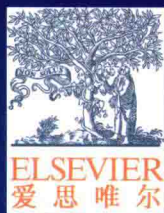




飞机设计技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目



AN INTRODUCTION TO
**AIRCRAFT STRUCTURAL
ANALYSIS**

飞机结构分析概论

[美] T. H. G. 麦格森 (T. H. G. Megson) 著

郭圣洪 姚雄华 尹建军 等译



航空工业出版社

飞机结构分析概论

An Introduction to Aircraft Structural Analysis

[美] T. H. G. 麦格森 (T. H. G. Megson) 著
郭圣洪 姚雄华 尹建军 等译

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书从开展飞机结构分析工作所需要的基本力学理论的阐述入手,结合飞机结构材料、工艺、承载功能以及适航要求等特点,介绍了飞机结构分析基于的设计思想、模型简化和分析计算的原理及方法。本书可作为飞机结构设计和强度设计人员开展设计计算、优化分析,以及强度校核的参考资料。

本书的读者对象是飞机设计院所从事飞机结构设计和强度设计工作的工程人员,以及航空航天院校师生。

图书在版编目(CIP)数据

飞机结构分析概论 / (美) 麦格森
(. Megson, T. H. G.) 著; 郭圣洪等译. --北京: 航空工业出版社, 2016. 1

(飞机设计技术丛书)

ISBN 978-7-5165-0948-7

I. ①飞… II. ①麦… ②郭… III. ①飞机-结构分析 IV. ①V22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 298236 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2012-6520

This edition of *Aircraft Introduction to Aircraft Structural Analysis* by T. H. G. Megson is published by arrangement with ELSEVIER LIMITED of The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK

飞机结构分析概论 Feiji Jiegou Fenxi Gailun

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1月第1版

2016年1月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 31.25

字数: 708千字

印数: 1—2000

定价: 98.00元

《飞机结构分析概论》

译校人员

郭圣洪 姚雄华 尹建军 许云峰

席小宁 王立行 杨 戈

前 言

在我讲授飞机结构的过程中，我觉得需要为航空工程专业的学生专门编写教材。虽然航空工程方面的优秀作品很多，但是这些作品有的已经过时，有的内容太专业，而不能满足本科生教材的要求。考虑到这一点，我写了《工科学生用飞机结构学》（简称《结构学》），本书就是以《结构学》为基础编写的。《结构学》的用户为出版商提供了许多有用的意见，建议出版《结构学》的简化版，这对于那些没有时间传授“大部头”书里面的所有资料的课程尤为重要。出版商所进行的调查及其反馈信息促使我编写了《飞机结构分析概论》，用于时间较短的课程的需要。

本书的大部分内容与《结构学》相似，但是删除了“结构振动”这一章，因为这章是单独的课程，也删除了气动弹性课题，把详细论述留给研究生课程。本书的“结构载荷和结构的不连续性”这一节进行了简化。这些主题使得我们对载荷传递和飞机结构的约束作用有了更深的了解，但是，这些主题通常超出了本科生教材范围。对这些主题感兴趣的读者应该参考“大部头”书。为了节省空间，“后机身的设计”附录可以从《结构学》的同步站点下载。请访问 www.elsevierdirect.com，搜索“Megson”找到网址和可下载内容。

补充材料（包括各章末尾的习题的解决方案）对使用《结构学》作为教材文本的注册讲师大有裨益。注册并访问 www.textbooks.elsevier.com，可以获得更多信息。

很感激密西西比州立大学机械航空工程系的副教授汤姆·莱西（Tom Lacy）对这本书的指导。

T. H. G. 麦格森

本书附有辅助材料，提供问题的详细答案用于教学。

注册并访问 www.textbooks.elsevier.com，可以获得讲师和导师所需要的材料。

译 序

军用飞机要满足战术技术要求，民用飞机要满足使用技术要求，结构是飞机满足上述技术要求的载体。而且结构是限定飞机承载能力、气动弹性、疲劳寿命特性的主要因素。在飞机设计中，结构设计和强度设计的基础是结构强度分析。结构强度分析经历了工程梁手工计算到有限元自动计算的发展过程，目前绝大多数的飞机设计都依靠有限元分析。但是，必须看到有限元分析是建立在弹性理论、材料力学等工程力学理论基础上的，分析结果能否很好地模拟飞机结构承载时的应力、变形，能否与地面和飞行试验相吻合，取决于模型的建立是否准确。在当今技术快速发展的情况下，为了达到提高飞机燃油效率、隐身性能、装载能力等要求，新型总体布局、新材料和新工艺不断涌现，对结构强度分析提出了新的挑战，应对这些挑战的基础就是结构和强度设计人员必须具备扎实的结构强度分析理论功底。

本书结合飞机结构承载的特点，从弹性理论基础出发，较为全面地阐述了工程梁、薄壁结构屈曲、虚功与能量法等结构强度分析相关理论；进而结合飞机结构材料、工艺、承载功能以及适航要求等特点，介绍了飞机结构分析基于的设计思想、模型简化和分析计算的原理和方法。

本书的翻译，有助于结构和强度设计人员，更全面和深入地了解结构强度分析的理论、方法和流程，更好地适应飞机设计的创新发展，也有助于年轻设计人员、航空院校在校大学生与研究生尽快熟悉飞机结构和强度设计工作。

本书如有翻译不妥之处，敬请批评指正。

译者

2015年1月

目 录

第 1 部分 结构分析原理

第 1 章 弹性理论基础	(3)
1.1 应力	(3)
1.2 力和应力的表示方法	(4)
1.3 平衡方程	(6)
1.4 平面应力	(7)
1.5 边界条件	(7)
1.6 倾斜面上应力的求解	(8)
1.7 主应力	(11)
1.8 应力莫尔圆	(12)
1.9 应变	(15)
1.10 相容性方程	(18)
1.11 平面应变	(19)
1.12 斜面的应变测定	(19)
1.13 主应变	(21)
1.14 莫尔应变圆	(21)
1.15 应力—应变关系	(22)
1.16 表面应变的试验测量	(28)
参考文献	(31)
习题	(32)
第 2 章 弹性力学中的二维问题	(35)
2.1 二维问题	(35)
2.2 应力函数	(37)
2.3 逆解法和半逆解法	(37)
2.4 圣维南原理	(41)
2.5 位移	(42)
2.6 端部加载悬臂梁的弯曲	(43)
参考文献	(47)
习题	(47)

第 3 章 实心截面的扭转	(50)
3.1 普朗特应力函数解法	(50)
3.2 圣维南翘曲函数解法	(57)
3.3 薄膜比拟法	(58)
3.4 窄矩形条的扭转	(60)
参考文献	(61)
习题	(62)
第 4 章 虚功和能量法	(63)
4.1 功	(63)
4.2 虚功原理	(64)
4.3 虚功原理的应用	(73)
参考文献	(80)
习题	(80)
第 5 章 能量法	(82)
5.1 应变能和余能	(82)
5.2 总余能驻值原理	(83)
5.3 用于求解结构变形问题	(84)
5.4 超静定系统解的应用	(90)
5.5 单位载荷法	(102)
5.6 挠度法	(104)
5.7 总势能(TPE)	(108)
5.8 总势能驻值原理	(109)
5.9 叠加原理	(112)
5.10 互等定理	(112)
5.11 温度影响	(115)
参考文献	(117)
补充书目	(118)
习题	(118)
第 6 章 矩阵法	(126)
6.1 表示法	(126)
6.2 弹簧的刚度矩阵	(127)
6.3 两个串联的弹簧的刚度矩阵	(128)
6.4 铰接结构的矩阵分析	(131)
6.5 静不定结构的应用	(137)
6.6 空间桁架的矩阵分析	(137)
6.7 等截面梁的刚度矩阵	(140)
6.8 连续体结构的有限元法	(146)

参考文献	(161)
补充书目	(161)
习题	(161)
第7章 薄板弯曲	(167)
7.1 薄板的纯弯曲	(167)
7.2 受到弯曲和扭转的板	(170)
7.3 承受横向分布载荷的板	(173)
7.4 矩形薄板的组合弯矩和面内载荷	(180)
7.5 具有小初始曲率的薄板弯曲	(184)
7.6 薄板弯曲能量法	(184)
参考文献	(190)
习题	(191)
第8章 柱	(194)
8.1 柱的欧拉屈曲	(194)
8.2 非弹性屈曲	(198)
8.3 初始缺陷的影响	(201)
8.4 横向载荷和轴向载荷作用下梁的稳定性	(203)
8.5 计算杆的屈曲载荷的能量法	(207)
8.6 薄壁杆的弯曲-扭转屈曲	(210)
参考文献	(219)
习题	(219)
第9章 薄板	(225)
9.1 薄板的屈曲	(225)
9.2 平板的非弹性屈曲	(228)
9.3 平板临界载荷的实验测定	(229)
9.4 局部失稳	(229)
9.5 加强板的失稳	(230)
9.6 板和加筋壁板的破坏应力	(232)
9.7 张力场梁	(235)
参考文献	(246)
习题	(247)

第2部分 飞机结构分析

第10章 材料	(253)
10.1 铝合金	(253)
10.2 钢	(255)

10.3	钛	(256)
10.4	塑料	(256)
10.5	玻璃纤维	(256)
10.6	复合材料	(256)
10.7	材料属性	(258)
	习题	(270)
第 11 章	飞机构件	(272)
11.1	构件载荷	(272)
11.2	构件功能	(274)
11.3	构件制造	(278)
11.4	连接	(282)
	参考文献	(287)
	习题	(287)
第 12 章	适航性	(289)
12.1	安全系数——飞行包线	(289)
12.2	载荷系数确定	(290)
	参考文献	(293)
第 13 章	机身载荷	(294)
13.1	飞机惯性载荷	(294)
13.2	对称机动载荷	(299)
13.3	与各种机动类型有关的法向加速度	(303)
13.4	阵风载荷	(305)
	参考文献	(310)
	习题	(310)
第 14 章	疲劳	(314)
14.1	安全寿命和破损安全结构	(314)
14.2	抗疲劳设计	(315)
14.3	部件的疲劳强度	(316)
14.4	飞机结构疲劳寿命的预测	(319)
14.5	裂纹扩展	(323)
	参考文献	(327)
	补充书目	(328)
	习题	(328)
第 15 章	开口薄壁梁和闭口薄壁梁的弯曲	(330)
15.1	对称弯曲	(331)
15.2	非对称弯曲	(338)
15.3	弯曲引起的挠曲变形	(344)

15.4	截面属性计算	(355)
15.5	弯曲理论的适用性	(361)
15.6	温度影响	(362)
	参考文献	(365)
	习题	(365)
第16章	梁的剪切	(371)
16.1	开口和单闭室截面薄壁梁的总应力、应变和位移关系式	(371)
16.2	开口截面梁的剪切	(374)
16.3	闭口截面梁的剪切	(378)
	参考文献	(384)
	习题	(384)
第17章	梁的扭转	(390)
17.1	闭口截面梁的扭转	(390)
17.2	开口截面梁的扭转	(398)
	习题	(404)
第18章	开口截面和闭口截面组合梁	(410)
18.1	弯曲	(410)
18.2	剪切	(410)
18.3	扭转	(413)
	习题	(414)
第19章	结构理想化	(415)
19.1	原理	(415)
19.2	壁板的理想化	(416)
19.3	理想化对开口和闭口截面梁分析的影响	(418)
19.4	开口截面梁和闭口截面梁的变形	(426)
	习题	(429)
第20章	翼梁和盒形梁	(432)
20.1	梯形翼梁	(432)
20.2	开口截面梁和闭口截面梁	(435)
20.3	具有变截面桁条的梁	(439)
	习题	(442)
第21章	机身	(443)
21.1	弯曲	(443)
21.2	剪切	(444)
21.3	扭转	(447)
21.4	机身开口	(448)
	习题	(449)

第 22 章 机翼	(451)
22.1 三个“实心梁”壳体	(451)
22.2 弯曲	(452)
22.3 扭转	(453)
22.4 剪切	(456)
22.5 剪心	(461)
22.6 梯形翼	(461)
22.7 变形	(464)
22.8 机翼开口	(465)
参考文献	(471)
习题	(471)
第 23 章 机身隔框和翼肋	(477)
23.1 加强筋/腹板结构原理	(477)
23.2 机身隔框	(481)
23.3 翼肋	(482)
习题	(485)

第 1 部分

结构分析原理

第 1 章 弹性理论基础

在这一章，我们将考虑弹性理论的基本思想与关系。这一理论分为三大部分：应力，应变和应力—应变关系。第三部分被延后到本章末尾阐述，是为了强调在应力—应变分析中，例如，平衡方程和相容性方程中，并没有引入具体的应力—应变规律。换句话说，1.1 ~ 1.14 节导出的关系既适用于线性弹性体，又适用于非线性弹性体。

1.1 应力

考虑如图 1-1 所示的任意形状的三维物体。在外力 P_1, P_2, \dots 的作用下，物体处于平衡状态，假设物体由连续、可变形的材料构成，因此力就可以在整个物体上进行传递。由此可见在任意内点 O 处，都有一个合力 δP 。在点 O 受到力 δP 的质点处于平衡状态，因此必定有一个大小相等且方向相反的力 δP （如图 1-1 所示）同时作用在质点上。如果我们现在用过点 O 的任意平面 nn 切分该物体，那么可以认为在对应的点 O 处，这两个力 δP 均匀地分布在该平面每面上的微小面积元 δA 上，如图 1-2 所示。点 O 处的应力 σ 由下式定义

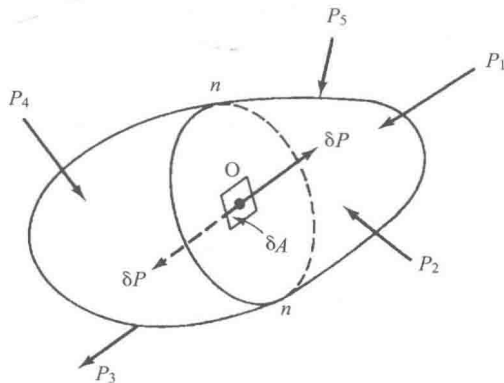


图 1-1 任意形状物体的内力

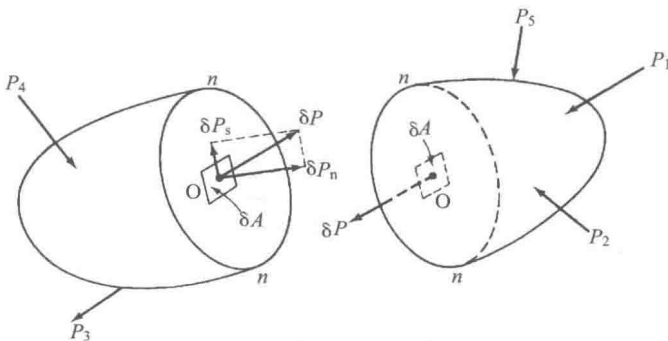


图 1-2 点 O 处的内力分量

$$\sigma = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta P}{\delta A} \quad (1-1)$$

图 1-2 中所示 δP 这样方向的力, 会在平面 mn 的两个面上产生拉应力。在这里必须认识到, δP 的方向是绝对的, 平面选择是任意的, 尽管点 O 的应力方向始终是 δP 的方向, 但是其大小与实际平面的选择有关, 因为不同的平面有不同的倾斜度, 因此就有不同的 δA 面积。在图 1-3 中参考木块的简单拉力更能容易理解这一说法。 P/A 给出横截面 mm 的均匀应力, 然而 P/A' 给出斜面 $m'm'$ 的应力。不管哪种情况, 这些应力与 P 的方向平行。

一般情况下, δP 的方向不垂直于 δA 面积, 通常将 δP 分解成两个分力: 垂直于平面的 δP_n 和作用于平面本身的 δP_s (见图 1-2)。注意在图 1-2 中, 平面内含点 δP 垂直于 δA 。与这些分力有关的应力是垂直应力或正应力 (normal or direct stress) σ , 其定义为

$$\sigma = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta P_n}{\delta A} \quad (1-2)$$

剪应力^① (shear stress) τ 定义为

$$\tau = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta P_s}{\delta A} \quad (1-3)$$

合成应力 (resultant stress) 是通过矢量加法的垂直法则计算而来的, 即

$$\sigma_{\text{res}} = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$$

然而, 一般情况下我们关心的是 σ 和 τ 的单独作用。

但是严格地说, 由于应力没有大小和方向, 所以它不是矢量, 我们必须规定应力作用平面。因此应力是张量, 其完整描述与两个力的矢量和作用表面有关。

1.2 力和应力的表示方法

通常, 在正交坐标轴 $Oxyz$ 中表达物体上某一个点的应力状态。在这种情况下, 我们使平面物体平行于坐标轴的方向。作用在平面上 O 点的合力 δP 可以被分解为一个垂直分量和两个平面内分量, 如图 1-4 所示, 因此就产生一个正应力分量和两个剪应力分量。

虽然这一正应力分量由参考作用平面规定, 但是, 除了规定平面方向外, 还需要规定应力分量方向。因此我们用单个下标表示正应力的作用平面, 用两个下标表示剪应力, 首先确定平面, 然后是方向。因此在图 1-4 中, 剪应力的分量分别是在 x 轴和 y 轴方向作用于 z 平面的 τ_{zx} 分量和 τ_{zy} 分量, 而正应力的分量是 σ_z 。

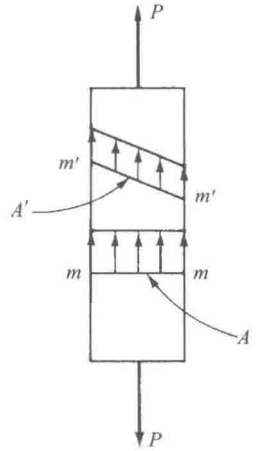


图 1-3 均匀木块上不同平面的应力值

^① 根据 GB 3102.3—1993 《力学的量和单位》规定, shear stress 定名为切应力, 但我国航空工业系统结构强度专业仍习惯称剪应力。——译者注

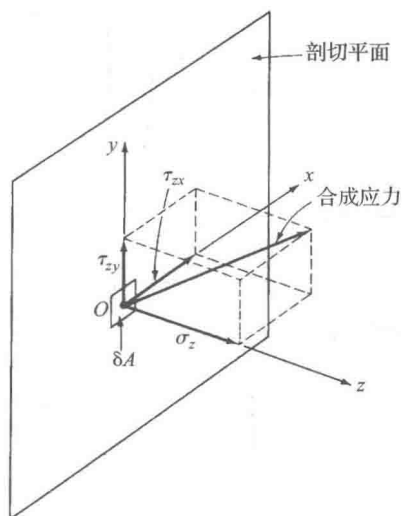


图 1-4 物体上某一点的应力分量

现在我们描述物体上 O 点的应力状态，通过规定 δx 面、 δy 面和 δz 面上各个面的应力分量和正应力分量，剖切平面 (cutting plane) 在 O 点形成的应力如图 1-5 所示。

元素各个面的分量很小，因此认为应力被均匀分布在每一个表面上。为了方便起见，每个对立面上的应力大小相等且方向相反。

现在，我们定义图 1-5 中所示的应力方向为正，这样，远离其关联平面的正应力为拉应力，其值为正；相反方向的正应力为压应力，其值为负。在拉应力方向就是坐标轴的正方向的平面上，当剪应力沿着关联坐标轴的正方向作用时，剪应力为正值。如果拉应力的方向是反方向，那么正的剪应力就是沿着相应坐标轴正方向的相反方向。

我们已经讨论了作用在物体上的两种外力产生的内应力。如表面力 P_1, P_2, \dots 或流体静力学压力被分布在物体表面积上。每个单位面积的表面力可以被分解成平行于直角坐标系的分量，一般情况下，这些分量用符号 $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}$ 表示。第二个施力

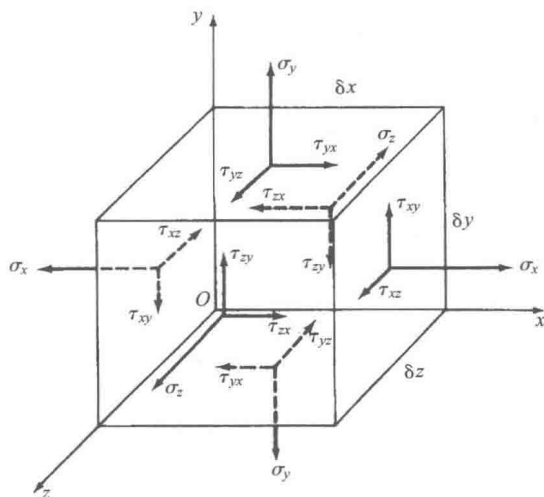


图 1-5 物体上某一点的应力符号规定和应力表示法