



中等职业教育课程改革国家规划新教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

主编 王建勋



机械基础

J I X I E J I C H U

(多学时)



北京出版集团公司
北 京 出 版 社

机械基础(多学时)

主编 王建勋

北京出版集团公司
北 京 出 版 社

图书在版编目 (CIP) 数据

机械基础: 多学时 / 王建勋主编. -- 北京: 北京出版社, 2010.5 (2020 重印)
ISBN 978-7-200-08250-0

I. ①机… II. ①王… III. ①机械学—专业学校—教材 IV. ①TH11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 085746 号

机械基础 (多学时)

JIXIE JICHU (DUOXUESHI)

主 编: 王建勋
出 版: 北京出版集团公司
北 京 出 版 社
地 址: 北京北三环中路 6 号
邮 编: 100120
网 址: www.bph.com.cn
总发行: 北京出版集团公司
经 销: 新华书店
印 刷: 定州市新华印刷有限公司
版 次: 2010 年 5 月第 1 版 2018 年 1 月修订 2021 年 10 月第 8 次印刷
开 本: 787 毫米 × 1092 毫米 1/16
印 张: 15
字 数: 347 千字
书 号: ISBN 978-7-200-08250-0
定 价: 35.00 元

质量监督电话: 010-82685218 010-58572162 010-58572393

绪论	1
第 1 节 机械发展的历史回顾	1
第 2 节 机器的组成	2
第 3 节 机械零件的承载能力与强度	4
第 4 节 机械零件材料与结构工艺性	6
第 5 节 摩擦、磨损及润滑概述	6
第 6 节 课程的性质、任务及学习要求	9
模块 1 工程力学基础	11
第 1 章 构件的静力分析	11
第 1 节 力学基本概念	12
第 2 节 平面汇交力系	17
第 3 节 力矩和力偶	20
第 4 节 平面一般力系	23
小结	25
思考与练习题	26
第 2 章 构件的承载能力分析	27
第 1 节 直杆轴向拉伸与压缩	28
第 2 节 剪切与挤压	34
第 3 节 圆轴扭转	35
第 4 节 直梁弯曲	37
* 第 5 节 组合变形	40
* 第 6 节 交变应力和疲劳强度	41
* 第 7 节 压杆稳定	42
小结	44
思考与练习题	44

模块 2 机械工程材料	45
第 3 章 金属材料与非金属材料	45
第 1 节 金属材料	46
* 第 2 节 非金属材料	57
* 第 3 节 新型工程材料	59
第 4 节 机械工程材料选用	60
小结	62
思考与练习题	62
模块 3 支承零部件与连接	63
第 4 章 支承零部件	63
第 1 节 轴	64
第 2 节 轴承	70
小结	78
思考与练习题	78
实习训练 1 正确安装、拆卸滚动轴承	79
第 5 章 连接	81
第 1 节 螺纹连接	82
第 2 节 键连接与销连接	89
第 3 节 联轴器与离合器	93
* 第 4 节 弹簧	98
小结	100
思考与练习题	100
实习训练 2 螺纹连接拆装	101
实习训练 3 联轴器的安装与找正	103
第 6 章 机械的节能环保与安全防护	105
第 1 节 机械润滑与密封	105
第 2 节 机械环保与安全防护	111
小结	115
思考与练习题	115
第 7 章 机械零件的精度与测量	116
第 1 节 极限、配合与表面粗糙度	117
* 第 2 节 测量工具和测量仪器	124

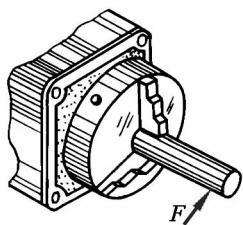
小结	130
思考和练习题	130
实习训练 4 零件测量	131
模块 4 常用机构	133
第 8 章 平面机构的组成	133
第 1 节 平面机构的组成	133
* 第 2 节 机构运动简图	135
小结	136
思考与练习题	136
第 9 章 平面连杆机构	137
第 1 节 平面连杆机构简介	137
第 2 节 铰链四杆机构的组成、类型与应用	138
第 3 节 平面四杆机构的特殊形式	141
第 4 节 铰链四杆机构类型的判断及特性	143
小结	146
思考与练习题	146
第 10 章 其他常用机构	147
第 1 节 凸轮机构	148
* 第 2 节 间歇机构	154
小结	158
思考与练习题	158
实习训练 5 机构的结构及特性分析	159
模块 5 常用机械传动	161
第 11 章 带传动和链传动	161
第 1 节 带传动	162
第 2 节 链传动	169
小结	172
思考与练习题	172
实习训练 6 V 带传动的安装与调试	173
第 12 章 齿轮传动和蜗杆传动	176
第 1 节 齿轮传动	177

第 2 节 蜗杆传动	188
小结	192
思考与练习题	192
第 13 章 轮系与减速器	193
第 1 节 轮系	194
第 2 节 减速器	199
小结	201
思考与练习题	201
实习训练 7 减速器的拆装和结构分析	202
模块 6 液压与气压传动	204
第 14 章 液压传动基础	204
第 1 节 液压传动的基本概念	204
第 2 节 液压元件	208
第 3 节 液压基本回路及实例分析	216
小结	221
思考与练习题	221
第 15 章 气压传动基础	222
第 1 节 气压传动的基本知识	223
* 第 2 节 气压基本回路及实例分析	225
小结	227
思考与练习题	227
实习训练 8 传动回路的搭建	228
参考文献	230

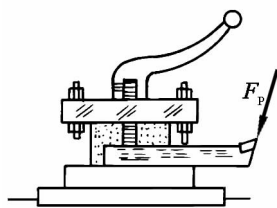
模块1

工程力学基础

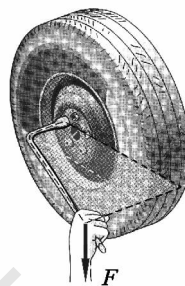
第1章 构件的静力分析



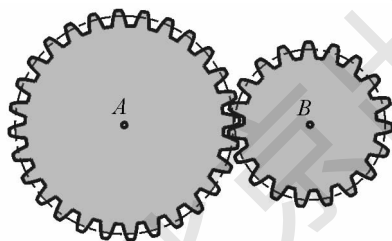
工件夹紧



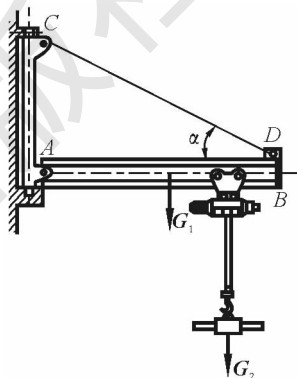
刀具装夹



装拆轮胎



齿轮传动



悬臂式吊车



在工程实践中,什么地方用到力的相关知识?

学习目标

1. 理解力的概念与基本性质。
2. 了解力矩、力偶、力向一点平移的结果。
3. 了解约束、约束力和力系,能作杆件的受力图。
- * 4. 会分析平面力系,会建立平衡方程并计算未知力。



第1节 力学基本概念

1.1 力的概念

1.1.1 力的定义

力是物体间的相互作用,这种作用使物体的运动状态发生变化或使物体发生变形。

1. 力的外效应

力使物体的运动状态发生改变的效应称为**力的外效应**。例如:人搬运物体时,人与物体之间产生相互作用。

2. 力的内效应

力使物体的形状尺寸发生改变的效应,称为**力的内效应**。例如:用气锤锻打工件时,气锤与工件之间产生相互作用,工件产生变形。

1.1.2 力的三要素

力对物体(或构件)的效应取决于力的大小、方向和作用点,它们称为**力的三要素**。

1.1.3 力的表示方法及单位

力是一个既有大小又有方向的物理量,又称为力矢量,可用一条有向线段表示,线段的长度(按一定比例尺)表示力的大小;线段的箭头表示力的方向;线段的起始点(或终点)表示力的作用点。力的表示方法如图 1-1 所示。力的国际单位为牛顿(N)。

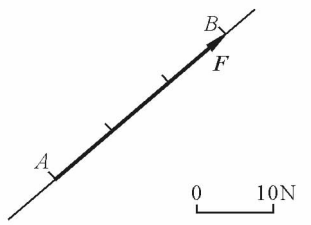


图 1-1 力的表示方法

1.1.4 刚体的概念

刚体是指在外力作用下大小和形状保持不变的物体。这是一个理想化的力学模型,事

实上是不存在的。实际物体在力的作用下,都会产生程度不同的变形。但微小变形对所研究物体的平衡问题不起主要作用,可忽略不计,这样可以使问题的研究大为简化。

静力学中研究的物体均可视为刚体。

1.2 力学的基本定理

1.2.1 二力平衡定理

作用在构件上的两个力,使构件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,且作用在同一条直线上。如图 1-2 所示,物体放置在水平地面上,受到重力 G 和水平面的支承力 F_N 的作用处于平衡状态,这两个力必等值、反向、共线。

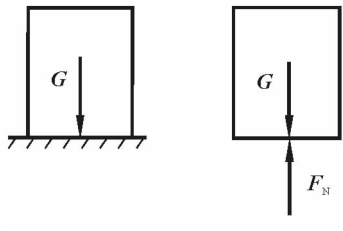


图 1-2 二力平衡

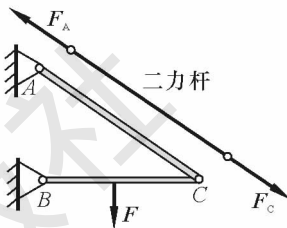


图 1-3 托架受力示意图

不考虑构件自重,凡只受二力的作用而保持平衡的构件称为二力构件,简称二力杆。

根据二力平衡定理可知,二力构件上的两个力的作用线必沿二力作用点的连线,且等值、反向。如图 1-3 所示,杆 AC 自重不计,为二力杆,则 A、C 两点所受力 F_A 、 F_C 必定在二力作用点的连线 AC 上。

1.2.2 平衡力系定理(力的可传性原理)

作用在刚体上某点的力,可沿其作用线任意移动其作用点而保持它原来对刚体的作用效果。如图 1-4 所示的小车,在 A 点作用力 F 和在 B 点作用力 F 对小车的作用效果是相同的。

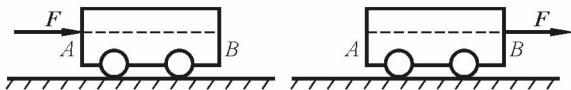


图 1-4 力的可传性

1.2.3 力的平行四边形法则

作用在构件上同一点的两个力,可以合成一个合力,此合力也作用在该点,其大小和方向由这两力为边构成的平行四边形的对角线确定。如图 1-5 所示, F_1 、 F_2 为作用于同一点 A 的两个力。以这两个力为邻边作出平行四边形,则从 O 点作出的对角线就是 F_1 与 F_2



的合力 F_R 即 $F_R = F_1 + F_2$ 。

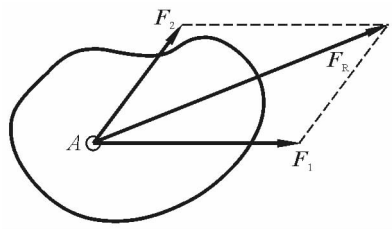


图 1-5 力的平行四边形法则

1.2.4 作用与反作用定理(牛顿第三定理)

两物体间相互作用的力总是同时存在的,且两力大小相等、方向相反、沿同一条直线,分别作用于两个不同的物体上,这两个力分别称为作用力与反作用力,如图 1-6 所示。

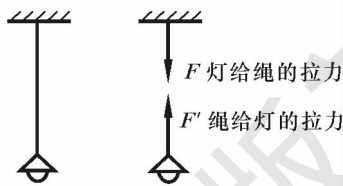


图 1-6 作用力与反作用力

1.3 约束和约束力

1.3.1 自由体与非自由体

1. 自由体

能在空间任意运动不受任何限制的物体称为自由体,如空间飞行的飞机、炮弹和火箭等。

2. 非自由体

在空间的运动受到某些限制的物体称为非自由体,如机车、机床的刀具等。

1.3.2 约束与约束力

1. 约束

限制物体运动的周围物体称为约束物,简称约束。例如:绳索是所吊重物的约束、轴承是轴的约束、机床夹具是工件的约束等。约束是通过力的作用来限制被约束物体的运动的。如图 1-6 所示的绳作用于灯的拉力 F' ,限制了灯向下的运动。

2. 约束力

约束作用于被约束物体的力,称为约束力。约束力的方向与该约束所能限制的运动方向相反;作用点是约束与非自由体的接触点;其大小总是未知的,在静力学中可以利用相关平衡条件求出。

1.3.3 常见的约束类型

1. 柔性约束

由柔软的绳索、链条或皮带等构成的约束称为**柔性约束**。其约束力为拉力,作用在接触点,方向背离受力物体,用符号 F_T 表示,如图 1-7 所示。

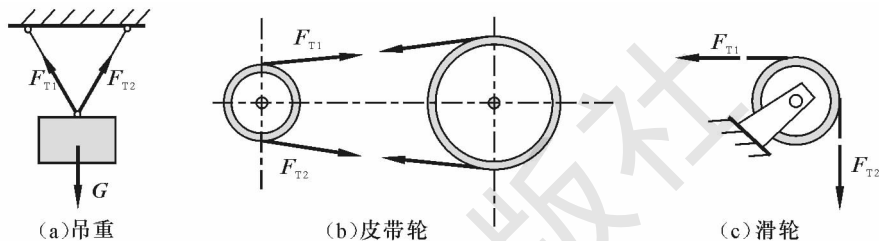


图 1-7 柔性约束

2. 光滑接触面约束

当两构件的接触表面非常光滑,摩擦可忽略不计时,可把构件的接触面视为完全光滑的刚性接触面,称为**光滑接触面约束**。光滑接触面约束的约束力作用在接触点,方向沿接触表面的公法线并指向受力物体,用符号 F_N 表示,如图 1-8 所示。

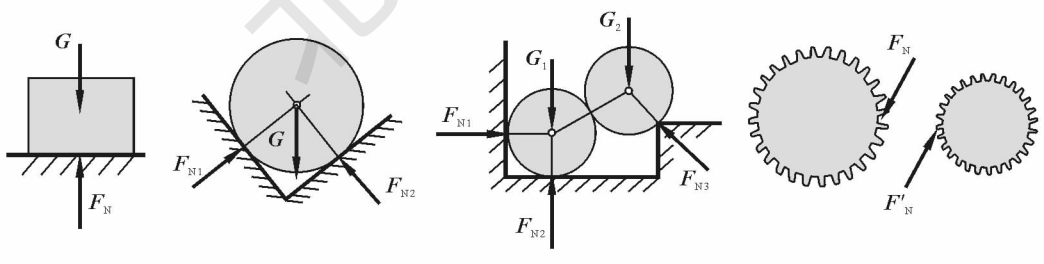


图 1-8 光滑接触面约束

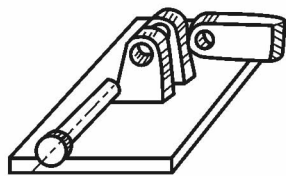
3. 光滑圆柱铰链约束

(1) 固定铰链和中间铰链

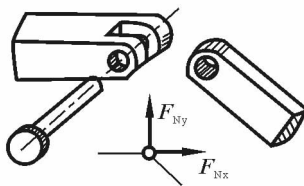
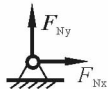
两构件采用圆柱销所形成的连接,并忽略接触处的摩擦,这类约束就称为光滑圆柱铰链约束。若圆柱销连接的两构件中有一个构件固定,称为**固定铰链**,如图 1-9(a) 所示。若圆柱销连接的两构件均不固定,称为**中间铰链**,如图 1-9(b) 所示。中间铰链和固定铰链的



约束力沿圆柱面接触点的公法线通过圆柱销的中心,方向不能确定。通常用两个正交分量 F_{Nx} 、 F_{Ny} 来表示。



(a) 固定铰链



(b) 中间铰链

图 1-9 固定铰链和中间铰链

(2) 活动铰链

原固定铰链下边不固定,安装上滚珠称为活动铰链,如图 1-10 所示。活动铰链支座的约束力作用线过铰链中心并垂直于支承面,方向不定,常用符号 F_N 表示。

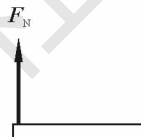
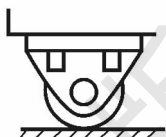
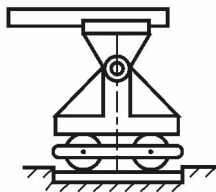


图 1-10 活动铰链

1.4 构件的受力分析

在实际工程中,研究构件的平衡问题,必须对构件物体的受力情况作全面的分析,即构件的受力分析。被确定要具体研究的构件或构件系统称为研究对象。将所研究对象从周围构件中分离出来,解除约束后的自由体构件称为分离体。在分离体上画出全部主动力和约束力,这种表示构件受力情况的简明图形称为受力图。

画受力图的具体步骤如下:

- (1) 明确研究对象,画出分离体。
- (2) 在分离体上画出全部主动力。
- (3) 在分离体上画出全部约束力。
- (4) 检查受力图是否完整正确。

【例 1-1】 如图 1-11(a) 所示,重 G 的球体 A ,用绳子 BC 系在墙壁上。画出球体 A 的受力图。

解: (1) 以球体 A 为研究对象,画出分离体图。

(2) 画出主动力 F_T 和 G 。

(3) 画出全部约束力。球体在 D 点受到竖直面支承力 F_{Nx} 的作用,它垂直于竖直面方向,如图 1-11(b) 所示。

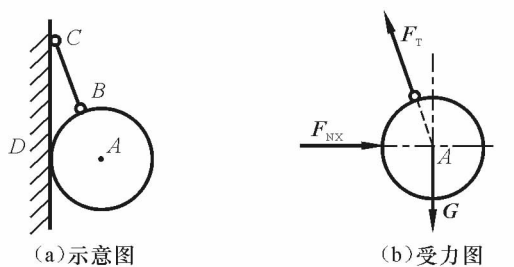


图 1-11 球体的受力图

第 2 节 平面汇交力系

作用在物体上的所有力均作用于同一平面内的力系称为平面力系。各力的作用线都在同一平面内且汇交于一点的力系则称为平面汇交力系。

2.1 平面汇交力系的合成

2.1.1 平面汇交力系合成的几何法

设有 F_1 与 F_2 两力作用于某刚体上的 A 点, 则由平行四边形法则, 以两力为边作平行四边形, 其对角线即为它们的合力 F_R , 记作 $F_R = F_1 + F_2$, 如图 1-12(a) 所示。为简便作图可省略 AD 与 DC, 直接将 F_2 连在 F_1 的末端, 通过 $\triangle ABC$ 即可求得合力 F_R , 如图 1-12(b) 所示。此法称为力的三角形法则。

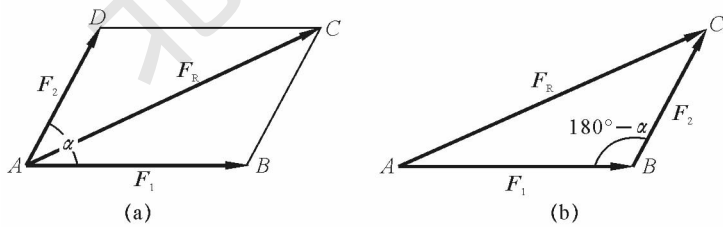


图 1-12 力的三角形法则

2.1.2 平面汇交力系的解析法

解析法是平面汇交力系合成的常用方法, 即以力在坐标轴上的投影来确定合力的大小和方向。

过力 F 的两端点向 x 轴作垂线, 垂足 a, b 在轴上截下的线段 ab 就称为力 F 在 x 轴上的投影, 记作 F_x ; 同样, 力 F 在 y 轴上的投影为 $a_1 b_1$, 记作 F_y , 如图 1-13 所示。

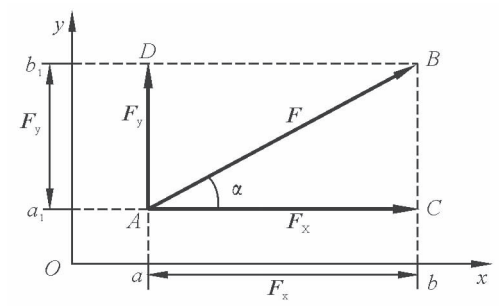


图 1-13 力在坐标轴上的投影

投影的正负规定:投影是代数量,若投影的指向与坐标轴正方向一致,则投影为正,反之为负。如图 1-13 所示的 F_x 、 F_y 均为正值。

设已知力 F 的大小以及力 F 与 x 轴的夹角 α ,则力 F 在坐标轴上的投影大小为

$$\begin{cases} F_x = F \cos \alpha \\ F_y = F \sin \alpha \end{cases} \quad (1-1)$$

若已知力 F 在直角坐标轴上的投影 F_x 、 F_y ,则该力的大小和方向为

$$\begin{cases} F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \\ \alpha = \arctan \left| \frac{F_y}{F_x} \right| \end{cases} \quad (1-2)$$

2.2 平面汇交力系的平衡条件

2.2.1 平面汇交力系合成解析法

合力投影定理:合力在某一轴的投影,等于各分力在同一轴上投影的代数和。

若刚体上 n 个力 $F_1, F_2, F_3, \dots, F_n$ 组成平面汇交力系,则各力在坐标轴上的投影为

$$\begin{cases} F_{Rx} = F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} = \sum_{i=1}^n F_{ix} \\ F_{Ry} = F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} = \sum_{i=1}^n F_{iy} \end{cases} \quad (1-3)$$

合力的大小和方向分别为

$$\begin{cases} F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2} \\ \alpha = \arctan \left| \frac{F_{Ry}}{F_{Rx}} \right| \end{cases} \quad (1-4)$$

式中: α —合力 F_R 与 x 轴所夹锐角。

* 2.2.2 平面汇交力系的平衡条件

要使构件处于平衡状态,需满足构件所受合力为零。即

$$F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2} = 0$$

亦即

$$\begin{cases} F_{Rx} = 0 \\ F_{Ry} = 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

平面汇交力系平衡的必要与充分条件:力系中各力在力系所在平面内两个相交轴上投影的代数和同时为零。式(1-5)称为平面汇交力系的平衡方程。

2.2.3 应用举例

【例 1-2】 如图 1-14(a) 所示,重量为 $G = 10 \text{ N}$ 的重物,放置在倾角为 $\alpha = 30^\circ$ 的光滑斜面上,试求保持重物平衡时需沿斜面方向所加的力 F 和斜面对重物的支承力 F_N 。

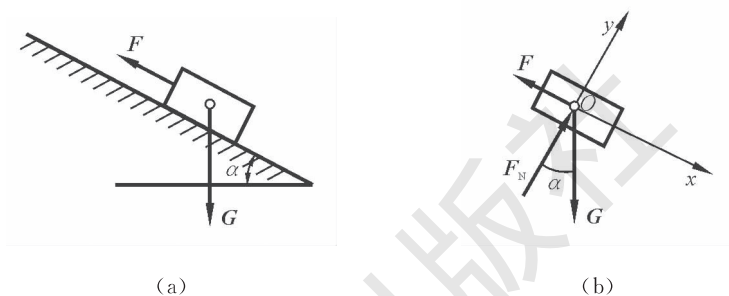


图 1-14

解: (1) 以重物为研究对象,画出受力图。重物受到重力 G 、拉力 F 和斜面对重物的支承力 F_N 的作用,其受力图如图 1-14(b) 所示。

(2) 取坐标系 xOy ,列平衡方程

$$F_{Rx} = 0: \quad G \sin \alpha - F = 0$$

$$F_{Ry} = 0: \quad F_N - G \cos \alpha = 0$$

$$\text{即} \quad \begin{aligned} 10 \sin 30^\circ - F &= 0 \\ F_N - 10 \cos 30^\circ &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{解得} \quad F = 10 \sin 30^\circ = 10 \times \frac{1}{2} \text{ N} = 5 \text{ N}$$

$$F_N = 10 \cos 30^\circ = 10 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ N} = 8.7 \text{ N}$$

重物对斜面的压力大小 $F'_N = F_N = 8.7 \text{ N}$,方向与 F_N 相反。

因此,保持重物平衡时需沿斜面方向所加的力为 5 N ,斜面对重物的支承力为 8.7 N 。



第3节 力矩和力偶

3.1 力矩和合力矩定理

3.1.1 力矩

为了描述力对刚体运动的转动效应,引入力对点之矩的概念。以扳手拧紧螺母为例,如图 1-15 所示,设螺母能绕点 O 转动,力 F 使物体绕 O 点转动效应的物理量称为力 F 对 O 点的矩,简称力矩,用符号 $M_O(F)$ 表示,即

$$M_O(F) = \pm Fd \quad (1-6)$$

其中,点 O 称为力矩中心,简称矩心;点 O 到力 F 作用线的垂直距离称为力臂。

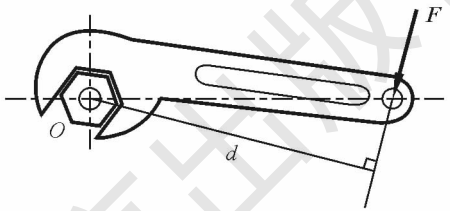


图 1-15 扳手的力矩

通常规定:力使物体绕矩心逆时针方向转动时,力矩为正;反之为负。力矩的单位是牛·米($N \cdot m$)。

由力矩的定义可知:

(1) 若将力 F 沿其作用线移动,则因为力的大小、方向和力臂都没有改变,所以不会改变该力对某一矩心的力矩。

(2) 力的大小等于零或其作用线通过矩心时,力矩等于零。

3.1.2 合力矩定理

合力矩定理:平面汇交力系的合力对平面内任意一点之矩,等于其所有各分力对同一点力矩的代数和。即

$$M_O(F_R) = M_O(F_1) + M_O(F_2) + \cdots + M_O(F_n) = \sum_{i=1}^n M_O(F_i) \quad (1-7)$$

式中: F_R — $F_1, F_2, \dots, F_n$ 的合力。

3.2 力偶及其基本性质

3.2.1 力偶和力偶矩

在日常生活和工程实际中经常见到物体受到两个大小相等、方向相反,但不在同一直线上的两个平行力作用的情况。例如:司机驾驶汽车时两手作用在方向盘上的力(图 1-16(a));工人用丝锥攻螺纹时两手加在铰杠上的力(图 1-16(b));用两个手指拧动水龙头所加的力(图 1-16(c))等。在力学中把这样一对等值、反向不共线的平行力称为**力偶**,用符号 (F, F') 表示。两个力作用线之间的垂直距离称为**力偶臂**,两个力作用线所决定的平面称为**力偶的作用面**(图 1-16(d))。

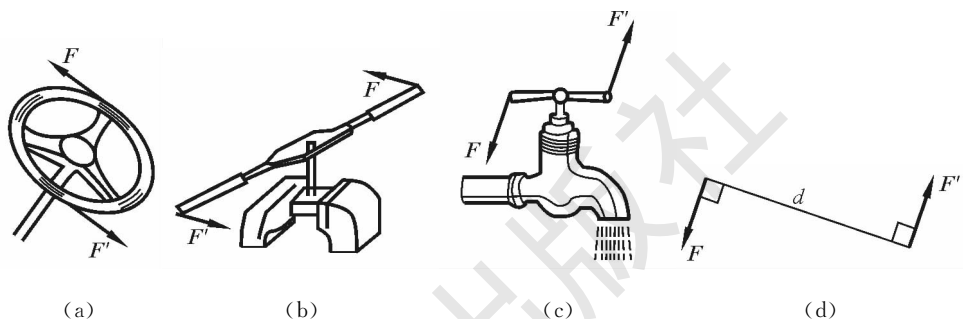


图 1-16 力偶和力偶矩

在平面问题中,以力与力偶臂的乘积作为量度在其作用面内对物体转动效应的物理量,称为**力偶矩**,用符号 $M(F, F')$ 或 M 表示,如图 1-16(d)所示。即

$$M(F, F') = \pm Fd \quad (1-8)$$

通常规定:力偶使物体逆时针方向转动时,力偶矩为正;反之为负。在国际单位制中,力偶矩的单位是牛顿·米($N \cdot m$)。

力偶的三要素——力偶矩的大小、力偶的转向和力偶的作用平面。

3.2.2 力偶的性质

- (1) 力偶对其作用平面内任意点取矩恒等于力偶矩本身,不因矩心的改变而改变。
- (2) 力偶没有合力,在任意坐标轴上的投影和等于零。力偶只能由力偶来平衡。
- (3) 力偶的等效性。作用在同一平面的两个力偶,若它们的力偶矩大小相等、转向相同,则这两个力偶是等效的,可以相互替换。

根据力偶的等效性,可得出下面两个推论:

推论 1 力偶可在其作用面内任意移动和转动,而不会改变它对物体的作用效应。

推论 2 只要保持力偶矩不变,可同时改变力偶中力的大小和力偶臂的长短,而不会改变它对物体的作用效应。



3.3 平面力偶系的合成与平衡条件

3.3.1 平面力偶系的合成

作用在刚体同一平面内的各力偶组成平面力偶系。设在刚体的同一平面内有 n 个力偶 $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$ 的作用, 现求其合力偶的力偶矩。根据力偶的性质, 力偶对刚体只产生转动效应, 其合力偶的力偶矩等于各分力偶矩的代数和, 即

$$M = M_1 + M_2 + \dots + M_n = \sum_{i=1}^n M_i \quad (1-9)$$

* 3.3.2 平面力偶系的平衡条件

平面力偶系平衡的充分必要条件: 平面力偶系中所有各力偶的力偶矩的代数和等于零。即

$$\sum M_i = 0 \quad (1-10)$$

【例 1-3】 如图 1-17 所示, 电动机轴通过联轴器与工作轴相连, 联轴器上 4 个螺栓 A、B、C、D 的孔心均匀地分布在同一圆周上, 此圆的直径 $d = 150 \text{ mm}$, 电动机轴传给联轴器的力偶矩 $M = 2.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 试求每个螺栓所受的力。

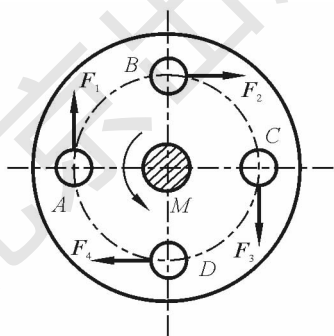


图 1-17

解: 取联轴器为研究对象, 作用于联轴器上有电动机传给联轴器的力偶和每个螺栓的反力, 受力图如图 1-17 所示。设 4 个螺栓的受力均匀, 即 $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F$, 则组成对力偶与电动机传给联轴器的力偶平衡。

$$\text{由 } \sum M = M - F \cdot d - F \cdot d = 0,$$

$$\text{解得 } F = \frac{M}{2d} = \frac{2.5}{2 \times 0.15} \text{ kN} = 8.33 \text{ kN}$$

所以每个螺栓所受的力大小是 8.33 kN , 方向如图所示。

第 4 节 平面一般力系

作用在构件上的各力作用线都在同一平面内,既不相交于一点又不完全平行的力系称为平面一般力系。

4.1 平面一般力系的简化

4.1.1 力的平移定理

力的可传性:作用于刚体上的力可沿其作用线在刚体内移动,而不改变其对刚体的作用效应。

如图 1-18 所示,将作用在刚体上 A 点的力 F 平移到刚体内任意一点 O (图 1-18(a)),则可在 O 点施加一对与力 F 大小相等的平衡力 F' 、 F'' (图 1-18(b)),力 F 与 F'' 为一对大小相等、方向相反、不共线的平行力,组成一个力偶,称为附加力偶,其力偶矩等于原力 F 对 O 点的力矩,即

$$M(F, F'') = \sum M_O(F) = \pm Fd \quad (1-11)$$

上式表示,附加力偶矩等于原力 F 对平移点的力矩。于是,在作用于刚体上平移点的力 F' 和附加力偶 M 的共同作用下,其作用效应就与力 F 作用在 A 点时等效(图 1-18(c))。

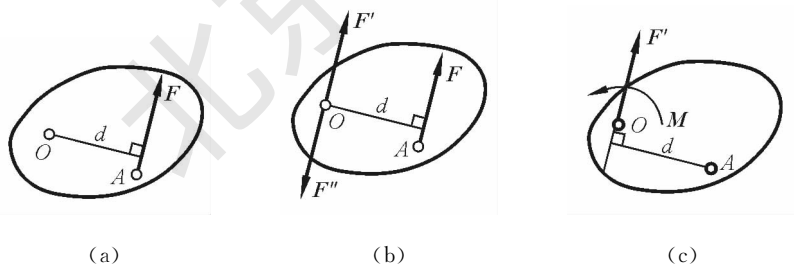


图 1-18 力的平移

力的平移定理:作用于刚体上的力,可平移到刚体上的任意一点,但必须附加一力偶,其附加力偶矩等于原力对平移点的力矩。

4.1.2 平面一般力系的简化

设刚体受到平面任意力系 $F_1, F_2, \dots, F_n$ 的作用,如图 1-19(a) 所示。在力系所在的平面内任取一点 O 作为简化中心。应用力的平移定理,将力系中各力依次平移至 O 点,得到汇交于 O 点的平面汇交力系 $F'_1, F'_2, \dots, F'_n$,此外还应附加相应的力偶,构成附加力偶系 $M_1, M_2, \dots, M_n$,如图 1-19(b) 所示。



平面汇交力系中各力的大小和方向分别与原力系中对应的各力相同,即

$$\mathbf{F}'_1 = \mathbf{F}_1, \mathbf{F}'_2 = \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}'_n = \mathbf{F}_n$$

平移后的力 $\mathbf{F}'_1, \mathbf{F}'_2, \dots, \mathbf{F}'_n$ 组成的平面汇交力系的合力 $\mathbf{F}'_R$ 称为平面一般力系的主矢。主矢 $\mathbf{F}'_R$ 等于原力系各分力的矢量和,其作用线过简化中心 O 点,如图 1-19(c) 所示。

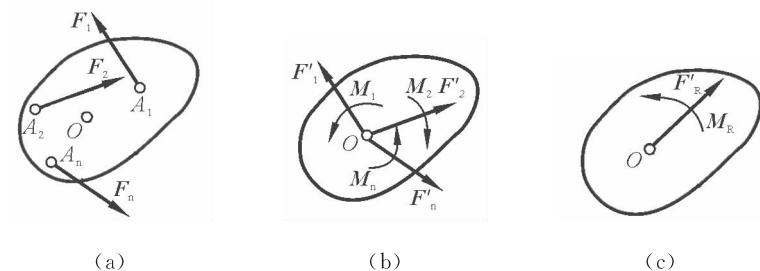


图 1-19 平面一般力系的简化

主矢 $\mathbf{F}'_R$ 的大小及方向分别由下式确定

$$\begin{cases} F'_R = \sqrt{(\sum F'_x)^2 + (\sum F'_y)^2} \\ \alpha = \arctan \frac{|\sum F'_y|}{|\sum F'_x|} \end{cases} \quad (1-12)$$

其中 α 为主矢 $\mathbf{F}'_R$ 与 x 轴正向间所夹的锐角。

由附加力偶 $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \dots, \mathbf{M}_n$ 组成平面力偶系的合力偶矩 $\mathbf{M}_R$ 称为平面一般力系的主矩。根据平面力偶系的合成,主矩 $\mathbf{M}_R$ 等于平面力偶系中各附加力偶矩的代数和,也等于原力系中各分力对简化中心力矩的代数和,作用在力系所在的平面上,如图 1-19(c) 所示,即

$$\mathbf{M}_R = \sum \mathbf{M} = \sum_{i=1}^n \mathbf{M}_O(\mathbf{F}_i) \quad (1-13)$$

由上述分析可得到如下结论:

平面一般力系向作用面内任一点简化,可得一主矢 $\mathbf{F}'_R$ 和一主矩 $\mathbf{M}_R$ 。主矢等于原力系各分力的矢量和,作用在简化中心上。其大小和方向与简化中心的选择无关。主矩等于原力系各分力对简化中心力矩的代数和,其值一般与简化中心的选择有关。

* 4.2 平面一般力系的平衡方程及其应用

4.2.1 平衡条件和平衡方程

当平面一般力系的主矢和主矩都等于零时,作用在简化中心的平面汇交力系是平衡力系,附加的力偶系也是平衡力系,所以该平面一般力系一定是平衡力系。故平面一般力系平衡的充分必要条件是:该力系的主矢和主矩都等于零。即

$$\begin{cases} \mathbf{F}'_R = 0 \\ \mathbf{M}_R = 0 \end{cases} \quad (1-14)$$

由此得到平面一般力系的平衡方程

$$\begin{cases} \sum F_x = 0 \\ \sum F_y = 0 \\ \sum M_O(F) = 0 \end{cases} \quad (1-15)$$

4.2.2 平衡方程的应用

【例 1-4】 如图 1-20(a) 所示,已知小球的重力 $G = 100 \text{ N}$,求斜面和绳子的约束力。

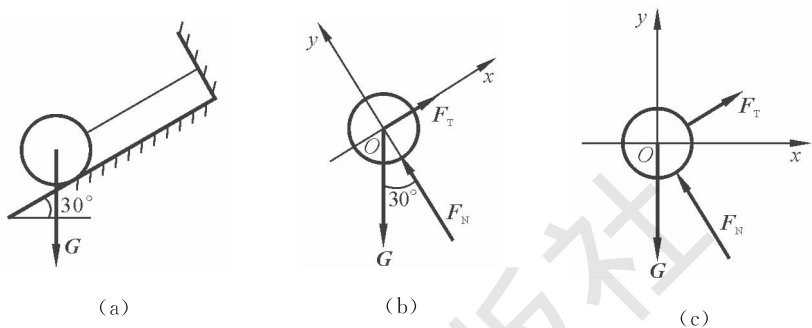


图 1-20

解:(1) 取小球为研究对象,画受力图,并建立坐标系,如图 1-20(b) 所示。

(2) 列平衡方程

$$\begin{cases} \sum F_x = 0: & F_T - G \sin 30^\circ = 0 \\ \sum F_y = 0: & F_N - G \cos 30^\circ = 0 \end{cases}$$

解得

$$\begin{cases} F_T = 100 \sin 30^\circ \text{ N} = 100 \times \frac{1}{2} \text{ N} = 50 \text{ N} \\ F_N = 100 \cos 30^\circ \text{ N} = 100 \times \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ N} = 86.6 \text{ N} \end{cases}$$

思考:若坐标系按如图 1-20(c) 所示建立,平衡方程该如何写?

小 结

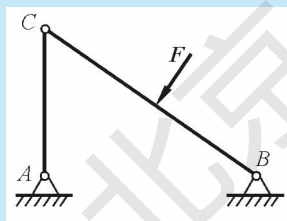
本章主要学习了静力学的有关内容,包括:

1. 力的概念与基本性质。
2. 力矩、力偶、力向一点平移的结果、约束、约束力和力系。
3. 平面汇交力系合成与平衡的几何条件。
4. 作杆件的受力图,分析平面力系,建立平衡方程并计算未知力。

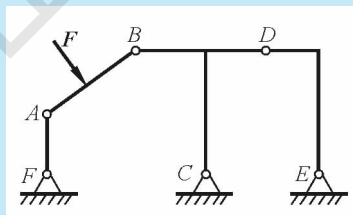


思考与练习题

1. 力使构件的运动状态发生变化称为_____；力使构件的形状发生变化称为_____。
2. 在外力作用下不发生变形的构件称为_____。
3. 力偶对物体只产生_____效应；力偶的三要素是_____、_____和_____。
4. 力偶无合力,在任意坐标轴上的投影和为_____,力偶只能用_____来平衡。
5. 在一个平面内的两力偶,若它们的力偶矩大小相等、转向相同,则两力偶_____。
6. 平面一般力系向作用面内任一点简化,可得一主矢 F'_R 和一主矩 M_R 。主矢的大小和方向与简化中心位置_____,主矩一般与简化中心的位置_____。
7. 同一个力在两个互相平行的轴上的投影有何关系?如果两个力在同一轴上的投影相等,问这两个力的大小是否一定相等?
8. 平面汇交力系在任意两根轴上的投影的代数和分别等于零,则力系必平衡,对吗?为什么?
9. 什么是二力构件?指出如图所示各结构中哪些构件是二力构件?分析其受力的方向能否确定?



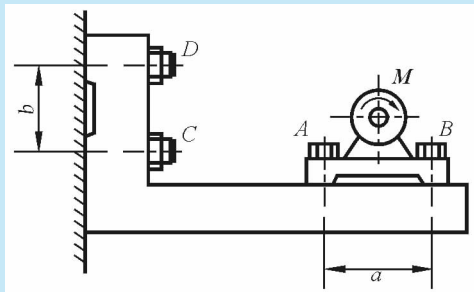
(a)



(b)

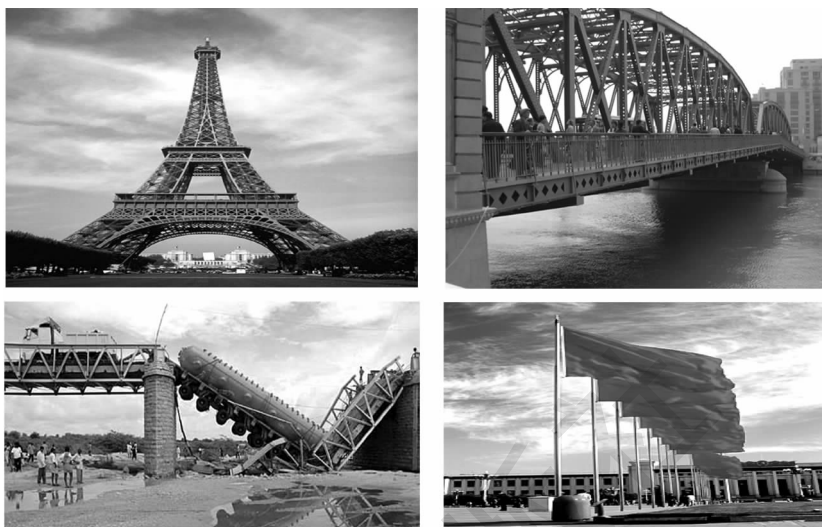
题 9 图

10. 如图所示,电动机用螺栓 A、B 固定在角架上,自重不计。角架用螺栓 C、D 固定在墙上。若 $M = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}$, $a = 0.3 \text{ m}$, $b = 0.6 \text{ m}$,求螺栓 A、B、C、D 所受的力。



题 10 图

第 2 章 构件的承载能力分析



1. 为什么有些建筑物很坚固, 而有些则会倒塌呢?
2. 为什么要把旗杆做成空心的?



学习目标

1. 理解直杆轴向拉伸与压缩的概念。
2. 了解内力、应力、变形、应变的概念。
- * 3. 会应用截面法, 会分析直杆轴向拉伸与压缩时的内力。
4. 了解材料的力学性能及其应用。
- * 5. 了解直杆轴向拉伸和压缩时的强度计算。
6. 理解连接件的剪切与挤压的概念、会判断连接件的受剪面与受挤面。
7. 理解圆轴扭转的概念, * 了解圆轴扭转时横截面上切应力的分布规律。
8. 理解直梁弯曲的概念, * 了解纯弯曲时横截面上正应力的分布规律。
9. 了解组合变形、交变应力与疲劳强度、压杆稳定的概念。



第1节 直杆轴向拉伸与压缩

1.1 直杆轴向拉伸与压缩的概念

在工程中有很多杆件受到拉伸或压缩的作用,虽然杆件的外形各有差异,受力方式也不同,但一般对受轴向拉伸与压缩杆件的形状和受力情况进行简化。轴向拉伸是在轴向力作用下,杆件产生伸长变形,也简称拉伸;轴向压缩是在轴向力作用下,杆件产生缩短变形,也简称压缩。如图 2-1(a) 所示的三脚架 ABC, AB 杆受拉伸, BC 杆受压缩,如图 2-1(b) 所示。又如图 2-2 所示桁架中的杆件,分别受拉力和压力作用而产生拉伸或压缩变形。

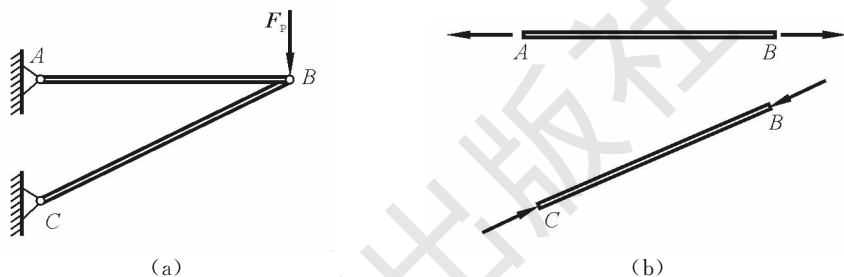


图 2-1 三脚架受力简图

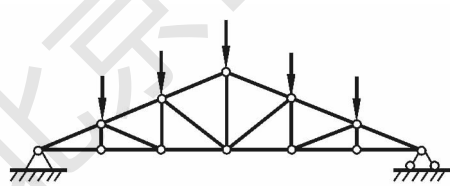


图 2-2 桁架杆件受力图

这些受力杆件的共同特点是:杆件是直杆;外力(或外力合力)的作用线沿杆件轴线。这种情况下,杆件的主要变形为轴向伸长或缩短。如图 2-3(a) 所示杆件在外力作用下发生轴向拉伸变形;如图 2-3(b) 所示杆件在外力作用下发生轴向压缩变形。这种变形形式称为轴向拉伸或轴向压缩,这类杆件称为拉杆或压杆。

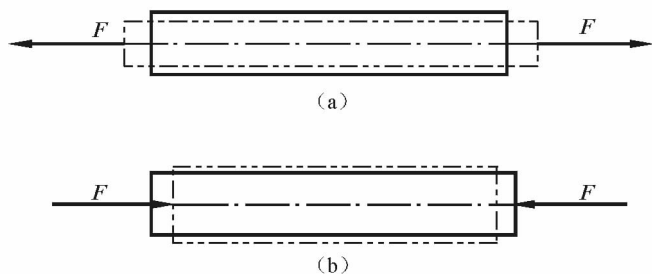


图 2-3 直杆受力简图

※ 1.2 直杆轴向拉伸或压缩计算

杆件在外力作用下将发生变形,与此同时,杆件内部各部分之间将产生相互作用力,此相互作用力称为**内力**。内力随外力的变化而变化,外力去掉后,内力将随之消失。

杆件的强度、刚度等问题均与内力这个因素有关,在分析这些问题时,常常需要知道杆件在外力作用下某一横截面上的内力值。求杆件任一横截面上的内力,通常采用下述的截面法。

1. 截面法求内力

现分析最简单的情况,设一等直杆在两端轴向拉力 F 的作用下保持平衡,如图 2-4(a) 所示。为求杆件横截面 $m-m$ 上的内力,可以假想有一平面沿横截面 $m-m$ 将杆件截分为 I、II 两部分,任取其中一部分(如部分 I)作为分离体来分析,而另一部分(如部分 II)对第一部分(如部分 I)的作用可用截开横截面上的内力来代替。由于杆件是连续体,内力在横截面上的分布也是连续的,通常将横截面上的分布内力用位于截面形心处的合力 F_N 来代替。 F_N 即为横截面 $m-m$ 上的内力,如图 2-4(b) 所示。

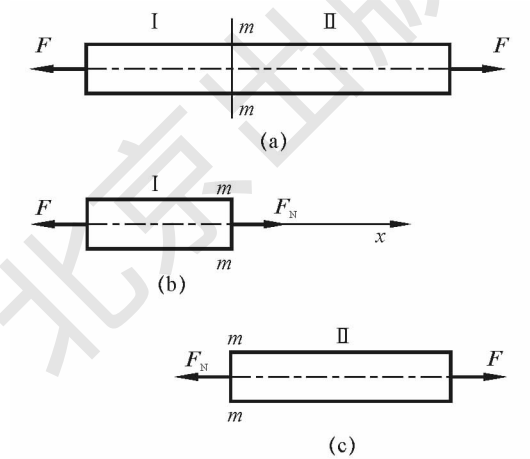


图 2-4 受拉直杆的内力

需要说明的是,如果变形体在外力作用下保持平衡,则从其上截取的任一部分也是平衡的。这个任一部分可以是截开的两部分中的任一部分,也可以是无限接近的两个截面所截出的一微段,还可以是围绕某一点截取的微元或微元的局部等。

因此,如图 2-4(b) 所示的第 I 部分也应该是保持平衡的。由平衡方程得

$$\sum F_x = 0, F_N - F = 0$$

即

$$F_N = F \quad (2-1)$$

其中, F_N 为杆件任一横截面 $m-m$ 上的内力,其作用线与杆的轴线重合,这种内力称



为轴力,并规定用符号 F_N 来表示。

同样的,如果保留第 II 部分来考虑,也可根据平衡方程计算出 $m-m$ 横截面上的轴力。其实根据作用力与反作用力的原理可知,部分 II 横截面上的轴力应与部分 I 横截面上的轴力大小相等、方向相反,如图 2-4(c) 所示。

为了区分拉伸与压缩,对轴力的正负号作如下规定:引起纵向伸长变形的轴力为正,称为拉力(F_N 指向其所在截面的外法线方向),引起纵向缩短变形的轴力为负,称为压力(F_N 指向其所在的截面)。

上述分析轴力的方法称为截面法,用截面法求内力的方法可归纳如下:

- (1) 截:在需要计算内力的横截面处,用一假想的平面将杆件截开。
- (2) 代:任取其中一部分,将丢弃部分对保留部分的作用以内力来代替,并假设内力为正。
- (3) 平:对保留部分建立平衡方程,计算出内力值。

截面法是求内力最基本的方法。

2. 轴力图

当杆件受到多个轴向外力作用时,在杆的不同横截面上的轴力将各不相同。为了表现横截面上的轴力随横截面位置变化的情况,可用轴力图来表示其变化规律。根据轴力图,便可确定某段是受拉还是受压,以及整个杆件上最大轴力的数值及其所在横截面的位置。用平行于杆轴线的 x 轴坐标表示横截面位置,用垂直于 x 轴的坐标 F_N 表示横截面轴力的大小,按选定的比例,把轴力表示在 $x-F_N$ 坐标系中,描出的轴力随截面位置变化的曲线即为轴力图,如图 2-5 所示。

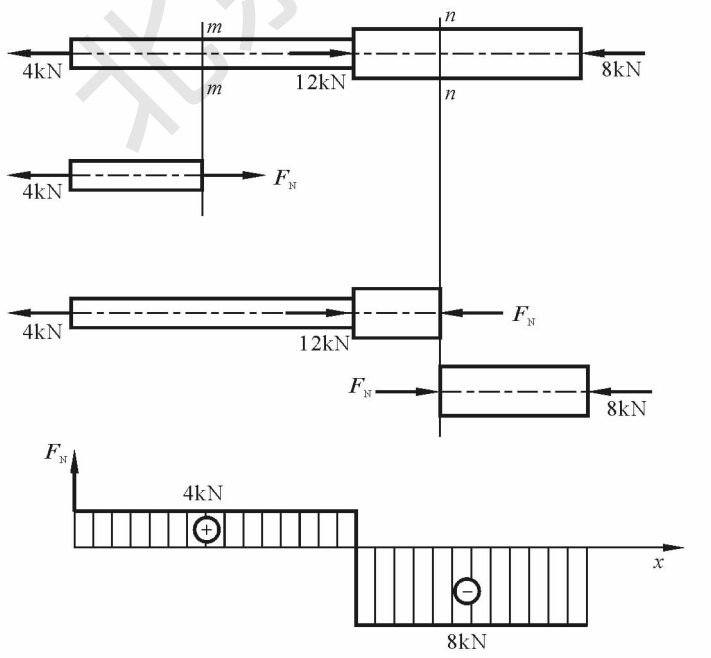


图 2-5 轴力图分析

1.3 材料在拉伸和压缩时的力学性能

材料在外力作用下,其强度和变形方面所表现出来的性能称为材料的力学性能。它是通过试验的方法测定的,是进行强度、刚度计算和选择材料的重要依据。

工程材料的种类根据其性能可分为塑性材料和脆性材料两大类。低碳钢和铸铁是这两类材料的典型代表,它们在拉伸和压缩时表现出来的力学性能具有广泛的代表性。下面我们就以低碳钢的拉伸试验和铸铁的压缩试验来研究材料在拉伸和压缩过程中所表现出来的力学性能。

1. 低碳钢拉伸时的力学性能

国家标准《金属材料室温拉伸试验法》(GB/T 228—2002) 规定了标准试件的形状与尺寸。用来测量变形的长度 l 称为标距。对于圆截面,标准规定 $l = 5d$ 或 $l = 10d$ 。试件形状如图 2-6 所示。

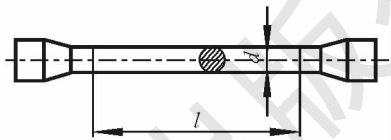


图 2-6 低碳钢标准拉伸试件

将低碳钢标准拉伸试件安装在拉伸试验机上,然后对试件缓慢施加拉伸载荷,直至把试件拉断。根据拉伸过程中记录的试件承受的拉力 F 值和试件标距 l 长度内的变形量 Δl 的关系图线(图 2-7(a)),称为拉伸图或 $F-\Delta l$ 曲线。为了反映材料本身的性能,将拉伸图的纵坐标 F 除以试件的横截面积 A ,即 $F/A = \sigma$ (称为应力);横坐标 Δl 除以试件的标距 l ,即 $\Delta l/l = \epsilon$ (称为线应变),取横坐标为 σ ,纵坐标为 ϵ ,于是得到 $\sigma-\epsilon$ 关系曲线(图 2-7(b)),称为应力—应变图。

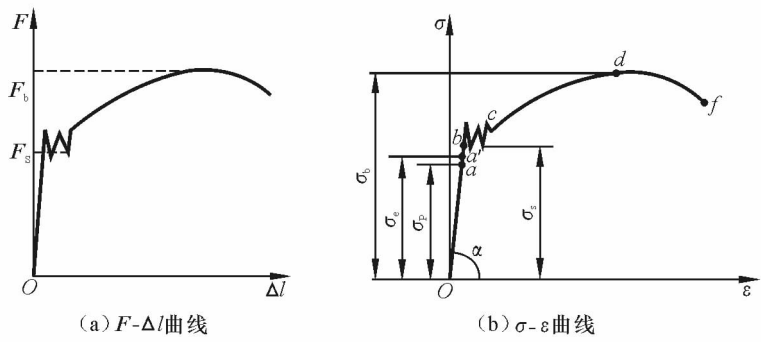


图 2-7 低碳钢拉伸试验曲线

试样在拉伸过程中经历了四个阶段(图 2-7(b))。



(1) 弹性阶段 低碳钢拉伸试验 $\sigma - \epsilon$ 曲线, Oa 段是直线, 应力与应变在此段成正比关系, 材料符合虎克定律, 即

$$\sigma = E \epsilon$$

式中的 E 为常数, 称为弹性模量。直线 Oa 的斜率 $\tan \alpha = \frac{\sigma}{\epsilon} = E$ 就是材料的弹性模量, 直线部分最高点所对应的应力值记作 σ_p , 称为材料的比例极限。曲线超过 a 点, 图上 ab 段已不再是直线, 说明材料已不符合虎克定律。但在 ab 段内卸载, 变形也随之消失, 说明 a b 段也发生弹性变形, 所以 ab 段称为弹性阶段。 b 点所对应的应力值记作 σ_e , 称为材料的弹性极限。弹性极限与比例极限非常接近, 工程实际中通常对二者不作严格区分, 而近似地用比例极限代替弹性极限。

(2) 屈服阶段 曲线超过 b 点后, 出现了一段锯齿形曲线, 这一阶段应力没有增加, 而应变依然在增加, 材料好像失去了抵抗变形的能力, 把这种应力不增加而应变显著增加的现象称作屈服, bc 段称为屈服阶段。屈服阶段曲线最低点所对应的应力 σ_s 称为屈服点(或屈服极限)。在屈服阶段卸载, 将出现不能消失的塑性变形。工程上一般不允许构件发生塑性变形, 并把塑性变形作为塑性材料破坏的标志, 所以屈服点 σ_s 是衡量材料强度的一个重要指标。

(3) 强化阶段 经过屈服阶段后, 曲线从 c 点又开始逐渐上升, 说明要使应变增加, 必须增加应力, 材料又恢复了抵抗变形的能力, 这种现象称作强化, cd 段称为强化阶段。曲线最高点所对应的应力值记作 σ_b , 称为材料的抗拉强度(或强度极限), 它是衡量材料强度的又一个重要指标。

(4) 缩颈断裂阶段 曲线到达 d 点前, 试件的变形是均匀发生的, 曲线到达 d 点, 在试件比较薄弱的某一局部(材质不均匀或有缺陷处), 变形显著增加, 有效横截面急剧减小, 出现了缩颈现象, 试件很快被拉断, 所以 de 段称为缩颈断裂阶段。

试件断裂后, 工作段的残余伸长量 $\Delta l = l_1 - l_0$ 与标距长度 l_0 的比值, 代表了试件拉断后的塑性变形程度, 称为材料断后伸长率。即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\%$$

式中: l_0 — 试件原来的标距长度; l_1 — 试件断裂后的标距长度。

也可以用断面收缩率来表示。即

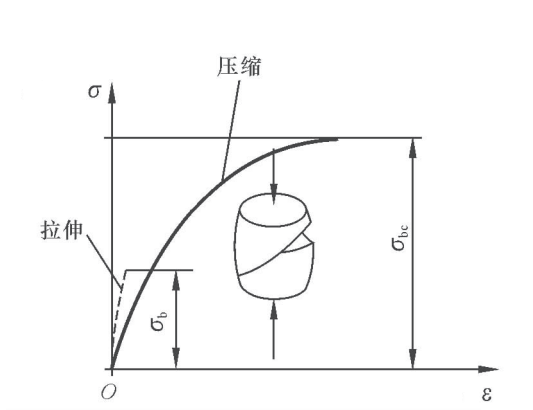
$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中: A_0 — 实验前试件的横截面积; A_1 — 试件断口处最小横截面积。

δ 、 ψ 大, 说明材料断裂时产生的塑性变形大, 塑性好。工程上通常将 $\delta > 5\%$ 的材料称为弹性材料, 如钢、铜、铝等; $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料, 如铸铁、玻璃、陶瓷等。

2. 铸铁压缩时的力学性能

压缩试件为短圆柱形。铸铁压缩试验 $\sigma - \epsilon$ 曲线如图 2-8 所示。

图 2-8 铸铁压缩试验 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

曲线没有明显的直线部分,应力较小时,曲线没有屈服阶段。曲线最高点的应力值称为抗压强度。铸铁材料抗压性能远好于抗拉性能,这也是脆性材料共有的属性。因此,工程中常用铸铁等脆性材料作受压杆件,而不用作受拉杆件。

* 3. 轴向拉伸和压缩时的强度计算

(1) 极限应力、许用应力与安全系数应力

材料丧失工作能力时的应力称为极限应力。脆性材料的极限应力是其强度极限 σ_b ; 塑性材料的极限应力是其屈服极限 σ_s 。

为了保证构件的安全可靠,需要一定的强度储备,应将材料的极限应力除以大于 1 的安全系数 n ,作为材料的许用应力,用 $[\sigma]$ 表示。

对于塑性材料有

$$[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s}$$

对于脆性材料

$$[\sigma] = \frac{\sigma_b}{n_b}$$

式中 n_s 、 n_b 是与屈服极限或抗拉强度相对应安全系数。

(2) 拉(压)杆的强度计算

为了保证拉(压)杆可靠地工作,必须使杆内的最大工作应力不超过材料的许用应力。于是,得到构件轴向拉伸或压缩的强度条件

$$\sigma_{\max} = \frac{F_N}{A} \leq [\sigma]$$

产生最大正应力的截面称为危险截面,适中的 F_N 和 A 分别是危险截面的轴力和横截面面积。



第2节 剪切与挤压

2.1 剪切和挤压的概念

2.1.1 剪切

剪切变形是杆件的基本变形之一。工程实际中的铆钉连接、螺纹连接、键连接等,都是剪切变形的实例。下面以铆钉连接为例,说明剪切变形的概念。

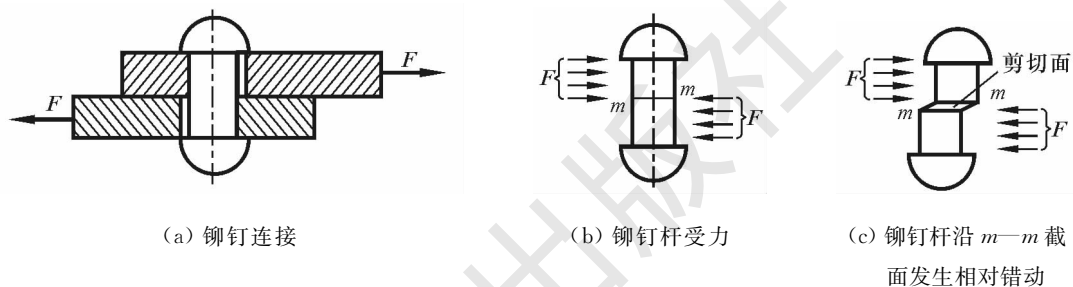


图 2-9 铆钉连接

铆钉连接如图 2-9(a) 所示,当两个被连接的钢板沿水平方向承受外力 F 作用时,外力通过钢板传到铆钉杆上,使铆钉杆的左上侧面和右下侧面受力,如图 2-9(b) 所示。这时铆钉杆的上半部分和下半部分在外力作用下分别向左和向右移动,沿截面 $m-m$ 发生相对错动。这就是剪切变形,如图 2-9(c) 所示。截面 $m-m$ 称为剪切面。剪切面上与截面相切的内力称为剪力,用 F_Q 表示。

2.1.2 挤压

一般情况下,连接件在发生剪切变形的同时,它与连接件传力的接触面上将受到较大的压力作用,从而出现局部变形,这种现象称为挤压。如图 2-10 所示铆钉连接中,上钢板孔左侧与铆钉杆上部左侧,下钢板孔右侧与铆钉下部右侧相互挤压。挤压面上所受的力称为挤压力,用 F_p 表示。

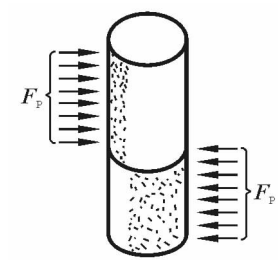


图 2-10 挤压变形

第 3 节 圆轴扭转

1. 扭转的概念

扭转变形也是杆件的一种基本变形。在工程实际中,有很多以扭转变形为主的杆件。例如,如图 2-11 所示为汽车方向盘操纵杆,如图 2-12 所示为载重汽车的传动轴。

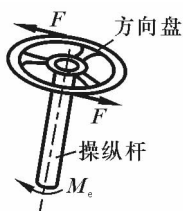


图 2-11 汽车方向盘操纵杆

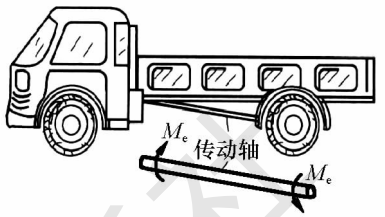


图 2-12 汽车传动轴

分析以上受扭杆件的特点,杆件的两端受到大小相等、转向相反且作用平面垂直于杆轴线的力偶的作用,致使杆件各横截面都绕杆轴线发生相对转动,杆件表面的纵向线将变成螺旋线。

作用于垂直杆轴平面内的力偶使杆引起的变形,称扭转变形。变形后杆件各横截面之间绕杆轴线相对转动了一个角度,称为扭转角,用 φ 表示,直轴的扭转变形如图 2-13 所示。以扭转变形为主要变形的直杆称为轴。

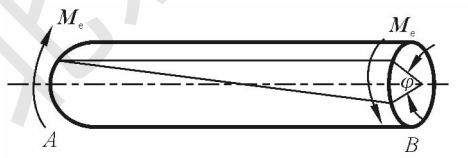


图 2-13 直轴的扭转变形

2. 外力偶矩的计算

工程中常用的传动轴(图 2-14) 是通过转动传递动力的构件,其外力偶矩一般不是直接给出的,通常已知轴所传递的功率和轴的转速。根据理论力学中的公式,可导出外力偶矩、功率和转速之间的关系为

$$M_e = 9\,550 \frac{P}{n} \quad (2-2)$$

式中: M_e —外力偶矩,单位 $\text{N} \cdot \text{m}$;

P —传递的功率,单位 kW ;



n —轴的转速,单位 r/min 。

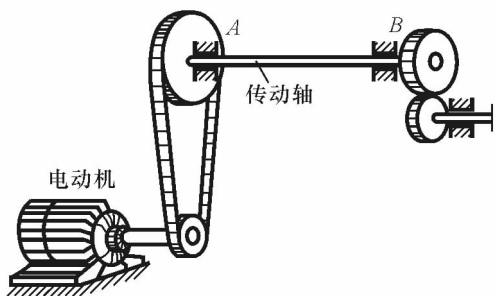


图 2-14 常用传动轴

3. 圆轴横截面上的应力

工程中要求对受扭杆件进行强度计算,根据扭矩 T 确定横截面上各点的切应力。在讨论扭转的应力和变形之前,对于切应力和切应变的规律以及二者关系的研究非常重要。下面分析实心圆轴推导切应力在横截面上的分布规律。

取一实心圆轴,在其表面等距离地画上圆周线和纵向线,如图 2-15(a) 所示。然后在圆轴两端施加一对大小相等、方向相反的扭转力偶矩 M_e ,使圆轴产生扭转变形,如图 2-15(b) 所示。可观察到圆轴表面上各圆周线的形状、大小和间距均未改变,仅是绕圆轴线作了相对转动,各纵向线均倾斜了一微小角度。



图 2-15

变形的情况:

(1) 各圆周线的形状、大小及圆周线之间的距离均无变化;各圆周线绕轴线转动了不同的角度。

(2) 所有纵向线仍近似地为直线,只是同时倾斜了同一角度。

扭转变形的平面假设:圆轴扭转时,横截面保持平面,并且只在原地发生刚性转动。在平面假设的基础上,扭转变形可以看做是各横截面像刚性平面一样,绕轴线作相对转动,由此可以得出:

(1) 扭转变形时,由于圆轴相邻横截面间的距离不变,即圆轴没有纵向变形发生,所以横截面上没有正应力。

(2) 扭转变形时,各纵向线同时倾斜了相同的角度;各横截面绕轴线转动了不同的角度,相邻截面产生了相对转动并相互错动,发生了剪切变形,所以横截面上有切应力。如图 2-16 所示,可知切应力的分布规律:横截面上某一点的切应力与该点到圆心的距离成正比,圆心处切应力为零;圆周上切应力最大,切应力沿半径成直线规律分布。

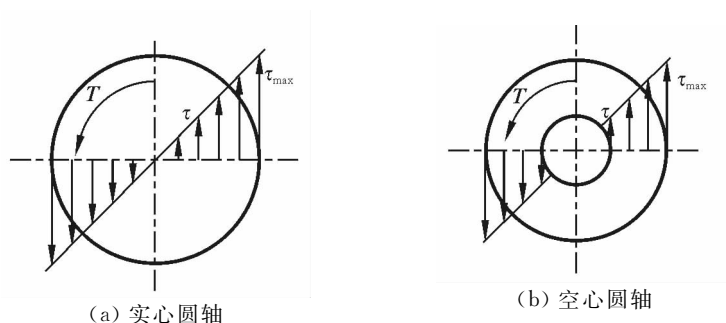


图 2-16 圆轴横截面切应力分布图

根据切应力的分布规律,可推出圆轴扭转时其截面上最大切应力的计算公式

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_n} \quad (2-3)$$

式中: $\tau_{\max}$ — 最大切应力,单位 MPa;

T — 扭矩,单位 $\text{N} \cdot \text{mm}$;

W_n — 抗扭截面模量,单位 mm^3 。

抗扭截面模量是横截面抵抗扭转能力的几何量,它只与截面的形状和尺寸有关,可按下列公式计算

$$\text{实心圆轴 } W_n = \frac{\pi D^3}{16} \approx 0.2 D^3$$

$$\text{空心圆轴 } W_n = \frac{\pi D^3 (1 - \alpha^4)}{16} \approx 0.2 D^3 (1 - \alpha^4)$$

式中的 $\alpha = \frac{d}{D}$, 即空心圆轴的内径与外径之比。

第 4 节 直梁弯曲

4.1 平面弯曲

在工程中常遇到这样一类直杆,当它们受到垂直于杆轴的外力,或在通过杆轴的平面内受到外力偶作用时,将发生弯曲变形。以弯曲变形为主的杆件称为梁。梁在工程中有着广泛的应用,如图 2-17、图 2-18、图 2-19 所示的阳台挑梁、桥式吊车梁、车轴都是梁的实例。

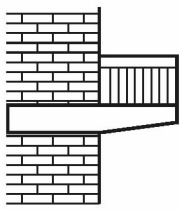


图 2-17 阳台挑梁

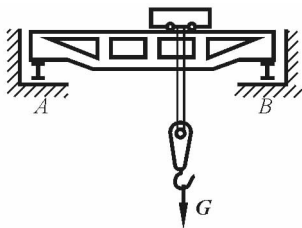


图 2-18 吊车大梁

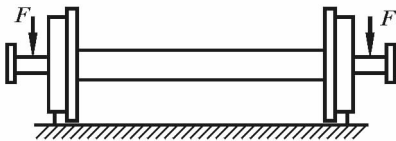


图 2-19 机车车轴

工程中最常见的梁,其横截面通常都采用对称形状,如矩形、工字形、T 字形及圆形等,其横截面上至少具有一条对称轴,且梁上所有的外力均作用在包含对称轴与轴线的纵向对称平面内。在这种情况下,梁变形时其轴线将弯曲成一条平面曲线,这条曲线处在外力所在的同一纵向对称面内。梁变形后的轴线所在平面与外力所在纵向平面相重合的这种弯曲称为平面弯曲。平面弯曲是弯曲变形中最基本的情况,也是工程中最常见的。

在工程实际中,梁的支座情况和载荷的作用形式是复杂多样的,为了便于研究,常对梁作一些简化。根据简化后梁的支座形式,我们将梁分成下述三种基本形式(图 2-20)。

(1) 悬臂梁:梁的一端为固定端,另一端为自由端,如图 2-20(a) 所示。

(2) 简支梁:梁的一端为固定的铰链支座,另一端为活动铰链支座,如图 2-20(b) 所示。

(3) 外伸梁:梁的支座形式与简支梁相同,但梁的一端(或两端)向支座外伸出,并在外伸端有载荷作用,如图 2-20(c) 所示。



(a) 悬臂梁



(b) 简支梁



(c) 外伸梁

图 2-20 梁的基本形式

※ 4.2 纯弯曲的正应力

观察梁弯曲时的变形情况,如图 2-21 所示,取一矩形截面直梁,在梁的表面画上横向线 $a-b$ 、 $c-d$ 和纵向线 $1-1$ 、 $2-2$ (图 2-21(a)),弯曲变形后, $1-1$ 、 $2-2$ 仍为直线,且与梁轴线正交,纵向线成为两段圆弧线,其中 $a-b$ 缩短, $c-d$ 伸长(图 2-21(b))。

设想梁是由平行于轴线的众多纤维组成,在纯弯曲过程中各纤维之间互不挤压,只发生伸长和缩短变形。由此可知,当梁弯曲时,上层纤维缩短,下层纤维拉长,中间附近有一层纤维既不缩短又不伸长,这一层纤维称为中性层,中性层与横截面的交线称为中性轴,由于整体变形的对称性,中性轴由与纵向对称面垂直(图 2-21(c))。由此可知,梁在弯曲时,上层纤维受到压力的作用,即受压应力;下层纤维受拉力作用,即受拉应力;中性层既不受压也不受拉,应力则为零。

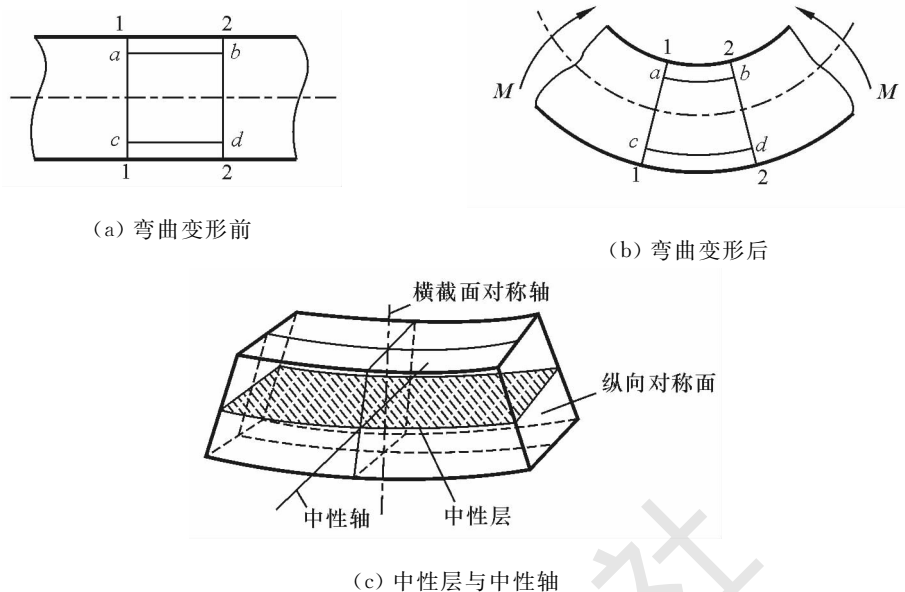


图 2-21 梁弯曲时的变形情况

因此,梁弯曲时横截面上的应力为拉应力或压应力,均为正应力,且应力在截面上的分布不均匀。弯曲时横截面正应力分布规律如图 2-22 所示。

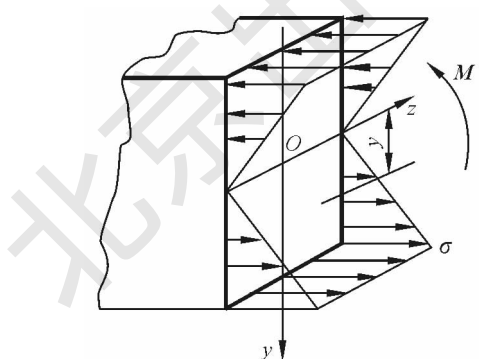


图 2-22 弯曲时横截面正应力分布规律

中性轴上各点正应力为零,正应力的大小与到中性轴的距离成正比,越靠近边缘,纤维的变形量越大,边缘的应力值最大,其最大正应力可用下面的公式进行计算

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \quad (2-4)$$

式中: M —作用在横截面上的弯矩,单位 $\text{N} \cdot \text{mm}$;

$M_{\max}$ —横截面上的最大弯矩,单位 MPa ;

W_z —抗弯截面模量,单位 mm^3 。

常用截面 W_z 值根据不同的截面形状,计算公式见表 2-1。



表 2-1 常用截面图形的抗弯截面模量

截面形状			
抗弯截面模量	$W_z = \frac{bh^2}{6}$ $W_y = \frac{hb^2}{6}$	$W_z = W_y = \frac{\pi D^3}{32}$ $\approx 0.1D^3$	$W_z = W_y = \frac{\pi D^3}{32}(1 - \alpha^4)$ $\approx 0.1D^3(1 - \alpha^4), \text{ 式中 } \alpha = \frac{d}{D}$

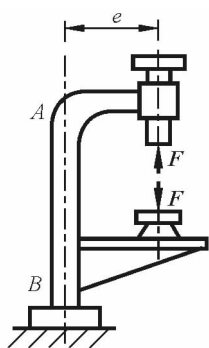
为了保证梁安全可靠的工作,必须使最大工作应力不超过材料的许用应力。

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} \leq [\sigma]$$

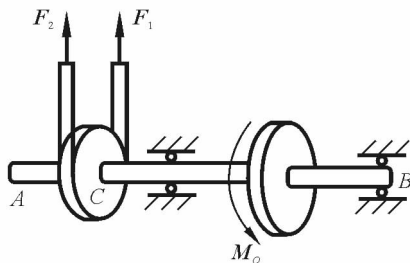
式中: $[\sigma]$ — 材料的许用应力。

* 第5节 组合变形

构件的受力情况分为基本受力(或基本变形)形式(如中心受拉或受压、扭转、平面弯曲、剪切)和组合受力(或组合变形)形式。在前面各节分别讨论了杆件在拉伸(挤压)、剪切、扭转和弯曲基本变形时的应力和强度计算。工程实际中杆件在荷载作用下所发生的变形,经常是两种或两种以上基本变形的组合,这种变形称为组合变形。图 2-23(a) 所示钻床立柱 AB 承受轴力 F 引起的拉伸和弯矩($M = Fe$)引起的弯曲,是拉变组合变形。图 2-23(b) 所示的传动轴 AB, 承受由力偶 M_o 引起的扭转和由力 F_1 、 F_2 引起的弯曲,是弯扭组合变形。



(a) 钻床的立柱



(b) 传动轴

图 2-23 组合变形

* 第6节 交变应力和疲劳强度

6.1 交变应力的概念

在工程实际中,还经常遇到随时间做周期性变化的载荷,这种载荷称为交变载荷。在交变载荷作用下,杆件内各点应力也随时间作周期性的变化。例如车辆的轮轴(图 2-24(a))受到外力作用后产生纯弯曲变形,现研究跨中截面上最外缘任一点 A 处的应力情况(图 2-24(b))。随着轮轴的转动,当 A 点处于位置 1 时,其正应力为最大拉应力 $\sigma_{\max}$;当 A 点处于位置 2 时,正应力为零;当 A 点处于位置 3 时,其正应力为最大压应力 $\sigma_{\min}$;当 A 点处于位置 4 时,应力又为零。可见,在车辆轮轴不断转动的过程中,A 点处的应力从 $\sigma_{\max} \rightarrow 0 \rightarrow \sigma_{\min} \rightarrow 0 \rightarrow \sigma_{\max}$ 不断地变化。这种随时间作周期性变化的应力,称为交变应力。

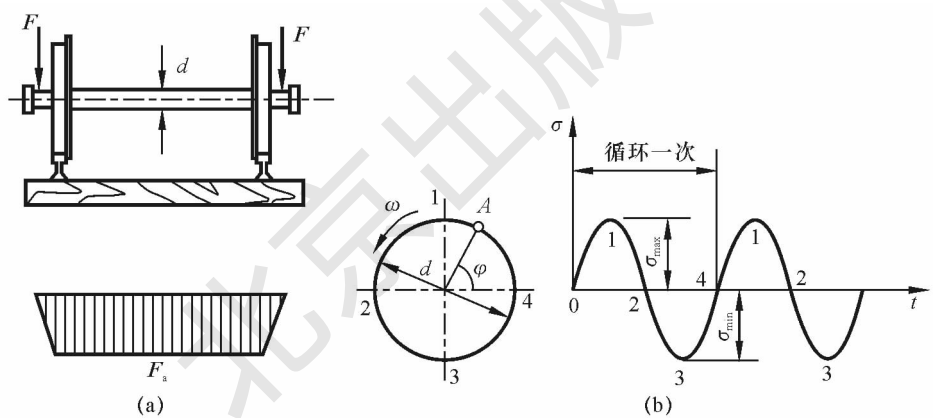


图 2-24 交变应力

若以时间 t 为横坐标,以应力 σ (正应力或剪应力) 为纵坐标,就可绘出承受交变应力的杆件内任一点处的应力随时间作周期性变化的曲线。我们把应力值从 $\sigma_{\max}$ 变到 $\sigma_{\min}$,再从 $\sigma_{\min}$ 回到 $\sigma_{\max}$ 的过程称为一个应力循环。交变应力循环中最小应力与最大应力的比值,称为循环特征,用 r 表示,即

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

$r = -1$ 的应力循环为对称循环; $r \neq -1$ 的应力循环为非对称循环(图 2-25),其中 $r = 0$ 的应力循环为脉动循环(图 2-26)。

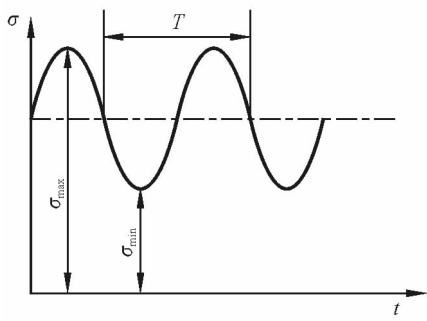


图 2-25 非对称循环

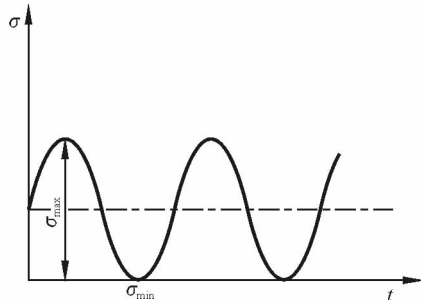


图 2-26 脉动循环

6.2 杆件的疲劳破坏

6.2.1 疲劳破坏的概念

疲劳破坏是机械零件失效的主要原因之一,约有 80% 以上机械零件的失效属于疲劳破坏。实践表明金属材料在交变应力的作用下,杆件所承受的应力虽然低于静载荷作用下的抗拉强度,甚至低于屈服强度,但经过较长一段时间的工作会产生裂纹或发生突然断裂,金属的这种破坏过程称为疲劳破坏。由于疲劳破坏总是使杆件在一定时间内失效,危害性很大,所以需要引起我们的高度重视。

6.2.2 疲劳破坏特征

- (1) 构件内的最大应力远小于材料的静应力强度极限就发生突然的破坏。
- (2) 塑性材料在交变应力作用下,没有显著的塑性变形就发生突然的断裂。
- (3) 疲劳破坏的断口,明显地呈现光滑和粗糙的两个区域。

※ 第7节 压杆稳定

7.1 压杆稳定的概念

在前面讨论压杆的强度问题时,认为只要满足直杆受压时的强度条件,就能保证压杆的正常工作。这个结论只适用于短粗压杆。而细长压杆在轴向压力作用下,其破坏的形式与强度问题截然不同。例如,一根长 300 mm 的钢制直杆,其横截面的宽度为 11 mm,厚度为 0.6 mm,材料的抗压许用应力等于 170 MPa,如果按照其抗压强度计算,其抗压承载力

应为 1 122 N。但是实际上,约承受 4 N 的轴向压力时,直杆就发生了明显的弯曲变形,丧失了其在直线形状下保持平衡的能力从而导致破坏(如图 2-27)。它明确反映了压杆失稳与强度失效的不同。

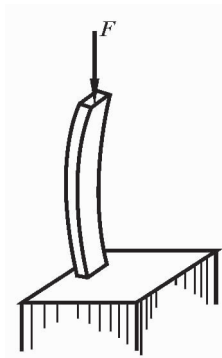


图 2-27

我们再来做一个试验,如图 2-28 所示。对一根细长等直压杆,沿其轴线施加压力 F 。当 F 较小时(图 2-28(a)),即使有一横向干扰力使之微弯,但随着干扰力的撤去,压杆能很快地恢复到原来的直线位置,这种直线形状的平衡状态称为稳定的平衡状态。当压力 F 增大但小于某一特定极限值 F_{cr} 时(图 2-28(b)),在横向干扰力作用下产生微弯,撤去干扰力后,压杆经过几次摆动后,仍能恢复到原来的直线平衡状态。当 F 大于 F_{cr} 时(图 2-28(c)),压杆受扰动发生弯曲,撤去干扰力后,压杆不能恢复到原来的直线平衡状态,而是处于微弯的平衡状态。若 F 继续增加,压杆因弯曲变形而丧失工作能力。这说明压杆原来的直线平衡状态是不稳定的。我们把介于稳定平衡状态与不稳定平衡之间的平衡状态称为临界平衡状态, F_{cr} 称为临界力。

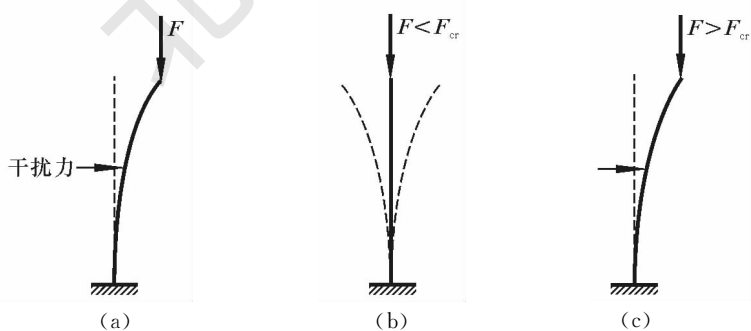


图 2-28 细长等直压杆稳定性分析



小 结

本章主要学习了构件的承载能力分析,包括直杆的轴向拉伸与压缩、连接件的剪切挤压、圆轴扭转、直梁弯曲等。

1. 直杆受轴向拉伸和压缩时会产生内力。
- * 2. 用截面法可分析直杆轴向拉伸与压缩时会产生内力。
3. 材料的力学性能可通过低碳钢的拉伸试验和铸铁的压缩试验表现出来。
4. 工程实际中的铆钉连接、键连接都存在剪切和挤压变形。
5. 扭转变形也是杆件的一种基本变形,横截面上有切应力。
6. 杆件受到垂直于杆轴的外力或通过杆轴的平面内受外力偶时,将发生弯曲变形。横截面上有正应力。
- * 7. 发生两种或两种以上基本变形时,杆件的变形称为组合变形。
- * 8. 杆件受到交变应力作用时,将发生疲劳破坏。
9. 细长压杆易出现不稳定状态。

思考与练习题

1. 构件变形的基本形式有哪些?
- * 2. 什么是截面法?怎样用截面法求杆件受拉、压时的内力?内力与外力有什么关系?
3. 低碳钢的 $\sigma-\epsilon$ 曲线显示哪几个阶段?各个阶段有哪些特点?
4. 怎样判断连接件的受剪面与受挤面?
5. 为什么同一减速器中,高速轴的直径较小,而低速轴的直径较大?
- * 6. 什么是压杆的稳定性?