

高等学校教材

工程力学

(静力学和材料力学)

范钦珊 施燮琴 孙汝劼

ongcheng Lixue

高等教育出版社

内 容 提 要

本书按照国家教委制定的“工程力学”(静力学和材料力学)课程基本要求编写,经材料力学课程教学指导小组审定,作为全国高等工业院校机电、化工、环境保护、采矿、建筑、轻工等专业的教材,适用课程时数为60~80,课程时数少于60的专业,以及专科学校也可选用。

本书由清华大学材料力学教研室编写。全书在理论、概念的论述上准确严谨,静力学与材料力学两部分内容相互渗透、协调,文字简明、精炼,适用面广。

为配合本书的使用,编者编写了书中全部习题的题解,作为教师用书,由清华大学材料力学教研室提供。

高等学校教材

工 程 力 学

(静力学和材料力学)

范钦珊 施曼琴 孙汝勃 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

江苏吴江伟业印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.5 字数 323,000

1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷

印数 0001—19,250

ISBN 7-04-002463-2/ID·143

定价 3.50元

序

“工程力学”(静力学和材料力学)是高等工业院校工艺类专业开设的技术基础课程。本书是应高等教育出版社之约,为了满足各校“工程力学”课程的教学需要而编写的。这项工作被列入国家教委“1986~1990年工科力学教材建设规划”。

为了使本书具有较强的通用性,我们在编写之前,先将编写提纲寄送全国70多所院校征求意见。根据这些意见,写出初稿后,又请部分院校的同行审查,提出进一步的修改意见。因此,可以说这本书是全国很多高等院校同行共同劳动的结晶。

在保证现行教学体系相对稳定的前提下,编写时,力求做到:基本概念、基本理论论述严谨;专业覆盖面宽;静力学和材料力学两部分内容尽量相互渗透、协调;文字通顺、简明,保证一定的信息量。

考虑到全国各院校不同专业对工程力学的要求差异较大,教学时数不尽一致,本书正文内容分为三个层次:基本要求部分;不同专业选用部分;进一步要求部分。第一部分用一般字体排印;第二部分为一般字体带“*”号;第三部分用小字排印。后两部分内容是很少的。经国家教委材料力学课程教学指导小组审定,本书可适用于课程时数为60~80的本科或专科各专业,课程时数少于60的专业也可以选用。

本书在编写过程中,得到清华大学材料力学教研室吴明德、王瑞五、陈季筠、蔡乾煌等老师的支持和帮助。国家教委工科力学课程教学指导委员会委员于光瑜教授、北京轻工业学院洪敏谦教授详细审阅了本书的初稿,并代表材料力学课程教学指导小组主持

了本书的审稿会，对本书的进一步修改提出了一些宝贵意见。参加审稿会的有：沈阳化工学院董秀石、大连轻工业学院孔庆宽、青岛化工学院孟庆东、北京工业大学薛宗蕙、上海第二工业大学郁鸿义、高等教育出版社吴向等同志。在本书出版之际，编者谨向他们表示诚挚的谢意。

本书由施燮琴编写绪论、第5至10章、附录；孙汝劼编写第1至4章；范钦珊编写第11至14章。全书由范钦珊统稿。

读者在使用本书时若发现缺点和问题，恳请批评指正。

范钦珊 施燮琴 孙汝劼

于清华大学

1988.12.

目 录

绪论	1
----------	---

第 I 篇 静 力 分 析

第 1 章 基本概念·受力图	6
1.1 刚体的概念	6
1.2 力的概念	7
1.3 平衡的概念	8
1.4 约束与约束力	10
1.5 物体的受力分析·受力图	18
习题	21
第 2 章 简单力系	26
2.1 汇交力系的简化与平衡条件	26
2.1.1 汇交力系的简化	27
2.1.2 汇交力系的平衡条件	29
2.2 力偶·力偶系的简化与平衡条件	37
2.2.1 力对点之矩	37
2.2.2 力偶与力偶的性质	39
2.2.3 力偶系的简化与平衡条件	43
习题	46
第 3 章 平面任意力系	56
3.1 力向一点平移	57
3.2 平面力系的简化	58
3.2.1 平面力系向作用面内一点简化	58
3.2.2 平面力系简化理论的推论和应用	60
3.3 平面力系的平衡条件	63
3.4 刚体系统的平衡问题	71
3.4.1 刚体系统静定性质的判断	71

3.4.2	研究对象的选择	73
3.4.3	刚体系统受力分析的特点	74
3.5	考虑有摩擦时物体的平衡问题	79
习题		82
第4章	空间任意力系	96
4.1	力对轴之矩	97
4.1.1	力对轴之矩	97
4.1.2	力对点之矩与力对通过该点的轴之矩的关系	98
4.2	空间力系的简化	98
4.3	空间力系的平衡条件	100
习题		104

第II篇 材料力学

第5章	轴向拉伸与压缩	111
5.1	拉、压杆的内力与应力	111
5.1.1	内力与截面法	111
5.1.2	应力	115
5.2	拉、压杆的强度计算	119
5.3	拉、压杆的变形计算	123
5.3.1	纵向变形·胡克定律	123
5.3.2	正应变·应力-应变关系	124
5.3.3	横向变形·泊松比	124
5.4	材料在拉伸、压缩时的机械性能	126
5.4.1	材料拉伸时的机械性能	126
5.4.2	材料压缩时的机械性能	133
5.4.3	应力集中的概念	134
5.4.4	高温对材料机械性能的影响·蠕变和应力松弛的概念	135
5.5	拉、压杆的简单静不定问题	136
习题		140
第6章	剪切实用计算	147
6.1	引言	147
6.2	剪切实用计算	148

6.3 挤压实用计算	149
习题	154
第7章 扭转	156
7.1 引言	156
7.2 外力偶矩·扭矩·扭矩图	156
7.2.1 外力偶矩	156
7.2.2 扭矩与扭矩图	158
7.3 圆轴扭转时横截面上的应力分析	160
7.3.1 表面变形的特点与平面假设	160
7.3.2 应变和应力特点——纯剪状态	161
7.3.3 剪应变分布——几何方程	162
7.3.4 剪切胡克定律——物理条件	163
7.3.5 横截面上的剪应力分布——静力方程	163
7.3.6 剪应力表达式及其应用条件	164
7.4 圆轴扭转时的强度计算	165
7.5 圆轴扭转时的变形与刚度计算	170
*7.6 矩形截面杆扭转的概念	172
习题	175
第8章 弯曲应力分析与强度计算	179
8.1 引言	179
8.1.1 工程中的弯曲问题	179
8.1.2 平面弯曲	180
8.2 梁的内力——剪力与弯矩	181
8.2.1 剪力与弯矩	181
8.2.2 剪力方程与弯矩方程	184
8.2.3 剪力图与弯矩图	185
*8.2.4 剪力、弯矩与分布载荷集度间的关系	190
8.3 纯弯梁横截面上的正应力分析	193
8.3.1 平面假设与变形的几何关系	193
8.3.2 物理方程与应力分布	196
8.3.3 静力平衡方程	196
8.4 纯弯应力公式的应用	198
8.5 矩形截面梁的弯曲剪应力简介	199

8.6	弯曲强度计算	201
8.7	弯曲应力与强度计算例题	203
8.8	提高梁的强度的主要措施	208
8.9	弯曲中心的概念	212
	习题	213
第9章	梁的位移分析	222
9.1	引言	222
9.1.1	挠度、转角及其相互关系	222
9.1.2	工程中的弯曲变形问题	223
9.2	挠曲线微分方程	224
9.3	积分法求梁的位移	226
9.4	确定位移的叠加法	232
9.5	梁的刚度条件·提高梁刚度的主要措施	236
9.5.1	梁的刚度条件	236
9.5.2	提高梁刚度的主要措施	238
9.6	简单静不定梁	240
	习题	244
第10章	能量法	251
10.1	引言	251
10.2	外力功与应变能的计算	251
10.2.1	外力功	251
10.2.2	基本受力与变形及组合受力与变形形式下的应变能	252
10.3	单位载荷法	258
10.4	梁承受冲击载荷时的应力简介	267
	习题	270
第11章	应力状态与强度理论	273
11.1	引言	273
11.2	一点应力状态的描述	274
11.3	平面应力状态中斜面上的应力分析	276
11.4	主应力、主平面与最大剪应力	278
11.4.1	主应力与主方向的确定	278
11.4.2	最大剪应力及其作用面	280

*11.5	应力状态分析的图解解析法——应力圆及其应用	282
11.5.1	应力圆方程	283
11.5.2	应力圆的画法	283
11.5.3	应力圆的应用	285
11.6	复杂应力状态下的应力-应变关系	285
11.7	应力状态分析例题	286
11.8	建立复杂应力状态下的强度条件的基本思想与方法	292
11.9	以应力为判据的强度理论	293
11.9.1	最大拉应力理论——第一强度理论	293
11.9.2	最大剪应力理论——第三强度理论	294
11.10	以应变为判据的强度理论	295
11.11	以能量为判据的强度理论	296
*11.12	含裂纹体的脆性断裂概述	297
11.13	强度理论的应用	299
11.13.1	应用强度理论时应注意的问题	299
11.13.2	应用举例	301
	习题	303
第12章	组合受力与变形杆件的强度计算	309
12.1	引言	309
*12.2	组合受力与变形特例之一——斜弯曲	310
12.2.1	内力与应力的计算	310
12.2.2	最大正应力与强度条件	311
12.3	组合受力与变形特例之二——拉伸(压缩)与弯曲的组合	314
12.3.1	轴向力与横向力同时作用的情形	314
12.3.2	偏心载荷引起的拉伸(压缩)与弯曲的组合	314
12.4	组合受力与变形特例之三——弯曲与扭转的组合	317
	习题	322
第13章	压杆稳定问题	328
13.1	引言	328
13.2	压杆稳定的基本概念	328
13.3	压杆的临界载荷——欧拉临界力	330
13.4	支承对压杆临界力的影响·常见支承条件下压杆的临界力公式	333

13.5	临界应力与柔度·三类不同的压杆	335
13.5.1	柔度的概念	336
13.5.2	三类不同压杆及临界应力表达式	336
*13.5.3	计算非弹性屈曲临界应力的抛物线公式	337
13.5.4	临界应力总图	338
13.6	压杆稳定安全校核	342
13.6.1	稳定安全准则	342
*13.6.2	安全系数校核法	342
*13.6.3	折减系数法	343
13.7	稳定计算的重要意义·提高压杆承载能力的措施	348
	习题	350
第 14 章	构件的疲劳强度概述	354
14.1	引言	354
14.2	疲劳破坏的特点与原因简述	354
14.3	关于交变应力的若干名词和术语	357
14.4	试件的疲劳极限·应力-寿命曲线	358
14.5	影响疲劳极限的因素·构件的疲劳极限	361
*14.6	有限疲劳寿命的概念	364
14.6.1	稳定交变应力下的有限疲劳寿命	364
14.6.2	不稳定交变应力下的有限寿命设计	365
14.7	提高构件疲劳强度的途径	367
	习题	368
附录 I	实验指导	370
I.1	常温静载拉伸试验	370
I.2	弯曲应力试验	371
I.3	压缩和扭转试验	373
附录 II	重心及截面的几何性质	375
II.1	重心·形心·静矩	375
II.2	惯性矩·平行移轴公式	378
	习题	383
附录 III	简单载荷作用下梁的变形	385
附录 IV	型钢表	389
	习题答案	408

绪 论

一、工程力学概述

工程力学所包含的内容极其广泛，本书所论之“工程力学”只包含“静力学”和“材料力学”两部分。前者研究物体的受力和平衡规律，后者研究物体在外力作用下的变形和失效现象。二者都是工程设计中的基本知识。

工程构件(泛指结构元件、机器的零部件等)在外力作用下丧失正常功能的现象称为“失效”或“破坏”。工程构件的失效形式很多，但工程力学范畴内的失效通常可分为三类：强度失效、刚度失效和稳定失效。

强度失效是指构件在外力作用下发生不可恢复的塑性变形或发生断裂。图 1a 和 b 所示分别为断裂了的销钉和产生塑性变形的铆钉。

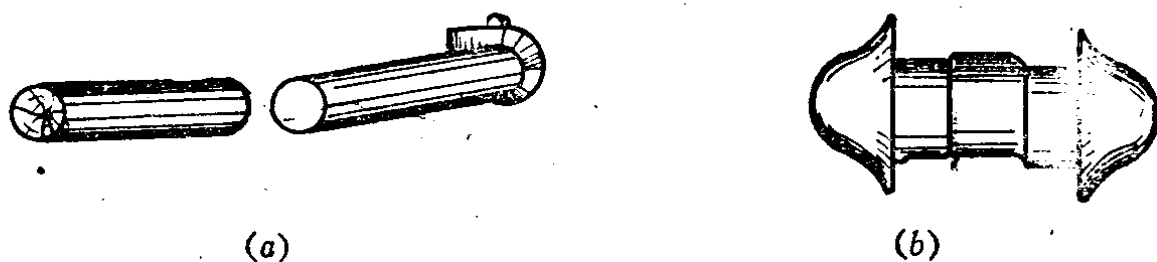
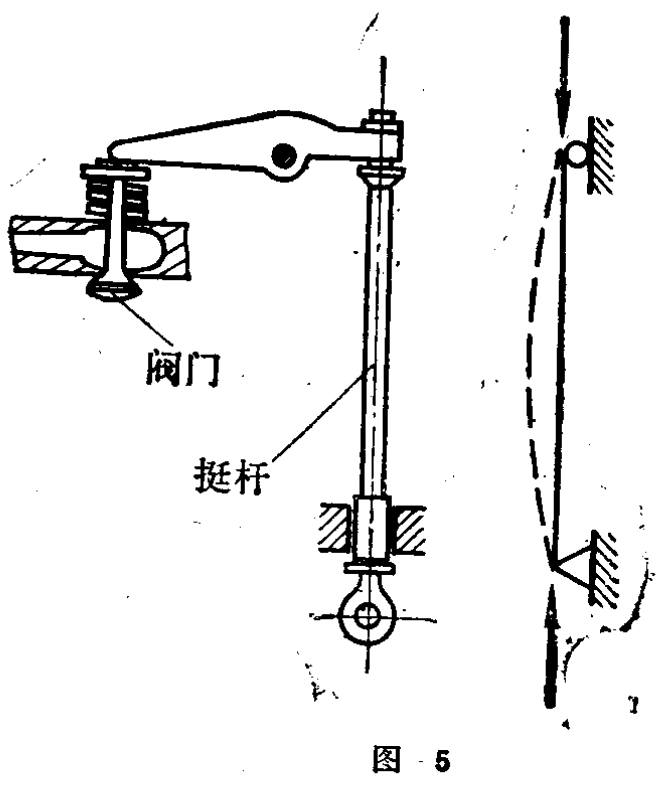
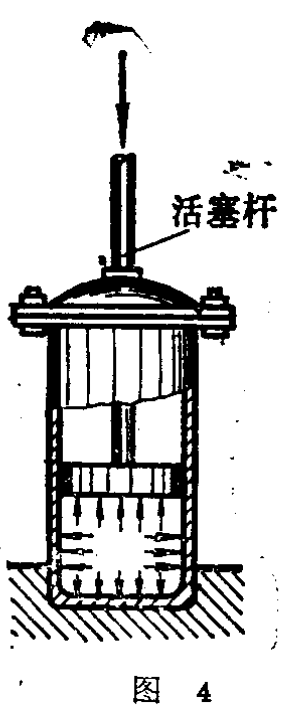
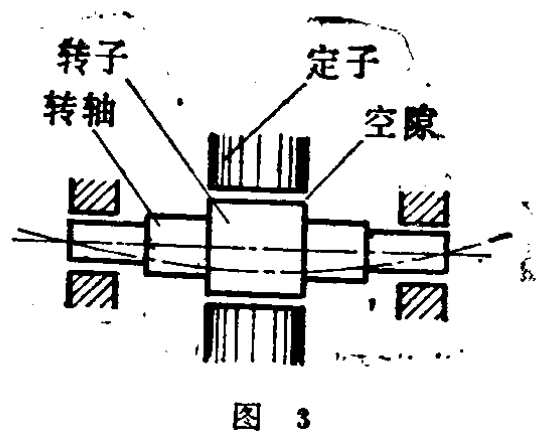
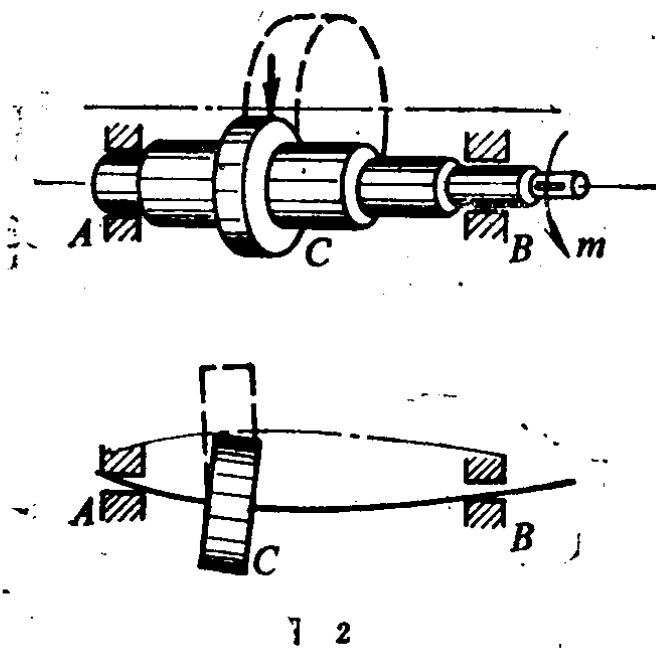


图 1

刚度失效是指构件在外力作用下产生过量的弹性变形。例如，齿轮传动轴如果弹性变形过大(图 2)，不仅会影响齿轮间的正常啮合，缩短齿轮的在役寿命，而且会加大轴与轴承的磨损，从而导致传动机构丧失正常功能；电机轴如果变形过大(图 3)，不仅会减小转子与定子之间规定的间隙，增加功率损耗，甚至可能使转子与定子接触，造成严重事故。

稳定失效是指构件在某种外力(例如轴向压力)作用下, 其平衡形式发生突然转变。图 4 所示之活塞杆、图 5 所示之内燃机中凸轮机构的挺杆, 由于过于细长, 当所承受的压缩载荷超过一定数值时, 便会从直线的平衡状态突然转变为弯曲的平衡状态, 致使各自所属的机器失去正常功能。



工程设计的任务之一就是保证构件在确定的外力作用下正常工作而不失效,即保证构件具有足够的强度、刚度与稳定性。所谓强度是指构件承受载荷作用而不发生塑性变形或断裂的能力。所谓刚度是指构件承受载荷作用而不发生过大的弹性变形的能力。所谓稳定性是指构件承受载荷作用而不发生平衡与变形形式转变的能力。为此,需要:

- 分析并确定构件所受各种外力的大小和方向。
- 研究在外力作用下构件的内部受力、变形和失效的规律。
- 提出保证构件具有足够强度、刚度和稳定性的设计准则和方法。

以上便是本课程的主要内容。

二、课程的研究对象

根据几何形状和尺寸的不同,工程构件可以大致分为杆、板、壳、块体。

若构件在某一方向上的尺寸比其余两个方向上的尺寸大得多,则称为杆。梁、轴、柱等均属杆类构件。杆横截面中心的连线称为轴线(图6)。轴线为直线者称为直杆;轴线为曲线者称为曲杆。所有横截面形状和尺寸都相同者称为等截面杆;不同者称为变截面杆。

若构件在某一方向上的尺寸比其余两个方向上的尺寸小得多,为平面形状者称为板;为曲面形状者称为壳(图7),穹形屋顶、薄壁容器等均属此类构件。

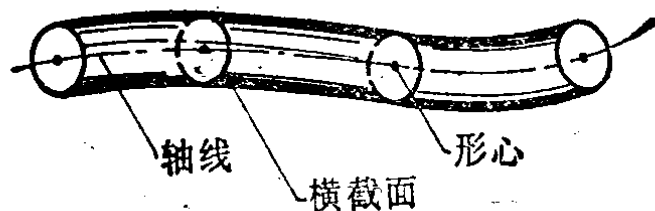


图 6

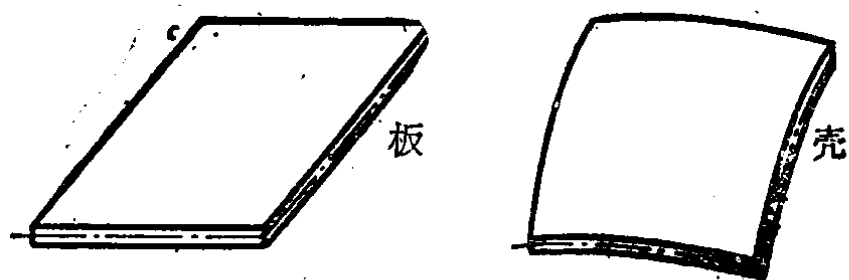


图 7

若构件在三个方向上具有同一量级的尺寸，则称为块体。水坝、建筑物基础等均属此类构件。

本课程仅以等截面直杆(简称等直杆)作为研究对象。板、壳以及块体的研究属于“板壳理论”和“弹性力学”的范畴。

第 I 篇 静 力 分 析

静力分析研究刚体在力系作用下的平衡规律。

本篇着重研究下列三个问题：

(1) 物体的受力分析 将所研究的物体从周围物体中分离出来, 作为受力体, 进而分析它所受的力, 一类是主动力, 另一类是约束力(见 1.4 节), 关键在于约束力的分析。

(2) 力系的简化 力系是指作用在某刚体上的若干个力所组成的系统。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(运动效应), 则称这两个力系为等效力系。如果用最简单的力系等效地代替复杂的力系, 便是力系的简化。

(3) 刚体的平衡条件 是指刚体处于平衡状态时作用于刚体上的力系应满足的条件。根据平衡条件, 可以求出作用在平衡刚体上的未知力。

第 1 章 基本概念 · 受力图

1.1 刚体的概念

在静力分析中所用的力学模型是刚体。所谓刚体，是指在力的作用下不变形的物体。实际上，任何物体受力后都会有或多或少的变形。但是工程上常用的材料，如钢、铸铁、混凝土等所制成的机器零件或结构构件，通常都具有足够的刚度。例如图 1.1 所示之桥式起重机的吊车梁，在载荷及本身重量作用下发生弯曲变形，由此而引起的吊车梁在铅垂方向的最大位移一般不超过梁跨度的 $1/500$ ，这种微小的变形对 A 、 B 两端铁轨支承力的影响是很小的，因此在计算这种支承力时，变形因素可以略去不计。于是可将吊

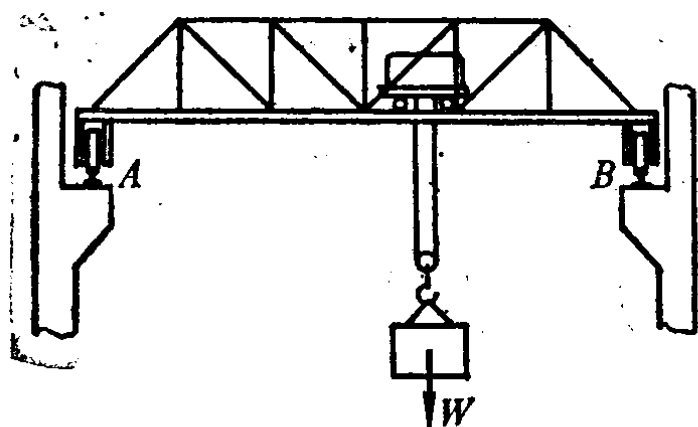


图 1.1

车梁抽象成不变形的刚体。这种抽象，是认识力学规律所必需的，也是解决实际问题所允许的。这样做，撇开了问题的次要因素而抓住其主要因素，从而使问题简化。

应该指出，采用刚体这一模型时，要注意所研究的问题的性质。随着问题性质的改变，那些原来是次要的因素，在新的情况下可能转变为主要因素，于是必须对计算模型作相应的改变。例如，一根梁上若有三个支座，要分析三个支座的支承力时，尽管梁的变形很小，三个支承力却与之有关，这时，梁的变形就成为主要因素，必须

以另一模型——变形体来代替。

1.2 力的概念

力是物体间的相互机械作用。力对物体的效应是使物体的机械运动发生变化,同时使物体发生变形。前者称为运动效应,后者称为变形效应。实践证明,力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点。

当研究力对刚体的效应时,只要保持力的大小、方向不变,将力的作用点沿力的作用线移动,并不改变力对刚体的效应。例如用绳拉车,或者沿同一直线、以大小、方向相同的力推车,对车产生的运动效应相同。图 1.2a 和 b 分别表示作用在同一刚体上的两力,若两力的大小、方向和作用线相同,尽管作用点不同,两力对刚体产生的运动效应仍相等,或等效。因此,力对刚体的效应取决于力的大小、方向和作用线。作用在刚体上的力沿作用线可移动的性质,称为力的可传性。

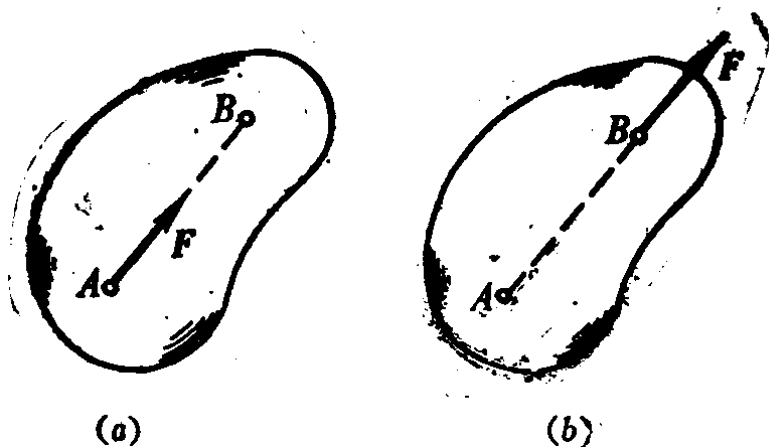


图 1.2

应该指出,力的可传性对于变形体并不适用。例如图 1.3a 所示之直杆,在两端 A、B 处施加大小相等、方向相反、作用线相同的两个力 F_1 、 F_2 ,显然这时杆件产生拉伸变形。若将力 F_2 沿其作用线移至 A 点,力 F_1 移至 B 点(图 1.3b),这时杆件则产生压缩