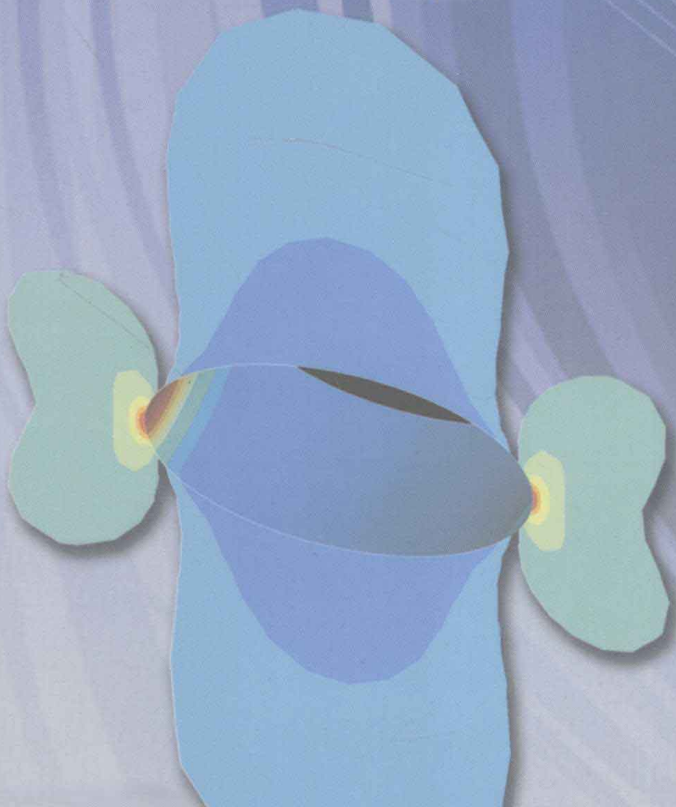
WILEY

SECOND EDITION

ELASTICITY IN ENGINEERING MECHANICS

工程力学中的弹性理论

(美) 博瑞斯(Arthur P. Boresi) 著
张建平(Ken P. Chong)
郭万林 寇良志 译



航空工业出版社

工程力学中的弹性理论

（美）博瑞斯（Arthur P. Boresi）
张建平（Ken P. Chong）　著

郭万林　寇良志　译

航空工业出版社
北京

内容提要

本书讲述了弹性理论和一些固体力学分支学科（包括高等材料力学、平面理论和壳理论、复合材料、塑性理论、有限元以及其他数值方法等）基础研究的基本内容。首先介绍了了一些为后面学习准备的参考文献和数学预备知识。根据读者受教育的不同程度，这些材料可用作必读材料或参考资料。本书的主要内容是从第2章的变形理论开始的，接着介绍了应力理论，三维应力—应变—温度关系，线弹性材料，非线性本构关系，直角坐标系和极坐标系下的平面弹性理论，承受末端载荷的柱状棒的三维问题。并给出了弹性问题的一般解另外，每一章都附有例题和习题，并且配有注解、参考文献以供进一步研究。

本书作为学生的教材、作为工程师或科学家的参考书都是很有价值的。书中的内容可供工程系本科学生、土木和机械工程以及相关工程领域的研究生研习。

图书在版编目（CIP）数据

工程力学中的弹性理论/（美）博瑞斯
（Boresi，A. P.），（美）张建平著；郭万林，寇良志译
. --北京：航空工业出版社，2010. 11
ISBN 978-7-80243-616-9

Ⅰ.①工… Ⅱ.①博…②张…③郭…④寇… Ⅲ.
①工程力学：弹性力学 Ⅳ.①0343

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 183042 号

北京市版权局著作权合同登记
图字：01-2010-1394

工程力学中的弹性理论
Gongcheng Lixue Zhong De Tanxing Lilun

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
2010 年 11 月第 1 版 2010 年 11 月第 1 次印刷
开本：787×1092 1/16 印张：26 5 字数：657 千字
印数：1—1500 定价：80 00 元

彈性力学为科学及工程之基礎。郭万林教授領銜盡心翻译，直趋「顺雅达」之境界，殊为難得。谨以此书獻给力学界同仁，请切磋及指正。

张建平

二〇〇九年

译 者 序

Arthur P. Boresi 和 Ken P. Chong 教授合著的Elasticity in Engineering Mechanics，2nd Edition（《工程力学中的弹性理论》第 2 版）出版于 1999 年。这是一本高等学校的新教材，也是一本论述弹性理论以及一些固体力学分支理论的好书。其第 1 版的中译本早在 20 世纪 80 年代就由科学出版社在中国大陆出版，广受好评。随着弹性理论的不断发展完善，原著发行了第 2 版，并加入了很多新知识，其内容编排也在第 1 版基础上做了较大的改进，使得原第 1 版中译本对于现英文版（第 2 版）不再适用。为推动中美文化交流，使中国学生从最新的教材中汲取更全面的弹性理论知识，原著作者、怀俄明大学机械工程系的 Ken P. Chong 教授积极促使本书第 2 版中译本在大陆的出版。2005 年 Chong 教授找到我，希望能帮忙翻译出版。翻阅此书，发现其内容编排由浅入深、简明扼要，特别注重讲清基本概念和原理，就推荐给我的学生寇良志学习，并尝试翻译。2006 年，中译本初稿完成。译文忠于原文，但还有很大的改进空间。后来我们又数次重新组织校译、修正，并于 2009 年完成最终稿，以中文版的形式奉献给广大读者。虽然中译本在原书出版 10 周年才面世，但该书精密的数学推导、完备的知识介绍，使得其价值历久弥新。

尽管目前各高校开设的力学课程很多，为这些不同课程配套的教材也很多，但是不同力学课程间的联系并不紧密，使得学生对于知识的掌握趋于松散。而要获得一个完备的力学知识体系，需要系统地学习掌握弹性理论和非线性力学。作为一本介绍弹性力学的优秀作品，《工程力学中的弹性理论》与国内其他有关弹性力学的书籍最大不同之处在于：书中每个公式都严格由最基本的公式推导得到，而不是直接给出，使得整书洋溢着数学美和理性美。这样严谨的方式使得弹性知识易学易懂，让读者对于弹性理论不仅知其然，而且知其所以然。为此作者在开始的章节就讲述了一些为后面学习准备的数学预备知识，每章节还列出了相关的参考文献。完备的弹性理论概述、由浅入深的内容介绍使其非常适合弹性力学入门的学习和使用。尽管如此，除了对基本弹性理论基础知识系统的介绍外，本书还详尽地介绍了非线性本构、应力耦合理论等，这样通过对本书的学习不仅可以很好地掌握基本的力学知识，还能进一步领会到弹性力学的精髓。本书集中讲述弹性理论，主要以杆和梁为模型来阐述

相关理论，对于工程中常用的壳、薄壁结构等经典结构研究并未涉及。若将本书结合材料力学、非线性力学、结构力学等课程学习使用，则能够对力学有一个全面完整系统的理解和掌握。由于本书作者介绍的基本概念清晰准确、简明扼要、前后连贯、层次清晰，来龙去脉分析透彻，而且书中每一章都附有很具代表性的例题和习题，并配有注解、参考文献和参考书目以供读者进一步学习和研究，因此，本书不仅适合没有力学基础的读者自学，还可以作为土木和机械工程以及相关工程领域本科生乃至研究生的教科书，将其作为工程师或科学家的参考书也很有价值。

对于该书的翻译，译者本着“信、达、雅”的原则，力求完整体现作者的学术意图和语言特点。我们在最大程度保证译文忠于原文（信），并且符合汉语表达习惯（达）的同时，我们还努力追求译文本身的优美（雅）。但限于译者的水平，对于雅的高要求可能还有不足之处，有兴趣的朋友可以参考英文原著。同时，译文中可能有错误和欠妥之处，欢迎读者批评指正。

在此特别感谢航空工业出版社的大力支持，尤其是李苏楠先生，曾数次亲赴南京洽谈本书的出版事宜。同时也要感谢本书作者 Ken P. Chong 教授为推动中美文化交流，为积极促成本书中译本的出版所做出的努力。另外，还要特别感谢吴文志（第 1 章），顾绍景（第 2 章），仇虎（第 3 章），蒋莱（第 4 章），缪春洋（第 5 章），杨龙、李绍渊（第 6 章），闫励、向目靖（第 7 章）和江勇、于培师（第 8 章）参与校译工作，保证了本书的及时出版。

译　者

2009 年 12 月 26 日于南京航空航天大学

原版前言

本书讲述了弹性理论和一些固体力学分支学科（包括高等材料力学、平面理论和壳理论、复合材料、塑性理论、有限元以及其他数值方法等）基础研究的基本内容。第1章包括了为后面学习准备的参考文献和一些数学预备知识。根据读者受教育的不同背景，这些材料可用作必读材料或当作参考资料。本书的主要内容是以第2章的变形理论开始的。第3章介绍应力理论。将变形理论和应力理论分开研究是为了强调它们彼此之间的独立性，同时也为了突出它们之间的数学相似性。这样，读者可以很清楚地看出这些理论仅仅依赖于跟连续介质模型相关的近似，而独立于材料的行为。在第4章，通过引入三维应力—应变—温度关系（本构关系）将变形理论和应力理论联系在一起。第4章主要讨论的是线弹性材料，其中附录4B还简要地介绍了非线性本构关系。第5章和第6章分别研究直角坐标系和极坐标系下的平面弹性理论。第7章介绍承受末端载荷的柱状棒的三维问题。热应力的相关内容则穿插在第4、5、6章里介绍。

弹性问题的一般解在第8章给出。关于向弹性理论更深入的主题的拓展可参照附录，如附录5B的复变量和附录5A和附录6A的应力耦合理论。另外，每一章都附有例题和习题，并且配有注解、参考文献和参考书目以供读者进一步研究。

如上所述，该书作为学生的课本、工程师或科学家的参考书都是很有价值的。书中的内容可用于多种不同形式的课程设置。例如，对于工程系高年级学生的全学期制课程，可以包括第2章（2.1~2.16节）、第3章（3.1~3.8节）、第4章（4.1~4.7节和4.9~4.12节）、第5章（5.1~5.7节），以及第6章的大部分（6.1~6.7节）内容和大量的习题解答。而对于高级工程系学生的季度（半学期）制课程，可以包含第2~第5章与上面相同的内容，但较少强调例题和习题解答。对于土木和机械工程以及相关工程领域的一年级研究生可以包括第1~6章，并从附录和（或）第7和第8章选择性地学习一些内容。后续的研究生课程内容可以包括第2~第6章的大部分附录材料、第7和第8章的主题，以及根据学生的个人爱好进一步学习的专题。

特别感谢发行人 Bob Argentieri，Bob Hilbert，Akemi Takada 参与和帮助本书的及时出版。

目　　录

第1章　基本概念和数学基础

第I部分　基本概念

1.1　发展趋势和范围

应用弹性理论解决工程问题的论文是固体力学技术文献的重要组成部分（Dvorak，1999）。当前论文中提出的许多问题都需要用数值方法在高速计算机上求解。在可以预见的将来，特别是随着微型计算机和小型机的广泛应用以及超级计算机的推广使用（Londer，1985；Fosdick，1996），这种趋势将会继续发展。例如，有限元法已经广泛应用于平面问题、板壳问题以及一般的三维问题等，包括线性和非线性问题、各向同性和各向异性材料问题。而且通过计算机的使用，工程师们能够全面考虑如航天飞机等大型工程问题的最优化设计（Atrek 等，1984；Zienkiewicz 和 Talor，1989；Kirsch，1993）。同时，计算机也在计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）(Ellis 和 Semenkov，1983)，以及虚拟试验和以模型为基础的模拟（Fosdick，1996）等领域起着重要的作用。

除有限元法外，一些经典的方法（如有限差分法）在弹性问题中又有了新的应用。更普遍的是，近似法这个广阔的主题已经在弹性领域引起了高度的关注。边界元法在解决二维、三维问题以及无限区域问题方面有其独特的优点，因此已经得到广泛应用（Brebbia，1988）。此外，有限元法的其他各种变化形式因具有更高效率而被广泛使用。例如，有限条法、有限层法以及有限棱柱法（Cheung 和 Tham，1997）已经被用于矩形区域；Yang 和 Chong 于 1984 年将有限条法推广到非矩形区域。近似法引起人们越来越大的兴趣，主要是由于大型工作站和个人电脑能力的增强以及它们的广泛应用。由于这种趋势将毫无疑问地会持续下去，所以本书作者（Boresi 和 Chong，1991）在第二本书里介绍了弹性力学的近似法，特别强调了应用有限差分法和有限元法进行数值应力分析。

尽管近似法在弹性力学里有着广泛的应用（Boresi 和 Chong，1991），弹性力学的基本概念仍然是最基本的，仍然是理解和解释数值应力分析的本质。因此，本书花了大量的篇幅在变形理论、应力理论、应力—应变关系（本构关系）以及弹性边界值问题上。书中广泛使用了上标和下标表示法（index notation），但是普遍的张量符号很少使用，主要在附录里使用。

近年来，力学和其他各学科的研究者们花了大量的精力去发展智能材料，它们能监视其自身的状态条件、探测可能发生的破坏、控制损伤，并适应变化的环境等。这些智能材料（或者是系统）的潜在应用非常广泛——设计含有光纤的飞行器蒙皮（Udd，1995）以探测结构的缺陷；设计带有传感/作动（actuating）元件的桥梁以抵抗剧烈的振动；制造

具有侦察和营救任务的远程控制微机电系统（MEMS）（Trimmer，1990），以及具有由特殊聚合物制成的游泳部件的隐身潜艇。这样一个多学科基础设施系统的研究前沿，是由材料学家、物理学家、化学家、生物学家，以及机械、电气、土木、控制、计算机、航空等工程领域的工程师们，集体开创的、由所有这些学科领域的研究内容构成的界面所定义的新学科（entity）。人们一般利用钢铁、混凝土、复合材料等这些传统的结构材料，再加上传感、处理和作动元件就可以制造出智能结构/材料。下面是目前研制的一些智能结构/材料（Chong 等，1990，1994）：

（1）压电（piezoelectric）复合材料，它可以把电流转变成力，或者将力转变成电流；

（2）形状记忆合金，通过改变温度引起相变可以产生力；

（3）电流变体和磁流变体，它们分别能在电场或者磁场的作用下通过显著改变基本的材料性能将液体转变成固体或是反向转变。

目前的研究着重于理解、合成和处理具有类似生物系统行为的材料系统。智能结构/材料一般具有自己的传感器（神经系统）、处理器（大脑）和作动器（肌肉），因此可以模仿生物系统（Rogers 和 Rogers，1992）。用于智能结构/材料的传感器包括光纤、腐蚀传感器以及其他环境传感器和感觉颗粒等。作动器的例子有加热能恢复到原来形状的形状记忆合金、液压系统、压电陶瓷聚合物复合材料等。智能结构/材料的处理器和控制部分都是基于微芯片、电脑软件和电脑硬件的。

过去，工程师和材料科学家们主要致力于表征给定的材料。随着高性能计算技术的普及和材料科学的新发展，研究者们现在可以表征处理、设计、制造出具有所需性能的材料。应用纳米技术（Reed 和 Kirk，1989；Timp，1999），工程师和科学家们能够用一个个分子来建造所设计的材料。而其中的一项挑战就是从模拟微观材料的短期的行为，跨越细观尺度和宏观尺度特性直至结构系统的长期服役性能（见图 1－1）。为了模拟各种环境作用和影响，往往需要进行加速试验。超级计算机和/或并行工作站是解决这类多尺度和尺度效应问题并建立模型的有效工具：

材料				结构				基础设施
纳米水平	~	微观水平	~	细观水平	~	宏观水平	~	系统水平
分子尺度			微米级			米级		千米级
纳米力学		微观力学		细观力学		梁		桥梁系统
自组装		微观结构		界面结构		柱		生活基础设施
纳米制备		机敏材料		复合材料		板		飞机

图 1－1① 材料和结构的尺寸

（1）通过引入大量的变量和未知量把微观性质融入基础设施系统的性能预测中去；

（2）用短期试验模拟推演长期寿命周期的行为。

根据美国国家科学基金委（NSF）Eugene Wong 的观点，当代卓越的技术有：

（1）微电子技术——摩尔法则：在过去的 30 年中每两年其容量翻番；无限的可微缩性②。

① 为了保持与原文一致，图 1－1 仍保留，不改为表，下同。——译者注

② 随着硅基微电子技术向 30nm 以下技术节点发展面临越来越严峻的挑战，依靠新的纳米技术寻求新的纳电子技术发展途径，目前看来比维持传统的无限微缩的摩尔定律更为现实。——译者注

（2）信息技术：汇聚计算和通信于一体。

（3）生物技术：分子水平上生命的奥秘。

这些技术一直为经济发展提供巨大的驱动力。根据作者的经验，工程力学与所有这些技术是息息相关的。许多研究活动和技术工作的第一步就是研究材料的形变、应力以及所涉及的应力—应变关系。

根据现代连续介质力学和 A. E. Love（1944）的例子，我们将变形理论和应力理论分开来讲述。这样做可以清晰地看到它们数学上的相似和物理上的不同（诸如偶应力和体力偶这些连续介质力学的概念，将在第 3，5，6 章的附录中引入）。这些效应是直接引入应力理论的，并不引起特殊的问题。应力和应变描述都是基于连续介质概念的，即认为物质连续分布在所考虑的区域内。从数学物理角度来看，这意味着所考虑的区域内完全充满了物质，所以如密度、动量、应力、能量等在区域内所有的点都可以用数学极值方法来定义（见第 3 章 3.1 节）。

1.2　弹性理论

不同于连续介质力学的一般理论（Eringen，1980），弹性理论是一种用于处理材料对施加于其上的力的一种特殊的响应——即弹性响应的专门理论，其中材料体（连续体）中任意一点 P 处的应力在任意时刻只与该点邻域内材料的即时变形相关（见第 4 章 4.1 节）。一般而言，应力与形变的关系是非线性的，与之相对应的理论被称为非线性弹性理论（Green 和 Adkins，1960）。但是，若应力与形变的关系是线性的，这种材料就被称为线弹性材料，相对应的理论被称为线弹性理论。

本书主要讨论的是线弹性理论。虽然在形式上特殊，但这种弹性理论也是研究材料的非弹性响应时的理论基础。例如，在涉及到材料的塑性和蠕变问题时就经常用到逐次弹性解法。因此，弹性理论在处理非弹性响应时也是有用的。

1.3　数值应力分析

弹性问题的解一般是寻求给定激励（如力）的作用下如何描述材料体（计算机芯片、机器零件、结构元件或者机械系统）的响应。从工程的角度看，这种描述经常要求数值的形式，目的是保证系统的响应不会违背设计者和工程师的设计要求。这些要求可能包括对确定性和或然性概念的考虑（Thoft - Christensen 和 Baker 1982；Wen 1984；Yao 1985）。从广义角度来看，数值结果可预测系统是否能表现出预期的性能。弹性问题的解可以直接数值处理（数值应力分析）或者以通解的形式（一般要求进一步的数值计算；见 1.4 节）得到。

数值应力分析的常用方法是将以数学形式提出的弹性问题转化为直接的数值分析问题。例如，在有限差分法中用代数表达式模拟微商。这样，弹性的微分边界值问题就转换成代数边界值问题，而后者可通过解联立代数方程组求解。在有限元法中，位移分量、应力分量等的势函数与能量方法（第 4 章 4.21 节）和矩阵法（1.28 节）被联合使用，这里仍然把弹性边界值问题转化成联立的代数方程系统问题。但是，由于有限元法可以应用于