

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

高等学校教材



工程力学

GONG CHENG LI XUE

张子栋 主编

华中理工大学出版社

工 程 力 学

张 子 栋 主编

(抚顺石油学院)



华中理工大学出版社

内 容 简 介

本书是根据国家教委颁发的高等工业学校《工程力学课程教学基本要求》编写的，适合作石油加工、化工工艺等类专业的教材（70学时左右），也可供有关工程技术人员和自学者参考。

本书内容包括：绪论，静力学的基本概念，平面汇交力系，力矩和力偶，平面一般力系，摩擦，空间力系和重心，材料力学的基本概念，拉伸与压缩，剪切与扭转，平面弯曲，复杂应力状态及强度理论，电测应力分析简介，组合变形，薄壁圆筒和厚壁圆筒，压杆稳定，交变应力。

工 程 力 学

张子栋 主编

责任编辑 湛柏琼

*

华中理工大学出版社出版发行

（武昌喻家山）

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：11.875 字数：292 000

1992年4月第1版 1992年4月第1次印刷

印数：1—1 000

ISBN 7-5609-0649-4/O·89

定价：3.08元

（鄂）新登字第10号

序

本书是根据国家教委颁发的高等工业学校《工程力学课程教学基本要求》编写的，适用于高等工业学校石油加工、化工工艺等类专业（70学时左右）。

考虑到专业的需要，书中还编入了电测应力分析简介和厚壁圆筒等内容。

本书也可作为职工大学、函授大学和夜大学石油加工、化工工艺专业《工程力学》的教材。

本书由张子栋编写第十、十二、十三、十四、十五和十六章并负责主编，王瑞苓编写绪论、第一、二、三、四、五和六章，金梦香编写第七、八、九和十一章。

本书承蒙华中理工大学赵廷仕教授和抚顺石油学院张振华教授审阅，编者在此向他们致以谢意。

限于编者的水平，本书定会有些缺点和错误，请广大教师和读者批评指正。

编 者

1990年10月

目 录

绪论	(1)
----	-------

第一篇 静 力 学

第一章 静力学的基本概念	(3)
--------------	-------

§ 1-1 刚体的概念	(3)
§ 1-2 力的概念	(4)
§ 1-3 平衡的概念	(4)
§ 1-4 力的可传性	(6)
§ 1-5 作用与反作用定律	(7)
§ 1-6 约束与约束反力	(8)
§ 1-7 物体的受力分析和受力图	(13)
思考题	(16)
习题	(17)

第二章 平面汇交力系	(20)
------------	--------

§ 2-1 平面汇交力系合成的几何法	(20)
§ 2-2 平面汇交力系平衡的几何条件	(22)
§ 2-3 三力平衡定理	(24)
§ 2-4 力在轴上的投影	(26)
§ 2-5 平面汇交力系的合成与平衡的解析法	(27)
思考题	(31)
习题	(31)

第三章 力矩和力偶	(35)
-----------	--------

§ 3-1 力对点之矩	(35)
§ 3-2 力偶和力偶矩	(37)
§ 3-3 平面力偶系的合成和平衡条件	(39)
思考题	(41)
习题	(42)

第四章 平面一般力系	(44)
§ 4-1 力的平移定理	(44)
§ 4-2 平面一般力系向一点的简化	(46)
§ 4-3 平面一般力系简化的结果 合力矩定理	(48)
§ 4-4 平面一般力系的平衡条件和平衡方程	(51)
§ 4-5 平面平行力系的平衡方程	(55)
§ 4-6 物体系的平衡 静定与静不定问题的概念	(58)
§ 4-7 平面简单桁架的内力分析	(62)
思考题	(66)
习题	(67)
第五章 摩擦	(72)
§ 5-1 摩擦现象	(72)
§ 5-2 滑动摩擦	(72)
§ 5-3 考虑摩擦时的平衡问题	(74)
§ 5-4 滚动摩擦阻的概念	(79)
思考题	(81)
习题	(82)
第六章 空间力系 重心	(85)
§ 6-1 力在直角坐标轴上的投影	(85)
§ 6-2 力对轴之矩	(86)
§ 6-3 空间一般力系的平衡方程	(87)
§ 6-4 重心	(92)
思考题	(96)
习题	(96)

第二篇 材 料 力 学

第七章 材料力学的基本概念	(100)
§ 7-1 材料力学的任务	(100)
§ 7-2 变形体的性质及其基本假设	(101)
§ 7-3 构件的分类 构件的几何特性	(102)
§ 7-4 杆件变形的的基本形式	(103)

思考题	(105)
第八章 拉伸与压缩	(106)
§ 8-1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	(106)
§ 8-2 轴向拉伸与压缩时横截面上的内力和应力	(107)
§ 8-3 许用应力 拉伸与压缩时的强度条件	(116)
§ 8-4 轴向拉伸与压缩时的变形	(121)
§ 8-5 低碳钢拉伸时材料的机械性质	(126)
§ 8-6 其它材料拉伸时的机械性质	(131)
§ 8-7 压缩时材料的机械性质	(133)
* § 8-8 温度对材料机械性质的影响	(135)
* § 8-9 材料的蠕变	(136)
* § 8-10 变形能	(137)
§ 8-11 应力集中的概念	(140)
§ 8-12 安全系数和许用应力的确定	(142)
§ 8-13 拉压静不定问题	(144)
思考题	(150)
习题	(150)
第九章 剪切与扭转	(154)
§ 9-1 剪切的观念和实用计算	(154)
§ 9-2 挤压的概念和实用计算	(157)
§ 9-3 扭转的概念	(161)
§ 9-4 外力偶矩和扭矩的计算	(163)
§ 9-5 纯剪切 剪切虎克定律	(167)
§ 9-6 圆轴扭转时的应力和变形	(169)
§ 9-7 圆轴扭转时的强度条件和刚度条件	(174)
思考题	(176)
习题	(177)
第十章 平面弯曲	(181)
§ 10-1 平面弯曲的概念及实例	(181)
§ 10-2 梁的分类	(182)
§ 10-3 剪力和弯矩	(183)

§ 10-4	剪力图和弯矩图	(186)
§ 10-5	弯矩、剪力和载荷集度之间的关系	(192)
§ 10-6	纯弯曲时梁的正应力	(194)
§ 10-7	常用截面的惯性矩 平行移轴公式	(200)
§ 10-8	梁弯曲时正应力的强度条件	(206)
§ 10-9	直梁弯曲时的剪应力	(210)
§ 10-10	梁截面的合理形状	(214)
§ 10-11	梁的挠度和转角	(216)
§ 10-12	弹性曲线的近似微分方程	(217)
§ 10-13	用叠加法求梁的变形	(225)
§ 10-14	梁的刚度校核	(227)
§ 10-15	简单超静定梁	(228)
思考题	.....	( 232)
习题	.....	( 233)
第十一章	复杂应力状态及强度理论	(241)
§ 11-1	直杆轴向拉伸或压缩时斜截面上的应力	(241)
§ 11-2	应力状态的概念	(242)
§ 11-3	平面应力状态的分析 应力圆	(244)
§ 11-4	三向应力状态的概念	(254)
§ 11-5	广义虎克定律	(256)
* § 11-6	复杂应力状态下的比能	(259)
§ 11-7	强度理论简介	(260)
思考题	.....	( 264)
习题	.....	( 265)
第十二章	电测应力分析简介	(267)
§ 12-1	概述	(267)
§ 12-2	电测应力分析方法简介	(267)
§ 12-3	电测法简介	(271)
思考题	.....	( 276)
习题	.....	( 277)
第十三章	组合变形	(278)
§ 13-1	组合变形的概念和实例	(278)

§ 13-2	拉伸(压缩)与弯曲的组合	(279)
§ 13-3	扭转与弯曲的组合	(287)
思考题	.....	( 293)
习题	.....	( 294)
第十四章	薄壁圆筒和厚壁圆筒	(298)
§ 14-1	薄壁圆筒形容器的应力计算	(298)
§ 14-2	厚壁圆筒的应力计算	(301)
§ 14-3	厚壁圆筒的强度计算	(306)
思考题	.....	( 308)
习题	.....	( 308)
第十五章	压杆稳定	(309)
§ 15-1	压杆稳定的概念	(309)
§ 15-2	临界力的确定 欧拉公式	(310)
§ 15-3	临界应力 临界应力总图	(314)
§ 15-4	压杆的稳定计算	(319)
§ 15-5	压杆合理截面及材料的选择	(325)
思考题	.....	( 326)
习题	.....	( 327)
第十六章	交变应力	(330)
§ 16-1	交变应力的概念	(330)
§ 16-2	对称循环下构件的持久极限	(333)
§ 16-3	对称循环下构件疲劳强度校核	(339)
§ 16-4	提高构件疲劳强度的措施	(341)
思考题	.....	( 342)
习题	.....	( 342)
附录 I	型钢规格表	(344)
附录 II	主要材料的机械性质表	(360)
习题答案	.....	( 362)

绪 论

一、工程力学的研究对象

工程力学是一门研究物体的受力分析、平衡条件以及构件强度、刚度和稳定性的科学，它包括《理论力学》中的静力学和《材料力学》中的有关内容。

在石油化工工业中，有许多静止的结构物和设备，例如各种框架、加热炉、塔器、反应器、换热器以及油罐等。它们均在力的作用下处于平衡状态。研究平衡物体的受力分析和平衡条件，都要用到静力学的知识。

结构物、设备和机器均由构件所组成。构件在工作时都要受到力的作用。为了保证构件在力的作用下正常工作，既不被破坏，也不发生过度的变形和不丧失稳定，这就要求构件具有足够的强度、刚度和稳定性。所谓强度，是指构件在外力作用下抵抗破坏的能力。所谓刚度，是指构件在外力作用下抵抗变形的能力。所谓稳定性，是指构件保持其原有平衡形态的能力。

本书的内容包括以下两篇：

第一篇：静力学——主要研究物体的受力分析、力系的简化和物体的平衡条件，它是研究构件强度、刚度和稳定性计算的基础。

第二篇：材料力学——主要研究在保证满足强度、刚度和稳定性要求的前提下，即在保证构件的安全条件下以最经济的代价，为构件选择适宜的材料，确定合理的形状和尺寸；为构件的强度、刚度和稳定性的设计和校核提供必要的理论基础和计算方法。

构件的强度、刚度和稳定性与所用材料的机械性质有关，而

材料的这些性质是通过材料实验测定出来的，因此，我们应对材料力学实验给以足够的重视。

二、工程力学的研究方法

人们通过生产实践以及对自然现象的直接观察，逐渐地建立并不断完善了一些基本概念，如力、力矩、强度、刚度和稳定性等，科学实验是工程力学研究的重要组成部分，如静力学中的摩擦定律、材料力学中的虎克定律等就是直接建立在实验基础上的。另外，科学实验也是近代力学发展和研究的重要手段。

把从观察和实验中获取的资料，经过去粗取精，去伪存真，由此及彼和由表及里地进行处理，方可上升到理论。这就是抽象化的过程，即抓住事物的主要因素，略去次要的、局部的、偶然的因素，深入到事物的本质并理解其内在联系。在工程力学中的刚体，就是略去了物体受力后的变形；在材料力学中的理想弹性体就是略去了材料的不均匀性和各向异性。正确的抽象，不仅简化了对问题的研究，而且更深刻地接近了实际。

将长期生产实践和科学实验所积累的感性材料，加以分析、综合和归纳，找出事物的内在联系和普遍规律，得到一些基本概念和定律或原理之后，通过数学演绎和逻辑推理建立起系统的理论，然后将理论应用于实践，并在实践中不断完善理论。从近代科学技术发展来看，计算技术是非常重要的，它是工程力学走向应用的重要手段之一。

第一篇 静力学

静力学主要研究物体在外力作用下平衡的条件及其应用。具体地说，静力学将讨论以下三个问题：

(1) 物体的受力分析 把所研究的物体从周围的联系中假想地分离出来，正确地画出分离体上每个力的作用点和作用方向。

(2) 力系的简化 作用在一物体上若干个力的总和称为力系，把作用在物体上的较复杂的力系，用一个最为简单的与其等效的力系来代替称为力系的简化。

(3) 力系的平衡条件及其应用 物体处于平衡状态时，作用于物体上的力系必须满足的条件，根据平衡条件，可以求出作用在平衡物体上的某些未知力。

第一章 静力学的基本概念

§ 1-1 刚体的概念

所谓刚体，是指在力的作用下，大小和形状都保持不变的物体，它是一个理想的力学模型。事实上，刚体是不存在的，因为任何物体受力后都将会发生或多或少的变形。在很多情况下，物体的变形对于研究该物体的平衡问题来说，影响甚微。所以在研究静力学问题时，变形可以忽略不计。然而，在材料力学中，物体的变形是研究问题的主要因素。所以，在材料力学中研究的物体是变形体。

§ 1-2 力的概念

所谓力，是物体间的相互作用，这种作用使物体的运动状态发生改变，或使物体变形。力对物体的作用将产生两种效应：一是使物体的运动状态发生改变，称为力的外效应；二是使物体变形，称为力的内效应。静力学研究力的外效应，材料力学研究力的内效应。

力对物体作用的效应取决于力的大小、方向和作用点三个要素，通常称为力的三要素。

力是一个有大小和方向的量，而且服从矢量的平行四边形法则，所以力是矢量。本书中，凡是矢量都用黑斜体字母表示，例如 $\mathbf{F}$ ，而这个矢量的大小（模）则用白体的同一字母表示。

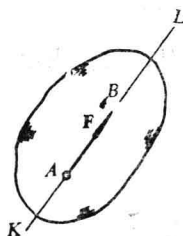


图1-1

度量力的大小的单位本书采用国际单位制(SI)，以牛(顿)(N)作为力的计算单位。牛(顿)的1 000倍称为千牛(顿)(kN)。

在图1-1中，带箭头的线段 AB 表示力 $\mathbf{F}$ ， F 表示 $\mathbf{F}$ 的大小，而 A 是 $\mathbf{F}$ 的作用点，直线 KL 是 $\mathbf{F}$ 的作用线。线段 AB 的长度可按一定的比例尺表示力的大小（模），线段的方位和箭头的指向表示力的方向。

§ 1-3 平衡的概念

所谓平衡，是指物体相对于地球（作为参考体）处于静止状态或作匀速直线运动。应该指出，绝对平衡和绝对静止的物体是不存在的。工程上所指的物体平衡，一般是相对地球而言。

经验证明：如果刚体只受两个力的作用而处于平衡状态，则这两个力大小相等、方向相反、作用线在同一直线上。这就是二

力平衡原理。必须注意，这个原理只适用于刚体，例如软绳受两个大小相等、方向相反的拉力作用可处于平衡状态，而受两个大小相等、方向相反的压力作用就不能平衡。

图1-2所示的刚性杆 AB 受两个共线力 F_A 和 F_B 作用而处于平

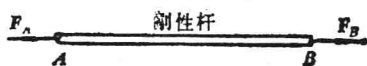


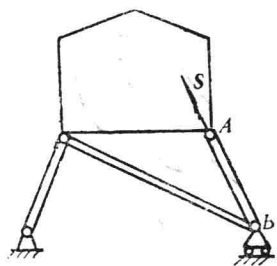
图1-2

衡时，则必须

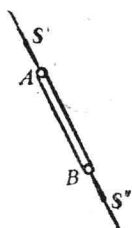
$$F_A = -F_B$$

F_A 和 F_B 称为作用在同一刚体上的一对平衡力。

工程上常遇到只承受两个力作用而处于平衡的构件，这样的构件称为二力构件简称为二力杆（图1-3a、b）。二力杆不一定是直杆，如图1-4所示的曲杆 AB ，在不计杆重量的情况下，也



(a)



(b)

图1-3

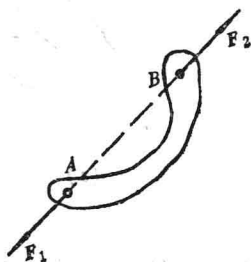


图1-4

是二力杆。根据二力平衡原理可知 F_1 和 F_2 大小相等、方向相反并沿两作用点 A 、 B 的连线。

二力平衡原理是最简单也是最基本的原理，它是研究在受力复杂情况下的物体平衡条件的基础。正确地判定二力杆，在分析物体的受力过程中起着重要作用。

§ 1-4 力的可传性

作用在刚体上的力可沿其作用线移动，而不改变它对刚体的作用效果。力的这个性质称为力的可传性。如图 1-5 所示的小车，不论在车后 A 点用力 F 推，还是在车前同一直线上的 B 点用

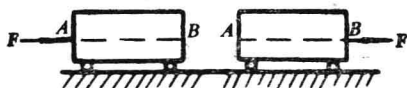


图1-5

力 F 拉，效果相同。

证明如下：

如图 1-6a 所示，设有力 F 作用在刚体上的点 A 。根据平衡力系的性质，可在力的作用线上任取一点 B ，并加上一对平衡力 F_1

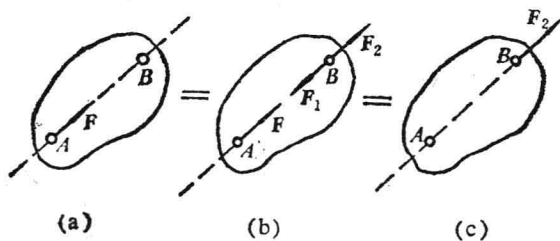


图1-6

和 F_2 ，使 $F_2 = -F_1 = F$ (图 1-6b)。由于 F 和 F_1 也是一对平衡力，可以去掉；这样只剩下 F_2 一个力 (图 1-6c)， F_2 的大小和方向与力 F 相同。这样相当于力 F 自点 A 沿其作用线移至点 B ，而不改变它对刚体的作用。

由此可见，对于刚体而言，力的三要素是力的大小、方向和作用线。作用于刚体上的力矢可以沿着作用线在刚体内移动，这种矢量称为滑动矢量。

必须指出，力的可传性不适用于变形体。这是因为作用力对

变形体产生内效应，当力沿作用线移动时，将改变它的内效应。例如一根直杆受到一对平衡拉力 F 和 F' 作用时，直杆受拉伸，它将被拉长（图1-7a）；若将两力互相易位，直杆受压缩，它将被压短（图1-7b）。

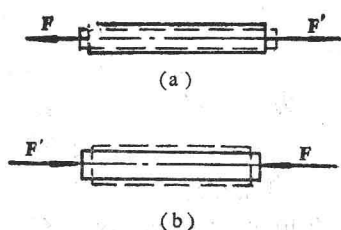


图1-7

§ 1-5 作用与反作用定律

任何两个物体间相互作用的一对力总是大小相等、方向相反、沿同一直线并分别作用在两个物体上。

应该指出，作用力与反作用力虽然是大小相等、方向相反、沿同一直线，由于它们分别作用在两个物体上，所以不能互成平衡。另外，此定律不仅适用于平衡物体，也适用于加速运动的物体。

〔例1-1〕 一物体重 G ，用绳子吊在天花板上（图1-8a）。试分析物体间的作用力和反作用力，并分析有几对平衡力。

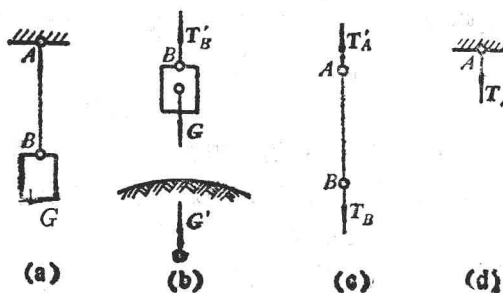


图1-8

〔解〕 重物与地球、重物与绳子以及绳子与天花板之间都互相作用。重物对绳子有作用力 T_B ，作用在绳子的端点B（图1-8

c)；同时，绳子对重物有一个反作用力 T'_B 作用在重物的B点（图1-8b），显然， $T_B = -T'_B$ 。另外，重物还受到地球的作用力即重力 G ， G' 是重物对地球的反作用力。同理，绳子对天花板有作用力 T_A ，作用在天花板的A点（图1-8d），其反作用力为 T'_A ，作用在绳子的端点A（图1-8c）。

作用在重物上的一对力 G 和 T'_B 以及作用在绳子上的—对力 T_B 和 T'_A 是两对平衡力。

§ 1-6 约束与约束反力

在空间可以自由运动而获得任意位移的物体称为**自由体**，如人投掷的石块、天空中的飞机、火箭等。位移受到某些限制的物体称为**非自由体**，如由钢索吊挂的重物、安装在桥墩上的桥梁、行驶在钢轨上的火车等。加在非自由体上使其位移受到一定限制的条件称为**约束**，这些条件一般是通过与周围物体相接触而构成的。所以，往往把限制非自由体运动的周围物体称为**约束**。例如，上述的钢索是重物的约束，桥墩是桥梁的约束，钢轨是火车的约束。约束通常是通过物体间的直接接触形成的。约束限制了非自由体沿某些方向的运动，而非自由体就沿这些方向给约束以作用力。与此同时，约束也产生大小相等、方向相反、作用线在同一直线上的反作用力施加在非自由体上（例如钢索吊挂重物的力，桥墩托着桥梁的力等），这些力称为**约束反作用力**，简称为**约束反力**或**反力**。约束反力的方向总是和非自由体上该约束所限制的位移方向相反。约束反力的大小和方向，取决于主动力的作用情况和约束的形式。所以，在静力学中约束反力一般来说是未知力。所谓**主动力**，是指能主动引起物体运动状态改变或使物体有运动状态改变趋势的力。例如物体的重力、风力、液体压力等。主动力在工程中也称为**载荷**。

约束是由物体间的相互接触引起的。因此，约束反力的作用