

“十二五”国家重点图书出版规划项目

航天科学与工程专著系列

工程力学

GONGCHENG LIXUE

主编 郭颖 李恒伟 唐玉玲
主审 陆夏美

“十二五”国家重点图书出版规划项目

航天科学与工程专著系列

工程力学

主编 郭颖 李恒伟 唐玉玲
主审 陆夏美

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本教材依据教育部工科力学指导小组制定的中、少学时“工程力学”课程的基本要求编写。全书共14章和两个附录,内容包括静力学和材料力学两部分。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;材料力学包括材料力学基本假设与基本概念、轴向拉伸与压缩、剪切、扭转、平面弯曲、应力状态分析、强度理论、组合变形的强度计算和压杆稳定等方面的内容。

本书可作为高等院校理工科类电气、高分子、无机等专业中、少学时的工程力学课程教材,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

工程力学/郭颖,李恒伟,唐玉玲主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.6

(航天科学与工程专著系列)

ISBN 978-7-5603-5384-5

I. ①工… II. ①郭…②李…③唐… III. ①工程力学—高等学校—教材 IV. ①TB12.

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 112391 号

策划编辑 杨秀华
责任编辑 杨秀华
封面设计 刘长友
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 16 字数 379 千字
版 次 2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-5384-5
定 价 36.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

“工程力学”是高等工科院校普遍开设的技术基础课程,涉及众多的力学学科分支与广泛的工程技术领域,是一门理论性较强、与工程技术联系极为密切的学科。

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)”和“材料力学课程教学基本要求(B类)”,并结合近年来编者讲授的“工程力学课程”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,编者力求做到语言精练严谨、内容繁简得当,注重理论联系工程实际,并注意与后续课程的衔接,具有较强的教学适用性。

全书分静力学和材料力学两篇,共 14 章和两个附录。其中静力学四章,材料力学八章。重点讲述了在平面和空间力系作用下物体系统的平衡、考虑摩擦的平衡、轴向拉压、剪切、扭转和弯曲四种基本变形下的强度和刚度的计算、组合变形的强度计算及压杆的稳定性计算等内容。

本书由哈尔滨理工大学、天津科技大学、哈尔滨商业大学等院校老师联合编写,参编者包括哈尔滨理工大学郭颖(第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章)、李恒伟(第 11 章、第 12 章、第 13 章、第 14 章),天津科技大学唐玉玲(第 6 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章),哈尔滨商业大学杨银环(第 5 章、第 10 章、附录 I、附录 II),本书由郭颖、李恒伟、唐玉玲任主编,全书由郭颖统稿。由哈尔滨理工大学陆夏美教授主审。

本书在编写过程中参考了很多优秀教材(见参考文献),吸取了这些教材的长处,在此向这些教材的编者表示衷心的感谢。

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

2015 年 4 月

目 录

第 1 篇 静力学

第 1 章 静力学基本知识和物体的受力分析	3
1.1 静力学基本概念	3
1.2 静力学公理	3
1.3 约束和约束反力	5
1.4 物体的受力分析和受力图	8
习题	11
第 2 章 平面力系	14
2.1 平面汇交力系	14
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	21
2.5 平面任意力系的平衡条件	24
2.6 物体系统的平衡 静定和静不定问题的概念	26
习题	30
第 3 章 摩擦	37
3.1 摩擦的概念	37
3.2 考虑摩擦的平衡问题	40
习题	43
第 4 章 空间力系	46
4.1 空间汇交力系	46
4.2 空间力对点之矩与力对轴之矩	48
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 2 篇 材料力学

第 5 章 材料力学的基本概念	63
5.1 材料力学的任务	63
5.2 变形固体的基本假设	64
5.3 杆件变形的基本形式	65
5.4 外力 内力 截面法	66
5.5 应力 应变 胡克定律	68
习题	71
第 6 章 轴向拉伸与压缩	73
6.1 轴向拉伸与压缩的概念	73
6.2 轴向拉压时横截面上的内力与应力	73
6.3 轴向拉压时斜截面上的应力	76
6.4 轴向拉压时的强度计算	77
6.5 轴向拉(压)时材料的力学性能	80
6.6 轴向拉(压)时的变形	84
6.7 轴向拉压时的超静定问题	86
6.8 应力集中的概念	89
习题	90
第 7 章 剪切	94
7.1 剪切的概念	94
7.2 剪切和挤压的实用计算	95
习题	100
第 8 章 扭转	103
8.1 扭转的概念	103
8.2 外力偶矩与扭矩的计算 扭矩图	103
8.3 圆轴扭转时的应力和强度计算	105
8.4 圆轴扭转时的变形和刚度计算	110
8.5 圆轴扭转时的破坏现象分析	113
8.6 非圆截面杆的扭转简介	114
习题	116
第 9 章 弯曲内力	121
9.1 平面弯曲的概念	121
9.2 梁的弯曲内力 剪力图和弯矩图	122
9.3 外力与剪力和弯矩间的微分关系	127
9.4 叠加法作剪力图和弯矩图	131

9.5	平面刚架和曲杆的内力图	132
	习题	134
第10章	弯曲强度	139
10.1	纯弯曲时梁横截面上的正应力	139
10.2	横力弯曲时梁横截面上的正应力及强度计算	142
10.3	横力弯曲时梁横截面上的切应力及强度计算	145
10.4	提高梁弯曲强度的措施	149
	习题	151
第11章	弯曲变形	157
11.1	弯曲变形的概念	157
11.2	挠曲线的近似微分方程	158
11.3	梁弯曲变形计算的积分法	159
11.4	梁弯曲变形计算的叠加法	162
11.5	简单超静定梁	165
	习题	166
第12章	应力和应变状态分析 强度理论	170
12.1	应力状态的概念	170
12.2	平面应力状态分析的解析法	172
12.3	平面应力状态分析的图解法	175
12.4	空间应力状态简介	178
12.5	平面应变状态分析简介	180
12.6	广义胡克定律	181
12.7	复杂应力状态下的应变比能	183
12.8	强度理论的概念	184
12.9	经典强度理论	185
	习题	189
第13章	组合变形	197
13.1	组合变形的概念	197
13.2	斜弯曲	197
13.3	拉伸或压缩与弯曲的组合变形	199
13.4	弯曲与扭转组合变形的强度计算	203
	习题	207
第14章	压杆稳定	214
14.1	压杆稳定性概念	214
14.2	细长压杆的临界力	215
14.3	欧拉公式的应用范围 临界应力总图	217

14.4	压杆稳定性计算	220
14.5	提高压杆稳定性的措施	222
	习题	223
附录 I	平面图形的几何性质	227
附录 I.1	静矩和形心	227
附录 I.2	惯性矩 极惯性矩 惯性积 惯性半径	228
附录 I.3	平行移轴公式	230
附录 I.4	转轴公式 主惯性轴 形心主惯性轴	232
	习题	233
附录 II	型钢表	237
参考文献		248

第1篇 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,力系中各力叫作该力的分力。相应的,将一个力系等效替换为一个力叫作力的合成,将一个力等效替换为一个力系叫作力的分解。

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 。

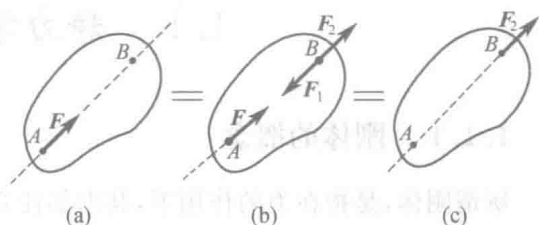


图 1.1

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

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 \quad (1.1)$$

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。

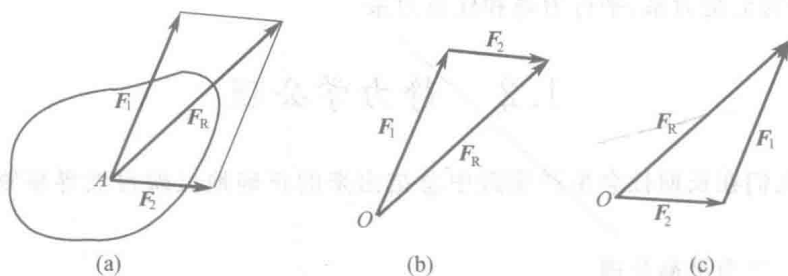


图 1.2

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。

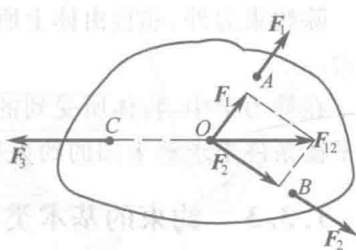


图 1.3

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,属于这类约束。

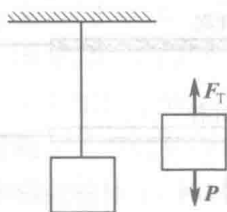


图 1.5

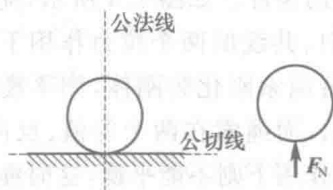


图 1.6

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。

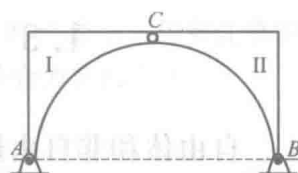
3. 光滑铰链约束

(1) 圆柱铰链和固定铰链支座

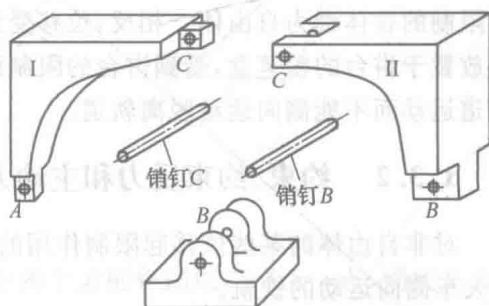
图 1.7(a) 所示的拱形桥,由左右两拱通过圆柱铰链 C 以及固定铰链支座 A 和 B 连接而成。

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。

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



(a)



(b)

图 1.7

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。

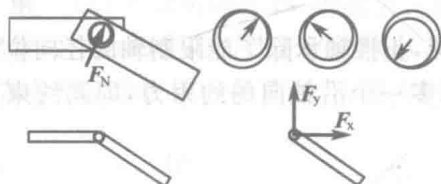


图 1.8

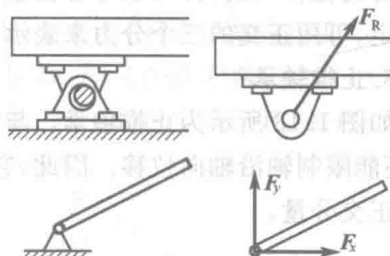


图 1.9

(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。

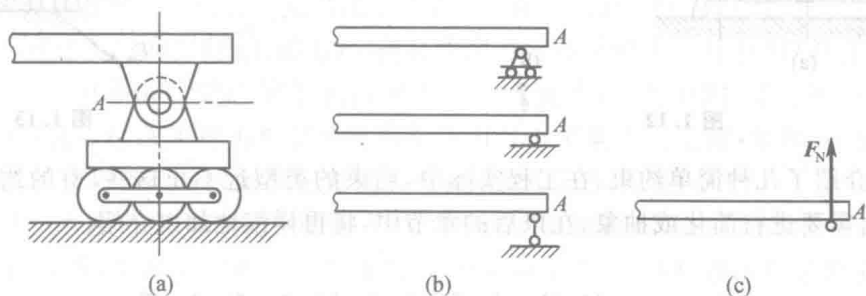


图 1.10

(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,反力过销中心,大小和方向不能确定,通常用正交的两个分力表示。

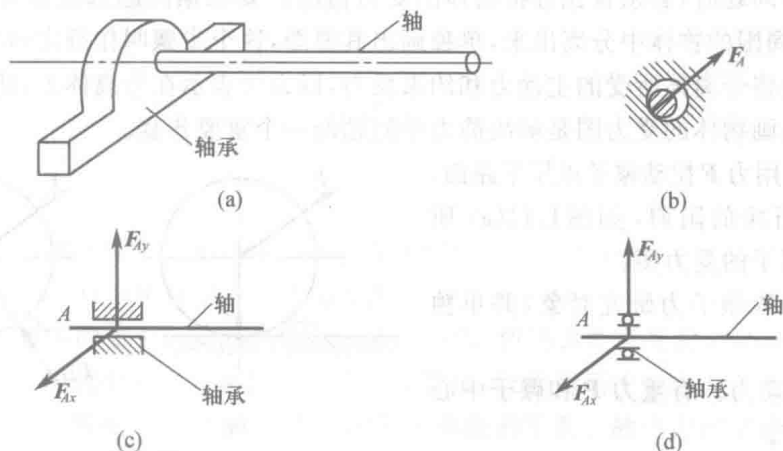


图 1.11

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。

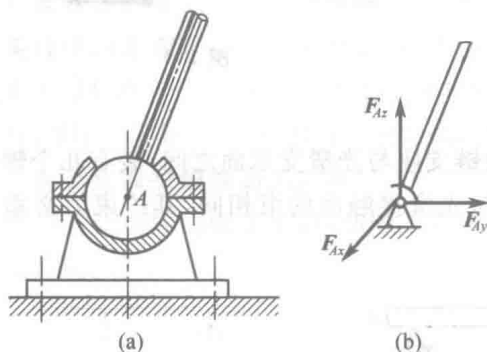


图 1.12

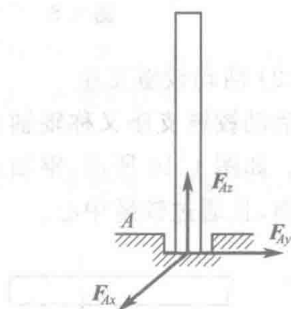


图 1.13

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,这个步骤叫作确定研究对象,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。

(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

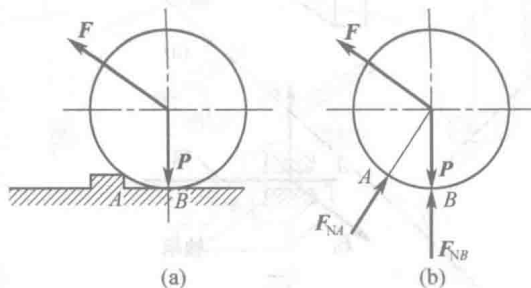


图 1.14

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。

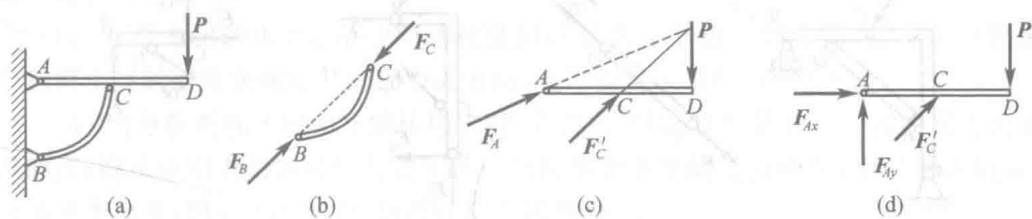


图 1.15

(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。

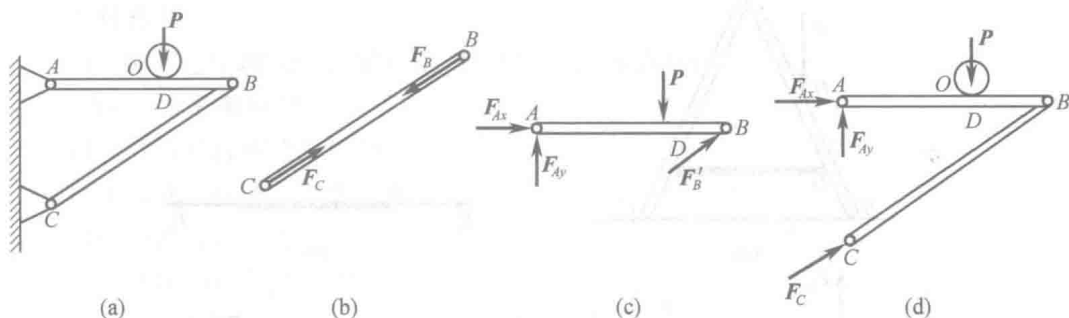


图 1.16

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。内力对系统的作用效果相互抵消,因此可以除去,并不影响整个系统的平衡。故内力在整体受力图上不必画出。在受力图上只需画出系统以外的物体给系统的作用力,这种力称为外力。系统的