

高等学校教材

理论力学

解题指导

及习题

柳祖亭 主编



机械工业出版社
China Machine Press

高等学校教材

理论力学解题指导及习题

主 编 柳祖亭

副主编 任其西 刘荣桂 张晓芳



机械工业出版社

本书是作者在长期教学实践的基础上,为充分调动学生学习的主动性和积极性,提高教学质量而编写的一本与工科理论力学教材相配合的辅助教材。本书内容分两部分,一部分是理论力学教材中各章节的典型例题分析与解题指导;一部分是各章节的概念性较强的习题。此外,静力学、运动学、动力学和理论力学总体还各附有二套自测题以供自检。本书可作为工科院校理论力学的辅助教材或教学参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

理论力学解题指导及习题/柳祖亭主编-北京:机械工业出版社,1999.10
高等学校教材

ISBN 7-111-07591-9

I. 理… II. 柳… III. 理论力学-高等学校-习题 IV. 031-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 63464 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:余茂祚 版式设计:冉晓华 责任校对:韩晶

封面设计:姚毅 责任印制:何全君

煤炭工业出版社印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 2 月第 1 版 第 1 次印刷

787mm × 1092mm¹/₁₆ · 16.25 印张 393 千字

0 001—4000 册

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

前 言

在工科院校中理论力学是一门理论性强而又与工程实践密切相关的课程。“理论易懂解题难”，是学生在在学习过程中比较普遍存在的现象。如何解决这个问题是提高教学质量、培养学生解决实际问题能力的关键之一。目前的理论力学教材一般例题偏少，思考题更少，要想搞好启发式教学，必须要有足够数量的启发式的例题和概念强的思考题。我们根据多年的教学经验，参考了兄弟院校的有关教材，集体编写了这本书，以期调动学生的主动性和积极性。全书按理论力学现有教材的各章为序，每章分为三个部分，第一部分是内容提要，第二部分是例题分析与解题指导，第三部分是习题。全书由柳祖亭教授、任其西副教授、刘荣桂副教授、张晓芳讲师等编写，其中第1、3章及静力学自测题由刘荣桂编写；第2、6章由许峰编写；第4、5章由彭志强编写；第7、8、9章及运动学自测题（二）由张晓芳编写；第10章及运动学自测题（一）由彭玉莺编写；第11、12、13章及动力学自测题由任其西编写；第14、15章及理论力学自测题由柳祖亭编写；第16、17章由谈梅兰编写；第18、19、20章由李健康编写。由于水平有限，难免有不妥之处，恳请批评指正。

编 者

目 录

前言

静 力 学

第 1 章 静力学基本概念和物体的受力分析	1	4.1 内容提要	35
1.1 内容提要	1	4.2 例题分析与解题指导	37
1.2 例题分析与解题指导	2	4.3 习题	44
1.3 习题	7	第 5 章 摩擦	57
第 2 章 汇交力系	11	5.1 内容提要	57
2.1 内容提要	11	5.2 例题分析与解题指导	58
2.2 例题分析与解题指导	12	5.3 习题	61
2.3 习题	20	第 6 章 空间力系与重心	67
第 3 章 力偶理论	25	6.1 内容提要	67
3.1 内容提要	25	6.2 例题分析与解题指导	71
3.2 例题分析与解题指导	26	6.3 习题	79
3.3 习题	29	静力学自测题 (一)	84
第 4 章 平面力系	35	静力学自测题 (二)	86

运 动 学

第 7 章 点的运动	89	9.1 内容提要	110
7.1 内容提要	89	9.2 例题分析与解题指导	111
7.2 例题分析与解题指导	91	9.3 习题	122
7.3 习题	97	第 10 章 刚体平面运动	131
第 8 章 刚体基本运动	101	10.1 内容提要	131
8.1 内容提要	101	10.2 例题分析与解题指导	133
8.2 例题分析与解题指导	102	10.3 习题	143
8.3 习题	105	运动学自测题 (一)	148
第 9 章 点的合成运动	110	运动学自测题 (二)	149

动 力 学

第 11 章 质点动力学基本方程	153	12.2 例题分析与解题指导	162
11.1 内容提要	153	12.3 习题	164
11.2 例题分析与解题指导	154	第 13 章 动量矩定理	167
11.3 习题	157	13.1 内容提要	167
第 12 章 动量定理	161	13.2 例题分析与解题指导	168
12.1 内容提要	161	13.3 习题	171

第 14 章 动能定理	175	18.1 内容提要	222
14.1 内容提要	175	18.2 例题分析与解题指导	225
14.2 例题分析与解题指导	177	18.3 习题	228
14.3 习题	186	第 19 章 质点相对运动动力学方程	233
第 15 章 碰撞	191	19.1 内容提要	233
15.1 内容提要	191	19.2 例题分析与解题指导	234
15.2 例题分析与解题指导	191	19.3 习题	237
15.3 习题	196	第 20 章 动力学普遍方程与拉格朗日	
第 16 章 达朗伯原理	200	方程	240
16.1 内容提要	200	20.1 内容提要	240
16.2 例题分析与解题指导	201	20.2 例题分析与解题指导	241
16.3 习题	208	20.3 习题	243
第 17 章 虚位移原理	212	动力学自测题 (一)	245
17.1 内容提要	212	动力学自测题 (二)	247
17.2 例题分析与解题指导	213	理论力学自测题 (一)	248
17.3 习题	219	理论力学自测题 (二)	250
第 18 章 机械振动基础	222	参考文献	252

静力学

第1章 静力学基本概念和物体的受力分析

1.1 内容提要

本章是静力学的概要和有关的概念及物体的受力分析等，在理论力学后面的章节、乃至材料力学等后续力学课程学习中起着很重要作用。打好这部分基础，有利于学生以后对力学综合问题的分析与求解。

1.1.1 静力学基本概念

1. 刚体的概念

所谓刚体是指这样的物体，在任意力作用下，其内部任意两点之间的距离始终保持不变。这一理想化模型的建立抓住了研究物体在力作用下运动时的主要矛盾，而忽略了次要矛盾（物体的微小变形），这种科学的抽象大大地简化了问题的研究。理论力学的静力学中仅研究刚体，因此，静力学又称为刚体静力学。

2. 力的概念

力是物体间的相互机械作用，这种作用使物体的机械运动状态发生变化（包括变形）。力是矢量。

力是高度抽象的概念，需要通过抽象思维去体会。随着学生力学知识的积累，对力的概念的要领会不断加深。受力分析是理论力学的基本功之一。

平衡是物体机械运动的一种特殊形式，也是工程实际中存在的普遍现象之一。静力学研究的就是物体（及其系统）的平衡规律。

3. 静力学公理

静力学有五个公理、两个推论。即：二力平衡原理、加减平衡力系原理、力的平行四边形法则、作用与反作用定律、刚化原理以及力的可传性推理和三力平衡汇交推理。

学生学习时对二力平衡原理、作用与反作用定律、三力平衡汇交原理和力的平行四边形法则等的学习要尤其予以重视，它们是学生受力分析乃至复杂系统平衡问题研究的基础。

如二力平衡原理，满足这一条件的约束常称为二力构件约束。在力系受力分析及平衡问题求解过程中，由于二力构件受力简单，常常构成求解复杂问题的突破口。

学生在学习这五个公理时，还要注意每个公理适用的对象及范围。如二力平衡原理仅适用于刚体，而力的平行四边形法则是一个普遍适用的法则。五个公理的作用也各不相同，如加减平衡力系原理，它是研究力系等效、力系简化的工具；而刚化原理则建立了刚体平衡与变形体平衡相互之间的转换关系，随着学习的深入，会不断加深对这些公理的理解，它们是刚体静力学的理论基础。

1.1.2 物体的受力分析

在研究工程实际中各种力学问题时，必须对物体进行受力分析，而受力分析是通过“受力图”来表达的。

1. 受力图

物体的受力图是描述一物体（或物体系统）的全部受力情况的计算简图，它是后续计算、设计的依据之一。

作用在物体上的力可分为两类：一类是主动力，一般是已知的、具有主动意义的，如重力、风压力、电磁力及电动机的驱动力偶等；另一类型是约束反力，它是未知的被动力。约束反力的方向一般由约束本身的性质决定，而大小由平衡条件决定。

2. 约束概念

约束简言之就是限制所研究物体运动的装置。约束与被约束的概念是相对的，在一定条件下可以转换。约束反力是约束施加在所研究物体上的力，其方向与约束的类型有关。

从教材约束类型表中可知，不同类型的约束，其约束反力未知分量的数目是不同的。静力分析的重要任务之一就是确定未知约束反力。而首先要做的工作是需要明确研究的对象，并把它从周围物体中分离出来，进而分析作用在研究对象上有哪些作用力（包括主动力和约束力），这一过程称为受力分析。下面通过典型例题来说明受力分析的受力点及注意事项。

1.2 例题分析与解题指导

1.2.1 解题方法

准确、熟练地做好物体的受力分析，是学习静力学的基本要求。要达到这一要求，必须掌握正确的解题方法。

1) 掌握约束的特性，分析其能限制研究对象什么方向的运动和不能限制什么方向的运动，这样才能正确决定约束反力的方向，约束反力的方向总是与约束所能阻碍的物体运动方向相反，这一点要特别注意。约束与被约束是一对矛盾，在一定的条件下可相互转换，研究对象不同，约束也就不同。

2) 对分离体的取法要熟练掌握。根据问题的特点，研究的对象可能是单个物体，也可能是几个物体所构成的系统。取分离体，就是要把研究对象从周围物体对它的约束中全部解除出来，代之以约束反力，并注意力表示的正确性。

3) 对力系的特点要根据公理及约束特点进行识别、简化，力求简捷、明了。如是二力构件应满足二力平衡原理；如属于三力汇交的力系应满足三力平衡条件；如是力偶系，应满足力偶平衡的特征——力偶只能与力偶平衡，等等。

1.2.2 画受力图的步骤及注意事项

1. 步骤

- 1) 确定研究对象。根据问题研究的需要选择研究对象，并取出相应的分离体。
- 2) 在分离体上画上主动力。
- 3) 根据约束类型及力系特征，正确地画上相应的约束反力。

2. 注意事项

1) 要分清研究对象与它的约束。把周围物体对研究对象的约束一一解除，并对应地画出约束反力。

2) 不要多画力亦不要画研究对象作用在约束上的力。每一种力，都表示一种物体间的相互作用关系，都有一种明确的物理意义，多画力表明概念不清。

3) 要用公理来判断所画受力图是否正确（如二力平衡、三力汇交、作用与反作用等）。

4) 画系统受力图时，要分清系统的内力与外力，只画外力不画内力。

1.2.3 例题分析

例 1-1 重为 W 的均质圆柱 A ，由杆 BC 、绳索 CD 和墙支撑，如图 1-1 所示。铰 B 与接触点 E 、 H 的摩擦不计，杆重不计。试分别画出圆柱 A 和杆 BC 的受力图。

解：1) 以圆柱 A 为研究对象，画出分离体图。先画主动力 W ；由于 E 、 H 处为光滑接触，画上 F_E 、 F_H 如图 1-1b 所示。2) 以 BC 杆为研究对象，画出分离体图。 B 支座为固定铰支座，画上约束反力 F_{Bx} 、 F_{By} ； C 为受绳索约束，画上拉力 F_C ； E 处为光滑接触，画上法向反力 F'_E ，它与 F_E 是作用与反作用关系，其受力如图 1-1c 所示。

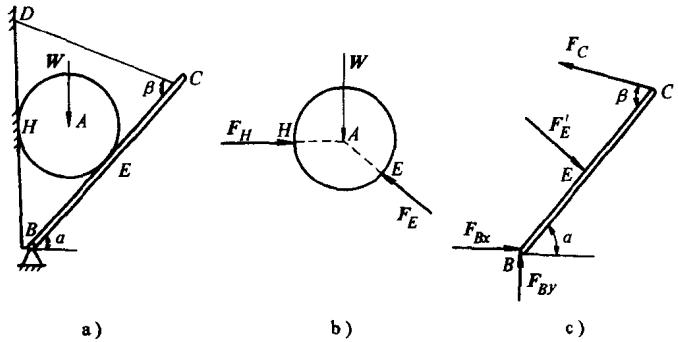


图 1-1 例 1-1 图
a) 结构图 b)、c) 受力图

例 1-2 图 1-2 所示梯子 AB 重 W ，在 C 处用绳 CD 拉住， A 、 B 处分别搁在光滑的墙及地面上。试画出梯子的受力图。

解：取 AB 杆为研究对象，画出分离体图。 A 处为光滑接触，杆上的 A 点有法线，故 F_A 方向沿杆上 A 点法线方向， B 处也类似。 D 处受柔索约束，约束反力 F_D 应背离被约束物体。其受力图如图 1-2b 所示。

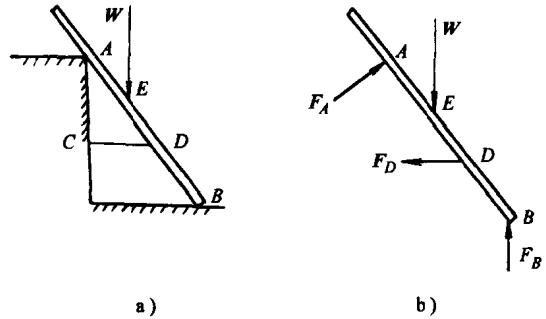


图 1-2 例 1-2 图
a) 结构图 b) 受力图

例 1-3 一平面结构如图 1-3a 所示。 AC 、 BD 、 CD 三杆均质且等长（长为 l 、重为 W ）， ED 为柔索。试画出 BD 、 CD 杆的受力图。

解： ED 柔索 D 端的力通常认为是作用在 D 销钉上。在把 BD 、 CD 杆分离画受力图时，有下列三种情形：

1) 考虑销钉在 BD 杆上。先以 BD 杆（包括销钉）为研究对象，画出分离体图。在销钉上画 ED 柔索的约束力 F_{ED} ，再画 CD 杆对销钉 D 的约束反力 F_{Dx} 、 F_{Dy} ， F_{Bx} 、 F_{By} 为支座 B 对 BD 杆的约束反力。再画 CD 杆的受力图，其中 F'_{Dx} 、 F'_{Dy} 为销钉 D 对 CD 杆的约束反力，它们与 F_{Dx} 、 F_{Dy} 构成作用与反作用关系。整个受力图如图 1-3b、c 所示。

2) 考虑销钉在 CD 杆上。先取 BD 杆为研究对象。画上受力图，其中 F_{Dx1} 、 F_{Dy1} 为销钉 D 对 BD 杆的约束反力。再取 CD 杆为研究对象，在销钉 D 上作用柔索 ED 的约束力 F_{ED} 。 F'_{Dx1} 、 F'_{Dy1} 与 F_{Dx1} 、 F_{Dy1} 构成作用与反作用关系。整个受力图如图 1-3d、e 所示。

3) 考虑销钉单独拆开。受力图如图 1-3f ~ h 所示。其中 F_{ED} 为柔索 ED 对销钉 D 的作

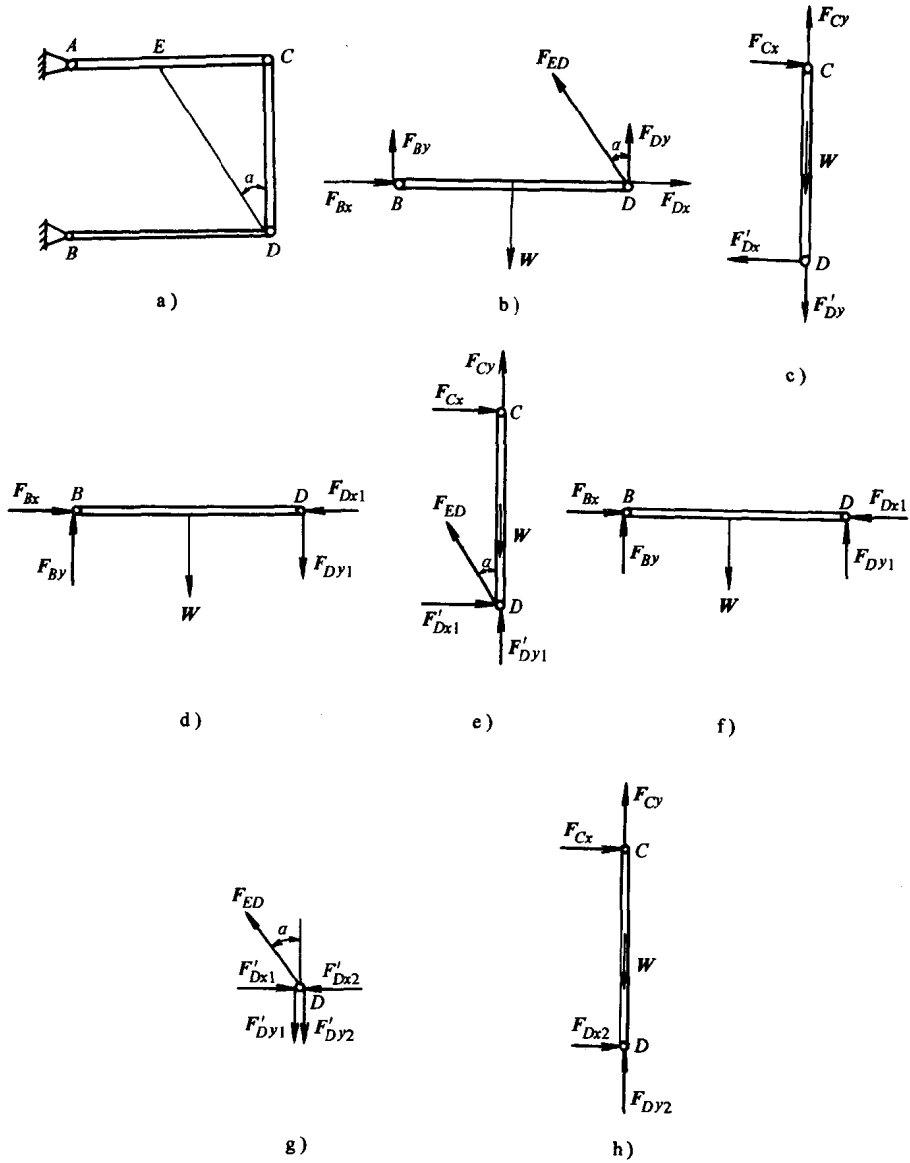


图 1-3 例 1-3 图

a) 系统 b) BD 图 1 c) CD 图 1 d) BD 图 2 e) CD 图 2 f) BD 图 3 g) D 点 h) CD 图 3

用, F'_{Dx1} 、 F'_{Dy1} 为 BD 杆对销钉的约束反力, 它们与 F_{Dx1} 、 F_{Dy1} 分别构成作用与反作用关系。 F'_{Dx2} 、 F'_{Dy2} 为 CD 杆对销钉的约束反力, 它们与 F_{Dx2} 、 F_{Dy2} 分别构成作用与反作用关系。

以上三种情况中, 中间铰 D 处约束反力的指向可任意假设, 但相互间必须符合作用与反作用的关系。其假设关系是否正确由平衡条件决定。求解结果正值表示与假设一致, 负值则相反。由此例可见: 当铰链连结多个物体时, 受力图有多种画法, 但必须明确销钉放在什么物体上。

例 1-4 一结构如图 1-4, AD 梁的 D 端作用一集中力偶 M 。梁、杆自重不计, 试作出 AD 梁的受力图。

解：以 AD 梁为研究对象，画出分离体图。由于 BC 杆为 B 、 C 两点受力的二力构件，故它对 AD 梁的约束反力 F_{BC} 沿 BC 方向， F_{Ax} 、 F_{Ay} 为 A 支座对 AD 梁的约束反力。整个受力图如图 1-4b 所示。

仔细分析，将会发现，此受力图可进一步简化。由主动力性质可知， AD 梁上为力偶系作用。再由力偶只能与力偶平衡及等效的性质，当 AD 梁在 D 端作用主动力 M

力偶时，约束对应的约束反力也必须构成力偶，根据这一分析， AD 梁的受力图可进一步简化，结果如图 1-4c 所示。其中约束反力 F_A 与 F_{BC} 构成一力偶，与 M 构成平衡关系。

例 1-5 一受力系统如图 1-5a 所示。 AB 梁上作用一分布力 q (单位: kN/m)， CD 梁上作用一集中力 F ， A 端为固定端，自重不计。试作出 AB 、 CD 梁的受力图。

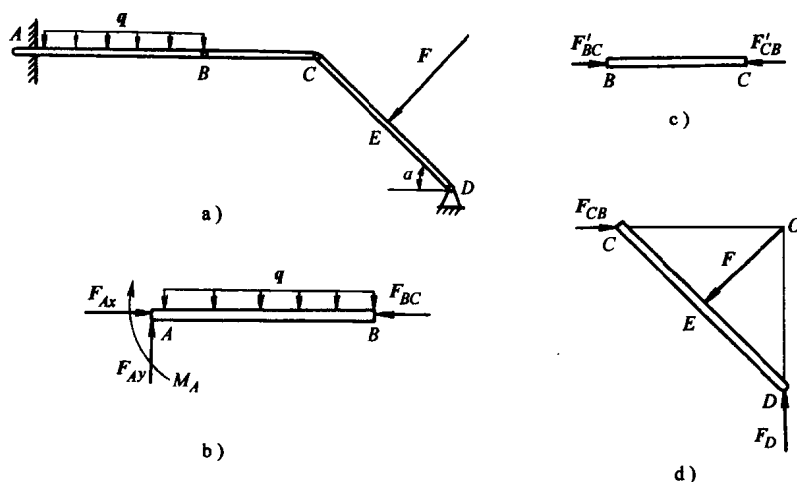


图 1-5 例 1-5 图

a) 结构图 b) AB 杆 c) BC 杆 d) CD 梁

解：分别取 AB 、 CD 为研究对象，作出分离体图。在 AB 梁上，因 A 端为固定端约束，故有 F_{Ax} 、 F_{Ay} 、 M_A 三个约束反力；又由于 BC 杆为二力杆，故 F_{BC} 为二力杆 BC 对 AB 梁的约束反力。在 CD 梁上， F_{CB} 为 BC 杆对 CD 梁的约束反力，它的指向与 F'_{CB} 相呼应，为作用与反作用关系 (见图 1-5c)。由于 CD 梁上， C 、 E 、 D 三点受力，平衡时，三力 F_{CB} 、 F 、 F_D 满足三力汇交原理，汇交点为 O 点。整个受力图由图 1-5b ~ d 所示。

例 1-6 一结构如图 1-6a 所示。不计自重和摩擦，试作出 AB 杆、 E 轮及销钉 B 的受力图。

解：这是一个系统问题，在作受力图时一定要搞清楚每个约束力的作用关系。

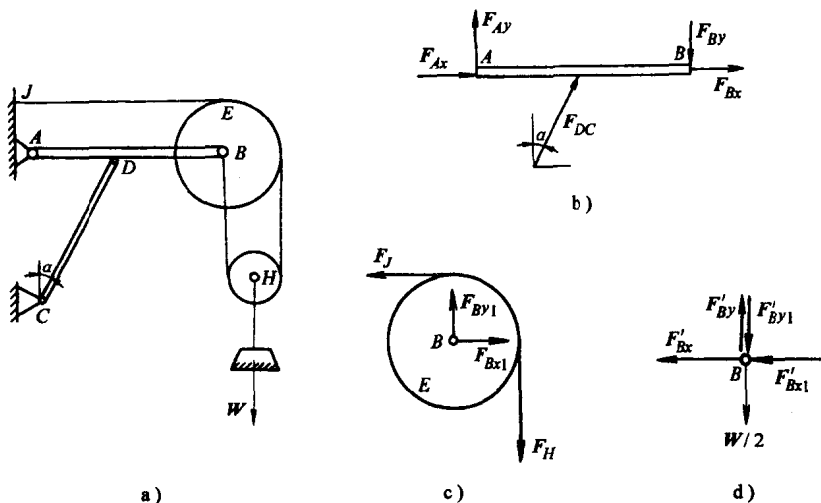


图 1-6 例 1-6 图

a) 系统 b) AB 杆 c) E 轮 d) 销钉 B

取 AB 杆为研究对象，作 AB 杆的受力图。A 端约束对应的约束反力为 F_{Ax} 、 F_{Ay} ；CD 杆为二力杆，故对 AB 杆的约束反力为 F_{DC} ；B 端 F_{Bx} 、 F_{By} 为销钉 B 对 AB 杆的约束反力；再取 E 轮为研究对象 F_J 、 F_H 为柔索对 E 轮的约束力，沿轮缘的切向； F_{Bx1} 、 F_{By1} 为销钉对 E 轮的约束反力；最后取消钉为研究对象；力 $W/2$ 为柔索对销钉的作用力，由 H 轮的平衡可知大小。销钉上 F'_{Bx} 、 F'_{By} 与 F_{Bx} 、 F_{By} ， F'_{Bx1} 、 F'_{By1} 与 F_{Bx1} 、 F_{By1} 分别构成作用与反作用关系，分别表示 E 轮、AB 杆对销钉的约束反力。AB 杆、E 轮、销钉 B 的受力图分别如图 1-6b~d 所示。

例 1-7 图 1-7 所示系统为多跨单层厂房的简图。力 F 为水平地震力。试作出系统各构件的受力图。

解：这是一个典型的系统受力分析题。正确分析系统内各构件的受力，需要解决两个主要问题：一是各构件的分析顺序。从学习中会发现，受力分析顺序一般常与计算顺序相反，对本系统，经分析可以知道，由于 HG 构件为二力构件，其上力线方向是已知的（指向由计算具体确定），故受力分析顺序为 $HG \rightarrow DEH \rightarrow BCD \rightarrow AB$ 。二是各构件之间的相互作用关系。不管关系如何复杂，它们应满足（如作用与反作用定律、

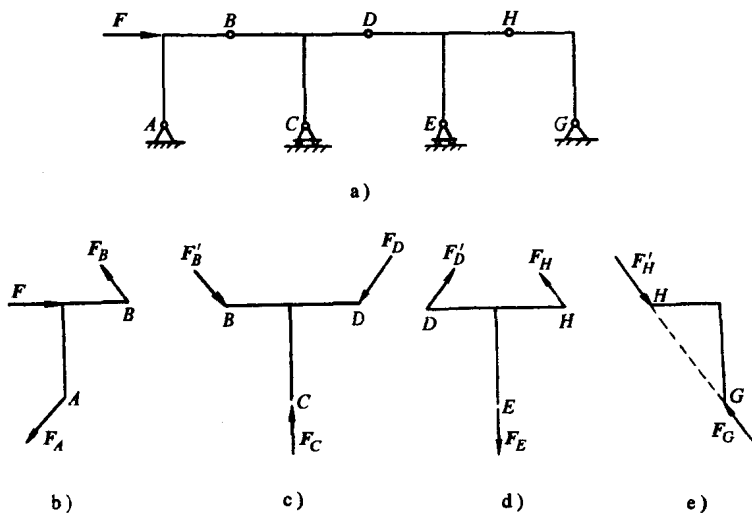


图 1-7 例 1-7 图

a) 系统 b) AB 构件 c) BCD 构件 d) DEH 构件 e) HG 构件

三力汇交原理、二力平衡原理等) 静力学公理。

本系统各构件受力图分别由图 1-7 所示。

1.3 习题

1. 是非题 (对画√, 错画×)

1-1 凡在二力作用下的约束称为二力构件。()

1-2 在两个力作用下, 使物体处于平衡的必要与充分条件是这两个力等值、反向、共线。()

1-3 力的可传性只适用于刚体, 不适用于变形体。()

1-4 凡是合力都比分力大。()

1-5 凡矢量都可用平行四边形法则合成。()

1-6 力是滑动矢量, 可沿作用线移动。()

2. 填空题 (把正确答案写在横线上)

1-7 均质杆在 A 、 B 两点分别与矩形光滑槽接触, 并在图示情况下平衡。AD 杆长为 _____。

1-8 AB 杆自重不计, 在 5 个已知力作用下处于平衡, 则作用于 B 点的四个力的合力 F_R 的大小 $F_R =$ _____, 方向沿 _____。

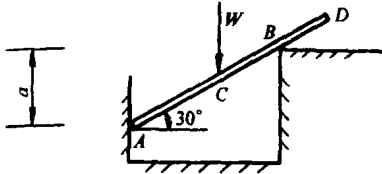


图 1-8 题 1-7 图

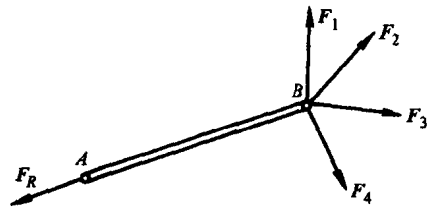


图 1-9 题 1-8 图

3. 回答题

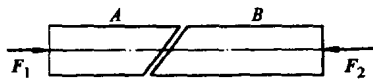


图 1-10 题 1-9 图

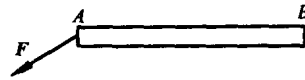


图 1-11 题 1-10 图

1-9 刚体 A 、 B 自重不计, 在光滑斜面上接触。如图 1-10 所示。其上分别作用有两等值、反向、共线的力 F_1 和 F_2 , 问 A 、 B 是否平衡?

1-10 图 1-11 中, 能否在 B 点加一力使 AB 杆平衡?

1-11 图 1-12 所示刚架 AC 和 BC , 在 C 处用销钉连接, 在 A 、 B 处分别用铰链支座支承构件形成一个三铰拱。现将作用在刚体 BC 上的力 F 沿着其作用线移至刚体 AC 上。不计三铰刚架自重。试问移动后对 A 、 B 、 C 三处的约束反力有没有影响? 为什么?

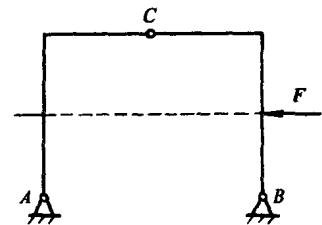


图 1-12 题 1-11 图

1-12 作用于刚体上的平衡力系, 如果作用到变形体上, 该变形体是否也一定平衡?

1-13 为什么说二力平衡条件、加减平衡力系原理和力的可传性等只能适用于刚体?

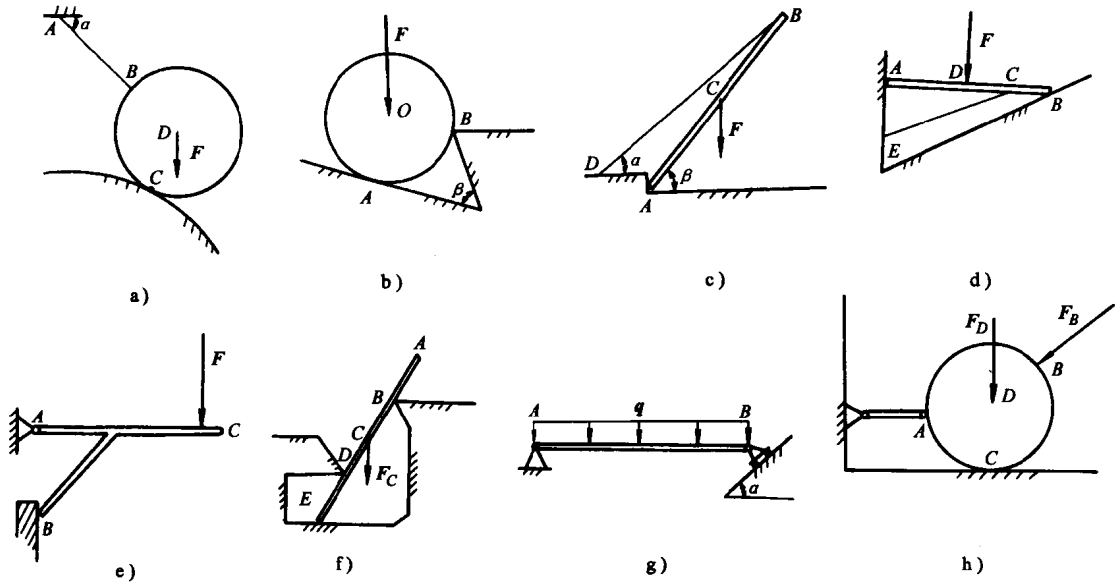


图 1-13 题 1-14 图

a) D 轮 b) O 轮 c) AB 杆 d) ADB 杆 e) ABC 杆 f) AE 杆 g) AB 杆 h) D 轮

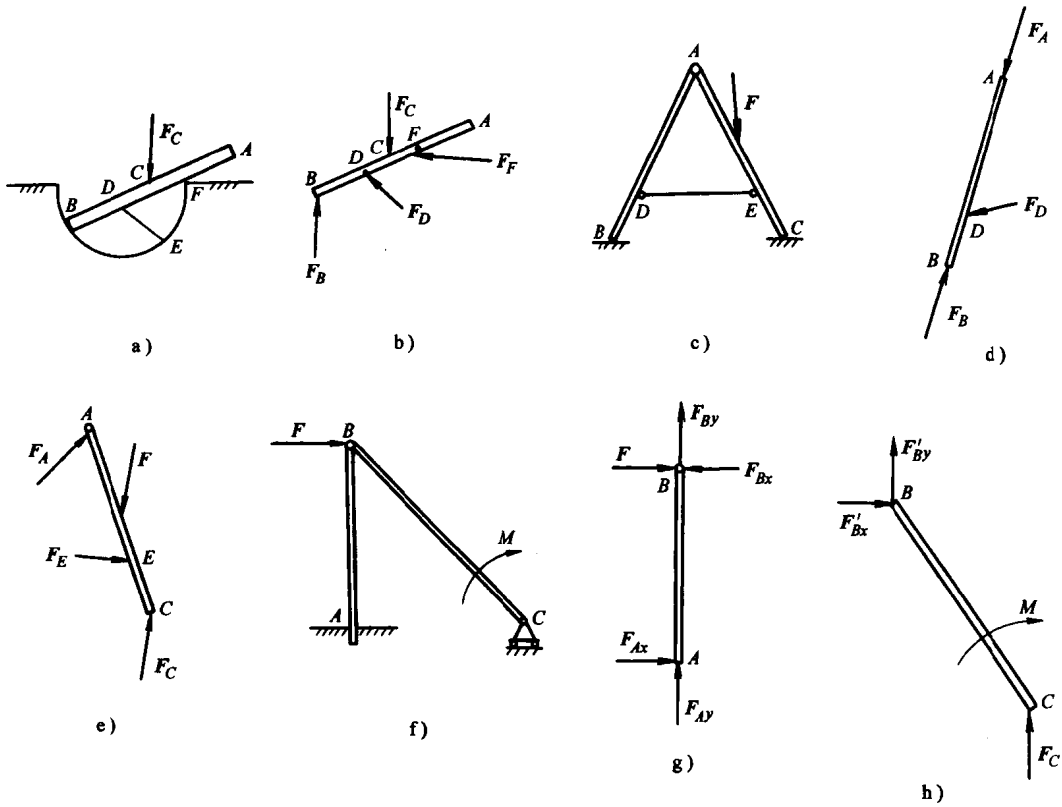


图 1-14 题 1-15 图

a) AB b) AB 受力图 c) ABC d) AB 受力图 e) AC 受力图 f) ABC 结构 g) AB 受力图 h) BC 受力图

4. 分析题

1-14 分析下面各物体所受的约束反力，并画出它们的受力图。假设所有接触面都是光滑的，其中没有画重力的物体，其自重不计。

1-15 分析下列各结构对应的受力图，如有错误，请予以改正（接触为光滑接触。）

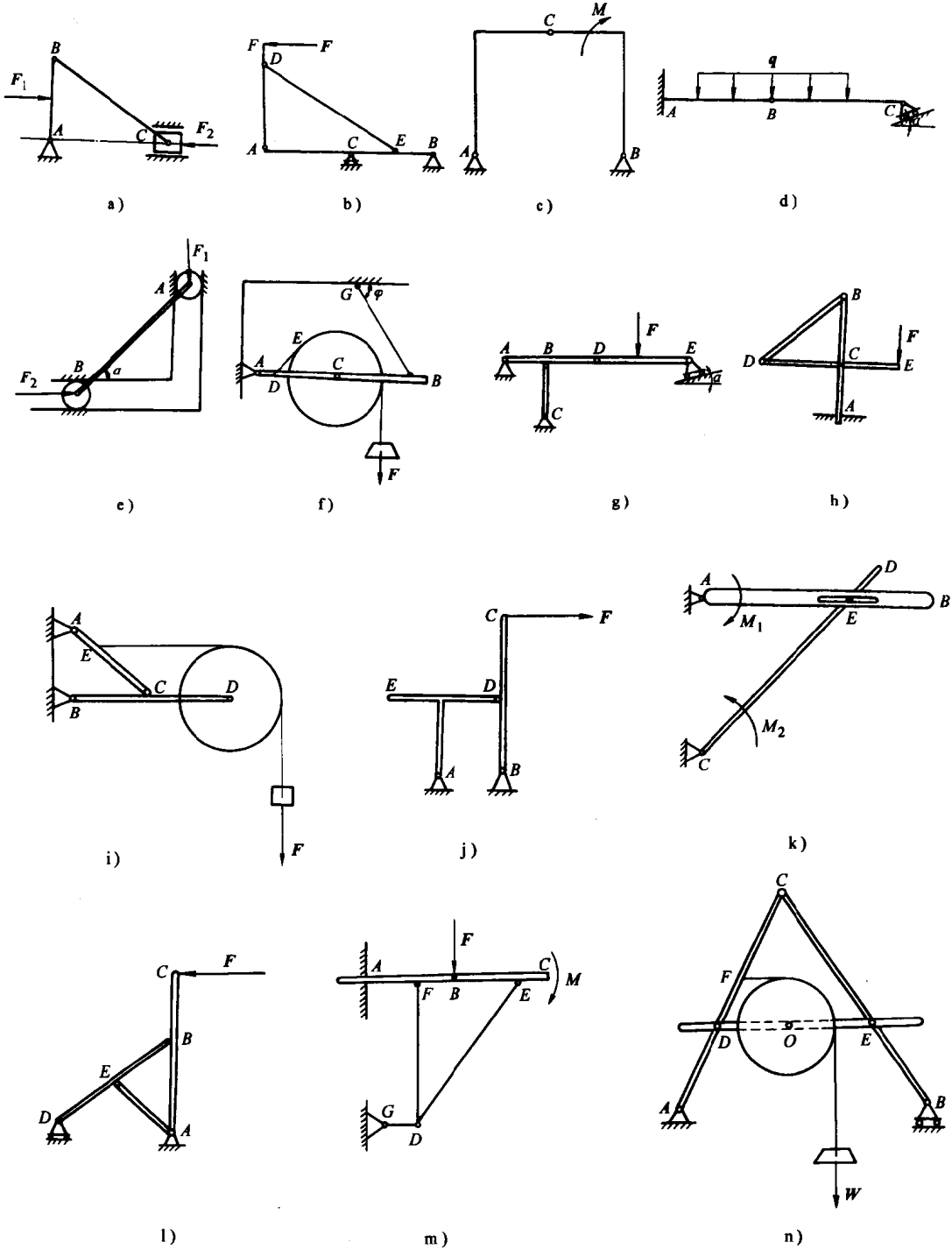


图 1-15 题 1-16 图

a) AB 杆、C 滑块 b) AD、AB 杆 c) BC 杆 d) AB、BC 杆 e) A、B 物块 f) AB 杆 g) AD、DE 杆 h) AB、DE 杆 i) BD、AC 杆、系统 j) BC 杆 k) AB、CD 杆、系统 l) DB、AC 杆 m) AB、BC 杆、系统 n) DE、AC、CB 杆

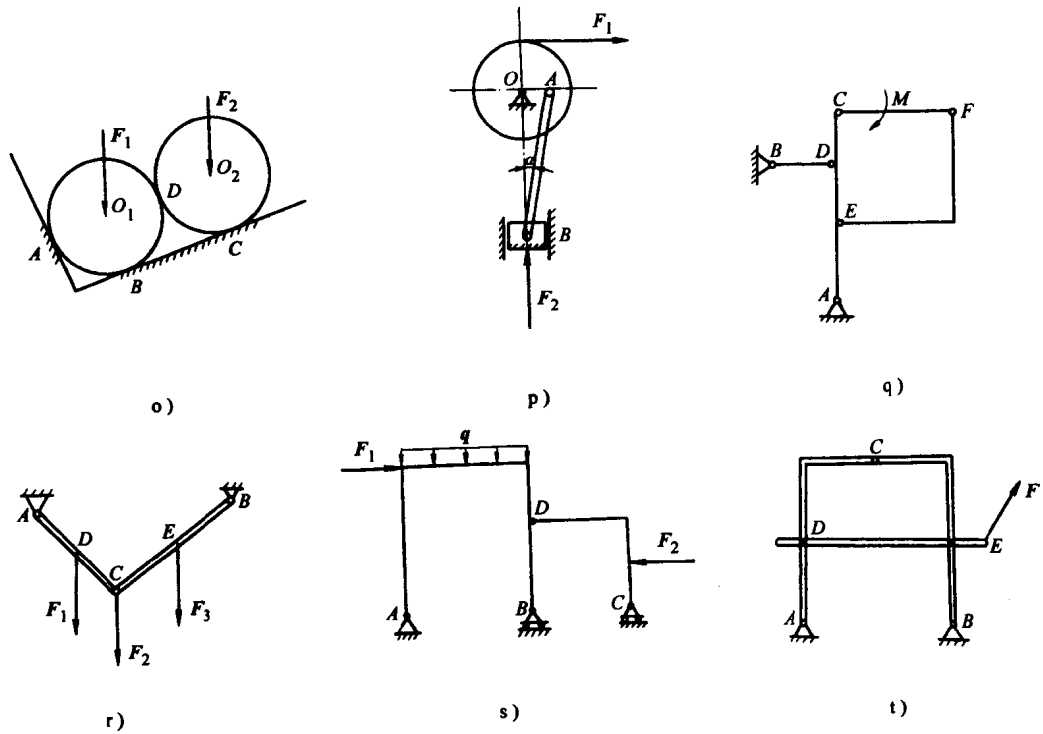


图 1-15 题 1-16 图 (续)

o) O_1 、 O_2 轮 p) O 轮、 B 滑块 q) CF 、 AC 杆 r) AC 、 BC 杆 s) AB 刚架、 DC 杆、系统 t) 整体、 BC 杆、 DE 杆

1-16 画出图示机构中指定杆件的受力图 (接触为光滑接触)。

第2章 汇交力系

2.1 内容提要

汇交力系是一种基本力系，它的理论是研究一般力系的基础。各力的作用线均汇交于一点的力系称为汇交力系，视其各力作用线是否位于同一平面内，又可分为平面汇交力系和空间汇交力系。

本章将研究两个问题，即汇交力系的合成与平衡问题。汇交力系合成的结果为一个合力，合力作用线通过力系的汇交点，合力的大小和方向与力系中各力的矢量和相同，即

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2 + \cdots + \mathbf{F}_n = \Sigma \mathbf{F}$$

汇交力系平衡的必要和充分条件为

$$\mathbf{F}_R = \Sigma \mathbf{F} = 0$$

对上述两式的具体运算，可采用几何法和解析法。

2.1.1 几何法

1. 力系合成的几何法

将汇交力系中各力 \mathbf{F}_1 、 \mathbf{F}_2 、 \cdots 、 \mathbf{F}_n 自汇交点出发，首尾相接而不必考虑次序，可得一折线，连接汇交点与最后一力矢端则构成一折线多边形。该封闭边即代表力系的合力。如图 2-1 所示。

2. 平衡的几何条件

汇交力系平衡时力系中各力组成的力多边形自行封闭，此即汇交力系平衡的几何条件。

2.1.2 汇交力系合成与平衡的解析法

解析法以力在坐标轴上的投影为基础进行计算，用该方法研究汇交力系，特别是空间汇交力系的合成与平衡问题显得十分便利。

1. 力在直角坐标轴上的投影

(1) 力的一次投影 若已知力作用于点 A ，并分别与 x 、 y 、 z 三轴夹角 α 、 β 、 γ ，如图 2-2 所示，则其在 x 、 y 、 z 三坐标轴上的投影分别为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F \cos \alpha \\ F_y &= F \cos \beta \\ F_z &= F \cos \gamma \end{aligned} \right\}$$

式中 α 、 β 、 γ ——称为力 F 的方向角，它们的余弦称为力 F 的方向余弦。

(2) 力的二次投影 即首先把力投影到包含投影轴的平面上得到一矢量 F_{xy} ，然后将在该平面上的投影再投影到该投影轴上，如图 2-3 所示。则力在 x 、 y 、 z 三个坐标轴上的投

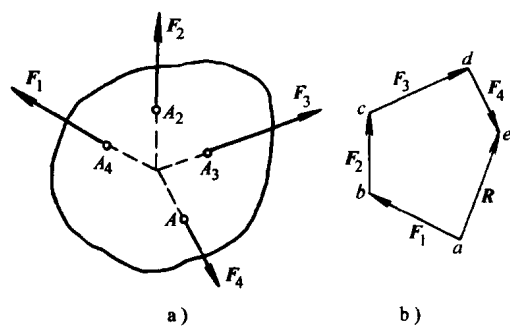


图 2-1 汇交力系合成
a) 受力图 b) 力多边形