



普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学

(静力学与材料力学)

Statics and Mechanics of Materials

顾晓勤 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

工 程 力 学

(静力学与材料力学)

顾晓勤 编著



机械工业出版社

本书内容包括质点和刚体静力学受力分析、力系简化、摩擦、平衡方程及应用,材料的基本变形即拉伸和压缩、剪切和挤压、扭转、弯曲,以及压杆稳定、复杂应力状态、强度理论、组合变形的强度计算、动载荷和交变应力、材料持久极限和疲劳理论等内容。

本书推荐学时数为 48 ~ 64,读者对象为应用型本科学生,以及其他类型高校相关专业学生。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学:静力学与材料力学/顾晓勤编著. —北京:机械工业出版社, 2014. 2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-45010-8

I. ①工… II. ①顾… III. ①静力学-高等学校-教材②材料力学-高等学校-教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 289906 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 凤 责任编辑:姜 凤 陈建平

版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:张 静 责任印制:李 洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·21 印张·467 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45010-8

定价:36.00 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

前 言

随着高等教育大众化、普及化的进程，应用型本科学生越来越多，他们对工程力学课程的要求，与研究型大学学生的要求有所不同。针对上述情况，作者结合二十多年的教学实践，在机械工业出版社的帮助下，编写了本教材。

本教材充分考虑当前应用型本科学生的生源特点和实际情况，在保持基本理论、基本概念的同时，突出应用性，借鉴国内外同类教材的优点，注意理论联系工程实际。本教材的目的是在有限的时间内，使学生掌握质点和刚体静力学受力分析、力系简化、摩擦、平衡方程及应用，材料的基本变形即拉伸和压缩、剪切和挤压、扭转、弯曲，以及压杆稳定、复杂应力状态、强度理论、组合变形的强度计算、动载荷和交变应力、材料持久极限和疲劳理论等内容，为专业课程学习打好基础。

本书可作为应用型本科工程力学课程的教材，本书推荐学时数为 48 ~ 64。对于多学时的工程力学课程，可以选用顾晓勤、谭朝阳编写的《理论力学》、《材料力学》；或者顾晓勤、刘申全主编的《工程力学 I》、《工程力学 II》，上述四本教材均由机械工业出版社出版。

本书的文字编写由顾晓勤完成，电子教案由谭朝阳完成。教师可登录机械工业出版社教育服务网 (www.cmpedu.com)，免费下载使用。

应用型本科教材建设目前仍处于探索阶段，由于作者水平所限，书中会有不少缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 12 月

目 录

前言	
绪论	1
第一节 刚体、变形体的概念	3
第二节 本课程的任务	4

第一篇 静 力 学

第一章 静力学基础	9
第一节 静力学的基本概念	9
第二节 静力学公理	11
第三节 约束和约束力	14
第四节 物体的受力分析和受力图	20
小结	25
习题	26
第二章 平面力系	30
第一节 平面汇交力系	30
第二节 力偶和力偶系	36
第三节 平面一般力系	39
第四节 静定问题与物体系统的平衡	49
第五节 平面静定桁架的内力计算	54
小结	61
习题	63
第三章 摩擦	69
第一节 滑动摩擦	70
第二节 摩擦角和自锁现象	71
第三节 滚动摩阻	74
第四节 考虑摩擦时物体的平衡问题	77
小结	81
习题	81
第四章 空间力系	84
第一节 力在直角坐标轴上的投影	84

第二节 力对点的矩	87
第三节 力对轴的矩	90
第四节 空间力系平衡条件	93
第五节 物体的重心	98
小结	104
习题	105

第二篇 材料力学

第五章 轴向拉伸和压缩	111
第一节 杆的内力和应力	111
第二节 杆的变形	115
第三节 材料在轴向拉伸和压缩时的力学性能	118
第四节 强度条件	122
第五节 简单拉压超静定问题	126
第六节 应力集中的概念	130
小结	132
习题	133
第六章 剪切和挤压	137
第一节 剪切的概念	137
第二节 剪切的实用计算	138
第三节 挤压的实用计算	141
小结	145
习题	145
第七章 扭转	148
第一节 扭转的概念	148
第二节 扭矩和扭矩图	149
第三节 切应力互等定理	152
第四节 圆轴扭转时横截面上的应力	153
第五节 圆轴扭转时的变形	156
第六节 圆轴扭转时的强度条件和刚度条件	158
* 第七节 非圆截面轴的自由扭转	161
小结	164
习题	165
第八章 截面的几何性质	168
第一节 截面的面积矩和形心位置	168

第二节	截面的惯性矩、惯性积和惯性半径	170
第三节	惯性矩的平行移轴公式	173
习题		175
第九章	梁弯曲时的内力和应力	177
第一节	梁的计算简图	178
第二节	弯曲时的内力计算	181
第三节	剪力图和弯矩图	184
第四节	弯曲时的正应力	190
第五节	正应力强度计算	195
第六节	弯曲切应力	198
第七节	提高梁弯曲强度的一些措施	205
小结		209
习题		210
第十章	梁的弯曲变形	215
第一节	挠曲线近似微分方程	215
第二节	确定梁位移的积分法	217
第三节	用叠加法求梁的变形	223
第四节	简单超静定梁	227
第五节	梁的刚度校核与提高梁弯曲刚度的措施	230
小结		233
习题		233
第十一章	压杆稳定	236
第一节	压杆稳定的概念	237
第二节	细长压杆的临界载荷	239
第三节	欧拉公式及经验公式	244
第四节	压杆稳定条件	248
第五节	提高压杆稳定性的措施	249
小结		250
习题		251
第十二章	复杂应力状态和强度理论	253
第一节	应力状态的概念	253
第二节	二向应力状态分析	256
第三节	三向应力状态分析	261
第四节	广义胡克定律	262
第五节	强度理论	263
小结		269

习题	270
第十三章 组合变形	273
第一节 组合变形的概念	273
第二节 拉伸（压缩）与弯曲的组合变形	274
第三节 弯曲与扭转的组合变形	277
小结	279
习题	280
第十四章 动载荷和疲劳	282
第一节 惯性力问题	282
第二节 冲击应力	287
第三节 冲击韧度	290
第四节 交变应力与疲劳失效	292
第五节 材料持久极限及影响因素	295
第六节 提高疲劳强度的措施	299
小结	301
习题	302
附录	304
附录 A 热轧型钢表	304
附录 B 部分习题参考答案	320
参考文献	327

绪 论

固体的移动、旋转和变形，以及气体和液体的流动等都属于**机械运动**。力学是研究物体机械运动的科学。机械运动是最简单的运动形式之一，此外物质还有发热、发光，发生电磁现象、化学过程，以及更高级的人类思维活动等各种不同的运动形式。力学分为三个部分：**质点和刚体力学、固体力学和流体力学**。力学不具有某些工程学科的经验基础，即不依赖于经验和独立观测；力学严谨、强调演绎，看上去更像是数学，但是力学不是抽象的纯理论学科。力学研究物理现象，其目的是解释和预测物理现象，并以此作为工程应用的基础。

力使物体运动状态发生改变的效应称为**力的外效应**；而力使物体形状发生改变（即变形）的效应称为**力的内效应**，属于固体力学范畴。当讨论力的内效应时，主要在物体受到平衡力系状态下进行分析。工程力学学科涉及众多的力学分支及广泛的工程技术内容，本课程只是其中最基础的部分，即静力学和材料力学的基础部分。

工业革命以来，由于科学发展和工程技术的需要，逐步形成了现代的力学学科，计算机技术的日益普及，更是推动了工程力学数值计算的发展。许多工程实例，如水电工程（图 0-1）、桥梁（图 0-2）、建筑物（图 0-3）、海洋工程（图 0-4）、航空航天（图 0-5）、工程机械（图 0-6）等，研究和设计过程中都离不开工程力学知识。



图 0-1 三峡大坝

力学可以追溯到古希腊亚里士多德和阿基米德时代，我国古代也有关于力学研究的文献记载。到了 17 世纪，牛顿提出三定律和万有引力定律，后来达朗贝尔、拉格朗日和哈密顿给出了这些原理的其他形式。讨论固体材料的力学也起源于 17 世纪，当时研究对象主要是木材和石料，伽利略研究了梁横截面上正应力分布规律。到了 19 世纪中叶，研究对象转变为以钢材为主体的金属材料。钢材的特点，使连续均匀、各向同性等基本假设以及线弹性问题的胡克定律成为当今变形体材料力学的基础。固体力学包括材料力学、弹性力学、塑性力学等课程。到了 20 世纪，材料力学形成两大流派：欧美

材料力学体系，其代表为美国斯坦福大学铁木辛柯教授 1930 年所著的《材料力学》；前苏联工科院校材料力学体系，其代表为列宁格勒铁道学院别辽耶夫教授 1932 年所著的《材料力学》。

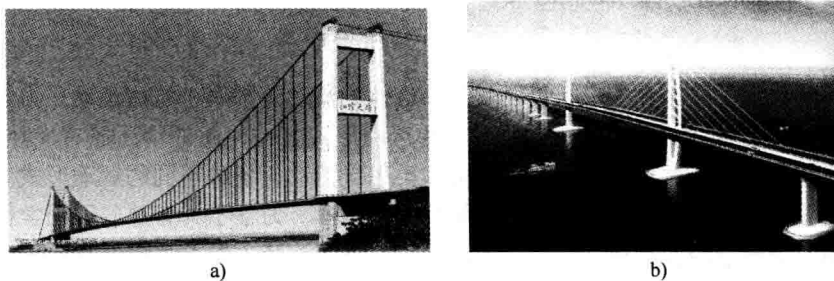


图 0-2 桥梁

a) 江阴长江大桥 b) 港珠澳大桥

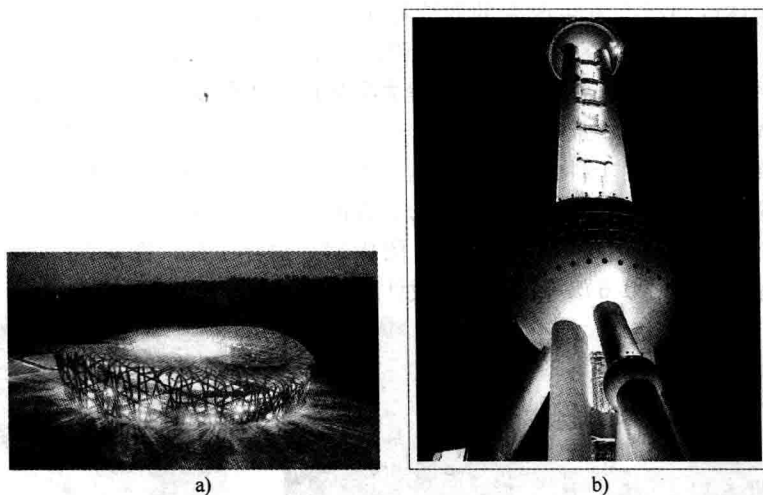


图 0-3 建筑物

a) 北京奥运会主会场 b) 上海东方明珠

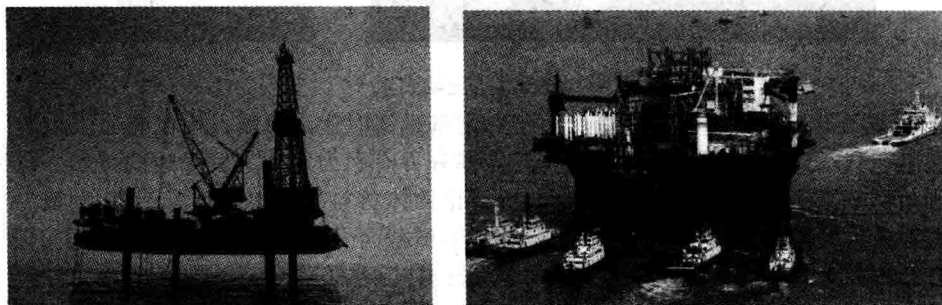


图 0-4 海洋工程



图 0-5 航空航天领域
a) 大型客机 b) 国际空间站



图 0-6 工程机械

20 世纪 50 年代开始, 计算机飞速发展, 应用不断普及, 这对于工程力学的发展起到了巨大的推动作用。在力学理论分析中, 人们可以借助计算机推导复杂公式, 从而求得复杂的解析解; 在实验研究中, 计算机不仅可以采集和整理数据、绘制实验曲线、显示图形, 还可以帮助人们选用最优参数。

近几十年来, 先进制造技术不断出现, 工程中除了使用钢铁等金属材料外, 聚合物、复合材料和工业陶瓷等材料越来越多地被采用, 工程力学研究的对象进一步扩展, 非金属材料力学也成为较多学时的工程力学课程的一个组成部分。

第一节 刚体、变形体的概念

工程中涉及机械运动的物体有时十分复杂, 在研究物体的机械运动时, 必须忽略一些次要因素的影响, 对其进行合理的简化, 从而抽象出力学模型。

当所研究物体的运动范围远远超过其本身的几何尺度时, 物体的形状和大小对运动的影响很小, 这时可将其抽象为只有质量而没有体积的质点。由若干质点组成的系统, 称为质点系。质点系中质点之间的联系如果是刚性的, 这样的质点系称为**刚体**; 如果联

系是弹性的，质点系就是**弹性体或变形体**；如果质点系中的质点都是自由的，这时质点系便是**自由质点系**。

实际物体在力的作用下都将发生变形。但对于那些受力后变形极小，或者虽有变形但对整体运动的影响微乎其微，则可以忽略变形，将物体简化为刚体。同时需要强调，当研究作用在物体上的力所产生的变形，以及由变形而在物体内部产生相互作用力时，即使变形很小，也不能将物体简化为刚体，而应是变形体。

质点、刚体与变形体都是实际物体的抽象力学模型，不是绝对的，例如对于一个航天器，当讨论轨道运动时，视航天器为质点；当讨论姿态运动时，视航天器本体为刚体，附加天线等为弹性体。又如当讨论地球绕太阳运动时，视地球为质点；当讨论地球自转时，视地球为刚体；当讨论地震时，必须将地球看作变形体。

第二节 本课程的任务

工程力学课程作为大学生的一门技术基础课，本教材只讨论工程力学学科中最基础的内容，主要涉及质点和刚体静力学、固体材料力学基础。

静止是机械运动的一种特殊形式。工程中把物体相对于地球静止或作匀速直线运动的状态称为物体的平衡状态。**静力学**主要研究物体的受力分析方法和力系的简化方法。研究物体在力系作用下平衡的规律及其应用。

材料力学所研究的仅限于杆、轴、梁等物体，其几何特征是纵向尺寸远大于横向尺寸。大多数工程结构的构件或机器的零部件都可以简化为杆件，如图 0-7、图 0-8 所示。

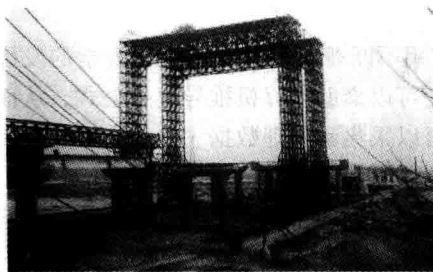


图 0-7 高架交通

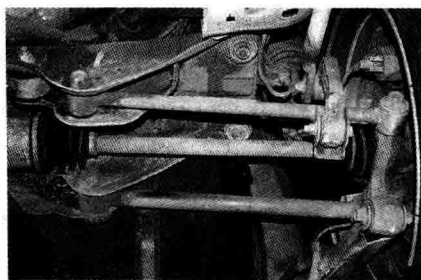


图 0-8 车辆结构

在确定构件的受力大小、方向后，需要进一步分析这些构件能否承受这些力，能否在外力作用下安全可靠地工作。对机械和工程结构的组成构件来说，为确保正常工作，必须满足以下要求：

1) 杆件具有足够的抵抗破坏的能力，使其在载荷作用下不致被破坏，即要求它具有足够的**强度**。例如，吊起重物的钢索不能被拉断；啮合的一对齿轮在传递载荷时，轮齿不允许被折断；液化气储气罐不能爆破；飞机的机翼不能断裂。为了保证构件正常工作，在外力作用下，往往也不允许构件产生永久变形。

2) 杆件具有足够的抵抗变形的能力, 使其在载荷作用下所产生的变形不超过工程上所允许的范围, 即要求它具有足够的**刚度**。例如, 图 0-9 所示的车床主轴如果变形过大, 将破坏主轴上齿轮的正常啮合, 引起轴承的不均匀磨损及噪声, 影响车床的加工精度。所以刚度要求是指构件应有足够的抵抗变形的能力。

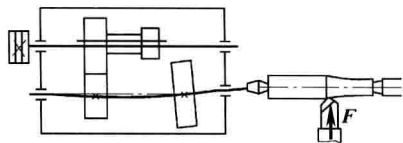


图 0-9 车床主轴受力变形

3) 杆件具有足够的抵抗失稳的能力, 使其在外力作用下能保持其原有形状下的平衡, 即要求它具有足够的**稳定性**。例如千斤顶的螺杆 (图 0-10a)、内燃机的挺杆 (图 0-10b) 等, 工作时应始终保持原有的直线平衡状态。

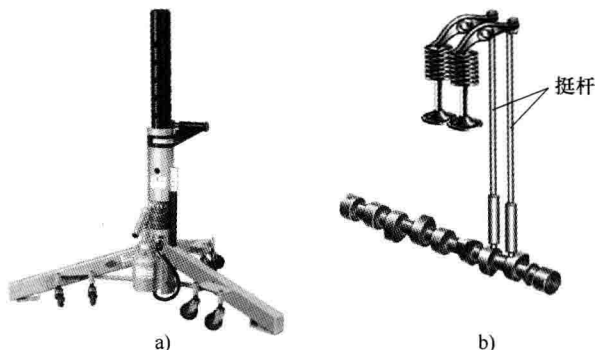


图 0-10 保持直线平衡的杆件

a) 飞机千斤顶 b) 内燃机挺杆

研究杆件的强度、刚度和稳定性, 是材料力学的任务。需要指出的是, 在研究构件的强度、刚度和稳定性时, 研究对象不再是刚体而是可变形固体。

在保证构件满足强度、刚度和稳定性三个条件的同时, 还要考虑节省材料、实用和价廉等经济要求。在机械设计中, 利用材料力学知识, 可以在相同的强度下减少材料用量, 以达到优化设计、降低成本、减轻重量等目的。

工程力学研究方法有理论方法、实验方法和计算机数值分析方法。在解决工程实际中的力学问题时, 首先从实践出发, 经过抽象化、综合、归纳, 运用数学推演得到定理和结论, 对于复杂的工程问题往往借助计算机进行数值分析和公式推导, 最后通过实验验证理论和计算结果的正确性。

在学习工程力学过程中, 要注意观察实际机械设备工作情况, 以及日常生活中的力学现象, 对力学理论要勤于思考、多做练习题, 做到熟能生巧。通过掌握领会本课程的内容, 为学习后继课程打好基础, 并能初步运用力学理论和方法解决工程实际中的技术问题。

第一篇 静力学

静力学研究物体在力系作用下平衡的普遍规律，即研究物体平衡时作用在物体上的力应该满足的条件。静力学主要研究三方面的问题：1) 物体的受力分析；2) 力系的等效与简化；3) 力系的平衡条件及应用。

所谓力系，是指作用于物体上的一群力。

所谓平衡，是指物体相对于惯性参考系（如地面）处于静止或匀速直线运动。例如，在地面上静止的建筑物，作匀速直线运动的车辆等，都处于平衡状态。

静力学是动力学的特例，因此力系的简化理论和物体受力分析的方法也是研究动力学的基础。

静力学的理论和方法在工程中有着广泛的应用，土木工程中房屋、桥梁、水坝、闸门，许多机器零件和结构件，如机器的机架、传动轴、起重机的起重臂、车间天车的横梁等，正常工作时处于平衡状态或可以近似地看作平衡状态。为了合理地设计这些零件或构件的形状、尺寸，选用合理的材料，往往需要首先进行静力学分析计算，然后对它们进行强度、刚度和稳定性计算。所以静力学的理论和计算方法是土木工程、机械零件和结构件静力设计的基础。

第一章 静力学基础

第一节 静力学的基本概念

一、力的概念

物体间的作用形式是多种多样的，大致可分为两类，一类是通过场起作用，包括重力、万有引力、电磁力等；另一类是由物体间的接触而产生的，如物体间的压力、摩擦力等。

人用手拉悬挂着的静止弹簧，人手和弹簧之间有了相互作用，这种作用引起弹簧运动和变形。运动员踢球，脚对足球的力使足球的运动状态和形状都发生变化。太阳对地球的引力使地球不断改变运动方向而绕着太阳运转。锻锤对工件的冲击力使工件改变形状等。人们在长期的生产实践中，通过观察分析，逐步形成和建立了力的科学概念：力是物体之间的相互机械作用，这种作用使物体的运动状态发生变化或使物体形状发生改变。

在力学中，我们抛开力的物理本质，只研究其表现，即力对物体的效应。力对物体的效应表现为两个方面：一是使物体的运动状态发生改变，叫做力的外效应；二是使物体的形状发生改变，叫做力的变形效应或内效应。在本篇静力学中采用刚体模型，因而只研究力对物体的运动效应。

实践证明，力对物体的内外效应决定于三个要素：1) 力的大小；2) 力的方向；3) 力的作用点。

力的作用点表示力对物体作用的位置。力的作用位置在实际中一般不是一个点，而往往是物体的某一部分面积或体积。例如人脚踩地，脚与地之间的相互压力分布在接触面上；物体的重力则分布在整个物体的体积上。这种分布作用的力称为**分布力**。但有时力的作用面积不大，例如钢索吊起机器设备，当忽略钢索的粗细时，可以认为二者连接处是一个点，这时钢索拉力可以简化为集中作用在这个点上的一个力。这样的力称为**集中力**。由此可见，力的作用点是力的作用位置的抽象化。

为了度量力的大小，必须首先确定力的单位，本书采用国际单位制，力的大小以牛[顿] (N) 或千牛[顿] (kN) 为单位。

在力学中要区分两类量：标量和矢量。在确定某种量时，只需一个数就可以确定的量称为**标量**。例如长度、时间、质量等都是标量。在确定某种量时，不但要考虑它的大小，还要考虑它的方向，这类量称为**矢量**，也称**向量**。力、速度和加速度等都是矢量。矢量可用一具有方向的线段来表示。如图 1-1 所示，线段的起点 *A*（或终点 *B*）表示力的作用点，沿力矢顺着箭头的指向表示力的方向；线段的长度（按一定的比例尺）表