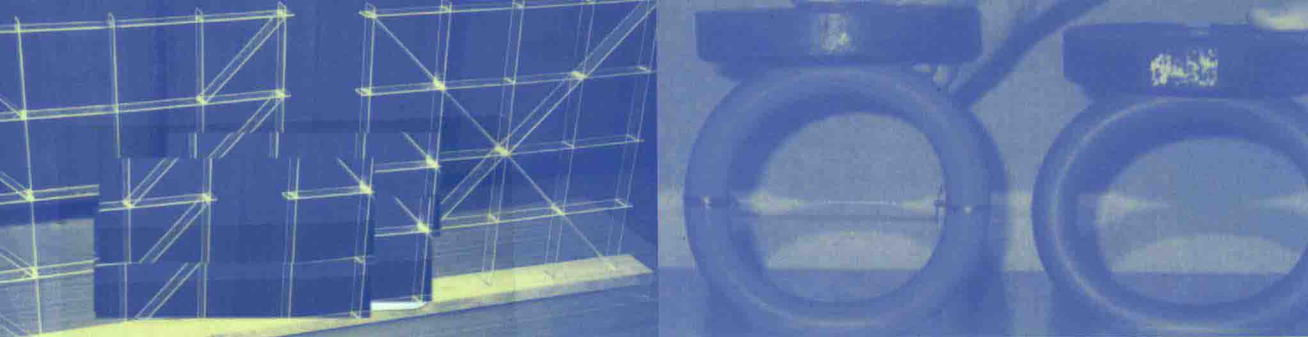




Understanding and Using
STRUCTURAL CONCEPTS

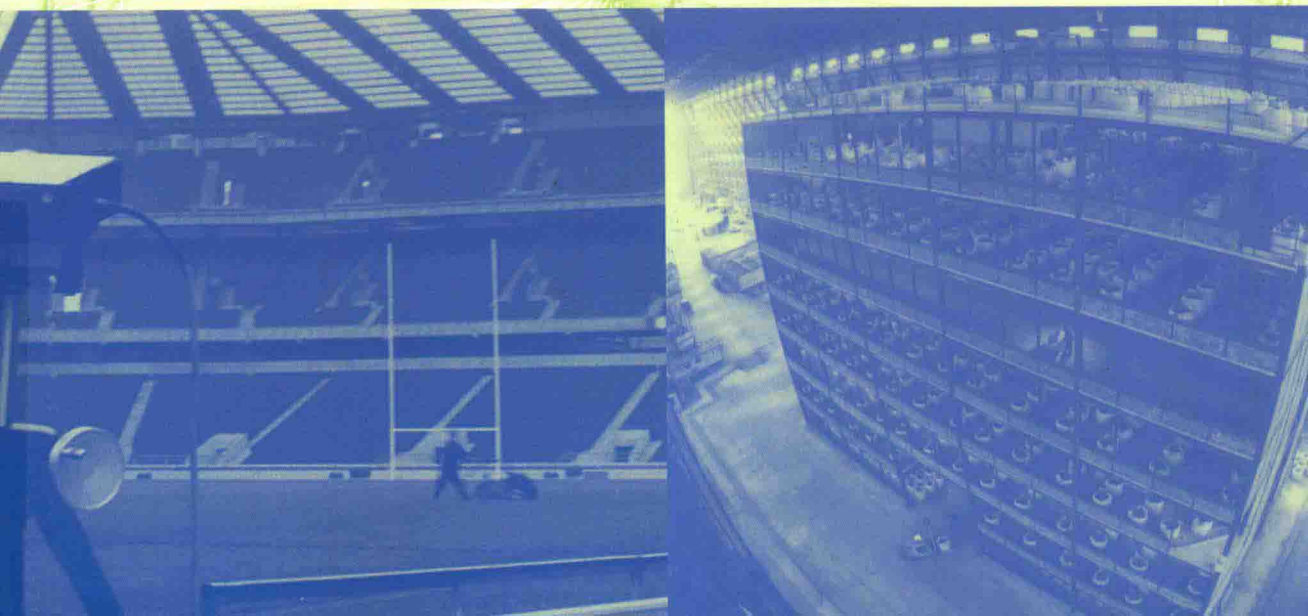
结构概念 感知与应用

(第二版)

[英] 季天健 · Adrian J. Bell · Brian R. Ellis 著

武岳 孙晓颖 李强 张清文 译

高等教育出版社



Understanding and Using
STRUCTURAL CONCEPTS

结构概念 感知与应用

(第二版)

[英] 季天健 · Adrian J. Bell · Brian R. Ellis 著

武岳 孙晓颖 李强 张清文 译

高等教育出版社·北京

图字：01-2016-2334 号

Understanding and Using Structural Concepts (Second Edition)

by Tianjian Ji, Adrian J. Bell and Brian R. Ellis

Copyright © 2015 by Tianjian Ji, Adrian J. Bell and Brian R. Ellis

Publisher: CRC Press, Taylor & Francis Group

All Rights Reserved.

Higher Education Press Limited Company is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese language edition of *Understanding and Using Structural Concepts (Second Edition)* throughout the world.

本书中文翻译版经授权由高等教育出版社有限公司独家出版并在世界范围内发行。

图书在版编目(CIP)数据

结构概念感知与应用：第二版/(英)季天健，
(英)艾德里安·贝尔(Adrian J. Bell)，(英)布瑞恩·
埃利斯(Brian R. Ellis)著；武岳等译。--北京：
高等教育出版社，2018. 5

书名原文：Understanding and Using Structural
Concepts (Second Edition)

ISBN 978-7-04-048745-9

I. ①结… II. ①季… ②艾… ③布… ④武… III.
①建筑结构 IV. ①TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 258090 号

JIEGOU GAINIAN GANZHI YU YINGYONG

策划编辑 刘剑波

责任编辑 刘剑波

封面设计 姜磊

版式设计 马敬茹

插图绘制 杜晓丹

责任校对 吕红颖

责任印制 尤静

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印刷 北京明月印务有限责任公司

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>

开本 850mm×1168mm 1/16
印张 27.25
字数 510 千字
购书热线 010-58581118

版次 2018 年 5 月第 1 版
印次 2018 年 5 月第 1 次印刷
定价 78.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 48745-00

译者前言

概念是对事物本质特征的抽象与概括，在一定程度上反映了人对客观世界的认知能力。在结构工程领域，结构概念是工程师对结构性状及行为的理解和提炼；正确并深入掌握结构概念是设计、建造优秀结构的前提。例如，在方案设计阶段，对结构整体合理性的把握；在结构分析阶段，对计算模型合理性和计算结果正确性的判断；在构造设计阶段，对各种构造措施的恰当处置等，都需要以结构概念为先导。不仅如此，工程结构是一个复杂的系统，目前对其材料特性、荷载条件和工作机理的认识还比较有限，在这种情况下，掌握清晰的概念并合理地运用概念往往比“精确”的分析更为重要。德国工程师施莱西(J. Schlaich)曾对概念的重要性作过精辟的阐述：“概念设计决定了结构的基本性能，许多在施工图阶段或施工阶段出现的问题，很可能源于概念设计中的疏忽，因此，缺乏概念的结构工程师等于将自己降格为安全验算人员。”

虽然概念的重要性是显而易见的，然而，要获取概念却并非易事。这是因为概念既不像理论知识那样系统，也不像实践环节那样具象。结构概念就像连接理论与实践的一座桥梁：对概念的学习离不开坚实的理论基础，缺乏了理论支承的概念只会成为一些就事论事的经验之谈；同样地，对概念的运用也离不开丰富的工程实践，缺乏了实践背景的概念不过是纸上谈兵。正是由于概念的这种特点，使得对概念的学习在课堂教学中往往成为难点或盲点。传统的大学教育多注重系统理论知识的讲授，而忽视了对实践环节的训练。由于学生缺乏实践经验，对于课堂教学中所涉及的一些概念也往往体会不深，更谈不上活学活用。正是在这样的背景下，近年来国内外许多有识之士提出了要加强工程教育的倡议，而概念教育恰恰是工程教育的重要组成部分。

2007年夏，季天健博士到哈尔滨工业大学访问时，我首次了解到他正在写一本关于结构概念的著作，当时就被这本书的名字吸引了：《感知结构概念》，直译为《可见可触摸的结构概念》，这无疑是在教与学中所追求的一种境界。2008年5月，这本书的英文版刚刚出版我便得以先睹为快，并且要把它介绍给国内读者的想法油然而生。2009年10月，这本书的中文版出版，陆续收到国内同行的众多好评。我自己在庆幸翻译了一本好书的同时，也尝试将书中内容融入教学实践中，学生反响颇佳。2015年夏，季天健博士开始着手撰写本书的第二版，我和众多读者们自然又有了一份新的期待。

这本书是对季天健博士十余年来致力于概念教学的成果总结，其特点可

概括为以下几方面：① 简明。书中没有连篇累牍的公式推导，而是以一种简明扼要的方式对各个知识点进行阐述，从而使读者可以以一种较为轻松的心情来阅读。② 形象。结构概念本身是抽象的，而本书通过一系列富有趣味的辅助教学手段，使读者仿佛身临其境一般感知到各种结构概念的存在。③ 开放。与很多刻板说教的教科书不同，本书更加倡导读者自己从工程实践和科研成果中提炼和丰富结构概念。因此，与其说本书介绍了众多的结构概念，不如说本书传递给读者一种发现结构概念的思想方法。

阅读译著的读者经常会面临一种为难的处境，即当他们对书中的某些内容难以理解时，常常会对翻译本身提出质疑，萌发出要把原著找来质证的冲动。我本人在多年的科研工作中也遇到过类似情况。但是对于阅读本书的读者，我希望他们可以不必有此顾虑。首先，本书的内容并非艰深，书中的绝大多数知识点对于一个经历过土木工程专业本科教育的人来说都是较为熟悉的，因此，他们可以根据已有的知识对书中内容作出判断。其次，本书的几位译者在翻译过程中也力求做到“信”与“达”，不仅各有分工，而且在成稿后又相互校对，努力把错误降到最低程度。再有，本书的原著者季天健博士也对翻译工作给予了大力支持，他特意回国与译者交流并审阅了全部译稿，从而保证译文最大限度地忠实于原著。

本书分工如下：武岳翻译第1、11~13、17~20章，并且负责全书统稿；孙晓颖翻译第2~10章；李强翻译第14~16章；张清文翻译第21~24章。我的研究生王强、邱冶、秦义、王慧慧、王敬烨、臧亦天、吴晓同参与了本书的部分翻译工作，在此一并表示感谢。另外，浙江大学的庄表中教授和北京交通大学的杨庆山教授也对本书的翻译工作给予了大力支持，在此深表谢意。我的导师沈世钊院士自始至终关注着本书的翻译工作，并且欣然为中文第一版作序，师恩之情，难以言表！

最后，我想用陆游的一句诗作为结语，“天机云锦用在我，剪裁妙处非刀尺”，希望以此与土木工程专业的同行们共勉！



2017年9月

于哈尔滨工业大学

第 一 版 序

我国的高等工科教育近年来经常面临一些来自社会的批评意见或来自教育界内部的反思，诸如在培养计划方面工程实践的训练不足；在教学方法方面过于偏重具体知识的传授，而忽略基本概念的启发与讨论，因而毕业生能动地解决实践问题的能力较差等。从土建类专业来看，也的确存在类似的问题，例如，我们培养的学生在运用计算机软件针对给定的结构模型进行计算分析方面往往比较熟练，但要他们针对实际工程问题自行建立正确合理的结构模型就可能出现困难；往往盲目相信得出的计算结果，而疏于通过必要的综合考察与分析判断其正确性和合理性，更不用说从中提炼出进一步的结构概念。这样，我们的毕业生在从事设计工作时就可能长期陷于“设计匠”的悲惨状况，而难于较快地成长为善于进行“概念设计”的创新型工程师。在建筑工地等工程实践第一线工作的毕业生遇到的实际问题更为复杂，在他们成长的道路上需要运用创新思维来解决和克服的困难就更多。

需要说明的是，我并不是想在这里正面讨论高等工科教育的改革问题，这一问题涉及教育体制、就业体制、专业培养计划和教学方法等方方面面，我对它们的了解和思考远远没有达到全面、深入的程度，因而不敢妄加议论。我只是想从一个具体侧面来表明，在结构学科的教学、研究乃至工程实践诸方面，的确到了需要大力提倡“重视结构概念”的时候了。

事实上，许多教育界和工程界的同仁近年来也的确经常在思考这些问题，尤其是一些从事工程力学课程教学的学者，进行了许多有成效的课程建设和教学改革方面的探索，取得了可喜的成果。但是在更接近工程实践的结构类课程方面，这类探索工作相对不足；一些学校试开设了结构概念课程，编写了相应的教材，作为辅助性课程供学生选修，但结合主干结构课程来加强结构概念的尝试则较少。英国曼彻斯特大学机械、宇航与土木工程学院的季天健博士(Dr. Tianjian Ji)，在这方面为我们作出了好榜样。这些年来，他在将结构概念引入课堂教学方面作了很多努力，并取得了瞩目的成果。季天健博士认为，相对于传统的课堂讲解，通过一些简明的演示模型来说明结构概念，可以使学生更好地理解这些概念；此外，如果能找到一些合适的工程实例来说明结构概念的原理和应用，可以更加引起学生的兴趣并使他们进一步理解这些概念。这样就使结构概念变成看得见、摸得着的东西。根据这些想法，他们设计开发了许多实物模型来演示结构概念；在可能的情况下，还组织学生参与设计和制作这些模型。他们还总结了大量工程实例，也包括一

些日常生活中碰到的例子,用于说明结构概念的原理和应用。与此同时,他们十分重视科研在发展结构概念方面的作用,经常把一些概念性较强或发展了新概念的科研成果引入教学中,使关于结构概念的探索在教学、科研、工程实践等各个方面紧密结合起来,也使其内涵日益丰富。在此基础上,他们建立了专门的网站,目的是使更多的相关专业的学生、教师和工程技术人员学习、了解和讨论这些“看得见、摸得着的结构概念”;从网站上可以下载彩色照片和可播放的视频片断。可以看到,季天健博士的结构课程教学显得十分活跃和丰富多彩。

时间长了以后,积累的资料既多,季天健博士便将所形成的讲稿编写成书出版,书名为 *Seeing and Touching Structural Concepts*, 或可直译为《看与摸结构概念》。我从内心为这本书的出版叫好。

国内外关于结构概念的专著很少。美国林同炎教授(T. Y. Lin)的著作 *Structural Concepts and Systems for Architects and Engineers* (1981年第一版,1988年第二版),是我们比较熟悉的一本名著,其目的是为结构工程师和建筑师正确进行方案设计提供必要的基本概念和简明的解析方法,内容丰富且有独特见解,出版之后在美国和其他西方国家受到热烈欢迎;其中译本《结构概念和体系》(第二版)于1999年出版,在中国也产生了深远影响,如前所述,一些学校还开设了结构概念选修课。如果说,林同炎先生的著作主要是针对作好方案设计(或概念设计)这一目标来编写的,季天健博士的新著则更多地反映了作为一位教师关于改进教学方法的思考和探索。正是由于这一特点,这本新书很值得我们教育界的同仁关注。

季天健博士是哈尔滨工业大学的校友,与母校经常有联系,近年来与我们的空间结构研究中心保持紧密的合作关系,所以他的新书刚一出版,我们便得以先睹为快,并且留下了十分深刻的印象。在空间结构领域,结构概念的内容极为丰富,加强这方面的研究对空间结构的健康发展尤具重要意义。研究中心的武岳博士平时对结构概念的研究就颇有兴趣,他在看到季天健博士新著后的第一个反应就是要尽快把它译成中文出版。这一想法得到了原作者和有关出版部门的大力支持,并迅速高效地付诸实施。他们还商量,下一步如何将配套的“结构概念”网站用中译版的形式引入中国。

现在我正以十分愉快的心情翻阅着他们刚刚完成的这份中译本书稿。这本书所讨论的多数问题其实并不深奥、复杂,但是它用一种全新的方法,即形象的和启发式的方法来展开讨论,以揭示有关问题内在的本质概念,这正是这本著作的特色所在。所以我认为,中译本的出版将会给我们的学生、教师和工程技术人员带来许多启示,有助于我们改进学习方法、思想方法和处理工程实际问题的方法。当然,我更期待的是,从事结构课程教学的老师能

从中得益。我相信，这本富有特色的著作将会对我们的课程建设和教学方法改革作出贡献。

我乐于为之作序。

沈世钊

2009 年 4 月

于哈尔滨工业大学

前言

本书作为《感知结构概念》的第二版，英文书名有所改动，由 *Seeing and Touching Structural Concepts* 改为 *Understanding and Using Structural Concepts*。原书名强调如何更好地理解结构概念，而现书名则强调对结构概念的理解与应用。换句话说，理解结构概念的目的是为了应用，而且是创新性的应用，以解决工程实际问题，从而使工程设计更加安全、经济和美观。

书名的改变反映了我们对结构概念本质的理解。在这一版中，结构概念定义为：

结构概念是对描述某一结构现象或方法的物理变量间数学关系式的领悟性解读和定性表述；它抓住了该关系式的物理内涵，并为其在工程中的应用提供了基础。

该定义表明，结构概念体现了对理论知识的深入理解，并且将对数学、物理的理解与工程实践有机地结合起来，从而为相关学习和研究提供了一种有效的方法。

结构概念可以通过抽象的方式从课本理论中学习，也可以结合实物模型和实际案例通过一种直观的方式来学习。相比之下，后一种方式更具有启发性、激励性和趣味性，但需要在课本中引入更多的实物模型和恰当的实际案例。理想的方式是将这两种学习方式整合在一起，使彼此相互补充。本书的目的就是提供一种直观的学习结构概念的方法，并使之与传统的理论学习相结合。为实现此目标，采用了以下3种方式：

(1) 通过一系列简单演示模型来说明结构概念或概念的作用，从而为理解理论知识提供一种简单、便捷的方式。

(2) 通过一些工程实际案例和日常生活实例来展示对结构概念的创新应用，一方面说明如何应用结构概念，另一方面也有助于建立理论与实践的联系。

(3) 通过将一些包含结构概念的研究成果转化为教学资料，改善和更新已有的授课内容。

实物模型逼真简单，可以用来说明某一结构概念。本书中的模型通常是成对出现的，其中一个使用了结构概念，另一个则没有。这样就可以通过两个模型的响应差异明显地看到和感觉到结构概念的作用。模型可以由教师在课堂上演示或由学生在课下使用。本书提供了大量的照片来说明这些模型以及它们的作用。

实际案例用来说明结构概念是怎样在实际中应用的，特别是创新性的应

用,以产生有效的工程解决方案。通过这些案例使学生的认识从结构构件延伸至结构整体,从单纯理解扩展到实际应用。这些案例也为我们欣赏工程师和建筑师在解决实际问题时的非凡创造力提供了机会。

在结构概念的学习中,实践、研究和教学三者是融为一体的,彼此相互促进、相互受益。针对新出现的工程问题的研究会带来新的概念并提供新的案例,这将有效地丰富结构概念的教学内容。本书某些章节的内容即源自这些研究。

除了有利于更好地理解外,实物模型和实际案例还有助于激发学生的学习兴趣。课堂实践表明,相对于单纯依靠语言或黑板/投影/幻灯片讲解的内容,学生对于利用实物演示的授课内容表现出更浓厚的兴趣。相对于课本例题,他们对应用概念解决工程问题的实际案例表现出更大的兴趣。通过直接接触模型以及将概念、模型和实际工程问题相联系,使学生受到极大的鼓舞。

第二版在以下4方面作了改进:

(1)增加了一章“绪论”,对结构概念进行概述,并介绍如何学习和使用本书。

(2)在原有“静力篇”和“动力篇”两部分的基础上,增加了“综合篇”部分。该部分包括4章,分别探讨了静力刚度与模态刚度的关系、静力问题与动力问题的关系、试验研究与理论研究的关系以及理论与实践的关系。

(3)在“静力篇”和“动力篇”部分的每章后面增加了少量的思考题。

(4)增加了一些新模型和新案例。

“静力篇”和“动力篇”部分分别有12章和7章。“综合篇”部分则致力于将静力问题和动力问题整合在一起。静力刚度和模态刚度的概念在工程实践中应用广泛,它们通常是分别处理的。第21章研究了两者的关系,并探讨了这种关系的理论基础以及工程应用。第22章探讨了静力问题与动力问题的关系,即有些静力学方法可以用来解决动力学问题,同时,也可以用一些动力学方法来解决静力学问题。最后两章探讨了与实证相关的研究工作。第23章受经济学研究的启发,提出了一系列描述试验研究与理论研究关系的模型,并通过许多真实案例加以佐证。第24章通过回顾结构概念的作用探讨了理论与实践的关系,这一章的内容可能并不成熟和完善,但是大量的实例为相关探索提供了有力支持。

本书是我们多年来从事与结构概念有关的教学、研究和工程实践的成果。书中借助实物模型和实际案例提供了大量的课堂演示。同时,采用了大量的其他教材未使用的材料以增强对结构概念的理解,激发学生的学习兴趣、创新性思考和设计。本书对于各个层次的工程师,从学生到咨询顾问,都是有用的。它对于包括研究生在内的各个年级的土木工程专业的学生都是有用的,同样地,它也适用于追求技术风格的建筑专业的学生及工程设计人员。

配合这本书的出版，我们建立了一个网站，名称为 Seeing and Touching Structural Concepts，网址是 www.structuralconcepts.org。这个网站包含了本书静力篇和动力篇中每章第 1、3、4 节的主要内容，以及部分精选的学生提交的“结构概念感知与应用”课程作业。

季天健，Adrian J. Bell

曼彻斯特大学，英国

Brian R. Ellis

圣奥尔本斯，英国

致 谢

我们对结构概念的研究始于 1999 年。最初是在土木工程专业本科教材中搜集一些可以用实物模型和工程实例来说明的结构概念。当然，如果没有大家的帮助，这些工作不可能达到现在的样子。

曼彻斯特大学的一些已毕业的学生参与了“感知结构概念”的研究工作。他们根据个人的课堂学习经验提供了对结构概念的理解并制作了大量的实物模型。其中，作出较大贡献的有 Wai Leng Yip 博士、Tom Eccles 先生、Lu Chen 博士、John Oxhey 先生。还有一些实验室技术人员在学生模型制作方面提供了帮助。

庄表中教授，浙江大学工程力学系的一名退休教师，提供了他在应用力学基础理论实际问题方面的一些个人心得，以及一些在生活中常见、有趣的模型。

感谢一些组织和个人允许我们使用他们的照片，书中已在相关的照片旁作了标注。

Tianxin Zheng 博士和 Hector Bobadilla 先生绘制了书中的许多插图，他们一位是曼彻斯特大学已毕业的博士，一位是在读的博士研究生。Linwei Xue 小姐(已毕业的曼彻斯特大学学生)帮助创建了网站。

还要感谢 Taylor & Francis 出版社为本书的出版所给予的帮助。感谢 Tony Moore 高级编辑对本书第一版和第二版工作的鼓励。同样感谢 Catherine Hogan 及她在 Deanta 环球出版服务机构的团队对这本书最后成稿所提供的帮助。

最后，还要感谢英国结构工程师学会、曼彻斯特大学以及高等教育研究院对本书相关研究工作和网站开发所给予的经费支持。

著者简介



季天健博士，英国曼彻斯特大学教授 (Reader)，英国结构工程师学会高级会员。先后在黑河建筑设计室、中国建筑科学研究院和英国建筑科学研究院从事了十余年的结构设计、研究和咨询工作。1996 年进入曼彻斯特大学任教，讲授过多个年级的结构分析和结构设计课程。同时还开展了结构动力学方面的研究工作。2014 年与 Adrian J. Bell 一起获得英国结构工程师学会颁发的“杰出结构工程教育奖”。2016 年获得曼彻斯特大学的“优秀教学奖”。



Adrian J. Bell 博士，英国曼彻斯特大学副教授 (Senior Lecturer)。曾从事大跨屋盖结构和塔桅结构等的设计咨询工作。主要讲授结构分析与结构设计类课程，教龄超过 30 年。主要研究方向包括索结构、钢结构和砌体结构。2014 年与季天健一起获得英国结构工程师学会颁发的“杰出结构工程教育奖”。



Brian R. Ellis 博士，曾任英国建筑科学研究院结构技术主管，现已退休。在英国建筑科学研究院期间，主要从事与结构振动相关的研究工作，在结构原型试验和现场监测方面颇有建树。还参与了英国国内和国际标准的编制工作。退休后，承担过一些工程顾问咨询工作。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 什么是结构概念	2
1.1.1 来源于理论的结构概念	2
1.1.2 来源于实践的结构概念	3
1.2 为什么要学习结构概念	4
1.3 学习结构概念的方法	5
1.3.1 理论知识	5
1.3.2 模型演示	5
1.3.3 应用实例	7
1.3.4 学生参与	7
1.4 本书的内容安排	8
1.5 学习建议	9
1.5.1 对于学生	9
1.5.2 对于教师	9
1.5.3 对于工程师	10
参考文献	12

第一部分 静 力 篇

第 2 章 平衡	15
2.1 定义与概念	16
2.2 理论背景	16
2.3 模型演示	18
2.3.1 作用力与反作用力	18
2.3.2 稳定平衡与不稳定平衡	19
2.3.3 板-瓶子系统	19
2.3.4 磁悬浮模型	20
2.4 应用实例	21
2.4.1 限行杆	21
2.4.2 人行桥	22
2.4.3 天平秤	22
2.4.4 舞台表演	23

2.4.5 磁悬浮列车	23
2.4.6 垃圾撮子	24
思考题	25
参考文献	25
第3章 质心	27
3.1 定义与概念	28
3.2 理论背景	28
3.3 模型演示	32
3.3.1 任意形状纸板的质心	32
3.3.2 物体的质心与形心	33
3.3.3 L形平面物体的质心	34
3.3.4 竖向平面物体的质心	34
3.3.5 质心与稳定	35
3.3.6 质心与运动	37
3.4 应用实例	38
3.4.1 工程起重机	38
3.4.2 埃菲尔铁塔	39
3.4.3 展示架	39
3.4.4 欧洲之门	40
思考题	41
参考文献	41
第4章 截面形状的影响	43
4.1 定义与概念	44
4.2 理论背景	44
4.3 模型演示	48
4.3.1 矩形截面梁和工字形截面梁	48
4.3.2 用书签托起书	50
4.4 应用实例	50
4.4.1 钢框架结构	50
4.4.2 铁路桥	50
4.4.3 腹板开孔的工字形截面构件	51
思考题	53
参考文献	53
第5章 应力分布	55
5.1 概念	56
5.2 理论背景	56
5.3 模型演示	57
5.3.1 钉板上的气球	57

5.3.2 均布应力与非均布应力	58
5.3.3 应力集中	59
5.3.4 截面核心区	60
5.4 应用实例	62
5.4.1 平跟鞋与高跟鞋	62
5.4.2 比萨斜塔	63
思考题	64
参考文献	65
第6章 弯曲	67
6.1 定义与概念	68
6.2 理论背景	68
6.3 模型演示	71
6.3.1 梁的弯曲假定	71
6.3.2 浅梁与深梁	72
6.4 应用实例	73
6.4.1 桁架的合理形状	73
6.4.2 利用伸臂梁减小弯矩	74
6.4.3 弯曲破坏	74
6.4.4 订书钉的弯曲变形	75
思考题	76
参考文献	77
第7章 剪切与扭转	79
7.1 定义与概念	80
7.2 理论背景	80
7.2.1 弯曲剪应力	80
7.2.2 扭转剪应力	82
7.2.3 剪切中心	85
7.3 模型演示	86
7.3.1 扭转效应	86
7.3.2 剪应力效应	87
7.3.3 剪力效应	89
7.3.4 开口截面与闭口截面的翘曲扭转	90
7.3.5 开口截面与闭口截面的无翘曲扭转	90
7.3.6 薄壁开口截面的剪切中心	91
7.4 应用实例	93
7.4.1 组合截面梁	93
7.4.2 剪力墙	93
7.4.3 开饮料瓶	93

7.4.4 箱形梁公路桥	95
思考题	95
参考文献	96
第8章 跨度与变形	97
8.1 概念	98
8.2 理论背景	98
8.3 模型演示	102
8.3.1 跨度的影响	102
8.3.2 边界条件的影响	103
8.3.3 梁的固端弯矩	103
8.3.4 竖向构件的侧向刚度	105
8.4 应用实例	106
8.4.1 柱支承	106
8.4.2 支柱根现象	107
8.4.3 结构中的支柱	107
思考题	109
参考文献	110
第9章 最短传力路径	111
9.1 定义、概念与准则	112
9.2 理论背景	112
9.2.1 引言	112
9.2.2 提高结构刚度的概念	113
9.2.3 概念推广	115
9.2.4 讨论	120
9.3 模型演示	123
9.3.1 试验验证	123
9.3.2 直线形和折线形传力路径	124
9.4 应用实例	125
9.4.1 高层结构的支撑系统	125
9.4.2 脚手架的支撑系统	125
思考题	127
参考文献	128
第10章 减小结构内力	129
10.1 概念与准则	130
10.2 理论背景	130
10.2.1 引言	130
10.2.2 无约束环与有约束环	131
10.3 模型演示	137