

工 程 力 学

焦安红 代美泉 主 编

李韩博 陈 萌 副主编

清华大学出版社

北 京

内容简介

本书内容分为两部分，第一部分为刚体静力学，共有四个项目，分别介绍了刚体静力学的概念、刚体静力分析、平面力系分析、摩擦；第二部分为构件的承载能力，共有四个项目，分别介绍了材料力学的基础知识、构件基本变形的强度和刚度、构件组合变形的强度、压杆稳定性问题。每部分均配有知识思维导图，用于说明讲述的主要内容。

本书精选了工程实践以及后续专业课程中必须掌握的知识、技能，以任务驱动的项目教学形式，由简到繁、由浅入深地展开，每个任务通过知识引出与内容相关的力学素养园地，给出培养学生的素养目标；通过实操练习、问题归纳、任务学习评价检验学生的知识目标、技能目标的完成情况，及时调整学习进度。

本书可作为高职高专院校机电类、近机电类各专业以及高等院校、成人教育等非土、非机专业少学时工程力学课程的教材，也可供相关工程技术人员阅读参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 焦安红, 代美泉主编. -- 北京 : 清华大学出版社, 2025. 7. -- ISBN 978-7-302-69498-4

I. TB12

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20257UE951 号

责任编辑：王 定

封面设计：周晓亮

版式设计：思创景点

责任校对：成凤进

责任印制：杨 艳

出版发行：清华大学出版社

网 址：<https://www.tup.com.cn>, <https://www.wqxuetang.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社 总 机：010-83470000 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市君旺印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：14.5 字 数：344 千字

版 次：2025 年 8 月第 1 版 印 次：2025 年 8 月第 1 次印刷

定 价：59.80 元

产品编号：111313-01

前 言

党的二十大报告强调，加强基础学科、新兴学科、交叉学科建设，加快建设中国特色、世界一流的大学和优势学科。基础学科是科技创新的源头，基础学科人才培养事关科技自立自强、民族复兴伟业，极具战略意义。工程力学既是基础学科，又是应用学科。作为基础学科，工程力学是机械、土木、交通、能源、材料等相关工科的基础；作为应用学科，工程力学几乎与所有工科专业交叉，直接解决工科专业发展和工程实际中的力学难题。

本书主要内容分为两部分，第一部分为刚体静力学，介绍了刚体静力学的概念、刚体静力分析、平面力系分析、摩擦等内容，旨在培养学生对机械零部件进行受力和受力分类计算的初步能力；第二部分为构件的承载能力，介绍了材料力学的基础知识、构件基本变形的强度和刚度、构件组合变形的强度、压杆稳定性问题，旨在培养学生初步掌握机械零部件承载能力的计算方法及对力学问题进行定性分析的综合能力。每部分配有知识思维导图，用于说明讲述的主要内容。

本书针对高职教育的特点，力求通俗易懂，以项目任务的形式展开教学，以应用为主，突出实用性、典型性和教学可操作性，贯穿素养元素，着眼于培养学生的辩证唯物主义观点、科学精神和创新能力。

本书编写突出以下特点：

- (1) 本书分两部分，增加了知识思维导图，更清晰地表述了各部分教学要点。
- (2) 本书以项目构建知识模块，分解成多个任务，每个任务通过工程实践案例导入，通过任务驱动、讲练结合的形式组织教学内容。
- (3) 本书各任务明确列出知识、技能、素养三个学习目标，紧紧围绕目标组织教学内容，通过实操练习、问题归纳、任务学习评价检验学生的目标达成情况，做到科学合理地安排学习进度。
- (4) 本书挖掘工程力学中所涉及的素养教育和立德树人等元素，提炼工程力学素养教育的典型案例，并融入全书，实现立德树人润物无声的效果。

本书建议学时为 72~108 学时。

本书由焦安红、代美泉担任主编，由李韩博、陈萌担任副主编。全书由两部分、八个项目组成，其中项目一、项目二由代美泉编写，项目三、项目五、项目六、项目七由焦安红编



写；项目四、项目八由李韩博编写，各项目中的知识拓展部分及附录由陈萌编写。全书由焦安红和代美泉修改定稿。

限于编者水平，书中难免存在不足之处，敬请广大读者提出宝贵的意见和建议。

本书提供有教学大纲、教学课件、电子教案、实操练习参考答案和模拟试卷，读者可扫下列二维码获取。



教学大纲



教学课件



电子教案



实操练习
参考答案



模拟试卷

编者

2025年3月于西安

目 录

第一部分 刚体静力学/1

项目一 刚体静力学的概念	3
项目二 刚体静力分析	11
任务一 认识约束模型	11
任务二 画构件的受力图	21
项目三 平面力系分析	30
任务一 平面汇交力系的合成与平衡	30
任务二 平面力偶系的合成与平衡	40
任务三 平面任意力系的合成与平衡	52
任务四 平面平行力系的合成与平衡	64
任务五 物体系统的平衡问题	69
项目四 摩擦	78

第二部分 构件的承载能力/91

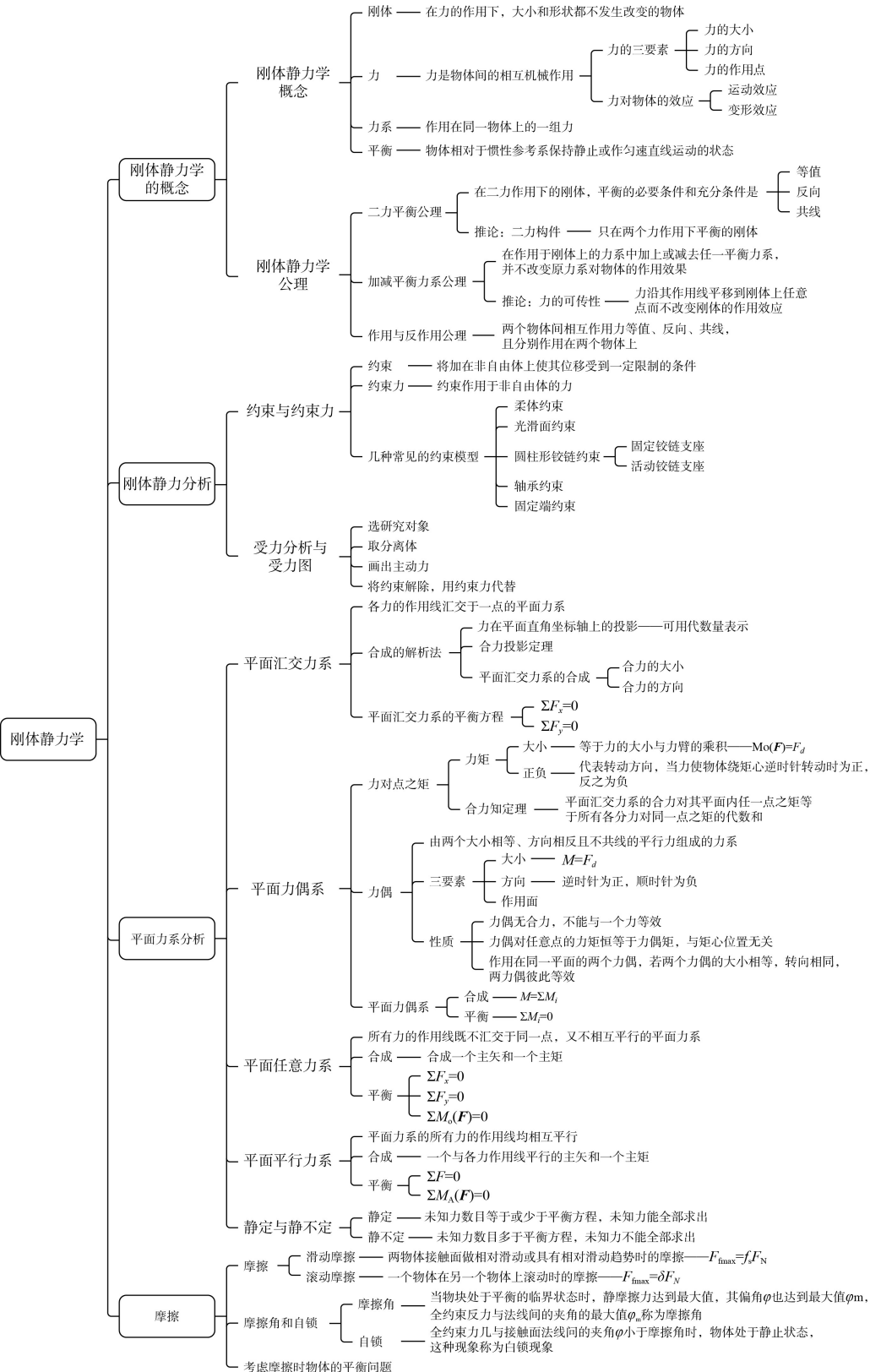
项目五 材料力学的基础知识	93
项目六 构件基本变形的强度和刚度	103
任务一 轴向拉(压)杆的强度	103
任务二 剪切与挤压变形的强度	126
任务三 圆轴扭转变形的强度和刚度	136
任务四 平面弯曲梁变形的强度和刚度	152
项目七 构件组合变形的强度	192
任务一 弯拉(压)组合变形构件的强度	192
任务二 弯扭组合变形构件的强度	201
项目八 压杆稳定性问题	212
参考文献	226


第一部分

刚体静力学

工程力学是人们“经久耐用、造价低廉”的要求和愿望的产物。怎样才能保证构件经久耐用呢？大家知道，构件的破坏是由力引起的。工程力学从研究构件的受力分析开始，研究构件的变形和破坏规律，为工程构件的设计和制造提供可靠的理论依据和实用的计算方法。

本书从解决问题的逻辑顺序出发，按照“刚体静力学→单一变形的强度和刚度问题分析→组合变形的强度设计”组织教学内容。其中，刚体静力学研究的是物体在力系作用下处于平衡状态的规律，不涉及物体的运动，其力学模型是刚体，具体内容参见刚体静力学学习思维导图。





项目一 刚体静力学的概念

任务描述

一、任务情境

力的概念最初是人类在劳动过程中通过肌肉紧张的感觉而总结产生的。公元前 480—公元前 380 年，中国的墨翟(约公元前 478—公元前 392 年)及其弟子考察了人体对周围环境的作用，看到人们通过肌肉的动作，如举、持、掷、踢、蹬，可以使别的物体发生位置移动，从而总结出肌肉力的概念。《墨经》一书对运动和力有明确的定义，在力的概念及许多力学知识方面，走在同时代的前沿，闪耀着中华民族智慧的光辉。

刚体的概念出现在古希腊时期，亚里士多德提出了“天体本身就是刚体”的观点，欧多克索斯研究了刚体的平衡和静力学问题。古代人们由于缺乏科学的实验和精确的数学分析，对刚体力学的研究主要停留在经验和定性描述的阶段。直到 17 世纪，伽利略和开普勒的研究成果开启了近代科学的大门。18 世纪，欧拉、达朗贝尔和拉格朗日等科学家开始运用微积分和变分法来研究刚体力学问题，建立了刚体力学的数学模型。20 世纪初，爱因斯坦提出了相对论，进一步推动了刚体力学的发展。

刚体力学的发展历程充满了曲折和变化，但它对现代工程学的发展有着重要的贡献，刚体力学的理论和方法被广泛用于工程设计、机械制造、航空航天等领域。接下来，就让我们开始学习刚体静力学的概念吧。

二、任务学习目标

(一) 知识目标

- (1) 理解力、刚体及平衡的基本概念。



- (2) 掌握静力学公理和推论的内容。
- (3) 会分析物系内每个物体的受力情况。

(二) 能力目标

- (1) 能够判断二力杆。
- (2) 能够区分作用与反作用公理和二力平衡公理。
- (3) 能够注意作用力与反作用力公理的应用。

(三) 素养目标

- (1) 能根据刚体的定义运用辩证唯物主义观点思考问题。
- (2) 运用力及静力学公理逐步提高观察问题的能力。

应知应会

一、刚体

刚体是指在力的作用下,大小和形状都不发生改变的物体。静力学以刚体为研究对象,因此又称**刚体静力学**。刚体是对实际受力物体的力学抽象。自然界中的任何物体受力后都要发生变形。如果物体变形较小,在研究平衡或运动时不起主要作用,变形可以忽略不计。例如,图 1-1 所示的横梁在力 F 的作用下产生的弯曲变形仅为梁长度的千分之几,在考查横梁平衡时可以忽略,因为由此引起的梁长度的变化微小,仍用梁的原长进行计算。这样既不会引起显著的误差,使计算过程大为简化,又能满足工程精度要求。

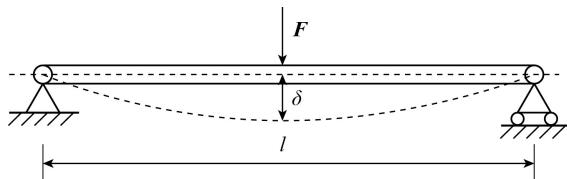


图 1-1 横梁弯曲变形

二、力和力系

(一) 力

力是物体间的相互机械作用。人们在长期的生活和大量的生产实践中逐步形成了对力的感性认识,这种感性认识再上升到理性,就建立起了抽象的力的概念。

物体间的相互机械作用大致分为两类:一类是物体直接接触的作用,如物体之间的挤压力、机车索引车厢的拉力等;另一类是场的作用,如地球引力场对物体的吸引力、电场对电荷的吸引力。

力对物体的作用使物体的运动状态和形状发生改变。力使物体运动状态发生变化的效应称为力的外效应,力使物体产生变形的效应称为力的内效应。静力学将物体抽象为



刚体，只考虑力的运动效应；而对于变形体，则既需考虑力的运动效应又需考虑力的变形效应。

由实践经验可知，力对物体的作用效果取决于力的三要素，即力的大小、方向和作用点。力的三要素可用矢量表示。用线段的起点或终点表示力的作用点，用箭头表示力的方向，用线段的长度表示力的大小，如图 1-2 所示。

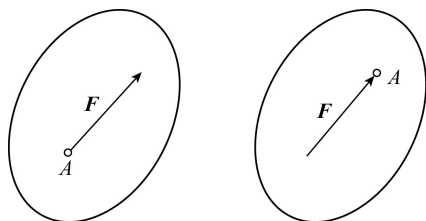


图 1-2 力的图示

力的国际制单位是牛(N)或千牛(kN)。目前在工程中，与国际单位制并用的还有工程单位制。力的工程制单位是千克力(kgf)。两者的换算关系是 1 千克力(kgf)=9.8 牛(N)。

(二) 分布力和集中力

力的作用点，实际上就是力作用位置的抽象化。物体受力一般是通过物体直接接触进行的。接触处多数情况下不是一个点，而是具有一定尺寸的面积。因此，其接触处所受的力都是作用在接触面积上的分布力，但分布力的分布规律比较复杂。例如，人的脚掌对地面的作用力以及脚掌上各点受到的地面的支撑力都是不均匀的。

当分布力作用面积很小时，为了分析计算方便起见，可以将分布力简化为作用于一点的合力，称为集中力。如果物体间的接触面积比较大，那么力在整个接触面积上的作用强度应用单位面积上的力的大小(载荷集度)来表示。面分布力载荷集度的单位为 N/m^2 。

在实际工程中常遇到一种沿狭长面积分布的力，往往将其简化为沿长度分布的力，称为线分布力。例如，图 1-3 所示的桥式起重机横梁，横梁上电葫芦与横梁接触面积较小，即可视为集中力；而横梁的自重则为分布力。

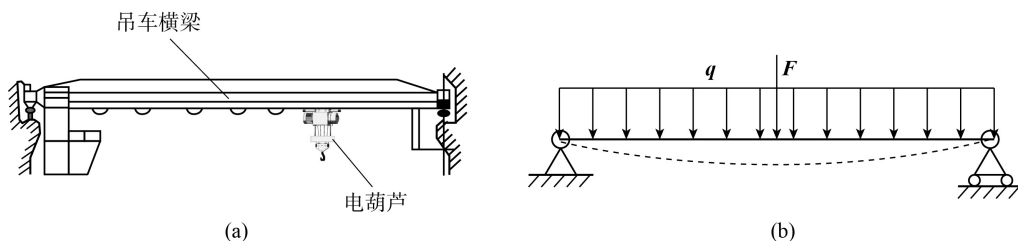


图 1-3 桥式起重机横梁

线分布力的分布载荷集度的单位为 N/m 。如图 1-4 所示，若线分布力是沿梁的长度均匀分布的，在运算时往往将其等效地替换为一集中力 F_q ，即 $F_q = ql$ ，作用点在梁的中点处。

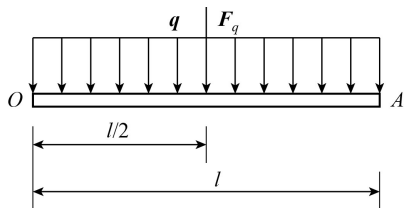


图 1-4 线分布力的简化

(三) 力系

力系是指作用在同一物体上的一组力。如图 1-5(a)、图 1-5(b)所示，作用于物体的两个共点力是一个力系；如图 1-5(c)所示，作用于物体的若干个力也是一个力系。

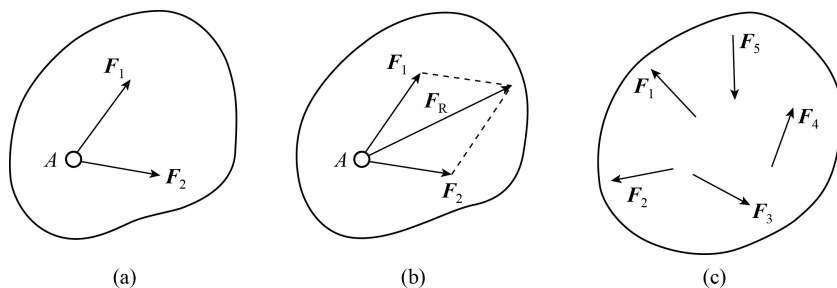


图 1-5 力系

使同一刚体产生相同作用效应的力系称为等效力系。

如果某力对物体的作用效应与一个力系相同，则称此力为该力系的合力，该力系中各力称为该合力的分力。如图 1-5(b)所示，我们可由力的平行四边形法则求出它的合力 F_R ， F_R 是 F_1 和 F_2 的合力， F_1 和 F_2 是 F_R 的分力。对于这种把一个较复杂的力系变成一个与其等效的简单力系的过程，称为力系的简化。

根据力系中各力作用线的分布情况，通常将力系加以分类：若各力作用线在同一平面内，称为平面力系；若各力作用线不在同一平面内，称为空间力系；若各力作用线汇交于一点，称为汇交力系；若各力作用线相互平行，称为平行力系；若各力作用线既不相交于一点也不完全平行，称为任意力系；若各力作用线在同一平面并汇交于一点的力系，称为平面汇交力系。还有一些其他类型的力系，可依此类推。

三、平衡与平衡力系

(一) 平衡

平衡是指物体在力的作用下相对于惯性参考系保持静止或匀速直线运动状态。在一般工程技术问题中，把固连于地球上的参考系视为惯性参考系，也就是说，物体的平衡是相对于地球而言的。例如，静止在地面上的机床、桥梁以及在直线轨道上做匀速运动的火车等物体都是在各种力系的作用下处于平衡状态的。



(二) 平衡力系

平衡力系是指作用于物体并使物体处于平衡状态的力系。

力系的平衡条件是指作用在处于平衡状态物体上的力系所应满足的条件。

满足平衡条件的力系是平衡力系。运用力系的平衡条件可以解决受力系作用的杆件和杆件结构的平衡问题。它是设计结构构件或机械零件时进行静力计算的基础。

四、刚体静力学的基本公理

公理是人类从反复的实践中总结出来的客观规律，它的正确性已被人们所公认。刚体静力学公理是研究静力学的基础和解决静力学问题的关键。

公理一 二力平衡公理

内容：作用在同一刚体上的两个力使刚体处于平衡的充分条件与必要条件是：这两个力大小相等、方向相反，且作用在同一条直线上(简称等值、反向、共线)。其数学表达式为

$$F_1 = -F_2$$

注意：对于变形体，二力等值、反向、共线只是其平衡的必要条件。例如，图 1-6(a)所示的绳子受到一对等值、反向、共线的拉力作用时处于平衡状态，但若绳子受到两个等值、反向、共线的压力作用，绳子就会因其原有位置和几何形状发生改变而失去平衡，如图 1-6(b)所示。因此，二力平衡公理只适用于刚体。

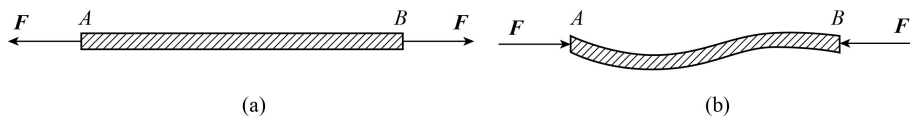


图 1-6 作用于变形体上的二力

应用：分析图 1-7(a)中 AB 杆的受力，不计自重。根据力及二力平衡公理， AB 杆只在 A 点和 B 点两处与其他物体相互作用产生力，而且在这两个力作用下处于平衡，这两个力必然满足二力平衡公理。因此， AB 杆两端处力的表示形式也清楚了，其受力图如图 1-7(b)所示。

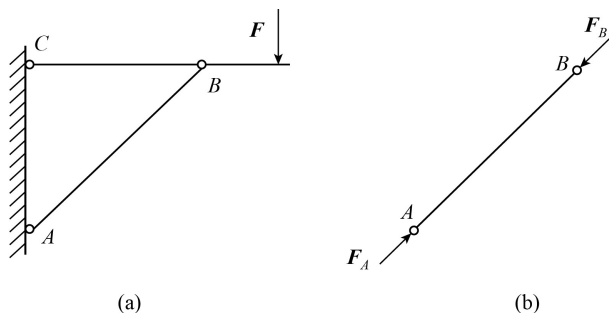


图 1-7 二力构件与二力杆

一般来说，只受两个力作用而平衡的构件，都称为二力构件，若该构件为杆件则称为二力杆。二力杆可以是直杆，也可以是不考虑变形的曲杆或折杆。在实际工程中，杆类零



件通常不计自重。二力构件概念的定义大大简化了工程力学构件的受力分析和计算，它是工程力学的一个重要概念。

公理二 加减平衡力系公理

内容：作用在刚体上的任何一个力系加上或减去任何一个平衡力系，并不改变原力系对刚体的作用。

这是显而易见的，因为平衡力系对于刚体的平衡或运动状态没有影响。该公理是力系简化的重要理论依据。注意：加减平衡力系公理仅适用于刚体。由该公理我们可以得到一个重要的推论，即力的可传性。

推论 力的可传性原理

内容：刚体上的力可沿其作用线移动到该刚体上任一点而不改变此力对刚体的作用效应。这一推论说明作用在刚体上的力是一个滑移矢量，该力三要素为大小、方向和作用线。

在图 1-8(b)所示刚体上，如果令力 $F = F' = F''$ ，则 F' 和 F 也是一对平衡力，减去这对平衡力后，刚体的受力情况如图 1-8(c)所示，这时物体的运动状态并没有任何改变。

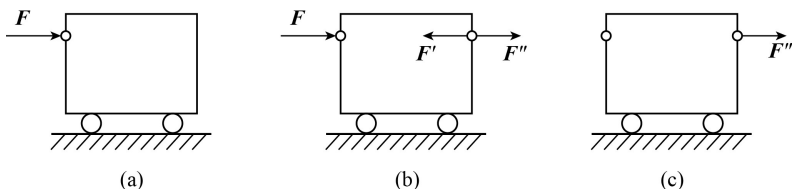


图 1-8 力的可传性

公理三 作用与反作用公理

内容：两物体间相互作用力总是同时存在，并且二力等值、反向、共线，分别作用在两个物体上。这两个力互为作用与反作用的关系。如图 1-9(b)所示，将作用力用 F_N 表示，反作用力用 F'_N 表示，以此表明作用力与反作用力之间的联系与区别。

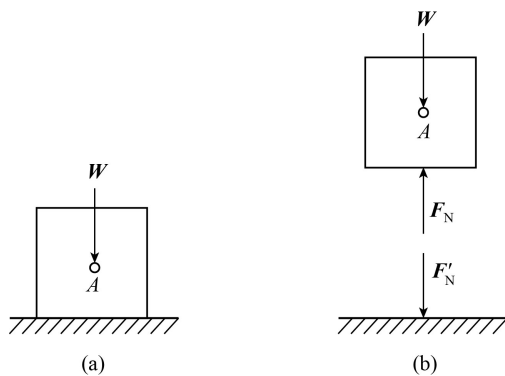


图 1-9 作用力与反作用力

作用力和反作用力是力学中普遍存在的一对矛盾，它们既互相对立，又互相依存，同时出现，同时消失，这是矛盾同一性的体现。

作用与反作用公理概括了自然界中物体间相互作用关系，表明一切力总是成对出现的，揭示了力的存在形式和力在物体间的传递方式。



注意：必须把作用与反作用公理、二力平衡公理严格地区分开来。作用与反作用公理是表明两个物体相互作用的力学性质，而二力平衡公理则说明一个刚体在两个力作用下处于平衡时两个力满足的条件。

素养园地

墨子——中国古代力学学者及其贡献

生平：墨子，名翟，春秋末期战国初期宋国人，宋国贵族目夷的后裔，曾担任宋国大夫。中国古代思想家、教育家、科学家、军事家，墨家学派创始人和主要代表人物。

贡献：墨子给出了力的定义：“力，刑(形)之所以奋也。”(摘自《墨经上》)也就是说，力是使物体运动的原因，即使物体运动的作用叫作力。

墨子认为，“动”是力推送的缘故。更为重要的是，墨子提出了“止，以久也，无久之不止，当牛非马也”的观点，意思是物体运动的停止来自阻力阻抗的作用，如果没有阻力，物体会永远运动下去。

墨子指出，称重物时秤杆之所以会平衡，是因为“本”短“标”长。用现代的科学语言来说，“本”即阻力臂，“标”即动力臂，写成为力学公式就是动力×动力臂(“标”)=阻力×阻力臂(“本”)。

此外，墨子还对杠杆、斜面、重心、滚动摩擦等力学问题进行了一系列的研究。



实操练习

一、填空题

- 力的可传性原理只适用于_____。
- 作用在刚体上的力可沿其作用线任意移动，而_____力对刚体的作用效果。所以，在静力学中，力是_____的矢量。
- 力对物体的作用效果一般分为_____效应和_____效应。

二、判断题

- 如物体相对于地面保持静止或匀速运动状态，则物体处于平衡。 ()
- 作用在同一物体上的两个力，使物体处于平衡的必要条件和充分条件是：这两个力大小相等、方向相反、在同一条直线上。 ()
- 在静力学公理中，二力平衡公理和加减平衡力系公理适用于刚体。 ()
- 在静力学公理中，作用力与反作用力公理和力的平行四边形公理适用于任何物体。 ()



问题归纳

问题 1: _____

问题 2: _____

问题 3: _____

学习评价

项目一 刚体静力学的概念						
序号	考核内容	考核标准	分值	学生自评 (30%)	学生互评 (30%)	教师评价 (40%)
1	理解力、刚体及平衡的基本概念,掌握静力学公理和推论的内容,会分析物系内每个物体的受力情况	准确回答力的概念	10			
2		准确回答刚体的概念	10			
3		准确回答平衡的概念	10			
4		清楚描述二力平衡公理	10			
5		清楚描述加减平衡公理	10			
6		清楚描述作用与反作用公理	10			
7	能够判断二力杆;能够区分作用与反作用公理和二力平衡公理;能够注意作用力与反作用公理的应用	能够运用二力平衡公理,准确判断二力杆	7			
8	能够判断二力杆;能够区分作用与反作用公理和二力平衡公理;能够注意作用力与反作用公理的应用	能够正确理解并运用作用与反作用公理和二力平衡公理	7			
9		能够注意作用力与反作用力的应用	6			
10	能根据刚体的定义,运用辩证唯物主义观点思考问题,能运用力及静力学公理逐步提高分析问题的能力	能够用辩证唯物主义观点正确理解刚体模型,注意分析问题抓住主要因素	10			
11	能根据刚体的定义,运用辩证唯物主义观点思考问题,能运用力及静力学公理逐步提高分析问题的能力	能够通过学习静力学概念,从力学体系形成中学习科学家的精神	10			
学生自评得分						
学生互评得分						
教师评价得分						

项目二 刚体静力分析

任务一 认识约束模型

任务描述

一、任务情境

如图2-1(a)所示，内燃机包含活塞、连杆、曲柄等工程构件，该图也可以看作内燃机的写实图，写实图有利于分析机构工作原理，却不利于研究机构受力情况。因此，我们需要把工程图抽象成平面力学简图，才能便于受力分析。图2-1(b)所示为内燃机的平面力学简图，也可以看作内燃机的表意图，这里将构件的连接形式通过各种约束表达出来。约束是力学中的重要概念，接下来，就让我们开始学习各类约束模型及其特点吧。

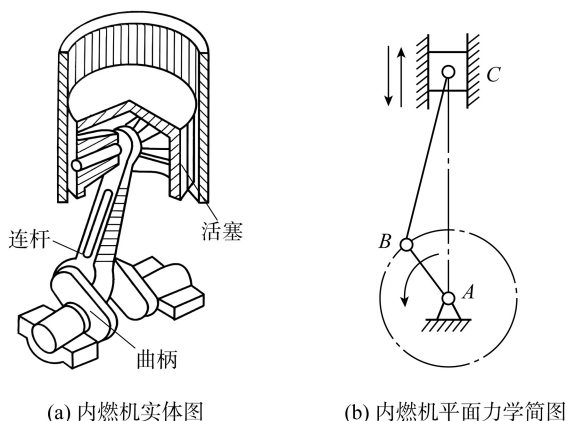


图 2-1 内燃机的平面力学简图



二、任务学习目标

(一) 知识目标

- (1) 理解约束和约束反力的概念。
- (2) 掌握常见的各类约束模型及其特点。
- (3) 掌握画平面力学简图的基本步骤。

(二) 能力目标

- (1) 能够正确理解约束的概念。
- (2) 能够辨别区分各类约束模型。
- (3) 能够把工程图简化成力学简图。

(三) 素养目标

- (1) 能够通过工程图熟悉工程，培养工程意识。
- (2) 能够通过工程图到力学简图的抽象简化过程，掌握实践到抽象的研究方法。

应知应会

一、约束和约束反力

工程中的机器和结构都是由若干零件和构件通过相互接触和相互连接而成的。每个构件的运动都被与它相连接的其他构件所限制。我们把对与之相连接构件的运动起限制作用的其他构件称为**约束**。

物体的运动如果受到其他物体的直接约束，如列车受到钢轨的约束、悬吊重物受到钢索的约束、各种机械中的轴受到轴承孔的约束等，我们把这类物体称为非自由体或受约束体。物体的运动如果没有受到其他物体的直接约束，如飞行中的飞机、火箭、人造卫星等，我们把这类物体称为自由体。

在工程力学中，物体上一般作用有主动力和约束反力两类力。能够促使物体运动或产生运动趋势的力称为主动力。这类力有物体重力或一些作用载荷等。主动力往往是给定的，当物体的运动或运动趋势受到约束时，约束对受约束体产生的作用力，称为**约束反力**，简称**约束力**。约束反力的方向总是与约束所限制物体的运动或运动趋势的方向相反，约束反力的作用点在约束与被约束物体的接触处。

一般情况下约束反力是由主动力引起的，其大小和方向因主动力的大小和作用线的不同而不确定，是一个未知力。因此，对约束反力的分析就成为受力分析的重点。其大小在静力学中可通过平衡条件求得。



二、约束模型

在实际工程中，构件间相互连接的形式多种多样，把这些相互连接形式，按其限制构件运动的特性抽象为理想化的力学模型，称为约束模型。

常见约束的约束模型有柔体、光滑面、光滑铰链、轴承等。实际工程中的约束与约束模型，有些比较相近，有些差异很大。因此，我们必须善于观察，正确认识约束模型及其意义。

(一) 柔体约束

(1) **组成**：工程上常用的钢丝绳、皮带、链条等柔性物体。

(2) **约束特点**：限制物体沿着柔索中心线伸长方向的运动。

(3) **约束反力方向**：柔索的约束反力作用在柔索与物体的连接点上，其方向一定是沿着柔索中心线，背离物体，即必为拉力。通常用 F_T 表示。

(4) **应用举例**：在图 2-2 所示的带轮传动机构中，带有紧边和松边之分，但两边的带所产生的约束反力都是拉力，只不过紧边的拉力要大于松边的拉力。

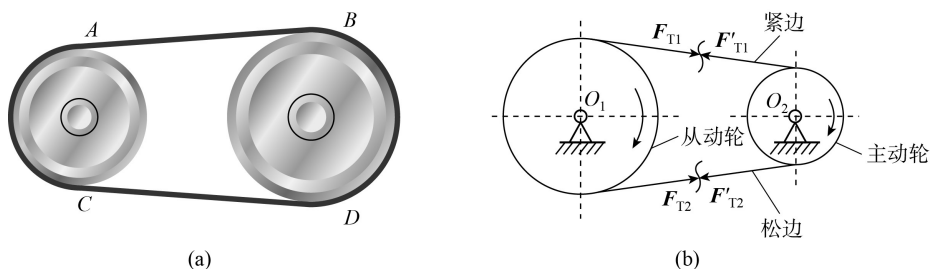


图 2-2 带轮传动机构

(二) 光滑面约束

(1) **组成**：由光滑接触面构成的约束。当两物体接触面之间的摩擦力小到可以忽略不计时，可将接触面视为理想光滑的约束，如支承物体的固定面、啮合齿轮的齿面等。

(2) **约束特点**：不论接触面是平面还是曲面，都不能限制物体沿接触面切线方向的运动，而只能限制物体沿着接触面的公法线指向约束物体方向的运动。

(3) **约束反力方向**：通过接触点，沿着接触面公法线方向，指向被约束的物体，通常用 F_N 表示。

(4) **应用举例**：如图 2-3 所示的齿轮传动机构中轮齿的约束反力。

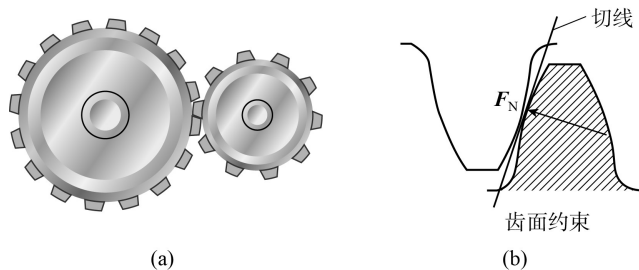


图 2-3 齿轮传动机构



(三) 光滑圆柱形铰链约束

(1) **组成:** 两物体分别钻有直径相同的圆柱形孔, 用一圆柱形销钉连接起来, 在不计摩擦时, 即构成**光滑圆柱形铰链约束**, 简称**铰链约束**。例如, 图 2-4 所示剪刀和订书机, 它们中间连接的销钉就是铰链约束。在机构简图中, 光滑圆柱形铰链通常用一个小圆圈表示。

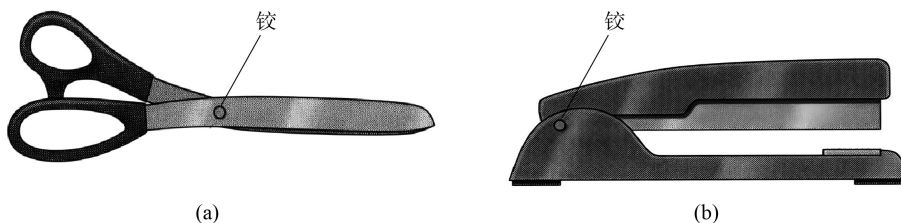


图 2-4 剪刀和订书机

(2) **约束特点及其约束反力:** 如图 2-5 所示, 这类约束的本质为光滑接触面约束, 因为其接触点位置未定, 所以只能确定铰链的约束反力为一通过销钉中心的大小和方向均无法预先确定的未知力。通常此力用两个大小未知的正交分力(F_{Ax} , F_{Ay})来表示。

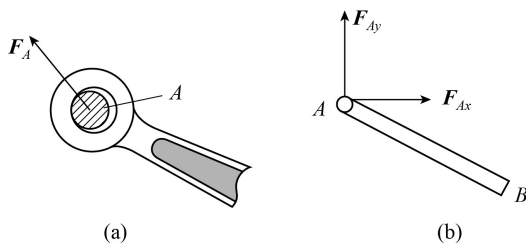


图 2-5 光滑圆柱形铰链的约束反力

(3) **铰链约束分类:** 铰链约束是工程上常见的一种约束。铰链约束有中间铰链、固定铰链支座、活动铰链支座等。

① 中间铰链。

结构特点: 两构件都能绕销钉轴线自由转动, 如图 2-6 所示的剪刀的结构及其约束反力。

说明: 一般不必分析销钉受力, 当要分析时, 必须把销钉单独取出。

② 固定铰链支座。

结构特点: 一个构件被固定为支座。支座是指能将物体连接在地、墙或机架等支承物上的装置。

固定铰链支座是在连接物体和支座上各开一直径相同的圆孔, 然后使两圆孔重叠, 再用一圆柱形销钉将其连接而成。其结构及力学简图如图 2-7 所示。

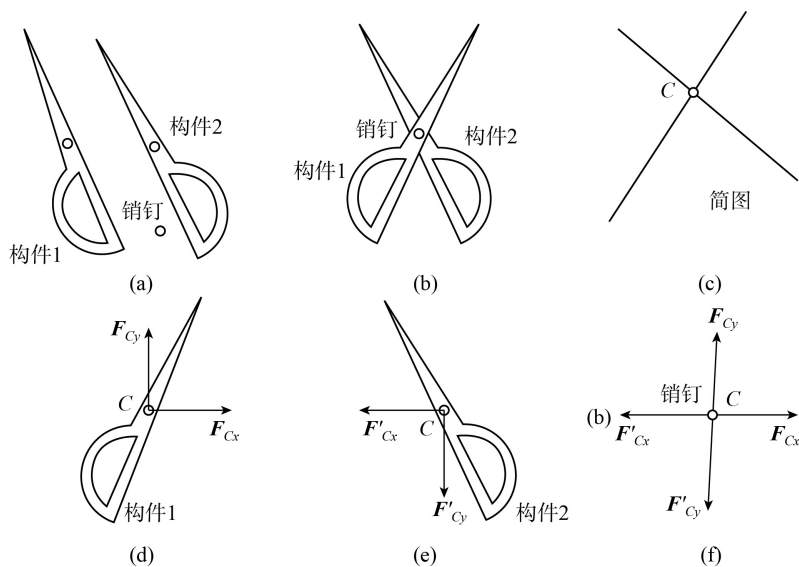


图 2-6 剪刀的结构及其约束反力

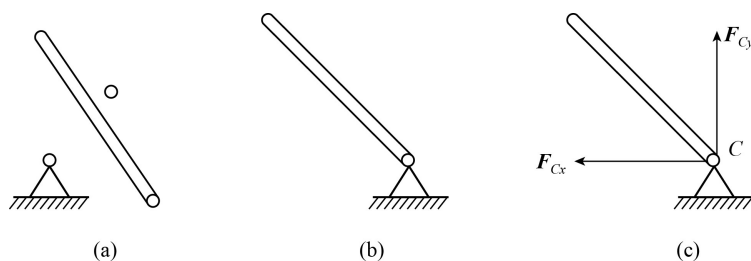


图 2-7 固定铰链支座结构及力学简图

③ 活动铰链支座。

结构特点：这种约束的支座没有固定在地、墙或机架上，而是在支座底座与支承面之间装有几个可滚动的辊轴，这样即构成活动铰链支座，又称辊轴支座。其结构及力学简图如图 2-8 所示。

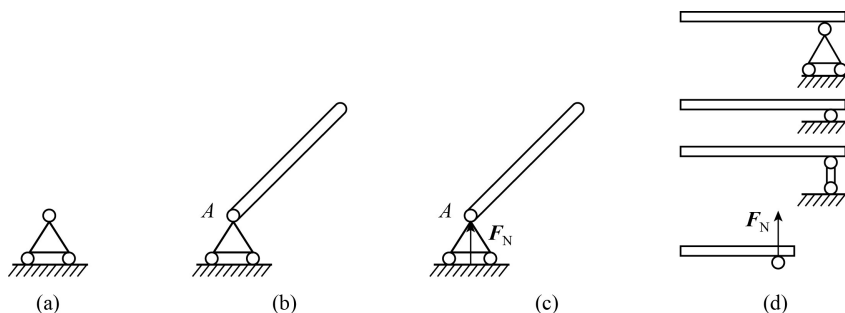


图 2-8 活动铰链支座结构及其力学简图

活动铰链支座只能限制被约束物体沿支座支承面法线方向的移动。活动铰链支座的约束反力作用线垂直于支承面且过铰心。



活动铰链支座常用在桥梁、屋架等工程结构中。这是因为这种约束只限制所支承物体沿垂直于支承面方向的移动，而不限制物体沿支承面方向的移动和绕铰链销钉的转动。因此，当温度变化引起桥梁、屋架等工程结构物在跨度方向伸缩，则允许活动铰链支座沿支承方向移动。

(4) **应用举例：**例如，图 2-9(a)所示为翻斗车的车箱，车箱与撑杆之间的连接为铰链连接，其平面力学简图及受力图如图 2-9(b)、图 2-9(c)所示。

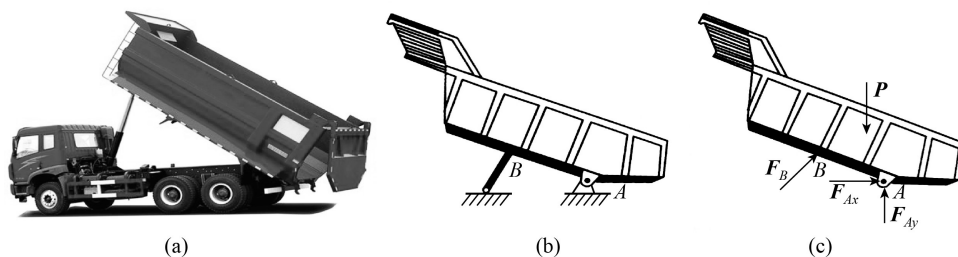
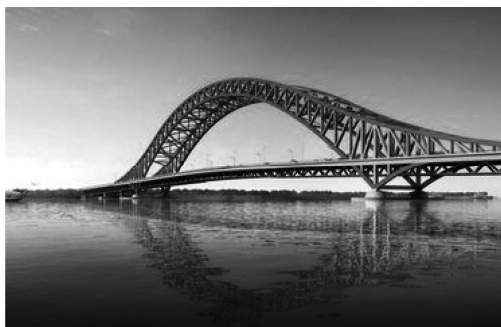
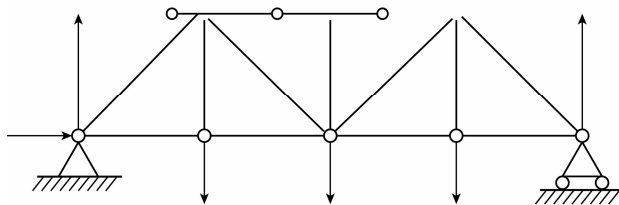


图 2-9 翻斗车的车箱

又如，图 2-10(a)所示为桥梁桁架，各杆之间通常采用铆接或焊接的方法连接，力学上抽象为铰链连接，平面力学简图及受力图如图 2-10(b)所示。



(a)



(b)

图 2-10 桥梁桁架

(四) 轴承

(1) **组成：**图 2-11(a)所示为径向轴承结构与力学简图，轴承由外圈、内圈、滚珠等构成。轴承是用来支承旋转轴的组件。

(2) **约束特点：**只允许轴在轴承孔内转动，而不允许轴移动。



(3) **轴承分类**: 轴承按其承受载荷方向的不同可分为径向轴承和推力轴承两类。

① **径向轴承**: 径向轴承的约束特点与光滑铰链相同, 即约束反力应在与轴线垂直的平面内, 通过圆轴中心。其结构及平面力学简图如图 2-11(b)、图 2-11(c)所示。

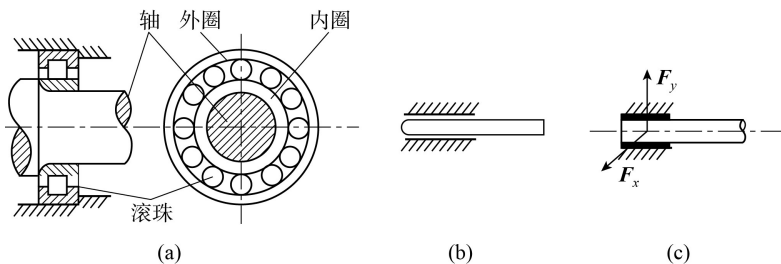


图 2-11 径向轴承结构与平面力学简图

② **推力轴承**: 如图 2-12 所示, 推力轴承除了与径向轴承一样具有作用线不定的径向约束反力外, 由于限制了轴的轴向运动, 还有沿轴线方向的约束反力。

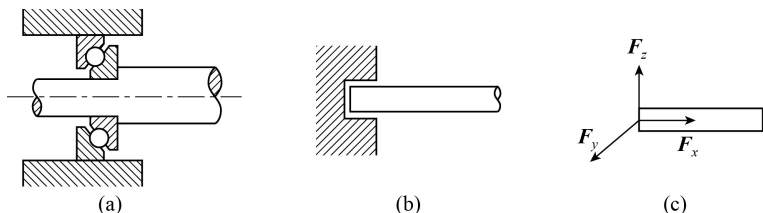


图 2-12 推力轴承结构与平面力学简图

三、构件的平面力学简图

在对工程构件进行受力分析时, 必须把真实的工程结构或构件的形状及其连接方式进行合理的抽象, 简化成能够进行分析计算的平面图形。

作平面力学简图时, 首先要在结构或构件上选择合适的简化平面, 画出其轮廓线(若是杆件可用其轴线代替), 然后按约束特性把约束简化为约束模型, 最后简化结构上的作用载荷。

【例 2-1】 桥式起重机大梁如图 2-13(a)所示。试画出其平面力学简图。

解: (1) 构件的简化。为了考查桥式吊车的承载能力, 需要对其横梁进行受力分析。为此取横梁为分离体, 把它简化为一根直杆。

(2) 约束的简化。四季温度的变化将使两端固定的横梁受到很大的轴向载荷, 故一般将其支座制成一端固定, 另一端可移动, 以便横梁能自由地热胀冷缩。因此, 在忽略摩擦的情形下, 可把横梁两端的约束简化为一个固定铰链支座和一个活动铰链支座。

(3) 载荷的简化。首先是重物和吊车的重量, 通过小车的滚轮作用在横梁上可简化为两个集中力 F , 各等于 $P/2$ 。其次是桥梁的自重, 可看作均布载荷。

(4) 桥式起重机大梁的平面力学简图如图 2-13(b)所示。

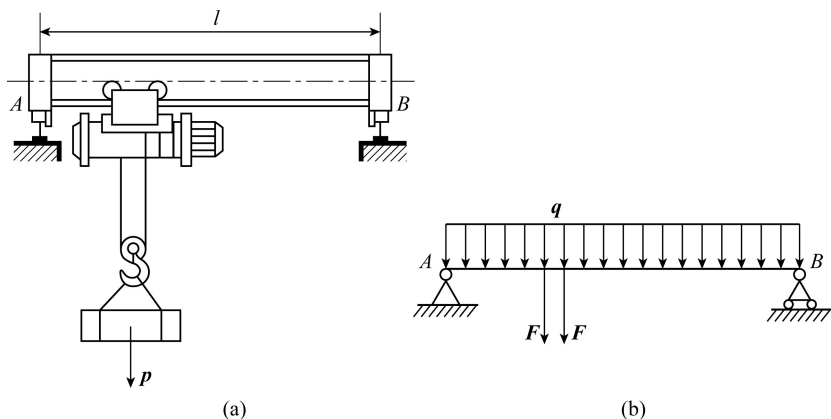


图 2-13 桥式起重机大梁的平面力学简图

素养园地

约瑟夫·拉格朗日——法国力学学者及其贡献

生平：法国著名数学家、物理学家。1736年1月25日生于意大利都灵，1813年4月10日卒于巴黎。他在数学、力学和天文学三个学科领域都有历史性的贡献，其中尤以数学方面的成就最为突出。

贡献：拉格朗日是分析力学的创立者。拉格朗日在其名著《分析力学》中，在总结历史上各种力学基本原理的基础上，发展了达朗贝尔、欧拉等人的研究成果，引入了势和等势面的概念，进一步把数学分析应用于质点和刚体力学，提出了运用于静力学和动力学的普遍方程，引进了广义坐标的概念，建立了拉格朗日方程，把力学体系的运动方程从以力为基本概念的牛顿形式，改变为以能量为基本概念的分析力学形式，奠定了分析力学的基础，为把力学理论推广应用到物理学其他领域开辟了道路。



实操练习

1. 对非自由体的运动所附加的限制条件为_____。
2. 约束反力的方向总是与约束所能阻止的物体的运动趋势的方向_____。
3. 约束反力由_____力引起，且随_____力的改变而改变。
4. 图 2-14 所示为齿轮减速箱中传动轴力学简图，由于齿轮只受径向力，所以所用轴承

为径向轴承。试画出齿轮轴的平面力学简图。

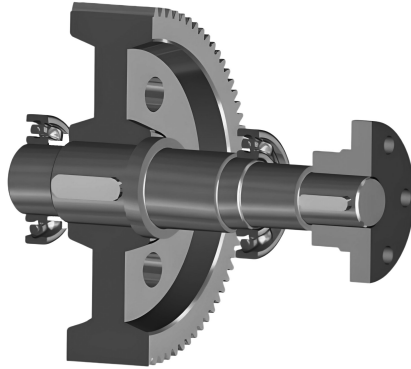


图 2-14 齿轮减速箱中传动轴力学简图

问题归纳

问题 1: _____

问题 2: _____

问题 3: _____



学习评价

项目二 刚体静力分析						
任务一 认识约束模型						
序号	考核内容	考核标准	分值	学生自评 (30%)	学生互评 (30%)	教师评价 (40%)
1	理解约束和约束反力的概念, 掌握常见的各类约束模型及其特点, 掌握画平面力学简图的基本步骤	准确回答约束的概念	10			
2		准确回答约束反力的概念	10			
3		准确回答约束模型的概念	10			
4		清楚描述常见的各类约束模型组成及特点	10			
5		清楚描述画平面力学简图的基本步骤	10			
6	能够正确理解约束的概念, 能够辨别区分各类约束模型, 能够把工程图简化成力学简图	能够掌握工程中常见的约束类型及确定约束反力的方法	10			
7		能够根据构件特性画出约束模型	10			
8		能够根据真实的工程结构简化出平面力学简图	10			
9	能够通过工程图熟悉工程, 培养工程意识; 能够通过工程图到力学简图的抽象简化过程, 掌握实践到抽象的研究方法	能够通过工程图的深入理解和分析, 增强对工程的整体认识和理解, 培养系统思维	10			
10		能够通过简化工程图为力学简图的过程, 学习如何将复杂问题化解为更易于管理和解决的问题。这种能力有助于在面对复杂问题时, 迅速找到解决问题的关键因素	10			
学生自评得分						
学生互评得分						
教师评价得分						



任务二 画构件的受力图

任务描述

一、任务情境

受力图是为了方便对构件进行受力分析、计算、设计及应用所画的一种力学图形。画构件受力图前,我们必须先明确研究对象及其所受的主动力和约束,然后考虑解除约束后,如何定性地画出研究对象可能受到的全部主动力和约束反力。任务一中,我们完成了内燃机结构从工程图到力学简图的学习,本任务需要我们进一步分析内燃机力学简图中滑块、曲柄和连杆的受力分析,如图 2-15 所示。

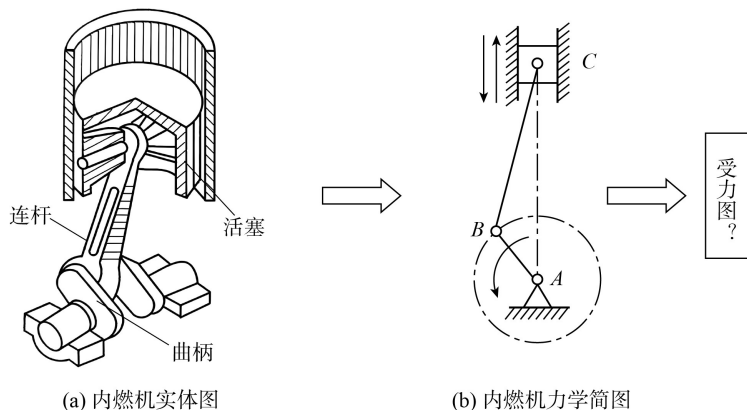


图 2-15 内燃机的平面力学简图

二、任务学习目标

(一) 知识目标

- (1) 理解受力分析的概念。
- (2) 理解物系的概念。
- (3) 掌握画受力图的基本步骤。

(二) 能力目标

- (1) 能够区分主动力和约束反力。
- (2) 能够分析单个物体的受力图。



(3) 能够分析简单物系的受力图。

(三) 素养目标

(1) 能够通过受力分析, 培养独自分析、解决问题的能力。

(2) 能够通过校核受力图, 培养耐心细致的做事态度。

应知应会

一、受力分析

在构件的平面力学简图的基础上分析静力学问题时, 往往首先必须根据问题的性质、已知量和所要求的未知量, 选择某一物体(若干个物体组成的物体系统)作为分析研究对象, 并假想地将所研究的物体从与之接触或连接的物体中分离出来, 即解除其所受的约束而代之以相应的约束反力。

解除约束后的物体, 称为**分离体**。分析作用在分离体上的全部主动力和约束反力, 画出分离体的受力简图, 即**受力图**。这一过程即**受力分析**。

二、画受力图

(一) 画受力图的基本步骤

(1) 确定研究对象。取分离体, 并分析哪些物体对它有约束反力的作用。

(2) 画主动力。在分离体上画出研究对象所受到的全部主动力, 如重力、载荷、风力、浮力、电磁力等。

(3) 画约束反力。在解除约束处, 根据约束的不同类型, 画出约束反力。

(4) 校核。检查受力图画得是否正确, 是否错画、多画、漏画。

(二) 单个物体的受力

单个物体, 可以是除与约束有联系外不与其他物体相接触的一个物体, 也可以是由若干个物体所组成的物体系统中的某个物体。

【例 2-2】 设小球重量为 Q , 在 A 处用绳索系在墙上, 如图 2-16(a) 所示。试画出小球的受力图。

解: (1) 将小球分离出来, 如图 2-16(b) 所示。

(2) 画主动力。主动力为重力 Q , 垂直向下, 作用点为小球质心 O 。

(3) 画约束反力。约束反力有两个: 一个是绳索的反力 F_T , 作用于 A 点, 沿绳索离开小球; 另一个是墙面的反力 F_N , 属于光滑接触面约束, 作用点为接触点 B , 因此, 约束反力 F_N 垂直墙面指向小球。

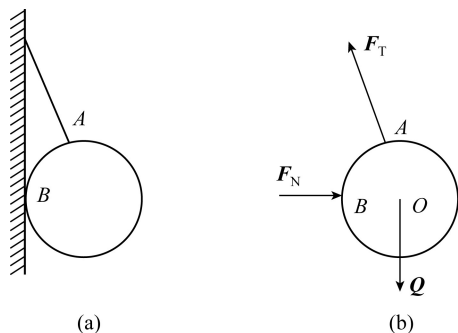
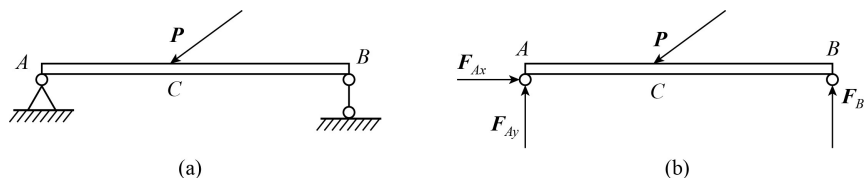


图 2-16 系在墙面上的小球平面力学简图

【例 2-3】 构件 AB 左端为固定铰链支座，右端为活动铰链支座，如图 2-17(a)所示，假设不计构件的重量， C 处作用一力 P ，试画出其受力图。

解： (1) 将 AB 杆分离出来，如图 2-17(b)所示。

图 2-17 构件 AB 的平面力学简图

(2) 画主动力。主动力为已知力 P ，作用点在 C 点。

(3) 画约束反力。约束反力有 3 个。其中， A 端为固定铰链支座，有两个约束反力，分别为水平方向 F_{Ax} 和垂直方向 F_{Ay} ； B 端为活动铰链支座，有一个垂直方向的约束反力 F_B 。

【例 2-4】 刹车机构的平面力学简图如图 2-18(a)所示。其曲杆 AB 可绕 A 点处转动，当仅考虑 AB 受力时，连接其他刹车部件的液压构件可视为在 D 点处铰接。试画出曲杆 AB 的受力图。

解： (1) 选取曲杆 AB 为研究对象，画出其分离体图，如图 2-18(b)所示。

(2) 画出主动力。主动力为已知力 F_p 。

(3) 画出约束反力。如图 2-18(b)所示， A 点处为固定铰链支座，约束反力用 F_{Ax} 、 F_{Ay} 表示，指向假定； CD 为二力杆， F_C 沿 CD 轴线，假设为压力。

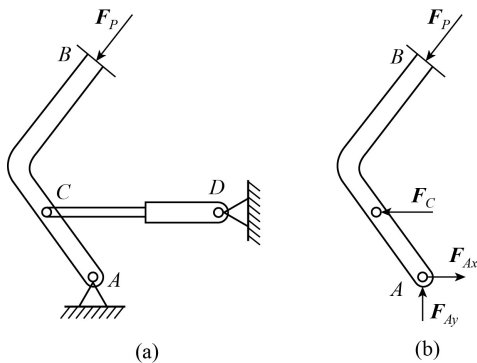


图 2-18 刹车机构的平面力学简图

(三) 物系的受力图

物系是若干个物体通过一定的约束(其他方式)联结而成的物体系统。作用于物系的力可分为两类：一类是**外力**，即系统外物体作用在系统内物体上的力；另一类是**内力**，即系统内物体间的相互作用力。内力和外力的区分不是绝对的，它们是可以相互转化的。

作物系整体受力图必须注意以下两点：

(1) 作整个物系的受力图时，由于内力成对出现，自成平衡系统，在受力图上不必画出内力，只需画出全部外力。

(2) 作物系中单个物体的受力图时，被物系内约束所联系的物体间相互作用力应符合作用与反作用公理。它们应该作用线平行、大小相等、方向相反。若符号一致，在其中一个符号上加一撇。

【例 2-5】如图 2-19(a)所示，构架的销钉 A 上受重为 W 的重力作用，杆 AB 、 AC 的自重不计，试作构架整体及杆 AB 、 AC 的受力图。

解：(1) 作构架整体的受力图，如图 2-19(b)所示。其中，因杆 AB 、 AC 的两端均为铰接，杆的自重不计，杆中未受任何外力作用，故此二杆均为二力杆，它们对构架的约束反力 F_{BA} 、 F_{CA} 如图 2-19(b)所示。

(2) 作杆 AB 、 AC 的受力图。作此二杆的受力图有三种方法：

方法一：设销钉在杆 AC 的 A 端，此时杆 AB 为二力杆，其受力图如图 2-19(c)所示。杆 AC 也是二力杆，其 C 端约束反力 F_{CA} 的方向与该杆的轴线重合， A 端受重力 W 和二力杆 AB 的约束反力 F_{AB} 共同作用， F_{AB} 与 F'_{AB} 为作用与反作用关系。杆 AC 受力图如图 2-19(d)所示。

方法二：设销钉在杆 AB 的 A 端，则杆 AC 为二力杆；杆 AB 的 A 端受重力 W 和杆 AC 的约束反力作用， B 端受与杆轴线重合的约束反力作用。

方法三：将销钉单独作为研究对象取出，则杆 AB 、 AC 均为二力杆，它们的受力图分别如图 2-19(e)~图 2-19(g)所示，其中 F_{AB} 与 F'_{AB} 、 F_{AC} 与 F'_{AC} 是作用与反作用关系。

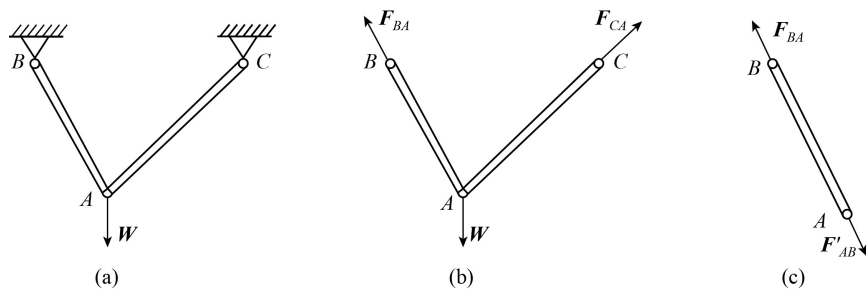


图 2-19 构架平面力学简图

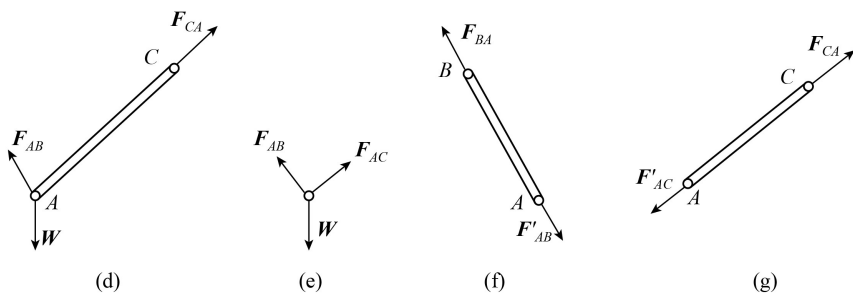


图 2-19 构架平面力学简图(续)

【例 2-6】图 2-20(a)所示的结构由杆 AC 、 CD 与滑轮 B 铰接而成。物体重为 G ，用绳子挂在滑轮上。如杆、滑轮及绳子的自重不计，并忽略各处的摩擦，试分别画出滑轮 B (包括绳索)、杆 AC 、 CD 及整个系统的受力图。

解：(1) 滑轮及绳索的受力图。在 B 处受中间铰链支座约束，在 E 处受柔索约束，在 H 处受柔索约束。在解除约束的 B 处所受的力可用两个正交分力 F_{Bx} 、 F_{By} 来表示，在 E 处画上沿绳索中心线背离滑轮的拉力 F_{TE} ，在 H 处画上沿绳索中心线背离滑轮的拉力 F_{TH} 。滑轮及绳索受力图如图 2-20(b)所示。

(2) 杆 CD 的受力图。杆 CD 为一个二力构件，由上可知，二力构件上的两个力为沿两个力作用点的连线，且等值、反向。假设杆 CD 受拉，在 C 、 D 处画上拉力 F_{CD} 、 F_{DC} ，且 $F_{CD} = -F_{DC}$ ，杆 CD 受力图如图 2-20(c)所示。

(3) 杆 AC 的受力图。杆 AC 在 A 处受固定铰链支座约束，在 B 、 C 处受中间铰链约束。在解除约束的 A 处所受的力可用两个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示；在 B 处画上 F_{Bx}' 、 F_{By}' ，它们分别与 F_{Bx} 、 F_{By} 互为作用力与反作用力；在 C 处画上 F_{CD}' ，它与 F_{CD} 互为作用力与反作用力。杆 AC 的受力图如图 2-20(d)所示。

(4) 整个系统的受力图。在 A 处受固定铰链支座约束，在 E 处受柔索约束，在 D 处受固定铰链支座约束。系统中杆 AC 与杆 CD 在 C 处铰接不分开，滑轮与杆 AC 在 B 处铰接不分开，故这两处的约束反力互为作用力与反作用力，并成对出现，为系统的内力，不必画出。只需在解除约束的 A 处用两个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 来表示；在 E 处画上与沿绳索中心线背离滑轮的拉力 F_{TE} ；在 D 处画上拉力 F_{DC} 。整个系统的受力图如图 2-20(e)所示。

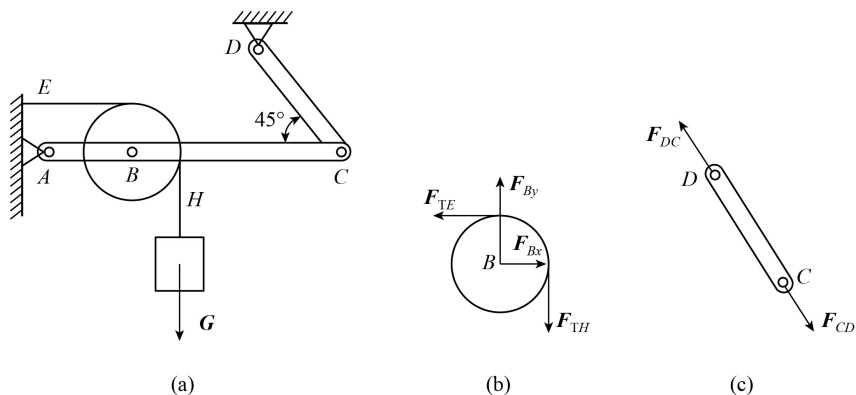


图 2-20 滑轮机构的平面力学简图

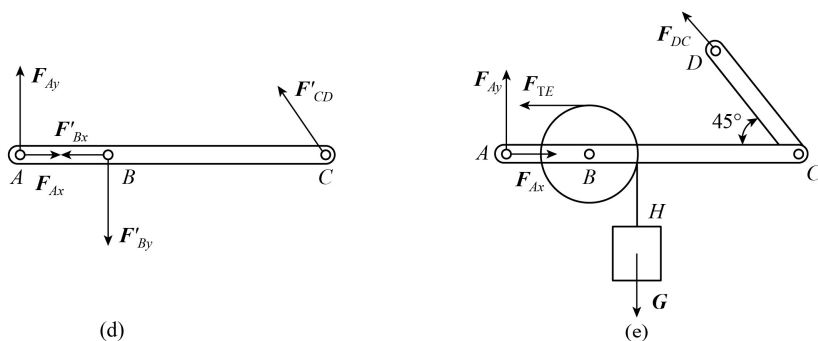


图 2-20 滑轮机构的平面力学简图(续)

小结:

正确地画出物体的受力图，是分析、解决力学问题的重要前提。画受力图时必须注意以下几点：

(1) 必须明确研究对象。根据求解需要，可以取单个物体或由若干个物体组成的系统为研究对象。不同的研究对象，其受力图是不同的。

(2) 正确确定研究对象受力的数目。受力图上必须画出全部的主动力和约束反力。一般可先画已知的主动力，再画约束反力。为了避免漏画某些约束反力，需要注意：分离体在哪几处被解除约束，则在这几处必作用着相应的约束反力。

(3) 正确地画出约束反力的方向。约束反力的方向只能根据约束的类型及性质来判断，切忌单凭直观感觉去画。

(4) 当分析两物体间相互的作用力时，应遵循作用力和反作用力的关系。作用力的方向一经假定，反作用力的方向应与之相反。当画整个系统的受力图时，由于内力成对出现，自成平衡系统，在受力图上不必画出内力，只需画出全部外力。

(5) 注意观察判断是否有二力杆，根据二力杆的特点画出二力杆上的力。

(6) 注意部分与整体受力图中，同一约束处反力假设指向的一致性。

素养园地**张衡——中国古代力学学者**

生平：张衡(78—139年)，字平子。汉族，南阳西鄂(今河南南阳市石桥镇)人，“南阳五圣”之一，与司马相如、扬雄、班固并称汉赋四大家。中国东汉时期伟大的天文学家、数学家、发明家、地理学家、文学家，在东汉历任郎中、太史令、侍中、河间相等职。晚年入朝任尚书，因病于永和四年(139年)逝世，享年 62 岁。北宋时被追封为西鄂伯。

贡献：张衡为中国天文学、机械技术、地震学的发展作出





了杰出的贡献，发明了浑天仪、地动仪，是东汉中期浑天说的代表人物之一。曾被后人誉为“木圣”。

实操练习

1. 图 2-21 所示的各物体的受力图是否有错误？应如何改正？

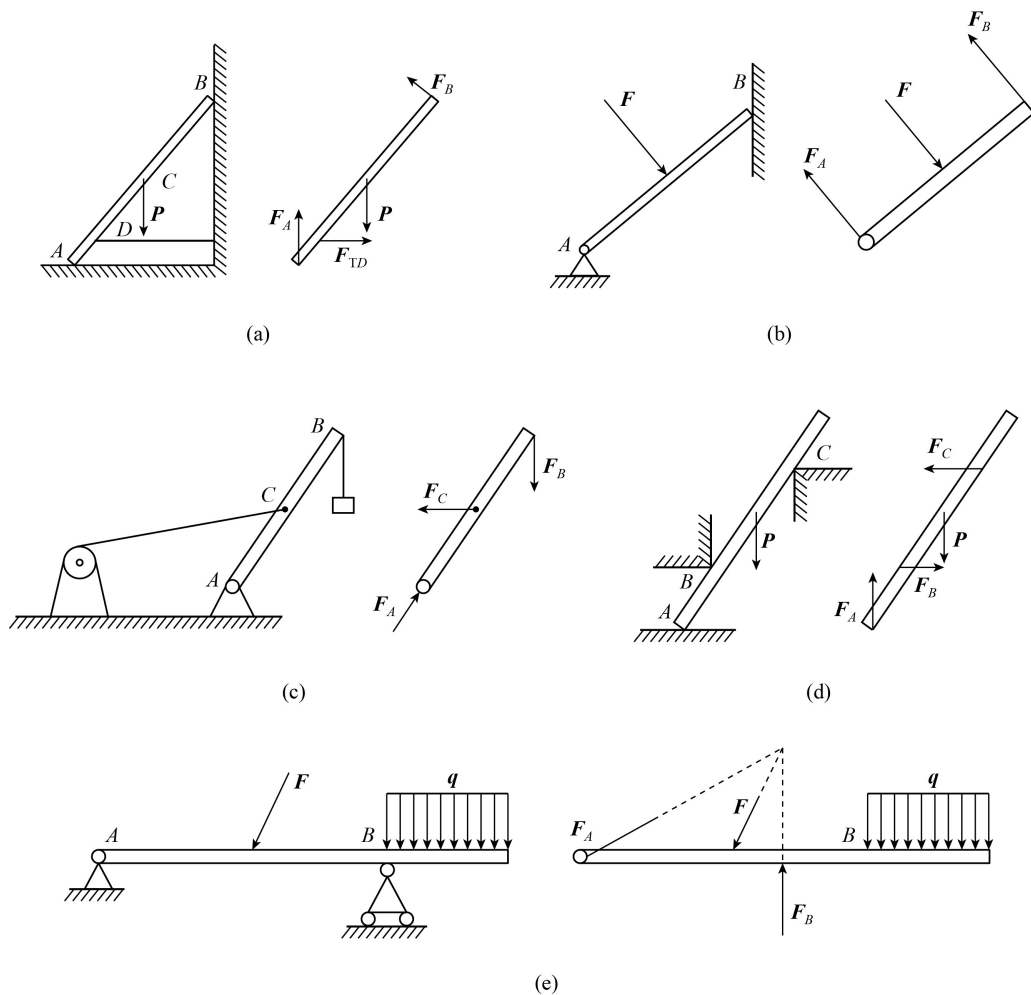


图 2-21 题 1 图



2. 试画出图 2-22 所示各个物体系统中每个物体的受力图。

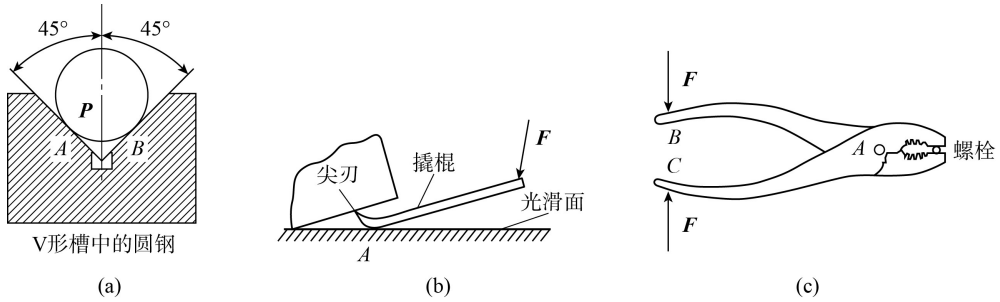


图 2-22 题 2 图

3. 画出图 2-23 所示各个构件及整个刚架的受力图。

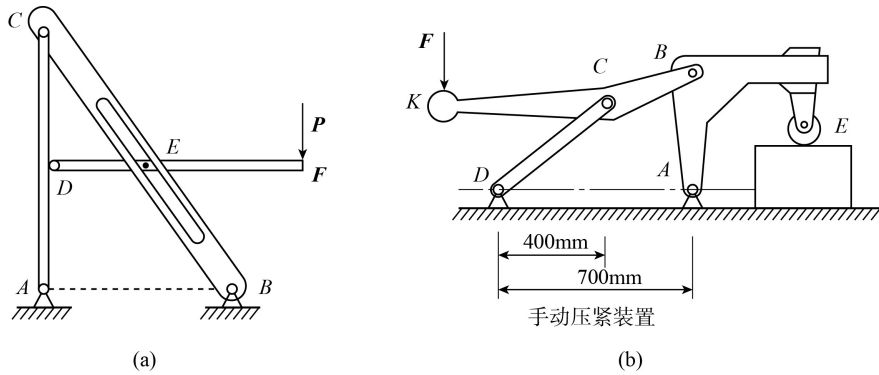


图 2-23 题 3 图

问题归纳

问题 1: _____

问题 2: _____

问题 3: _____



学习评价

项目二 刚体静力分析						
任务二 画构件的受力图						
序号	考核内容	考核标准	分值	学生自评 (30%)	学生互评 (30%)	教师评价 (40%)
1	理解受力分析的概念,理解物系的概念,掌握画受力图的基本步骤	准确回答受力分析的概念	10			
2		准确回答物系的概念	10			
3		准确回答外力的概念	10			
4		准确回答内力的概念	10			
5		清楚描述画受力图的基本步骤	10			
6	能够区分主动力和约束反力,能够分析单个物体的受力图,能够分析简单物系的受力图	能够区分主动力和约束反力	10			
7	能够分析简单物系的受力图	能够画出单个物体的受力图	10			
8		能够画出简单物系的受力图	10			
9	能够通过受力分析,培养独自分析、解决问题的能力;能够通过校核受力图,培养耐心细致的做事态度	在进行受力和解决问题的过程中,能够运用批判性思维,学习对不同信息进行深入的分析,识别假设和偏见,并做出合理的判断和决策	10			
10	能够通过校核受力图,培养耐心细致的做事态度	能够在校核受力图的过程中保持耐心,面对复杂或烦琐的任务时能够坚持不懈,不轻易放弃	10			
学生自评得分						
学生互评得分						
教师评价得分						