



面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century

结构力学教程(I)

龙驭球 包世华 主编
龙驭球 包世华 匡文起 袁 驷 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

结构力学教程(I)

龙驭球 包世华 主编
龙驭球 包世华 匡文起 袁 驷 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

结构力学教程(I)/龙驭球,包世华主编;龙驭球等编著.
—北京:高等教育出版社,2000.7(2001 重印)

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-04-008630-1

I. 结… II. ①龙…②包… III. 结构力学-高等学校
教材 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 18765 号

结构力学教程(I)

龙驭球 包世华 主编

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

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.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 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 2000 年 7 月第 1 版

印 张 33.75

印 次 2001 年 7 月第 3 次印刷

字 数 590 000

定 价 36.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

序

教材建设是一项需要长期积累而又不断翻新的工作,既要锲而不舍、精益求精,又要善于探索、有所创新。本书是在清华大学四十多年结构力学教材建设和近几年教学改革实践的基础上编写的,主要想在以下几个方面作些新的尝试和安排:

一、由一本书扩充为三书鼎立。由于结构力学计算机化的进程日新月异,以及在计算机化的形势下结构定性分析的能力培养日益显得更为重要,因此除编写一本“结构力学教程”侧重于经典结构力学的基本理论和基本方法外,还拟编写两本配套教材,即“程序结构力学”和“定性结构力学”,分别侧重于计算机方法和定性分析方法。三书鼎立,相互呼应,以期适应新世纪、新形势的新要求。

二、为计算机化提供新的基础知识和新工具。在为矩阵位移法配置的计算机程序方面,有 FORTRAN 77 程序, Fortran 90 程序。此外,还引入作者教学和科研成果《结构力学求解器》作为新工具,提高解算大型结构、复杂结构的例题、习题的能力,开拓教学内容的广度和深度,利用动画显示,提高对结构性能的感性认识。

三、将虚功—能量方法贯通全书,提高理论水平。以前的结构力学教材也讲一点虚功—能量方法,但讲得太晚,太集中,学与用离得太远。针对这种情况,本书改为“提前讲、分段讲、就近用”的作法,以便收到“由浅入深、分散难点、学了就用、便于生根”的效果,从而进一步提高理论水平。计算机化不仅不排斥力学理论,而是更加需要力学理论的指导,呼唤力学理论的深化。

四、注意培养思维能力和科学素质。为了把力学方法上升到方法论的高度,在书中专门写了四节:

- 方法论(1)——学习方法(第1章)。
- 方法论(2)——静定结构部分(第6章)。
- 方法论(3)——超静定结构部分(第12章)。
- 方法论(4)——结构力学之道(最后一章)。

为了指导学习和启发思考,专门写了两章“总论”,分别对静定结构和超静定

结构两大部分内容进行融会贯通的梳理和开阔视野的指点;几乎每一章都专门写了“小结”和“思考与讨论”两节,引导读者跨进更广的思考空间。

五、适当更新内容。除了删去和压缩比较陈旧的内容外,还注意扩大专业覆盖面,新加悬索、空间结构等内容,适当介绍一些科研成果,包括作者新近的部分学术成果。

总的来说,“守本翻新”是本书的编写方针。守本,是指继续保持“打好基础,脉络清晰,理论联系实际,符合认识规律”的编写风格。翻新,是指进行一些经过初步实践的新尝试,包括上面提到的五点。

本书内容各校可根据具体教学要求选用,带*号者为选学、提高内容。

本书稿请西安建筑科技大学刘铮教授和东南大学单建教授审阅,在审阅中提了不少宝贵意见。清华大学雷钟和教授提供了本书部分思考题及习题,张玉良副教授提供了 FORTRAN 77 程序的初稿。作者谨向他们表示衷心的感谢。

欢迎批评,恳请指正。

作 者

1999 年冬于清华园

本书符号表说明

为了深入贯彻国家技术监督局发布的国家标准(GB 3100~3102—93)《量和单位》,本书对结构力学符号和单位的传统用法作了调整,既保证了对国家标准的认真实施,又考虑了教师和学生使用上的习惯与方便。

在实施国家标准的过程中,为保证国家标准和现有惯例的衔接,本书作了认真的考虑,现作如下说明,请读者注意。

1. 国家标准规范的物理量、名称和符号,按国家标准使用,注重量的物理属性。如,旧称剪应变(剪切角) γ ,现改称切应变;又如,各种力(包括荷载、反力和内力)都用 F 作为主符号,而将其特性以下标(上标)表示;等等。

2. 对于在结构力学中广泛使用的广义力(包括力与力偶矩、力矩)和广义位移(包括线位移与角位移),为了体现其广义性(有时还有未知性),考虑到全书叙述的统一和表达的简洁、完整,本书仍沿用 X (多余力未知力)、 Δ 和 δ (位移)、 c (支座位移)等广义物理量。至于它们在具体问题中对应的量和相应单位,则视具体问题而定。

3. 在结构力学中经常应用“单位量”的概念,如单位力 $X=1$,单位荷载 $F_p=1$,单位位移 $\Delta=1$ 等。现以单位力 $X=1$ 为例加以说明。单位力 $X=1$ 是一种简称,详细地说,是指数值为 1 而其量纲指数都为零(量纲并不为零,量纲为一)的特定广义力 $\overline{X}=1$ (这里, $\overline{X}$ 与 X 在数值上相等,但量纲不同。 $\overline{X}$ 是一个量纲一的量,以前称为无量纲量)。单位量的概念主要用于求比例系数(或称影响系数)。仍以力 X 引起某量 M 的情况为例,二者的比例系数为 $\overline{M}=\frac{M}{X}$ 。在线性问题中,比例系数是一个重要的概念。

4. 本教材中某些符号及有关公式运算中的单位表示,考虑以往教材的习惯和结合工程实际运算的方便,作了必要的处理。具体情况在本教材的相应处已有说明。

主要符号表

A	面积
a	振幅
A_ϵ	应变能密度
B_a	应变余能密度
c	支座广义位移、粘滞阻尼系数
C	弯矩传递系数
c_{cr}	临界阻尼系数
d	结间距离
E	弹性模量
f	矢高、工程频率
F_p	集中荷载
$\mathbf{F}_p$	荷载向量
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_{N_x}, F_{N_y}	水平(x)、垂直(y)方向的分轴力
F_Q	剪力
F_Q^L, F_Q^R	截面左、右的剪力
F_Q^F	固端剪力
F_{Pe}	欧拉临界荷载
F_{Per}	临界荷载
F_{Pu}	极限荷载
F_P^I	可破坏荷载
F_P	可接受荷载
F_e	弹性力
F_I	惯性力
F_c	阻尼力

F_R	广义反力、反力合力
$\bar{F}^e$	局部坐标系下单元杆端力向量
F^e	整体坐标系下单元杆端力向量
$\bar{F}^{Fe}$	局部坐标系下单元固端力向量
F^{Fe}	整体坐标系下单元固端力向量
G	切变模量
i	线刚度
I	惯性矩
$\mathbf{I}$	单位矩阵
k	刚度系数、切应力分布不均匀系数
$\bar{k}^e$	局部坐标系下单元刚度矩阵
k^e	整体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_u	极限弯矩
M_e	弹性极限弯矩
N	形函数矩阵
p	均布荷载集度
P	广义荷载、广义力
P^e	单元结点荷载向量
P	结构结点荷载向量
q	均布荷载集度
R	半径
r	半径、反力影响系数
S	转动刚度
t	时间
T	周期、动能
$\mathbf{T}$	坐标转换矩阵
U	应变能
u	水平位移
v	竖向位移、挠度、速度
V	应变余能

W	功、计算自由度、弯曲截面系数
X	广义未知力、广义多余未知力
Y	位移幅值向量、主振型向量、主振型矩阵
y	位移
Z	影响线量值
α	线膨胀系数、初相角
β	动力系数
Δ	广义未知位移
Δ	位移向量
Δ'	单元杆端位移向量
δ	柔度系数、位移影响系数
ϵ	线应变
μ	力矩分配系数
κ	曲率
φ	弦转角
γ_0	平均切应变
θ	截面的转角、干扰力频率
ξ	阻尼比
σ_b	强度极限
σ_s	屈服应力
σ_u	极限应力
ω	圆频率

责任编辑	余美茵
封面设计	张楠
责任绘图	朱静
版式设计	周顺银
责任校对	马桂兰
责任印制	杨明

内 容 提 要

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是面向 21 世纪课程教材和教育部工科力学“九五”规划教材。本书是在清华大学四十多年结构力学教材建设和近年教学改革实践基础上,为高等学校土建、水利、道桥、力学等专业结构力学课程编写的新教材。

全书共 16 章,分为(Ⅰ)、(Ⅱ)两册。第(Ⅰ)册共 9 章,主要包括静定结构部分,超静定结构部分等。第(Ⅱ)册共 7 章,主要包括矩阵位移法、能量原理以及动力、稳定、极限荷载计算等专题部分。本书为第(Ⅰ)册,并附有《结构力学求解器》软件光盘 1 张。

本书贯彻“守本翻新”的方针。守本,是指继续保持“打好基础,脉络清晰,理论联系实际,符合认识规律”的编写风格。翻新,是指进行一些经过初步实践的新尝试:将经典与现代方法融为一体,将虚功-能量方法贯通全书,讲点方法论提高科学素质,更新内容扩大专业覆盖面,引入结构力学计算机辅助分析计算软件《结构力学求解器》作为新工具。

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1-1 结构力学的学科内容和教学要求	1
§ 1-2 结构的计算简图及简化要点	4
§ 1-3 杆件结构的分类	9
§ 1-4 荷载的分类	10
§ 1-5 方法论(1)——学习方法	11
第 2 章 结构的几何构造分析	17
§ 2-1 几何构造分析的几个概念	18
§ 2-2 平面几何不变体系的组成规律	22
§ 2-3 平面杆件体系的计算自由度	28
§ 2-4 空间杆件体系的几何构造分析	32
§ 2-5 在求解器中输入平面结构体系	36
§ 2-6 用求解器进行平面体系的几何构造分析	42
§ 2-7 小结	46
§ 2-8 思考与讨论	48
习题	50

第一部分 静定结构

第 3 章 静定结构的受力分析	57
§ 3-1 梁的内力计算的回顾	57
§ 3-2 静定多跨梁	64
§ 3-3 静定平面刚架	68
§ 3-4 静定空间刚架	79
§ 3-5 静定平面桁架	83
§ 3-6 静定空间桁架	97
§ 3-7 组合结构	103
§ 3-8 三铰拱	108

* § 3-9 悬索结构	121
* § 3-10 用求解器确定截面单杆	127
* § 3-11 用求解器求解组合结构	131
§ 3-12 小结	134
§ 3-13 思考与讨论	135
习题	137
第4章 静定结构总论	153
§ 4-1 隔离体方法及其截取顺序的优选	153
§ 4-2 几何构造分析与受力分析之间的对偶关系	157
§ 4-3 零载法	160
§ 4-4 刚体体系的虚功原理	162
§ 4-5 静定结构的一般性质	172
§ 4-6 各种结构型式的受力特点	175
* § 4-7 用求解器求解一般静定结构	178
§ 4-8 小结	180
§ 4-9 思考与讨论	181
习题	182
第5章 影响线	186
§ 5-1 移动荷载和影响线的概念	186
§ 5-2 静力法作简支梁影响线	188
§ 5-3 结点荷载作用下梁的影响线	192
§ 5-4 静力法作桁架的影响线	195
§ 5-5 机动法作影响线	198
§ 5-6 影响线的应用	203
§ 5-7 铁路、公路的标准荷载制和换算荷载	212
* § 5-8 简支梁的包络图和绝对最大弯矩	219
* § 5-9 用求解器计算结构的影响线	223
§ 5-10 小结	226
§ 5-11 思考与讨论	227
习题	228
第6章 结构位移计算与虚功—能量法简述	234
§ 6-1 应用虚力原理求刚体体系的位移	235
§ 6-2 结构位移计算的一般公式	240
§ 6-3 荷载作用下的位移计算	247
§ 6-4 荷载作用下的位移计算举例	251

§ 6-5 图乘法	257
§ 6-6 温度作用时的位移计算	265
§ 6-7 用求解器进行位移计算	267
§ 6-8 变形体的虚功原理	269
§ 6-9 应变能与应变余能	275
§ 6-10 能量偏导数定理	283
§ 6-11 互等定理	287
§ 6-12 位移影响线	291
§ 6-13 方法论(2)——静定结构部分	292
§ 6-14 小结	297
§ 6-15 思考与讨论	300
习题	304

第二部分 超静定结构

第 7 章 力法	315
§ 7-1 超静定结构的组成和超静定次数	315
§ 7-2 力法的基本概念	318
§ 7-3 超静定刚架和排架	325
§ 7-4 超静定桁架和组合结构	331
§ 7-5 对称结构的计算	336
§ 7-6 两铰拱	342
§ 7-7 无铰拱	349
§ 7-8 由卡氏定理推导力法方程	359
§ 7-9 支座移动和温度改变时的计算	364
§ 7-10 超静定结构位移的计算	372
§ 7-11 超静定结构计算的校核	375
§ 7-12 用求解器进行力法计算	378
§ 7-13 小结	380
§ 7-14 思考与讨论	381
习题	384

第 8 章 位移法	393
§ 8-1 位移法的基本概念	393
§ 8-2 等截面杆件的刚度方程	397
§ 8-3 无侧移刚架的计算	404
§ 8-4 有侧移刚架的计算	408

§ 8-5 位移法的基本体系	417
§ 8-6 对称结构的计算	422
§ 8-7 支座位移和温度改变时的计算	427
§ 8-8 小结	431
§ 8-9 思考与讨论	432
习题	435
第 9 章 渐近法及超静定力的影响线	443
§ 9-1 力矩分配法的基本概念	443
§ 9-2 多结点的力矩分配	450
§ 9-3 对称结构的计算	458
§ 9-4 无剪力分配法	461
§ 9-5 力矩分配法与位移法的联合应用	469
§ 9-6 超静定力的影响线	472
§ 9-7 连续梁的最不利荷载分布及内力包络图	477
§ 9-8 用求解器求解一般的超静定结构	481
§ 9-9 小结	483
§ 9-10 思考与讨论	484
习题	486
附录 A 《结构力学求解器》(学生版)介绍	494
附录 B 习题答案	503
附录 C 索引	515
主要参考书目	520
主编简介	521
编者简介	523

第1章

绪论

§ 1-1 结构力学的学科内容和教学要求	§ 1-4 荷载的分类
§ 1-2 结构的计算简图及简化要点	* § 1-5 方法论(1)——学习方法
§ 1-3 杆件结构的分类	

§ 1-1 结构力学的学科内容和教学要求

1. 结构

建筑物和工程设施中承受、传递荷载而起骨架作用的部分称为工程结构,简称为结构。房屋中的梁柱体系,水工建筑物中的闸门和水坝,公路和铁路上的桥梁和隧洞等,都是工程结构的典型例子。

从几何角度来看,结构可分为三类:

(1) 杆件结构——这类结构是由杆件所组成。杆件的几何特征是横截面尺寸要比长度小得多。梁、拱、桁架、刚架是杆件结构的典型形式。

(2) 板壳结构——这类结构也称为薄壁结构。它的厚度要比长度和宽度小得多。房屋中的楼板和壳体屋盖、水工结构中的拱坝都是板壳结构。

(3) 实体结构——这类结构的长、宽、厚三个尺度大小相仿。水工结构中的重力坝属于实体结构。

狭义的结构往往指的就是杆件结构,而通常所说的结构力学就是指杆件结构力学。

2. 结构力学的研究对象

结构力学与理论力学、材料力学、弹塑性力学有密切的关系。理论力学着重讨论物体机械运动的基本规律,其余三门力学着重讨论结构及其构件的强度、刚度、稳定性和动力反应等问题,其中材料力学以单个杆件为主要研究对象,结构力学以杆件结构为主要研究对象,弹塑性力学以实体结构和

板壳结构为主要研究对象。

结构力学的任务是根据力学原理研究在外力和其他外界因素作用下结构的内力和变形,结构的强度、刚度、稳定性和动力反应,以及结构的组成规律。具体地说,包括以下几个方面:

- (1) 讨论结构的组成规律和合理形式,以及结构计算简图的合理选择。
- (2) 讨论结构内力和变形的计算方法,进行结构的强度和刚度的验算。
- (3) 讨论结构的稳定性以及在动力荷载作用下的结构反应。

结构力学问题的研究手段包含理论分析、实验研究和数值计算三个方面。实验研究方法的内容在实验力学和结构检验课程中讨论,理论分析和数值计算方面的内容在结构力学课程中讨论。

在结构分析中,首先把实际结构简化成计算模型,称为结构计算简图;然后再对计算简图进行计算。结构力学中介绍的计算方法是多种多样的,但所有各种方法都要考虑下列三方面的条件:

- (1) 力系的平衡条件或运动条件。
- (2) 变形的几何连续条件。
- (3) 应力与变形间的物理条件(或称为本构方程)。

结构力学的基本解法是直接运用上述三方面条件进行解算的,可称为“平衡-几何”解法。这些解法如果采用虚功和能量形式来表述,则称为“虚功-能量”解法。

电子计算机的出现,对结构力学学科产生了巨大的影响。过去由于缺乏现代化的计算手段,结构分析都是靠“手算”。现在情况不同了,过去无法解算的许多大型结构计算问题,现在已经成为“电算”中的常规问题。“电算”提高了结构力学解决问题的能力,同时也对结构力学提出了新的要求,即“电算”方法必须适应“电算”的特点。因此,一些与“电算”关系密切的内容,例如能量原理、结构矩阵分析、有限元法、半解析法、结构分析软件、结构优化设计等,已经在结构力学中占据愈来愈重要的地位,在结构力学学科领域里形成了一个新的分支学科——计算结构力学。这就是借助计算机采用数值方法解决结构力学问题的一个分支学科。

3. 课程教学中的能力培养

在《结构力学课程教学基本要求》中提出了关于分析能力、计算能力、自学能力和表达能力的培养要求。其要点如下:

(1) 分析能力

在结构力学课程中要培养多方面的分析能力,例如:

选择结构计算简图的能力——如何对实际结构进行“删繁就简”,确定其计算简图,这是进行结构力学计算的第一步。在结构力学课程中要初步