



(美) 牛春匀 (Michael C. Y. Niu)

冯振宇 程小全

张纪奎

徐建新

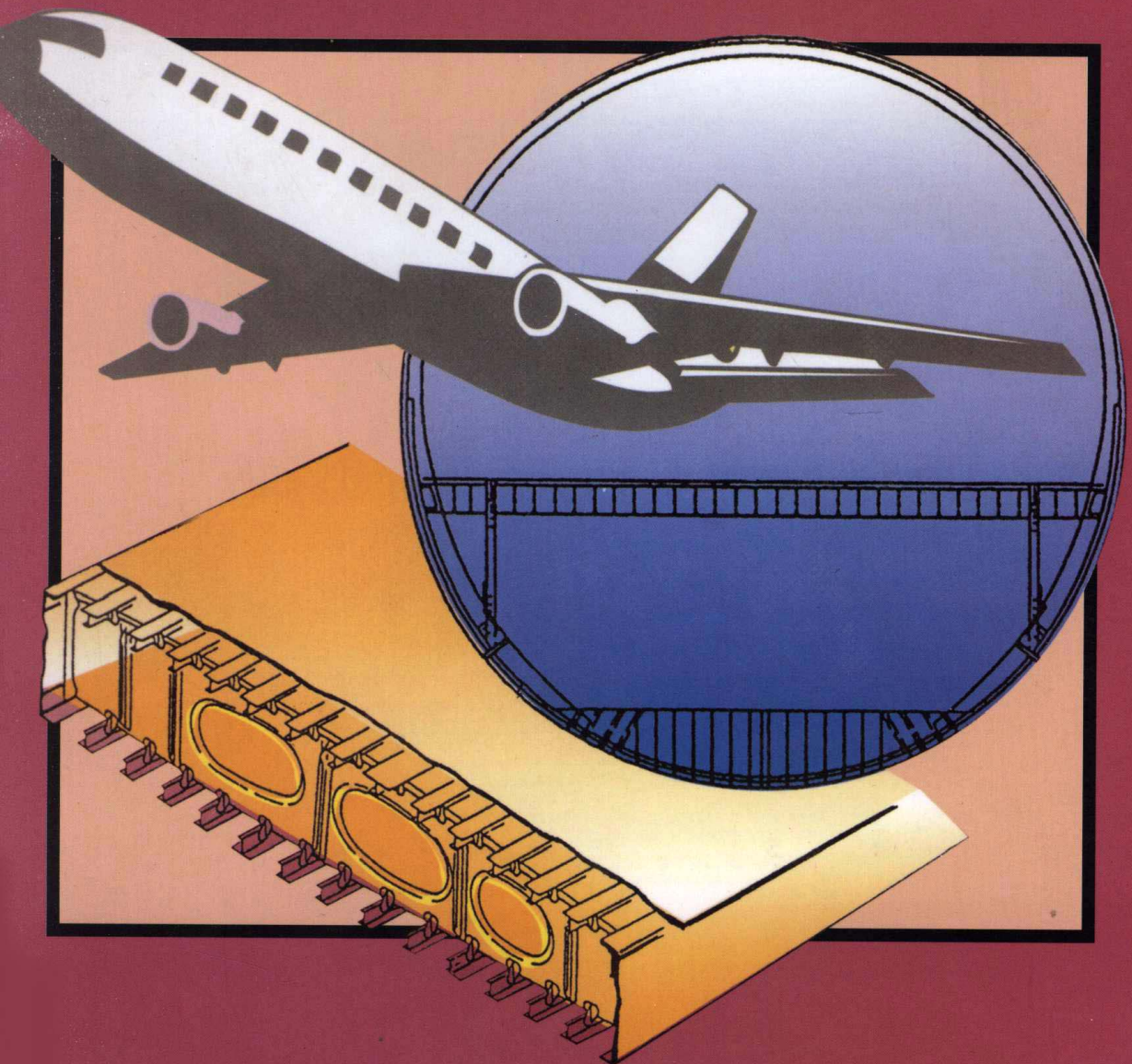
著  
译  
审

# AIRFRAME

# STRESS ANALYSIS AND SIZING

# 实用飞机结构

# 应力分析及尺寸设计



航空工业出版社



# 实用飞机结构应力分析 及尺寸设计

(美) 牛春匀 (Michael C. Y. Niu) 著  
冯振宇 程小全 张纪奎 译  
徐建新 审

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书对飞机结构应力分析及尺寸设计进行了详细系统的介绍,阐述了飞机结构应力分析的设计方法及具体结构的尺寸设计细节。全书共17章,其内容包括绪论,飞机结构尺寸设计工作,外载荷,材料的选择,结构分析,梁的应力,板壳,盒形梁,压杆的稳定,薄板屈曲,剪切板,开口,承压壁板,损伤容限壁板,结构补救与修理,以及结构试验方案,基本涵盖了飞机结构尺寸设计中的主要问题。

本书主要供航空工程技术人员和结构工程师参考,也可作为航空高等院校教材参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

实用飞机结构应力分析及尺寸设计 / (美)牛春匀著;  
冯振宇,程小全,张纪奎译. —北京:航空工业出版社,  
2009.12

ISBN 978-7-80243-387-8

I. 实… II. ①牛…②冯…③程…④张… III. 飞机—结  
构设计 IV. V221

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第203776号

## 实用飞机结构应力分析及尺寸设计 Shiyong Feiji Jiegou Yingli Fenxi ji Chicun Sheji

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2009年12月第1版

2009年12月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:45.25

字数:1155千字

印数:1—2000

定价:180.00元

# 作者简介

牛春匀教授一直从事金属和复合材料飞机结构研究及咨询工作，曾是洛克希德航空系统公司的高级研发主管工程师，现任（美国）AD飞机结构咨询公司总经理。

牛教授在航天器结构和飞机结构的分析与设计方面有30多年的工作经验。在洛克希德，曾任部门主任和规划主任，负责结构布置与各种结构计划工作，其中包括金属和复合材料创新结构设计，这些结构可用在现在和（或）将来的先进战斗机和先进运输机上。在洛克希德工作期间，他深入参与初步设计各个方面的工作，其中包括飞机总体布局、结构布置、结构形式选择以及适航等内容。他是L-1011的主任工程师，负责机翼和尾翼的应力分析工作。他还于1966年和1968年，在波音公司先后做过波音727和波音747两架飞机的应力分析工程师。

牛教授的主要著作有三部：AIRFRAME STRUCTURAL DESIGN（1988），COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURES（1992）以及AIRFRAME STRESS ANALYSIS AND SIZING（1997）。此外，他还编写了洛克希德复合材料设计指南和复合材料制图手册。他先后于1973年和1986年获得洛克希德成就奖和成果卓越奖，并在1973年列入Who's Who航空专家名录。

牛教授是北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学和沈阳航空工业学院的客座教授。

牛教授在洛杉矶加州大学讲授“飞机结构与修理”、“复合材料飞机结构”以及“飞机结构应力分析与尺寸布置”等工程短训课程。

牛教授1962年毕业于中国台湾中原大学土木工程专业，获学士学位；1966年在美国怀俄明大学获土木工程专业硕士学位。

## 译者序言

牛教授有三部主要的英文著作，分别是 AIRFRAME STRUCTURAL DESIGN (1988) (绿皮)，COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURES (1992) (蓝皮) 以及 AIRFRAME STRESS ANALYSIS AND SIZING (1997) (红皮)。这些著作在国际航空界具有广泛而深远的影响，被国际上主要飞机公司的结构设计人员称为“案头工具书”。本书原著是其中的最后一部，也是影响力最大的一部。书中给出的结构应力分析与尺寸设计方法大都是以前人的经验和试验数据为基础，结合作者多年飞机结构设计工程经验总结提炼而成，具有极强的工程实用性，因此得到了结构设计人员的青睐。

原著自 1997 年问世以来，在香港现代军事出版公司先后印刷了四次。本书根据牛教授最新修订的书稿翻译而成。全书内容涉及飞机结构设计的许多方面，其中一些名词术语与部分内容首次译成中文，对我国飞机结构工程设计必将具有重要的工程价值。现在正值我国大型运输机和大型客机项目进入工程设计阶段，相信本书的出版对我国的航空事业的发展会起到积极的推动作用。

在翻译过程中，译者主要参考了 2008 年 10 月出版的《实用飞机结构工程设计》一书。对于一些中文中暂时没有对应的专业词汇与术语，译者与牛教授进行了认真的讨论，再三斟酌后确定中文用词。对于其中较难翻译的内容，牛教授多次通过越洋电话给译者详细解释了其中的物理概念与相关的工程背景。此外，牛教授在百忙之中审阅了全书译稿，并提出了许多重要的修改意见。在与牛教授的交流过程中，译者不仅学到了很多新的知识，更为牛教授严谨负责的治学精神所感动。

全书的翻译工作主要由冯振宇、程小全、张纪奎完成，并由冯振宇负责统稿。其中程小全负责缩写词、首字母缩写词、术语和第1、2、9、13章的翻译，张纪奎负责第12、14、15、17章和习题的翻译，其余各章和附录由冯振宇翻译。在翻译过程中，王轩、卢翔、李顶河、蔺越国、汪源龙、范舟、尹星岩、曹飞龙、胡杰文、徐迟等同志参加了部分初译和图文整理工作，对他们的辛勤付出表示感谢。本书由中国民航大学徐建新教授审校。徐教授对译稿提出了许多宝贵的意见，译者在此表示诚挚感谢。

本书的出版得到了航空工业出版社的大力支持，史晋蕾、李苏楠和邵箭编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此表示衷心感谢。

由于译者水平有限，时间又比较仓促，翻译过程中难免存在不尽人意之处。对于翻译中的不足或疏漏，衷心希望读者批评指正。

译者

2009年11月



## 作者感言

宇宙中充满了阴（负的）和阳（正的）的平衡。这可能有助于解释工业革命在给人类带来文明（正的）的同时，也对我们造成了污染（负的）——如果得不到有效的控制将是人类的灾难。在这个世界上存在着许多这种需要平衡的事例，而其结果则完全要看在时间还不是太迟之前我们如何处理它们。在事情发展的早期阶段把问题搞清楚，将会使其在后面更加容易处理，并且费用相应也会少很多。

20世纪70年代开始应用的电子计算机所带来的计算技术的革命，给工程技术人员带来了快速且精确的分析结果。计算机甚至能解决一些高超静定结构的问题，而在过去这是不可能做到的。不久的将来，计算机有可能会取代所有的人工计算。计算机（包括硬件和软件）的价值是无可争议的，然而，墨菲法则（Murphy's Law）常常到处发生作用，在结构设计领域里也不例外。一个工程师，他只知道如何给计算机输入信息，但有可能不清楚所得到的计算结果正确与否。（这是一个输入垃圾到输出垃圾的过程！）工程师不是机器，创新来源于工程师。非常遗憾，工业界出于对成本的考虑，而漠视工程师的实际经验。然而，计算机无法让工程师得到有价值的经验，它只是一个美妙的工具，并不能代替一切！

其次，谈谈有关工作经验。现在工程师花费大量的时间在计算机屏幕前，而忽视了不同学科同事（即小组工作）之间交流的重要性。工程师正在失去从“老手”那里获得必要经验的机会。最终的结果是工业界渐渐丢失了最有价值的经验，这些经验随着退休工程师的离世而消失。工业界应该要求工程师在他们退休之前，以报告的形式写下他们有价值的经验，这样就可以将其传给后来的人。虽然大公司拥有他们自己的手册、指南等供工作人员使用，但是，它们仅仅只是手册，而不能提供足够的经验。工业管理花费太多的努力在计算如何节约成本上，然而从长远来看，失去了宝贵的经验，最终则会导致很大的

损失。如果这种情形不能马上得到补救，那么飞机制造和其他工业将出现反冲效应。

与当代飞机工业相关的另一件事。自从“阿洛哈航线”（Aloha Airlines）一架老的波音 737 飞机失事后，这件事就一直在引起人们的争论，但是，至今没有人，包括飞机制造商和用户，想要给飞机定一个更适当的飞行寿命，如限制使用飞行小时数和服役年限等。从结构设计人员的观点来看，大家都认识到任何金属结构就像人体一样，都有其自己的疲劳寿命，没有一个寿命是永久的，即使维护工作做得非常认真小心。一架飞行器如果太老，再优良的维护也没有用。飞机与地面交通工具不同，如果飞机在空中有问题，它不可能停在那里等着援救，而肯定会掉下来。飞机制造商和政府认证机构的最高目标应该是为飞机确定一套合理的，并且合乎经济效用的寿命周期标准，以降低乘客的危险。这件事情现在就应该做，不要等着失去更多的生命后才觉醒！

中春白



# 前 言

这本书旨在为进行飞机和其他航空器结构尺寸设计的工程技术人员提供必要的数据和程序支持。书中的各种材料性能数据绝大部分来源于政府机构的相关出版物，如 NACA 报告和一些技术文献资料。当然，如果读者对材料强度和结构分析的基本概念不是十分通晓，可能会对本书的内容理解不够全面深入；本书作者假设读者对相关学科已经比较熟悉，因而，这些相关基础知识不再赘述。为保持本书结构紧凑，文中仅保留了与飞机结构相关的数据和技术资料。鉴于现代飞机结构主要是金属结构，本书集中考虑了金属结构的布局问题。读者在进行飞机结构布局过程中，可以参考书中的一些材料性能许用数据和结构布局分析案例。

本书内容尽可能循序渐进，许多章节包含了大量的数值计算例题，以便于验证分析方法，正确使用设计数据和/或设计曲线，使飞机结构工程师真实体会如何才能获取一个结构效率最高的结构。飞机结构工程师通过阅读本书，可以初步了解飞机结构布局过程中的应力分析工作内容。如何将材料强度理论和作者丰富的实践经验应用于工程实际是本书的重点内容。而做到飞机结构理论和实践应用并重，则依赖于拥有大量支持结构分析理论的试验数据。

飞机结构分析问题通常涉及到薄板（或厚板）和加筋板的屈曲和局部失稳。薄板屈曲设计是机体结构分析中最重要的一项工作。20 世纪 40 年代以来的 NACA 报告提供了该研究领域大量的技术资料和设计数据。目前，结构工程师在机体结构应力分析工作中仍在利用这些技术资料和数据作为设计依据。

在全面考虑静强度、疲劳强度、破损 - 安全要求、损伤容限和经济成本影响的情况下，通过仔细选择结构布局形式和材料而获取一个最终的设计优化方案是本书最重要的内容。书中以图表和曲线形式提供了大量来自于过去的经验和/或试验结果的材料性能数据，用于金属机体尺寸设计。本书的另一个目的是帮助结构工程师全面回顾从飞机设计制造（包括零部件的使用维护）经验教训中得到的数据资料，以指导设计具有结构完整性和重量效率的飞机结构。

本书将介绍一些结构尺寸设计方法和手段，以帮助设计工程师在飞机初步设计阶段进行结构设计粗略估算工作；同时，这些方法和手段对结构维修工程师也是十分有用的。

设计理论往往与实践有较大的距离，本书试图通过一些实例建立二者之间的联系。书中每章的最后列出了一些参考文献，以帮助有兴趣的读者深入理解本书的内容。

作者的另一本专著《实用飞机结构工程设计》中包含了大量设计资料和数据，可以作为本书的参考资料。读者如需要深入学习飞机结构尺寸设计知识，推荐参阅《实用飞机结构工程设计》一书。

本书在编写过程中，直接结合了一些典型的工程报告，并配有高质量的插图，不像过去一些教科书那样进行商业性的注解。真诚感谢那些在本书第1版编写过程中修正许多错误的人。特别感谢 Lawrence W. Maxwell 先生对全文（第1版）进行的校对和评述。书中难免出现一些小错误，欢迎读者提出建议，以利修订再版。

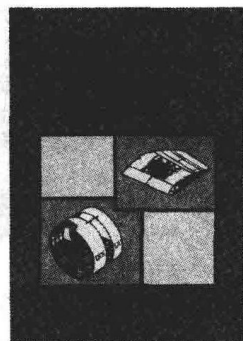
牛春匀 (Michael C. Y. Niu)  
美国加利福尼亚  
1998年10月 (第2版)

牛春匀教授的三部著作《实用飞机结构工程设计》(Airframe Structural Design)、《实用飞机结构应力分析及尺寸设计》(Airframe Stress Analysis and Sizing)、《实用飞机复合材料结构设计与制造》(Composite Airframe Structures) 在国际上影响非常广泛, 三部专著均是牛教授数十年来在工作中积累的实际工程经验和珍贵资料的汇集, 已经成为世界各大飞机研制公司必备的参考书籍, 并广泛为航空院校所采用。

## AIRFRAME STRUCTURAL DESIGN

### 《实用飞机结构工程设计》(绿皮)

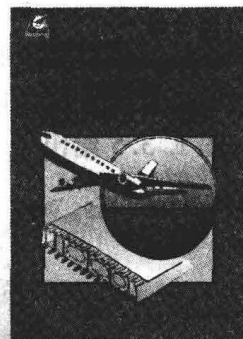
本书对飞机结构设计的全过程进行了详细系统的介绍, 阐述了飞机结构设计的思想及其发展过程、设计方法以及具体结构的设计细节等。包括考虑制造的设计, 外载荷, 材料, 屈曲与稳定性, 开口设计, 紧固件与结构连接, 机翼、尾翼和机身结构设计, 起落架, 发动机安装, 先进复合材料结构设计, 疲劳、损伤容限与破损-安全设计以及重量控制与平衡等内容, 基本涵盖了飞机结构设计中的主要问题。结构设计实例多、结构图和各种数据曲线多, 工程参考价值大。



## AIRFRAME STRESS ANALYSIS AND SIZING

### 《实用飞机结构应力分析及尺寸设计》(红皮)

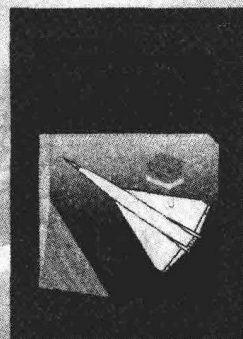
本书对飞机结构应力分析及尺寸设计进行了系统的介绍, 阐述了飞机结构应力分析的设计方法及具体结构的尺寸设计细节, 是作者数十年工作经验的积累, 包括飞机结构尺寸设计, 外载荷, 材料的选择, 结构分析, 梁的应力, 板壳, 盒形梁, 压杆的稳定, 薄板屈曲, 剪切板, 开口, 承压壁板, 损伤容限壁板, 结构补救与修理, 以及结构试验方案等, 基本涵盖了飞机结构尺寸设计中的主要问题。对于大量依靠计算机处理数据, 缺少通过实际经验判断计算结果的工程技术人员将有很大帮助。



## COMPOSITE AIRFRAME STRUCTURES

### 《实用飞机复合材料结构设计与制造》(蓝皮)

作者在美国洛克希德公司从事复合材料研究工作二十余年, 积累了很多实际的工程经验, 认为未来复合材料将大量应用于飞机结构中, 这点从波音 787 及空客 A350XWB 大量使用复合材料也可以看出。复合材料优点很多, 不仅可以大大减轻飞机结构重量, 而且没有腐蚀等问题。本书对从复合材料的选择到产品制造的全过程进行了详细的介绍, 包括材料、工夹具、制造方法、连接、环境影响、叠层设计、结构试验、品质试验、维护修理等。因结构应力分析不在本书重点介绍范围内, 仅对读者在应力分析时应注意的问题进行了一般介绍, 此外还对复合材料的结构应用及较新的设计理念进行了介绍。



# 目 录

缩写词、首字母缩写词及术语 .....	( 1 )
<b>第 1 章 绪论 .....</b>	<b>( 6 )</b>
1.1 概述 .....	( 6 )
1.2 优化设计讨论 .....	( 11 )
1.3 结构重量 .....	( 13 )
1.4 针对制造的设计 .....	( 14 )
参考文献 .....	( 18 )
<b>第 2 章 尺寸设计工作 .....</b>	<b>( 19 )</b>
2.1 概述 .....	( 19 )
2.2 初步尺寸设计 .....	( 20 )
2.3 产品应力分析 .....	( 21 )
2.4 正式应力分析报告 .....	( 21 )
2.5 符号规定的选择 .....	( 24 )
2.6 载荷传递路径和分离体图 .....	( 26 )
2.7 制图公差 .....	( 28 )
2.8 安全裕度 .....	( 29 )
2.9 刚度要求 .....	( 29 )
2.10 讨论 .....	( 30 )
<b>第 3 章 外载荷 .....</b>	<b>( 32 )</b>
3.1 概述 .....	( 32 )
3.2 结构设计准则 .....	( 33 )
3.3 重量及平衡 .....	( 37 )
3.4 飞行载荷 .....	( 39 )
3.5 地面载荷 .....	( 42 )
3.6 动载荷 .....	( 47 )
3.7 操纵面 .....	( 48 )
3.8 机身增压载荷 .....	( 49 )
3.9 机翼燃油压力载荷 .....	( 50 )
3.10 其他载荷 .....	( 53 )

3.11 商用运输机的载荷状态小结 .....	( 56 )
参考文献 .....	( 59 )
<b>第4章 材料的选择</b> .....	( 60 )
4.1 概述 .....	( 60 )
4.2 应力—应变曲线 .....	( 63 )
4.3 材料许可值 .....	( 68 )
4.4 适航要求 .....	( 74 )
4.5 断裂韧性和裂纹扩展速率 .....	( 75 )
4.6 材料的应用 .....	( 77 )
4.7 选材程序 .....	( 78 )
参考文献 .....	( 79 )
<b>第5章 结构分析</b> .....	( 80 )
5.1 胡克定律 .....	( 80 )
5.2 主应力 .....	( 82 )
5.3 平衡与协调 .....	( 84 )
5.4 静定结构 .....	( 85 )
5.5 静不定(冗余)结构 .....	( 94 )
5.6 有限元建模 .....	( 117 )
参考文献 .....	( 126 )
<b>第6章 梁的应力</b> .....	( 127 )
6.1 梁理论 .....	( 127 )
6.2 截面特性 .....	( 128 )
6.3 对称截面和非对称截面的弯曲 .....	( 132 )
6.4 塑性弯曲 .....	( 134 )
6.5 梁的剪应力 .....	( 139 )
6.6 剪心 .....	( 147 )
6.7 楔形梁 .....	( 148 )
6.8 扭转 .....	( 154 )
6.9 盒形梁的压塌载荷 .....	( 162 )
参考文献 .....	( 163 )
<b>第7章 板壳</b> .....	( 164 )
7.1 引言 .....	( 164 )
7.2 板 .....	( 164 )
7.3 圆柱壳 .....	( 176 )
7.4 半球形壳 .....	( 178 )

7.5 蜂窝板	( 181 )
参考文献	( 194 )
<b>第 8 章 盒形梁</b>	( 196 )
8.1 概述	( 196 )
8.2 扭矩引起的剪流	( 199 )
8.3 单闭室盒形梁 ( 双桁条截面 )	( 208 )
8.4 单闭室盒形梁 ( 多桁条截面 )	( 209 )
8.5 双闭室盒形梁	( 220 )
8.6 变截面盒形梁	( 226 )
8.7 剪滞效应	( 232 )
参考文献	( 240 )
<b>第 9 章 连接件和接头</b>	( 241 )
9.1 引言	( 241 )
9.2 紧固件	( 245 )
9.3 连接	( 256 )
9.4 偏心连接	( 258 )
9.5 角板连接	( 263 )
9.6 焊接连接	( 268 )
9.7 胶结连接	( 275 )
9.8 耳片分析	( 283 )
9.9 拉伸接头	( 302 )
9.10 拉伸角片	( 317 )
9.11 间隙和垫片的使用	( 323 )
9.12 疲劳的考虑	( 327 )
参考文献	( 343 )
<b>第 10 章 压杆的稳定</b>	( 345 )
10.1 前言	( 345 )
10.2 欧拉方程 ( 长的压杆 )	( 346 )
10.3 阶形杆	( 351 )
10.4 变截面锥形杆	( 355 )
10.5 梁的横向失稳	( 360 )
10.6 压弯构件	( 365 )
10.7 局部失稳应力	( 385 )
10.8 压杆整体失稳和局部失稳的相互影响	( 394 )
参考文献	( 396 )

<b>第 11 章 薄板屈曲</b> .....	( 398 )
11.1 概述 .....	( 398 )
11.2 一般屈曲公式 .....	( 400 )
11.3 平板屈曲 .....	( 404 )
11.4 曲板屈曲 .....	( 410 )
11.5 联合载荷作用 .....	( 413 )
参考文献 .....	( 416 )
<b>第 12 章 剪切板</b> .....	( 418 )
12.1 引言 .....	( 418 )
12.2 抗剪腹板 .....	( 419 )
12.3 纯对角张力腹板 .....	( 426 )
12.4 对角张力平腹板 .....	( 427 )
12.5 对角张力曲板 .....	( 445 )
12.6 末端闭室和对接处的对角张力效应 .....	( 462 )
参考文献 .....	( 468 )
<b>第 13 章 开口</b> .....	( 469 )
13.1 引言 .....	( 469 )
13.2 腹板不加强的剪切梁 .....	( 472 )
13.3 腹板加强的剪切梁 .....	( 476 )
13.4 开口用环形加强板加强的腹板 .....	( 483 )
13.5 弯曲加强板加强的腹板开口 .....	( 486 )
13.6 深剪切梁口框加强开口 .....	( 498 )
13.7 轴向载荷作用下蒙皮 - 桁条壁板上的开口 .....	( 506 )
13.8 蒙皮 - 桁条曲面壁板上的大开口 .....	( 516 )
参考文献 .....	( 534 )
<b>第 14 章 压缩壁板</b> .....	( 535 )
14.1 概述 .....	( 535 )
14.2 有效宽度 .....	( 538 )
14.3 铆钉之间的蒙皮屈曲 .....	( 540 )
14.4 蒙皮 - 长桁壁板 .....	( 542 )
14.5 坚固的整体 - 加筋壁板 .....	( 566 )
14.6 无凸缘整体 - 加筋壁板 .....	( 570 )
参考文献 .....	( 576 )
<b>第 15 章 损伤容限拉伸壁板</b> .....	( 579 )
15.1 简介 .....	( 579 )



15.2	应力循环和载荷谱 .....	( 582 )
15.3	结构寿命预测 (安全寿命) .....	( 584 )
15.4	结构裂纹扩展 (检查周期) .....	( 588 )
15.5	剩余强度 (破损 - 安全设计) .....	( 591 )
15.6	组合梁的剩余强度 .....	( 594 )
	参考文献 .....	( 599 )
<b>第 16 章</b>	<b>结构补救与修理</b> .....	<b>( 601 )</b>
16.1	引言 .....	( 601 )
16.2	结构补救 .....	( 603 )
16.3	补救案例 .....	( 605 )
16.4	修理时要考虑的因素 .....	( 608 )
16.5	修理案例 .....	( 617 )
16.6	腐蚀损伤的修理 .....	( 633 )
16.7	蒙皮 - 桁条壁板的修理 .....	( 635 )
16.8	结构改装 .....	( 637 )
	参考文献 .....	( 639 )
<b>第 17 章</b>	<b>结构试验方案</b> .....	<b>( 641 )</b>
17.1	介绍 .....	( 641 )
17.2	试验载荷谱 .....	( 641 )
17.3	应变片 .....	( 642 )
17.4	疲劳试验壁板试样 .....	( 645 )
17.5	压缩试验壁板试样 .....	( 655 )
17.6	剪切试验壁板试样 .....	( 657 )
17.7	主要连接试样 .....	( 658 )
	参考文献 .....	( 659 )
	习题 .....	( 660 )
<b>附录 A</b>	<b>常用单位换算</b> .....	<b>( 672 )</b>
<b>附录 B</b>	<b>紧固件</b> .....	<b>( 673 )</b>
<b>附录 C</b>	<b>常用截面特性</b> .....	<b>( 681 )</b>
<b>附录 D</b>	<b>梁的常用公式</b> .....	<b>( 691 )</b>
<b>附录 E</b>	<b>计算机辅助工程 (CAE)</b> .....	<b>( 701 )</b>

# 缩写词、首字母缩写词及术语

## 飞机几何图形

