

# 飞行器 结构力学基础

薛明德 向志海 编著

清华大学出版社

薛明德 向志海 编著

# 飞行器结构力学基础

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是一本阐述飞行器结构分析基本理论与方法的教材。全书首先介绍了飞行器结构的发展过程以及设计思想的演变。随后介绍了杆件(特别是包括了闭口、开口薄壁杆件以及复合截面杆件)、板与壳等组成飞行器结构的基本薄壁元件的受力与变形特点以及相应的力学分析方法。在此基础上介绍了静定杆系与杆板组合结构分析的理论与方法,然后从能量原理入手讲述了相应的静不定结构的分析方法。最后讲述了结构稳定性的基本概念、稳定性分析的基本原理以及飞行器中典型的杆、板与壳在轴压、侧压及扭矩作用时失稳的力学行为与分析方法。各章附有例题、习题及参考文献。

本书可作为航空航天专业、力学专业大学本科教材,也可作为其他有关专业结构力学课程的参考书,还可供上述专业教师及工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

## 图书在版编目(CIP)数据

飞行器结构力学基础/薛明德,向志海编著. —北京:清华大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-302-20275-2

I. 飞… II. ①薛…②向… III. 飞行器—结构力学 IV. V414

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 085169 号

责任编辑:石磊 李嫚

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:19 字 数:409 千字

版 次:2009 年 9 月第 1 版 印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:32.00 元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:027286-01

# 前言

## FOREWORD

本书是清华大学航天航空学院本科生飞行器结构力学课程的教材。本书作者通过调研国内外相关教材、专著和其他文献,并结合多年来讲授相关固体力学课程和科研工作的经验,编写了一本《飞行器结构力学讲义》。从2007年春季起,该讲义经过清华大学三个年级本科生试用,在此过程中不断修改、补充和完善,最终形成了本教材。

在本书编写过程中,主要遵循以下几个方面的原则:

### 一、面向工程、注重建模

本门课程既具有很强的工程背景,又必须阐明很多基本的力学概念。本书力图先从工程的观点介绍这门学科的发展历史、背景知识以及今后的发展方向,然后再讲解具体的力学分析方法。教材中的例题和习题都尽量结合具体的飞行器结构来选用。由于近代各种CAE(computer aided engineering)软件已经在飞行器结构分析中被广泛采用,设计人员逐渐从繁复的计算工作中解放出来;对于结构分析工程师来说,在一定的设计条件下能够选择合适的结构形式、从实际工程问题中抽象出合理的力学模型更凸显其重要性。这就要求学生通过本门课程的学习,对工程中常见的各类不同结构(如开口与闭口薄壁杆件,板与壳)承受各种不同载荷的能力与行为融会贯通、有比较透彻的理解。这些不同构件常常同时在诸如航天器、火箭、飞机等同一个工程结构中存在,但在以往传统的力学专业教学中,这些内容往往分属不同课程,学生缺乏总体概念,很难将它们互相联系与比较,本书力求在这方面具有较鲜明的特色。

### 二、强调基础、注重推导

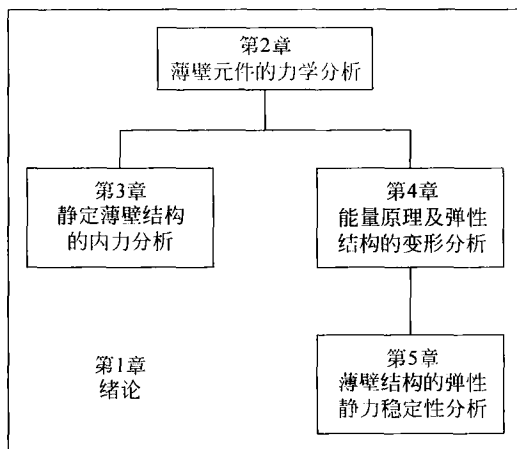
现有各种结构力学教材比较注重各种具体结构的计算方法;为了使能够适应近代航空航天科技发展对于结构创新的要求,本教材力求阐明基本的力学概念、假设和原理,并要求学生结合具体结构能自行推导大部分公式。通过这种训练,希望学生不但知道怎样求解具体的问题,而且还能从基本原理上领悟这样做的道理,而不是死记硬背现成的计算公式,即力求贯彻“授人以鱼,不如授之以渔”的教学原则。

### 三、有所取舍、重点突出

飞行器是一个很广泛的概念,它包含了飞机、火箭、导弹、飞艇、卫星、飞船等多种类别。每种飞行器的运行工况、结构形式和材料都不尽相同,相应的设计要求和结构的具体分析方法也有所区别。而在大学里学习本门课程的学生,毕业以后所投身的工程领域也是多种多样的。这些庞杂的具体结构分析内容很难在一本书中讲透彻,但对它们进行结构力学分析的基础知识是相通的。加之随着现代数字模拟技术的飞速发展,数字化设计已经成为这个行业技术发展的必然趋势,对于传统的结构力学的讲授必须突出最基本的内容、有所取舍。作为一本专业基础教材,本书只能以常规飞行器为例,对于其中普遍应用的金属杆件、板与壳元件及其组合结构进行叙述,力图阐明它们的强度、变形和稳定性方面的基本概念和分析方法,为学生毕业后适应多种工程对象结构分析的要求打下扎实的基础。

本教材针对大学工科高年级学生编写。在学习本教材之前,要求学生先修材料力学课程;本书的基础知识还涉及弹性力学的基本微分方程,由于其内容可以在很多教科书中找到,不再列入本书。此外,本书也不叙述飞机、火箭等飞行器的结构细节,这部分内容学生可以在飞行器结构设计课程中进行学习。至于复合材料结构分析、有限元方法、疲劳断裂、振动理论以及飞行器结构优化设计等知识,学生可以从相应的专业课程中学到。而诸如飞艇中的薄膜结构分析,高超音速飞行器的防热结构分析等这些特殊的问题,学生可以在工作需要时进行更加深入的学习和研究。

基于以上的考虑,全书共分五章(书中带\*号的章节可以作为选修内容),它们之间的关系可由下图表示:



第1章回顾了飞行器结构分析技术发展的历史过程,介绍了飞行器的分类、典型结构、使用工况和使用的材料,并对飞行器设计的整个过程和思想做了简单的描述。通过这部分内容的学习,希望学生对这门学科的简要发展历程,它所要解决的工程问题,以及它在整个

飞行器设计过程中所处的地位建立一个整体的印象,并明确这门课程学习的目的、意义和相应的特点。另外,第1章中列出的参考文献也有利于今后进一步学习相关知识。

第2章阐述杆件、板与壳这类薄壁元件的基本特点、基本理论假设以及相应的分析方法。由于整个飞行器结构几乎都是由这些基本薄壁元件组成的,因此这部分内容是整个课程的基础。本章中关于弹性圆环的分析方法是我们根据以往的研究工作系统地总结出来的。本章还阐述了工程中复杂结构组合截面杆件的分析方法,为读者对于飞行器部件进行总体的近似分析打下初步基础。

第3章阐述静定薄壁结构的内力分析。这部分的内容和传统《结构力学》教材比较相似,但增加了杆板组合模型方面的内容。这些方法曾经在飞行器结构分析中发挥了巨大的作用。虽然它们现在已经逐渐被有限元等数值分析方法所取代,但是通过这章的学习,对理解结构的传力特性还是很有帮助的。

第4章从能量角度来进行薄壁结构的分析。这既是《弹性力学》能量原理的自然应用,又是有限元等数值分析方法的基础。通过该章的学习,希望学生能够熟悉各种薄壁结构的包括温度影响在内的能量表达公式,能应用能量法来进行静不定结构的分析,并能够理解有限元等近似计算方法的基本思想。

第5章讲述薄壁结构的弹性静力稳定性分析。阐明稳定性问题的基本概念,介绍结构弹性静力稳定性分析的基本方法和各种结构的典型失稳形式和特点,并对飞行器中一些简单结构的弹性静力稳定性问题给出定量计算公式。

我们的教学经验表明,在本教材的基础上配合相应的设计和制作实验会达到更好的教学效果。这部分内容可以由教师具体设计,不再纳入教材内容。

本教材的编写工作得到了清华大学航空航天学院和清华大学出版社的大力支持。清华大学航空航天学院学生航空创新实践基地和清华大学强度与振动中心实验室的各位老师为我们的实验教学环节提出了很好的建议,并提供了场地和设备方面的支持。任文敏教授给我们提供了大量的国内外资料和习题。殷雅俊教授为本教材第3章的编写提供了很好的素材。肖志祥副教授给我们提供了机身气动载荷分布的计算结果。在本教材即将出版之际,作者向所有对本教材做出贡献的朋友们表示衷心的感谢!

由于时间和编者的水平有限,本教材中不妥之处恐难避免,敬请读者批评指正。

编者

2009年7月于北京清华园

# 目录

## CONTENTS

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....            | 1  |
| 1.1 飞行器结构力学的发展简史 .....           | 1  |
| 1.1.1 飞机结构和材料的演变.....            | 2  |
| 1.1.2 飞机结构的力学分析 .....            | 20 |
| 1.1.3 火箭和导弹结构 .....              | 25 |
| 1.1.4 航天器结构 .....                | 28 |
| 1.1.5 气球和飞艇结构 .....              | 32 |
| 1.2 飞行器研制的基本过程和思想.....           | 34 |
| 1.2.1 飞行器研制的基本过程 .....           | 34 |
| 1.2.2 飞行器结构设计思想 .....            | 35 |
| 习题 .....                         | 37 |
| 本章参考文献 .....                     | 37 |
| <b>第 2 章 薄壁元件的力学分析</b> .....     | 40 |
| 2.1 典型飞行器结构的受力特征.....            | 41 |
| 2.1.1 作用在飞机上的外载荷 .....           | 41 |
| 2.1.2 机翼结构 .....                 | 41 |
| 2.1.3 机身结构 .....                 | 43 |
| 2.1.4 火箭结构 .....                 | 45 |
| 2.2 杆件、薄板与薄壳承载的基本特点与基本假定 .....   | 47 |
| 2.2.1 杆件、薄板与薄壳的几何特点与坐标系的建立.....  | 47 |
| 2.2.2 杆件、板与壳受力与变形的特点,广义内力素 ..... | 49 |
| 2.2.3 杆件、板与壳所承受的外载荷.....         | 52 |
| 2.2.4 杆件、板与壳承载方式与承载能力的比较.....    | 54 |

|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 2.3        | 任意截面形状直杆的拉伸、压缩、弯曲与扭转     | 59         |
| 2.3.1      | 直杆受单轴拉压                  | 59         |
| 2.3.2      | 直梁受横向力作用下的平面弯曲           | 62         |
| 2.3.3      | 复合截面直杆受轴力与横向力作用下的平面拉压与弯曲 | 66         |
| 2.3.4      | 梁的弯曲剪应力,非对称截面梁的弯曲,剪力中心   | 70         |
| 2.3.5      | 杆件的自由扭转问题                | 72         |
| 2.4        | 薄壁杆件                     | 76         |
| 2.4.1      | 薄壁杆件受力与变形的基本假定           | 76         |
| 2.4.2      | 薄壁杆件的自由扭转问题              | 77         |
| 2.4.3      | 薄壁梁的弯曲剪应力                | 81         |
| 2.4.4      | 开口薄壁杆件的约束扭转              | 93         |
| 2.4.5      | 闭口薄壁杆件的约束扭转*             | 110        |
| 2.4.6      | 剪切滞后                     | 117        |
| 2.5        | 弹性圆环*                    | 119        |
| 2.5.1      | 弹性圆环的基本形状、坐标系与力学分析的基本假定  | 119        |
| 2.5.2      | 弹性圆环变形的几何关系和弹性关系         | 121        |
| 2.5.3      | 弹性圆环的平衡方程                | 123        |
| 2.6        | 弹性薄板的弯曲问题                | 127        |
| 2.6.1      | 弹性薄板的小挠度弯曲微分方程           | 127        |
| 2.6.2      | 弹性薄板小挠度弯曲的边界条件           | 131        |
| 2.6.3      | 弹性薄板小挠度弯曲微分方程的解          | 134        |
| 2.7        | 弹性薄壳理论                   | 141        |
| 2.7.1      | 旋转曲面的几何特性                | 142        |
| 2.7.2      | 旋转壳的薄膜理论                 | 143        |
| 2.7.3      | 圆柱壳轴对称情况的一般(有矩)理论        | 153        |
|            | 习题                       | 159        |
|            | 本章参考文献                   | 165        |
| <b>第3章</b> | <b>静定薄壁结构的内力分析</b>       | <b>166</b> |
| 3.1        | 几何不变性和不可移动性              | 166        |
| 3.2        | 桁架结构                     | 170        |
| 3.2.1      | 判断桁架几何不变性和不可移动性的方法       | 171        |
| 3.2.2      | 静定桁架的解法                  | 178        |
| 3.3        | 刚架结构                     | 183        |
| 3.3.1      | 组成刚架的方法                  | 184        |



|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 3.3.2 静定刚架的解法             | 185        |
| 3.4 混合杆系结构                | 185        |
| 3.5 静定薄壁结构                | 186        |
| 3.5.1 受剪板的平衡              | 187        |
| 3.5.2 平面静定薄壁结构            | 190        |
| 3.5.3 空间静定薄壁结构            | 195        |
| 习题                        | 203        |
| 本章参考文献                    | 206        |
| <b>第4章 能量原理及弹性结构的变形分析</b> | <b>207</b> |
| 4.1 功和能量的基本概念             | 208        |
| 4.1.1 真实状态与可能状态           | 208        |
| 4.1.2 功、广义力、广义位移和广义变形     | 209        |
| 4.1.3 应变能和应变余能            | 210        |
| 4.2 能量原理                  | 213        |
| 4.2.1 可能功原理与功的互等定理        | 214        |
| 4.2.2 和应变能相关的能量原理         | 216        |
| 4.2.3 和应变余能相关的能量原理        | 220        |
| 4.3 静不定结构的分析              | 228        |
| 4.3.1 力法                  | 229        |
| 4.3.2 位移法                 | 237        |
| 4.4 近似解法                  | 239        |
| 4.4.1 里兹法                 | 240        |
| 4.4.2 伽辽金法                | 243        |
| 4.4.3 有限单元法               | 244        |
| 习题                        | 245        |
| 本章参考文献                    | 247        |
| <b>第5章 薄壁结构的弹性静力稳定性分析</b> | <b>248</b> |
| 5.1 结构稳定性的基本概念            | 249        |
| 5.1.1 平衡状态的类型             | 249        |
| 5.1.2 静力稳定性问题的分类          | 249        |
| 5.1.3 屈曲模态                | 253        |
| 5.1.4 屈曲与破坏的关系            | 256        |
| 5.1.5 保守系统中弹性结构屈曲的研究方法    | 256        |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 5.2 开口薄壁杆件的弯扭屈曲 .....        | 261 |
| 5.2.1 中心受压杆件的扭转屈曲 .....      | 262 |
| 5.2.2 受弯薄壁梁的侧向屈曲 .....       | 264 |
| 5.3 薄板的弹性屈曲 .....            | 267 |
| 5.3.1 矩形薄板的弹性屈曲 .....        | 267 |
| 5.3.2 加筋薄板的前屈曲分析 .....       | 271 |
| 5.3.3 受压加筋板的后屈曲分析 .....      | 274 |
| 5.3.4 张力场梁设计 .....           | 279 |
| 5.4 薄壳的弹性屈曲 .....            | 284 |
| 5.4.1 圆柱薄壳的轴压屈曲 .....        | 284 |
| 5.4.2 圆柱薄壳在纯弯曲载荷作用下的屈曲 ..... | 286 |
| 5.4.3 圆柱薄壳的扭转屈曲 .....        | 286 |
| 5.4.4 圆柱薄壳的外压屈曲 .....        | 287 |
| 5.4.5 圆柱薄壳在多组载荷下的屈曲 .....    | 287 |
| 5.4.6 圆柱曲板的轴压和剪切屈曲 .....     | 288 |
| 5.4.7 球壳的外压失稳 .....          | 288 |
| 5.4.8 加筋壳屈曲问题简介 .....        | 289 |
| 习题 .....                     | 290 |
| 本章参考文献 .....                 | 291 |

# 第 1 章

## 绪 论

飞行器结构力学是一门有很强应用背景的课程,为了明确学习目的和重点,有必要了解飞行器发展的历程、飞行器的主要组成部分、各部分的典型结构形式、使用的材料、所受的载荷以及飞行器设计的基本过程。在进行实际结构分析时,这部分知识也有助于结构分析师从工程问题中抽象出合理的力学模型,并在此基础上进行具体的力学分析。

这些基础知识的详细内容可以在航空航天发展史、飞行器总体设计、飞行器结构设计和航空航天材料学等专门的课程中获得。本章只对这些内容进行比较概括的介绍,力求突出其中和力学分析相关的部分。

飞行器包括飞机、气球、飞艇、导弹、运载火箭、人造地球卫星、空间探测器、载人飞船、空间站、航天飞机与航空飞机等多种类别。但很多飞行器结构分析的方法和技术都源于对飞机结构的分析。因此,本章首先比较详细地介绍飞机结构的发展历程和相应结构分析方法的演变,然后简略介绍其他飞行器相对于飞机的自身结构特点。

### 1.1 飞行器结构力学的发展简史

飞行曾经是人类一个很古老的梦想。这个梦想里既有嫦娥飞天、天使下凡和神奇飞毯等浪漫的传说,也有风筝、竹蜻蜓和孔明灯等具体的尝试,更有万户升空这类勇敢而悲壮的故事。人类历经长期不懈的探索,终于使这个梦想从飞天的神话变成了身边的现实<sup>[1~6]</sup>。1783年法国人蒙特哥尔菲兄弟(Mongtolfier brothers)和查尔斯(J. A. Charles)的气球使人类首次实现了长时间的飞行。1903年美国莱特兄弟(Wright brothers)研制成功了第一架可操控的载人动力飞机。1947年美国耶格尔(C. Yeager)驾驶 Bell X-1 飞机首次实现了超

音速飞行。1957年前苏联成功发射了世界上第一颗人造地球卫星。1961年前苏联宇航员加加林(Y. Gagarin)乘坐东方号飞船首次进入太空。1969年,美国阿波罗11号飞船第一次登月成功,阿姆斯特朗(N. Armstrong)成为第一个登上月球的宇航员。1971年前苏联首先将世界上第一个空间站——礼炮一号送上了近地轨道。1981年美国首次将可以重复使用的、往返天地间的有翼式载人航天器——哥伦比亚号航天飞机射入近地轨道。这些辉煌的成就,一方面基于空气动力学、推进技术、控制技术和材料科学的发展,另一方面也依赖于飞行器结构设计和分析技术的进步。下面就沿着结构分析这条线索,对飞机、火箭、飞艇和航天器的发展过程做一个概括的回顾和展望。

### 1.1.1 飞机结构和材料的演变

在动力飞机的萌芽和早期发展阶段,空气动力学理论只能对飞机的设计工作提供初步的参考。飞机设计者主要凭经验进行探索,力图通过改善机翼布局与翼型增加飞机的升力、降低阻力并改善飞机的操控性能。但当时的发动机只能为轻质但脆弱的竹木结构提供有限的动力;由于重量和价格原因,强度和刚度较高的金属材料只能用在极少数关键的承力部位,无法得到大量使用。用于保持机身和机翼气动外形的蒙皮则采用麻布或帆布材料,它们可以传递气动压力,承受扭转剪应力,但无法承受弯曲应力。在这样的背景下,虽然人们尝试了从单翼到多翼的各种机翼结构形式,但最终却是莱特兄弟的双翼飞机“飞行者一号”(图1.1)成功地用重于空气的飞行器实现了第一次可操控的载人有动力飞行。这是因为在当时的技术条件下,木材较低的强度和刚度限制了机翼的翼展长度,而不高的飞行速度和简单的翼型又使单翼飞机很难获得足够的升力。和单翼布局相比较,相同翼展的多翼布局却可产生更大的升力,而且各层机翼之间安装的支撑杆和拉索将各个翼面连接在一起,大大增加了机翼结构的整体刚度。在各种多翼布局中,双翼布局是一种最简单的形式<sup>[2.4.7-8]</sup>。

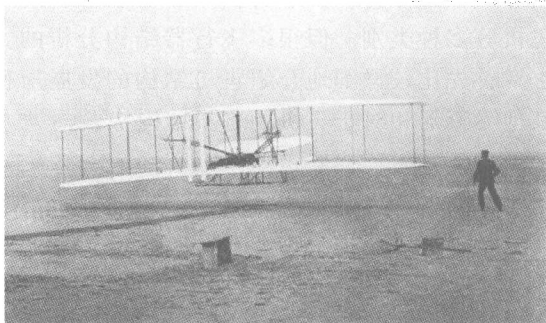


图 1.1 莱特兄弟的双翼飞机“飞行者一号”(Wright Flyer)(美国,1903年)

虽然双翼结构获得了成功,但仍然有一些人对其合理性提出了质疑。因为和单翼结构相比,双翼布局中机翼之间的支撑结构不但制造安装复杂,而且会产生很大的气动阻力;另

外,从直观上分析,既然鸟儿都是单翼的,那么单翼飞机似乎应是一种更合乎逻辑的设计。在这些热衷于单翼飞机设计的先驱中,法国人贝尔特利(R. E. Pelterie)、杜蒙(A. S. Dumont)、拉瓦瓦索欧(L. Levavasseur)和布雷里奥(L. Blériot)是其中的代表性人物。他们用张线把机翼和机身连接起来以增加机翼的刚度,同时采用了更大功率的发动机。通过这些技术手段,他们设计的单翼飞机也陆续飞上了天空。贝尔特利设计的单翼机(图 1.2)和布雷里奥设计的“布雷里奥 XI”型单翼机(图 1.3)就曾进行过出色的飞行,后者还于 1909 年首次飞越了英吉利海峡,轰动了世界。单翼飞机由于飞行阻力较小,所以和双翼飞机相比有速度上的优势,曾多次刷新了飞行速度的纪录。但是脆弱的机翼仍是当时单翼机的最大弱点,在实际飞行时经常发生机翼折断事故。为解决此问题人们曾经做过多次强度和刚度试验;但当时只能进行静力试验,所加载荷和实际飞行时的气动载荷有很大出入。另外,当时的单翼飞机主要通过机身立柱和机翼之间的上下张线来增强机翼的刚度(图 1.2 和图 1.3),于是干扰了气流,影响了飞行的稳定性,而且相应的气动力分析也相当复杂。由于这些原因,单翼飞机的结构安全问题一时没能得到很好的解决。

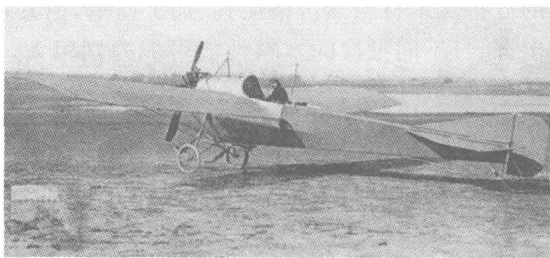


图 1.2 贝尔特利设计的单翼机(REP-1)(法国,1907年)

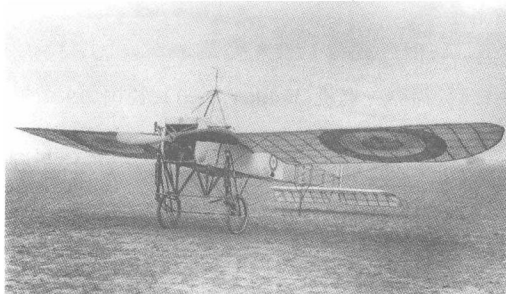


图 1.3 布雷里奥 XI 型单翼机(法国,1909年)

为安全起见,直至 20 世纪 30 年代中期,人们都偏向于使用双翼飞机,甚至多翼飞机,只不过机翼间的复杂支撑结构逐渐被相对简洁的支柱所代替(图 1.4)。但是随着战争和商业需求的不断增长,迫切要求全面提高飞机的性能。这种需求大大推动了空气动力学、航空发

动机技术以及飞机材料和结构技术的发展。此时低速空气动力学在理论和试验技术上都有了长足的进步。库塔(M. W.)与儒科夫斯基(H. E. Жуковский)的机翼环流理论已经建立,雷诺(O. Reynolds)数的研究和普朗特(L. Prandtl)边界层理论的创立加深了人们对流体粘性阻力的理解,甚至空气的可压缩性也引起了人们的注意。工程师们陆续建造了各类风洞以测量模型飞机在各种来流下所受的气动载荷。这些成就使人们逐步加深了对各种形式飞机的升力和阻力特性的认识,并开始用于指导飞机的设计工作。例如通过对各种翼型进行系统、深入的研究后发明了缝翼和襟翼等增升装置,认识到流线型机身对减小阻力的作用。与此同时,航空燃料、发动机结构、材料和冷却方式都有很大的改进,涡轮增压技术和变矩螺旋桨技术也逐渐成熟,这些都使活塞式发动机的性能得到了突飞猛进的提高。空气动力学和发动机技术的进步促进了飞机的速度、载重、航程和机动性等性能的发展。这时就要求飞机做成流线型并具有光滑外表以减少气动阻力。因此要求座舱是全封闭的,发动机放在整流罩里,起落架可以藏在机身和机翼里,淘汰双翼布局而代之以很薄的单翼结构。相应地要求飞机结构要能承受更大的载荷,机翼要有足够的刚度以避免颤振问题,等等。这些结构的变化需要得到相应材料的支持。木材虽然价格便宜、加工简单,但其强度和刚度差、易潮、易燃、易腐蚀、各向异性突出,而且不同批次的木料性能可能差别很大。人们迫切需要找到可以替代木头的材料来满足飞机发展的需要。

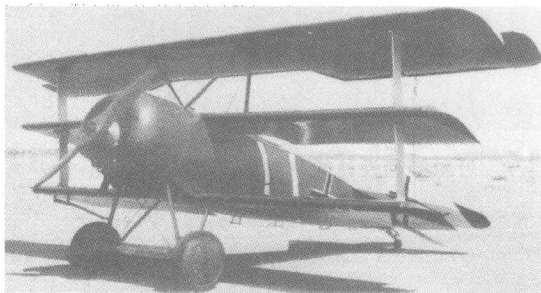


图 1.4 福克三翼机(Fokker Dr. 1)(德国,1917年)

虽然金属材料笨重、不易加工且价格高昂,但是人们仍然希望利用其高强度和高刚度的特点来制造飞机<sup>[9]</sup>。一些飞机开始使用金属做内部的骨架,但仍用木板或布做蒙皮,例如“一战”中著名的福克三翼机(图 1.4)。还有一些航空先驱开始大胆地尝试制造全金属的飞机。1912年德国的瑞斯纳(H. J. Reissner)和容克斯(H. Junkers)用钢桁架做机身,波纹钢板做机翼,试飞成功了世界上第一架全金属实验飞机(图 1.5)。此后容克斯一直致力于制造全金属飞机,坚信金属是制造飞机的最好材料。1915年他造出了世界上第一架全金属单翼机(图 1.6)。该飞机创造性地采用了厚翼型和悬臂梁式结构,因此不需要外部张线就能满足刚度要求。另外,其光滑的薄锡板蒙皮大大减少了飞行的阻力,从而创造了当时的飞行速度纪录。但笨重的机身影响了其操控性能,以至于被人们戏称为“锡驴”(Tin Donkey)。

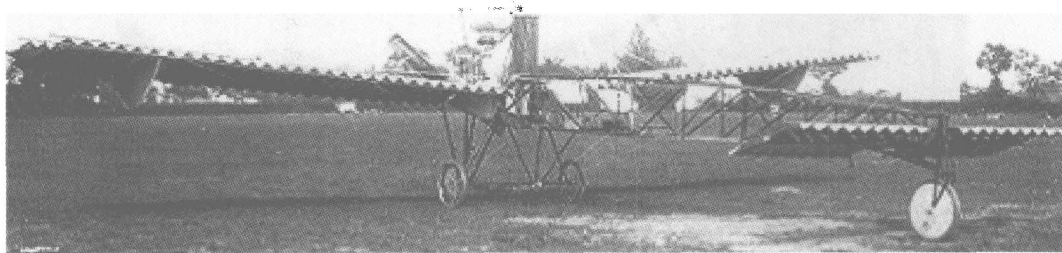


图 1.5 第一架全金属实验飞机(Reissner Ente)(德国,1912年)



图 1.6 世界上第一架全金属单翼机(Junkers J1)(德国,1915年)

1903年德国冶金工程师维尔姆(A. Wilm)发现含有少量铜的铝材经过淬火后强度和刚度可大大提高,由此开创了研制硬铝合金材料的时代。由于当时硬铝合金都在德国的Düren进行生产,因此又被人们称作“杜拉铝”(Duralumin)。另外在法语中“dur”也有“硬”的意思,正好表达了这种材料轻质高强的特点。经过多次改进,杜拉铝的性能不断提高,并且成本也逐渐降低,很快引起了航空界对这种材料的注意。1919年,容克斯用杜拉铝管制造机身和机翼框架,并在外面覆盖波纹铝板作为蒙皮,成功地造出了世界上第一架全金属客机(图1.7)。后来采用类似原理制造的美国福特公司的三引擎飞机(图1.8)对20世纪20、30年代的民用航空产生了巨大的影响,被人们亲切地称为“锡鹅”(Tin Goose)。

容克斯设计的厚翼型悬臂梁式单翼是结构上一个比较显著的进步,该机翼由内部支撑结构代替了双翼的外部支撑结构(见图1.7和图1.8),在保证强度和刚度的同时大大减小了机翼的飞行阻力。但是厚重的机翼和桁架式的机身结构极大地限制了用于装载乘客和货物的内部空间。为了减轻飞机的重量,增加飞机的运输能力,人们开展了航空轻结构的研究,其中一个最重要的思想是让蒙皮也参与结构受力,由此产生了硬壳式结构(Monocoque)、半硬壳式结构(Semi-monocoque)以及相应的应力蒙皮(Stressed Skin)技术<sup>[10,11]</sup>。1912年法国人贝什罗(L. Béchereau)设计的德佩迪桑(Deperdussin)单翼机最早

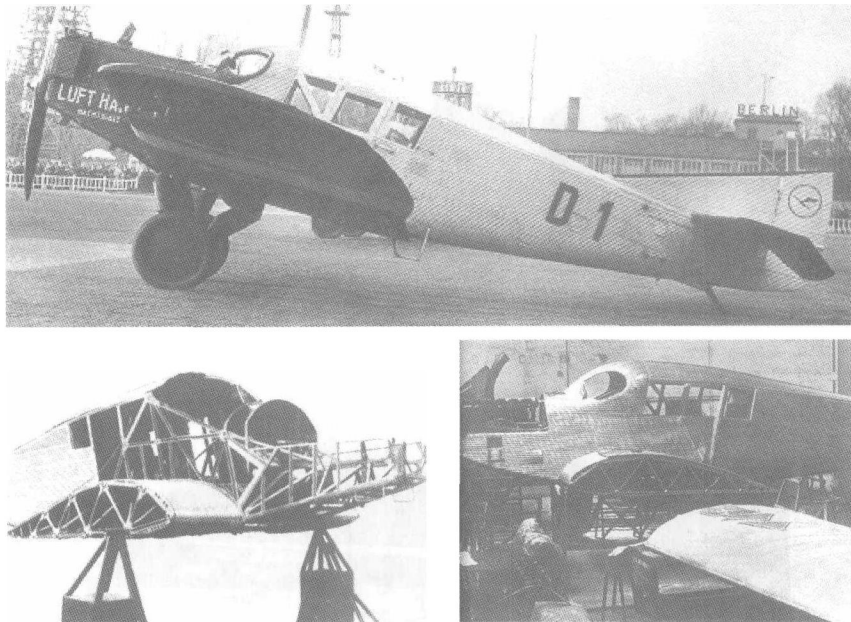


图 1.7 容克斯第一架全金属客机 Junkers F13(德国,1919 年)

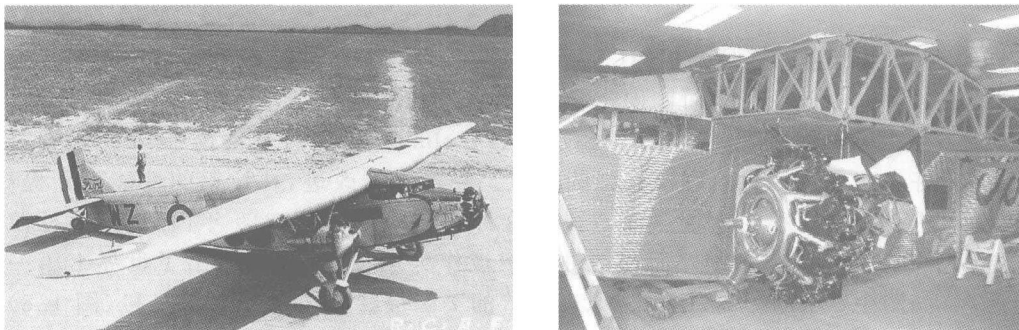


图 1.8 福特公司的三引擎飞机(美国,1926 年)

采用了硬壳式机身结构(图 1.9)。它是由三层 1.5mm 厚的郁金香木板交错地粘在一个模子上而得到的。在第一次世界大战前,德佩迪桑飞机不断地刷新飞行速度纪录,赢得了许多航空竞赛的大奖。硬壳式结构的蒙皮承受所有的应力,为了不使蒙皮失稳可增加蒙皮厚度或者加入环向的加强框。这种整体式的壳体结构使得飞机既轻又坚固,而且还可以增加飞机的内部空间,但是其制造难度较大。为便于制造,可采用半硬壳式结构。这种结构最初是由德国的罗尔巴赫(A. Rohrbach)于 1924 年提出的<sup>[2]</sup>。当时容克斯设计的全铝飞机为保证蒙皮刚度而采用了波纹蒙皮,这种蒙皮会产生很大阻力(虽然已将波纹方向设计成沿飞行方



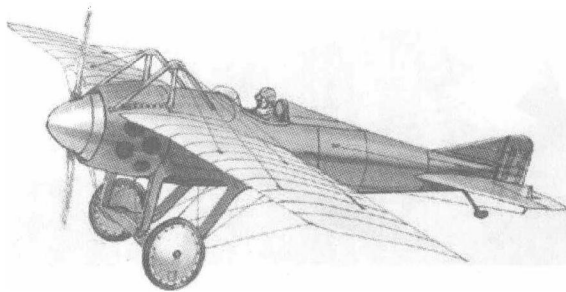


图 1.9 第一架硬壳式单翼机德佩迪桑(Deperdussin)(法国,1912年)

向),而且也不能承受较大的弯曲应力。罗尔巴赫提出在隔框和桁条组成的框架结构上蒙上一层光滑的薄铝蒙皮以形成一种整体式结构(图 1.10)。这种结构中桁条与蒙皮共同承受拉压和弯曲应力,同时蒙皮还要承受扭转剪应力。由于该结构中蒙皮和框架共同承受各种应力作用,于是被称作应力蒙皮。值得一提的是罗尔巴赫设计的机翼中采用全金属盒式梁结构,大大增强了机翼的刚度。后来他的助手瓦格纳(H. A. Wagner)研究了应力蒙皮因后屈曲产生褶皱的现象,进一步改进了应力蒙皮技术。1926年罗尔巴赫在美国进行关于应力蒙皮概念的演讲,将此技术带到了美国。1927年洛克希德(Lockheed)公司的设计师诺斯罗普(J. Northrop)就设计出了美国首架半硬壳式结构的飞机“织女星”(图 1.11),并刷新了一系列速度、高度和航程纪录,取得了巨大的成功。在第二次世界大战期间,道格拉斯(Douglas)公司制造的 DC3 运输机(军用型号为 C47,图 1.12)和北美航空(North American Aviation)公司制造的野马战斗机(图 1.13)是两种使用了应力蒙皮技术的杰出作品,前者几乎奠定了现代旅客机的基本结构形式,而后者则被认为是活塞式飞机的巅峰之作。

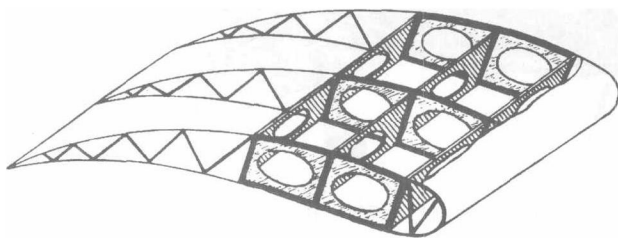


图 1.10 罗尔巴赫设计的应力蒙皮机翼结构(德国,1924年)

需要指出的是,现代飞机由于功能和维护的需要,机身上都有很多开孔区域。这些开孔改变了完整应力蒙皮的受力状态,造成了很大的应力集中(需要进行补强),因此作用在机身上大部分气动载荷主要由隔框和桁条承受。像这样的结构严格说来并不是真正的半硬壳式结构。