

结构静力与动力分析

——强调地震工程学的物理方法

(原著第四版)

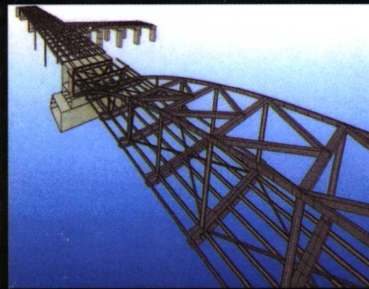
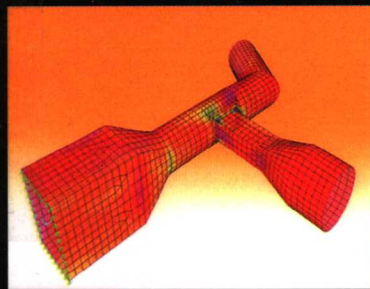
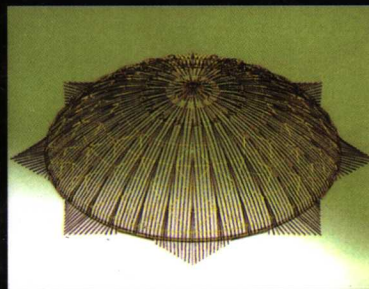
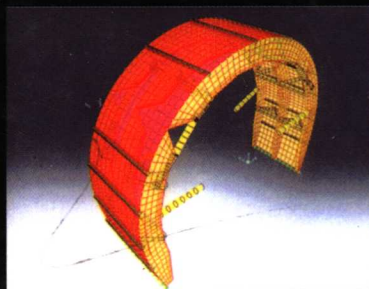
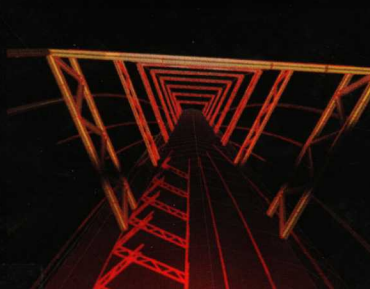
**Static & Dynamic Analysis
of Structures**

A PHYSICAL APPROACH WITH EMPHASIS
ON EARTHQUAKE ENGINEERING

[美] 爱德华·L·威尔逊 著

北京金土木软件技术有限公司

中国建筑标准设计研究院 译



中国建筑工业出版社

结构静力与动力分析

——强调地震工程学的物理方法

(原著第四版)

[美] 爱德华·L·威尔逊 著

北京金土木软件技术有限公司 译
中国建筑标准设计研究院

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2005-0591号

图书在版编目 (CIP) 数据

结构静力与动力分析——强调地震工程学的物理方法
(原著第四版)/(美) 威尔逊著; 北京金土木软件技术有限公司等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2005

ISBN 7-112-07901-2

I. 结... II. ①威... ②北... III. ①建筑结构-
结构静力分析-应用软件②建筑结构-结构动力分析-应用
软件 IV. TU311-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 122308 号

STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF STRUCTURES / Edward L. Wilson

Copyright © 1996 - 2004 by Computers and Structures, Inc.

Chinese (Simplified Characters Only) edition Copyright © 2005 by Beijing Civil King Software Technology Co., Ltd. Authorized translation from English language edition by Computers and Structures, Inc. All Rights Reserved.

No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior explicit written permission of the publisher.

Translation Copyright © 2006 by China Architecture & Building Press

本书由美国 Computers and Structures 公司授权翻译出版

责任编辑: 董苏华 王 跃 程素荣

责任校对: 刘 梅 张 虹

CSI 标识、ETABS[®]、SAP2000[®] 和 SAP90[®] 是 Computers and Structures, Inc. 的注册商标, SAFE[™] 是 Computers and Structures, Inc. 的商标

结构静力与动力分析

——强调地震工程学的物理方法
(原著第四版)

[美] 爱德华·L·威尔逊 著

北京金土木软件技术有限公司

中国建筑标准设计研究院 译

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京嘉泰利德公司制版

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 23½ 字数: 700 千字

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月第一次印刷

定价: 79.00 元

ISBN 7-112-07901-2

(13855)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址: <http://www.cabp.com.cn>

网上书店: <http://www.china-building.com.cn>

结构工程是这样的一种艺术：
使用材料
这些材料属性只能估算

建立真实的结构
这些真实的结构只能近似分析

来承受外力
这些力不能准确得知

以满足我们对公众安全职责的要求。

——改编自一位不知名作者

译者的话

本书是结构分析国际权威专家威尔逊教授的经典著作《Static & Dynamic Analysis of Structures》英文第四版的中译本。随着 SAP2000、ETABS 和 SAFE 程序在中国得到广大工程设计人员、教学科研人员的广泛认可与应用，作为 SAP2000、ETABS 和 SAFE 程序基础理论的本书英文版在业界广为流传。北京金土木软件技术有限公司和中国建筑标准设计研究院应广大结构工程技术人员的强烈要求，经过近两年的时间，完成了本书的翻译工作。

本书主要目的是提出必要的理论背景，以便让使用结构分析计算机程序的用户能够理解程序中使用的的基本近似方法，验证所有分析结果并对结果承担专业责任。本书归纳总结了最新版的 SAP 和 ETABS 程序中使用到的有限元和数值方法理论进展。程序使用的许多单元和数值方法是全新的，在目前的结构分析教科书里面还尚未提及。除此之外，本书还归纳总结了力学基本方程。对所有从事现代结构工程领域的研究学者和专业人员来说，本书是一本“必读”的专业书籍。

如本书的副标题——强调地震工程学的物理方法——所言，本书自始至终都把基本的物理方法贯穿到结构分析的每个细节。从最基本的物理概念入手，以浅显易懂的方式，采用严格的物理方法和逻辑推理来推导展开每一个专题。它不是一本纯理论化的教科书，而是始终以应用为主线，深入浅出地阐述结构工程静力与动力分析的主要问题，所涉及的理论都较为基础和直观，不需要很多的背景知识，是一本适合工程设计人员阅读的书籍。

爱德华·L·威尔逊是加利福尼亚大学伯克利分校的结构工程名誉退休教授，从 1965 年至 1991 年威尔逊教授一直在那里执教。1973 年至 1976 年，他是结构工程和工程力学分部的主席，1987 年至 1990 年担任土木工程系的副主任。威尔逊教授在伯克利分校教授了有关结构分析、计算分析、结构动力学以及有限元等内容的课程，并指导相应的研究工作。他发表了超过 180 篇的技术论文和学术著作。在他三十年的教学生涯中，威尔逊教授指导了 29 位博士研究生。

威尔逊教授于 1963 年在加利福尼亚大学获得博士学位，1963 年至 1965 年在加利福尼亚州萨克拉曼多的通用航空公司担任高级研发工程师。在那

里，威尔逊博士开发了用于“民兵”导弹和“阿波罗”太空舱的温度与应力分析的数值方法和计算程序。威尔逊教授负责开发了多个计算程序，这些程序已经在土木工程、机械工程以及航天工程等领域得到了极其广泛的应用，通用三维有限元分析程序 SAP 和三维建筑静动力分析程序 TABS 系列是其中的代表。

威尔逊教授率先开发了针对高层建筑结构和水工结构分析的计算方法和实用的计算机程序，这些专用程序包括了热传递分析、徐变效应、顺序施工、土-结构-流体相互作用，以及孔隙渗流等。随着这些程序在全球范围内被大量公司和研究机构所采用，威尔逊教授在众多工程项目中担任直接或间接的顾问工作。

1985 年威尔逊教授当选为美国国家工程院院士，并于 1990 年获得“林同炎夫妇”工程教授的殊荣。1991 年由于其在教学中的杰出贡献，威尔逊教授被收入“伯克利嘉奖” (Berkeley Citation)。威尔逊教授分别于 1974 年和 1995 年被美国土木工程师协会 (ASCE) 授予 Huber 和 Howard 奖章，以表彰其在土木工程领域取得的卓越成就；1998 年，他又获得了洛杉矶高层建筑设计委员会颁发的终身成就奖；2003 年，威尔逊教授由于开发 SAP 系列程序而获得了美国计算力学协会授予的 von Neumann 勋章。

威尔逊教授于 1961 年编制了第一个自动化的有限元分析程序，是 CAL、SAP 和 ETABS 系列程序的原创开发者，这些程序以其精确性、高速性及其使用高效数值算法和精确有限单元而闻名于世。在过去的 10 年中，威尔逊教授作为 CSI 公司的高级技术顾问，一直致力于结构计算分析新方法的研发顾问工作。

本书在全球范围内被视为从事结构工程设计和教学科研的经典著作，对了解和掌握结构分析软件的基本原理、基本假设以及实际应用都有很强的参考作用。中文版的推出必将对我国从事结构工程设计和教学科研起到积极的促进作用。

本书的第 1 章介绍计算机软件使用到的各种结构材料属性；第 2 章介绍平衡原理和协调性原理；第 3 章介绍了结构分析中的能量原理和功；第 4 章至第 10 章分别介绍了一维单元、等参单元、非协调单元、边界条件与约束、弯曲板单元、具有法向转动的膜单元、壳单元；第 11 章介绍了几何刚度和 $P-\Delta$ 效应；第 12 章介绍了动力分析的基本方法；第 13 章详细介绍了动力分析中的振型叠加法；第 14 章介绍了刚度与质量正交向量的计算方法；第 15 章详细介绍了动力分析的反应谱法；第 16 章介绍了土-结构相互作用；第 17 章阐述了为满足建筑规范如何进行地震分析模拟；第 18 章介绍了一种新型的快速非线性分析方法；第 19 章详细分析了线性粘滞阻尼；第 20 章介

绍了动力分析的数值积分方法；第 21 章阐述了结构中存在的非线性单元及其分析方法；第 22 章介绍了使用位移荷载的地震分析方法；第 23 章阐述了流体-结构的相互作用。本书的附录给出了相应的背景知识，如向量表示法、矩阵表示法、线性方程求解、特征值问题、数值积分、最小二乘法、地震加速度和位移记录的一致性。为了便于读者阅读，本书还给出了所有图表的索引，以及专用名词的中英文对照表。

本书翻译工作的具体分工为：袁文平负责第 1—4 章的翻译工作；李文峰、李立负责第 5—8 章的翻译工作；李永双负责第 9—12 章的翻译工作；刘春明负责第 13—17 章的翻译工作；李楚舒负责第 18—23 章的翻译工作；孔凡箴、李胜林负责附录部分的翻译工作；常弘、沈万湘负责对全书的公式、图表的制作；李楚舒负责全书的校对与统稿工作。

威尔逊教授亲笔为中文版撰写了序言，显示出了一位德高望重的老教授对中国读者和中文版的特别关爱。在本书的翻译过程中得到了美国 CSI 公司 Ashraf 总裁、Syed 副总裁、Sukomal 博士等人的大力支持与协助，还得到了中国建筑工业出版社董苏华、王跃、程素荣诸位编辑的大力支持，在此一并表示诚挚的谢意。

由于译者水平有限，书中难免存在瑕疵和错误，恳请广大读者批评指正。我们的通讯地址是：北京车公庄大街 19 号，中国建筑标准设计研究院，北京金土木软件技术有限公司，邮政编码：100044，电话：010 - 88383866，传真：010 - 88381056，网址：www.bjcks.com，E-mail：info@bjcks.com。

北京金土木软件技术有限公司
中国建筑标准设计研究院
2005 年 9 月

中文版序

CSI 公司以及我本人都非常高兴地看到本书中文版的出版，我愿意就中文版增加一些个人注释。要特别感谢北京金土木软件技术有限公司的同仁，是他们将我这本英文著作译为中文出版物，并增加了更多的背景知识。

中国工程师与美国加州大学的联系已经有超过 150 年的历史。当我 1950 年进入加州大学学习时，同班同学中有不少是出生在中国，或者是加利福尼亚州的第一代移民，他们都非常聪明与勤奋，这促使我更加刻苦努力地工作。

在 20 世纪 50 年代，林同炎（朋友们都称他为 TY）是加州大学伯克利分校最受欢迎的教师。他于 1931 年在伯克利获得了硕士学位，其硕士论文的发表给美国整个工程界以极大的震撼；其后他返回中国，负责建造了许多桥梁。二战后的 1946 年，伯克利分校土木工程系在全球招募顶尖人才以培养从战场返回的老兵，他们立刻联系在中国的林同炎，提供给他一个终身教席职位。1965 年我任教以后，能够有机会与林同炎一起工作，我们一起合作了大量的科研和咨询项目，这些项目都是需要解决具有挑战性的问题——其中的一些激励我和我的学生开发了 TABS 与 SAP 系列程序。

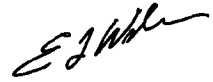
20 世纪 70 年代后期，中国研究生和访问学者开始来到伯克利学习和交流科学知识。许多返回中国的工程师都带回了 SAP、NONSAP 和 ETABS 的 FORTRAN 版本。

1981 年，我和我的妻子应邀访问中国，在令人激动的两周访问中我们有机会体验了中国伟大的历史与灿烂的文化；同时也有机会与中国同行交流了学术思想，并且就现代计算方法以及 PC 机求解重大结构工程问题的潜能等方面作了学术报告。

北京大学的袁明武教授于 1980—1982 年来到伯克利与我共同工作。其间，我们开发了求解地震工程问题的荷载相关里兹向量（Load Dependent Ritz vector）算法。后来，这个方法扩展为求解地震工程非线性问题的快速非线性分析（Fast Nonlinear Analysis）方法。

因此，我非常荣幸我的中国朋友选择翻译本书，希望中国的结构工程师

可以从我的研究工作和计算机程序中获得在实际结构设计中的应用价值。



爱德华·L·威尔逊
“林同炎夫妇”工程荣誉退休教授
2005年1月

原著第四版序

这一版是对 2000 年 7 月第三版的更正和增补。从读者的评价来判断，自从第一版于 1998 年出版以来，本书获得了巨大的成功。然而，所有的技术性著作都具有有限的生命期，所以必须经常进行修订和扩展。

本书新加入了第 23 章，这是关于在地震作用下流体-结构相互作用的内容。在这章中阐述了 SAP2000 中能够用于模拟流体和固体结构相互作用的三维实体 (SOLID) 单元，它包括了流体准确的压缩性和质量效应，用非常小的剪切模量来稳定流体的网格和近似流体的粘性。诸如大坝-水库系统动力响应这样的问题，现在可以用 SAP2000 来进行准确的模拟。因此，对于这类问题不再需要专用的特别程序来求解了，而且不再需要附加的质量近似。

本书可作为使用 SAP2000、ETABS 和 SAFE 程序的有限元技术和数值方法的基本参考手册。然而，这些程序还包括了其他许多使用的方法，本书并没有覆盖，例如，逐步施工加载 (incremental construction loading)、推覆分析 (pushover analysis)、刚度退化单元 (degrading stiffness elements) 等。这些主题可以从下列网站获得：www.csiberkeley.com 或者 www.edwilson.org。

如果您对本书所提供的材料有理论方面的问题，请与我联系：ed-wilson1@juno.com；如果对软件应用方面的问题，请直接联络 CSI。

爱德华·L·威尔逊

2004 年 8 月

致 谢

在过去的 40 多年里，在我的学生和同事的帮助下，本书的材料得到了丰富和发展，必须感谢他们的贡献。在此要特别感谢 CSI 公司的诸位同仁：Ashraf Habibullah 总裁是我 30 多年来的好朋友，他一直致力于建立连接学术研究界与结构工程实践之间的桥梁；除了 Ashraf 之外，Iqbal Suharwardy 博士和 Robert Morris 博士对本书提供的数值方法作出了原创性的贡献；必须感谢 Syed Hasanain、Marilyn Wilkes、Randy Corson、Steve Pyle 和 Sukomal Modak 等人的友谊、鼓励和对一个怪僻老教授的宽容；同时我还要感谢在过去 30 年来使用 TABS 和 SAP 系列程序大量的工程师，是他们不断给予我大部分著作出版的主要动力。

爱德华·L·威尔逊
2004 年 8 月

我大学一年级的物理教师曾教条地警告学生：“绝不使用你推导不出来的方程。”他还这样说，“如果一个人用5分钟时间来解决一个与人性命攸关的问题，他应该花3分钟的时间去研究这个问题，并清楚地理解它。”在过去的40年里，这些简单而实际的教导一直在指导着我的工作，而且我希望这种哲学思想已经传给了我的学生。就现代结构工程而言，可以把这些话重新叙述为“除非你完全理解了程序采用的理论和近似方法，否则绝不使用任何一个结构分析程序”和“在没有清楚地定义荷载、材料属性以及边界条件之前，不要创建计算机模型”。

因此，本书主要目的是提出必要的理论背景，以便让使用结构分析计算机程序的用户能够理解程序中使用的的基本近似方法，验证所有分析结果并对结果承担专业责任。假定本书的读者具有静力学、固体力学和结构分析的初步知识，期望的知识水平相当于具有土木工程或力学工程学士学位的人士。附录中定义了基本的矩阵和向量表示法，它们在本书中被广泛使用。本书不需要张量表示法和复变量的背景知识。

本书是为学生和专业工程师所著，而不是我的学术同行；因此，所有方程都是使用物理方法建立的。现代计算机的高速发展使得三维结构分析变得相对简单，因此，所有的方程都是以三维形式出现，而且自动包含了各向异性材料属性。对于灵活使用计算机程序，计算机编程的背景知识并不是必需的。但是，本书给出了详细的数值算法，以便使读者能完全理解本书所归纳的计算方法。附录包含了所用数值方法的基本摘要，因此应该不必花额外的时间阅读理论研究论文，就可以理解本书所提供的理论。

作者已为结构的静力和动力分析创建并发表了许多计算技术。许多工程专业人士发现这些计算方法是很有用的，就我个人而言，这是令人满意的。因此，编辑这本理论与应用著作的一个理由是要以出版方式巩固此项研究和发展的。除此之外，最近发展起来的快速非线性分析(FNA)方法和其他数值方法首次在这里做了详细的介绍。

结构静力与动力分析的基础是沿用了100多年的基本物理定律。因此，任何一个人相信自己发现了力学新的基本原理的人，都将会因为自己的无知而成为受害者。本书包含了一些计算技巧，作者认为这些计算技巧对开发结

构分析程序是很有效的。

由于廉价个人计算机的出现，结构静力与动力分析已经达到了很高的自动化程度。但我个人的观点是，结构工程领域永远不会完全自动化。带有人工智能的专家系统会取代有创造力的人——这种想法简直就是对所有结构工程师的侮辱。

本书包括和更新了第一版《结构三维动力分析》的内容，为给本书的将来版本扩充材料，我期待着来自读者的更多意见和问题。

爱德华·L·威尔逊

2004年8月

目 录

译者的话	v
中文版序	ix
原著第四版序	xi
致谢	xiii
个人评述	xv
第 1 章 材料属性	1
1.1 引言	1
1.2 各向异性材料	1
1.3 计算机程序中材料属性的使用	3
1.4 正交各向异性材料	3
1.5 各向同性材料	4
1.6 平面应变各向同性材料	5
1.7 平面应力各向同性材料	5
1.8 类流体材料的属性	6
1.9 剪切波和压缩波波速	7
1.10 轴对称材料属性	7
1.11 力-变形关系	8
1.12 小结	8
第 2 章 平衡与协调性	11
2.1 引言	11
2.2 基本平衡方程	12
2.3 应力合成-力与弯矩	12
2.4 协调性要求	13
2.5 应变位移方程	13
2.6 转角的定义	14
2.7 材料界面的方程	14
2.8 有限元系统中的界面方程	15
2.9 静定结构	16
2.10 位移变换矩阵	17
2.11 单元刚度矩阵与柔度矩阵	18
2.12 静定结构的解法	18

2.13	结构系统的一般解法	19
2.14	小结	19
第3章	能量和功	21
3.1	引言	21
3.2	虚功与实功	21
3.3	势能和动能	23
3.4	应变能	24
3.5	外力功	25
3.6	能量驻值原理	26
3.7	力法	28
3.8	拉格朗日运动方程	28
3.9	动量守恒	29
3.10	小结	31
第4章	一维单元	33
4.1	引言	33
4.2	轴向单元分析	33
4.3	二维框架单元	35
4.4	三维框架单元	38
4.5	构件端部释放	41
4.6	小结	42
第5章	等参单元	43
5.1	引言	43
5.2	一维简例	44
5.3	一维积分公式	45
5.4	中部节点位置的限定	46
5.5	二维形函数	47
5.6	二维中的数值积分	50
5.7	三维形函数	51
5.8	三角形单元和四面体单元	53
5.9	小结	54
第6章	非协调单元	55
6.1	引言	55
6.2	剪力锁定单元	56
6.3	添加非协调模式	57
6.4	单元刚度矩阵的形成	58
6.5	非协调二维单元	58

6.6	使用非协调位移的范例	59
6.7	三维非协调单元	60
6.8	小结	60
第7章	边界条件与一般性约束	61
7.1	引言	61
7.2	位移边界条件	62
7.3	结构分析中的数值问题	62
7.4	与约束有关的一般性理论	63
7.5	刚性隔板约束	64
7.6	刚性约束	67
7.7	在梁-壳分析中运用约束	68
7.8	在剪力墙分析中运用约束	69
7.9	把约束应用于网格变换	70
7.10	拉格朗日乘数与罚函数	71
7.11	小结	72
第8章	弯曲板单元	73
8.1	引言	73
8.2	四边形单元	74
8.3	应变-位移方程	78
8.4	四边形单元刚度	78
8.5	满足分片检验	79
8.6	静力凝聚	80
8.7	三角形弯曲板单元	80
8.8	其他弯曲板单元	80
8.9	数值范例	81
8.9.1	一个单元的梁	81
8.9.2	简支方板上的点荷载	82
8.9.3	简支方板上的均布荷载	83
8.9.4	三角形弯曲板单元的计算	84
8.9.5	使用板单元模拟梁中的扭转	84
8.10	小结	85
第9章	具有法向转动的膜单元	87
9.1	引言	87
9.2	基本假设	88
9.3	位移近似法	88
9.4	节点转动介绍	89
9.5	应变-位移方程	90

9.6	应力-应变关系	91
9.7	把相对转动转换为绝对转动	91
9.8	三角形膜单元	92
9.9	计算范例	92
9.10	小结	93
第 10 章	壳单元	95
10.1	引言	95
10.2	简单四边形壳单元	96
10.3	用平面单元模拟弯曲壳	96
10.4	三角形壳单元	97
10.5	使用实体单元进行壳分析	98
10.6	SCORDELIS-LO 筒形拱顶分析	98
10.7	半球壳算例	99
10.8	小结	100
第 11 章	几何刚度和 $P-\Delta$ 效应	101
11.1	几何刚度定义	101
11.2	近似屈曲分析	103
11.3	建筑结构的 $P-\Delta$ 分析	104
11.4	三维建筑的方程	106
11.5	$P-\Delta$ 效应的大小	107
11.6	在不修改计算机程序情况下的 $P-\Delta$ 分析	107
11.7	有效长度- K 系数	108
11.8	几何刚度的一般公式	108
11.9	小结	110
第 12 章	动力分析	111
12.1	引言	111
12.2	动力平衡	112
12.3	逐步求解法	113
12.4	振型叠加法	114
12.5	反应谱分析	114
12.6	频域内求解	114
12.7	线性方程的求解	115
12.8	无阻尼谐波响应	115
12.9	无阻尼自由振动	116
12.10	小结	116