

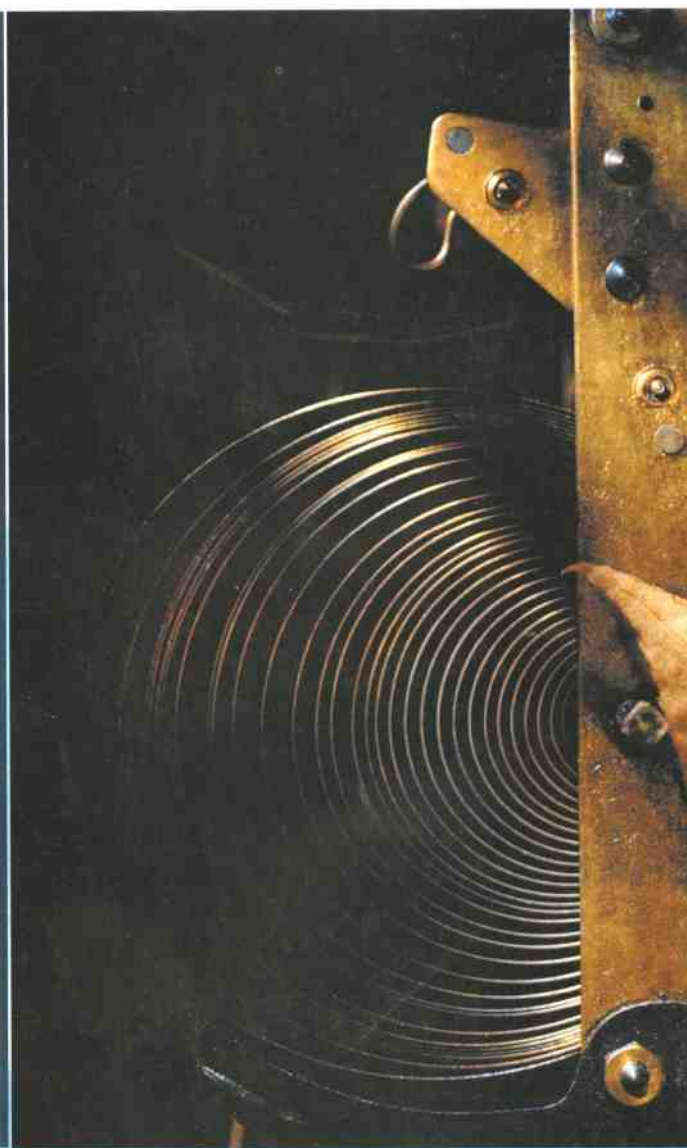


工程力学

GONGCHENGLIXUE

主 编 刘 辉

副主编 方 坤 董世成



哈尔滨地图出版社

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主 编 刘 辉

副主编 方 坤 董世成

哈尔滨地图出版社

• 哈尔滨 •

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/刘辉主编. —哈尔滨: 哈尔滨地图出版社,
2007. 6

ISBN 978 - 7 - 80717 - 650 - 3

I. 工… II. 刘… 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 092654 号

哈尔滨地图出版社出版、发行

(地址: 哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮编: 150086)

鸡西日报社印刷厂印刷

开本: 787mm × 1 092mm 1/16 印张: 19.25 字数: 468 千字

2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 80717 - 650 - 3

印数: 1 ~ 1 000 定价: 29.00 元

前 言

本书系根据教育部《高职高专机械类专业力学课程教学基本要求》(少学时)编写的。在编写过程中,我们遵循“必需、够用”的编写原则,精选内容、恰当组织,力求语言简练、通俗易懂,简化了繁琐的数学推导,加强了基本知识、基本理论和基本方法的训练。在编写中我们参考了许多兄弟院校的教材,博采众家之长,同时又尽量反映编者在长期教学中所积累的经验 and 体会。

本书可作为机械类、近机械类各专业的高职、高专及成人教育的力学教材,也可供工科其他专业选用。讲授本书全部内容约需 90~100 学时。

本书中第一、六、九、十三、十五、十六章由刘辉(鸡西大学)编写;第三、五、十、十一、十二章由方坤(鸡西大学)编写;第二、四、七、八、十四章由董世成(鸡西大学)编写。书中图、表均由董世成编辑和整理。全书由刘辉主编,并负责全书的统稿和定稿。

在本书编写过程中,参考和引用了参考文献所列书目中的部分习题和例题,在此向原作者致谢。

限于编者的水平,书中难免存在一些缺点和不妥之处,诚恳希望广大读者批评指正。

编者

2007 年 5 月

内 容 提 要

本书分静力学和材料力学两篇共十六章。包括静力学基础、平面汇交力系、力矩和平面力偶理论、平面一般力系、摩擦、空间力系和重心、轴向拉伸与压缩、剪切与挤压、圆轴的扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析和强度理论、组合变形的强度计算、压杆稳定、动载荷和交变应力。每章附有习题，书末附有习题答案。

本书采用国际单位制，可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及应用型本科机械类、近机械类各专业力学教材，也可供工科其他专业选用及有关工程技术人员参考。

目 录

第1篇 静力学

静力学引言	2
第1章 静力学基础	3
1.1 静力学的基本概念	3
1.2 静力学公理	4
1.3 约束与约束反力	7
1.4 研究对象与受力图	11
第2章 平面汇交力系	15
2.1 平面汇交力系合成的几何法	15
2.2 平面汇交力系合成的解析法	16
2.3 平面汇交力系的平衡条件	17
第3章 力矩和平面力偶理论	24
3.1 力矩的概念及其计算	24
3.2 两个平行力的合成	26
3.3 平面力偶理论	28
3.4 力的平移定理	31
第4章 平面一般力系	36
4.1 平面一般力系向一点简化 力系的主矢和主矩	36
4.2 平面一般力系简化结果的讨论 合力矩定理	39
4.3 平面一般力系的平衡方程	42
4.4 平面平行力系的平衡方程	45
4.5 物体系统的平衡 静定与静不定问题的概念	46
第5章 摩擦	55
5.1 滑动摩擦	55
5.2 摩擦角和自锁现象	57
5.3 考虑滑动摩擦时物体的平衡问题	59
5.4 滚动摩擦的概念	62
第6章 空间力系 重心	68
6.1 空间汇交力系的合成	68
6.2 空间力偶理论	71
6.3 力对轴的矩和力对点的矩	73
6.4 空间一般力系的简化 合力矩定理	77
6.5 空间力系的平衡方程及其应用	80
6.6 重 心	84

第2篇 材料力学

材料力学引言	97
第7章 轴向拉伸与压缩	100
7.1 轴向拉伸与压缩的概念	100
7.2 截面法 轴力 轴力图	100
7.3 截面上的应力	103
7.4 轴向拉伸或压缩时的变形 胡克定律	107
7.5 材料在拉伸与压缩时的力学性能	111
7.6 轴向拉伸或压缩时的强度计算	116
7.7 拉伸、压缩静不定问题	120
7.8 应力集中的概念	125
第8章 剪切与挤压	131
8.1 剪切的概念与实用计算	131
8.2 挤压的概念与实用计算	133
第9章 圆轴的扭转	139
9.1 扭转的概念	139
9.2 扭矩和扭矩图	139
9.3 纯剪切	142
9.4 圆轴扭转时的应力和强度条件	144
9.5 圆轴扭转时的变形和刚度条件	148
第10章 弯曲内力	155
10.1 对称弯曲的概念	155
10.2 梁的计算简图及分类	156
10.3 剪力与弯矩	158
10.4 剪力图与弯矩图	161
10.5 载荷集度、剪力和弯矩间的关系	164
第11章 弯曲应力	170
11.1 纯弯曲时梁横截面上的正应力	170
11.2 横力弯曲时梁横截面上的正应力	176
11.3 弯曲剪应力简介	180
11.4 提高梁弯曲强度的措施	182
第12章 弯曲变形	190
12.1 弯曲变形的概念	190
12.2 梁的挠曲线近似微分方程	191
12.3 用积分法求弯曲变形	192
12.4 用叠加法求弯曲变形	198
12.5 简单静不定梁	201

12.6	梁的刚度校核	202
12.7	提高梁弯曲刚度的措施	204
第 13 章	应力状态分析和强度理论	210
13.1	应力状态的概念	210
13.2	平面应力状态分析	212
13.3	三向应力状态下的最大剪应力	220
13.4	广义胡克定律	221
13.5	强度理论	224
第 14 章	组合变形的强度计算	235
14.1	组合变形的工程实例及分析方法	235
14.2	拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	236
14.3	扭转与弯曲的组合变形	241
第 15 章	压杆稳定	248
15.1	压杆稳定的概念	248
15.2	细长压杆的临界力	249
15.3	欧拉公式的适用范围 经验公式	252
15.4	压杆的稳定校核	256
15.5	提高压杆稳定性的措施	258
第 16 章	动载荷和交变应力	262
16.1	概述	262
16.2	构件作匀加速直线运动和匀速转动时的应力计算	262
16.3	构件受冲击时的应力计算	265
16.4	交变应力与疲劳失效	271
16.5	交变应力的循环特征及其类型	273
16.6	材料的疲劳极限	274
16.7	构件的疲劳极限 疲劳极限计算	275
16.8	提高构件疲劳强度的措施	279

附 录

附录 1	型钢表	285
附录 2	习题答案	291
参考文献		301

第 1 篇 静 力 学

静力学引言

在工程上，物体相对于地球处于静止或做匀速直线运动的状态称为**平衡**。平衡是物体机械运动的一种特殊形式。静力学是研究物体在力的作用下处于平衡的规律的科学。静力学主要研究三个方面的问题：（1）物体的受力分析；（2）力系的简化；（3）建立各种力系的平衡条件。

工程上有许多机器零件和结构构件，如机床的主轴、丝杠、起重机的起重臂等，它们在工作时处于平衡状态或近似地看做处于平衡状态。为了合理地设计这些零件和构件的形状、尺寸，选用合适的材料，通常需要对它们进行强度、刚度或稳定性的分析计算。为此，必须首先运用静力学知识，对零件和构件进行受力分析，并根据平衡条件求出未知力。学习静力学还为学习许多后继课程奠定基础。此外，静力学知识还可直接应用于工程技术中。例如，通过对轴上零件的受力分析来合理地布置轴承；应用平衡条件求出轴承反力，作为选用轴承的一个依据等。

第1章 静力学基础

1.1 静力学的基本概念

一、力的概念

人们通过长期的生产实践和科学实验，建立了力的概念。**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和形状发生改变。**例如，人推车的力使车子改变它的运动状态（如由静到动、由慢到快等）；锻锤对锻件的冲击力使锻件改变形状等。

力使物体运动状态发生改变的效应称为**力的外效应**，而力使物体产生变形的效应称为**力的内效应**。静力学研究力的外效应。

实践表明，力对物体的作用效应取决于三个要素：（1）力的大小；（2）力的方向；（3）力的作用点。

力的作用点就是力对物体作用的位置。力的作用位置，一般来说并不是一个点，而往往是物体的某一部分面积或体积。例如，两物体接触时，它们之间的相互压力分布在所接触的表面上，重力分布在物体的整个体积上。但在很多情况下，我们可以把分布力简化为作用于一个点上的集中力。例如，当分布力作用的面积不大时，可以把该面积抽象为一个点，而认为力作用在该点上。又如，在研究力对物体的外效应时，可把重力简化为集中作用于物体的重心。

力的大小反映物体间相互机械作用的强度，它用力的单位来度量。在国际单位制（SI制）中，力的单位是牛顿（N）；在工程单位制中，力的单位则是千克力（kgf）。本书采用国际单位制。牛顿和千克力的换算关系是

$$1\text{kgf} \approx 9.8\text{N}$$

力是矢量，可用有向线段（矢线）把力的三要素表示出来。矢线的始端（或末端）表示力的作用点，沿着力矢顺着箭头的指向表示力的方向，力矢的长度按一定的比例尺表示力的大小。通过力的作用点沿力的方向的直线，称为**力的作用线**。图 1-1 中表示工人（未画出）推小车的力。这个力作用在 B 点，它的方向由线段和箭头表示，为水平向右，大小为 80N 。通过 AB 的直线为力的作用线。本书中用黑体字母表示矢量，而用对应的普通字母表示矢量的模（即大小）。例如，用 $\mathbf{F}$ 表示力矢量（图 1-1），用 F 表示这个力的大小，在图 1-1 中 $F = 80\text{N}$ 。始端为 A ，末端为 B 的矢量也可记为 $\overline{AB}$ 。

一个物体所受的力往往有数个。同时作用在同一物体上的许多力称为**力系**。作用在物体上的力系如果可以用另一个力系来代替而效应相同，那么这两个力系互称**等效力系**。作用于刚体上的力系如果可以用一个力代替而不改变对刚体的效应，那么这个力称为力系的**合力**，而力系中的各个力称为**分力**。

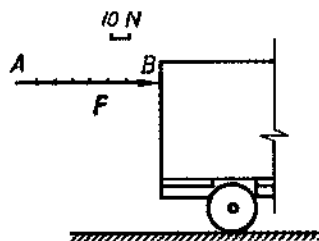


图 1-1

二、刚体的概念

力对物体的作用效应，除了使物体的运动状态发生变化外，还使物体发生变形，在正常情况下，工程上的机械零件和结构构件在力的作用下发生的变形是很微小的，甚至需要用专门的仪器才能测量出来。例如，一般机械中的轴，其最大挠度都在轴承间距的 $5/10000$ 以下，最大扭转角为每米轴长不超过 $0.5 \sim 1^\circ$ 。这样微小的变形对于力对物体外效应的研究影响极小，因此可以略去不计。从而就可把物体看做是不变形的。在受力情况下保持形状和大小不变的物体称为刚体。刚体是静力学中对物体进行抽象简化后得到的一种理想模型。这种简化是必要的，也是实际所许可的。

然而当变形在所研究的问题中成为主要因素时（如在材料力学中），一般就不能再把物体看做是刚体了。

三、平衡的概念

前已述及，在工程上物体相对于地球处于静止或做匀速直线运动的状态称为平衡。作用在物体上使物体处于平衡状态的力系称为平衡力系。平衡力系所满足的条件称为平衡条件。

1.2 静力学公理

静力学公理是人们在长期的生产和生活实践中总结得到的最基本的力学规律。这些规律的正确性已被实践反复证明，是完全符合客观实际的。

一、公理一 二力平衡条件

受两个力作用的刚体处于平衡状态的充分和必要条件是，这两个力大小相等，方向相反，作用线相同。如图 1-2 所示，即

$$F_A = -F_B$$

对于非刚体来说，二力平衡条件只是必要条件而不是充分条件。例如，绳索的两端受到等值、反向、共线的压力，就不能平衡了。

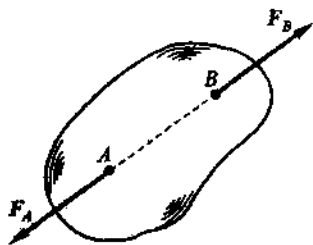


图 1-2

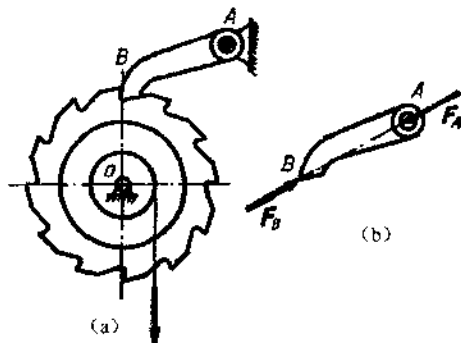


图 1-3

在两个力作用下并处于平衡的物体称为二力体。若物体是个杆件，则称为二力杆。图1-3b所示的棘爪，在A处受到圆柱形销钉所施加的力 F_A ，在爪尖B点受到棘轮所施加的力 F_B ，棘爪自重很轻可略去不计，所以棘爪是二力体。根据二力平衡条件， F_A 和 F_B 一定等值、反向、共线，亦即 F_A 、 F_B 的作用线一定沿A、B两点的连线。可见，利用二力平衡条件可直接确定二力体所受两个力的作用线。

二、公理二 加减平衡力系公理

在作用于刚体的已知力系上，加上或减去任意个平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用效应。

就是说，若两个力系只相差一个或若干个平衡力系，则它们对刚体的作用效应是相同的，彼此可以等效替换。

推论 力的可传性原理

作用在刚体上的力可沿其作用线移到该刚体上任一点而不改变此力对该刚体的外效应。例如，力 F 作用在小车的A点，如图1-4a所示。根据加减平衡力系公理，可在力 F 的作用线上取任一点B，并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ，使 $F_1 = -F_2 = F$ ，如图1-4b所示。由于力 F 和 F_2 也是一个平衡力系，故可除去；这样只剩下一个力 F_1 ，如图1-4c所示。于是，原来的这个力 F 与力系 (F, F_1, F_2) 以及力 F_1 等效。对比图1-4a和c，因 $F = F_1$ ，显见力 F 可沿作用线等效地移到任意点B。

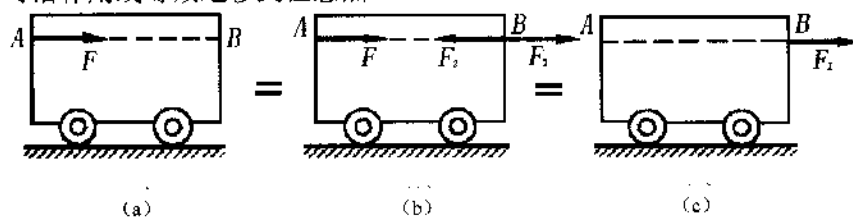


图 1-4

如果受力物体不是小车，而换为一般的刚体，上述推论仍然成立。

必须注意，运用力的可传性不改变力对物体的外效应，但会改变力对物体的内效应。就是说，力的可传性只适用于刚体而不适用于变形体。

根据力的可传性原理，对于刚体来说力的三要素应改为大小、方向和作用线。这样，力矢可以从它作用线上的任一点画出。我们把具有这种性质的矢量称为滑动矢量。因此，作用于刚体上的力是滑动矢量。

三、公理三 力的平行四边形法则

作用于物体上同一点的两个力可以合成为一个合力，合力也作用于该点，合力的大小和方向由以两分力为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示，即合力矢等于这两个分力矢的矢量和，如图1-5a所示。其矢量表达式为

$$F_R = F_1 + F_2 \quad (1-1)$$

其中 F_R 表示合力, F_1, F_2 表示分力。

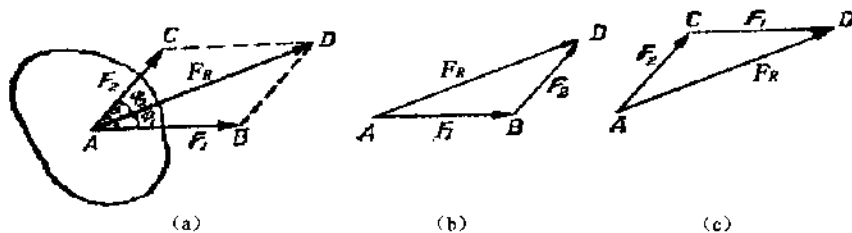


图 1-5

求解合力 F_R 的大小和方向, 一般可用几何作图法或利用几何关系计算。用几何作图法时, 可选取恰当的比例尺做成平行四边形, 然后直接从图上量取对角线的长度, 它按比例代表合力 F_R 的大小; 对角线与分力间的夹角表示合力的方向。利用几何关系计算时, 如已知 F_1, F_2 和它们的夹角 α , 则由余弦定理可得

$$F_R^2 = F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2 \cos(180^\circ - \alpha) = F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha$$

所以合力的大小为

$$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha} \quad (1-2)$$

为了求合力 F_R 与分力 F_1, F_2 之间的夹角 φ_1, φ_2 , 可对 $\triangle ABD$ 应用正弦定理:

$$\frac{F_1}{\sin \varphi_2} = \frac{F_2}{\sin \varphi_1} = \frac{F_R}{\sin(180^\circ - \alpha)}$$

所以

$$\sin \varphi_1 = \frac{F_2 \sin \alpha}{F_R}, \quad \sin \varphi_2 = \frac{F_1 \sin \alpha}{F_R} \quad (1-3)$$

在运用几何作图法求合力 F_R 时, 实际上不必作出整个平行四边形, 只要以力矢 F_1 的末端 B 作为力矢 F_2 的始端画出 F_2 , 那么矢量 $\overline{AD}$ 就代表合力矢 F_R , 如图 1-5b 所示。分力矢和合力矢所构成的三角形 ABD 称为力三角形。这一合成方法称为力三角形法则。如果先画 F_2 , 后画 F_1 , 其结果不变, 如图 1-5c 所示。上述利用力的平行四边形法则由分力求合力的过程叫做力的合成。

利用力的平行四边形法则 (或力三角形法则), 也可以把作用在物体上的一个力分解为相交的两个分力, 分力与合力作用于同一点。在工程问题中, 通常遇到的是把一个力分解为方向已知的两个分力, 特别有用的是把一个力分解为方向已知且互相垂直的两个分力。这种分解称为正交分解, 所得的两个分力称为正交分力。

推论 三力平衡汇交定理

刚体受不平行的三个力作用而平衡时, 若其中两个力的作用线汇交于一点, 则此三个

力的作用线必在同一平面内且汇交于一点。如图 1-6 所示, 此推论读者可运用公理一和公理三加以证明。

三力平衡汇交定理是不平行三力平衡的必要条件。当刚体受不平行三力而处于平衡时, 利用这个定理可以确定未知力的方向。

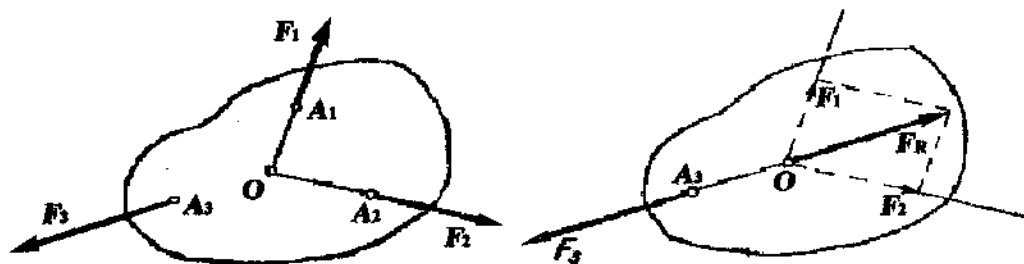


图 1-6

四、公理四 作用和反作用定律

两个物体间的作用力和反作用力, 总是大小相等, 方向相反, 作用线相同, 并分别作用于这两个物体上。

例如, 车刀在工件上切槽时 (图 1-7), 车刀作用于工件的切削力为 P , 同时工件必有反作用力 P' 总是等值、反向、共线。

必须注意, 作用力和反作用力不是作用在同一物体上, 而是分别作用在相互作用的两个物体上。因此, 对于每一个物体来说, 不能把作用力和反作用力说成是一对平衡力。

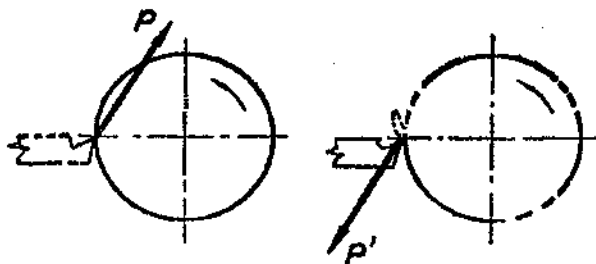


图 1-7

1.3 约束与约束反力

在空间可以自由运动, 其位移不受任何限制的物体称为**自由体**, 如空中飞行的飞机、炮弹和火箭等。工程中的大多数物体, 其某些方向的位移往往受到限制, 这样的物体称为**非自由体**。例如, 在钢轨上行驶的火车、安装在轴承中的转轴等, 都是非自由体。对非自由体某些方向的位移起限制作用的周围物体称为**约束**。例如, 钢轨对于火车、轴承对于转轴等, 都是约束。当物体沿着约束所限制的方向有运动趋势时, 约束对物体将产生一作用力。约束对被约束物体的作用力称为**约束反力**或**约束力**。例如, 钢轨给火车的力、轴承给转轴的力都属于约束反力。**约束反力的方向总是与非自由体被约束所限制的位移方向相反**。应用这一准则, 可以确定约束反力的方向或作用线的位置。至于约束反力的大小则不能预

先独立地确定。约束反力以外的力（如重力、切削力、电磁力）称为主动力。它们一般是给定的或可测定的。在静力学中，约束反力和物体所受的主动力组成平衡力系，因此可用平衡条件求出约束反力。

下面介绍约束的几种基本类型并进行约束反力的分析。

一、柔软的绳索（简称柔索）约束

柔软的绳索能够承受较大的拉力，而抵抗压缩和弯曲的能力却很差。在一般情况下可以认为柔索只承受拉力，而不能承受压力和弯曲。工程上的钢丝绳、皮带、链条，都可以简化为柔索。当物体受柔索的约束时，柔索只限制物体沿着柔索伸长方向的位移。因此，柔索给被约束物体的约束反力作用在柔索与物体的接触点，其方向沿着柔索离开被约束物体，即必为拉力。例如，用铁链吊起一减速箱盖（图 1-8a）， G 是箱盖的重力，根据柔索反力的特点，可以确定铁链给铁环的力一定是拉力（ T ， T_B ， T_C ），铁链给箱盖的力也是拉力（ S_B ， S_C ）。同理，可以确定在皮带传动中皮带给两个皮带轮的力都是拉力（图 1-8b）。

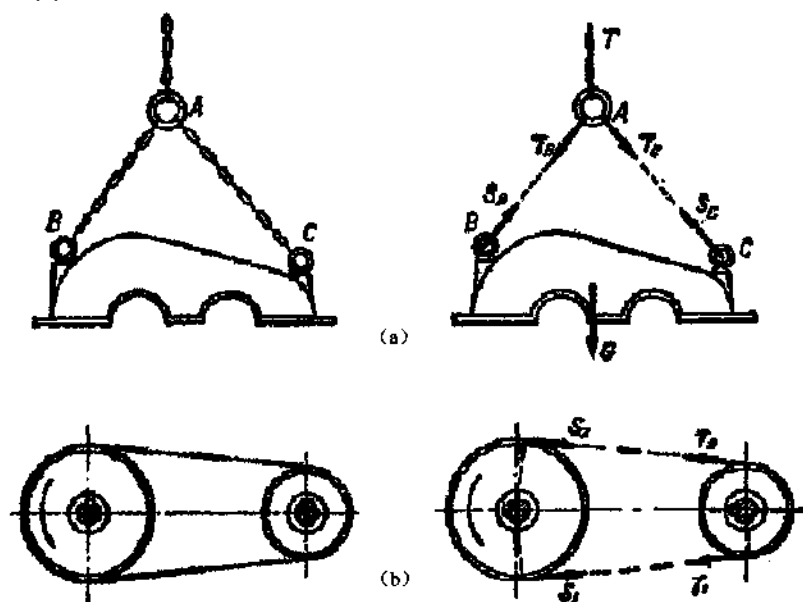


图 1-8

二、光滑接触面约束

若物体接触面之间的摩擦力远小于物体所受的其他各力，则摩擦力可以略去不计而认为接触面是“光滑”的。若两物体间的接触面是光滑的，则物体可自由地沿接触面滑动，或沿接触面在接触点的公法线方向脱离接触，但不能沿公法线方向压入接触面。因此，光滑接触面给被约束物体的约束反力必通过接触点，方向沿着接触面在该点的公法线，指向被约束物体内部，即必为压力。工程上以光滑面相接触的实例很多。如重为 G 的圆轴搁在 V 形铁上，接触于 A ， B 两点（图 1-9a）。圆轴受到 V 形铁所给的力 N_A ， N_B ，它们分别沿

着圆轴与V形铁两接触面在A、B两点的公法线方向。V形铁受到圆轴所给的力 N_A' 、 N_B' 。 N_A 与 N_A' 、 N_B 与 N_B' 互为作用力与反作用力。又如重为 G 的机床工作台与床身以平面导轨和V形导轨相接触(图1-9b),共有三个接触面。 N_1 、 N_2 、 N_3 是床身导轨给工作台的约束反力,它们应分别垂直于三个接触面。 N_1' 、 N_2' 、 N_3' 是工作台给床身的力,它们分别与 N_1 、 N_2 、 N_3 互为作用力与反作用力。

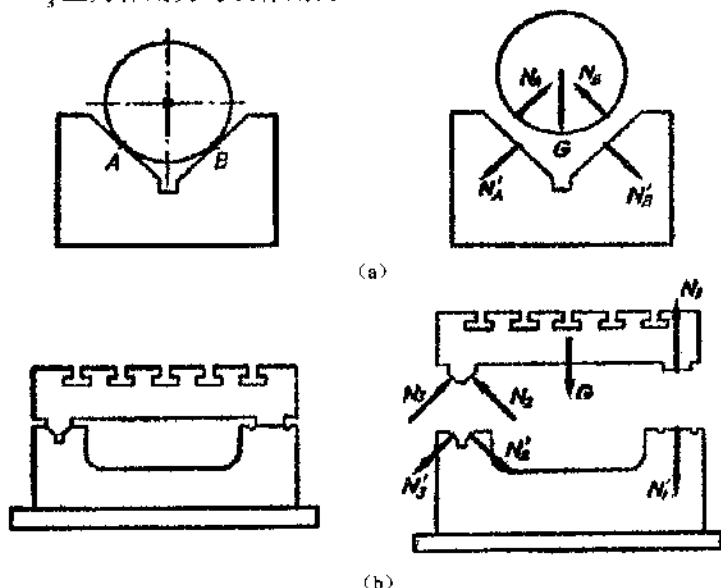


图 1-9

三、光滑铰链约束

光滑铰链型约束通常由一个圆孔套在一个圆轴外面构成。它在工程中有多中具体形式,现将其中主要的几种分述如下:

(一) 圆柱形销钉连接

在机器中常用圆柱形销钉 C 将两个零件 A 、 B 连接起来(图1-10a, b)。如果销钉和销孔是光滑的,那么销钉只限制两零件的相对移动,而不限制两零件的相对转动。具有这种特点的约束在力学上称为铰链。图1-10c是图1-10b的简化图,圆柱形销钉连接可用图1-10c所示简图来表示。

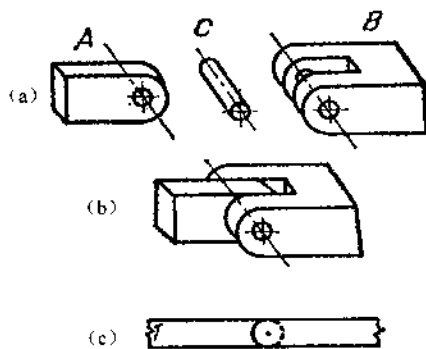


图 1-10

由图1-11可见,如果略去摩擦,销钉与零件实际上是以两个光滑圆柱面相接触。按照光滑接触面反力的特点,销钉给零件的反力 N 应沿圆柱面在接触点 K 的公法线,即通过 K 点的半径方向。但因接触点 K 一般不能预先确定,以至反力 N 的方向也不

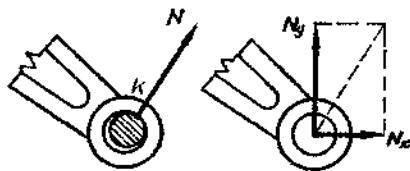


图 1-11