

普通高等教育“十三五”规划教材

《工程力学》学习指导 与解题指南

主 编 高 慧 马 剑
副主编 余 斌 章 杰 王静芳



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

普通高等教育“十三五”规划教材

《工程力学》

学习指导与解题指南

主 编 高 慧 马 剑
副主编 余 斌 章 杰 王静芳



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是与作者(余斌)主编的《工程力学》(机械工业出版社, 2011 年出版)教材相配套的学习指导书。书中内容按照教材章节的先后顺序安排, 每章均包括教学要求与学习目标、理论要点、典型例题分析与习题解答四个部分。其中, “理论要点”部分提纲挈领地对本章的基本概念、基本理论和基本公式进行归纳总结, 以方便读者复习、记忆和查询; “典型例题分析”部分深入细致地介绍解题思路、解题方法和解题技巧, 以提高读者分析问题和解决问题的能力; “习题解答”部分对教材中本章的全部习题给出求解思路和详细解题过程, 以帮助读者掌握课程重点, 学会分析方法, 提高解题能力。

本书结构严谨、层次分明、语言精练、讲解详细, 可作为高等院校工管、机电、冶金、材料、环境工程等专业“工程力学”课程的配套用书, 也可作为工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

《工程力学》学习指导与解题指南/高慧, 马剑主编.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2017. 9(2017. 10 重印)

(普通高等教育“十三五”规划教材)

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4694 - 7

I. ① 工… II. ① 高… ② 马… III. ① 工程力学—高等学校—教学参考资料

IV. ① TB 12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 212508 号

策 划 马 琼

责任编辑 王 瑛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfbx001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017 年 9 月第 1 版 2017 年 10 月第 2 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 11

字 数 254 千字

印 数 501~3500 册

定 价 23.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 4694 - 7/TB

XDUP 4986001 - 2

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

“工程力学”是一门重要的技术基础课程，在现阶段教学课时进一步减少的情况下，为使学生在有限的教学时数下全面系统地理解和掌握工程力学的基本概念、基本知识，提高工程应用和计算能力，我们编写了本书。

本书由静力学和材料力学两部分组成。静力学部分包括静力学基础、平面力系、空间力系等三章；材料力学部分包括轴向拉伸与压缩、剪切与挤压的实用计算、圆轴扭转时的强度和刚度计算、梁弯曲时的强度计算、梁弯曲时的刚度计算、组合变形时的强度计算、压杆的稳定问题等七章。

本书由江苏科技大学的高慧和马剑主编，余斌、章杰和王静芳等参与了本书的编写和审校工作。

本书的编写和出版得到了江苏科技大学(张家港校区)教务部门的资助，西安电子科技大学出版社也对本书的出版给予了大力支持，在此表示诚挚的谢意。在编写过程中，编者查阅和参考了大量文献，谨向这些文献的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，欢迎读者批评指正。

编 者

2017年6月

目 录

第1章 静力学基础	1
1.1 教学要求与学习目标	1
1.2 理论要点	1
1.2.1 静力学的基本概念	1
1.2.2 静力学公理	1
1.2.3 约束与约束力	2
1.2.4 物体的受力分析和受力图	2
1.3 典型例题分析	2
1.4 习题解答	4
第2章 平面力系	8
2.1 教学要求与学习目标	8
2.2 理论要点	8
2.2.1 平面力的投影与分解	8
2.2.2 平面力对点之矩的概念和计算	8
2.2.3 平面力偶理论	9
2.2.4 平面力系的简化	9
2.2.5 平面任意力系的简化结果分析	9
2.2.6 平面任意力系的平衡条件和平衡方程	10
2.2.7 物体系统的平衡 静定和静不定概念	10
2.3 典型例题分析	11
2.4 习题解答	13
第3章 空间力系	26
3.1 教学要求与学习目标	26
3.2 理论要点	26
3.2.1 空间力的投影与分解	26
3.2.2 力对点之矩和力对轴之矩	27
3.2.3 空间力系的平衡	28
3.2.4 重心	31
3.3 典型例题分析	34
3.4 习题解答	36
第4章 轴向拉伸与压缩	44
4.1 教学要求与学习目标	44

4.2 理论要点	44
4.2.1 轴向拉伸与压缩的概念	44
4.2.2 轴力及轴力图	45
4.2.3 轴向拉压杆横截面上的应力	45
4.2.4 轴向拉压杆的变形与胡克定律	46
4.2.5 材料在拉伸与压缩时的力学性能	47
4.2.6 轴向拉压杆的强度计算	48
4.3 典型例题分析	48
4.4 习题解答	51
第5章 剪切与挤压的实用计算	63
5.1 教学要求与学习目标	63
5.2 理论要点	63
5.2.1 剪切与挤压的概念和实例	63
5.2.2 剪切和挤压的实用计算	64
5.3 典型例题分析	66
5.4 习题解答	67
第6章 圆轴扭转时的强度和刚度计算	72
6.1 教学要求与学习目标	72
6.2 理论要点	72
6.2.1 圆轴扭转的概念和实例	72
6.2.2 外力偶矩的计算和扭矩	72
6.2.3 切应力互等定理与剪切胡克定律	74
6.2.4 圆轴扭转时横截面上的应力与强度计算	74
6.2.5 圆轴扭转变形与刚度计算	76
6.3 典型例题分析	77
6.4 习题解答	79
第7章 梁弯曲时的强度计算	84
7.1 教学要求与学习目标	84
7.2 理论要点	84
7.2.1 梁弯曲的概念	84
7.2.2 梁的内力及其求法	85
7.2.3 截面的几何性质	88
7.2.4 梁平面弯曲时横截面上的应力、应力强度计算	91
7.2.5 提高梁强度的措施	93
7.3 典型例题分析	94
7.4 习题解答	97
第8章 梁弯曲时的刚度计算	110
8.1 教学要求与学习目标	110
8.2 理论要点	110

8.2.1	梁的变形与位移的概念	110
8.2.2	挠曲线近似微分方程	111
8.2.3	计算梁位移的积分法	112
8.2.4	计算梁位移的叠加法	113
8.2.5	梁的刚度计算	114
8.2.6	提高梁刚度的措施	115
8.3	典型例题分析	115
8.4	习题解答	120
第 9 章	组合变形时的强度计算	126
9.1	教学要求与学习目标	126
9.2	理论要点	126
9.2.1	组合变形的概念与实例	126
9.2.2	杆件承受拉(压)与弯曲组合变形时的强度计算	126
9.2.3	梁斜弯曲时的强度计算	127
9.2.4	平面应力状态应力分析	127
9.2.5	广义胡克定律	128
9.2.6	强度理论和相当应力	128
9.2.7	圆轴承受弯扭组合变形时的强度计算	129
9.3	典型例题分析	130
9.4	习题解答	134
第 10 章	压杆的稳定问题	151
10.1	教学要求与学习目标	151
10.2	理论要点	151
10.2.1	压杆稳定的概念	151
10.2.2	两端铰支细长压杆的临界力	152
10.2.3	其他支承细长压杆的临界力	153
10.2.4	欧拉公式的适用范围 临界应力总图	154
10.2.5	压杆稳定条件 压杆的合理设计	156
10.3	典型例题分析	158
10.4	习题解答	161
参考文献		167

第1章 静力学基础

本章主要研究三个方面的内容：物体的受力分析、力系的简化、力系的平衡。

1.1 教学要求与学习目标

- (1) 正确掌握力的基本概念及其性质(包括静力学公理)。
- (2) 正确掌握约束的概念和各种常见约束力的性质；能熟练地画出单个刚体及刚体体系的受力图。

1.2 理论要点

1.2.1 静力学的基本概念

(1) 力：一个物体对另一个物体的作用，其结果是使物体的运动状态发生变化或使物体产生变形。对变形体而言，力是定位矢量，其三要素为大小、方向、作用点；对刚体而言，力是滑移矢量，其三要素为大小、方向、作用线。

(2) 力系：指作用于物体上的一群力。

(3) 刚体：是理想化的力学模型，是指在力的作用下其内部任意两点之间的距离始终保持不变的物体。一般情况下，物体受力后都会有变形，如果变形比较小，在研究平衡问题或运动规律时可以忽略，则可以把研究对象视为刚体。静力学中，研究的物体只限于刚体。

(4) 平衡：指物体相对于惯性参考系处于静止或匀速直线运动状态。惯性参考系是指保持静止或匀速直线运动状态的参考系。

1.2.2 静力学公理

公理1 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，合力的作用点在该点，合力的大小和方向由以这两个力为边构成的平行四边形的对角线确定。

公理2 二力平衡公理：作用在刚体上的两个力，使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，且在同一直线上。

公理3 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效应。这个公理是研究力系等效变换的重要依据。

根据上述公理可以导出下列两个推论。

推论1 力的可传性：作用于刚体上某点的力，可以沿着它的作用线滑移到刚体内任

意一点,并不改变该力对刚体的作用效应。

推论 2 三力平衡汇交定理:作用于刚体上三个相互平衡的力,若其中两个力的作用线汇交于一点,则这三个力必在同一平面内,且第三个力的作用线通过汇交点。

公理 4 作用和反作用定律:作用力和反作用力总是同时存在,两力的大小相等、方向相反,沿着同一直线,分别作用在两个相互作用的物体上。

公理 5 刚化公理:若变形体在某一力系作用下处于平衡,则将此变形体刚化为刚体,其平衡状态保持不变。

1.2.3 约束与约束力

1. 基本概念

- (1) 自由体:位移不受限制的物体,如断线的风筝、小鸟等。
- (2) 非自由体:位移受到限制的物体,如火车、电机转子、挂在钢索上的重物。
- (3) 约束:对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体,如铁轨对于火车,轴承对于电机转子,钢索对于重物等。
- (4) 约束力:约束对物体的作用,方向必与该约束所能阻碍的位移方向相反。静力学问题中约束力和物体受的其他已知力(称主动力)组成平衡力系,因此可用平衡条件求出未知的约束力。

- (5) 主动力:使物体运动或有运动趋势的力。

2. 几种常见约束

- (1) 具有光滑接触表面的约束。
- (2) 由柔软的绳索、链条或胶带等构成的约束。
- (3) 光滑铰链约束。
- (4) 其他约束,如滚动支座、球铰链、止推轴承。

1.2.4 物体的受力和受力图

1. 物体的受力分析

确定物体受到哪些力作用,每个力的作用位置和方向如何。作用在物体上的力可分为两类:主动力(如物体的重力、风力等,一般是已知的)和未知的约束力。

2. 画受力图的步骤

- (1) 取研究对象(即取分离体)——把要研究的物体从周围物体中分离出来,单独画出简图。
- (2) 画主动力。
- (3) 画约束力。

1.3 典型例题分析

【例 1-1】 梁 AB 如图 1.1(a)所示, A 端为固定铰支座约束, B 端为滚动支座约束,支承平面与水平面夹角为 30° 。梁中点 C 处作用力 F_P , 不计梁的自重,画出梁的受力图。

解 取梁为研究对象。

受力分析：梁受到主动力 F_P 的作用，A 端固定铰支座约束的约束力为两个正交的力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 。B 端为滚动支座约束的约束力，垂直于支承平面，方向斜向上。受力图如图 1.1(b) 所示。本题 A 处的受力可以进一步简化，A 处的约束力作用线一定通过 F_P 和 F_B 力的作用线交点 E，梁 AB 的受力图如图 1.1(c) 所示。

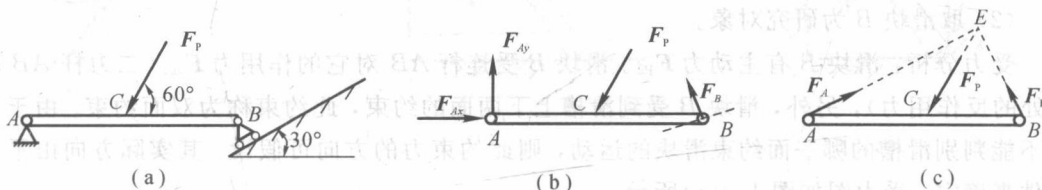


图 1.1 例 1-1 图

【例 1-2】 杆 AC 与 BC 在 C 点用光滑铰链连接，二杆的 D、E 处用绳索连接。A 端为固定铰支座，B 端放在光滑水平面上，结构受力如图 1.2(a) 所示。不计杆自重，试分别画出杆 AC、BC 和整体的受力图。

解 (1) 取杆 AC 为研究对象。

受力分析：杆 AC 上有主动力 F_P ，固定铰支座 A 的约束力为两个正交的力 F_{Ax} 、 F_{Ay} ，中间铰链 C 处的约束力也为两个正交的力 F_{Cx} 、 F_{Cy} 。D 处有绳子拉力 F_T ，沿绳子水平向右。受力图如图 1.2(b) 所示。

(2) 取杆 BC 为研究对象。

受力分析：杆 BC 上有分布载荷 q ，B 端为光滑接触面约束，约束力为 F_B ，垂直接触面方向向上。中间铰链 C 处的约束力为两个正交的力 F'_{Cx} 、 F'_{Cy} ，它们分别与 F_{Cx} 、 F_{Cy} 为作用力和反作用力。E 处有绳子拉力 F'_T ，沿绳子水平向左。受力图如图 1.2(c) 所示。

(3) 取整体为研究对象。

受力分析：此机构受到固定铰支座 A 和光滑接触面 B 处的约束，绳子 DE 和中间铰链 C 的约束为系统内部约束。先画出主动力 F_P 和分布载荷 q ，解除固定铰支座 A 和光滑接触面 B 处的约束，在相应位置画出约束力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 和 F_B ，受力图如图 1.2(d) 所示。整体受力图可以在原图上画出。

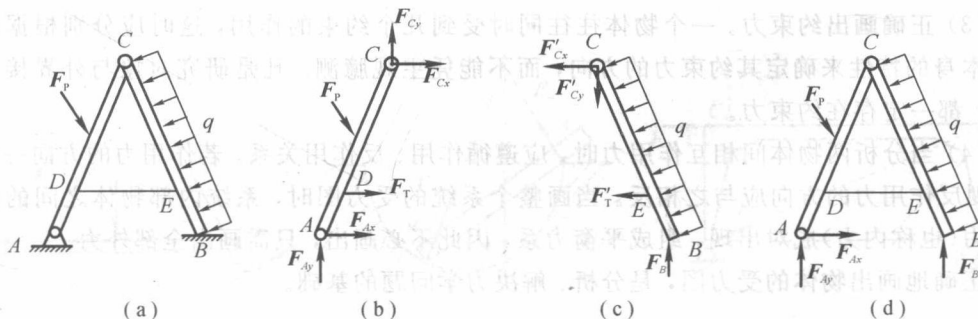


图 1.2 例 1-2 图

【例 1-3】 如图 1.3(a) 所示，曲柄连杆机构中，O、A、B 三处铰链连接，在曲柄 OA 的中点作用一向右的水平力 F_{P1} ，在滑块 B 处作用一向左的水平力 F_{P2} ，此时机构在图示位

置平衡,不计曲柄连杆自重和摩擦,试画出曲柄 OA 和滑块 B 及整体的受力图。

解 (1) 取曲柄 OA 为研究对象。

受力分析: 曲柄 OA 有主动力 F_{P1} 。连杆 AB 为二力杆, 所以 AB 连杆 A 处的作用力 F_{AB} 的方向可以确定, 曲柄 OA 上 A 处的作用力 F_{AB} 方向也可以确定, 再根据三力平衡汇交定理, 可以确定固定铰支座 O 处的约束力 F_O 的方向, 受力图如图 1.3(b) 所示。

(2) 取滑块 B 为研究对象。

受力分析: 滑块 B 有主动力 F_{P2} 。滑块 B 受连杆 AB 对它的作用力 F_{BA} (二力杆 AB 的 B 处的反作用力), 另外, 滑块 B 受到滑槽上下两面的约束, 此约束称为双面约束。由于事先不能判别滑槽的哪一面约束滑块的运动, 则此约束力的方向可假设, 其实际方向由平衡条件来确定, 受力图如图 1.3(c) 所示。

(3) 取整体为研究对象。

受力分析: 此机构受到固定铰支座 O 和 B 处滑槽的约束, 其曲柄 OA 、连杆 AB 处的中间铰链 A 和滑块 B 、连杆 AB 处的中间铰链 B 的约束为系统内部约束, 在整体受力图上, 其相互间作用力不表示出来, 所以整体受力图如图 1.3(a) 所示。

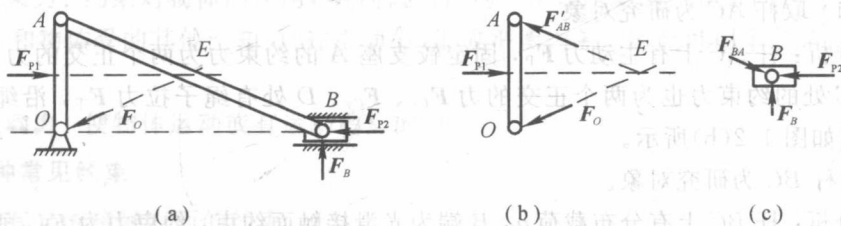


图 1.3 例 1-3 图

画受力图时必须注意以下几点:

(1) 明确研究对象。根据求解需要, 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。不同的研究对象的受力图是不同的。

(2) 确定研究对象受力的数目。对每一个力都应明确它是哪一个施力物体施加给研究对象的, 决不能凭空产生。同时, 也不可漏掉一个力。一般可先画已知的主动力, 再画约束力。

(3) 正确画出约束力。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本身的特性来确定其约束力的方向, 而不能凭主观臆测。凡是研究对象与外界接触的地方, 都一定存在约束力。

(4) 当分析两物体间相互作用力时, 应遵循作用、反作用关系。若作用力的方向一经假定, 则反作用力的方向应与之相反。当画整个系统的受力图时, 系统内部物体之间的相互作用力(也称内力)成对出现, 组成平衡力系, 因此不必画出, 只需画出全部外力。

正确地画出物体的受力图, 是分析、解决力学问题的基础。

1.4 习题解答

习题 1-1 画出图 1.4 中物体 A 、 AB 或 $ABCD$ 的受力图。所接触处均为光滑接触。

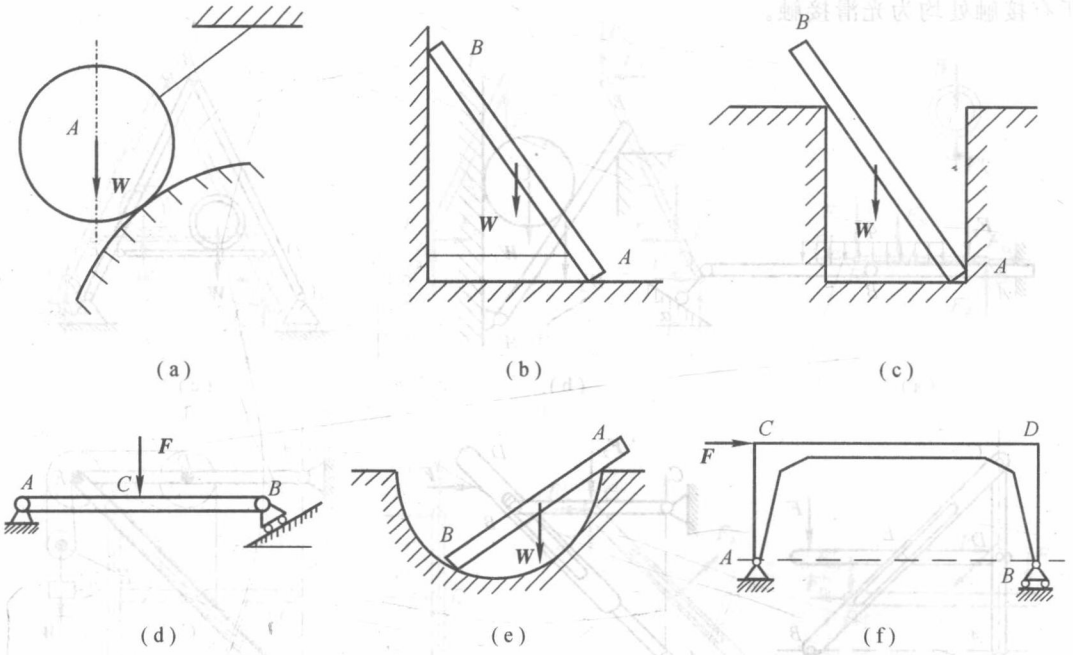


图 1.4 习题 1-1 图

解 物体 A 和构件 AB、ABCD 的受力图见图 1.5。

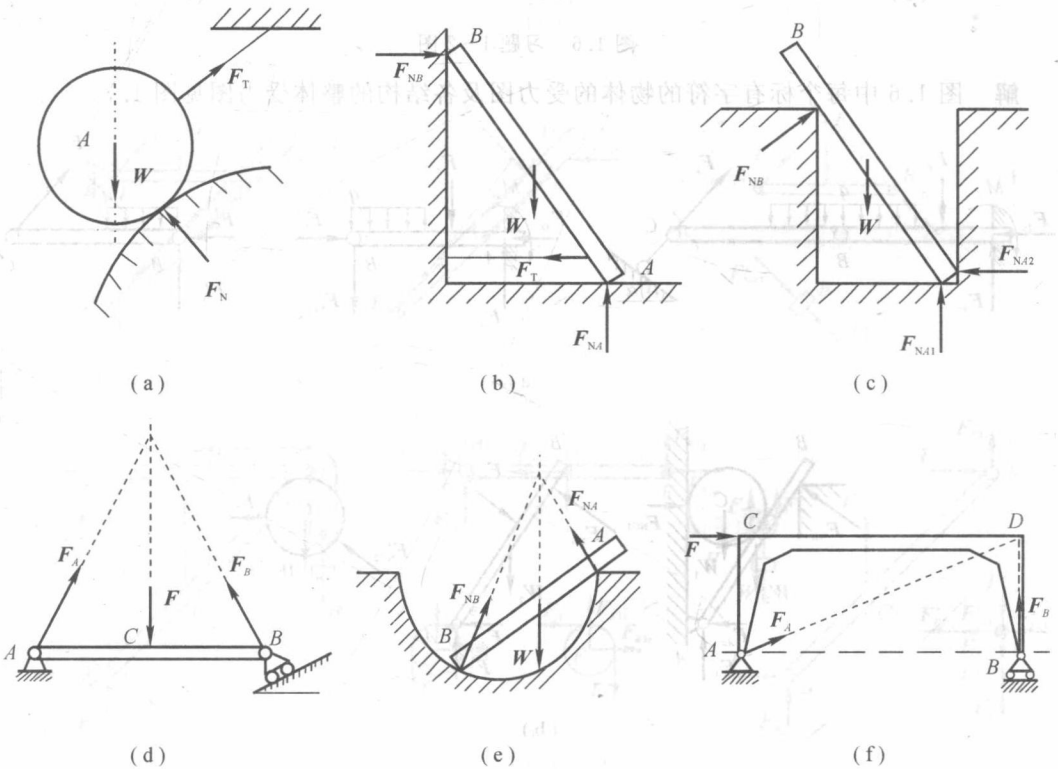


图 1.5 习题 1-1 的受力图

习题 1-2 画出图 1.6 中所示每个标有字符的物体的受力图、各结构的整体受力图。

所有接触处均为光滑接触。

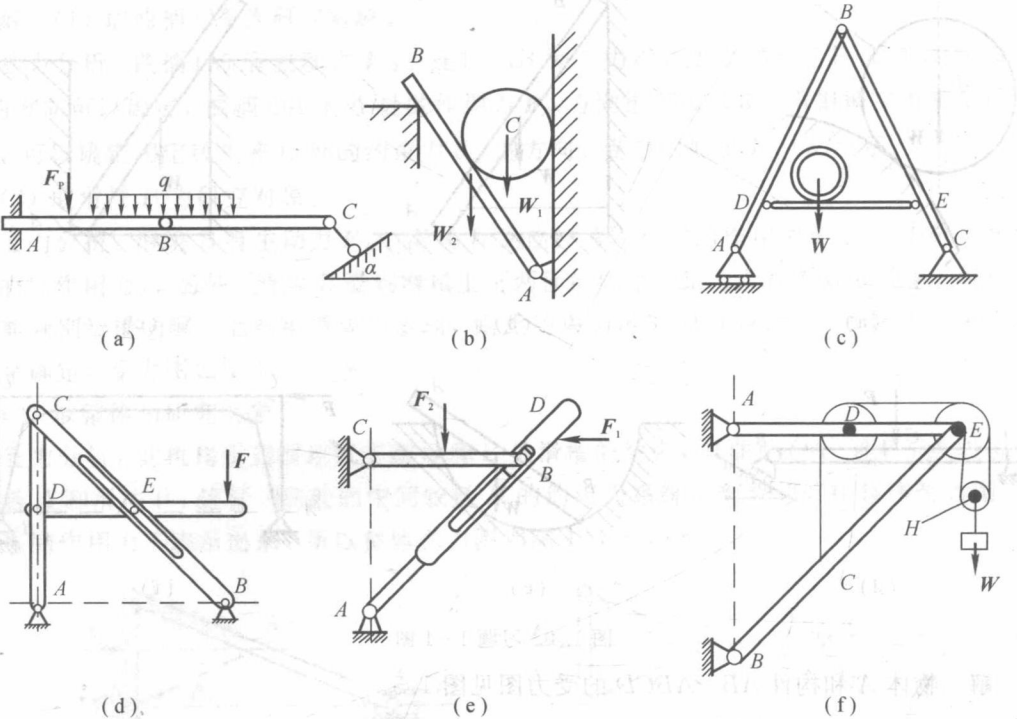
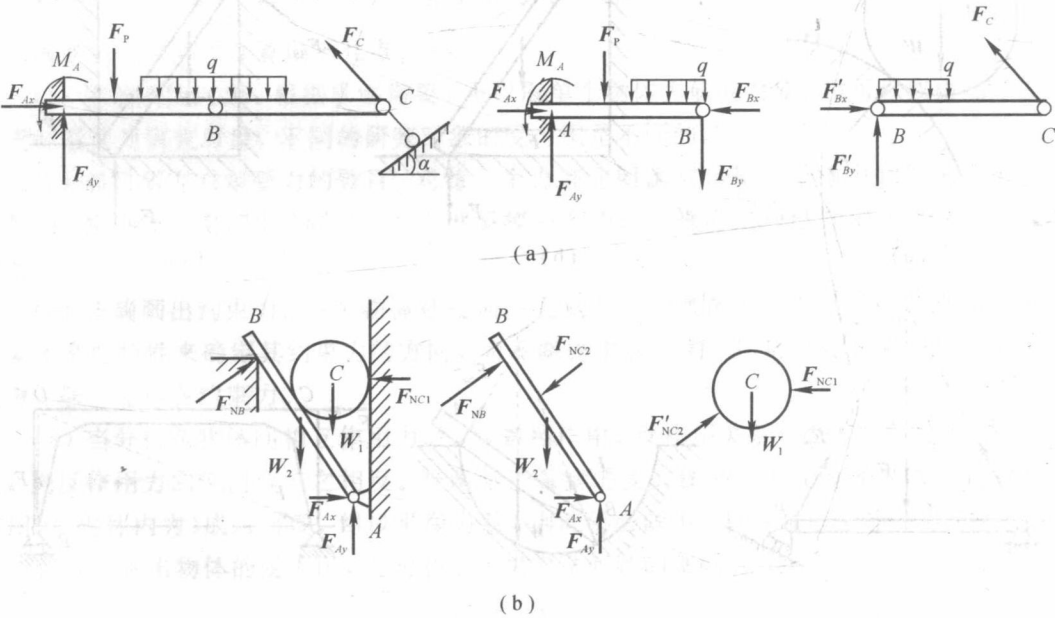


图 1.6 习题 1-2 图

解 图 1.6 中每个标有字符的物体的受力图及各结构的整体受力图见图 1.7。



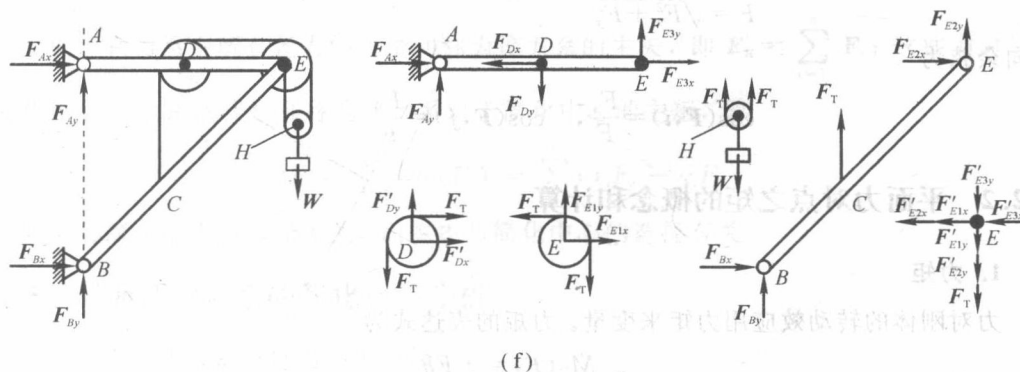
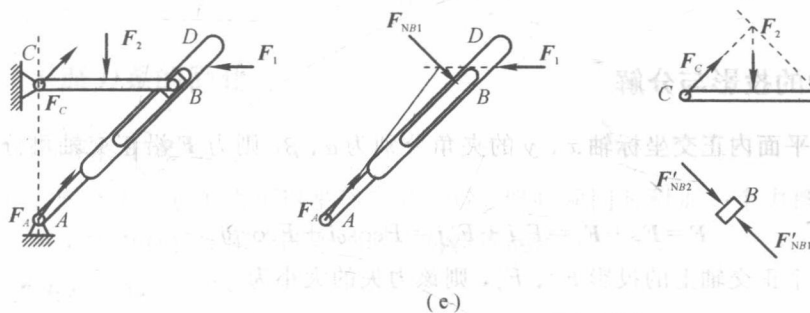
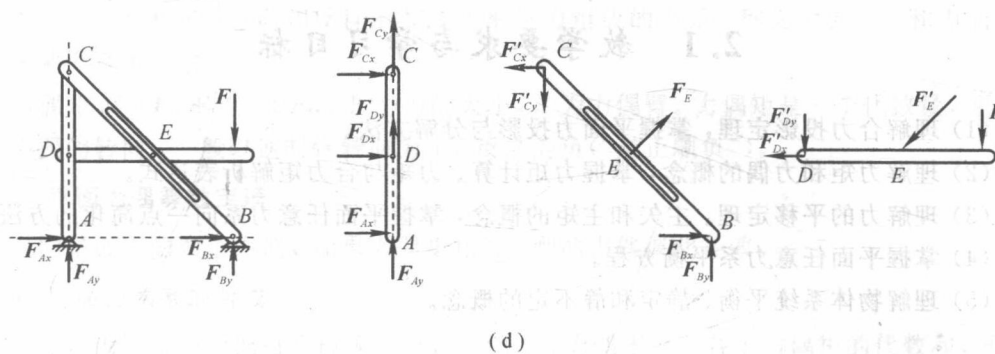
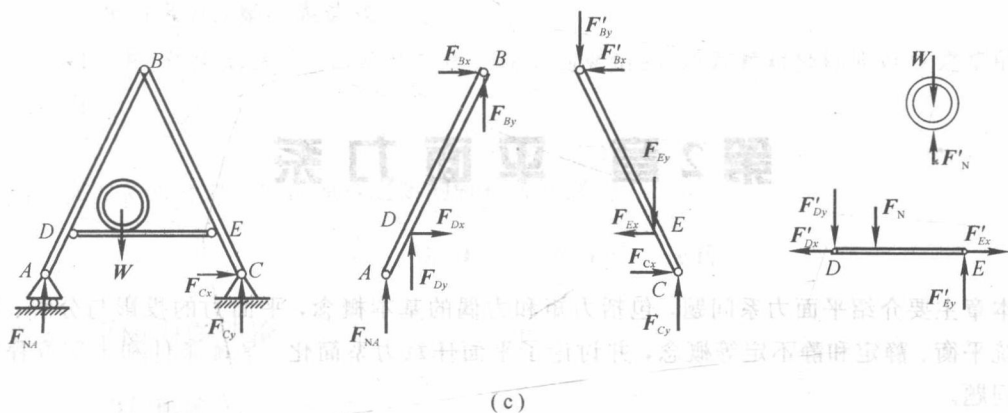


图 1.7 习题 1-2 的受力图

第2章 平面力系

本章主要介绍平面力系问题,包括力矩和力偶的基本概念,平面力的投影与分解、物体系统平衡、静定和静不定等概念,并讨论了平面任意力系简化、平衡条件和平衡方程等计算问题。

2.1 教学要求与学习目标

- (1) 理解合力投影定理,掌握平面力投影与分解方法。
- (2) 理解力矩和力偶的概念,掌握力矩计算、力矩与合力矩解析表达式。
- (3) 理解力的平移定理、主矢和主矩的概念,掌握平面任意力系向一点简化的方法。
- (4) 掌握平面任意力系平衡方程。
- (5) 理解物体系统平衡、静定和静不定的概念。

2.2 理论要点

2.2.1 平面力的投影与分解

已知力 F 与平面内正交坐标轴 x 、 y 的夹角分别为 α 、 β ,则力 F 沿正交轴可分解为两个分力 F_x 和 F_y :

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_x + \mathbf{F}_y = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} = F \cos \alpha \mathbf{i} + F \cos \beta \mathbf{j}$$

若已知力 F 在两个正交轴上的投影 F_x 、 F_y ,则该力矢的大小为

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

方向余弦为

$$\cos(\mathbf{F}, \mathbf{i}) = \frac{F_x}{F}, \quad \cos(\mathbf{F}, \mathbf{j}) = \frac{F_y}{F}$$

2.2.2 平面力对点之矩的概念和计算

1. 力矩

力对刚体的转动效应用力矩来度量。力矩的表达式为

$$M_O(\mathbf{F}) = \pm Fh$$

式中: F 为力的大小, h 为力臂,力使物体绕矩心逆时针转向转动时为正,反之为负(“逆正顺负”)。

2. 力矩与合力矩解析表达式

已知力 F , 作用点 $A(x, y)$ 及其与水平轴 x 的夹角 α , 则力 F 对坐标原点 O 之矩的解析表达式为

$$M_O(F) = xF_y - yF_x$$

平面汇交力系的合力对坐标原点之矩的解析表达式为

$$M_O(F_R) = \sum_{i=1}^n x_i F_{yi} - y_i F_{xi}$$

2.2.3 平面力偶理论

1. 力偶的概念

由两个大小相等、方向相反且不共线的平行力组成的力系, 称为力偶。力和力偶是静力学的两个基本要素。

力偶矩 $M_O(F, F') = \pm Fd$, F 为力的大小, d 为力偶臂。力偶矩是一个代数量, 正负号表示力偶的转向, 一般以逆时针转向为正, 反之为负(“逆正顺负”)。

2. 平面力偶等效定理

在同平面内的两个力偶, 如果力偶矩相等, 则两力偶彼此等效。

3. 平面力偶系的合成

同平面内任意个力偶可合成为一个合力偶, 合力偶矩等于各个力偶矩的代数和, 即

$$M = \sum_{i=1}^n M_i$$

2.2.4 平面力系的简化

1. 力的平移定理

作用在刚体上一点的力可以平移到另一点, 但必须同时附加一个力偶, 这个附加力偶的矩等于原来的力对新作用点的矩(“原力对新点的矩”)。

2. 主矢和主矩

平面任意力系中所有各力的矢量和称为该力系的主矢, 即 $F'_R = \sum_{i=1}^n F_i$; 这些力对于任选简化中心 O 的矩的代数和称为该力系对于简化中心的主矩, 即

$$M_O = \sum_{i=1}^n M_O(F_i) = \sum_{i=1}^n (x_i F_{yi} - y_i F_{xi})$$

主矢与简化中心的选择无关, 而主矩与简化中心的选择有关。

2.2.5 平面任意力系的简化结果分析

(1) 平面任意力系简化为一个力偶:

$$F'_R = 0, M_O \neq 0$$

(2) 平面任意力系简化为一个合力:

$$\mathbf{F}'_R \neq \mathbf{0}, M_O = 0 \text{ 或 } \mathbf{F}'_R \neq \mathbf{0}, M_O \neq 0$$

(3) 平面任意力系平衡:

$$\mathbf{F}'_R = \mathbf{0}, M_O = 0$$

2.2.6 平面任意力系的平衡条件和平衡方程

(1) 平面任意力系平衡的充要条件: 力系的主矢和对于任一点的主矩都等于零。

(2) 平面任意力系平衡方程:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n F_{xi} &= 0 \\ \sum_{i=1}^n F_{yi} &= 0 \\ \sum_{i=1}^n M_O(\mathbf{F}_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

即: 所有各力在两个任选的直角坐标系轴上的投影的代数和分别等于零, 且各力对于任意一点的矩的代数和也等于零。

平面任意力系平衡的三个平衡方程也可用两个力矩方程和一个投影方程表示, 即

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n M_A(\mathbf{F}_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n M_B(\mathbf{F}_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n F_{xi} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

其中, x 轴不得垂直于 A 、 B 两点的连线。

也可写出三个力矩式平衡方程, 即

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n M_A(\mathbf{F}_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n M_B(\mathbf{F}_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n M_C(\mathbf{F}_i) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

其中, A 、 B 、 C 三点不得共线。

2.2.7 物体系统的平衡 静定和静不定概念

(1) 静定问题: 未知约束力数目恰好等于独立平衡方程数目的问题。这些未知约束力可由静力平衡方程全部求出。

(2) 静不定问题(超静定问题): 未知约束力的数目多于独立平衡方程的数目的问题。仅仅用静力平衡方程不能求出全部未知力。

(3) 在求解静定物体系统的平衡问题时, 可以选每个物体为研究对象, 列出全部平衡方程, 然后求解; 也可先取整个系统为研究对象, 列出平衡方程, 解出部分或全部的未知量