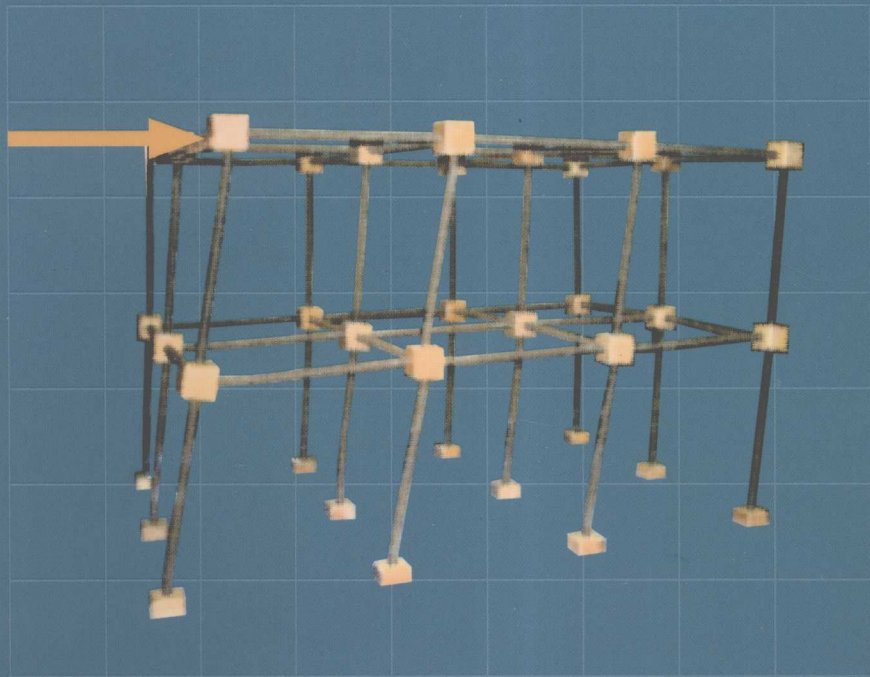


感知

结构概念

Seeing and Touching **STRUCTURAL CONCEPTS**

[英] 季天健 Adrian Bell 著
武岳 孙晓颖 李强 译



高等教育出版社
Higher Education Press

感知

结构概念

Seeing and Touching STRUCTURAL CONCEPTS

[英] 季天健 Adrian Bell 著
武 岳 孙晓颖 李 强 译



高等教育出版社
Higher Education Press

图字: 01-2008-5789 号

Seeing and Touching Structural Concepts by Tianjian Ji and Adrian Bell

First published 2008

by Taylor & Francis

Taylor & Francis is an imprint of the Taylor & Francis Group, an informa Business

Copyright © 2008 Tianjian Ji and Adrian Bell

All rights reserved. Authorized translation from the English language edition published by Routledge, a member of the Taylor & Francis Group.

本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, Routledge 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

感知结构概念/(英)季天健,(英)柏尔(Bell,A.)著;
武岳,孙晓颖,李强译. —北京:高等教育出版社,
2009.10

书名原文: Seeing and Touching Structural Concepts
ISBN 978-7-04-027884-2

I. 感… II. ①季…②柏…③武…④孙…⑤李…

III. 建筑结构 IV. TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 158214 号

策划编辑 刘剑波 责任编辑 赵向东 封面设计 张楠
责任绘图 尹莉 版式设计 余杨 责任校对 俞声佳
责任印制 毛斯璐

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
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司

印刷 国防工业出版社印刷厂

开本 787×1092 1/16

印张 16.25

字数 300 000

购书热线 010-58581118
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.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2009 年 10 月第 1 版

印次 2009 年 10 月第 1 次印刷

定价 36.00 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 27884-00

译者序

概念是人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和行为的理解和提炼；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，由于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所谓“精确”的分析更为重要。德国工程师施莱西(J. Schlaich)曾对概念的重要性做过精辟的阐述：“概念设计决定了结构的基本性能，很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。结构概念就像是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，缺乏了理论支撑的概念只会成为一些就事论事的经验之谈。同样，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于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，更谈不上去活学活用。正是在这样的背景下，近年来国内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，季天健博士来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专著，当时就被这本书的名字吸引了。可见可触摸的结构概念无疑是在教与学中所追求的一种境界。2008年5月，这本书刚刚出版我便得以先睹为快，并且一种要把它介绍给国内读者的想法油然而生。这本书是对季天健博士近十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) 简明性。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了阐述，从而使读者可以以一种较为轻松的心情来阅读。

2) 形象性。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) 开放性。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去凝炼和丰富结构概念。

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做出判断。其次，本书的三位译者在翻译过程中也力求做到“信”与“达”，三位译者不仅各有分工，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，从而保证了译文最大限度地忠实于原著。

本书分工：武岳翻译第10~12、16~19章，并且负责全书统稿；孙晓颖翻译第1~9章；李强翻译第13~15章。我的研究生王强、邱冶、秦义、王慧慧、王敬桦参与了本书的部分翻译工作，在此一并表示感谢。再有，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，并且欣然为之作序，师恩之情，难以言表！

最后，我想用陆游的一句诗作为本序结语，“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共勉！



2009年5月

于哈尔滨工业大学

前言

在《朗文当代英语大辞典》中，“概念”被定义为原理或观点。原理是指那些已被认可的、并可作为推理或行动基础的事实或信念。在土木工程领域，结构概念是学习、分析和设计的重要基础。

对于学生、教师和工程师来说，理解结构概念、讲授结构概念以及在工程中应用结构概念都是十分重要的。因此在高校中应加强结构概念的教学，以适应在学习和工作中面临的变化与挑战。

过去，结构概念主要是通过手算和工程经验积累获得的。而现在，大量的手算工作已被计算机取代，这就需要借助新的方式来获取结构概念。对于结构概念的理解是非常重要的，它是设计合理而富有创新性的结构（建筑、桥梁等）的基础。随着计算机的广泛应用，人们往往对计算机分析结果给予过分的信任。事实上，尽管计算机分析结果在数学上是正确的，但是如果采用了不正确的假设和模型，其结果仍可能存在缺陷或错误。过分依赖计算机，这也是建筑行业对刚毕业大学生的批评原因之一。一般来说，这些刚毕业的学生善于使用计算机，却无法判断计算机分析结果是否正确，这说明他们在大学学习期间可能没有充分掌握基本的结构概念。

结构概念和原理是抽象的，无法被直接看到和感觉到。例如，传力路径反映了荷载从其作用点传递到结构支座的过程；共振描述了当动荷载的频率等于结构固有频率时结构的振动特性。如果这样的概念和原理可以被观察到或触摸到，学生就能够更好地理解 and 记住它们。

教科书通常不提供工程实例来说明结构概念的应用情况。如果教师们可以讲授一些相关的工程实例，并且适当地将研究工作引入到教学中，势必会激发学生的兴趣，提高他们对结构概念的理解程度。

课堂实践表明，相对于用语言或用黑板/投影/幻灯等方式来讲解，学生们更喜欢通过实物来演示；相对于课本上的例题，学生们对运用概念来解决工程问题的实例更有兴趣。通过直接触摸以及将概念和模型与实际工程问题联系起来，有效地提高了学生的学习积极性。

在这样的背景下，我们一直在发展我们所谓的“看得见摸得着的结构

概念”，并将其作为传统课堂教与学的补充。为实现这个目标，我们采用了以下三种方式：

- 在传统教学中，提供一系列简单的模型演示来说明结构概念和原理，以使学生更好地理解这些概念。我们首先找出那些可以用实物或模型来演示的结构概念，然后设计、制作出简单且适合于课堂使用的演示模型来解释这些概念。在可能的情况下，还鼓励学生来帮助设计和制造这些模型。

- 通过相关的工程实例来说明结构概念和原理的应用，以帮助学生在理论知识和实践之间架起一座桥梁。通过观察结构概念如何被应用到实际结构设计中，学生们对学习产生了真正的兴趣，对结构概念得到了更好的理解。我们已经找到了一些可以说明概念在实践中应用的工程实例。此外，我们还研究了那些导致倒塌的失败设计，这些例子恰好说明了错误理解结构概念造成的后果。

- 将科研成果，特别是那些包含结构概念的科研成果适当引入到教材中，以加强现有的教学内容。科研和教学在高校中往往是独自进行的，这使得科研成果和本科教学之间的联系并不总能得到发展。在本书中，那些与结构概念有关或阐述结构概念的研究成果，已经通过与模型演示和工程实例相联系的方式应用到课堂教学中。例如，设计刚度更大的结构的概念，结构振动中的人体模型，以及由竖向荷载引起的框架结构水平移动等都在书中有所介绍。

我们已经开发了许多实物模型来阐明结构概念，并总结了大量的工程以及日常生活的实例来说明这些概念的应用。这些模型和实例在教科书中通常是没有的，但却是对教与学的有益补充，因为实物模型和应用实例往往可以帮助学生很快地掌握和记住相应的概念。

本书中的例子将结构概念、简单的模型演示和工程实例有机地联系在一起，有助于教师授课，也会使建筑和结构工程专业的学生以及工程设计人员受益。希望通过对本书的学习能激发读者的兴趣，去寻找更多的结构概念以及它们的应用。

本书的结构有点像“菜单”，其中的大部分结构概念是独立的。每一章都包括四节，阐述一个或多个相关的概念：

- 1) 定义与概念：给出本章所用术语的定义，并以便于记忆的方式用一两句话来简要地阐明概念，有的章节还给出了要点。

- 2) 理论背景：若相关理论在教科书中很容易找到，本书就只给出简介和适当的参考书；若相关理论在别处很难找到，本书则会给出较为详细的说明。本书还选择性地给出一些例子，以便说明这些理论的应用及其与下一节中模型演示的联系。

- 3) 模型演示：演示模型主要以照片的形式给出。通常会给出两个相关的模型来比较二者在性能上的差异，以便阐明概念。有的章节还包含了小型

试验。

4) 应用实例：书中给出了适当的工程实例以说明概念是如何被用于实践的。有些例子则来自于大多数人所熟悉的日常生活。

与此同时，我们还创建了一个与本书同名的网站，网址是 <http://www.structuralconcepts.org>。网站上包含了本书每章第一、三、四节的大部分内容。从网站上可以下载彩色照片和播放视频片断。

网站和本书主要是为土木和结构工程专业的学生、教师和青年工程师编写的，但是这些内容对于建筑学、机械工程以及航空航天工程专业的学生、教师与青年工程师也会有所帮助。

对于学生

本书提供了实用而有趣的信息来加强对结构概念的理解和对课堂学习的补充。内容的深度涵盖了从大学本科一年级到四年级的课程。

本书可以有不同的用途：

- 1) 针对课堂上学习的概念去查阅本书相关章节，以获得更好的理解。
- 2) 通过本书复习过去已学的许多概念。
- 3) 尝试用另外一种模型来解释本书中已有的概念(或本书中没有的概念)，或者用另外的实例来说明某一概念的应用。

本书的部分模型是由我们的学生设计制作的。因为他们知道哪些概念难以理解，以及哪些概念能够用模型演示出来。

对于教师

我们希望这本书可以为结构概念的教学提供有益的补充。书中的照片和内容都可以从我们的网站上下载来用于教学。

教师都希望学生们能够积极并有效地学习，为此需要提供适当的活动与激发措施来实现。本书和网站可用于实现这一目的。我们要求三年级的本科生阅读网站上与静力学相关的所有内容，并为他们布置了独立的课程作业，题目是“加强对结构概念的理解”。我们要求他们设计一个实物模型来展示某一结构概念，或者找到某一结构概念被创造性应用的工程实例。这个作业受到了同学们的热烈欢迎，所有的学生都递交了作业，这些作业被装订成册分发给班里的所有同学，作为新的学习资源，这样可以促使他们互相学习而不是仅仅向教师 and 课本学习。学生们提供的一些例子已经被收录在本书和网站中。

对于工程师

本书和相关网站的内容对工程师，特别是那些刚毕业的工程师，是非常有用的。和在校大学生不同，工程师虽然获得了实践经验，但却有可能忘记了大学里学过的一些结构概念。你可能会发现本书和网站可以在以下三个方面非常有用：

1) 迅速复习许多结构概念。

2) 通过书中的例子来检验每个概念在实践中的应用情况，并且希望你能够产生自己的想法来将本书中所述的以及本书中未述的结构概念应用于工作中。

3) 根据你自己的经验，在自己或同事的工作中找出应用结构概念的实例。然后思考一下，这些概念的应用对于增强对结构性能的理解以及获得更有效的结构有哪些帮助。

工程师的目的是获得安全、经济与美观的设计，深入理解结构概念有助于实现这一目的。

最后，非常欢迎您能够与我们交流您关于某个(或某些)结构概念的实物模型或应用实例方面的想法和见解。我们会注明来源并将适当的例子添加到网站上，以便与更多的学生、教师和工程师们一起分享。

季天健，艾德里安·贝尔

机械、航空和土木工程学院

英国曼彻斯特大学

序

我们的高等工科教育近年来经常受到一些来自社会的批评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；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；毕业生能动地解决实践问题的能力较差；等等。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；对于得出的计算结果往往盲目相信，而疏于必要的综合考察与分析，无法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，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，进行了许多卓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，编写了相应的教材，作为辅助性课程供学生选修，但结合主干结构课来加强结构概念的尝试则较少。英国曼彻斯特大学机械、航空与土木工程学院的季天健博士(Dr. T. Ji)，在这方面为我们做出了好榜样；这些年来他在将结构概念引入课堂教学方面做了很多努力，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，通过一些简明的模型演示来说明结构概念，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,来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,他们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内容,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来学习、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,季天健博士领导的结构课程教学显得十分活跃和丰富多彩。

时间长了以后,积累的资料很多,季天健博士便将所形成的讲稿编写成书出版,书名就叫做《Seeing and Touching Structural Concepts》,或可直译成《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(Dr. 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)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做好方案设计(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出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,并且产生了十分深刻的印象。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有重要意义。研究中心的武岳博士平时对结构概念的研究颇有兴趣,他在看到季天健新著后的第一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,并被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。所以我想，这一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，我们从事结构课程教学的教师将从中得益。我相信，这一富有特色的著作将会对我们的课程建设和教学方法改革做出贡献。

我乐于为之作序。

沈世钊

2009年4月

于哈尔滨工业大学

致 谢

我们对于“看得见摸得着的结构概念”的研究始于1999年末。我们最初是在土木工程本科教材中搜集那些可以用实物模型和工程实例来说明的结构概念。当然,如果没有其他人的帮助,这些工作不可能达到现在的样子。

一些曼彻斯特大学的往届和在读本科学生,包括 W. Yip 小姐、K. H. Lee 先生、C. E. Liang 先生、K. Chow 先生、K. Y. Chan 先生、T. Eccles 先生和 L. Chen 先生等,参与了“看得见摸得着的结构概念”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。

在模型制作方面,M. Dean 先生、G. Lester 先生和 G. Sigh 先生,还有一些其他的技术人员给这些同学提供了帮助。

庄表中教授,中国浙江大学工程力学系的一名退休教授,提供了他在应用力学基本理论解决实际问题方面的一些个人经验,以及一些在日常生活中使用的、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做了标注。

曼彻斯特大学的一位博士研究生,T. Zheng 先生,绘制了书中的许多插图。K. C. Leong 博士(一位往届学生)和 L. Xue 小姐(一位博士研究生)帮助创建了网站。

我们也十分感谢 B. R. Ellis 博士(一位独立顾问)对这本书手稿的阅读、校核和建议。

还要感谢 Taylor & Francis 出版社为这本书的出版所给予的帮助。感谢 Tony Moore 和 Simon Bates 两位编辑的鼓励和帮助。同样感谢 Matt Deacon 和他在 Wearset 的团队对这本书最后成稿所提供的帮助。

最后,我们要感谢英国结构工程师协会、曼彻斯特大学以及高等教育研究院,对本书同名网站的创建和更新所给予的经费支持,而网站的内容构成了本书的一部分。

目 录

第一部分 静 力 学

1 平衡	3
.....	
1.1 定义与概念	3
1.2 理论背景	3
1.3 模型演示	5
1.3.1 作用力与反作用力	5
1.3.2 稳定平衡与不稳定平衡	6
1.3.3 板-瓶系统	7
1.3.4 磁悬浮模型	7
1.4 应用实例	8
1.4.1 限行杆	8
1.4.2 人行桥	9
1.4.3 天平	9
1.4.4 舞台表演	10
1.4.5 磁悬浮列车	10
1.4.6 快餐店中的垃圾撮子	11
2 质心	13
.....	
2.1 定义与概念	13
2.2 理论背景	13
2.3 模型演示	17
2.3.1 任意形状纸板的质心	17
2.3.2 物体的质心与形心	18
2.3.3 水平面内的物体质心	18
2.3.4 竖直平面内的物体质心	19

2.3.5	质心与稳定	20
2.3.6	质心与运动	22
2.4	应用实例	22
2.4.1	工程用起重机	22
2.4.2	埃菲尔铁塔	23
2.4.3	展示架	23
2.4.4	Kio 塔	23
3	不同截面形式的影响	25
3.1	定义与概念	25
3.2	理论背景	25
3.3	模型演示	29
3.3.1	两个矩形截面梁和一个工字形截面梁	29
3.3.2	用书签将书托起	30
3.4	应用实例	31
3.4.1	钢框架结构	31
3.4.2	铁路桥	31
3.4.3	腹板开孔的工字形构件(蜂窝梁和柱)	31
4	弯曲	34
4.1	定义与概念	34
4.2	理论背景	34
4.3	模型演示	37
4.3.1	梁的弯曲假定	37
4.4	应用实例	38
4.4.1	桁架梁的外形	38
4.4.2	利用悬挑减小弯矩	38
4.4.3	弯曲破坏	39
4.4.4	订书钉的弯曲变形	39
5	剪切与扭转	42
5.1	定义与概念	42
5.2	理论背景	42
5.2.1	弯曲剪应力	42
5.2.2	扭转剪应力	44

5.3	模型演示	47
5.3.1	扭转效应	47
5.3.2	剪应力效应	47
5.3.3	剪力效应	49
5.3.4	开口与闭口截面的翘曲扭转	50
5.3.5	开口与闭口截面的无翘曲扭转	51
5.4	应用实例	51
5.4.1	组合截面梁	51
5.4.2	建筑中的剪力墙	52
5.4.3	开启饮料瓶	52
6	应力分布	54
6.1	概念	54
6.2	理论背景	54
6.3	模型演示	55
6.3.1	钉板上的气球	55
6.3.2	均布应力与非均布应力	56
6.4	应用实例	57
6.4.1	平底鞋与高跟鞋	57
6.4.2	比萨斜塔	58
7	跨度与变形	59
7.1	概念	59
7.2	理论背景	59
7.3	模型演示	63
7.3.1	跨度的影响	63
7.3.2	边界条件的影响	63
7.3.3	梁的固端弯矩	64
7.4	应用实例	65
7.4.1	柱支承	65
7.4.2	支柱根现象	65
7.4.3	结构中的支柱	66
8	直接传力路径	68
8.1	定义、概念与准则	68

8.2	理论背景	68
8.2.1	引言	68
8.2.2	提高结构刚度的概念	69
8.2.3	概念实现	72
8.2.4	讨论	77
8.3	模型演示	79
8.3.1	试验验证	79
8.3.2	直线形和折线形传力路径	80
8.4	应用实例	81
8.4.1	高层结构的支撑体系	81
8.4.2	脚手架的支撑体系	81
9	减小结构内力	85
9.1	概念	85
9.2	理论背景	85
9.2.1	引言	85
9.2.2	无约束环与有约束环	86
9.3	模型演示	93
9.3.1	一对橡胶环	93
9.3.2	后张预应力塑料梁	93
9.4	应用实例	94
9.4.1	雷利体育馆	94
9.4.2	浙江黄龙体育中心	95
9.4.3	斜拉桥	96
9.4.4	承受过分振动作用的楼板	97
10	屈曲	99
10.1	定义与概念	99
10.2	理论背景	99
10.2.1	不同边界条件下的柱屈曲	99
10.2.2	梁的侧向弯扭屈曲	102
10.3	模型演示	104
10.3.1	塑料尺的屈曲变形	104
10.3.2	屈曲荷载和边界条件	105
10.3.3	梁的侧向弯扭屈曲	106