



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十二五”住建部规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

中国土木工程学会教育工作委员会 审订

# 结构力学 (上)

(第5版)

J G L X

包世华 主编



WUTP



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十二五”住建部规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等学校土木工程专业新编系列教材

中国土木工程学会教育工作委员会 审订

# 结构力学 (上册)

(第5版)

包世华 主编

龙驭球 主审

武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

## 【主编简介】

包世华 清华大学土木工程系教授,中国力学学会《工程力学》杂志编委,中国建筑学会高层建筑结构委员会委员。1985~1986年为美国伊利诺伊大学土木工程系访问学者,1991~1993年为香港理工大学土木与结构系研究员。长期从事结构力学、弹性力学、能量原理及有限元、板壳结构、薄壁杆件结构和高层建筑结构等领域的教学和科研工作。

出版教材和专著30多部。教材有《高层建筑结构设计》、《结构力学》、《结构力学教程》、《结构动力学》和英文教材《Structural Mechanics》等,分别于1987年获建设部优秀教材二等奖,1988年、1992年获国家教委优秀教材奖,1998年获教育部科学技术进步奖一等奖,1999年获国家级科学技术进步奖二等奖,2002年获教育部全国优秀教材一等奖,2007年获教育部普通高等教育精品教材,主编武汉理工大学出版社出版的《结构力学》被选为普通高等学校“十一五”和“十二五”国家级和住建部规划教材,以及“十三五”住建部规划教材,等等。专著有《薄壁杆件结构力学》、《高层建筑结构计算》、《新编高层建筑结构》、《高层建筑结构设计和计算》(上、下册)等。

在国内外刊物上发表学术论文130多篇。参加制定《薄壳结构设计规程》,其壳体研究成果被收入该规程。提出和创建了高层建筑结构解析和半解析常微分方程求解器解法系列。1983年获北京市科委技术成果奖,1986年、1992年、1994年分别获国家教委科学技术进步奖一、二、三等奖。

E-mail: baosh@tsinghua. edu. cn

## 图书在版编目(CIP)数据

结构力学(上)/包世华主编. —5版. —武汉:武汉理工大学出版社,2018.8  
ISBN 978-7-5629-5851-2

I. ①结… II. ①包… 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(2018)第177442号

项目负责人:蔡德民 刘永坚 田道全

责任编辑:高 英

责任校对:王一维

封面设计:付 群

出版发行:武汉理工大学出版社

社 址:武汉市洪山区珞狮路122号

邮 编:430070

网 址: <http://www.wutp.com.cn>

经 销:各地新华书店

印 刷:荆州市鸿盛印务有限公司

开 本:880×1230 1/16

印 张:17.25

字 数:559千字

版 次:2000年8月第1版 2018年8月第5版

印 次:2018年8月第1次印刷

印 数:5000册

定 价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87664138 87395758 87165708(传真)

· 版权所有 盗版必究 ·

# 普通高等学校土木工程专业新编系列教材编审委员会

(第4届)

## 学术顾问:

吕西林 李杰 罗福午 李少甫 甘绍熺 包世华 毛鹤琴  
熊峰 刘立新 李必瑜 彭少民 何铭新 吴培明 胡敏良

## 主任委员:

李国强 朱宏亮

## 副主任委员:

刘伟庆 邹超英 白国良 徐礼华 雷宏刚 贾连光 朱彦鹏  
张永兴 张俊平 刘殿忠 缪昇 王岚 周学军 赵明华

## 委员:

邓铁军 王林 王燕 王天稳 王月明 王社良 王泽云  
王雪松 王新武 王毅红 白晓红 卢文胜 叶献国 过静珺  
刘剑飞 孙俊 孙强 孙家齐 任建喜 陈水生 陈昌富  
陈伯望 何培玲 李书进 李怀建 李启令 李碧雄 邵旭东  
宋固全 吴能森 吴炎海 吴雪茹 吴辉琴 张立人 张科强  
周云 段兵廷 姜玉松 柳炳康 饶云刚 俞晓 赵瑞斌  
秦建平 徐伟 袁广林 袁海庆 蒋沧如 曾志兴 窦立军  
戴国欣 魏瑞演

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘书长:蔡德民

## 第 5 版前言

本次修订的依据仍然是教育部颁布实施的《普通高等学校本科专业目录》中所规定的土木工程专业的业务培养目标,教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会制定的《结构力学课程教学基本要求(A类)》,住房和城乡建设部高等学校土木工程专业指导委员会制定的《结构力学课程教学大纲》和《高等学校土木工程本科指导性专业规范》。本书的适用对象为普通高等学校土木工程学科专业(即“大土木”)各类专门化方向的本科学生,也可供参加高等教育自学考试的学生、考研的学生和参加注册结构工程师考试的人员以及有关工程技术人员阅读参考。

本版主要改动的地方有:

1. 第 14 章对结构的计算简图和结构力学定性(概念)分析的内容有较大的增补。

这两部分内容都是编者在清华大学长期的教学实践中提出,是国内外结构力学教材中少有系统讨论的内容,是创新的内容。

结构计算简图是结构力学的建模理论,过去的结构力学教材多数是在第一章对构件、结点和支座等做出一些假设,以后就用线条表示的计算简图进行计算了。结构计算简图与实际结构之间有很大的差别。我们力图在教材中减少这个差别,也就是力学计算理论联系了工程结构实际,在第一章后还专门增加对结构计算简图的讨论。这一举措得到了学界和工程界的认可,有的教材也开始采用此方法,所以本版继续在这方面进行了增补。

结构力学定性(概念)分析首次在结构力学教材中系统的讨论,是在本书的第 4 版。为什么要写这部分内容的详细原因已在第 4 版前言中说明,不再复述。本版又增补了新内容。

2. 其他内容上的增、删和改写

第 1 章中增加了一节介绍结构线性分析和非线性分析;第 2 章中增加了对虚铰(主要是两平行杆虚铰)的讨论;第 8 章中删去主要适用于路桥专业的公路换算荷载;第 11 章中删去了用位移法解排架的内容,换成了更适合位移法求解的有多侧移的刚架;第 13 章中删去了忽略轴向变形的刚架一节;并对少量的文字、例题和图进行了修改。

3. 本版尽量用例题来表述内容,全书共有例题 180 多个。

本书第 3 版、第 4 版前言仍保留。其中提到的本书的编写依据,各版的演进过程,对基本要求和提高部分,以及星号“\*”的含义等,仍然是有效的,可以翻看。

本书难免存在不足之处,欢迎批评,恳请指正。

包世华

2018 年 6 月于清华园

## 第4版前言

本次修订的依据是教育部颁布实施的《普通高等学校本科专业目录》中所规定的土木工程专业的业务培养目标,教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会制定的《结构力学课程教学基本要求(A类)》、住房和城乡建设部高等学校土木工程专业指导委员会制定的《结构力学课程教学大纲》以及《高等学校土木工程本科指导性专业规范》。本书的适用对象为普通高等学校土木工程专业(即“大土木”)各类专门化方向的本科学生,也可供参加高等教育自学考试的学生、考研的学生和参加注册结构工程师考试的人员以及有关工程技术人员阅读参考。

本版主要改动的地方有:

1. 新增写了静定结构内力和位移的定性分析、结构的变形简图、超静定结构内力和位移的定性分析、多层多跨刚架的近似法(侧移计算)等内容作为结构力学定性(或概念)分析的入门。

对结构力学定性(或概念)分析的重要性,工程界和广大教师已经有充分的认识。结构设计大师林同炎早就有《结构概念与体系》的专著,论述概念设计的重要性。因此,结构力学应该涵盖经典结构力学、程序(或计算)结构力学和定性(或概念)结构力学三个方面,已为大家所认知。经典结构力学已经成熟,程序(计算)结构力学正在日趋完善,定性(或概念)结构力学刚刚起步。

从结构力学对能力的培养来说也有三个方面:经典方法的分析能力、计算机分析能力和定性分析能力。在结构的概念设计、结构的合理形式、结构计算模型的建立、结构受力和变形性能的估计和判断,以及计算结果正误的分析等方面都需要结构力学定性分析能力的培养。从这个角度看,定性分析能力的培养可能是上述三个能力培养中要求最高,也是最难的一个方面。定性分析能力的培养并不只是结构力学一门课程的任务,也不能要求结构力学一门课程来完成,但是结构力学课程应该承担此任务。高层次的能力培养需要从简单的训练开始,需要一个人门的向导。编者认为在讲授经典结构力学分析方法的同时或稍后,就应该教学生做简单结构内力和变形的大致形状的估计、判断等的训练,以之作为结构力学定性分析的入门。20世纪80年代,编者在清华大学上结构力学学习题课时就曾进行过这方面的尝试,取得了较好的效果。

总之,定性分析是一个新的内容,在教材中怎么写好这个入门的材料,尚无一定之规。这次收入本书的只是在传统的经典分析方法的基础上,增加了一些仅靠脑和手对结构内力和变形进行定性分析的入门方法。这里要指出,计算机在定性分析中也是大有可为的,在计算机和各种应用软件高速发展的今天,期待着有更好的结构力学定性分析教材问世。

今后,结构力学定性分析的教材和教学走向可能有两条路:一条是以经典结构力学为主的教材中,加入计算机计算和定性分析的内容,前者是基础,为主体;后两者是互为依赖的左右手,是一个统一的整体、一本书,本书走的就是这一条路。另一条是单独设课,独立成书。

本书中把定性分析的内容集中放在了第14章中,教学中可以将其分散在合适的相关章节。因为《结构力学课程教学基本要求(A类)》中没有提出定性分析的要求,本书收入该内容是为了提倡读者培养结构力学定性分析的能力,各学校及读者可自行决定是否选用,书中该部分内容打上了星号(“\*”)。

2. 在内容上做了一些删减、改写,顺序也有改变

第8章中汽车车队移动荷载和铁路标准活载均按新规范标准进行了修改;原在下册的第11章位移法收入上册;第12章超静定结构的近似法收入第14章,内容有扩展;第15章中删去了有限元法求刚架的自振频率;第16章中改写了圆环和圆拱稳定方程的推导,删去了圆拱的计算长度和刚架的稳定;第17章中删去了矩阵位移法求刚架的极限荷载等。删减内容均是一般学校不选用的专题、提高内容,需要用到相关内容的读者可参见本书的第3版。

本版修订工作由包世华制定修改方案和大纲。修订工作由包世华、辛克贵完成。全书由包世华修改定稿。

本书由中国工程院院士、清华大学龙驭球教授和清华大学张铜生教授审阅,龙驭球为主审。郑州大学樊友景、南昌大学张爱萍和昆明理工大学孙俊对本书进行了审读。他们对编写大纲及书稿提出了许多宝贵意见,在此向他们表示感谢。

本书难免存在不足之处,欢迎读者批评指正。

包世华

2011年10月于清华园

## 第3版前言

本书第3版作为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,重新进行了改编。

编写依据仍然是教育部颁布实施的《普通高等学校本科专业目录》中所规定的土木工程专业的业务培养目标、教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会制定的《结构力学课程教学基本要求(A类)》和建设部高等学校土木工程专业指导委员会制定的《结构力学课程教学大纲》。适用对象为普通高等学校土木工程专业(即“大土木”)各类专门化方向的本科学生,也可供参加高等教育自学考试的学生、考研的学生和参加注册结构工程师考试的人员以及有关工程技术人员阅读参考。

考虑到近年来各高校《结构力学》教学内容、体系改革等的实践结果和课时普遍调低的现状,第3版改动的地方主要有:

1. 为了与主编编写的结构力学双(英)语教材(Bao Shihua and Gong Yaoqing. Structural Mechanics. Wuhan University of Technology Press, 2006)完全一致,以便中、英文教学可以互相参考,将第2~6章全部进行了改写。这样,采用中文教学的师生,必要时可以参考上述英语教材;采用双(英)语教学的师生,在需要时也可以参考本书。

2. 教育部高等学校非力学专业力学基础课程教学指导分委员会2007年印发的《结构力学课程教学基本要求(A类)》(简称《基本要求》)中,将课程内容分为了两部分:基础部分和专题部分。基础部分为必修内容,专题部分中的“结构矩阵分析”和“结构的动力计算”(只要求到两个自由度体系)为必修内容,并去除了一些具体数字方面(如学时数、上机时数等)的硬性要求。

按照上述《基本要求》中是否为必修的要求,本书第3版将全书内容明确地划分为两部分:基本部分和专题、提高部分,前者为必修内容,后者为选修内容。

基本部分包括《基本要求》中的基础部分,即结构的几何组成分析、静定结构、超静定结构和影响线等;矩阵位移法和结构的动力计算(到两个自由度体系为止)。基本部分是为课程打好基础,落实课程基本要求的必修内容。第2版中没有打“\*”号的内容第3版中大都保留下来了,但按照《基本要求》中列为必修和选修的要求重新进行了划分,即第3版中作为必修的基本部分已按新《基本要求》确定,较第2版有所减少。专题、提高部分是《基本要求》中未列为必修的内容,包括:稳定、极限荷载、两个自由度以上体系的动力计算,以及各章中加“\*”号的内容。专题、提高部分一般不是课程教学基本要求的必修内容,个别学校或专业如有需要,可酌情选取其中某些材料作为教学内容。

有关学时数、理论教学时数、上机时数和实践性教学时数等规定,第3版中均去除了。

本版修订工作由包世华制定修改方案和大纲。修订工作分工如下:包世华,第1~9、12、15~17章;辛克贵,第10、11、13、14章。全书由包世华修改定稿。

本书由中国工程院院士、清华大学龙驭球教授和清华大学张铜生教授审阅,龙驭球为主审。郑州大学樊友景、南昌大学张爱萍和昆明理工大学孙俊对本书进行了审读。他们对编写大纲及书稿提出了许多宝贵意见,在此,对他们表示感谢。

本书难免存在不足之处,欢迎读者批评指正。

编者

2007年3月

# 目 录

1 绪论 .....	(1)
1.1 结构和结构的分类 .....	(1)
1.2 结构力学的任务与方法 .....	(3)
1.2.1 结构力学课程与其他课程的关系 .....	(3)
1.2.2 结构力学的任务和学习方法 .....	(3)
1.3 结构的计算简图 .....	(4)
1.3.1 计算简图及其选择原则 .....	(4)
1.3.2 计算简图的简化要点 .....	(4)
1.3.3 结构计算简图示例 .....	(7)
1.4 杆件结构的分类 .....	(9)
1.5 荷载的分类 .....	(11)
1.6 结构线性分析和非线性分析 .....	(11)
本章小结 .....	(13)
思考题 .....	(13)
2 结构的几何组成分析 .....	(14)
2.1 几何组成分析的目的、几何不变体系和几何可变体系 .....	(14)
2.2 自由度和约束的概念 .....	(15)
2.2.1 自由度 .....	(15)
2.2.2 约束 .....	(15)
2.2.3 约束代换和虚铰 .....	(16)
2.2.4 必要约束和多余约束 .....	(17)
2.3 几何不变无多余约束的平面杆件体系的几何组成规则 .....	(17)
2.3.1 一个点和一个刚片的连接 .....	(18)
2.3.2 平面内两个刚片的连接 .....	(18)
2.3.3 平面内三个刚片的连接 .....	(19)
2.3.4 瞬变体系 .....	(20)
2.4 几何组成分析举例 .....	(20)
2.5 体系的计算自由度数公式 .....	(22)
2.6 结构的几何组成和静定性的关系 .....	(23)
本章小结 .....	(24)
思考题 .....	(24)
习题 .....	(24)
3 静定梁 .....	(27)
3.1 静定单跨梁的计算 .....	(27)
3.1.1 杆件截面内力及正负号规定 .....	(27)
3.1.2 杆件截面内力计算的方法——截面法 .....	(27)
3.1.3 荷载与内力之间的微分关系 .....	(30)
3.1.4 内力图的绘制 .....	(31)
3.2 叠加法绘制直杆弯矩图 .....	(33)
3.2.1 简支梁弯矩图的叠加方法 .....	(33)

3.2.2	分段叠加法	(34)
3.3	简支斜梁的计算	(35)
3.4	静定多跨梁的计算	(37)
3.4.1	静定多跨梁的约束力与几何组成	(37)
3.4.2	静定多跨梁内力图的绘制	(38)
3.5	本章小结	(40)
3.6	思考题	(41)
3.7	习题	(41)
<b>4</b>	<b>静定刚架</b>	(44)
4.1	静定平面刚架的几何组成及特点	(44)
4.2	静定刚架支座反力的计算	(46)
4.3	用截面法求静定刚架杆端截面内力	(47)
4.4	静定刚架内力图的绘制	(51)
4.5	三铰刚架及多层多跨静定刚架的内力图	(53)
4.5.1	三铰刚架及多层多跨静定刚架内力图的绘制	(53)
4.5.2	刚架内力图的校核	(54)
*4.6	静定空间刚架的计算	(55)
3.8	本章小结	(56)
3.9	思考题	(57)
3.10	习题	(57)
<b>5</b>	<b>三铰拱</b>	(61)
5.1	三铰拱的组成和类型	(61)
5.2	竖向荷载作用下三铰拱的支座反力	(62)
5.3	竖向荷载作用下三铰拱的截面内力	(63)
5.4	三铰拱的受力特性	(67)
5.5	三铰拱的合理轴线	(67)
5.5.1	竖向荷载作用下三铰拱的合理拱轴	(67)
5.5.2	沿径向均匀分布荷载作用下三铰拱的合理拱轴	(68)
*5.6	悬索	(69)
3.11	本章小结	(71)
3.12	思考题	(72)
3.13	习题	(72)
<b>6</b>	<b>静定桁架和组合结构</b>	(74)
6.1	桁架的特点和组成分类	(74)
6.1.1	桁架计算简图的假设及内力特点	(74)
6.1.2	桁架按几何组成分类	(75)
6.1.3	桁架杆件轴力正负号规定及斜杆轴力的表示	(76)
6.2	结点法	(76)
6.3	截面法	(79)
6.4	结点法和截面法的联合应用	(82)
6.5	组合结构	(83)
6.5.1	组合结构的组成与型式	(83)
6.5.2	组合结构的计算	(83)
*6.6	静定空间桁架	(85)
6.6.1	空间桁架的应用	(85)

6.6.2	空间桁架的几何组成	(85)
6.6.3	空间桁架的计算方法	(86)
	本章小结	(89)
	思考题	(89)
	习题	(89)
<b>7</b>	<b>静定结构总论</b>	(94)
7.1	静定结构受力分析的方法	(94)
7.2	静定结构的一般性质	(96)
7.3	各种结构型式的受力特点	(98)
7.3.1	梁、拱、刚架和桁架的受力特点	(98)
7.3.2	梁式桁架的型式与受力特性	(100)
7.4	用零载法分析体系的几何可变性	(102)
	本章小结	(104)
	思考题	(104)
	习题	(104)
<b>8</b>	<b>影响线</b>	(106)
8.1	影响线的概念	(106)
8.2	静力法作静定单跨梁影响线	(107)
8.2.1	简支梁的影响线	(107)
8.2.2	伸臂梁的影响线	(109)
8.3	结点荷载作用下梁的影响线	(111)
8.4	静力法作桁架的影响线	(112)
8.5	机动法作静定梁的影响线	(114)
8.5.1	刚体体系的虚功原理	(114)
8.5.2	机动法作影响线的原理和步骤	(114)
8.5.3	机动法作简支梁的影响线	(115)
8.5.4	机动法作静定多跨梁的影响线	(116)
8.6	影响线的应用	(118)
8.6.1	计算影响量值	(118)
8.6.2	可动均布荷载的最不利布置	(119)
8.6.3	移动荷载的最不利位置	(119)
8.7	公路、铁路的标准荷载制	(124)
8.8	简支梁的包络图和绝对最大弯矩	(125)
8.8.1	简支梁的包络图	(125)
8.8.2	简支梁的绝对最大弯矩	(126)
	本章小结	(128)
	思考题	(128)
	习题	(129)
<b>9</b>	<b>虚功原理和结构的位移计算</b>	(132)
9.1	位移计算概述	(132)
9.2	虚功和虚功原理	(133)
9.2.1	虚功	(133)
9.2.2	刚体体系虚功原理的两种应用	(134)
9.2.3	变形体体系的虚功原理	(138)
9.3	单位荷载法计算位移和位移计算的一般公式	(139)

9.4	荷载作用下的位移计算	(140)
9.4.1	荷载作用下位移的计算公式及计算位移的步骤	(140)
9.4.2	各类结构的位移计算公式	(140)
9.4.3	荷载作用下位移计算举例	(141)
9.5	图乘法	(144)
9.5.1	图乘法的计算公式	(144)
9.5.2	图乘的分段和叠加	(146)
9.5.3	图乘法位移计算举例	(147)
9.6	温度作用时的位移计算	(152)
9.7	支座移动时的位移计算	(153)
9.8	线性变形体系的互等定理	(155)
9.8.1	功的互等定理	(155)
9.8.2	位移互等定理	(155)
9.8.3	反力互等定理	(156)
9.9	空间刚架的位移计算公式	(156)
	本章小结	(157)
	思考题	(157)
	习题	(159)
<b>10</b>	<b>力法</b>	(163)
10.1	超静定结构和超静定次数	(163)
10.1.1	超静定结构	(163)
10.1.2	超静定次数的确定	(163)
10.2	力法的基本概念	(165)
10.2.1	力法的基本未知量和基本体系	(165)
10.2.2	力法的基本方程	(165)
10.3	力法方程的典型形式	(167)
10.3.1	两次超静定结构的力法方程	(167)
10.3.2	$n$ 次超静定结构的力法方程	(169)
10.4	超静定梁、刚架和排架	(169)
10.4.1	超静定梁和刚架	(169)
10.4.2	铰接排架	(174)
10.5	超静定桁架和组合结构	(176)
10.5.1	超静定桁架	(176)
10.5.2	超静定组合结构	(177)
10.6	对称结构的计算	(179)
10.6.1	结构和荷载的对称性	(179)
10.6.2	取对称基本体系计算	(180)
10.6.3	取半边结构计算	(182)
10.7	超静定拱	(187)
10.7.1	两铰拱计算	(187)
10.7.2	对称无铰拱计算	(191)
*10.8	交叉梁系和超静定空间刚架	(195)
10.8.1	交叉梁系的计算	(195)
10.8.2	超静定空间刚架的计算	(198)
10.9	温度变化和支座移动时超静定结构的内力	(199)

10.9.1	温度变化时的内力计算	(199)
10.9.2	支座移动和支座为弹性支座时的内力计算	(201)
* 10.10	超静定结构的位移计算	(205)
10.11	超静定结构计算的校核	(207)
	本章小结	(209)
	思考题	(210)
	习题	(211)
<b>11</b>	<b>位移法</b>	(216)
11.1	位移法的基本概念	(216)
11.2	等截面直杆的形常数和载常数	(217)
11.2.1	等截面直杆的形常数	(217)
11.2.2	等截面直杆的载常数	(219)
11.3	位移法的基本未知量和基本体系	(222)
11.3.1	位移法的基本未知量	(222)
11.3.2	位移法的基本体系	(223)
11.4	位移法方程	(224)
11.4.1	位移法方程的建立	(224)
11.4.2	位移法方程的典型形式	(225)
11.5	位移法计算连续梁和无侧移刚架	(227)
11.6	位移法计算有侧移刚架	(231)
11.7	位移法计算对称结构	(237)
* 11.8	支座位移和温度变化时的计算	(239)
11.8.1	支座位移和弹性支座时的计算	(239)
11.8.2	温度变化时的计算	(243)
* 11.9	用直接平衡法建立位移法方程	(245)
11.9.1	等截面直杆的转角位移方程	(245)
11.9.2	用直接平衡法计算超静定结构	(246)
	本章小结	(247)
	思考题	(248)
	习题	(249)
	<b>附录 习题答案</b>	(254)
	<b>参考文献</b>	(260)

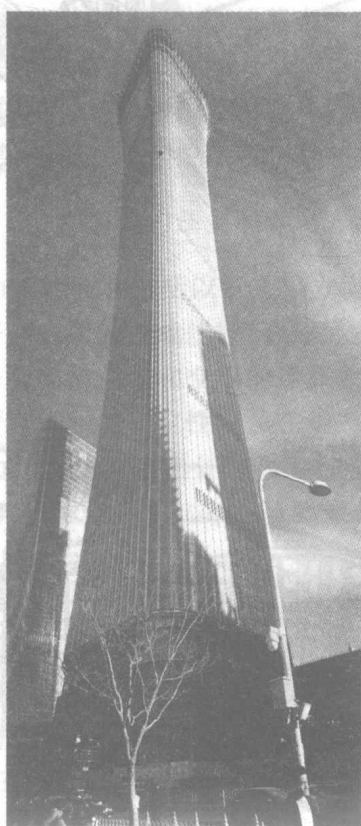
# 1 绪 论

## 本章提要

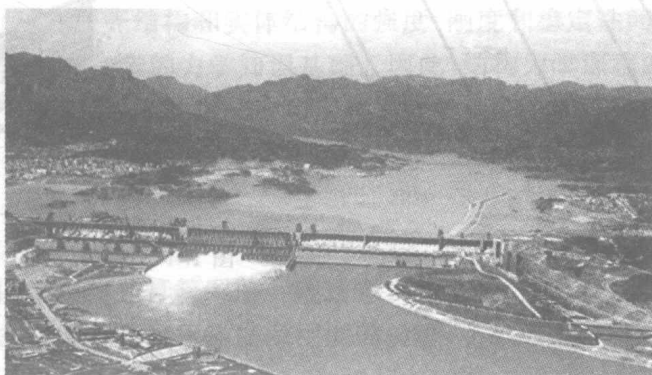
本章介绍结构力学的任务与方法、结构的计算简图、结构和杆件结构的分类、荷载的分类、结构线性分析和非线性分析共五个问题,其中结构的计算简图是重点,是本书后续章节计算的依据。

## 1.1 结构和结构的分类

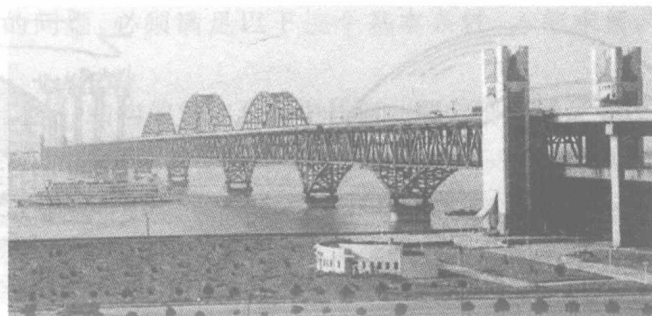
在土木工程中,由建筑材料构成,能承受荷载而起骨架作用的构筑物称为工程结构,简称结构。图 1.1 所示是一些工程结构的例子<sup>①</sup>。图 1.1(a)所示为 2019 年将要建成的北京最高(528m)的建筑——中国尊大厦,图 1.1(b)所示为一水利枢纽工程,图 1.1(c)所示为一桥梁结构。再细一些,如图 1.16 所示单层厂房结构中的屋面板、屋架、梁、柱、基础及其组成的体系,也都是结构。



(a)



(b)



(c)

图 1.1 工程结构示例

(a) 北京中国尊大厦;(b) 长江三峡水利工程;(c) 九江长江大桥

<sup>①</sup> 严格地说,照片中看到的是这些结构的外形,只有图 1.1(c)的桥梁结构,其受力骨架是展现在外的。

结构按其几何特征通常分为三类：

(1) 杆件结构

杆件结构是由杆件或若干根杆件相互连接组成。杆件的几何特征是：三个方向尺寸中，长度  $l$  比截面宽度  $b$  和厚度  $h$  大得多，如图 1.2 所示。各种结构中，杆件结构最多，本书讨论的也主要是杆件结构。

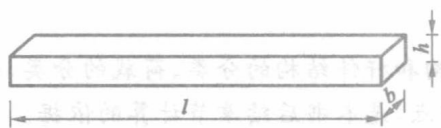


图 1.2 杆件

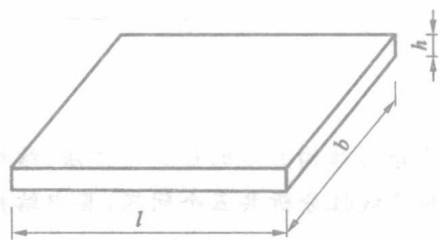


图 1.3 平板

(2) 板壳结构(又称薄壁结构)

它的几何特征是：三个方向尺寸中，厚度  $h$  比长度  $l$  和宽度  $b$  小得多，如图 1.3 所示的平板。由几块平板组合，可得折板，如图 1.4(a) 所示；图 1.4(b) 所示为折板屋面结构。当薄壁结构为曲面时，则为壳体，如图 1.5(a) 所示；图 1.5(b) 所示为一壳体屋面结构。

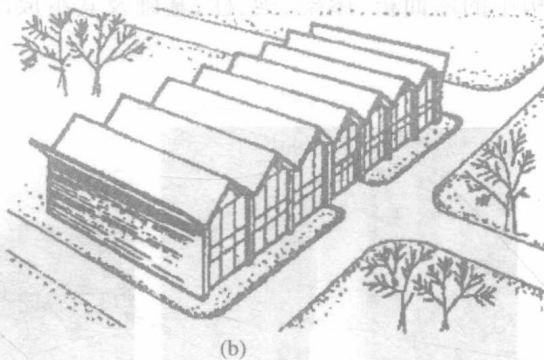
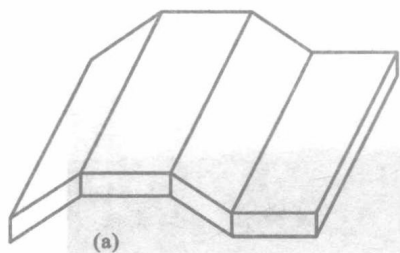


图 1.4 折板结构  
(a) 折板；(b) 折板屋面

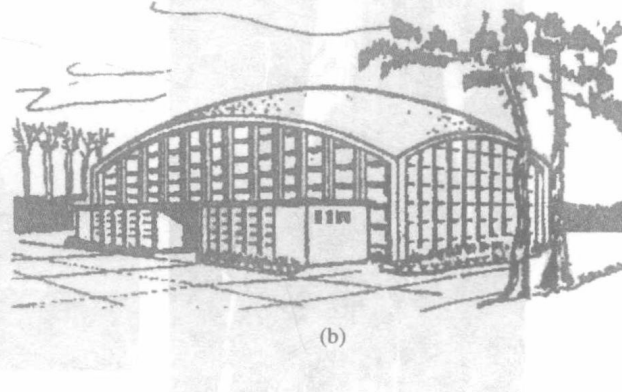
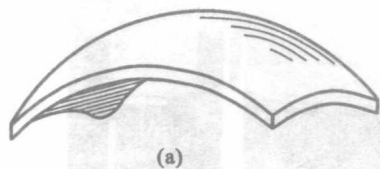


图 1.5 壳体结构  
(a) 壳体；(b) 壳体屋面结构

(3) 实体结构

实体结构的几何特征是：三个方向尺寸中，长度  $l$ 、宽度  $b$  和厚度  $h$  大致相当，如挡土墙(图 1.6)、堤坝和块体基础(图 1.7)等。

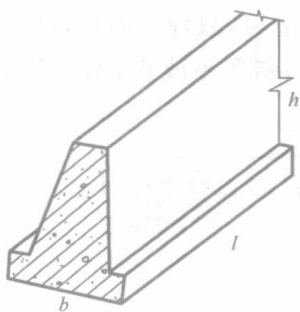


图 1.6 挡土墙

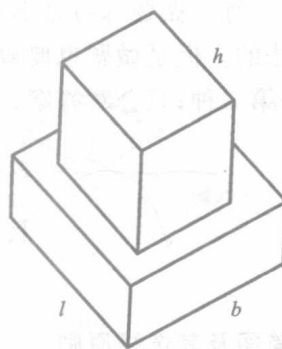


图 1.7 块体基础

## 1.2 结构力学的任务与方法

### 1.2.1 结构力学课程与其他课程的关系

本课程讨论的范围是杆件结构,因此,也可称为杆件结构力学,简称为结构力学。

结构力学是土木工程各专业的一门重要的技术基础课,在各门课程的学习中起着承上启下的作用。

结构力学是理论力学和材料力学的后续课程。理论力学研究的是刚体的机械运动(包括静止和平衡)的基本规律和刚体的力学分析。材料力学研究的是单根杆件的强度、刚度和稳定性问题。而结构力学则是研究杆件体系的强度、刚度和稳定性问题。因此,理论力学和材料力学是学习结构力学的重要的基础课程,为结构力学提供力学分析的基本原理和基础。

同时,结构力学又为后续的弹性力学(研究板壳结构和实体结构的强度、刚度和稳定性问题)以及混凝土结构、砌体结构和钢结构等专业课程提供了进一步的力学知识基础。因此,结构力学课程的学习在土木工程的房建、结构、道路、桥梁、水利及地下工程各专业的学习中均占有重要的地位。

### 1.2.2 结构力学的任务和学习方法

结构力学的任务包括以下几个方面:

- (1) 研究结构的组成规律、合理形式以及结构计算简图的合理选择;
- (2) 研究结构内力和变形的计算方法,以便进行结构强度和刚度的验算;
- (3) 研究结构的稳定性以及在动力荷载作用下结构的反应。

结构力学的计算问题分为两类:一类为静定性的问题,只需根据下面三个基本条件的第一个条件——平衡条件,即可求解;另一类为超静定性的问题,必须满足以下三个基本条件,方能求解。三个基本条件是:

(1) 力系的平衡条件 在一组力系作用下,结构的整体及其中任何一部分都应满足力系的平衡条件。

(2) 变形的连续条件(即几何条件) 连续的结构发生变形后,仍是连续的,材料没有重叠或缝隙;同时结构的变形和位移应满足支座和结点的约束条件。

(3) 物理条件 把结构的应力和变形联系起来的物性条件,即物理方程或本构方程。

以上三个基本条件贯穿在本课程的全部计算方法中,只是满足的次序和方式不同而已。

学习时要注意结构力学与其他课程的联系。对理论力学和材料力学等先修课程的知识,应当根据情况进行必要的复习,并在运用中得到巩固和提高。

学习时要注意分析方法与解题思路。在本课程中讲述的各种具体的计算方法,均是前述三个基本条件的具体体现,要注意各种方法在其计算过程中是怎样实现三个基本条件的要求的。学习时要着重掌握各种方法的解题思路,特别是要从这些具体的算法中学习分析问题的一般方法,例如:如何由已知领域逐步过渡到未知新领域的方法,如何将整体分解成局部再由局部综合成整体的方法,如何把有关几个问题加以对比的方法,等等。

学习时要注意多练。做题练习是学习结构力学的重要环节。不做一定数量的习题,是很难掌握其中的概念、原理和方法的。但是做题也要避免各种盲目性:不看书,不复习,只埋头做题,这是第一种;贪多求快,不求甚解,这是第二种;只会对答案,不会自己校核,这是第三种;错题不改正,不会从中吸取教训得以提高,这是第四种。

## 1.3 结构的计算简图

### 1.3.1 计算简图及其选择原则

实际结构是很复杂的,完全按照结构的实际工作状态进行力学分析是不可能的,也是不必要的。因此,对实际结构进行力学计算以前,必须加以简化,略去不重要的细节,用一个能反映其基本受力和变形性能的简化的计算图形来代替实际结构。这种代替实际结构的简化计算图形称为结构的计算简图。结构的受力分析都是在计算简图中进行。因此,计算简图的选择是结构受力分析的基础。选择不当,则计算结果不能反映结构的实际工作状态,严重的将会引起工程事故。所以,对计算简图的选择应该十分重视。

计算简图的选择原则是:

- (1) 计算简图应能反映实际结构的主要受力和变形性能;
- (2) 保留主要因素,略去次要因素,使计算简图便于计算。

应当指出,计算简图的选择在上述原则指导下,要根据当时当地的具体要求和条件来选用,并不是一成不变的。如对重要的结构应采用比较精确的计算简图;对不重要的结构可以使用较为简单的计算简图。如在初步设计的方案阶段,可使用较为粗糙的计算简图,而在技术设计阶段再使用比较精确的计算简图。如用手算,可采用较为简单的计算简图,而用电算,则可以采用较为复杂的计算简图。

### 1.3.2 计算简图的简化要点

#### (1) 结构体系的简化

一般结构实际上都是空间结构,各部分相互连接成为一个空间整体,以承受各个方向可能出现的荷载。但在多数情况下,常可以忽略一些次要的空间约束而将实际结构分解为平面结构,使计算得以简化。本书主要讨论平面结构的计算问题。当然也有一些结构具有明显的空间特征而不宜简化成平面结构,本书也将涉及这方面的内容。

#### (2) 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,截面变形符合平截面假设,截面上的应力可根据截面的内力(弯矩、剪力、轴力)来确定,截面上的变形也可根据轴线上的应变分量来确定。因此,在计算简图中,杆件可用其轴线表示,杆件之间的连接区用结点表示,杆长用结点间的距离表示,荷载的作用点也转移到轴线上。当截面尺寸增大时(例如超过杆长的 $1/4$ ),杆件用其轴线表示的简化,将引起较大的误差。

#### (3) 杆件间连接的简化

结构中杆件与杆件之间的相互连接处,简化为结点。木结构、钢结构和混凝土结构中杆件与杆件之间相互连接的构造方式虽然很多,但其结点通常简化为以下两种理想情形:

##### ① 铰结点

理想铰结点的特点是:被连接的杆件在结点处不能相对移动,但可绕铰自由转动;在铰结点处可以承受和传递力,但不能承受和传递力矩。这种理想情况,实际结构中是很难遇到的。图 1.8(a)所示的木屋架端结点,由于连接的作用,各杆之间不能相对移动,但有相互间微小转动,计算时简化为一铰结点,其计算简图如图 1.8(b)所示。木屋架的结点也只是比较接近铰结点。图 1.9(a)所示一钢桁架的结点,是通过节点板把各杆件焊接在一起的,实际上各杆端是不能相对转动的,但在桁架中各杆主要是承受轴力,因此计算时仍将这种结点简化为铰结点[图 1.9(b)]。

##### ② 刚结点

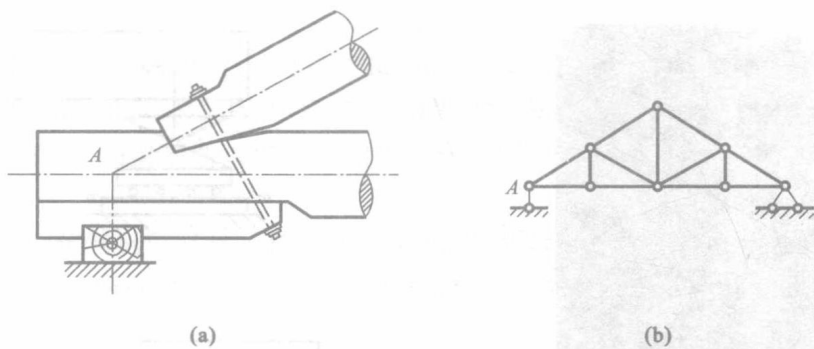


图 1.8 木屋架结点——铰结点  
(a) 木屋架端结点构造; (b) 铰结点计算简图

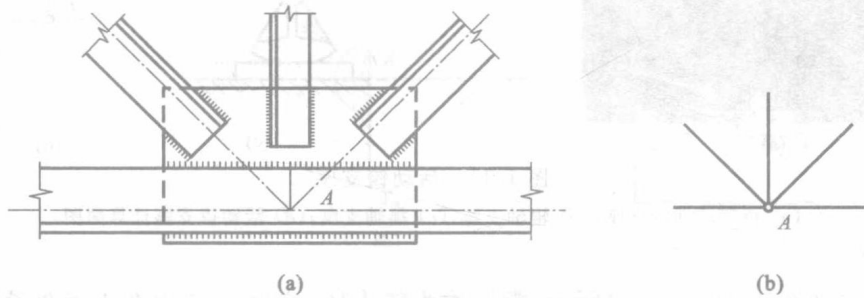


图 1.9 钢桁架结点——铰结点  
(a) 钢桁架结点做法; (b) 铰结点计算简图

刚结点的特点是:被连接的杆件在结点处不能相对移动,也不能相对转动;在刚结点处不但能承受和传递力,而且能承受和传递力矩。图 1.10(a)所示是一钢筋混凝土框架边柱和梁的结点,由于梁和柱之间的钢筋布置以及混凝土将它们浇筑成整体,使梁和柱不能产生相对移动和转动,计算时简化为一刚结点,其计算简图如图 1.10(b)所示。

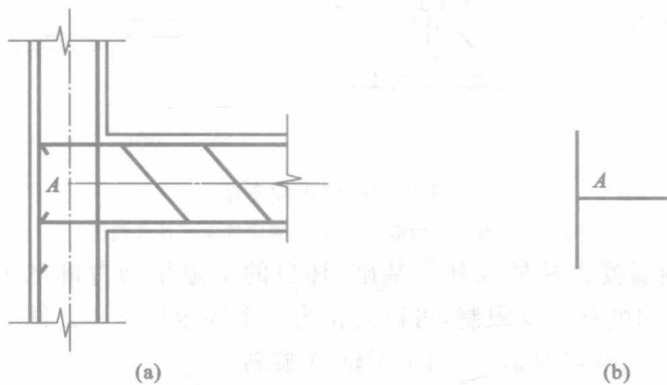


图 1.10 钢筋混凝土梁柱结点——刚结点  
(a) 钢筋混凝土梁柱结点做法; (b) 刚结点计算简图

#### (4) 结构与基础间连接的简化

结构与基础的连接装置称为支座。支座的作用是把结构固定于基础上,同时,结构所受的荷载通过支座传到基础和地基。支座对结构的反作用力称为支座反力。平面结构的支座一般简化为下面四种情形:

##### ① 活动铰支座

图 1.11(a)所示为一桥梁结构活动铰支座的照片;图 1.11(b)、(c)所示为桥梁结构中所用辊轴支座和摇轴支座的简化图形。它容许结构在支承处绕圆柱铰  $A$  转动和沿平行于支承平面  $m-n$  的方向移动,但  $A$  点不能沿垂直于支承面的方向移动。当不考虑摩擦力时,这种支座的反力  $R_A$  将通过铰  $A$  的中心并与支承平面  $m-n$  垂直,即反力的作用点和方向都是确定的,只有它的大小是一个未知量。根据活动铰支座的位移和受力特点,在计算简图中可以用一根垂直于支承面的链杆  $AB$  来表示,如图 1.11(d)所示。此时结构可绕铰  $A$  转动;链杆又可绕  $B$  转动,当转动很微小时, $A$  点的移动方向可看成是平行于支承面的。