

结构力学



蒋玉川 徐双武 胡耀华 编著



科学出版社
www.sciencep.com

0342
718
1=

结 构 力 学

蒋玉川 徐双武 胡耀华 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书根据土木工程、水利工程和工程力学专业的教学大纲要求,针对土木工程、水利工程和工程力学专业的特点而编写。全书共分 10 章,主要包括:绪论及体系的几何构造分析;各类静定结构的内力计算和静定结构的位移计算;静定梁、刚架、桁架的影响线的作法;用力法、位移法和渐进法计算超静定结构在荷载、温度及支座移动下的内力;利用矩阵位移法计算杆系结构;单自由度和多自由度的自由振动和受迫振动,阻尼力对振动的影响,多自由度体系的主振型的正交性以及振型分解法。第 9 章用 Fortran90 语言编写了平面刚架的上机程序和程序说明。

本书可供高等工科院校土木工程、水利工程及工程力学专业作教材,也可供其他工科院校相关专业选用。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学/蒋玉川,徐双武,胡耀华编著. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-022681-5

I. 结… II. ①蒋… ②徐… ③胡… 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(2008)第 117252 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:柏连海

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

竣工印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 8 月第一次印刷 印张: 29 3/4

印数: 1—4 000 字数: 577 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(HA08)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

结构力学是土木工程、水利工程和工程力学专业的一门必修的专业基础课,特别是在土木工程、水利工程和工程力学专业的专业培养中具有重要的地位。本书结合上述专业的教学大纲要求,针对土木工程、水利工程和工程力学专业的特点而编写,主要介绍杆系结构静力计算和动力计算的原理和方法以及各类结构的受力性能,以培养学生的结构分析计算能力。全书共分 10 章,主要包括:绪论及体系的几何构造分析;各类静定结构的内力计算和静定结构的位移计算;静定梁、刚架、桁架的影响线的作法;用力法、位移法和渐进法计算超静定结构在荷载、温度及支座移动下的内力;利用矩阵位移法计算杆系结构;单自由度和多自由度的自由振动和受迫振动,阻尼力对振动的影响,多自由度体系的主振型的正交性以及振型分解法。第 9 章用 Fortran90 语言编写了平面刚架的上机程序和程序说明。

本书的主要特点是在内容和语言上力求精练,除加强对传统手算和基本方法的训练外,还介绍了结构矩阵分析方法,对各种现代结构形式、受力特点、适用范围充分地接触、了解,起到抛砖引玉和打开窗口的效果。另外,本书除了突出土木工程、水利工程专业的特点外,在具体的解题方法上力求有所创新,体现了编者在长期结构力学教学和科研中的体会和经验。

本书可以供高等工科院校土木工程、水利工程及工程力学专业作为教材,也可供其他相关专业选用。讲授完本教材需要 90~100 学时,上机实习需要 10 个机时。

本书由四川大学蒋玉川教授任主编。蒋玉川教授负责编写第 3、4、6、7、10 章,四川大学徐双武老师负责编写 8、9 章,四川大学胡耀华副教授负责编写第 1、2、5 章。西华大学陈辉老师参加了第 3、4、6、7、10 章的编写。在编写本教材的过程中,四川大学的王启智教授、王清远教授、张建海教授、于建华教授、李章政教授和张新培教授提出了宝贵的意见,作者特在此对他们表示感谢。

主要符号

A	面积
a	振幅
c	支坐位移、粘滞阻尼系数
c_{cr}	临界阻尼系数
d	结间距离
D	修正后柱的抗侧刚度
E	弹性模量
f	拱高的矢高、频率
F_P	集中荷载
$F_P(t)$	动荷载
$F_e(t)$	等效动荷载
F_H	水平推力
F_x, F_y	集中荷载在水平(x)、竖向(y)的分力
F_N	轴力
F_{Nx}, F_{Ny}	轴力在水平(x)、竖向(y)的分力
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_{Pcr}	临界荷载
F_s	弹性力
F_I	惯性力
F_b	阻尼力
F_R	广义反力的合力
$\bar{F}^e$	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
G	切变模量
i	线刚度
I	惯性矩
$\mathbf{I}$	单位矩阵
k	刚度系数, 剪力分布不均匀系数

$\bar{k}^e$	局部坐标系下的单元刚度矩阵
k^e	整体坐标系下的单元刚度矩阵
K	结构刚度矩阵
l	杆长
m	质量
$\bar{m}$	线分布质量
M	质量矩阵
M	力矩, 力偶矩, 弯矩
M^F	固端弯矩
M^u	分配弯矩
M^c	传递弯矩
n	转速
N	形状函数
q	均布荷载集度
r	半径, 单位结点位移在附加联系中引起的约束力或约束力偶
S	转动刚度
t	时间
T	周期
T	坐标转换矩阵
U	弹性应变能
V	内力的功
W	外力的功, 计算自由度, 抗弯截面模量
u	水平位移
v	竖向位移、挠度
X	广义未知力, 广义多余未知力
Y	位移幅值向量
y	位移
$\dot{y}$	速度
$\ddot{y}$	加速度
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_{st}	静力位移

δ	柔度系数
ϵ	线应变
γ	切应变
γ_0	平均切应变
μ	力矩分配系数
k	曲率
φ	弦转角
θ	截面转角
ξ	阻尼比
ω	圆频率

目 录

前言

主要符号

第 1 章 绪论	1
1.1 结构力学的研究对象和基本任务	1
1.2 结构的计算简图和结构的分类	2
1.2.1 结构的计算简图	2
1.2.2 结构的分类	7
1.3 荷载及其分类	9
1.4 结构力学的学习方法	9
第 2 章 平面体系的几何构造分析	11
2.1 概述	11
2.1.1 自由度	12
2.1.2 约束	12
2.1.3 多余约束	14
2.1.4 瞬铰	14
2.1.5 体系的计算自由度	15
2.2 平面几何不变体系的组成规则	16
2.2.1 两刚片的组成规则	16
2.2.2 三刚片的组成规则	17
2.2.3 二元体规则	18
2.3 瞬变体系	18
2.4 几何组成分析举例	20
2.5 体系的几何构造分析与静定特性的关系	22
2.6 小结	24
习题	25
第 3 章 静定结构的内力分析	29
3.1 单跨静定梁的内力图	29
3.1.1 梁内任意截面上的内力	29
3.1.2 荷载与内力之间的微分关系	30
3.1.3 荷载与内力之间的积分关系	31

3.1.4	用叠加法作弯矩图	32
3.1.5	斜梁的内力图	34
3.2	多跨静定梁的内力图	37
3.3	静定平面刚架的内力图	41
3.3.1	刚架的特点及应用	41
3.3.2	刚架的内力计算	42
3.4	三铰拱的反力和内力计算	50
3.4.1	拱式结构的特点及应用	50
3.4.2	三铰拱的反力计算	52
3.4.3	三铰拱的内力计算	53
3.4.4	三铰拱的压力线	56
3.4.5	三铰拱的合理轴线	58
3.5	静定平面桁架的内力计算	62
3.5.1	桁架的特点和组成	62
3.5.2	结点法、截面法及其联合应用	64
3.5.3	对称条件的利用	73
3.5.4	复杂桁架的计算	75
3.6	静定组合结构计算	77
3.7	静定结构的特性	79
3.7.1	温度变化、支座移动及制造误差等在静定结构中不会引起内力	79
3.7.2	静定结构的局部平衡特性	80
3.7.3	静定结构的等效荷载变换特性	81
3.7.4	静定结构的构造变换特性	82
3.8	用零载法判断体系的几何组成属性	83
3.9	小结	84
	习题	86
第4章	静定结构的影响线	94
4.1	移动荷载和影响线的概念	94
4.2	静力法作影响线	95
4.2.1	支座反力影响线	95
4.2.2	剪力影响线	95
4.2.3	弯矩影响线	96
4.3	机动法作影响线	101
4.4	结点荷载作用下简支主梁的影响线	108
4.4.1	M_C 的影响线	108

4.4.2	M_D 的影响线	108
4.4.3	F_{QD} 的影响线	108
4.5	静力法作桁架的影响线	111
4.5.1	杆 bc 的影响线	112
4.5.2	杆 CD 的影响线	112
4.5.3	竖杆 cC 的影响线	113
4.5.4	竖杆 dD 的影响线	113
4.6	影响线的应用	114
4.6.1	利用影响线求影响量值	114
4.6.2	求荷载的最不利位置	115
4.6.3	临界位置的判定	116
4.7	铁路、公路的标准荷载和换算荷载	120
4.7.1	铁路标准荷载	120
4.7.2	公路标准荷载	121
4.7.3	换算荷载	123
4.8	简支梁的绝对最大弯矩和内力包络图	128
4.8.1	简支梁的绝对最大弯矩	128
4.8.2	简支梁的内力包络图	131
4.9	小结	132
	习题	132
第 5 章	静定结构的位移计算与虚功原理	138
5.1	结构位移计算概述	138
5.2	实功原理	139
5.2.1	外力实功	140
5.2.2	内力实功和变形位能	140
5.3	虚功原理	143
5.3.1	虚功原理	143
5.3.2	虚功原理的应用(虚位移原理与虚力原理)	144
5.4	平面杆件结构位移计算的一般公式——单位荷载法	147
5.5	静定结构在荷载作用下的位移计算	149
5.6	图乘法	154
5.7	静定结构在温度变化和支座移动所引起的位移计算	160
5.7.1	由于温度变化引起的位移	160
5.7.2	由于支座移动引起的位移	162
5.8	互等定理	163

5.8.1 功的互等定理	163
5.8.2 位移互等定理	164
5.8.3 反力互等定理	165
5.8.4 反力与位移互等定理	166
5.9 小结	166
习题	167
第 6 章 力法	171
6.1 超静定结构概述	171
6.2 力法中超静定次数的确定	173
6.3 力法基本原理及典型方程式	175
6.3.1 力法的基本原理	175
6.3.2 力法的典型方程	177
6.4 用力法计算超静定梁、刚架、桁架、排架及组合结构	180
6.4.1 超静定梁和刚架	180
6.4.2 超静定桁架	189
6.4.3 超静定组合结构和排架	192
6.5 结构对称性的利用	196
6.5.1 选取对称的基本结构	197
6.5.2 取半边结构计算	203
6.6 两铰拱	209
6.7 无铰拱	214
6.7.1 确定拱截面尺寸	214
6.7.2 弹性中心法	215
6.7.3 总和法	219
6.8 超静定结构的位移计算	225
6.9 超静定结构内力图的校核	226
6.9.1 平衡条件的校核	226
6.9.2 位移条件的校核	227
6.10 温度变化和支座位移时的计算	229
6.10.1 温度变化时超静定结构的计算	229
6.10.2 支座位移时超静定结构的计算	231
6.11 超静定结构的特征	237
6.11.1 温度和支座沉降等因素的影响	237
6.11.2 结构的刚度分布对结构内力的影响	237
6.11.3 多余约束的存在及其影响	238

6.12 小结	238
习题	239
第7章 位移法	246
7.1 位移法的基本概念	246
7.2 等截面直杆的转角位移方程	249
7.2.1 两端固定等截面直杆的转角位移方程	249
7.2.2 一端固定另一端铰支等截面直杆的转角位移方程	253
7.2.3 一端固定另一端定向支座等截面直杆的转角位移方程	254
7.3 位移法基本未知量的数目	254
7.4 应用转角位移方程建立位移法方程	257
7.5 位移法在对称结构中的改进和应用	263
7.6 位移法的基本体系和典型方程	266
7.6.1 确定基本未知量	266
7.6.2 建立位移法的基本体系	266
7.6.3 建立位移法方程	268
7.6.4 求系数 r_{11} 和自由项 R_{1P}	268
7.6.5 绘弯矩图	268
7.7 对称性的利用和位移法的进一步讨论	278
7.7.1 对称性的利用	278
7.7.2 杆轴线与支座链杆重合时的处理	279
7.7.3 静定部分的处理	280
7.7.4 静定剪力柱带来的简化	281
7.8 小结	289
习题	290
第8章 渐近法	295
8.1 概述	295
8.2 力矩分配法的基本原理	295
8.2.1 基本原理	295
8.2.2 基本要素	297
8.3 多结点的力矩分配法	302
8.4 利用力矩分配法计算无侧移超静定刚架	308
8.5 有侧移超静定刚架的计算方法	311
8.5.1 无剪力分配法	311
8.5.2 力矩分配法与位移法的联合应用	316
8.6 近似法	319

8.6.1 分层法	319
8.6.2 反弯点法	320
8.7 超静定结构的影响线及其应用	324
8.8 连续梁的最不利荷载分布及内力包络图	327
8.9 小结	330
习题	330
第9章 矩阵位移法	336
9.1 概述	336
9.2 单元刚度矩阵	337
9.2.1 局部坐标系(单元刚度矩阵)	337
9.2.2 单元刚度矩阵的性质和特殊单元	339
9.2.3 整体坐标系(单元刚度矩阵)	340
9.3 整体刚度矩阵	343
9.3.1 连续梁的整体刚度矩阵	343
9.3.2 刚架的整体刚度矩阵	348
9.4 等效结点荷载	352
9.5 矩阵位移法的解题步骤和算例	355
9.6 平面刚架程序设计和算例	362
9.6.1 平面刚架程序设计总框图与程序标识符说明	362
9.6.2 Fortran 90 语言编程简介	365
9.6.3 平面刚架源程序(Fortran 90 语言)	366
9.6.4 算例	375
9.7 小结	377
习题	378
第10章 结构动力计算	383
10.1 概述	383
10.1.1 结构动力计算的特点	383
10.1.2 动力荷载的分类	383
10.1.3 动力计算中体系的自由度	385
10.2 单自由度体系运动方程的建立	387
10.2.1 刚度法	388
10.2.2 柔度法	388
10.3 单自由度体系的自由振动	393
10.3.1 无阻尼自由振动	393
10.3.2 有阻尼自由振动	397

10.4	单自由度体系的强迫振动	401
10.4.1	无阻尼强迫振动	401
10.4.2	有阻尼强迫振动	411
10.5	多自由度体系的自由振动	416
10.5.1	刚度法	417
10.5.2	柔度法	428
10.6	多自由度体系主振型的正交性和主振型矩阵	435
10.6.1	主振型的正交性	435
10.6.2	主振型矩阵	439
10.7	多自由度体系在简谐荷载作用下的强迫振动	441
10.7.1	刚度法	441
10.7.2	柔度法	444
10.8	多自由度体系在一般动荷载作用下的强迫振动	448
10.9	小结	452
	习题	453
	主要参考文献	458

第 1 章 绪 论

1.1 结构力学的研究对象和基本任务

由若干简单构件(如杆件、板、壳等)按某种合理方式组成,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,各种地下洞室及支挡,以及水利工程中的水坝、闸门等,都是结构的典型例子。

结构力学以结构为研究对象,其基本任务是研究结构在外因(包括荷载、温度变化、支座移动、制造误差等)作用下的内力、变形和稳定的计算原理和计算方法以及结构的组成规律和合理形式。

结构力学的研究内容包括以下几个方面:探讨结构的组成规律和合理形式;研究结构在荷载等因素作用下所产生的内力;计算结构在荷载等因素作用下所引起的变形;讨论结构的稳定性以及在动力荷载作用下的结构反应。

进行强度和稳定计算的目的在于保证结构满足安全和经济的要求。计算刚度的目的在于保证结构不致发生实用上不能允许的过大变形。对于结构的强度、刚度和稳定,不仅在设计新的结构时需要进行计算,而且在建成的结构需要承受以往没有预计的荷载时也需要进行核算,以确定是否需要加固和如何加固。研究组成规律的目的是保证结构各部分不致发生相对运动,而能承受荷载并维持平衡。探讨结构的合理形式是为了有效地利用材料,使其性能得到充分发挥。

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。结构力学课程讨论理论分析和数值计算方面的内容。

结构力学知识与结构设计具有非常密切的联系。结构工程师的主要任务是通过分析、计算,合理地选择结构各部分的材料和截面尺寸,在实现结构预期功能的同时保证所设计的结构物能够安全地承受各种可预见的外因作用,根据结构力学的计算原理和方法进行结构分析,并取得有关的内力和位移等数据,为下一步对结构各部件(简称构件)进行截面设计提供依据。由此可见,掌握和熟练运用结构力学知识,是顺利进行结构设计的重要基础。

1.2 结构的计算简图和结构的分类

1.2.1 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,因为这是由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。

计算简图是对结构进行力学分析的依据。选择结构的计算简图是结构分析的首要工作,极为重要。要正确地解决这个问题,需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,所以必须缜密地选择计算简图。计算简图的选择应遵循下列两条规则:

1) 从实际出发——计算简图要反映实际结构的主要性能,使计算结果接近实际情况。

2) 分清主次,略去细节——计算简图要便于分析和计算。

计算简图的选择受到许多因素的影响,其主要因素如下。

1) 结构的重要性:对重要的结构应采用比较精确的计算简图,以提高计算的可靠性;反之,可用较粗略的计算简图。

2) 设计阶段:在初步设计阶段可使用较粗略的计算简图;在技术设计阶段再使用比较精确的计算简图。

3) 计算问题的性质:通常对于结构的静力计算可使用比较复杂的计算简图;对于结构的动力和稳定计算,由于计算比较复杂,要采用比较简单的计算简图。

4) 计算工具:使用的计算工具越先进,采用的计算简图就可以更精确些。

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)与构件相互连接处(称为结点)的简化。

下面简要地说明结构计算简图的简化要点。

(1) 杆件的简化

杆件的截面尺寸(宽度、厚度)通常比杆件长度小得多,截面上的应力可根据截面的内力(弯矩、轴力、剪力)来确定。因此,在计算简图中,杆件用其轴线表示,用杆轴线所形成的几何轮廓来代替原结构,杆件之间的连接区用结点表示,杆长用结点间的距离表示,而荷载的作用点也转移到轴线上。

(2) 结点的简化

结构中杆件与杆件之间的连接处称为结点。钢、木或钢筋混凝土结构的结点

有很多种构造形式。在计算简图中常将实际的结点简化为理想铰结点、刚结点和二者的组合——组合结点三种。

1) 铰结点。理想铰结点的特征是被连接的各杆可以绕结点中心自由转动。实际上,工程结构中难以做到无摩擦的理想铰,多少具有一定的刚性。钢桥中的栓接结点、木屋架的结点比较接近于铰结点。图 1.1(a)表示木屋架的结点 D 的构造示意图。理想铰结点在计算简图上用一个小圆圈表示,如图 1.1(b)中所示。

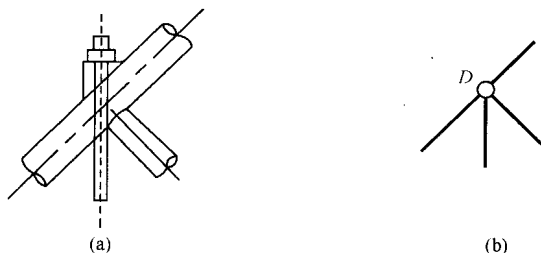


图 1.1

2) 刚结点。图 1.2(a)表示一钢筋混凝土框架边柱与梁的交汇结点的构造示意图。上柱、下柱和梁用混凝土浇筑成整体,钢筋的布置使各杆端能抵抗弯矩。刚结点的特征是当结构发生变形后,交汇于该结点的各杆之间的夹角保持与变形前的相同。该结点在计算简图上如图 1.2(b)所示。

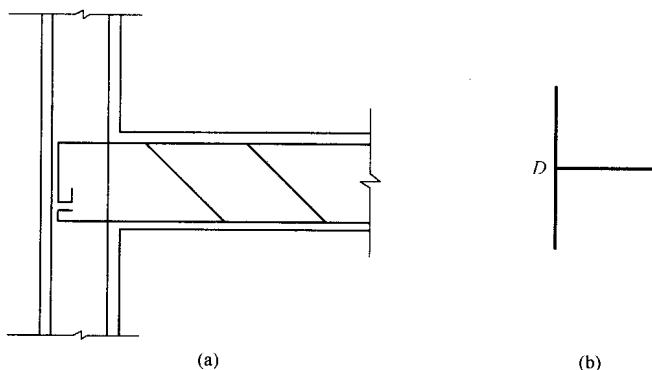


图 1.2

3) 组合结点。若在同一结点处出现上述两种结点结合的情况,则该结点称为组合结点。图 1.3 为某组合结点 D 的计算简图,其中左、右两杆之间为刚结,而竖杆与横杆之间为铰接。

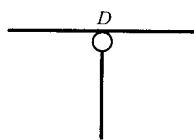


图 1.3