

工程力学

● 主编 宋祥玲 刘 深 孟朝霞

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

工 程 力 学

主 编 宋祥玲 刘 深 孟朝霞

副主编 褚彩萍 陈文娟 于田霞

焦新伟 贺建才

主 审 苑章义 张立文

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书充分体现高等教育特色,理论与实践并重。书中理论知识实用性强,注重学生综合能力的培养和提升。

全书共分 15 个项目,主要内容有:静力学基础、平面力系、空间力系、轴向拉伸与压缩、圆轴的扭转、剪切和挤压、弯曲、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定、动载荷与交变应力、运动学基础、点的合成运动和刚体的平面运动、动力学基础、动能定理。全书内容通俗易懂,直观精练,注重技能。每个项目均附有思考题,书后附有答案,便于读者自学和巩固提高本课程知识。

本书内容简单实用,信息量大,既可作为高等院校相关专业教材,也可供有关工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 宋祥玲, 刘深, 孟朝霞主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2017.7
ISBN 978-7-5682-4394-0

I. ①工… II. ①宋… ②刘… ③孟… 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 (2017) 第 172967 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 三河市华骏印务包装有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 15.5

字 数 / 387 千字

版 次 / 2017 年 7 月第 1 版 2017 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 57.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前 言

“工程力学”是机械、水利和建筑类专业的一门专业技术基础课，在基础课和专业课中起到承前启后的作用，是基础课与工程技术的综合，在专业技术教育中占据极其重要的地位。本书是根据新形势下高等院校教学的实际情况，结合新时期高等院校工程力学课程教学大纲的基本要求编写的。本书精选了必需、够用的理论知识和实践技能，对部分公式的推导过程进行了详细的介绍，有助于学生对理论知识的理解和消化吸收，给实践提供了良好的理论支撑。

全书由 15 个项目组成，主要内容有：静力学基础、平面力系、空间力系、轴向拉伸与压缩、圆轴的扭转、剪切和挤压、弯曲、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定、动载荷与交变应力、运动学基础、点的合成运动和刚体的平面运动、动力学基础、动能定理。每个项目都包含思考题（书后附有答案）。本书内容全面，通俗易懂，简洁明了，适合高职学生学习。栏目设计从简到难，从小到大，从局部到整体，渗透教育教学规律。本课程安排在专业课学习之前开设，为学生未来的专业发展提供知识保证。学好工程力学知识，学生可以掌握构件的设计和验算构件的承载能力，也有助于以后从事设备安装、运行和维护工作。工程力学来源于实践又服务于实践，各部分之间联系紧密，又有较强的系统性。现场观察和实验有助于理论知识的消化和吸收。学习中要循序渐进，一步一个脚印，抓住问题的本质，忽略次要方面，将抽象问题简单化，建立力学模型。

本书由宋祥玲、刘深、孟朝霞任主编，褚彩萍、陈文娟、于田霞、焦新伟、贺建才任副主编。具体分工如下：静力学基础、平面力系、空间力系、轴向拉伸与压缩、剪切和挤压、弯曲、压杆稳定、动载荷与交变应力、运动学基础、点的合成运动和刚体的平面运动、动力学基础、动能定理由宋祥玲、孟朝霞编写；应力状态和强度理论、组合变形由刘深编写；圆轴的扭转由褚彩萍、于田霞、焦新伟编写；附录由陈文娟、贺建才编写。全书由宋祥玲统稿。全书由苑章义、张立文审稿。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正，以便以后改进。如有其他意见或建议，欢迎提出宝贵意见（634179743@qq.com）。

编 者

目 录

项目 1 静力学基础	1
1.1 静力学中的基本概念	1
1.2 静力学公理	2
1.3 约束与约束反力	3
1.4 物体的受力分析	7
思考题	10
项目 2 平面力系	12
2.1 平面汇交力系合成的几何法	12
2.2 平面汇交力系合成的解析法	14
2.3 力矩的概念及计算	17
2.4 力偶及平面力偶系的合成	21
2.5 平面任意力系的简化	24
2.6 平面力系的静力学平衡	27
2.7 重心和形心	29
2.8 摩擦及其平衡问题	35
思考题	39
项目 3 空间力系	41
3.1 力在空间直角坐标轴上的投影	41
3.2 力对轴之矩	42
3.3 空间力系的平衡	44
思考题	48
项目 4 轴向拉伸与压缩	49
4.1 轴向拉伸与压缩的概念、轴力与轴力图	49
4.2 轴向拉压时截面上的应力(横截面、斜截面)剪应力互等定律	51
4.3 拉伸与压缩时的变形	53
4.4 材料拉伸与压缩时的力学性能	55
4.5 拉伸与压缩的强度计算	58
4.6 拉压杆的超静定问题	61
4.7 应力集中与材料疲劳	63
思考题	64
项目 5 圆轴的扭转	65
5.1 扭转的概念及外力偶矩计算	65
5.2 扭矩图	66

5.3	圆轴扭转时的应力和变形	68
5.4	圆轴扭转时的强度和刚度计算	75
5.5	非圆截面杆的扭转问题	76
	思考题	78
项目 6	剪切和挤压	80
6.1	剪切和挤压的概念	80
6.2	剪切和挤压的实用强度计算	81
6.3	剪应变 剪切胡克定律	83
	思考题	84
项目 7	弯曲	85
7.1	平面弯曲和静定梁	85
7.2	梁的内力——剪力和弯矩	87
7.3	剪力图和弯矩图	89
7.4	载荷集度、剪力和弯矩的关系	93
7.5	简单梁受典型载荷时的内力图	97
7.6	内力方程法作内力图	98
7.7	微分关系法作内力图	101
7.8	叠加法作内力图	103
7.9	梁的正应力计算	104
7.10	梁的正应力强度条件	112
7.11	梁的剪应力及强度计算	117
7.12	梁弯曲时的变形	120
7.13	提高梁强度的措施	127
7.14	梁的刚度计算	129
	思考题	130
项目 8	应力状态和强度理论	132
8.1	应力状态的概念	132
8.2	平面应力状态分析	135
8.3	最大切应力和广义胡克定律	142
8.4	强度理论	145
8.5	莫尔强度理论	148
8.6	各种强度理论的使用范围	148
	思考题	151
项目 9	组合变形	153
9.1	拉伸(压缩)与弯曲组合变形	153
9.2	扭转与弯曲组合变形	156
	思考题	159
项目 10	压杆稳定	160
10.1	压杆稳定的概念	160

10.2	两端铰支细长压杆的临界压力	160
10.3	不同支承条件下细长压杆临界力的欧拉公式	162
10.4	欧拉公式的应用范围及临界应力总图	163
10.5	压杆的稳定性计算	166
10.6	提高压杆稳定性的措施	167
	思考题	168
项目 11	动载荷与交变应力	169
11.1	动载荷与动应力的概念	169
11.2	构件作匀加速直线运动时的动应力计算和强度条件	169
11.3	构件作匀速转动时的动应力计算和强度条件	171
11.4	交变应力和疲劳破坏	173
	思考题	175
项目 12	运动学基础	176
12.1	点的运动	176
12.2	刚体的平动	182
12.3	刚体的定轴转动	183
12.4	定轴转动刚体上点的速度和加速度	184
	思考题	186
项目 13	点的合成运动和刚体的平面运动	187
13.1	合成运动的概念	187
13.2	速度合成定理	188
13.3	刚体平面运动的概念及运动方程	189
13.4	平面图形上各点的速度分析	191
	思考题	195
项目 14	动力学基础	196
14.1	质点的动力学基本方程	196
14.2	质点动力学的两类问题	196
14.3	刚体定轴转动的动力学基本方程	199
14.4	刚体定轴转动动力学基本方程的应用	201
	思考题	201
项目 15	动能定理	202
15.1	力的功	202
15.2	动能定理	204
	思考题	208
附录	常用型钢规格表	210
	思考题答案	220
	参考文献	237

项目 1 静力学基础

1.1 静力学中的基本概念

一、力的概念

力是物体间相互的机械作用，这种作用的效应使物体的运动状态和形状尺寸发生改变。例如，人推车、挑担等都要用力。力广泛存在于物体与物体之间，人与物体之间。力使物体运动状态发生改变的效应称为力的外效应或运动效应；而力使物体发生形状改变的效应称为力的内效应或变形效应。静力学和动力学只研究力的外效应，材料力学则研究力的内效应。

实践表明，力对物体的作用效应取决于三个要素，即力的大小、方向和作用点。

(1) 力的大小。它是指物体间机械作用的强弱，度量力的大小，本书采用国际单位制(SI)，力的单位是牛顿(用符号 N 表示)或千牛顿(用符号 kN 表示)。

(2) 力的方向。它包含方位和指向两个方面，例如当谈到某钢索拉力竖直向上时，竖直是指力的方位，向上是说它的指向。

(3) 力的作用点。它是指力在物体上作用的地方，实际上它不是一个点，而是一块面积或体积。当力的作用面积很小时，就看成一个点，如钢索起吊重物时，钢索的拉力就可以认为集中于一点，而称为集中力。当力的作用地方是一块较大的面积时，如蒸汽对活塞的推力，就称作分布力。当物体内每一点都受到力的作用时，如重力，就称作体积力。

上述三要素称为力的三要素，只要有一个发生变化，力的作用效应就发生变化。要确定一个力，必须说明它的大小、方向和作用点。

力是矢量，可以用一个带箭头的有向线段表示，按一定比例画出的线段长度表示力的大小，线段的方位和箭头的指向表示力的方向，线段的起点或终点表示力的作用点。本书中，力矢量用黑体字表示(手写时在字母上加箭头或短横线)，力的大小是标量，用普通体字母表示。

力总是成对出现，称为作用力和反作用力，也称为施力物体和受力物体，二者之间没有严格界限。物体之间的相互机械作用可以是接触的，也可以是非接触的，如重力等。

力有多种分类方法，如平面力系和空间力系。也可以分为汇交力系、平行力系和任意力系。如果一物体在力系作用下处于平衡状态，则称这一力系为平衡力系。如一力系用另一力系代替而对物体产生相同的外效应，则称这两个力系互为等效力系。若一个力与一个力系等效，力称为该力系的合力，该力系的各力称为此力的分力。

二、物体的理想模型——刚体

刚体是指受力后不产生变形的物体。理想模型在各学科研究中都非常重要，它的建立和引入突出问题的主要方面，忽略次要因素的影响，因此可简化问题的研究。在静力学中，

理想模型包括三个方面的内容：研究对象的理想化、受力分析的理想化，以及接触与连接方式的理想化。

刚体实际上是不存在的，物体受力后或多或少都会发生变形。如果变形可以忽略，物体就可以看作刚体。刚体可以是单个构件，也可以是工程结构整体。

1.2 静力学公理

公理 1 (二力平衡公理)：作用于一个刚体上的二力，使刚体保持平衡状态的必要与充分条件是：此二力大小相等、方向相反，且沿同一直线。刚体受二力平衡如图 1-1 所示。

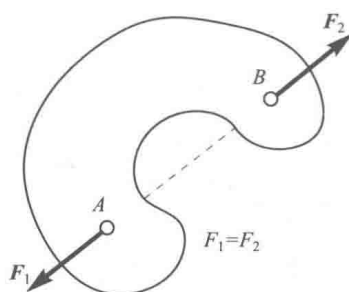


图 1-1 刚体受二力平衡

对于只能受拉、不能受压的柔性体，上述二力平衡条件只是必要的，不是充分的，如图 1-2 所示。

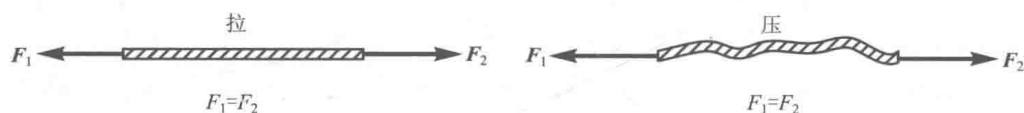


图 1-2 柔性体受力

在两个力作用下保持平衡的构件称为二力构件，简称二力杆。二力杆可以是直杆，也可以是曲杆。图 1-3 中曲杆 BC 即二力杆。

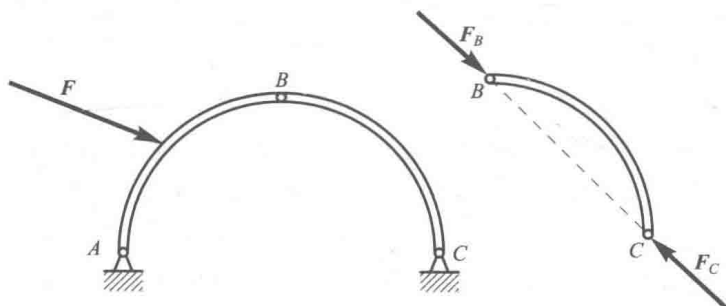


图 1-3 二力杆及其受力

公理 2 (加减平衡力系公理)：在作用于刚体的已知力系中，加上或减去任意平衡力系，不改变原力系对刚体的效应。

公理 3 (力的平行四边形公理)：作用于物体上同一点的两个力，可以合成为一个力，合

力也作用在该点，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来确定，如图1-4所示。

$$F_R = F_1 + F_2$$

公理4（作用与反作用公理）：两个物体间的作用力和反作用力，总是同时存在，且大小相等、方向相反，沿同一直线（简称等值、反向、共线）分别作用在这两个物体上。

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

对已知处于平衡状态的变形体，可以应用刚体静力学的平衡理论。

推论1（力的可传性）：刚体力学中，只要保持力的大小和方向不变，将力的作用点沿力的作用线移动，刚体的运动效应不会发生变化。

注意：力的可传性对于变形体并不适用。

推论2（三力平衡汇交定理）：作用在平衡刚体上、作用线处于同一平面内的三个互不平行的作用线必定汇交于一点，如图1-5所示。

推论3（力的三角形法则）：两个力依次首尾相接，合力从第一个力的始端指向第二个力的末端，如图1-6所示。

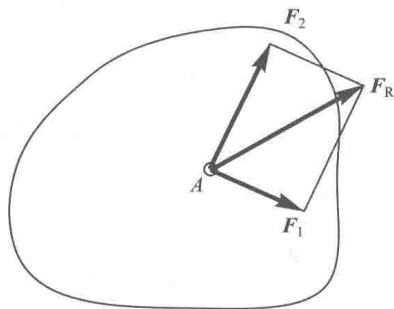


图1-4 力的平行四边形规则

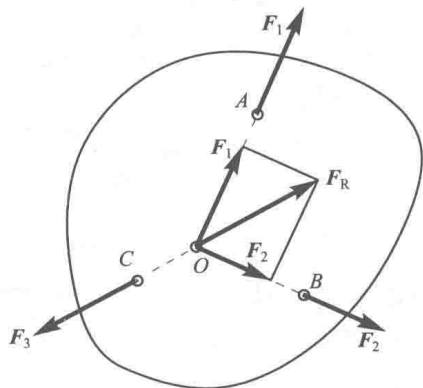


图1-5 三力平衡汇交定理的应用

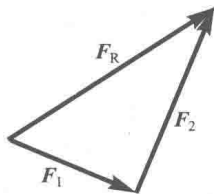


图1-6 力的三角形法则

1.3 约束与约束反力

一、柔性约束

由皮带、链条、钢丝绳、柔索等柔性物体所形成的约束称为柔性约束。这类约束只能受拉力不能受压力。约束力作用在与物体的连接点上，作用线沿柔性物体方向，背向物体，通常用 F_T 或 T 表示。

带轮传动机构中，带有紧边和松边之分，但两边所产生的约束力都为拉力，且紧边的拉力要大于松边的拉力。图1-7所示为滑轮缆索，图1-8所示为带轮和链轮。

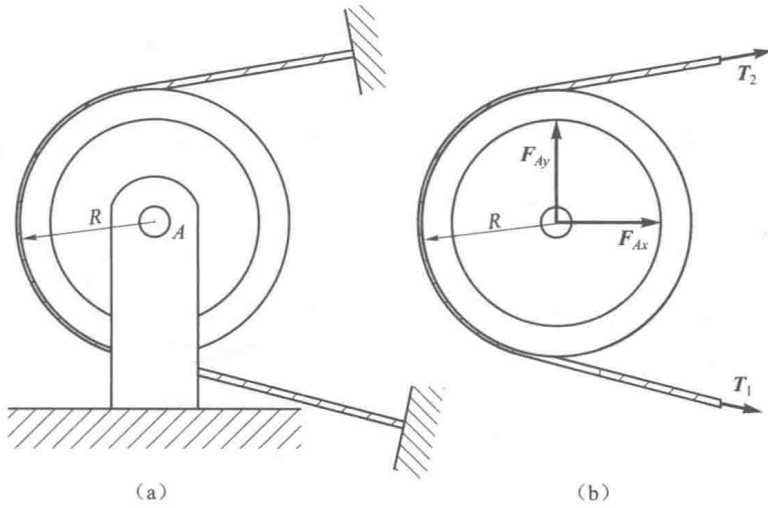


图 1-7 滑轮缆索

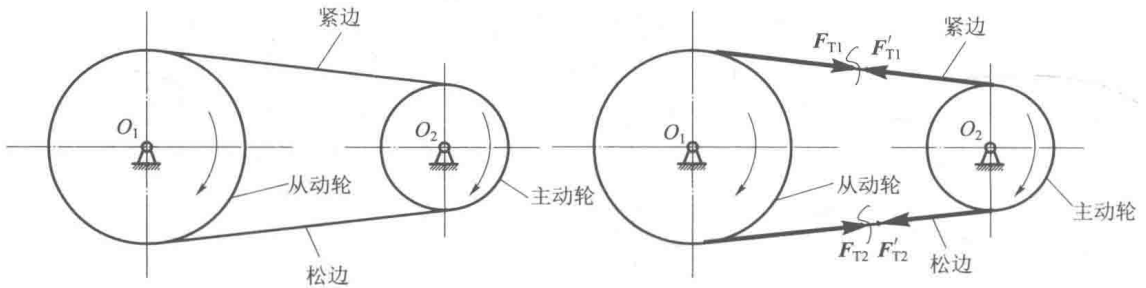


图 1-8 带轮和链轮

二、刚性约束

1. 光滑面约束

光滑指无摩擦或摩擦力可以忽略。光滑刚性面约束的特点是：这种约束不能阻止物体沿接触点切面任何方向的运动或位移，而只能限制物体沿接触点处公法线指向约束方向的运动或位移。

光滑面约束的约束力通过接触点，沿该点公法线并指向被约束物体，一般用 F_N 表示，如图 1-9 所示。

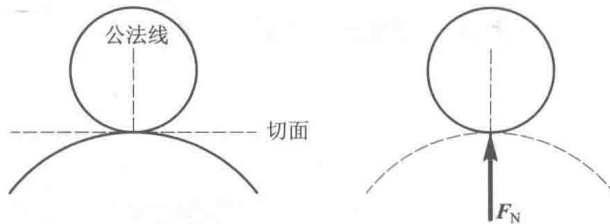


图 1-9 光滑面约束及其受力

2. 光滑圆柱铰链

1) 固定铰链支座约束

中间铰中任一构件若与地基或底座相固连，则称为固定铰链支座，如图 1-10 所示。

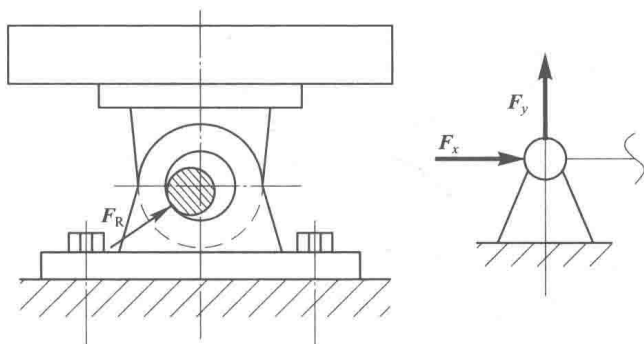


图 1-10 固定铰链支座约束及其受力

2) 中间铰链支座约束

将具有相同圆孔的两构件用圆柱形销钉连接起来,称为中间铰链支座约束,如图 1-11 所示。

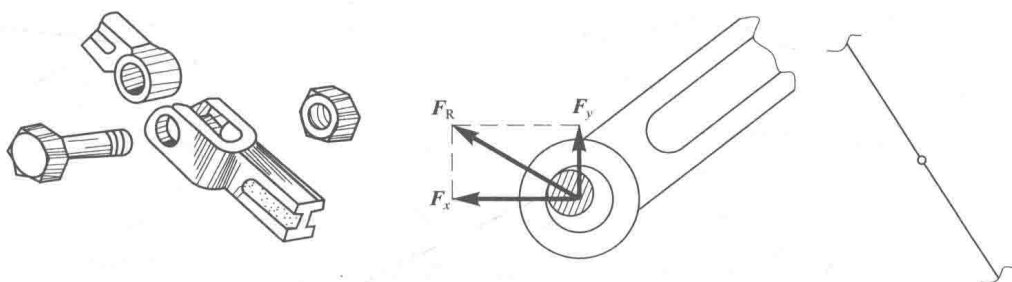


图 1-11 中间铰链支座及其受力

注意:图 1-11 中的 F_R 才是真正的约束力,满足光滑表面接触约束特征,但其方向无法事先确定,故受力分析时将其向坐标轴向投影得到 F_x 和 F_y 作为等效约束力分量。

3) 活动铰链支座约束

在铰链支座的底部安装一排滚轮,可使支座沿固定支承面移动,这种支座的约束性质与光滑面约束反力相同,其约束反力必垂直于支承面,且通过铰链中心,如图 1-12 所示,主要用于桥梁、屋架等工程结构中。

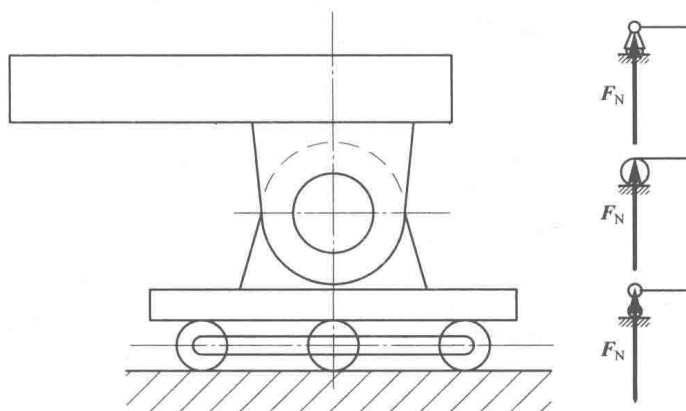


图 1-12 活动铰链支座及其受力

3. 球铰链支座

球铰链是一种空间约束,它能限制物体沿空间任何方向移动,但物体可以绕其球心任意转动。球铰链的约束反力可用三个正交的分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 、 F_{Az} 表示,如图 1-13 所示。

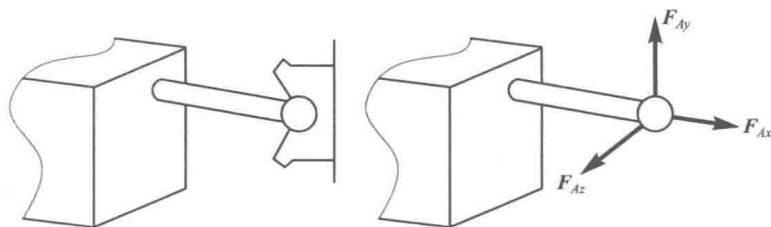


图 1-13 球铰链支座及其受力

4. 径向轴承与止推轴承

这两类符合铰链约束定义，允许轴转动，但限制与轴线垂直方向的运动和位移。可归入固定铰链支座，采用固定铰链支座的约束力分析方法。

径向轴承（薄）：包含滚珠、滑动径向轴承，如图 1-14 所示。

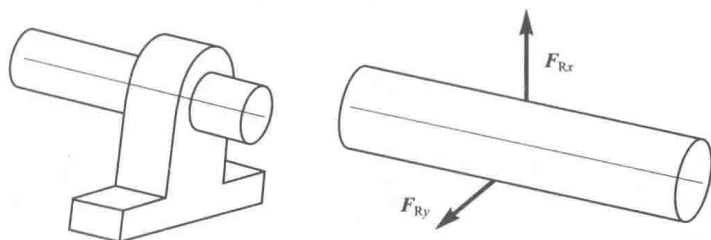


图 1-14 径向轴承及其受力

止推轴承（薄）：包含滚珠、滑动轴承。如图 1-15 (a) 所示的止推轴承，除了与向心轴承一样具有作用线不定的径向约束力外，由于限制了轴的轴向运动，因而还有沿轴线方向的约束力，如图 1-15 (b) 所示。

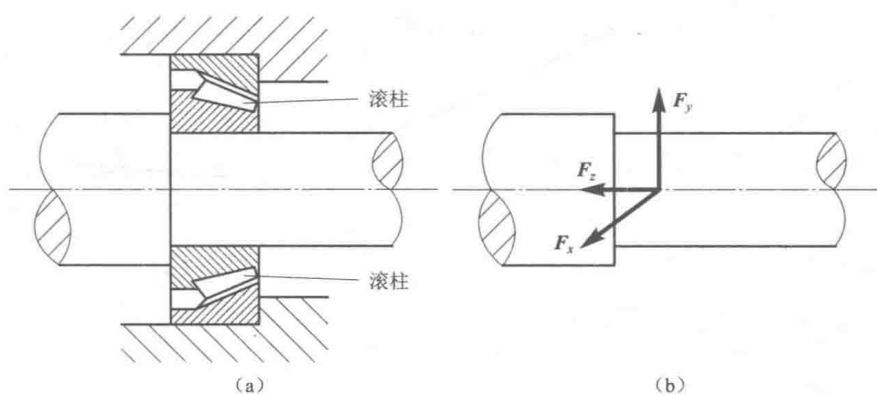


图 1-15 止推轴承及其受力

5. 固定端约束

固定端约束能限制物体沿任何方向的移动，也能限制物体在约束处的转动。所以，固定端 A 处的约束力可以用两个正交的分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 和力矩为 M_A 的力偶表示，如图 1-16 所示。

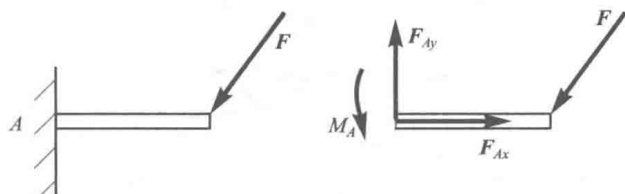


图 1-16 固定端约束及其受力

1.4 物体的受力分析

一、受力图的概念

对单个构件只需选择研究对象，而对物体系统则需在选取研究对象后取隔离体。取隔离体是指，将所需研究构件从物体系统中分离出来。这一过程需要解除约束，解除约束后的构件称为隔离体或自由体。

下面分析隔离体受力（包括主动力和约束力），特别是确定各约束力的作用线和指向。

约束力的分析步骤：

- (1) 分析是否为二力构件。
- (2) 分析是否为三力构件。
- (3) 分析是否可利用作用力与反作用力确定约束力的方向。
- (4) 根据约束类型确定约束力。

二、画受力图的步骤

在所选择的研究对象的隔离体上画出全部主动力和约束力。

画研究对象的受力图一般应按以下步骤进行：

- (1) 选择研究对象，解除约束，画出其隔离体图。
- (2) 在隔离体上画出作用在其上的所有主动力（一般为已知力）。
- (3) 在隔离体的每一个约束处，根据相应步骤画出约束力。

三、例题解答

[例 1-1] 具有光滑表面，重力为 F_W 的圆柱体，放置在刚性光滑墙面与刚性凸台之间，接触点分别为 A 和 B 两点，如图 1-17 所示。试画出圆柱体的受力图。

解：（1）选择研究对象。本例中要求画出圆柱体的受力图，所以只能以圆柱体作为研究对象。

（2）取隔离体。将圆柱体从所受的约束中分离出来，即得到圆柱体的隔离体。

（3）画受力图。

主动力：重力。

约束力：在 A 、 B 两处的约束力，属于光滑面约束。

于是，可画出圆柱体的受力图，如图 1-18 所示。

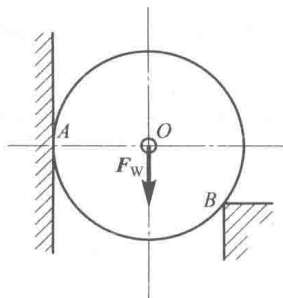


图 1-17 圆柱体

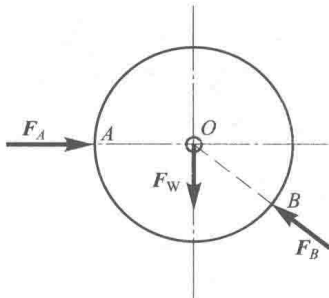


图 1-18 圆柱体的受力图

[例 1-2] 梁如图 1-19 所示。试画出梁的受力图。

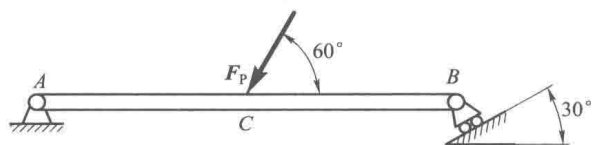


图 1-19 梁

解：(1) 选择研究对象。

(2) 取隔离体。将 A 、 B 两处的约束解除，也就是将 AB 梁从所受约束的系统中分离出来。

(3) 分析主动力与约束力，画出受力图。

约束力： A 端为固定铰链支座， B 端为辊轴支座。画出梁的受力图，如图 1-20 所示。

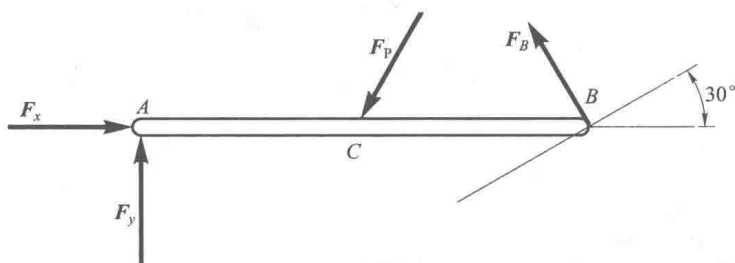


图 1-20 梁的受力图

[例 1-3] 如图 1-21 所示，二杆自重不计。试分别画出结构整体以及 AC 杆和 BC 杆的受力图。

解：(1) 整体受力图，如图 1-22 所示。

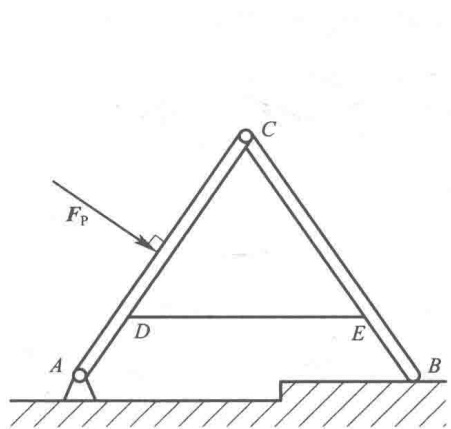


图 1-21 杆

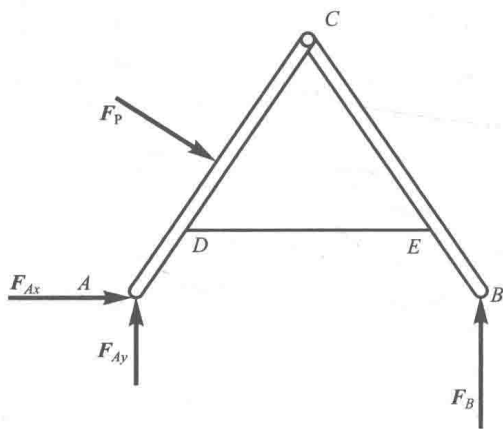


图 1-22 整体受力图

(2) AC 杆的受力图，如图 1-23 和图 1-24 所示。

(3) BC 杆的受力图，如图 1-25 和图 1-26 所示。

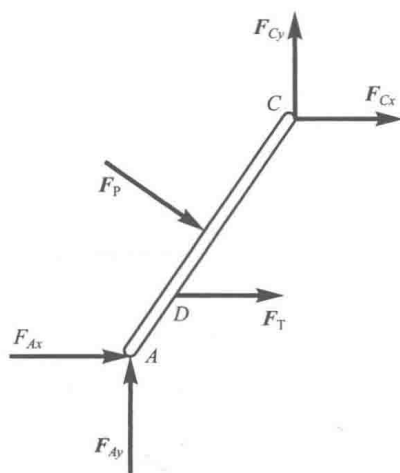


图 1-23 AC 杆的受力图 (表示法一)

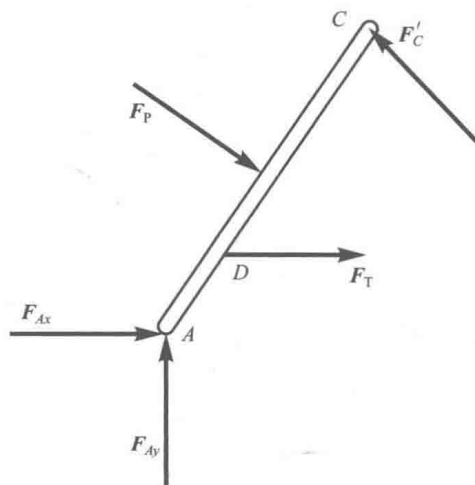


图 1-24 AC 杆的受力图 (表示法二)

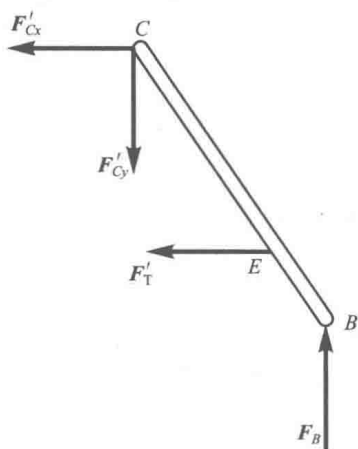


图 1-25 BC 杆的受力图 (表示法一)

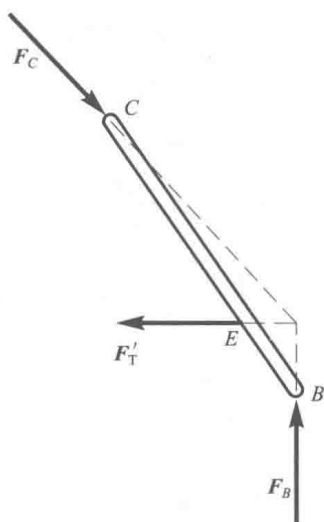


图 1-26 BC 杆的受力图 (表示法二)

[例 1-4] 一多跨梁 ABC 由 AB 和 BC 用中间铰 B 连接而成, 支承和载荷情况如图 1-27 (a) 所示。试画出梁 AB 、梁 BC 、销 B 及整体的受力图。

解: (1) 取出分离体梁 AB , 其受力图如图 1-27 (b) 所示。其上作用有主动力 F_1 , 中间铰 B 的销钉对梁 AB 的约束力用两正交分力 X_{B1} 、 Y_{B1} 表示, 固定端约束处有两个正交约束力 X_A 、 Y_A 和一个约束力偶 M_A 。

(2) 取出分离体梁 BC , 其受力图如图 1-27 (c) 所示。其上作用有主动力 F_2 , 销 B 的约束力 X_{B2} 、 Y_{B2} , 活动铰链支座 C 的约束力 N_C 。

(3) 取销 B 为研究对象, 受力情况如图 1-27 (d) 所示, 销 B 受 X'_{B1} 、 Y'_{B1} 和 X'_{B2} 、 Y'_{B2} 四个力的作用。销为梁 AB 和梁 BC 的连接点, 其作用是传递梁 AB 和 BC 之间的作用, 约束两梁的运动。从图 1-27 (d) 可以看出, 销 B 的受力呈现等值、反向的关系。因此, 在一般情况下, 若销 B 处无主动力作用, 则不必考虑销的受力, 将梁 AB 和 BC 间点 B 处的受力视为作用力与反作用力即可。

(4) 图 1-27 (e) 所示为整体 ABC 的受力图, 受到 F_1 、 F_2 、 N_C 、 X_A 、 Y_A 、 M_A 的作用, 中间铰 B 处为内力作用, 故不予画出。

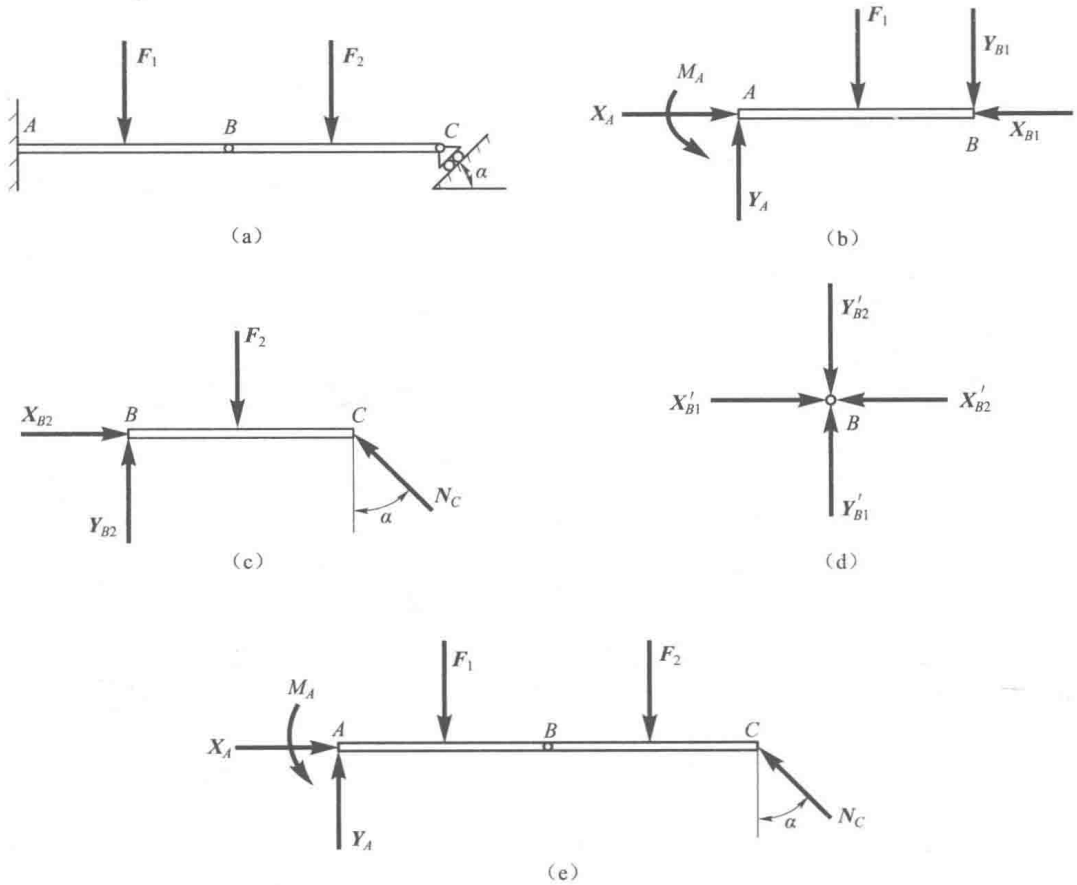


图 1-27 多跨梁 ABC 受力图

(a) 多跨梁 ABC; (b) AB 梁的受力图; (c) BC 梁的受力图; (d) 销 B 的受力图; (e) 整体 ABC 的受力图

思考题

1. 等腰三角形构架 ABC 的顶点 A、B、C 都用铰链连接，底边 AC 固定，而 AB 边的中点 D 作用有平行于固定边 AC 的力 F，如图 1-28 所示。不计各杆自重，试画出杆 AB 和 BC 的受力图。

2. 用力 F 拉动碾子以轧平路面，重为 G 的碾子受到一石块的阻碍，如图 1-29 所示。试画出碾子的受力图。

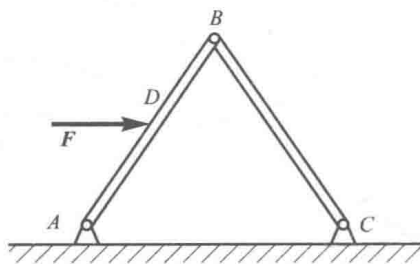


图 1-28 等腰三角形构架

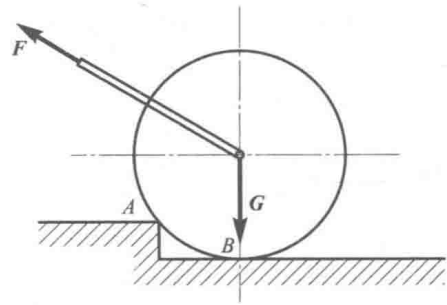


图 1-29 碾子