

■ 高等学校通用教材

工程力学 (I)

ENGINEERING MECHANICS (I)

齐威 林巍 主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

中国书画函授大学肇庆分校

肇庆分校建校二十周年纪念册

肇庆分校建校二十周年纪念册



TB12/128

:1

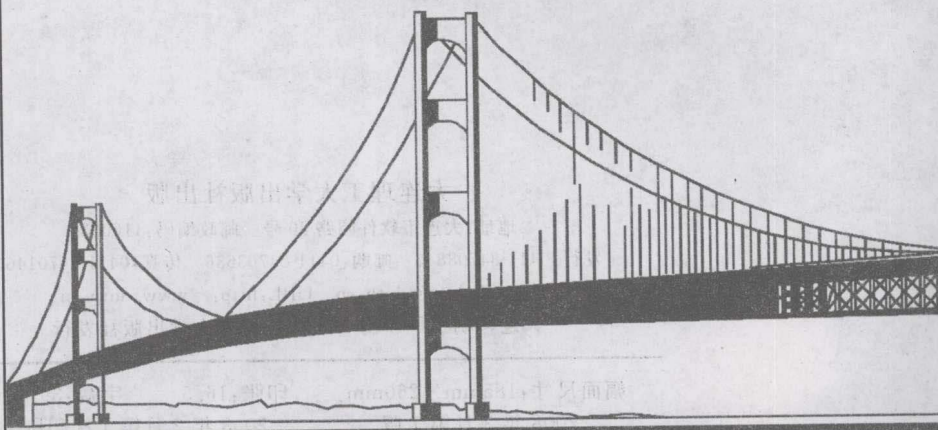
2008

■ 高等学校通用教材

工程力学(I)

ENGINEERING MECHANICS (I)

齐威 林巍 主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

工程力学(Ⅱ) / 齐威, 林巍主编. — 大连: 大连理工大学出版社, 2008.2
高等学校通用教材
ISBN 978-7-5611-3997-4

I. ①工... Ⅲ. ①齐... ②林... Ⅳ. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 012257 号

齐威 林巍 主编

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84708842 邮购: 0411-84703636 传真: 0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连印刷三厂印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm 印张: 16.5 字数: 391 千字
2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

责任编辑: 赵 静

责任校对: 王 义

封面设计: 宋 蕾

ISBN 978-7-5611-3997-4

定 价: 24.80 元

大连理工大学出版社

前 言

为了积极推进工程力学教学内容和课程体系改革,更好地适应高等工业学校工程力学课程的教学需要,在总结近年来探索与实践经验的基础上,我们编写了这套《工程力学》系列教材。

本教材将传统的理论力学和材料力学课程内容融汇、整合、取舍后分成几个模块:每个模块内容单独成册。第一册为静力学和材料力学基础模块;第二册为运动学和动力学基础模块;第三册为工程动力学和材料力学专题模块;其中第一册为工程力学课程体系中的基本内容,大约 60 个学时,可以作为工科类各专业力学基础必修课程的教材单独使用;尤其可以很好地满足轻化工程、食品及生物工程等专业的教学需要;第二册与第三册可以在学习完第一册内容的基础上,由各专业按各自的教学需要选择使用。

本书在满足教学基本要求的前提下,力求做到提高起点、精炼内容、减少重复,以进一步突出基本概念、基本理论和基本方法,同时适当拓宽学生知识面,介绍本学科发展的最新成果。

本书在编写过程中尽量做到符合学生的认知特点和教学规律,合理选择和安排例题及习题。书中采用的力学术语及名词均执行了最新颁布的国家标准的有关规定。

本书由大连工业大学力学教研室集体编写。

第一册由齐威、林巍主编;金艳、贺向东、程金石、杨新策、时君丽参编。

限于编者水平所限,书中欠妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2008.01

目 录

绪 论	1
第 1 章 静力学基本概念和物体的受力分析	3
1.1 力和刚体的概念	3
1.2 静力学公理及其推论	4
1.3 约束和约束反力	7
1.4 物体的受力分析和受力图	10
习 题	14
第 2 章 平面力系	17
2.1 力在轴上的投影和力对点的矩	17
2.2 力偶矩、平面力偶系的简化	20
2.3 平面力系的简化	21
2.4 平面力系的平衡条件和平衡方程式	25
2.5 平面力系平衡方程式应用举例	27
2.6 物系的平衡、静定与静不定的概念	33
2.7 滑动摩擦及其平衡问题	41
习 题	46
第 3 章 空间力系	55
3.1 力在空间直角坐标轴上的投影	55
3.2 力对轴的矩和力对点的矩	56
3.3 空间力系的平衡方程式及其应用	60
3.4 平行力系的中心与重心	67
习 题	71
第 4 章 材料力学的基本概念	74
4.1 材料力学的任务	74
4.2 变形固体及其基本假设	75
4.3 内力 截面法 应力 应变	76
4.4 杆件变形的基本形式	79
习 题	80

第 5 章 拉伸与压缩	81
5.1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	81
5.2 轴向拉伸与压缩时杆件的内力与应力	81
5.3 轴向拉伸与压缩杆件的强度条件及其应用	84
5.4 轴向拉伸与压缩杆件的变形计算	86
5.5 简单拉伸、压缩的静不定问题	88
5.6 材料受拉伸与压缩时的力学性能	91
5.7 安全系数和许用应力	96
5.8 温度和时间对材料力学性能的影响	97
5.9 应力集中的概念	98
习 题	99
第 6 章 剪切与挤压	103
6.1 剪切的概念及其实用计算	103
6.2 挤压的概念及其实用计算	105
习 题	109
第 7 章 扭 转	111
7.1 扭转的概念及实例	111
7.2 外力偶矩与扭矩图	111
7.3 纯剪切与剪切胡克定律	114
7.4 圆轴扭转时的应力与变形	116
7.5 圆轴扭转时的强度与刚度条件	120
7.6 矩形截面杆扭转的概念	124
习 题	126
第 8 章 弯曲内力与强度计算	129
8.1 平面弯曲的概念与实例	129
8.2 梁的内力——剪力与弯矩	130
8.3 剪力图与弯矩图	133
8.4 载荷集度、剪力和弯矩间的关系	136
8.5 纯弯曲时梁横截面上的正应力	139
8.6 梁的弯曲正应力强度条件及其应用	143
8.7 弯曲剪应力	150
8.8 提高梁的弯曲强度的措施	153
习 题	157
第 9 章 弯曲变形与刚度计算	165
9.1 梁的挠度与转角	165

9.2	挠曲线的微分方程	166
9.3	用积分法求梁的变形	167
9.4	用叠加法求梁的变形	170
9.5	梁的刚度校核 提高梁的刚度的主要措施	172
9.6	简单静不定梁的解法	173
	习 题	176
第 10 章	应力状态和强度理论	179
10.1	一点应力状态的概念	179
10.2	复杂应力状态实例——圆筒形薄壁容器的计算	180
10.3	平面应力状态分析——解析法	181
10.4	平面应力状态分析的图解法——应力圆	186
10.5	三向应力状态简介	188
10.6	广义胡克定律	189
10.7	强度理论及其应用	190
	习 题	194
第 11 章	组合变形时杆件的强度计算	198
11.1	组合变形的概念和实例	198
11.2	弯曲与拉伸(压缩)的组合	198
11.3	弯曲与扭转的组合	203
	习 题	207
第 12 章	压杆稳定	211
12.1	压杆稳定的概念	211
12.2	两端铰支压杆的临界力	212
12.3	其他支承条件下压杆的临界力	213
12.4	临界应力与柔度 临界应力总图	215
12.5	压杆的稳定校核	217
12.6	提高压杆稳定性的措施	221
	习 题	222
	习 题 答 案	225
附录 I	型钢表	233
附录 II	简单截面图形的几何性质表	247
附录 III	简单载荷作用下梁的变形表	249
附录 IV	主要材料的力学性能表	252

绪 论

一、工程力学的内容和任务

工程力学是研究物体机械运动一般规律和工程构件的强度、刚度、稳定性的计算原理及方法的科学。它综合了理论力学和材料力学两门课程中的有关内容,是一门理论性和实践性都较强的课程。

理论力学研究物体机械运动的一般规律,包括静力学、运动学和动力学三方面内容。静力学研究物体在力系作用下的平衡条件;运动学研究物体机械运动的几何规律;动力学研究物体运动状态的变化与作用力之间的关系。

工程上对机器或结构物中的构件,主要有强度、刚度和稳定性三方面的要求。所谓强度,是指构件抵抗破坏的能力。例如图 0-1 所示的简易起重机起吊重物时,横梁和拉杆均不得破坏。所谓刚度,是指构件抵抗变形的能力。例如图 0-2 中的行车大梁,其工作时的最大变形不得超过一定的限度。所谓稳定性,则是指构件在工作时保持其原有的稳定平衡状态的能力。如图 0-3 所示的内燃机汽缸中的活塞挺杆,工作时必须始终保持其稳定的直线平衡状态,而不能出现弯曲(称为失稳)的情况。材料力学就是研究工程构件的变形和破坏规律,从而建立工程构件的强度、刚度和稳定性的计算原理和方法的科学。

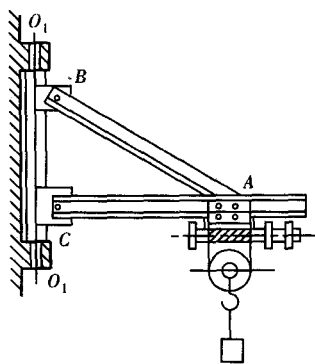


图 0-1

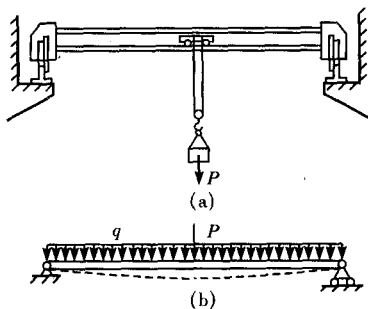


图 0-2

本书内容以静力学和材料力学为主,同时也包括了运动学和动力学中的有关内容。

二、工程力学的专业地位和学习目的

工程力学是现代工程技术的重要的理论基础之一。在轻工、化工、纺织等专业中,工程力学是重要的技术基础课,在基础课和专业课之间起着桥梁的作用。它为机器设备的运动分析和强度、刚度计算提供了理论基础,是工程技术人员应当掌握的基本理论和技能。

学习这门课程,既可以直接解决一些简单工程实际问题,又可以为后续的有关课程打好基础。同时,掌握工程力学的研究方法,将有助于其他科学技术理论的学习,有助于形成辩证唯物主义世界观,提高分析问题和解决问题的能力,为今后从事科研工作和解决生产实际问题打下坚实的基础。

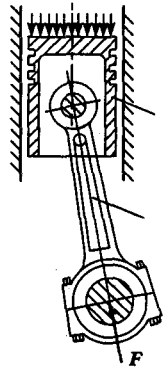


图 0-3

第 1 章 静力学基本概念和 物体的受力分析

引言

静力学是研究力系的简化及物体在力系作用下的平衡条件的科学。

所谓力系,是对作用在物体上的一组力的总称。

所谓平衡,是指机械运动的一种特殊状态,即物体相对于惯性参考系处于静止或匀速直线运动的状态。在实际工程问题中,一般是把地球取作惯性参考系。因此,通常所说的平衡状态,就是指物体相对于地球处于静止或匀速直线运动的状态。

如果一个物体在某个力系作用下处于平衡状态,则称该力系为平衡力系。

一个平衡力系,其中各个力之间应该满足一定的条件,正是这种条件使力系成为平衡力系。使一个力系成为平衡力系的条件,称为力系的平衡条件。

静力学主要研究三个问题:

(1) 物体的受力分析 即分析物体所受各力的大小、方向和作用位置,以便对所要研究的力系有初步的了解。

(2) 力系的简化 即用一个最简单的力系来等效替换一个复杂的力系,从而抓住不同力系的共同本质,明确力系对物体作用的总效果。

(3) 建立力系的平衡条件 力系的平衡条件是进行静力计算的基础。它在工程实际中有广泛的应用。利用力系的平衡条件,可以求出力系中的未知量,为工程构件的力学设计提供依据。

1.1 力和刚体的概念

1.1.1 力的概念

力是人们从物体之间的相互作用中抽象出来的一个概念。在自然界中,物体之间相互作用的形式是多样的。其中最常见就是机械作用,即使物体机械运动状态发生变化的作用。人们就把物体之间的机械作用称为力。

物体之间机械作用的方式有两种:一种是通过物体之间的直接接触发生作用,如人用手推车,两物体发生碰撞等;另一种是通过场的形式发生作用,如地球以重力场使物体受到重力。

力的作用效果取决于三个因素,称为力的三要素。它们是力的大小、力的方向、力的作用点。这三个因素可以用一个矢量包括无遗。矢量线段的长度,按一定比例表示力的大小;矢量

线的方位和矢量的指向,表示力的方向;矢量的起点或终点可以表示力的作用点。

表示力的矢量称为力矢,力矢线段所在的直线,称为力的作用线。力矢通常用粗体字母表示,书写时为方便起见,也可以在字母上方加一带箭头的横线表示力矢。

本书采用法定计量单位制。其中力的单位用牛顿(N)或千牛顿(kN)。

图 1-1 中的力矢 F 表示了一个作用在物体上 A 点处、大小为 20N,沿着作用线 l 的力。

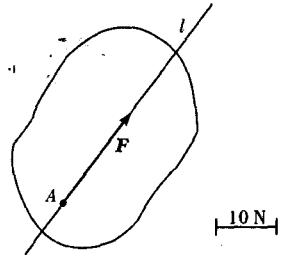


图 1-1

1.1.2 刚体的概念

力系对物体的作用效果可分为外部效果和内部效果:外部效果使物体的运动状态发生变化,内部效果使物体变形。在静力学中,主要研究物体的平衡,即物体机械运动的一种特殊状态,此时物体的变形为次要因素,可以忽略不计。这就抽象出一种理想物体,即刚体的概念。

所谓刚体,就是指体积和形状永不变化的物体,或者说内部任意两点的距离永不改变的物体。

在静力学中,所研究的受力物体都是刚体。由于这一点,本书介绍的静力学也称为刚体静力学。

需要指出的是,刚体这个概念的应用是有一定范围的。当研究力对物体作用的外部效果时,可以把物体抽象为刚体。然而在研究力对物体作用的内部效果,如材料力学研究物体的变形和破坏时,就不能把物体作为刚体,否则会导致错误的结果,甚至无法进行研究。

1.2 静力学公理及其推论

人们在长期的生活和生产活动中,发现和总结出一些最基本的力学规律,又经过实践的反复检验,证明是符合客观实际的普遍规律,于是就把这些规律作为力学研究的基本出发点。这些规律概括起来有五条,称为静力学公理,概述如下。

1. 力的平行四边形规则

作用于物体上同一点的两个力的合力仍作用在该点上,合力的大小和方向用以这两个力为邻边所作的平行四边形的对角线来表示。

该规则指出了两个共点力合成的基本法则,即合力等于两个分力的几何和。其数学表达式为

$$F = F_1 + F_2$$

如图 1-2 所示。

2. 二力平衡条件

刚体只受两个力作用而平衡的充分必要条件是这两个力等值、反向、共线。

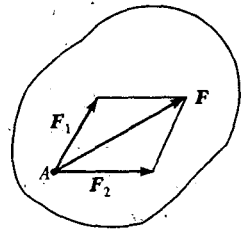


图 1-2

图 1-3 中的物体在 F_1 与 F_2 两个力作用下平衡, 于是有 $F_1 = -F_2$ 。

二力平衡条件给出了最简单的力系的平衡条件。

3. 加减平衡力系原理

在作用于刚体上的力系中, 任意加上或减去一个平衡力系不会改变原力系对刚体的作用效果。

根据这个原理, 为了实现简化力系的目的, 可以人为地在刚体上加上或减去任意的平衡力系。因此, 它是力系简化的基础。

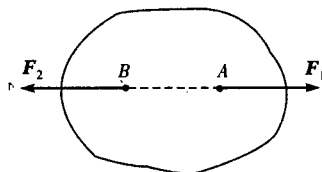


图 1-3

4. 作用与反作用原理

两物体之间的相互作用力总是等值、反向、共线, 分别作用在两个物体上。

这个原理揭示了物体之间相互作用力的定量关系, 它是研究由多个物体组成的物体系统平衡问题的基础。

5. 刚化原理

若变形体在某力系作用下处于平衡, 则将此变形体刚化为刚体后其平衡状态不变。

该公理给出了把变形体抽象为刚体模型的条件。例如一根绳索, 在一对等值、反向、共线的拉力作用下处于平衡, 若将该绳索刚化为一根刚性杆, 则这根杆在原力系作用下仍然平衡, 如图 1-4 所示。但是若绳索所受的是一对压力, 则不能保持平衡, 此时绳索就不能简化为刚体。由此可知, 作用在刚体上的平衡力系所满足的平衡条件, 只是使变形体平衡的必要条件而非充分条件。

作为上述诸公理的应用, 可以得到以下几个十分有用的推论。



图 1-4

推论 1 力的可传性原理

作用在刚体上的力可以沿着其作用线在刚体内任意移动。

证明 设在刚体上 A 点处作用着力 F , 现在把它沿其作用线移到 B 点, 移动过程如图 1-5 所示。即在 B 点沿着力 F 的作用线加上一对平衡力 $F'' = -F' = F$, 再将力 F 与 F' 所构成的平衡力系减去, 则在刚体上就只有 $F'' = F$ 作用在 B 点。上述过程两次应用了加减平衡力系原理。

按照这个推论可知: 作用在刚体上的力的三要素为力的大小、方向和作用线。

推论 2 三力平衡汇交定理

若刚体在三个互不平行的共面力作用下处于平衡状态, 则这三个力的作用线必汇交于一点。

该推论的证明请读者参照图 1-6 自行给出。

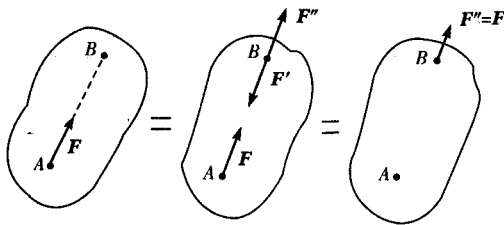


图 1-5

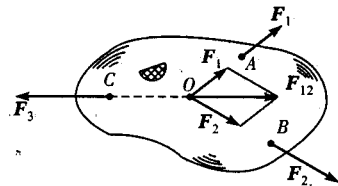


图 1-6

各个力的作用线共平面且汇交于一点的力系称为平面汇交力系。三力平衡汇交定理指出了三个不平行的共面力构成平衡力系的必要条件,即这三个力构成一个平面汇交力系。

推论 3 力的三角形规则 —— 用几何法求两个共点力的合力。

设在刚体上 A 点处作用着两个力 F_1 与 F_2 , 由平行四边形规则可以求得其合力 F , 见图 1-7(a)。由于 $ABDC$ 构成一个平行四边形, 故有 $AC \parallel BD$, 于是 BD 线段的长度和方向就是力矢 F_2 的大小和方向, 而三角形 ABD 中的 AD 线段, 其长度、方向和起点与合力矢 F 完全相同。从而也可以由下述方法求力 F_1 与 F_2 的合力: 将力 F_1 与 F_2 首尾相接, 再由第一个力的起点向第二个力的终点引矢量, 则该矢量就是合力矢 F , 如图 1-7(b) 所示。这样, 力 F_1 、 F_2 与合力 F 构成了一个三角形, 称为力三角形。上述求合力的方法称为力的三角形规则。

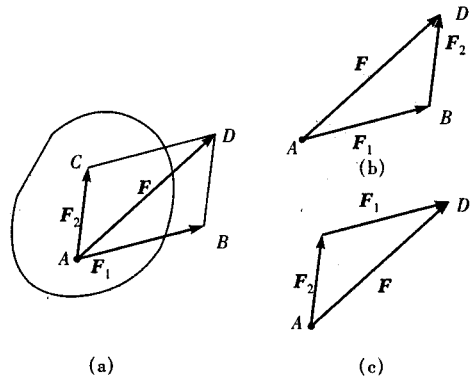


图 1-7

在应用力的三角形规则求两个共点力的合力时, 必须注意力三角形的矢序规则: 即两个分力矢 F_1 与 F_2 要首尾相接, 而合力矢 F 则是从第一个分力矢的起点指向第二个分力矢的终点。作图时分力矢的顺序可以随意确定, 例如也可先作 F_2 , 再作 F_1 , 这样得到的力三角形形状有变化, 但合力矢 F 不变, 如图 1-7(c) 所示。

还要指出: 力三角形规则只是矢量相加的几何运算规则。由于作图时分力矢的作用线被平行移动过(如图 1-7(b) 中力 F_2 的作用线由 AC 平移到 BD), 因此, 力三角形不能完全表示力系真实的作用情况。另外, 求合力时, 力三角形画在何处都行, 但要明确, 合力矢 F 仍然作用在原来的点 A 处。

推论 4 力的多边形规则 —— 用几何法求平面汇交力系的合力。

设在刚体上 A 点处作用着一个平面汇交力系, 如图 1-8(a) 所示。为简明起见, 图中画了四个力 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 。为求其合力, 可以连续应用力三角形规则, 即先将 F_1 与 F_2 首尾相接, 求得它们的合力 $F' = F_1 + F_2$, 再将 F_3 与 F' 首尾相接, 求得合力 $F'' = F' + F_3 = F_1 + F_2 + F_3$ 。再将 F'' 与 F_4 首尾相接, 求得该力系的合力 F , 并有

$$F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 = \sum_{i=1}^4 F_i$$

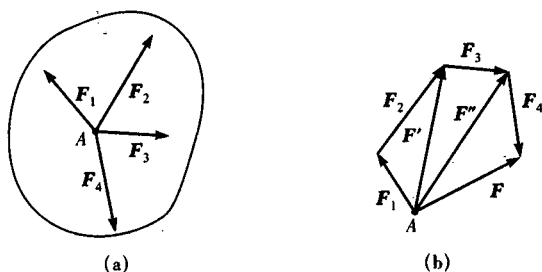


图 1-8

求和过程见图 1-8(b)。由该图中容易看出:各分力矢与合力矢 F 一起构成了一个多边形,称为力多边形。在这个力多边形中,各分力首尾相接沿同一转向环绕力多边形的边界,而合力 F 是力多边形的封闭边,其方向由第一个力矢的起点指向最后一个力矢的终点,这就是作力多边形时必须遵循的矢序规则。至于图中的矢量 F' 与 F'' ,属几何运算的中间结果,可不必作出。当然,作图时也可改变各分力的相接顺序,这样会导致力多边形的形状发生变化,但合力矢 F 不变。

若平面汇交力系由 n 个力组成,则其合力矢 $F = \sum_{i=1}^n F_i$,它仍作用在原力系的汇交点上,其大小和方向由各分力首尾相接所得的力多边形的封闭边确定。

推论 5 平面汇交力系平衡的几何条件

由力多边形规则知:若平面汇交力系有合力,则合力矢由力多边形的封闭边确定。如果所研究的是一个平衡的平面汇交力系,那么这个力系将无合力,即合力矢为零。这样,按力多边形规则作出的力多边形将自行封闭,也就是说第一个力的起点将与最后一个力的终点重合。于是有:平面汇交力系平衡的几何条件是力多边形自行封闭。

利用这一条件,可以求得一个平衡的平面汇交力系中的某些未知力的大小或方向。这种研究平面汇交力系平衡问题的方法称为几何法。

1.3 约束和约束反力

工程中的机器或结构,总是由许多零部件组成的。这些零部件按照一定的方式相互连接。因此,它们的运动必然互相牵连和限制。如果从中取出一个物体作为研究对象,则它的运动当然也会受到与它连接或接触的周围其他物体的限制。也就是说,它是一个运动受限制或约束的物体,称为被约束体。

在静力学中所研究的物体大都处于平衡状态,这正是它们受到约束的结果。因此,它们都是被约束体。

限制被约束体运动的周围物体称为约束。

例如图 1-9 中,圆柱形滚子静止在水平路面上,取滚子为研究对象,则它是一个被约束体,而路面就是它的一个约束。

再如图 1-10 中,重物由绳索挂在空中。取重物作研究对象,则它是一个被约束体,而绳索是它的一个约束。

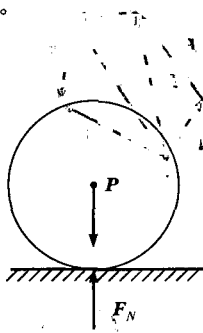


图 1-9

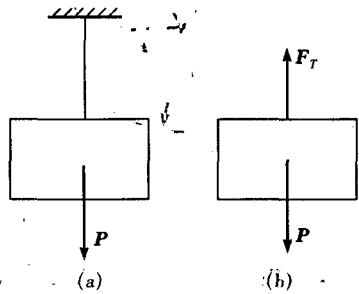


图 1-10

约束限制被约束体的运动,是因为在被约束体给约束一个作用力时,约束对被约束体也施加了一个反作用力。约束对被约束体的反作用力称为约束反力,简称反力。

在对物体进行受力分析时,最重要的是如何确定约束反力的方向。显然,约束反力的方向应当与它所能限制的被约束体的运动方向相反。这是确定约束反力方向的基本原则。

至于约束反力的大小和作用点,前者一般未知,需要利用平衡条件来求。后者,即约束反力的作用点,在被约束体与约束的接触处。若被约束体是刚体,则只需确定约束反力的作用线位置即可。

为以后应用方便起见,下面把工程上常见的一些约束进行分类,并分析其反力的特点。

1. 理想光滑表面约束

在约束与被约束的接触面较小且比较光滑的情况下,忽略摩擦因素,就得到了理想光滑表面约束。如车轮与轨道的接触面、图 1-9 中与滚子接触的路面,都可以认为是理想光滑表面约束。

这类约束起着阻碍物体沿接触面的公法线向约束内部运动的作用。因此,其约束反力的方向沿接触面公法线指向被约束体,故称为法向反力。

图 1-9 中路面对滚子约束反力 F_N 就是法向反力。

图 1-11 所示直杆放在槽中,它在 A、B、C 三处受到槽的约束,这种约束称为尖端支承约束,此时可将尖端支承处看作小圆弧与直线相切,则约束反力仍是法向反力。

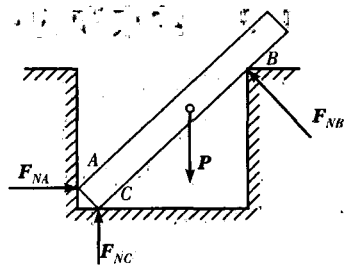


图 1-11

2. 柔性约束

这类约束一般由柔软的绳索、链条或皮带等构成。由于这些物体只能承受拉力,故这类约束的反力只能是拉力。图 1-10 中吊住重物的绳索就是一个柔性约束,其反力为拉力

F_T 。

图 1-12(a) 表示一个皮带传动装置,皮带的约束反力都是拉力,如图 1-12(b) 所示。

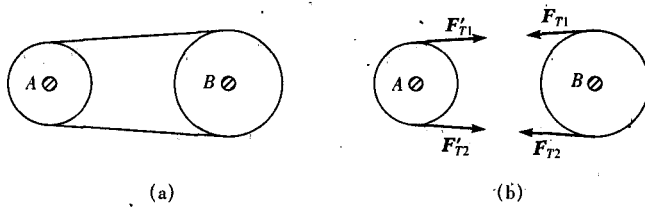


图 1-12

3. 圆柱铰链(平面铰链) 约束

为了将两个构件 A 与 B 连接在一起,可以在 A、B 上各钻圆孔,然后用圆柱形销钉将它们串起来,如图 1-13 所示。这种约束称为圆柱铰链。

一般认为销钉与构件光滑接触,所以这也是一种理想光滑表面约束,约束反力 F_N 应通过接触点 K 沿公法线方向(通过销钉中心)指向构件,如图 1-14(a) 所示。但实际上预先很难确定接触点 K 的位置,因此反力 F_N 的方向无法确定。为克服这一困难,通常用一对互相垂直的分力 F_x 与 F_y 表示约束反力 F_N ,待将来根据平衡条件计算出 F_x 与 F_y 的大小后,再根据需要用平行四边形规则求得合力 F_N 的大小和方向。见图 1-14(b)。

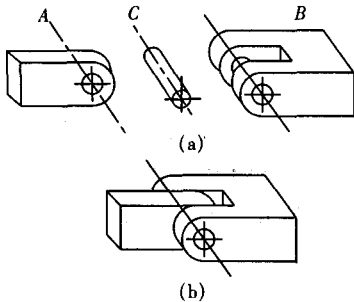


图 1-13

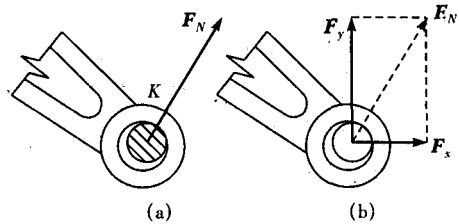


图 1-14

由于这种铰链限制构件在垂直于销钉的平面内的相对移动,故亦称为平面铰链。

这种约束在工程上有广泛应用,见下面的例子:

(1) 固定铰支座 用以将构件和基础连接,如桥梁的一端与桥墩连接时,常用这种约束。见图 1-15(a),图 1-15(b) 是这种约束的简图。

(2) 向心滚动轴承 如轴颈处的轴承。见图 1-16 所示。

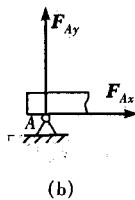
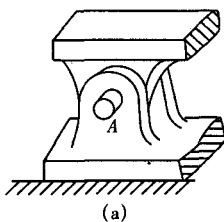


图 1-15

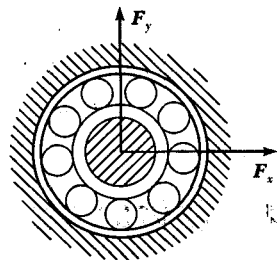


图 1-16