



高等学校规划教材

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主 编 龚良贵 章宝华

副主编 彭南陵 熊拥军



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高等学校规划教材

工 程 力 学

主 编 龚良贵 章宝华
副主编 彭南陵 熊拥军



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 简 介

本书是高等学校规划教材。全书共分 5 部分 18 章,按整合优化方式编写,把原理论力学、材料力学的内容加以精选、融合与贯通,分为静力学、材料力学、运动学、动力学和构件强度问题的专题研究 5 个模块。本书既保留了原理论力学、材料力学理论严谨、逻辑清晰、由浅入深、宜于教学的风格和体系,又根据当前教育改革的要求,强化应用性的教学内容,重点在于培养学生分析问题和解决问题的能力,以适应 21 世纪教学需要。

本书既可作为高等院校工科各专业工程力学课程的教材,也可作为其他层次教学用书和广大工程技术人员的自学用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学 / 龚良贵, 章宝华主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2007

高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5084 - 4795 - 7

I. 工… II. ①龚…②章… III. 工程力学—高等学校—教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 099841 号

书 名	高等学校规划教材 工程力学
作 者	主编 龚良贵 章宝华 副主编 彭南陵 熊拥军
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	787mm×1092mm 16 开本 24.25 印张 620 千字
版 次	2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	39.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

本书是为适应普通高等教育教学改革需要而编写的,适用于高等院校工科各专业,高职高专以及成人教育的教学用书和广大工程技术人员的自学用书。

根据当前教育改革的要求,在编写过程中做了如下努力:

(1) 在体系编排上,改变了原“理论力学”和“材料力学”两门课程自成体系的格局,将两门课程整合优化成5个部分18章,而且每章的知识结构也作了适当调整。第一部分“静力学”,突出刚体平衡时的力学特征;第二部分“材料力学”,突出变形体平衡时的力学特征;第三部分“运动学”,突出刚体运动形态;第四部分“动力学”,突出刚体运动时的力学特征;第五部分“构件强度问题的专题研究”,突出变形体的动强度问题。通过调整,本书突出了“知识和能力”这条主线,减少了重叠,符合工程设计思路要求,便于读者接受。

(2) 在内容安排上,注意处理好本课程与前修课程和后续课程间的衔接;处理好内部相关内容间的关系;精选经典内容,渗透现代力学思想,重在讲清概念,减少理论推导;加强工程意识和工程方法的训练。

(3) 在每章后面都附有小结以及思考题和习题,书末附有习题答案。旨在指导学生学习,启发学生思考。

本书由龚良贵、章宝华任主编,彭南陵和熊拥军任副主编。其中:绪论、第1章、第2章、第3章、第11章、第12章、第13章、第17章、附录D由龚良贵(南昌大学)编写;第7章、第8章、第9章、第10章、附录B由章宝华(南昌工程学院)编写;第4章、第5章、第6章、附录A由彭南陵(南昌大学)编写;第14章、第15章、第16章、第18章、附录C由熊拥军(南昌大学)编写。本书由龚良贵统稿。

本书在编写的过程中,得到了南昌大学和南昌工程学院领导的大力支持,在此致以诚挚的谢意。

限于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在缺点和不妥之处,恳请各位专家、同仁和广大读者批评指正。

编 者

2007年5月

主 要 符 号

a	加速度	$M_O(F)$	力 F 对点 O 之矩
a_a	绝对加速度	M	外力偶矩, 弯矩
a_r	牵连加速度	n	转速
a_r	相对加速度	p	动量
a_τ	切向加速度	P	功率
a_n	法向加速度	q	分布荷载
A	面积、自由振动振幅	r, R	半径
b	宽度	t	摄氏温度, 时间
C	质心, 重心	T	周期, 动能
d	力偶臂, 直径, 距离	v	速度
E	机械能, 弹性模量	v_a, v_c, v_r	绝对速度, 牵连速度, 相对速度
f	频率, 动摩擦因数	V	势能, 体积
f_s	静摩擦因数	V_ϵ	应变能
F	力, 荷载	W	重量, 功
F_I	惯性力	W_P	扭转截面系数
F_N	法向约束力, 轴力	W_z	弯曲截面系数
F_σ	临界荷载	α	角加速度, 线膨胀系数
F_S	剪力	β	角
F_R	合力	θ	梁横截面的转角
F_T	拉力	φ	相对扭转角
g	重力加速度	φ_m	摩擦角
G	切变模量	γ	切应变
h	高度	Δ	变形、位移
I	冲量	δ	厚度, 伸长率, 滚阻系数
I_P	极惯性矩	ϵ	线应变
I_y, I_z	截面对 y 轴, z 轴惯性矩	ϵ_e, ϵ_p	弹性应变, 塑性应变
J	转动惯量	λ	柔度, 长细比, 频率比
k	弹簧刚度系数	ω	角速度
K	应力集中系数	ω_0	固有圆频率
l, L	长度、跨度	μ	长度系数、泊松比
L_O	质点系对 O 轴的动量矩	ρ	密度, 曲率半径
m	质量	σ	正应力
M_O	力系对点 O 的主矩		

σ_b	抗拉（压）强度	$\sigma_{0.2}$	条件屈服应力
σ_{bs}	挤压应力	σ_s	屈服点
σ_{cr}	临界应力	τ	切应力
σ_e, σ_p	弹性极限，比例极限	$[\sigma]$	许用应力
σ_t, σ_c	拉应力，压应力	$[\tau]$	许用切应力

目 录

前言

主要符号

绪论	1
----	---

第一部分 静 力 学

引言	3
第 1 章 静力学公理和物体的受力分析	4
1.1 静力学公理	4
1.2 约束和约束反力	6
1.3 物体的受力分析与受力图	8
小结	12
思考题	12
习题	13
第 2 章 基本力系	15
2.1 汇交力系的合成与平衡	15
2.2 力矩	19
2.3 力偶系的合成与平衡	23
小结	27
思考题	28
习题	30
第 3 章 一般力系	33
3.1 力线平移定理	33
3.2 平面一般力系向一点简化	33
3.3 一般力系的平衡方程	36
3.4 物体系统的平衡·静定问题和静不定问题	40
3.5 平面简单桁架的内力计算	43
3.6 摩擦	45
小结	52
思考题	54
习题	56

第二部分 材 料 力 学

引言	63
第 4 章 材料力学的基本概念	64
4.1 材料力学的任务	64

4.2 变形固体的基本假设	64
4.3 外力及其分类	65
4.4 内力·截面法和应力的概念	65
4.5 位移与应变的概念	67
4.6 杆件变形的基本形式	68
小结	70
思考题	71
习题	71
第5章 拉伸、压缩与剪切	73
5.1 轴力及轴力图	73
5.2 轴向拉伸、压缩时的应力	75
5.3 轴向拉伸、压缩时材料的力学性能	77
5.4 轴向拉伸、压缩时的强度计算	81
5.5 轴向拉伸、压缩时的变形	83
5.6 轴向拉伸、压缩的应变能	84
5.7 拉伸、压缩时的超静定问题	86
5.8 应力集中的概念	89
5.9 连接件的实用强度计算	89
小结	93
思考题	95
习题	96
第6章 扭转	101
6.1 外力偶矩的计算·扭矩及扭矩图	101
6.2 薄壁圆筒的扭转	103
6.3 圆轴扭转时的应力和强度计算	105
6.4 圆轴扭转时的变形和刚度计算	109
6.5 圆轴的扭转应变能	111
6.6 圆轴扭转时的超静定问题	113
6.7 非圆截面杆扭转的概念	114
小结	115
思考题	116
习题	117
第7章 弯曲	120
7.1 平面弯曲的概念及梁的计算简图	120
7.2 梁的剪力与弯矩·剪力图与弯矩图	121
7.3 梁的正应力和强度计算	132
7.4 梁的切应力和强度计算	139
7.5 提高梁弯曲强度的措施	144
7.6 梁的变形和刚度计算	146
7.7 梁内的弯曲应变能	155
7.8 简单超静定梁	156
小结	158

思考题	159
习题	160
第 8 章 应力状态和强度理论	167
8.1 应力状态的概念	167
8.2 二向应力状态	168
8.3 三向应力状态	175
8.4 广义胡克定律	176
8.5 强度理论及其应用	177
小结	181
思考题	182
习题	183
第 9 章 组合变形的强度计算	186
9.1 拉伸(压缩)与弯曲的组合	186
9.2 扭转与弯曲的组合	189
9.3 两相互垂直平面内的弯曲	191
小结	194
思考题	194
习题	195
第 10 章 压杆稳定	198
10.1 压杆稳定的概念	198
10.2 细长压杆的临界力	199
10.3 压杆的临界应力及临界应力总图	201
10.4 压杆的稳定计算	204
10.5 提高压杆稳定性的措施	206
小结	207
思考题	208
习题	208

第三部分 运 动 学

引言	211
第 11 章 点的运动学和刚体的基本运动	212
11.1 点的运动学	212
11.2 刚体的平行移动	220
11.3 刚体的定轴转动	221
小结	225
思考题	226
习题	227
第 12 章 点的合成运动	231
12.1 点的合成运动的基本概念	231
12.2 点的速度合成定理	232
12.3 点的加速度合成定理	234

小结	238
思考题	239
习题	239

第 13 章 刚体的平面运动	243
13.1 基本概念与运动分解	243
13.2 平面图形内各点的速度计算	244
13.3 平面图形内各点的加速度计算	249
13.4 运动学综合应用举例	251
小结	253
思考题	254
习题	255

第四部分 动 力 学

引言	259
----------	-----

第 14 章 动量定理和动量矩定理	260
14.1 质点动力学的基本方程	260
14.2 动量定理	263
14.3 动量矩定理	268
小结	274
思考题	275
习题	276

第 15 章 动能定理	282
15.1 功与功率	282
15.2 动能定理	285
15.3 势力场·势能·机械能守恒定律	289
15.4 动力学普遍定理的综合应用	291
小结	294
思考题	295
习题	296

第 16 章 机械振动基础	300
16.1 单自由度系统的自由振动	300
16.2 单自由度系统的有阻尼自由振动	306
16.3 单自由度系统的受迫振动	308
16.4 隔振	312
小结	312
思考题	313
习题	313

第五部分 构件强度问题的专题研究

引言	315
----------	-----

第 17 章 构件的动荷载强度	316
17.1 惯性力·动静法	316

17.2 考虑惯性力时的应力计算	319
17.3 受冲击荷载时的应力和变形计算	321
17.4 构件抗冲击能力的措施	324
小结	324
思考题	326
习题	327
第 18 章 构件的疲劳强度	330
18.1 交变应力与应力循环特性	330
18.2 疲劳破坏的概念	331
18.3 疲劳极限及其测定	332
18.4 影响构件疲劳极限的主要因素	333
18.5 对称循环下构件的疲劳强度计算	338
小结	340
思考题	341
习题	341
附录 A 截面的几何性质	342
附录 B 梁在简单荷载作用下的变形	350
附录 C 型钢表	352
附录 D 习题答案	363
参考文献	376

绪 论

工程力学是一门理论性较强的技术基础学科，它是诸多力学课程的基础，并在工程技术领域中有着广泛的应用。

1. 工程力学的任务

机械设备或工程结构都是由若干构件组成。当它们传递运动或承受荷载时，各个构件都要受到力的作用。首先，必须确定作用在各个构件上有哪些力，以及它们的大小和方向；其次，在确定了作用在构件上的外力后，还必须为构件选用合适的材料，确定合理的截面形状和尺寸，以保证构件既能安全可靠的工作又符合经济要求。这些都是工程力学所要解决的问题。

工程力学涉及众多的力学分支学科，本书只是其中最基础的一部分，主要研究物体的机械运动和杆件弹性变形的一般规律。它是高等工科院校的一门理论性较强的技术基础课程，为后续课程的学习和解决工程实际问题提供力学的基本理论和方法。

机械运动是指物体在空间的位置随时间而发生的改变。机械运动是物质各种运动（例如发热、发光、电磁现象、化学过程等）中最基本以及人们在生产和生活中最常见的一种运动形式。

变形是指物体在外力作用下形状和尺寸的改变。物体的变形按其性质可分为两种：一种是**弹性变形**，它是随外力的解除而消失的变形；另一种是**塑性变形**，或称残余变形，它是在外力解除后而不能消失的变形。杆件是指一个方向（长度方向）尺寸远大于其他两个方向（宽度和厚度方向）尺寸的构件。本课程主要研究杆件的弹性变形问题。

本课程所研究的内容以牛顿定律为基础，属经典力学范畴，适用于速度远低于光速的宏观物体的运动。近代物理学的发展，发现经典力学的研究范围存在许多局限性。但在一般工程技术中的力学问题，所研究的对象都属宏观、低速范畴，故经典力学的准确性还是可以肯定的。

工程力学课程的任务，概括起来可分为两类。

(1) **研究物体的机械运动与所受力之间的关系**。这里包括力的一般性质、力系的简化及物体在力系的作用下平衡规律的研究，物体运动几何性质的描述，物体运动状态改变与其所受力之间的关系，以便掌握物体机械运动的基本规律和研究方法。

(2) **研究物体变形与所受力之间的关系**。即研究物体在外力作用下变形和破坏的规律，为解决构件强度、刚度和稳定性问题提供基本理论和计算方法。

2. 工程力学的研究方法

由观察和实验可知，在外力作用下，任何物质均会变形。工程力学的研究方法是实验观察——建立模型——理论分析——实验（实践）验证。这是自然科学研究问题的一般方法。

本课程研究的物体，大多是各种工程结构物及其构件。这些结构物和构件，形状大小各异，组成也很复杂。因此，在研究它们的运动和变形时，必须首先根据问题的性质，抓住主要方面，略去次要因素，合理简化，抽象为力学模型。这是重要的一步。

在研究物体的平衡规律时，由于物体变形量很小或变形因素对问题的研究影响很小，可忽略物体的变形而将其抽象为刚体。在研究物体机械运动的几何性质和运动状态改变与受力之间关系时，因为物体的运动范围远大于物体本身的大小，所以可将物体抽象为一个质点，或者由质点组成的质点系。但在研究物体的变形与受力之间关系时，则不能再将物体视为刚体，而应看成可变形固体。

建立模型之后，可运用数学方法进行分析计算。这种解决工程力学问题的方法称为理论方法。然而，许多工程实际问题，仅靠理论方法还不能有效地解决，但通过实验的方法可得到满意的结果。另外，在解决构件的承载能力问题时，需要通过实验测定材料的力学性质。可见，实验方法也是解决工程力学问题的一个必不可少的方法。

随着计算机技术的迅速发展，计算机分析方法在工程力学领域中已得到日益广泛的应用，并促进着工程力学研究方法的更新。这将使工程力学在解决日常生活、环境、交通和国防等工程问题中发挥更大的作用。

3. 工程力学的地位和作用

工程力学既是基础学科，又可直接面向工程应用。这门课程讲述力学的基础理论和基本知识以及处理工程力学问题的基本方法，为后续课程的学习和解决工程实际问题提供力学基础知识。

学习工程力学不仅要深刻理解力学的基本概念和基本定律，而且要牢固地掌握由此而导出的解决工程力学问题的定理和公式，同时也要注意培养自己处理工程力学问题的能力。

第一部分 静力学

引言

静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的学科。

刚体，是指物体在力的作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变。这是一个理想化的力学模型。事实上，任何物体受力后或多或少都会发生变形，因此，实际上并不存在绝对的刚体。但是，对那些在运动中变形极小，或虽有变形但不影响其整体运动的物体，忽略变形，对问题的研究结果不仅没有显著影响，而且可以使问题得以简化。这时，该物体可抽象为刚体。将物体抽象为刚体是有条件的，这与所研究的问题的性质有关。当物体的变形（即使很小）成为所研究问题的主要方面而不应忽视时，则不能抽象成为刚体，而应当成变形体处理。

由于静力学中所研究的物体只限于刚体，所以静力学又称为**刚体静力学**。

力，是指物体间相互的机械作用。这种作用使物体的机械运动状态发生变化或形状发生变化。前者称为运动效应（又称外效应），后者称为形变效应（又称内效应）。力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点三个要素，因此，力应以矢量表示，在本书中用黑色字体 F 表示力矢量。在工程力学中采用国际单位制（SI），力的单位是牛顿（N），或千牛顿（kN）。

力系，是指同时作用在物体上的一群力。作用线在同一平面内的力系称为平面力系；作用线不在同一平面内的力系称为空间力系；作用线汇交于一点的力系称为汇交力系；作用线相互平行的力系称为平行力系；作用线既不汇交于一点，又不相互平行的力系称为一般力系。

平衡，是指物体相对于惯性参考系处于静止或作匀速直线运动的状态。它是机械运动的特殊形式。在工程实际中，通常把固连于地球的参考系作为惯性参考系，用此参考系来研究物体相对于地球的平衡问题，所得结果能很好地与实际情况相符合。

在静力学中，将研究以下三个问题。

(1) **物体的受力分析**。分析某个物体或物体系统共受几个力，以及每个力的作用位置和方向。

(2) **力系的等效与简化**。将作用在物体上的一个力系用另一个与其等效的力系来代替，这两个力系互为等效力系。如果用一个简单力系等效地替换一个复杂力系，则称为力系的简化。如果某力系与一个力等效，则此力称为该力系的合力，而力系中各力称为此力系的分力。

(3) **力系的平衡条件**。研究作用在处于平衡状态物体上的各种力系所需满足的条件。使物体处于平衡状态的力系称为平衡力系。

力系的平衡条件在工程中有着十分重要的意义，是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。因此，静力学在工程中有着广泛的应用。

第 1 章 静力学公理和物体的受力分析

本章将阐述静力学公理，并介绍工程中常见的约束和约束反力的分析及物体的受力图。静力学公理是静力学理论的基础。物体的受力分析是力学中重要的基本技能。

1.1 静力学公理

公理是人们在生活和生产实践中长期积累的经验总结，并经过实践反复检验，被确认是符合客观实际的最普遍、最一般的规律。

公理 1 力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力，可以合成为一个合力。合力的作用点也在该点，合力的大小和方向，由这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定，如图 1.1 (a) 所示。或者说，合力矢等于这两个力矢的几何和，即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

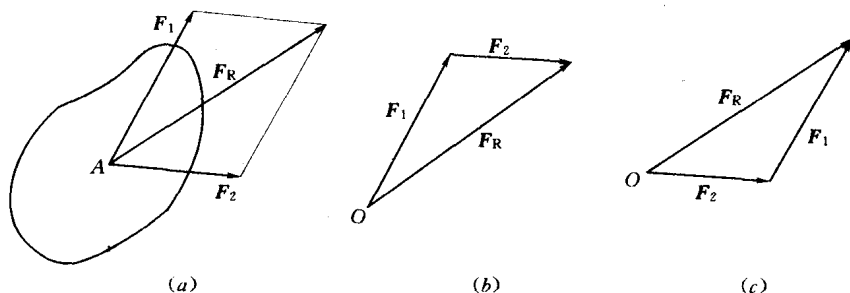


图 1.1 力的平行四边形法则

力的平行四边形也可演变成为力三角形，由它能更简便地确定合力的大小和方向，如图 1.1 (b)、(c) 所示，而合力作用点仍在汇交点 A。

这个公理表明了最简单力系的简化规律，它是复杂力系简化的基础。

公理 2 二力平衡条件

作用在刚体上的两个力，使刚体保持平衡的必要与充分条件是：这两个力的大小相等，方向相反，且在同一直线上，如图 1.2 所示。即

$$\mathbf{F}_1 = -\mathbf{F}_2 \quad (1.2)$$

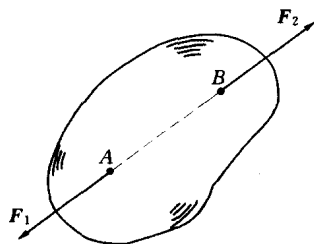


图 1.2 二力平衡条件

这个公理揭示了作用于物体上的最简单的力系平衡时必须满足的条件。对刚体来说，这个条件既是必要的，又是充分的；但对于变形体，它只是平衡的必要条件，而不是充分条件。例如，软绳受两个等值、反向、共线的拉力作用可以平衡，而受两个等值、反向、共线的压力作用就不能平衡。

工程上，把只受两个力作用而处于平衡的物体，称为二力构件（又称二力杆）。根据二力平衡条件可知，二力构件不

论形状如何，其所受的两个力的作用线，必沿这两个力作用点的连线。这一性质在对物体进行受力分析时极为有用。

公理 3 加减平衡力系原理

在作用于刚体上的已知力系中加上或减去任意的平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用。

这个公理是研究力系等效替换的重要理论依据。但必须注意，此公理也只适用于刚体而不适用于变形体。

由上述公理可以导出如下重要推论。

推论 1 力的可传性

作用在刚体上某点的力，可以沿着它的作用线移到刚体内任意一点，并不改变该力对刚体的作用。

如图 1.3 (a) 所示的刚体，在 A 点受力 F 作用，若在力 F 的作用线上任一点 B 加上一平衡力系 F_1 、 F_2 ，且使 $F = F_2 = -F_1$ [图 1.3 (b)]，则 F 与 F_1 又构成一平衡力系，将此力系去掉后，可得到作用于 B 点的力 F_2 [图 1.3 (c)]。于是，原作用于 A 点的力 F 可以沿其作用线移到 B 点。

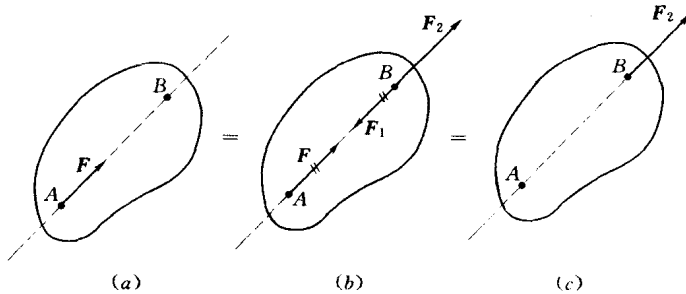


图 1.3 力的可传性

根据力的可传性，力对刚体的效应与力的作用点无关。因此，对于刚体来说，力的三要素是力的大小、方向和作用线。在这种情况下，力矢可沿其作用线任意滑动，成为滑动矢量。

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上的三个相互平衡的力，若其中两个力的作用线汇交于一点，则此三个力必在同一平面内，且第三个力的作用线通过汇交点。

设有三个互相平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 分别作用于刚体上的 A、B、C 三个点 (图 1.4)。已知 F_1 和 F_2 的作用线交于 O 点，根据力的可传性，将力 F_1 和 F_2 移到汇交点 O，并用力的平行四边形规则，求得其合力 F_{12} 。则 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两力平衡必需共线，所以，力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面，且通过力 F_1 和 F_2 的汇交点 O。

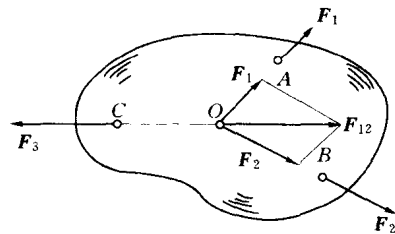


图 1.4 三力平衡汇交定理

三力平衡汇交定理说明了不平行的三个力平衡的必要条件，有时用此来确定第三个力的作用线的方位。

公理 4 作用和反作用定律

作用力和反作用力总是同时存在，两力的大小相等，方向相反，沿着同一直线，分别

作用在两个相互作用的物体上。

这一公理概括了物体间相互作用力的关系，表明作用力和反作用力总是成对出现的。由于作用力和反作用力分别作用在两个物体上，因此，不能视为平衡力系。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡时，如将此变形体刚化为刚体，其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体抽象为刚体模型的条件。刚体的平衡条件是变形体平衡的必要条件，而非充分条件。

静力学全部理论都可以由上述 5 个公理推证而得到。这既能保证理论体系的完整性和严密性，又可以培养读者的逻辑思维能力。

1.2 约束和约束反力

在空间的位移不受任何限制，可以自由运动的物体，称为**自由体**。位移受到某些限制的物体称为**非自由体**。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体，称为**约束**。例如，绳子是电灯的约束；合页是门、窗的约束；滑道是冲头的约束；轴承是飞轮和轴的约束；支座是桥梁的约束等。

既然约束阻碍着物体的运动，那么当物体沿着约束所能限制的方向运动或有运动趋势时，约束对该物体必然有力的作用，以阻碍物体的运动，这种力称为**约束反力**，简称**反力**。因此，约束反力的方向总是与该约束所能阻碍的运动方向相反，这是确定约束反力方向的准则。

物体所受的力，除约束反力外，还有例如重力、水压力、风力、电磁力等，它们是促使物体运动或使物体有运动趋势的力，这种力称为**主动力**。

在一般情况下，约束反力是由主动力的作用而引起的，因此，它又是一种被动力。静力学分析的重要任务之一就是确定未知约束反力。

工程中约束的种类很多，对于一些常见的约束，按其所具有的特性，可以归纳为下列几种基本类型。

1. 柔性约束（柔索）

柔性约束是由绳索、胶带或链条等柔性物体构成的。这类约束的性质决定它只能承受拉力，所以它给物体的约束反力也只能是拉力。因此，柔性约束对物体的约束反力，作用在接触点，方向沿着柔索背离物体。通常用 F 或 F_T 表示这类约束反力。

例如，图 1.5 (a) 所示，用绳索悬挂一重物，则绳索对重物的约束反力是沿绳索的拉力 F_{T1} 和 F_{T2} ，如图 1.5 (b) 所示。

2. 光滑接触面约束

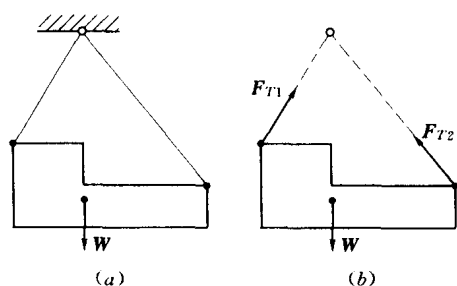


图 1.5 柔性约束

光滑接触面约束可忽略摩擦，将接触表面视为理想光滑的约束。此时，不论接触面是平面还是曲面，都不能限制物体沿约束表面切线的运动，而只能限制物体沿着接触表面法线方向，并向约束内部的运动。因此，光滑接触面对物体的约束反力通过接触点，方向沿接触表面的公法线方向，并指向受力物体。这种约束反力称为**法向反力**，通常用 F_N 表示。