

生物力学基础

田心 毕平 编著



科学出版社

www.sciencep.com

生物力学基础

田 心 毕 平 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书包括基本力学概念、生物力学研究和应用的几类典型系统两部分,适合作为生物医学工程专业和非理工背景的相关专业本科生、研究生的教学用书,以及以上领域的科研、临床人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

生物力学基础/田心,毕平编著. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018335-4

I. 生… II. ①田…②毕… III. 生物力学—高等学校—教材 IV. Q66

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第163182号

责任编辑:康 蕾 / 责任校对:陈丽珠

责任印制:刘士平 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2007年1月第一次印刷 印张:8 1/2

印数:1—2 000 字数:196 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

前 言

生物力学作为生命科学和力学的交叉科学,是生命科学中的重要分支。20世纪70年代以来,我国在生物力学研究和教学有了长足的发展。1981年,冯元桢教授所著《生物力学》介绍了生物力学的发展历史、研究方法和成果,给有志于生物力学研究的科研人员及有关高等院校师生提供了教学参考书。但是,面对诸如医学专业背景和其他非理工科专业背景的本科生和研究生,根据我们多年来生物力学的本科教学经验,编者感到需要一本适合非理工专业的本科生和临床人员的基础生物力学教材。在天津市“十五”教材基金支持下,在国内同行的促进下,我们编写了这本教材。

生物力学涉及了理论力学、材料力学、流体力学、粘弹性力学等各个方面的力学问题和流变学的基础知识,针对没有力学专业背景的本科生、研究生和医学临床人员,本书的编写指导思想是既能确切地阐述基础力学理论,又不涉及复杂的数学力学公式及推导。

在本书的内容安排上,编者首先为非理工科专业背景的读者打下必要的力学基础,安排了基础力学知识部分。其次,由于生物力学在临床中有众多的应用,不可能一一列举,编者力求通过几类典型的生物力学系统,以点代面,讲述如何将力学的基本理论应用到生物体的力学分析中去,重在学习思路和方法,学习举一反三的能力,为读者今后在生物力学方面的创新研究和临床应用打下基础。

本书是编者在“生物力学”多年教学经验的基础上编写的,在编写中主要参考了冯元桢教授的《生物力学》,其余各参考资料均已在书后列出,在本书的编著过程中吸取和引用了他们的思想和部分插图,在此一并表示感谢。由于编者水平有限,在本书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006年8月

目 录

前言	
绪论	(1)
第一节 生物力学的发展概况	(1)
第二节 生物力学的研究方向	(2)
第三节 生物力学的研究方法	(3)
第一章 力学基础知识	(4)
第一节 刚体静力学基本概念	(4)
第二节 平面力系及其平衡方程	(11)
第三节 变形体力学基础	(19)
第四节 流体在圆管中的运动	(38)
第五节 生物材料的粘弹性	(51)
第二章 肌肉动力学性质	(57)
第一节 骨骼肌的特点、构成及收缩原理	(57)
第二节 Hill 方程	(60)
第三节 Hill 三元素模型	(60)
第四节 心肌的力学性质	(61)
第五节 平滑肌的力学性质	(63)
第三章 骨的力学性质	(65)
第一节 骨的成分	(65)
第二节 骨的构造	(66)
第三节 骨的力学特性	(66)
第四节 软骨	(74)
第五节 骨的连接	(75)
第六节 骨的功能适应性原理	(76)
第七节 骨折	(76)
第四章 心脏力学	(80)
第一节 心脏的构造	(80)
第二节 心电系统	(81)
第三节 心脏搏动的力学过程	(83)

第四节	心动周期中左心室的压力 - 容积关系	(84)
第五节	心脏泵功能的评价指标	(85)
第六节	心脏瓣膜关闭的力学基础问题	(87)
第七节	心脏瓣膜病变及其血流动力学变化	(90)
第八节	人工心脏瓣膜简介	(91)
第五章	血管的力学性质	(93)
第一节	血管组成材料、结构和力学性质	(93)
第二节	血管壁的张力	(95)
第三节	动脉血管的顺应性	(98)
第四节	小动脉、毛细血管、静脉的力学性质	(98)
第五节	血管壁的粘弹性	(99)
第六节	血管的重建	(100)
第六章	血液循环的力学基础	(101)
第一节	血液循环系统概述	(101)
第二节	血液流动基础知识	(103)
第三节	血液流动中的血管阻抗	(105)
第四节	动脉中的血液流动模型	(109)
第五节	脉搏波	(111)
第六节	静脉中的血液流动	(113)
第七章	血液的流动、变形性质	(116)
第一节	血液的组成及理化特性	(116)
第二节	血液的流变学特性	(116)
第三节	屈服应力	(119)
第四节	血液的粘弹性	(120)
第五节	血液流变性的测量	(120)
第六节	血液在刚性圆管中的定常层流运动	(125)
主要参考书目	(129)

绪 论

生物力学(Biomechanics)是力学和生命科学的交叉科学,它研究力作用的生物效应,包括生物体从整体到各个器官生长、消亡和运动中的力学问题,以及与生物体有关的流体和气体的运动和交换,特别是与人体有关的力学问题。生物力学对生命科学的发展,对医学的基础研究和临床,都有重要的科学价值和应用意义。

第一节 生物力学的发展概况

20世纪中期,生物力学成为了一门独立的学科。远在中世纪,许多物理学家、数学家、生理学家和医生就为生物力学的发展作出了卓越的贡献,血液循环的发现是其中一个典型的范例。1615年,英国医生 Harvey 发现了血液循环的事实,虽然当时没有显微镜,不能看见微血管,不可能见到血液经动脉流向静脉的过程,但是,他在研究中发现血液只能单向流出心室,并测出心室的容量为2英两,按心脏每分钟搏动70次计算,心脏每小时搏出的血液量为 $(2 \times 72 \times 60)$ 英两=8640英两。大量的血液从何而来?又流向了何处?根据质量守恒定律和连续性原理,经过逻辑推理,他认为必定有一个血液的循环系统存在。经过十几年的研究,1628年 Harvey 发表了关于血液循环的研究结果。生物力学研究的典型例子还有:Galileo 在成为一位著名的物理学家之前,是医科学生。他发现了摆长与周期的定量关系,并用此表达人的心率。著名的数学家 Euler 于1775年首次研究了血液流动的数学问题,给出了不可压缩理想流体在弹性管中的流动方程,并描述了动脉中脉搏波的传播。意大利数学家和天文学家 Borelli(1608~1679),在他的著作《论动物的运动》(1680)中成功地阐明了肌肉的运动和动物自身的运动问题,以及鸟飞和鱼游、心脏和肠的运动。英国医生 Young 创建了光的波动理论,建立了声带发音的弹性力学理论,并在此理论中提出了杨氏模量。法国流体力学家 Poiseuille,当他还是一位医科学生时,就发明了用水银计来测量狗主动脉的血压,并且发现了粘性流体在直圆管层流中压力差与流量的关系,后来被称为 Poiseuille 定律。流体力学家 Korteweg(1878)和 Lamb(1898)分别分析了血管中波的传播。Frank 提出了心脏流体力学理论;Van der Pol(1929)用非线性振荡器模拟心脏,并用四个 Van der Pol 振荡器组成的模拟装置,得到了仿真的心电信号。Startling 提出了物质透过膜的传输定律,说明了人体内水平衡问题。Krogh 因对微循环研究的贡献而获得诺贝尔奖,Hill 也因在肌肉力学方面的研究而获得诺贝尔奖。他们的贡献为生物力学的发展奠定了基础。

被称为“生物工程之父”的 Von Helmholtz,历任 Königsberg 大学的生理和病理学教授,

波恩大学的解剖和生理学教授,海德堡大学的生理学教授,柏林大学(1871)的物理学教授。他刚从医科学校毕业就发表了“能量守恒定律”。他一生中,在光学、声学、电动力学,生理学和医学方面都作出了卓越的贡献:发现了眼聚焦机制;继 Young 之后发明了彩色视觉的三色理论;发明了晶状体镜,用以研究眼球晶体的变化;发明了观察视网膜的眼底镜;发明了 Helmholtz 共振仪。他首次测定了神经脉冲的传播速度;指出肌肉收缩所释放的热是动物热的重要来源等。他发明的涡量守恒定律是流体力学的基础理论之一,他的著作 *Sensation of Tone* 至今仍广为流传。

美国科学院、工程院和生物医学院院士冯元桢(Fung, Y. C.)教授原是航空工程专家,从 20 世纪 60 年代中期开始,他致力于生物力学的研究,成为生物力学领域享有盛名的科学家,在生物力学研究方面取得了卓越的成效。

目前,国内外生物力学的研究已经进入了一个基础理论和临床应用结合,从微观层次到系统综合层次,多个学科交叉的发展阶段。生物力学的发展潜力是巨大的。

第二节 生物力学的研究方向

根据力学的经典分类,结合生物体的特点,目前比较常见的生物力学研究方向如下。

一、生物材料力学

生物材料力学研究组成生物体的材料所具有的力学特性。生物材料主要包括生物硬组织(牙齿、甲壳等)、生物软组织(肌肉、皮肤、血管、生物膜等),以及体液(血液、淋巴液、唾液等)。生物材料一般不服从以胡克定律为基础的弹性力学规律,也不服从以牛顿粘滞定律为基础的牛顿流体力学规律,因此,生物材料的本构方程是十分复杂的,常常不能简单地用数学方程表达。生物材料的本构关系常常需要以实验为前提,建立经验的本构方程,而实验中的最大困难在于很难准确测量活体情况下的实验数据。例如,生物的软组织和体液一旦离开了活体,其力学性能会发生很大的变化。另外,生物材料的力学性质与一般工程材料不同,具有多相、非均匀、各向异性等特征。在不同的生理状态下,生物材料的力学性质差异也很大。

二、生物流体力学

生物流体力学研究在生物体内各种体液和气体的流动规律,包括血液流动问题,呼吸系统中的动力学问题,淋巴系统、泌尿系统中的体液流动,以及生物体在流体介质(如空气、水等)中的流动规律。血液循环系统中的流动是生物流体力学的重要研究内容之一。血液循环系统中的流动极为复杂,这是由于人体的血管系统高度枝化,几何形状复杂;血液在血管(尤其在动脉)中的脉动流;血管壁的粘弹性;血液的非牛顿性;动脉中脉搏波的传播和反射,以及系统的各种非线性因素对血液循环系统中流动的影响等。

三、生物固体力学

生物固体力学应用力学的基本理论和方法,研究在生物组织、器官乃至生物系统中的力学问题。例如,对骨、软骨、关节和骨骼系统力学性质的研究,对牙齿、牙床结构的力学分析等。近年来,骨骼和关节力学已成为生物力学最活跃的分支之一,包括对骨损伤愈合和骨再生的生物力学机制研究,人工关节和假肢的设计制造,以及在特殊劳动环境中的人体骨骼和关节防护等。

四、运动生物力学

运动生物力学研究生物体的运动,近年来广泛应用于体育运动事业和现代航空航天事业等领域。例如,应用地球引力场的力学原理去研究合理训练运动员的方法。在现代航空航天事业中,研究飞行员和宇航员在非地球引力场中对超重、失重、冲击、振动的承受能力,提供科学的训练计划,设计科学的动作和合理的安全保护装置。在研究各种飞禽、走兽、鱼类运动的基础上,研制仿生器械乃至仿生机器人。此外,运动生物力学近年来在康复医学中展现了巨大的发展潜力。

五、生物热力学

生物体是一个非平衡态的热力学系统。生物体内部以及生物体与周围环境之间不停地进行着物质和能量的交换。生物热力学应用热力学的观点来研究生命维持过程中的物质和能量的运输、交换、补充与消耗。

第三节 生物力学的研究方法

生物力学作为一门交叉科学,其研究方法是生命科学和力学研究方法的结合。体现了归纳分析和逻辑推理的结合、理论和实验的结合。由于生物体力学研究对象的复杂性,往往不可能用统一的方法进行生物力学研究,但是可参考的生物力学研究思路如下。

- (1) 确定研究对象的形态和解剖结构的几何特征。
- (2) 测定生物材料的力学性质,确定应力和应变关系的本构关系。
- (3) 根据力学原理,例如质量守恒、动量守恒、能量守恒、Maxwell 方程和材料的本构方程等,建立所研究器官或系统的数学模型,确定边界条件。
- (4) 用解析方法、近似方法或数值方法求解数学模型。
- (5) 设计和实施相应的生理学实验,得到相应的实验数据。
- (6) 对实验数据和从模型中得出的相应仿真结果进行分析比较,验证所建立力学-数学模型的有效性,根据情况对模型本身或模型的求解方法进行修正,直至问题得到满意的解答。

第一章 力学基础知识

第一节 刚体静力学基本概念

本章内容是在临床中应用生物力学涉及的力学基础知识,包括:临床生物力学基础、静力学基础、变形静力学基础、血流动力学基础和血液流变学力学基础。本章的目的在于通过对有关基本力学概念的阐述,为学习生物力学在医学中的应用打下基础。

一、力、力矩及力偶

力是物体之间的相互机械作用,其作用效果是使物体的运动状态和(或)形状发生改变。前者是力的运动效应,后者是力的变形效应,一般来说,这两种效应是同时存在的。在研究中,为了使问题简化,通常是将运动效应和变形效应分开来研究,静力学研究力的运动效应,材料力学研究力的变形效应。

(一) 力的概念

力对物体的作用效果取决于力的大小、力的方向和力的作用点,称之为力的三要素。由于力是一个既有大小又有方向的量,因此,用一个向量(矢量)表示力的三要素,即用一条

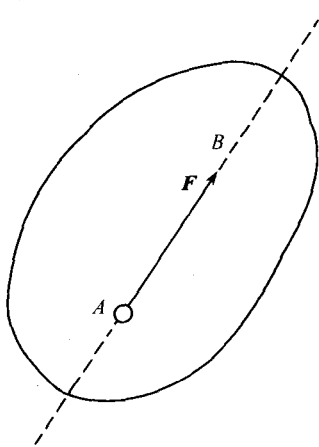


图 1-1 力的矢量示意图

定位的有向线段来表示力。线段的长度表示力的大小,线段的方位和箭头的指向表示力的方向,线段的始端 A 表示力的作用点,如图 1-1 所示,线段所在的直线称为力的作用线,如图上虚线所示,通常用粗体字母 F 表示力的向量,在国际单位制中力的单位为牛顿(N),或千牛顿(kN)。因为物体相互作用并不是点接触而是以物体上的一部分面积接触,因此,作用于物体某一面积上的力称为分布力,当分布力的作用面积很小时可以近似为一个点,则称此力为集中力。

因为力是矢量,所以应该按照矢量的运算规则进行力的运算。作用在物体上同一点的若干个力,例如两个力 F_1 和 F_2 可以合成为一个合力 F_R ,即

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

此时,合力的大小和方向应按矢量合成(此处为平行四边形规则)进行运算,如图 1-2 所示。显然,若两力共线、同向,其合力为两力的大小相加;共线反向则相减。若两力大小相等、反向并共线,则合力为零,此受力物体处于平衡状态。

人体受力一般有:人的各部位都受重力;各骨骼关节间又都有相互的作用力;除此之外还有肌肉力。肌肉力是肌肉具有能动收缩的能力,是人体运动的内在动力。例如,骨骼肌是构成躯体的主要部分,它由大量肌纤维组成,当通过神经传来信息而兴奋时能收缩,骨骼肌收缩时产生肌张力,并在腱的附着点产生对骨的拉力,从而使肢体产生运动或保持一定的姿态。如图 1-3 所示,一块肌肉全部肌纤维拉力的合力就是这块肌肉的合力,其大小与肌纤维的数量成正比,若以 A 表示肌纤维横断面的面积,则有:

$$F = \lambda A \quad (1-2)$$

式(1-2)中 λ 称为肌肉系数,表示单位生理横断面积所受的肌力。

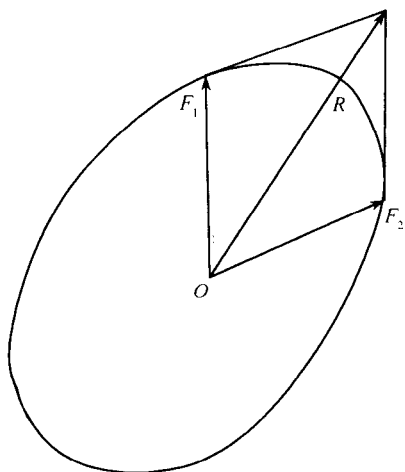


图 1-2 两个力的矢量合成

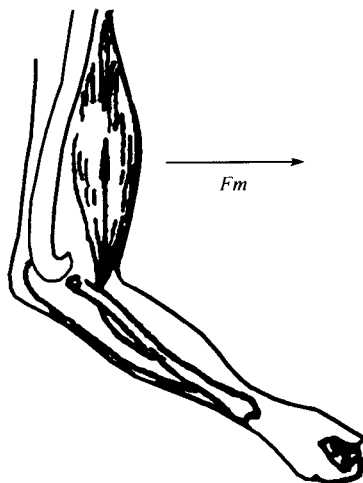


图 1-3 肌肉力示意图

(二) 力对点之矩

力对物体作用的运动效应包括移动效应和转动效应,物体的移动效应用力来度量,而力对物体的转动效应则用力对点之矩来度量,下面介绍力对点之矩的概念。

设在物体上作用的力为 F ,如图 1-4 所示,任取一点 O 作为矩心,定义点 O 到力 F 的垂直距离 d ,称为力臂,则力 F 对 O 点力矩的量值(绝对值)为力的大小与力臂的乘积,若力使物体绕 O 点逆时针转动,力矩取正值;若力使物体绕 O 点顺时针转动,力矩取负值。力 F 对 O 点之矩以 $m_o(F)$ 表示,有

$$m_o(F) = \pm Fd \quad (1-3)$$

显然,若力的作用线通过 O 点,则力对 O 点之矩为

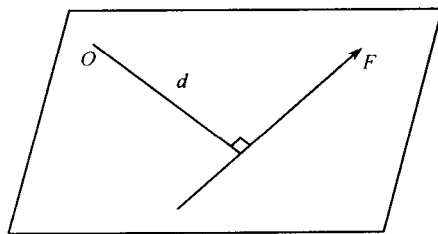


图 1-4 力 F 对点 O 之矩的表示

零。与力不同,对于平面问题,力矩是代数量,不是矢量,如式(1-3)所示。这是因为除了力矩的大小外,在力与矩心组成的平面内物体只有逆时针或顺时针转动两种可能,因此,以正负号表示已足以表达其转动的方向特征。力矩的单位为 $N \cdot m$ 或 $kN \cdot m$ 。

(三) 力偶的概念

大小相等、方向相反、作用线互相平行的两个力称为力偶,记作 (F, F') ,如图 1-5 示。两个力作用线之间的距离称为力偶臂;由两个力作用线所决定的平面称为力偶作用面,如作用面不同,力偶的作用效应也不同。因此,力偶矩的大小、力偶的转向和力偶的作用平面称为力偶的三要素。

力偶中的两个力不是一对平衡力,也不能合成一个等效力,力偶本身既不能平衡又不能与另一个力等效,因此,力偶是力学中的基本量之一。

力偶对物体的作用只有转动效应而无移动效应,转动效应以力偶矩来度量,即用组成力偶的两个力对其作用面内任一点之矩的代数和来度量。设力偶为 (F, F') ,其力偶臂为 d ,如图 1-6 所示。力偶 (F, F') 对任取的 O 点之矩为

$$\begin{aligned} m_o(F, F') &= m_o(F) + m_o(F') \\ &= F_x - F'(x + d) \\ &= F_d \end{aligned}$$

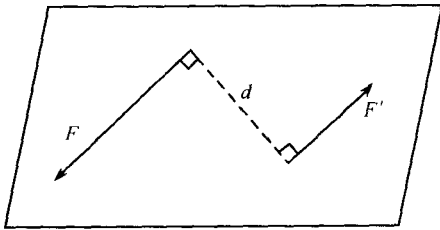


图 1-5 力偶的示意图

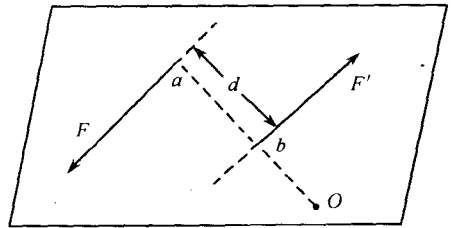


图 1-6 力偶矩计算的示意图

由此可知,力偶的作用效应取决于力的大小和力偶臂的长短,与矩心 O 的位置无关,通常以 $m(F, F')$ 表示力偶矩,简记 m 。

$$m = \pm Fd \tag{1-4}$$

式中的正负号表示力偶的转动方向,力偶的转向为逆时针时,符号为正;顺时针方向转动,符号为负。

力偶矩的单位与力矩一样,在国际单位制中是 $N \cdot m$ 。

两个力偶等效的条件是大小相等、方向相同。

二、刚体的概念

(一) 质点

质点是具有一定质量而几何形状和尺寸大小可以忽略不计的物体,也就是说,可将物

体作为只有质量但没有大小的点。例如,研究人造地球卫星的轨道时,卫星的形状和大小对研究的问题无关紧要,可将卫星看做一个质点。

(二) 质点系

质点系是由几个或无限个相互有联系的质点所组成的系统。例如,太阳系就是一个质点系。质点系的概念十分广泛,对于无限个质点组成的系统可以有形状和大小的物体,例如刚体和固体,也可以是有有一定体积而无一定形状的流体,例如液体和气体。

(三) 刚体

所谓刚体是指这样的物体,在力的作用下,其内部任意两质点的距离始终保持不变,也就是说,在力的作用下,物体的形状和大小都不变。实际上,物体在力的作用下都会有不同程度的变形,在研究物体机械运动的一般规律时,若物体变形微小,对要研究的问题不起主要作用时,可以略去变形把物体看作刚体,这样可使问题的研究大为简化。刚体是一个理想化的力学模型。当研究人的肢体运动时,肢体可简化为刚体。

三、约束与约束反力

能在空间作任意运动的物体被称为自由体。但是实际情况下,物体在空间的运动往往受到限制,被称为非自由体。例如,机车受铁轨的限制,只能在轨道上运动;人体的四肢受到关节的限制,只能绕关节转动;血液受到血管的限制,只能在血管中流动等。由周围物体构成的阻碍非自由体运动的限制条件,称为该非自由体的约束,例如以上例子中的铁轨、关节及血管均可称为约束。约束限制物体的运动,改变物体的运动状态,因此,约束对物体的作用就是力的作用。约束对物体的作用力称为约束反力。约束反力的方向与该约束所能阻碍的运动方向相反。由此可以确定约束反力的方向或作用线的位置;约束反力的作用点是被约束物体与约束的接触点;约束反力的大小从受力体的平衡方程中求解。

根据特征,将常见的约束分成如下几个基本类型。

(一) 柔软约束

例如,绳索、皮带、链条等。如不特别指明,这类约束的截面尺寸和重量均可略去不计,这类约束的特点是只能限制物体沿柔软约束拉伸方向的运动,即约束只能承受拉力,不能承受压力。在图 1-7(a) 示例中,一条绳索悬吊一个物体,绳索的约束反力 T 的作用点在接触点 A ,方向沿绳索的中心线且背离物体,如图 1-7(b) 所示。

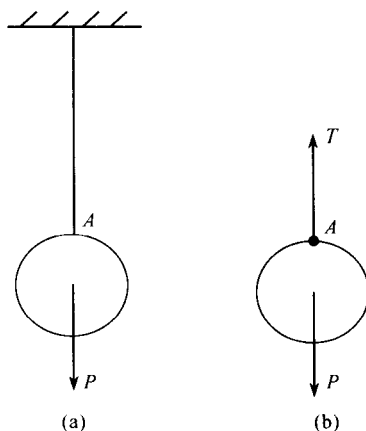


图 1-7 柔软约束

(a) 柔软约束;(b) 接触反力 T 的作用点 A 和方向示意

(二) 光滑面约束

若与物体相接触的约束是光滑表面(平面或曲面),则称此约束为光滑面约束。光滑面是一种理想化情形,事实上,两物体相接触总是存在摩擦的,若摩擦力与其他力比较很小时可略去摩擦力,视为光滑面。这类约束不能限制物体沿物体表面切线方向的运动,只能阻碍物体沿接触表面法线并向约束内部的运动,因此,光滑面约束对物体的约束反力,其作用点在接触点处,方向沿接触表面的公法线,并指向受力物体,这种约束反力称为法线反力 N_A ,下标 A 指接触点 A ,如图 1-8 所示。

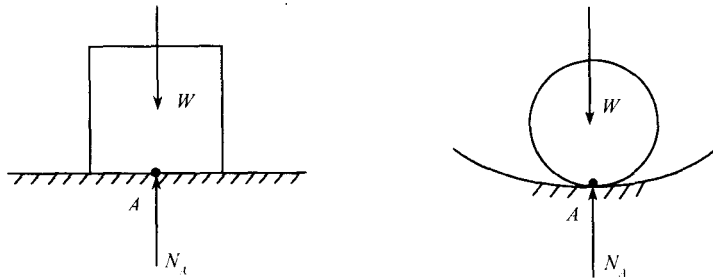


图 1-8 光滑面约束

例如,人的肢体关节面间有关节面软骨,关节囊的滑膜层能分泌滑液,所以关节面的摩擦力可以减小到最小程度。因此,人体关节面是比较理想的光滑面约束。

(三) 固定铰链约束

固定铰链约束的两类典型构造是光滑柱形铰链和光滑铰链支座。光滑柱形铰链是两个物体各有一个同样大小的圆孔用一个销钉(圆柱体)连接起来而构成。由于销钉是圆柱体,被称为光滑圆柱铰链,如图 1-9(a)所示。图 1-9(b)表示由图 1-9(a)所示的二物体及销钉所构成的铰链,图 1-9(c)为常用的铰链约束简图。

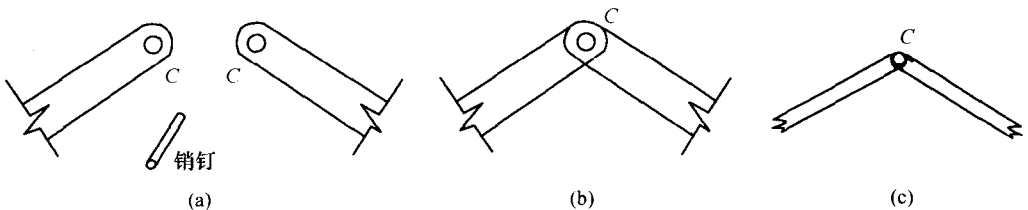


图 1-9 光滑柱形铰链约束

(a) 光滑圆柱铰链;(b) 二物体及销钉所构成的铰链;(c) 常用的铰链约束简图

铰链约束只允许两物体绕销钉轴线有相对转动,而限制物体脱离销钉有任何方向的微小位移。这类约束中,销钉 C 与物体上的圆孔是光滑接触,销钉 C 对物体来讲就是光滑面约束,其反力应沿接触点 A 的公法线方向,作用线必通过铰链中心 C ,接触点 A 的位置未知,

约束反力也未知,但作用线必通过铰链中心 C 。铰链约束反力的方向和大小却未知,通常用两个与它等价的正交分力 N_{Ax} 和 N_{Ay} 代替,但其反力作用线必定通过铰链中心,它被视为反力的作用点,见图 1-10 所示。

凡是具有铰链约束特征的不论其构造形式如何均属于铰链约束,例如人身的胫骨与股骨间的膝关节就是铰链约束,这是因为膝关节只允许胫骨和股骨绕其作相对转动。

光滑铰链支座是另一种典型固定铰链约束,若销钉相连的两物体之一固定在支承面上,这种约束称为光滑铰链支座,如图 1-11(a)所示,图 1-11(b)是铰链支座简图和约束反力画法。

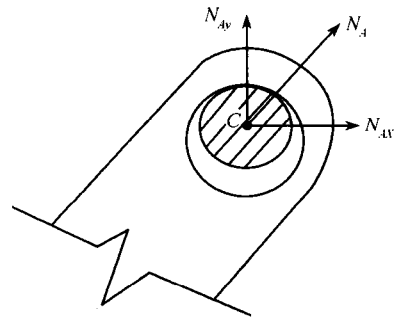


图 1-10 固定铰链约束反力示意图

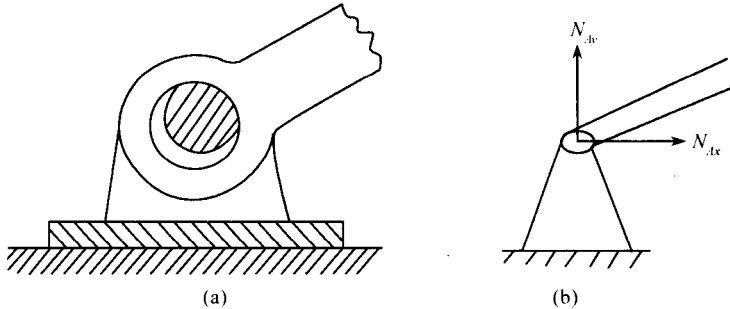


图 1-11 光滑铰链支座约束

(a) 光滑铰链支座构造图;(b) 常用简图和约束反力

(四) 辊轴支座

辊轴支座是将铰链支座用几个辊轴支撑在光滑面上,它使物体不仅可绕铰链中心轴转动,还可以沿支承面移动,因此,其约束反力方向垂直于支承面且通过铰链中心。图 1-12(a)表示辊轴支座的构造图,图 1-12(b)是常用的两种简图。

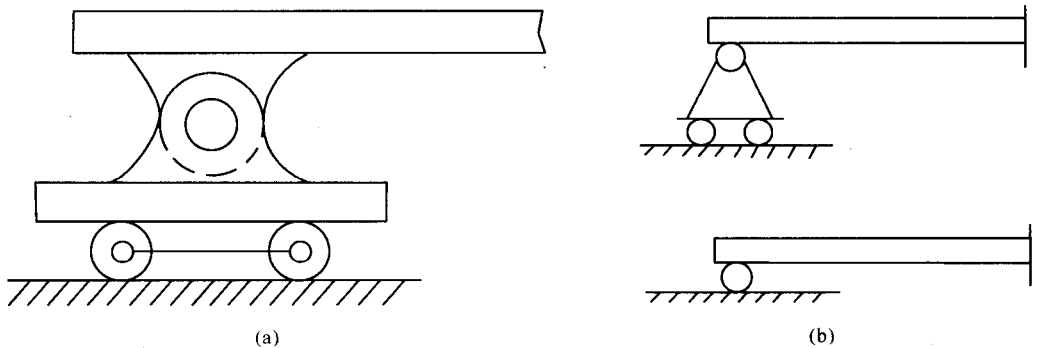


图 1-12 辊轴支座约束

(a) 辊轴支座构造图;(b) 常用的两种辊轴的约束简图

(五) 固定端约束

关于固定端约束将在第二节中叙述。

四、物体的受力分析与受力图

在物体的力学研究中,首先要进行物体的受力分析,确定物体受几个力(包括主动力和约束反力),以及每个力的作用位置和方向。

为了清晰地表示物体的受力情况,需要把被研究物体(简称受力体)从周围的物体(简称施力)中分离出来,单独画出其轮廓简图,这个步骤叫做取分离体或取研究对象;然后把作用在这个分离体上的力(包括约束反力和已知主动力)全部画在简图上。这个表示物体受力的简明图形,称为受力图。画受力图是解决力学平行问题的第一个重要步骤,以下举例说明受力图的画法。

【例 1-1】力 F 拉动碾子压平路面,碾子的重为 P ,它受到一石块的阻碍,如图 1-13(a) 所示。不计摩擦,试画出碾子的受力图。

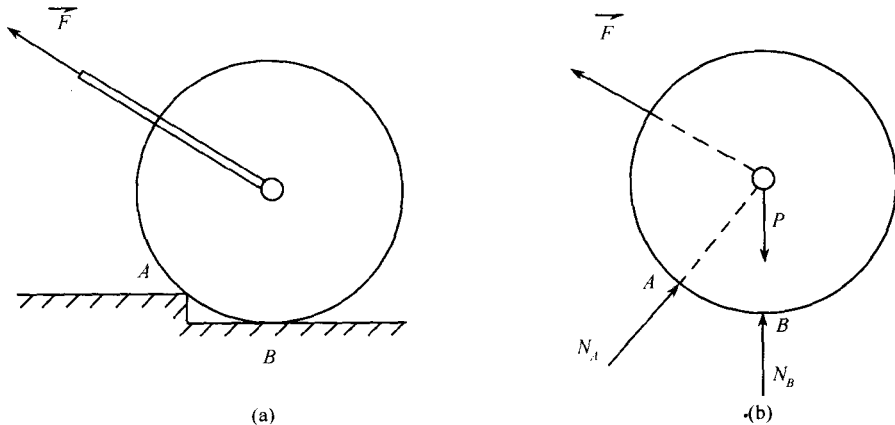


图 1-13 碾子受力分析
(a) 碾子示意图;(b) 碾子受力图

【解】(1) 取碾子为分离体(研究对象),单独画出其简图。

(2) 先画出已知主动力:碾子中心受到的拉力 F 和重力 P ;再画出约束反力:碾子在 A 和 B 两处受到石块和地面的约束,若不计摩擦,这两个约束均为光滑面约束,即在 A 处有反力 N_A 和 B 处有 N_B 作用,约束反力方向均为接触点的公法线方向并指向碾子中心,如 1-13 图(b)所示。

【例 1-2】简支梁 AB 两端分别连接在铰链支座和滚动支座上,在梁的 C 处作用一集中力 P ,如图 1-14(a) 所示,若不计梁自重。试画出此梁的受力图。

【解】(1) 取梁 AB 为分离体并单独画出其简图。

(2) 在分离体上画出已知力 P 。画约束反力: A 处为铰链支座, 约束反力用正交的两个分力 X_A 和 Y_A 表示; B 处为辊轴支座, 约束反力 N_B 沿垂直方向向上(垂直于辊轴固定面), 如图 1-14 所示。图中 X_A 和 Y_A 的指向是假设的, 正确与否应从力学平衡方程解的符号确定。

第二节 平面力系及其平衡方程

在本书中, 我们只研究平面力系的受力问题, 即作用在物体上的诸力作用线都在同一平面上。

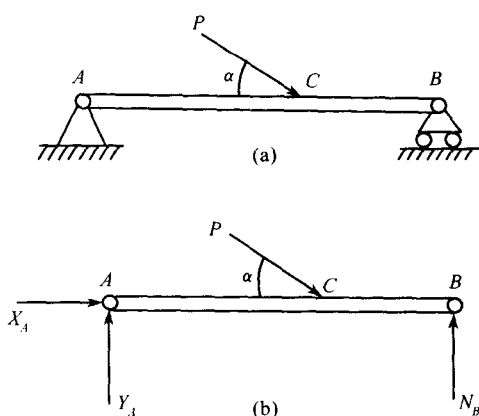


图 1-14 例 1-2 中的梁受力图
(a) 梁的示意图; (b) 梁的受力图

一、平面力系的简化

力系是指作用于物体上的一群力(或力偶)。若用一个简单力系等效的替换一个复杂力系, 称为力系的简化。

(一) 力线平移定理

力线平移定理是平面力系简化的依据, 在本节中先介绍其基本概念。

1. 定理

作用在刚体上的力 F 可以平行移动到刚体上的任一点, 但必须同时附加一个力偶, 其力偶矩等于力 F 对平移点之矩。

2. 证明

设力 F 作用于刚体上的 A 点, 如图 1-15 (a) 所示, 在刚体上任取一点 B , 在 B 点加上大小相等、方向相反且与力 F 平行的两个平行力 F' 和 F'' , 则刚体上作用有大小相等的 $F' = F'' = F$, 如图 1-13 (b) 所示, 虽然力系 (F, F', F'') 与力 F 等效, 力系 (F, F', F'') 可看做一个作用在 B 点上的力 F' 和一个力偶 (F', F'') 。即: 作用在刚体上 A 点的力 F 可平行移

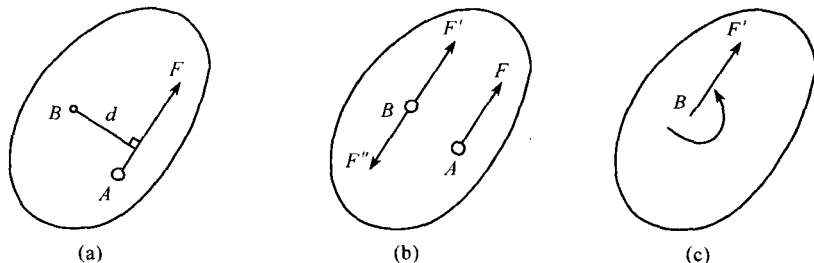


图 1-15 力的平移

(a) 力 F 作用于刚体上 A 点; (b) 在刚体任意点 B 加上一对平衡力 F 和 F' ; (c) A 点力 F 向 B 点的等效平移