

理论力学

主 编/周新伟 刘 恂 严 实



重点规划教材

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

理论力学

主 编 周新伟 刘 恂 严 实

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本教材是按照教育部力学基础课程教学指导分委员会最新制定的“理论力学课程基本要求(B类)”编写的。全书共13章,内容包括静力学、运动学和动力学三部分。静力学内容包括静力学基本概念和公理、物体的受力分析、平面力系、摩擦、空间力系等;运动学内容包括点的运动学、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动等;动力学内容包括动力学基本定律、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理等。

本书可作为高等学校工科机械、机电、热能、金材、材型、安全等专业中、少学时的理论力学课程教材,也可供其他专业及相关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

理论力学 / 周新伟, 刘恂, 严实主编. -- 哈尔滨 :
哈尔滨工程大学出版社, 2011.6
ISBN 978 - 7 - 81133 - 964 - 2

I. ①理… II. ①周… ②刘… ③严… III. ①理论力学 - 高等学校 - 教材 IV. ①O31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 101793 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 肇东市一兴印刷有限公司
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 12
字 数 290 千字
版 次 2011 年 6 月第 1 版
印 次 2011 年 6 月第 1 次印刷
定 价 24.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

PREFACE

理论力学是高等工科院校普遍开设的一门重要的专业基础课,是研究物体机械运动普遍规律的一门学科,在专业课与基础课之间起衔接作用,为学习后续相关课程奠定基础。

为适应“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革”的需要,根据教育部力学基础课程教学指导分委员会最新制定的理工科非力学专业“理论力学课程教学基本要求(B类)”,并结合近年来编者讲授的“理论力学课程”教学内容、课程体系等方面的改革实践和体会,编写了本教材。在编写过程中,编者注意坚持理论严谨、逻辑清晰、由浅入深、易教易学的原则,强调联系工程实际、注重基本概念、注重后续课程中概念的渗透。本书具有较强的教学实用性,是注重培养工程应用型人才、重视能力培养的新教材。

和大多数理论力学教材一样,本书仍分为静力学、运动学和动力学三部分。静力学主要内容包括静力学基本概念和公理、物体的受力分析、平面力系、摩擦、空间力系;运动学主要内容包括点的运动学、刚体的基本运动、点的合成运动、刚体的平面运动;动力学主要内容包括动力学基本定律、动量定理、动量矩定理、动能定理、达朗贝尔原理。

参加本书编写工作的有:哈尔滨理工大学周新伟(绪论、第 9 章、第 10 章、第 12 章、第 13 章)、刘恂(第 2 章、第 3 章、第 4 章)、严实(第 5 章、第 6 章、第 8 章),哈尔滨商业大学杨银环(第 1 章、第 11 章),齐齐哈尔大学杨洪澜(第 7 章)。

全书由周新伟、刘恂、严实主编,由哈尔滨理工大学曲贵民教授、哈尔滨工业大学张莉教授主审。

本教材在编写过程中,参考了许多优秀的教材(见参考文献),吸取了这些教材的许多长处,在此向这些教材的编者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,教材中的疏漏和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2011 年 2 月

绪论	1
----------	---

第一编 静 力 学

第 1 章 静力学基本知识和物体的受力分析	4
1.1 静力学基本概念	4
1.2 静力学公理	4
1.3 约束和约束反力	6
1.4 物体的受力分析和受力图	9
习题	12
第 2 章 平面力系	15
2.1 平面汇交力系	15
2.2 平面力对点之矩的概念与计算	18
2.3 平面力偶系	19
2.4 平面任意力系的简化	22
2.5 平面任意力系的平衡条件	25
2.6 物体系统的平衡·静定和静不定问题的概念	27
习题	30
第 3 章 摩擦	37
3.1 摩擦的概念	37
3.2 考虑摩擦时的平衡问题	40
习题	43
第 4 章 空间力系	46
4.1 空间汇交力系	46
4.2 力对点的矩和力对轴的矩	47
4.3 空间力偶理论	50
4.4 空间任意力系向一点的简化·主矢和主矩	51
4.5 空间任意力系的平衡条件	54
4.6 平行力系的中心与物体的重心	55
习题	58

第二编 运 动 学

第 5 章 点的运动学	63
5.1 点的运动方程	63
5.2 点的速度和加速度的矢量表示法	64
5.3 点的速度和加速度的直角坐标表示法	66

5.4 点的速度和加速度的自然坐标表示法	67
习题	70
第6章 刚体的基本运动	74
6.1 刚体的平行移动	74
6.2 刚体的定轴转动	75
6.3 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	76
6.4 定轴轮系的传动比	79
习题	81
第7章 点的合成运动	84
7.1 点的合成运动的基本概念	84
7.2 点的速度合成定理	86
7.3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	89
习题	91
第8章 刚体的平面运动	96
8.1 刚体平面运动的概念与运动分解	96
8.2 用基点法和投影法求平面图形内各点速度	98
8.3 用瞬心法求平面图形内各点速度	100
8.4 用基点法求平面图形内各点的加速度	103
8.5 运动学综合应用	105
习题	106
第三编 动力学	
第9章 动力学基本定律	113
9.1 动力学基本定律	113
9.2 质点运动的微分方程	114
习题	118
第10章 动量定理	121
10.1 质点的动量定理	121
10.2 质点系的动量定理	124
10.3 质心运动定理	127
习题	130
第11章 动量矩定理	134
11.1 质点的动量矩定理	134
11.2 质点系的动量矩定理	136
11.3 刚体绕定轴的转动微分方程	140
11.4 刚体对轴的转动惯量	142

习题	147
第 12 章 动能定理	152
12.1 力的功	152
12.2 质点的动能定理	156
12.3 质点系的动能定理	157
12.4 功率 功率方程 机械效率	161
12.5 动力学普遍定理的综合应用	162
习题	165
第 13 章 达朗贝尔原理(动静法)	171
13.1 惯性力的概念	171
13.2 达朗贝尔原理	172
13.3 刚体惯性力系的简化	174
13.4 刚体定轴转动时轴承的动约束力	179
习题	180
参考文献	184

绪 论

1. 理论力学的研究对象和内容

理论力学是研究物体机械运动一般规律的一门科学。

所谓机械运动,是指物体在空间的位置随时间的变化。机械运动是人们在生活和生产实践中最常见的一种运动。例如:车辆的行驶、机器的运动、水的流动、建筑物的振动以及人造地球卫星的运行等,都是机械运动。物体的平衡是机械运动的特殊情况,在本书中,我们也将研究物体的平衡问题。

理论力学所研究的内容是以伽利略和牛顿所建立的基本定律为基础的,属于古典力学的范畴,研究速度远小于光速的宏观物体的机械运动。至于速度接近光速的物体和微观基本粒子的运动,则必须用相对论和量子力学的观点才能予以说明,这说明古典力学的应用范围是有局限的。但是,一般工程中所遇到的大量的力学问题,用古典力学来解决,不仅方便,而且能够保证足够的精确性。因此,我们学习本课程具有实际意义。

本课程的内容包括以下三个部分:

静力学——研究物体在力系作用下的平衡规律,同时也研究力系的等效和简化。

运动学——研究物体机械运动的几何性质,而不考虑物体运动的物理原因。

动力学——研究物体的机械运动变化与其所受的力之间的关系,是理论力学最主要的组成部分。

2. 理论力学的研究方法

任何一门科学由于研究对象的不同而有不同的研究方法,但是通过实践去发现真理,又通过实践去证实真理和发展真理,这是任何科学技术发展的正确途径。理论力学也必须遵循这个认识规律进行研究和发

(1)通过观察生活和生产实践中的各种现象,进行多次的科学实验,经过分析、综合和归纳,总结出力学的最基本的规律。

(2)在对事物观察和实验的基础上,经过抽象化建立力学模型。抽象化的方法,在理论力学的研究中具有重要作用。就是在研究工作中,常常抓住一些带本质性的主要因素,而撇开一些影响不大的次要因素,从而提炼出力学模型作为研究对象。如当物体的运动范围比它本身的尺寸大得多时,可把物体当作只有质量而没有大小的一个质点;把在外力作用下变形很小的物体当作不可变形的刚体。这些都是科学的抽象,它一方面简化了所研究的问题,另一方面也更深刻地反映了事物的本质。

(3)在建立力学模型的基础上,从基本规律出发,用数学演绎和逻辑推理的方法,得出正确的具有物理意义和实用价值的定理和结论,在更高的水平上指导实践,推动生产发展。

综上所述,理论力学的研究方法是从实践到理论,再由理论回到实践,通过实践进一步补充和发展理论,然后再回到实践,如此循环往复,每一循环都在原来的基础上提高

一步。

3. 理论力学的任务

理论力学是一门理论性较强的学科基础课。通过本课程的学习,我们要掌握机械运动的客观规律,能动地改造客观世界,为以后走上工作岗位服务。因此学习本课程的任务:一方面是运用力学基本知识结合其他有关的课程,解决工程技术中的简单力学问题;另一方面是为学习一系列的后继课程,如材料力学、机械原理、机械零件等有关的后继课程提供重要的理论基础。学习理论力学,也有助于培养辩证唯物主义的世界观,树立正确的思想方法和提高分析问题与解决问题的能力。

随着现代科学技术的发展,力学的研究内容已渗透到其他科学领域。例如:固体力学和流体力学的理论被用来研究人体骨骼的强度,血液流动的规律以及植物中营养的输送问题等在生物力学中有重要用途。另外,还有新兴的爆炸力学、电磁流体力学等都是力学与其他学科结合而形成的边缘科学,这些学科的建立和发展,都必须有坚实的理论力学知识作为基础。

4. 如何学好理论力学

注意弄清基本概念,掌握推理方法,深刻理解并熟练掌握其结论,大量演算习题,巩固所学理论,培养理论力学分析和解决实际问题的能力。

第一编 静 力 学

静力学是研究物体在力系作用下的平衡条件的科学。

所谓力系,是指作用在物体上的一群力。

平衡是指物体相对于惯性参考系(如地面)保持静止或匀速直线运动状态,即物体的运动状态保持不变。如果作用于物体上的力系使物体保持平衡,则该力系称为平衡力系,此时力系所满足的条件称为平衡条件。

静力学所研究的基本问题包括以下三方面的内容:

1. 受力分析

分析物体(包括物体系统)受哪些力,每个力的作用位置和方向,并画出物体的受力图。

2. 力系的等效替换

将作用于物体上的一个力系用与之等效的另一个力系来代替的过程,称为力系的等效替换;将一个复杂力系用一个简单力系等效替换的过程,称为力系的简化。如果一个力系可与一个力等效替换,则称该力为此力系的合力,力系中各力叫做该力的分力。相应地,将一个力系等效替换为一个力叫做力的合成,将一个力等效替换为一个力系叫做力的分解。

3. 建立力系平衡条件

即研究作用在物体上的各种力系所需满足的平衡条件。

第 1 章 静力学基本知识和物体的受力分析

1.1 静力学基本概念

1.1.1 刚体的概念

所谓刚体,是指在力的作用下,其内部任意两点间的距离始终保持不变的物体,即受力而不变形的物体。事实上,任何物体在力的作用下都会产生不同程度的变形,因此刚体并不是实际存在的实体,而是抽象简化的理想模型。注意,刚体是理想化的力学模型。

静力学研究的力学模型都是刚体和刚体系统,故又称为刚体静力学。

1.1.2 力的概念

力是物体间相互的机械作用。这种作用的效果是使物体的运动状态发生变化,同时使物体的形状发生改变。

物体形状的改变,我们称之为物体的变形。

力使物体运动状态发生变化的效果,称为力的外效应,或者称为力的运动效应;力使物体发生变形的效果,称为力的内效应,或者称为力的变形效应。

力有三要素,即大小、方向和作用点。因此力是矢量,且是定位矢量。

力的大小的单位,在国际单位制中是牛顿(Newton),以 N 来表示。工程中也常用“千牛顿”作单位,记作 kN。

通过力的作用点,沿力的方向的直线称为力的作用线。

工程中常见的力系,按其作用线的分布,可分为平面力系和空间力系,按其作用线的关系,又可分为汇交力系、平行力系和任意力系。

1.2 静力学公理

公理是人们在长期社会生产实践中总结出来的正确地反映自然界事物基本规律的定律。

公理 1 二力平衡公理

作用在同一个刚体上的两个力,使刚体处于平衡状态的必要和充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,且作用在同一直线上。

公理 1 只适用于刚体,而对变形体,上面的条件只是必要的,但不是充分的。

只受两个力的作用而处于平衡状态的构件称为二力构件,当构件为杆件时称为二

力杆。

公理 2 加减平衡力系公理

在已知力系上加上或减去任意的平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用。

公理 2 也只适用于刚体。

根据上述公理有如下推论:

推论 1 力的可传性原理

作用于刚体上的力,可沿其作用线移动到刚体上的任一点,而不改变该力对刚体的作用效果。

证明 设有力 F 作用在刚体上的点 A ,如图 1-1(a) 所示。根据加减平衡力系公理,可在力的作用线上任取一点 B ,并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = F_2 = -F_1$,如图 1-1(b) 所示,由于力 F 和 F_1 也是一个平衡力系,故可除去,这样只剩一个力 F_2 ,如图 1-1(c) 所示,即原来的力 F 沿其作用线移到了点 B 。

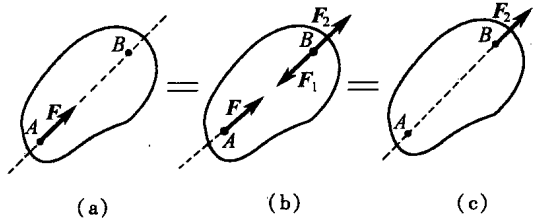


图 1-1

可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效果的要素,而是被作用线所代替。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。

作用于刚体上的力矢可以沿着作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

公理 3 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一个合力,合力的作用点仍然在该点,合力的大小和方向由以这两个力为邻边所构成的平行四边形的对角线来确定。

公理 3 本质上是说明力的合成符合矢量运算法则,合力矢量等于这两个力矢量的几何和,即

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

亦可用三角形法则来求合力矢,如图 1-2(b) 和 1-2(c) 所示。但要注意的是,三角形法则并未如实地反映出每个力的三要素,只是一种求解合力矢的方法。

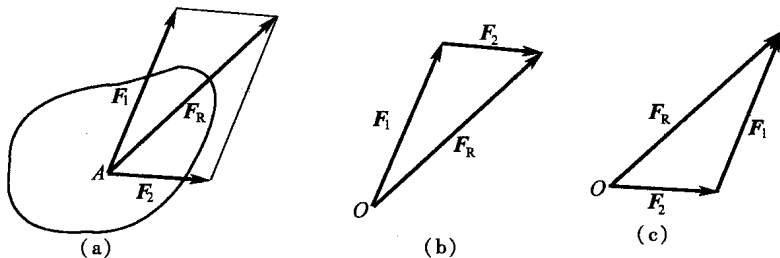


图 1-2

推论 2 三力平衡汇交定理

作用于刚体上的三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则此三力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

证明 如图 1-3 所示,在刚体的 A, B, C 三点分别作用三个相互平衡的力 F_1, F_2, F_3 。先根据力的可传性原理,将 F_1, F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形法则得到合力 F_{12} ,则力 F_3 与合力 F_{12} 应平衡。由二力平衡公理, F_3 与 F_{12} 共线,故 F_3 必与 F_1 和 F_2 共面,且通过 F_1 与 F_2 的汇交点。定理得证。

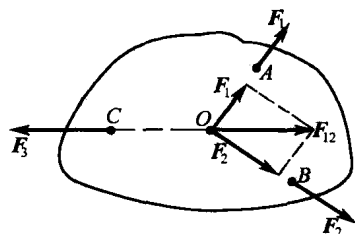


图 1-3

公理 4 作用与反作用定律

两物体间的作用力和反作用力总是同时存在、大小相等、方向相反、作用线相同,且分别作用在这两个物体上。

公理 4 概括了物体间相互作用的关系,表明作用力和反作用力总是成对出现的。由于作用力与反作用力分别作用在两个物体上,因此不能视为平衡力系。

公理 5 刚化原理

变形体在某一力系作用下处于平衡,若将此变形体刚化为刚体,其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体抽象成刚体模型的条件。如图 1-4 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化为刚体,则平衡状态保持不变。而绳索在两个等值、反向、共线的压力作用下则不能平衡,这时绳索就不能刚化为刚体。

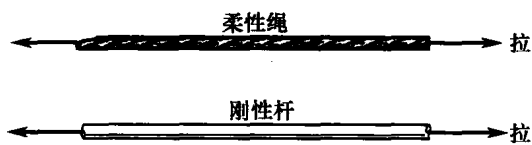


图 1-4

公理 5 建立了刚体力学与变形体力学的联系,扩大了刚体静力学的应用范围。当在变形体力学中直接应用静力学的结论和分析方法时,其理论依据就是刚化原理。

1.3 约束和约束反力

1.3.1 自由体和非自由体

有些物体,如飞行的飞机、投掷出去的石块等,在空间的位移不受任何限制。位移不受限制的物体称为自由体。相反,位移受到限制而不能作任意运动的物体称为非自由体,如放置于讲台的粉笔盒,受到讲台的限制而不能下落,再如火车受到铁轨的限制,只能沿轨道运动而不能侧向运动脱离轨道。

1.3.2 约束、约束反力和主动力

对非自由体的某些位移起限制作用的物体称为约束,如限制粉笔盒下落的讲台和限制火车侧向运动的铁轨。

约束对于物体的作用,实际上就是力,这种力称为约束反力,简称约束力或反力。因

此,约束反力的方向必然与该约束能够阻碍的运动方向相反。应用这个准则,可以确定约束反力的方向或作用线的位置,而约束反力的大小则往往是未知的。

除约束力外,非自由体上所受到的所有促使物体运动或产生运动趋势的力,统称为主动力。

在静力学中,物体所受到的全部的主动力和全部的约束反力组成平衡力系,因此可以用平衡条件来求解未知的约束反力。

1.3.3 约束的基本类型和约束反力方向的确定

下面介绍几种在工程实际中经常遇到的简单的约束类型和确定约束反力的方法。

1. 柔性体约束

柔性体约束即为由柔软的绳索、链条或皮带等构成的约束,如图 1-5 所示。由于柔软的绳索本身只能承受拉力,所以它给物体的约束反力也只能是拉力。因此,绳索对物体的约束反力,作用在接触点,方向沿着绳索背离物体。通常用 F 或 F_T 来表示这类约束力。

2. 具有光滑接触表面的约束

例如支持物体的固定平面,如图 1-6 所示,当表面非常光滑,摩擦可以忽略不计时,属于这类约束。

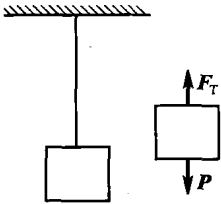


图 1-5

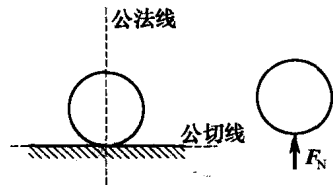


图 1-6

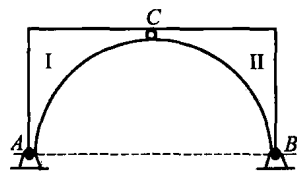
这类约束不能限制物体沿约束表面切线方向的位移,只能阻碍物体沿接触表面法线并向约束内部的位移。因此,光滑支承面对物体的约束反力,作用在接触点处,方向沿接触表面的公法线,并指向受力物体。这种约束反力称为法向反力,通常用 F_N 表示。

3. 光滑铰链约束

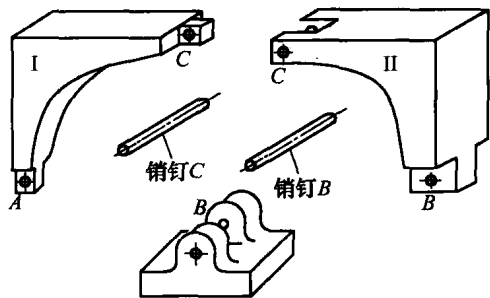
(1) 圆柱铰链和固定铰链支座

图 1-7(a) 所示的拱形桥,由左右两拱通过圆柱铰链 C 以及固定铰链支座 A 和 B 连接而成。

圆柱铰链简称铰链,由销钉 C 将两个钻有同样大小孔的构件连接在一起而成。如图 1-8 所示,约束反力过销中心,大小和方向不能确定,通常用正交的两个分力表示。



(a)



(b)

图 1-7

如果两个构件中有一个固定在地面或者机架上,则这种约束就称为固定铰链支座,简称固定铰支。如图 1-9 所示,其约束反力与圆柱铰链性质相同,反力过销中心,大小和方向不能确定,通常也用正交的两个分力表示。

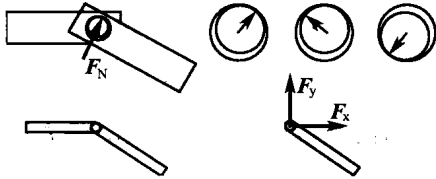


图 1-8

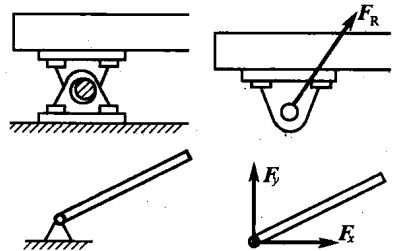


图 1-9

(2) 活动铰链支座

活动铰链支座又称辊轴支座,是在固定铰链支座与光滑支承面之间,装有几个辊轴而构成。如图 1-10 所示,辊轴支座的约束性质与光滑接触面约束相同,其约束力必垂直于支承面,且通过铰链中心。

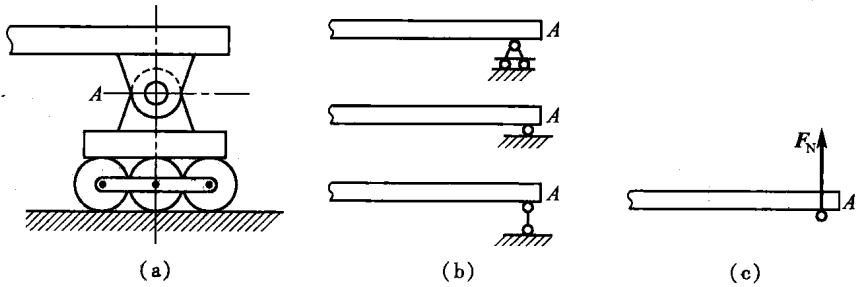


图 1-10

(3) 向心轴承

向心轴承又称径向轴承,如图 1-11 所示,其约束反力与圆柱铰链性质相同,反力过

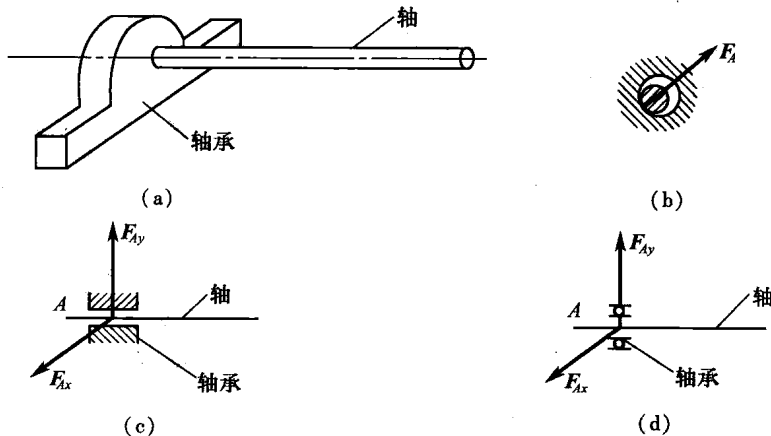


图 1-11

销中心,大小和方向不能确定,通常用正交的两个分力表示。

4. 光滑的球形铰链

通过圆球和球壳将两个构件连接在一起的约束称为球铰链,如图 1-12 所示。它限制了球心的位移,但构件可绕球心任意转动。其约束力应通过接触点与球心,但方向不能预先确定,可用正交的三个分力来表示。

5. 止推轴承

如图 1-13 所示为止推轴承。与径向轴承不同,止推轴承除了能限制轴的径向位移以外,还能限制轴沿轴向位移。因此,它比径向轴承多一个沿轴向的约束力,即其约束力有三个正交分量。

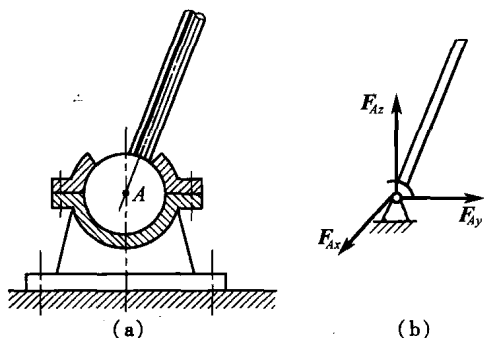


图 1-12

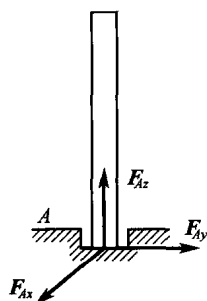


图 1-13

以上介绍了几种简单约束,在工程实际中,约束的类型远不止这些,有的约束比较复杂,分析时需要进行简化或抽象,在以后的章节中,将再详细地加以介绍。

1.4 物体的受力和受力图

在工程实际中,为了求出未知的约束反力,需要根据已知力,应用平衡条件来求解。为此,首先要确定构件受了几个力、每个力的作用位置和力的作用方向,这个过程称为物体的受力分析。

解决力学问题时,必须首先分析物体的受力情况。要根据问题选定需要进行研究的物体,将其从周围的物体中分离出来,单独画出其简图,这个步骤叫做确定研究对象,或取分离体。然后将分离体所受的主动力和约束反力,以力矢表示在分离体上,所得到的图形称为受力图。画物体的受力图是解决静力学问题的一个重要步骤。

例 1-1 用力 F 拉动碾子以压平路面,碾子受到一石块的阻碍,如图 1-14(a) 所示。试画出碾子的受力图。

解 (1) 取碾子为研究对象,并单独画出其简图。

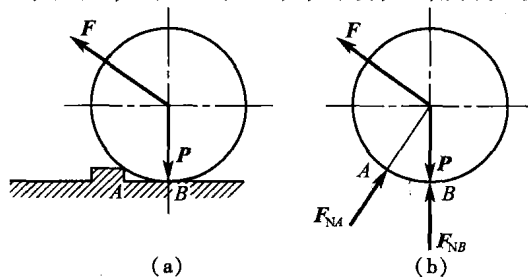


图 1-14

(2)画主动力。有重力 P 和碾子中心受到的拉力 F 。

(3)画约束反力。碾子在 A 和 B 两处受到石块和地面的光滑约束,因此在 A 处和 B 处受到石块与地面的法向反力 F_{NA} 和 F_{NB} 的作用,均沿碾子上接触点的公法线而指向圆心。

受力图如图 1-14(b)所示。

例 1-2 如图 1-15(a)所示结构,试画 AD, BC 的受力图(不计各杆的自重)。

解 (1)先分析曲杆 BC 的受力。容易判断,由于 BC 杆只在 B, C 两点处受力,即 BC 杆仅受两个力的作用而处于平衡状态,因此 BC 杆是二力杆,由此可确定 F_B 和 F_C 大小相等、方向相反并在同一条直线上,受力图如图 1-15(b)所示。

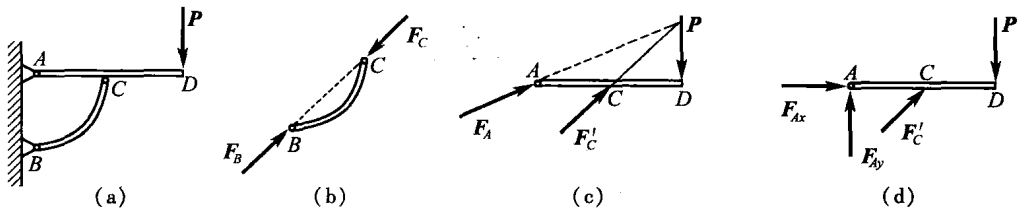


图 1-15

(2)再分析杆 AD 的受力。先画出主动力 P 。在 C 点处 AD 受到 BC 给它的约束反力 F'_C 的作用,这个力与 BC 杆所受的力 F_C 符合作用与反作用定律。由于 AD 杆在 A, C, D 三处受力,符合三力平衡汇交定理的条件,可确定 A 点受力 F_A 的方向,受力图如图 1-15(c)所示。另外,也可对 A 点受力正交分解而不使用三力平衡汇交定理,如图 1-15(d)所示,这种受力分析对后面列写投影平衡方程的步骤来说会更加方便。

例 1-3 由水平杆 AB 和斜杆 BC 构成的管道支架如图 1-16(a)所示。在 AB 杆上放一重为 P 的管道, A, B, C 处都是铰链连接,不计各杆的自重,各接触面都是光滑的。试分别画出水平杆 AB 、斜杆 BC 及整体的受力图。

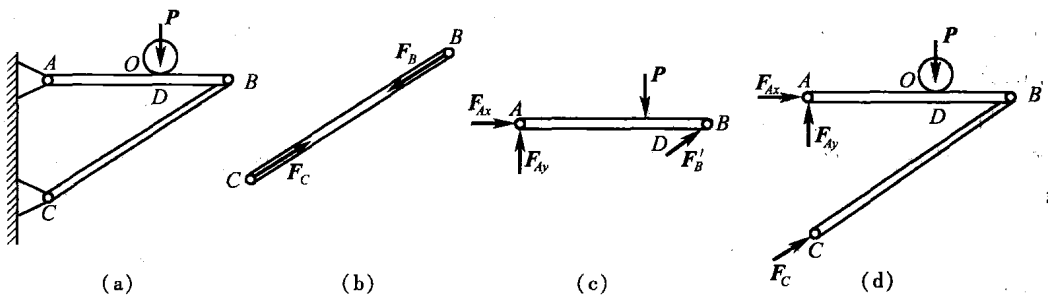


图 1-16

解 (1)分析斜杆 BC 的受力。易见斜杆 BC 为二力杆,受力如图 1-16(b)所示。

(2)分析水平杆 AB 的受力。受力如图 1-16(c)所示。

(3)分析整体的受力。当对整体作受力分析时,铰链 B 处所受的力 F_B 和 F'_B 互为作用力与反作用力,这两个力成对地作用在整个系统内,故称为系统的内力。内力对系统