

工程弹性力学

〔美〕 A. P. 薄理士 张建平 著



科学出版社

工程弹性力学

[美]A.P. 薄理士 张建平 著

王惠德 张爱林 译
王冬青 冀延
傅宝连 校

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了弹性力学的基本理论. 全书共分八章. 第一章讲述必要的矢量代数和张量代数的基础知识. 从第二章起深入系统地讨论变形理论、应力理论、本构关系、弹性力学的平面问题和空间问题、热应力、各种截面等直杆的扭转和弯曲的三维问题以及弹性力学问题的一般解. 更深入的理论及其应用在附录中作了论述.

本书可作为航空、机械、土建、船舶等专业高年级大学生和研究生的教材或教学参考书, 也可供有关专业教师、科研人员和工程技术人员参考.

Arthur P. Boresi Ken P. Chong

Elasticity in Engineering Mechanics

Elsevier Science Publishing Co., Inc., 1987

工程弹性力学

(美) A. P. 薄理士 张建平 著

王康德 张爱华

王冬青 纂

傅金连 校

责任编辑 杨 岭

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

北京黄坎印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

*

1995年 1月第一版 开本: 850×1168 1/32

1995年 1月第一次印刷 印张: 18⁵/₁₆

印数: 1—1200 字数: 476 000

ISBN 7-03-004078-3/O · 709

定价: 22.80 元

作者致谢

本书中文版能够在中国大陆顺利出版,端赖大陆力学界权威大力支持,尤其是中国力学泰斗钱伟长教授的热忱推荐并为本书中文版作序,王惠德教授等信、达、雅的翻译和多方奔跑,以及傅子智教授等的热心协助,作者在此万分感激.

中国的力学研究及其理论,在世界上深具学术地位.作者深切希望本书能够“抛砖引玉”,促进中美双方面的交流,并盼望各方贤达多多赐教!

A. P. 薄理士 张建平

序 言

A. P. 薄理士(Arthur P. Boresi)和张建平(Ken P. Chong)教授合著的《工程弹性力学》一书,由王惠德教授等经一年多时间的翻译、整理,即将出版.这是一本理论联系实际的好书,也是充分反映连续介质力学(固体力学)基本理论发展的好书.它和国内外充斥市场的“弹性理论”和“弹性力学”不很一样.它不仅有较新的基本理论的叙述和讨论,而且还介绍了许多理论方面的前沿课题,以及与航空、动力机械、新型结构材料有关的工程弹性力学的实际问题 and 基本知识,使读者通过本书的阅读很快就能用以处理各种最新发展的工程技术问题.

本书在第二章讲解变形理论时,特别强调了有限变形的各家应变定义,讨论了变形中的刚体转角分量与各种应变定义的关系,并且给出了各种应变的不变量.同时,本章还介绍了运动学中的局部加速度和物质加速度之间的关系,这无疑给处理高速撞击,如穿甲力学问题提供了必要的理论基础.

本书第三章讲解应力理论时,引进了应力偏量和八面体应力,以及各种应力不变量.这显然对处理塑性屈服和断裂力学的问题提供了理论基础.本章还引进了应力偶和体力偶的概念.这对于最近发展的极化材料的弹性力学,显然是非常重要的.

在第四章中讲解应力-应变关系时,特别引进了纤维增强的材料模型.这种复合材料弹性力学的理论基础,在高技术领域是很重要的.最后本章用了相当大的篇幅研究热应力问题,或称温度应力问题,其重点放在 Duhamel 的理论上.关于耦合的热应力问题本章也有较全面的提示.这为有温差的弹性体静力学中的许多实际问题提供了足够的基础知识.本章对于晶体弹性理论只涉及最基本的一段,这对于搞技术物理的学生是不够的,但对于处理一般

工程技术中的各向异性材料是完全足够了。

本书对能量定理和变分原理也给予足够的重视,这显然对于利用有限元技术求解弹性力学问题建立了一定的理论基础。

本书有一半章节,即第五、第六、第七各章,讲解了直角坐标和极坐标中的平面问题,以及各种截面的杆件在各种受力状态下的弹性理论解。这些结果无疑对于工程人员是很有用的。这里也讲解了斜交坐标下的平面问题,它在结构力学计算中是较重要的。同样,本书的这些章节中,有不少涉及热应力和热应变的具体问题。

第八章中,广泛讲解了弹性理论中的一般解问题。其中涉及 Helmholtz 变换、Galerkin 矢量、Love 应变函数、Kelvin 问题以及用 Westergaard 孪生梯度或双梯度法求解 Boussinesq 和 Cerruti 问题等。这些问题都给出了比较详细的解释。

所有这些都说明本书是晚近的一本较好、较现代的弹性力学教材。作者指出,部份材料适用于美国大学三年级学生,另一部份适用于大学四年级学生,还有一部份理论性较强,是提供研究生课程用的。

听说张建平教授正准备写一本续集,是关于有限元计算力学、断裂力学以及工程结构部件如板壳弹性力学、振动和应力波的传播等问题的。

本书作者薄理士和张建平教授都是美国怀俄明大学土木工程系应用力学教授。薄理士教授迄今还兼任该系系主任。他们都是美国土木工程学会院士,兼工程力学分部和稳定性委员会以及《工程力学杂志》的负责人。在 1983 年春,我曾到怀俄明大学参加美国土木工程学会的“第五届工程力学学术会议”。他们就是这次会议的召集人。也就是在该会上我和他们初次见面相识的。我们中国力学界出席该会的约有 10 人之多。我们在那里受到了热情的款待,并到两位教授家里做客,见到了两位夫人。

薄理士教授是美国力学科学院的创始人之一,张建平教授也是力学科学院的成员。

薄理士教授任职怀俄明大学土木工程系教授、系主任(1980起)以前,曾长期(1952—1979)任依利诺依斯大学教职,自1959年起任该校理论和应用力学教授达20年之久,40年以来他长期从事国家标准局、北美飞机制造公司、陆军建筑工程研究实验室、阿贡(Argonne)国家实验室等机构的工程工作,同时在里拜-渥温斯-福特(Libbey-Owens-Ford)公司、爱里森(Allison)通用发动机研究部、美国陆军研究机关、美国陆军弹道研究实验室等广泛的领域做过科学顾问。

张建平教授毕业于台湾国立成功大学(1964),获麻省大学结构工程硕士学位(1966),普林斯登大学固体力学博士学位(1969),后在美国国家钢铁公司以高级主管工程师的职位主持有关钢铁结构和冷加工复合板的研究(1969—1974)和在怀俄明大学任固体力学及结构力学讲座教授(1974—1988),曾任香港大学荣誉教授(1981)、华盛顿大学(1987)和麻省理工学院(1988)的客座教授。自1989年起,他任国家科学基金会结构与建筑部主任,主管和执行美国联邦政府在结构、建筑系统、施工、材料科学、工程力学、无损检测、计算机辅助设计和基于专家系统的人工智能等方面的科研项目和教育计划。

张建平教授长期从事结构力学和固体力学的科研和教学工作,涉及范围有岩土材料特性、断裂力学、薄壁结构和混合结构特性、结构动力学、应力波的传播、计算机辅助设计和优化设计等。张建平教授的学术工作很丰富,除已发表了百余篇学术论文外,还和别人合作著有《油页岩力学》、《智慧型结构》、《工程弹性力学》(即本书)、《固体力学中的近似解法》(以上系由Elsevier出版)、《电脑辅助工程》和《土木工程中的工程力学》(均由美国土木工程学会出版)。

张建平教授也是美国土木工程学会“工程力学学报”副主编(1986—1988),伦敦“国际薄壁结构杂志”的北美主编(1987迄今),也是我国“应用数学和力学”月刊的海外编委(1981迄今)。张

建平教授对我国力学发展一贯很关心,曾几度来华访问和讲学,并两度亲自撰写高质量的研究论文,提交“应用数学和力学”发表,为该刊增色不少.最近张建平教授受聘为天津大学和同济大学的顾问教授,义务为促进学术交流尽力.他是1991年在北京举行的首届“中美计算力学会议”的发起、赞助及参与者之一.在此之前他还参与了香港科技大学的建校计划(1988—1989).

本书的中译本的出版,将在我国建设有中国特色的社会主义的过程中,发挥“科技是第一生产力”的有效作用.

谨为序.

钱伟长

1993年3月25日于北京

译 者 的 话

A. P. 薄理士教授和张建平教授所著《工程弹性力学》一书在美国力学界和工程界享有很高声誉. 它不仅是航空、机械、土木工程等专业大学高年级和研究生的理想教材, 而且还为进一步学习高等材料力学、塑性理论、板壳理论、复合材料力学等固体力学课程提供坚实基础. 本书概念清晰, 推导严谨, 内容丰富. 对弹性力学较新的基本理论作了有独到见解的系统的论述. 同时也介绍了许多理论前沿课题. 诸如运动学中的局部加速度与物质加速度之间的关系, 关于应力偶和体力偶的论述, 关于纤维增强材料模型的建立等. 无疑这些内容对解决一些高科技领域的工程弹性力学问题具有重要意义. 此外, 本书对许多工程实际问题也给出了详细的论述和解答, 读者可以用来解决各种工程问题. 书中每一章都附有足够数量的例题和习题, 有助于深入理解和掌握基本理论和方法, 也有助于学会如何应用基本理论和方法解决实际问题. 有鉴于此, 译者在执教之余, 将其译成中文出版. 译者确信, 本书中文本的出版, 将有益于中美力学界的学术交流.

本书的翻译工作始终得到力学界老前辈、著名科学家钱伟长教授的热心关怀, 审阅了部分译稿, 并在百忙中为中文版本写了序. 在此特向钱老表示由衷的谢意.

参加本书翻译工作的有: 王惠德译第一、第二章; 张爱林译第四、第五章; 王冬青译第三、第七章; 冀延译第六、第八章. 全书由王惠德、张爱林统审定稿.

限于水平, 译文中难免有不当之处, 欢迎批评指正.

原 序

本书取材试图为深入学习弹性力学及固体力学若干其他分支提供基础,其中包括高等材料力学、板壳理论、复合材料力学、塑性理论、有限元法及其他数值方法。为便于阅读,第一章给出某些数学预备知识。根据读者情况,本章内容可作为必读材料或参考材料。本书主要内容始于第二章的变形理论。第三章介绍应力理论。把变形理论和应力理论分开论述,以强调它们彼此之间的独立性和在数学上的类似性。这样做,可以清楚地看到这些理论仅仅依赖于与连续介质模型化相关的近似方法,而与材料特性无关。在第四章,借助于引入三维应力-应变-温度关系(本构关系)将变形理论与应力理论结合起来。第四章主要论述线弹性材料。而在附录 4B 中简要地讨论了非线性本构关系。第五章和第六章分别介绍直角坐标和极坐标中的弹性力学平面问题。第七章介绍端部受力等直杆的三维问题。有关热应力的内容则按逻辑顺序依次编入第四、第五和第六章的有关题目。

第八章介绍弹性力学问题的一般解。对更高深课题的推广应用,则编入附录中。例如复变量法编入附录 5B,应力偶理论编入附录 5A 和 6A。此外,在每一章均给出了例题和习题,以及为进一步学习所需的注释、参考文献和书目。

如上所述,本书作为大学生的教科书和从事实际工作的工程师和研究人员的参考书是有价值的。本书所提供的材料可用作若干不同类型的课程。例如,作为高年级工科大学生一个学期的课程可采用第二章($\S 2-1$ 至 $\S 2-16$)、第三章($\S 3-1$ 至 $\S 3-8$)、第四章($\S 4-1$ 至 $\S 4-7$ 和 $\S 4-9$ 至 $\S 4-12$)和第五章($\S 5-1$ 至 $\S 5-7$)的内容,并尽可能多地纳入第六章($\S 6-1$ 至 $\S 6-6$)内容以及讲解重要习题的解法。作为高年级四分之一学年课程可以讲述从第二章至

第五章的类似材料,但对例题和习题不作重点讲解.作为土木工程、机械工程及其他有关的工程领域一年级研究生课程可包括第一章至第六章并选择相应各章附录中的材料,或者再选择第七章和第八章的内容.作为研究生的后续课程,可包括第二章至第六章附录中的大部分材料,并根据个别研究生进行深入专题研究的兴趣而包括学习第七章和第八章中的课题.

作者特别感谢 Shelley Hoinaes 为本书打印了手稿.还特别感谢出版者的关心、合作和帮助,使本书得以及时出版.

目 录

作者致谢

序言

译者的话

原序

第一章 基本概念与数学预备 (1)

第一部分 引言 (1)

§ 1-1 趋势与展望 (1)

§ 1-2 弹性力学 (2)

§ 1-3 数值应力分析 (3)

§ 1-4 弹性力学问题的通解 (4)

§ 1-5 实验应力分析 (5)

§ 1-6 弹性力学的边值问题 (5)

第二部分 基本概念 (7)

§ 1-7 矢量代数概要 (7)

§ 1-8 标量点函数 (10)

§ 1-9 矢量场 (12)

§ 1-10 矢量的微分 (14)

§ 1-11 标量场的微分 (15)

§ 1-12 矢量场的微分 (16)

§ 1-13 矢量场的旋度 (17)

§ 1-14 流体的 Euler 连续方程 (17)

§ 1-15 散度定理 (19)

§ 1-16 二维散度定理 (22)

§ 1-17 线积分和面积分(标量积的应用) (23)

§ 1-18	Stokes 定理	(24)
§ 1-19	恰当微分	(25)
§ 1-20	三维空间的正交曲线坐标系	(26)
§ 1-21	正交曲线坐标系中的微分长度的表达式	(27)
§ 1-22	正交曲线坐标系中的梯度和 Laplace 算子	(28)
第三部分 张量代数基础		(31)
§ 1-23	指标符号 求和约定	(31)
§ 1-24	笛卡儿直角坐标系旋转下的张量变换	(35)
§ 1-25	张量的对称部分和反对称部分	(41)
§ 1-26	δ_{ij} 和 ϵ_{ijk} (Kronecker δ 符号和交错张量)	(43)
§ 1-27	齐次二次型	(45)
§ 1-28	矩阵代数基础	(48)
§ 1-29	变分法中的一些课题	(52)
第二章 变形理论		(57)
§ 2-1	可变形连续介质	(57)
§ 2-2	刚体位移	(58)
§ 2-3	连续域的变形 物质变量 空间变量	(59)
§ 2-4	对可变形介质连续变形的约束	(63)
	习题 2-4	(66)
§ 2-5	位移矢量的梯度 张量	(66)
§ 2-6	无限小线单元的伸展	(69)
	习题 2-6	(76)
§ 2-7	ϵ_{ii} 的物理意义 应变的定义	(76)
§ 2-8	线单元的最终方向 剪应变的定义 $\epsilon_{ij} (i \neq j)$ 的 物理意义	(80)
	习题 2-8	(84)
§ 2-9	$\epsilon_{\alpha\beta}$ 的张量特性 应变张量	(85)
§ 2-10	倒易椭球 主应变 应变不变量	(87)

§ 2-11 主应变的确定 主轴	(91)
习题 2-11	(97)
§ 2-12 应变不变量的确定 体积应变	(99)
§ 2-13 体积元的转动与位移梯度的关系	(104)
习题 2-13	(108)
§ 2-14 均匀变形	(109)
§ 2-15 小应变和小转角理论	(113)
习题 2-15	(122)
§ 2-16 经典小位移理论的协调条件	(124)
习题 2-16	(129)
§ 2-17 由连续性引出的附加条件	(130)
§ 2-18 可变形介质的运动学	(133)
习题 2-18	(138)
附录 2A 正交曲线坐标系中的应变-位移关系	(139)
§ 2A-1 几何预备知识	(139)
§ 2A-2 应变-位移关系	(141)
附录 2B 用笛卡儿方法推导特殊坐标系中的应变-位移关系	(144)
附录 2C 一般坐标系中的应变-位移关系	(147)
§ 2C-1 Euclid 度量张量	(147)
§ 2C-2 应变张量	(149)
第三章 应力理论	(152)
§ 3-1 应力的定义	(152)
§ 3-2 应力符号	(155)
§ 3-3 力矩的求和 一点的应力 斜面上的应力	(158)
习题 3-3	(162)
§ 3-4 应力的张量特性 坐标轴旋转时应力分量的 变换	(167)
习题 3-4	(170)
§ 3-5 主应力 应力不变量 极值	(170)

习题 3-5	(175)
§ 3-6 平均应力张量和应力偏张量 八面体应力 ...	(176)
习题 3-6	(180)
§ 3-7 平面应力的近似 二维和三维 Mohr 圆	(185)
习题 3-7	(191)
§ 3-8 空间坐标系中变形体的运动微分方程	(193)
习题 3-8	(196)
附录 3A 空间曲线坐标系中的平衡微分方程	(197)
§ 3A-1 空间正交曲线坐标系中的平衡微分方程 ...	(197)
§ 3A-2 平衡方程的特殊情况	(199)
§ 3A-3 一般空间坐标系中的平衡微分方程	(201)
附录 3B 含应力偶和体力偶的平衡方程	(203)
附录 3C 小位移理论运动微分方程的简化	(205)
§ 3C-1 物质导数 体积分的物质导数	(205)
§ 3C-2 物质坐标中的平衡微分方程	(210)
第四章 弹性理论的三维方程	(217)
§ 4-1 固体的弹性与非弹性响应	(217)
§ 4-2 内能密度函数(绝热过程)	(220)
§ 4-3 应力分量与应变能密度函数的关系	(223)
§ 4-4 广义 Hooke 定律	(226)
习题 4-4	(235)
§ 4-5 各向同性介质 均匀介质	(236)
§ 4-6 弹性各向同性介质的应变能密度	(237)
习题 4-6	(243)
§ 4-7 特殊应力状态	(247)
习题 4-7	(249)
§ 4-8 热弹性方程	(250)
§ 4-9 热传导微分方程	(252)
§ 4-10 有一个和两个变量的热应力问题的基本解法	(254)

§ 4-11 应力-应变-温度关系	(257)
习题 4-11	(265)
§ 4-12 用位移表示的热弹性方程	(267)
§ 4-13 球对称应力分布(球)	(269)
习题 4-13	(271)
§ 4-14 用应力分量和温度表示的热弹性协调方程	
Beltrami-Michell 关系	(271)
习题 4-14	(277)
§ 4-15 边界条件	(278)
习题 4-15	(283)
§ 4-16 弹性力学平衡问题的唯一性定理	(284)
§ 4-17 用位移分量表示的弹性力学方程	(287)
习题 4-17	(290)
§ 4-18 弹性力学的基本三维问题, 半逆法	(291)
习题 4-18	(296)
§ 4-19 等圆截面轴的扭转	(300)
习题 4-19	(304)
§ 4-20 弹性力学中的能量原理	(305)
§ 4-21 虚功原理	(306)
习题 4-21	(311)
§ 4-22 虚应力原理(Castigliano 定理)	(312)
§ 4-23 混合虚应力-虚应变原理(Reissner 定理)	
.....	(315)
附录 4A 虚功原理对变形介质的应用(Navier-Stokes 方程)	
.....	(316)
附录 4B 非线性本构关系	(318)
§ 4B-1 变应力-应变系数	(319)
§ 4B-2 高阶关系	(319)
§ 4B-3 亚弹性公式	(320)
§ 4B-4 摘要	(320)

第五章 笛卡儿直角坐标系的弹性力学平面理论	(321)
§ 5-1 平面应变	(321)
习题 5-1	(326)
§ 5-2 广义平面应力	(327)
习题 5-2	(332)
§ 5-3 用应力分量表示的协调方程	(333)
习题 5-3	(337)
§ 5-4 Airy 应力函数	(338)
习题 5-4	(347)
§ 5-5 用调和函数表示的 Airy 应力函数	(353)
§ 5-6 平面弹性理论的位移分量	(355)
习题 5-6	(358)
§ 5-7 笛卡儿直角坐标系中二维问题的多项式解	(362)
习题 5-7	(365)
§ 5-8 用位移分量表示的平面弹性理论	(369)
习题 5-8	(370)
§ 5-9 相对于斜坐标轴的平面弹性理论	(370)
附录 5A 具有应力偶的平面弹性理论	(374)
§ 5A-1 引言	(374)
§ 5A-2 平衡方程	(375)
§ 5A-3 应力偶理论中的变形	(376)
§ 5A-4 协调方程	(379)
§ 5A-5 具有应力偶的平面问题的应力函数	(381)
附录 5B 用复变量表示的平面弹性理论	(382)
§ 5B-1 用解析函数 $\phi(z)$ 和 $\chi(z)$ 表示的 Airy 应力函数	(383)
§ 5B-2 用解析函数 $\phi(z)$ 和 $\chi(z)$ 表示的位移分量	(384)