



航天科技图书出版基金资助出版

# 飞行器结构力学

梁立孚 宋海燕 李海波 编著



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

# 飞行器结构力学

梁立孚 宋海燕 李海波 编著



中国宇航出版社

·北京·

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

飞行器结构力学 / 梁立孚, 宋海燕, 李海波编著. --北京: 中国宇航出版社, 2011.12

ISBN 978-7-5159-0120-6

I. ①飞… II. ①梁… ②宋… ③李… III. ①飞行器—结构力学 IV. ①V414

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 253453 号

责任编辑 刘亚静 责任校对 王 妍 封面设计 京鲁图文

---

出版  
发行

中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号  
(010) 68768548

邮 编 100830

网 址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com)

经 销 新华书店

发行部 (010) 68371900  
(010) 68768541

(010) 88530478 (传真)  
(010) 68767294 (传真)

零售店 读者服务部  
(010) 68371105

北京宇航文苑  
(010) 62529336

承 印 北京画中画印刷有限公司

版 次 2012 年 1 月第 1 版

2012 年 1 月第 1 次印刷

规 格 880×1230

开 本 1 / 32

印 张 13.25

字 数 366 千字

书 号 ISBN 978-7-5159-0120-6

定 价 58.00 元

---

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

## 航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

## 前 言

飞行器结构力学的内容是相当丰富的，并且随着航空航天科学技术的发展变得越来越丰富。如果要全面反映飞行器结构力学的面貌，将能写成一部巨著。本书作者的能力和精力都不能实现这一点。以飞行器的某种典型结构为对象，着重说明飞行器结构力学的基本原理和基本方法是一种可行的方案。

航空航天科学技术的迅速发展，对航空航天科学技术著作的编写提出更高的要求。就有关飞行器的结构力学而言，出版一部能够兼顾航空（大气中的飞行器）与航天（空间飞行器）事业发展需要的作品，是时代赋予科学工作者的任务。本书的编写认真考虑了这个重要的因素。

在航空航天科学技术发展需要的大背景下，我国已经出版了多部有关飞行器结构力学的优秀著作，我们在认真学研这些优秀著作的同时，力争把本书写得有一些特点。

概括起来，本书作为飞行器结构力学专著主要有如下特点。

1) 以能量原理为基础是飞行器结构力学的显著特点，书中不仅系统地研究了以力和位移为基本变量的能量原理，而且探讨了一些有关飞行器结构力学的论著中对能量原理的不同的提法。这便使得力法和位移法的研究建立在更加严格的理论基础上。同时，能量原理作为有限元素法和其他近似计算方法的理论基础，更能体现飞行器结构力学的基础地位。

2) 电子计算机的广泛应用是时代的特点，为了适应时代的要求，在飞行器结构力学的研究中，把矩阵分析方法作为重要的研究

和计算方法。这是因为，矩阵的书写形式便于编制计算机程序，进而形成飞行器结构力学的各种计算机软件。另外，考虑到飞行器结构力学是有限元素法的策源地，书中给出有限元素法的基本原理和基本方法。

3) 以航天器为例，飞行器在其飞行过程中要经受极为恶劣的热环境，其温度可以从摄氏零下 200 多度变至摄氏数千度以上。虽然热控技术的发展可以大大减轻热环境对飞行器结构强度的影响，但是，这仍然是一个不可忽视的问题。为适应飞行器近代发展的需要，本书把有关热应力的内容纳入飞行器结构力学中，并且推导出适用于飞行器结构计算的热应力计算形式。

本书是《飞行器结构力学》(中国宇航出版社，2003 年版)的修订版，修订工作涉及到以下几个方面。

1) 以能量原理为基础是飞行器结构力学的显著特点，但是，研究能量原理需要应用变分法，没有变分法数学基础的读者会感到困难。世界变分原理学家胡海昌曾经倡导将变分法通俗化，为了实现这一原则，本书的第 1 章增编了变分法初步一节。以普通高等理工科院校讲授的高等数学为起点，用通俗的数学语言给出变分法的基本概念和基本运算，为学研能量原理及其应用提供可靠的基础。

2) 为了适应电子计算机广泛应用的年代特点，本书把矩阵分析方法作为重要的研究和计算方法。这次修订中，第 2 章扩充了自动形成载荷状态矩阵和单位状态矩阵的秩力法的内容，第 3 章扩充了有限元素法的理论基础和计算方法的内容。

3) 为了兼顾航空(大气中的飞行器)与航天(空间飞行器)对飞行器结构力学的要求，这次修订中，在第 5 章中加强了壳体力学的内容，在第 4 章中加强了限制扭转的内容。

4) 作者十分感谢有关专家和广大读者对原版提出一些合理性建议和改进意见，并且认真进行了修订。这次修订中，还修正了原版

中的一些不足，例如书写和印刷错误等。我们觉得，一部好的著作，应当是通过反复实践和修正而逐步形成的。

本书得到了航天科技图书出版基金、国家自然科学基金(11172046)、博士学科点专项科研基金(20060217020)和中央高校基本科研业务费专项资金(HEUCF100205)的资助。

由于水平限制，书中定有不妥之处，诚恳希望各位专家和广大读者给予指导和帮助。

作 者  
2011年3月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第 1 章 能量原理</b> .....	9
1.1 引言 .....	9
1.2 虚功原理和最小势能原理 .....	12
1.3 余虚功原理和最小余能原理 .....	21
1.4 最小势能和最小余能原理衍生的变分原理 .....	27
1.4.1 应变能与余应变能 .....	27
1.4.2 最小应变能原理和最小余应变能原理 .....	28
1.4.3 Castigliano 定理 .....	29
1.4.4 单位位移法和单位载荷法 .....	30
1.4.5 功的互等定理 .....	32
1.4.6 叠加原理 .....	35
1.5 Ritz 方法 .....	42
1.6 变分法初步 .....	44
1.6.1 变分法的基本概念 .....	44
1.6.2 自由的变分问题 .....	49
1.6.3 有附加条件的变分问题 .....	54
习题 .....	56
<b>第 2 章 力法</b> .....	62
2.1 引言 .....	62
2.1.1 系统的几何不变性 .....	62
2.1.2 自由度和约束(几何不变性的判断) .....	65



2.1.3	结构的组成 .....	69
2.1.4	静不定度的判定 .....	71
2.2	静定结构的内力计算 .....	76
2.2.1	结构元件的平衡 .....	77
2.2.2	平面静定结构的内力计算 .....	84
2.2.3	空间静定结构的内力计算 .....	88
2.3	静定结构的位移计算 .....	91
2.3.1	元件的柔度特性 .....	92
2.3.2	静定结构的位移计算 .....	98
2.4	静不定结构的内力和位移计算 .....	105
2.4.1	对称性的利用 .....	105
2.4.2	静不定结构的内力计算——力法 .....	107
2.4.3	静不定结构的位移计算 .....	116
2.5	矩阵力法 .....	123
2.5.1	应用矩阵方法计算结构的内力 .....	123
2.5.2	应用矩阵方法计算静不定结构的变形 .....	125
2.5.3	单位状态和载荷状态可以取得不一致 .....	126
2.6	秩力法的一般原理 .....	133
2.7	从一般的矩阵力法过渡到秩力法 .....	138
	习题 .....	142
<b>第3章</b>	<b>直刚法和有限元法 .....</b>	<b>151</b>
3.1	引言 .....	151
3.1.1	应用最小势能原理来研究问题 .....	151
3.1.2	位移法 .....	155
3.1.3	矩阵位移法 .....	157
3.1.4	直接刚度法 .....	158
3.2	元件(局部坐标)的刚度矩阵 .....	167
3.2.1	位移变换和力的变换矩阵 .....	167

---

---

3.2.2	梁元件的刚度矩阵 .....	168
3.2.3	扭杆刚度矩阵 .....	171
3.2.4	复合受力状态的杆元件的刚度矩阵 .....	171
3.2.5	变轴力杆的刚度矩阵 .....	173
3.2.6	矩形受剪板的刚度矩阵(用于矩阵位移法) .....	175
3.2.7	梯形板的刚度矩阵(用于直接刚度法) .....	177
3.3	坐标变换 .....	178
3.3.1	等轴力杆的坐标变换 .....	179
3.3.2	平面梁元素的坐标变换 .....	180
3.3.3	板—杆结构元件的坐标变换 .....	183
3.4	总体刚度矩阵的形成 .....	185
3.4.1	桁架问题 .....	185
3.4.2	刚架问题 .....	192
3.4.3	板—杆结构问题 .....	205
3.5	有限元法 .....	213
3.5.1	从 Ritz 法到有限元法 .....	213
3.5.2	有限元法的基本概念 .....	218
3.5.3	适于有限元计算的最小势能原理 .....	220
3.5.4	有限元应用举例 .....	221
	习题 .....	230
<b>第 4 章</b>	<b>工程梁理论</b> .....	<b>235</b>
4.1	引言 .....	235
4.1.1	基本假设 .....	235
4.1.2	坐标系的选择 .....	237
4.2	正应力的计算 .....	238
4.2.1	计算正应力的一般方法 .....	238
4.2.2	计算组合薄壁结构剖面正应力的折算系数法 .....	241
4.2.3	工程梁中的热应力 .....	242

4.3	开剖面系统的弯曲剪流和弯心 .....	245
4.3.1	开剖面系统的弯曲剪流 .....	245
4.3.2	开剖面系统的弯心 .....	250
4.4	单闭剖面的剪流和刚心 .....	255
4.4.1	在扭矩 $M_x$ 作用下,单闭剖面的剪流 .....	255
4.4.2	在剪力 $Q_y$ 作用下,单闭剖面的剪流 .....	256
4.4.3	单闭剖面的刚心 .....	257
4.5	多闭剖面的剪流与刚心 .....	263
4.5.1	静不定度的判定 .....	263
4.5.2	确定多闭剖面剪流的几种思路 (以三闭室剖面为例) .....	263
4.5.3	多闭剖面的剪流 .....	265
4.5.4	多闭剖面的刚心 .....	269
4.5.5	多闭剖面剪流及刚心的近似计算 .....	273
4.6	隔膜计算 .....	276
4.6.1	前言 .....	276
4.6.2	加强框的计算 .....	277
4.7	框中的热应力 .....	281
4.8	限制扭转 .....	287
4.8.1	导言 .....	287
4.8.2	开剖面系统的限制扭转 .....	288
4.9	剖面的扇形特性 .....	293
4.9.1	扇形坐标之定义 .....	293
4.9.2	极点变换后扇形坐标的确定 .....	296
4.9.3	主扇形坐标 $\tilde{\omega}$ 的计算说明 .....	297
4.10	闭剖面结构的限制扭转 .....	301
4.11	加劲薄壁板的参与(剪滞)问题 .....	304
	习题 .....	307

<b>第 5 章 板壳稳定</b> .....	313
5.1 引言 .....	313
5.2 弹性薄板的近似理论 .....	315
5.2.1 弹性薄板的控制方程 .....	315
5.2.2 垂直于板面载荷及板面内载荷共同作用的板的 弯曲微分方程 .....	321
5.2.3 板的边界条件 .....	324
5.2.4 板弯曲的最小势能原理 .....	325
5.2.5 由变分法来决定板的弯曲微分方程及其边界条件 .....	326
5.3 板的稳定 .....	329
5.3.1 导言 .....	329
5.3.2 矩形板的临界应力 .....	333
5.3.3 超过比例极限以后板的稳定性 .....	344
5.3.4 薄壁杆件的稳定性 .....	346
5.3.5 加强板失去稳定性后的受力分析 .....	350
5.3.6 正交各向异性板的稳定性 .....	359
5.3.7 薄壁梁的腹板由于剪切而失去稳定性后的 应力分析 .....	362
5.4 薄板的热皱损 .....	368
5.4.1 问题的提出 .....	368
5.4.2 初步分析 .....	370
5.4.3 临界载荷的计算公式 .....	371
5.5 圆柱壳体的平衡方程式、几何方程式、物理方程式 .....	374
5.6 圆柱壳体的薄膜问题 .....	380
5.7 承受轴对称载荷的圆柱形壳体 .....	384
5.8 在均匀压力作用下圆环及筒体的临界载荷 .....	389
5.9 圆柱形壳在均匀轴向压缩下的对称屈曲 .....	394
5.10 几种载荷情形下的临界应力公式 .....	398
5.10.1 剪切 .....	398

---

---

5.10.2 压缩与剪切联合作用 .....	400
习题 .....	400
<b>参考文献</b> .....	<b>407</b>

# 绪 论

## 0.1 飞行器结构力学在力学中的地位

我们知道，研究物质运动普遍规律的一门科学是物理学，力学作为物理学的一个分支，它是研究物体机械运动的普遍规律的一门科学。用不甚完全的话说，力学可以分为质点、刚体力学（理论力学）和连续介质力学，连续介质力学又可分为流体力学和固体力学，固体力学又可分为弹性力学和塑性力学。材料力学则是弹性力学和塑性力学的近似理论，它在工程中得到方便的应用。

结构力学在力学中地位是什么呢？我们认为，结构力学属于应用力学，设计和制造某种结构需要应用哪些力学知识，便可将之归入相应的结构力学的范畴。正因为如此，不同的结构有其不同的结构力学，例如：

建筑结构力学——建筑结构的设计和施工中，主要涉及杆系，因此，杆系设计和施工中所需要的力学知识便构成建筑结构力学，其主要内容是研究杆系结构的强度、刚度和稳定性。

船舶结构力学——船舶结构的设计和制造中，主要涉及开口薄壁杆件，因此，开口薄壁杆件的弯曲和扭转便构成船舶结构力学的主要内容。

以上两种结构力学的内容是相当丰富的，但因不是我们的研究对象，不做详细阐述。

飞行器结构力学——飞行器结构主要是薄壁结构，薄壁结构力学构成飞行器结构力学的主要内容。

这里指出，飞行器结构力学中的“结构”不是真实的结构，而是将真实结构经忽略次要因素、保留主要特性简化出的受力模型。

由于简化的方式不同，得到的受力模型也不同。

## 0.2 飞行器结构力学的任务

从飞行器设计的角度来看，飞行器结构力学应当是研究作用在飞行器结构上的力（飞行器的外载荷）、力在结构中的传递（传力）和力在结构中引起的效应（强度、刚度和稳定性）的一门科学。作用在飞行器结构上的力即指作用在飞行器上的外载荷，以大气中的飞行器为例，作用在飞行器结构上的力有空气动力、集中和分布质量力、发动机的推（拉）力等，有时还涉及热载荷。在固连在飞行器上的坐标系中来观察问题，作用在飞行器上的外载荷（包括惯性力）构成一个平衡力系，应当注意到，作用在飞行器不同部位的外载荷是通过力在结构中的传递来达到平衡的，这就又引出力在结构中怎样传递更合理的问题，因为飞行器结构是相当复杂的，所以传力的规律也是相当丰富的。熟悉传力规律的人看飞行器结构，就像研究电器的人看电路图一样，各个元件都有其固有的作用，飞行器结构的部件、组合件和零件的传力构成合理的传力系统图。用通俗的话说，飞行器的各元件的传力是以其受力为代价的，由于飞行器结构是变形体，结构元件在传力（受力）过程中要引起一些效应，这些效应归结为飞行器结构的强度问题、刚度问题和稳定性问题。强度问题是从研究结构元件内应力着眼，使其内应力不大于容许应力，此时，认为结构满足了强度要求。刚度问题是从研究结构的变形（位移）着眼，使其变形限制在结构完成其使命容许的范围内，此时，认为结构满足了刚度要求。稳定性问题是指不允许结构失去稳定性，研究这类问题的关键是正确地确定失去稳定性的临界应力或临界载荷。以上论述的是飞行器结构力学的大体系，本书不能遵循这个大体系，而是把重点放在研究力的效应上，而且也不是力的效应的全部内容，而是着重研究内力计算、位移计算和失稳临界载荷。为了实现这一目的，需要研究一些力学基本原理和方法。任何

一架性能先进的飞行器必须具有质量小且结实可靠的结构。为此，很有必要掌握结构分析的基本原理及计算方法，以便在飞行器各个设计和应用阶段，对其结构的组成及其内力与变形进行必要的分析计算。

### 0.3 飞行器结构力学的计算模型

飞行器结构往往是十分复杂的，要想考虑所有的因素来分析其内力和变形几乎是不可能的，也是没有必要的。为了便于分析和计算，首先需要将真实结构加以简化，保留其主要因素，略去次要因素，用理想化的受力系统来代替实际结构，以得到所需要的计算模型。所以，结构力学中所指的结构实际上是真实结构的计算模型。

常见的飞行器结构可以简化为以下几种计算模型。

1) 桁架结构。横截面尺寸远远小于长度的杆组成的结构，杆件不受横向载荷作用，各杆之间均以无摩擦的铰链相连接（铰接）。

2) 刚架结构。即杆系结构，由可以承受弯曲载荷的直杆或曲杆组成的受力系统。各杆件之间是刚性连接（固结），也允许在刚架结构中存在铰接。

3) 薄壁结构。飞行器结构中应用得最多的一种形式。在飞行器结构中，薄壁结构是指由骨架（梁、缘条、桁梁、桁条、肋、隔框）及蒙皮所构成的受力系统。

4) 整体结构。需要简化为三维结构，通常是由机械铣切或化学腐蚀加工而成。

5) 板壳结构。有的空间飞行器其舱段可以简化为壳体，而其太阳能电池帆板可以简化为板。有的大气中的飞行器其舱段可以简化为壳体，而其翼面可以简化为由厚板组成的箱体。

6) 混合结构。由上述各种结构模式不同形式组合而形成的结构。飞行器的结构多数为这种混合结构。



## 0.4 结构计算模型的简化

尽管不同类型的计算模型简化的方式不尽相同，但也有一些基本的原则。以下，以桁架结构和刚架结构为例来说明计算模型简化的一般方法。

计算模型选取的原则是：

- 1) 力求反映实际结构的主要受力和变形特征；
- 2) 力求便于结构的力学分析和计算。

计算模型的简化大致可分为以下几个方面的内容。

### (1) 外载荷的简化

1) 略去对强度和刚度影响不大的外载荷，着重考虑起主要作用的外载荷。

2) 将作用面积很小的分布载荷等效地简化为集中载荷。

3) 将载荷集度变化不大的分布载荷简化为均布载荷。

4) 将动力效应不大的动力载荷简化为静力载荷。

### (2) 几何形状的简化

飞行器的外形大多由曲线或曲面所构成，计算模型可以简化为用折线代替曲线，用若干平面代替曲面。

### (3) 受力系统的简化

1) 将结构中各种受力构件简化为理想化元件。例如，承受拉伸和压缩的杆元件，承受弯曲的梁元件，承受扭转的杆元件。有时将这3种元件统称为杆件，可以理解为广义的杆元件。各种元件都有“自己”的受力特性。

2) 略去结构中不受力或受力不大的元件。

### (4) 连接关系的简化

将实际结构中所采用的铆接、螺接或焊接等连接方式，按照其受力及构造特点，可以简化为没有摩擦的铰接、刚接等。杆件的汇交点称为节点，其可以简化为图0-1所示的3种形式。