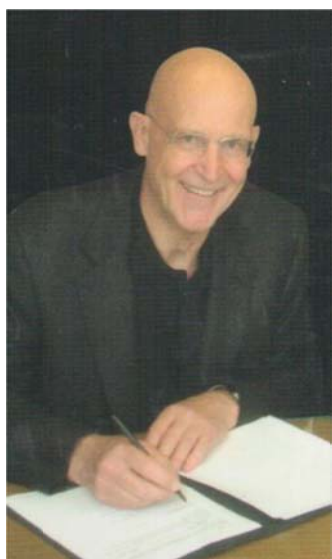




GRAHAM H. POWELL

Professor Emeritus of Structural Engineering
University of California at Berkeley

关于作者

鲍威尔教授在结构分析与设计的计算机应用领域具有超过五十年的研究、教学和工程经验。他和他的学生开发了许多计算机程序，多个已经在工程实践中得到了广泛的应用。他开发的程序覆盖了建筑结构、桥梁、油气管道、电厂管道系统及汽车安全防护屏障等诸多领域。

鲍威尔教授被称为“非线性先生 (Mr. Nonlinear)”。在结构的非线性分析建模和抗震性能设计方面，鲍威尔教授具有特别丰富的经验。他主持开发了被广泛使用的 DRAIN 系列计算机程序，此程序用在非弹性结构的动力分析。近些年，他开发了 CSI 软件 PERFORM-3D，利用非线性分析来进行结构的性能设计。

鲍威尔教授的丰富经验使得他具有独特的资质来写这本有关结构分析建模技术的著作。本书反映了他对当前结构工程教育的关切：结构工程教育常常忽略了对建模重要性的认识，导致年轻工程师在有效使用现代计算机程序方面缺乏必要的和足够的培训与教育。

结构分析的建模

——行为及基础

关于中译本

鉴于鲍威尔教授在本著作中对结构分析建模领域的独特论述，应工程界同仁的邀请，北京筑信达工程咨询有限公司(www.cisec.cn)和上海长福工程结构设计事务所(www.cfstruct.com)组织相关力量共同对本著作进行了翻译。

中译本以内部参考资料的形式，供国内结构工程界的同行及相关科研人员参考。

由于译者的水平有限，虽然一年来多次通篇审核校订，依然会存在不妥甚至错误之处，欢迎读者批评指正，信息反馈：info@cisec.cn。

英文原版可以通过CSI官网直接订购(<https://orders.csiamerica.com/SearchResults.asp?Cat=2>)，售价 150 美金。

前言

本书针对广泛的读者群，具有宏大的目标。如果你是一个学生，其目的是提供给你在学习结构分析和结构设计课程所需的基础知识；如果你是一个年轻的工程师，其目的是帮助你正确理解所使用的结构分析软件，并帮助你成为一个更好的工程师；如果你是一个经验丰富的结构工程师，其目的是帮助你保持对结构的正确认识；如果你是一位结构分析的大学教授，其目的是劝导你改变你的教学方法。一言以蔽之，本书的目的是力图改变对结构分析的领悟认知和教学方法。

同时，本书的范围又是相当地窄。本书覆盖了结构分析的建模基本要素，但不包括其中的许多细节。本书包含了分析的直接刚度法（Direct Stiffness Method），使用物理解释（physical explanations），而非形式理论（formal theory）；同时覆盖了相当深度的材料非线性（material nonlinear）和几何非线性（geometric nonlinear），着重强调物理解释，而不是理论或数学推导；本书将结构分析置于其应有的位置，即，是用于结构设计的一个工具，而不是结构设计本身的终点；本书不涉及结构分析理论，及结构分析如何进行计算机编程；本书考虑了线性、非线性、静力和动力分析，但不解释其中所涉分析理论的细节。许多细节是本书后续卷的主题。本书通篇强调的是物理概念及理解，而不是形式理论或数学公式。

这是有原因的。我常听说年轻工程师盲目使用计算机程序，对正在做的事情缺乏理解。这多半是真实的，而且是不幸的。然而，我的经验告诉我，我们不应该责备年轻工程师。

我相信问题的症结在于，工程专业学生被训练成：把结构分析视为某种魔幻化的东西，能够以高精度的方式，给出我们对结构所有需要知晓的一切行为。这是一个幻觉。结构分析最多也就是具有高度的近似性，通过计算机程序来预测结构的行为，必须采用怀疑态度（skepticism）来仔细检视。结构分析不是魔幻化的东西，它仅仅是结构设计的一个辅助工具，并且是远非完美的工具。

我还听到过对计算机程序开发者责备的言论（不是对 CSI，而是某些其他厂商），我不同意这点。结构分析计算机程序是一个工具，与其他任何工具一样，它的主要目的就是提高生产力。软件开发者的任务就是开发最可能的工具，工程师的工作就是依靠自身技能来使用它。提供给年轻工程师所需要这种技能的教育和培训，是另外的某些人的工作。这种技能是什么？谁是“某些人”？

下面是我对这些所需要技能的一些观点：

- (1) 对于广大工程师来说，这些技能并不包括编制结构分析程序。这可能在 1975 年是一个有用的技能，当时结构分析程序的功能很有限，经常需要扩展。当今计算机程序的状况并非如此，程序现在可以完成某些令人惊奇的事情。计算机软件开发是高度专业化的工作，对于绝大多数工程师来说，工作的挑战是**使用**程序，而不是**开发**程序。

然而，利用诸如 Matlab、Mathcad 或 Visual Basic 语言来编写对分析结果处理的程序，这个技能是有价值的，这些通用性工具是大部分工程师应当熟悉的和经常使用的。

- (2) 这些技能不包括用经典“手算”方法（例如弯矩分配法，**Moment Distribution**）来进行结构分析。我听说了这样的争论，学生是否应该学习弯矩分配法来培养对结构行为的“感觉（feel）”，对于这点，我是坚决反对的。弯矩分配法在它的时代是一个优秀的工具，但它过时了，只存在其历史意义。几十年来，我没有用过弯矩分配法，它几乎也不能培养“感觉”。

但是，某些手算技能是绝对有价值的。隔离体（**free body diagrams**）和平衡方程（**equilibrium equations**）对理解力的流动和检查分析程序的力的结果是否满足平衡是极其有用的；图乘法（**moment-area method**）对于检查分析程序的变形是否合理是极其有用的。这些方法，及其他的一些简单技术，是基本的技能，它们能有助于产生“感觉”。

- (3) 对于大多数工程师来说，这些技能不包括对“矩阵法（**Matrix Methods**）”的细节理解。从一开始，并没有所谓的“矩阵法”，只是一种矩阵表示形式（对所有工程师来说，矩阵表达是一种非常有用的和日常使用的方法），是结构分析方法的矩阵表达形式。大部分分析方法可以用矩阵来表达，也可不用。如果一种方法由于历史原因没有用矩阵形式来表达，增加其矩阵表达并不会令其显得更现代或更有用。

然而，有一种分析方法极其依赖矩阵，这就是直接刚度法，几乎所有的结构分析软件都基于这个方法，从事结构分析的所有工程师应当具备理解这种方法的基本知识。然而，不需要理解其数学细节，也不需要编程。直接刚度法是一个非常直观的过程（**physical process**），大多数工程师需要理解的是它的物理概念，而不是数学形式。这意味着需要理解：结点、单元、自由度、刚度系数；刚度矩阵的物理意义；单元刚度矩阵是如何组装成结构的刚度矩阵；需要求解上万联立方程；如果分析模型建立不善将如何导致错误等。理论的和计算的细节只需要被相对较少的程序开发工程师掌握即可。

- (4) 理解结构组件（**structural components**）的行为是一项必需的技能（**an essential skill**）。对于弹性组件（或更确切地，为了分析目的假定为弹性），关键属性是刚度，或者刚度矩阵。对于梁柱组件，通常是抗弯刚度（ EI ）、轴向刚度（ EA ），以及可能的抗剪刚度（ GA' ）。大多数结构分析的教科书都暗示，这些值可以很好定义并能方便计算，但在实际结构中通常不是这么一回事。例如，如何计算开裂后的及沿长度裂缝数量变化的钢筋混凝土梁的 EI ？如何计算裂缝数量与轴力相关的钢筋混凝土

柱的 EI ？如何确定剪切变形是很重要还是可以忽略？教科书极少关注这些问题。

而且，这还只是对弹性分析。多数情况，特别是地震运动，结构组件的受力将超过其屈服强度而成为非弹性。这些组件的行为是怎样？哪些方面的行为对分析和设计是重要的？在分析模型中需要哪些属性来捕捉这些行为？如何估计这些属性值？既然这些属性值不可能精确获得，如何考虑其不确定性？这些非常重要的方面是结构分析课程和教科书很少提及的。

- (5) 建立一个能够捕捉结构重要行为的分析模型的能力是一项必需的技能。这就如同“矩阵法”在学术上的挑战一样。事实上，在我看来，分析建模比分析理论在学术上更加具有挑战性。

与此相关，对计算结果的一致性校核能力是一项必需的技能（这就是“感觉”——结果看起来对吗？）。这项技能需要在实践中培养，但是能够被传授的。然而，这不能通过学习弯矩分配法或矩阵法来培养；可以通过更高效地使用程序来分析结构、审慎检视结果、改变结构属性来进行“如果……那么……（what-ifs）”的试算、指定非实际的大刚度来看会发生什么情况，等等。对大多数工程师来说，这比分析理论要有用得多。

- (6) 懂得如何利用程序结果来进行设计决策是一项必需的技能。在一般的结构分析教科书上，最后的结果是变形图和弯矩图；在工程实践中，这只是开始，重要的是如何利用分析结果来支持设计决策。学生应当理解，结构分析并不是设计的结束，而仅仅是用于设计一个工具。

如果我是对的，这些技能是非常重要的，为什么没有传授这些技能？下面是我对导致这一问题的看法：

- (1) 结构分析有三个阶段：开始的“建模（modeling）”、最终的“阐释（interpretation）”和中间的“计算（computation）”。对大多数工程师来说，最重要的阶段是“建模”和“阐释”，相对不重要是“计算”（包括分析理论和数值计算）。
- (2) 计算过程通常是由计算机软件来处理，程序开发者负责理论（及许多其他方面，例如数据管理和图形）和数值计算。大多数工程师可以把软件视为“黑箱”，一端接受结构模型，另一端生成“结果”。结构工程师必须相信计算是正确进行的，并且对计算的执行具有整体性的理解，但不需要关心计算的细节。对大多数工程师来说，最重要的阶段是建模和阐释，这需要人类的技能和智能，通常不是计算机程序所能处理好的。（在某种程度上也在进行自动化的建模和阐释，这是开发者的目标。某些工程师盼望所有三个阶段都能自动化的那一天，但要小心你所期望的

事情。)

- (3) 这就是我认为的问题所在。在全世界的大学里，工程专业学生都是被极度传授“计算”，很少关注“建模”和“阐释”。学生学到的这个技能没有多少用，而有用的技能又没有被传授。应该传授这些技能的“某些人”，正是大学教授，通常他们并不是做得很好。相对来说，传授计算知识比较容易，主要是理论的东西，教授们通常擅长理论；教建模和阐释比较难，这就是教授们并没有做好的部分原因。

教科书极少（如果还有的话）讲解建模和阐释，所以没什么帮助。本书并不覆盖所有上述技能，但确实填补了某些鸿沟。本书包括了结构组件的行为、直接刚度法，以及建模和阐释的基本原理。本书计划作为系列丛书的首册，后续还将深入考虑构件建模，详细讲解线性、非线性、静力和动力分析的假设及其过程。

这不是一本常规意义上的带有范例和指定问题的教科书，而是提供了结构行为和建模有关的背景信息。为了传授我所说的系列技能，结构分析课程需要使用下述练习：

- (1) 建立各种类型的隔离体；利用平衡方程和虚位移原理来求解平衡问题；利用隔离体来校核分析程序的输出，例如梁柱连接处的内力。对学生强调：没有任何理由在隔离体和平衡方程中出现错误。
- (2) 绘制变形图，以获得这样的感觉：结构是如何变形的，以及变形后构件是如何连接在一起产生整体结构变形的。
- (3) 求解简单的变形问题，同时也检查分析软件的变形结果的合理性。我个人喜欢用图乘法，因为很直观；我也喜欢用简单的标准结果，如 $PL^3/3EI$ 来计算悬臂梁端承受荷载的变形；我并不喜欢用虚力原理（“假定单位力法”），因为相对于直观物理概念来讲，需要太多的数学过程。
- (4) 需要学生使用计算机程序来进行结构分析，从结构分析课程第一节课就应该开始。建立各种类型的结构线弹性模型，改变构件刚度，然后运行分析；查看变化导致的结果，并解释这些结果。我相信，这是培养对结构行为“感觉”的最好路径。
- (5) 随着学生对建模和阐释技能的提高，增加材料和几何非线性，一如既往地强调建模假定和获得行为的解释。进而增加动力分析。结构分析的第一个本科生课程能够处理足够简单的非弹性分析，第二个课程应当包括动力分析。
- (6) 阐述分析结果是如何用来进行设计的。强调结构分析最多也就是很近似的，并不是设计的终点，而仅仅是支持设计的一个工具。而与分析和设计相关的所有课程，都常常作为独立的专业课来讲授。

关于本书，下面提供一些附加要点：

- (1) 需要在多处增加“作者认为”的字样，之所以略去了，纯粹是为了避免极度重复。本书的大部分都仅仅是作者的个人观点，欢迎不同意见。
- (2) 本书无参考文献。编辑参考文献和正确引用它们是件简单但工作量巨大的任务，既然所有分析都可以用计算机来完成，最佳的参考文献就是计算机程序的文档，这将导致更多的参考文献。
- (3) 本书除了考虑分析之外，还考虑设计，参考了设计规范和工程标准，主要是美国的钢结构和混凝土规范，包括 ANSI/AISC 360 和 ACI 318，ASCE 7 和 ASCE 41，这些都是大家熟知的且可以获得的规范。本书采用的符号没有遵循任何特定的规范。
- (4) 我想提及一本具有极少范例的处理结构行为的教科书，这就是 W. Morgan 所著的《结构构件》(The Elements of Structure, 1977 年第二版, I. Buckle 编辑, Pitman 出版社)，这本书覆盖了结构行为，但没有建模。然而，成功的建模始于对行为的理解。如果能找到这本书，非常值得一读。

在此，我要感谢 Jeff Hollings 在文字检查寄予的帮助，感谢 Iqbal Suharwardy 和 G. Robert Morris 在技术上的帮助，感谢 Ashraf Habibullah 的耐心，以及我的夫人 Lynette 一如既往的耐心。

最后，我要将本书献给能力设计 (Capacity Design) 之父——Tom Paulay 教授，他是我所遇到的最好的导师和最和蔼的人。

Graham Powell

加州伯克利

2010 年 1 月



目录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 结构分析的阶段	1
1.2.1 建模	1
1.2.2 阐释	2
1.2.3 计算	2
1.3 三阶段的相对重要程度	3
1.4 需求和能力	3
1.4.1 性能评估	3
1.4.2 直接设计	4
1.5 弹性分析与非弹性分析	5
1.5.1 结构组件的行为	5
1.5.2 弹性行为与非弹性行为	6
1.5.3 使用弹性分析的基于强度的设计	6
1.5.4 使用非弹性分析的基于强度的设计	7
1.5.5 基于变形的抗震设计	8
1.5.6 基于强度的抗震设计	9
1.5.7 使用弹性分析的能力设计	9
1.6 静力分析与动力分析	10
1.7 小位移分析与大位移分析	11
1.7.1 概述	11

x	目录
1.7.2	平衡11
1.7.3	协调（连续性）12
1.7.4	分析类型12
1.7.5	悬链效应14
1.8	需求分析与能力分析 14
1.8.1	概述14
1.8.2	达到屈服时的侧向荷载15
1.8.3	倒塌时的地震强度15
1.8.4	梁的抗弯强度16
1.8.5	塑性铰的转动能力16
1.8.6	本节的结论18
1.9	本章的结论 19
1.10	后续章节的主题 19
第 2 章	分析模型 21
2.1	实际结构与分析模型 21
2.2	两种类型的分析模型 21
2.3	结点-单元模型的特性 22
2.4	一些单元类型 23
2.5	结点和单元的连接 24
2.5.1	概述24
2.5.2	杆单元的连接24
2.5.3	刚性端域25
2.6	单元之间的缝隙和重叠 25

目录	xi
2.6.1 面单元	25
2.6.2 单元与单元的接触	26
2.7 单元间的平衡	26
2.7.1 单元边界上的平衡	26
2.7.2 连接处的平衡	27
2.8 有限尺寸结点和零长度单元的离散模型	28
2.9 连续模型	28
2.9.1 框架结构	28
2.9.2 墙结构	29
2.10 单元和组件	30
第 3 章 直接刚度法	31
3.1 单元的刚度和柔度	31
3.1.1 概述	31
3.1.2 杆单元	31
3.1.3 刚体位移和变形模式	33
3.1.4 梁单元	33
3.1.5 面单元和实体单元	35
3.1.6 板单元和壳单元	37
3.2 刚度法和柔度法	38
3.3 直接刚度法	38
3.3.1 概述	38
3.3.2 自由度	39
3.3.3 添加刚度	40

3.3.4	结构刚度的组装	41
3.3.5	添加柔度	42
3.3.6	结点编号优化	43
3.3.7	平衡方程	44
3.3.8	荷载矩阵	44
3.3.9	方程求解	44
3.3.10	单元的变形和力	45
3.3.11	平衡检查	45
3.3.12	导致不平衡的原因	45
3.3.13	刚性支座的反力	45
3.3.14	与从约束相关的力	46
3.4	从约束——刚性楼隔板	46
3.5	线性分析中的平衡错误	48
3.5.1	概述	48
3.5.2	非稳定结构	48
3.5.3	刚度系数不匹配	50
3.5.4	编程错误	52
3.5.5	非稳定模式的确定	53
3.6	单元荷载	55
3.6.1	概述	55
3.6.2	单元力-位移关系	55
3.6.3	结构平衡方程	56
3.6.4	单元初始变形	57
3.6.5	在刚性支座处施加位移	58

目录	xiii
3.7 动力和非线性分析.....	59
3.7.1 动力荷载	59
3.7.2 材料非线性	59
3.7.3 几何非线性	59
3.8 子结构和超单元.....	60
第 4 章 组件行为——单轴 F-D 关系	63
4.1 概述.....	63
4.1.1 组件和单元	63
4.1.2 组件的建模目标	64
4.2 组件的力-变形关系.....	64
4.2.1 一般的 F-D 关系.....	64
4.2.2 单调变形的 F-D 关系	65
4.2.3 循环变形的复杂性	67
4.2.4 弹性变形和塑性变形	69
4.2.5 延性比	71
4.2.6 刚-塑性铰	71
4.2.7 其他非线性 F-D 关系	72
4.2.8 本节小结	73
4.3 需要哪种类型的 F-D 关系	73
4.4 弹性分析的刚度	74
4.4.1 梁、柱、墙的抗弯刚度	74
4.4.2 钢筋混凝土的剪切变形	76
4.4.3 连接	76

4.4.4	本节小结	77
4.5	非弹性分析的 F-D 关系	77
4.5.1	概述	77
4.5.2	非弹性行为的大小	77
4.5.3	实用的 F-D 关系——一般形式	78
4.5.4	ASCE 41 中的 F-D 关系	80
4.5.5	骨架关系	81
4.6	非弹性分析的滞回环	81
4.6.1	滞回环锚固到骨架关系	81
4.6.2	CSI PERFORM-3D 的滞回环	83
4.6.3	循环退化的实用模拟	84
4.6.4	“循环内”和“循环间”的强度丧失	85
4.7	本章的结论	86
第 5 章	组件行为——多轴相关的 F-D 关系	87
5.1	概述	87
5.2	刚度相关性	87
5.3	强度相关性	88
5.4	非弹性相关性：屈服后行为	89
5.5	金属屈服的塑性理论	90
5.5.1	概述	90
5.5.2	理想弹塑性金属的屈服	91
5.5.3	应变硬化	92
5.6	摩擦相关面	95

目录	xv
5.6.1 摩擦支承组件	95
5.6.2 粘聚与摩擦	96
5.7 P-M-M 相关性的拓展	96
5.7.1 概述	96
5.7.2 钢截面——类推即可	97
5.7.3 屈服面的尖点	99
5.7.4 钢筋混凝土截面——类推效果不好	100
5.7.5 延性极限和强度丧失	102
5.7.6 滞回曲线和刚度退化	103
5.7.7 循环退化	103
5.7.8 其他截面形状	104
5.8 塑性理论是否对 P-M 相关性有用	104
5.8.1 概述	104
5.8.2 假定和近似	104
5.8.3 轴向变形的重要性——钢柱	105
5.8.4 塑性铰中的轴向变形是否正确	107
5.8.5 累积轴向变形——混凝土柱	108
5.8.6 是否可以将轴向伸长假定为零	108
5.8.7 静力推覆分析中的轴向变形	109
5.8.8 本节的结论	109
5.9 混凝土梁的轴向拉伸	111
5.10 P-M 相关的纤维截面	111
5.10.1 概述	111
5.10.2 梁纤维截面	111

5.10.3	柱纤维截面	112
5.10.4	墙纤维截面	112
5.10.5	纤维段	113
5.10.6	刚塑性纤维铰	114
5.10.7	纤维模型的局限性	114
5.11	梁柱中的非弹性剪切	115
5.11.1	概述	115
5.11.2	钢梁中的 M-V 相关性	115
5.11.3	钢柱中的 P-M-V 相关性	116
5.11.4	钢筋混凝土梁中的 M-V 相关性	116
5.11.5	钢筋混凝土柱中的 P-M-V 相关性	117
5.11.6	连接部位的 P-M-V 相关性	118
5.11.7	分析与设计	118
5.12	剪力墙中的剪切	118
5.13	素混凝土的多轴材料模型	121
5.13.1	动机	121
5.13.2	塑性理论	121
5.13.3	压场理论	122
5.13.4	基于单轴应力-应变的简单模型	124
5.13.5	考虑 P-V 相关性的可能模型	125
5.13.6	考虑三维应力的素混凝土模型	126
5.13.7	过度依赖分析	126
5.13.8	关于需求分析和能力分析的说明	127
5.14	能力相关性	128

目录	xvii
5.14.1 概述	128
5.14.2 轴力对弯曲延性的影响	128
5.14.3 剪力对弯曲延性的影响	128
5.14.4 铰转动对剪切强度的影响	128
5.15 塑性变形和变形的 D/C 比	128
5.16 本章小结	129
5.17 本章的结论	131
第 6 章 $P - \Delta$ 效应、稳定和屈曲	133
6.1 概述	133
6.1.1 几何非线性的成因	133
6.1.2 几何非线性分析的类型	133
6.1.3 $P - \Delta$ 效应	134
6.1.4 荷载类型和相应的分析	134
6.1.5 弹性分析和非弹性分析	134
6.1.6 本章议题	135
6.2 单根柱的 $P - \Delta$ 和 $P - \delta$ 贡献	137
6.2.1 概述	137
6.2.2 悬臂柱	137
6.2.3 $P - \Delta$ 分析中的近似	138
6.2.4 $P - \Delta$ 效应与小位移效应	138
6.3 $P - \Delta$ 和 $P - \delta$ 贡献的相对重要程度	138
6.3.1 悬臂柱	138
6.3.2 无支撑框架柱	139

6.4	$P - \Delta$ 和 $P - \delta$ 贡献的模拟	141
6.4.1	概述	141
6.4.2	悬臂柱模型	141
6.4.3	$P - \delta$ 索的性能	142
6.4.4	弹性悬臂柱的性能	143
6.4.5	柱设计中的弯矩和剪力	144
6.4.6	无支撑框架中的弹性柱	145
6.4.7	无支撑框架中的非弹性柱	146
6.4.8	单元模型	148
6.5	侧向荷载作用下的框架性能	148
6.5.1	概述	148
6.5.2	$P - \Delta$ 杆和 $P - \Delta$ 柱	148
6.5.3	专业术语回顾	149
6.5.4	主结构和 $P - \Delta$ 柱	150
6.5.5	$P - \Delta$ 柱对刚度和强度的影响	150
6.5.6	增大荷载还是降低强度	152
6.5.7	$P - \Delta$ 柱的荷载与主结构的荷载	152
6.5.8	梁的 $P - \Delta$ 效应	152
6.5.9	有支撑框架中 $P - \Delta$ 效应	153
6.5.10	本节小结	154
6.6	框架的屈曲性能	154
6.6.1	概述	154
6.6.2	平衡状态下的稳定	155
6.6.3	平衡分岔	156

目录	xix
6.6.4 屈曲后的非弹性行为	157
6.6.5 屈曲前的非弹性性能	157
6.6.6 初始缺陷的影响—弹性情况	158
6.6.7 初始缺陷影响—非弹性情况	159
6.6.8 重力倾斜影响	160
6.6.9 屈曲荷载是否有用	160
6.6.10 本节小结	161
6.7 多层和三维建筑的 $P-\Delta$ 柱	161
6.7.1 多层建筑的 $P-\Delta$ 柱	161
6.7.2 三维建筑中的 $P-\Delta$ 柱	162
6.7.3 多根 $P-\Delta$ 柱的模型	164
6.8 多层和三维框架的屈曲	164
6.9 轴向受力柱的屈曲	166
6.9.1 概述	166
6.9.2 理想弹性柱	166
6.9.3 初始缺陷和非弹性柱	168
6.9.4 钢柱	168
6.9.5 钢筋混凝土柱	169
6.9.6 屈曲强度理论	169
6.9.7 材料非线性和几何非线性的组合	170
6.9.8 对屈曲强度的分析模型	171
6.9.9 本节小结	172
6.10 铰接构件的简单结构	173
6.10.1 概述	173

6.10.2	结构和分析模型例子	173
6.10.3	弹性分析的基于强度设计	174
6.10.4	非弹性分析的基于变形设计	175
6.10.5	斜撑行为的模拟	175
6.11	受弯的铰接弹性柱	176
6.11.1	概述	176
6.11.2	承受正弦分布侧向荷载的弹性柱	176
6.11.3	承受其他形式分布侧向荷载的弹性柱	177
6.11.4	承受端部弯矩的弹性柱	177
6.11.5	弯矩放大的直接算法	178
6.11.6	框架中的弹性柱	179
6.12	梁-柱强度	179
6.12.1	概述	179
6.12.2	理想弹塑性性能	180
6.12.3	逐步屈服行为	181
6.12.4	切线模量理论	182
6.12.5	切线模量、折减与割线模量	184
6.13	基于强度的梁-柱设计	185
6.13.1	概述	185
6.13.2	钢梁-柱	185
6.13.3	钢筋混凝土梁-柱	187
6.14	基于变形的梁-柱设计	188
6.15	支撑框架中的受压构件	188
6.15.1	概述	188

目录	xxi
6.15.2 带墙的支撑框架	188
6.15.3 弹性分析的基于强度设计	189
6.15.4 非弹性分析的基于变形设计	189
6.15.5 对角支撑框架	189
6.16 无支撑框架中的柱	190
6.16.1 概述	190
6.16.2 框架和柱的屈曲	191
6.16.3 弹性分析的基于强度设计	192
6.16.4 非弹性分析的基于变形的的设计	192
6.17 难点 1——初始倾斜	193
6.17.1 概述	193
6.17.2 模拟方法	193
6.18 难点 2——刚度折减	195
6.18.1 概述	195
6.18.2 对侧向荷载分析的影响	195
6.18.3 刚度折减的模拟	198
6.18.4 $P - \delta$ 贡献的作用	199
6.18.5 对屈曲分析的影响	199
6.18.6 刚度折减分析是否必要	199
6.19 几何刚度理论	199
6.19.1 概述	199
6.19.2 $P - \Delta$ 杆的几何刚度矩阵	200
6.19.3 结构的刚度矩阵	202
6.19.4 $P - \delta$ 贡献	202

6.20 侧向荷载作用下的弹性分析方法.....	202
6.20.1 概述	202
6.20.2 有侧移放大和无侧移放大	203
6.20.3 有侧移放大的分析方法	203
6.20.4 无侧移放大的分析方法	205
6.20.5 有侧移放大和无侧移放大的相似性	207
6.20.6 分析方法	208
6.20.7 “2-B”分析法.....	208
6.20.8 “1-B”分析法.....	209
6.20.9 “0-B”分析法.....	210
6.20.10 “0-B”分析法中的端弯矩	211
6.20.11 初始缺陷	214
6.20.12 刚度折减和有侧移放大	214
6.20.13 刚度折减和无侧移放大	215
6.20.14 需求/能力的计算.....	215
6.20.15 本节小结	216
6.21 钢框架结构的直接分析法.....	216
6.21.1 概述	216
6.21.2 可接受的二阶分析方法	216
6.21.3 有侧移放大的精度基准	216
6.21.4 无侧移放大的精度基准	217
6.21.5 可接受的分析方法	218
6.21.6 初始倾斜	218
6.21.7 基本刚度折减	219

目录	xxiii
6.21.8 附加刚度折减	219
6.21.9 附加刚度折减的另一种方法	220
6.21.10 本节小结	221
6.22 框架侧向荷载作用下的非弹性分析	221
6.23 屈曲分析	222
6.23.1 概述	222
6.23.2 有平衡分岔的分析方法	223
6.23.3 带初始缺陷的屈曲分析方法	224
6.24 一些其他结构	225
6.24.1 概述	225
6.24.2 平面外弯曲的墙体	225
6.24.3 大跨度屋盖	225
6.24.4 桥梁结构中的柱	226
6.24.5 零轴力下管道的屈曲	227
6.24.6 埋入式管道的屈曲	227
6.24.7 埋入式管道的大位移	228
6.24.8 荷载随动作用的结构	228
6.25 梁的弯扭屈曲	230
6.25.1 概述	230
6.25.2 弯扭屈曲的成因	230
6.25.3 分析模型	233
6.25.4 工字形截面梁的扭转性能	233
6.25.5 受压翼缘的性能	234
6.25.6 剪力对梁屈曲的影响	235

6.25.7 实际建模	236
6.26 设置支撑防止屈曲	236
6.27 隔震器的 $P - \Delta$ 效应	237
6.27.1 概述	237
6.27.2 平面摩擦-摆动型隔震器	237
6.27.3 盆式摩擦-摆动型隔震器	239
6.27.4 橡胶隔震器	239
6.27.5 橡胶隔震器的另外一种模型	240
6.27.6 哪一个模型正确	242
6.28 其他形式的屈曲	243
6.29 精确的大位移分析	243
6.30 本章的结论	244
第 7 章 行为的其他一些特性	245
7.1 塑性机制	245
7.1.1 倒塌机制与塑性机制	245
7.1.2 抗震推覆分析	246
7.1.3 合适的机构和不合适的机构	246
7.1.4 给定机构的侧向强度计算	247
7.1.5 导致机构的其他原因	249
7.2 使用能力设计进行机构控制	249
7.2.1 概念	249
7.2.2 机构控制的例子	249
7.2.3 高层建筑中高阶模态影响	250

目录	xxv
7.3 静力不确定性和冗余	250
7.3.1 静定结构	250
7.3.2 超静定结构	251
7.3.3 冗余	253
7.4 非结构组件	253
7.5 功和能	253
7.5.1 实际结构的能量平衡	253
7.5.2 弹性分析模型中的能量平衡	254
7.5.3 非弹性分析模型中的能量平衡	255
7.5.4 分析中的能量平衡检查	255
7.5.5 能量耗散的数量和分布	256
7.5.6 能量耗散作为需求-能力的度量	256
7.6 面对不确定性	256