

高等院校教材

简明工程力学教程

江南大学力学教研室 编
范本隽 主编 陈安军 副主编



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校教材

简明工程力学教程

江南大学力学教研室 编

范本隽 主 编

陈安军 副主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书是中、少学时类型的工程力学教材,为适应各专业的基础力学课程的学时数均有较大压缩的实际情况,本书的编写以简明、实用、易学为原则。全书分为四篇,第一篇为刚体静力学;第二篇为材料力学;第三篇为运动学与动力学;第四篇为专题。章节的安排较为紧凑,适当提高了起点,简化了叙述,重在讲述基本概念与基本方法。按少学时组织教学可只学第一篇和第二篇;按中学时组织教学可学第一、二、三篇;第四篇供选用。

本书主要面向轻工、化工、纺织、工业设计以及食品工程、通信工程等非机类及近机类专业本科教学,也可作为工科各专业的专科及成人教育教材。

图书在版编目(CIP)数据

简明工程力学教程/范本隽主编. —北京:科学出版社,2005
(高等院校教材)

ISBN 7-03-014609-3

I. 简… II. 范… 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(2004)第 119492 号

责任编辑:段博原 邢德平 于宏丽/责任校对:张 琪
责任印制:钱玉芬/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年3月第 一 版 开本:BS(720×1000)

2005年3月第一次印刷 印张:27 1/2

印数:1—4 000 字数:544 700

定价:33.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

前 言

本书是为轻工、化工、纺织、工业设计以及食品工程、通信工程等专业编写的力学教材。这些专业力学教学的课时数较少，教学要求因专业门类多、差别大而跨度较大。作为多年从事“工程力学”课程教学的教师，我们深感需要一本简明、实用、易教易学的教材。近年来高等教育的深刻变革已使一些老教材与今天的教学进度不甚和谐，新教材中体现这些专业的教学特点的也不多。因此，我们根据自己从事力学教学的实际经验，编写这样一本适合上述专业使用的工程力学教材。

简明、实用、易教、易学是编写这本教材的指导思想。全书的内容涉及刚体静力学、材料力学、运动学和动力学。编写时，凡与大学物理相重复内容的叙述尽量简略，其余内容的叙述也以简明为原则。刚体静力学的叙述直接以空间汇交力系为起点；材料力学杆件内力的叙述和计算直接引用空间一般力系的简化结果；质点的运动学和动力学合并在一章中讲述。此外，某些概念引入时衍生的公式推导，放在书末的附录中。这样安排，使教材避免了简单知识的多次重复，主线明确，达到压缩学时而不压缩内容的目的。

本书由江南大学（原无锡轻工大学）力学教研室组织编写，参加编写的人员有：范本隽（绪论，第7、10、11、12、23章，附录）；陈安军（第19~22章）；许佩霞（第8、9、13、14章）；钱静（第15~18章）；周斌兴（第1~6章）。本书由范本隽担任主编，陈安军为副主编。

本书在编写中参阅了各兄弟院校的优秀教材，获益匪浅，谨致谢意。限于我们的编写水平和时间，书中有可能存在缺点、错误，欢迎读者给予指正。

编 者

2004年6月

目 录

前言

绪论 1

第一篇 刚体静力学

第 1 章 静力学基本概念和物体受力分析	5
1.1 静力学基本概念.....	5
1.2 静力学的基本公理.....	6
1.3 约束与约束反力.....	9
1.4 物体的受力分析和受力图.....	13
第 2 章 汇交力系	18
2.1 力在空间直角坐标轴上的投影.....	18
2.2 汇交力系的合成.....	19
2.3 汇交力系的平衡条件.....	21
第 3 章 力偶系	28
3.1 力对点的矩.....	28
3.2 力偶.....	29
3.3 力偶系的合成和平衡条件.....	30
第 4 章 平面一般力系	37
4.1 力的平移定理.....	37
4.2 平面一般力系向作用面内任一点简化.....	38
4.3 平面一般力系的合成结果.....	40
4.4 平面一般力系的平衡条件.....	43
4.5 物系的平衡 静定与静不定问题.....	48
第 5 章 空间一般力系	58
5.1 力对点的矩矢.....	58
5.2 力对轴的矩.....	59
5.3 空间一般力系的平衡条件.....	61
第 6 章 重心与摩擦	67
6.1 平行力系中心和物体的重心.....	67
6.2 摩擦.....	74

第二篇 材料力学

第7章 材料力学基本概念	89
7.1 材料力学的任务与基本假设	89
7.2 杆件变形的基本形式	92
7.3 杆件的内力及其计算方法	93
7.4 应力和应变的概念 胡克定律	97
第8章 轴向拉伸与压缩	101
8.1 直杆轴向拉伸和压缩时的应力和强度条件	101
8.2 直杆轴向拉伸和压缩时的变形和刚度条件	108
8.3 材料在拉伸和压缩时的力学性能	110
8.4 安全因数和许用应力	114
8.5 应力集中的概念	115
8.6 拉伸和压缩的静不定问题	116
第9章 扭转	126
9.1 扭转外力和内力的计算	126
9.2 圆轴扭转时的应力和强度条件	130
9.3 圆轴扭转时的变形和刚度条件	137
第10章 平面弯曲	143
10.1 平面弯曲的概念	143
10.2 平面弯曲的内力——剪力和弯矩的计算	144
10.3 剪力图和弯矩图	149
10.4 梁的纯弯曲正应力及正应力强度条件	154
10.5 截面图形的惯性矩与平行移轴公式	163
*10.6 直梁弯曲时的切应力及切应力强度校核	168
10.7 梁的弯曲变形及刚度条件	171
10.8 用变形比较法解简单静不定梁	180
10.9 提高梁的承载能力的措施	183
第11章 复杂应力状态下的强度条件	192
11.1 一点的应力状态	192
11.2 广义胡克定律与应变能密度概念	200
11.3 复杂应力状态时的材料失效准则与强度条件	202
第12章 组合变形	210
12.1 组合变形与叠加原理	210
12.2 第一类组合变形——组合后仍为单向应力状态	211

12.3	第二类组合变形——组合后为复杂应力状态·····	218
第 13 章	连接件强度计算 ·····	227
13.1	剪切强度计算·····	227
13.2	挤压强度计算·····	229
第 14 章	压杆稳定 ·····	236
14.1	压杆稳定性概念·····	236
14.2	细长压杆的临界压力与欧拉公式·····	237
14.3	中、小柔度压杆的临界压力·····	241
14.4	压杆稳定性校核·····	242
14.5	提高压杆稳定性的措施·····	246
第三篇 运动学与动力学		
第 15 章	质点的运动学与动力学 ·····	253
15.1	质点运动的描述·····	253
15.2	直角坐标法求点的速度、加速度·····	255
15.3	自然坐标法求点的速度、加速度·····	256
15.4	质点动力学基本定律和质点运动微分方程·····	262
第 16 章	刚体的基本运动 ·····	269
16.1	刚体的平移·····	269
16.2	刚体的定轴转动·····	270
16.3	转动刚体上各点的速度和加速度·····	272
第 17 章	点的复合运动 ·····	278
17.1	点的复合运动概念·····	278
17.2	点的速度合成定理·····	280
* 17.3	点的加速度合成定理·····	284
第 18 章	刚体的平面运动 ·····	294
18.1	刚体平面运动概述·····	294
18.2	基点法确定平面图形内各点的速度·····	296
18.3	瞬心法确定平面图形内各点的速度·····	300
* 18.4	平面图形各点加速度分析·····	304
第 19 章	动量定理 ·····	312
19.1	动量与冲量·····	312
19.2	动量定理·····	313
19.3	质心运动定理·····	316
第 20 章	动量矩定理 ·····	323

20.1	质点和质点系的动量矩·····	323
20.2	动量矩定理·····	324
20.3	质点系相对于质心的动量矩定理·····	327
20.4	刚体对轴的转动惯量·····	328
20.5	刚体定轴转动和平面运动微分方程·····	332
第 21 章	动能定理 ·····	340
21.1	力的功·····	340
21.2	质点和质点系的动能·····	344
21.3	动能定理·····	346
21.4	功率和功率方程·····	349
第 22 章	达朗贝尔原理 ·····	356
22.1	惯性力的概念·····	356
22.2	达朗贝尔原理与动静法·····	357
22.3	刚体惯性力系的简化·····	359
第四篇 专 题		
第 23 章	动强度专题 ·····	371
23.1	动应力概述·····	371
23.2	构件作匀加速直线平动及作匀速转动时的动应力·····	371
23.3	冲击应力·····	374
23.4	交变应力与疲劳强度简介·····	381
附录 A	若干公式推导 ·····	397
A.1	内压薄壁容器的应力·····	397
A.2	形状改变能密度(畸变能密度)公式推导·····	400
附录 B	型钢表 ·····	402
习题参考答案 ·····		416
主要参考书目 ·····		429

绪 论

许多工程领域都与力学有密不可分的关系。例如, 机械工程中需研究各零件的运动和受力问题; 房屋、桥梁工程需研究梁、柱等杆件在平衡状态下承受载荷能力的问题; 化工、食品工程中需研究受内压作用的容器和管道的强度问题; 包装工程和纺织工程中的工艺设计也需研究各种各样的力学问题。“工程力学”正是面向工程需要, 为研究、解决工程中的力学问题而提供理论依据和基本的计算方法的学科。

为设计一个能在一定的载荷下正常工作的结构物, 需要从两个方面来解决问题。第一个方面是弄清组成结构的每一个构件所受的力与结构所受的载荷之间的关系, 即要计算出结构正常工作时其中的每一个构件所受的力。第二个方面是弄清构件的材料和截面尺寸、支承形式等因素与构件所能抵抗的外力之间的关系, 即要确定在一定的外力作用下怎样设计构件才能保证它能安全可靠地工作, 同时又是经济合理的。“工程力学”中的**静力学、运动学和动力学**部分(这三部分总称为**理论力学**)是处理第一方面问题的; 而**材料力学**部分则是处理第二方面问题的。

因此, 可以对工程力学的任务作如下概括: **研究结构和构件的受力及平衡、运动规律, 研究构件的承载能力的科学计算方法, 从而为设计工程构件提供必要的理论基础和行之有效的计算方法, 使所设计的构件能安全、可靠地工作, 同时满足经济性要求。**

在工程力学研究中, 与其他学科一样, 需要把所研究的对象作适当的简化, 略去一些次要因素, 保留主要因素, 从而将实际物体抽象成为便于分析研究的模型。按力学分析的要求建立的模型称为**力学模型**。工程力学中根据不同的研究目的, 主要采用刚体和变形固体作为实际构件的力学模型, 前者用于静力学、运动学和动力学部分, 后者用于材料力学部分, 原因将在相应章节中说明。此外, 构件与外界的连接, 也简化成为“铰链”、“固定端”等力学模型。

对于所建立的力学模型, 可以应用工程力学的定理、公式进行求解。工程力学是一个由公理、定理及推论、计算公式等组成的理论体系, 这个体系是在实践中提炼出的基本原理的基础上经过严格的数学推演而形成的, 并已经过实践的反复检验。学习工程力学, 应该熟练掌握这个理论体系, 学会应用力学理论知识去解决实际问题。另一方面, 实践是不断发展的, 现代工程技术不断提出新的力学问题, 工程力学也在研究这些新问题中不断丰富和发展其理论体系和计算方法。例如, 关于强度失效的新理论、关于断裂和损伤的理论和计算方法、关于用复合材料等新材

料制成的构件强度的理论和计算方法,以及应用电子计算机分析复杂形状构件强度的有限单元法等,都是工程力学学科的新内容。本书所涉及的,只是工程力学最基础的知识,读者在掌握本书内容的基础上,可根据所从事的工作的需要,参考专门的著作,对某些问题进行更深入的探讨。

第一篇 刚体静力学

本篇研究力和力系的基本性质、物体的受力分析和刚体系统平衡问题的求解方法。

第1章 静力学基本概念和物体受力分析

静力学的基本概念、公理及物体的受力分析是研究静力学的基础。本章将介绍力与刚体的概念及静力学公理,并阐述工程中常见的约束和约束反力的分析。最后介绍物体的受力分析及受力图,它是解决力学问题的重要环节。

1.1 静力学基本概念

1.1.1 力的概念

力的概念是人们在长期生活和生产实践中逐步形成,并经过科学的抽象建立起来的。例如,当人们用手推、拉、掷或举起物体时,由于手的作用,可使物体的运动状态发生变化;滚动的车轮受到制动块的摩擦作用可使滚动变慢,直至停止;空中落下的物体,由于地心引力的作用而越落越快。上述物体运动状态的变化,是由于物体间的相互作用而产生的,这种作用也称为**机械作用**。物体间相互的机械作用还能引起物体的变形,如杆件受拉力作用而伸长、受压力作用而缩短等。所以力的概念可概括为:力是物体间的相互机械作用,这种作用可使物体的运动状态发生变化或使物体发生变形。

物体受力后产生两种效应:使物体的运动状态发生改变的效应称为**外效应**,而使物体的形状发生改变的效应称为**内效应**。显然,对于刚体(不变形的物体)而言,力只有外效应。

在工程实际中,我们会遇到各种力,如重力、弹性力、滑动摩擦力等,由观察及试验表明,力对物体作用效应决定于下列3个要素:①力的**大小**;②力的**方向**;③力的**作用点**。

力的大小表示机械作用的强弱,可以根据力的效应的大小加以测定,在国际单位制中,力的计量单位为牛[顿](N)或千牛[顿](kN)。工程上曾采用工程单位制,力的单位是千克力(kgf), $1\text{kgf}\approx 9.8\text{N}$ 。

力的方向,是指力作用的方位和指向。

力的作用点,是指力作用的位置。物体间的机械作用通过物体间的直接接触或是通过物质的一种形式——场起作用。实际上两个物体直接接触时,力的作用线位置分布在一定的面积上,只是当接触面积相对比较小时,才能抽象地将其看作集中于一点,这样的力称为**集中力**。不能抽象地看作集中力的力称为**分布力**。作用在物体上的分布力常用与其等效的集中力来替代。通过力的作用点并沿力的方

位的直线,称为力的作用线。

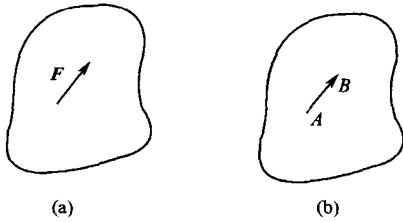


图 1-1

由于力既有大小,又有方向,所以是矢量(以后将提到)。服从矢量的运算法则。本书正文中,代表矢量的字母用加粗的斜体字母表示(如 F)。和一切矢量一样,可用一个带箭头的有向线段(矢量) \overline{AB} 表示力 F ,如图 1-1 所示,矢量的起点 A (或终点 B)表示力的作用点,矢量的方向表示力的方向,矢量的长度按选定的比例表示力的大小。

作用在刚体上的群力,称为力系。若作用在刚体上的力系可用另一力系来代替而不改变它对刚体的效应,则这两个力系称为等效力系。

1.1.2 刚体和平衡的概念

刚体是指受力作用后不变形的物体。这一特征表现为物体内任意两点的距离始终保持不变。实际上,不变形的物体是不存在的,如图 1-2 所示的塔器,在风力载荷作用下,塔器轴线上最大水平位移一般为塔高的 $1/5000 \sim 1/1000$ 。因此,对塔器进行受力分析时,变形是一个次要因素,可以忽略不计。在研究物体的受力情况时,为使问题简化,忽略物体变形就可将原物体用一理想化的模型——刚体来代替。以后,除特别指明需要考虑物体的形状改变外,其余物体均看作抽象化的理想模型——刚体。

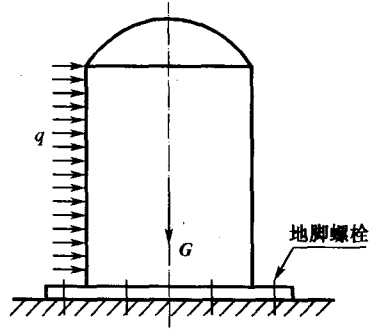


图 1-2

平衡是机械运动中的一种特殊情况,在静力学中是指物体相对于地球保持静止或匀速直线运动状态。平衡规律在工程实际中应用广泛,按平衡状态分析结构受力称为**静力分析**,各种机器和建筑物的设计往往要经过静力分析。以后还可以看到,动力学问题也可以应用静力学的方法解决。

1.2 静力学的基本公理

下面分别阐述作为静力学基础的 5 个公理,这些公理是人们在实践中,对处于平衡和运动的物体进行了长期的观察和实验,而得出的关于力的基本性质的概括和总结。

公理 1 (二力平衡公理):作用于同一个刚体上的两个力,使刚体处于平衡的必要且充分条件是:这两个力大小相等、方向相反,作用线沿同一直线。

公理 1 阐明了由两个力组成的最简单力系的平衡条件。它是在力系作用下刚体平衡条件的基础。工程上经常遇到只受两个力作用而平衡的刚体,称为二力体(或二力构件)。根据公理 1,这两个力的作用线必定沿着两个作用点的连线,且大小相等、方向相反,如图 1-3 所示。

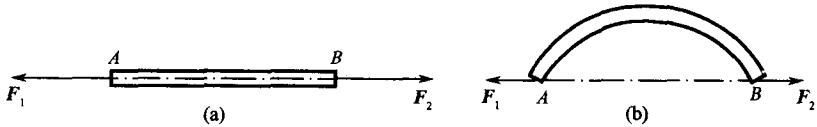


图 1-3

公理 2 (加减平衡力系公理):在某一力系中加上或减去任意的平衡力系后与原力系等效。

根据这一公理,可以得到作用于刚体的力,可沿着其作用线任意移动,而不改变此力对刚体的作用效应。

证明 设有力 F 作用在刚体上的某点 A ,如图 1-4 所示。根据加减平衡力系原理,可在力的作用线上任取一点 B ,并加上一对平衡力系,且使 $F' = -F'' = F$,由于力 F 和 F' 也是一对平衡力,故可除去。这样只剩下一个力 F' ,故刚体在力 F 作用下与在力 F' 作用下等效。即原来的作用力 F 沿其作用线移到了点 B 。

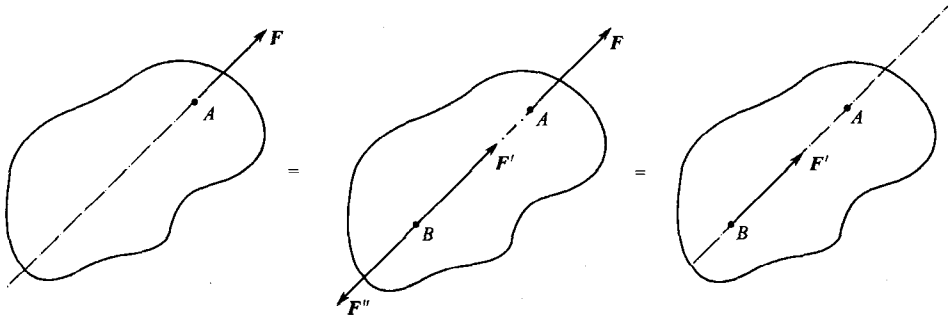


图 1-4

公理 3 (二力合成公理):作用于刚体上某点 A (或作用线交于某点 A)的两个力 F_1 、 F_2 ,可以合成一个力,这个力称为合力。如图 1-5 所示,合力的大小、方向、作用线由以这两个力为邻边所组成的平行四边形的对角线来决定,即可以写成矢量加法运算公式

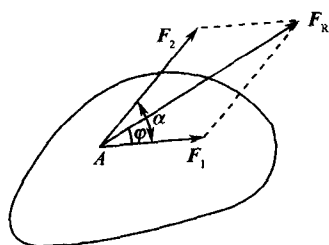


图 1-5

定

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

合力的大小、方向可以用余弦与正弦定理决

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\alpha}$$

$$\frac{F_R}{\sin(\pi - \alpha)} = \frac{F_2}{\sin\varphi}$$

$$\sin\varphi = \frac{F_2}{F_R}\sin\alpha$$

其中, α 、 φ 分别为 \mathbf{F}_1 与 \mathbf{F}_2 和 \mathbf{F}_R 与 \mathbf{F}_1 的夹角。

推论 (三力平衡定理):如果刚体受三个力作用而平衡,且其中二个力的作用线交于一点,则第三个力的作用线必通过该点且三个力共面。

证明 设图 1-6(a)所示刚体在 \mathbf{F}_1 、 \mathbf{F}_2 和 \mathbf{F}_3 三个力作用下处于平衡,且这三个力中, \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 的作用线交于 O 点。按力的可传性,将 \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 分别沿各自的作用线移到 O 点,并按平行四边形公理将 \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 合成为一个作用于 O 点的合力 \mathbf{F}_{12} (图 1-6(b))。这样,刚体就在 \mathbf{F}_{12} 和 \mathbf{F}_3 两个力的作用下平衡。由公理 1 知, \mathbf{F}_{12} 和 \mathbf{F}_3 两个力必须共线。由于 \mathbf{F}_{12} 的作用线通过 O 点且与 \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 在同一平面内,所以 \mathbf{F}_3 的作用线也必须通过 O 点,并且也与 \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 在同一平面内。定理由此得证。

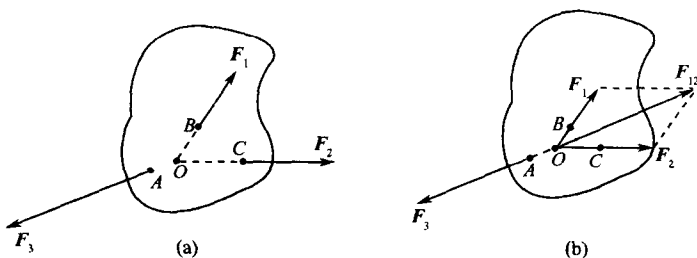


图 1-6

公理 4 (作用力与反作用力公理):当甲物体对乙物体有作用力的同时,甲物体也受到来自乙物体的反作用力;作用力与反作用力总是同时存在的,两力的大小相等、方向相反且沿着同一直线分别作用在两个相互作用的物体上。

公理 4 是由研究一个物体的平衡问题过渡到研究几个物体组成的“物体系统”的平衡问题的桥梁。由这个公理可以得出,作用力与反作用力必须成对出现,同时出现也同时消失。

公理 5 (刚化公理):当变形体在某力作用下处于平衡状态时,此时将变形体刚化成刚体,则平衡不受影响。

例如,绳 AB 在力 F_1 、 F_2 作用下处于平衡(图 1-7(a)),现将绳假想为一个不会变形的刚杆 AB ,此刚杆在力 F_1 、 F_2 作用下仍然平衡(图 1-7(b))。

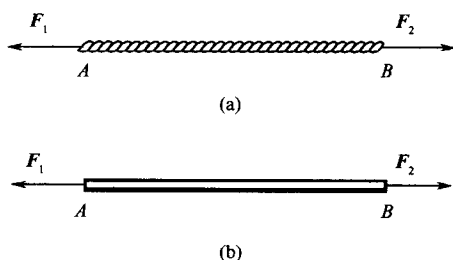


图 1-7

刚化公理也称为变形体平衡公理,但需注意,若 F_1 、 F_2 均按相反方向作用,则刚体能够平衡。而绳在这样两个力的作用下显然是不能够平衡的。所以,刚体的平衡条件仅是变形体平衡的必要条件,而非充分条件,即变形体只有在平衡的前提下才能刚化成刚体。

公理 5 建立了刚体静力学与变形体静力学之间的联系,使刚体的平衡条件能应用到变形体的平衡问题中去。

1.3 约束与约束反力

有些物体,它们在空间的位移方向不受任何限制,如空气中的气球和飞行中的火箭等。而有些物体,由于受到与之联系或接触的其他物体的限制,以致在空间的位移方向受到一定的限制,如置于桌上的书不可能向下运动,受铁轨限制的机车只能沿轨道运动等。在空间中位移不受限制的物体称为**自由体**,而位移受到限制的物体称为**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,桌面是书的约束,铁轨是机车的约束等。

既然约束阻碍物体某些方向的位移,那么,当物体沿着约束所能阻碍的方向有运动趋势时,物体对约束就有作用力。同时,约束也对物体有反作用力以阻碍物体的运动。约束作用于被约束物体的力称为**约束反作用力**,简称**约束(反)力**或**反力**。

那些不是约束反力的力(如重力)都称为**主动力**。主动力能主动地改变物体的运动状态,它的大小和方向不直接依赖于作用在物体上的其他力。与主动力不同,约束反力要由作用在物体上的其他力决定。在静力学中,约束反力的大小要根据平衡条件求得,至于它的方向总是与约束所能阻碍的位移方向相反。

正确确定约束反力的方向在解决静力学问题时起着非常重要的作用。下面介绍几种工程中常见的约束类型。

1.3.1 柔性约束

绳子、链条、皮带、钢丝等柔性物体,只能阻止物体沿柔性物体伸长的方向而不能阻止其他任何方向的位移。所以,由绳子等柔性物体产生的约束反力,只能是拉