



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

结构力学 I 第2版

萧允徽 张来仪 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

结 构 力 学 (I)

第 2 版

主 编 萧允徽 张来仪

参 编 文国治 陈名弟 王达淦

主 审 刘 铮



机 械 工 业 出 版 社

本书是在 2006 年第 1 版《结构力学 (I、II)》(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)的基础上修订而成的,内容符合教育部最新制定的《结构力学课程教学基本要求(A类)》。

全书分 I、II 两册。I 册共 11 章,内容包括:绪论、平面体系的几何组成分析、静定梁和静定刚架的受力分析、三铰拱和悬索结构的受力分析、静定桁架和组合结构的受力分析、虚功原理和结构的位移计算、力法、位移法、渐近法和近似法、影响线及其应用、矩阵位移法,并附有用 C 语言编制的平面刚架静力分析程序;II 册共 3 章,内容包括:结构的动力计算、结构的稳定计算、结构的极限荷载。

本书坚持“基本概念的阐述要准确,基本原理的论证要透彻,基本方法的分析要具体,基本能力的培养要加强”的编写原则,采用“条理化”的论述方式和“板式”的排版方式,图文并茂,一目了然,是一本内容精炼、版式新颖、教师好用、学生易读的教学用书。

本书适用于普通高等学校宽口径的“大土木”专业(包括建筑工程、路桥、岩土工程、水利工程和建筑安装等),也可供有关工程技术人员参考。为便于教师讲授本教材,配套编制了电子教案,教师可通过 <http://www.cmpedu.com> (机工教材网)注册后免费下载使用。

图书在版编目(CIP)数据

结构力学 I / 萧允徽, 张来仪主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2012. 12
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-40833-8

I. ①结… II. ①萧… ②张… III. ①结构力学—高等学校—教材 IV. ①0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 305631 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 姜 风 责任编辑: 姜 风 责任校对: 陈延翔
封面设计: 肖 力 责任印制: 张 楠
北京振兴源印务有限公司印刷
2013 年 2 月第 2 版第 1 次印刷
297mm × 210mm · 25.75 印张 · 794 千字
标准书号: ISBN 978-7-111-40833-8
定价: 49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务
社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>
销 售 一 部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>
销 售 二 部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>
读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

本书第2版是在第1版《结构力学（I、II）》（普通高等教育“十一五”国家级规划教材）的基础上，根据教育部最新制定的《结构力学课程教学基本要求（A类）》以及全国土木工程专业指导委员会最新制定的《高等学校土木工程本科指导性专业规范》，并认真总结近七年来的教学实践经验修订而成的。

本次修订工作，仍遵循第1版关于“四基”的编写原则，并保持第1版教材原有的鲜明特色，在以下几个方面进行了修订、完善和探索。

（1）为了加强本课程与专业课程以及工程实际的紧密联系，改写和充实了第1章绪论的内容。

（2）为了弥补第1版教材在培养学生对内力图绘制正误性判断能力上的不足，在第3章中强调了对静定结构内力图的校核。

（3）为了加深对变形图的正确理解，凡绘制各插图中的变形曲线时，均力求更能符合变形规律和反映变形特征；同时，通过贯穿于第6章～第9章中相关的例题和习题，着重培养学生勾绘变形曲线的能力。

（4）为了加强矩阵位移法基本原理的介绍，并与后续相关课程相衔接，改写了第11章；同时，考虑到目前程序编制的发展趋势，改用C语言编写了附录A中的平面刚架静力分析程序。

（5）为了贯彻“少而精”的原则，更方便本科教学，对于第13章第3节，即“13.3 确定临界荷载的能量法”一节，进行了重新编写，精选其中一种解法，而删去对多种解法的介绍及综述。

（6）为了论述更加严密和便于阅读了解，对一些文字和例题进行了修改和调整。

（7）为了更好地体现各个插图对诠释文中内容的作用，对全书所有插图的名称和标注，重新进行了规范和必要修改。

（8）为了更好地发挥“板书式”排版方式其“文图并茂，一目了然”的优点，本次修订时，对教材版式也作了进一步的完善。

本书第2版修订，由萧允徽、张来仪担任主编。参加修订工作的有：文国治、王达诠（第I分册）和陈名弟（第II分册）。

本书第2版书稿，又再次承蒙西安建筑科技大学刘铮教授精心审阅，谨致谢意。

本书第2版封面照片，是编者自摄的重庆朝天门长江大桥（该桥为我国自行设计和建造的“世界第一钢桁架拱桥”）。

欢迎专家、读者继续批评和指正。

编者

2013年1月

第1版前言

本书是按照教育部审定的“结构力学课程教学基本要求”新编的教材，适用于普通高等学校宽口径的“大土木”专业（包括建筑工程、路桥、岩土工程、水利工程和建筑安装等），也可供有关工程技术人员参考。

为培养高素质创新型专门人才，本书在编写过程中，坚持“基本概念の阐述要准确，基本原理の论证要透彻，基本方法の分析要具体，基本能力の培养要加强”の编写原则，在学习、继承的基础上，结合编者多年来从事结构力学教学、科研の实践，力求为读者提供一本内容精炼、版式新颖、教师好用、学生易读の新教材。本书在以下几方面作了一些新的探索：

（1）专门为教师上课，特别是采用多媒体教学，设计了“板书式”（书横排，强调文、图、公式紧密结合）の排版方式，图文并茂，一目了然，以利于教师使用和学生理解。

（2）刻意依次编排推理层次，纲目清晰，采用多层次并对小节次也多冠以标题の“条理化”の论述方式，以突出结构变形行为の因果关系和逻辑环链。

（3）精选措词，务求准确覆盖力学概念の内涵。

（4）丰富示例，用以验证理论の工程实用价值，为后续深化认识奠定坚实的基础。

（5）适当引入新的科研成果，以充实和更新教材内容，使力学原理和计算更贴近和反映工程实际。

本书由萧允徽、张来仪主编，萧允徽、张来仪、陈名弟、王达詮共同编写完成。

本书书稿承蒙西安建筑科技大学刘铮教授和重庆大学张汝清教授精心审阅，提出了许多宝贵の意见，对提高本书の质量起了重要作用。

本书の编写得到重庆大学教材建设基金の资助，同时还得到了重庆大学土木工程学院及建筑力学教研室同仁の大力支持。赵更新、游渊、文国治为本书各章编写了思考题和习题，黎娟、刘纲为本书绘制了插图。

借本书出版之际，编者在此一并致以衷心の谢忱。

限于编者水平，书中可能还存在不少问题，恳请批评指正。

编者

2006年7月

目 录

第2版前言

第1版前言

第Ⅰ章 绪论	1
1.1 结构力学的对象和任务	3
1.2 杆件结构的计算简图	7
1.3 平面杆件结构的分类	9
1.4 荷载的分类	10
1.5 结构计算简图实例	11
第Ⅱ章 平面体系的几何组成分析	15
2.1 几何不变体系和几何可变体系	17
2.2 几何组成分析的几个概念	18
2.3 平面体系的计算自由度	20
2.4 平面几何不变体系的基本组成规则	23
2.5 几何可变体系	24
2.6 几何组成分析的方法及示例	26
2.7 静定结构与超静定结构	29
思考题	29
习 题	30

第Ⅲ章 静定梁和静定刚架的受力分析	33
3.1 单跨静定梁	35
3.2 多跨静定梁	44
3.3 静定平面刚架	46
*3.4 静定空间刚架	56
思考题	59
习 题	60
第Ⅳ章 三铰拱和悬索结构的受力分析	65
4.1 拱结构的形式和特性	67
4.2 三铰拱的内力计算	68
4.3 三铰拱的压力线和合理拱轴	74
*4.4 悬索结构	78
思考题	82
习 题	83
第Ⅴ章 静定桁架和组合结构的受力分析	85
5.1 桁架的特点和组成	87
5.2 静定平面桁架	89
5.3 三种平面梁式桁架受力性能比较	101

*5.4 静定空间桁架	104
5.5 静定组合结构	107
5.6 静定结构的特性	110
思考题	113
习 题	113
 第⑥章 虚功原理和结构的位移计算	117
6.1 概述	119
6.2 变形体系的虚功原理	121
6.3 结构位移计算的一般公式 单位荷载法	127
6.4 静定结构在荷载作用下的位移计算	129
6.5 图形相乘法	134
6.6 静定结构由于支座移动引起的位移计算	142
6.7 静定结构由于温度变化引起的位移计算	143
*6.8 具有弹性支座的静定结构的位移计算	146
6.9 线弹性体系的互等定理	148
思考题	152
习 题	153
 第⑦章 力 法	157
7.1 超静定结构概述	159

7.2 力法的基本原理	162
7.3 力法的基本体系选择及典型方程	166
7.4 用力法计算超静定结构在荷载作用下的内力	170
7.5 用力法计算超静定结构在支座移动和温度变 化时的内力	181
7.6 对称结构的简化计算	187
7.7 用弹性中心法计算对称无铰拱	193
7.8 超静定结构的位移计算	200
7.9 超静定结构内力图的校核	204
7.10 超静定结构的特性	207
思考题	208
习 题	209
 第⑧章 位移法	215
8.1 位移法的基本概念	217
8.2 等截面直杆的转角位移方程	219
8.3 位移法的基本未知量	224
8.4 位移法的基本结构及位移法方程	228
8.5 用典型方程法计算超静定结构在荷载作用下的内力	232
*8.6 用典型方程法计算超静定结构在支座移动和 温度变化时的内力	244

8.7 用直接平衡法计算超静定结构的内力	248
*8.8 混合法	251
思考题	253
习 题	254
 第 ⑨ 章 渐近法和近似法	259
9.1 概述	261
9.2 力矩分配法的基本概念	262
9.3 用力矩分配法计算连续梁和无侧移刚架	269
9.4 无剪力分配法	275
*9.5 多层多跨刚架的近似算法	278
思考题	282
习 题	283
 第 ⑩ 章 影响线及其应用	287
10.1 移动荷载及影响线概念	289
10.2 用静力法作静定梁的影响线	291
10.3 用静力法作间接荷载作用下梁的影响线	298
10.4 用静力法作静定桁架的影响线	301
10.5 用机动法作静定梁的影响线	305

10.6 利用影响线计算影响量值	310
10.7 利用影响线确定移动荷载最不利位置	312
10.8 铁路公路的标准荷载制和工业厂房的吊车荷载	319
10.9 换算荷载	321
10.10 简支梁的内力包络图和绝对最大弯矩	324
10.11 用机动法作连续梁的影响线	328
10.12 连续梁的内力包络图	332
思考题	335
习 题	336
 第 ⑪ 章 矩阵位移法	341
11.1 概述	343
11.2 杆件结构的离散化	344
11.3 单元坐标系中的单元刚度矩阵	348
11.4 结构坐标系中的单元刚度矩阵	351
11.5 用先处理法形成结构刚度矩阵	352
11.6 结构的综合结点荷载列阵	361
11.7 求解结点位移和单元杆端力	364
11.8 矩阵位移法的计算步骤和算例	366
11.9 平面刚架程序设计	373

思考题	380
习 题	381
附录	385
附录 A 平面刚架静力分析程序 (PFF 程序)	385
附录 B 部分习题答案	393
参考文献	401

第 1 章 绪论

● **本章教学的基本要求：**了解结构力学的对象和任务；初步了解计算机化的结构力学的发展趋势；了解选取结构计算简图的原则、要求及其主要内容；了解平面杆件结构的分类；了解各类结构的受力性能；了解荷载的分类。

● **本章教学内容的重点：**结构力学的对象和任务；杆件结构的计算简图。

● **本章教学内容的难点：**如何将实际结构简化为计算简图。

● **本章内容简介：**

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">1.1 结构力学的对象和任务1.2 杆件结构的计算简图1.3 平面杆件结构的分类1.4 荷载的分类1.5 结构计算简图实例 |
|---|

1.1 结构力学研究的对象和任务

1.1.1 结构

建筑物和构筑物中,用以支承、传递荷载并维持其使用功能形态的部分,称为**工程结构**,简称**结构**。例如,房屋中的梁柱体系,水工建筑物中的水坝和闸门,公路和铁路上的桥梁和隧道,以及电力通讯系统中的输电塔和电视塔等。

1.1.2 研究的对象和任务

以下工程力学课程之间既有密切的联系,又有明确的分工。

- (1) **理论力学**:着重讨论刚体机械运动的基本规律。
- (2) **材料力学**:着重讨论单个杆件的强度、刚度和稳定性的计算。

- (3) **结构力学**:着重讨论杆件结构的强度、刚度、稳定性计算和动力反应,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、合理形式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,为结构设计的强度计算和刚度验算奠定基础。

- 3) 讨论结构的稳定性以及在动力荷载作用下的结构反应。

- (4) **弹塑性力学**:着重讨论薄壁结构(板、壳、膜结构等)和实体结构(挡土墙、墩台、重力坝、块体基础等)的应力、变形、稳定性和动力反应等问题。

学习结构力学,要注重对于分析能力、计算能力、自学能力和表达能力的训练。

1.1.3 土木工程结构实例

图 1-1 是土木工程结构的一些实例。

- (1) **上海环球金融中心**(图 1-1a)

塔楼地上 101 层,高 492m。由三维巨型框架-核心筒及其间相互联系的伸臂钢桁架所组成的三重结构体系。于 2008 年 8 月竣工。

- (2) **北京奥运会主体育馆(鸟巢)**(图 1-1b)

骨架结构由 24 榀巨大的门式钢桁架围绕着内部碗状看台旋转而成。于 2008 年 4 月竣工。

- (3) **重庆朝天门长江大桥**(图 1-1c)

主跨为 552m 的“世界第一钢桁架拱桥”。于 2009 年 4 月通车。

- (4) **国家游泳中心(水立方)**(图 1-1d)

世界上最大的膜结构工程,外墙体和屋面围护结构采用新型空间钢膜结构体系。于 2008 年 1 月竣工。

- (5) **国家大剧院**(图 1-1e)

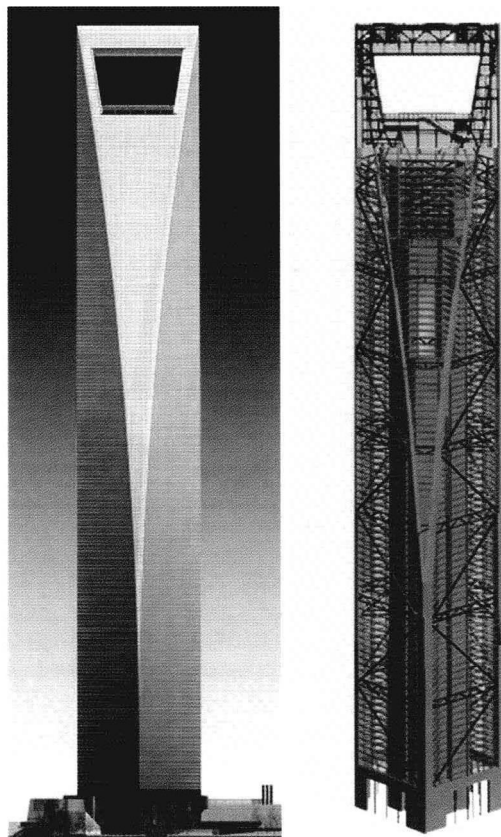
巨大的椭圆形壳体由 148 榀弧形钢桁架组成。该壳体东西长轴 212m,南北短轴 143m,高 46m。于 2007 年 12 月竣工。

- (6) **中央电视台新台址工程**(图 1-1f)

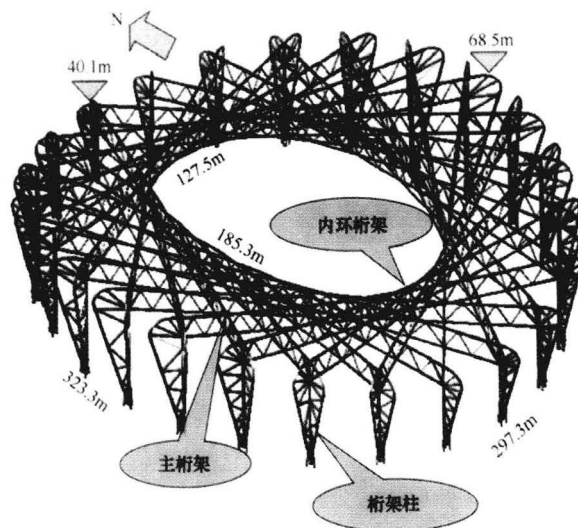
两塔楼为筒中筒结构,顶部“空中楼阁”悬挑臂长 75m。于 2012 年 5 月竣工。

- (7) **长江三峡大坝**(图 1-1g)

世界上规模最大的混凝土重力坝,坝顶总长 3035m,高 185m。主体工程于 2006 年 5 月建成。



a) 上海环球金融中心
(选自本教材参考文献[24])



b) 北京奥运会主体育馆(鸟巢)结构布置图
(选自本教材参考文献[25])

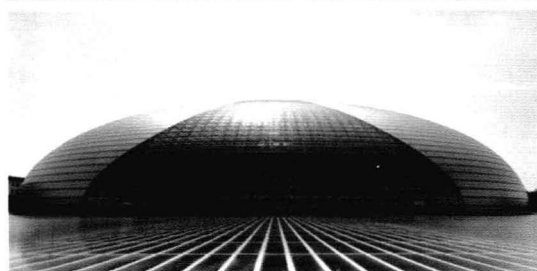
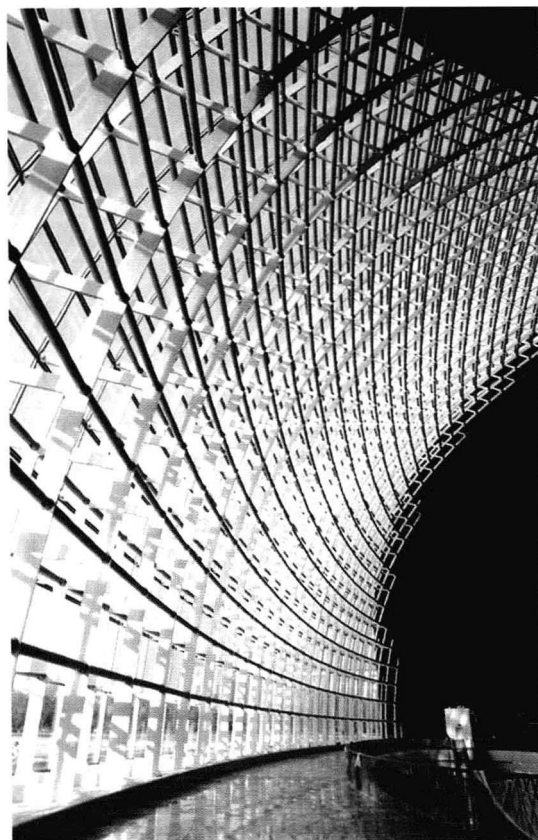


c) 重庆朝天门长江大桥
(选自《中国影像网》<http://www.imagecn.cn>)

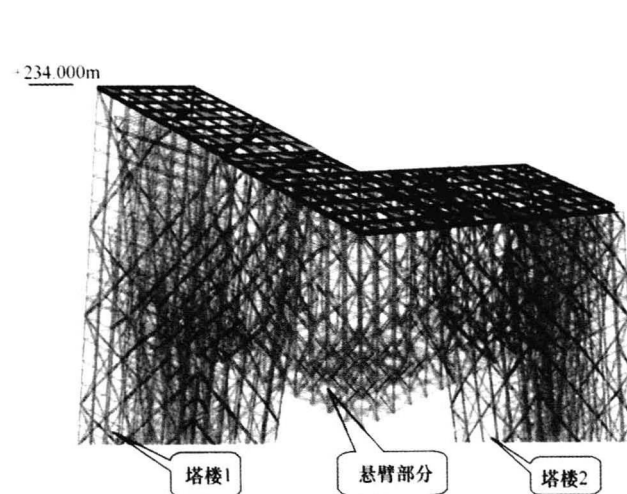


d) 国家游泳中心(水立方)
(选自《昵图网》<http://www.nipic.com>)

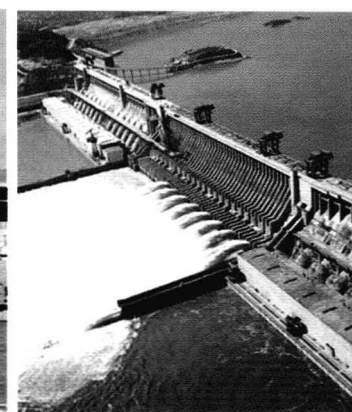
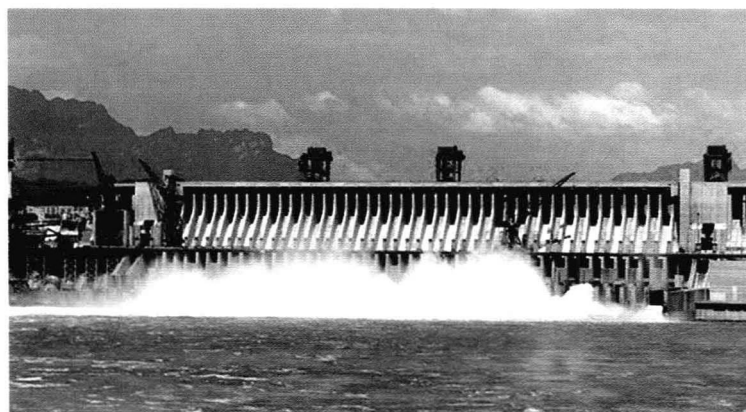
图 1-1 土木工程结构的一些实例



e) 国家大剧院
(选自《昵图网》<http://www.nipic.com>)



f) 中央电视台新台址工程
(左图选自本教材参考文献[24], 右图选自《百度网》<http://www.baidu.com>)



g) 长江三峡大坝
(选自《百度网》<http://www.baidu.com>)

图 1-1 土木工程结构的一些实例 (续)

1.1.4 计算机化的结构力学

应当指出的是,自从电子计算机和有限元法问世以来,结构力学这门学科得到了进一步的发展,出现了**计算机化的结构力学**(即**计算结构力学**)这个新的分支,使结构力学研究的对象、任务、理论、计算模型和数学工具都发生了深刻的变化。

1 对象

结构力学研究的对象,原先主要是杆件结构;计算结构力学研究的对象,变成为可以是各种不同类型构件(杆件、板、壳、膜结构和实体结构)的组合物,即过去是一种一种地来处理,而现在则可以比较如实地按结构的本来面貌来研究。

2 任务

由原先仅仅是进行结构受力和反应的分析(被动地分析和说明结构在外因作用下的反应),发展为在一定的目标和约束下,主动从事**结构优化设计**(主动地设计和改造结构)。

3 理论

过去各种特殊的计算方法层出不穷(由于来自计算工具方面的障碍,使基础理论的作用未能尽情发挥),现在已使计算方法趋于比较统一,以变分法为基础的有限元法成为普遍采用的方法,其相关软件已商业化。而各种公理化了的变分原理又增添了新的活力,进一步发挥了它们的作用。

4 计算模型

以往总是尽可能地把空间问题简化为平面问题,多维变少维;非线性问题简化为线性问题;不均匀简化为均匀;不连续的改为连续的;动态的改为静态的。改来改去,无非是如何使问题容易求解。计算机化以后,结构力学可以处理复杂得多的计算模型,从而更便于反映结构的真实情况。

5 数学工具

以往杆件结构用线性代数计算,板、壳、实体结构用偏微分方程计算。现在是离散化的数值计算,矩阵数学成为最有效的数学工具。其他如循环迭代、逻辑判别等,都是结构力学的重要工具。

这些由于计算手段带来的变化,使力学工作者为工程服务的能力有了量级上的提高,这是在计算机化以前难以想象的。

为了反映这种变化和适应发展趋势,在本书中,专列第11章矩阵位移法,初步介绍有关内容。为了便于读者进一步学习,可参阅重庆大学编著的《结构分析中的有限元法》,或其他相关教材。各高等院校均开设有这方面的必修课或选修课。

有必要强调的是:在计算结构力学中,力学是它的主体,是研究的基础;而计算是手段,是为力学服务的。同时,力学还可以判断电子计算机计算结果的正确性。因此,我们应当十分重视经典结构力学理论与方法的学习。

1.2 杆件结构的计算简图

1.2.1 结构的计算简图

实际结构是很复杂的,完全按照结构的实际情况进行力学分析,既不可能,也无必要。结构的计算简图是力学计算的基础,极为重要。

在结构计算中,经过科学抽象加以简化,用以代替实际结构的计算图形,称为结构的计算简图。

1.2.2 选取的原则及要求

选取的原则是:一要从实际出发,二要分清主次。

选取的要求是:既要尽可能正确地反映结构的实际工作状态,又要尽可能使计算简化。

有时,根据不同的要求和具体情况,对于同一实际结构也可选取不同的计算简图。例如,在初步设计阶段,可选取比较简略的计算简图,而在施工图设计阶段,则可选取较为精确的计算简图;用手算时,可选取较为简单的计算简图,而采用电子计算机计算时,则可选取较为复杂的计算简图。

总的来说,这是一个比较复杂的问题,结构计算简图的合理选择,需经过本书以下逐章的学习、相关专业课的学习以及今后工作的实践,才能逐渐理解和把握得更准确。

1.2.3 实际杆件结构的简化

将实际杆件结构简化为计算简图,通常包括以下几个方面的内容:

① 杆件体系的简化

实际工程结构都是空间结构,其计算工作量一般都很大。在大多数情况下,常可忽略一些次要的空间约束,而将其简化为平面结构,使计算得到简化,并能满足一定的工程精度要求。

② 几何形式的简化

在平面杆件结构中,当杆件的长度大于其截面宽度和高度的

5倍以上时,通常可认为杆件变形时其截面仍保持平面,截面上某点的应力可以根据该截面上的内力(弯矩、剪力和轴力)来确定。由于内力只沿杆长方向变化,因此,在计算简图中,无论是直杆或曲杆,均可用其轴线(各横截面形心的连线)代替杆件,而用按杆轴线形成的几何轮廓来代替原结构。

③ 材料性质的简化

杆件材料一般均假设为连续、均匀、各向同性、完全弹性或弹塑性。对于金属材料,以上假设在一定受力范围内是符合实际情况的;而对于混凝土、砖、石,乃至木材等材料,则带有不同程度的近似性。

4 支座的简化

根据支座对结构的约束作用, 平面杆件结构的支座可简化为下列几种:

- (1) 活动铰支座 (滚轴支座、辊轴支座): 见图 1-2a。
- (2) 固定铰支座 (不动铰支座, 也简称铰支座): 见图 1-2b。
- (3) 固定支座: 见图 1-2c。

以上三种支座, 在先修的力学课程中已作过详细介绍。

- (4) 定向支座 (滑动支座、双链杆支座): 见图 1-2d。

结构在支承处不能转动, 不能沿垂直于支承面的方向移动, 但可沿支承面的方向滑动。计算简图用垂直于支承面的两根平行

链杆表示, 其支座反力为一垂直于支承面的集中力和一个力矩。这种支座在实际工程结构中并不多见, 但对超静定结构利用对称性进行简化计算时, 具有理论分析价值。

- (5) 弹性支座: 如果在结构计算时, 需要考虑支座本身的变形, 则称这种支座为弹性支座。弹性支座又可分为抗移动弹性支座 (如图 1-2e 所示) 和抗转动弹性支座 (如图 1-2f 所示)。图中 k , 表示使弹性支座发生单位移动 (或单位转动) 时, 沿该方向所需施加的力 (或力矩), 称为弹性刚度系数。

有必要指出, 支座反力 (简称支反力) 是一个广义力, 它既可表示支座处沿某方向的单个反力, 也可表示支座处的反力矩。

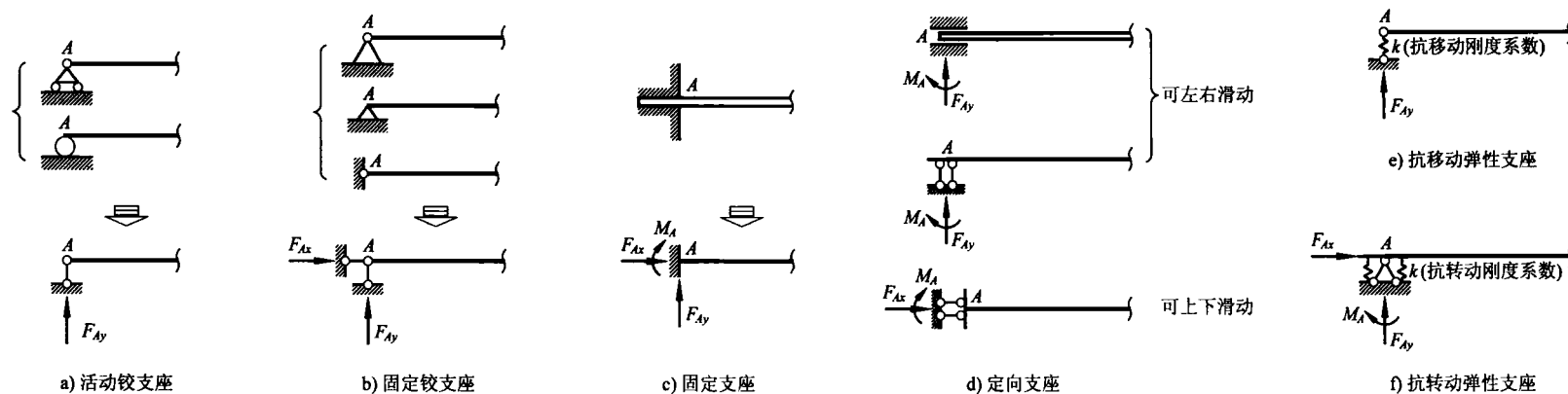


图 1-2 平面杆件结构的支座