

工程力学
高等学校教材兼自学考试与函授用书

工程力学

陈 丰 孙利民 主编

12
0

中国建材工业出版社

工 程 力 学

陈 丰 孙利民 主编

中国建材工业出版社

(京)新登字 177 号

图书出版编目(CIP)数据

工程力学 / 陈丰、孙利民 主编, 北京: 中国建材工业出版社, 1997.5.
ISBN7-80090-608-6

I. 力… II ①陈……②孙…… III. 工程力学-高等学校-教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 07076 号

工程力学

陈 丰 孙利民 主编

* * *

中国建材工业出版社

(北京海淀区三里河路 11 号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中牟县印刷厂印刷

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 22.5 字数: 520 千字

1997 年 7 月第一版 1997 年 7 月第一次印刷

印数: 1-4000 册 定价: 18.80 元

ISBN 7-80090-608-6 / TB·37

前 言

随着我国教学改革的深入发展,各院校、各类专业及不同层次的学生对《工程力学》课程的要求差异较大,教学时数不尽一致。为适应课程时数为110~120学时的教学需要,特编写本书。

《工程力学》是高等工业院校开设的技术基础课。本书分为理论力学,材料力学两部分,可作为高等院校机械、电力、土建、水工等类专业的教材,亦可兼作上述各专业的函授教材或高等教育自学考试用书。

本书在编写过程中,力求突出内容的整体性和连贯性;基本概念和基本理论讲述清楚,便于自学和理解;加强基础知识练习和工程实例的应用,以培养学生分析和解决问题的能力。

本书由陈丰、孙利民主编,第一、二、三、四、五章由陈丰编写,第六、七、八、九、十章由赖永星编写,第十一、十二、十三、十四、十五章由苗同臣编写,第十六、十七、十八、十九、二十章及附录由孙利民编写,第二十一、二十二、二十三、二十四章由候晓华编写。

由于编者水平有限,经验不足,书中缺点和错误难免,恳请读者批评指正。

编者

一九九六年八月

目 录

绪论.....	1
---------	---

静 力 学

第一章 静力学基本概念与受力分析.....	3
§ 1—1 静力学基本概念与静力学公理.....	3
§ 1—2 约束与约束反力.....	6
§ 1—3 受力分析与受力图.....	9
习 题	11
第二章 平面汇交力系	14
§ 2—1 平面汇交力系合成与平衡的几何法	14
§ 2—2 平面汇交力系合成与平衡的解析法	16
习 题	20
第三章 力矩与平面力偶系	23
§ 3—1 力矩的概念	23
§ 3—2 力偶与力矩	24
§ 3—3 平面力偶系的合成与平衡	26
习 题	28
第四章 平面任意力系	30
§ 4—1 平面任意力系的简化	30
§ 4—2 平面任意力系平衡方程	33
§ 4—3 物体系统的平衡	38
§ 4—4 考虑摩擦的平衡问题	42
习 题	45
第五章 空间力系	50
§ 5—1 力在空间直角坐标轴上的投影	50
§ 5—2 力对轴的矩	51
§ 5—3 空间力系的平衡方程	53
§ 5—4 重心	57

习 题	58
-----------	----

运 动 学

第六章 点的运动学	62
§ 6—1 点的运动的矢量法	62
§ 6—2 点的运动的直角坐标法	63
§ 6—3 点的运动的自然法	66
习 题	71
第七章 刚体的基本运动	73
§ 7—1 刚体的平行转动	73
§ 7—2 刚体的定轴移动	74
§ 7—3 定轴转动刚体上各点的速度和加速度	75
习 题	78
第八章 点的合成运动	81
§ 8—1 合成运动的概念	81
§ 8—2 点的速度合成定理	82
§ 8—3 牵连运动为平动时点的加速度合成定理	85
习 题	87
第九章 刚体的平面运动	90
§ 9—1 刚体平面运动的概念	90
§ 9—2 平面图形内各点的速度	92
§ 9—3 平面图形内各点的加速度	97
习 题	99

动 力 学

第十章 质点运动微分方程	103
§ 10—1 动力学的基本定律	103
§ 10—2 质点运动微分方程	104
习 题	107
第十一章 动量定理	110
§ 11—1 动量定理	110
§ 11—2 质心运动定理	114
习 题	118
第十二章 动量矩定理	121
§ 12—1 刚体的转动惯量	121

§ 12—2 动量矩定理	124
§ 12—3 刚体绕定轴转动的微分方程	128
习 题	130
第十三章 动能定理	134
§ 13—1 力的功及动能	134
§ 13—2 动能定理	141
§ 13—3 动力学普遍定理综合应用	146
习 题	149
第十四章 达朗伯原理	153
§ 14—1 惯性力	153
§ 14—2 达朗伯原理	154
§ 14—3 刚体惯性力系的简化	155
习 题	159
第十五章 虚位移原理	162
§ 15—1 约束·自由度·虚位移与理想约束	162
§ 15—2 虚位移原理	164
习 题	167
材 料 力 学	
第十六章 轴向拉伸与压缩	170
§ 16—1 工程中的拉伸与压缩问题	170
§ 16—2 内力的概念·截面法和轴力	170
§ 16—3 拉(压)杆横截面上的应力·强度条件	172
§ 16—4 拉(压)杆的变形计算	176
§ 16—5 材料在拉伸和压缩时的机械性能	178
§ 16—6 拉(压)杆的简单静不定问题	184
题	186
第十七章 剪切	190
§ 17—1 剪切概念与工程实例	190
§ 17—2 剪切和挤压的实用计算	190
§ 17—3 应用实例	192
习 题	196
第十八章 扭转	198
§ 18—1 概述	198

§ 18—2	扭转时的内力	198
§ 18—3	纯剪切·剪切虎克定律	202
§ 18—4	圆轴扭转时的应力和变形	204
§ 18—5	圆轴扭转时的强度和刚度条件	207
§ 18—6	矩形截面杆扭转概述	208
习 题		209
第十九章	弯曲内力与应力	212
§ 19—1	平面弯曲的概念	212
§ 19—2	梁的内力——剪力与弯矩	213
§ 19—3	剪力图与弯矩图	215
§ 19—4	弯矩·剪力和分布载荷集度之间的关系	218
§ 19—5	纯弯曲时梁的正应力	220
§ 19—6	常见截面的惯性矩·平行移轴公式	224
§ 19—7	矩形截面梁的弯曲剪应力简介	229
§ 19—8	弯曲强度计算及其应用	230
§ 19—9	提高梁强度的主要措施	234
习 题		236
第二十章	弯曲变形	243
§ 20—1	梁的挠度和转角	243
§ 20—2	弹性曲线的近似微分方程	244
§ 20—3	用叠加法求梁的变形	248
§ 20—4	梁的刚度校核·提高梁刚度的措施	252
§ 20—5	简单静不定梁	254
习 题		256
第二十一章	应力状态与强度理论	260
§ 21—1	应力状态问题的提出	260
§ 21—2	一点应力状态的描述	260
§ 21—3	平面应力状态分析	261
§ 21—4	应力圆	263
§ 21—5	最大应力和主应力	265
§ 21—6	三向应力状态的最大剪应力·广义虎克定律	267
§ 21—7	强度理论的概念	270
§ 21—8	常用的四个强度理论	271

§ 21—9 强度理论的应用	273
习 题	275
第二十二章 组合变形构件的强度计算	279
§ 22—1 组合变形的概念	279
§ 22—2 弯拉(压)组合强度计算	279
§ 22—3 偏心拉(压)强度计算	282
§ 22—4 弯扭组合强度计算	284
习 题	287
第二十三章 压杆稳定	291
§ 23—1 压杆稳定的概念	291
§ 23—2 计算临界载荷的欧拉公式	291
§ 23—3 临界应力·欧拉公式的适用范围	294
§ 23—4 压杆的稳定计算	297
§ 23—5 提高压杆稳定性的措施	300
习 题	300
第二十四章 疲劳强度与冲击应力	303
§ 24—1 交变应力及疲劳破坏的概念	303
§ 24—2 交变应力的有关名词和术语	304
§ 24—3 S—N 曲线和材料的疲劳极限	305
§ 24—4 影响疲劳破坏的因素和构件的疲劳极限	306
§ 24—5 冲击载荷与冲击应力	310
习 题	312
附 录 型钢规格表	314
附表 1 热轧等边角钢(GB 700—79)	314
附表 2 热轧不等边角钢(GB 701—79)	319
附表 3 热轧普通槽钢(GB 707—65)	323
附表 4 热轧普通工字钢(GB 706—65)	325

绪 论

一、工程力学的研究对象和内容

工程力学是研究物体机械运动的一般规律以及构件承受载荷能力的一门学科。

所谓机械运动,是指物体在空间的位置随时间的变化。机械运动是人们生活和生产实践中最常见的一种运动。平衡是机械运动的特殊情况。

工程中的结构元件,机器零部件等都可称为构件,构件在承受载荷或传递运动时,能够正常工作而不破坏,也不发生过大的变形,并能保持原有的平衡形态而不丧失稳定,这就要求构件具有足够的强度、刚度和稳定性。

本教材包含有“理论力学”和“材料力学”两部分。

理论力学是研究力作用于物体时的外部效应,即研究物体机械运动的规律,因此它们是将物体抽象化为刚体来研究的,理论力学包含以下内容:

静力学——主要研究受力物体平衡时作用力所应满足的条件,同时也研究物体受力的分析方法,以及力系简化的方法等。

运动学——研究物体运动的几何性质(如轨迹、速度、加速度等),而不考虑物体运动的原因。

动力学——研究受力物体的运动变化与作用力之间的关系。

材料力学是研究物体在力作用下的内部效应,所以它是研究变形固体的。其主要内容有:

研究构件在外力作用下的内部受力、变形和失效的规律;

提出保证构件具有足够强度、刚度和稳定性的设计准则和方法。

二、工程力学的研究方法

研究科学的过程,就是认识客观世界的过程,任何正确的科学研究方法,一定要符合辩证唯物主义的认识论。工程力学也正是遵循这个正确的认识规律进行研究和发展的。

工程力学对生产实践起着重要指导作用,为工程中构件的设计和计算提供了简便实用的方法,同时又为生产技术的发展所推动,两者是相互促进,共同发展的。

工程实际中作机构运动的物体是多种多样的,在外力作用下物体的变形和破坏形式也是各不相同的,这就要求我们在分析研究问题时,必须抓住主要因素,并运用抽象化的方法,从而得出比较合乎实际的力学模型和强度准则。

例如,在研究物体平衡时,其变形就是次要因素,忽略了这一点,就可将真实物体视为刚体来研究。但是研究物体的强度及刚度时,变形就成了主要因素,因此只有用变形固体这一力学模型来代表真实物体,才能反映问题的本质。又如,用铸铁材料制成的圆杆,在沿轴线的外力作用下拉断时,破坏面与轴线垂直。如果在杆两端与轴线垂直的平面内作用一对等值反向的力偶而产生扭转破坏时,破坏面则是与杆轴线夹角为 45° 的螺旋面,根据理论分析和实验分析,认为这种破坏实质上也为拉断。因此,尽管两种情况下的载荷形式及破坏形式各不相同,但由于破坏的本质都一样,故此采用了相同的强度准则。

综上所述,对于工程实际中的问题,运用科学抽象的方法,加以综合分析,再通过实验与严密的数学推理,从而得到工程中适用的理论公式,以指导实践,并为实践所检验。即从实践到理论,再由理论回到实践,通过实践进一步补充和发展理论,然后再回到实践,循环往复,逐步发展。

三、工程力学在专业学习中的地位和作用

工程力学是机械、化工、轻工、纺织、电力、冶金、地质、金属加工工艺、建筑学、环境工程等技术专业的技术基础课。这门课程讲述力学的基础理论和基本知识,以及处理工程中力学问题的基本方法,在专业课与基础课之间起桥梁作用。它为专业设备及机器的机械运动分析和强度计算提供必要的理论基础。

学习工程力学不仅要深刻理解力学的基本概念和基本定律,并且还要熟练地掌握由基本概念和基本定律寻出的解决工程力学问题的定理和公式,同时也要注意培养自己处理工程力学问题的能力。为达此目的,认真读书,演算一定数量的习题,注意联系有关专业中的力学问题是学好工程力学的重要途径。

“实践是检验真理的唯一标准”,工程力学的全部理论是前人经过长期实践总结出的客观规律,我们的任务是认识它、掌握它,让它为我们社会主义建设事业服务,它将通过我们在各个实际工程中的应用和实践,得到进一步的充实和完善。

静 力 学

静力学是研究物体在力系作用下平衡的规律的科学。

静力学主要研究下列两个问题:

1. 力系的简化 力系是指作用在物体上的一群力。若用一个最简单的力系等效地代替复杂的力系,称为力系的简化。

2. 力系的平衡条件 是指物体处于平衡状态时,作用于物体上的力系应满足的条件,根据平衡条件,可求解工程实际问题。

第一章 静力学基本概念与受力分析

§ 1-1 静力学基本概念与静力学公理

一、刚体

静力学研究的对象主要是刚体。所谓刚体是指在力作用下不变形的物体,即刚体内部任意两点间的距离保持不变。在实际问题中,任何物体在力的作用下或多或少都会产生变形,如果物体变形不大或变形对所研究的问题没有实质影响,则可将物体抽象为刚体。

二、平衡

平衡是指物体相对于惯性参考系静止或作匀速直线运动。平衡是物体机械运动的一种特殊状态。在工程技术问题中,常把固连于地球上的参考系作为惯性参考系。因此,平衡就是指物体相对地球处于静止或作匀速直线运动的状态。

三、力的概念

1. 力的定义

力是物体间的相互机械作用,这种作用使物体的机械运动状态发生改变,或使物体变形。前者称为力的运动效应或外效应,后者称为力的变形效应或内效应。在理论力学部分只研究力的外效应,而力的内效应将在本教材的材料力学部分研究。

2. 力的三要素

实践证明,力对物体的效应取决于力的大小、方向和作用点。这三者称为力的三要素。

力的大小反映了物体间相互机械作用的强度,它可以通过力的外效应或内效应的大小来度量。本教材采用国际单位制,力的单位是牛顿(N)或千牛顿(kN)。

力的方向包含力的作用线在空间的方位和指向。

力的作用点是力作用在物体上的部位。实际上,当两个物体直接接触时,力总是分布地作用在一定的面积上。当力作用的面积很小以至于可以忽略其大小时,就可以近似地看成作用在一个点上。作用于一点上的力称为集中力。如果力作用的面积很大,这种力称为分布力。分布力作用的强度用单位面积上力的大小 $q(\text{N}/\text{m}^2)$ 来度量,称为载荷集度。

3. 力是矢量

根据以上所述,既然一个力可由三个要素即大小、方向和作用点来表示,因此力具有矢量所具备的条件,可见力是矢量,且为定位矢量,可用一具有方向的线段来表示,如图1-1所示。线段的长度按一定比例尺表示力的大小,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,而与线段重合的直线表示力的作用线。在本教材中,矢量均用黑体字母表示如 $\mathbf{F}$,该矢量的大小则用同文的白体字母表示如 F 。

4. 力系

作用在物体上的一群力称为力系。如果物体在一力系的作用下保持平衡状态,则该力系称为平衡力系。若两力系分别作用于同一物体而效应相同时,则这两力系称为等效力系。若力系与一力等效,则此力就称为该力系的合力。

四、静力学公理

公理是人类经过长期的缜密观察和经验积累而得到的结论,它可以在实践中得到验证。公理不可能用更简单的原理去代替,也无需证明而为大家所公认。静力学公理是人们关于力的基本性质的概括和总结。

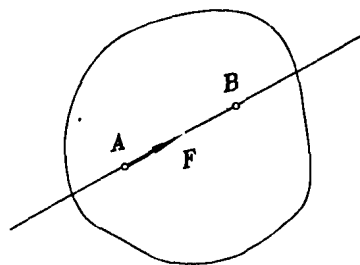


图1-1

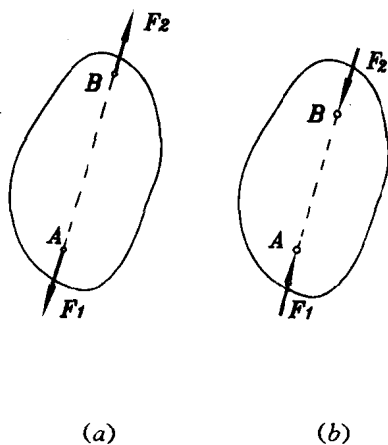


图1-2

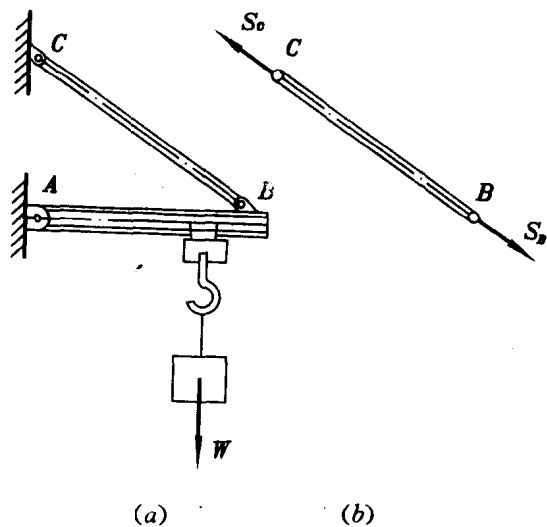


图1-3

公理一(二力平衡公理) 作用在同一刚体上的两个力使刚体保持平衡的必要和充分条件是:这两个力大小相等,方向相反,并且作用在同一直线上。

需要强调的是,这个原理只适用于刚体。二力等值、反向、共线是刚体平衡的必要和充分条件。它们构成最简单的平衡力系。图1-2表示了满足公理一的两种情况。

工程上常遇到只受两个力作用而平衡的构件,称为二力构件或二力杆。根据公理一作用于二力构件上的两个力必沿作用点的连线。如图1-3a所示简单吊车中的拉杆BC,如果不考虑它

的重量,杆就只有 B 和 C 处分别受到力 S_B 和 S_C 的作用,如图1-3b所示,所以杆 BC 是二力杆件。

公理二(加减平衡力系公理) 在作用于刚体上的任何一个力系中,加上或取去任意一个平衡力系,并不改变原来力系对刚体的效应。

这个公理的正确性是显而易见的,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。

推论(力的可传性原理) 作用于刚体的力可以沿其作用线移至刚体内任意一点,而不改变它对于刚体的效应。

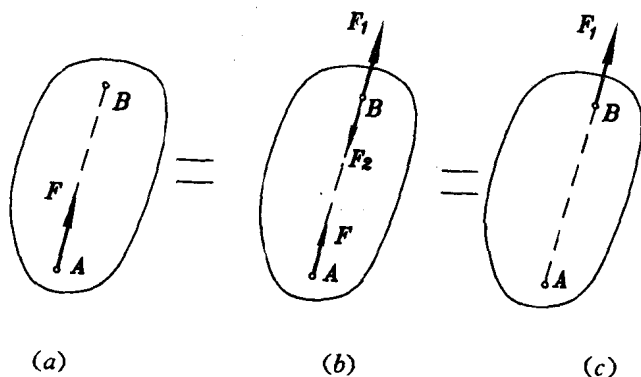
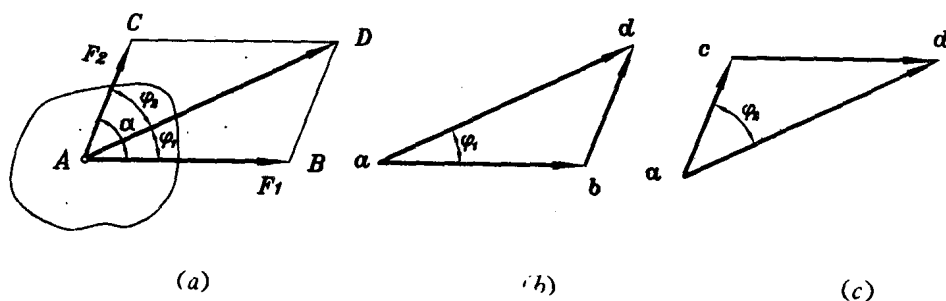


图1-4

证明 设力 F 作用于刚体的 A 点,如图1-4a所示。在其作用线上任取一点 B ,并在 B 点加上一对相互平衡的力 F_1 和 F_2 ,并令 $F_1 = F_2 = F$,如图1-4b所示,由公理二知,这不影响原来的力 F 对刚体的效应。根据公理一得知力 F 与 F_2 相互平衡,再由公理二取去这两个力,于是仅余下作用于 B 点的力 F_1 ,显然它与原来作用于 A 点的力 F 等效,如图1-4c所示。可见,力对于刚体的效应与力的作用点在作用线上的位置无关,即力可以沿其作用线在刚体内任意移动而不改变它对于刚体的效应,对于刚体来说,力是滑动矢量。所以作用于刚体上的力的三要素应是:力的大小、方向和作用线。

公理三(力的平行四边形法则) 作用于物体某一点的两个力的合力,亦作用于同一点上,其大小及方向可由这两个力所构成的平行四边形的对角线来表示。



设在物体的A点作用有力 F_1 和 F_2 ,如图1-5a所示,如用 R 表示它们的合力,则可以写成矢量表达式。

$$R = F_1 + F_2$$

即合力 R 等于两力 F_1 与 F_2 的矢量和(或几何和)。

求合力的大小及方向亦可只画出半个平行四边形如图1-5b所示。从点 a 开始先画矢量 $\overline{ab}$ 表示力矢 F_1 ,在其末端 b 作 $\overline{bd}$ 表示力矢 F_2 ,连接起点 a 与终点 d 得到矢量 $\overline{ad}$,矢量 $\overline{ad}$ 表示合力 R 的大小和方向。三角形 abd 称为力三角形,这一求合力的方法称为力三角形法则。如果从点 a 开始先画矢量 $\overline{ac}$ 表示力 F_2 ,再从 c 点画矢量 $\overline{cd}$ 表示 F_1 ,同样可得到相同的表示合力 R 的大小和方向的矢量 $\overline{ad}$,如图1-5c所示。可见,合力矢与两分力矢的作图先后次序无关。

推论(三力平衡汇交定理) 刚体在三力作用下平衡,若其中二力的作用线相交,则第三力的作用线必交于同一点,且三力共面。

证明 设有相互平衡的三个力 F_1 、 F_2 和 F_3 分别作用于刚体的 A_1 、 A_2 和 A_3 三点如图1-6所示,已知力 F_1 和 F_2 的作用线交于 B 点。按力的可传性,将力 F_1 和 F_2 移至交点 B ,并用公理三求得其合力 R 。今以合力 R 代替力 F_1 和 F_2 的作用,根据已知条件,合力 R 应与力 F_3 平衡,由公理一知,力 F_3 的作用线必与合力 R 的作用线重合。因此,力 F_3 的作用线亦在力 F_1 与 F_2 所构成的平行四边形平面上,且通过交点 B 。

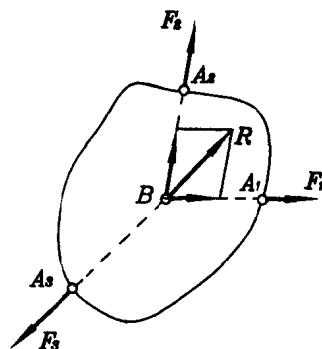


图1-6

三力平衡汇交定理说明了不平行的三个力平衡的必要条件,有时用来确定第三个力的作用线的方位。

公理四(作用与反作用定律) 两物体相互作用的作用力和反作用力大小相等,作用线相同,指向相反,分别作用在这两个物体上。

作用力与反作用力是互相依存、同时出现、共同消失的,它们分别作用在不同物体上。因此,在分析物体受力时,必须明确施力物体和受力物体。这与同一刚体上作用有两个力的平衡条件问题完全不同,不能把作用力和反作用力视为一组平衡力。

§ 1-2 约束与约束反力

凡可以在空间作任意运动的物体称为自由体,如在空中飞行的飞机、火箭等。凡因受到周围物体的阻碍、限制而不能作任意运动的物体称为非自由体,如工程 and 实际生活中的大多数物体。所谓约束,就是阻碍物体某些位移的限制条件,这种限制条件是由与被限制的物体相联系的其它物体构成的。例如,书放在光滑的桌面上,桌面就是书的约束,又称为约束体,它阻碍了书沿铅直方向向下运动。约束对物体的作用实质上就是力的作用。约束作用在物体上的力称为约束反力或约束力,也简称为反力。除约束反力外,物体上受到的各种荷载如重力、风力、切削力……,它们是促使物体运动或有运动趋势的力,称为主动力。

下面介绍工程中常见的几种约束类型和确定约束反力的方法。

一、柔索约束

工程实际中的胶带、钢丝绳、链条等柔体都属于这一类约束,如图1-7a所示。由于柔软的绳索本身只能承受拉力,如图1-7b,所以它给物体的约束反力也只能是拉力,如图1-7c。因此,柔索对物体的约束反力,作用在接触点,方向沿着柔索背离物体。通常用 T 或 S 表示这类约束反力。

链条或皮带也都只能承受拉力,当它们绕过轮子时,约束反力沿轮缘的切线方向,如图1-8所示。

二、光滑接触面约束

当两物体接触时,若接触面是光滑的,即它们间的摩擦可以忽略时,则物体可以沿着接触面或离开接触面运动,但不能沿着接触面在接触点处的公法线朝向接触面运动,所以光滑接触面约束的约束反力通过接触点,沿接触面在接触点处的公法线,并指向物体,这种约束反力又称为法向反力,常用字母 N 表示。如图1-9所示的固定面给球 O 的约束反力 N_A ,图1-10所示的直杆在接触处 A, B 两点所受的约束反力 N_A 和 N_B 。

三、光滑圆柱形铰链约束

圆柱铰链是工程结构和机器中经常

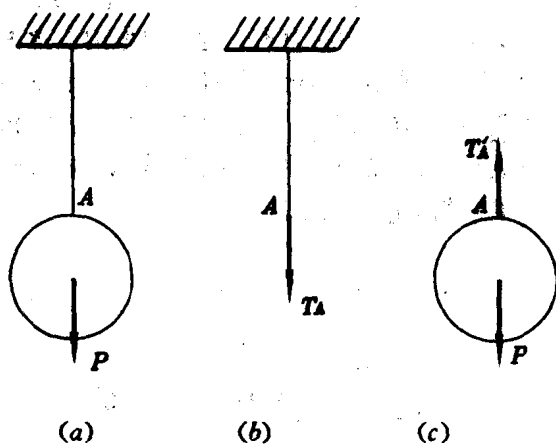


图1-7

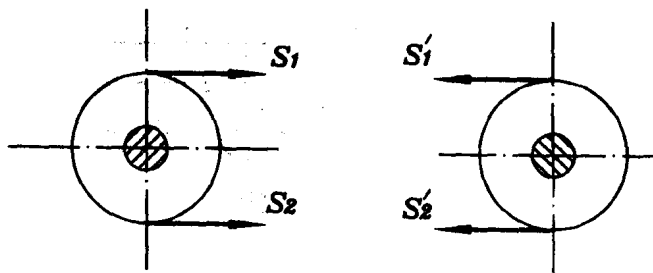


图1-8

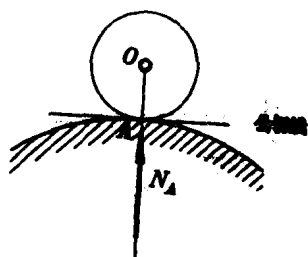


图1-9

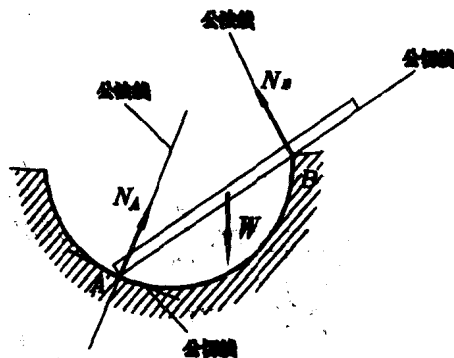


图1-10

用来连接构件或零、部件的一种结构形式,它的构造是将两个构件(或零件)钻上同样大小的圆孔,并用圆柱销钉穿入圆孔将两个构件(或零件)连接起来,其结构如图1-11a、b。如果销钉和圆孔是光滑的,那么销钉只能阻碍两构件在垂直于销钉轴线的平面内的相对移动,而不能阻碍两构件绕销钉轴线的相对转动,具有这种构造和特点的约束称为圆柱铰链,图1-11c是

图1-11b的简化图形。

由图1-11d可见,销钉与构件实际上是以两个光滑圆柱面相接触,因此,这种约束的约束反力应作用在圆孔上与销钉接触的任意一条母线上的一点 D ,垂直于销钉轴线,且通过圆孔中心 C ,如图1-11d中的力 R_c 。但因母线的位置决定于构件上所受的其它力,点 D 一般不能预先确定,所以力 R_c 的方向也不能确定。可见铰链的约束反力作用在垂直于销钉轴线的平面内,通过圆孔中心,方向待定。在受力分析中,铰链的约束反力通常用两个正交的垂直于销钉轴线且通过圆孔中心 C 的分力 X_c 和 Y_c 来表示,如图1-11e或f所示。两分力的指向可任意假定,由计算结果来判定假设的正确性。

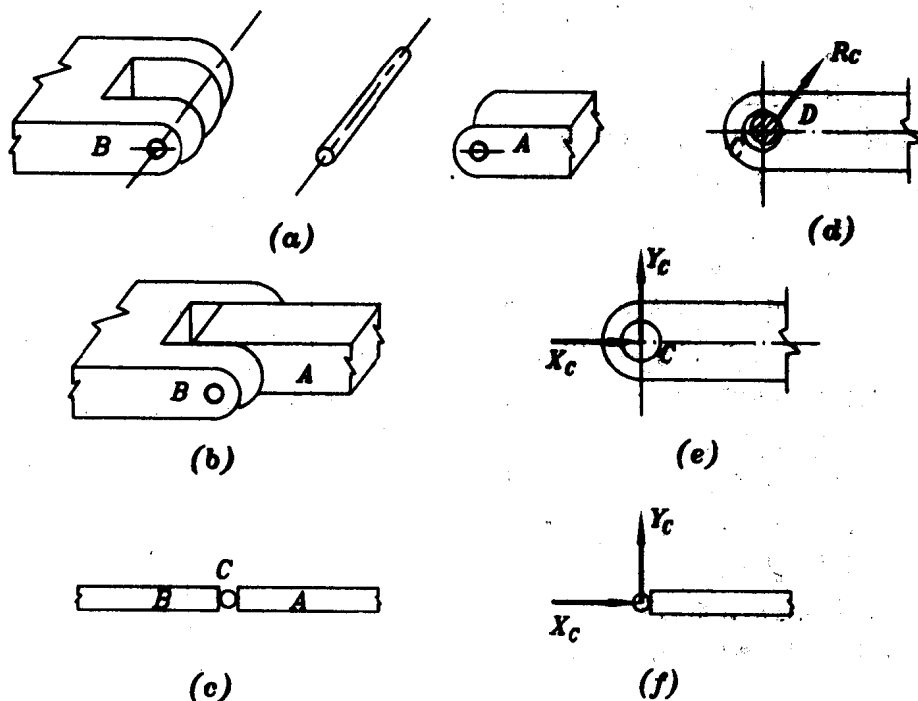


图1-11

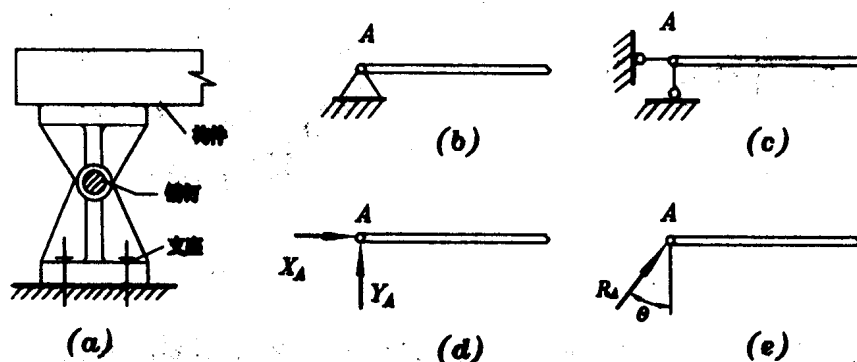


图1-12