

道路与桥梁专业“十一五”高职高专应用型规划教材

工程力学

(第2版)

GONGCHENG LIXUE

蒋丽珍 王爱兰 主编



黄河水利出版社

道路与桥梁专业“十一五”高职高专应用型规划教材

工 程 力 学

(第2版)

主 编	蒋丽珍	王爱兰
副主编	夏锦红	杜建华
主 审	李俊彬	

黄河水利出版社

· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书是道路与桥梁专业“十一五”高职高专应用型规划教材,是根据教育部 2003 年 2 月审定的高职高专土建类专业通用《工程力学教学大纲》编写的。

全书内容分上、下两篇。上篇:静力学,内容有绪论、静力学基础和物体的受力分析、基本力系的合成与平衡、一般力系的合成与平衡。下篇:材料力学,内容有材料力学的基本知识、轴向拉伸和压缩、扭转、截面的几何性质、梁的应力、梁的内力、梁的变形、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定。本书增强了对工程力学基本内容的内在联系及基本公式应用条件的阐述,为了便于学生自学和教学,各章都有小结、思考题、习题,书末附有型钢规格表。

本书为高职高专土建类工程力学教材,教学时节数为 60~80 学时,也可供中专学生和土建类工程技术人员参考。为了适应教学上的不同要求,编有带 * 号章节,供选学用。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/蒋丽珍,王爱兰主编.—2 版.—郑州:黄河水利出版社,2012.2

道路与桥梁专业“十一五”高职高专应用型规划教材

ISBN 978-7-5509-0202-2

I. 工… II. ①蒋… ②王… III. 工程力学-成人高等教育-教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 012078 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南地质彩色印刷厂

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:18.75

字数:434 千字

版次:2008 年 3 月第 1 版

2012 年 2 月第 2 版

印数:4 101—8 100

印次:2012 年 2 月第 2 次印刷

定价:32.00 元

前 言

本书是根据教育部 2003 年 2 月审定的高职高专土建类专业通用《工程力学教学大纲》编写的。为了适应教学上的不同要求,编有带 * 号章节,供选学用。

本书增强了对工程力学基本内容的内在联系及基本公式应用条件的阐述,为了便于学生自学和教学,各章都有小结、思考题,选编了习题,在书后有部分习题答案。

本书编写的指导思想:以培养工程应用型人才为宗旨,在工程实践中挖掘力学概念和示例,培养学生在工程实践中发现力学问题、运用力学知识解决工程实际问题的能力。

参加本书编写工作的有:开封大学刘俊华(绪论和第一章),山东交通职业学院王爱兰(第二章和第三章),平原大学夏锦红(第四章、第五章和第六章),江西交通职业技术学院蒋丽珍(第七章、第八章、第九章和第十章),石家庄铁路职业技术学院杜建华(第十一章、第十二章和第十三章)。

本书由蒋丽珍、王爱兰担任主编,由夏锦红、杜建华担任副主编,由江西交通职业技术学院李俊彬担任主审。

本书在编写中虽然经历了集体讨论、分工、选题、编写、初审、修改、复审和定稿等过程,但由于编者水平有限,不足之处在所难免,对于书中的缺点和错误,热诚地欢迎读者批评和建议。

作 者

2007 年 12 月

目 录

前 言

绪 论	(1)
-----------	-----

上篇 静力学

第一章 静力学基础和物体的受力分析	(3)
第一节 静力学的基本概念	(3)
第二节 静力学公理	(5)
第三节 约束和约束力	(8)
第四节 物体的受力分析和受力图	(11)
本章小结	(14)
思考题	(15)
习 题	(16)
第二章 基本力系的合成与平衡	(21)
第一节 力学中两项基本运算	(21)
第二节 平面汇交力系	(26)
第三节 平面力偶理论	(31)
本章小结	(35)
思考题	(36)
习 题	(38)
第三章 一般力系的合成与平衡	(41)
第一节 平面一般力系向作用面内任一点简化	(41)
第二节 平面一般力系的平衡条件及应用	(46)
第三节 物体系统的平衡	(55)
第四节 摩 擦	(58)
第五节* 空间力系在直角坐标轴上的投影	(67)
第六节* 空间汇交力系的合成与平衡	(69)
第七节* 空间一般力系的合成与平衡	(72)
第八节 物体重心和形心的坐标公式	(78)
本章小结	(82)
思考题	(86)
习 题	(88)

下篇 材料力学

第四章 材料力学的基本知识	(94)
第一节 材料力学的任务	(94)
第二节 变形固体的基本假设	(96)
第三节 杆件变形的基本形式	(98)
本章小结	(99)
思考题	(99)
习 题	(99)
第五章 轴向拉伸和压缩	(100)
第一节 轴向拉伸和压缩的概念	(100)
第二节 轴向拉伸和压缩的内力及内力图	(101)
第三节 拉(压)杆的应力	(104)
第四节 拉(压)杆的变形计算	(107)
第五节 材料在拉伸与压缩时的力学性质	(110)
第六节 拉压杆的强度计算	(118)
本章小结	(121)
思考题	(122)
习 题	(122)
第六章 扭 转	(124)
第一节 扭转轴的内力及内力图	(124)
第二节 圆轴扭转时应力和强度计算	(128)
第三节 圆轴扭转时的变形与刚度条件	(132)
本章小结	(135)
思考题	(136)
习 题	(136)
第七章 梁的内力	(138)
第一节 工程中常见的弯曲问题	(138)
第二节 梁的内力	(139)
第三节 梁的剪力图和弯矩图	(145)
第四节 弯矩、剪力、荷载集度间的关系	(149)
第五节 简易法作剪力图和弯矩图	(150)
第六节 叠加法作梁的弯矩图	(156)
本章小结	(157)
思考题	(158)
习 题	(158)

第八章 截面的几何性质	(162)
第一节 静 矩	(162)
第二节 惯性矩	(164)
第三节 惯性矩的平行移轴公式	(165)
第四节 组合截面惯性矩的计算	(166)
本章小结	(168)
思考题	(168)
习 题	(168)
第九章 梁的应力	(170)
第一节 梁的正应力	(170)
第二节 梁的正应力强度计算	(176)
第三节 矩形截面的剪应力	(179)
第四节 其他形状截面梁的剪应力	(183)
第五节 梁的剪应力强度条件	(185)
第六节* 梁的合理截面形状及变截面梁	(187)
本章小结	(189)
思考题	(190)
习 题	(190)
第十章 梁的变形	(193)
第一节 挠度和转角	(193)
第二节 挠曲线近似微分方程	(194)
第三节 积分法计算梁的位移	(195)
第四节 叠加法计算梁的位移	(199)
第五节 梁的刚度计算	(202)
本章小结	(203)
思考题	(204)
习 题	(204)
第十一章* 应力状态和强度理论	(206)
第一节 应力状态的概念	(206)
第二节 平面应力状态分析	(209)
第三节 三向应力状态分析	(217)
第四节 广义虎克定律	(219)
第五节 强度理论及其应用	(221)
本章小结	(233)
思考题	(234)
习 题	(234)

第十二章 组合变形	(240)
第一节 概 述	(240)
第二节 斜弯曲	(241)
第三节 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	(246)
第四节 偏心压缩(拉伸)	(249)
本章小结	(253)
思考题	(254)
习 题	(254)
第十三章 压杆稳定	(258)
第一节 压杆稳定的概念	(258)
第二节 细长压杆临界力的欧拉公式	(260)
第三节 压杆稳定性计算	(265)
本章小结	(271)
思考题	(271)
习 题	(272)
习题答案	(274)
附 录 型钢规格表	(281)
参考文献	(292)

绪 论

在土建工程中,有大量的建筑物和工程设施,如道路、房屋、水工建筑。建筑物和工程设施中,承受和传递荷载起骨架作用的部分称为工程结构,简称为结构。公路和铁路上的桥梁和隧道,房屋中的梁柱体系,水工建筑中的闸门和水坝等,都是工程结构的典型例子。结构是建筑物的骨架,它的质量好坏,对建筑物的安全和使用寿命起决定性的作用。

工程力学是为结构提供受力分析方法和计算理论依据的一门科学,是道路、桥梁和土建等各专业的一门专业基础课。

一、工程力学的研究对象

工程结构是由工程构件(梁、柱、桁架、拱等)所组成的,工程构件简称为构件,它们是工程力学研究的对象。

按构件的几何尺寸,构件可分为三类:

杆——这类构件也称杆件,几何特征是它的横截面尺寸要比它的长度尺寸小得多。梁、柱是杆的典型例子,它是工程力学研究的主要对象。由杆件组成的结构称为杆件结构,它是结构力学的主要研究对象。

壳——这类构件也称为薄壳,它的厚度要比长度和宽度小得多。水工结构中的拱坝、房屋中的楼板和壳体屋盖都是壳。这类结构称为板壳结构。

块体——这类构件也称为实体,它的长、宽、高3个尺寸大小相仿。水工结构中的重力坝属于实体。这类结构称为块体结构或实体结构。板壳结构和块体结构是弹塑性力学的主要研究对象。

实际结构或构件是很复杂的,完全按照实际情况进行力学分析是不可能的,也是不必要的。因此,对实际结构进行力学计算以前,必须加以简化,略去不重要的细节,显示其基本特点,科学地抽象出力学模型。

构件在力的作用下都将发生变形,一般在工程问题中这种变形是极其微小的。在研究物体平衡时,将它略去,而认为构件没有发生变形,其计算结果不影响工程的精确性。这种认为形状、大小不变的物体称为刚体。它是静力学的主要研究对象。

分析构件的强度、刚度和稳定性时,它们与变形密切相关,因而即使是微小的变形也得加以考虑,这时就必须把构件抽象成变形固体。变形固体是材料力学的主要研究对象。

二、课程的任务

工程力学有两个基本任务。一是研究物体受力后的平衡条件以及它在工程中的应用。物体在空间的位置随时间的改变,称为机械运动。它是物质运动形式中最简单的一种运动。例如,星球的运动,车辆、船只的行驶以及各种机器的转动等。平衡是机械运动的特殊形式,所以在工程力学中首先要研究物体受力的平衡条件及其在工程中的应用,这

是静力学部分的主要任务。二是研究构件的强度、刚度及稳定性。结构和构件在外力作用下丧失正常功能的现象称为失效或破坏。在工程中,要保证构件不发生失效而能安全正常工作的条件是:

- (1) 构件在外力作用下,不发生不可恢复的塑性变形或不发生断裂,即具有足够的强度;
- (2) 构件在外力作用下,不产生过量的弹性变形,即具有足够的刚度;
- (3) 构件在某种外力作用下,其平衡形式不发生改变,即具有足够的稳定性。

三、工程力学的教学内容

本书的内容包括静力学部分和材料力学部分。静力学部分主要研究力系的简化和物体的平衡条件,它是研究物体的机械运动和构件强度、刚度及稳定性的基础。材料力学部分主要研究构件的强度、刚度和稳定性,为结构选取适当的材料、合理的截面形状和尺寸提供理论基础。

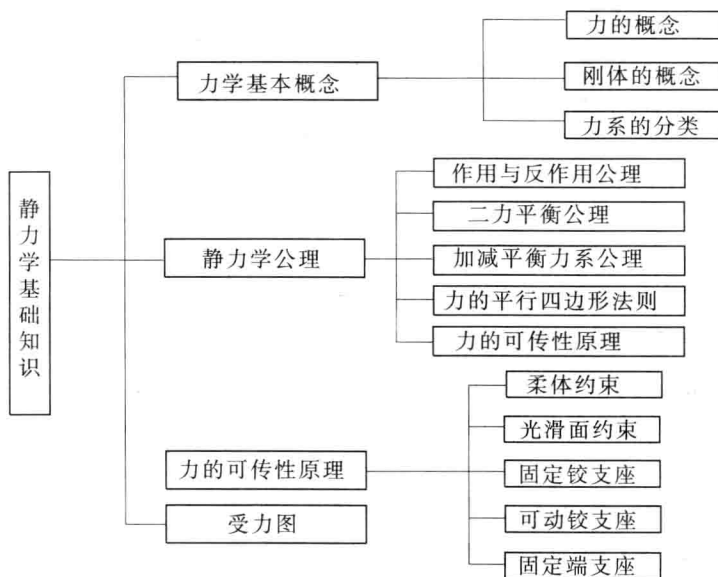
上篇 静力学

第一章 静力学基础和物体的受力分析

【内容要点】

- (1) 力的定义、力和力系的分类。
- (2) 静力学公理。
- (3) 约束与约束反力。
- (4) 建筑结构的受力分析与受力图。

【知识链接】



第一节 静力学的基本概念

一、力的概念

力的概念是从实践中产生的。人类在与自然的抗争中,通过自身肌肉伸缩最先感觉

到力的作用。在生产和生活中又逐渐地认识到,这种作用不仅存在于人与物体之间,而且广泛地存在于物体与物体之间。实践证明:物体的机械运动状态的改变(包括变形)都是由于其他物体对该物体施加力的结果。这样,人们建立起了抽象的力的概念。

(一) 力的定义

力是物体间的相互机械作用。物体之间的作用一般可分为两类:一类是接触作用,如车辆对桥面的压力,楼板对梁的压力;另一类是“场”对物体的作用等,如地球对月球的引力,电场对电荷的引力和斥力等。这些作用使物体的运动状态和形状发生变化。前者是力对物体的运动效应或外效应,后者是力的变形效应或内效应。

(二) 力的三要素及表示方法

如图 1-1(a) 所示的力 F , 其作用线通过物体的质心, 此力只能使物体产生移动(平动); 如图 1-1(b) 所示的力 F , 其方向与轴线 AB 既不相交也不平行, 此力仅能使物体产生定轴转动; 如图 1-1(c) 所示的力 F , 其作用线不通过物体的质心, 此力使物体既移动又转动。由此可见, 力对物体的作用, 同时取决于力的大小、方向、作用点, 将这称为力的三要素。能同时反映这三个要素的量在数学上称为矢量(向量), 矢量符号一般以黑体字印刷, 如 F 、 P 等; 非黑体字, 如 F 、 P 等, 表示相应矢量的大小(模)。

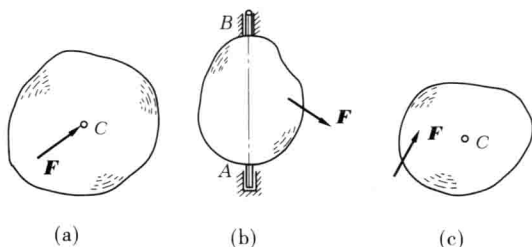


图 1-1

因此,力是矢量,通常用一个有方向的线段来表示,如图 1-2 所示。线段的起点或终点表示力的作用点,线段的方向表示力的方向,按一定比例绘制的该线段的长度代表力的大小。通过力的作用点且沿该力的方向的直线,称为力的作用线。

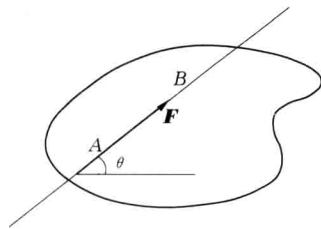


图 1-2

在国际单位制中,以 N 作为力的单位符号,称为牛[顿]。有时也以 kN 作为力的单位符号,称为千牛[顿]。

二、力系和平衡力系的概念

作用于一个物体上的若干个力,称为力系。若两个力系对物体的运动效应完全相同,则这两个力系互称为等效力系。若一个力与一个力系等效,则称该力为这个力系的合力,而力系中的各力称为该合力的分力。若物体在力系的作用下处于平衡状态,则称该力系为平衡力系。使一个力系成为平衡力系的条件,称为力系的平衡条件。

三、刚体和质点的概念

(一) 刚体的概念

刚体是指在任何力的作用下其几何形状和尺寸保持不变的物体,即受力后刚体中任意两点之间的距离保持不变。实际上,自然界并不存在刚体,一切物体在力的作用下都会产生不同程度的变形。在实际工程问题中,物体的变形极其微小,当研究物体的某些规律如平衡、运动等时,这种变形的影响很小。当忽略这种变形的影响时,不但不会影响力对物体的作用效应,而且使问题大为简化。这种略去次要因素、抓住主要矛盾的方法,便是科学的抽象。所以,刚体是一个经过简化后抽象出来的力学模型,是一个相对的概念。

因此,在应用刚体这一概念时,应注意所研究问题的条件和范围。例如,对同一根钢管,当两人抬,计算每人的受力时,可以将钢管看成刚体;当三人同时抬,要计算每个人的受力时,尽管钢管此时变形很小,但变形在此时为解决问题的主要因素,这时的钢管应看做另一种模型——变形体。

(二) 质点的概念

如果物体的形状和尺寸对运动的影响很小,则可以将物体抽象为质点。质点是指具有质量而无形状和大小理想力学模型。由有限个或无限个质点构成的系统称为质点系。质点系中各质点有确定的质量,它们之间的相互位置可以是固定不变的,如刚体即为不变质点体系;质点系中各质点之间的位置也可以是变化的,如机器内部各互相影响而转动的零部件构成的可变质点系。

第二节 静力学公理

静力学公理是人们在长期的生活和生产中,经过反复观察和试验总结出来,被实践所证明的客观规律,它反映了作用在物体上的力的基本性质,是研究力系及其平衡等问题的最基本的规律。

一、二力平衡公理

作用在同一刚体上的两个力,使该刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力的大小相等,方向相反,且作用在同一直线上(即二力等值、反向、共线)。

这个公理揭示了刚体受到最简单力系(二力)作用平衡时的充分必要条件,是静力学中最基本的平衡条件。但对于变形体来说,这个条件是充分条件,但不是必要条件,如图1-3所示,已知 $F_A = -F_B$,图1-3(a)所示绳索受到等值、反向的拉力作用时保持平衡,图1-3(b)所示绳索受到等值、反向的压力作用时不能保持平衡。



图 1-3

在两个力作用下处于平衡的构件称为二力构件,也称为二力杆。如图 1-4 所示,已知 $F_1 = -F_2$,如图 1-4 (a)、(b)所示为拉杆,如图 1-4 (c)所示为压杆,二力构件上的力必满足二力平衡条件。

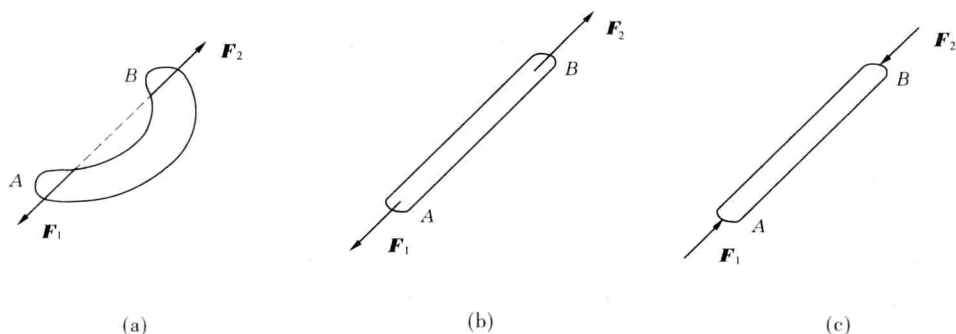


图 1-4

二、加减平衡力系公理

作用在刚体上的任意力系中,加上或减去一个平衡力系并不改变原力系的作用效应。也就是说,如果两个力系只相差一个平衡力系或几个平衡力系,那么它们对刚体的作用效应完全相同(这是因为平衡力系对刚体的作用效应等于零),可以互相等效替换,这一性质称为加减平衡力系公理。

这个公理不适用于变形体,因为加减的平衡力系会影响物体的变形。它是力系等效代换的基础。

三、力的平行四边形法则

作用在物体上同一点的两个力,可以合成为作用于该点的一个合力,合力的大小和方向由这两个力为邻边构成的平行四边形的对角线确定,如图 1-5(a)所示。

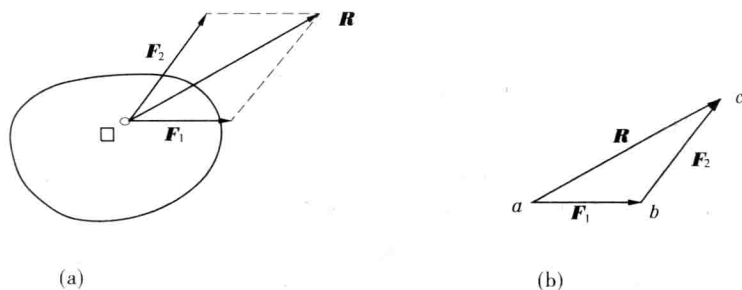


图 1-5

以 R 表示 F_1 和 F_2 的合力,则按平行四边形法则相加得

$$R = F_1 + F_2$$

即合力矢等于这两个分力矢的几何合力。

当用平行四边形法则求合力时,不用画出整个平行四边形,只要做出一半就可以了。

从任意点 a 作力 F_1 的矢量 ab , 如图 1-5(b) 所示, 再以力 F_1 的末端 b 作力 F_2 的矢量 bc (即两分力首尾相连), 连接 a 、 c 两点, 即得合力 R 的矢量 ac , 分力和合力所构成的三角形称为力三角形, 这种求合力的方法称为力三角形法则。

四、作用与反作用定律

物体间的作用力与反作用力总是成对出现的, 一对作用力和反作用力总是大小相等、方向相反、分别作用在这两个相互作用的物体上的。

这个定律概括了物体间的作用关系。对于一切相互作用的力学现象都适用。有作用力, 必有反作用力; 反之, 没有作用力, 必定没有反作用力。即作用力与反作用力总是成对出现的。

当对多个物体组成的系统受力分析时, 运用这个定律, 可以从一个物体的受力分析过渡到相邻物体的受力分析。

注意, 二力平衡公理和作用力与反作用力定律的区别是: 在二力平衡公理中, 两个力也是大小相等, 方向相反, 但它们是作用在同一个物体上, 而作用力与反作用力则是分别作用在两个相互作用的物体上。

五、力的可传性定理

作用在刚体上某点的力, 可沿其作用线移到刚体上任意一点, 而不改变该力对刚体的作用效应。

证明: 设力 F 作用在刚体的 A 点, 如图 1-6(a) 所示。在其作用线上任选一点 B , 并加上两个等值、反向、共线的力 F_1 和 F_2 , 使 $F = -F_1 = F_2$, 如图 1-6(b) 所示, 由加减平衡力系公理知, 这并不影响 F 的作用效应, 即力系 (F, F_1, F_2) 与原力 F 等效。再在该力系中去掉平衡力系 (F, F_1) , 则剩下的力 F_2 与原力 F 等效, 如图 1-6(c) 所示, 即力 F 沿它的作用线移到了 B 点。

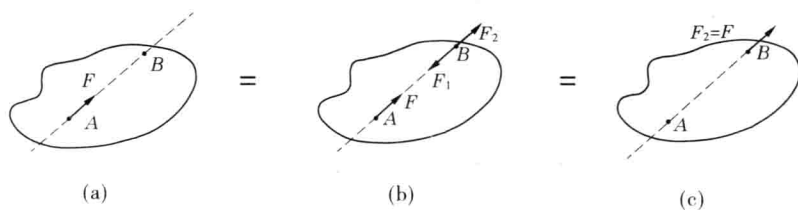


图 1-6

对于刚体来说, 决定力的作用效应的要素是力的作用线, 而不是力的作用点。因此, 作用于刚体上的力的三要素是: 力的大小、方向和作用线。

六、三力平衡汇交定理

作用于刚体上三个相互平衡的力, 若其中两个力交于一点, 则此三力必在同一平面内, 且第三个力的作用线必通过该交点。

证明: 如图 1-7(a) 所示, 在刚体上作用三个相互平衡的力 F_1 、 F_2 、 F_3 。由力的可传性

原理, F_1 和 F_2 移到它们的交点 O , 合成一个合力 F_{12} , F_3 与 F_{12} 平衡, 由二力平衡公理知此二力必共线, 所以 F_1 、 F_2 、 F_3 必共面, 如图 1-7(b) 所示。

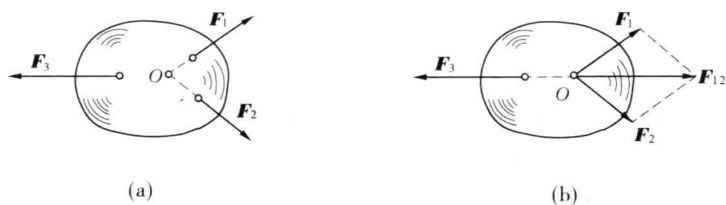


图 1-7

第三节 约束和约束力

一、约束

(一) 约束的概念

在自然界和工程中, 向空间任意方向运动, 位移不受限制的物体称为自由体, 如工人上抛的砖块和瓦块, 在空中自由飞行的飞机等。位移受到限制的物体称为非自由体, 如火车运动时受到铁轨的限制, 桥梁受到桥墩的限制。对非自由体的某些位移起限制作用的物体称为约束, 如铁轨对于火车, 桥墩对于桥梁, 都是约束。

(二) 约束力

约束限制着物体的位移, 即约束改变了物体的运动状态, 因此约束对物体的作用就是力, 我们称它为约束反力或约束力。所以, 约束反力的方向总是与约束所能阻碍的物体的运动或运动趋势的方向相反, 其作用点就是接触点。应用这一规律可以确定约束力的作用线位置 and 方向, 而约束力的大小是未知的。约束只有在限制物体的位移时才对物体产生约束反力, 因此约束反力是“被动力”。物体受到的其他已知作用力称为主动力。被动力和主动力统称为物体所受的外力。

二、常见的几种基本约束类型及其约束反力

(一) 柔体约束

绳索、链条、钢绞绳、胶带等都是柔体, 由于柔体只能承受沿着柔体中心线方向的拉力, 即只能限制物体沿着柔体中心线伸长方向的运动, 所以柔体对物体的约束反力必定是沿着柔体中心线而背离物体的, 常用字母 T 表示, 如图 1-8 所示。

(二) 光滑接触面约束

当物体接触面上的摩擦力很小, 可以忽略不计时, 即可认为是光滑接触面。如图 1-9 所示, 物体搁置在光滑支撑面上, 不论支承面的形状如何, 这种约束只限制物体沿着接触面公法线指向接触面方向的运动, 而不限制物体沿着接触面公切线或离开接触面方向的运动。因此, 光滑接触面的约束力通过接触点, 方向沿接触面的公法线并指向被约束的物

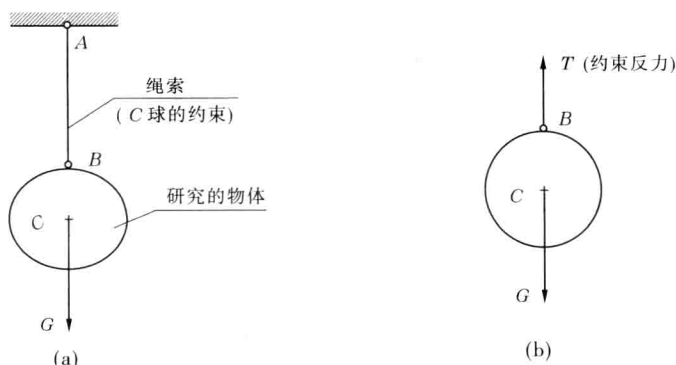


图 1-8

体,常用字母 N 表示,如图 1-9 所示。

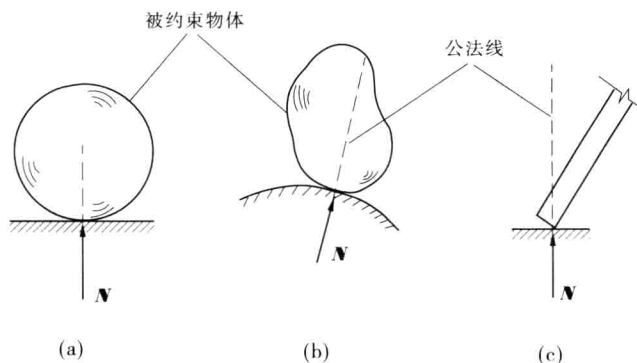


图 1-9

(三) 圆柱铰链约束

圆柱铰链约束 (简称铰链) 由一圆柱形销钉将两个或更多的构件连接在一起构成,即在各构件连接处各用一直径相同的圆孔,将销钉穿入而结合在一起。如图 1-10(a)、(b) 所示, A、B 两个构件用销钉 C 连接在一起。这种铰链用途比较广泛。例如,门窗的合页和起重机动臂与机座的连接。在力学计算中,圆柱铰链常简化成如图 1-10(c)、(d) 所示的简图。

销钉与圆孔的接触若是光滑的,则这种约束只能限制物体在垂直于销钉轴线的平面内沿任意方向移动,而不能限制物体绕销钉转动或沿其轴线方向移动。因此,铰链的约束反力作用在圆孔与销钉的接触点 K 上,通过销钉中心,作用线沿接触点处的公法线,如图 1-10(e) 所示的反力 R_c 。由于接触点 K 的位置一般不能预先确定,所以铰链约束反力的作用线方向 θ 和指向也不能预先确定。如图 1-10(f) 所示,在实际计算中,通常用互相垂直且通过铰链中心的两个分力 R_{cx} 、 R_{cy} 来代替 R_c 。

1. 固定铰支座

用圆柱铰链连接的两个构件中,如果有一个固定不动,就构成固定铰支座,如图 1-11(a) 所示。这种支座能限制构件沿圆柱销钉半径方向的移动,而不能限制其转动,其约束反力与圆柱铰链相同。固定铰支座的计算简图如图 1-11(b)、(c)、(d)、(e) 所