

卓越工程师教育培养计划——现代力学精品教材

GONGCHENG  
LIXUE  
JIAOCHENG

# 工程力学教程

(第三版)

章向明 刘 燕 冯贵层 主编



科学出版社

卓越工程师教育培养计划——现代力学精品教材

# 工程力学教程

(第三版)

章向明 刘 燕 冯贵层 主编

科学出版社

北京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

### 内 容 简 介

本书是在《工程力学教程》第二版的基础上,吸取国内外一些优秀教材的长处和精髓,结合作者多年教学实践和教学研究成果编写而成。本版对点的合成运动、刚体平面运动、动能定理、动载荷和压杆稳定作较大范围的修编,使其更加完善。

本书涵盖理论力学、材料力学的基本理论知识和基本原理。全书共16章,包括:物体的受力分析;平面力系的等效与平衡;运动学基础;点的合成运动;刚体的平面运动;动量定理与动量矩定理;动能定理;简单应力;截面几何性质;圆轴的扭转;弯曲内力;弯曲应力;弯曲变形;应力状态和强度理论及其应用;动载荷;压杆稳定。每章后有习题,并附有习题答案,同时出版配套的学习指导书和习题解答。

本书以力学的基本概念和原理为主线,优化课程体系,重组教学内容,有效减少叙述的篇幅,适应课程学时减少和提高起点的需要。教材有多处内容属于全新概念,体系完整,如静力平衡新体系和剪力、弯矩图作图新体系,其中静力平衡新体系是第三版的创新内容。教材既注重理论阐述的科学性和系统性,又注重理论联系实际;既注重数学推导的严谨性,又注重物理含义的描述,力求做到叙事简明扼要,说理逻辑严密。

本书可作为高校机械类、力学类和一些交叉型专业的工程力学课程教材,也可作为科研人员和相关工程技术人员的参考用书。

#### 图书在版编目(CIP)数据

工程力学教程/章向明,刘燕,冯贵层主编.—3版.北京:科学出版社,2016.2  
卓越工程师教育培养计划.现代力学精品教材  
ISBN 978-7-03-047194-9

I. ①工… II. ①章… ②刘… ③冯… 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(2016)第 016828 号

责任编辑:高 嵘/责任校对:董艳辉  
责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16

2016年2月第 三 版 印张:17

2016年2月第一次印刷 字数:418 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 第三版前言

工程力学是工科院校大多数工程专业的一门重要的技术基础课,研究物体机械运动一般规律及构件的承载能力。它既是专业课和现代工程技术的理论基础,又直接应用于工程实际问题,对于培养学生解决工程问题的能力及对其他后续课程的教学具有不可忽视的重要作用。

《工程力学教程》第一版和第二版使用效果明显。随着我校教学改革的深入和培养任务的转型,特别是两级院校会议精神的深入贯彻,原有的教材已不能适应培养海军初级指挥军官新的教学需要,其传统的教学内容和课程体系必须进行改革。教材内容应有较强的系统性,难度适中,因此,迫切需要改编教材适应当前培养海军新型人才的需要,在教材中增加一些创新性、与海军高科技设备相关的问题,紧密联系海军部队实际,解决课程学时短与提高起点及相关专业对内容要求高的矛盾。只有用新的体系组织精选过的内容付诸教学,才能做到学时少,内容新,水平高,效果好,适应培养学员创新能力,提高学员分析问题和解决问题能力的需要。教材第一版完成了有无的问题,第二版修订了使用过程中发现的错误,第三版将解决上档次的问题。本次改版主要任务是将静力平衡新体系写入教材,新体系节约 2 学时,适应减少学时、提高起点的需要,同时对第二版进行整理和完善,特别是对点的合成运动、刚体平面运动、动能定理、动载荷和压杆稳定作较大范围的改写,使其更加完善。第三版具有以下特点:

(1) 以力学的基本概念和原理为主线,优化课程体系,重组教学内容,有效减少叙述的篇幅,适应课程学时减少和提高起点的需要。既注重理论阐述的科学性和系统性,又注重理论联系实际;既注重数学推导的严谨性,又注重力学理论物理含义的描述,力求做到叙事简明扼要,说理逻辑严密。教材有多处内容属于全新概念,体系完整,如静力平衡新体系和剪力、弯矩图作图新体系。

(2) 教材注重加强数学与力学结合提高学员分析能力,体现数学思想,深化力学问题的本质,促使学员的思维能力得到升华,增强学员应用数学工具分析解决工程问题的能力,引导和启发学员运用数学工具分析力学问题的思维过程,使学员理解数学在力学体系中的真正作用,为后续课程学习打下良好的基础。例如,作者在多年教学理论研究的基础上,独创弯矩图中弯矩极值大小及弯矩极值位置的确定方法,并给出数学上的严格证明。同时,总结出剪力图、弯矩图画法全新体系。

(3) 静力学是在 4 个静力学公理的基础上建立起来的。虽然 4 个公理是人类长期生产和生活经验积累的总结和结晶,但在引入静力学的过程中,似乎有些突兀,特别是其中关键的“二力合力公理”过于牵强。编者从力的作用效果、力系等效和平衡的本质出发,给出力和力系的作用效果的具体描述。在此基础上,证明二力合力定理,二力平衡定理,还给出了力系等效定理,构建了静力平衡体系的新框架,力图使静力平衡体系的描述更完美,更合理。

本书由章向明、刘燕、冯贵层主编,杨少红、施华民任副主编。章向明对全书进行修编,刘燕参加了第 3~7 章的修编,参加编写的还有郑波、吴菁、黄方、胡明勇。

在本书出版过程中,得到了海军工程大学装备处及理学院的热情帮助,在此一并表示谢意。本书采用我国法定计量单位,有关量、单位及符号均执行国家标准的一系列新规定。

限于编者的水平,书中难免有缺点和不妥之处,恳切希望广大读者批评指正。

### 言 谢 三 兼

编 者

2015年12月

# 目 录

## 第一篇 静 力 学

第 1 章 物体的受力分析	3
1.1 力	3
1.2 物体的受力分析	6
习题 1	8
第 2 章 平面力系的等效与平衡	10
2.1 力的作用效果	10
2.2 力系的作用效果	11
2.3 力偶	14
2.4 平面力系的平衡条件	15
2.5 静定与静不定	20
2.6 刚体系	21
习题 2	24

## 第二篇 运 动 学

第 3 章 点的运动与刚体的基本运动	31
3.1 用矢量描述点的运动	31
3.2 在直角坐标系中描述点的运动	32
3.3 在自然坐标系中描述点的运动	35
3.4 刚体的平行移动	38
3.5 刚体的定轴转动	39
习题 3	42
第 4 章 点的合成运动	45
4.1 点的绝对运动、相对运动和牵连运动	45
4.2 速度合成定理	46
4.3 加速度合成定理	48
习题 4	53

<b>第 5 章 刚体平面运动</b> .....	57
5.1 刚体平面运动的概念 .....	57
5.2 平面运动刚体各点速度的基点法 .....	58
5.3 平面运动刚体各点速度的瞬心法 .....	60
5.4 平面运动刚体各点的加速度 .....	63
习题 5 .....	66

### 第三篇 动力学

<b>第 6 章 动量定理与动量矩定理</b> .....	71
6.1 动量定理 .....	71
6.2 质点系动量矩定理 .....	77
6.3 刚体平面运动微分方程 .....	83
习题 6 .....	87
<b>第 7 章 动能定理</b> .....	92
7.1 力的功 .....	92
7.2 动能 .....	96
7.3 动能定理 .....	97
7.4 动力学普遍定理综合应用 .....	101
习题 7 .....	107

### 第四篇 材料力学

<b>第 8 章 简单应力</b> .....	115
8.1 轴向拉伸与压缩的概念 .....	115
8.2 轴向拉伸与压缩时横截面上的内力 .....	115
8.3 直杆轴向拉伸与压缩时横截面上的应力 .....	118
8.4 拉伸与压缩杆的强度计算 .....	119
8.5 拉(压)杆的变形·胡克定律 .....	121
8.6 拉伸和压缩时材料的力学性能 .....	124
8.7 应力集中的概念 .....	129
8.8 拉、压超静定问题 .....	130
8.9 剪切和挤压的实用计算 .....	133
习题 8 .....	136
<b>第 9 章 截面几何性质</b> .....	141
9.1 静矩和形心 .....	141
9.2 惯性矩 .....	143

9.3 平行移轴公式 .....	145
习题 9 .....	147
<b>第 10 章 圆轴的扭转 .....</b>	<b>149</b>
10.1 圆轴扭转的概念 .....	149
10.2 扭转时的外力和内力 .....	149
10.3 圆轴扭转的应力和强度条件 .....	152
10.4 圆轴扭转的变形和刚度条件 .....	156
习题 10 .....	157
<b>第 11 章 弯曲内力 .....</b>	<b>161</b>
11.1 梁弯曲的概念 .....	161
11.2 剪力和弯矩 .....	162
11.3 剪力图和弯矩图 .....	165
11.4 剪力图和弯矩图的画法 .....	166
习题 11 .....	172
<b>第 12 章 弯曲应力 .....</b>	<b>176</b>
12.1 梁横截面上的正应力 .....	176
12.2 梁横截面上的剪应力 .....	179
12.3 梁的强度计算 .....	183
12.4 提高梁抗弯能力的措施 .....	186
12.5 拉伸与弯曲同时作用时横截面上的正应力 .....	189
习题 12 .....	192
<b>第 13 章 弯曲变形 .....</b>	<b>196</b>
13.1 引言 .....	196
13.2 挠曲线的近似微分方程 .....	197
13.3 用积分法计算梁的变形 .....	197
13.4 叠加法确定梁的挠度与转角 .....	198
13.5 弯曲刚度条件和提高弯曲刚度的措施 .....	200
13.6 简单静不定梁 .....	201
习题 13 .....	203
<b>第 14 章 应力状态和强度理论及其应用 .....</b>	<b>205</b>
14.1 应力状态理论简介 .....	205
14.2 平面应力状态分析 .....	206
14.3 三向应力状态下的最大应力·广义胡克定律 .....	210
14.4 强度理论简介 .....	212



14.5 弯扭组合与弯拉(压)扭组合	215
习题 14	218
<b>第 15 章 动载荷</b>	222
15.1 引言	222
15.2 构件作等加速直线运动的动应力计算	222
15.3 构件作等速转动时的动应力计算	223
15.4 构件受冲击载荷时的动应力计算	223
15.5 交变应力和疲劳强度	226
15.6 交变应力的特性和疲劳极限	228
习题 15	229
<b>第 16 章 压杆稳定</b>	232
16.1 压杆稳定的概念	232
16.2 细长压杆的临界力	233
16.3 压杆的临界应力	235
16.4 压杆稳定性计算	237
16.5 提高压杆承载能力的措施	239
习题 16	240
习题答案	243
参考文献	249
附录 型钢表	250

# 第一篇 静力学

---

静力学是研究物体在力的作用下平衡规律的科学。静力学主要研究以下三个问题：

## 1. 物体的受力分析

分析物体所受的已知力和未知力，并在受力图上标明每个力的作用位置和方向。

## 2. 力系的等效替换

将作用在物体上的一个复杂力系用另一个与它等效的简单力系进行替换。

## 3. 建立力系的平衡条件

研究作用在物体或物体系统上的力系所需满足的平衡条件，并应用这些条件解决工程实际问题。力系的平衡条件是设计结构、构件和机械零件时静力计算的基础。

因此，静力学在工程中有着十分广泛的应用。



# 第1章 物体的受力分析

## 1.1 力

### 1.1.1 力

壮士举起大鼎时,机车牵引列车时,都需施加一个力。力是物体之间的相互机械作用。力的作用效果是使物体的运动状态发生变化,或使物体发生变形。静力学研究力改变物体运动状态的效应。

力对物体的作用效果取决于力的大小、方向、作用点。三要素中任何一个改变,力的作用效果就不同。

力是一个既有大小又有方向的量,是矢量。矢量可以用一个带有方向的线段表示,线段的起点表示拉力的作用点,线段的终点表示压力的作用点。线段的方位和箭头指向表示力的方向,线段的长度(按一定的比例)表示力的大小。书中,力矢量用黑斜体字母表示,如  $\boldsymbol{F}$ ;而力的大小用普通字母表示,如  $F$ 。

### 1.1.2 作用与反作用

当一个物体受到另一个物体作用时,必然给另一物体一个反作用。作用力与反作用力总是同时存在,两力的大小相等、方向相反,作用线为同一直线,分别作用在两个相互作用的物体上。若用  $\boldsymbol{F}$  表示作用力,又用  $\boldsymbol{F}'$  表示反作用力,则

$$\boldsymbol{F} = -\boldsymbol{F}'$$

### 1.1.3 主动力

作用在物体上的力可分为两类,即主动力和约束反力。有一类力,如重力、风力、切削力、水压力、风压力、活塞的推力等,这些力是促使物体运动或使物体有运动趋势的力,称为主动力(或称载荷)。主动力一般是已知的,通常作为设计计算的原始数据。静力学中,主动力在问题中给定,如何确定主动力的不在静力学研究范畴,工程中自有妙法。

### 1.1.4 约束反力

物体在主动力的作用下产生运动或有运动趋势,物体的运动常常受到周围物体的限制,周围物体对运动(或有运动趋势)物体的限制称为约束。构成约束的周围物体是约束体。约束是以物体间相互接触的形式构成,约束的作用在约束体与被约束体之间产生作用和反作用力,这种作用是被约束体在主动力的作用下主动施加在约束体上,约束体反过来给被约束体以反作用力,约束体作用在被约束体上的反作用力称为约束反力。

约束反力的大小是未知的,它与物体上所受的主动动力有关。静力学寻求约束反力的求解方法。约束反力的作用点与方向一般是已知的。约束反力限制物体的运动,它的作用点在约束体和被约束体的接触点,它的方向与约束所能限制的运动方向相反。

### 1.1.5 常见约束反力的方向

#### 1. 柔性约束

绳索、胶带、铰链等柔性体约束,只能限制物体远离柔性体的运动,柔性体的约束反力只能是拉力。柔性体的约束反力作用点在连接点,其方向沿柔性体的轴线而背离被约束的物体。

图 1-1 中,绳索对杆 AB 的约束,皮带对轮 A 和轮 B 的约束都属于柔性约束。

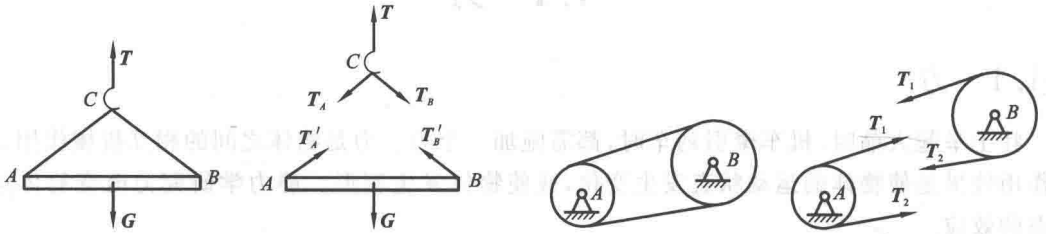


图 1-1

#### 2. 光滑面约束

光滑面约束是指光滑接触面对物体的约束。如果接触面摩擦力很小,可忽略摩擦的影响,认为接触面是绝对光滑的。此类约束不能限制物体沿接触面切线方向的运动,只能限制物体沿接触面法线方向且指向接触面方向的运动。

光滑面的约束反力作用在接触点,方向沿公共法线且指向被约束的物体。图 1-2 中,光滑地面对球体的约束;光滑地面对杆 AB 的约束或尖角对杆面的约束;齿轮对另一齿轮的约束都属于光滑面约束。如果接触面摩擦力不能忽略,则不是光滑面约束。

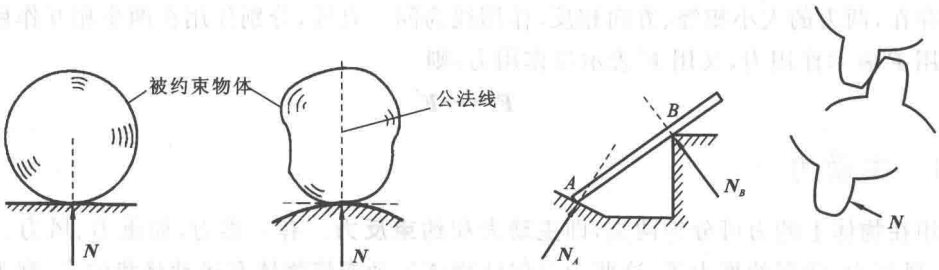


图 1-2

#### 3. 固定铰链约束、中间铰链约束

将构件与固定支座在连接处钻上圆孔,再用圆柱形销子串联起来,使构件只能绕销钉的轴线转动(图 1-3)。这种约束称为固定铰链约束或固定铰链支座。

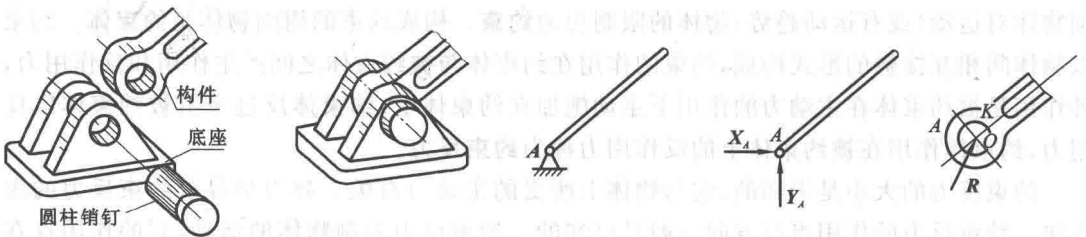


图 1-3

固定铰链约束的圆柱形销子限制了构件圆孔中心在水平方向和竖直方向的移动,固定铰链约束的约束反力通常用水平力  $X$  和竖向力  $Y$  表示,作用点应理解为在圆孔中心。

销钉对构件的约束也可理解为光滑面约束,销钉给构件的约束反力  $R$  方向应沿圆柱面在接触点的公共法线,且通过铰链中心。但接触点的位置不能预先确定。

两个构件在端部钻上圆孔,用圆柱形光滑销钉连接(图 1-4),称为中间铰。中间铰的销钉对构件的约束反力与固定铰链支座销钉对构件的约束反力相同。

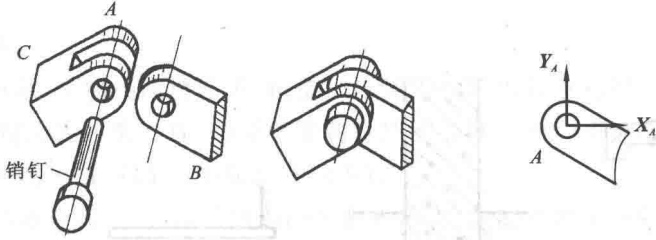


图 1-4

#### 4. 辊轴支座

在固定铰支座与支承面之间安装几个辊轴(图 1-5)使支座能在水平方向移动,就成为辊轴支座。这种支座约束的特点是只能限制垂直于支承面方向的运动,而不能限制物体绕铰轴的转动和沿支承面移动。因此,辊轴支座的约束反力等同于光滑面约束,且约束反力通过铰链中心。

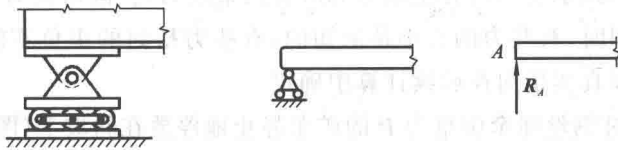


图 1-5

#### 5. 活动铰支座、连杆约束

在固定铰支座与构件之间安装一连杆,称为活动铰支座或连杆约束(图 1-6)。这种支座的约束特点是限制沿连杆方向的运动,不限制垂直连杆的微小移动(静力学的研究对象都几乎没有移动)和绕铰轴的转动。因此,活动铰支座的约束反力沿连杆方向,且通过铰链中心,指向不能确定,但可预先随意假设,不影响受力分析结果,真实指向在后续计算中确定。

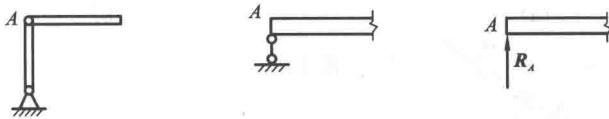


图 1-6

#### 6. 固定端约束

构件的一部分嵌入在另一坚固物体内,坚固物体对该构件所构成的约束称为固定端约束

(图 1-7)。如坚硬地面对电线杆的约束,墙体对雨篷的约束,固定刀架对车刀的约束,立柱对焊接在其上的托架的约束等都属于固定端约束。这类约束的特点是连接处有很大的刚性,不允许被约束物体在约束处有任何的移动或转动。

固定端约束限制了物体在水平方向和竖直方向的移动,同时限制了物体的转动,因此,固定端的约束反力有三个(图 1-8):水平力  $X_A$ 、竖向力  $Y_A$  和力偶矩为  $M_A$  (力偶的概念见第 2.3 节)。至于水平力是向左还是向右,则无关紧要,其他两力也是如此,真实指向在后续计算中确定。

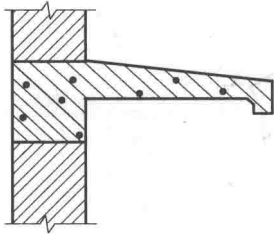


图 1-7

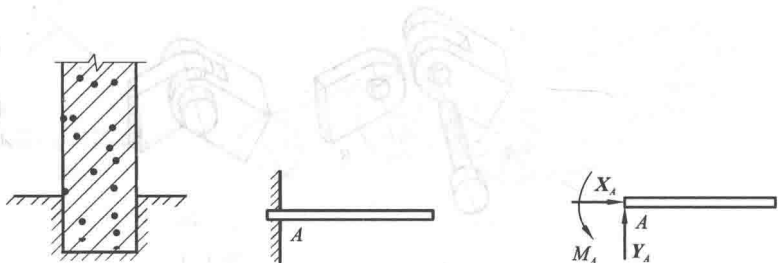


图 1-8

## 1.2 物体的受力分析

在对某个物体进行工程计算时,首先要对所研究的物体(研究对象)进行受力分析,分析研究对象所承受的所有主动力和约束反力。画研究对象的受力图,就是画研究对象的轮廓图,并画所有作用在其上的力(承受的所有主动力和所有约束反力)。画研究对象的受力图是工程计算的第一步,画受力图时,有些力的大小是未知的,有些力指向的正负不能确定,无关紧要,可预先随意假设,大小和真实指向在后续计算中确定。

**例 1-1** 绞车通过钢丝绳牵引重为  $P$  的矿车静止地停放在斜坡上(图 1-9),画出矿车的受力图。

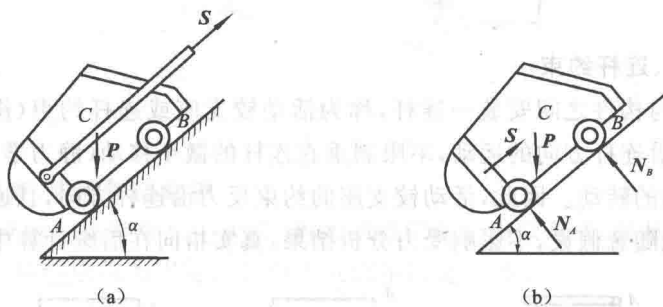


图 1-9

**解** 首先画研究对象(矿车)的轮廓图(图 1-9(b));画主动力——地球对矿车的引力,即重力  $P$ ;画钢丝绳给矿车的约束反力  $S$  (柔性约束);画斜坡给矿车的约束反力  $N$  (光滑面约束)。

此处,忽略了斜坡对矿车的摩擦力;分析人员认为斜坡的摩擦力很小,因而忽略了摩擦力而认为坡面光滑。如果认为忽略摩擦力对所分析的问题影响较大则受力图上还需加上斜坡给

矿车的摩擦力  $F$ 。

**例 1-2** 简易起重架如图 1-10 所示,  $A, C, D$  三处都是圆柱形铰链连接, 被起吊重物的重量为  $W$ , 绳端拉力为  $T$ , 不计杆件和滑轮的自重, 分别画出下列各研究对象的受力图。

- (1) 重物连同滑轮  $B$ ;
- (2) 斜杆  $CD$ ;
- (3) 横梁  $AB$ ;
- (4) 结构的整体。

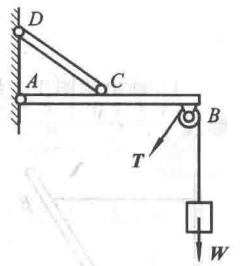


图 1-10

**解** (1) 研究对象: 重物连同滑轮  $B$  (包括一段绳子); 画出其轮廓图 (图 1-11(a)); 画重物所受的重力  $W$ ; 画绳子受到另外半节绳子的约束反力  $T$  (柔性约束); 画滑轮轴给滑轮的约束反力  $X_B$  和  $Y_B$  (中间铰链约束)。

此处认为滑轮的重力很小, 对所分析的问题影响不大, 因而忽略了滑轮的重力。如果滑轮的重力比较而言较大, 则还应加上滑轮所受的重力。

(2) 取  $CD$  杆为研究对象, 画出其轮廓图 (图 1-11(b));  $CD$  杆是连杆约束, 其约束反力的方向必沿连杆方向, 至于  $R_C$  和  $R_D$  是画拉力还是压力则无关紧要。如图 1-12 中矿井巷道支护的三角拱的  $BC$  杆也是连杆约束, 其约束反力的方向必沿  $B, C$  的连线方向。

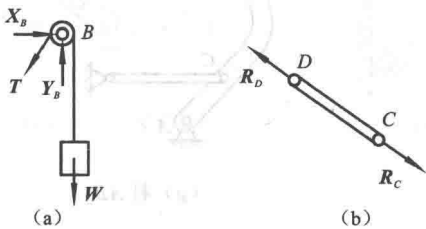


图 1-11

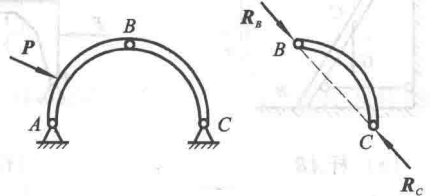


图 1-12

(3) 取  $AB$  梁为研究对象, 画出其轮廓图 (图 1-13); 忽略梁  $AB$  自身的重量; 画滑轮轴  $B$  给销钉  $B$  的约束反力 (中间铰链约束), 与滑轮轴  $B$  给滑轮的约束反力 (图 1-11(a)) 大小相等、方向相反 (似乎是作用与反作用, 其实是通过销钉  $B$  传递的结果); 画固定铰支座  $A$  的约束反力 (固定铰链约束); 画销钉  $C$  的约束反力 (连杆约束), 与销钉  $C$  给  $CD$  杆的约束反力 (图 1-11(b)) 大小相等、方向相反 (看上去是作用与反作用)。

(4) 取整体为研究对象, 画出其轮廓图 (图 1-14); 忽略各构件自身的重量; 画重物所受的重力  $W$  (主动力); 画绳子的拉力  $T$  (柔性约束); 画铰链  $A$  的约束反力 (固定铰链约束); 画铰链  $D$  的约束反力 (连杆约束)。

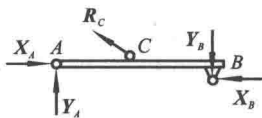


图 1-13

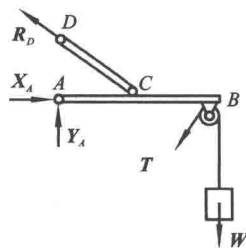
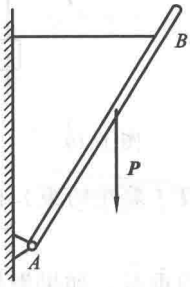


图 1-14

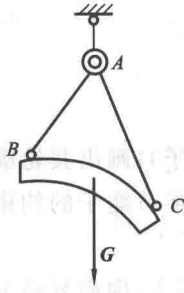


### 习 题 1

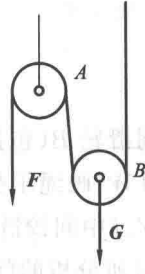
1. 画出题图 1-1 所示各图中物体的受力图(图中未画重力的物体均不计自重,所有接触处均为光滑接触)。



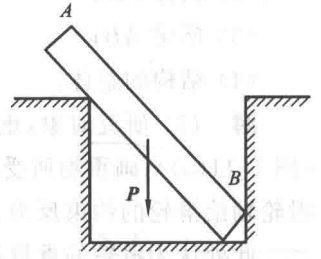
(a) 杆 AB



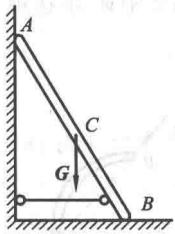
(b) 杆 BC



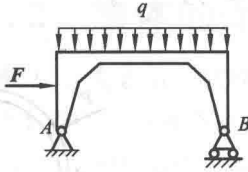
(c) 轮 A 和 轮 B



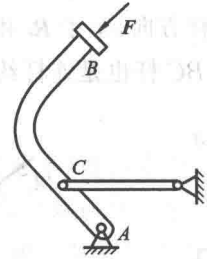
(d) 杆 AB



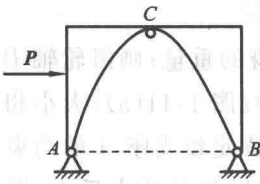
(e) 杆 AB



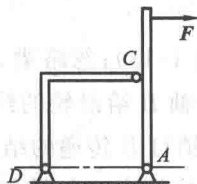
(f) 杆 AB



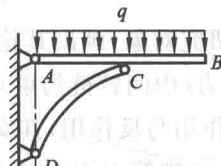
(g) 杆 AB



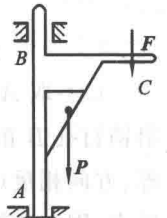
(h) 杆 AC 和 杆 BC



(i) 杆 AC 和 DC



(j) 杆 AB 和 杆 DC



(k) 杆 ABC

题图 1-1

2. 画出题图 1-2 所示各图中每个标注字符的物体(不包括销钉和支座)的受力图(未画重力的各物体的自重不计,所有接触处均为光滑接触)。