



飞机设计技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ADVANCED AIRCRAFT DESIGN CONCEPTUAL DESIGN  
**ANALYSIS AND OPTIMIZATION**  
**OF SUBSONIC CIVIL AIRPLANES**

# 亚声速民用飞机 概念设计和优化

[荷兰] 埃格伯特·多伦比克 (Egbert Torenbeek) 著

段卓毅 主译 郭圣洪 副主译



航空工业出版社

WILEY

# 亚声速民用飞机概念 设计和优化

Advanced Aircraft Design  
Conceptual Design, Analysis and Optimization  
of Subsonic Civil Airplanes

[荷兰] 埃格伯特·多伦比克 (Egbert Torenbeek) 著  
段卓毅 主译  
郭圣洪 副主译

航空工业出版社

北 京

## 内 容 提 要

本书概述了亚声速运输机的设计过程、设计要求、设计方法,介绍了现代燃气涡轮发动机技术进展及其总效率和推力衰减率等特征参数对飞机性能的影响,分析了气动阻力的各种分解和预测方法以及减阻技术,探讨了飞机总体布局的选择过程,建立了一种利用品质因数(最大起飞重量或能源效率)与主要选择变量之间的准解析关系对飞机设计方案进行优化的方法。本书可供飞机设计专业的硕士研究生和博士研究生、教学人员、飞机设计人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

亚声速民用飞机概念设计和优化 / (荷) 埃格伯特·多伦比克 (Egbert Torenbeek) 著; 段卓毅等译. -- 北京: 航空工业出版社, 2016. 8  
(飞机设计技术丛书)

书名原文: Advanced Aircraft Design: Conceptual Design, Analysis and Optimization of Subsonic Civil Airplanes

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1079 - 7

I. ①亚… II. ①埃… ②段… III. ①民用飞机—设计 IV. ①V271

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 198211 号

北京市版权局著作权合同登记  
图字: 01 - 2015 - 1307

© 2013 Egbert Torenbeek

All rights reserved 2013 John Wiley and Sons, Ltd.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition, entitled Advanced Aircraft Design: Conceptual Design, Analysis and Optimization of Subsonic Civil Airplanes, ISBN 978 - 1 - 118 - 56811 - 8, by Egbert Torenbeek, published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Aviation publishing & Media Co., Ltd and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

亚声速民用飞机概念设计和优化

Yashengsu Minyong Feiji Gainian Sheji he Youhua

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016 年 8 月第 1 版

2016 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 23.75

字数: 534 千字

印数: 1—1500

定价: 98.00 元

# 《亚声速民用飞机概念设计和优化》

## 译校人员

主 译 段卓毅

副主译 郭圣洪

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 成 员 | 席小宁 | 王立行 | 许云峰 | 杨 戈 | 王银虎 |
|     | 刘聪璞 | 商立英 | 蒋汉杰 | 郭润兆 | 丁兴志 |
|     | 刘绍辉 | 李焦赞 | 张德虎 | 任晓峰 | 仝 超 |

# 序 言

对于学生和年轻研究人员来说，飞机设计是一项非常令人着迷、充满激情的工作。他们之所以对这种工程学科感兴趣，是因为他们知道这是一门综合性的学科：飞机飞行涉及空气动力学；飞机能够承载一定的有效载荷并保持机体完整需要合理的结构布局；飞机的稳定性和操纵性又涉及飞行力学，这些还只是飞机设计的基础问题。在理工领域，航空航天工程院系均遵循这一原则，并以空气动力学、轻型结构、飞行力学及空间技术等基础学科为基础，为工程专业学生提供航空航天知识。人们通常认为，飞机设计这门学科不值得开设一个专门的系。但是总有例外，荷兰代尔夫特理工大学便是欧洲首批开创飞机设计系的理工大学之一。在1980年埃格伯特·多伦比克担任系主任之后，这个具有鲜明个性的人进一步完善了飞机初步设计的方法和途径。1995年，慕尼黑理工大学（TUM）开设航空工程系，主要课程就是飞机设计，而我受聘担任系主任。这说明飞机综合设计已逐步在科研领域引起关注。

类似观点亦见于产业界。我在空中客车公司（Airbus）任职期间，技术管理层并不完全相信，飞机设计与空气动力学、结构、系统、推进和机舱等大型工程设计部门一样重要。但同时，空中客车公司却在大约10年前突然发现，公司缺乏具有全面知识、可以将飞机整体视为一个复杂系统的工程师。于是，空中客车公司大力推行改革，在公司培养“飞机架构设计师”和“飞机系统集成工程师”，并高度强调“飞机设计”专业的知识和经验至关重要。

然而，产业界与研究中心或大学对飞机综合设计的看法存在严重分歧。产业界要求并希望，大学和研究中心不要太过关注飞机集成，因为这是产业界发挥作用的专门领域。产业界声称自己是唯一的参与者，因为他们熟知市场需求并且必须在决定发展新产品并将其推入市场之前根据时间、成本、质量和风险考虑正确的设计方法。所以，产业界希望大学不要涉足飞机设计领域，并且不打算告知科研界太多有关创新型飞机设计的详情。但同时，学生和年轻工程师又不得不在大学学习期间接受培训，学习并掌握飞机设计的基本特征。与飞机设计相比，学生对低速空气动力学或机身骨

架详细设计并不太感兴趣。他/她们的动机是开发飞机模型、滑翔机，并希望知道如何设计此类飞行器以及采用何种方法确定机翼、尾翼和发动机尺寸。飞机设计科学方法因此成为大学主要学科之一以及航空工程课程的组成部分。

市场上好书不少，但我首推埃格伯特·多伦比克的书籍。此类书籍主要于1980—1990年成书，并提供了诸多20世纪60—80年代有关飞机设计的资料。当时，作者主要关注飞机初步设计，包括重量<sup>①</sup>分配、机翼和尾翼面积确定，以及操纵性和稳定性评估。

在过去的20年中，计算机能力大大提高。市面上出现大量飞机设计软件程序，只要遵循传统飞机设计特点，这些软件将表现很好且能获得优秀的设计结果。飞机设计过程的新增内容称为多学科设计优化（MDO）法。计算机速度和容量的持续提高首先使得各种类型的结构布局都可以采用有限元法进行研究，允许拟研发的飞机部件和整机的气动设计采用计算流体力学方法。接下来的步骤便是利用多学科工具。首先，整合不同设计边界，如高速和低速空气动力学。然而，如今多学科设计优化法允许采用空气动力学、结构和飞行力学设计约束条件整合法、采用多学科设计优化法设计飞机。多学科设计优化是适用于各种飞机设计特征的新型设计方法，几乎有关飞机设计的所有论文目前均采用某种多学科优化方法。

我还记得，大约5年前，飞机设计教授在研讨会期间坐在俄罗斯萨拉伏尔加（Volga）海滩激情讨论飞机优化问题。我们亦都知悉埃格伯特·多伦比克当时正在创作有关预先飞机设计的新书。然而，埃格伯特·多伦比克曾一度怀疑，在所有机构都采用大型复杂软件工具的同时，是否仍有足够多的人对错综复杂的预先飞机设计感兴趣。埃格伯特并不确知飞机行业的人士是否喜欢阅读此类书籍。我们鼓励他继续创作。埃格伯特·多伦比克在飞机设计教授中名望极高，我本人亦非常高兴他最终完成了创作。在读完本书几章内容之后，我坚信，埃格伯特的飞机设计准解析法非常有价值，是对常规计算机化分析法的绝好补充。

在未来几十年内，航空业将面临新环境方面的各种巨大挑战。尽管航空运输业绩斐然，但仍将面临新问题，如“什么飞行高度最佳，对大气的影  
响最小？”或“对于给定的一项飞行任务，新概念飞机选配了类似开式转子发动机等新设备后如何提升燃油效率，减少环境影响？”我深信，未来的新概念飞机应该能够更好地应对航空运输必须面对的、日益严格的环保

① 本书所提“重量”均为“质量”（mass）概念，单位为kg，t等。

限制。对于那些必须分析研究新边界条件影响的问题，以及大型工业计算机软件尚未得到正确验证的问题，则阅读本书将大有裨益。本书所述的物理方法有助于更好地定性分析各类新型和非传统飞机设计概念的主要参数，有助于读者理解如何评估所述概念的利弊。

最后，祝愿本书取得好成绩，并希望产业界、科研界的同仁，尤其是青年科研人员喜爱本书。

名誉教授、工学博士、名誉博士 迪特尔·施密特 (Dieter Schmitt)

空中客车公司未来项目航空顾问、前负责人  
慕尼黑理工大学布拉尼亚克航空工程学院前任教授

2012 年 11 月 25 日

# 系列前言

航空航天系列涵盖一系列航空航天飞行器及其系统，包括结构和系统设计理论与实践。本书的内容集中在飞机概念设计阶段，与航空航天系列中的其他书籍互为补充。

飞机设计属于飞机项目的早期活动，且始于概念设计，直至初步设计。飞机设计需要思维开阔、敢担冒险、顾全大局的人才。在飞机项目的这一阶段，重点是关注飞机外形、燃油和载荷装载能力，以及适应飞行任务的总重量。根据本阶段产生的概念逐步形成设计和制造所需的解决方案。本书作者从设计要求和设计注意事项着眼，以预先设计过程概述开篇，然后列举早期设计重量预测示例。下一阶段介绍飞机总体布局选择。布局选择是一项重要且复杂的问题，因为其关乎着新技术的应用和操作特性。本阶段所作决定不仅涉及而且影响项目的多个专业（部分专业会在航空航天系列中的其他书籍内阐述）。本阶段属集成阶段，总设计师会面临各种挑战。随后，本书提出了一种通过准解析关系实现显式优化的方法。本书以示例分析结尾，示例分析通常是预先设计，尤其是优化的关键所在。

本书全面论述了亚声速民用飞机的预先设计，从初步定尺寸到最后阻力计算均包括在内，内容清晰简洁。军用飞机设计师亦可从本书吸取经验。本书对飞机设计领域的大学生、研究生及从业者，以及航空航天研发领域的科学家均大有帮助。本书以作者在代尔夫特理工大学飞机设计系多年研究为素材，因此具有很高的权威性。

彼得·贝罗巴巴 (Peter Belobaba)

乔纳森·库珀 (Jonathan Cooper)

艾伦·西布里奇 (Allan Seabridge)

# 前 言

我不知道为什么人们会惧怕新观念。

我却惧怕旧观念。

——约翰·凯吉 (John Cage), 美国作家

预先设计 (AD) 是指在飞机设计和开发过程的预先设计工程师和分析师们所从事的活动。起点是一组规定了有效载荷/航程、客舱座位数、飞行性能、运行和环境特征参数的顶层要求。最初的设计活动要形成一个基本的总体设计结构, 具体形式是 (电子) 布置图、一个规定物理特征参数和基本技术假设的数据库, 以及一份符合要求的可行性评估报告。设计者可提出一个或几个概念设计方案, 在预先设计阶段的第二阶段, 也就是所谓的初步设计中, 将对这些概念设计方案进行改进和比对。概念设计和初步设计是开发过程中的关键阶段, 在这两个阶段中, 创造性和新颖性至关重要、影响深远, 决定整个项目的成败。

自 20 世纪 70 年代以来, 在越来越多设有航空航天课程的学术机构中, 飞行器设计已经成为学术教育和研究的课题。当前, 已在学术课程和教育手册中纳入了许多飞行器设计项目特有的专题, 并提供大量软件工具, 供学生进行设计实践。尽管许多学术课程均对飞行器设计投以适当关注, 但传统航空学科以设计为导向的方法有助于提高对航空科学的整体理解。然而, 设计手册基本以现有甚至过时的技术为基础, 在将其用于未来的预先飞机设计项目时可能产生与现实脱节的结果。并且, 由于引入了集成产品设计技术和多学科设计优化等大部分手册中未涵盖的内容, 设计技术正变得日趋复杂。

作者编写本书的目的是推动飞行器设计 (教学) 的进步, 书中强调的是清晰的设计思路而非复杂的计算, 也未使用大量的统计信息。另一立足点来自于工业设计人员和学术教师, 他们表示对预先设计阶段非常规飞行器概念和实际优化示例尤为感兴趣。因而本书的重点是亚声速运输机和公务 (商务) 飞机。本书既有作者的学术教学方法, 也有对 20 世纪 70 年代以来出现的高新技术和新颖的飞机结构进行深入研究取得的大量成果。本书重点介绍了代尔夫特理工大学 (Delft University of Technology) 的飞行

器设计人员在1980—2000年之间进行的研究。尽管在本书中囊括了关于近代飞机模型设计方法和统计数据的一些信息,但给出这些结果的主要目的并不是要将其作为手册使用。本书的大部分材料对之前拥有飞机设计经验的人而言均简单易懂。本书也可供设计专业方向的硕士研究生和博士研究生、设计教学人员、预先飞机设计人员和航空研究所的应用科学家使用。

本书可细分为以下几章:

(1) 第1章和第2章概述了预先设计过程、设计要求和设计方法、设计注意事项以及采用统一方程的预先设计重量预测方法。第3章对现代燃气涡轮发动机技术和结构进行了总结,定义了之后章节中使用的总效率和推力衰减率等特征参数。第4章向读者介绍气动阻力的各种分解和预测方法以及减阻技术,其中许多主题都是经验丰富的设计人员所熟知的;有些则可令学生或研究人员大开眼界。

(2) 第5章和第6章集中探讨了飞机总体布局的选择。这是一个基本但却复杂的问题,需就(新)技术应用和操作特性做出各种决策,并且多数决策具有很强的跨学科性。第5章探讨了如何在普通机翼与机身组合内分配有效负载这一基本问题。这一问题在分析师之间曾引起过探讨,有些人支持飞翼,有些人则反对飞翼。然而,最佳布局不一定是飞翼式飞机或传统的管翼结构飞机(TAW)。举例来说,翼身融合体可成为可行的替代方案。第6章探讨机翼内无有效载荷的飞机的全新设计。对前翼和三升力面构型、高度非线性升力系统、连接翼、双机身和氢动力飞机等几种与众不同的概念进行了定性评估。在有主导性能要求或几何约束的情况下,非常规的布局也许是最佳解决方案。

(3) 第7~第10章旨在通过品质因数(例如,最大起飞重量或能源效率)与主要选择变量之间的准解析关系来建立一种明确的优化方法。第7章概述了一般优化问题、术语和用以找出可行解决方案的策略。第8章主要探讨重量工程,这是飞行器设计的关键学科。该章推导出了飞行器总重与各分量重量的设计敏感性表达式。在不考虑设计约束条件下,这些表达式可用于修改基本设计以改善各种品质因数。第9章论述发动机与机身的匹配,其中考虑了根据高速和低速性能要求推导出的发动机装机功率或推力的约束条件。第10章推导了关于最佳机翼平面面积、展弦比、后掠角与相对厚度的解析法判定标准,通过图解说明了亚声速货机和跨声速喷气客机(均采用传统布局)采用上述判定标准的结果。

(4) 最后几章采用主流的解析法阐述了对预先设计,尤其是优化设计至关重要的主题。第11章介绍了机翼结构重量预测方法,该方法可满足概

念优化的大部分要求。第 12 章阐述最佳巡航飞行的传统判定标准为何对高速飞机不适用。统一了用于螺旋桨和喷气飞机（最佳）巡航性能分析的理论，其中包括任务油量和备份油量的简单估算。

概念设计现有优化方法的准解析特征并不能取代严密数值法。主要目的在于为高级设计师和研究员提供支持，并帮助他们理解飞机特征对各类设计参数不同影响之间的复杂关系，因此所得结果可能对复杂设计尺寸和优化方案较为有用。再者，解析性的判定标准较为简单，能快速估计为动力和集体设计引进不同技术可能产生的影响。如果谨慎使用，则准解析关系会足够准确并成功回答各类“假设”问题，并做出权衡研究，如重量增加问题、参数变更，并考虑衍生型飞机。从本角度来看，可将本书献给计算机辅助飞机设计技术尚未出现时期倡导本方法的以往杰出科学家和设计师，如阿什克纳斯（I. H. Ashkenas）、琼斯（R. T. Jones）、屈西曼（D. Küchemann）和 G. H. 李（G. H. Lee）等。作者希望本书能对设计师的设计理念有所裨益，希望他们将概念设计视为一门艺术而非一门科学，视为设计和制造性能优异的飞机的艺术。

# 致 谢

在此感谢主讲米歇尔·范·托伦 (Michel van Tooren) 和西奥·范·霍尔顿 (Theo van Holten) 让我进入学科组 SEAD 工作, 并感谢米希尔 (Michiel Haanschoten) 为我提供 ICT 问题专业支持。特别感谢 DAR 全体人员, 尤其是阿尔温德·甘戈利·罗 (Arvind Gangoli Rao)、詹弗兰科·拉·罗卡 (Gianfranco la Rocca)、德里·维瑟 (Dries Visser)、鲁洛夫·沃斯 (Roelof Vos) 和马克·沃斯克尔 (Mark Voskuijl), 感谢他们/她们就推进技术和飞机设计进行频繁、有趣的交流, 并在阅读本书草稿后给予宝贵反馈意见。此外, 感谢 ADSE 的埃弗特·杰西 (Evert Jesse) 在重量预测领域提供的宝贵建议。

没有我夫人的支持, 就没有本书, 所以感谢我的夫人——亲爱的尼尔森·沃克尔 (Nellie Volker)。鉴于我在关心你与无限痴迷于航空工程之间平衡得不太好, 为此我咏怀感激, 感谢你容忍我的分心, 并在本书创作的十余年间一直支持我。

埃格伯特·多伦比克  
荷兰代尔夫特理工大学, 2013 年 4 月

# 译 序

飞机设计是一门以空气动力学、轻型结构、飞行力学及空间技术等基础学科为基础的综合性的学科，也是设计和制造性能优异的飞机的艺术，它将飞机整体视为一个复杂系统。飞机设计工作需要具有全面知识的设计师和工程师。空中客车公司近年来高度强调“飞机设计”专业的知识和经验至关重要，大力推行改革，培养“飞机架构设计师”和“飞机系统集成工程师”。学生和年轻工程师需要在大学学习期间接受培训，学习并掌握飞机设计的基本特征。飞机设计科学方法因此成为大学主要学科之一以及航空工程课程的组成部分。

本书原作者埃格伯特·多伦比克（Egbert Torenbeek）从1980年起担任荷兰代尔夫特理工大学飞机设计系主任。他改进和完善了飞机初步设计的方法和途径，在飞机设计教学中享有很高的名望。亚声速民用飞机概念设计及优化属于飞机项目的早期活动，以规定的有效载荷/航程、客舱座位数、飞行性能、运行和环境特征参数等顶层要求为出发点，首先提出一个或几个概念设计方案，然后对这些概念设计方案进行对比分析和优化。与其他讲述飞机设计的书有所不同，本书强调的是清晰的设计思路而非复杂的计算，也未使用大量的统计信息。本书的重点是亚声速运输机、公务（商务）飞机、非常规飞行器概念设计和实际优化示例。书中主要介绍了亚声速民用飞机概念设计过程、设计要求、设计方法、设计注意事项，以及现代燃气涡轮发动机技术和结构、气动阻力的各种分解和预测方法，以及减阻技术、飞机总体布局的选择、普通机翼与机身组合内分配有效负载、机翼内无有效载荷的飞机的全新设计、通过品质因数与主要选择变量之间的准解析关系来建立一种明确的优化方法、重量工程、发动机与机身的匹配、关于最佳机翼平面面积/展弦比/后掠角/相对厚度的解析法判定标准、采用主流的解析法对概念设计及优化的至关重要性、统一的巡航性能分析理论等。

本书对飞机设计领域的大学生、研究生、从业者皆有裨益，也可供飞机设计专业方向的硕士研究生和博士研究生、教学人员、设计人员参考使用。

由于译校人员的水平有限，错误和不当之处在所难免，敬请各位专家和读者指正。

段卓毅

中航工业第一飞机设计研究院总设计师

# 目 录

|                        |        |
|------------------------|--------|
| 第 1 章 设计性能优异的飞机 .....  | ( 1 )  |
| 1.1 飞机设计如何发展 .....     | ( 1 )  |
| 1.2 概念产生 .....         | ( 5 )  |
| 1.3 产品开发 .....         | ( 7 )  |
| 1.4 基本构型设计概述 .....     | ( 10 ) |
| 1.5 自动化设计综合 .....      | ( 15 ) |
| 1.6 技术评估 .....         | ( 18 ) |
| 1.7 优化问题的结构 .....      | ( 20 ) |
| 参考文献 .....             | ( 22 ) |
| 第 2 章 早期方案设计 .....     | ( 29 ) |
| 2.1 方案与要求 .....        | ( 29 ) |
| 2.2 重量术语和预测 .....      | ( 33 ) |
| 2.3 统一方程 .....         | ( 37 ) |
| 2.4 航程参数 .....         | ( 41 ) |
| 2.5 环境问题 .....         | ( 45 ) |
| 参考文献 .....             | ( 49 ) |
| 第 3 章 推进与发动机技术 .....   | ( 54 ) |
| 3.1 推进技术引领航空发展 .....   | ( 54 ) |
| 3.2 喷气推进的基本概念 .....    | ( 54 ) |
| 3.3 涡桨发动机 .....        | ( 60 ) |
| 3.4 涡扇发动机布局 .....      | ( 63 ) |
| 3.5 动力装置选择 .....       | ( 67 ) |
| 参考文献 .....             | ( 69 ) |
| 第 4 章 气动阻力及减阻 .....    | ( 74 ) |
| 4.1 基本概念 .....         | ( 74 ) |
| 4.2 分解方案和术语 .....      | ( 77 ) |
| 4.3 超声速寄生阻力和诱导阻力 ..... | ( 78 ) |
| 4.4 升阻极曲线表示 .....      | ( 85 ) |
| 4.5 阻力预测 .....         | ( 89 ) |
| 4.6 降低黏性阻力 .....       | ( 94 ) |

|                           |              |
|---------------------------|--------------|
| 4.7 降低诱导阻力 .....          | (101)        |
| 参考文献 .....                | (102)        |
| <b>第5章 从传统布局到飞翼 .....</b> | <b>(111)</b> |
| 5.1 飞翼实例 .....            | (111)        |
| 5.2 有效体积的分配 .....         | (116)        |
| 5.3 气动效率研究 .....          | (121)        |
| 5.4 $MaL/D$ 参数研究 .....    | (125)        |
| 5.5 一体化布局的比较 .....        | (127)        |
| 5.6 飞翼设计 .....            | (134)        |
| 参考文献 .....                | (136)        |
| <b>第6章 全新设计 .....</b>     | <b>(142)</b> |
| 6.1 主流和激进布局 .....         | (142)        |
| 6.2 机型形态学 .....           | (144)        |
| 6.3 机翼和尾翼布局 .....         | (148)        |
| 6.4 前置翼面式飞机 .....         | (152)        |
| 6.5 非平面升力系统 .....         | (155)        |
| 6.6 连接翼飞机 .....           | (159)        |
| 6.7 双机身飞机 .....           | (163)        |
| 6.8 氢燃料商业运输机 .....        | (167)        |
| 6.9 有前景的概念 .....          | (169)        |
| 参考文献 .....                | (170)        |
| <b>第7章 飞机优化设计 .....</b>   | <b>(179)</b> |
| 7.1 完美设计: 不切实际的幻想 .....   | (179)        |
| 7.2 优化要素 .....            | (180)        |
| 7.3 解析优化或数值优化 .....       | (186)        |
| 7.4 大规模优化设计问题 .....       | (191)        |
| 7.5 概念设计中的实用优化 .....      | (197)        |
| 参考文献 .....                | (200)        |
| <b>第8章 最佳重量理论 .....</b>   | <b>(208)</b> |
| 8.1 重量工程: 飞机设计的核心 .....   | (208)        |
| 8.2 设计灵敏度 .....           | (210)        |
| 8.3 喷气运输机空重 .....         | (212)        |
| 8.4 机体阻力的设计灵敏度 .....      | (216)        |
| 8.5 推力、动力装置和燃油重量 .....    | (219)        |
| 8.6 起飞重量、推力和燃油效率 .....    | (224)        |
| 8.7 总结和思考 .....           | (228)        |
| 参考文献 .....                | (230)        |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 第 9 章 发动机和机体的匹配 .....    | (234) |
| 9.1 需求与约束 .....          | (234) |
| 9.2 根据巡航性能选取的发动机大小 ..... | (235) |
| 9.3 低速要求 .....           | (237) |
| 9.4 起飞图解分析 .....         | (239) |
| 9.5 进近和着陆 .....          | (244) |
| 9.6 发动机选择和安装 .....       | (246) |
| 参考文献 .....               | (248) |
| 第 10 章 机翼气动设计的要素 .....   | (252) |
| 10.1 引言 .....            | (252) |
| 10.2 平面几何形状 .....        | (254) |
| 10.3 设计灵敏度信息 .....       | (257) |
| 10.4 亚声速飞机机翼 .....       | (260) |
| 10.5 含约束条件的优化 .....      | (263) |
| 10.6 跨声速飞机机翼 .....       | (265) |
| 10.7 升力系数和展弦比 .....      | (271) |
| 10.8 详细设计 .....          | (275) |
| 10.9 高升力装置 .....         | (278) |
| 参考文献 .....               | (279) |
| 第 11 章 机翼结构及其重量 .....    | (286) |
| 11.1 引言 .....            | (286) |
| 11.2 方法 .....            | (288) |
| 11.3 基本翼盒 .....          | (292) |
| 11.4 惯性力减小和设计载荷 .....    | (299) |
| 11.5 非理想重量 .....         | (302) |
| 11.6 次要结构和杂项结构 .....     | (306) |
| 11.7 铝合金的应力水平 .....      | (310) |
| 11.8 优化 .....            | (313) |
| 11.9 应用 .....            | (317) |
| 参考文献 .....               | (320) |
| 第 12 章 统一的巡航性能 .....     | (323) |
| 12.1 引言 .....            | (323) |
| 12.2 最大气动效率 .....        | (326) |
| 12.3 参数 $MaL/D$ .....    | (329) |
| 12.4 航程因子 .....          | (332) |
| 12.5 巡航飞行时的航程 .....      | (336) |
| 12.6 巡航过程与任务耗油量 .....    | (339) |