



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

工程结构力学(I)

黄小清 曾庆敦 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面 库 课 程 教
Textbook Series for 21st Century

工程结构力学(I)

黄小清 曾庆敦 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目(CIP)数据

工程结构力学. 1 / 黄小清, 曾庆敦主编. —北京:
高等教育出版社, 2001. 7
本科土木、交通、水利、力学专业教材
ISBN 7-04-009313-8

I. 工... II. ①黄... ②曾... III. 土木结构-结构
力学-高等学校-教材 IV. TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 040137 号

工程结构力学(I)

黄小清 曾庆敦 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>

<http://www.hep.com.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 中国科学院印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 2001 年 7 月第 1 版

印 张 27

印 次 2001 年 7 月第 1 次印刷

字 数 490 000

定 价 22.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

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。

全书分(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)三册。第(Ⅰ)册包括静力分析篇、静定结构内力分析篇、杆件应力与变形分析篇。第(Ⅱ)册包括虚功原理及应用篇、超静定结构计算篇、影响线及极限分析篇、弹性稳定性分析篇;第(Ⅲ)册包括动力分析篇、动力分析专题篇。本书为第(Ⅰ)册。

本书的主要特点是:将原来的理论力学、材料力学和结构力学课程内容进行贯通、融合和渗透,对经典内容加以精选,使之更加简练并富有新意,是一本具有新体系、新内容,论述严谨,重视基础与工程应用,重视能力培养的新教材。教材具有模块化的特点。模块化的新体系既有利于学生对力学学科的整体认识,又适应了不同层次的教学要求。

本书可作为高等学校土木工程、交通、水利和工程力学等各专业的教材,也可作为有关工程技术人员参考书。

序 言

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”中“力学系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”项目的研究成果之一,是面向 21 世纪课程教材。

本教材对原来的理论力学、材料力学和结构力学三门课程的教学内容加以精选,根据 21 世纪人才培养的需要,重视基本概念、基本理论、基本方法,重视学生力学素质和创新能力的培养,优化课程结构,重组课程内容,形成新的课程体系,实现了三门课程的相互贯通、融合和相互渗透。在对传统的教学内容加以精选的同时,根据现代科学技术发展趋势,增加了计算机分析的有关内容。

本教材分(Ⅰ)、(Ⅱ)、(Ⅲ)三册。第(Ⅰ)册包括静力分析篇、静定结构内力分析篇、杆件应力与变形分析篇。第(Ⅱ)册包括虚功原理及应用篇、超静定结构计算篇、影响线及极限分析篇、弹性稳定性分析篇。第(Ⅲ)册包括动力分析篇、动力分析专题篇。

本教材具有模块化的特点,各个模块中心突出,模块之间关系明确,具有循序渐进,相互衔接,又有一定的独立性。模块化的新体系既有利于学生对力学学科的整体认识,又适应了不同层次的教学要求。

本教材初稿于 1998 年完成后,在华南理工大学交通土建专业和工程力学专业进行了多次教学实践,在广泛听取各方面意见的基础上,对初稿进行了两次较大的修改。参加本教材编写工作的有:第(Ⅰ)册:黄小清,马友发,田乔其,曾庆敦,孙萍;第(Ⅱ)册:曾庆敦,何庭蕙,黄小清;第(Ⅲ)册:林大铨,谢广达,刘绍梁,黄小清,曾庆敦。全书由黄小清、曾庆敦任主编。

本教材于 1999 年 2 月通过了教育部基础力学课程教学指导小组组织的专家评审。清华大学范钦珊教授、上海大学叶志明教授、华南理工大学韩大建教授、华南理工大学云天铨教授等对书稿提出了许多建设性意见和具体修改意见,为提高本教材质量作出了重要贡献,在此谨向他们表示深切的感谢。

本教材在编写过程中参考了众多国内外的优秀教材,并得到了华南理工大学教务处、华南理工大学交通学院的关心和帮助,得到了高等教育出版社的大力支持,在此也一并表示衷心的感谢。

由于水平有限,对三门力学系列课程内容的贯通和融合难免有缺点和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2001 年 2 月于华南理工大学

主要符号表

A	面积
a_y, a_z	截距
D, d	直径
E	材料的弹性模量(杨氏模量)
e	偏心距
F	力
F_{Ax}, F_{Ay}, F_{Az}	A 处铰链的约束力
F_P	荷载
F_{Pa}	轴向力
F_{Pr}	径向力
F_{Pt}	切向力
F_R	合力
F'_R	主矢
F_S	剪力
F_N	轴力、法向约束力
f_s	静摩擦因数
f	动摩擦因数
G	重量、材料的切变模量
g	重力加速度
I	惯性矩
I_p	极惯性矩
I_{yz}	惯性积
i	惯性半径
K, k	理论应力集中系数、弹簧刚度系数
M	弯矩、力偶矩
M_e	外力偶矩
M_f	滚动阻力偶矩

n	安全因数、转速
P	功率
p	总应力
q	分布荷载集度
R, r	半径
r	矢径
S, S^*	静矩
T	扭矩、温度
ΔT	温度差
u	水平位移、轴向位移
V	体积、内部可变量
V_e	应变能
v_v	体积改变能密度
v_d	形状改变能密度
W	功、弯曲截面系数、自由度
W_p	扭转截面系数
α	线膨胀系数
γ	切应变
Δ	变形、位移
δ	延伸率、滚动阻碍系数、厚度
ϵ	线应变
ϵ_e	弹性应变
ϵ_p	塑性应变
θ	体应变、单位长度相对扭转角、梁横截面转角
ν	泊松比
ρ	曲率半径、密度
σ	正应力
σ_t	拉应力
σ_c	压应力
σ_{bs}	挤压应力
$[\sigma]$	许用应力
$[\sigma_t]$	许用拉应力
$[\sigma_c]$	许用压应力
σ_b	强度极限

$[\sigma_{bs}]$	挤压许用应力
σ_e	弹性极限
σ_p	比例极限
σ_s	屈服极限
σ_T	温度应力
σ_u	极限应力
$\bar{\sigma}$	平均应力
$\sigma_{0.2}$	名义屈服极限
τ	切应力
$[\tau]$	许用切应力
τ_s	剪切屈服极限
φ	相对扭转角
φ_m	摩擦角
ψ	断面收缩率

目 录

课程总论	(1)
------------	-------

第一篇 静力分析

第一章 静力分析基础	(6)
§ 1-1 力及其性质	(6)
§ 1-2 力矩	(13)
§ 1-3 力偶及其性质	(18)
§ 1-4 约束和约束力	(22)
§ 1-5 研究对象和受力图	(27)
习题	(31)
第二章 力系的简化	(40)
§ 2-1 力的平移定理	(40)
§ 2-2 力系的简化	(41)
§ 2-3 重心	(48)
习题	(53)
第三章 力系的平衡	(57)
§ 3-1 力系的平衡方程	(57)
§ 3-2 刚体系统的平衡	(64)
§ 3-3 静定与超静定的基本概念	(67)
习题	(68)
第四章 摩擦与考虑摩擦时的平衡问题	(79)
§ 4-1 滑动摩擦	(79)
§ 4-2 摩擦角与自锁现象	(81)
§ 4-3 考虑滑动摩擦的平衡问题	(83)
§ 4-4 滚动阻碍简介	(86)
习题	(89)

第二篇 静定结构的内力分析

第五章 杆件内力分析	(96)
§ 5-1 内力与截面法	(96)

§ 5-2 轴向拉压杆的内力计算	(97)
§ 5-3 扭杆的内力计算	(100)
§ 5-4 单跨静定梁的弯曲内力计算	(104)
§ 5-5 单跨斜梁的内力计算	(122)
§ 5-6 组合变形杆件的内力计算	(124)
习题	(126)
第六章 杆件结构内力分析	(133)
§ 6-1 平面体系的几何组成分析	(133)
§ 6-2 多跨静定梁和静定平面刚架	(146)
§ 6-3 静定拱	(160)
§ 6-4 静定平面桁架	(173)
§ 6-5 静定结构的静力特性	(191)
习题	(193)
 第三篇 杆件应力与变形分析	
第七章 应力计算与强度条件	(206)
§ 7-1 应力与应变的概念	(206)
§ 7-2 轴向拉压杆的应力及强度计算	(208)
§ 7-3 材料在拉伸和压缩时的力学性能	(214)
§ 7-4 应力集中的概念	(221)
§ 7-5 扭杆的应力及强度计算	(222)
§ 7-6 平面弯曲梁的应力及强度计算	(230)
§ 7-7 斜弯曲梁的应力及强度计算	(254)
§ 7-8 拉压与弯曲组合作用时杆的应力及强度计算	(257)
§ 7-9 联接件的工程实用计算	(266)
习题	(271)
第八章 应力状态分析及强度理论	(285)
§ 8-1 应力状态概述	(285)
§ 8-2 平面应力状态分析	(288)
§ 8-3 三向应力状态分析	(296)
§ 8-4 广义胡克定律	(298)
§ 8-5 一般应力状态下的应变比能	(302)
§ 8-6 工程中的强度理论	(304)
§ 8-7 弯扭组合变形杆件的强度计算	(313)
习题	(317)
第九章 变形、位移分析与刚度计算	(323)
§ 9-1 轴向拉压杆的变形及刚度计算	(323)
§ 9-2 圆轴扭转时的变形及刚度计算	(327)

§ 9-3 梁的弯曲变形及刚度计算	(329)
§ 9-4 简单超静定问题	(343)
习题	(349)
附录 A 均质形体的重心表	(357)
附录 B 梁的变形表	(360)
附录 C 截面图形的几何性质	(364)
§ C-1 截面的静矩和形心	(364)
§ C-2 惯性矩和惯性半径	(365)
§ C-3 惯性积和惯性主轴	(368)
§ C-4 惯性矩和惯性积的平行移轴公式	(368)
§ C-5 惯性矩和惯性积的转轴公式	(370)
习题	(374)
附录 D 型钢规格表	(377)
习题答案	(390)
参考文献	(402)
索引	(403)
Synopsis	(414)
主编简介	(415)

课程总论

一、工程结构力学的研究内容

基础力学既是自然科学又是诸多工程科学的基础,是人类认识自然界和从事科学技术工作必须具备的基本理论。工程结构力学包含了基础力学课程中的理论力学、材料力学和结构力学。

工程结构力学研究的是物体在荷载作用下的运动效应及变形效应,从而为工程结构计算提供必要的理论基础和计算方法。

工程结构是工程中各种结构的统称,包括机械结构、土木结构、航空航天结构、化工结构等。在土木工程中,承受荷载和传递荷载,起着骨架作用的部分称为结构,如房屋中的梁柱体系、水工建筑物中的闸门和水坝、桥梁和隧洞等,都是工程结构的典型例子。

按照几何特征,结构可分为杆件结构、薄壁结构和实体结构。结构的组成部分统称为结构构件,简称为构件。根据构件的几何形状和几何尺寸可以将它们归属于杆、板、壳或体。本课程在研究物体的变形效应时,主要对象是杆件和杆件结构。

所谓杆件,是指长度远大于横向尺寸的构件。杆件各横截面形心的连线称为轴线。轴线为直线的杆件称为直杆;轴线为折线或曲线的杆件分别称为折杆或曲杆。如果杆件横截面的形状和尺寸沿杆的轴线保持不变,称为等截面杆,否则称为变截面杆。

在常规工程设计中,结构必须满足强度、刚度和稳定性的要求。

所谓强度,是指构件抵抗破坏的能力。任何构件应具备足够的强度,以保证在规定的使用条件下不发生破坏。

所谓刚度,是指构件抵抗变形的能力。构件的变形过大,即使有足够的强度,也会影响其正常工作。工程上根据构件的不同用途,要求构件在荷载作用下的弹性变形不得超过一定的范围。

所谓稳定性,是指构件在荷载作用下保持其平衡形式不发生突然转变的能力。例如受压杆件在外界扰动下,其直线的平衡形式不能突然转变为弯曲的平衡形式,否则压杆将丧失承载能力,甚至导致结构物的坍塌。

此外,结构物的设计尚需满足降低材料消耗、减轻自身重量和节约资金等经

经济性要求。如何在满足强度、刚度和稳定性的前提下,为设计既安全又经济的构件和结构提供必要的理论基础和计算方法是本课程的主要任务。

本课程主要包含以下内容:

1. 研究物体机械运动的一般规律,包括物体受力的分析方法、力系的简化和物体在力系作用下的平衡规律;物体的运动以及受力物体的运动与作用力之间的关系。

2. 研究杆件在荷载作用下的强度、刚度和稳定性问题。

3. 研究结构的组成规律、合理形式;结构的强度、刚度、稳定性以及动力学性能的计算原理和计算方法。

对于土木工程等专业的读者,工程结构力学是一门重要的技术基础课,它为进一步学习钢筋混凝土结构、钢结构、木结构、桥梁工程以及其它专业课程奠定必要的力学基础。

二、刚体与变形固体模型

工程结构力学对所研究的物体采用了两种模型:刚体和变形固体。所谓刚体,是一种理想化的力学模型,指的是在外力作用下不变形的固体,即其内部任意两点间的距离始终保持不变。实际上,任何固体受力后,内部质点之间均将产生相对运动,使其初始位置发生改变,称之为位移,从而导致物体的形状和尺寸发生变化,称为变形。具有可变形性质的固体称为变形固体。研究物体在力系作用下的运动效应,当物体变形很小,而且运动效应又与变形无关时,可以忽略微小变形,将物体视为刚体;研究物体在荷载作用下的变形效应,即使变形很小,也不能忽略,因而必须将物体视为变形固体。

三、变形固体及其基本假设

变形固体的变形,就其变形性质可分为弹性变形和塑性变形。弹性变形是指作用于变形固体的外力除去后消失的变形,不能消失的那部分残留变形则称为塑性变形或残余变形。只产生弹性变形的固体称为弹性体。

一般工程结构中,当外力不超过某一限度时,构件属于弹性体,且构件工作时所产生的弹性变形与构件尺寸相比一般是非常微小的,这类变形称为小变形。今后,除非有特别说明,本书的研究内容限于小变形和弹性体的范围。

实际的变形固体的结构和性态都比较复杂,但本书所涉及的研究内容仅仅限于宏观性态。因此,为简化研究过程,得到便于工程应用的理论表达式,一般需对变形固体作出下列假设:

连续性假设 假设组成固体的物质不留空隙地充满了固体的体积。实际上,组成固体的粒子之间存在着不同程度的空隙。然而,由于这些空隙与构件的尺寸相比极其微小,可以忽略不计,于是可以认为变形固体内部的物质在其整个体积内是连续的。这样,可以将有关的力学量表达为固体内各点坐标的连续函

数。

均匀性假设 假设组成固体的物质在固体内均匀分布并且在各处都具有相同的力学性质。事实上,可变形固体基本组成部分的性质会有不同程度的差异,即使金属的晶粒也是这样。但是,由于材料的基本组成部分的大小和物体尺寸相比极为微小,且它们在物体中的排列是不规则的,固体每一部分的力学性质都是为数极多的基本组成部分性质的统计平均值,所以可以认为变形固体内部的物质均匀分布且处处具有相同的力学性质。基于这一假设,用小试样测得的某些性质可以作为材料的性能。

各向同性假设 假设材料沿任何方向的力学性质是完全相同的。就大多数工程材料而言,虽然微观上不是各向同性的,但在宏观上表现为各向同性。例如金属材料的单个晶粒呈结晶各向异性,但形成多晶凝集体的金属时晶粒呈随机取向,因而在宏观上表现为各向同性,进行力学分析时分析对象可以不受取向限制。

实践表明,根据这些假设得出的力学理论,对于工程中的大多数材料基本上是正确的。当然,也有一些工程材料,它们的力学性质具有明显的方向性,如木材,其顺纹与横纹的强度是不同的;又如单向纤维增强复合材料,沿其纤维方向和垂直于纤维方向的力学性质是不相同的。这类材料属于**各向异性材料**。

四、荷载的分类

荷载是作用在结构上的**主动力**。对结构或构件进行分析和计算时,首先必须正确地计算作用于其上的荷载,这是结构分析与计算的第一步,也是很重要的一环。在工程实际中,结构或构件所受的荷载多种多样,为了便于分析和计算,可以从不同的角度将荷载进行分类。

恒载与活载—荷载按其作用时间的长短,可分为恒载与活载。恒载是长期作用在结构上的不变荷载,如结构的自重、土压力等。活载是暂时作用于结构上的可变荷载,如车辆荷载、吊车荷载、风荷载、雪荷载及人群荷载等。活载还可划分为**可动荷载**和**移动荷载**两类。可动荷载是指在结构上能占有任意位置的活载(如风、雪载),而移动荷载则为一系列互相平行、间距保持不变且能在结构上移动的活载(如车辆及吊车荷载)。

静荷载与动荷载—荷载按其作用的性质分为静荷载和动荷载。静荷载是指逐渐增加的,不致使结构产生显著的冲击或振动,因而可略去惯性力影响的荷载。当它增至最后的确定数值后,其大小、作用位置及方向不再随时间而变化。例如将机器缓慢地放置在基础上时,机器对基础的作用力便是静荷载。动荷载是一种突然施加的,或者随时间迅速变化的荷载,它将使结构受到显著的冲击和振动,产生不容忽视的加速度。例如地震力、打桩机产生的冲击荷载等。

表面力与体积力—荷载按其作用方式又可分为表面力和体积力。表面力是

作用于构件表面的力,例如油缸内的油对缸壁的压力。体积力是连续分布于物体内部各点的力,如物体的重力。

应该指出,结构除了承受荷载外,尚可受到其它外在因素作用,如温度改变、支座移动、制造误差等。

五、结构计算简图

一个实际的结构,无论是本身的构造、构件与构件间的联结以及荷载的作用与传递等都是很复杂的。进行力学分析计算时,必须将实际结构或构件抽象简化为既能反映实际受力状况又便于计算的图形,这种代替实际结构的简化图形称为该结构的**计算简图**。

计算简图选择的原则为:尽量反映结构的主要特征,力求便于结构的力学计算。

对实际结构或构件的抽象简化,主要包括对其几何形状、荷载、支座以及对构件与构件之间的联接方式的简化。

在杆件结构的计算简图中,杆件均可用其轴线表示。杆件间相互联结处称为**结点**。结构的结点通常可简化为**铰结点**和**刚结点**。铰结点的基本特点是它所联结的各杆件都可以绕结点作自由转动。刚结点的特点是它所联结的各杆不能绕结点自由转动,即在结点处各杆端之间的夹角始终保持不变。

如何选取和确定合适的计算简图,需作认真分析,也需要有较多的实际经验,并善于判断主次因素。对一些新型结构,往往要通过反复试验和实践才能获得比较合理的计算简图。不过,对于常规的结构形式,则可利用前人已积累的经验,直接采用其常用的计算简图。

第一篇 静力分析

在客观世界中,存在各种各样的物质运动,机械运动是其中的一种运动形式。物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动,平衡是机械运动的特殊情形。物体在力系作用下处于平衡,是指物体相对于惯性坐标系(工程中常将地球近似地视为惯性系)保持静止或作匀速直线运动。例如,桥梁、房屋、机床的床身、作匀速直线运动的船舶等,都处于平衡状态。

作用在物体上的两个或两个以上的力所组成的系统称为力系。静力分析研究的是物体在力系作用下的平衡规律,其主要内容包括物体受力的分析方法、力系的简化、力系的平衡条件及其工程应用。

静力分析中采用的物体模型是刚体。刚体的平衡条件也是变形固体平衡的必要条件,因此,本篇是设计结构和构件时静力计算的基础,在工程上有着广泛的应用。