的先进技术和设计原则。我们力求本书内容的精练性与先进性,既注重阐述部件与系统设计的基本概念、原理及方法,也注重反映当前航空技术发展的新成果,并对新结构形式、新材料、先进系统以及先进的设计技术等进行了介绍。

由于部件与系统在设计要求上有较大的差别,因此本书将部件与系统设计分开来阐述。全书共分10章。第1章介绍飞机部件与系统设计的任务、设计过程与设计要求。与过去相比,当前飞机设计原理和技术已发生了深刻的变化,因此第2章对飞机部件设计的一般原理进行介绍,包



括综合设计思想、优化设计、多学科设计优化、数字化设计以及结构设计原理与方法等内容。第3~5章分别阐述机翼、机身及尾翼部件设计,包括各部件的设计原则、设计要求或设计特点,外形主要几何参数,结构形式和结构布置,设计分离面的选择和主要设计分离面的对接形式,气动弹性等内容。复合材料因其具有区别于金属材料的独特性能,作为一种新型航空材料在飞机结构上已获得越来越广泛的应用,因此第6章专门阐述复合材料翼面和机身设计,重点介绍复合材料翼面和机身设计结构形式的选择与设计特点。第7章介绍起落架设计,包括起落架形式、起落架主要参数选择、结构受力和运动形式、减震装置设计等内容。第8章介绍动力装置的进/排气系统设计、燃油系统设计以及发动机的安装设计和降噪措施。第9章介绍操纵系统设计,包括人工操纵系统、自动控制系统以及先进的电传操纵和主动控制等飞机操纵技术。第10章阐述飞机液压系统设计,包括液压系统的工作原理、工作特性、基本回路和主要附件。

本书由邴正能任主编,程小全任副主编。方卫国(第1、9章及第2、3章部分章节)、邴正能(第2、3、4、5、8章部分章节)、程小全(第6章及第3、4、5、8章部分章节)和贾玉红(第7、10章及第8章部分章节)等同志参加了编写。崔德刚教授和杨秉宪教授在百忙中对本书进行了仔细的审阅,并提出了许多宝贵意见。根据这些意见,作者对书稿进行了认真修改。在此对崔德刚教授和杨秉宪教授表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,参考了很多国内外文献资料和兄弟院校的有关教材,出版时得到了国防科学技术工业委员会的大力支持和资助,在此对所有原作者和资助单位表示诚挚的感谢。

本书是国内首次专门介绍飞机部件和系统设计的教材,可供参考的同类教材及文献资料极少,在编写上有一定的难度,对于书中存在的不足或错误,衷心希望读者批评指正。

编 者

2005年4月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 部件设计的任务和基本要求	1
1.2 部件设计过程与主要工作内容	1
1.3 部件设计的依据	6
1.4 系统设计的一般过程	7
1.5 系统设计要求	8
习 题	10
第 2 章 飞机部件设计的一般原理	11
2.1 部件优化设计	11
2.1.1 部件优化问题分类	11
2.1.2 结构布局优化	12
2.1.3 结构优化	14
2.1.4 结构可靠性优化设计	16
2.2 综合设计原理与方法	18
2.2.1 综合设计思想	18
2.2.2 多目标优化设计	21
2.2.3 多学科设计优化	23
2.2.4 数字化设计	28
2.3 当前飞机结构设计原理与方法	31
2.3.1 强度和刚度设计	31
2.3.2 疲劳、耐久性设计	32
2.3.3 损伤容限设计	36
2.3.4 可靠性设计	41
2.3.5 维修性设计	44
2.3.6 适航性设计	48
习 题	49
第 3 章 飞机机翼设计	50
3.1 机翼部件设计原则和要求	50
3.1.1 机翼部件设计的特点和原则	50
3.1.2 机翼部件设计主要依据和要求	51
3.1.3 机翼部件设计内容与方法	52



3.2 机翼外形的主要参数	54
3.2.1 翼型的选择与设计	54
3.2.2 机翼的平面几何参数	64
3.2.3 机翼前视图的形状参数	70
3.2.4 翼根与翼梢的修形	71
3.3 机翼的平面形状和布局	74
3.3.1 边条翼	74
3.3.2 后掠机翼	79
3.3.3 变后掠机翼	83
3.3.4 前掠机翼	85
3.3.5 三角机翼	87
3.4 机翼参数初步选择和大迎角气动特性	90
3.4.1 机翼参数初步选择	90
3.4.2 大迎角空气动力特性	91
3.5 机翼结构形式和结构布置	96
3.5.1 机翼受力形式选择的基本原则	96
3.5.2 机翼结构形式特点及载荷传递	100
3.5.3 机翼受力系统布局	106
3.5.4 翼根连接区受力及大开口区设计	120
3.6 机翼与机身连接结构形式	125
3.6.1 连接设计原则	125
3.6.2 机翼与机身连接形式	125
3.7 机翼设计分离面及其对接形式	131
3.7.1 分离面设计原则	131
3.7.2 分离面对接形式	132
3.8 机翼的气动弹性	136
3.8.1 静气动弹性	136
3.8.2 动气动弹性	141
3.9 机翼增升装置	146
3.9.1 增升装置的设计原理	146
3.9.2 增升装置形式选择和参数选择	150
3.10 副翼	153
3.10.1 设计原则与要求	153
3.10.2 副翼和扰流片设计	154
3.10.3 差动副翼	156
习 题	157



第 4 章 飞机机身设计	158
4.1 机身设计特点	158
4.1.1 机身的功用和内部布置	158
4.1.2 机身设计特点	160
4.1.3 机身设计要求	161
4.2 机身外形主要参数	161
4.2.1 机身的几何参数	161
4.2.2 前机身的外形特点	163
4.2.3 细长前机身的大迎角非定常空气动力特性	165
4.2.4 机身横截面的形状	166
4.2.5 机身尾部外形特点	172
4.2.6 面积律	174
4.3 机身的结构形式和结构布置	176
4.3.1 机身典型结构形式与结构布置	176
4.3.2 军机机身结构布置和承力系统设计	181
4.3.3 民机机身结构形式和承力系统布置	189
4.4 加强框的设计	193
4.4.1 加强框的结构形式	193
4.4.2 加强框的设计	195
4.5 机身结构开口设计	196
4.5.1 中、小开口区的补强设计	197
4.5.2 大开口区的补强设计	199
4.6 机身分离面的布置与设计	200
4.6.1 分离面的类型与作用	200
4.6.2 分离面的设计	201
习 题	202
第 5 章 尾翼设计	203
5.1 水平尾翼设计	203
5.1.1 平尾的功用、设计原则和要求	203
5.1.2 平尾外形和主要参数选择	204
5.1.3 平尾位置的选择	209
5.1.4 升降舵设计	210
5.2 垂直尾翼设计	211
5.2.1 垂尾的作用、设计原则和要求	211
5.2.2 垂尾外形和主要参数选择	212
5.2.3 方向舵的设计	214
5.3 尾翼结构的受力形式和连接形式	215



5.3.1 尾翼结构布局和承力系统的安排	215
5.3.2 全动水平尾翼	220
5.3.3 尾翼的安装与连接	224
5.4 操纵面的气动补偿和气动平衡	226
5.4.1 气动补偿	226
5.4.2 气动平衡	227
5.5 尾翼防颤振设计	229
5.5.1 尾翼的颤振与防止	229
5.5.2 配重结构	230
习 题	231
第 6 章 复合材料翼面及机身设计	232
6.1 复合材料的特点及其在飞机结构中的应用	232
6.1.1 复合材料的性能和设计特点	232
6.1.2 复合材料在飞机结构上的应用	236
6.2 复合材料性能	238
6.2.1 层合板的表示与材料工程常数	238
6.2.2 层合板的性能剪裁与强度估算	239
6.3 复合材料结构设计要求与原则	244
6.3.1 结构设计要求与一般原则	244
6.3.2 结构设计选材	245
6.3.3 结构工艺性考虑	248
6.3.4 设计许用值的确定	251
6.3.5 结构试验验证	254
6.4 复合材料基本结构设计	258
6.4.1 复合材料结构设计的步骤	258
6.4.2 层合板设计	259
6.4.3 夹层结构设计	261
6.5 复合材料机翼设计	264
6.5.1 复合材料机翼设计特点	264
6.5.2 复合材料机翼的结构形式	265
6.5.3 复合材料机翼设计	269
6.5.4 机翼整体油箱设计	278
6.5.5 结构细节设计	282
6.5.6 结构连接设计	286
6.6 复合材料机身设计	288
6.6.1 复合材料机身设计特点	288
6.6.2 复合材料机身设计	289



6.7 复合材料安定面与操纵面结构设计	293
6.7.1 垂直安定面结构设计	294
6.7.2 鸭翼结构设计	297
6.7.3 水平尾翼结构设计	298
6.7.4 操纵面结构设计	300
6.8 复合材料结构可修理性设计	301
习 题	302
第7章 起落架设计	304
7.1 起落架的设计任务和设计要求	304
7.1.1 起落架的设计任务	304
7.1.2 起落架的设计要求	305
7.2 起落架形式及其特点	306
7.2.1 后三点式起落架	306
7.2.2 前三点式起落架	307
7.2.3 自行车式起落架	308
7.2.4 多轮多支柱式起落架	308
7.3 起落架主要参数选择	309
7.3.1 起落架的主要参数	309
7.3.2 起落架的布局设计	311
7.3.3 起落架形式对地面滑行稳定性的影响	314
7.4 起落架结构受力	316
7.4.1 起落架的外载荷	316
7.4.2 起落架结构受力	317
7.5 前起落架设计	325
7.5.1 前起落架的构造特点和稳定距	325
7.5.2 前轮的摆振和减摆装置	327
7.5.3 前轮操纵系统和纠偏机构	329
7.6 减震装置	334
7.6.1 减震装置的任务和要求	334
7.6.2 油气式减震器的工作特性	335
7.6.3 油气式减震器的设计	342
7.6.4 双动式油气减震器的设计	348
7.6.5 全油液式减震器的设计	349
7.7 起落装置其他部件设计	351
7.7.1 机轮和轮胎设计及选择	351
7.7.2 机轮刹车装置	355
7.7.3 收放机构设计	362



7.7.4 起落架的收放位置锁和信号指示系统	365
7.8 主动控制起落架	368
习 题	371
第8章 飞机动力装置设计	372
8.1 飞机动力装置概述	372
8.1.1 动力装置的功用和组成	372
8.1.2 动力装置设计依据与要求	372
8.1.3 动力装置特点	373
8.2 飞机的进气道设计	373
8.2.1 进气道性能参数和设计要求	373
8.2.2 亚声速进气道	374
8.2.3 超声速进气道	376
8.2.4 进气道系统与前机身的一体化设计	379
8.3 排气系统设计	380
8.3.1 排气喷管的功能和要求	380
8.3.2 尾喷管设计	380
8.3.3 后机身、尾翼和喷管系统的一体化设计	384
8.3.4 反推力和矢量推力装置	390
8.4 发动机的安装	393
8.4.1 发动机在飞机上的安装形式	393
8.4.2 发动机安装的基本要求	395
8.4.3 发动机在飞机上的安装	396
8.4.4 发动机短舱设计	409
8.5 降噪结构设计	412
8.5.1 飞机的噪声环境与结构设计要求	412
8.5.2 翼装短舱的降噪设计	413
8.5.3 翼下吊装短舱的降噪设计	414
8.5.4 后机身吊挂短舱的降噪设计	416
8.6 燃油系统	417
8.6.1 燃油系统设计要求	417
8.6.2 航空燃油特点及要求	420
8.6.3 燃油系统原理图设计	424
8.6.4 燃油系统主要分系统	429
8.6.5 燃油系统的油箱设计	443
8.6.6 燃油消耗顺序控制	450
习 题	452



第 9 章 飞行控制系统设计	454
9.1 飞行控制系统概述	454
9.1.1 飞行控制系统的功用与演变	454
9.1.2 飞控系统的设计要求	455
9.1.3 飞控系统类型和组成	456
9.2 人工飞控系统布置设计	462
9.2.1 飞控系统线路敷设	463
9.2.2 飞控系统传动系数和传动比	464
9.2.3 主要部件功能及基本工作原理	466
9.2.4 主要部件在飞机上的布置	478
9.3 电传飞控系统布置设计	480
9.3.1 电传飞控系统中可靠性与余度技术	480
9.3.2 电传飞控系统的组成	482
9.3.3 电传飞控系统工作原理	484
9.3.4 主要部件及功能	486
9.3.5 主要部件在飞机上的布置	487
9.3.6 电传飞控系统的优点及存在的问题	488
9.4 自动控制系统	489
9.4.1 自动控制系统与人工飞控系统的综合	489
9.4.2 主要部件功能与基本工作原理	491
9.4.3 主要部件在飞机上的布置	491
9.5 主动控制飞机	492
习 题	503
第 10 章 液压系统	504
10.1 液压系统功用和要求	504
10.1.1 液压系统的功用	504
10.1.2 液压传动的特点	504
10.1.3 液压系统的要求	505
10.2 液压系统方案设计及原理图	508
10.2.1 液压系统的原理方案论证	509
10.2.2 液压系统的方案设计及原理图	510
10.3 液压系统主要附件特性	514
10.3.1 液压泵	515
10.3.2 液压电机和液压作动筒	522
10.3.3 液压传动系统的控制元件——控制阀	525
10.4 液压系统工作特性计算	536
10.4.1 基本公式	536