

理论力学

主编/王正浩 主审/生涛

辽宁民族出版社

高等学校教材

理论力学

主 编 王正浩
主 审 生 涛

辽宁民族出版社

图书在版编目(CIP)数据

理论力学/王正浩主编. —沈阳:辽宁民族出版社,

2001.7

高等学校教材

ISBN 7-80644-505-6

I.理… II.王… III.理论力学-高等学校-教材 IV.013

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 045030 号

辽宁民族出版社出版发行

(沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮政编码 110003)

沈阳农业大学印刷厂印刷

字数:180 千字 开本:787×1092 1/16 印张:9.5
2001 年 9 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

责任编辑:权春哲 责任校对:张启发
封面设计:杜 江

印数:1—1000 定价:18.00 元

前 言

本教材是根据高等工业学校理论力学课程教学基本要求(50~60学时)编写的。可作为工科院校理论力学课程的教材,也可供函授、夜大、电大等作教学参考书。研究分析现有教材,总结多年来的教学实践,是编写这本理论力学简明教程的基础。在编写中,注意到当前学生的水平,以及大学物理、高等数学等课程的教学情况,适当提高起点,减少了一些不必要的重复,删去了一些不必要的繁琐证明和推导过程,为学生留有较大的思维空间,有利于创新人才的培养。

参加本教材编写的人员有:王正浩(第一章~第六章)、孙雅珍(第七章~第十章)、周俊(第十一章~第十四章)。全书由王正浩统一组稿。承生涛教授审阅,并提出了许多宝贵意见,编者对此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中错误和疏漏之处在所难免,诚请读者批评指正。

编 者

2001年6月

目 录

绪论	(1)
----	-----

第一篇 静力学

第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析	(2)
第一节 静力学的基本概念	(2)
第二节 静力学公理	(2)
第三节 约束和约束反力	(5)
第四节 物体的受力分析和受力图	(7)
习 题	(8)
第二章 平面汇交力系	(12)
第一节 力在轴上的投影	(12)
第二节 平面汇交力系的合成	(13)
第三节 平面汇交力系的平衡条件	(14)
习 题	(16)
第三章 力对点的矩·平面力偶理论	(18)
第一节 力对点的矩·合力矩定理	(18)
第二节 平面力偶理论	(20)
第三节 平面力偶系的合成和平衡条件	(21)
习 题	(22)
第四章 平面任意力系	(25)
第一节 力的平移定理	(26)
第二节 平面任意力系向一点简化	(26)
第三节 平面任意力系简化的最终结果·合力矩定理	(29)
第四节 平面任意力系平衡条件	(31)
第五节 静定与静不定问题·物体系统的平衡	(33)
第六节 静定平面桁架内力的计算	(37)
习 题	(38)
第五章 空间力系·重心	(43)
第一节 力对轴的矩	(43)
第二节 力对点的矩矢	(44)
第三节 合力矩定理·重心和形心	(44)
习 题	(47)
第六章 摩擦	(48)
第一节 滑动摩擦	(48)

第二节 摩擦角和自锁现象	(49)
第三节 考虑摩擦的平衡问题	(50)
习 题	(53)

第二篇 运动学

第七章 点的运动学	(55)
第一节 点的运动矢量表示法	(55)
第二节 点的运动直角坐标表示法	(56)
第三节 点的运动自然表示法	(58)
习 题	(63)
第八章 刚体的基本运动	(65)
第一节 刚体的平行移动	(65)
第二节 刚体的定轴转动	(66)
第三节 定轴转动刚体内各点的速度和加速度	(67)
习 题	(69)
第九章 点的合成运动	(71)
第一节 合成运动的概念	(71)
第二节 点的速度合成定理	(72)
第三节 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	(75)
习 题	(76)
第十章 刚体的平面运动	(80)
第一节 运动方程与平面运动的分解	(80)
第二节 平面图形上各点速度分析——基点法和投影法	(81)
第三节 平面图形上各点速度分析——瞬心法	(82)
第四节 平面图形内各点的加速度	(85)
习 题	(87)

第三篇 动力学

第十一章 质点运动微分方程	(93)
第一节 动力学基本定律	(93)
第二节 质点运动微分方程	(93)
第三节 质点动力学的两类问题	(94)
第十二章 动量定理	(98)
第一节 动量和冲量	(98)
第二节 动量定理	(100)
第三节 质心运动定理	(104)
习 题	(107)
第十三章 动量矩定理	(110)
第一节 动量矩	(110)
第二节 转动惯量	(111)

第三节	动量矩定理	(114)
第四节	刚体绕定轴转动的微分方程	(117)
习 题		(118)
第十四章	动能定理	(122)
第一节	力的功	(122)
第二节	几种常见力的功	(123)
第三节	动能	(127)
第四节	动能定理	(129)
习 题		(134)
习题答案		(139)

绪 论

理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。

机械运动是指物体在空间中的位置随时间的变化,它是自然界中最基本最普遍的运动形式。

理论力学以刚体、质点、质点系作为研究对象,以牛顿定律为理论基础,通过一系列的公理、定理、原理来揭示物体机械运动的普遍规律,这些内容属于古典力学的范畴。本世纪初,量子力学、相对论力学的巨大成就,说明古典力学的适用范围,仅限于运动速度远小于光速的宏观物体。这个局限性并不有损于古典力学的价值,因为相对论力学对古典力学提出的数量修正仅在物体速度大到可以和光速相比拟的情况下才有实际意义。现代工程技术中,相当多的专业甚至航天技术中所考察的物体仍是远小于光速的宏观物体,有关力学问题的研究,仍以古典力学为依据。用古典力学解决问题,不仅方便,而且能够保证足够的精确性。

为了便于接受和掌握,本书先后讲述三部分内容:

静力学——研究物体在力系作用下的平衡规律,以及物体的受力分析和力系简化的方法。

运动学——研究物体机械运动的几何性质(如轨迹、速度、加速度等)。

动力学——研究物体的机械运动与所受的力之间的关系。

理论力学是一门理论性较强的技术基础课。学习本课程的目的在于认识机械运动的客观规律,并应用这些规律和其他专业知识解决工程实际问题,同时为材料力学、结构力学等后继课程提供重要的理论基础。此外,掌握机械运动的规律,理解力学的研究方法,有助于培养辩证唯物主义世界观,提高分析、解决问题的能力。

第一篇 静力学

静力学是研究物体的受力分析、力系的等效替换(或简化)和各种力系平衡条件的科学。

物体的受力分析 工程中存在各种各样的结构和机构,它们的受力状态如何,是人们关心的问题之一。静力学就是要对物体进行受力分析,首先定性地给出物体的受力情况,画出物体的受力图,然后才能给以定量的求解。物体的受力分析是静力学主要研究的问题之一。

力系的等效替换(或简化) 实际中存在各种各样的力系,其实际分布比较复杂,如何用一个比较简单的力系去等效代替一个比较复杂的力系,进而确定复杂力系对物体的总效应,并为建立各种力系的平衡条件打下基础,是静力学主要研究的问题之二。

各种力系的平衡条件 实际中存在各种各样的力系,其平衡时均应满足一定的条件,究竟应满足什么样的条件?研究与建立各种力系的平衡条件,并应用这些条件去解决实际问题,是静力学主要研究的问题之三。

第一章 静力学的基本概念和物体的受力分析

第一节 静力学的基本概念

1. 平衡: 物体相对于地面保持静止或作匀速直线运动或作匀速转动的状态,称为平衡状态。

2. 力系: 同时作用在物体上的一组力称为力系。使物体处于平衡状态的力系称为平衡力系。两个力系如果对物体作用效果相同,则此两个力系互称为等效力系。在效应相等的条件下,将一力系转换为比较简单的力系的过程,称为力系的简化。

3. 刚体: 在力作用下不变形的物体称为刚体。刚体内任意两点间的距离永不改变。刚体是一个理想化的力学模型,自然界中不存在刚体。在理论力学中主要研究力对物体的运动效应,不研究力对物体的变形效应,如果物体变形极小对研究运动效应影响甚微,则可略而不计,将物体抽象化为刚体,这是科学研究中所必需的方法。

第二节 静力学公理

静力学公理是在力的概念逐步形成的同时,人们对力的基本性质所进行的概括和总结。公理是以实验观察为依据并为实践反复所证明的客观规律,是人们对客观事物的理性认识。静力学公理是整个静力学的理论基础。

1. 二力平衡公理

作用于一刚体上的两个力,使刚体维持平衡的充分与必要条件是:这两个力等值、反向、共

线。

此公理只适用于刚体,对于变形体并非充分条件。例如,软绳受等值、反向、共线的两个拉力作用时可以平衡,如果是压力则不可能平衡。

只受两个力作用并处于平衡状态的物体(杆件)称为二力体(二力杆)。其特点是:所受的两个力一定等值、反向、共线。

例如:不计质量的 BO 直角杆,分别在 B 和 O 两点各受一个力作用并处于平衡(图 1—1),如杆受压,则直角杆的受力图如图 1—1 所示。

2. 力的平行四边形公理

作用在物体上同一点的两个力可以合成为一个合力,此合力也作用在该点,合力的大小、方向以原两力矢为邻边的平行四边形的对角线表示(图 1—2a)。

以 R 表示力 F_1 和 F_2 的合力,则

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

求合力时,可用力的三角形法则。即分力矢 F_1 与 F_2 首尾相

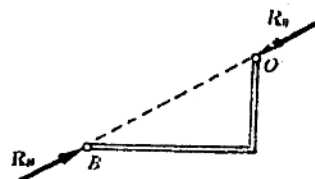
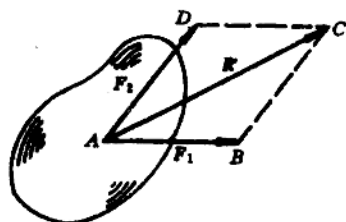
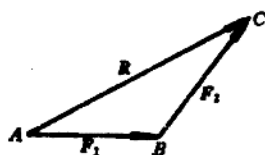


图 1—1



(a)



(b)

图 1—2

接,则 F_1 首端 A 至 F_2 尾端 C 为合力矢 R (图 1—2b)。

根据力的平行四边形公理,可将一个力分解为两个分力。

例如,可将力 R 分解为两个分力 F_1 和 F_2 或 F'_1 和 F'_2 (图 1—3)。

3. 作用与反作用公理

两物体间的相互作用力,总是成对出现,一个力称为作用力,另一个力称为反作用力,这两个力的关系是:等值、反向、共线,分别作用在这两个物体上。

4. 加减平衡力系公理

在作用于刚体的已知力系中;加上或减去一个平衡力系,并不改变原力系对刚体的作用效应。

此公理只适用于刚体。例如软绳 AB 受拉平衡($F_1 = -F_2$)。如果加上平衡力系(R_1, R_2),且 $R_1 > F_1, R_2 > F_2$,软绳将失去平衡(图 1—4)。

推论 1. 力的可传性原理

作用在刚体上的力可沿其作用线滑动到该刚体上的任一点,而不改变此力对刚体的作用效应。

证明:设力 F 作用于刚体的点 A (图 1—5a)。在力的作用线上任取一点 B ,并在点 B 加上两

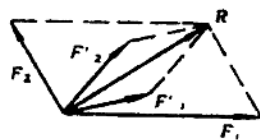


图 1—3

个等值、反向、共线的力 F_1 和 F_2 , 使 $F_1 = -F_2 = F$ (图 1-5b)。根据加减平衡力系公理, 所得力系 (F 、 F_1 、 F_2) 与原力 F 等效。因为 F 和 F_2 也是一个平衡力系, 故可去掉, 剩下的力 F_1 (图 1-5c) 与力系 (F 、 F_1 、 F_2) 等效, 即力 F_1 与力 F 等效。这样, 就把原来作用在点 A 的力 F 沿其作用线移到了点 B 。



图 1-4

力的可传性原理只适用于刚体。根据力的可传性原理可知, 力在刚体上的作用点已为力的作用线所代替, 于是作用于刚体上的力的三要素可表达为: 力的大小、方向和作用线。因此, 作用于刚体上的力是滑动矢量。

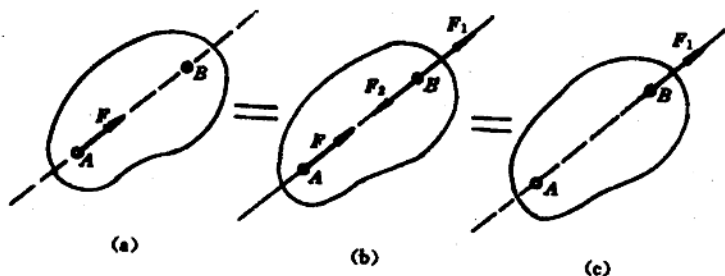


图 1-5

推论 2. 三力平衡汇交原理

刚体在三个不平行的力作用下平衡, 这三个力必位于同一平面, 且作用线汇交于一点。

证明: 设平衡刚体上 A 、 B 、 C 三点分别作用于力 F_1 、 F_2 和 F_3 (图 1-6), 其中 F_1 和 F_2 作用线汇交于 O 点。根据力的可传性原理, 将 F_1 和 F_2 移到 O 点, 再应用力的平行四边形公理将 F_1 和 F_2 合成为一个力 R 。此时刚体处于二力平衡状态, 故 F_3 与 R 共线, 即力 F_3 作用线通过 O 点, 且 F_3 与 F_1 、 F_2 共面。

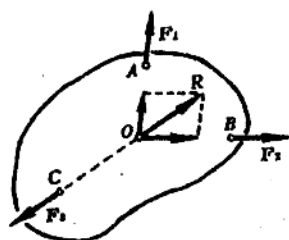


图 1-6

例如, 不计质量的 ABC 杆, 分别在 A 、 B 和 C 点各受一个力作用而平衡 (图 1-7a), F_A 和 F_B 已知, 则杆在 C 点所受的力 F_C 的作用线必过 F_A 、 F_B 二力作用线的交点 (图 1-7b)。

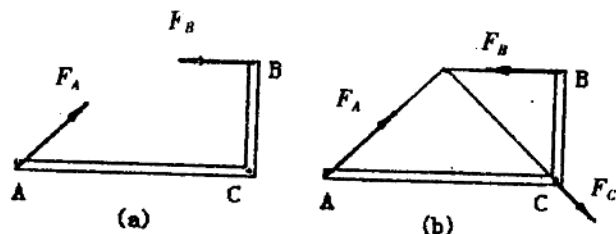


图 1-7

第三节 约束和约束反力

对物体的某些位移起限制作用的周围物体称为约束。例如,铁轨对于机车,轴承对于电机转轴,吊车钢索对于重物等,都是约束。既然约束限制着物体的运动,也就是约束能够起到改变物体运动状态的作用,所以约束对物体的作用,实际上就是力,这种力称为约束反力,简称反力。因此,约束反力的方向必与该约束所能够限制的物体的运动方向相反。根据这个准则,可以确定约束反力的方向或作用线位置。与约束反力相对应,能够引起物体运动状态改变的力称为主动力,例如重力、风力、水压力等。主动力在工程中也称为荷载。在静力学中,物体受的主动力与约束反力组成平衡力系,因此可利用平衡条件确定约束反力。

下面介绍几种工程实际中常见的简单的约束类型和约束反力的确定方法。

1. 柔索

由不可伸长的柔软的绳索、链条或皮带等构成的约束称为柔索。柔索只能承受拉力,不能承受压力,因此只能限制物体沿柔索伸长方向的运动。所以柔索对物体的约束反力,作用在接触点,方向沿柔索中心线,背离物体提供拉力。通常用 T 表示这类约束反力(图 1—8)。

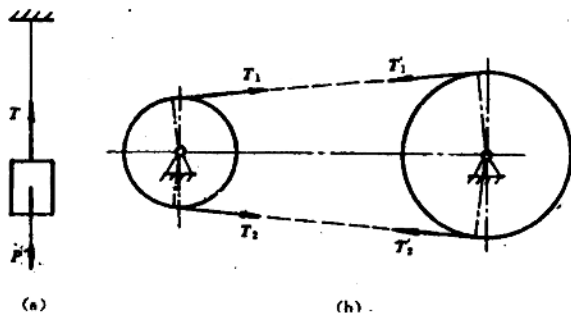


图 1—8

2. 光滑接触面

当忽略两物体接触面间的摩擦时,可视为光滑接触。例如,支持物体的固定平面(图 1—9)、啮合齿轮的齿面(图 1—10)、机床中的导轨等,都属于这类约束。

光滑接触面不能限制物体沿表面切线的位移,只能阻碍物体沿接触表面法线并向约束内部的位移。根据确定约束反力方向的

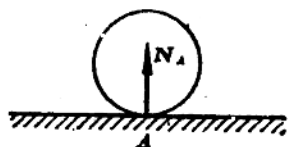


图 1—9

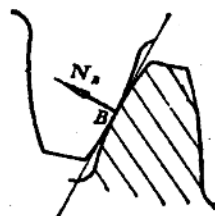


图 1—10

准则,可知光滑接触面的约束反力,作用在接触面(点)处,方向沿接触面的公法线,指向受力物体。这种约束反力称为法向反力,用 N 表示(图 1—9,图 1—10,图 1—11)。

3. 光滑圆柱铰链

钻有圆孔的物体 A 和 B (图 1—12a),将销钉 C 插入两物体的圆孔中(图 1—12b),构成一个铰链,这种连接称为铰链连接,简称铰接。因铰接位置不同,可用不同形式的简图表示铰接(图 1—12c)。

物体 A 和物体 B 均与销钉 C 接触,不考虑摩擦时,为光滑圆柱面接触,所以销钉对被连接件(物体 A 或物体 B)的作用力 N 作用于接触点 K ,作用线沿接触面的公法线,即通过孔中心(图 1—13a)。因接触点的位置一般不能确定,故常表示为过孔的中心相互正交的两个分力(图 1—13b)。

4. 固定铰支座

若将铰接的两个构件中的一个构件与基础固定在一起,便构成了固定铰支座(图1-14a)。计算简图可用不同的形式(图1-14b)。约束反力分析与铰接相同(图1-14c)。

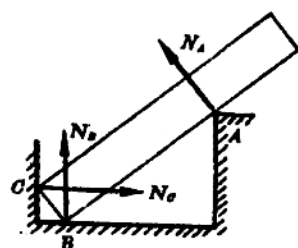
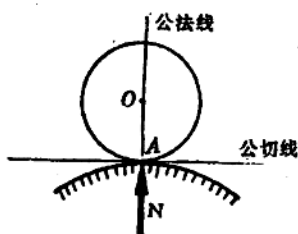


图 1-11

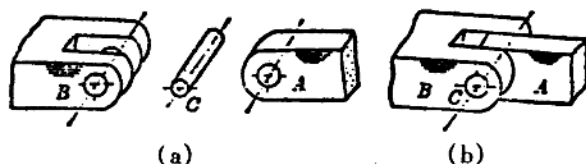


图 1-12

5. 辊轴支座

在固定铰支座下面,装上一排滚子或类似滚子的物体,就构成了滚动支座,又称为辊轴支座或活动支座,如图1-15a所示,简图如图1-15b所示。在桥梁、屋架等结构中,其一端常采用滚动支座,以适应结构的热胀冷缩现象。滚动支座的约束反力必垂直于支承面,通过销钉中心,如图1-15b所示。

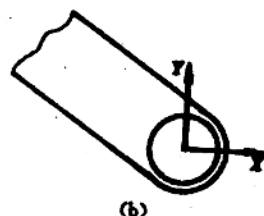
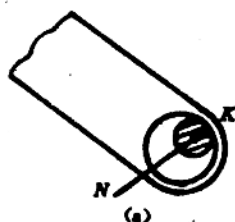


图 1-13

6. 链杆

不计自重,借助两个光滑铰链与其他物体连接的杆件称为链杆

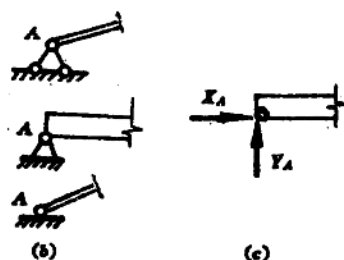
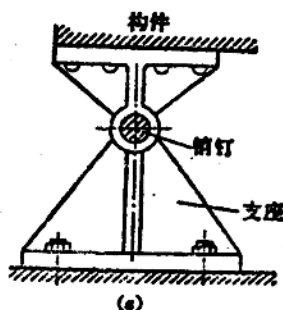


图 1-14

(图1-16a、b)。链杆中间不受其他力作用,即链杆是二力杆。链杆只能限制物体沿链杆中心线方向的运动,不能限制其他方向的运动,所以链杆约束反力的作用线沿链杆中心线,可能是拉力,也可以是压力(图1-16c)。

以上只介绍了几种常见的简单约束,在工程实际中,约束的类型远不止这些。

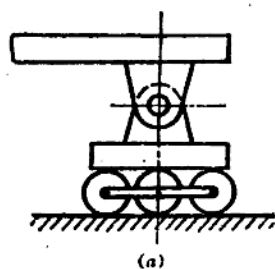


图 1—15

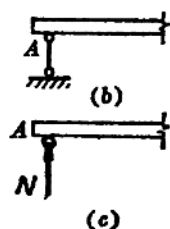
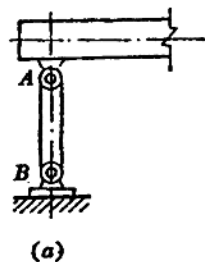
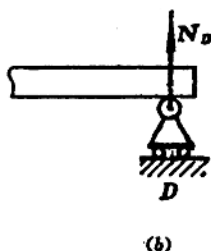


图 1—16

第四节 物体的受力和受力图

在静力学中,为了求出未知的约束反力,需要根据已知力,应用平衡条件求解。为此,首先要确定物体受哪些力,这个分析过程称为物体的受力分析。物体受力分析是静力计算的基础,必须熟练掌握。

为了清晰地表示物体的受力情况,需要把研究的物体(受力体)从周围的物体(施力体)中分离出来,单独画出它的简图,这个步骤叫做取研究对象(取分离体),然后把施力物体对研究对象的作用力全部画出来,这种表示物体受力的简明图形,称为受力图。

在画受力图时,主要是根据分离体所承受的约束类型,正确判断每个约束反力的作用点,方向等特征。

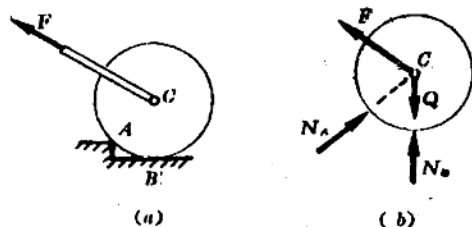


图 1—17

例 1—1 用力 F 拉动重为 Q 的碾子以压平路面,碾子受到台阶的阻碍(图 1—17a),试画出碾子平衡时的受力图。

解:

(1) 取碾子为研究对象,画出简图。

(2) 画主动力。主动力有拉力 F 和重力 Q 。

(3) 画约束反力。约束反力有 N_A 和 N_B 。A、B 处均为光滑接触面,其反力应作用于接触点,沿公法线并指向碾子。受力图如图 1—17b 所示。

例 1—2 三铰拱桥由左、右两拱铰接而成(图 1—18a)。设各拱自重不计,在拱 AC 上作用有载荷 P 。试分别画出拱 AC、CB 和整体受力图。

解:

(1) 先分析拱 BC 的受力。由于拱 BC 自重不计,且只有 B、C 两处受到铰链约束,因此拱 BC 为二力体。根据二力体平衡公理,可画出 BC 的受力图(图 1—18b)。

(2) 分析拱 AC 的受力。由于自重不计,因此主动力只有载荷 P 。拱在 C 处受有拱 BC 给它的约束反力 S_C' 的作用,根据作用与反作用公理,知 $S_C' = -S_C$ 。拱在 A 处受有固定铰支座给它的约束反力 N_A 的作用,可用两个正交分力 X_A 和 Y_A 表示(图 1—18c)。

进一步分析可知,拱 AC 只受三个力作用而平衡,根据三力平衡汇交定理,可以确定 N_A 方

位(图 1—18d),至于 N_A 指向,以后由平衡条件确定。

(3) 分析整体的受力。整体所受的主动外力只有荷载 P 。整体在 A 处和 B 处受有固定铰支座给它的约束反力的作用。根据拱 BC 和 AC 分别在 B 处和 A 处所受到的约束反力,不难得到整体的受力图(整体受力图请读者自行完成)。

需要指出的是,当选整体为研究对象时,由于铰链 C 处所受的力互为作用力与反作用力关系,即 $S_C = -S_C'$,成对地作用在整个系统内,故称为内力。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。这里,荷载 P 和约束反力 S_B 、 N_A (或 X_A 和 Y_A) 就是作用于整个系统的外力。

当把右半拱 BC 作为研究对象时, S_C 属于外力,但当取整体为研究对象时, S_C 又成为内力。

正确地画出物体的受力图,是分析、解决力学问题的基础。有关画受力图时必须注意之点归纳如下:

1. 必须明确研究对象。根据解题的需要,可以取单个物体为研究对象,也可以取由几个物体组成的系统为研究对象。
2. 正确分析研究对象的受力数目。由于力是物体之间相互的机械作用,因此,对每一个约束反力都应明确它是哪一种约束施加给研究对象的,决不能凭空产生。同时,也不可漏掉一个力。
3. 正确画出约束反力。一个物体往往同时受到几个约束的作用,这时应分别根据每个约束单独作用时,由该约束本身的特性来确定约束反力的方向,而不能凭主观臆测。
4. 几个物体相互接触情况。它们之间的相互作用、关系按作用与反作用公理来分析。当画整个系统受力图时,只画出外力,不画内力。

习 题

1—1 说明下列等式的意义。

(1) $F_1 = F_2$; (2) $F_1 = F_2$; (3) $R = F_1 + F_2$; (4) $R = F_1 + F_2$; (5) F_1 与 $-F_2$ 等效。

1—2 什么叫二力构件?分析二力构件受力时与构件的形状有无关系?

1—3 下列各物体的受力图是否有错误?如何改正?

1—4 画出杆件 AB 的受力图,不计自重,图中各接触面均为光滑。

1—5 图出下列结构中,每个物体的受力图,要求各铰链处给出反力作用线位置及正确

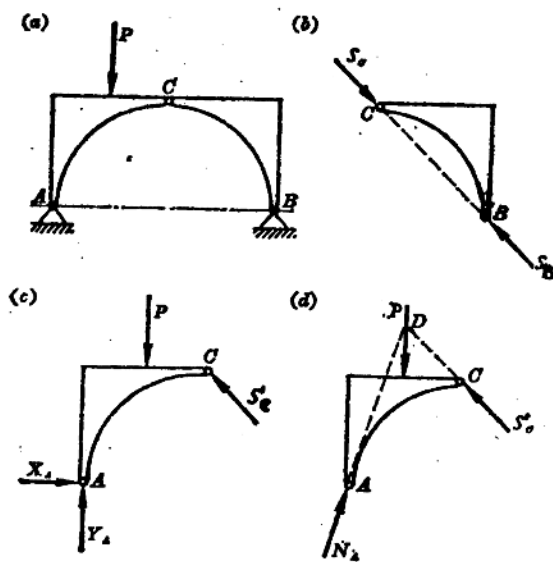
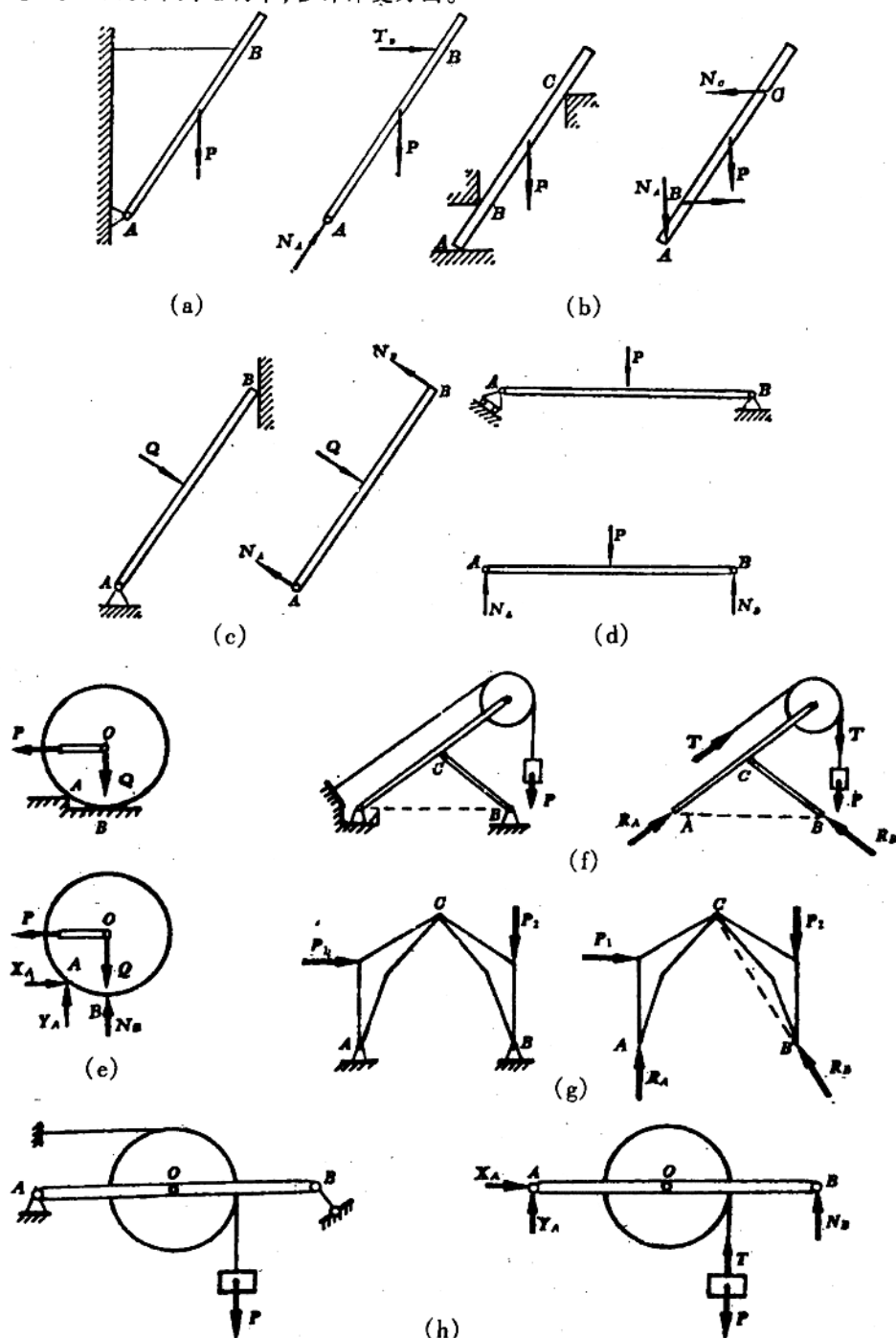


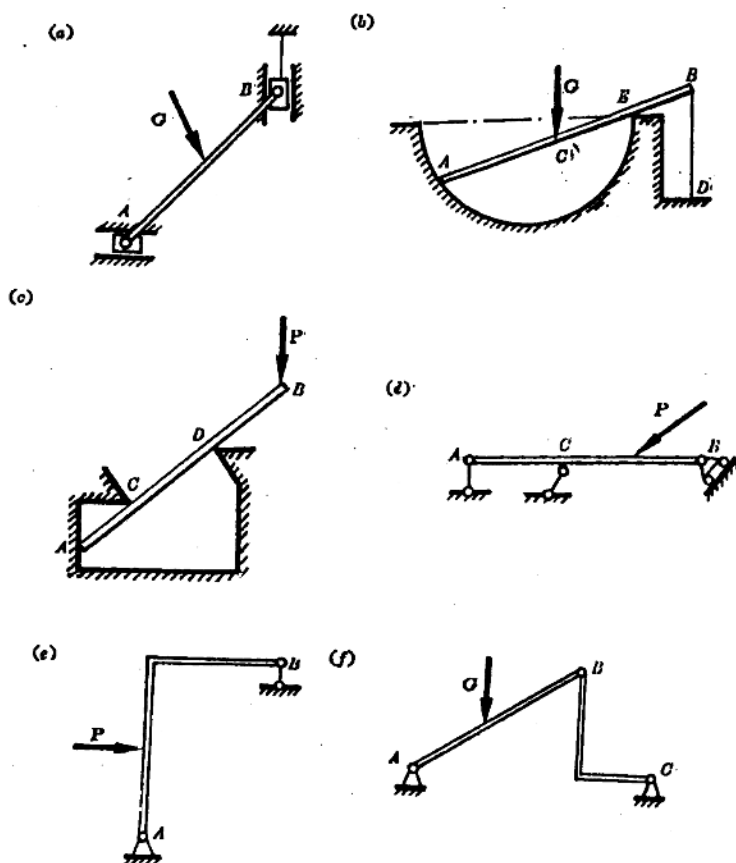
图 1—18

指向。

1—6 画出下列结构中,各杆件受力图。



题 1—3 图



题 1—4 图

