



普通高等教育“十三五”规划教材

Engineering Mechanics

工程力学

» 主编 苑学众



国防工业出版社
National Defense Industry Press

工程力学

主 编 苑学众
参 编 洪 媛 孙雅珍 任德斌
马丽珠 付柏全 海 洪
马云存

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书内容分为静力学和材料力学两篇。第一篇的内容包括静力学公理和物体受力分析、汇交力系、力偶系、平面任意力系(含平面桁架和摩擦的分析)和空间任意力系。第二篇的内容包括材料力学的基本概念、轴向拉伸、压缩和剪切(含连接件的强度计算)、扭转内力、应力与变形、弯曲内力、弯曲应力(含平面图形几何性质)、弯曲变形、应力状态、强度理论和压杆稳定。书末附有型钢表和大多数习题的答案。

本书可作为普通高等学校工科专业“工程力学”课程的教材,适合机械、交通、物流、土木、工程管理、房地产、造价、无机、材料、高分子、材料化学等专业的学生使用,也可作为同类专业的教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学 / 苑学众主编. —北京:国防工业出版社,2017.1
ISBN 978-7-118-11122-4

I. ①工… II. ①苑… III. ①工程力学 IV. ①TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 310941 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14³/₄ 字数 368 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776

发行业务:(010)88540717

前 言

本书是按照普通高等学校工科专业“工程力学”课程的基本要求编写的,可作为工程院校“工程力学”的教材,适合机械、交通、物流、土木、工程管理、房地产、造价、无机、材料、高分子、材料化学等专业的学生使用,也可作为同类专业的教材和参考书。本书的基本内容为72~80学时,可满足44~80学时的教学要求。

本书内容分为两篇:静力学和材料力学。第一篇共5章,包括静力学公理和物体受力分析,汇交力系,力偶系,平面任意力系(含平面桁架和摩擦的分析)和空间任意力系。第二篇共9章,包括材料力学的基本概念,轴向拉伸、压缩和剪切,扭转,弯曲内力,弯曲应力(含平面图形几何性质),弯曲变形,应力状态,强度理论和弯曲与扭转的组合,压杆稳定。书末附有型钢表和大多数习题的答案。

本书内容按由浅到难、从特殊到一般的顺序,循序渐进。第一篇注重理论的严密性。例如,对力偶的等效与合成,均从公理出发进行了证明。第二篇与多数材料力学教材安排相同。在保证教学内容的条件下,注意内容的精简。在材料的力学性能部分,改正了《材料力学》等教材普遍存在的关于低碳钢试样滑移的叙述。在弯曲变形部分引入了主编提出的“悬臂梁法”。

本书第1章由付柏全编写,第2、3、9、14章由苑学众编写,第4章由洪媛编写,第5、6章由任德斌编写,第7、8章由孙雅珍编写,第10、11章由苑学众、洪媛编写,第12章由马丽珠编写,第13章由海洪编写。全书由苑学众统稿。

由于编者水平有限,书中不足之处和错误在所难免,希望读者批评指正。

编 者
2016/8/1

目 录

第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学公理和物体受力分析	1
1.1 静力学公理	1
1.2 约束和约束力	3
1.3 物体受力分析	7
习题	9
第 2 章 汇交力系	13
2.1 汇交力系的合成与平衡——几何法	13
2.1.1 合成的几何法——力多边形法则	13
2.1.2 平衡的几何条件	14
2.2 力在坐标轴上的投影	14
2.2.1 力在轴上和平面上的投影	14
2.2.2 力在直角坐标轴上的投影	15
2.2.3 投影与分力的比较	15
2.3 汇交力系合成与平衡的解析法	16
2.3.1 合成的解析法	16
2.3.2 平衡的解析条件——平衡方程	17
习题	22
第 3 章 力偶系	25
3.1 力偶	25
3.1.1 力偶和力偶矩	25
3.1.2 力偶的等效条件	25
3.2 力偶系的合成与平衡	27
3.2.1 力偶系的合成	27
3.2.2 力偶系的平衡条件	28
3.3 力对点的矩	29
3.3.1 平面力对点的矩	29
3.3.2 空间力对点的矩	29
3.3.3 力偶对点的矩	30
3.4 力对轴的矩	30
3.4.1 力对轴的矩	30

3.4.2	力对坐标轴的矩	31
3.4.3	力对点的矩和力对轴的矩的关系	32
	习题	32
第4章	平面任意力系	35
4.1	平面任意力系的简化	35
4.1.1	力的平移定理	35
4.1.2	平面任意力系向作用面内一点简化·主矢和主矩	36
4.1.3	平面任意力系的简化结果分析	37
4.2	平面任意力系的平衡方程	39
4.2.1	平面任意力系的平衡条件	39
4.2.2	平面任意力系的平衡方程	39
4.2.3	平面任意力系的平衡方程的其他形式	40
4.2.4	平面平行力系的平衡方程	40
4.3	体系的平衡·静定和静不定问题	42
4.3.1	静定和静不定问题的概念	42
4.3.2	刚体系统的平衡问题	42
4.4	桁架	45
4.4.1	节点法	46
4.4.2	零杆	47
4.4.3	截面法	47
4.5	摩擦	49
4.5.1	滑动摩擦	49
4.5.2	摩擦角和自锁现象	50
4.5.3	考虑摩擦时物体的平衡问题	52
	习题	54
第5章	空间任意力系	61
5.1	空间任意力系的简化	61
5.1.1	力的平移定理	61
5.1.2	空间任意力系的简化	61
5.1.3	力系简化的最后结果	64
5.2	空间任意力系的平衡方程	65
	习题	67

第二篇 材料力学

第6章	材料力学的基本概念	71
6.1	材料力学的研究对象	71
6.2	变形固体的基本假设	72
6.3	外力和内力	74

6.4	应力和应变	75
6.5	胡克定律	77
	习题	78
第7章	轴向拉伸、压缩和剪切	80
7.1	轴向拉伸和压缩的概念	80
7.2	轴力和轴力图	80
7.3	轴向拉伸和压缩的应力	82
7.3.1	拉压杆横截面上的应力	82
7.3.2	拉压杆斜截面上的应力	84
7.4	材料在拉伸和压缩时的力学性能	85
7.4.1	材料在拉伸时的力学性能	85
7.4.2	材料在压缩时的力学性能	88
7.5	许用应力和强度计算	89
7.6	轴向拉伸和压缩时的变形	91
7.7	简单拉压静不定问题	94
7.7.1	静不定问题的概念	94
7.7.2	静不定问题的解法	95
7.8	剪切和挤压的强度计算	97
7.8.1	剪切与剪切强度条件	97
7.8.2	挤压与挤压强度条件	97
	习题	100
第8章	扭转	104
8.1	扭转的概念	104
8.1.1	扭转	104
8.1.2	动力传递——功率、转速与外力偶矩之间的关系	104
8.2	扭矩和扭矩图	105
8.3	切应力互等定理	106
8.3.1	薄壁圆筒的扭转应力	106
8.3.2	纯剪切与切应力互等定理	107
8.3.3	剪切胡克定律	107
8.4	圆轴扭转时的应力和强度条件	108
8.4.1	横截面上的应力	108
8.4.2	极惯性矩与抗扭截面系数	109
8.4.3	圆轴扭转的强度计算	110
8.5	圆轴扭转时的变形和刚度条件	111
8.5.1	圆轴扭转变形	111
8.5.2	圆轴扭转刚度条件	111
	习题	112

第9章 弯曲内力	115
9.1 弯曲的概念	115
9.2 剪力和弯矩	116
9.3 剪力图和弯矩图	119
9.4 载荷集度、剪力和弯矩间的微分关系	120
9.4.1 载荷集度、剪力和弯矩间的微分关系	120
9.4.2 利用载荷集度、剪力和弯矩间的微分关系画内力图	121
习题	122
第10章 弯曲应力	125
10.1 平面图形的几何性质	125
10.1.1 静矩和形心	125
10.1.2 惯性矩	126
10.2 弯曲正应力	128
10.2.1 纯弯曲	128
10.2.2 纯弯曲梁的变形分析	129
10.2.3 弯曲正应力	130
10.2.4 最大弯曲正应力	132
10.3 弯曲切应力	133
10.3.1 矩形截面梁	133
10.3.2 工字形等截面梁	135
10.4 梁的强度计算和提高强度的措施	136
10.4.1 弯曲正应力强度	136
10.4.2 弯曲切应力强度	137
10.4.3 提高梁强度的措施	137
10.5 非对称弯曲	139
10.6 弯拉(压)组合	142
10.6.1 弯拉(压)组合	142
10.6.2 偏心拉伸或压缩	143
习题	145
第11章 弯曲变形	150
11.1 梁的挠曲线近似微分方程	150
11.1.1 概述	150
11.1.2 梁的挠曲线近似微分方程	151
11.2 积分法	152
11.3 叠加法	154
11.3.1 载荷叠加法	155
11.3.2 逐段变形叠加法	156
11.4 简单静不定梁	158

11.5	梁的刚度条件和提高抗弯能力的主要途径	160
11.5.1	梁的刚度条件	160
11.5.2	提高梁抗弯能力的主要途径	161
	习题	162
第12章	应力状态	165
12.1	应力状态概述	165
12.2	平面应力状态应力分析	166
12.2.1	斜截面应力	167
12.2.2	极值应力和主应力	168
12.3	应力状态分析的图解法	171
12.3.1	应力圆	171
12.3.2	应力圆的应用	172
12.3.3	三向应力圆	173
12.3.4	最大应力	173
12.4	广义胡克定律	174
12.4.1	平面应力状态下的广义胡克定律	174
12.4.2	三向应力状态下的广义胡克定律	175
	习题	176
第13章	强度理论和弯曲与扭转的组合	180
13.1	强度理论概述	180
13.2	常用的四个强度理论	180
13.2.1	关于断裂的强度理论	181
13.2.2	关于屈服的强度理论	182
13.2.3	强度条件的统一表达式	183
13.3	弯扭和弯扭拉(压)组合	185
13.3.1	弯扭组合	185
13.3.2	弯扭拉(压)组合	186
13.4	薄壁压力容器	188
	习题	189
第14章	压杆稳定	192
14.1	压杆稳定的概念	192
14.2	细长压杆的临界力	193
14.2.1	两端铰支压杆	193
14.2.2	非两端铰支压杆	194
14.3	临界应力	195
14.3.1	临界应力和柔度	195
14.3.2	欧拉公式的适用范围	196
14.4	超过比例极限后压杆的临界应力	198

14.4.1	超过比例极限后压杆的临界应力	198
14.4.2	临界应力总图	198
14.5	压杆稳定条件与提高稳定性的措施	199
14.5.1	压杆稳定条件	199
14.5.2	折减系数法	200
14.5.3	提高稳定性的措施	201
习题		203
附录 A 型钢表		207
附录 B 习题答案		216
参考文献		224

第一篇 静 力 学

第 1 章 静力学公理和物体受力分析

1.1 静力学公理

公理是人们在长期生产生活实践中,经过反复的观察和实验发现和总结出一些最基本、最普遍的客观规律。

公理 1 二力平衡公理

作用于刚体上的两个力使刚体处于平衡的必要和充分条件是这两个力大小相等、方向相反、作用于同一条直线上,即等值、反向、共线。

这个公理表明了作用于刚体上的最简单的力系平衡时所必须满足的条件。

公理 2 加减平衡力系原理

在已知力系上,任意加上或减去一个平衡力系,与原力系对刚体的作用等效。

这个公理是研究力系等效变换的重要依据。

根据公理 1 和公理 2 可以导出推论 1。

推论 1 力的可传性

作用于刚体的力,其作用点可以沿作用线在刚体内任意移动,而不改变它对该刚体的作用。

证明:设有力 F 作用在刚体的点 A ,如图 1-1(a)所示,根据加减平衡力系公理,可以在力的作用线上任意取一点 B ,并加上两个相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,使 $F = F_1 = -F_2$,如图 1-1(b)所示。由于力 F 和 F_2 是一个平衡力系,故可减去,这样刚体上就只有 F_1 作用,如图 1-1(c)所示。因此,原来的力 F 就相当于沿其作用线移动到了点 B 。

由此可见,对于刚体来说,力的作用点已不是决定力的作用效应的要素,它已为作用线所代替。因此,作用于刚体上力的三要素是力的大小、方向和作用线。

作用于刚体上的力可以沿着作用线移动,这种矢量称为滑动矢量。

公理 3 力的平行四边形法则

作用于物体上任一点的两个力可合成为作用于同一点的一个力,即合力。合力的矢由原

两力的矢为邻边而作出的力平行四边形的对角矢来表示。或者说,合力矢等于这两个分力矢的几何和,如图 1-2(a) 所示,即

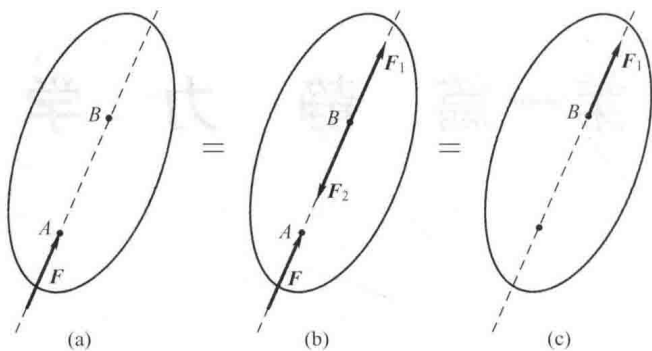


图 1-1

$$F_R = F_1 + F_2$$

也可以用力三角形法则,如图 1-2(b) 所示。
这个公理表明了最简单力系的简化规律,是复杂力系简化的基础。
根据公理 3 和公理 1 可以导出推论 2。

推论 2 三力平衡汇交定理

当刚体在三个力作用下平衡时,设其中两力的作用线相交于某点,则第三个力的作用线必定也通过这个点,且三力共面。

证明:如图 1-3 所示,在刚体的 A, B, C 三点上,分别作用三个相互平衡的力 F_1, F_2, F_3 。根据力的可传性,将力 F_1, F_2 移到汇交点 O ,然后根据力的平行四边形法则,得合力 F_{12} 。则力 F_3 应与 F_{12} 平衡。由于两个力平衡必须共线,所以力 F_3 必定与力 F_1 和 F_2 共面,且通过力 F_1 与 F_2 的交点 O 。定理得证。

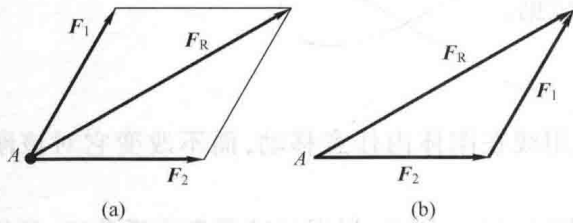


图 1-2

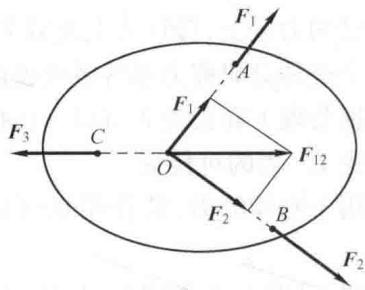


图 1-3

公理 4 作用和反作用定律

任何两个物体间的相互作用的力,总是大小相等、作用在同一直线,但方向相反,并同时分别作用于这两个物体上,如图 1-4 所示。

这个定律表明了作用力和反作用力是成对出现的,总是同时存在、同时消失、大小相等、指向相反、作用线相同、作用在相互作用的两个物体上,即等值、反向、共线、异体、共存。

这个公理概括了物体间相互作用的关系,为研究多个物体组成的物系问题提供了理论基础。

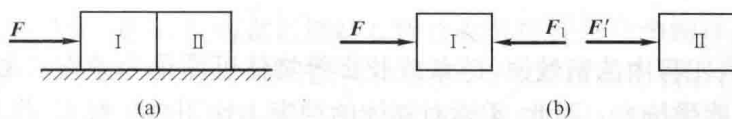


图 1-4

公理 5 刚化原理

变形体在已知力系作用下处于平衡状态,如将这个变形体刚化为刚体,其平衡状态保持不变。

这个公理提供了把变形体看作为刚体模型的条件。如图 1-5 所示,绳索在等值、反向、共线的两个拉力作用下处于平衡,如将绳索刚化为刚体,其平衡状态保持不变。绳索在等值、反向、共线的压力作用下并不能平衡,因为在这种情况下绳索不能刚化为刚体。但刚体在上述两种力系的作用下都是平衡的。

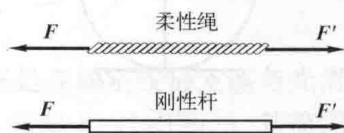


图 1-5

由此可见,刚体平衡条件是变形体平衡的必要条件,而非充分条件。在刚体静力学的基础上,考虑变形体的特性,可进一步研究变形体的平衡问题。

1.2 约束和约束力

因为力是物体间的相互机械作用,所以在分析物体的受力时必须了解有关物体之间的相互接触和联系方式。

空间位移不受任何限制的物体称为**自由体**,如飞行中的飞机、炮弹和火箭等。由于与周围物体接触,某些方向的位移受到限制的物体称为**非自由体**。如机车受铁轨的限制,只能沿轨道运动;电动机转子受轴承的限制,只能绕轴线转动;重物由钢索吊住,不能下落等。对非自由体的某些位移起限制作用的周围物体称为**约束**。如铁轨对于机车、轴承对于电动机转子、钢索对于重物等,都是约束。既然约束阻碍着物体的位移,也就是约束能起到改变物体运动状态的作用,所以约束对物体的作用实际上就是力,这种力称为**约束力**(也称**约束反力**或**反力**)。物体除受约束力外,还受重力、风力、水压力等各种载荷作用,它们是促使物体运动或有运动趋势的力,称为**主动力**,这种力可以被独立确定。而约束力事先不能被确定,约束力通常取决于约束本身的性质、主动力和物体的运动状态。约束力作用在相互接触处,约束力的方向必须与约束所能限制的位移方向相反,这是确定约束力方向和作用线位置的准则。在静力学中,约束力和主动力组成平衡力系,因此可用平衡条件求出未知的约束力。

下面介绍工程中几种基本约束,并对其约束力进行分析。

1. 光滑接触面约束

若两物体的接触面上摩擦力很小,可忽略,则接触面可简化为光滑表面,如支持物体的固定面(图 1-6)、啮合齿轮的齿面、机床中的导轨等。光滑接触面约束不能限制物体沿约束表面切线的位移,只能阻碍物体沿接触表面法线的位移。因此,光滑接触面约束对物体的约束力,作用在接触点处,作用线沿接触表面的公法线,指向被约束的物体,使物体受压。这种约束力称为**法向约束力**,通常用 F_N 表示,如图 1-6 中的 F_{N_A} 。

2. 柔索

如图 1-7 所示,工程中的钢丝绳、链条或胶带等物体可简化为柔索。柔索的特点是不计自重,不可伸长,只能受拉力。因此,柔索对物体的约束力作用在接触点,作用线沿着柔索,方向背离物体,使物体受拉,可用 F_T 表示。

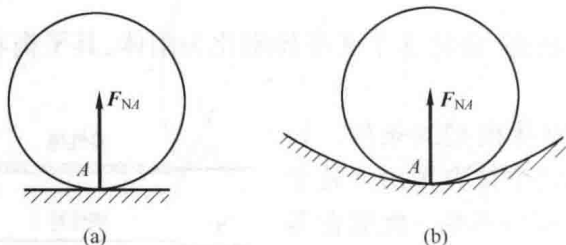


图 1-6

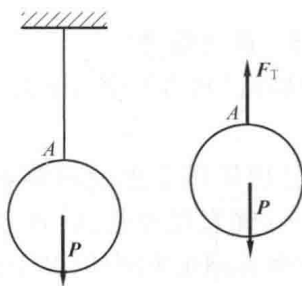


图 1-7

3. 光滑铰链约束

1) 圆柱铰链和固定铰支座

如图 1-8(a) 所示的结构由两个直角弯杆通过圆柱铰链 C 以及固定铰支座 A 和 B 连接而成。圆柱铰链简称**铰链**,它是由销钉 C 将两个钻有同样大小孔的构件连接在一起而成的,如图 1-8(b) 所示,其简图如图 1-8(a) 所示的铰链 C 。如果铰链连接中有一个固定在地面或机架上作为支座,则这种约束称为**固定铰链支座**,简称**固定铰支**,如图 1-8(b) 所示的支座 B ,其简图如图 1-8(a) 所示的固定铰链支座 A 和 B 。

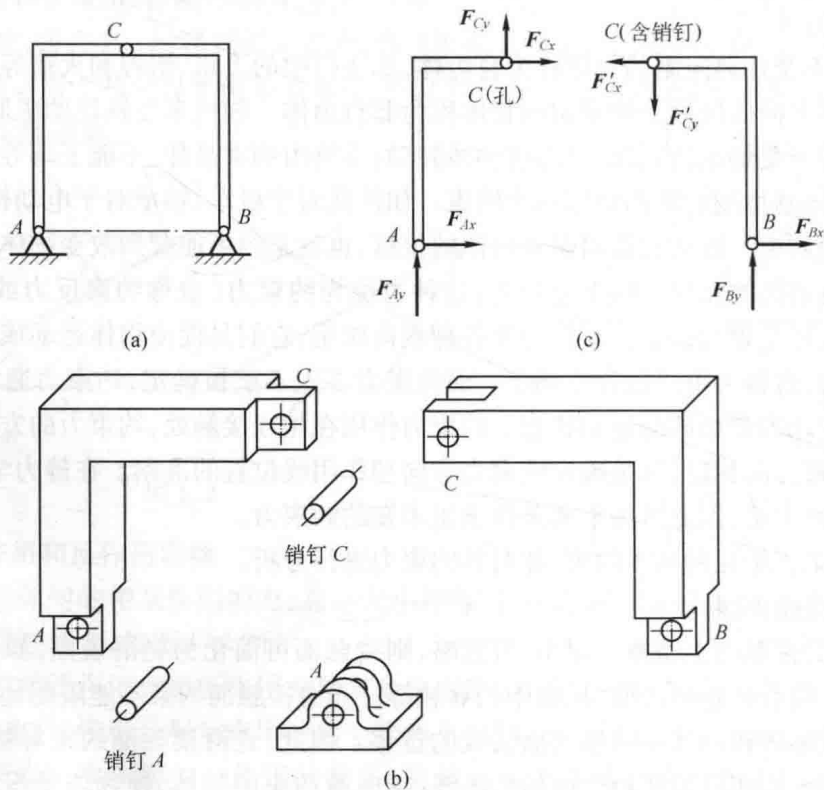


图 1-8

在分析铰链 C 处的约束力时,通常把销钉 C 固连在其中任意一个构件上。如当把销钉 C 固连在构件 BC 上时,则构件 AC 、 BC 互为约束。显然,当忽略摩擦时,构件 BC 上的销钉与构件 AC 的结合,实际上是销钉与光滑孔的配合问题,即圆柱销定与圆柱孔是光滑曲面接触。因此,约束力应沿接触点公法线(接触点与圆柱销中心的连线),但接触点位置随载荷的方向而改变,即作用线不能预先定出,但约束力垂直于销钉轴线并通过铰链中心。因此,这种约束的约束力通过铰链中心,但方向不确定,通常用垂直分力来表示,如图 1-8(c) 所示。

同理,把销钉固连在 A 、 B 支座上,则固定铰支 A 、 B 对构件 AC 、 BC 的约束力特征与上述分析铰链 C 一样,如图 1-8(c) 所示。

2) 活动铰支座

在桥梁、屋架等结构中经常采用活动铰支座约束。这种支座是在固定铰链支座与光滑支承面之间装设几个辊轴而构成的,故又称辊轴支座或可动支座,如图 1-9(a) 所示,其简图如图 1-9(b) 所示。它可以沿支承面移动,允许由于温度变化而引起结构跨度的自由伸长和缩短。显然活动铰支座不能阻止构件沿着支撑面的运动,所以其约束力必垂直于支撑面且通过铰链中心,指向不定。通常用 F_N 表示其法向约束力,如图 1-9(c) 所示。

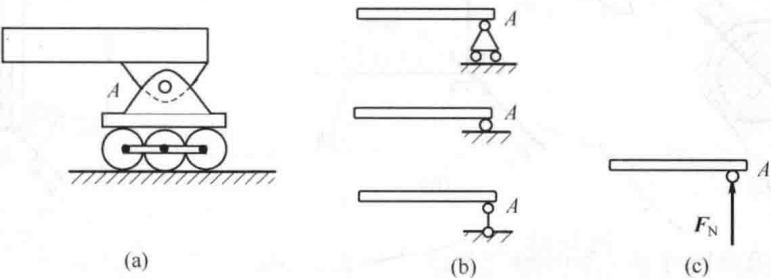


图 1-9

3) 链杆

两端用光滑销钉与物体连接中间不受力的刚杆(直杆或弯杆)称为链杆。这种链杆常被用作拉杆或支承,用两端的铰链连接物体。链杆约束只能阻止物体上与链杆连接的点沿链杆中心线方向的运动,因此链杆约束的约束力沿着链杆中心线(两铰连线),指向不定,如图 1-10 所示。

4. 空间约束

1) 球铰链

通过圆球和球壳将两个构件连接在一起的约束称为球铰链。它使构件的球心不能有任何位移,但构件可绕球心任意转动。若忽略摩擦,其约束力是通过球心,但方向不能预先确定的一个空间力,可用三个正交分力 F_{Ax} 、 F_{Ay} 、 F_{Az} 表示,其简图及约束力如图 1-11 所示。

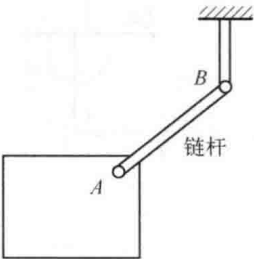


图 1-10

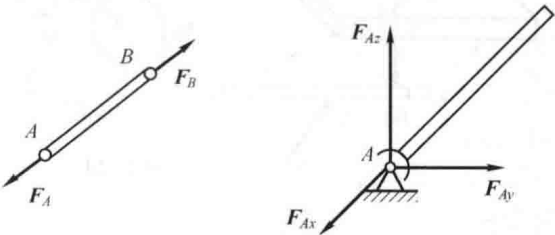


图 1-11

2) 向心轴承(径向轴承)

向心轴承简图如图 1-12 所示。轴可在孔内任意转动,也可沿孔的中心线移动;但是,轴承阻碍着轴沿径向向外位移。当轴和轴承在某点 A 光滑接触时,轴承对轴的约束力 F_A 作用在接触点 A ,且沿公法线指向轴心(图 1-12(a))。但是,随着轴所受的主动力不同,轴和孔的接触点的位置也随之不同。所以当主动力尚未确定时,约束力的方向预先不能确定。但无论约束力朝向如何,其作用线必垂直于轴线并通过轴心。这样一个方向不能预先确定的约束力,通常可用通过轴心的两个大小未知的正交分力 F_{Ax} , F_{Ay} 来表示,如图 1-12(b) 所示, F_{Ax} , F_{Ay} 的指向暂可任意假定。

3) 止推轴承

止推轴承与径向轴承不同,它除了能限制轴的径向位移以外,还能限制轴沿轴向的位移。因此,它比径向轴承多一个沿轴向的约束力,即其约束力有三个正交分量 F_{Ax} , F_{Ay} 和 F_{Az} 。止推轴承的简图及约束力如图 1-13 所示。

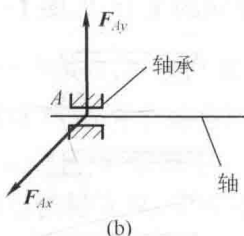
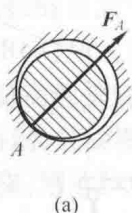


图 1-12

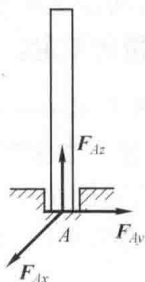


图 1-13

5. 固定端

将物体的一端牢固地插入基础或固定在其他静止的物体上,则称为固定端,如图 1-14(a) 所示。固定端除了限制物体移动,还限制物体的转动。因此,固定端的约束力可用一个约束力 F 和约束力偶 M_A 表示(力偶的概念详见第 3 章),可分别分解为三个正交分量 F_{Ax} , F_{Ay} , F_{Az} 和 M_x , M_y , M_z (图 1-14(b))。对于平面问题,固定端的约束力可用两个正交分力 F_{Ax} , F_{Ay} 和在平面内的力偶 M_A 表示,如图 1-14(c) 所示。

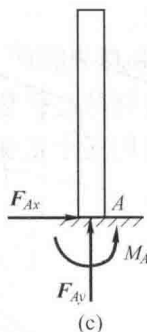
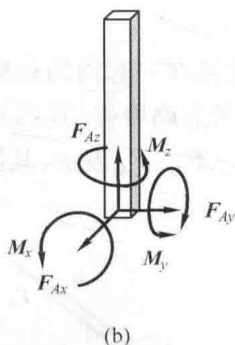
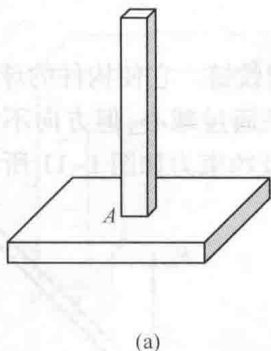


图 1-14

1.3 物体受力分析

受力分析不仅是构件设计的基础,而且是动力分析的基础。受力分析包含以下几方面工作:将所研究部分的周围约束去掉,并从整体中分离出来,称为**取分离体**或**取研究对象**;根据外加载荷和约束性质判断并确定作用在物体上有几个力,其中哪些是主动力、哪些是约束力,各力的作用线、方向、大小如何;在**分离体**上逐一画出作用于其上的全部力(包括主动力和约束力),这种图形称为**受力图**。下面举例说明画受力图的方法和步骤。

例 1-1 如图 1-15(a) 所示,设接触处都是光滑的,画出物体的受力图。

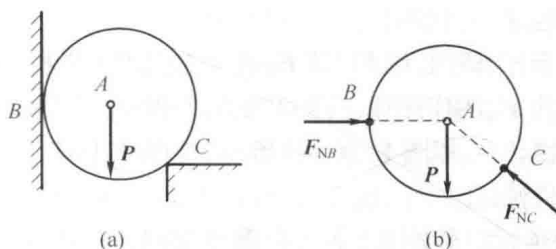


图 1-15

解: 本题为单刚体受力分析问题。

(1) 取研究对象:圆盘 A。

(2) 画主动力:圆盘的重力 P 。

(3) 画约束力:根据约束类型(A、B 两处均为光滑接触约束)画上相应的约束力,受力图如图 1-15(b) 所示。

例 1-2 如图 1-16(a) 所示,不计自重和摩擦,AB 杆上作用有载荷 F 。分别画出杆 AB 和 CD 的受力图。

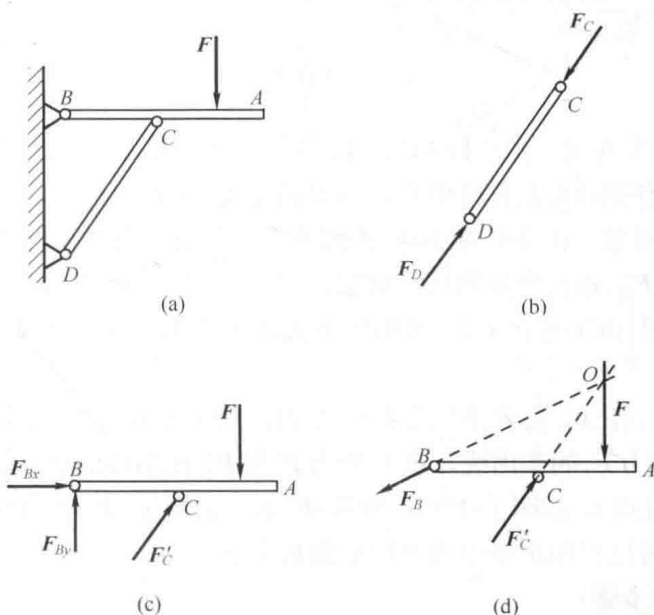


图 1-16