



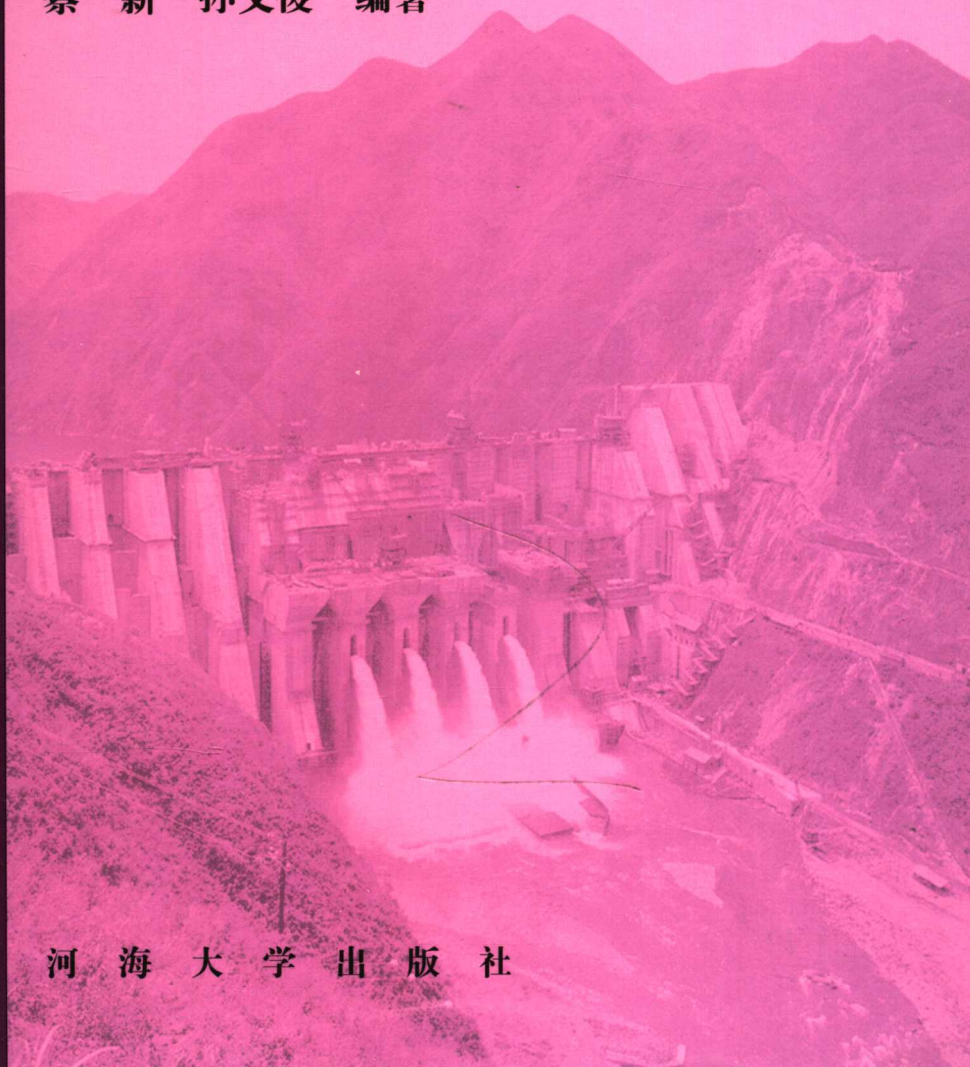
面向 21 世纪 课 程 教 材
TEXTBOOK SERIES FOR 21ST CENTURY

工
程
力
学
教
程
之
四

MECHANICS OF STRUCTURES

结 构 静 力 学

蔡 新 孙文俊 编著



河 海 大 学 出 版 社

0342/72

2004

面向 21 世纪课程教材

工程力学教程之四

结 构 静 力 学

蔡 新 孙文俊 编著

河海大学出版社

内 容 提 要

本书对传统结构力学内容作了较大调整,将静定结构内力计算和矩阵位移法分别移至《工程力学教程》系列课程教材的静力学基础和计算力学基础之中,这里主要介绍结构力学中超静定结构最基本的计算原理和计算方法。内容包括几何组成分析、虚功原理和结构的位移计算、力法、位移法(含力矩分配法)、影响线及其应用以及超静定结构的补充讨论,还在附录中给出了厂房结构内力计算大作业和连续梁影响线计算分析程序。

本书可作为高等学校工科土建、水利、道桥等专业的教材,也可作为其他相关专业的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

结构静力学/蔡新,孙文俊编. —2 版. —南京: 河海大学出版社, 2003. 10

ISBN 7 - 5630 - 1926 - X

I. 结... II. ①蔡... ②孙... III. 结构静力学-高等学校-教材 IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 090688 号

书 名 / 结构静力学
书 号 / ISBN 7 - 5630 - 1926 - X/O · 108
责任编辑 / 隋亚安
出 版 / 河海大学出版社
地 址 / 南京市西康路 1 号(邮编: 210098)
电 话 / (025) 83737852(总编室)
(025) 83722833(发行部)
经 销 / 江苏省新华书店
印 刷 / 丹阳市教育印刷厂
开 本 / 787 毫米×960 毫米 1/16
印 张 / 18.25
字 数 / 377 千字
版 次 / 2004 年 2 月第 2 版
印 次 / 2004 年 2 月第 1 次印刷
定 价 / 29.00 元

《工程力学教程》编委会

顾 问 姜弘道 赵光恒 傅作新

程迺巽 杨仲侯 陈定圻

主 任 卓家寿

副主任 孙文俊 张子明

编 委 (按姓氏笔画排列)

王向东 孙文俊 朱为玄 许庆春

江 泉 张子明 陈国荣 邵国建

陆晓敏 杨海霞 杜成斌 卓家寿

武清玺 赵 引 徐道远 黄孟生

章 青 蔡 新

总 序

《工程力学教程》系列教材是河海大学承担教育部《面向 21 世纪力学系列课程内容和课程体系改革的研究与实践》教改项目和《国家级力学教学基地》建设项目研究的成果。本教程以优化高校土木、水利类专业的固体力学系列课程知识结构体系为目标,按照“重组基础、反映现代、融入前沿、综合交叉”的原则,建立由系列模块组成有机联系的一体化力学课程新体系。原有土木、水利类专业设立的理论力学、材料力学、结构力学和弹性力学 4 门力学课程,由于各课自成系统,存在知识结构中不应有的割裂或不必要的重复现象,现代信息和应用实践也较薄弱,不利于进行完整的力学素质教育和创造性思维的培养。本教程按新组建的课程体系分为七门:静力学基础、动力学基础、材料力学、结构静力学、结构动力学、弹性力学、计算力学基础等,依序编为高校工科教材——《工程力学教程》之一至之七。

本教程具有以下特点:

1. 本教程体系采用了小型模块化和分层系列化的结构,增加了组合的灵活性,适应不同专业、不同层次的教学要求。

本教程将静力问题和动力问题分别设置模块集中论述,使得教材内容紧凑、重点突出,避免不必要的重复;将静定问题和超静定问题以及结构分析的经典理论和现代计算机方法分别设置在不同模块中,以便循序渐进地安排教学内容,使教程的层次分明,条理清晰,前后连贯,易为读者掌握。

本教程涵盖了不同性质固体(刚体和变形体)、不同形体结构(杆件、杆系和实体结构)的力学分析问题,加强了不同研究对象的各门课程之间的共性联系,又突出了各自的个性差异,有利于学生整体力学素质的提高和创新能力的培养。

本教程以基础力学为主体内容,通过反复精选,力求突出基础力学的精华,保持内容的相对稳定。另一些内容则根据水利、土木类专业的需求,着眼于加强力学素质教育和应用能力的培养,力求融入现代信息、扩大视野、预留思维空间。可根据不同专业的教学要求,由本教程各模块适当组合,得出合适的教材。

2. 本教程内容的选取和组织体现了整体力学知识的融会贯通和整合优化,既强化了力学知识的完整性,又达到了精减篇幅、提高效率的目的。

本教程中对于力学中一些重要的概念、原理和方法的论述,按其内涵的完整性和外延的逻辑性进行有机的贯通连接、交叉融会和整合优化。例如,将考察体的平

衡概念、平衡条件以及静定问题的求解等内容统一在本教程之一《静力学基础》中作严密完整的阐述,实现了刚体和变形体平衡问题的连贯以及各类静定问题求解条件和方法的统一。又如,结构分析理论中的平衡条件、协调条件和本构关系的提出、相应方程的建立和应用等,始终贯穿于不同结构问题的分析求解全过程。这样既突出了工程力学中最重要、最基本的理论工具,又强化了对工程力学问题的求解能力和正确思维方法的培养与训练。本教程中有关虚位移原理、质量几何与面积几何以及静、动力学等内容,也体现了其贯通性和统一化。

3. 本教程中内容的阐述方法不囿于一种模式。对于基本概念的提高和分析计算模型的建立等一类不易理解的内容,采用从特殊到一般的方法展开论述;对于有关力学的理论分析和推导公式等一类比较严密的、数学性较强的内容则采用从一般到特殊的方法展开演绎,并留下一些内容给读者练习。因问题不同而采用不同的叙述方式,既体现了认识论规律,又有利于培养抽象思维、逻辑推理的能力。此外,还可提高授课的质量和效率。这与过去传统教材相比,新教程的起点提高了。

4. 本教程加强了工程概念、实验和上机计算等实践性内容并增添了一些现代知识、实验技术和教学软件(本教程各门课的计算程序汇集在“工程力学教程计算软件”光盘内),以便强化学生的工程应用、创造性思维和动手能力,提高学生的综合素质。

本教程是在著名力学教育家徐芝纶院士、吴永祯、赵光恒、杨仲侯等教授工作的基础上,组织具有丰富教学经验的教师精心编撰完成的。各模块负责统稿的分别为:《静力学基础》武清玺;《动力学基础》武清玺;《材料力学》徐道远;《结构静力学》蔡新;《结构动力学》张子明;《弹性力学》陈国荣;《计算力学基础》杨海霞。

本教程系列教材第一版由教育部基础力学课程指导小组组织专家评审,参加审稿的专家有胡增强教授、王鑫伟教授、赵光恒教授、余颖禾教授、单建教授等。以上专家们提出的宝贵审稿意见,为本书的修改起了重要的指导作用。

本教程系列教材第一版自2001年8月陆续出版以来,已在河海大学水利、土木类各专业使用过两轮并被部分兄弟院校的相关专业作为教材使用。为进一步提高教材质量,特邀请范钦珊教授、王焕定教授和王琪教授组成的专家组进行了评审。根据专家们的评审意见,按照教育部“面向21世纪教材”的要求,对本教程系列教材进行了改版。

由于编者水平所限,书中肯定存在不少缺陷和差错,敬请读者不吝指正。

本教程系列教材由“河海大学新世纪教育教改工程”专项经费资助出版。

改 版 前 言

《工程力学教程》系列教材第一版自 2001 年 8 月起陆续出版以来,已在河海大学水利、土木类各专业作为教材使用过两轮并已被部分兄弟院校的相关专业作为教材使用。为进一步提高教材质量,特邀请范钦珊教授、王琪教授和王焕定教授组成的专家组进行了评审。根据专家们的评审意见,按照教育部“面向 21 世纪课程教材”的要求对本系列教材进行了修改出版。作为面向 21 世纪工程力学系列课程教材,仍按“重组基础、反映现代、融入前沿、综合交叉”的原则,在系列教材的原有体系和风格特点的基础上,对每本书都作了程度不同的修改和完善。

本书与第一版相比,主要修改如下:

1. 在 §1-4 中增加了几何组成与静定结构受力分析关系的论述,增加了几何组成较复杂的静定结构的内力计算例题,使本教材与《静力学基础》的内容更好地衔接并借此对静定结构的内力计算作必要的回顾和加深,以利于对本课程的学习。

2. 改写了第 5 章中静力法绘制连续梁影响线的内容,以便介绍附录 B“连续梁影响线计算分析程序”中绘制影响线的理论依据。

3. 删除了关于计算多跨多层刚架的“近似法”一节(§4-7)。该内容虽为工程实用方法,但不属于本课程的基本要求。

4. 对其他内容也作了部分修改,使其更加准确与完善,同时补充了少量思考题和习题。

本书承评审组专家们进行了详细的审阅并提出了很多宝贵意见,为提高本书的质量作出了贡献,特此表示诚挚的感谢。

限于编者水平,本书仍难免有不妥或疏漏之处,希望使用本书的教师和广大读者批评指正并提出宝贵意见和建议。

编 者

2003 年 8 月

前 言

本书为河海大学推出的面向 21 世纪力学系列课程教材——《工程力学教程》之四,是在河海大学“国家工科基础课程(力学)教学基地”,及河海大学“面向 21 世纪力学系列课程改革小组”审定的“《结构静力学》编写大纲”编写的校内试用教材的基础上修订而成的。原试用教材已经专家评审并在校内正式使用过,这次修订充分考虑和采纳了专家和校内师生的意见,在此谨致谢意。

根据我校面向 21 世纪力学系列课程改革的总体思路,本书对传统结构力学内容作了较大调整。首先,将“静定结构内力计算”归入新编的《静力学基础》一书中,本书仅作简要回顾;其二,将“矩阵位移法”纳入新编的《计算力学基础》一书中,本书未予阐述;其三,将“力矩分配法”作为一节放入“位移法”一章中,不单独设章。本书在选材上既注重加强基础理论又强调结合实际应用,例如全面阐述了虚功原理及其应用,简介了能量原理及能量法;又如对超静定结构的解法和结构的计算简图作了补充讨论,增设了厂房结构计算大作业等。本书还在内容的叙述上注意与其他系列力学课程的衔接和贯通。此外,为了继续培养学生应用计算机进行力学计算的能力,还给出了绘制连续梁影响线的电算程序(光盘)。

参加本书编写的有蔡新[第 2, 3, 4, 5 章(部分),附录 A, B],孙文俊(第 1, 6 章,附录 B),唐建民[第 2, 5 章(部分),附录 A]。硕士研究生杨建贵编制了附录 B 的计算程序并拟制了算例,硕士研究生方忠强参加了本书稿的校稿工作,硕士研究生杨付权参加了习题解答工作。全书由蔡新统稿编成。

本书稿主要参考了本校结构力学教研室老师历年编写的教材,同时吸取了其他同类教材的精华,还融入了作者多年教学、科研实践的经验与体会,力争贴近时代,贴近工程实际。即使如此,限于时间及作者水平,不妥之处仍不可避免,诚请专家与读者不吝赐教。

编 者

2001 年 8 月

主要符号表

符号	含意	符号	含意
A	面积	U	虚变形功
a	间距	u	水平位移, 轴向位移
C	支座位移, 力矩传递系数	V	结构势能
D, d	直径, 距离	v	横向位移, 垂直位移
E	弹性模量	$\bar{V}$	结构余能
F	力, 集中荷载	V_e	应变能
f	拱高	V_c	应变余能(余应变能)
F_{cr}	临界荷载(影响线问题)	W	功, 外力虚功
F_N	轴力	Z	影响量
F_Q	剪力	α	线胀系数, 角度
G	切变模量	β	角度
h	高度	γ	切应变
I	惯性矩	Δ	位移
i	杆件线(性)刚度	δ	位移, 柔度系数
K, k	劲度系数(刚度系数)	Δl	伸长(缩短)变形
l	长度、跨度	ε	线应变
M, m	弯矩, 力矩, 力偶矩	θ	角度, 转角
M^F	固端弯矩	λ	剪应力不均匀修正系数(剪切形状系数)
M^a	分配弯矩	μ	力矩分配系数
M^c	传递弯矩	ρ	曲率半径
q	均布荷载集度	φ	角度, 转角
q_N	轴向均布荷载集度	Ω	内力图面积, 影响线图面积
R, r	半径		
t	摄氏温度, 温度改变		

目 录

第 1 章 绪 论

§ 1-1 结构静力学的研究对象和任务	(1)
§ 1-2 结构的计算简图和分类	(3)
§ 1-3 平面体系的几何组成分析	(7)
§ 1-4 静定结构内力计算	(15)
思考题	(27)
习 题	(27)

第 2 章 虚功原理和结构的位移计算

§ 2-1 概 述	(33)
§ 2-2 外力虚功与虚变形功	(35)
§ 2-3 虚功原理	(41)
§ 2-4 虚位移原理与单位位移法 静定结构反力(内力)计算的 一般公式	(45)
§ 2-5 虚力原理与单位荷载法 结构位移计算的一般公式	(47)
§ 2-6 荷载作用下结构的位移计算	(51)
§ 2-7 图乘法计算结构的位移	(56)
§ 2-8 支座移动与温度改变时的位移计算	(63)
§ 2-9 线性变形体系的互等定理	(66)
思考题	(69)
习 题	(70)

第 3 章 力 法

§ 3-1 超静定结构的一般概念	(77)
§ 3-2 力法的基本原理	(80)
§ 3-3 力法的基本未知量、基本系和典型方程	(83)
§ 3-4 力法计算超静定结构举例	(86)
§ 3-5 支座移动与温度改变时的内力计算	(98)
§ 3-6 超静定结构位移计算与力法计算校核	(101)
§ 3-7 力法简化计算——对称性利用	(106)
§ 3-8 力法计算超静定拱	(110)
§ 3-9 超静定结构的特性	(125)
§ 3-10 等截面直杆的转角位移方程	(126)

思考题	(134)
习 题	(135)
第 4 章 位 移 法	
§ 4-1 位移法的基本原理	(141)
§ 4-2 位移法的基本未知量、基本系和典型方程	(146)
§ 4-3 位移法计算举例	(151)
§ 4-4 混合法的概念	(162)
§ 4-5 力矩分配法	(164)
§ 4-6 对称性利用	(173)
思考题	(178)
习 题	(179)
第 5 章 影响线及其应用	
§ 5-1 移动荷载与影响线的概念	(184)
§ 5-2 静力法绘制静定梁的影响线	(185)
§ 5-3 间接荷载作用下的影响线	(192)
§ 5-4 桁架影响线	(194)
§ 5-5 机动法作静定梁影响线	(197)
§ 5-6 连续梁影响线	(201)
§ 5-7 影响量的计算	(205)
§ 5-8 最不利荷载位置确定	(208)
§ 5-9 包络图	(214)
§ 5-10 简支梁的绝对最大弯矩	(218)
思考题	(224)
习 题	(224)
第 6 章 超静定结构补充讨论	
§ 6-1 超静定结构计算方法的讨论	(230)
§ 6-2 超静定结构基本解法的推广与联合应用	(233)
§ 6-3 结构计算中的能量法	(241)
§ 6-4 结构计算简图的补充讨论	(247)
习 题	(252)
附录 A 单层工业厂房结构计算作业	(255)
附录 B 连续梁影响线计算分析程序 CBINFLU. FOR	(261)
部分习题答案	(267)
参考文献	(273)

绪论

本章介绍了结构静力学的研究对象和任务,着重讨论了结构的力学计算简图的选取和平面体系的几何组成分析,这些内容是对结构进行力学分析首先需要解决的问题。

静定结构的内力计算和内力图的绘制是本课程的重要基础,本章作了必要的回顾和加深,学习者应很好复习、熟练掌握。

§ 1-1 结构静力学的研究对象和任务

工程建筑物,例如房屋、桥梁、码头、闸门、水坝等,在使用中都要承受各种荷载(如自重、风压力、水压力、货物等)的作用。建筑物中支承荷载而起骨架作用的部分称为**结构(structure)**。一根梁、一个柱等单个构件是最简单的结构。一般的结构都是由许多构件通过各种方式互相联结在一起而组成的。例如图 1-1 所示的厂房结构,就是由屋架、柱子、吊车梁及基础等组成的空间体系。

结构按其构件的几何形态可分为三类:

(1) **杆件结构(framed structures)** 此类结构由杆件组成。杆件的几何特征是横截面尺寸要比长度小得多,如图 1-1 所示。

(2) **板壳结构(slab and shell structures)** 此类结构由厚度远小于其长度和宽度的板或壳组成,所以也称为薄壁结构。例如楼板、薄拱坝等。

(3) **实体结构(massive structures)** 此类结构在三个方向上的尺度大致为同一量级。例如电站中的块式基础、锚固桥索的墩台等。

杆件结构可分为**平面结构(plane structure)**和**空间结构(space structure)**。在平面结构中,各杆的轴线和荷载的作用面在同一平面内,否则,便是空间结构。结构静力学,通常也简称为**结构力学(structural Mechanics)**,其研究对象是杆件结

构,本书只限于研究平面杆件结构的静力计算问题。

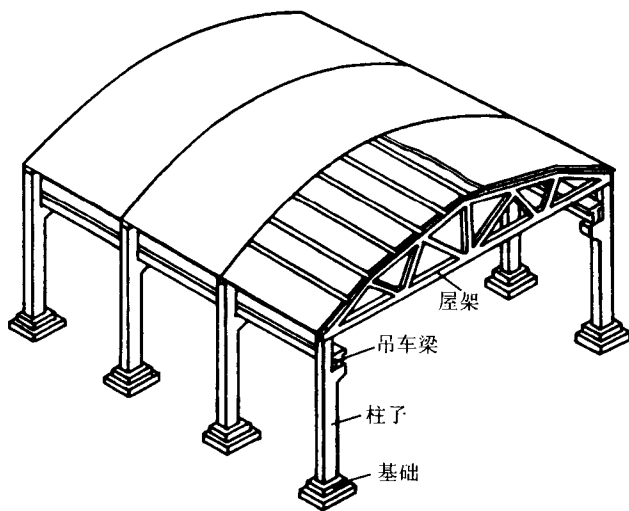


图 1-1 厂房结构

结构力学的任务是研究杆件结构的组成规律和合理形式以及结构在荷载等外因作用下产生的内力和位移的计算方法,为结构的强度、刚度和稳定性设计服务。

结构力学与理论力学和材料力学既有联系又有区别。理论力学(已学过的静力学基础和动力学基础)着重研究物体机械运动的基本规律;材料力学着重研究单根杆件的强度、刚度和稳定性的计算;而结构力学的研究对象则为杆件组成的体系。结构力学是一门重要的技术基础课程。掌握了结构力学的原理和方法,不仅可计算结构中的内力、位移等数值,而且可以对结构的受力性能,优缺点等问题有深入的认识,从而能对工程中有关问题作出正确的判断;同时为学习后续课程,如钢木结构、钢筋混凝土结构、水工结构等专业课程以及弹性力学(主要研究板壳与实体结构)等力学课程,提供必要的力学基础。

本书主要介绍结构力学中最基本的计算原理和计算方法,这些内容是解决一般常用结构的静力计算问题所必需的。根据结构的组成和计算方法的不同,杆件结构又分为**静定结构**(statically determinate structures)和**超静定结构**(statically indeterminate structures),由于静定结构的内力计算只需要应用静力平衡条件,所以本工程力学系列课程将这部分的基本内容归入《静力学基础》课程之中,本课程主要讨论超静定结构的计算。此外,结构力学现代发展的矩阵分析方法已并入《计算力学基础》课程中,本教材也不涉及这方面的内容。

§ 1-2 结构的计算简图和分类

一、结构的计算简图

在静力学基础中已经指出实际结构是很复杂的,完全按照结构的原始情况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之前,必须加以简化。略去不重要的细节,抓住其基本特点,用一个简化的图形(理想模型)来代替实际结构。这种图形叫做结构的计算简图。

计算简图的选取原则是:

- (1) 尽可能正确反映实际结构的主要力学性能,以使计算结果可靠、准确。
- (2) 必须抓住主要矛盾,忽略次要因素,力求计算简便。

结构中力学性能有关的因素主要有:结构的几何轮廓及尺寸,材料性质,各杆件之间的联结方式,杆件与基础的联结方式等。选择计算简图时,应考虑以上各方面的简化。此外,还要考虑作用在结构上的荷载的简化。

在静力学基础中,对结构杆件、支座、结点的简化已作过讨论。常见的支座简图有四种:辊轴支座(如图 1-2)、铰支座(如图 1-3)、滑移支座(如图 1-4)和固定支座(如图 1-5)。读者应该熟悉它们的表示方法和相应的约束反力。

常见的结点简图有铰结点(如图 1-6 及图 1-8 中的 C 结点)、刚结点(如图 1-7 及图 1-8 中的 A 结点和 B 结点)以及组合结点(如图 1-8 中的 D 结点),要明确它们各自的特点。



图 1-2 辊轴支座

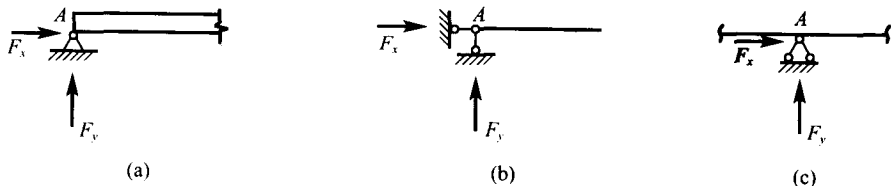


图 1-3 铰支座



图 1-4 滑移支座

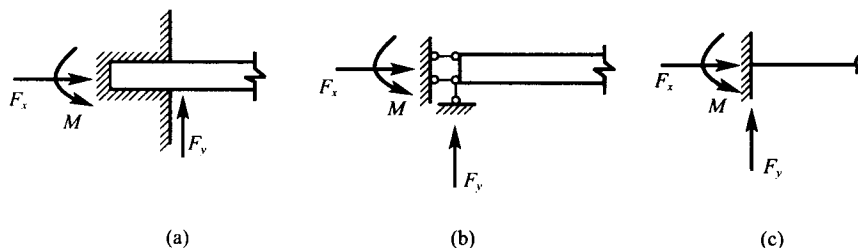


图 1-5 固定支座

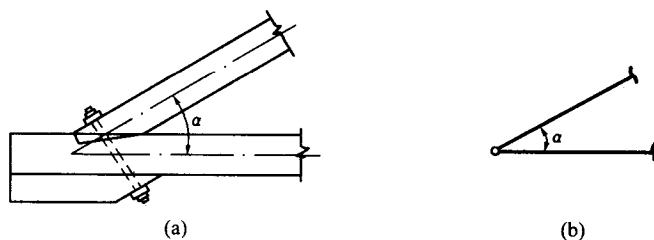


图 1-6 铰结点

关于结构材料的性质,本书与材料力学一样,将物体视为变形体,并假设为连续、均匀、各向同性和完全弹性的。这一假设对金属材料在一定受力范围内是符合实际情况的;对于混凝土、钢筋混凝土、砖、石等材料带有一定程度的近似性。而木材则应注意其顺纹和横纹两个方向性质不同的特点。

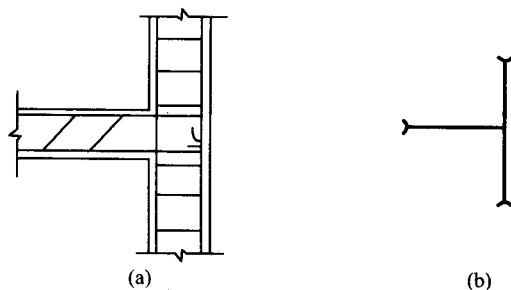


图 1-7 刚结点

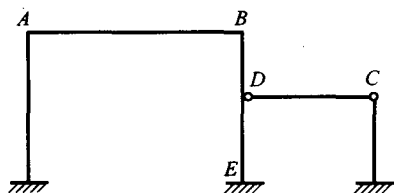


图 1-8 组合结构

关于荷载,一般指主动作用于结构上的外力,如自重、水压力等,广义荷载还包括结构受到的温度变化、支座移动和材料收缩等因素。荷载的确定很重要又较复杂,通常将长期作用于结构的不变荷载称为**恒载**(dead loads),如自重、土压力;而将暂时作用于结构的短期荷载和位置可变的移动荷载称为**活载**(live loads),如风荷载、堆货、吊车荷载;缓慢加到结构上的荷载称为**静荷载**(static loads);快速加到结构上的荷载,引起不容忽略的惯性力则为**动荷载**(dynamic loads)。本教材只讨论静力荷载下的计算问题,不论何种荷载,在杆件结构计算中都可以简化为作用在杆件轴线上的力。当荷载作用范围大大小于杆长时,可简化为集中力,如车辆轮压等,否则即为分布荷载。

下面用一个简单例子来说明选取计算简图的方法。

图 1-9(a)所示为工业建筑中采用的一种桁架式组合吊车梁,横梁 AB 和竖杆 CD 由钢筋混凝土做成,但 CD 杆的截面面积比 AB 梁的截面面积小很多。斜杆 AD , BD 则为 16 锰圆钢。吊车梁两端由柱子上的牛腿支承。

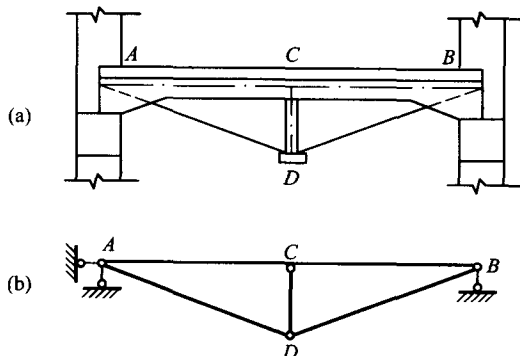


图 1-9 吊车梁及其简图

支座简化: 由于吊车梁的两端仅通过较短的焊缝与柱子牛腿上的预埋钢板相联,这种构造对吊车梁支承端的转动不能起多大的约束作用,又考虑到梁的受力情况和计算的简便,所以梁的一端可简化为铰支座而另一端则简化为辊轴支座。

结点简化：因 AB 是一根整体的钢筋混凝土梁，截面较大，故在计算简图中， AB 取为连续杆；而竖杆 CD 和钢拉杆 AD ， BD 与杆件 AB 相比，截面都较小，它们基本上都只承受轴力，故 CD ， AD ， BD 的两端都可看作是铰结，其中 C 铰联在 AB 的下方。

再用各杆件的轴线代替各杆件，则得如图 1-9(b) 所示的计算简图。图中 A ， B ， D 为铰结点， C 为组合结点。这个简图保证了主要杆件横梁 AB 的受力性能（有弯矩、剪力和轴力）；对其余三杆，保留了主要内力为轴力这一特点，而忽略了较小的弯矩和剪力的影响。对于支座，保留了主要的竖向支承作用，忽略了转动约束的作用。实践证明，分析时取这样的计算简图是合理的，它既反映了结构的变形和受力特点，又能使计算比较简单。

图 1-10~图 1-13 给出了其他一些结构的计算简图。在后面的章节中还将说明从某些实际结构到计算简图的简化过程。最后一章还要对计算简图作补充讨论。

二、杆件结构的分类

在静力学基础中，已经知道杆件结构按其受力性能可分为以下几类：梁（如图 1-10）、拱（如图 1-11）、刚架（如图 1-12）、桁架（如图 1-13）和组合结构（如图 1-9）等，应能正确区分各类结构、识别受弯杆还是只有轴力的桁杆。

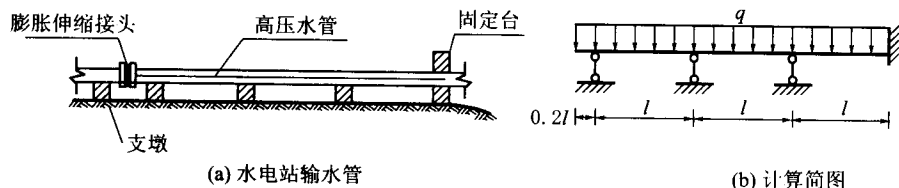


图 1-10 水电站输水管及其计算简图

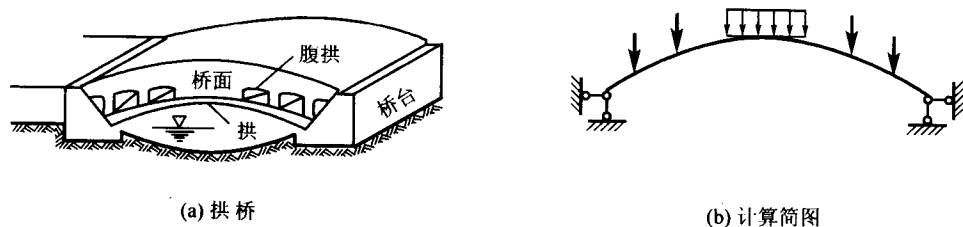


图 1-11 拱桥及其计算简图