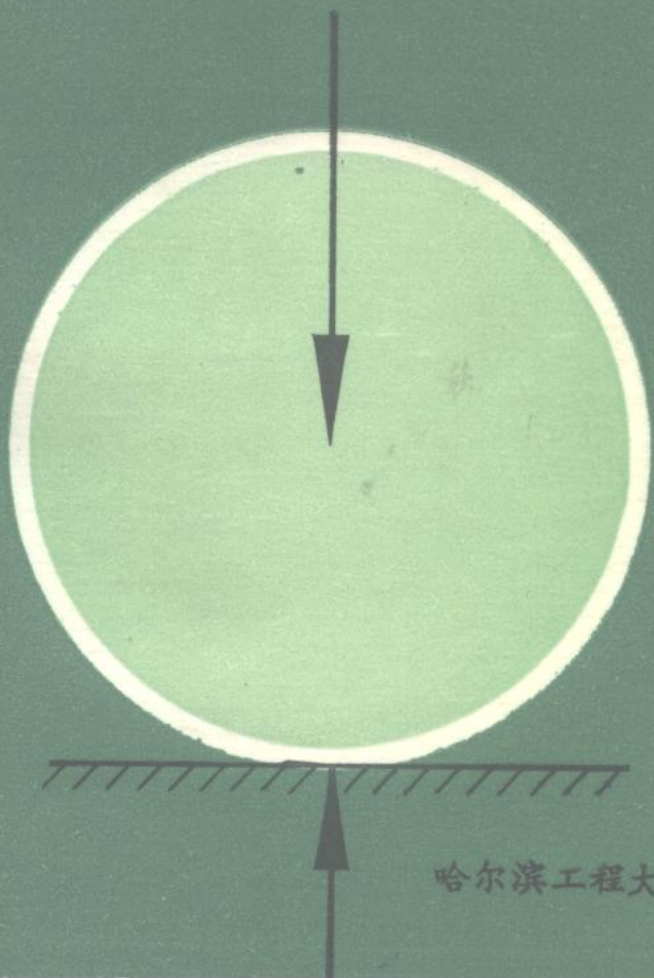


工 程 力 学

(静 力 学)

杨晓翔 编



哈尔滨工程大学出版社

TB12

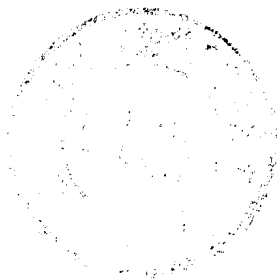
Y28-2

460763

工 程 力 学

(静 力 学)

杨晓翔 编



00460763

哈尔滨工程大学出版社

内 容 提 要

本教材是根据国家教委制定的工程力学课程基本要求，在总结多年来教学经验的基础上编写的。它适用于石油、地质、冶金、轻工和材料等类专业，作适当删减后可用作函授教材。本书除作为高等学校的试用教材外，也可供有关工程技术人员参考。

工程力学

(静力学)

杨晓翔 编

责任编辑 张植朴

*

哈尔滨工程大学出版社出版发行

新华书店经销

大庆石油学院印刷厂印刷

*

开本 850×1168mm 1/32 印张 7.8125 字数 220 千字

1995年12月第1版 1995年12月第1次印刷

印数:1~1000册

ISBN 7-81007-632-9

O·43 定价:8.90元

前 言

为了更好地适应高等工业学校石油、地质、冶金、轻工和材料等专业工程力学的教学需要,根据国家教委制定的工程力学课程基本要求,在总结多年来教学经验的基础上,编写了这套《工程力学》教材。

《工程力学》分为静力学、运动学和动力学、材料力学,共三册,分别出版。书中标有“*”的节次为加深和加宽内容,可按照教学需要选学。

在编写中注意吸收其它教材的优点,并结合专业特点,力求作到基本概念和基本理论论述严谨,内容精练。在内容安排、例题和习题的选取等方面,尽量作到符合学生的认识特点和教学规律。此外,各章后有小结、思考题和习题,书后附有习题答案;较难的习题标有“*”号。

本书均采用国际单位制。力学术语、物理量名称及符号等,均采用最新颁布的国家标准的有关规定。

本教材也适用于高等工业学校函授教学,在讲授时可根据专业情况和学时多少选择讲授内容。本书也可供其它专业和有关工程技术人员参考。

本书全稿由大庆石油学院范家齐教授主审,并且提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

限于作者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,希望广大读者批评指正。

编 者

1995年4月

目 录

第一章 静力学基本概念和物体的受力分析	1
§1-1 静力学基本概念.....	1
§1-2 静力学基本公理.....	4
§1-3 约束和约束反力.....	9
§1-4 物体的受力分析和受力图	15
小 结	19
思考题	21
习 题	25
第二章 汇交力系	34
§2-1 汇交力系合成的几何法及平衡的几何条件	35
§2-2 汇交力系合成的解析法	41
§2-3 汇交力系的平衡方程及其应用	46
小 结	53
思考题	55
习 题	58
第三章 力矩及力偶系	68
§3-1 力对点之矩及合力矩定理	68
§3-2 力对轴之矩	73
§3-3 力偶及其性质	77
§3-4 力偶系的合成和平衡方程	83
小 结	89
思考题	91
习 题	94
第四章 平面任意力系	102
§4-1 力的平移定理.....	103
§4-2 平面任意力系向一点简化及简化结果.....	105
§4-3 平面任意力系的平衡条件和平衡方程.....	112

§ 4-4	平面平行力系的平衡方程	118
§ 4-5	物体系统的平衡、静定和静不定概念	121
§ 4-6	平面桁架的内力计算	132
	小 结	138
	思考题	140
	习 题	145
第五章	空间任意力系	159
§ 5-1	空间任意力系向一点简化及简化结果	160
§ 5-2	空间任意力系的平衡方程	166
§ 5-3	空间任意力系平衡方程应用举例	170
§ 5-4	空间问题转化成平面问题处理	175
	小 结	177
	思考题	179
	习 题	181
第六章	静力学专题	189
专题一	摩 擦	189
§ 6-1	滑动摩擦	190
§ 6-2	考虑摩擦的平衡问题	196
§ 6-3	滚动摩擦阻的概念	204
专题二	重 心	207
§ 6-4	平行力系的中心和重心的坐标公式	208
§ 6-5	确定重心位置的方法	213
	小 结	222
	思考题	223
	习 题	226
	习题答案	236
第二章	汇交力系	236
第三章	力矩及力偶系	237
第四章	平面任意力系	238
第五章	空间任意力系	241
第六章	静力学专题	243

第一章 静力学基本概念和 物体的受力分析

本章首先介绍两个常用的基本概念——力和刚体,以及静力学基本公理,它们是静力学的基础,然后介绍典型的约束形式和约束反力,在此基础上对物体进行受力分析。

§ 1-1 静力学基本概念

一、力

人们在长期的生产和生活实践中,逐渐认识到力的存在,并从中抽象出力的概念。所谓力是指物体之间的相互机械作用,这种作用的结果将使物体的运动状态发生变化,或使物体的形状发生变化。如果使物体的运动状态发生变化则称力的外效应或称力的运动效应,它属于理论力学的研究范畴;如果使物体的形状发生变化则称力的内效应或称力的变形效应,它属于材料力学的研究范畴。

力是物体间的相互作用,在实际中,物体间的作用方式是多种多样千变万化的,但是可以归纳成两种类型,一种是两个物体直接接触,如摩擦力、水流对坝体的压力等;另一种作用方式是通过场间接作用,如万有引力场中的万有引力(重力)及电磁场中的电磁力等。

既然力是物体间的相互作用,那么力必须是成对出现的。例如人用力推小车,如图 1-1 所示,人给小车一个作用力,那么小车必然给人一个反作用力。作用力与反作用力是相互依存、同时出现、

共同消失的。一般我们称所要研究的物体为受力体，这里小车可看成是受力体；称对受力体产生机械作用的物体为施力体，这里人就

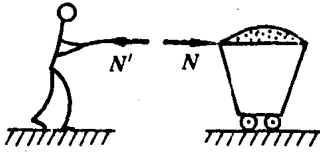


图 1-1

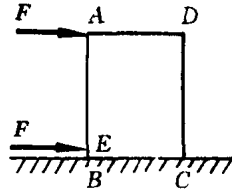


图 1-2

是施力体。实践表明，力对物体的作用效果取决于三个要素：(1)力的大小；(2)力的方向；(3)力的作用点，即力的三要素。力的大小和方向对物体的作用效果的影响是显而易见的，下面简单说明力的作用点对物体作用效果的影响。如图 1-2 所示的物体，如力 F 作用于 E 点，则物体将向前运动；如果力 F 的大小和方向均不变，但作用于 A 点，则物体将绕 C 点转动(摩擦力要足够大)。力的三要素可用一个定位矢量来表示，所谓定位矢量是指矢量的始端或末端固定于空间内某一点的矢量。因此，可用矢量的大小和方向表示力的大小和方向，用矢量的始端或末端表示力的作用点，即力是一个定位矢量。这样力也可以用一个起始点或终止点固定的有向线段来表示，如图 1-3 所示。本书采用黑体字母 \boldsymbol{F} 表示力矢量；用普通字母 F 表示力的大小，即力矢量的模 $F = |\boldsymbol{F}|$ 。通过力的作用点并沿着力的方位的直线称为力的作用线。力的大小可以通过选择不同的单位来度量。在国际单位制(SI)中，力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)。在工程单位制中，力的单位是公斤力(kgf)或吨力(tf)。两种单位制之间的换算关系为

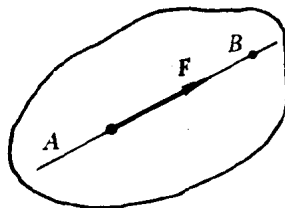


图 1-3

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

本书均采用国际单位制。

二、刚体

在静力学中另一个常用的概念就是刚体。所谓刚体是指在力的作用下其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体，也可以说是受力后不变形的物体。它是从实际中抽象出来的理想化的力学模型。实际上任何物体在力的作用下都或大或小地发生变形，但是，这些微小的变形对所研究的问题属于次要因素时，就可忽略不计。

刚体的概念是相对的，有条件的，在某些情况下可视为刚体，但是在其它情况下又得看成是变形体。如当两个人抬一根钢管时，两个人所受的压力与钢管的变形无关，可把钢管看成刚体。但是当三个人抬一根钢管时，虽然钢管的变形很小，但三个人所受的压力分配却与钢管的变形有关，因此要计算出三个人分别受到的压力就必须把钢管看成是变形体。在理论力学的静力学中，所研究的对象只限于刚体，所以又称为刚体静力学。

下面再简单地介绍几个静力学中所用到的概念。

1. 平衡 平衡是指物体相对于惯性参考系处于静止或匀速直线运动。在工程问题中，一般选取惯性参考系为地面。

2. 力系 作用在物体上的一群力称为力系。如果物体在一力系作用下保持平衡状态，则称该力系为平衡力系。作用于刚体上的一个力系用另外一个力系代替，如果两个力系对刚体的作用效果相同，那么称这两个力系为等效力系。

3. 合力和分力 如果一个力系和一个力等效，那么称这个力为该力系的合力，称力系中的每个力为这个力的分力。

§ 1-2 静力学基本公理

静力学公理是研究静力学的基础。它主要研究两个力的合成和平衡,以及两个物体间相互作用等最基本的力学规律。静力学的定理、公式和结论均在静力学公理的基础上推导的。

一、二力平衡公理

作用在刚体上的两个力,使刚体处于平衡的充分必要条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。如图 1-4 所

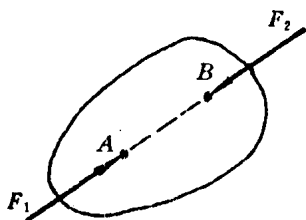


图 1-4

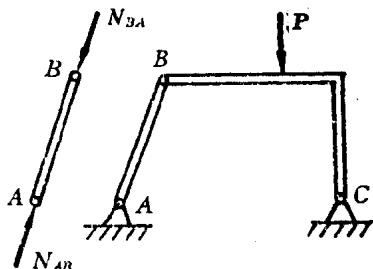


图 1-5

示,这里 $F_1 = -F_2$,此公理只适用于刚体,而不适用于变形体。在工程实际中,我们把在两个力作用下处于平衡的构件称为二力构件,如构件的几何形状是杆则称为二力杆。如图 1-5 中的 AB 杆(忽略其自重)即为二力杆。

二、加减平衡力系公理

在任意一力系中,加上或减去任何一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效果。此公理只适用于刚体,它经常被用于力系的简化中。由此公理可得出如下推论。

推论 1 力的可传性原理

作用在刚体上某点的力可沿着它的作用线移动到刚体内的任意一点,并不改变它对刚体的作用效果。

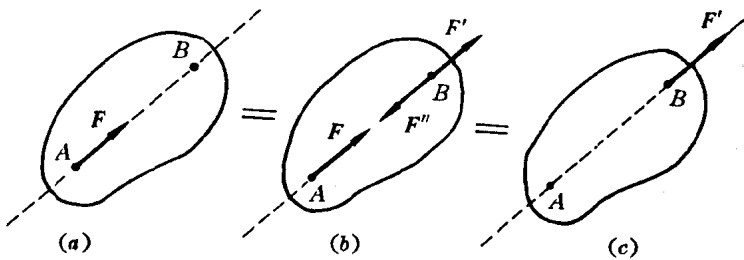


图 1-6

证明 设力 F 作用于刚体的 A 点,如图 1-6(a)。在力 F 的作用线上任取一点 B ,根据加减平衡力系公理在 B 点加上一对平衡力,使得 $F = -F' = F''$,则对刚体的作用效果不变,如图 1-6(b)。显然力 F 和 F' 也构成一对平衡力,再根据加减平衡力系公理减去一对平衡力 F 和 F'' ,同样不改变对刚体的作用效果,如图 1-6(c)。这样力 F 的作用点就沿其作用线移动到任意一点 B 。例如,一力 F 作用在料车的前面拉车或作用在料车的后面推车,对料车

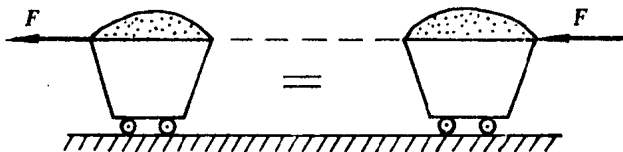


图 1-7

的作用效果是一样的,如图 1-7 所示。力的可传性原理只适用于刚体,而不适用于变形体。例如一根变形杆 AB 的两端受一对平衡力 $F_1 = -F_2$ 的作用,使杆受拉伸而伸长,如图 1-8(a)。如果按力的可传性原理把力 F_1 和 F_2 的作用点分别移动到杆的另一端,则杆受压而缩短,如图 1-8(b)所示,改变了原力系的作用效果。力的可传性原理只适用于力在一个刚体上传递,而不能把作用在某个刚体上的力传递到另外的刚体上。如图 1-9 所示,两个小球在

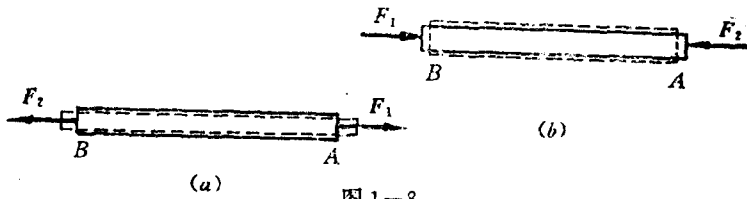


图 1-8

图 1-9(a)中处于平衡状态,两球之间受压。如将作用力分别传递到另外一个球上,则两球将分离,如图 1-9(b)所示。因此力只能

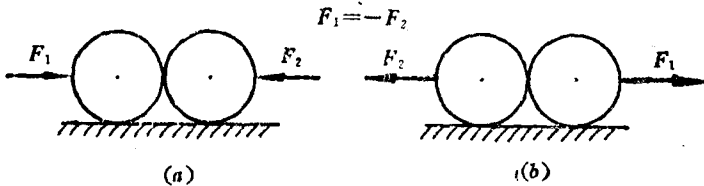


图 1-9

在一个刚体内传递。从上述分析可以看出,对于刚体而言,力的作用点已不是力的三要素之一。作用于刚体上力的三要素变成:(1)力的大小;(2)力的方向;(3)力的作用线。因此,我们称作用于刚体上的力矢量为**转移矢量**。

三、力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力,可以合成一个合力。合力的作用点仍在该点,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 1-10(a)所示。由于力是矢量,所以符合矢量加法,即合力矢等于两分力矢的矢量和,数学表达式为

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

要注意(1-1)式是矢量和,不能同代数和相混淆。在用矢量加法求和时,可将两个分力矢量首尾相接,然后从第一个矢量的始端到第

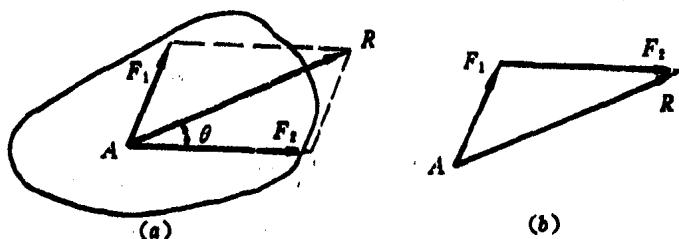


图 1-10

二个矢量的末端连线即为合力矢量,如图 1-10(b)。这种求合力的方法称为力的三角形法则。力的平行四边形法则既适用于刚体又适用于变形体,它给出了最简单力系的简化规律,是复杂力系简化的基础和依据。由此公理和二力平衡公理可得如下推论。

推论 2 三力平衡汇交定理

若刚体在三个力的作用下处于平衡,且其中二力相交于一点

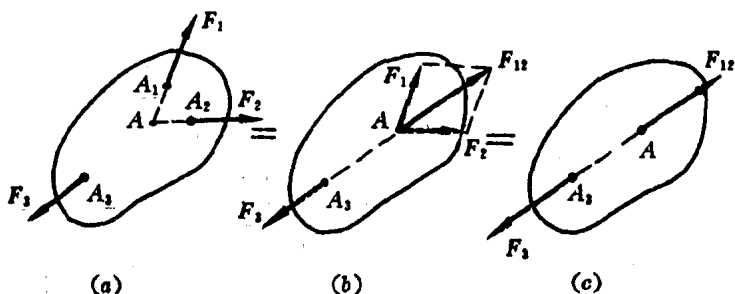


图 1-11

时,则第三个力的作用线必通过同一点,且三力在同一平面内。

证明 如图 1-11 所示,刚体在三个力 F_1 、 F_2 、 F_3 作用下处于平衡,且 F_1 、 F_2 的作用线相交于 A 点。根据力的可传性原理把 F_1 、 F_2 的作用点移动到 A 点,根据力的平行四边形法则将 F_1 、 F_2 合成为一个合力 F_{12} 。则刚体在 F_1 、 F_{12} 作用下与原力系等效。再由二力

平衡公理可知,刚体在 F_3 、 F_{12} 作用下平衡,则 F_3 、 F_{12} 必定大小相等、方向相反且作用在同一直线上,所以 F_3 必然过 A 点且与 F_1 、 F_2 在同一平面内。

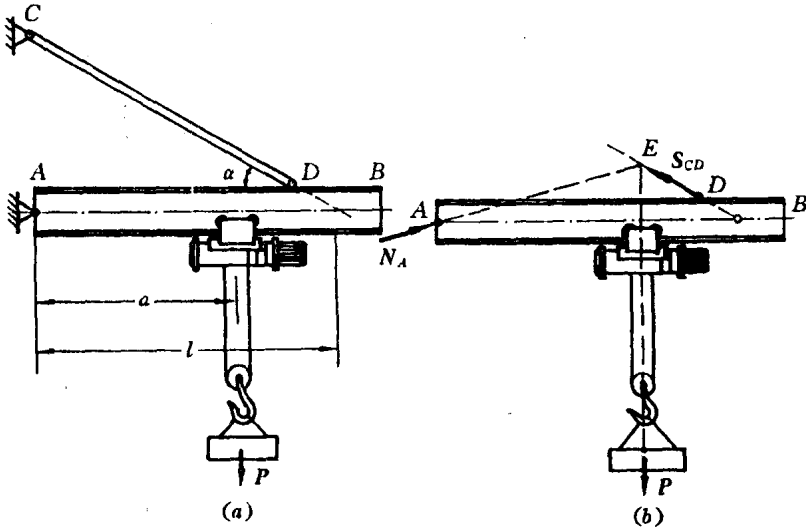


图 1-12

如果一个物体在三个力作用下处于平衡状态,且已知两个力的方向,那么用三力平衡汇交定理可以确定第三个力的方向。如图 1-12 所示的简易吊车横梁 AB ,如忽略 CD 杆和 AB 梁的自重, CD 杆为二力杆,所以力 S_{CD} 沿 CD 的连线方向。横梁在三个力即 CD 杆的拉力 S_{CD} 、吊车载荷 P 和支座 A 的反力 N_A 作用下平衡。已知力 P 和 S_{CD} 相交于 E 点,所以支座反力 N_A 的作用线必然通过 E 点。

四、作用与反作用定律

两个物体间的相互作用力,即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。

作用力和反作用力总是成对出现的,有作用力必然有反作用

力。如前所述,有施力体必然有受力体,有受力体必然有施力体,二者相互依存。如图 1-13 所示的简易滑轮提升系统,绳索给重物一

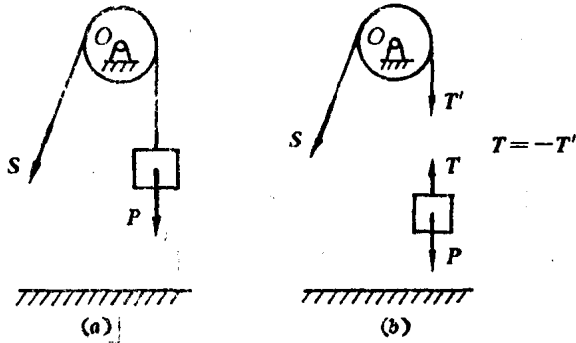


图 1-13

个拉力 T ,那么重物同样给绳索一个反作用力 T' 。应该注意,作用力和反作用力虽然大小相等方向相反,但是分别作用在两个物体上,所以不是一对平衡力,不要与二力平衡公理相混淆。如上例,力 T 和 T' 是一对作用力和反作用力;而力 T 和 P 是一对平衡力,均作用在重物上。

无论物体处于静止状态还是运动状态;无论是刚体还是变形体,作用与反作用定律均适用。此定律是对物体系统进行受力分析的重要依据。

§ 1-3 约束和约束反力

当物体在空间不受限制,可以沿任意方向运动,我们称其为自由体,如飞行中的人造卫星、飞机和炮弹等。当物体受到其它物体的限制,在某些方向上不能运动,我们称其为非自由体。例如,放置在桌面上的物体,物体就受到桌面的制约而不能向桌面内运动;起重机提升重物时,重物受到钢丝绳的限制而不能下落;电动机转子

受到轴承的限制只能绕中心轴转动,所以桌面上的物体、被提升的重物和电动机转子等均属于非自由体。由此看出非自由体在某些方向上不能运动是因为受到了其周围其它物体的限制,我们称能够阻碍非自由体运动的周围物体为非自由体的约束。约束是一个实实在在的物体,如前所述的桌面就是桌面上物体的约束,钢丝绳就是被提升重物的约束,轴承就是转子的约束等。

约束既然能够阻碍非自由体的运动,就一定给非自由体一个作用力,我们称约束给被约束物体(非自由体)的作用力为约束反力。约束反力的作用点应在约束和被约束物体的相互接触处,它的方向应与约束所能阻碍的运动方向相反。约束反力的大小将由平衡条件确定。

由于约束反力是约束阻碍物体运动的力,所以是被动力;与之相反,凡能使物体运动或有运动趋势的力则称为主动力,如重力、风载荷及各种机械设备的驱动力等。

在静力学中,约束反力和主动力组成平衡力系,根据平衡条件可求出约束反力,所以根据约束性质,正确分析约束反力是研究平衡问题的重要环节。下面介绍几种工程中常见的约束形式。

一、柔性约束

由绳子、链条或皮带等柔性物体所构成的约束称为柔性约束。由于柔性体本身只能承受拉力,因此它只能限制被约束的物体沿柔性体的方向离开柔性体的运动。如悬挂在天花板上的白炽灯,灯受到悬链的约束而不能落地,灯受到的约束反力是沿着悬链背离灯的方向,如图 1-14 所示。所以,柔性约束的约束反力只能是拉力,作用在接触点上,方向沿着柔性体背离被约束的物体。又如,在工程地质钻探中,通常采用滑轮组合压入法取原状土,见图 1-15(a),而滑轮组合装置中的钢丝绳就属于柔性约束,其约束反力见图 1-15(b)。

二、光滑接触面约束

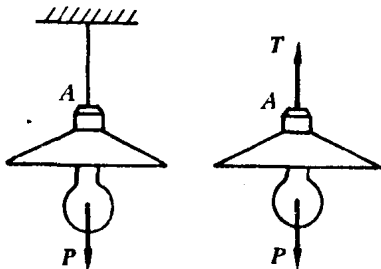


图 1-14

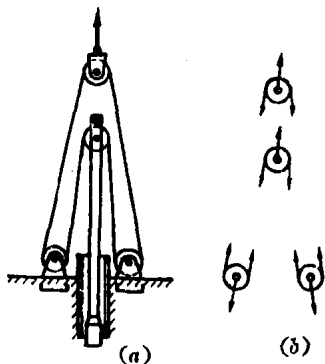


图 1-15

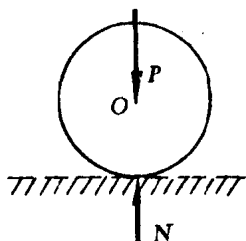


图 1-16

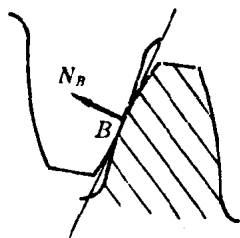


图 1-17

当两个物体接触面上的摩擦力与其它力相比较小且可忽略不计,此时可以看成是光滑面接触,这样相互接触的一个物体对另一个物体来说就构成了光滑接触面约束。光滑接触面约束既不能阻止物体沿接触面的切线方向移动,也不能阻止物体沿接触面的公法线离开约束面的运动,只能阻止物体沿接触面的公法线向约束面内的运动。如放置在光滑桌面上的小球,桌面只能阻止小球向桌面内的运动,因此小球受到桌面的反力 N ,如图 1-16 所示。所以,光滑接触面约束的约束反力,作用在接触点处,方向沿着接触面的