



国防科工委“十五”规划教材·航空宇航科学与技术

飞机总体设计

主编 李为吉

编者 李为吉 王正平 艾剑良 杨华保

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

本书对飞机总体设计的基本概念和方法作了系统简明的阐述,强调了飞机总体设计的综合协调、折中权衡、反复迭代等特点。

全书共六章,内容有:飞机初始总体参数与方案设计、飞机总体参数详细设计、飞机操纵系统设计与分析、飞机费用与效能分析、飞机总体参数优化。

本书可作为航空高等学校飞行器设计专业本科生的教材,也可供该专业研究生和从事飞机设计工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

飞机总体设计/李为吉主编;李为吉,王正平,艾剑良,杨华保编. —西安:西北工业大学出版社,2004.12
国防科工委“十五”规划教材. 航空宇航科学与技术
ISBN 7-5612-1838-9

I. 飞… II. ①李…②王…③艾…④杨… III. 飞机—系统结构—设计—高等学校—教材 IV. V221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 096198 号

飞机总体设计

李为吉 王正平 艾剑良 杨华保 编

责任编辑 王俊轩

责任校对 李阿盟

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

发行部电话:029-88493844 88491757

<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:15.25 字数:310 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-1838-9 定价:22.00 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 陈光禡

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

主要符号表

符号	定义	单位
A	机翼展弦比	m
a	前轮伸出量	m
B	主轮距	m
b	机翼翼展,纵向轮距	m
b_a	副翼翼展	m
b_f	襟翼翼展	m
b_t	轮胎宽度	m
c	机翼弦长	m
c'	襟翼放下时的机翼弦长	m
c''	前缘襟翼放下时的机翼弦长	m
\bar{c}	机翼平均气动弦长	m
c_f	襟翼弦长	m
C_f	当量蒙皮摩擦阻力因数	
C_D	阻力因数	
C_{D0}	零升阻力因数	
C_L	翼剖面升力因数	
$C_{L\alpha}$	翼剖面升力线斜率	
$C_{L\alpha f}$	襟翼放下时的翼剖面升力线斜率	
$C_{L\delta f}$	由于襟翼弯曲引起的翼剖面升力线斜率	
C_L	机翼升力因数	
C_m	俯仰力矩因数	
D	阻力	N
d_p, D_p	螺旋桨的直径	m
d_t, D_t	轮胎直径	m
d_f, D_f	机身直径	m
E	待机时间	h
e	奥斯瓦尔德效率因子;主轮伸出量	m



f	当量废阻面积	m^2
g	重力加速度	m/s^2
H	飞行高度	m
h	机轮高度	m
i_w	机翼安装角	$(^\circ)$
K_Δ	后掠角修正因数	
K_f	开裂式襟翼修正因数	
K_λ	尖削比修正因数	
K'	简单襟翼的修正因数	
L	升力	N
L/D	升阻比	
L_f	机身长度	m
l_m	主起落架到全机中心的距离	m
l_n	前起落架到全机中心的距离	m
Ma	马赫数	
n	过载	
n_p	螺旋桨桨叶的数目	
n_s	支柱的数目	
N	发动机的数目	
P	功率(或马力)	W (或 $hp = 736W$)
P_{bl}	桨叶的单位面积功率	W/m^2 (hp/m^2)
P_n	前起落架支柱的载荷	N
P_m	主起落架支柱的载荷	N
q	动压	N/m^2
R	航程	m
Re	雷诺数	
S	机翼面积	m^2
S_{wet}	机翼浸湿面积	m^2
S_{wf}	襟翼翼面积	m^2
t	时间	s, min, h
t/c	相对厚度	
T	推力	N
v	绝对空速	km/h
W	重量	N

X	推力(或功率)	N(或 hp)
x, y, z	从参考点到某一部件重心的距离	m
x_v, x_h, x_c	从重心到某一翼面焦点的距离	m
Y_t	发动机航向力矩的力臂	m
希腊字母		
	定义	单位
α	迎角	($^{\circ}$)
β	侧滑角	($^{\circ}$)
λ	根梢比	
Λ	后掠角	($^{\circ}$)
π	3.1415926	
Γ	上反角	($^{\circ}$)
ρ	大气密度	kg/m ³
σ	大气密度比	
θ_{tc}	机身锥角	($^{\circ}$)
ϕ	横向地面间隙角	($^{\circ}$)
θ	纵向地面间隙角	($^{\circ}$)
θ_{lof}	纵向翻滚角	($^{\circ}$)
ε	下洗角	($^{\circ}$)
ε_t	扭转角	($^{\circ}$)
η	展向站位	m
ψ	横向翻滚角	($^{\circ}$)
μ_G	地面摩擦因数	
δ	压力比	
γ	航迹角	($^{\circ}$)
θ	温度比	
δ_e	升降舵偏角	($^{\circ}$)
δ_r	方向舵偏角	($^{\circ}$)
δ_a	副翼偏角	($^{\circ}$)
δ_f	襟翼偏角	($^{\circ}$)



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,生产和传播国防科技



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

本书是航空高等学校飞行器设计专业本科生的必修课教材,重点讲述了飞机总体设计的基本原理和方法,强调飞机总体设计的综合协调、折中权衡、反复迭代等特点,通过几个循环,由简到繁完成飞机的总体设计,锻炼并增强学生的综合分析和解决问题的能力。

全书将飞机总体设计分为三个方面:方案设计、总体参数设计、决策和优化。首先研究飞机总体设计第一轮迭代设计流程,计算最重要的飞机总体参数:起飞重量、翼载荷和推重比,初步计算升阻特性,进行方案设计及初步分析。进而进行飞机总体参数详细设计,包括机翼、机身、尾翼、起落架等部件设计,验证方案设计的可行性,给出飞机三面图。书中还讨论了飞机总体设计的一些重要内容:飞机操纵系统设计,分析现代高速飞机的稳定性和操纵性,增稳和主动控制技术,电传操纵和综合飞行控制的基本概念;飞机寿命周期费用的概念和分析模型,飞机作战效能分析和评估方法。飞机设计是一个复杂的系统工程,涉及多个学科领域,必须建立综合设计思想,书中介绍了飞机多学科设计优化的基本原理、算法,面向系统设计的方法评价准则,多准则决策的层次结构和综合评价框架。

本书还吸收了国外一些成功的飞机设计经验数据、计算公式,对学生掌握飞机总体设计方法很有帮助。尽管与实际应用于工业界的方法相比,书中列出的设计与分析技术是简化了的,但课程内容安排符合学生认识规律。通过这门课的学习,使学生在定性分析能力、定量估算能力、综合运用能力等方面得到锻炼、提高。

本书是国防科工委“十五”规划教材,是在普通高等教育“九五”国家级重点教材《现代飞机总体综合设计》一书基础上,经过几年教学实践,做了修改补充;保持并加强理论严谨、系统性强的特点。其内容力图接近工



程实际,对从事飞机设计的工程技术人员有参考价值,并便于读者自学。

本书由西北工业大学航空学院李为吉、王正平、艾剑良、杨华保编写,李为吉主编。全书由李为吉、王正平统稿。

编 者

2004 年 11 月于西北工业大学

目 录

第 1 章 绪言	
第 2 章 飞机初始总体参数与方案设计	
2.1 方案设计的任务和过程	4
2.2 重量估算	4
2.3 飞机升阻特性估算	11
2.4 确定推重比和翼载	17
2.5 总体布局形式的选择(方案设计)	25
2.6 飞机气动布局的选择	38
2.7 隐身性能对飞机气动布局的影响	42
第 3 章 飞机总体参数详细设计(部件设计)	
3.1 设计的任务和步骤	57
3.2 机翼设计	61
3.3 机身设计	89
3.4 尾翼及其操纵面的设计	96
3.5 推进系统的选择与设计	104
3.6 起落架设计	122
3.7 飞机初步设计实例	131
第 4 章 飞机操纵系统设计与分析	
4.1 操纵系统的特性	141
4.2 现代高速飞机稳定性和操纵性的基本特点与操纵系统设计	146
4.3 飞机主动控制技术	153
4.4 电传操纵系统	160
4.5 综合飞行控制系统	167
第 5 章 飞机费用与效能分析	
5.1 飞机寿命周期费用的概念和分析方法	174
5.2 研究、发展、试验与鉴定费用和生产费用分析——兰德 DAPCA IV 模型	178
5.3 使用保障费用	182
5.4 飞机作战效能分析	185
5.5 多任务攻击机概念综合设计的基本原理	199



第 6 章 飞机总体参数优化

6.1 飞机总体参数的多学科设计优化	206
6.2 面向系统设计的方法	219
参考文献	227

第 1 章 绪 言

飞机设计是一项既复杂且周期又很长的工作,通常分成几个阶段进行。

首先拟定设计要求。它是由使用方(军方或民航)负责。现代军用飞机根据国家的战略方针和将来面临的作战环境,经过分析提出作战技术要求。现代军用飞机从设计要求的制定到开始服役使用一般都需要 10 年以上的的时间,要准确预计 10 年后的政治、经济、技术环境是相当困难的。一个型号的军用飞机的全寿命费用达数百亿元的量级,因而军用飞机设计要求的研究和制定是一项非常重要和影响巨大的工作。军用飞机设计要求的研究和制定一般都由专门的机构和人员进行。民用飞机主要强调安全性、经济性和舒适性,其设计要求一般是由飞机公司提出初步设想,经过与可能用户的商讨,并经过市场调查和分析讨论后制定的。

第二阶段是概念设计。它与设计要求阶段有重叠,因为有时要通过概念设计来使设计要求制定得更为合理和具体化。概念设计的目的是对飞机的气动布局、性能、重量水平、航空电子、武器、所需新技术、费用和市场前景等方面进行初步和方向性的探讨。概念设计中还有对设计要求中各项目的指标进行分析,适当降低那些对性能影响不大,但可能降低技术风险和发展费用的设计要求,有可能提出一套合理组合的设计要求。概念设计中设计师的经验和判断力起重要作用,往往采用经验或半经验的分析方法。

第三阶段是初步设计。它包括两部分内容:方案设计和打样设计。方案设计,首先根据设计要求在概念设计的基础上,进行多种气动布局方案的对比和研究,以及机翼、机身、尾翼的形状、设计参数的确定,并同时进行飞机的内部布置。这时,各个专业都要介入,如结构的传力路线设计、新材料新工艺的选用、各系统的原理设计、全机重量和重心估计、飞机性能计算和飞行品质分析,从各专业技术上检查设计方案能否满足设计要求及协调各专业的分指标。飞机方案设计中充满着矛盾,要通过各种方案的研究来评价、折中和综合,不断进行改进,直到获得一个满足要求的综合最佳方案。打样设计,在方案设计阶段主要是确定飞机总体布局,对结构和系统的考虑比较粗略,在详细设计之前,结构和系统还需要一个初步设计的过程,这个过程就是打样设计。在打样设计阶段要进行下列工作:

(1) 气动分析和风洞试验,进行全机载荷计算,性能和飞行剖面计算,操纵性和稳定性分析和气动弹性分析等。制造不同的模型,进行高低速风洞试验,提供原始气动力数据。

(2) 结构打样设计。对主要受力部件进行初步设计和分析,选择合理的结构形式,确定采用的新材料、新工艺和进行重量估算。

(3) 系统打样设计。对所有系统进行原理设计,确定主要附件和系统的功能和功率。对管道、电缆进行初步设计和通路协调。



(4)全机布置协调。一般是在全尺寸图纸上进行,画出全套协调图。随着计算机技术的发展,全机布置协调,运动机构及间隙检查,可在计算机屏幕上进行。

(5)样机审查。在打样设计后期要制造全尺寸样机,用户在全尺寸样机和真实座舱环境中检查是否符合使用要求。在样机审查批准以后,冻结设计状态,详细设计才能开始。

第四阶段是详细设计。其主要任务是:进行结构和系统的详细设计和分析,包括所有零部件设计,提供零件图、装配图、总图;进行详细的重量估算和强度校核,并进行最后的飞机性能计算;进行工艺设计,制定飞机制造工艺方案,向制造部门提供生产图纸;进行结构的静强度、动强度和寿命试验;对系统进行地面台架模拟试验;进行飞机维修性、生存力分析和研制费用、经济性评估。

第五阶段为原型机试制。为加快研制速度,现代飞机都制造多架原型机进行试飞。

第六阶段为试飞。

在试飞结束获得设计定型或型号合格证后才能进入第七阶段。

第七阶段为成批生产。

第八阶段为使用和不断改进。对已投入使用的飞机进行改进改进,扩大它的功能和延长使用寿命,世界各国都很重视这一途径。

为了使航空高等学校学生掌握飞机设计的基本概念、原理和方法,从飞机总体设计和飞机结构设计两个方面,分别用两本教材加以介绍。飞机总体设计是在使用方提出特定设计要求的条件下,选择并确定飞机布局形式和总体设计参数,经过计算、分析、修正,使所设计出来的飞机以优良的性能,最大限度地满足使用方的要求。飞机总体设计是反复迭代逐渐逼近的过程,满足设计要求,可以有多种可行的方案,确定总体设计参数和进行分析,也有不同的工作量和确定精度的方法。飞机总体设计涉及多学科领域,如空气动力学、结构强度、航空发动机、自动控制、电子技术、材料及工艺等,特别需要各方面的综合协调。本书作为航空高等学校本科生教材,为强调培养学生的综合和决策问题的能力,在内容安排上也是由简到繁的,通过几个循环完成飞机的总体设计。

本书将飞机总体设计分为三个方面:方案设计、总体参数设计、决策与优化。将飞机升阻特性和飞行性能计算与分析的内容有机地融入到方案设计和总体参数设计的章节中。第二章讨论飞机方案设计,提出飞机总体设计的第一轮迭代设计流程,其中包括总体布局及初步分析,起飞重量、翼载和推重比的计算,升阻特性初步计算,以及各种矛盾因素权衡处理方法。第三章讨论飞机总体参数设计,介绍机翼、机身和尾翼几何参数选择,内部布置,推进装置与机体一体化设计,起落架设计等。通过总体参数设计,进一步研究总体方案的可行性,进行方案决策。结合实例,给出了飞机初步设计三面图。第四章讨论飞机操纵系统的特点和基本组成,给出设计要求,分析现代高速飞机的稳定性和操纵性,增稳和主动控制技术,介绍电传操纵和综合飞行控制的基本概念。

书中还介绍了下列内容:第五章,飞机费用和效能分析。这是不同于飞机性能准则的另一



个决定设计方案取舍的重要方面。它包括了飞机寿命周期费用的组成和分析方法,研究、发展、试验、鉴定、生产费用和使用保障费用分析模型。军用飞机完成预定作战任务能力的大小,可通过作战效能进行综合评估。这一章介绍了飞机作战效能分析的概念和评估方法。现代飞机设计是一个复杂的系统工程,涉及多学科领域,各学科构成的子系统相互交叉影响。飞机设计必须建立综合设计的思想,提高综合设计的手段。第六章,飞机总体参数优化,详细介绍了飞机多学科设计优化方法的基本原理、常用算法及分析比较、近似技术、计算流程。这里有我们的研究成果和对某通用航空飞机总体参数优化的详细分析计算过程。另外,针对飞机总体设计的特点,书中还介绍了面向系统设计的方法评价准则,建立了多准则决策的层次结构和综合评价框架。

本书强调了飞机总体设计的综合协调、折中权衡、反复迭代等特点,在各个阶段都尽量给出具体的设计步骤。在论述中吸收了国外一些成功的飞机设计经验数据、计算公式,对学生掌握飞机总体设计方法很有帮助。在书中还介绍了飞机总体设计优化和决策的基本概念和方法,使读者体验设计的全过程。尽管与实际应用于工业界的方法相比,本教材所列出的设计与分析技术是简化了的,但是其内容安排符合学生认识规律。通过这门课的学习,使学生在定性分析能力、定量估算能力,以及综合运用能力与联系工程实际能力等方面将得到锻炼和提高。

为配合学生学习并掌握飞机总体设计的知识和设计方法,在编者多年教学和科研工作基础上编制了一套飞机总体设计教学版软件及详细的使用手册。学生利用这一软件,可以实现飞机总体设计的各个环节和全部过程,并可对设计方案进行权衡。软件和使用手册将另外单独出版发行。

第 2 章 飞机初始总体参数与方案设计

2.1 方案设计的任务和过程

本章是为了使飞机设计专业的学生能熟悉飞机设计过程中所用的设计决策方法,了解飞机设计的任务来源与如何进行最初阶段的设计工作而编写的。“初始总体参数的确定”和“方案设计”便是这一阶段的任务。初始设计阶段之后的情况很大程度上取决于初始设计阶段的结果和研制成本。如果初始设计阶段的结果可以满足预定的设计要求,则可以进行飞机的详细设计,如果初始设计的结果中发现了某些问题(如某种技术上的不足,或缺乏数据等),那么就要进一步地改进初始方案、研究解决问题的方案,直到问题被解决之后,形成最终设计任务书,再进行飞机的全尺寸发展研制。如果研制表明在可接受的周期和费用内不能解决这些问题,该设计项目则将被取消。

方案设计的任务主要是确定如下飞机总体参数:

- (1) 起飞总重 W_{TO} ;
- (2) 最大升力系数 C_{Lmax} ;
- (3) 零升阻力系数 C_{D0} ;
- (4) 推重比 T/W ;
- (5) 翼载 W/S 。

本章中假设飞机的任务要求是已知的,任务书中定义的典型参数有:

- (1) 装载和装载类型;
- (2) 航程或待机要求;
- (3) 起飞着陆场长;
- (4) 爬升要求;
- (5) 机动要求;
- (6) 鉴定基准(例如:实验、航标或军用标准)。

2.2 重量估算

飞机必须在带有装载物的情况下达到航程、航时、速度和巡航速度的目标。估算为了完成