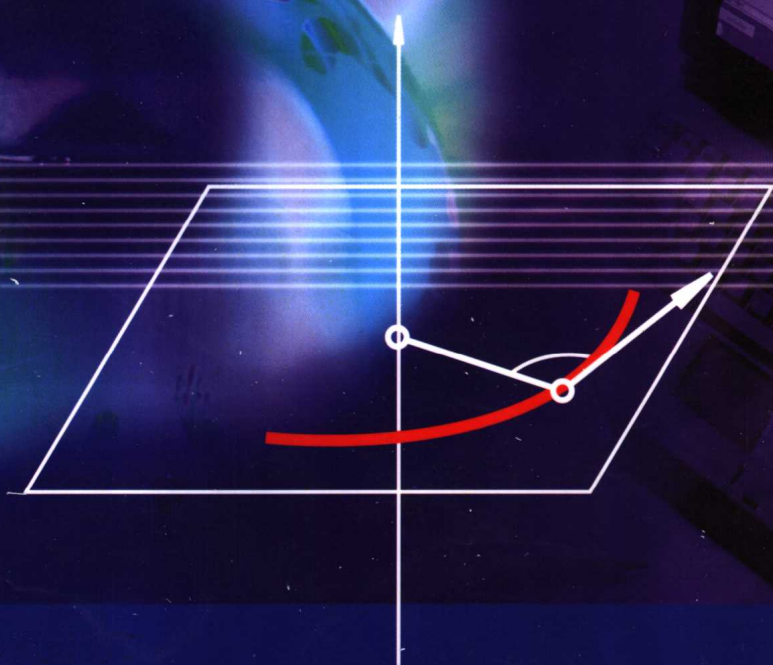


工程力学

杨佩兰 主编

郭彦 武安海 阎明光 副主编



地震出版社

工 程 力 学

杨佩兰 主 编

郭 彦 武安海 阎明光 副主编

地 震 出 版 社

图书在版编目(CIP)数据

工程力学/杨佩兰主编. —北京:地震出版社, 2002.8

ISBN 7-5028-2095-7

I. 工… II. 杨… III. 工程力学 IV. TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第043807号

内 容 摘 要

本教材依据教育部《高职高专教育机械类专业力学课程教学基本要求》和高职高专人才培养目标及规格的精神编写。本书紧密结合当前高职高专力学教学改革的需要,既注重学习、吸收有关院校高职高专教育力学课程改革的成果,又尽可能反映编者长期教学所积累的经验与体会,精选内容,简化公式的推导,着力贯彻高职高专教育“以应用为目的”、“以需要、够用为度”的原则,体现了高职高专教育的特色。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校的机械类专业力学教材,也可供相关工程技术人员参考。

工程力学

杨佩兰 主编

郭彦 武安海 阎明光 副主编

责任编辑:李小明 张平

责任校对:王花芝

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路9号

邮编:100081

发行部:68423031 68467993

传真:68423031

门市部:68467991

传真:68467972

总编室:68462709 68423029

传真:68467972

E-mail: seis@ht rol. cn. net

经销:全国各地新华书店

印刷:北京鑫丰华彩印有限公司

版(印)次:2002年8月第一版 2002年8月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:410千字

印张:16

印数:0001~2000

书号:ISBN 7-5028-2095-7/TU·163 (2651)

定价:25.00元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

本教材根据教育部《高职高专教育机械类专业力学课程教学基本要求》和高职高专专业人才培养目标及规格的要求组织编写。可作为机械类、近机械类各专业的高职高专院校与成人教育的专业教材。

本书广泛吸收了有关院校近期力学教学改革的成果，围绕高职高专培养技术应用性人才的目标，本着以需要够用为度、理论推导从简、突出工程实用的原则，尽力使文字叙述简明，内容精练，例题、习题选择与工程实际密切。全书贯彻了建立工程构件力学模型的主线，突出了力学建模在课程内容中的主导地位。各章都以工程实例及力学模型开篇，着力为培养技术应用性人才的目标而奠定基础。

本教材共分为三篇 20 章：第一篇静力学基础，第二篇运动学和动力学，第三篇材料力学。

本教材由杨佩兰（第 1、2、3、12、14、16、18 章）、吕亚洲（第 4、5 章）、阎明光（第 6、9 章）、武安海（第 7、11、15 章）、王军（第 8、10 章）、刘建勋（第 13、17 章）、郭彦（第 19、20 章）编写。全书由邯郸职业技术学院杨佩兰任主编，郭彦担任副主编；华北水利水电学院武安海任副主编；阎明光任副主编，杨佩兰负责全书的统稿。

本书承蒙吉林大学汽车学院王耀斌教授、东北师范大学陆国庆教授、吉林林学院姜贵君教授审阅并对书稿提出了许多宝贵意见和建议，在此一并表示感谢。

因编者水平有限，书中不妥之处恳请读者批评指出。

编 者

2002 年 5 月

目 录

第一篇 静力学基础

引 言	(1)
第 1 章 静力学基础	(2)
1.1 静力学的基本概念	(2)
1.2 静力学公理	(3)
1.3 约束和约束反力	(5)
1.4 物体的受力分析	(7)
小结	(8)
习题	(9)
第 2 章 汇交力系和力偶系	(12)
2.1 汇交力系的合成	(12)
2.2 汇交力系的平衡	(14)
2.3 力偶系	(17)
2.4 力偶矩矢	(19)
2.5 平面力偶系的合成与平衡	(20)
小结	(21)
习题	(21)
第 3 章 平面一般力系	(23)
3.1 平面一般力系的简化	(23)
3.2 平面一般力系及平行力系的平衡方程	(26)
3.3 物体系统的静定与静不定问题	(29)
3.4 摩擦时的平衡问题	(32)
小结	(37)
习题	(38)
第 4 章 空间任意力系	(41)
4.1 力对轴之矩	(41)
4.2 空间任意力系的简化	(42)
4.3 空间任意力系的平衡条件	(43)
4.4 重心	(45)
小结	(47)
习题	(48)

第二篇 运动学和动力学

引 言	(51)
第 5 章 点的运动	(52)
5.1 用矢径法描述点的运动	(52)
5.2 用直角坐标法描述点的运动	(53)
5.3 用自然坐标法描述点的运动	(55)
小结	(58)
习题	(58)
第 6 章 刚体的基本运动	(60)
6.1 刚体的平行移动	(60)
6.2 刚体绕定轴转动	(61)
6.3 定轴传动系统传动比的计算	(63)
小结	(66)
习题	(66)
第 7 章 点的运动合成	(68)
7.1 运动合成的概念	(68)
7.2 点的速度合成定理	(69)
7.3 点的加速度合成定理	(72)
小结	(74)
习题	(74)
第 8 章 刚体的平面运动	(77)
8.1 刚体平面运动的运动方程	(77)
8.2 求平面图形上各点速度的基点法与速度投影法	(79)
8.3 用瞬心法求平面图形上各点的速度	(81)
8.4 用基点法求平面图形上各点的加速度	(83)
小结	(84)
习题	(85)
第 9 章 动力学基础	(87)
9.1 质点动力学基本方程	(87)
9.2 质心运动定理	(89)
9.3 动量定理	(90)
9.4 动量矩定理	(93)
9.5 刚体定轴转动微分方程	(97)
小结	(99)
习题	(99)
第 10 章 动静法	(103)
10.1 惯性力的概念及质点动力学问题的动静法	(103)
10.2 刚体惯性力系的简化	(105)

10.3 质点系的动静法	(107)
小结	(108)
习题	(109)
第 11 章 动能定理	(111)
11.1 力的功	(111)
11.2 动能	(114)
小结	(117)
习题	(117)

第三篇 材料力学

引 言	(121)
第 12 章 轴向拉伸与压缩	(124)
12.1 轴向拉伸与压缩的概念	(124)
12.2 截面法、轴力与轴力图	(124)
12.3 截面上的应力	(126)
12.4 轴向拉伸或压缩时的变形 胡克定律	(129)
12.5 材料在拉伸与压缩时的机械性质 (力学性能)	(131)
12.6 轴向拉伸或压缩时的强度计算	(135)
12.7 拉伸、压缩静不定问题	(137)
小结	(139)
习题	(140)
第 13 章 剪切与挤压	(143)
13.1 剪切的概念与实用计算	(143)
13.2 挤压的实用计算	(145)
小结	(148)
习题	(148)
第 14 章 圆轴的扭转	(150)
14.1 圆轴扭转的概念	(150)
14.2 扭矩与扭矩图	(150)
14.3 纯剪切 剪切胡克定律	(153)
14.4 圆轴扭转时的应力和强度条件	(154)
14.5 圆轴扭转时的变形和刚度条件	(156)
小结	(158)
习题	(159)
第 15 章 弯曲内力	(161)
15.1 平面弯曲的概念	(161)
15.2 梁的计算简图及分类	(162)
15.3 梁的内力、剪力与弯矩计算	(163)
15.4 弯矩、剪力与载荷集度间的关系	(165)

15.5	剪力图与弯矩图的绘制	(166)
	小结	(169)
	习题	(169)
第 16 章	梁弯曲时的强度与刚度计算	(172)
16.1	实验观察与假设	(172)
16.2	弯曲正应力的计算	(172)
16.3	弯曲切应力简介	(175)
16.4	梁的强度计算	(176)
16.5	梁的弯曲变形概述	(178)
16.6	用积分法求梁的变形	(179)
16.7	用叠加法求梁的变形	(181)
16.8	简单静不定梁	(184)
16.9	提高梁的强度和刚度的措施	(185)
	小结	(187)
	习题	(187)
第 17 章	应力状态和强度理论	(190)
17.1	应力状态的概念	(190)
17.2	平面应力状态分析(应力圆)	(191)
17.3	三向应力圆及最大切应力	(195)
17.4	广义胡克定律	(196)
17.5	强度理论	(196)
	小结	(200)
	习题	(200)
第 18 章	组合变形的强度计算	(203)
18.1	拉伸(压缩)与弯曲组合变形的强度计算	(203)
18.2	弯曲与扭转组合变形的强度计算	(205)
	小结	(210)
	习题	(210)
第 19 章	压杆稳定	(213)
19.1	压杆稳定的概念	(213)
19.2	细长杆的临界压力	(214)
19.3	欧拉公式的应用范围及经验公式简介	(216)
19.4	压杆的稳定性校核	(218)
19.5	提高压杆稳定性的措施	(220)
	小结	(221)
	习题	(221)
第 20 章	动载荷和交变应力	(223)
20.1	构件作匀加速直线运动或匀速转动时的应力计算	(223)
20.2	冲击载荷	(225)
20.3	交变应力及其循环特征	(227)

20.4 疲劳破坏和疲劳极限.....	(229)
20.5 构件的疲劳极限 疲劳强度计算.....	(230)
20.6 提高构件疲劳强度的措施.....	(231)
小结.....	(231)
习题.....	(232)
附录 A 型钢表.....	(234)
附录 B 习题答案.....	(238)
主要参考书目.....	(245)

第一篇 静力学基础

引言

物体在力作用下的机械运动和变形机理构成了工程力学的研究范畴。

平衡是机械运动的特殊情形，静力学是研究物体在力系作用下的平衡规律，因此，静力学需讨论以下三方面的问题。

1. 物体的受力分析

即给出作用于物体的力的全貌。

2. 力系的等效替换与简化

力系经过等效替换或简化，可清楚地刻画出它对物体的作用。主矢和主矩是力系的两个基本特征量，因而，力系对物体的作用取决于力系的主矢和主矩。

力系等效定理是力系等效替换与简化的理论基础。

3. 力系的平衡条件

归纳物体在各种力系作用下的平衡条件及相应的平衡方程，求解静力平衡问题是静力学最重要的任务。

以力系的主矢和主矩为核心的力系平衡定理是推演力系平衡条件的理论基础。

静力学中涉及的物体抽象为刚体。

第 1 章 静力学基础

静力学是研究物体在力系作用下平衡规律的科学。力系是指作用于同一物体上的一组力。物体的平衡状态是指物体相对于地球处于静止或作匀速直线运动。物体处于平衡状态时，作用于该物体上的力系称为平衡力系。

静力学研究的主要内容之一就是建立力系的平衡条件，并借此对物体进行受力分析。静力学建立力系平衡条件的主要方法是力系的简化，所谓力系的简化就是用简单的力系代替复杂的力系，当然，这种代替必须在两力系对物体的作用效应完全相同的条件下进行。对同一物体作用效应相同的两力系，彼此称为等效力系。若一个力与一个力系等效，则此力称为该力系的合力。

综上所述，静力学应研究的主要问题是：

- (1) 力系的简化。
- (2) 建立物体在各种力系作用下的平衡条件。

1.1 静力学的基本概念

1.1.1 力的概念

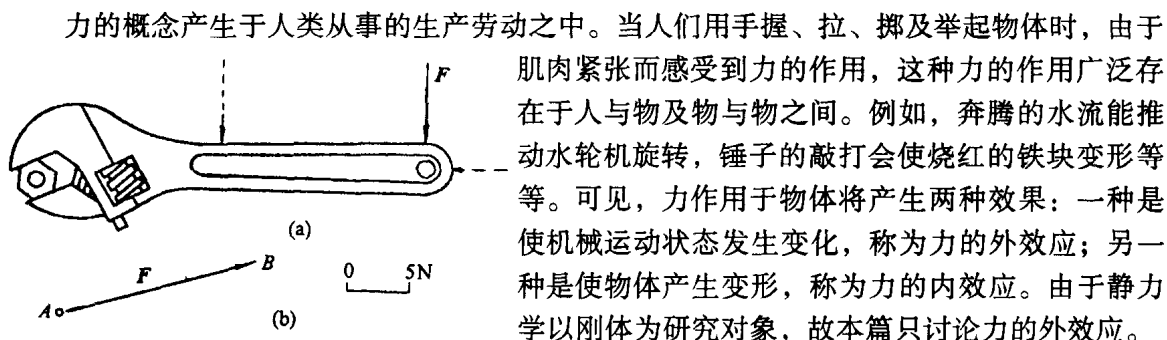


图 1-1

力的概念产生于人类从事的生产劳动之中。当人们用手握、拉、掷及举起物体时，由于肌肉紧张而感受到力的作用，这种力的作用广泛存在于人与物及物与物之间。例如，奔腾的水流能推动水轮机旋转，锤子的敲打会使烧红的铁块变形等等。可见，力作用于物体将产生两种效果：一种是使机械运动状态发生变化，称为力的外效应；另一种是使物体产生变形，称为力的内效应。由于静力学以刚体为研究对象，故本篇只讨论力的外效应。

综上所述，在静力学分析的范畴内，力可定义为：力是物体间的相互作用，这种作用将引起物体机械运动状态发生变化。

1. 力的三要素

力对物体的作用效应决定于以下三个要素：力的大小、方向、作用点，因此力是定位矢量（图 1-1 (a)）。例如，用扳手拧螺母时，作用在扳手上的力，因大小不同，或方向不同，或作用点不同，它们产生的效果就不同。

2. 力的单位

本书采用我国法定计量单位，力的单位为牛顿（N）或千牛顿（kN）。

3. 力的矢量表示

力是矢量，图示时常用一个带箭头的线段表示（图 1-1 (b)），线段长度 AB 按一定比例代表力的大小，线段的方位和箭头表示力的方向，其起点或终点表示力的作用点。此线段

及其延伸称为力的作用线。用黑体字（如 $\mathbf{F}$ ）代表力矢，以白体字母 F 代表力的大小。

1.1.2 刚体的概念

实践表明，任何物体受力后总会产生一些变形。但在通常情况下绝大多数零件和构件的变形都是很微小的，甚至需要用专门的仪器才能测量出来。研究证明，在许多情况下，这种微小的变形对物体的外效应影响甚微，可以忽略不计，即不考虑力对物体作用时物体所产生的变形。任何情况下均不变形的物体称为刚体。刚体是对实际物体经过科学的抽象和简化而得到的一种理想模型，它抓住了问题的本质。

然而当变形在所研究的问题中成为主要因素时（例如在材料力学中），一般就不能再把物体看作是刚体了。

1.1.3 平衡的概念

所谓平衡，是指物体相对于地球处于静止或作匀速直线运动的状态。显然，平衡是机械运动的特殊形式。作用在刚体上使刚体处于平衡状态的力系称为平衡力系，平衡力系应满足的条件称为平衡条件。静力学研究刚体的平衡规律，即研究作用在刚体上的力系的平衡条件。

1.2 静力学公理

1.2.1 公理一：二力平衡公理

作用于同一刚体上的两个力，使刚体处于平衡状态的必要与充分条件是：此两力必须等值、反向、共线。

两力平衡公理是刚体受最简单的力系作用时的平衡条件，如一物体仅受两力作用而平衡，则两力的作用线必定是沿此两力作用点的连线，如图 1-2 所示，这类构件常被称为二力构件。

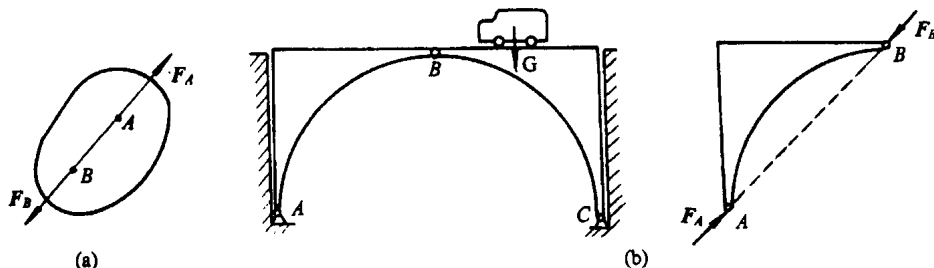


图 1-2

1.2.2 公理二：加减平衡力系公理

在已知力系上，加上或减去任一平衡力系，不会改变原力系对刚体的作用效应。

推理 1 （力的可传性原理）作用于刚体上的力，可沿其作用线滑移到该刚体的任何位置而不会改变此力对刚体的作用效应。

证明如下：

(1) 设力 $\mathbf{F}$ 作用于刚体上 A 点（图 1-3 (a)）。

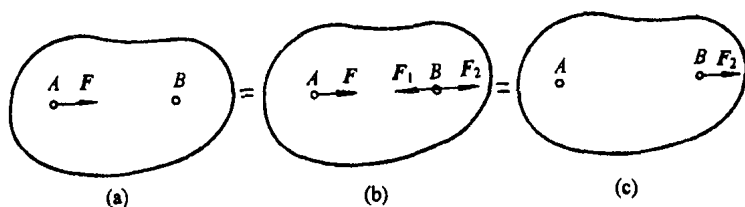


图 1-3

(2) 在力 F 的作用线上任选一点 B ，并在 B 点加一组沿 AB 线的平衡力 F_1 和 F_2 ，且使 $F_2 = F = -F_1$ (图 1-3 (b))。

(3) 除去 F 与 F_1 所组成的一对平衡力，刚体上只剩下 F_2 ，且 $F_2 = F$ (图 1-3 (c))。

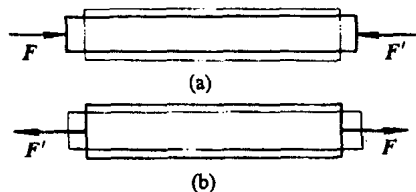


图 1-4

此原理说明，力是滑移矢量，它可以沿其作用线滑移但不能任意移至作用线以外的位置。

必须指出，力的可传性原理不适应于研究物体的内效应。例如，一根直杆受一对平衡力 F 、 F' 作用时，杆件受压 (图 1-4 (a))；若将两力互沿作用线移动，则杆变为受拉作用 (图 1-4 (b))，但拉伸和压缩是两种不同的内效应。

因此，研究物体的内效应时，力应作固定矢量处理。

1.2.3 公理三：力的平行四边形法则

作用于物体上某点两力的合力也作用于该点，其大小和方向可用此两力为邻边所构成的平行四边形的对角线来表示 (图 1-5)。

力是矢量，其运算也应按矢量运算法则进行，其矢量合成式为

$$\mathbf{F}_R = \mathbf{F}_1 + \mathbf{F}_2$$

反之，一个力也可以分解为两个分力，分解也按力的平行四边形法则来进行。显然，由已知力为对角线可作无穷多个平行四边形 (图 1-6)，故必须附加一定条件，才可能得到确切的结果。附加条件可能为：①规定两个分力的方向；②规定其中一个分力的大小和方向等等。

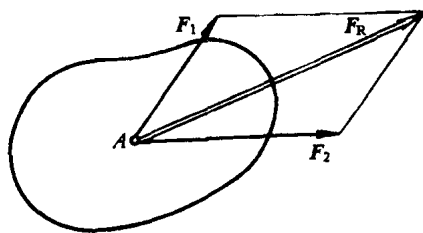


图 1-5

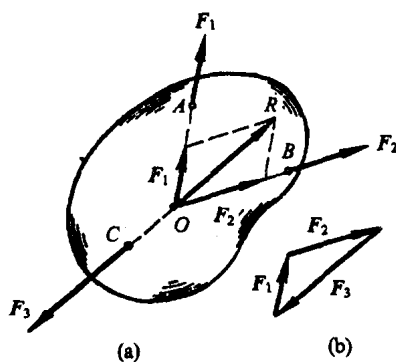


图 1-6

推理 2 三力平衡汇交定理 若刚体在三个共面而又互不平行的力作用下处于平衡的必要与充分条件是：三力的作用线必须汇交于一点，如图 1-6 (a) 所示。

三力矢量按首尾相连的顺序构成一封闭三角形，或简称力的三角形自封。因此，三力 F_1 、 F_2 、 F_3 构成封闭三角形。如图 1-6 (b) 所示。可自行证明。

三力构件，是指作用着三个力并处于平衡的构件。三力构件三个力的作用线交于一点。

若已知两个力的作用线，由此可以确定一个未知力的作用线。

1.2.4 公理四：作用和反作用定律

两个物体间相互作用的一对力，总是大小相等，方向相反，作用线相同，并分别作用于这两个物体。这两个力互为作用力和反作用力。

1.3 约束和约束反力

在空间可以自由运动，其位移不受任何限制的物体称为自由体，如空中飞行的飞机、火箭等。工程中的大多数物体，其在某些方向的位移往往受到限制，这样的物体称为非自由体。例如，在钢轨上行驶的火车、安装在轴承中的转轴等，都是非自由体。对非自由体某些方向的位移起限制作用的周围物体称为约束。如钢轨是火车的约束，轴承是转轴的约束等。当物体沿着约束所限制的方向有运动趋势时，约束对物体必产生一作用力。约束对被约束物体的作用力称为约束反作用力，简称约束反力或约束力。约束反力的方向总是与非自由体被约束所限制的位移方向相反。这是用以确定各种约束反力方向的原则，至于约束反力的大小则不能预先独立地确定。约束反力以外的其它力称为主动力。在静力学中，约束反力和物体所受的主动力组成平衡力系，因此可用平衡条件求出约束反力。

下面介绍几种工程中常用的约束类型，并分析其约束反力的特点。

1.3.1 柔索约束

工程中常见的钢丝绳、三角带、链条等都可以简化为柔索。当物体受到柔索的约束时，柔索只能限制物体沿柔索伸长方向的位移。因此，柔索受约束反力只拉勿压且沿柔索的中线，背离受力物体，图 1-7 (a) 所示为两根绳索悬吊一重物。根据柔索反力的特点，可知绳索作用于重物的约束反力是沿绳索的拉力 F_A 、 F_B 。图 1-7 (b) 所示为带传动装置。带对带轮的约束反力为沿两个带轮的外公切线的 F_1 、 F_2 。

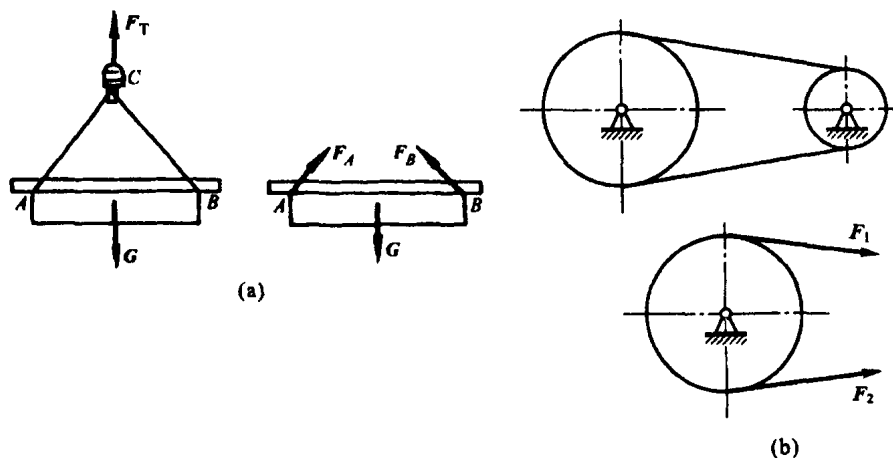


图 1-7

1.3.2 光滑接触面约束

当两物体直接接触，并可忽略接触处的摩擦时，约束只能限制物体在接触点沿接触面的

公法线指向约束物体的运动，不能限制物体沿接触面切线方向的运动。

因此光滑接触面的约束反力必通过接触点，方向沿着接触面在该点的公法线，指向被约束物体内部，即必为压力。通常这种约束反力称为法向反力。如图 1-8 所示。

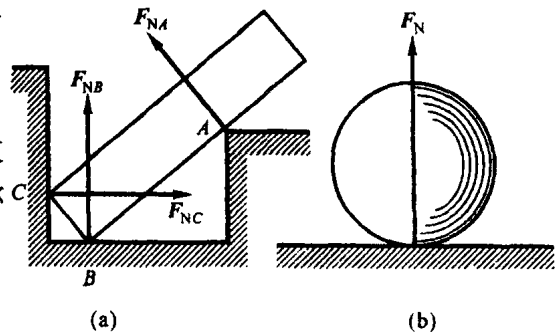


图 1-8

1.3.3 光滑圆柱铰链约束

两个物体用光滑圆柱体（例如销钉）相连接，二者都可绕光滑圆柱体自由转动，这时，光滑圆柱体便对所连接物体的移动形成约束。最常见的有：

(1) 固定铰支座。若构成圆柱铰链约束中的一个构件固定在地面或机架上作为支座，则称此铰链为固定铰支座，其约束反力一般用两个正交分量表示（图 1-9）。

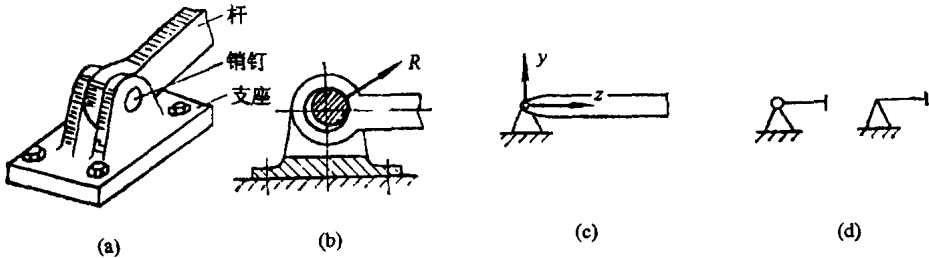


图 1-9

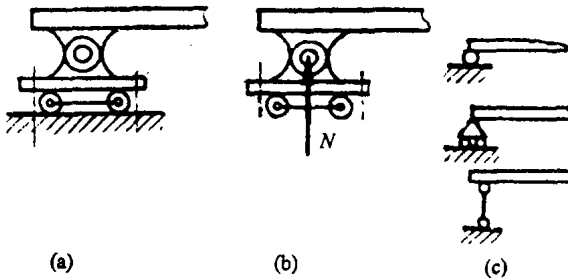


图 1-10

(2) 可动铰支座。若在由圆柱铰链构成的支座与光滑支承面之间装有辊轴，就构成辊轴支座或可动铰支座。其约束反力垂直于光滑支承面，如图 1-10 (b) 所示。图 1-10 (c) 为可动铰支座的简化画法。

(3) 中间铰链。将两个构件用圆柱铰链连接在一起成为中间铰链，其约束反力一般也用两个正交分量表示（图 1-11）。

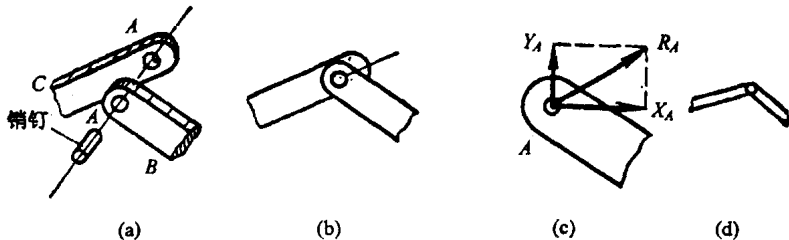


图 1-11

1.3.4 光滑球形铰链约束

构件 A 的球形部分嵌入构件 B 的球形窝内，就构成了球形铰链约束。这是一种空间的铰链约束。若两个球形表面之间无摩擦，则为光滑接触，构件 A 受到的约束反力必通过球心沿着半径方向，但它的方位不能预先确定。通常将球形铰链的约束反力表示为正交的三个

分力 X 、 Y 、 Z (图 1-12)。

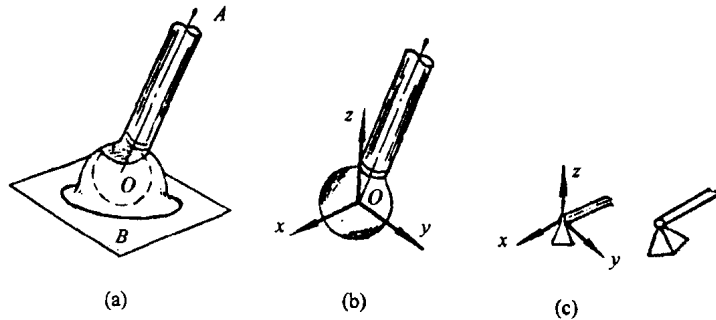


图 1-12

1.3.5 轴承约束

轴承是机器中支承轴的重要零件，常用的有“向心轴承”和“向心推力轴承”。

(1) 向心轴承。如图 1-13 (a) 所示，它的性质与圆柱铰链相同，但现在轴为被约束物体，轴承限制了轴在垂直于轴线的平面内的径向运动。其约束力与圆柱铰链约束力的特点相同 (如图 1-13 (b))，通常用互相垂直的两个分力 X 和 Y 表示。

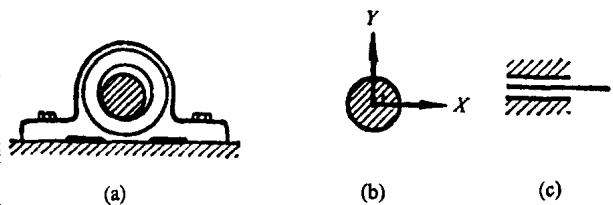


图 1-13

(2) 向心推力轴承。如图 1-14 (a) 所示，它不仅限制物体在垂直于轴线的平面内的径向运动，而且限制了单方向的轴向运动 (止推作用)。其约束力与球铰约束力的特点相同如图 1-14 (b)，通常用互相垂直的三个分力 X 、 Y 和 Z 表示。

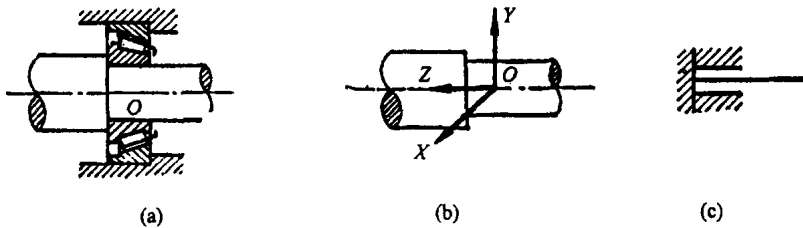


图 1-14

1.4 物体的受力分析

在求解静力平衡问题时，首先必须分析物体的受力情况，即进行受力分析。根据问题的已知条件和待求量，从有关结构中恰当选择某一物体 (或几个物体组成的系统) 作为研究对象。这时，可设想将所选择的对象从与周围的约束 (含物体) 的接触中分离出来，即解除其所受的约束而代之以相应的约束反力。这一过程称为解除约束。解除约束后的物体，称为分离体，画有分离体及其所受的全部力 (包括主动力和约束反力) 的简图，称为受力图。

例 1-1 悬臂吊车如图 1-15 (a) 简图中 A 、 B 、 C 三点为铰链，起吊重量为 P ，横梁 AB 和斜杆 BC 的自重可略去不计。试画出横梁 AB 的受力图。

解 先以横梁为研究对象，将它从周围物体中分离出来。起吊重量通过电葫芦的走轮，作用在梁的 D 点，为主动力。忽略电葫芦的重量， $P' = P$ 。 B 铰处的约束力方向可通过 BC 杆确定。由于 BC 杆的自重不计，只在两端受力，故为二力构件。 BC 杆在 T_C 和 T_B 的作用

下处于平衡状态。 T_B 为横梁在 B 处对 BC 杆的作用力，BC 杆在 B 处对 AB 梁的反作用力为 T'_B 二者等值，反向、沿同一直线作用。A 处为铰链约束，其约束力通过铰链中心，但方向不能确定，故用两互相垂直的分力 X_A 和 Y_A 表示，如图 1-15 (b) 所示。

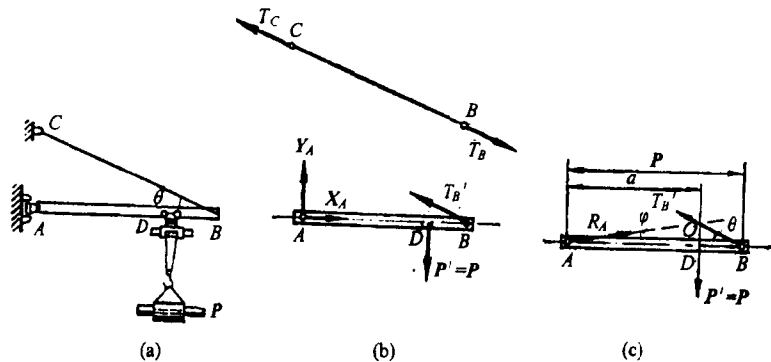


图 1-15

根据三力平衡条件，可以确定铰链 A 处的约束力必通过 P' 与 T'_B 作用线的交点 O，如图 1-15 (c) 所示，但工程分析与计算中一般都是将 A 处的约束力分解为 X_A 和 Y_A 、两个分力。

例 1-2 画出图 1-16 (b)、(c)，两图中滑块及推杆的受力图，并进行比较。图 1-16 (a) 是曲柄滑块机构，图 1-16 (d) 是凸轮机构。

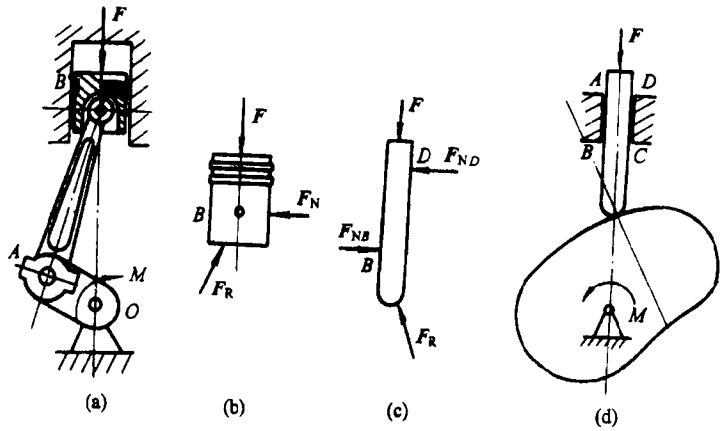


图 1-16

解 分别取滑块、推杆为分离体，画出它们的主动力和约束反力，其受力如图 1-16 (b)、(c) 所示。滑块上作用的主动 F 、 F_R 与 F 的交点在滑块与滑道接触长度范围以内，其合力使滑块单面靠紧滑道，故产生一个与约束面相垂直的反力 F_N ， F 、 F_R 、 F_N 三力汇交。推杆上的主动力 F 、 F_R 的交点在滑道之外，其合力使推杆倾斜而导致 B、D 两点接触，故有约束反力 F_{NB} 、 F_{ND} 。

小 结

- (1) 力是矢量，力的运算服从矢量运算法则。
- (2) 各种约束的约束反力必须按照规定的画法在受力图上准确地表示。
- (3) 在画受力图时，选定研究对象后，每解除一个约束，就必须加上该约束能够产生的约束反力，而不要事先判断该约束在此时有没有这些约束反力，以免引起不必要的错误；对