

普通高等教育“九五”教育部重点教材



结构分析

STRUCTURAL ANALYSIS

杜正国 主编 杜正国 彭俊生 罗永坤 编

高等教育出版社

ANALYSIS
ANALYSIS
ANALYSIS
ANALYSIS

普通高等教育“九五”教育部重点教材

结构分析

Structural Analysis

杜正国 主编 杜正国 彭俊生 罗永坤 编著

著者赠书。
2003.3

高等教育出版社

· 北京 ·

内容提要

本书是普通高等教育“九五”教育部重点教材,是在作者从事多年工科结构力学教学工作和近年进行教学改革研究与实践的基础上写成的。

全书共分 12 章。主要内容包_内括静定和超静定结构分析,框架剪力墙结构分析,结构的动力、稳定性和塑性分析,影响线及其应用等部分。全书阐述深入浅出,篇幅紧凑,算例丰富。各章后面附有小结和一定数量的习题,书末附有大部分习题的答案。

本书可作为高等学校土木工程、水利和工程力学等专业的结构力学或结构分析课程教材,也可作为有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

结构分析 / 杜正国主编. —北京:高等教育出版社,
2003

ISBN 7-04-011595-6

I. 结... II. 杜... III. 建筑结构-结构分析-高等
学校-教材 IV. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 077269 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
邮政编码 100009
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 [http://www. hep. edu. cn](http://www.hep.edu.cn)
[http://www. hep. com. cn](http://www.hep.com.cn)

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 中国青年出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 35.5
字 数 660 000

版 次 2003 年 1 月第 1 版
印 次 2003 年 1 月第 1 次印刷
定 价 43.70 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

序

本书属普通高等教育“九五”教育部重点教材。在延续数年的编写过程中,作者得到了教育部第三届工科力学课程教学指导委员会结构力学课程教学指导小组和高等教育出版社的真挚支持和指导,也得到了作者所在学校西南交通大学的关切和支持。这些,都是鼓励作者坚持不懈地完成这份书稿的重要动力。

本书是在作者从事多年工科结构力学教学工作和近几年教学改革研究与实践的基础上写成的。在书稿内容取舍和重点把握方面基于如下几方面考虑:

1. 各类静定结构的分析原理与方法是结构分析的重要基础。在精选素材前提下,应重点训练学生使其具备正确和熟练的手算能力,如正确绘制结构内力图和计算结构的各种位移等。因而,编者认真地选取了与这部分内容相应的算例和习题,力图使其具有典型性和启发性。

2. 超静定结构分析的原理和方法是结构分析的重点。编写这部分内容时,尽力贯彻‘重经典讲透分析原理,用矩阵规范分析过程’的原则,结构规模从小到大,循序展开,从而达到使学生建立清晰的以计算机为计算工具的结构分析思路,增强今后分析较大型较复杂结构的学习信心。

3. 有选择地保留一部分用于简单超静定结构分析的传统简化方法,仍然符合于当今从事工程技术工作人员的需要。例如,结构分析中的对称性利用、力矩分配法和超静定拱分析中的弹性中心法等。

4. 鉴于近年来结构工程领域中更多地采用高强薄壁材料,高耸、大跨度组合结构日新月异兴起,促使作者适当加深了结构稳定性和动力分析这两部分内容。同时,新增了框架剪力墙结构分析和平面问题有限元分析两章内容。讲授时可以根据教学需要,择取其中部分内容。

5. 面对当前高等工科院校许多教师研制的各种丰富多彩的结构分析教学软件和多种版本的结构分析商业软件,建议使用本书的读者,在教师指导下,选择较为熟悉而且易于实现一定教学要求的计算软件,上机练习。

参与本书编写工作的有西南交通大学教授杜正国(执笔第一、四、五、六、七、十一章)、副教授彭俊生(执笔第九、十、十二章)和副教授罗永坤(执笔第二、三、八章);本书部分插图请毛蓉萍副教授绘制。全书由杜正国教授统稿。

本书稿曾请西安建筑科技大学刘铮教授、清华大学匡文起教授和北京建筑工程学院刘世奎教授审阅。他们提出了不少宝贵意见,编者循此对书稿作了认

真修改和调整。在此,谨向他们致以诚挚的感谢。

限于编者水平,书中难免会有错漏和不足之处,恳请批评指正。

编 者

2001 年 12 月于西南交通大学

主要符号表

A	截面积, 面积
A_i	第 i 单元(项)指定量值
$\mathbf{A}$	指定量值矩(列)阵
a	位移幅值
$\mathbf{B}$	几何矩阵
c	支座广义位移, 粘滞阻尼系数
c_{cr}	临界阻尼系数
C	弯矩传递系数
$\mathbf{C}$	支座位移矩(列)阵
d	结间距离、厚度
$\mathbf{D}$	弹性矩阵
E	弹性模量
E_p	势能
f	拱高、工程频率
F_p	集中荷载
$\mathbf{F}_p$	荷载矩(列)阵
F_H	水平推力
F_x, F_y	水平(x)、垂直(y)方向的分力
F_N	轴力
F_Q	剪力
F_Q^E	固端剪力
F_{Per}	临界荷载
F_{Pu}	极限荷载
F_e	弹性力
F_I	惯性力
F_D	阻尼力
F_R	反力, 合力
$\mathbf{F}_r$	广义反力向量
$\bar{\mathbf{F}}^{(e)}$	局部坐标系下单元杆端力列阵
$\mathbf{F}^{(e)}$	结构坐标系下单元杆端力列阵

$\bar{\mathbf{F}}^{\text{F(e)}}$	局部坐标系下单元固端力列阵
$\mathbf{F}^{\text{F(e)}}$	结构坐标系下单元固端力列阵
$\mathbf{F}_E$	等效结点荷载列阵
$\mathbf{F}_p$	结构结点荷载列阵
G	切变模量
i	线刚度
I	截面二次轴矩(惯性矩)
$\mathbf{I}$	单位矩阵
I_p	截面二次极矩(扭转惯性矩)
k	刚度系数、切应力分布不均匀系数
$\bar{\mathbf{k}}^{(\text{e})}$	局部坐标系下单元刚度矩阵
$\mathbf{k}^{(\text{e})}$	结构坐标系下单元刚度矩阵
$\mathbf{K}$	结构刚度矩阵
m	质量
$\mathbf{M}$	质量矩阵
M	力矩、力偶矩、弯矩
M^{F}	固端弯矩
M_s	屈服弯矩
M_u	极限弯矩
N	形函数矩阵
p	沿杆轴均布荷载集度
q	垂直于杆轴(或其切线)的均布荷载集度
R	半径、反力
T	坐标变换矩阵
t	坐标变换矩阵子块
r	半径
S	转动刚度、影响线量值
t	时间, 温度
T	周期
U	应变能、虚应变能
u	水平位移
v	竖向位移、速度
V	动能
W	动力计算自由度、弯曲截面系数
X	广义多余未知力

X	多余未知力矩(列)阵
y	位移
Y	位移幅值列阵、主振型列阵、主振型矩阵
α	线膨胀系数
Δ	广义未知位移
Δ	位移矩(列)阵
$\delta^{(e)}$	单元杆端位移列阵
δ	柔度系数、位移影响系数
δ	柔度矩阵
ϵ	线应变
ϵ_s	屈服应变
μ	力矩分配系数、动力系数
φ	初相角、转角
ψ	弦转角
γ	切应变
θ	截面的转角、干扰力频率
ξ	阻尼比
σ_b	强度极限
σ_s	屈服极限
ω	圆频率

主 编 简 介



杜正国 西南交通大学土木工程学院教授,河北省石家庄铁道学院、唐山铁道学院兼职教授。

1961年毕业于上海同济大学工程力学专业。当年开始执教于西南交通大学(及其前身唐山铁道学院)。历任西南交通大学结构力学教研室主任、建筑工程系副主任、教育部第三届工科力学课程教学指导委员会委员和四川省第七、第八届政协委员。主要从事结构力学和结构分析的教学和科研工作。自1979年以来,先后出版教材8本。1992年被中国力学学会评选为优秀力学教师。

责任编辑	余美茵
封面设计	刘晓翔
责任绘图	朱 静
版式设计	胡志萍
责任校对	朱惠芳
责任印制	韩 刚

目 录

第一章 绪论(1)

§ 1-1	结构分析与结构设计	1
§ 1-2	计算机对结构分析的影响	1
§ 1-3	结构的计算简图和分类	2
§ 1-4	荷载及其分类	7
§ 1-5	线性弹性和叠加原理	8
§ 1-6	体系的几何组成分析	9
§ 1-7	小结	20
习题		20

第二章 静定结构受力分析(22)

§ 2-1	静定梁	22
§ 2-2	静定平面刚架	34
§ 2-3	静定拱式结构	40
§ 2-4	静定平面桁架	48
§ 2-5	静定组合结构	59
§ 2-6	小结	62
习题		64

第三章 结构位移计算(72)

§ 3-1	概述	72
§ 3-2	实功原理与虚功原理	73
§ 3-3	位移计算的一般公式 单位荷载法	78
§ 3-4	荷载作用下的位移计算	81
§ 3-5	图乘法	86
§ 3-6	温度变化引起的位移计算	92
§ 3-7	静定结构支座移动时的位移计算	96
§ 3-8	互等定理	97
§ 3-9	小结	100
习题		101

第四章 超静定结构分析引论(106)

§ 4-1	概述	106
§ 4-2	结构的超静定次数	108
§ 4-3	结构的超静定次数	113

§ 4-4	小结	117
习题		117
第五章	超静定结构分析的力法(119)	
§ 5-1	力法的基本原理	119
§ 5-2	在多种外因作用下的力法分析	124
§ 5-3	力法分析示例	130
§ 5-4	力法分析中的对称性利用	140
§ 5-5	超静定结构位移计算	152
§ 5-6	力法计算的校核	156
§ 5-7	交叉梁系分析	159
§ 5-8	超静定简单空间刚架分析	163
§ 5-9	超静定拱的分析	165
§ 5-10	小结	178
习题		179
第六章	超静定结构分析的位移法(183)	
§ 6-1	位移法的基本概念	183
§ 6-2	等截面直杆的杆端力——杆端位移方程	186
§ 6-3	位移法按转角位移方程的直接解法	190
§ 6-4	位移法按建立基本结构的经典解法	197
§ 6-5	位移法分析示例	202
§ 6-6	适用于电脑运算的矩阵位移法	216
§ 6-7	局部坐标系下的单元刚度矩阵	221
§ 6-8	结构坐标系下的单元刚度矩阵	225
§ 6-9	由单元刚度矩阵组集结构原始刚度矩阵	227
§ 6-10	关于支座约束条件的处理方法	233
§ 6-11	关于非结点荷载的变换方法	235
§ 6-12	矩阵位移法分析示例	239
§ 6-13	矩阵位移法的子结构分析法	251
§ 6-14	矩阵位移法中的注意事项	261
§ 6-15	位移法的渐近计算——力矩分配法	267
§ 6-16	借助力矩分配法计算有侧移的刚架	285
§ 6-17	无剪力分配法	289
§ 6-18	小结	293
习题		294
第七章	框架剪力墙结构分析(298)	
§ 7-1	概述	298
§ 7-2	剪力墙单元的刚度矩阵	299
§ 7-3	带有刚域梁单元的刚度矩阵	301

§ 7-4	带有剪力墙的平面框架分析法	303
§ 7-5	剪力墙结构的三维分析法	305
§ 7-6	框剪结构的近似分析法	315
§ 7-7	小结	322
习题		322
第八章	影响线及其应用(324)	
§ 8-1	影响线的概念	324
§ 8-2	用静力法作静定梁的影响线	325
§ 8-3	间接荷载作用下的影响线	332
§ 8-4	机动法作影响线	333
§ 8-5	桁架的影响线	336
§ 8-6	三铰拱的影响线	341
§ 8-7	标准荷载制	344
§ 8-8	利用影响线求最不利荷载位置	346
§ 8-9	简支梁的内力包络图和绝对最大弯矩	355
§ 8-10	位移影响线	360
§ 8-11	超静定结构影响线概述	362
§ 8-12	小结	367
习题		368
第九章	结构动力分析(375)	
§ 9-1	概述	375
§ 9-2	结构动力计算简图和动力自由度	378
§ 9-3	建立体系运动微分方程的常用方法	381
§ 9-4	单自由度体系运动方程的建立方法	382
§ 9-5	单自由度体系的自由振动	388
§ 9-6	单自由度体系的强迫振动	396
§ 9-7	多自由度体系	413
§ 9-8	多自由度体系的自由振动	418
§ 9-9	多自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动	428
§ 9-10	多自由度体系在一般荷载作用下的强迫振动	434
§ 9-11	无限自由度体系的自由振动	440
§ 9-12	计算频率的近似法	443
§ 9-13	小结	448
习题		449
第十章	结构的稳定性分析(455)	
§ 10-1	概述	455
§ 10-2	用静力法确定临界荷载	460
§ 10-3	确定临界荷载的能量法	479

§ 10-4	小结	493
习题		494
第十一章	梁和刚架的塑性分析与极限荷载(496)	
§ 11-1	概述	496
§ 11-2	极限弯矩	497
§ 11-3	简支梁的塑性分析与塑性铰	499
§ 11-4	超静定梁的极限荷载概念	501
§ 11-5	矩形门式框架的极限荷载概念	503
§ 11-6	小结	508
习题		508
第十二章	平面问题的有限元分析法(510)	
§ 12-1	概述	510
§ 12-2	三角形单元的刚度矩阵	515
§ 12-3	结构的原始刚度矩阵	525
§ 12-4	支承条件的引入	528
§ 12-5	非结点荷载的处理	529
§ 12-6	主应力计算及计算结果	532
§ 12-7	矩形单元	534
§ 12-8	小结	539
习题		539
习题答案(541)		
主要参考书目(552)		
主编简介(553)		

第一章 绪 论

§ 1-1 结构分析与结构设计

建筑物或其他工程构筑物中用以支承或传递荷载的骨架部分称为结构。如房屋建筑中的梁柱体系,土木工程中的桥梁、隧道和涵洞,以及水利工程中的水坝、闸门等,都是结构的典型例子。

结构分析主要是研究结构遭遇某种外界因素(如荷载或广义荷载)作用时,结构所产生的以内力和变形为主要量值的分析方法。结构分析是工程力学中的一个重要组成部分。

结构分析也是结构设计过程中的一项必不可少的工作,二者联系十分密切。结构工程师的主要任务是通过计算、分析、合理地实现结构预期的功能,使所设计的结构物能够安全地承受各种可能遇到的外因作用。通过结构分析取得的内力和变形等数据,为下一步对构件进行截面设计提供依据。如对于静定结构,情况比较简单,当荷载、结构外形尺寸和约束形式给定后,根据静力平衡方程,即可完全确定结构的内力,进而确定结构中各构件的截面尺寸。然而,对于工程中大量采用的超静定结构,情况就不那样简单。结构的内力分布除了须满足静力平衡条件外,还需要满足变形条件和物理条件。结构的内力分布与各构件的刚度发生了关系。因此,超静定结构的计算和设计,需要经历一个迭代和逐步修改的过程。工程师根据经验,先拟定结构各构件的初始截面尺寸,然后进行结构分析,求得第一次的结构内力,据此算出经过修正后的各构件截面尺寸,并替换初始截面尺寸。然后,再进行结构分析,算得下一次的内力分布和相应的构件截面尺寸。在上述迭代与修改截面尺寸的过程中,不仅需要对结构内力、变形等量值反复计算,而且要对计算结果进行对比、分析,直至符合工程设计要求为止。由此可见,掌握正确的结构分析方法,是进行结构设计的重要基础。

§ 1-2 计算机对结构分析的影响

20 世纪 50 年代以来,由于计算机应用的迅速发展和普及,特别是结构分析方法通过矩阵代数与电子数字计算机成功地结合后,对结构分析研究领域产生了十分深远的影响。

如前所述,对于超静定结构计算和设计中需要经历的迭代和逐步修改截面尺寸的过程,实际上是一种重复性的计算工作。如能将这种计算过程编制成可以控制的计算机程序,并由计算机来完成这一迭代和修改过程,则可使结构设计人员从繁重的数字计算工作中解脱出来,将更多的精力和时间用于对所拟各种设计方案的比较和研究上,并在最后作出一个较佳方案。显然,计算机的应用会给工程结构设计带来巨大的经济效益。20 世纪 70、80 年代,我国在改革开放的政策下,计算机技术得到迅速地发展和普及,结构分析的计算机方法相继解决了许多大型、复杂结构的计算问题,促进形成了诸如结构矩阵分析、有限单元法等力学分支。

结构分析中引入计算机方法,对高等学校工科结构力学课程教学内容的革新起了促进的作用。结构分析的基本理论和基本方法仍然是结构力学课程教学内容的‘根’,将理论与计算机方法结合起来,可以使教学内容不断地向叶茂根深方向发展。

同时,结构分析中的基本和常用的手工解法,仍不应轻视。因为这些方法不仅在无法提供计算机的场合下有其使用价值,而且在对结构作出初步估算,或者有必要对经过计算机方法求得的结果进行定性校核时都是有用的。

§ 1-3 结构的计算简图和分类

1-3-1 结构的计算简图

在结构分析中,完全按照结构的实际情况进行力学分析是不可能和不必要的。这是由于实际结构的复杂性和工程设计要求所决定的。因此,在对实际结构进行分析之前必须加以简化,略去相对次要的因素与作用,保留反映结构行为的基本特点,用一个简化的计算图形代替实际结构。这种图形称为结构计算简图。

例如,图 1-1a 所示两端支承于墙体上的梁,荷载通过上层立柱传递给梁。对于这样一个简单的结构,如果要完全按照实际情况进行分析,则首先遇到的问题是梁两端反力的作用位置和由立柱传来的荷载作用在梁上的位置难以确定,原因是梁与墙、梁与柱之间的作用力的分布规律难以准确掌握。现进行简化,假设上述两处受力为均匀分布,其合力分别作用于墙和立柱的中心线位置,于是得到如图 1-1b 所示用轴线表示的梁的计算简图。当然,这种简化的前提是墙与梁、柱与梁之间的接触宽度应比梁的长度小很多,且梁的截面尺寸也比梁的长度小很多。

选择结构计算简图是结构分析的首要工作,极为重要。正确地解决这个问题

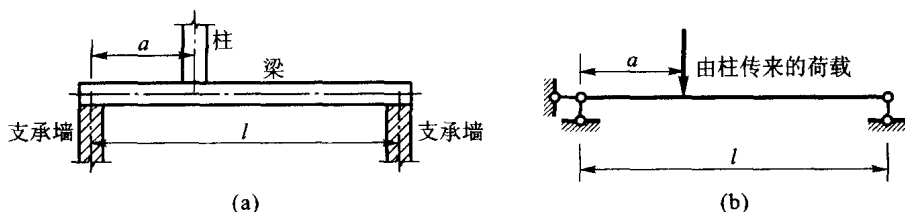


图 1-1

题,要有比较丰富的结构设计经验,对结构构造、施工等各方面具备较宽的知识面,并且对结构各部分的受力情况具有正确的定性判断能力。选取结构计算简图的原则,一方面要能反映实际结构的主要受力性能,另一方面又必须略去一些次要因素,使计算得到简化。对实际结构进行简化,通常包括对结构体系的简化、对实际支座的简化和对构件(杆件)与构件相互联结处(称为结点)的简化。

有时,同一结构在不同的计算阶段需要采用不同的计算简图。在初步设计中为了估算构件的截面尺寸,采用一个比较粗略而计算简单的计算简图,而在最终设计阶段,则采用较为精确的计算简图。特别是在具备计算机的条件下,就可以采用较精确的计算简图进行结构分析。

把结构与基础或其他支承物(如墩台)联结起来用以固定结构的位置,并将结构上的荷载传至支承物或地基的装置称为支座。支座对结构的反作用力称为支座反力。

平面结构常用的支座有如下四种:

1. 滚轴支座(也称滑动铰支座)

图 1-2a 表示这种支座的构造示意图。上部结构(如桥跨)与支座的上摆 B 一起,可以绕柱形铰 A 转动,其下摆 C 与支承面 $m-n$ 之间装有滚轴,因而可以沿支承面水平移动,但不允许 A 点发生垂直于支承面方向的位移。这种支座的反力一定通过铰 A 中心,并与支承面 $m-n$ 互相垂直,因此支座反力 F_{Ay} 的方向和作用点是确定的。图 1-2b 表示用一根支座链杆(简称支杆)表示的滚轴支座计算简图。支杆中的内力等于该支座反力 F_{Ay} 的大小。图 1-2c 为这种支座的相应示力图。

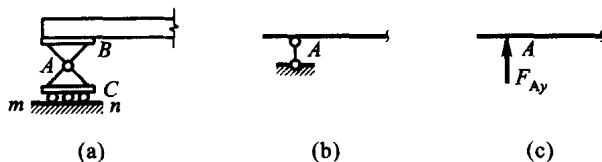


图 1-2