目　　录

公式及其使用方法

第一章　理论力学

第二章 材料力学

第三章 机械设计

第四章 机械加工

第五章 流体力学

第六章 热力学

公式及其使用方法

1. 公式的重要性

当问到"宽10cm，长8cm的矩形面积是多少"时，我想你会立即回答是$80cm^2$。这是因为在你头脑里肯定是这样考虑的："矩形的面积等于长乘宽"。

尽管象这样把解法预先背下来也是很重要的，可是对于复杂的计算就很难这样做了。

因此，就需要有不借助于语言来表达的公式。例如，设横边长为a，纵边长为b，面积为S时，则可以用如下公式来表示：

$$S = a \times b \cdots\cdots (1)$$

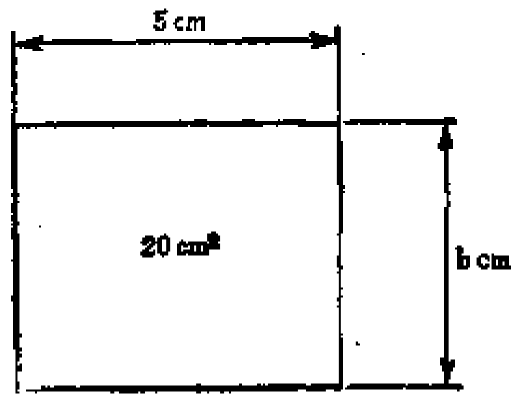
象这样用公式来表示时，不论用什么样的数值代入a、b，都可以求出相应的矩形面积。

例如$a = 20cm$，$b = 30cm$的矩形，其面积S为：

$$S = 20 \times 30 = 600cm^2$$

2. 公式的变换

如右图所示，当已知矩形的面积及其一边边长时，想求出未知边边长b，则可将(1)式变换一下得出求b的公式。将(1)式的两边同除以a，得



$$\frac{S}{a} = \frac{a \times b}{a}$$

$$\therefore b = \frac{S}{a} \cdots\cdots (2)$$

如将$S = 20cm^2$，$a = 5cm$，代入(2)式，得

$$b = \frac{S}{a} = \frac{20}{5} = 4\,(cm)$$

如上所述，将公式两边同除以a即可得到求b的变换公式。由此可见，公式的变换是遵守一定法则的。下面是计算的最基本法则。

(1) 等式两边同加以一数或同减以一数，用等号连结的两边仍相等。

$$20+3=20+3 \qquad 20-3=20-3$$

(2) 等式两边同除以一数或同乘以一数，等式两边仍相等。

$$\frac{20}{2}=\frac{20}{2} \qquad 20\times2=20\times2$$

根据上述法则，可对等式移项如下：

(1) $x+20=40 \Rightarrow x+20-20=40-20 \Rightarrow$

$x=40-20$　(正数移项后变为负数)

(2) $x-20=30 \Rightarrow x-20+20=30+20 \Rightarrow$

$x=30+20$　(负数移项后变为正数)

(3) $2x=6 \Rightarrow \frac{2}{2}x=\frac{6}{2} \Rightarrow x=\frac{6}{2}$(当乘以某数时，移项后变为除以该数)

(4) $\frac{x}{2}=3 \Rightarrow \frac{x}{2}\times2=3\times2 \Rightarrow x=3\times2$ (当除以某数时，移项后变为乘以该数)

计算要点

$10^0=1$　　$\frac{1}{10^0}=1$

$10^1=10$　　$\frac{1}{10^1}=0.1$

$10^2=100$　　$\frac{1}{10^2}=0.01$

$10^3=1000$　　$\frac{1}{10^3}=0.001$

$10^n=1\overbrace{00\cdots\cdots00}^{n个}$　　$\frac{1}{10^n}=\overbrace{0.00\cdots\cdots0}^{n个}1$

3. 单位及其换算

本公式集使用各种单位，常常一边变换单位一边往公式里代入。例如，要把图面上的长度单位由mm变换成m，或者需要把面积的单位由cm^2变换成m^2。

下边是最基本的单位及其换算方法：

(1) 长度的单位及其换算

长度的基本单位用公制是m。辅助单位有以下种种：

$$\text{nm}\ (纳米)=\frac{1}{1000000000}\text{m}=\frac{1}{10^9}\text{m}=0.000000001\text{m}$$

$$\mu\text{m}(微米)=\frac{1}{1000000}\text{m}=\frac{1}{10^6}\text{m}=0.000001\text{m}$$

$$\text{mm}(毫米)=\frac{1}{1000}\text{m}=\frac{1}{10^3}\text{m}=0.001\text{m}$$

$$\text{cm}\ (厘米)=\frac{1}{100}\text{m}=\frac{1}{10^2}\text{m}=0.01\text{m}$$

$$\text{dm}\ (分米)=\frac{1}{10}\text{m}=0.1\text{m}$$

$$\text{km}\ (千米)=1000\text{m}=10^3\text{m}$$

因而

$$1\text{m}=10\text{dm}=100\text{cm}=1000\text{mm}=1000000\mu\text{m}=10^9\text{nm}$$

【例题】 1km是多少cm？

【解答】 1km是1000m，1m是100cm。因而

$$1\text{km}=1000\times100=100000(\text{cm})$$

(2) 力的单位及其换算

力的基本单位是kgf。辅助单位有以下几种：

$$\text{mgf}(毫克力)=\frac{1}{1000000}\text{kgf}=\frac{1}{10^6}\text{kgf}$$

$$\text{gf}\ (克力)=\frac{1}{1000}\text{kgf}=\frac{1}{10^3}\text{kgf}$$

tf(吨力)＝1000kgf

1kgf＝1000000mgf＝1000gf＝0.001tf

(3) 时间的单位及其换算

时间的基本单位是S(秒)。辅助单位有以下种种。

min(分)＝60s

h(时)＝60min＝3600s

d(日)＝24h＝1440min＝86400s

$$1s=\frac{1}{60}min=\frac{1}{3600}h=\frac{1}{86400}d$$

【例三】 如一个月有三十天，试用小时、分和秒来表示这一个月的时间。

【解答】 1个月(30日)＝24×30＝720(h)

＝720×60＝43200(min)

＝43200×60＝2592000(s)

(4) 导出单位及其换算

由基本单位m、kgf、s和辅助单位所导出的单位，总称为导出单位。下列单位都是导出单位。

1) 速度

1m/s＝60m/min＝3600m/h＝3.6km/h

1km/h＝1000m/h＝1000/3600m/s

2) 面积

$1m^2=1000\times1000mm^2=1000000mm^2=10^6mm^2$

$=100\times100cm^2=10000cm^2=10^4cm^2$

$=0.001\times0.001km^2=0.000001km^2=1\times10^{-6}km^2$

3) 体积

$1m^3=1000\times1000\times1000mm^3=1000000000mm^3=10^9mm^3$

$=100\times100\times100cm^3=1000000cm^3=10^6cm^3$

4) 加速度m/s^2

5) 力矩kgf·m

6) 功率kgf·m/s

(5) 实用单位

除了上述单位以外，被使用的还有实用单位。下面是有代表性的实用单位，它们都是可以从导出单位导出的。

1) 马力(公制马力)

$1ps = 75kgf \cdot m/s$(1匹马在1秒内作功的能力)

2) 电功率

$1kW = 102kgf \cdot m/s$

3) 热量

$1kcal = 427kgf \cdot m$

4) 气压

$1atm = 1033kgf/m^2$ (相当于760mm水银柱的压力)

【例题】 试换算下列单位

1) $1kgf \cdot m$是多少$kgf \cdot cm$?

2) $1000kgf/m^2$是多少kgf/cm^2?

3) $36km/h$是多少m/s?

4) $500kgf \cdot m$是多少$kcal$?

【解答】

1) $1kgf \cdot m = 1kgf \times 1m = 1kgf \times 100cm = 100(kgf \cdot cm)$

2) $1000kgf/m^2 = \dfrac{1000kgf}{1m^2} = \dfrac{1000kgf}{100 \times 100cm^2} = 0.1(kgf/cm^2)$

3) $36km/h = 36 \times 1km/h = 36 \times \dfrac{1km}{1h} = 36 \times \dfrac{1000m}{3600s} = 10(m/s)$

4) $500kgf \cdot m = \dfrac{500}{427}kcal = 1.17(kcal)$

(6) 角度和转速的单位及其换算

1) 度和弧度

1度(1°)：直角的1/90是1°

1弧度(1rad)：57.29度(360° = 2π弧度)

$$1rad = \frac{360}{2\pi}(度) = \frac{180}{\pi}(度)$$

【例题】 试回答下列问题

1) 60°是多少弧度?

2) 45°是多少弧度?

3) $2\pi/3$弧度是多少度?

【解答】

1) $60° = 60 \times \frac{2\pi}{360} = \frac{\pi}{3}(rad)$

2) $45° = 45 \times \frac{2\pi}{360} = \frac{\pi}{4}\ (rad)$

3) $\frac{2\pi}{3}(rad) = \frac{2\pi}{3} \times \frac{360}{2\pi} = 120°$

2) 转速

1 rpm：1分钟内的转数 (revolutions per minute的缩写)

1 rad/s：1秒钟内的角位移

$$1rpm = 2\pi\ (rad/min) = \frac{2\pi}{60}(rad/s)$$

$$1\ rad/s = \frac{60}{2\pi}(rpm) = \frac{1}{2\pi}(rps)$$

【例题】 60rpm是多少rad/s?

【解答】 $60rpm = 60 \times \frac{2\pi}{60}\ (rad/s)\ = 2\pi(rad/s)$

第一章　理论力学

§ 1.1　二力的合成

(1)　二力正交时

$$F=\sqrt{F_X^2+F_Y^2}\quad(\text{kgf})\quad(1)$$

F：合力

F_X、F_Y：X、Y方向的分力

F、F_X、F_Y都是矢量

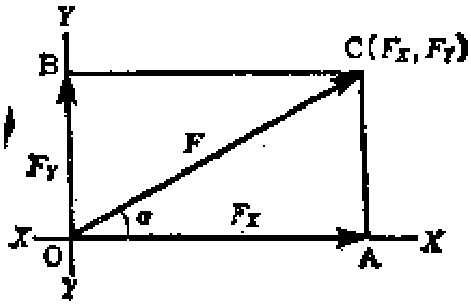


图1.1　正交分力

(2)　二力F_1、F_2相交成任意角θ时

$$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\theta}\quad(2)$$

$$\tan\alpha=\frac{F_Y}{F_X}=\frac{F_2\sin\theta}{F_1+F_2\cos\theta}\quad(3)$$

α：F和F_1之间的夹角

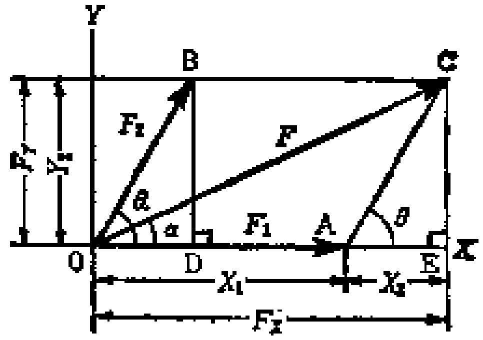


图1.2

【解说】　二力正交时力的合成，如图1.1所示，作矩形，求出对角线。这就是二力合成的力(合力)．二力F_1、F_2相交成任意角θ时力的合成，如图1.2所示，作出平行四边形并求解．合力的倾角为α。即或二力是正交时也可以使用(3)式求出。

【例题】　$F_1=4$kgf．$F_2=3$kgf 二力互相垂直，试求合力的大小及合力与力F_1之间的夹角α。

【解答】　将$F_1=F_X=4$kgf．$F_2=F_Y=3$kgf代入(1)式求得合力F。由(3)式求得夹角α。

$$F=\sqrt{F_X^2+F_Y^2}=\sqrt{4^2+3^2}=5(\text{kgf})$$

$$\tan\alpha=\frac{F_Y}{F_X}=\frac{3}{4}=0.75$$

$$\therefore \alpha=36.87^\circ=36^\circ 52'$$

【例题】 $F_1=10\text{kgf}$，$F_2=6\text{kgf}$ 二力相交成60°角，试求其合力的大小及合力与力F_1之间的夹角α。

【解答】 将$F_1=10\text{kgf}$，$F_2=6\text{kgf}$，$\theta=60^\circ$代入(2)、(3)式，得

$$F=\sqrt{F_1^2+F_2^2+2F_1F_2\cos\theta}$$
$$=\sqrt{10^2+6^2+2\times10\times6\times\cos60^\circ}$$
$$=14\text{kgf}$$

$$\tan\alpha=\frac{F_2\sin\theta}{F_1+F_2\cos\theta}=\frac{6\sin60^\circ}{10+6\cos60^\circ}=0.4$$

$$\therefore \alpha=21.80^\circ=21^\circ 48'$$

§ 1.2 共点力系的合成

(1) 力系的正交分力的合成

$$F_X=X_1+X_2+\cdots\cdots+X_n \quad (1)$$

$$F_Y=Y_1+Y_2+\cdots\cdots+Y_n \quad (2)$$

(2) 力系的合力及合力与X轴之间的夹角α

$$F=\sqrt{F_X^2+F_Y^2}\ (\mathrm{kgf})$$

$$\tan\alpha=\frac{F_Y}{F_X}$$

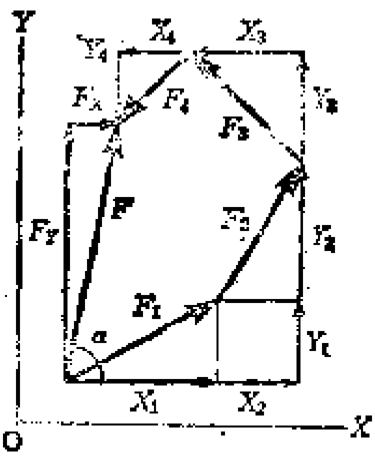


图1.3 力的合成

【解说】 同时作用于同一点的许多个力，称为共点力系。设共点力系由力F_1、F_2、……、F_n n个力组成。力F_1、F_2、……、F_n在X轴方向和在Y轴方向的分力分别为X_1、Y_1，X_2、Y_2，X_3、Y_3，……，X_n、Y_n。(1)、(2) 式表示F_X、F_Y分别是各个分力沿X轴方向，沿Y轴方向的总和。求出F_X、F_Y以后，将F_X、F_Y作为二正交分力即可求出其合力与夹角。

【例题】 如图 1.4 所示，设$F_1=8$kgf，$F_2=6$kgf，$F_3=6$kgf，$F_4=3$kgf，$\theta_1=60°$，$\theta_2=60°$，$\theta_3=45°$，$\theta_4=30°$，试求合力的大小及合力的夹角。

【解答】 由(1)、(2) 式求出沿X轴方向、沿Y轴方向各分力的总和。

$$F_X = X_1 + X_2 + X_3 + X_4$$
$$= 8\cos 60^\circ - 6\cos 60^\circ - 6\cos 45^\circ + 3\cos 30^\circ$$
$$= 8\times 0.5 - 6\times 0.5 - 6\times 0.71 + 3\times 0.87$$
$$= -0.65(\text{kgf})$$

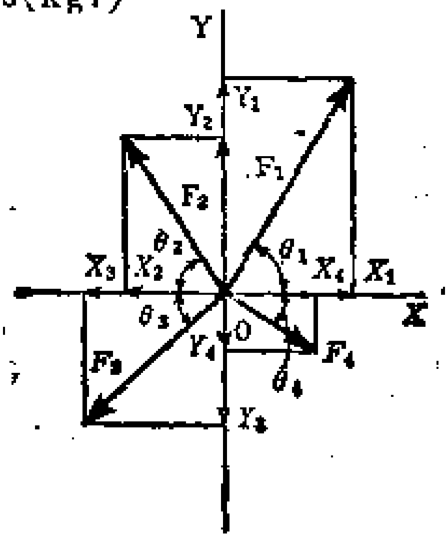


图1.4 例题图

$$F_Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4$$
$$= 8\sin 60^\circ + 6\sin 60^\circ - 6\sin 45^\circ - 3\sin 30^\circ$$
$$= 8\times 0.87 + 6\times 0.87 - 6\times 0.71 - 3\times 0.5 = 6.42\ (\text{kgf})$$

$$\therefore F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2} = \sqrt{(-0.65)^2 + 6.42^2} = 6.45(\text{kgf})$$

$$\tan\alpha = \frac{F_Y}{F_X} = \frac{6.45}{-0.65} = -9.92$$

$\therefore \alpha \approx 84^\circ 15'$（$\tan\alpha$的计算结果是负数，因此由 X 轴负向往 Y 轴正向顺时针转过$84^\circ 15'$即为合力F的方向。）

§1.3 力矩及其正负的规定

(1) 力与力臂相垂直作用时〔图1.5(a)〕

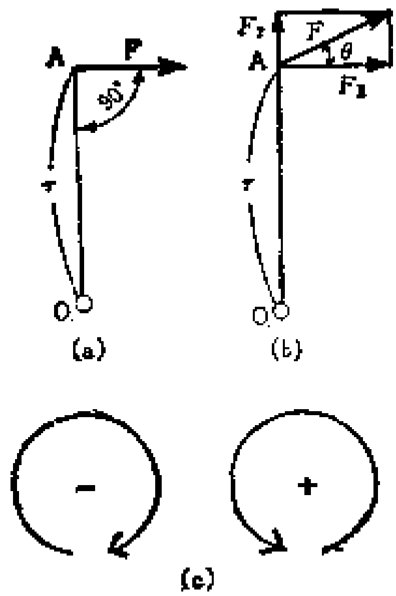


图1.5 (a) 力矩

$$M=F\cdot r \quad (\mathrm{kgf\cdot mm}) \quad (1)$$

M：力矩

F：力

r：力臂

(2) 力与力臂不相垂直作用时〔图1.5(b)〕

$$M=F_1\cdot r=F\cdot r\cos\theta \quad (2)$$

(3) 力矩的合成

$$M=M_1+M_2+M_3+\cdots\cdots(3)$$

(4) 力矩的正负〔图1.5(c)〕

规定力矩顺时针转向为负，而逆时针转向为正，以资区别。

【解说】 用扳手拧螺母时，使螺母旋转的回转力就是力矩。力矩等于力F与力臂r的乘积。力臂是转动中心O点到力F的作用线的垂直距离。想要用较小的力产生较大的力矩，就必须让力臂长一些。

【例题】 如图1.5(a) 所示，$r=400\mathrm{mm}$，$F=15\mathrm{kgf}$，试求力F对O点的力矩。

【解答】 将$F=15\mathrm{kgf}$，$r=400\mathrm{mm}$代入(1) 式，得

$$M = F \cdot r = 15 \times 400 = 6000(\text{kgf} \cdot \text{mm}) = 6(\text{kgf} \cdot \text{m})$$

【例题】 如图1.6所示，试求对轴O的力矩。

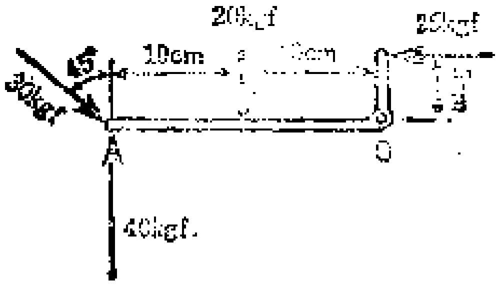


图1.6 例题图

【解答】 由(1)、(2)、(3) 式，得

$$M = 20 \times 30\cos 45^\circ + 10 \times 20$$
$$+ 5 \times 25 - 20 \times 40$$
$$= -50.74(\text{kgf} \cdot \text{cm})$$

【例题】 如图1.7所示，在等边三角形的三个顶点上作用有10kgf、12kgf和14kgf三个力，试求对中心点O的力矩。

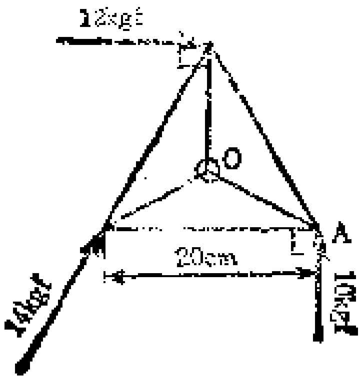


图1.7 例题图

【解答】 中心在等边三角形的中垂线上，距底边⅓处。因此，$\overline{OA}$ $= 17.3 \times 2/3 = 11.53\text{cm}$。

$$M = 11.53 \times 10\cos 30^\circ - 12 \times 11.53$$
$$- 14 \times (17.3 - 11.53)$$
$$= -119.29\ (\text{kgf} \cdot \text{cm})$$

§1.4 力偶矩

(1) 力偶矩

$M=F\cdot d$(kgf·mm) (1)

F：组成力偶的力的大小

d：力偶臂

(2) 力偶矩的合成

$M=M_1+M_2+M_3+\cdots\cdots$(2)

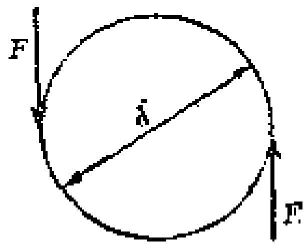


图1.8 力偶

【解说】 大小相等方向相反作用线相平行的两个力称为力偶。此力偶所产生的矩称为力偶矩。

用两手握住汽车的方向盘使之转动时产生的矩是力偶矩。

【例题】 如图1.8所示，设$F=15$kgf，$d=30$mm，试求力偶矩。

【解答】 由(1)式得

$M=F\cdot d=15\times30=450$(kgf·mm)

【例题】 如图1.9所示，设$F=20$kgf，$d=30$cm，距圆心20cm处有转动中心。试求此力矩。

【解答】 由§1.3的(1)、(3)式，得

$M=20\times35-20\times5=600$(kgf·cm)

如用§1.4的(1)式求解此值，得

$M=20\times30=600$(kgf·cm)

力偶矩与转动中心的位置无关，可用(1)式求出。

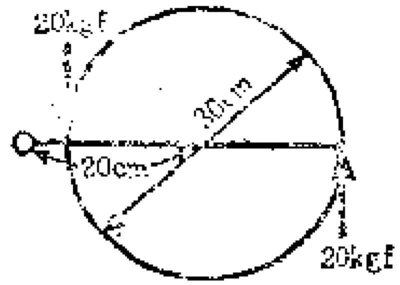


图1.9 例题图

【例题】 如图1.10所示，作用有三个力偶，试求对O点的力偶矩。再由计算力矩的公式求出对A点的矩。

【解答】 用(1)、(2)式，把60kgf分解成为三个20kgf的分力，即60=20+20+20，得

$M=-20\times10-20\times20-20\times40$
$=-1400$(kgf·cm)

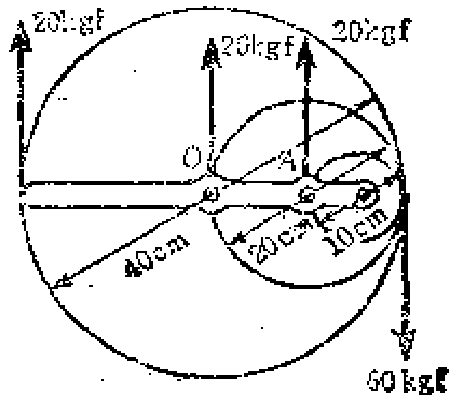


图1.10 例题图

由§1.3的(1)、(3)式，得

$M=-60\times10-20\times10-20\times30=-1400$ (kgf·cm)

§1.5 平行力的合成

(1) 两个同向平行力的合成〔图1.11(*a*)〕

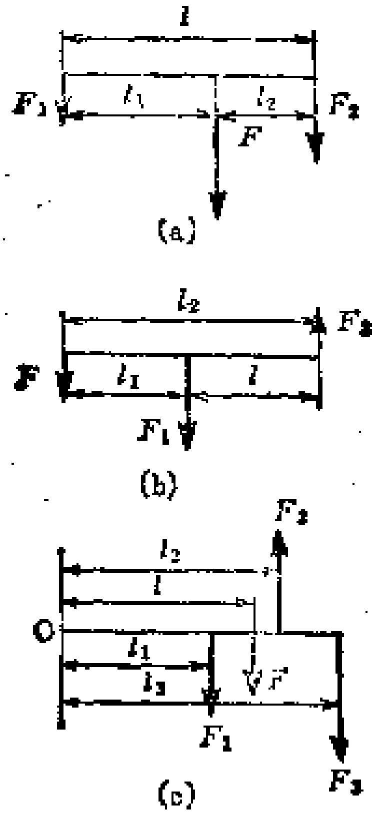


图1.11 平行力的合成

$$F=F_1+F_2\ (\mathrm{kgf}) \tag{1}$$

$$l_1=l\frac{F_2}{F_1+F_2}\quad l_2=l\frac{F_1}{F_1+F_2} \tag{2}$$

l_1：合力F与力F_1作用线之间的距离(mm)。

l_2：合力F与力F_2作用线之间的距离(mm)

l：力F_1与力F_2作用线之间的距离(mm)

(2) 两个反向平行力的合成〔图1.11(*b*)〕

($F_1>F_2$)

$$F=F_1-F_2\ (\mathrm{kgf}) \tag{3}$$

$$l_1=l\frac{F_2}{F_1-F_2}\qquad l_2=l\frac{F_1}{F_1-F_2} \tag{4}$$

(3) 多个平行力的合成〔图1.11(*c*)〕

$$F=F_1+F_2+F_3+\cdots\cdots \tag{5}$$

$$l=\frac{F_1l_1+F_2l_2+F_3l_3+\cdots\cdots}{F} \qquad (6)$$

l_1、l_2、l_3……：分别表示由任意点 O 到各力（F_1、F_2、F_3……）作用线的距离

【解说】 合力F的位置是，当二力同向时，位于二力之间；而当二力反向时，位于二力中较大的力的外侧。

【例题】 两个同向平行力，60kgf 和 20kgf，相距为100mm。试求其合力的大小及合力的位置。

【解答】 由(1)、(2)式，设$F_1=60$kgf，$F_2=20$kgf，得

$F=60+20=80$(kgf)

$$l_1=100\times\frac{20}{60+20}=25(\text{mm})$$

【例题】 如图1.11(c)所示，设$F_1=10$kgf，$F_2=20$kgf，$F_3=25$kgf，l_1、l_2、l_3分别是20、30、40mm，试求其合力的大小及合力的位置。

【解答】 由(5)、(6) 式，得

$F=10-20+25=15$(kgf)

$$l=\frac{20\times30-10\times20-25\times40}{15}=-40(\text{mm})$$

§1.6 力的平衡

(1) 二力平衡

$$F=F_1+F_2=0 \qquad (1)$$

(2) 多力平衡

$$F=F_1+F_2+F_3+\cdots\cdots+F_n=0 \qquad (2)$$

(3) 三力平衡(拉米定理)

$$\frac{F_1}{\sin\alpha_1}=\frac{F_2}{\sin\alpha_2}=\frac{F_3}{\sin\alpha_3} \quad (\text{kgf}) \qquad (3)$$

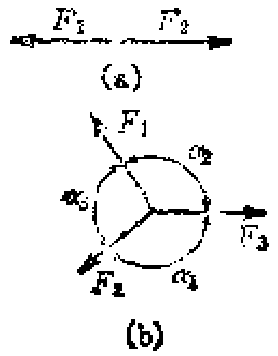


图1.12 力的平衡

【解说】 虽然物体受到了力的作用，可是就象没有受到力的作用一样保持静止状态，则称此力是平衡的。

两个力，若二力大小相等、方向相反，则二力平衡。三个力，若其中两个力的合力与第三个力相平衡，则称为三力平衡。

【例题】 如图1.13所示，用两根细绳悬挂一重为 60kgf 的物体。试求两根细绳中的拉力。

【解答】 将$F_3=60\text{kgf}$，$\alpha_1=150°$、$\alpha_2=120°$，$\alpha_3=90°$代入(3)式，得

$$\frac{F_1}{\sin 150°}=\frac{60}{\sin 90°}$$

$$\therefore F_1=\frac{0.5\times 60}{1}=30(\text{kgf})$$

$$\frac{F_2}{\sin 120°}=\frac{60}{\sin 90°}$$

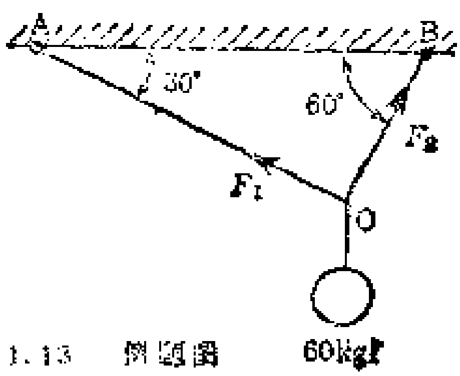


图1.13 例题图

$$\therefore F_2=\frac{0.87\times 60}{1}\approx 52(\mathrm{kgf})$$

【例题】如图1.14所示，在一根细绳的中间加上一个水平拉力20kgf，

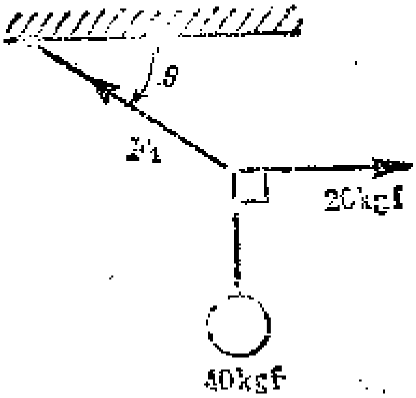


图1.14 例题图

悬挂物体重量为40kgf。试求细绳中的拉力和细绳的倾角θ。

【解答】 由(3)式，得

$$\frac{F_1}{\sin 90^\circ}=\frac{40}{\sin(180^\circ-\theta)}=\frac{20}{\sin(90^\circ+\theta)}$$

$$40\sin(90^\circ+\theta)=20\sin(180^\circ-\theta)$$

$$40\cos\theta=20\sin\theta$$

$$\therefore \tan\theta=2 \qquad \theta=63.43^\circ=63^\circ 26'$$

$$F_1=\frac{40\sin 90^\circ}{\sin(180^\circ-63.43^\circ)}=44.72(\mathrm{kgf})$$

§1.7 任意力系的平衡

(1)平衡方程

$$X_1+X_2+X_3+\cdots\cdots=0 \qquad (1)$$

$$Y_1+Y_2+Y_3+\cdots\cdots=0 \qquad (2)$$

$$M_1+M_2+M_3+\cdots\cdots=0 \qquad (3)$$

(X_1, Y_1):正交分力

M:对任意一点O的力矩

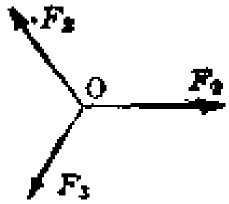


图1.15 力的平衡

【解说】 一般地说，为了要使任意力系平衡，下列条件是必要的。

① 合力为零。

② 各力对任意一点O的力矩的总和为零。

为了要使任意力系平衡，第二条特别重要。

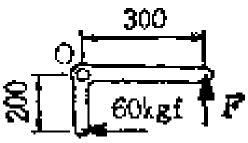


图1.16 例题图

【例题】 如图1.16所示，在曲捉的一端作用有一60kgf的力，问另一端需加多少kgf的力才能平衡?

【解答】 由(3)式，对O点力矩的总和为零，得

$$F\times300-60\times200=0$$

$$\therefore F=40(\text{kgf})$$

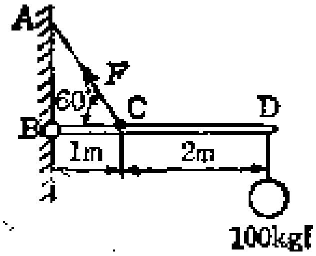


图1.17 例题图

【例题】 如图1.17所示，在杆的一端悬挂一重为100kgf的物体，在杆的中间被一细绳拉住。试求细绳中的拉力。

【解答】 按照力矩式求出作用在点C的力(参照图1.18)

$$M=100\times3=F_c\times1$$

$$F_0=300(\text{kgf})$$

其次，由图1.18力的平衡求出力F。

$$F=\frac{300}{\sin60^\circ}=346.4(\text{kgf})$$

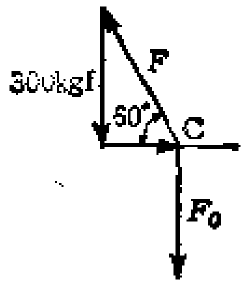


图1.18 例题图

【例题】 如图1.19所示，试求绳中拉力。

【解答】 象上一例题那样求解，得

$$F=\frac{10}{\sin45^\circ}=14.1(\text{kgf})$$

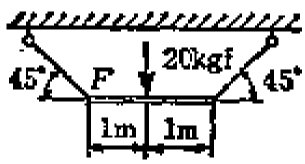


图1.19 例题图

§1.8 作用在桁架上的力

(1) 图解法

被载荷W、反力R_1、R_2以及构件分隔开的空间记作A、B、C、D，首先求出反力R_1、R_2。其次，象图1.20(a)那样在R_1的延长线上适当地选取点①并从点①作$\overline{\overline{ap}}$，交W的延长线于点②。从点②作$\overline{\overline{bp}}$，交R_2于点③。作①③，在图1.20(b)上从P点作①③的平行线$\overline{\overline{①③}}$，求出点C。

然后再从点a、b、c作构件AD、BD、DC的平行线，求出点d。各线段的长就是待求的桁架内力力矢的长度。

(2) 节点力的平衡

对于各节点，有

$$F_X = X_1 + X_2 + X_3 + \cdots\cdots = 0$$

$$F_Y = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \cdots\cdots = 0$$

即可求出作用在各构件的 力。

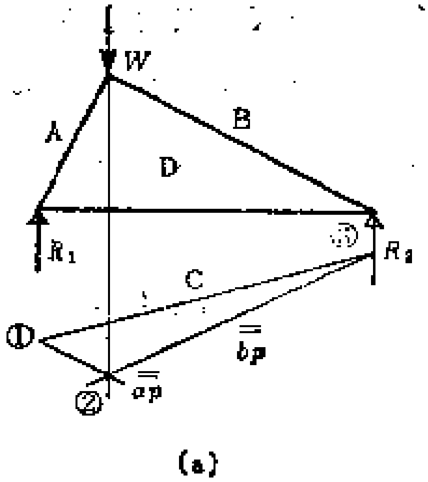


图1.20 图解法

【解说】 通常求桁架内力都是象如下例题那样合并使用图解法和计算。

【例题】 如图1.21所示，作用在桁架上的载荷有$W=400$kgf。试求反力和各构件的内力。

【解答】 用图解法作图，求出R_1和R_2。此桁架是对称桁架，故R_1和R_2相等，都等于$W/2$。

各构件的内力，由图1.21(b)，得

$$R_1 = R_2 = 200\text{kgf} = \overline{ac} = \overline{cb}$$

$$\overline{ad} = \overline{eb} = 200/\sin 30° = 400(\text{kgf})$$

$$\overline{cd} = \overline{ce} = 200/\text{tg}30° = 346.4(\text{kgf})$$

$$\overline{de} = 0$$

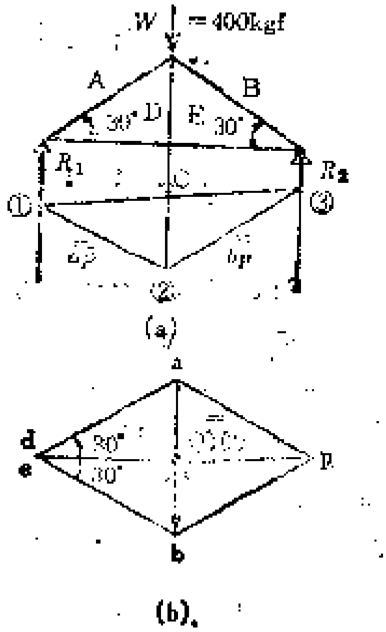


图1.21 例题图

§1.9 各种图形的重心和形心

(1) 物体重心的位置(参照附表1)

$$x=\frac{w_1x_1+w_2x_2+w_3x_3+\cdots\cdots}{W}$$

$$y=\frac{w_1y_1+w_2y_2+w_3y_3+\cdots\cdots}{W}$$

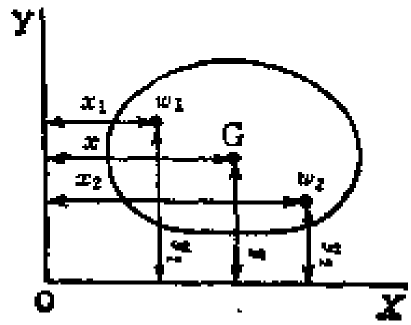


图1.22 重心和形心

w_1、w_2、w_3……：各部分的重量

(x_1, y_1)，……：各部分的位置

W：总重量

(2) 平面图形形心的位置

$$x=\frac{s_1x_1+s_2x_2+s_3x_3+\cdots\cdots}{S}$$

$$y=\frac{s_1y_1+s_2y_2+s_3y_3+\cdots\cdots}{S}$$

s_1、s_2、……：各部分面积

S：总面积

【解说】 当物体的相对密度和厚度一定时，可以将物体的重心视作平面图形的形心。

【例题】 如图1.23所示形状的零件，由均质材料制成。此零件的厚度一定。试确定其重心的位置。

【解答】 将零件分成A、B、C三部分，求出各部分的面积s_1、s_2、s_3。

$s_1 = 20 \times 10 = 200(cm^2)$

$s_2 = 10 \times 15 = 150(cm^2)$ $s_3 = 10 \times 30 = 300(cm^2)$

$$y = \frac{200 \times 30 + 150 \times 17.5 + 300 \times 5}{200 + 150 + 30}$$

$$= 15.58(cm)$$

【例题】 如图1.24所示一有圆形孔的板。试确定其重心位置。

【解答】 圆形孔是要被切掉的，故应取负值。

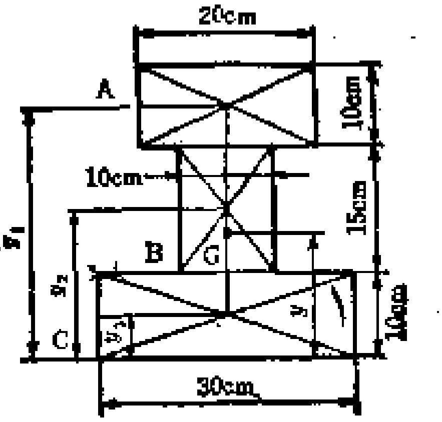


图1.23 例题图

$$x = \frac{600 \times 15 - \pi \times 6^2 \times 21}{600 - \pi \times 6^2} = 13.6(cm)$$

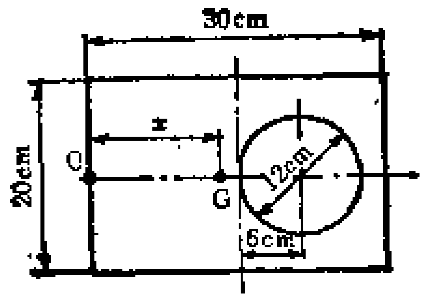


图1.24 例题图

§1.10 速度和匀加速运动

(1) 速度

$$v=\frac{s}{t}(\mathrm{m/s}) \quad (1) \qquad s=vt(\mathrm{m}) \quad (2)$$

s：移动距离(m)

t：时间(s)

(2) 加速度

$$a=\frac{v-v_0}{t}(\mathrm{m/s^2}) \qquad (3)$$

(3) 物本以初速度V_0作匀加速移动时

$$V=v_0+at \qquad (4)$$

$$s=v_0t+\frac{1}{2}at^2 \qquad (5)$$

$$V^2-v_0^2=2as \qquad (6)$$

【解说】 (1)、(2)式是作匀速运动的物体，在时间间隔 t 内移动距离 s 时的速度。(3)式的加速度a可以说是在时间间隔t内速度增量$v-v_0$的变化比例。(4)、(5)、(6)式都是当速度以一定的比例变化（匀加速）时才适用的。

【例题】 职业棒球投手都是以平均120km/h以上的速度把球投向捕手。从投手到捕手的距离是18m 问需几秒钟球才能到达捕手?

【解答】 将$v=120\times1000/3600(\mathrm{m/s})$代入变换的(1)式，得

$$t=\frac{18}{33.3}=0.54 \text{（秒）}$$

【例题】 有一汽车 0—400 加速（从开始到跑完 400m 的时间）需用20(s)。试求该汽车的加速度以及20(s)后的速度(km/h)。

【解答】 将$v_0=0$，$t=20$秒代入变换的(5)式后求得加速度。

$$a=\frac{2\times400}{20^2}=2(\mathrm{m/s^2})$$

将$v_0=0$，$a=2(\mathrm{m/s^2})$ $t=20(\mathrm{s})$代入（4）式后求得20秒后的速度。

$$v=2\times20=40(\mathrm{m/s})=144(\mathrm{km/h})$$

§1.11 落体运动

(1) 以初速度v_0向铅直下方投掷时

$$v=v_0+gt \quad (1)$$

$$h=v_0t+\frac{1}{2}gt^2 \quad (2)$$

$$v^2-v_0^2=2gh \quad (3)$$

(2) 以初速度v_0向铅直上方投掷时

$$v=v_0-gt \quad (4)$$

$$h=v_0t-\frac{1}{2}gt^2 \quad (5)$$

$$v_0^2-v^2=2gh \quad (6)$$

v_0: 初速度(m/s)

g: 重力加速度(m/s)

h: 移动距离(m)

v: t秒后的速度(m/s)

t: 时间(s)

【解说】 苹果从树上掉下来，计算中取初速度$v_0=0$。重力加速度随地域不同而多少有点不同，但通常多取值为9.8(m/s²)。

【例题】 从1000m上空落下来的物体，几秒钟以后到达地面？到达地面瞬间速度又是多少？

【解答】 将$v_0=0$，$g=9.8$，$h=1000$代入变换的(2)式后，得

$$t=\sqrt{\frac{2\times1000}{9.8}}=14.3(s)$$

将$t=14.3$，$v_0=0$，$g=9.8$代入(1)式，得

$$v=9.8\times14.3=140(m/s)$$

【例题】 从地面以初速度49(m/s)向铅直上方发射，问几秒钟以后能到达最高点？其高度距离地面又有多少米？设空气阻力忽略不计。

【解答】 将$v_0=49$，$v=0$，$g=9.8$代入(4)式求得t。由(6)式求得高度h。

$$t=\frac{49}{9.8}=5(s)$$

$$h = \frac{49^2}{2 \times 9.8} = 122.5(\text{m})$$

求出从（500＋490）（m）高处落下所需的时间，再加上 10(s)即可。

$$t = \sqrt{2 \times 990 / 9.8} = 14.2(\text{s})$$

$$10 + 14.2 = 24.2(\text{s})$$

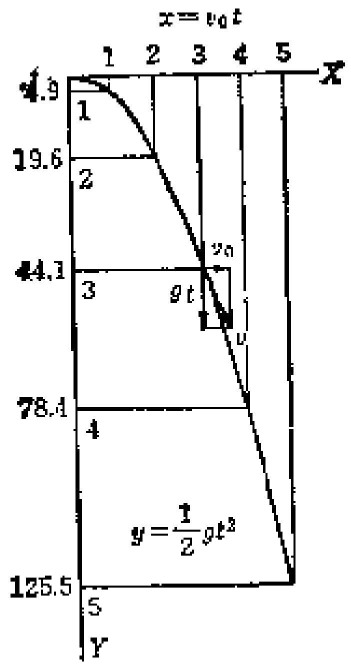


图1.25 抛物运动

§1.12 抛物运动

(1) 水平投掷时

$$x=v_0t \quad (1)$$

$$y=\frac{1}{2}gt^2 \quad (2)$$

$$v=\sqrt{v_0^2+(gt)^2} \quad (3)$$

(2) 斜上投掷时

$$x=v_0t\cos\alpha \quad (4)$$

$$y=v_0t\sin\alpha-\frac{1}{2}gt^2 \quad (5)$$

$$v_x=v_0\cos\alpha \quad (6)$$

$$v_y=v_0\sin\alpha-gt \quad (7)$$

$$v=\sqrt{v_x^2+v_y^2}$$

v_0：初速

v：t 秒后的速度

v_x：v的水平分量

v_y：v的铅直分量

α：v_0与水平之间的夹角

x：沿水平方向移动的距离

y：沿铅直方向移动的距离

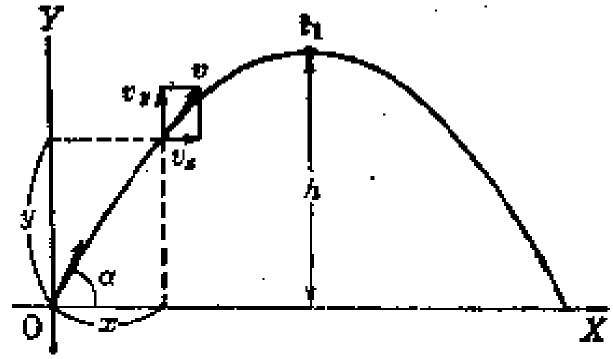


图1.26 抛物运动

【解说】 物体水平抛或斜抛时，如不计空气阻力，物体成抛物线落下。此运动称为抛物运动。若没有空气阻力，则沿水平方向的速度是一定不变的，沿铅直方向由于有重力加速度而使速度产生变化，结果形成抛物线。

【例题】 在距离地面1000m的上空有一架飞机。飞机以400km/h 的速度飞行。从此飞机上掉下一物体。试问几秒钟后物体才能落到地面？在前方多远处降落？

【解答】 由(2)式求得到达地面的时间。设$y=1000$，$g=9.8$，则有

$$t=\sqrt{\frac{2\times1000}{9.8}}=14.3(\mathrm{s})$$

用(1)式求得沿水平方向移动的距离 x。设$v_0=400\times1000/3600$

(m/s)，$t=14.3$(s) 则有

$$x=111.1\times14.3=1589(\text{m})$$

【例题】 在地面上，以初速50m/s与水平线成30°仰角上抛一球。试问能抛到距离地面多少米的高处？几秒钟以后掉到地面上？落地处距离多远？

【解答】 将$y=0$，$v_0=50$m/s，$\alpha=30°$代入(4)、(5)式，得

$$0=50\times\sin30°\times t-\frac{1}{2}\times9.8\times t^2$$

$$\therefore t=\frac{2\times50\sin30°}{9.8}=5.1(\text{s})$$

由此 $x=50\times5.1\times\cos30°=221(\text{m})$

将$v_y=0$，$v_0=50$m/s，$\alpha=30°$代入(7)、(4)式，求得t和y。

$$t=\frac{50\times\sin30°}{9.8}=2.55(\text{s})$$

$$y=50\times2.55\times\sin30°-\frac{1}{2}\times9.8\times2.55^2=31.9(\text{m})$$

【例题】 从距离地面100m的大厦楼顶，以初速20m/s沿仰角30°方向斜上抛一球。试问需几秒钟球才能掉到地面上？

【解答】 求到达地面的时间。

1) 升到最高点的时间t_1

$$t_1=\frac{v_0\sin\alpha}{g}=\frac{20\times\sin30°}{9.8}=1.02(\text{s})$$

2) 从大厦楼顶到最高点的高度h

$$h=\frac{v_0^2\sin^2\alpha}{2g}=\frac{20^2(\sin30°)^2}{2\times9.8}=5.1(\text{m})$$

故从地面到最高点的高度为105.1(m)

3) 从最高点到达地面所需时间t_2

$$t_2=\sqrt{\frac{y}{4.9}}=\sqrt{\frac{105.1}{4.9}}=4.6(\text{s})$$

4) 从大厦楼顶到达地面所需时间 t

$$t=t_1+t_2=1.02+4.6=5.62(\text{s})$$

§1.13 圆周速度与角速度、转速的关系

(1) 圆周速度与角速度

$$v=\frac{r\theta}{t} \qquad (1)$$

$$\omega=\frac{\theta}{t} \qquad (2)$$

$$v=\omega r \qquad (3)$$

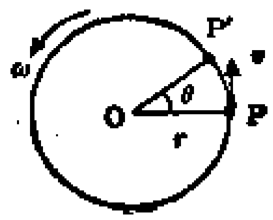


图1.27

v: 圆周速度(m/s)
r: 转动半径(m)
t: 时间(s)
ω: 角速度(rad/s)
θ: 角位移(rad)

(2) 转速与弧度

$$1^\circ=\frac{\pi}{180^\circ}(\mathrm{rad}), \quad 1\mathrm{rpm}=\frac{1}{60}\mathrm{rps}=\frac{2\pi}{60}(\mathrm{rad/s})$$

$$N(\mathrm{rpm})=\frac{2\pi N}{60}(\mathrm{rad/s}) \qquad (4)$$

N: 每分钟回转的圈数 (rpm)

【解说】 对于圆周运动来说，是用角速度作为表示速度的单位的。而角速度则表示每单位时间的转角。角速度的单位常用每秒弧度(rad/s)表示，但实际上却是每分钟圈数rpm (revolutions per minute)。

【例题】 在转动半径是100m的马路上，汽车以120km/h 的速度行驶。求此汽车的角速度。

【解答】 将$v=120\times1000/3600$(m/s)，$r=100$m代入(3)式，得

$$\omega=\frac{33.3}{100}=0.33(\mathrm{rad/s})$$

【例题】 若想对直径50mm的低碳钢圆杆以切削速度60m/min切削加工，试问车床的转速应为若干？而此时的角速度又是多少？

【解答】 将$r=25\mathrm{mm}=0.025\mathrm{m}$，$v=60\mathrm{m/min}=1\mathrm{m/s}$代入(3)式，得

$$\omega=\frac{1}{0.025}=40(\mathrm{rad/s})$$

由(4)式，得

$$N=\frac{60\times40}{2\pi}\approx382(\mathrm{rpm})$$

【例题】 试求地球自转时的角速度和圆周速度。

【解答】 将$\theta=2\pi(\mathrm{rad})$，$t=3600\times24(\mathrm{s})$，$r=6378000(\mathrm{m})$代入(2)、(3)式，得

$$\omega=\frac{2\pi}{3600\times24}=7.3\times10^{-5}(\mathrm{rad/s})$$

$$v=7.3\times10^{-5}\times6378000=466(\mathrm{m/s})$$

§1.14　匀速圆周运动和向心加速度

(1)　向心加速度

$$a=v\cdot\frac{\Delta\theta}{\Delta t}=v\omega=r\omega^2=\frac{v^2}{r}\,(\mathrm{m/s^2})\qquad(1)$$

v:　圆周速度(m/s)

$\Delta\theta$:　微小角位移(rad)

Δt:　微小时间间隔(s)

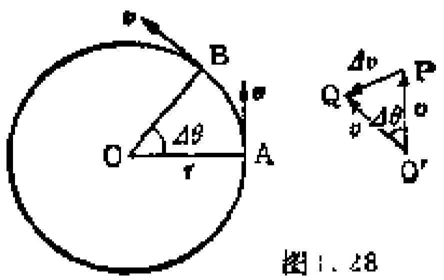


图1.28

【解说】　若物体在圆周上以一定的角速度运动，则称为匀速圆周运动。此运动，如图1.28所示，圆周速度的大小虽然是一定的，可是速度的方向不断地变化着。由于速度方向的变化而产生的加速度，被称作向心加速度。

今设在无穷小的时间间隔Δt内，速度变化Δv相当于矢量$\overrightarrow{PQ}$。因此，$PQ=\Delta v=a\Delta t$。

又，由图可知$\Delta v=v\Delta\theta$，由此二式可得$\Delta v=a\Delta t=v\Delta\theta$，又由于$v=\omega r$从而得出(1)式。

【例题】　在直径为80cm的圆周上，物体以60rpm的转速转动。试求此物体的向心加速度。

【解答】　将$r=40\mathrm{cm}=0.4\mathrm{m}$　$\omega=60\mathrm{rpm}=60\times2\pi/60$ (rad/s) 代入(1)式，得

$$a=0.4\times(2\pi)^2=15.8(\mathrm{m/s^2})$$

【例题】　汽车在转动半径为120m的马路上以200km/h的速度行驶。试求此汽车的向心加速度。

【解答】　将 $r=120\mathrm{m}$，$v=200\mathrm{km/h}=200\times1000/3600$ (m/s) 代入(1)式，得

$$a=\frac{55.6^2}{120}=25.7(\mathrm{m/s^2})$$

【例题】 地球绕太阳旋转一周需要365天。今设地球到太阳的距离为14960万km。试求地球的圆周速度和向心加速度。

【解答】 使用§1.13的(1)式求圆周速度。

$$\theta=2\pi(\mathrm{rad})$$

$$t=365\times24\times3600(\mathrm{s})=31536000(\mathrm{s})$$

$$r=149600000\mathrm{km}$$

$$v=\frac{149600000\times2\pi}{31536000}\approx30(\mathrm{km/h})$$

由(1)式求向心加速度，得

$$a=\frac{30^2}{149600000}\approx6\times10^{-6}(\mathrm{km/s^2})$$

§1.15　力和运动的关系

(1)　运动方程

$$F=ma=\frac{W}{g}a \qquad a=\frac{Fg}{W} \qquad (1)$$

$$W=mg \qquad m=\frac{W}{g} \qquad (2)$$

W：　物体重量(kgf)

m：　物体质量($kg\cdot s^2/m$)

g：　重力加速度(m/s^2)

F：　物体受到的作用力(kgf)

a：　加速度(m/s^2)

(2)　牛顿三定律

第一定律（惯性定律）若物体不受外力作用则运动状态不发生变化。

第二定律(动量定律) 若力作用在物体上，则力所产生的加速度，其大小与力的大小成比例，其方向与力的方向一致。

第三定律(作用反作用定律)物体A给物体B以作用力时，物体A从物体B处受到与作用力大小相等方向相反的反作用力.

【解说】　牛顿第二定律的数学表达式就是运动方程。

【例题】　为了使重1000kgf的汽车，从静止状态在20秒内驶完 400m的距离。设摩擦不计。试问汽车需发出多少力？

【解答】　将$v_0=0$，$t=20$(s)，$s=400$m代入§1.10(5)式，得

$$400=0\times 20+\frac{1}{2}\times 20^2\times a \qquad \therefore a=2(m/s^2)$$

将$W=1000$kgf，$a=2(m/s^2)$，$g=9.8(m/s^2)$ 代入(1)式，得

$$F=\frac{1000}{9.8}\times 2=204(kgf)$$

【例题】　某人体重为60kgf，在10秒钟内跑完了100m的距离．设以一定的比例加速，则此人连续地受到多少kgf的力连续作用呢？

【解答】　用§1.10的(5)式和(1)式求解，得

$$a=\frac{2\times 100}{10^2}=2\ (\mathrm{m/s^2})$$

$$F=\frac{60}{9.8}\times 2=12.2(\mathrm{kgf})$$

§1.16 向心力和离心力

(1) 向心力(离心力)

$$F=F'=\frac{W}{g}a=\frac{W}{g}r\omega^2=\frac{W}{g}\cdot\frac{v^2}{r} \qquad (1)$$

F: 向心力(kgf)

F': 离心力(kgf)

a: 向心加速度(m/s^2)

r: 转动半径 (m)

W: 物体重量 (kgf)

ω: 角速度 (rad/s)

g: 重力加速度 (m/s^2)

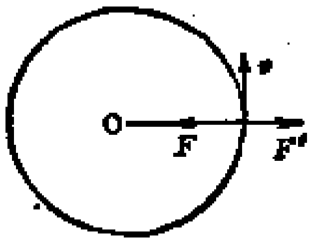


图1.29 离心力和向心力

【解说】 所谓向心力，就是能产生向心加速度的力，而离心力，是与向心力大小相等，由于惯性而方向相反的力。因而如图1.29所示，向心力F与离心力F'保持平衡。若将绳切断则向心力消失（同时离心力也消失），物体沿切线方向飞出去了。

【例题】 汽车在转动半径为10m的马路上，以60km/h的速度拐弯。汽车中有一人体重为60kgf。试问作用在此人身上的离心力是多大？

【解答】 将$r=10m$，$v=60km/h=16.7m/s$代入§1.14的(1)式中求出向心加速度，得

$$a=\frac{16.7^2}{10}=2[illegible]\ (m/s^2)$$

将$W=60kgf$，$g=9.8m/s^2$，$a=27.9m/s^2$代入(1)式，得离心力为

$$F'=\frac{60}{9.8}\times 27.9=170.8\ (kgf)$$

【例题】　重量为800kgf的汽车，在半径为50m的马路上以200km/h的速度拐弯。为防止汽车横向打滑飞出去，应使马路倾斜多少？

【解答】　如图1.30所示，因为汽车重量W、与马路相垂直的法向反力R、离心力F'三力平衡。所以

$$W\tan\theta=F'=\frac{Wv^2}{gr}$$

由此得到　$\tan\theta=\dfrac{v^2}{gr}$

即可求出倾斜角。

式中$v=200\text{km/h}=55.6\text{m/s}$

$$\tan\theta=\frac{55.6^2}{9.8\times 50}=6.3\qquad\therefore\theta=80°59'$$

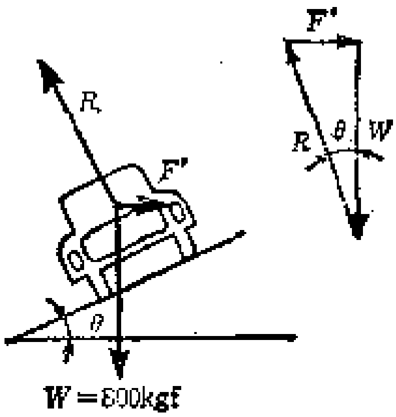


图1.30

§1.17　圆锥摆

(1) 离心力和向心力

$$F=F'=\frac{W}{g}r\omega^2 \qquad (1)$$

(2) 角速度

$$\omega=\sqrt{\frac{g}{h}}$$

$$h=\frac{g}{\omega^2} \qquad (2)$$

(3) 周期

$$T=2\pi\sqrt{\frac{h}{g}} \qquad (3)$$

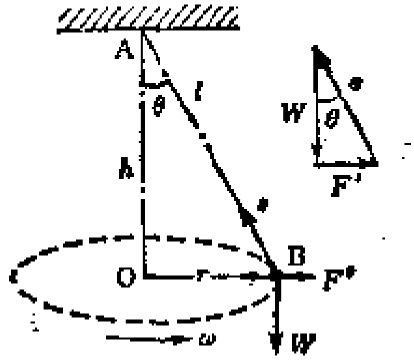


图1.31　圆锥摆

【解说】　绳上系以重物，使之运动，则绳描绘出一圆锥，称此为圆锥摆。如图1.31所示，重物处于动态之中，而绳的拉力S、重量W和离心力F'三个力互相平衡．自此平衡关系得出（1）式。

【例题】　如图1.31所示，重量为1kgf的物质以角速度6rad/s旋转着。试求圆锥摆的高度h等于多少?

【解答】　将$\omega=6$rad/s代入（2）式，得

$$h=\frac{9.8}{6^2}=0.27\ (\mathrm{m})$$

【例题】　如图1.31所示的圆锥摆，重物重量为2kgf，以角速度4rad/s旋转着。今设转动半径$r=0.5$m，试求绳的拉力。

【解答】　将$W=2$kgf、$r=0.5$m、$\omega=4$rad/s代入（1）式，得

$$F'=\frac{2}{9.8}\times0.5\times4^2=1.6\ (\mathrm{kgf})$$

由W、F和S三力平衡得

$$\tan\theta=\frac{1.6}{2}=0.8 \qquad \therefore\theta=38.66^\circ$$

$$S=\frac{1.6}{\sin 38.66^\circ}=2.56\ (\text{kgf})$$

【例题】 圆锥摆以角速度5rad/s旋转着，试求其周期T。

【解答】 由（2）、（3）式得

$$h=\frac{9.8}{5^2}\approx 0.4\ (\text{m})$$

$$T=2\pi\sqrt{\frac{0.4}{9.8}}=1.27\ (\text{s})$$

§1.18 动量和冲量

(1) 动量

$$P = mv = \frac{W}{g}v \quad (\text{kgf} \cdot \text{s}) \qquad (1)$$

P: 动量 (kgf·s)、

m: 质量 (kgf)

W: 重量 (kgf)

g: 重力加速度 (m/s^2)

v: 速度 (m/s)

(2) 冲量

$$Ft = \frac{w}{g}v - \frac{w}{g}v_0 \quad (\text{kgf} \cdot \text{s}) \qquad (2)$$

F: 作用力 (kgf)

t: 时间 (s)

v_0、v: 在力作用以前及以后的速度 (m/s)

【解说】 要使运动的物体停止时，物体的质量越大、速度越快就越难停止。由此想到用质量与速度的乘积来表示运动的激烈程度，这就是动量mv。把质量m用重力单位表示，则得$m=W/g$。另外，同样地为了表示运动的激烈程度，用了力与力的作用时间的乘积，它的数值等于动量的变化。

【例题】 重量为10kgf的物体以50m/s的速度运动，试求其动量。

【解答】 将$W=10\text{kgf}$，$v=50\text{m/s}$，$g=9.8\text{m/s}^2$代入（1）式，得

$$P = \frac{10}{9.8} \times 50 = 51 \quad (\text{kgf} \cdot \text{s})$$

【例题】 在上一题中，如有一重量为0.5kgf的子弹，也要产生那么大的动量，需要有多大的速度呢？

【解答】 将$P=51\text{kgf} \cdot \text{s}$，$W=0.5\text{kgf}$代入（1）式，得

$$51 = \frac{0.5}{9.8} \times v \qquad \therefore v = \frac{51 \times 9.8}{0.5} \approx 1000 \quad (\text{m/s})$$

【例题】 重为6kgf的物体，以10m/s的速度运动着。对此物体加上一力15kgf，力的作用时间为4秒钟，力的方向与运动方向相同。试求此物体的速度变为多少？

【解答】 将$W=6\text{kgf}$，$v_0=10\text{m/s}$，$F=15\text{kgf}$，$t=4\text{s}$代入（2）式，得

$$15\times4=\frac{6}{9.8}\times v-\frac{6}{9.8}\times10$$

$$\therefore v=\frac{15\times9.8\times4}{6}+10=108\ (\text{m/s})$$

§1.19　动量守恒定律和碰撞

（1）动量守恒定律

$$\frac{W_1}{g}u_1+\frac{W_2}{g}u_2=\frac{W_1}{g}v_1+\frac{W_2}{g}v_2 \qquad (1)$$

W_1、W_2：物体的重量（kgf）

u_1、u_2：碰撞前的速度（m/s）

v_1、v_2：碰撞后的速度（m/s）

（2）碰撞

$$v_1=u_1-\frac{W_2(u_1-u_2)}{W_1+W_2}(1+e) \qquad (2)$$

$$v_2=u_2+\frac{W_1(u_1-u_2)}{W_1+W_2}(1+e) \qquad (3)$$

e：恢复系数（$0\leqslant e\leqslant 1$，$e=1$时弹回到原来的高度。）

【解说】动量守恒定律的式（1）表示两物体（W_1、W_2）相碰撞，虽然速度的变化分别为（$u_1\to v_1$）、（$u_2\to v_2$），可是两物体动量的总和保持不变。

【例题】从重量为100kgf的小船上，沿水平方向放枪。如子弹以500m/s的速度飞行，则小船会怎样呢？设子弹重量为100gf。

【解答】将$W_1=100$kgf，$W_2=0.1$kgf，$u_1=u_2=0$，$v_2=500$m/s代入（1）式，得

$$\frac{100}{9.8}\times 0+\frac{0.1}{9.8}\times 0=\frac{100}{9.8}\times v_1+\frac{0.1}{9.8}\times 500$$

$$\therefore v_1=-\frac{0.1\times 500}{100}=-0.5\ \text{(m/s)}$$

小船沿与子弹飞行相反的方向以0.5m/s的速度运动。

【例题】重量为200gf的高尔夫球，被人用重为2kgf的高尔夫球杆以40m/s的速度打出，设恢复系数为0.7，试求球飞出的速度。

【解答】将$W_1=2$kgf，$W_2=0.2$kgf，$u_1=40$m/s，$u_2=0$，$e=0.7$代入（3）式，得

$$v_2=0+\frac{2(40-0)}{2+0.2}(1+0.7)\approx 62\ \text{(m/s)}$$

§1.20 功

(1) 沿力的方向作功〔图1.32(a)〕

$$A=F\cdot S(\mathrm{kgf\cdot m}) \qquad (1)$$

A：功（kgf·m）

F：作功的力（kgf）

S：移动距离（m）

(2) 沿力的作用线的斜方向运动时〔图1.32(b)〕

$$A=F\cdot S\cos\theta \ (\mathrm{kgf\cdot m}) \qquad (2)$$

θ：力与位移方向之间的夹角（°）

(3) 功的单位

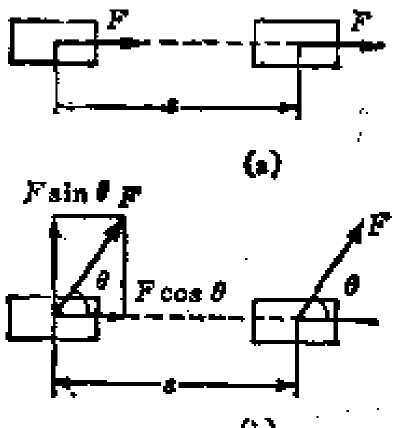


图1.32 功

工程单位制 kgf·m

国际单位制 1焦（J）=1瓦特秒（$W\cdot s$）

【解说】 在物体上作用着力F（kgf），沿力的方向移动了S（m），这时我们就说力F作功了．功等于与时间无关的力F（kgf）以及移动距离S（m）的乘积。

【例题】 某物体受到20(kgf)的力作用并沿力的方向移动了100(m)，求力所作的功是多少？

【解答】 将$F=20$kgf，$S=100$m代入（1）式，得

$$A=20\times100=2000 \ (\mathrm{kgf\cdot m})$$

【例题】 如图1.33所示，在斜面上有重为10kgf的物体与斜面平行向上移动。设斜面摩擦不计，问此物体沿斜面上升与铅直提升所作的功是否一样？

【解答】 求与斜面平行上升时作的功。为此，将 $F=10\sin 30°=5kgf$，$S=4m$ 代入（1）式，得

$$A=5\times 4=20(kgf\cdot m)$$

求铅直提升时作的功。为此，将 $F=W=10kgf$，$S=2m$ 代入(1)式，得

$$A=10\times 2=20(kgf\cdot m)$$

因此，所作的功是相同的。

【例题】 某物体，如图1.32(b)所示，受到斜向力作用，水平移动10m，设力的大小为30kgf，力与移动方向的夹角为60°（$\theta=60°$）。求力所作的功。

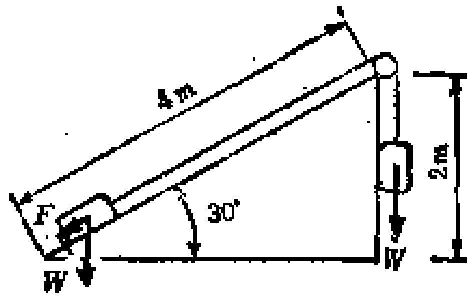


图1.33 例题图

【解答】 将 $F=30kgf$，$S=10m$，$\theta=60°$ 代入（2）式，得

$$A=30\times 10\times \cos 60°=150\ (kgf\cdot m)$$

§1.21　功率

(1)　功率

$$p=\frac{A}{t}=\frac{FS}{t}=Fv\ (\mathrm{kgf\cdot m/s})\qquad (1)$$

A：功（kgf·m）、

t：作功的时间（s）

F：作功的力（kgf）

S：移动距离（m）

v：力F的速度（m/s）

(2) 功率单位的换算

1kgf·m/s＝9.8J/s＝9.8W

1W＝0.102kgf·m/s＝1J/s

1kW＝102kgf·m/s≈1.36PS

1PS＝75kgf·m/s＝0.736kW

【解说】 所谓功率，即是每单位时间内所作的功。例如，为了要作1000kgf·m的功，甲需时50秒而乙需时100秒，则甲每秒内作功20kgf·m，而乙则每秒内作功10kgf·m。甲、乙二人作功的能力显然是不一样的。功率就是用来比较作功的能力的。

【例题】 要将重100kgf的物体在10秒内提升5m，问需功率几千瓦？

【解答】 将$F=100$kgf，$S=5$m，$t=10$s 代入（1）式，得

$$p=\frac{100\times5}{10}=50\ (\mathrm{kgf\cdot m/s})=\frac{50}{102}\approx0.5\ (\mathrm{kW})$$

【例题】 从8m深的井中，在10分钟内抽出50m³的水，问需功率几千瓦？

【解答】 将 $F=50\mathrm{m}^3=50000$kgf，$t=10$分＝600秒，$S=8$m 代入(1)式，得

$$p=\frac{50000\times8}{600}=666.7\ (\mathrm{kgf\cdot m/s})$$

$$=\frac{666.7}{102}=6.5\ (\mathrm{kW})$$

【例题】 用功率为500kW的电机车牵引重为200tf的列车，问列车的最大速度是多少？设每1tf列车重其行驶阻力为5kgf。

【解答】 将 $F=200\times5=1000$ (kgf)，$P=500\times102=51000$ (kgf·m/s) 代入 (1) 式，得

$$51000=1000\times v$$

$$\therefore v=\frac{51000}{1000}=51\ (\mathrm{m/s})\approx184\ (\mathrm{km/h})$$

§1.22 定轴转动的功和功率

(1) 功

$$A=FS=Fr\theta=T\theta \ (\mathrm{kgf\cdot m}) \quad (1)$$

F：作功的力（kgf）

S：移动距离（m）

r：转动半径（m）

θ：转角（rad）

(2) 功率

$$p=\frac{T\omega}{102}=\frac{2\pi NT}{102\times 60} \ (\mathrm{kW}) \quad (2)$$

$$p=\frac{T\omega}{75}=\frac{2\pi NT}{75\times 60} \ (\mathrm{PS}) \quad (3)$$

T：转矩（kgf·m）

ω：角速度（rad/s）

N：转速（rpm）

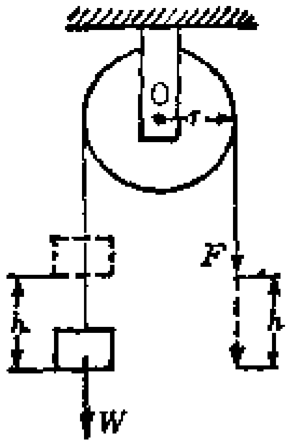


图1.34 定轴转动

【解说】 转矩是一种能产生定轴转动的力矩。如果用旋转物体的圆周速度表示其功率和功，则与§1.20、§1.21的公式相同。

【例题】 对转轴的平均转矩是100kgf·m，如此轴每分钟转120圈，问功率是多少kW？

【解答】 将$T=100\mathrm{kgf\cdot m}$，$N=120\mathrm{rpm}$代入（2）式，得

$$p=\frac{2\times\pi\times 120\times 100}{102\times 60}=12.3 \ (\mathrm{kW})$$

【例题】 电动机的转速是1200（rpm），功率是6kW，问能产生多大的转矩？

【解答】 将$P=6\mathrm{kW}$，$N=1200\mathrm{rpm}$代入（2）式，得

$$6=\frac{2\times\pi\times 1200\times T}{102\times 60}$$

$$\therefore T=\frac{6\times 102\times 60}{2\times\pi\times 1200}=4.9 \ (\mathrm{kgf\cdot m})$$

【例题】 直径200mm的齿轮以转速1000rpm传送5PS的功率，试求该齿轮的齿上所受的力。

【解答】 将 $r=\frac{200}{2}=100\text{mm}=0.1\text{m}$，$N=1000\text{rpm}$，$P=5\text{PS}$代入(3)式，设式中$T=Fr$，求出$F$。

$$5=\frac{2\times\pi\times1000\times F\times0.1}{75\times60}$$

$$\therefore F=\frac{5\times75\times60}{2\times\pi\times1000\times0.1}=35.8\ (\text{kgf})$$

§1.23 势能和动能

(1) 势能〔图1.35(*a*)〕

$$E_p=Wh \quad (\mathrm{kgf\cdot m}) \qquad (1)$$

W：物体重量 (kgf)、

h：距离基准面的高度 (m)

(2) 动能〔图1.35(*b*)〕

$$E_K=\frac{W\cdot v^2}{2g} \quad (\mathrm{kgf\cdot m}) \qquad (2)$$

v：物体的速度 (m/s)

g：重力加速度 (m/s)

(3) 弹簧的势能〔图1.35(*c*)〕

$$U=\frac{F}{2}\cdot\delta=\frac{1}{2}k\delta^2 \quad (\mathrm{kgf\cdot m}) \qquad (3)$$

δ：弹簧的伸长(缩短) (m)

K：弹簧常数(使弹簧产生单位长度的伸长或缩短所需的力)kgf/m

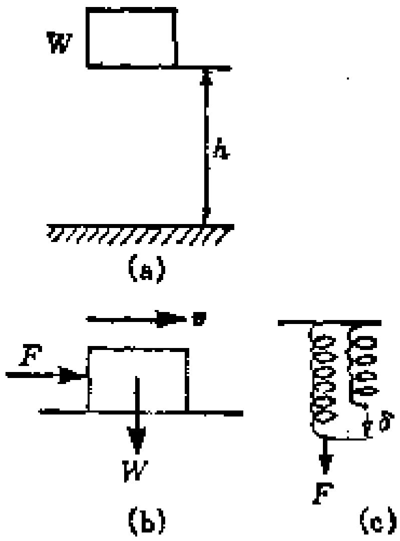


图1.35 能量

【解说】 如图 1.35 (*a*) 所示，位于h (m) 高处重为W (kgf) 的物体，储存有只降落h (m) 的能量。此种能被称作势能。发条钟表一边放出储存在发条里的能量一边使钟表走动，也同样是势能。动能是正在运动的物体，利用其拥有的惯性力的本领。

【例题】 重量为800kgf的汽车，以20m/s的速度行驶。求此动能。

【解答】 将 $W=800\mathrm{kgf}$，$v=20\mathrm{m/s}$，$g=9.8\mathrm{m/s^2}$ 代入 (2) 式，得

$$E_K=\frac{800\times20^2}{2\times9.8}=16330 \quad (\mathrm{kgf\cdot m})$$

【例题】 重量为1200kg的喷气式飞机，在高空1000m以音速 (340m/s) 飞行。试求其机械能。

【解答】 将$W=1200\mathrm{kgf}$，$h=1000\mathrm{m}$，$v=340\mathrm{m/s}$代入 (1)、(2) 式，得

$$E_P=1200\times1000=1200000 \quad (\mathrm{kgf\cdot m})$$

$$E_K=\frac{1200\times340^2}{2\times9.8}=7078000 \quad (\mathrm{kgf\cdot m})$$

因此，全部机械能$E=E_P+E_K=8278000$ (kgf·m)

§1.24 转动惯量

(1) 转动惯量

$$J=\frac{W_1}{g}r_1^2+\frac{W_2}{g}r_2^2+\cdots\cdots\ (\text{kg}\cdot\text{ms}^2) \qquad (1)$$

W_1、W_2……：小物体的重量（kgf）

r_1、r_2……：到转轴的距离（m）

g：重力加速度（m/s^2）

(2) 回转半径

$$K=\sqrt{\frac{J}{m}}=\sqrt{\frac{gJ}{m}}\ (\text{m})$$

m：质量（kg）。

W：重量（kgf）

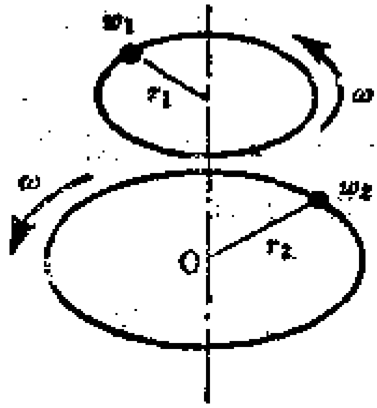


图1.36 转动惯量

(3) 简单图形的转动惯量（参考附表2）

【解说】 如图1.36所示，距离转轴O为r_1、r_2……处有重量为W_1、W_2……的小物体以相同的角速度ω转动时，小物体的全部动能可表示为$E_K=\frac{1}{2}J\omega^2$。这里，J称作转动惯量。J越大，转动就越不容易变化。

【例题】 细长杆重量为12kgf长为1m，以其重心为中心旋转。试求此细长杆的转动惯量和回转半径。

【解答】 由附表2得

$$J=\frac{12}{9.8}\times\frac{1^2}{12}=0.1\ (\text{kgf}\cdot\text{ms}^2)$$

$$K=\sqrt{\frac{1^2}{12}}=0.29\ (\text{m})$$

§1.25 杠杆的作用

(1) 力比

$$\frac{W}{F}=\frac{OA}{OB}$$

W：物体的重量（kgf）

F：作用在杠杆上的力（kgf）

OA、OB：到支点的距离（m）

(2) 速比

$$\frac{v_b}{v_a}=\frac{h}{l}=\frac{OB}{OA} \qquad (2)$$

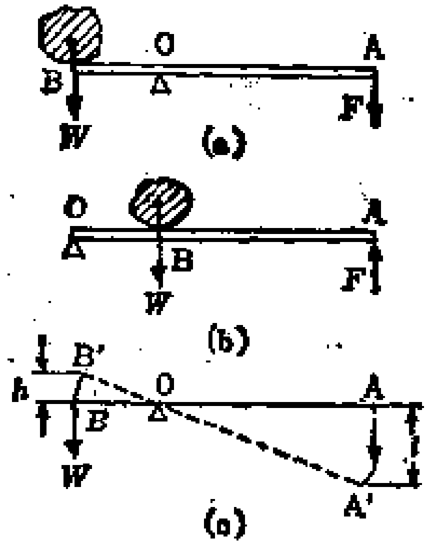


图1.37 杠杆的作用

$$(\text{力比})\times(\text{速比})=\frac{W}{F}\times\frac{h}{l}=\frac{OA}{OB}\times\frac{OB}{OA}=1 \qquad (3)$$

v_a、v_b：力和物体的移动速度（m/s）

l、h：力和物体的移动距离（m）

【解说】 自古以来人类常常利用杠杆，根据力矩的平衡原理，能用较小的力的移动很重的物体。

【例题】 使用长为1m的杆以15kgf的力，如图1.37（a）所示移动重量为90kgf的物体，问支点的位置选在那里合适？

【解答】 将$W=90$kgf，$F=15$kgf，$OA=1-OB$代入（1）式，得

$$\frac{90}{15}=\frac{1-OB}{OB}$$

$$\therefore OB=\frac{1}{7}=0.14\ (\text{m})$$

【例题】 当力比是8时，速比该是多少？

【解答】 将$\frac{W}{F}=8$代入（3）式，得

$$8\cdot\frac{h}{l}=1 \qquad \therefore\frac{h}{l}=\frac{1}{8}$$

【例题】 要利用长为2m的杠杆搬动重量为135kgf的钢琴，如图1.37（a）所示。问钢琴应当位于何处才适宜？还有，要把钢琴举高10cm，问力点A应移动多少cm？设力$F=15$kgf。

【解答】 将$W=135$kgf，$F=15$kgf，$OA=2-OB$，$h=0.1$m代入（1）、（2）式，得

$$\frac{135}{15}=\frac{2-OB}{OB} \qquad \therefore OB=0.2\ (\mathrm{m})$$

$$\frac{0.1}{l}=\frac{0.2}{1.8} \qquad \therefore l=0.9\ (\mathrm{m})$$

§1.26 轮轴的运动

(1) 轮轴

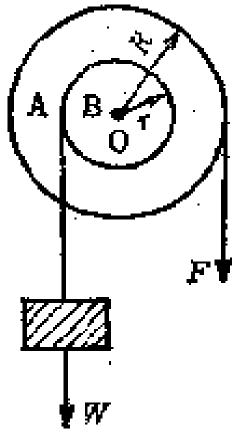


图1.38 轮轴

$$F=\frac{r}{R}W=\frac{d}{D}W \quad (\text{kgf}) \qquad (1)$$

r、d：小圆筒的半径和直径（m）

R、D：大圆筒的半径和直径（m）

W：物体的重量（kgf）

(2) 绞车

力F对轮轴所作的功（$F\pi D$）＝W所作的功（$W\pi d$）　(2)

【解说】 将半径不同的圆筒固定在同一轴上，这就是轮轴。绞车（装卸机械）也是应用这个原理的。众所周知，如图1.38中，物体重量W与力F，是按照杠杆的原理而平衡的。

【例题】 在图1.38中，$D=40\text{cm}$，$d=10\text{cm}$，设物体重量为100kgf，试求绳中拉力。

【解答】 将$d=0.1\text{m}$，$D=0.4\text{m}$，$W=100\text{kgf}$代入（1）式，得

$$F=\frac{0.1}{0.4}\times 100=25 \quad (\text{kgf})$$

【例题】 要在轮轴上用15kgf力提升重量为150kgf的物体，小圆筒的直径如为20cm，则大圆筒直径应该是多少？设摩擦略而不计。

【解答】 将$F=15\text{kgf}$，$W=150\text{kgf}$，$d=20\text{cm}$代入（1）式，得

$$15=\frac{20}{D}\times 150 \qquad \therefore D=\frac{20}{15}\times 150=200 \quad (\text{cm})$$

【例题】 如图1.38所示，$R=150\text{mm}$，$r=50\text{mm}$，绳中拉力为15kgf，试问能提升多么重的物体？

【解答】 将$R=150\text{mm}$，$r=50\text{mm}$，$F=15\text{kgf}$代入（1）式，得

$$15=\frac{50}{150}\times W \qquad \therefore W=\frac{15\times 150}{50}=45(\text{kgf})$$

【例题】 要用轮轴将重为100kgf的物体提升5m，绳中拉力为15kgf，问绳子得拉出多少米？

【解答】 根据（2）式的原理，得

$$100\times 5=15\times l \qquad \therefore l=33.3 \quad (\text{m})$$

§1.27　滑轮的运动

（1）定滑轮(图1.39)

$$\left.\begin{aligned}&\text{拉力}\quad F=W\ (\mathrm{kgf})\\&\text{功}\quad Fh=Wh\ (\mathrm{kgf\cdot m})\\&\text{力矩}\quad Fr=Wr\ (\mathrm{kgf\cdot m})\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

W：载荷(kgf)

F：力（kgf）

h：位移（m）

r：滑轮半径（m）

（2）动滑轮(图1.40)

$$\left.\begin{aligned}&\text{拉力}\quad F=W/2\ (\mathrm{kgf})\\&\text{移动距离}\quad l=2h\ (\mathrm{m})\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

（3）差动滑轮（图1.41）

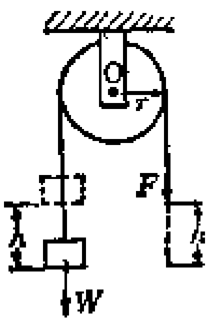


图1.39　定滑轮

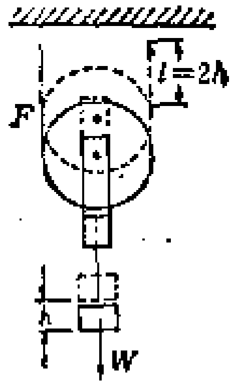


图1.40　动滑轮

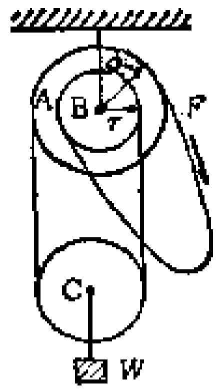


图1.41　差动滑轮

$$\text{力比}\frac{W}{F}=\frac{2R}{R-r}=\frac{2D}{D-d}\qquad(3)$$

r、R：小滑轮、大滑轮半径（m）

d、D：小滑轮、大滑轮直径（m）

【解说】　不论哪一种滑轮，主动力F所作的功与载荷W所作的功大小相等。

【例题】　使用三个动滑轮提升120kgf的重物。试求绳子的拉力并求出力比。

【解答】 由（2）式可知，使用一个动滑轮拉力减半，若使用三个动滑轮时，则

$$F=W\div2\div2\div2=\frac{W}{8}=\frac{120}{8}=15\ (\text{kgf})$$

$$力比=\frac{W}{F}=\frac{120}{15}=8$$

【例题】 如图1.41所示的差动滑轮，$R=200\text{mm}$，$r=150\text{mm}$，要提升500kgf的重物，试问加在绳子上的力F是多少？此外，要将重物提升50cm，试问绳子将移动多少米？

【解答】 将$W=500\text{kgf}$，$R=0.2\text{m}$，$r=0.15\text{m}$代入（3）式，得

$$\frac{500}{F}=\frac{2\times0.2}{0.2-0.15}\qquad\therefore F=\frac{500\times(0.2-0.15)}{2\times0.2}=62.5\ (\text{kgf})$$

根据作功的大小应该相等，得

$$500\times0.5=6.25\times l\qquad\therefore l=4\ (\text{m})$$

§1.28 摩擦力

(1) 静摩擦（图1.42）

$$f_s=\mu_s R \qquad (1)$$

μ_s：最大静摩擦系数

R：法向反力（kgf）

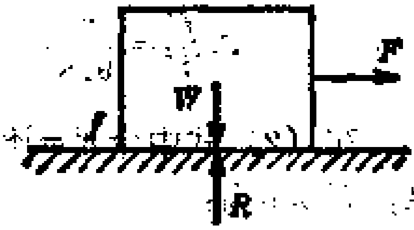


图1.42 静摩擦

(2) 动摩擦力

$$f'=\mu R \qquad (2)$$

μ：动摩擦系数

(3) 滚动摩擦（图1.43）

$$M_\rho=\rho R \qquad (3)$$

M_ρ：滚动摩擦力矩，阻碍滚动的力矩。(kgf·m)

ρ：滚动摩擦系数[1]（mm）

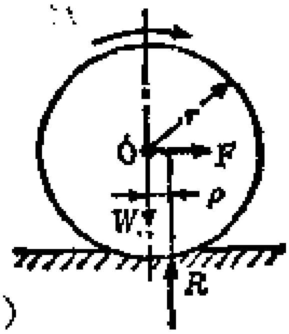


图1.43 滚动摩擦

【解说】 相互接触的两个面作相对滑动时，由于接触面的凸凹不平以及接触面上分子的凝聚力而产生摩擦力。而象气垫车那样在接触面间形成空气层，则将几乎没有摩擦而容易滑动。

【例题】 物体的最大静摩擦系数为0.15，所产生的正压力为100kgf。试求最大静摩擦力。

【解答】 将$\mu_0=0.15$，$R=100$kgf代入（1）式，得

$$f_0=0.15\times100=15\ \text{(kgf)}$$

【例题】 在水平的地面上，以速度10m/s滑动的物体，经过5秒钟以后停止了。试求物体与地面之间的动摩擦系数是多少？

【解答】 由§1.10的（3）式求出加速度（负值）。将$v_0=10$m/s，$v=0$，$t=5$（s）代入§1.10的（3）式，得

$$a=\frac{0\quad}{5}=-2\ (\text{m/s}^2)$$

其次，将§1.15的（1）式中的F代之以动摩擦力f'，得

$$f'=\frac{W}{g}a=\frac{W}{9.8}\times2$$

[1] 原著此处无单位，恐有误。——译者注。

$$\therefore \frac{f'}{W}=\frac{2}{9.8}$$

在（2）式中令$R=W$并将（2）式变换成$\mu=f'/R$，从而求得动摩擦系数μ为：

$$\mu=\frac{f'}{R}=\frac{f'}{W}=\frac{2}{9.8}=0.2$$

§1.29 有摩擦的斜面

(1) 用与斜面相平行的力使重物沿斜面上升的情况（图1.44）

$$F=W(\tan\phi\cos\theta+\sin\theta)$$

$$=W\frac{\sin(\phi+\theta)}{\cos\phi} \qquad (1)$$

F：力(kgf)

W：物体重量(kgf)

ϕ：摩擦角(°)

θ：斜面的倾斜角(°)

(2) 用与斜面相平行的力使重物沿斜面下降的情况（图1.44）

$$F=W(\mu\cos\theta-\sin\theta)=W\frac{\sin(\phi-\theta)}{\cos\phi} \qquad (2)$$

μ：物体和斜面的摩擦系数

(3) 用水平推力使重物沿斜面上升的情况(图1.45)

$$F=W\tan(\phi+\theta) \qquad (3)$$

(4) 用水平拉力使重物沿斜面下降的情况(图1.46)

$$F=W\tan(\phi-\theta) \qquad (4)$$

摩擦角：斜面的倾斜度稍微再大一点就正好要滑动，此时斜面的倾斜角即等于摩擦角。

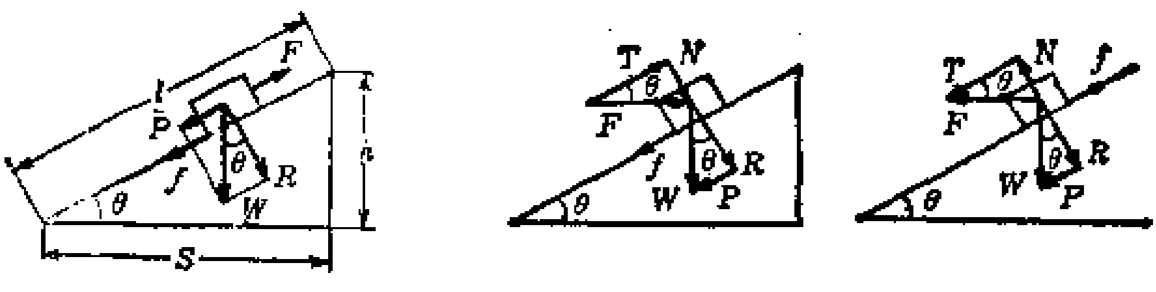


图1.44 与斜面平行的力　　图1.45 水平推力　　图1.46 水平拉力

【解说】 斜面是从修造金字塔那个时期起就常常使用的，而现在则是在螺旋方面应用这一原理。

【例题】 重量为 10kgf的物体，如图1.44所示，用与斜面相平行的力

使之沿斜面上升。现在假设，斜面的倾斜角为25°，摩擦角为11°。试求此平行力的大小。

【解答】 将$W=10$kgf，$\phi=11°$，$\theta=25°$代入(4)式，得

$$F=10\times\frac{\sin(11°+25°)}{\cos 11°}=10\times\frac{0.588}{0.982}\approx 6(\text{kgf})$$

【例题】 重量为50kgf的物体，如图1.45所示在水平推力作用下有沿斜面上升的趋势。现在假设，摩擦系数为0.3，斜面的倾斜角为30°。试求此水平推力的大小。

【解答】 将$W=50$kgf，$\theta=30°$，$\phi=\tan^{-1}\mu=\tan^{-1}0.3=16.7°$代入(3)式，得

$$F=50\tan(16.7°+30°)=53.1(\text{kgf})$$

【例题】 如图1.46所示，重量为100kgf的物体在水平拉力作用下有沿斜坡下降的趋势。现在假设，斜面的倾斜角是10°，摩擦角是12°，试求此水平拉力的大小。

【解答】 将$W=100$kgf，$\theta=10°$，$\phi=12°$代入(4)式，得

$$F=100\times\tan(12°-10°)=3.5(\text{kgf})$$

§1.30　功能原理和机械效率

（1）功能原理（损失为0时）

$$F\cdot l=Wh\ (\text{kgf}\cdot\text{m})$$

F：作用在物体上的力(kgf)

l：在力F的作用下物体移动的距离(m)

W：物体的重量(kgf)

h：物体的移动距离(m)

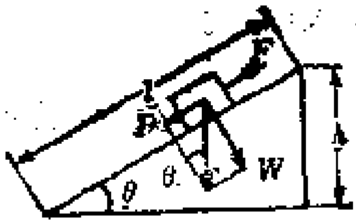


图1.47　功的原理

（2）机械的效率

$$\text{效率}(\eta)=\frac{\text{有效功}}{\text{总功}}\times 100\%=\left(1-\frac{\text{无效功}}{\text{总功}}\right)\times 100\%$$

$$=\frac{\text{有效功率}}{\text{有效功率}+\text{无效功率}}\times 100\%\qquad(2)$$

【解说】 将提供的能量全部都变成为有效功的机械是不存在的。实际情况是机械由于摩擦等等原因多少总要产生一些无效功。(1)式的条件是属于理想的情况。Fl是力所作的功，Wh是物体吸收(储存)的能量，在理想的情况下两边可以用等号相连。

【例题】 设图1.47的斜面，摩擦不计。物体重量为20kgf，斜面长为4m，倾斜角为30°。试求力所作的功。

【解答】 将$l=4$m，$F\geqslant P=W\sin\theta=20\sin 30°=10$kgf代入(1)式，得

功的大小$=Fl=10\times 4=40$(kgf·m)

【例题】 利用电动机，每分钟内将240l的水抽到高8m的大罐中去。设水泵的效率为80%，试问电动机输出的功率应该是多少千瓦？

【解答】 将效率＝80%，有效功率＝240×8/60＝32kgf·m/s代入(2)式，求出总功率。总功率＝有效功率＋无效功率。

$$80=\frac{32}{\text{总功率}}\times 100$$

$$\therefore \text{总功率}=40\text{kgf}\cdot\text{m/s}=\frac{40}{102}=0.39(\text{kW})$$

【例题】 从高100m的坝上每秒落下1000kgf的水。利用此水使发电机

发电800kW。求此发电机的效率。

【解答】 将有效功率=800kW，总功率=100×1000/102=980kW 代入(2)式，得

$$效率(\eta)=\frac{800}{980}\times 100\%=81.6\%$$

§1.31 楔

(1) 打入时

$$F=2R(\sin\theta+\tan\phi\cos\theta)$$

$$=2R\ \frac{\sin(\phi+\theta)}{\cos\phi}\ (\mathrm{kgf}) \qquad (1)$$

F：打入力(kgf)

R：正压力(kgf)

θ：楔尖端角的一半

ϕ：摩擦角

(2) 拔出时

$$F=2R(\tan\phi\cos\theta-\sin\theta)$$

$$=2R\ \frac{\sin(\phi-\theta)}{\cos\phi}\ (\mathrm{kgf}) \qquad (2)$$

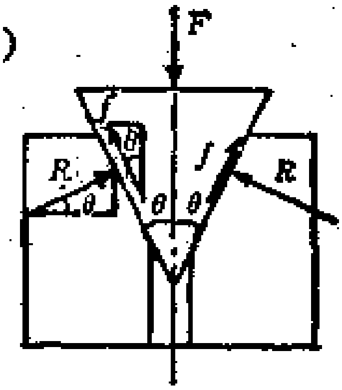


图1.48 楔

【解说】 式中$\tan\phi=\mu$是静摩擦系数，ϕ是摩擦角。在斜面上放置的物体，当斜面的倾斜角逐渐增大时就会自然下滑，此下滑瞬间斜面的倾斜角就等于摩擦角。另外由(2)式可知，如$\theta>\phi$，则楔将自然被挤出去。

【例题】 如图1.48所示，设楔的尖端角$2\theta=3^\circ$，摩擦系数为$\mu=0.2$，以3kgf的力将楔打入。试求出正压力R的大小以及拔出力的大小。

【解答】 将$\theta=1.5^\circ$，$\phi=\tan^{-1}\mu=\tan^{-1}0.2=11.3^\circ$，$F=3$kgf代入(1)式，求得正压力$R$。

$$3=2\times R\times\frac{\sin(11.3^\circ+1.5^\circ)}{\cos11.3^\circ}$$

$$\therefore R=\frac{3\times0.98}{2\times0.22}=6.7(\mathrm{kgf})$$

将$R=6.7$kgf，$\phi=11.3^\circ$，$\theta=1.5^\circ$代入(2)式求得拔出力。

$$F=2\times6.7\times\frac{\sin(11.3^\circ-1.5^\circ)}{\cos11.3^\circ}=2.33(\mathrm{kgf})$$

【参考】 利用楔的原理的有锥柄钻头、有缝夹套等等。这些都是将圆筒加工成锥形，借助摩擦阻力以传递主轴的转动。锥形的角度约为1/20，被称作莫氏锥度，此时$2\theta=\tan^{-1}0.05=2.86^{\circ}$。由于低碳钢与低碳钢的摩擦系数为0.35～0.4，因而摩擦力是足够的。

【发展】 楔的原理，在锥柄钻头等方面有所应用。另一方面，在三角皮带传动等动力传动设备上也同样被广为应用。槽轮上有三角形槽，由于楔的作用增大了摩擦力，就可以使用对于平皮带传动来说不可能使用的那样小的皮带轮。

§1.32 螺旋转动时的力和力矩

(1) 将螺旋旋紧时的力和力矩

$$F=W\tan(\phi+\theta)\ \text{(kgf)} \tag{1}$$

F: 旋紧螺旋的力(kg)

W: 载荷(kgf)

ϕ: 摩擦角

θ: 螺旋升角

$$M=F\cdot\frac{d_0}{2}=\frac{d_0}{2}W\tan(\phi+\theta)\quad \text{(kgf·m)} \tag{2}$$

M: 使螺旋转动的力矩(kgf·m)

d_0: 螺旋的平均直径(mm)

(2) 将螺旋松开时的力和力矩

$$F=W\tan(\phi-\theta)\ \text{(kgf)} \tag{3}$$

$$M=F\cdot\frac{d_0}{2}=\frac{d_0}{2}W\tan(\phi-\theta)\quad \text{(kgf·m)} \tag{4}$$

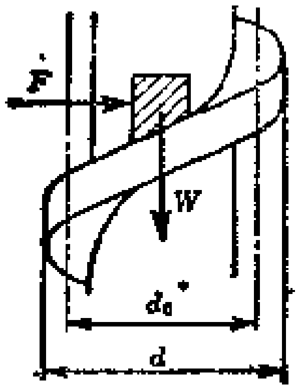


图1.49 螺旋

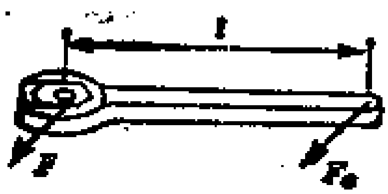


图1.50 使螺旋转动的力

(3) 利用扳手拧紧螺旋的力

$$F_e=\frac{d_0F}{2l}=\frac{M}{l}=\frac{0.2d}{l}W\ \text{(kgf)} \tag{5}$$

l: 扳手的长度(mm)

d: 螺旋的外径(mm)

【解说】 螺旋，可以认为是在圆筒的周围卷缠的斜面。因而(1)、(3)式是将§1.29的(3)、(4)式照搬过来加以使用的。在(5)式中，之所以是$M=0.2dW$，这是考虑增加上外螺纹、内螺纹或者螺母的底面等等的摩擦力的缘故。

【例题】 平均直径40mm，螺旋升角4°，摩擦角8°的螺旋。在其上放置有载荷为60kgf的物体。物体要上下移动。试求使螺旋转动的力和力矩。

【解答】 将$W=60\text{kgf}$，$\phi=8^\circ$，$\theta=4^\circ$，$d_0=40\text{mm}=0.04\text{m}$代入(1)、(2)式，可求得使物体上升的力和力矩。

$$F=60\tan(8^\circ+4^\circ)=12.8(\text{kgf})$$

$$M=12.8\times0.04/2=0.26(\text{kgf}\cdot\text{m})$$

将$W=60\text{kgf}$，$\phi=8^\circ$，$\theta=4^\circ$，$d_0=0.04\text{m}$代入(3)、(4)式，可求得使物体下降的力和力矩。

$$F=60\tan(8^\circ-4^\circ)=4.2(\text{kgf})$$

$$M=4.2\times0.04/2=0.084(\text{kgf}\cdot\text{m})$$

§1.33 简谐振动

(1) 周期

$$T=\frac{2\pi}{\omega} \qquad (s) \tag{1}$$

T：周期(s)

ω：角速度(rad/s)

(2) 频率

$$f=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi}\ (Hz) \tag{2}$$

(3) 位移

$$x=r\sin\theta=r\sin\omega t \tag{3}$$

r：振幅(cm)

θ：转角(rad)

t：时间(s)

x：x方向的位移(cm)

(4) 速度

$$v=r\omega\cos\theta=r\omega\cos\omega t\ \ (m/s) \tag{4}$$

(5) 加速度

$$a=-r\omega^2\sin\theta=-\omega^2 r\sin\theta=-\omega^2 x\ \ (m/s^2) \tag{5}$$

(6) 恢复力

$$F=\frac{W}{g}a=-\frac{W}{g}\omega^2 x \qquad (kgf) \tag{6}$$

W：物体的重量(kgf)

g：重力加速度(m/s^2)

【解说】 如图1.51(a)所示，当P点在圆周上作匀速圆周运动时，P点在x轴上的投影沿x轴方向(上、下)作一定的振动。称此种振动为**简谐振动**。

【例题】 如图1.51(a)所示的简谐振动，如振幅$r=30$cm，$\theta_1=\frac{\pi}{2}$(rad)时，试求位移是多少？另外，当$\theta_2=\pi$(rad)时，位数又是多少？

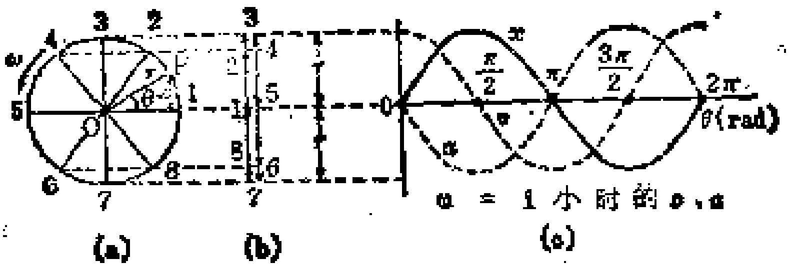


图1.51 简谐振动的位移速度、加速度

【解答】 将$r=30$cm，$\theta_1=\frac{\pi}{2}$(rad)，$\theta_2=\pi$(rad)代入(3)式，得

$$x_1=30\sin(\pi/2)=30(\text{cm})$$

$$x_2=30\sin\pi=0(\text{cm})$$

【例题】 物体作简谐振动，其角速度为2π rad/s，试求其周期是多少？

【解答】 $\omega=2\pi$(rad/s)代入(1)式，得

$$T=\frac{2\pi}{2\pi}=1 \qquad (\text{s})$$

§1.34 单摆的振动

(1) 周期

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}\ (\mathrm{s}) \tag{1}$$

T: 周期(s)

ω: 角速度(rad/s)

l: 绳长(m)

g: 重力加速度($\mathrm{m/s^2}$)

(2) 频率

$$f=\frac{n}{t}=\frac{1}{T}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}}\ (\mathrm{Hz}) \tag{2}$$

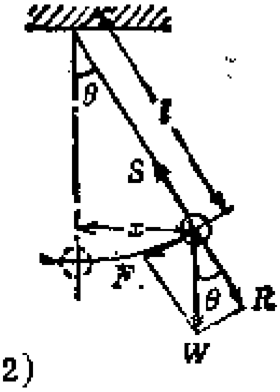


图1.52 单摆

f: 频率 (Hz)

n: 振动的次数

t: 时间 (s)

(3) 恢复力

$$F=-\frac{W}{l}x\ (\mathrm{kgf}) \tag{3}$$

W: 系在绳上的物体的重量(kgf)

x: 物体沿水平方向的位移、振幅(m)

【解说】 由于恢复力F的作用而使单摆反复地作简谐振动。如重力加速度是常数，则周期T与重物的重量、振幅等无关，由绳长来决定。

【例题】 试求长为10m的单摆的周期。

【解答】 将$l=10$m代入(1)式，得

$$T=2\pi\sqrt{\frac{10}{9.8}}=6.35(\mathrm{s})$$

【例题】 摆式钟，其周期是1秒，试求其摆长。

【解答】 将$T=1$(s)代入(1)式，得

$$1=2\pi\sqrt{\frac{l}{9.8}}$$

$$\therefore l=\frac{9.8\times 1}{4\pi^2}\approx 0.25(\text{m})$$

【例题】 重力加速度的大小，因纬度以及距海面的高度而有所不同。今在东京大学院内，长为10m 的单摆振动 80 次历时 507.8 秒。如$\pi=3.14159$，试求大学院内的重力加速度。

【解答】 将$n=80$次，$t=507.8$秒，$l=10$米代入(2)式，得

$$f=\frac{80}{507.8}=0.15754=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{10}}$$

$$\therefore g=4\pi^2\times 10\times 0.15754^2=9.79807(\text{m/s}^2)$$

§1.35　弹簧振子的振动

(1)　周期

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{W}{Kg}}=2\pi\sqrt{\frac{l-l_0}{g}}(\mathrm{s})\quad(1)$$

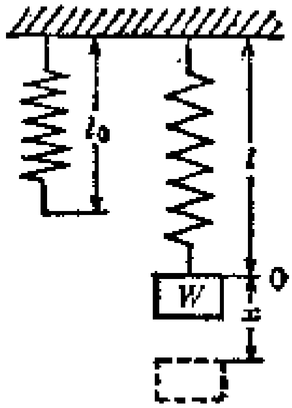


图1.53　弹簧振子

T：周期(s)

ω：角速度(rad/s)

W：载荷(kgf)

K：弹簧常数(kgf/cm)

l、l_0：弹簧长度(cm)

(2)频率

$$f=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{Kg}{W}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l-l_0}}\quad(\mathrm{Hz})$$

f：频率(Hz)

(3)恢复力

$$F=-Kx\ (\mathrm{kgf})$$

F：恢复力(kgf)

x：弹簧的位移(cm)

【解说】　给弹簧系上重物W，再拉开x远，如图1.53所示，以0为中心上下作往复运动。称这样的振子为弹簧振子。弹簧振子的恢复力与将重物拉开的距离x成正比例，此定律称为虎克定律。

【例题】　在螺旋弹簧上系一重为4kgf的重物。弹簧常数是2kgf/cm。再从平衡位置上稍稍拉开一点，释放后开始振动。试求此弹簧振子的周期和频率。

【解答】　将$K=2$kgf/cm，$W=4$kgf，$g=980\mathrm{cm/s^2}$代入(1)、(2)式，得

$$T=2\pi\sqrt{\frac{4}{980}}=0.28(\mathrm{s})$$

$$f=\frac{1}{0.28}=3.57(\mathrm{Hz})$$

【例题】 设弹簧常数为1kgf/cm的弹簧振子其周期为1秒。试求弹簧上所系重物的重量是多少？并求出频率。

【解答】 将$T=1(s)$，$K=1kgf/cm$代入(1)、(2)式，得

$$1=2\pi\sqrt{\frac{W}{1\times 980}}\quad \therefore W=\frac{980}{4\pi^2}=24.8(kg)$$

$$f=\frac{1}{1}=1(Hz)$$

§1.36 扭转振子

(1) 周期

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{J}{K_t}}=2\pi\sqrt{\frac{Jl}{GI_p}}(s) \qquad (1)$$

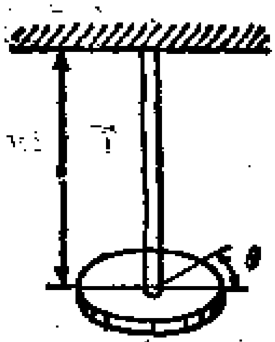


图1.54 扭转振子

T：周期(s)

ω：角速度(rad/s)

K_t：扭转弹簧常数(kgf/cm)

J：圆盘对于中心轴的转动惯量(kgf·cms²)

I_p：扭轴截面的极惯性矩(cm⁴)

G：剪切弹性模量(kgf/cm²)

l：扭轴的长度(cm)

(2) 频率

$$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_t}{J}}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{GI_p}{Jl}}(\mathrm{Hz}) \qquad (2)$$

(3) 恢复力矩

$$M=J\alpha=K_t\theta(\mathrm{kgf\cdot m}) \qquad (3)$$

α：角加速度(rad/s²)

θ：扭转角(rad)

【解说】 扭转振子力求恢复原来位置的力矩M是恢复力矩。M可用转动方程去求。由于M与转角θ成正比例，令比例常数为K_t，则得出式(3)。由此式(3)可导出(1)、(2)式。

【例题】 一扭轴，其扭转弹簧常数为6.6kgf/cm。在扭轴的一端固定连接一圆盘。圆盘对扭轴的转动惯量为0.51kgf·cms²。圆盘作简谐振动。试求其频率和周期。

【解答】 将K_t=6.6kgf/cm，J=0.51kgf·cms²代入(1)、(2)，得

$$T=2\pi\sqrt{\frac{0.51}{6.6}}\quad 1.75(s)$$

$$f=\frac{1}{1.75}=0.57(\mathrm{Hz})$$

【例题】 一钢丝，其扭转弹簧常数为10kgf/cm，在其一端固定连结一圆盘，组成扭转振子。如其频率为2Hz，试求此圆盘的转动惯量与周期。

【解答】 将$K_t=10\text{kgf/cm}$，$f=2\text{Hz}$代入(2)式和(1)式，得

$$2=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{10}{J}}\quad\therefore J=\frac{10}{4\pi^2\times 2^2}=0.063(\text{kgf}\cdot\text{cms}^2)$$

$$T=2\pi\sqrt{\frac{0.063}{10}}\approx 0.5(\text{s})$$

第二章　材料力学

§2.1　应力(应力强度)

(1)　拉伸(压缩)应力σ(kgf/cm²)的产生

$$\sigma=\frac{P}{A}\qquad(\mathrm{kgf/cm^2})\tag{1}$$

(2)　剪应力 τ (kgf/cm²)的产生

$$\tau=\frac{P}{A}\qquad(\mathrm{kgf/cm^2})\tag{2}$$

P：从外部作用在材料（物体）上的拉伸（压缩、剪切）载荷（kgf）

A：截面积（cm²）

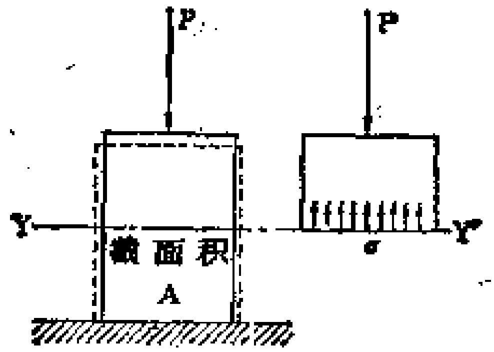


图2.1　压缩载荷

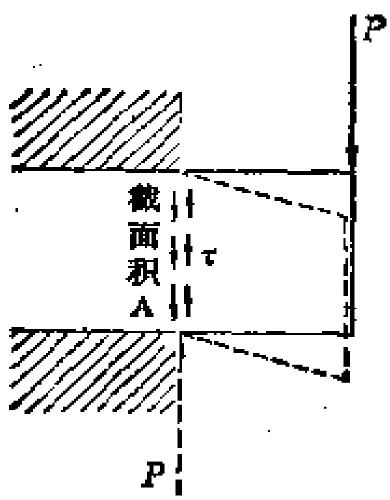


图2.2　剪应力

【解说】 如果载荷P（kgf）从外部作用在材料（物体）上，则在材料内部产生大的变形以抵抗该力（载荷P），使材料不发生破坏所产生的抵抗力σ（kgf/cm^2）或τ（kgf/cm^2）和外力P相平衡。将这个抵抗力称为应力或应力强度。将σ称为拉伸（压缩）应力，τ称为剪应力。

【例题】 5000kgf的应力作用在边长为2cm的软钢制的方杆上，求产生在材料内部的应力（应力强度）σ是多少？

【解答】 将$P=5000$kgf，$A=2\times2(cm^2)$代入(1)式，得

$$\sigma=\frac{P}{A}=\frac{5000}{4}=1250(kgf/cm^2)$$

【例题】 将25000kgf的剪切载荷加在圆杆上，使材料内产生400kgf/cm²的剪应力，问该圆杆的直径应为多少才合适？

【解答】 将$P=25000$kgf，$\tau=400kgf/cm^2$代入变换的(2)式，得

$$A=\frac{P}{\tau}=\frac{25000}{400}=62.5\ (cm^2)$$

如果求圆杆的直径d(cm)，则变换$A=\frac{\pi}{4}d^2$，得

$$d=\sqrt{\frac{4A}{\pi}}=\sqrt{\frac{4\times62.5}{\pi}}=8.921\ (cm)$$

§2.2　弹性模量

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}=\frac{PL}{Al}\ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

E：弹性模量（$\mathrm{kgf/cm^2}$）

σ：拉伸（压缩）应力（$\mathrm{kgf/cm^2}$）

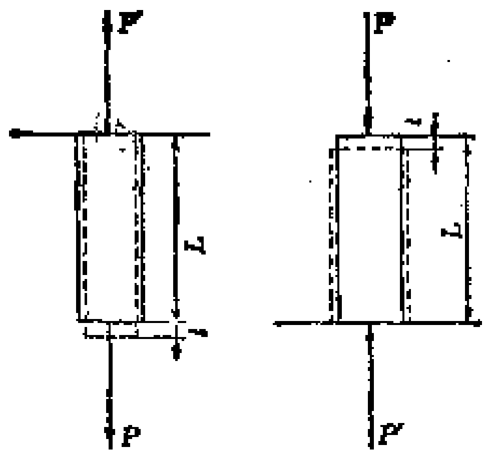
ε：应力方向的应变ε $=\frac{l}{L}$

P：拉伸（压缩）载荷（kgf）

L：材料的原长(cm)

l：伸长（拉伸）或缩短（压缩）的长度（cm）

A：截面积($\mathrm{cm^2}$)



(a) 拉伸　　(b) 压缩

图2.3　载荷引起的变形

【解说】据虎克定律，在比例界限范围内，产生于材料内的拉伸（压缩）应力σ与其对应方向的应变（单位长度的伸长或缩短）ε成正比例，即

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon}\ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

将该比例常数E称为弹性模量（杨氏模量、杨氏比率）。

【例题】需要多少拉力才能使直径为2cm，长度为200cm的软钢制的圆杆伸长0.1cm，设弹性模量$E=2.1\times10^6(\mathrm{kgf/cm^2})$

【解答】将$A=\frac{\pi}{4}\times2^2=\pi(\mathrm{cm^2})$，$L=200\mathrm{cm}$，$l=0.1\mathrm{cm}$，$E=2.1\times10^6\ \mathrm{kg/cm^2}$代入变换的上式，得

$$P=\frac{EAl}{L}=\frac{2.1\times10^6\times\pi\times0.1}{200}=3299\ (\mathrm{kgf})$$

【发展】如图所示将拉伸载荷加到材料上，在拉伸方向产生伸长的同时在垂直于载荷的方向缩短。该纵向（拉伸方向）应变ε和横向应变ε'之比为m

$$m=\frac{\varepsilon}{\varepsilon'}$$

m称为泊松系数，其倒数$1/m$称为泊松比。

§2.3 剪切弹性模量

$$G=\frac{\tau}{\gamma}=\frac{PL}{A\lambda_s}=\frac{P}{A\phi}\ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

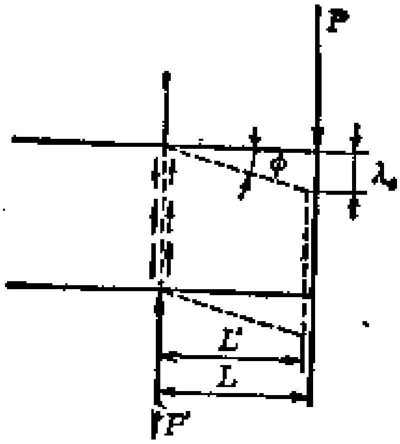


图2.4 剪切

G：剪切弹性模量$(\mathrm{kgf/cm^2})$

τ：剪应力$(\mathrm{kgf/cm^2})$

γ：剪应力方向的剪应变

$$\gamma=\frac{\lambda_s}{L}\approx\phi$$

P：剪切载荷(kgf)

L：材料的原长(cm)

A：截面积$(\mathrm{cm^2})$

λ_s：由剪切载荷引起的长度变化(cm)

ϕ：由剪切载荷引起的角度变化(rad)

【解说】 据虎克定律，剪应力τ及其对应方向的剪应变γ之比为

$$G=\frac{\tau}{\gamma}\ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

G称为剪切弹性模量。

【例题】 将500kgf的剪切载荷加在一截面的边长为4cm的软钢制的方杆上，求剪应变是多少弧度？设剪切弹性模量$G=0.81\times10^6(\mathrm{kg/cm^2})$。

【解答】 将$G=0.81\times10^6(\mathrm{kgf/cm^2})$，$P=500\mathrm{kgf}$，$A=4\times4=16(\mathrm{cm^2})$代入变换的上式，得

$$\phi=\frac{P}{AG}=\frac{500}{16\times0.81\times10^6}\approx0.00003858\ (\mathrm{rad})$$

【例题】 若使剪切弹性模量（横弹性模量）为350000kgf/cm²的铸铁，产生0.0005rad的剪应变时，求需要多少剪应力？

【解答】 将$G=350000\mathrm{kgf/cm^2}$，$\gamma=0.0005\mathrm{rad}$代入上面的变换公式，得

$$\tau=\gamma G=0.0005\times350000=175\ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

§2.4 热应力

$$\sigma=\varepsilon E=\alpha(t_1-t_2)E \quad (\mathrm{kgf/cm^2})$$

σ：热应力（温度从t_1℃变化到t_2℃时在材料内部产生的应力）（kgf/cm²）

ε：由于温度变化产生的应变

E：弹性模量（kgf/cm²）

α：线膨胀系数

t_1-t_2：温度变化

$t_1>t_2$（σ为正）——拉伸应力

$t_1<t_2$（σ为负）——压缩应力

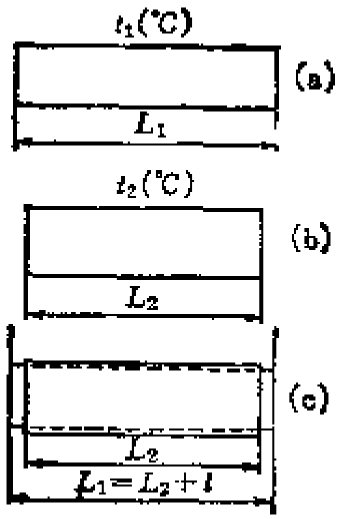


图2.5 热应力

【解说】 物体（材料）一加热就膨胀，一冷却就收缩。将这种材料在t_1℃时不产生伸长或缩短的条件下使其固定，一加热到t_2℃就阻碍材料的膨胀而和加压缩载荷一样；相反的一冷却就阻碍材料的收缩而和加拉伸载荷一样。这种由于材料内部的温度变化而产生的应力称为热应力。

【例题】 将直径为 3cm的软钢杆两端固定，使温度升高 60℃时杆的应力是多少？设$E=2100000(\mathrm{kgf/cm^2})$，$\alpha=0.000012$。

【解答】 将$\alpha=0.000012$，$t_1-t_2=60$℃，$E=2100000\mathrm{kgf/cm^2}$ 代入

上式，得

$$\sigma=\alpha\ (t_1-t_2)\ E=0.000012\times60\times2100000$$
$$=1512\ (kgf/cm^2)$$

【例题】 直径为 3cm的软钢杆从常温加热升高 30℃后，将两端固定在墙壁上再冷却到常温。这时产生在杆内的拉伸应力和加在墙壁上的力是多少？设软钢的线膨胀系数 $\alpha=0.000012$，弹性模量 $E=2.1\times10^6$ (kgf/cm²)。

【解答】 将 $\alpha=0.000012$，$E=2.1\times10^6$ (kgf/cm²)，$t_1-t_2=30$℃代入上式，得

$$\sigma=\alpha(t_1-t_2)E=0.000012\times30\times2.1\times10^6=756(kgf/cm^2)$$

将 $A=\dfrac{\pi}{4}\times3^2=7.070$ (cm²)代入变换的 $\sigma=\dfrac{P}{A}$ 的公式，得

$$P=A\sigma=7.070\times756=5345\ (kgf)$$

§2.5　安全系数

$$(\text{安全系数})=\frac{\text{材料的极限应力}}{\text{许用应力}}\quad \text{或} \quad S=\frac{\sigma_B}{\sigma_A}$$

【解说】　如果在材料内部产生较大应力，超过材料的弹性极限，则其材料可能破坏也可能产生永久变形，此时作为机械和结构的部件将不起作用。此外，即使在弹性极限内由于长时间地作用着重复载荷，有时也发生疲劳破坏。故在实际使用中，考虑了上述种种条件，还认为是安全的最大应力称为许用应力或使用应力。

材料的极限应力，以前是使用材料破坏时的应力（拉伸强度）；但现在对脆性材料取拉伸强度（强度极限），对软钢和合金钢之类的塑性材料取屈服极限。

材料的极限应力和许用应力之比称为安全系数。

【例题】　使3140kgf的拉伸载荷作用在直径为2cm、拉伸强度为4000 kgf/cm²的圆杆上时，试求安全系数。

【解答】　将$P=3140\text{kgf}$，$A=\dfrac{\pi}{4}\times 2^2=3.142(\text{cm}^2)$代入$\sigma=\dfrac{P}{A}$的式中，求工作应力。

$$\sigma=\frac{P}{A}=\frac{3140}{3.142}=999.4(\text{kgf/cm}^2)$$将该σ值代入上式，

得
$$S=\frac{\sigma_B}{\sigma_A}=\frac{4000}{999.4}=4.002$$

【例题】　设某材料的拉伸强度为4800kgf/cm²，安全系数为5，试求许用应力。

【解答】　将$S=5$，$\sigma_B=4800\text{kgf/cm}^2$代入变换的上式，得

$$\sigma_A=\frac{\sigma_B}{S}=\frac{4800}{5}=960\ (\text{kgf/cm}^2)$$

注意　在实际中将材料作为机械零件使用时，必须考虑安全系数。按着实验和经验得到的钢铁许用应力收录在附表 3 中。

§2.6 周向应力（薄壁圆筒）

$$\sigma_2=\frac{PD}{2t}\quad(\mathrm{kgf/cm^2})$$

σ_2：周向应力（使圆筒和管纵向开裂的应力）（$\mathrm{kgf/cm^2}$）

P：作用在纵向（含轴）断面上的内压力（$\mathrm{kgf/cm^2}$）

D：圆筒（管）的内径（cm）

t：圆筒（管）的壁厚（cm）

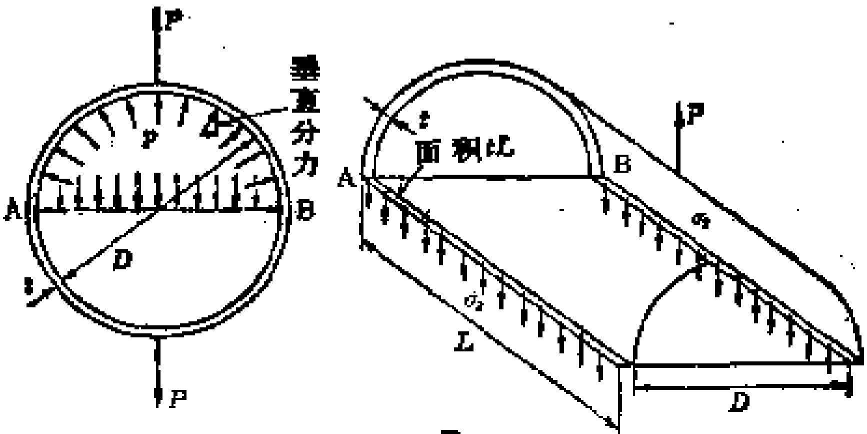


图2.6 薄壁圆筒（$t<\frac{D}{20}$）上下开裂的力

【解说】 在图2.6中，因为使圆筒上下开裂的力P(kgf)是作用在AB断面上内压力p($\mathrm{kgf/cm^2}$)的合力，设圆筒的长度为L，则

$$P=pDL\quad(\mathrm{kgf})$$

此外，产生拉应力σ_2的截面积是2tL（$\mathrm{cm^2}$）该应力的总和$2tL\sigma_2$(kgf)和P相平衡，所以

$$2tL\sigma_2=pDL$$

应力σ_2称为周向应力

【例题】 圆筒的壁厚为5mm，内径为30cm，试求当承受7$\mathrm{kgf/cm^2}$内压力时的周向应力。

【解答】 将$t=0.5\mathrm{cm}$，$D=30\mathrm{cm}$，$p=7\mathrm{kgf/cm^2}$代入上式，则

$$\sigma_2=\frac{pD}{2t}=\frac{7\times30}{2\times0.5}=210\quad(\mathrm{kgf/cm^2})$$

注：薄壁圆筒（$t<\frac{1}{20}D$）的轴向应力$\sigma_1=pD/4t$($\mathrm{kgf/cm^2}$)

§2.7 厚壁圆筒的周向应力

$$\sigma_{\theta}=\frac{p r_1^2(r_2^2+r^2)}{r^2(r_2^2-r_1^2)}(\mathrm{kgf/cm^2}) \tag{1}$$

σ_{θ}：距中心任意半径 r $(r_1<r<r_2)$(cm)处的周向应力 (kgf/cm²)

r_1：从中心到内壁的半径(cm)

r_2：从中心到外壁的半径(cm)

p：内压(kgf/cm²)

在内壁上产生最大的周向应力 σ_{max} (kgf/cm²)。设 $r=r_1$，得

$$\sigma_{max}=p\frac{r_2^2+r_1^2}{r_2^2-r_1^2}\ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

$$\text{或}\ \frac{r_2}{r_1}=\sqrt{\frac{\sigma_{max}+p}{\sigma_{max}-p}} \tag{2}$$

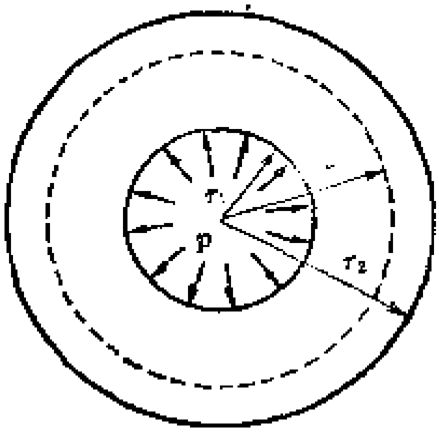


图2.7 厚壁圆筒

【解说】 与内径相比壁厚较大的圆筒称为厚壁圆筒。厚壁圆筒由于内压力的作用，在材料内产生的应力是不同的，在内壁处应力最大，随着向外侧的移动应力减小，在外壁处应力最小。

【例题】 设圆筒内径为 20cm，壁厚 3cm，许用应力 $\sigma_a=600$kgf/cm²，试问该圆筒能承受多少内压？

【解答】　将 $\sigma_{max}=\sigma_a=600\ \mathrm{kgf/cm^2}$，$r_1=10\mathrm{cm}$，$r_2=10+3=13$ (cm) 代入变换的(2)式，得

$$p=\frac{\sigma_{max}(r_2^2-r_1^2)}{r_2^2+r_1^2}=\frac{600(13^2-10^2)}{13^2+10^2}=153.9$$

$(\mathrm{kgf/cm^2})$

【例题】　两端封闭的厚壁圆筒，其外径为 25cm，内径为 15cm，当作用1500kgf/cm²内压时，产生的最大周向应力是多少？

【解答】　将 $r_2=12.5\ \mathrm{cm}$，$r_1=7.5\ \mathrm{cm}$，$p=1500\ \mathrm{kgf/cm^2}$代入(2)式，得

$$\sigma_{max}=p\frac{r_2^2+r_1^2}{r_2^2-r_1^2}=1500\times\frac{12.5^2+7.5^2}{12.5^2-7.5^2}=3188$$

$(\mathrm{kgf/cm^2})$

§2.8　弹性能

$$U=\frac{1}{2}pl=\frac{\sigma^2}{2E}AL\ \ (\mathrm{kgf\cdot cm})$$

U：储存在材料内部的弹性能量

P：加在材料上的载荷(kgf)

l：由载荷引起的伸长(cm)

σ：材料产生的应力(kgf/cm²)

A：材料的原截面积(cm²)

L：材料的原长度(cm)

E：弹性模量(kgf/cm²)

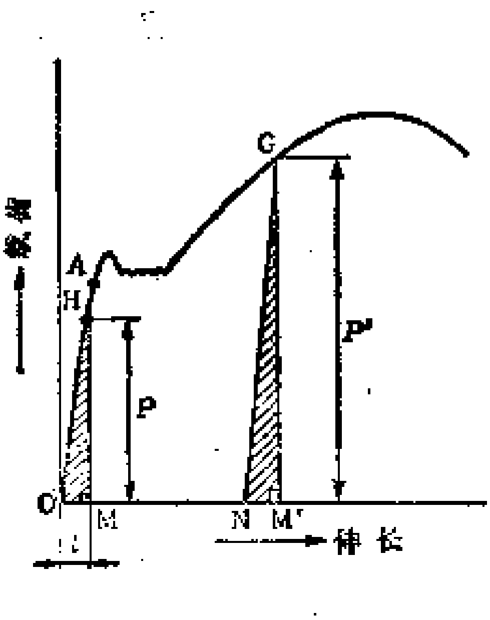


图2.8　弹性变形

【解说】　据虎克定律，在弹性极限内（严格的说是在比例极限范围内），由载荷引起的伸长与载荷成正比。一去掉载荷材料就恢复到原形。载荷加到材料上，在材料的内部就储存有能量，由于去掉载荷放出能量，就可以认为恢复到了原长。将该能量称为弹性能或弹性变形能。

图2.8是表示载荷P（kgf）加在等截面的软钢杆上产生的伸长l（cm）。这时弹性能的大小等于△OHM的面积，所以

$$U=\frac{1}{2}pl=\frac{1}{2}\sigma A\times\frac{\sigma L}{E}=\frac{\sigma^2}{2E}AL\ \ (\mathrm{kgf\cdot cm})$$

【例题】　设截面积为5cm²，长度为50cm的软钢杆的弹性极限为2000kgf/cm²，弹性模量 $E=2100000$kgf/cm²，可以储存多少弹性能？

【解答】　将 $\sigma=2000$kgf/cm²，$E=2100000$kgf/cm²，$A=5$cm²，$L=50$cm代入上式，得

$$U=\frac{\sigma^2}{2E}AL=\frac{2000^2}{2\times2100000}\times5\times50=238.1(\mathrm{kgf\cdot cm})$$

【发展】　当所加的载荷比材料的弹性极限大时，载荷与伸长不成比例。储存的弹性能等于△NGM'的面积。ON是残留的永久变形。

§2.9 剪力图和弯矩图(集中载荷作用在悬臂梁上)

(1) 反力

$$R_A = W_1 + W_2 \text{(kgf)} \quad (1)$$

R_A: 反力(kgf)

W_1、W_2: 集中载荷(kgf)

(2) 剪力

BC间 $F_1 = W_1$ (kgf)

$$= R_A - W_2 \text{ (kgf)} \quad (2)$$

AC间 $F_2 = W_1 + W_2$(kgf)

$$= R_A \text{ (kgf)} \quad (3)$$

F_1、F_2: 作用在梁上的剪力(kgf)

(3) 弯矩

$$M_{max} = W_1 l_1 + W_2 l_2 \text{ (kgf·cm)} \quad (4)$$

M_{max}: 作用在梁上的最大弯矩(kgf·cm)

l_1、l_2: 从梁的支点到集中载荷的距离(cm)

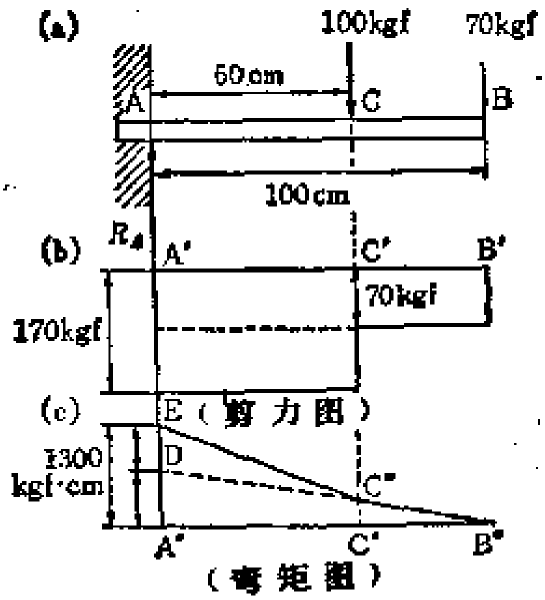


图2.9 受两个集中载荷的悬臂梁

【解说】　如图2.9(a)所示，在悬臂梁上作用着两个集中载荷．固定端（支点）产生的反力R_A，因力的平衡，所以可由(1)式求出．作用在梁上的剪力在BC间〔$F_1=R_A-W_2$ (kgf)〕和在AC间〔$F_2=R_A$ (kgf)〕是不同的．如果分析载荷W_1(kgf)和W_2(kgf)所产生的弯矩，假如只作用W_1(kgf)时，弯矩图成直角三角形A′′B′D′，最大弯矩发生在固定端等于W_1l_1 (kgf·cm)；同样只作用W_2 (kgf)时，弯矩图成直角三角形D′C′E，若将两个三角形合成就能够求得弯矩图．

【例题】　两个集中载荷作用在图2.10(a)所示的悬臂梁上，试求固定端的反力，并画出剪力图和弯矩图．

【解答】　将$W_1=70$kgf，$W_2=100$kgf代入(1)式，得

$$R_A=W_1+W_2=70+100=170\ (\text{kgf})$$

BC间的剪力　$F_1=-W_1=-70$ (kgf)

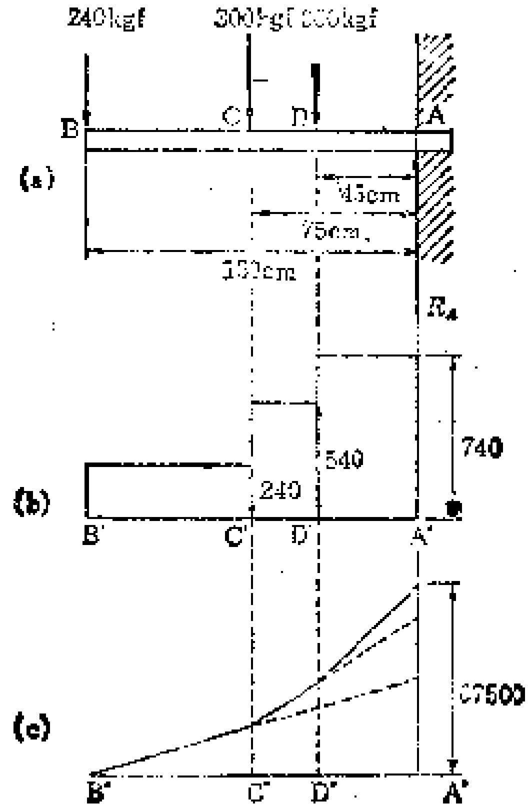


图2.10

CD间的剪力　$F_2=-(W_1+W_2)=-(70+100)=-170$(kgf)

注：作用在梁上的剪力的方向因和图2.9的例子相反所以得－（负）．

在弯矩图中，将$l_1=100$cm，$l_2=60$cm代入(4)式，得

$$M_{max}=W_1l_1+W_2l_2=70\times100+100\times60=13000(\text{kgf·cm})$$

【例题】 3个集中载荷作用在图2.11(a)所示的悬臂梁上，试求固定端反力，并画出剪力图和弯矩图。

【解答】 将$W_1=240\text{kgf}$，$W_2=300\text{kgf}$，$W_3=200\text{kgf}$代入(1)式，得

$$R_A=W_1+W_2+W_3=240+300+200=740(\text{kgf})$$

BC间的剪力 $F_1=W_1=240\ (\text{kgf})$

CD间的剪力 $F_2=W_1+W_2=240+300=540(\text{kgf})$

AD间的剪力 $F_3=W_1+W_2+W_3=740(\text{kgf})$

将$l_1=150\text{cm}$，$l_2=75\text{cm}$，$l_3=45\text{cm}$代入(4)式，得

$$M_{max}=W_1l_1+W_2l_2+W_3l_3$$
$$=240\times150+300\times75+200\times45=67500(\text{kgf}\cdot\text{cm})$$

将上面的结果归纳成图2.11。

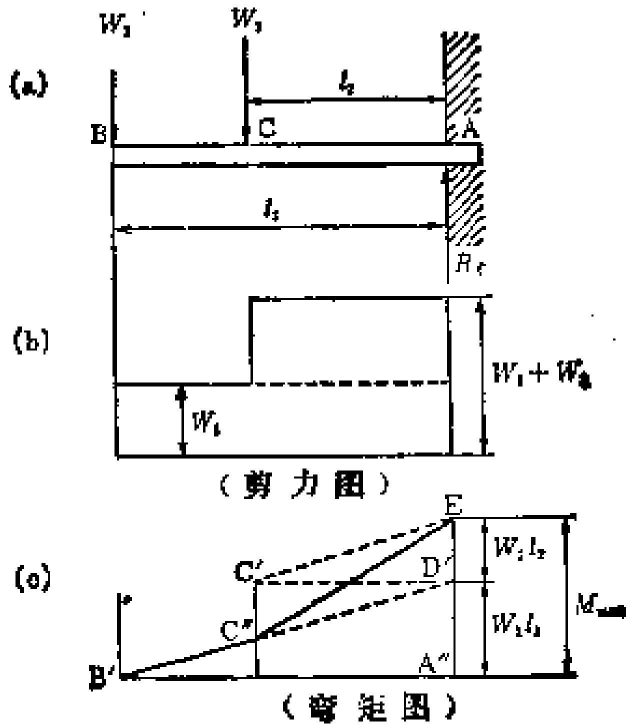


图2.11

【发展】 由于集中载荷的作用而在梁上产生的剪力，无论在集中载荷间选取哪个截面都是相等的。

弯矩与离开载荷的距离x (cm)成正比地增加或减少。因此加一个载荷时曲线图变成直线图，加n个集中载荷时的曲线图，将成为有$n-1$个转折点的某一折线曲线图。

§2.10 剪力图和弯矩图(均布载荷作用在悬臂梁上)

(1)反力

$$R_A = wl \ \text{(kgf)} \qquad (1)$$

R_A：反力(kgf)

w：均布载荷(kgf/cm)

l：跨度(cm)

(2) 剪力

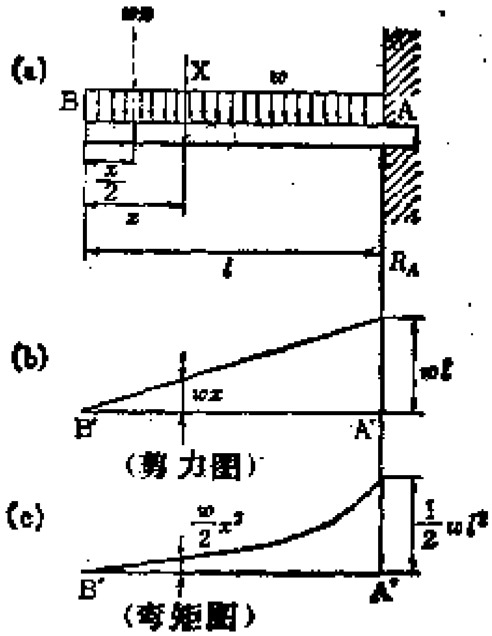


图2.12 受均布载荷的悬臂梁

$$F_x = wx \ \text{(kgf)} \qquad (2)$$

F_x：离开自由端Bx(cm)距离，作用在x截面上的剪力(kgf)

x：从自由端B到x截面的距离(cm)

(3) 弯矩

$$M_{max} = \frac{wl^2}{2} \ \text{(kgf·cm)} \qquad (3)$$

M_{max}：最大弯矩(kgf·cm)

【解说】 如图2.12(a)所示，当着均布载荷w(kgf/cm)作用在长度为l(cm)悬壁梁上时，均布载荷的总和是wl(kgf)，其合力的作用

点作用在悬臂梁的跨度中间$\frac{l}{2}$处，产生在固定端的反力R_A(kgf)用(1)式表示。

离开自由端B x(cm)距离，作用在 x截面上的剪力F_x，如(2)式所示，是x的一次函数，所以剪力图成(b)图。

在x截面上的弯矩M_x (kgf·cm)

$$M_x = (力) \times (距离) = (wx) \times \left(\frac{x}{2}\right) = \frac{wx^2}{2}$$

(kgf·cm)

是x的二次函数，所以从自由端(0)向固定端($\frac{wl^2}{2}$) 所描绘的抛物线是逐渐增加的，最大弯矩产生在固定端，其大小如(3)式所示。

【例题】 如图2.13(a)所示，$w=5$ kgf/cm均布载荷，沿全长为120 cm悬臂梁作用着，试求其反力并画出剪力图和弯矩图。

【解答】 将$w=5$kgf/cm，$l=120$cm代入(1)式，得

$$R_A = wl = 5\times120 = 600 \text{ (kgf)}$$

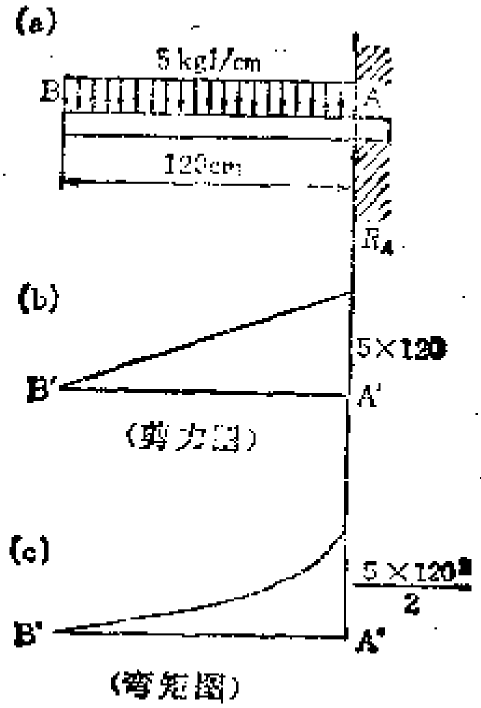


图2.13

〈剪力图〉

自由端的剪力为0。

固定端的剪力F(kgf)，$F=wl=600$ (kgf)，因此剪力图如图 2.13 (b)所示。

〈弯矩图〉

自由端的弯矩为 0。

固定端的弯矩为M_{max} (kgf·cm)，

$$M_{max}=\frac{wl^2}{2}=\frac{5\times120^2}{2}=36000(\text{kgf}\cdot\text{cm})$$

因此弯矩图如图2.13(c)所示。

【例题】 如图2.14(a)所示，试画出均布载荷作用在悬臂梁上而产生的剪力图和弯矩图。

〈剪力图〉

由$w=8$kgf/cm，$l=100$cm可以知道，自由端的剪力等于0；固定端的剪力F (kgf)，

$$F=-wl=-8\times100$$
$$=-800\ (\text{kgf})$$

因此，剪力图如图 2.14(b)所示。

〈弯矩图〉

自由端的弯矩等于 0；固定端的弯矩M_{max}(kgf·cm)，

$$M_{max}=\frac{wl^2}{2}=\frac{8\times100^2}{2}$$
$$=40000\ (\text{kgf}\cdot\text{cm})$$

因此弯矩图如图2.14(c)所示，

注：作用在梁上的剪力方向因和图2.13的例子相反所以为（负）。

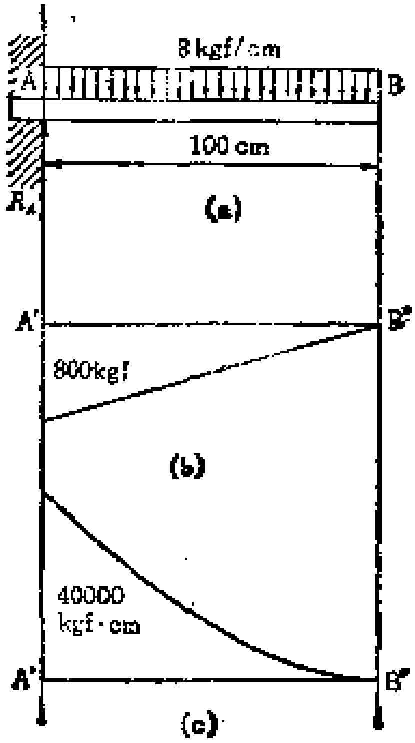


图2.14

§2.11 剪力图和弯矩图(集中载荷作用在简支梁上)

(1) 反力

$$R_B = \frac{Wl_1}{l} \quad (\text{kgf}) \tag{1}$$

$$R_A = W - R_B \quad (\text{kgf}) \tag{2}$$

R_A、R_B：支点A、B的反力(kgf)

W：集中载荷(kgf)

l_1：从支点A到集中载荷的距离(cm)

l：跨度(cm)

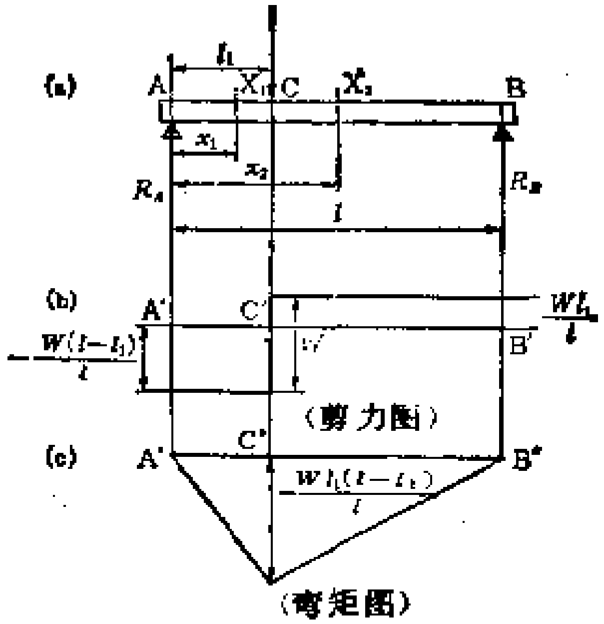


图2.15 受一个集中载荷的简支梁

(2) 剪力

AC间 $F_1 = -R_A$ (kgf) (3)

BC间 $F_2 = W - R_A = R_B$ (kgf) (4)

F_1、F_2：AC间、BC间的剪力(kgf)

(3)弯矩

$$M_{max} = -\frac{Wl_1(l-l_1)}{l} \quad (\text{kgf}\cdot\text{cm}) \tag{5}$$

M_{max}：最大弯矩（kgf·cm）

【解说】 如图2.15(a)所示，作用一集中载荷，由力的平衡和对于支点A的力矩求得产生在支点的反力R_A（kgf），R_B（kgf）

$$R_A+R_B=W \quad (\text{kgf})$$

$$R_A \cdot 0+R_B \cdot l=Wl_1 \quad (\text{kgf}\cdot\text{cm})$$

由此可求出(1)式、(2)式。

梁上某段假想截面的剪力大小，因为可以由该假想截面任何一侧力的代数和求出，所以求出(3)式、(4)式。

任意截面弯矩的大小，等于该截面一侧力矩的代数和，距支点A〔见图2.15(a)〕为x_1、x_2距离的x_1截面、x_2截面的弯矩大小，假设分别为M_1(kgf·cm)，M_2（kgf·cm），由(1)式，(2)式可得

$$M_1=-R_Ax_1=-(W-\frac{Wl_1}{l})\ x_1=-\frac{W(l-l_1)}{l}x_1$$

(kgf·cm)

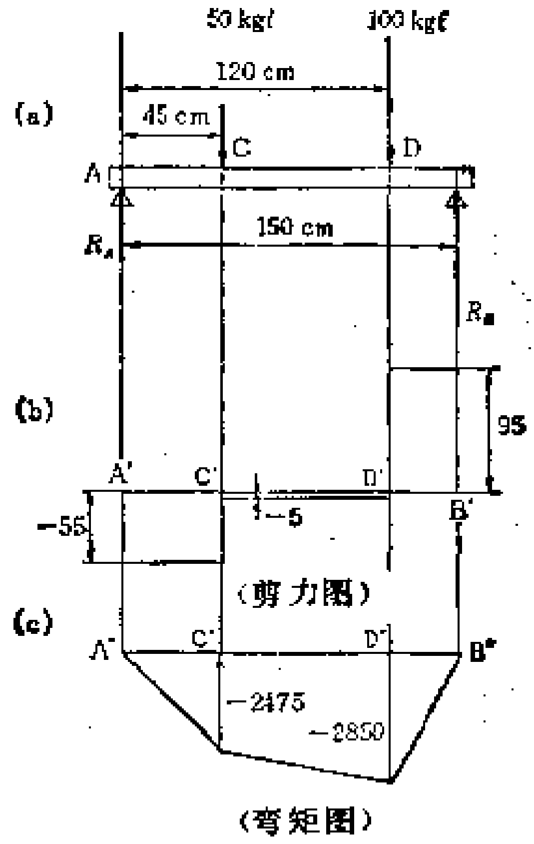


图2.16

$$M_2=-R_Ax_2+W(x_2-l_1)=-\frac{W(l-l_1)}{l}+W(x_2-l_1)$$

$$=-\frac{Wl_1(l-x_2)}{l}\quad(\mathrm{kgf\cdot cm})$$

该二式的最大值是当$x_1=x_2=l_1$时，即可求出(5)式。

【例题】 如图2.16(a)所示，在简支梁上作用着两个集中载荷，画出剪力图和弯矩图，并求出最大弯矩。

【解答】 将$l=150\mathrm{cm}$，$l_1=45\mathrm{cm}$， $l_2=120\mathrm{cm}$，，$W_1=50\mathrm{kgf}$，$W_2=100\mathrm{kgf}$代入(1)式，(2)式，得

$$R_B=\frac{W_1l_1+W_2l_2}{l}=\frac{50\times45+100\times120}{150}$$

$$=95(\mathrm{kgf})$$

$$R_A=W_1+W_2-R_B=50+100-95=55(\mathrm{kgf})$$

剪力的大小

AC间 $F_1=-R_A=-55(\mathrm{kgf})$

CD间 $F_2=-R_A+W_1=-55+50=-5\ (\mathrm{kgf})$

DB间 $F_3=-R_A+W_1+W_2=R_B=95\ (\mathrm{kgf})$

将上面的结果归纳成图，得到图 2.16(b)。

弯矩的大小，比较C点、D点的弯矩$M_C(\mathrm{kgf\cdot cm})$，$M_D(\mathrm{kgf\cdot cm})$就可确定出最大的弯矩$M_{max}(\mathrm{kgf\cdot cm})$。

$$M_C=-R_Al_1=-55\times45=-2475(\mathrm{kgf\cdot cm})$$

$$M_D=-R_B(l-l_2)=-95(150-120)=-2850(\mathrm{kgf\cdot cm})$$

将上面的结果归纳成图，得到图2·16 (c)。绝对值大的便是所求的最大弯矩，因为$\bar{M}_D>M_C$，所以，

$$M_{max}=M_D=-2850(\mathrm{kgf\cdot cm})$$

【发展】 集中载荷在三个以上的情况下，也同样能够计算。

§2.12　剪力图和弯矩图（均布载荷作用在简支梁上）

（1）　反力

$$R_A = R_B = \frac{Wl}{2}(\mathrm{kgf}) \qquad (1)$$

R_A、R_B：支点A、B的反力（kgf）

W：均布载荷(kgf·cm)

l：跨度(cm)

(2)　剪力

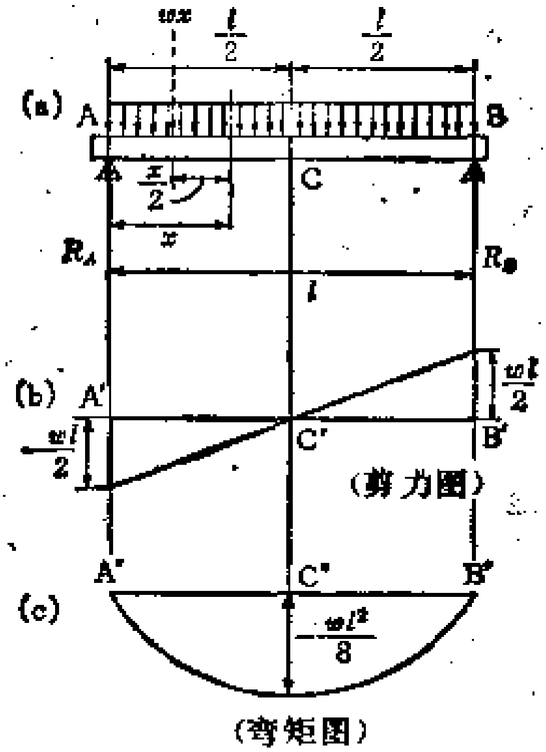


图2.17　受均布载荷的简支梁

$$F_x = wx - R_A = w\left(x - \frac{l}{2}\right)\ (\mathrm{kgf}) \qquad (2)$$

F_x：X截面的剪力(kgf)

x：从支点A到X截面的距离(cm)

(3)　弯矩

$$M_{max} = -\frac{Wl^2}{8}(\mathrm{kgf\cdot cm}) \qquad (3)$$

M_{max}: 最大弯矩(kgf·cm)

【解说】 如图2.17(a)所示，当着均布载荷w(kgf/cm)作用在简支梁上时，设跨度为l (cm)，则总的载荷为wl(kgf)。因为两支点反力R_A(kgf)，R_B (kgf)相等，所以得(1)式。

X截面剪力F_x(kgf)的大小，等于该截面左侧均布载荷的和wx (kgf)与反力R_A(kgf)的差。从(1)式，得

$$F_x = wx - R_A = wx - \frac{wl}{2} \ (\text{kgf})$$

从而求得(2)式。因该式是x的一次函数，所以在支点A负值最大，然后逐渐接近于0，在中间等于0，改变符号，在支点B正值最大。将这些加以归纳，得到图2.17(b)。

弯矩的大小，作用在x截面左侧的均布载荷的和是wx (kgf)，从合力的作用点到x截面的距离为$\frac{x}{2}$，设X截面的弯矩大小为M_x (kgf·cm)，则M_x等于合力wx和反力R_A的力矩代数和，

$$M_x = wx \cdot \frac{x}{2} - R_A x = \frac{wx^2}{2} - \frac{wl}{2}x \ (\text{kgf·cm})$$

$$\therefore M_x = \frac{wx}{2}(x - l) \ (\text{kgf·cm})$$

因为弯矩是x的二次函数，所以最大弯矩(负值最大) M_{max} (kgf·cm)，发生在梁的中间 ($x = \frac{l}{2}$)，在支点的弯矩为0。归纳得图2.17(c)，最大弯矩值为(3)式。

【例题】 如图 2.18(a)所示，均布载荷作用在简支梁上时，画出剪力图和弯矩图。

【解答】 将l=150cm，W=10kgf/cm代入(1)式，得

$$R_A = R_B = \frac{wl}{2} = \frac{10 \times 150}{2} = 750 \ (\text{kgf})$$

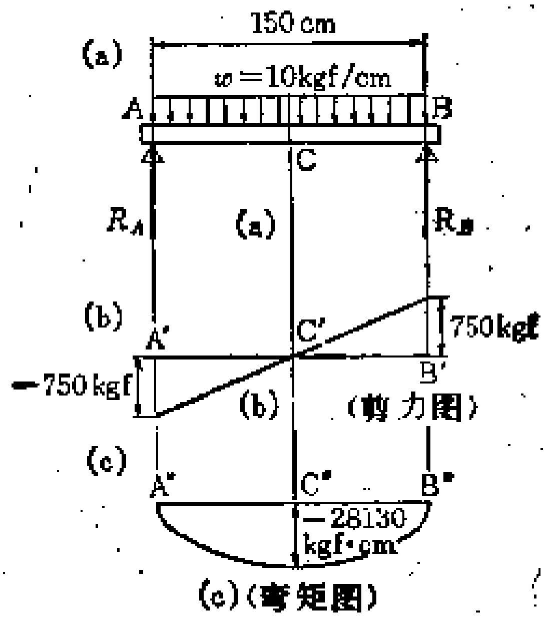


图2.18

剪力

$$F_A=-R_A=-750\ (\mathrm{kgf})$$

$$F_B=R_B=750\ (\mathrm{kgf})$$

将上面的结果一归纳，得到图2.18(*b*)。

弯矩

$$M_{max}=-\frac{wl^2}{8}=-\frac{10\times150^2}{8}=-28125(\mathrm{kgf\cdot cm})$$

归纳上面的结果，中间点的弯矩为−28125 (kgf·cm)，支点的弯矩为0，通过三点画抛物线得到图2.18(c)。

【发展】 梁的剪力和弯矩有下述关系

1. 假如是简支梁，在剪力图与横轴相交的截面上产生最大的弯矩。
2. 如果剪力大小不变，则弯矩成线性变化。
3. 剪力如果在某段范围内为0，则相对应范围内弯矩大小为一常量。
4. 某截面的弯矩大小，可以用该截面一侧剪力图面积的代数和表示。

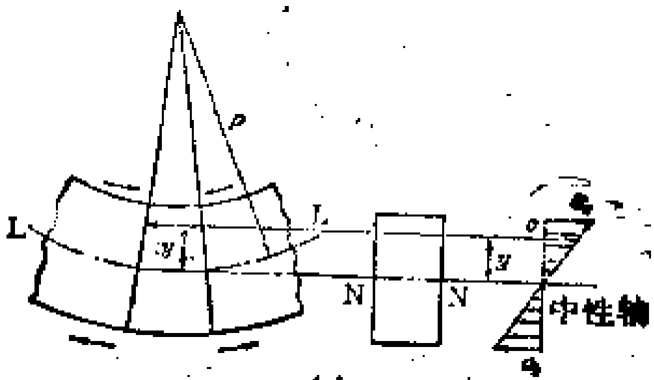
§2.13 梁的截面惯性矩和截面模量

$$\sigma=\varepsilon E=\frac{Ey}{\rho}\ (\mathrm{kgf/cm^2}) \qquad (1)$$

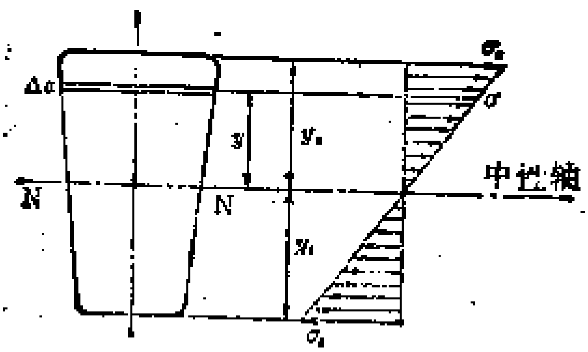
$$M=\frac{E}{\rho}I\ (\mathrm{kgf\cdot cm}) \qquad (2)$$

$$M=\sigma Z\quad (\mathrm{kgf\cdot cm}) \qquad (3)$$

σ：梁上所产生的应力（$\mathrm{kgf/cm^2}$）
ε：距中性层为y距离的应变
E：弹性模量（$\mathrm{kgf/cm^2}$）
y：距中性层的距离（cm）
ρ：中性层的曲率半径（cm）
M：作用在梁上的弯矩（kgf·cm）
I：截面惯性矩（$\mathrm{cm^4}$）
Z：截面模量（$\mathrm{cm^3}$）



(a)



(b)

图2.19 内力矩

【解说】 由梁上工作应力σ (kgf/cm^2)所产生的，距中性层为y(cm)距离的某一面上的应变ε，与y距离成正比，与曲率半径ρ成反比。从而(1)式成立。

如图2.19(b)所示：距中性轴NN为y(cm)距离的微小面积Δa(cm^2)上所产生的内力是$\sigma\Delta a$。因此，该内力对中性轴NN的力矩为ΔM(kgf·cm)，$\Delta M=y\sigma\Delta a$ (kgf·cm)。对于整个截面积计算其力矩，如总力矩为M(kgf·cm)，则得

$$M=\Delta M_1+\Delta M_2+\Delta M_3+\cdots$$
$$=y_1\sigma_1\Delta a_1+y_2\sigma_2\Delta a_2+y_3\sigma_3\Delta a_3+\cdots$$

$\therefore M=\Sigma y\sigma\Delta a$ (kgf·cm)

Δa_1、Δa_2、Δa_3……：在x截面上平行于中性轴分割的微小截面积(cm^2)

y_1、y_2、y_3……：从Δa_1，Δa_2，Δa_3，……的形心到中性轴的距离 (cm)

σ_1、σ_2、σ_3……：产生在Δa_1，Δa_2，Δa_3，…上的应力 (kgf/cm^2)

将(1)式代入该式中，得

$$M=\Sigma y\frac{y}{\rho}E\Delta a=\frac{E}{\rho}\Sigma y^2\Delta a \ (kgf\cdot cm)$$

$\Sigma y^2\Delta a$根据截面形状不同而具有一定的值，称为截面惯性矩，用I(cm^4)表示。

如果以I代入上式来代替$\Sigma y^2\Delta a$，则可得(2)式。

此外，从(1)式、(2)式可以求出

$$M=\sigma\frac{I}{y}$$

4上。

【例题】 在梁的危险截面上，承受的最大弯矩为600(kgf·m)，产生的应力是800(kgf/cm²)，求截面模量Z是多少？

【解答】 将$M=60000$kgf·cm，$\sigma=800$kgf/cm²代入变换的(3)式，得

$$Z=\frac{M}{\sigma}=\frac{60000}{800}=75(\mathrm{cm}^3)$$

【发展】 假如梁的截面形状和大小已确定，则截面模量为一常量，所以由(3)式可知，弯曲应力σ和弯矩M成正比。因此，产生在承受最大弯矩的截面上的弯曲应力如果小于许用应力，则梁是安全的。如果按下面的顺序计算，就可以决定梁的截面形状和大小。即

1. 决定梁的截面形状
2. 从(3)式求出截面模量Z(cm³)
3. 决定尺寸(大小)

【例题】 作用在截面为正方形的梁的最大弯矩为75×10^4(kgf·cm)，设梁的许用应力为1000(kgf/cm²)，求截面的尺寸是多少？

【解答】 将$M=75\times10^4$(kgf·cm)，$\sigma=1000$kgf/cm²代入变换的(3)式，得

$$Z=\frac{M}{\sigma}=\frac{75\times10^4}{1000}=750\ (\mathrm{cm}^3)$$

从附表 4得

$$Z=\frac{1}{6}h^3$$

经变换，得

$$h=\sqrt[3]{6Z}=\sqrt[3]{6\times750}=16.51\ (\mathrm{cm})$$

§2.14 梁的挠度

$$\delta_{max}=\alpha\frac{Wl^3}{EI}\ (\mathrm{cm}) \qquad (1)$$

$$i_{max}=\beta\frac{Wl^2}{EI}\ (^\circ) \qquad (2)$$

δ_{max}：最大挠度（cm）

W：载荷（kgf）

l：跨度（cm）

E：弹性模量（kgf/cm²）

I：截面惯性矩（参照附表4）(cm⁴)

α，β：按照梁的种类、载荷的种类决定的系数

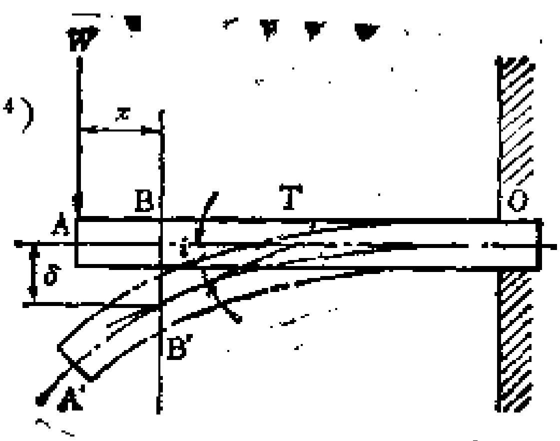


图2.20 悬臂梁的挠度

【解说】 如图2.20所示，载荷作用在等直梁上时，梁的轴线OA弯曲成曲线OA'（将该曲线称为弹性曲线），在载荷作用以前，距自由端为x的B点，画一条与OA相垂直的垂线，假设该垂线和OA'相交于B'点，则BB'是由于载荷W引起的挠度δ。此外，在B'点画曲线OA'的切线，假设与OA相交于T点，则得

$$\angle BTB'=i(^\circ)$$

将该角度称为转角。若将最大挠度和最大转角用公式表示，则如上面的(1)式、(2)式。载荷作用在各种梁上的δ_{max}、i_{max}以及α、β如表2.1所示。

【例题】 1（tf）的集中载荷，作用在长度为1m的悬臂梁的自由端上，试问这时的最大挠度和最大转角是多少？设梁的截面积为矩形，宽为2cm，高为10cm，$E=2.1\times10^6$(kgf/cm²)。

【解答】 从附表4中查出I的计算公式，将$b=2$cm，$h=10$cm代入，得

$$I=\frac{1}{12}bh^3=\frac{1}{12}\times2\times10^3=\frac{1000}{6}=166.7\ (\mathrm{cm}^4)$$

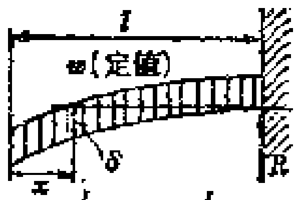
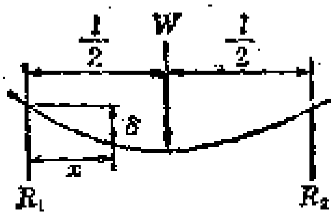
将$l=100\mathrm{cm}$，$W=1000\mathrm{kgf}$代入表2.1的公式中，得

$$\delta_{max}=\frac{Wl^3}{3EI}=\frac{1000\times100^3}{3\times2.1\times10^6\times\frac{1000}{6}}=0.9524\ (cm)$$

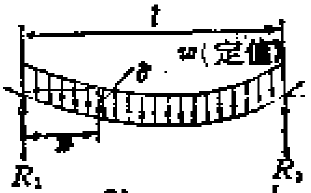
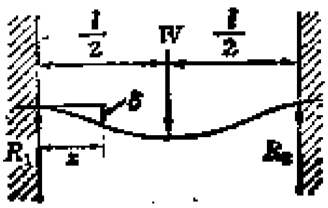
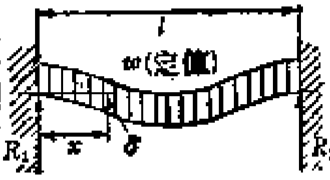
$$i_{max}=-\frac{Wl^2}{2EI}=-\frac{3}{2l}\delta_{max}=-\frac{3}{2\times100}\times0.9524$$

$$=-0.01429(°)$$

表 2.1　　挠度和转角

序号	载荷与弹性曲线	挠 度 δ	转 角 i
1	 $\alpha=\frac{1}{3}$，$\beta=-\frac{1}{2}$	$\delta=\frac{Wl^3}{3EI}\left(1-\frac{3x}{2l}+\frac{x^3}{2l^3}\right)$ $x=0$：— $\delta_{max}=\frac{Wl^3}{3EI}=\frac{\sigma l^2}{3Ee}$	$i=-\frac{Wl^2}{2EI}\left(1-\frac{x^2}{l^2}\right)$ $x=0$：— $i_{max}=-\frac{Wl^2}{2EI}=-\frac{3}{2l}\delta_{max}$
2	 $\alpha=\frac{1}{8}$，$\beta=-\frac{1}{6}$	$\delta=\frac{wl^4}{8EI}\left(1-\frac{4x}{3l}+\frac{x^4}{3l^4}\right)$ $x=0$：— $\delta_{max}=\frac{wl^4}{8EI}=\frac{\sigma l^2}{4Ee}$	$i=-\frac{wl^3}{6EI}\left(1-\frac{x^3}{l^3}\right)$ $x=0$：— $i_{max}=-\frac{wl^3}{6EI}$ $=-\frac{4}{3l}\delta_{max}$
3	 $\alpha=\frac{1}{48}$，$\beta=\pm\frac{1}{16}$	$0\leqq x\leqq\frac{l}{2}$：— $\delta=\frac{Wl^3}{48EI}\left(\frac{3x}{l}-\frac{4x^3}{l^3}\right)$ $x=\frac{l}{2}$：— $\delta_{max}=\frac{Wl^3}{48EI}=\frac{\sigma l^2}{12Ee}$	$0\leqq x\leqq\frac{l}{2}$：— $i=\frac{Wl^2}{16EI}\left(1-\frac{4x^2}{l^2}\right)$ $\left.\begin{array}{l}x=0\\x=l\end{array}\right\}$：— $i_{max}=\pm\frac{Wl^2}{16EI}$ $=\pm\frac{3}{l}\delta_{max}$

续表

序号	载荷与弹性曲线	挠度 δ	转角 i
4	 $\alpha=\frac{5l}{384}$, $\beta=\pm\frac{l}{24}$	$\delta=\frac{wl^4}{24EI}\left(\frac{x}{l}-\frac{2x^3}{l^3}+\frac{x^4}{l^4}\right)$ $x=\frac{l}{2}$:— $\delta_{max}=\frac{5wl^4}{384EI}=\frac{5\sigma l^2}{48Ee}$	$i=\frac{wl^3}{24EI}\left(1-\frac{6x^2}{l^2}+\frac{4x^3}{l^3}\right)$ $\left.\begin{array}{l}x=0\\x=l\end{array}\right\}$:— $i_{max}=\pm\frac{wl^3}{24EI}=\pm\frac{16}{5l}\delta_{max}$
5		$0\leq x\leq\frac{l}{2}$,— $\delta=\frac{Wl^3}{16EI}\left(\frac{x^2}{l^2}-\frac{4x^3}{3l^3}\right)$ $x=\frac{l}{2}$:— $\delta_{max}=\frac{Wl^3}{192EI}=\frac{\sigma l^2}{24Ee}$	$0\leq x\leq\frac{l}{2}$,— $i=\frac{Wl^2}{8EI}\left(\frac{x}{l}-\frac{2x^2}{l^2}\right)$ $x=\frac{l}{4}$:— $i_{max}=\pm\frac{Wl^2}{64EI}$
6	 $\alpha=\frac{l}{384}$, $\beta=\pm\frac{\sqrt{3}l}{216}$	$\delta=\frac{wl^4}{24EI}\left(\frac{x^2}{l^2}-\frac{2x^3}{l^3}+\frac{x^4}{l^4}\right)$ $x=\frac{l}{2}$:— $\delta_{max}=\frac{wl^4}{384EI}$	$i=\frac{wl^3}{12EI}\left(\frac{x}{l}-\frac{3x^2}{l^2}+\frac{2x^3}{l^3}\right)$ $x=l\left(\frac{1}{2}\mp\frac{\sqrt{3}}{6}\right)$:— $i_{max}, i_{min}=\pm\frac{\sqrt{3}}{216}\cdot\frac{wl^3}{EI}$

（注） W:集中载荷 w:单位长度均布载荷 x:到截面的距离 l:梁的长度 E:弹性模量 I:截面惯性矩 i:转角 e:从中性轴到图形边缘的距离 δ:挠度

§2.15　等强度梁

(1)　厚度h(cm) 不变的悬臂梁

$$b_1=\frac{6Wx}{\sigma_b h^2}\quad(\mathrm{cm})\qquad(1)$$

$$\delta_{max}=\frac{6Wl^3}{b_2h^3E}$$

$$=\frac{l^2\sigma_b}{hE}(\mathrm{cm})(2)$$

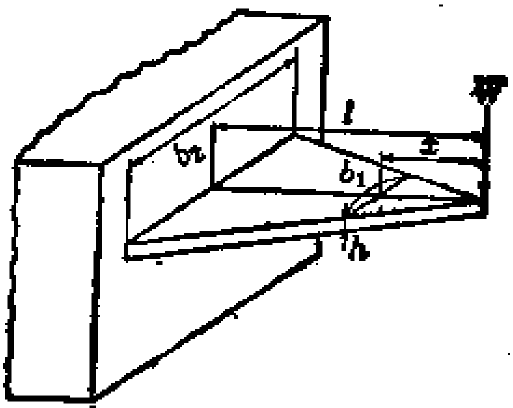


图2.21　厚度不变的等强度悬臂梁

b_1：距自由端为x距离的梁的宽度 (cm)

W：加在自由端的载荷 (kgf)

x：距自由端的距离 (cm)

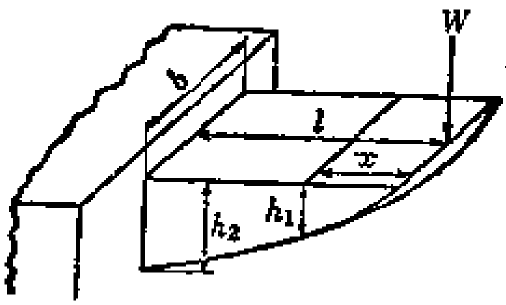


图2.22　宽度不变的等强度悬臂梁

σ_b：弯曲应力(值不变) (kgf/cm²)

δ_{max}：最大挠度 (cm)

l：跨度 (cm)

b_2：固定端的宽度 (cm)

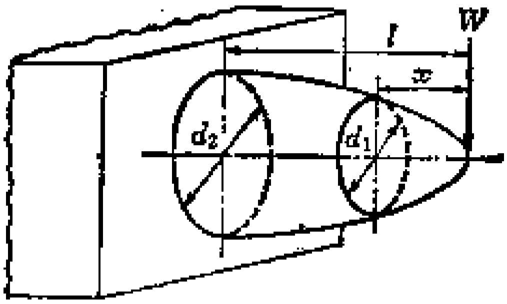


图2.23　圆形截面的等强度悬臂梁

E：弹性模量 (kgf/cm²)

(2)　宽度b (cm) 不变的悬臂梁

$$h_1=\sqrt{\frac{6Wx}{\sigma_b b}}\quad(\mathrm{cm})\qquad(3)$$

$$\delta_{max}=\frac{8Wl^3}{bh_2^3E}=\frac{4\sigma_b l^2}{3h_2E}\quad(\mathrm{cm})\qquad(4)$$

h_1：距自由端为 x 距离梁的厚度（cm）

h_2：固定端梁的厚度（cm）

(3) 圆形截面

$$d_1=\sqrt[3]{\frac{32Wx}{\pi\sigma_b}}\ \text{(cm)} \tag{5}$$

$$\delta_{max}=\frac{192}{5}\cdot\frac{Wl^3}{\pi E d_2^4}=\frac{6\sigma_b l^2}{5Ed_2}\ \text{(cm)} \tag{6}$$

d_1：距自由端为 x 距离的梁的直径（cm）

d_2：固定端梁的直径（cm）

【解说】 梁的截面沿梁的全长如果是相同的话，因为截面是根据危险截面的弯曲应力决定的，则除了危险截面以外，其余各截面的强度过大而材料不经济。因此，使截面模量 Z(cm^3) 也随着弯矩 M(kgf·cm) 的变化而变化，让截面的形状连续地变化，使发生在梁上的弯曲应力 σ (kgf/cm^2) 值一定，将这种梁称为等强度梁。图2.21是厚度不变的矩形截面梁；图2.22 是宽度不变的矩形截面梁；图2.23是 圆形截面梁。公式从附表 4 可查出。

【例题】 用厚度1cm的钢板制造的，长度为50cm的等强度悬臂梁，在自由端加100(kgf) 的载荷，试求固定端的宽度和最大挠度。设许用弯曲应力 $\sigma_b=400$(kgf/cm^2)，弹性模量 $E=2.1\times10^6$ (kgf/cm^2)。

【解答】 将 $h=1$cm，$l=50$cm，$W=100$kgf，$\sigma_b=400$ kgf/cm^2，$E=2.1\times10^6$ kgf/cm^2 代入 (1) 式，(2) 式，得

$$b_2=\frac{6Wl}{\sigma_b h^2}=\frac{6\times100\times50}{400\times1}=75\ \text{(cm)}$$

$$\delta_{max}=\frac{l^2\sigma_b}{hE}=\frac{50^2\times400}{1\times2.1\times10^6}=0.4762\ \text{(cm)}$$

【发展】 该等强度梁的挠度是普通梁挠度的1.5倍（参照§2.14 的表2.1），可作为钢板弹簧利用。即在 (1) 的梁内储存的弹性能 U 为

(1) $U=\frac{1}{2}W\delta=\frac{1}{2}\cdot\frac{b_2h^2\sigma_b}{6l}\cdot\frac{l^2\sigma_b}{hE}$

$$=\frac{\sigma_b^2}{12E}b_2hl\ \ (\mathrm{kgf\cdot cm}) \tag{7}$$

同样，(2)、(3)的弹性能U为

$$(2)\ U=\frac{1}{2}\cdot\frac{b^2h_2^2\sigma_b}{6l}\cdot\frac{4\sigma_b l^2}{3h_2E}$$

$$=\frac{\sigma_b^2}{9E}bh_2l\ \ (\mathrm{kg\cdot cm}) \tag{8}$$

$$(3)\ U=\frac{1}{2}\cdot\frac{\pi d_2^3\sigma_b}{32l}\cdot\frac{6\sigma_b l^2}{5Ed_2}$$

$$=\frac{3\sigma_b^2}{160E}\pi d_2^2l\ \ \ \ (\mathrm{kgf\cdot cm}) \tag{9}$$

【例题】 在上面的例题中，储存在梁内的弹性能是多少？

【解答】 将在上题中给出的数值与$b_2=75\mathrm{cm}$，$\delta_{max}=0.4762\mathrm{cm}$代入(7)式，得

$$U=\frac{\sigma_b^2}{12E}b_2hl=\frac{400^2}{12\times2.1\times10^6}\times75\times1\times50$$

$$=23.81\ \ (\mathrm{kgf\cdot cm})$$

或者 $$U=\frac{1}{2}W\delta_{max}=\frac{1}{2}\times100\times0.4762$$

$$=23.81\ \ (\mathrm{kgf\cdot cm})$$

§2.16 冲击载荷应力

$$\sigma=\frac{W}{A}\left(1\pm\sqrt{1+\frac{2EAh}{WL}}\right)$$

(kgf/cm^2) (1)

$$l=\frac{\sigma}{\sigma_0}l_0$$

$$=l_0\left(1\pm\sqrt{1+\frac{2h}{l_0}}\right)$$

(cm) (2)

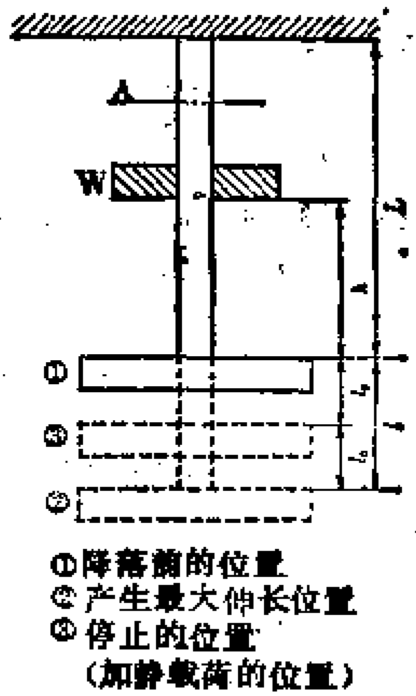


图2.24 冲击载荷

σ：冲击应力 (kgf/cm^2)

W：冲击载荷 (kgf)

A：截面积 (cm^2)

E：弹性模量 (kgf/cm^2)

h：载荷（重物）落下高度 (cm)

L：材料的原长 (cm)

l：加冲击载荷时的伸长（缩短） (cm)

l_0：作用静载荷W时的伸长（缩短） (cm)

σ_0：作用静载荷W时的应力 (kgf/cm^2)

【解说】 如果将冲击载荷加到材料上，一瞬间将在材料内部产生非常大的应力。把这个应力称为冲击应力。重量为W(kgf) 的重物从高度 h (cm) 落到图2.24的凸缘上，冲击应力如果在弹性极限内，杆在瞬间产生最大伸长 l (cm)，然后再瞬间缩短。当此伸缩的振动停止时，杆将产生和加静载荷W (kgf) 时同样的应力σ_0 (kgf/cm^2) 和伸长l_0 (cm)。因为这时重物所损失的势能和材料得到的弹性能相等，所以

$$\frac{1}{2}\sigma Al=W(h+l)$$

将 $l=\sigma L/E$ 代入上式，经过整理得

$$AL\sigma^2-2WL\sigma-2EWh=0$$

若将这个式子对σ解出，则得（1）式。

【例题】 80(kgf)重物，从5(cm)的高度落在长5m,直径为2(cm)，弹性模量$E=2.1\times10^6$ (kgf/cm²）的钢丝上，求产生的冲击应力是多少？

【解答】 将$\sigma_0=P/A=80/\pi=25.46$，$l_0=\sigma_0 L/E=25.46\times500/2.1\times10^6=0.006062$代入（1）式，得

$$\sigma=\sigma_0\left(1+\sqrt{1+\frac{2h}{l_0}}\right)=25.46\left(1+\sqrt{\frac{2\times5}{0.006062}}\right)$$

$$=1060\ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

§ 2.17　扭转的剪应变和剪应力

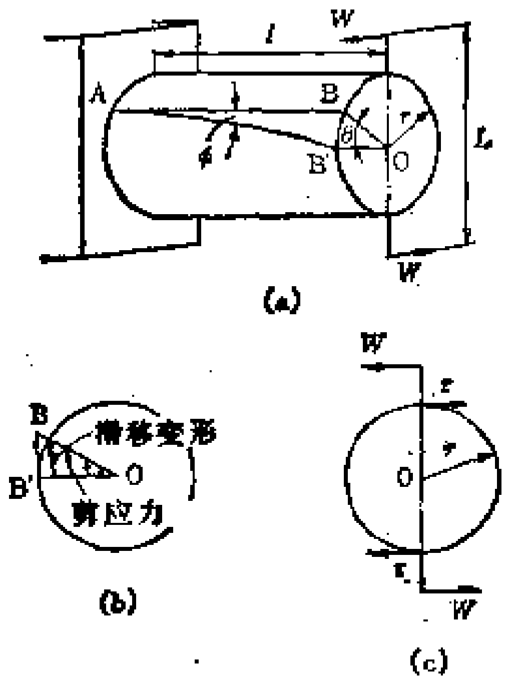


图2.25　轴的扭转

(1) 剪应变γ

$$\gamma = \tan\phi \approx \phi = \frac{r\theta}{l} \qquad (1)$$

ϕ：剪切角 (rad)

r：圆杆半径 (cm)

θ：扭转角 (rad)

l：圆杆长度 (cm)

(2)　剪应力τ　(kgf/cm^2)

$$\tau = \phi G = \frac{r\theta}{l} G$$

(kgf/cm^2)　　(2)

G：剪切弹性模量 (kgf/cm^2)

【解说】 如图2.25(a)所示，力偶如果作用在直径为d(cm)的圆轴上，则母线AB被扭转移动到AB'。这时 $\angle BAB'$ 称为剪切角ϕ(rad)，$\angle BOB'$称为扭转角θ (rad)。$\tan\phi$是剪应变，但因ϕ值非常小，所以可用 (1) 式表达。由扭转而产生的剪应力称扭转应力。τ/ϕ为一常量。设该常量为G，称为剪切弹性模量。再求剪应力τ(kgf/cm^2)则得(2)式。在同一圆轴表面上尽管位置不同，但扭转应力的值是不变的。

【例题】 有一直径为100mm，长度为5m的圆轴，当着扭转角为0.05 rad时，剪应力为多少？

设 $G = 0.8\times10^6$ (kgf/cm^2)。

【解答】 将$r = 5cm$，$l = 500cm$，$\theta = 0.05rad$，$G = 0.8\times10^6 kg/cm^2$代入 (2) 式，得

$$\tau = \frac{r\theta}{l} G = \frac{5\times0.05}{500}\times0.8\times10^6 = 400 \ (kgf/cm^2)$$

§2.18 截面极惯性矩和抗扭截面模量

$$T=R=\frac{\tau}{r}I_p=\tau Z_p\ \ (\text{kgf}\cdot\text{cm}) \qquad (1)$$

T：扭转力矩（扭矩） (kgf·cm)

R：抵抗扭转力矩 (kgf·cm)

τ：扭转应力 (kgf/cm²)

r：圆杆（轴）半径 (cm)

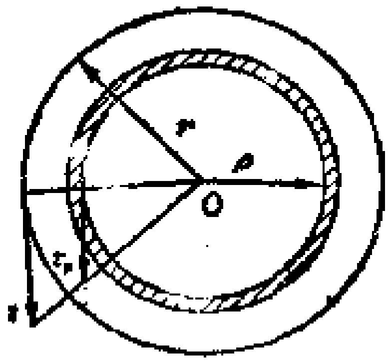


图2.26 抵抗扭转力矩

I_p：截面极惯性矩 (cm⁴)

Z_p：抗扭截面模量 (cm³)

【解说】 如图2.26所示，设距圆心为ρ (cm) 的半径微小面积Δa上产生的扭转应力τ_p，Δa面积上的内力是$\tau_p\Delta a$，假如该内力对圆心O的力矩为ΔR(kgf·cm)，则得

$$\Delta R=\rho\tau_p\Delta a=\frac{\tau}{r}\rho^2\Delta a$$

将这个力矩对整个截面来求，即求总的力矩 R

$$R=\Sigma\Delta R=\Sigma\frac{\tau}{r}\rho^2\Delta a=\frac{\tau}{r}\Sigma\rho^2\Delta a\ \ (\text{kgf}\cdot\text{cm})$$

R是抵抗扭转力矩T而产生的力矩，R和T的大小相等方向相反。上式的$\Sigma\rho^2\Delta a$决定于截面的形状和大小，因为是微面积Δa对于圆的圆心之矩，所以称为截面的极惯性矩，用I_p (cm⁴) 表示。并且I_p/r的值也决定于截面的形状和大小，用 Z_p (cm³) 表示称为抗扭截面模量。

【发展】 如图2.27所示，设x、y、z轴是在重心G上互相正交的三个轴。假设取距重心G为ρ距离的微小面积Δa(cm²) 对于Z轴的截面极惯性矩为 I_p(cm⁴)，则

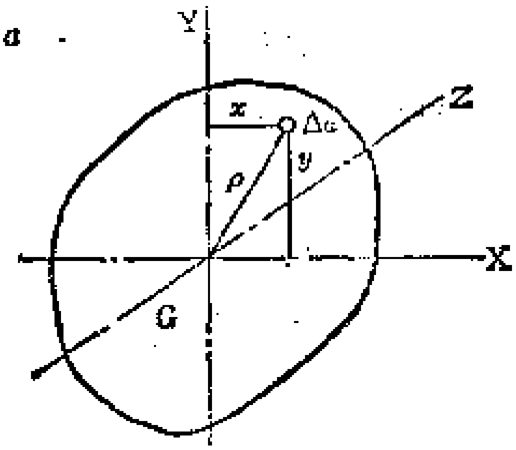


图2.27 截面对Z轴的极惯性矩

$$I_p=\Sigma\rho^2\Delta a=\Sigma(y^2+x^2)\Delta a$$
$$=\Sigma y^2\Delta a+\Sigma x^2\Delta a$$
$$\therefore I_p=I_x+I_y(\mathrm{cm}^4)$$

I_x：截面对x轴惯性矩（cm^4）

I_y：截面对y轴惯性矩（cm^4）

圆截面时，从附表4查出

$$I_x=I_y=\frac{\pi d^4}{64}\quad(\mathrm{cm}^4)$$

因为

$$I_p=2I_x=2\times\frac{\pi d^4}{64}=\frac{\pi d^4}{32}\quad(\mathrm{cm}^4)\qquad(2)$$

$$Z_p=\frac{I_p}{r}=\frac{\pi d^3}{16}\quad(\mathrm{cm}^3)\qquad(3)$$

对于空心圆截面也同样

$$I_p=\frac{\pi}{32}(d_2^4-d_1^4)\quad(\mathrm{cm}^4)\qquad(4)$$

$$Z_p=\frac{\pi}{16}\left(\frac{d_2^4-d_1^4}{d_2}\right)\quad(\mathrm{cm}^3)\qquad(5)$$

【例题】 试求半径为3cm的圆杆的极惯性矩和抗扭截面模量。

【解答】 将$d=6\mathrm{cm}$代入(2)式、(3)式，得

$$I_p=\frac{\pi d^4}{32}=\frac{\pi}{32}\times6^4=127.2\ (\mathrm{cm}^4)$$

$$Z_p=\frac{\pi}{16}d^3=\frac{\pi}{16}\times6^3=42.41\ (\mathrm{cm}^3)$$

【例题】 1200（kgf·cm）的扭矩，作用在直径为4cm的圆杆上，试求产生的最大的扭转应力。

【解答】 将$d=4\mathrm{cm}$代入（3）式，得抗扭截面模量

$$Z_p=\frac{\pi d^3}{16}=\frac{\pi\times4^3}{16}=12.57(\mathrm{cm}^3)$$

将$T=1200\mathrm{kgf\cdot cm}$，$Z_p=12.57\mathrm{cm}^3$代入变换的(1)式，得最大扭转应力

$$\tau=\frac{T}{Z_p}=\frac{1200}{12.57}=95.47\ (\mathrm{kgf/cm}^2)$$

§2.19 纵弯曲、柱端约束系数、截面最小惯性半径和细长比

(1) 柱端约束系数（图中的n）

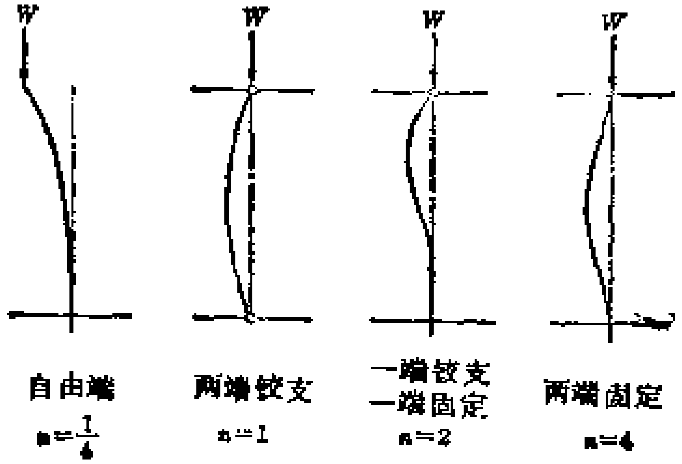


图2.28 柱端约束条件

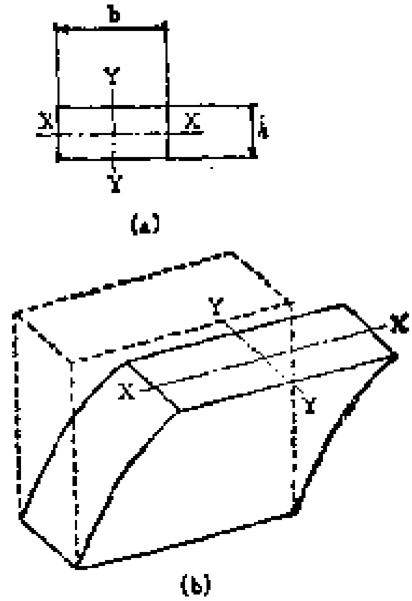


图2.29 纵弯曲

(2) 截面最小惯性半径k(cm)

$$k=\sqrt{\frac{I}{A}}\ \text{(cm)} \qquad (1)$$

I：截面最小惯性矩（cm^4）

A：截面积（cm^2）

(3) 细长比

$$\frac{l}{k}=\frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \qquad (2)$$

l：柱的长度 (cm)

【解说】 与粗细相比长度较长的杆（一般长度是粗细的4倍以上），如果受到轴向压缩载荷，在发生压缩破坏之前由于弯曲的作用而产生了破坏，将这种现象称为纵弯曲。引起纵弯曲的长杆称为柱。该柱越难弯曲越好。由于柱两端支承方式的不同其纵弯曲的难易程度也就不同。

图2.28中的n,是根据柱端约束条件而确定的系数,称为柱端约束系数。

加在柱上的载荷逐渐增大时就会发生破坏。将发生纵弯曲的最小载荷称为临界载荷。临界载荷除以柱的面积所得的值称为临界应力。发生纵弯曲的方向,是在截面惯性矩最小的方向。因此,在图2.29中,板厚为h(cm)和板宽为b(cm),因为$h<b$,所以

$$I_x=\frac{bh^3}{12}<I_y=\frac{b^3h}{12}$$

I_x、I_y:对于XX轴,YY轴的截面惯性矩(cm^4)

因为截面最小惯性矩是 I_x,所以弯曲发生在与XX轴垂直的方向上。设截面最小惯性矩为I(cm^4),用截面积A(cm^2)去除得k,即

$$k^2=\frac{I}{A}\ (\mathrm{cm}^2)$$

k称为截面最小惯性半径。因此,如果设柱的长度为l,

则$\frac{l}{R}$称为细长比。

【例题】 试求长度为3m,矩形截面10cm×5cm的截面最小惯性半径和细长比。

【解答】 $b=10$cm,$h=5$cm的矩形截面的最小惯性矩,从附表4查得

$$I=\frac{bh^3}{12}=\frac{10\times5^3}{12}=104.2\ (\mathrm{cm}^4)$$

截面最小惯性半径,从(1)式得

$$k=\sqrt{\frac{I}{A}}=\sqrt{\frac{104.2}{10\times5}}=1.444\ (\mathrm{cm})$$

将$l=300$cm和k值代入(2)式,得

$$\frac{l}{k}=\frac{300}{1.444}=208$$

【发展】 纵弯曲强度计算方法有各种各样,但具有代表性的是在下一节的欧拉公式和兰肯公式。使用哪个公式,由细长比决定。表 2.2 表

示兰肯公式的适用范围。

表 2.2 兰肯公式常数

常数 \ 材料	铸铁	软钢	硬钢	木材
σ_c (kgf/cm²)	5600	3400	4900	500
a	$\frac{1}{1600}$	$\frac{1}{7500}$	$\frac{1}{5000}$	$\frac{1}{750}$
细长比的范围	$<80\sqrt{n}$	$<90\sqrt{n}$	$<85\sqrt{n}$	$<60\sqrt{n}$

（选自《机械工程学手册》修订第4版，机械学会编）

§2.20　柱的强度

（1）　欧拉公式

$$W = n\pi^2 \frac{EI}{l^2} \quad (\text{kgf}) \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{W}{A} = n\pi^2 \frac{EI}{l^2 A} = n\pi^2 \frac{Ek^2}{l^2}$$

$$= \frac{n\pi^2 E}{\left(\frac{l}{k}\right)^2} \quad (\text{kgf/cm}^2) \tag{2}$$

W：临界载荷（kgf）

n：柱端约束系数（参考§2.19图2.28中的柱端约束系数）

E：柱材料的弹性模量（kgf/cm^2）

I：柱截面的最小惯性矩（cm^4）

l：柱的长度（cm）

σ：临界应力（kgf/cm^2）

k：截面惯性半径（cm）

A：柱的截面积（cm^2）

（2）　兰肯公式

$$W = \sigma A = \frac{\sigma_c A}{1 + \frac{a}{n}\left(\frac{l}{k}\right)^2} \quad (\text{kgf})$$

σ_c：由材料确定的常数（参照表2.2）（kgf/cm^2）

a：根据柱的材料由实验确定的常数（参照表2.2）

【解说】　细长比（$\frac{l}{k}$）大于表2.2中所给的值时使用欧拉公式。这是因为细长比较长，所以压缩作用比弯曲作用小，因此只用弯曲就能求出临界载荷W(kgf）的理论公式。对于细长比$\frac{l}{k}$小于表中的值的柱，如

果应用欧拉公式，则在达到临界载荷之前由于压缩的作用就先破坏了，因此要用弯曲作用和压缩作用组合的兰肯实验公式。

【例题】 试求图2.30所示的一端自由，截面为10cm×10cm，长度为350cm的柱的临界载荷和安全载荷。设$E=1.0\times10^5$ (kgf/cm²)，安全系数为10。

【解答】 由$b\times h=10\text{cm}\times10\text{cm}$，

$l=350$cm求细长比，

截面积 $A=10\times10=100(\text{cm}^2)$

截面最小惯性矩

$$I=\frac{h^4}{12}=\frac{10^4}{12}=833.3$$

(cm^4)

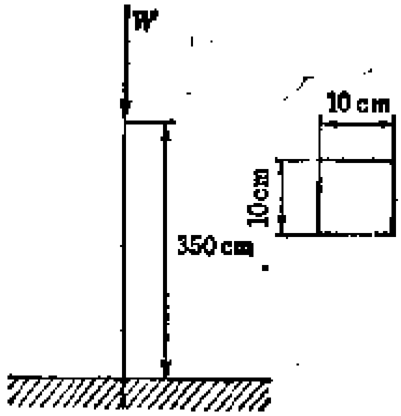


图2.30

细长比 $\frac{l}{k}=\frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}}=\frac{350}{\sqrt{\frac{833.3}{100}}}=121.2$

由表 2.2木材细长比的界限， $n=\frac{1}{4}$

$$60\sqrt{n}=30<\frac{l}{k}=121.2$$

所以用欧拉公式。

将$E=1.0\times10^5$ (kgf/cm²)，$I=833.3(\text{cm}^4)$，$l=350$cm，$n=\frac{1}{4}$代入 (1) 式，得

$$W=n\pi^2\frac{EI}{l^2}=\frac{1}{4}\pi^2\times\frac{1.0\times10^5\times833.3}{350^2}$$

$$=1678\ (\text{kgf})$$

求安全载荷$\frac{W}{S}$

$$\frac{W}{S}=\frac{1678}{10}=167.8\ (\text{kgf})$$

【例题】　试求两端为固定端，长度为2m，直径8cm的硬钢制作的圆柱的临界应力。设 $E=2.1\times10^6(\mathrm{kgf/cm^2})$。

【解答】　从§2.19的图2.28中查出 $n=4$。由 $d=8\mathrm{cm}$，$l=200\ \mathrm{cm}$ 求细长比

$$k=\sqrt{\frac{I}{A}}=\sqrt{\frac{\pi d^4}{64}\times\frac{4}{\pi d^2}}=\frac{d}{4}=\frac{8}{4}=2(\mathrm{cm})$$

$$\frac{l}{k}=\frac{200}{2}=100$$

柱端约束系数 $n=4$，由表2.2中查出细长比的界限

$$85\sqrt{n}=170>\frac{l}{k}=100$$

所以用兰肯公式。如将从表2.2中查出的 $\sigma_e=4900\mathrm{kgf/cm^2}$，$a=\frac{1}{5000}$ 代入（3）式，则得

$$\sigma=\frac{\sigma_e}{1+\frac{a}{n}\left(\frac{l}{k}\right)^2}=\frac{4900}{1+\frac{1}{4\times5000}\times100^2}$$

$$=3267(\mathrm{kgf/cm^2})$$

§2.21 组合应力(一)

(1) 斜面上的应力

$$\sigma_n=\frac{W\cos\theta}{\frac{A}{\cos\theta}}=\frac{W\cos^2\theta}{A}$$

$$=\sigma\cos^2\theta\ (\mathrm{kgf/cm^2}) \tag{1}$$

$$\tau=\frac{W\sin\theta}{\frac{A}{\cos\theta}}=\frac{W\cos\theta\sin\theta}{A}$$

$$=\frac{\sigma}{2}\sin2\theta\ (\mathrm{kgf/cm^2}) \tag{2}$$

σ_n: $A'B'$方向的垂直应力 (kgf/cm²)

W: 轴向载荷 (kgf)

A: 断面AB的截面积 (cm²)

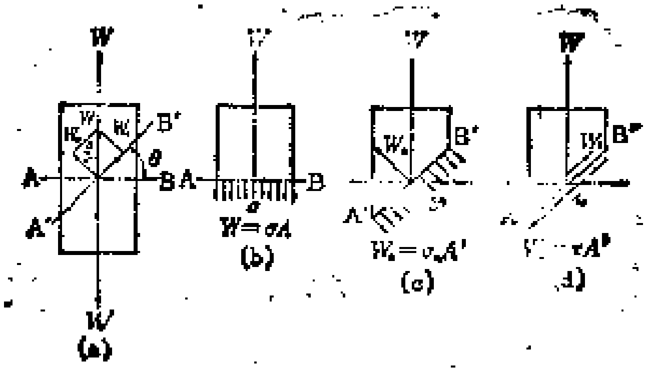


图2.31 斜截面上的应力

θ: $A'B'$和AB的夹角(°)

τ: $A'B'$ 方向的剪应力 (kgf/cm²)

(2) 互相垂直的正应力

$$\sigma_n=\sigma_x\cos^2\theta+\sigma_y\sin^2\theta\quad(\mathrm{kgf/cm^2}) \tag{3}$$

$$\tau=\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\sin2\theta\ (\mathrm{kgf/cm^2}) \tag{4}$$

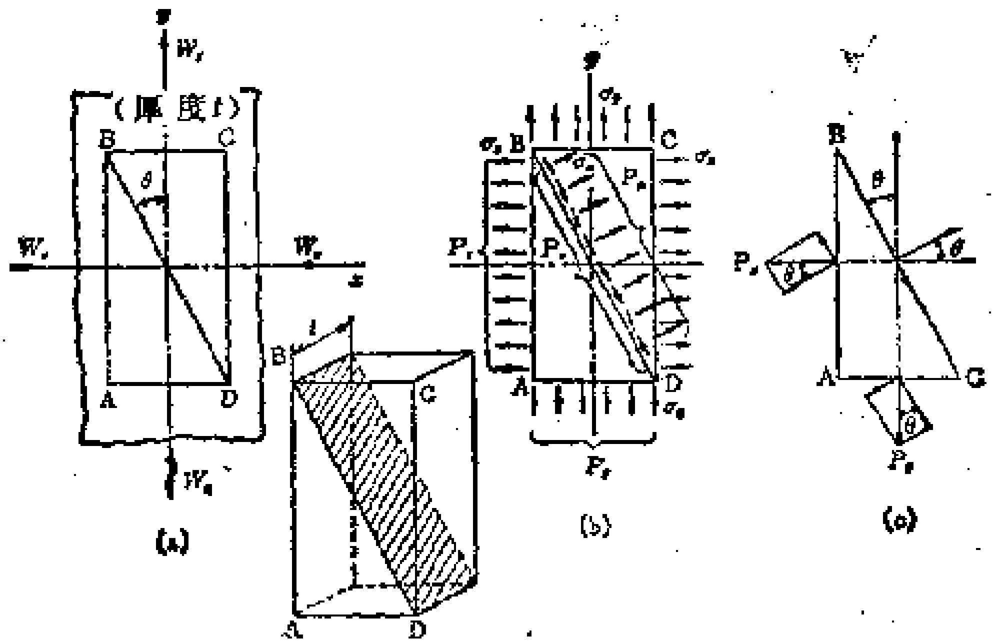


图2.32 互相垂直的正应力合成

σ_x、σ_y: 在材料内部产生的互相垂直的应力 (kgf/cm²)

$\sigma_x > \sigma_y$时:

$\theta=0°$ (主平面) σ_n (kgf/cm²) 最大, $\sigma_n=\sigma_x$, $\tau=0$

$\theta=90°$ (主平面) σ_n (kgf/cm²) 最小, $\sigma_n=\sigma_y$, $\tau=0$

$\theta=45°$ ($\sin 2\theta=1$) 时, τ值最大.

$$\tau_{max}=\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2} \quad (\mathrm{kgf/cm^2})$$

【解说】 如图2.32所示, 轴向载荷W(kgf) 如果作用在均匀的材料上, 产生在垂直截面AB上的正应力σ (kgf/cm²)的大小等于$\dfrac{W}{A}$。但该种材料对于抗剪应力弱时, 往往大约和AB截面成45°的截面破坏。在斜截面$A'B'$上同时产生正应力σ_n (kgf/cm²) 和剪应力 τ (kgf/cm²), 特别是$\theta=45°$的斜截面上, 产生最大剪应力。

【例题】 9000(kgf) 的载荷, 作用在图2.31所示的5cm×6cm的矩形截面的钢制棒料上, 试求产生在30°的斜截面上的正应力和剪应力。

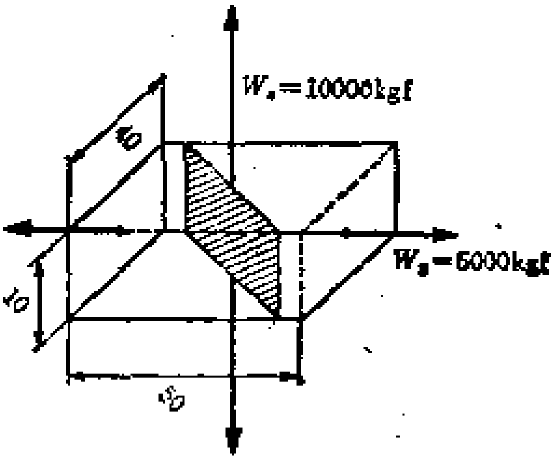
【解答】 将$W=9000\text{kgf}$，$A=5\text{cm}\times 6\text{cm}$，$\theta=30^\circ$代入 (1) 式、(2) 式，得

$$\sigma=\frac{W\cos^2\theta}{A}=\frac{9000\times\cos^2 30^\circ}{5\times 6}=225(\text{kgf/cm}^2)$$

$$\tau=\frac{W\sin\theta\cos\theta}{A}=\frac{9000\times\sin 30^\circ\cos 30^\circ}{5\times 6}=129.9$$
(kgf/cm^2)

【例题】 相互垂直的载荷$W_x=10000(\text{kgf})$，$W_y=5000$ (kgf)作用在图2.33[1]所示的长方体上时，试求在60°斜截面上产生的正应力和剪应力。

【解答】 如求图中所产生的σ_x、σ_y，则得



$$\sigma_x=\frac{W_x}{A}=\frac{10000}{50\times 40}$$
$$=5\ (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\sigma_y=\frac{W_y}{A}=\frac{5000}{50\times 10}$$
$$=10\ (\text{kgf/cm}^2)$$

将上述的值代入(3)式、(4)式，得

$$\sigma_n=\sigma_x\cos^2\theta+\sigma_y\sin^2\theta$$
$$=5\times\cos^2 60^\circ+10\times\sin^2 60^\circ=8.750(\text{kgf/cm}^2)$$

$$\tau=\frac{\sigma_x-\sigma_y}{2}\ \sin^2\theta=\frac{5-10}{2}$$
$$\times\sin(2\times 60^\circ)$$
$$=-2.165\ (\text{kgf/cm}^2)$$

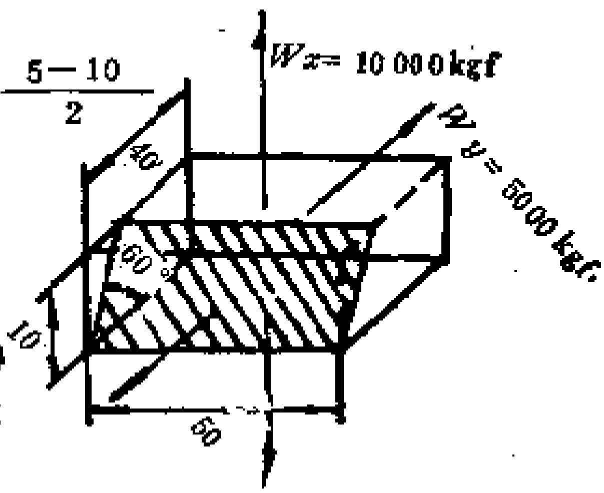


图2.33 作用的载荷互相垂直

[1] 原文的图2.33画法不对，用此图得不到σ_y、σ_n、τ的计算结果。应采用译者的图2.33才能得到。
——译者注

§2.22 组合应力

(1) 主平面

$$\tan 2\theta=\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x-\sigma_y} \qquad (1)$$

θ：主平面和y轴夹角(°)

σ_x、σ_y：x轴、y轴方向的正应力 (kgf/cm^2)

τ_{xy}：x轴方向的剪应力 (kgf/cm^2)

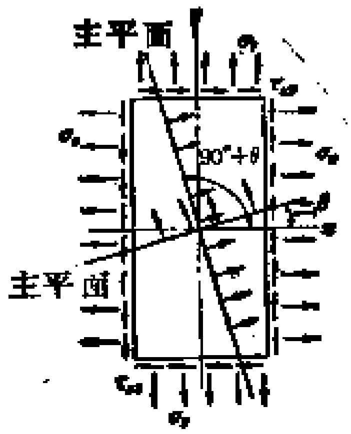


图2.34 主平面和主应力

(2) 主应力

σ_{max}、σ_{min}：最大或最小主应力 (kgf/cm^2)

$$\left.\begin{matrix}\sigma_{max}\\ \sigma_{min}\end{matrix}\right\}=\frac{(\sigma_x+\sigma_y)}{2}\pm\frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+4\tau_{xy}^2}$$

(kgf/cm^2) (2)

(3) 最大剪应力

$$\tau_{max}=\frac{\sigma_{max}-\sigma_{min}}{2}=\frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+4\tau_{xy}^2}$$

(kgf/cm^2) (3)

【解说】一般在材料内的某截面上，都同时作用着正应力σ_n (kgf/cm^2) 和剪应力τ(kgf/cm^2)，由于θ角的变化应力也变化。在这些截面中组合应力p(kgf/cm^2) 垂直作用的截面称为主平面，作用在主平面上的正应力称为主应力。

【例题】 互相垂直的拉应力$\sigma_x=800$(kgf/cm^2)，$\sigma_y=600$(kgf/cm^2)，剪应力$\tau_{xy}=200$(kgf/cm^2) 作用在互相垂直的平面上，求主平面位置，最大正应力和最大剪应力。

【解答】 将$\sigma_x=800kgf/cm^2$，$\sigma_y=600\ kgf/cm^2$，$\tau_{xy}=200\ kgf/cm^2$代入 (2) 式、(3)式，得

$$\sigma_{max}=\frac{\sigma_x+\sigma_y}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+4\tau_{xy}^2}$$

$$=\frac{(800+600)}{2}+\frac{1}{2}\sqrt{(800-600)^2+4\times200^2}$$

$$=923.6\quad(\mathrm{kgf/cm^2})$$

$$\tau_{max}=\frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x-\sigma_y)^2+4\tau_{xy}^2}$$

$$=\frac{1}{2}\sqrt{(800-600)^2+4\times200^2}$$

$$=223.6\ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

主平面位置

$$\theta=\frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x-\sigma_y}=\frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{2\times200}{800-600}$$

$$=31°43'\text{或}121°34'$$

§ 2.23 组合应力（三）

(1) 相当弯矩M_e(kgf·cm)

$$M_e=\frac{1}{2}(M+\sqrt{M^2+T^2})\quad(\text{kgf}\cdot\text{cm})\qquad(1)$$

M：弯矩 (kgf·cm)

T：扭矩 (kgf·cm)

(2) 相当扭矩

$$T_e=\sqrt{M^2+T^2}\quad(\text{kgf}\cdot\text{cm})\qquad(2)$$

【解说】 安装齿轮和皮带轮等的传动轴，同时受弯曲和扭转作用。因为这时在轴上同时发生弯曲应力σ_b(kgf/cm²) 和扭转应力 τ (kgf/cm²)，所以构成了组合应力状态。现在分析一下圆形截面轴（抗弯截面模量 Z cm³），由弯矩M (kgf·cm) 引起的弯曲应力 σ_b (kgf/cm²) 在轴的表面最大，为

$$\sigma_b=\frac{M}{Z}=\frac{32M}{\pi d^3}\quad(\text{kgf/cm}^2)$$

弯曲应力σ_b是正应力，扭转应力τ是剪应力。因为在材料内部它们是互相垂直的，所以作为这些组合应力将产生最大主应力σ_{max}和最大剪应力τ_{max}.

设$\sigma_x=\sigma_b$，$\sigma_y=0$，$\tau_{xy}=\tau$，σ_{max}从§2.22中的 (2) 式，得

$$\sigma_{max}=\frac{1}{2}\sigma_b+\frac{1}{2}\sqrt{\sigma_b{}^2+4\tau^2}$$

$$=\frac{1}{2}\left\{\frac{32M}{\pi d^3}+\sqrt{\left(\frac{32M}{\pi d^3}\right)^2+4\left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2}\right\}$$

$$\therefore\sigma_{max}=\frac{1}{2}\times\frac{32}{\pi d^3}(M+\sqrt{M^2+T^2})\quad(\text{kgf/cm}^2)$$

设式中，

$$M_e=\frac{1}{2}(M+\sqrt{M^2+T^2})\quad(\text{kgf}\cdot\text{cm})$$

将M_e称为相当弯矩。

同样，设：

$$T_e=\sqrt{M^2+T^2}\ (\mathrm{kgf\cdot cm})$$ 将T_e称为相当扭矩。

【例题】 试求同时受$M=30000$ (kgf·cm)，$T=50000$(kgf·cm) 轴的相当弯矩和相当扭矩。

【解答】 $T_e=\sqrt{M^2+T^2}=\sqrt{30000^2+50000^2}$

$$=58310\ (\mathrm{kgf\cdot cm})$$

$$M_e=\frac{1}{2}(M+\sqrt{M^2+T^2})$$

$$=\frac{1}{2}(30000+\sqrt{30000^2+50000^2})=44155\ (\mathrm{kgf\cdot cm})$$

第三章　机械设计

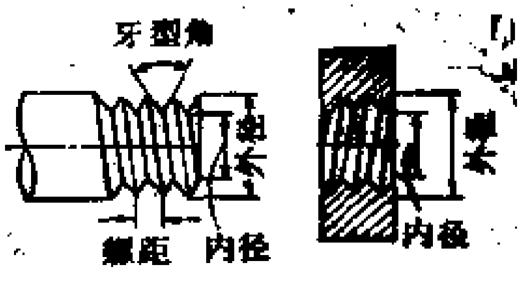
§3.1　螺纹（一）

（1）　导程l（mm）

$$l=np\ (\text{mm})\qquad (1)$$

n：螺纹头数

p：螺距（mm）



（a）外螺纹　　（b）内螺纹

图3.1　螺纹各部名称

（2）　受轴向载荷作用的螺栓直径（mm）

$$d=\sqrt{\frac{2W}{\sigma_a}}\ (\text{mm})\qquad (2)$$

W：轴向载荷（kgf）

σ_a：许用拉应力（kgf/mm^2）

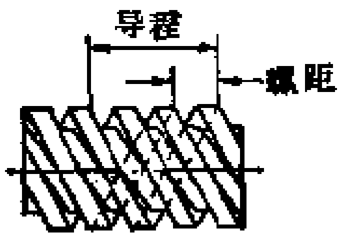


图3.2　三头螺纹

（3）　同时承受轴向载荷及扭矩作用的螺栓直径（mm）

$$d=\sqrt{\frac{8W}{3\sigma_a}}\ (\text{mm})\qquad (3)$$

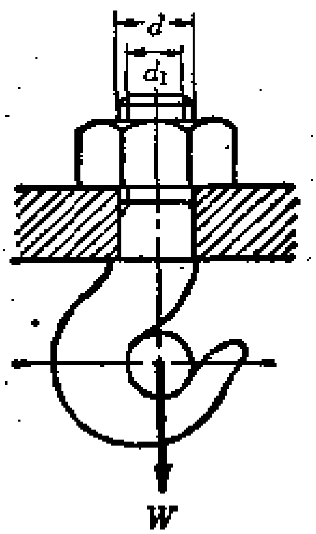


图3.3　吊钩

【解说】 通常使用的螺纹，是用一根螺旋线卷在圆柱体上，称单头螺纹。把两根以上的螺旋线并行等间距地卷起，称多头螺纹。按螺旋线的数量分为双头螺纹、三头螺纹等。螺纹回转一周时，螺纹上任一点在轴向移动的距离叫导程。同一根螺旋线上相应两点之间的距离叫螺距。导程与螺距的关系见(1)式。

在图3.3上，吊钩承受 W (kgf) 载荷，螺纹内径d_1 (mm)，在螺纹上产生拉应力σ (kgf/mm²)，假如不考虑夹紧时的拉力，则

$$W=\frac{\pi}{4}d_1^2\cdot\sigma\ \text{(kgf)}$$

求螺栓直径时，用 $d_1=0.8d$代入上式，则

$$W=\frac{\pi}{4}(0.8d)^2\cdot\sigma\approx0.5d^2\cdot\sigma\ \text{(kgf)}$$

如令该应力σ和螺栓材料的许用拉应力相等，从上式就可以求出螺栓直径d，即为 (2) 式。此外，若同时承受轴向载荷和扭矩作用时，将 (2) 式中的W用 $\frac{4}{3}W$代替即是 (3) 式。

【例题】 如图3.3的钢制吊钩，吊起3000kgf 的重物，试确定吊钩普通螺纹的尺寸。设许用拉应力为4.8kgf/mm²。

【解答】 将$W=3000$kgf，$\sigma_a=4.8$kgf/mm²代入 (2) 式，得

$$d=\sqrt{\frac{2W}{\sigma_a}}=\sqrt{\frac{2\times3000}{4.8}}=35.36\ \text{(mm)}$$

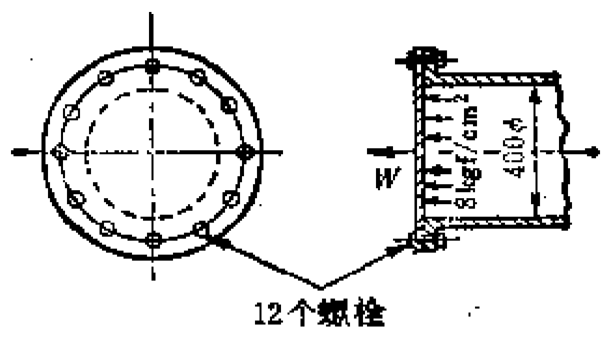


图3.4 气缸盖

从附表5查得为$M36$。

【例题】 如图 3.4所示，在内径 400mm，内压$8kgf/cm^2$的气缸盖上，用12个螺栓把紧，试求螺栓直径。设许用拉应力为$4.5kgf/mm^2$。

【解答】 求作用在盖上的总载荷P(kgf)，(计算时请注意单位换算)

$$P=\frac{8}{100}\times\frac{\pi}{4}\times400^2=10053\ (\mathrm{kgf})$$

假定12个螺栓所承受的工作载荷相等，则一个螺栓所受载荷为

$$W=\frac{P}{12}=\frac{10053}{12}=837.8(\mathrm{kgf})$$

由（3）式可求得螺栓直径d（mm）

$$d=\sqrt{\frac{8W}{3\sigma_a}}=\sqrt{\frac{8\times837.8}{3\times4.5}}=22.28\ (\mathrm{mm})$$

从附表5中选取大于并靠近$d=22.28$(mm）的$M24$螺栓。

【注意】 注意使用（2）式和（3）式的条件。对压力容器、螺旋千斤顶和螺旋压力机等的螺纹计算，一般用（3）式。

【发展】 按照JIS制定的螺纹大致分为公制螺纹和尤氏螺纹。从断面形状可分为三角螺纹、梯形螺纹和矩形螺纹。此外还有ISO螺纹，为此应在螺栓端部和螺帽上打印以便和其他螺纹相区别。

§3.2 螺纹(二)

(1) 受剪力作用的螺栓直径d (mm)

$$d=\sqrt{\frac{4W}{\pi\tau_a}}\ (\mathrm{mm}) \qquad (1)$$

W：垂直于螺栓轴线方向的载荷 (kgf)

τ_a：许用剪应力 (kgf/mm²)

(2) 螺帽高h (mm)

$$h=\frac{Wp}{\pi d_2 H_1 q}\ (\mathrm{mm}) \qquad (2)$$

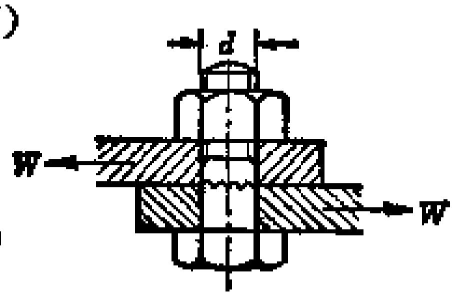


图3.5 受剪切载荷作用的螺栓

p：螺距 (mm)

d_2：螺纹的中径〔$\approx(d+d_1)/2$〕(mm)

H_1：螺纹牙相接触的高度 (mm)

q：螺纹接触面许用压力 (kgf/mm²)

【解说】 如图3.5所示受有剪力作用时，应使螺纹部分不在剪切面上。设螺栓上产生的剪应力为τ，则

$$W=\frac{\pi}{4}d^2\tau\ (\mathrm{kgf})$$

使许用剪应力τ_a (kgf/mm²) 与τ相等，即成为求螺栓直径 d的(1)式。象这样承受横向载荷的情况，应使螺栓与孔间不存在间隙，也就不会产生弯曲应力。

螺栓、螺帽之所以破坏，不仅由于螺栓有被剪断之可能，并且螺帽也可能损坏。承受载荷的面积大致等于螺纹一圈的面积$\pi d_2 H_1$。设螺纹 n圈上所承受的载荷是均等的，则支承载荷的面积即是$n\pi d_2 H_1$。设接触面许用压力为q，则圈数为

$$n=\frac{W}{\pi d_2 H_1 q}$$

在此，螺帽高h (mm) 为

$$h=np$$

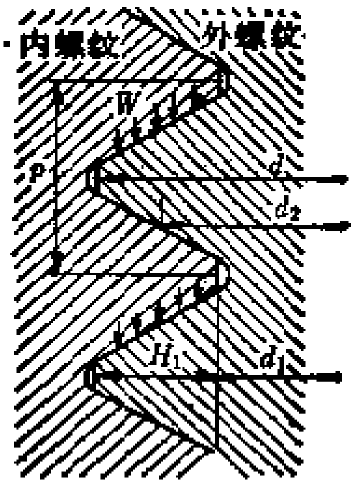


图3.6　螺纹的接触面压力

从上面两个公式可求螺帽高度，即为（2）式。表3.1给出螺纹表面许用压力的大小。

表 3.1　　螺纹表面许用压力（kgf/mm^2）

外螺纹	内螺纹	联接用	传动用
软钢	软钢或黄铜	3	1
硬钢	硬钢或青铜	4	1.3
软钢	铸铁	1.6	0.5

（选自《机械工程学手册》修订第五版，日本机械学会编）

【例题】　在图3.5中作用力$W=1200$kgf，如使用M24（外径24mm）的螺栓，试求该螺栓产生的剪应力大小。

【解答】　将$W=1200$kgf，$d=24$mm 代入变换的（1）式，得

$$\tau=\frac{W}{\frac{\pi}{4}d^2}=\frac{1200}{\frac{\pi}{4}\times(24)^2}=2.653\ (kgf/mm^2)$$

【例题】　在图3.5中作用力$W=1500$kgf，试求螺栓直径。设许用剪应力$\tau_a=3kgf/mm^2$。

【解答】 将$W=1500$kgf，$\tau_a=3$kgf/mm²代入（1）式，得

$$d=\sqrt{\frac{4W}{\pi\tau_a}}=\sqrt{\frac{4\times1500}{\pi\times3}}=25.23\ (\text{mm})$$

从附表5中查得，大于并靠近$d=25.23$mm的公制标准螺纹是$M27$。

【例题】 30tf螺旋压力机的螺纹选用软钢材料制造，螺栓外径100mm，内径80mm，螺距40mm，求螺帽高度。设螺纹接触面许用压力为$q=3$kgf/mm²。

【解答】 将$W=30000$kgf，$d=100$mm，$d_1=80$mm，$p=40$mm，$q=3$kgf/mm²代入（2）式，得

$$h=\frac{Wp}{\pi d_2H_1q}=\frac{30000\times4}{\pi\times\frac{100+80}{2}\times\frac{100-80}{2}\times3}$$

$$=141.5\approx150\ (\text{mm})$$

【发展】 在载荷较大时，可使用梯形螺纹、方牙螺纹、锯齿螺纹等。若摩擦力大时，可采用圆形螺纹。

一般机械零件以软钢制造的螺帽高度，等于螺栓外径的0.8～1倍为好。

§3.3 铆钉接头

(1) 铆钉被剪断的情况〔图3.7 (a)、(b)〕

$$\left.\begin{aligned} &\text{图 (a)} \quad W = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \tau_a \ (\mathrm{kgf}) \\ &\text{图 (b)} \quad W = \frac{\pi}{2} d^2 \cdot \tau_a \ (\mathrm{kgf}) \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

W：相当1个间距的拉伸载荷 (kgf)

d：铆钉的公称直径 (mm)

τ_a：铆钉的许用剪应力 (kgf/mm²)

(2) 板被剪断的情况

〔图3.7(c)〕

$W = t\ (p - d_1)\sigma_t$ (kgf) (2)

t：板厚 (mm)

p：铆钉的间距 (mm)

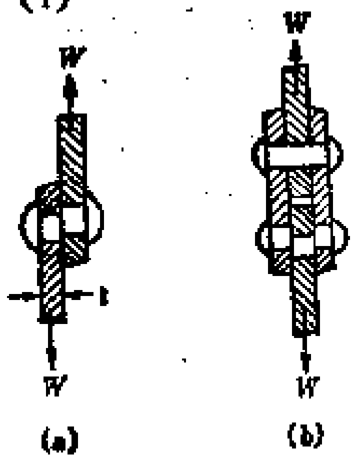
d_1：铆钉孔径 (mm)

σ_t：板材的许用拉应力 (kgf/mm²)

(3) 铆钉孔被挤压坏的情况

$W = td\sigma_c$ (kgf) (3)

σ_c：板的许用压应力 (kgf/mm²)



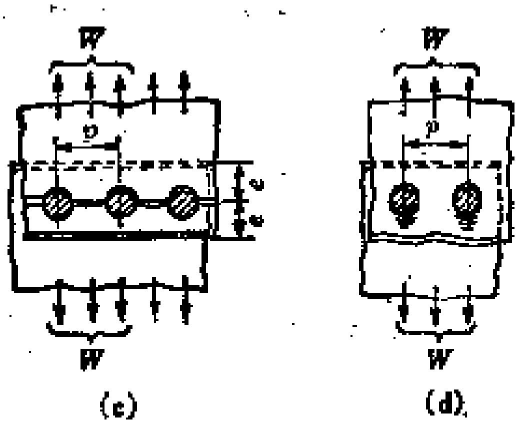


图3.7 铆钉接头的破坏

(4) 铆钉接头的效率

板效率η_1

$$\eta_1 = \frac{t(p - d_1)\sigma}{tp\sigma} = \frac{p - d_1}{p} \quad (4)$$

铆钉的效率η_2

$$\eta_2 = \frac{Z\dfrac{\pi}{4}\qquad}{tp\sigma} \quad (5)$$

将η_1、η_2二值中的较小值称为铆钉接头效率

σ：板材的抗拉强度（kgf/mm^2）

Z：在1个间距内铆钉的剪断面数目

τ：铆钉的剪断强度（kgf/mm^2）

【解说】 当铆钉接头承受载荷作用而破坏时，可按图3.7上的四种情况考虑。在实际的铆钉接头中，有以密封为主和以强度为主的两种情况，并分别参照下面的尺寸比例。

（a）以密封为主的情况，一般用在1列搭接接头，极少用于2列搭接接头。

$$d_1=\sqrt{50t}-4 \quad (mm)$$

$$p=3d_1+5 \quad (mm)$$

$$e=1.5d_1 \quad (mm)$$

（b）以强度为主的情况：按图3.8上规定的符号（上面的符号也与此相同）。

$$d_1=\sqrt{50t}-2 \quad (mm)$$

$$p=(3\sim8)d_1 \quad (mm)$$

$$e=(1.5\sim2.5)d_1 \quad (mm)$$

$$e'=(1.5\sim2)d_1 \quad (mm)$$

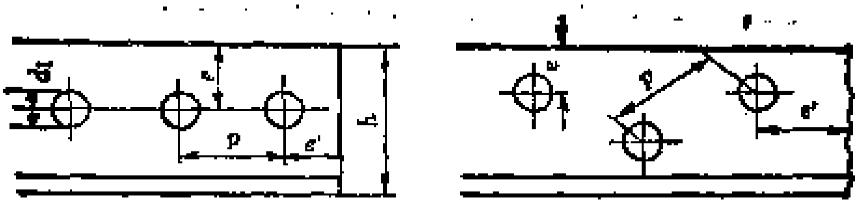


图3.8 结构用角钢的铆钉配置

【例题】 把厚度为16mm的钢板，用1列铆钉的搭接接头联接而制作低压容器时，按（a）式求铆钉的公称直径、间距尺寸和接头效率。板材的拉伸强度为35kgf/mm^2，铆钉的剪断强度为28kgf/mm^2。

【解答】 将$t=16mm$代入（a）式，得

$$d=\sqrt{50t}-4=\sqrt{50\times16}-4=24.28$$

$$\approx24\ (\mathrm{mm})$$

从附表6、7查得铆钉的公称直径 $d=24(\mathrm{mm})$ 及孔径 $d_1=25.5(\mathrm{mm})$。

$$p=3d_1+5=3\times25.5+5=81.5\approx82\ (\mathrm{mm})$$

$$\eta_1=\frac{p-d_1}{p}=\frac{82-25.5}{82}=0.6890$$

$$\eta_2=\frac{Z\frac{\pi}{4}d^2\tau}{tp\sigma}=\frac{1\times\frac{\pi}{4}\times24^2\times28}{16\times82\times35}=0.2758$$

取二者中较小值，铆钉接头效率为 $\eta=0.2758$

§3.4 焊接接头

(1) 打坡口的焊接接头

$P = tl\sigma_a$ (kgf) (1)

P：载荷 (kgf)

t：板厚 (mm)

l：焊缝长度 (mm)

σ_a：许用拉应力 (kgf/mm²)

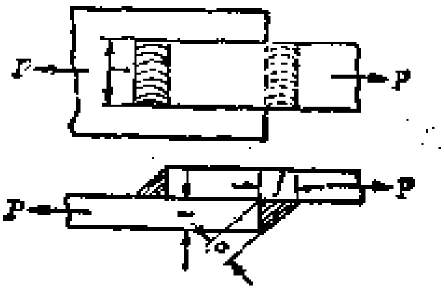


图3.9 带坡口的焊接接头的强度

(2) 正面填角焊接

$P = 2al\sigma_a \approx 1.4tl\sigma_a$

(kgf) (2)

a：焊缝厚度 (mm)

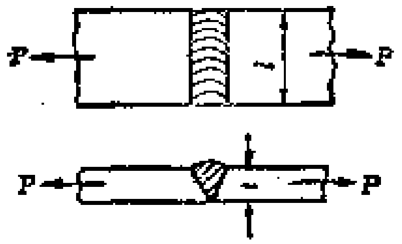


图3.10 正面填角焊接接头的强度

(3) 侧面填角焊接

$P = 2al\tau_a = 1.4tl\tau_a$

(kgf) (3)

τ_a：许用剪应力 (kgf/mm²)

详细的强度计算和安全系数请参照附表8、9、10。

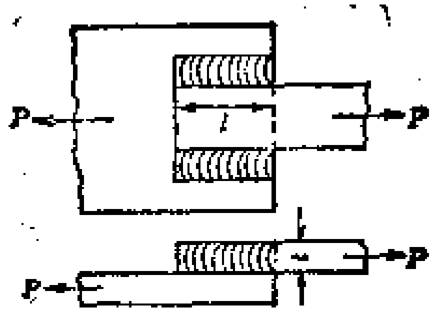


图3.11 侧面填角焊接接头的强度

【解说】 如图 3.9所示，在焊接区域，焊缝表面呈鼓起状。从板材到焊缝表面膨起的熔敷金属称加强焊缝。为了安全，在计算时加强焊缝并不计入。因此，载荷P可用 (1) 式表示。

图3.10的焊接方法叫正面填角焊接。把a的长度叫焊缝厚度。一

般设$f=t$，所以$a=t\cos45^\circ\approx0.7t$，因为有2个抵抗截面而成为(2)式。同样可求得（3）式。

【例题】 如图3.11所示的焊接接头，软钢板的厚度$t=12$(mm)，为了吊起4000kgf载荷，焊接长度l最小应该是多少？设焊缝系数为0.8，许用剪应力为5 kgf/mm²。

【解答】 将$P=4000$kgf，$t=12$mm，$\tau_a=5$kgf/mm²，$\eta=0.8$代入变换的(3)式，得

$$l=\frac{P}{1.4t\ \tau_a\eta}=\frac{4000}{1.4\times12\times5\times0.8}=59.52(\text{mm})$$

§3.5 管径

(1) 压力容器的壁厚 t (mm)

$$t=\frac{Dp}{2\sigma_a\eta}+C \quad (\mathrm{mm}) \qquad (1)$$

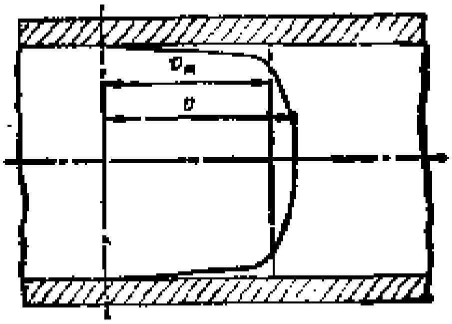


图3.12 管内的速度分布

D：筒体内径(mm)

p：内压力($\mathrm{kgf/mm^2}$)

σ_a：许用拉应力($\mathrm{kgf/mm^2}$)

η：焊接接头效率

c：壁厚附加量（对于腐蚀为一常量，故通常采用1mm)(mm)

(2) 管径

$$D=\sqrt{\frac{4\times10^6 Q}{\pi v_m}}\approx1128\sqrt{\frac{Q}{v_m}}(\mathrm{mm}) \qquad (2)$$

D：管子内径 (mm)

Q：流量($\mathrm{m^3/s}$)

v_m：平均流速(m/s)

【解说】 为了能在实际的压力容器上使用铆接接头和焊接接头，在理论上参照§2.6同时又考虑了接头效率和壁厚附加量，即得出(1)式。

通常，管内充满流体流动时，由于管内壁和流体的摩擦，管子中间流速快，靠近管壁处减慢。设管内截面积为A，则有

$$Q=A\cdot v_m=\frac{\pi}{4}\left(\frac{D}{1000}\right)^2 v_m \qquad (\mathrm{m^3/s})$$

按上式解出直径D，即为(2) 式。

【例题】 平均流速为 3 m/s，流量为 7 $\mathrm{m^3/s}$，水压为15$\mathrm{kgf/cm^2}$。试求此铸铁输水管管径。

【解答】 根据(2)式求管子内径D(mm)

$$D=1128\sqrt{\frac{Q}{v_m}}=1128\sqrt{\frac{7}{3}}=1723(\mathrm{mm})$$

从附表22求出C值

$$C=6\left(1-\frac{Dp}{27500}\right)=6\left(1-\frac{1723\times0.15}{27500}\right)$$

$$=5.944\ (\mathrm{mm})$$

管的壁厚

$$t=\frac{Dp}{2\sigma_{a}\cdot\eta}+C=\frac{1723\times0.15}{2\times2.5\times1}+5.944$$

$$=57\cdot63(\mathrm{mm})$$

从附表22 知 $t\geqslant55$时，c可取小值。因此，$t=55(\mathrm{mm})$

§3.6 轴径

(1) 承受弯曲的轴

圆轴 $$d=\sqrt[3]{\frac{32M}{\pi\sigma_a}}\approx\sqrt[3]{\frac{10M}{\sigma_a}}\ (\mathrm{mm}) \tag{1}$$

空心轴 $$d_2=\sqrt[3]{\frac{32M}{\pi\sigma_a(1-k^4)}}\approx\sqrt[3]{\frac{10M}{\sigma_a(1-k^4)}}(\mathrm{mm}) \tag{2}$$

d：轴径 (mm)

d_1、d_2：空心轴的内径和外径 (mm)

M：作用在轴上的最大弯矩 (kgf·mm)

σ_a：轴的许用弯曲应力 (kgf/mm²)

k：内径与外径的比值 ($=d_1/d_2$)

(2) 承受扭转的轴

圆轴 $$d=\sqrt[3]{\frac{16T}{\pi\tau_a}}\approx\sqrt[3]{\frac{5T}{\tau_a}}(\mathrm{mm}) \tag{3}$$

空心轴 $$d_2=\sqrt[3]{\frac{16T}{\pi\tau_a(1-k^4)}}\approx\sqrt[3]{\frac{5T}{\tau_a(1-k^4)}}\ (\mathrm{mm}) \tag{4}$$

T：作用在轴上的最大扭矩 (kgf·mm)

τ_a：轴的许用扭转应力 (kgf/mm²)

(3) 同时承受弯曲与扭转的轴

圆轴 $$d=\sqrt[3]{\frac{10M_e}{\sigma_a}}\ (\mathrm{mm}),$$

$$d=\sqrt[3]{\frac{5T_e}{\tau_a}}(\mathrm{mm}) \tag{5}$$

空心轴 $$d_2=\sqrt[3]{\frac{10M_e}{\sigma_a(1-k^4)}}(\mathrm{mm}),$$

$$d_2=\sqrt[3]{\frac{5T_e}{\tau_a(1-k^4)}}(\mathrm{mm}) \tag{6}$$

M_e：相当弯矩（参照§2.23）(kgf·mm)

T_e：相当扭矩（参照§2.23）(kgf·mm)

【解说】 从附表4中查得圆轴的抗弯截面模量

$Z=\frac{\pi d^3}{32}$，将此代入$M=\sigma_a Z$中，得

$$M=\sigma_a Z=\sigma_a \frac{\pi d^3}{32}\approx\frac{\sigma_a d^3}{10}(\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

由上式求得d，即成(1) 式。

同样，若为空心轴时，把$Z=\frac{\pi(d_2^4-d_1^4)}{32d_2}$代入，得

$$M=\sigma_a\cdot Z=\sigma_a\frac{\pi(d_2^4-d_1^4)}{32d_2}\approx\frac{\sigma_a(d_2^4-d_1^4)}{10d_2}$$

$$=\frac{\sigma_a d_2^3(1-k^4)}{10}\ (\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

若求出d_2，即得到(2) 式。

另外，Z_p为抗扭截面模量，由$T=\tau_a Z_p$，对于圆轴可得下式。

$$Z_p=\frac{\pi d^3}{16}$$

$$T=\tau_a Z_p=\tau_a\times\frac{\pi d^3}{16}\approx\frac{\tau_a d^3}{5}(\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

如求d可得出（3）式。同理可得(4) 式。

【例题】 求承受1000kgf·m扭矩作用的轴的直径。设许用扭转应力为5kgf/mm²。

【解答】 将$T=1000000\text{kgf}\cdot\text{mm}$，$\tau_a=5\text{kgf/mm}^2$代入(3) 式，得

$$d=\sqrt[3]{\frac{5T}{\tau_a}}=\sqrt[3]{\frac{5\times1000000}{5}}=100(\text{mm})$$

【例题】 求同时承受弯矩为200000kgf·mm和扭矩为40000kgf·mm

的轴径。设许用弯曲应力为5kgf/mm²，许用扭转应力为2.5kgf/mm²。

【解答】 由$M=200000$kgf·mm和$T=40000$kgf·mm求出相当扭矩T_e，得

$$T_e=\sqrt{M^2+T^2}=\sqrt{200000^2+40000^2}=204000\ (\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

把T_e值和$\tau_a=2.5$kgf/mm²代入（5）式求d

$$d=\sqrt[3]{\frac{5T_e}{\tau_a}}=\sqrt[3]{\frac{5\times204000}{2.5}}=74.17\ (\text{mm})$$

求相当弯矩M_e

$$M_e=\frac{1}{2}(M+T_e)=\frac{1}{2}(200000+204000)$$
$$=202000\ (\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

把M_e值与$\sigma_a=5$kgf/mm²代入(5)式求d

$$d=\sqrt[3]{\frac{10M_e}{\sigma_a}}=\sqrt[3]{\frac{10\times202000}{5}}=73.93\ (\text{mm})$$

比较上面的两个直径，由相当扭矩求得的直径大些。按这个数值从附表11中选用$d=75$ mm。

§3.7 传动轴的直径

(1) 传动轴的直径d (mm)

$$d \approx 170\sqrt[3]{\frac{P}{\tau_a N}} \ (\text{mm}) \tag{1}$$

P：轴传递功率 (kW)

τ_a：许用扭转应力 (kgf/mm^2)

N：转速 (rpm)

(2) 限制轴的扭转角时传动轴的直径d (mm)

$$d = \sqrt[4]{\frac{2.23\times10^{12}P}{GN}} \ (\text{mm}) \tag{2}$$

若轴选用碳钢制造，$G=8.1\times10^3(\text{kgf/mm}^2)$，则

$$d = \sqrt[4]{\frac{2.23\times10^{12}P}{GN}} \approx 130\sqrt[4]{\frac{P}{N}} \ (\text{mm}) \tag{3}$$

θ：轴的扭转角 (°)

G：剪切弹性模量 (kgf/mm^2)

【解说】 设扭矩为T (kgf·mm)，由§1.22的 (2)式，得

$$P=\frac{2\pi NT}{102\times1000\times60} \ (\text{kW})$$

$$\therefore \quad T=974000\frac{P}{N} \ (\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

将上式代入§3.6的 (3)式，即得(1)式。

传动轴应有足够的扭转刚度，一般轴长1m扭转角不得超过¼°。若截面极惯性矩为$I_p(\text{mm}^4)$，轴的长度为l (m)，则

$$\theta=\frac{360}{2\pi}\times\frac{Tl}{I_pG}\approx57.3\times\frac{Tl}{I_pG} \ (°)$$

在此，设传动轴的截面为圆形，$\theta/l=¼(°/\text{m})$ 即得(2) 式。

【例题】 轴传递功率为$P=30\text{kW}$，$N=280\text{rpm}$。试求轴径。设许用扭转应力$\tau_a=2\text{kgf/mm}^2$，剪切弹性模量$G=8.1\times10^3(\text{kgf/mm}^2)$，

单位扭转角为 0.25°/m ($\theta/l=\frac{1}{4}°$)。

【解答】 $$d=170\sqrt[3]{\frac{P}{\tau_a N}}=170\sqrt[3]{\frac{30}{2\times280}}=64.09(\mathrm{mm})\quad(i)$$

$$d=130\sqrt[4]{\frac{P}{N}}=130\sqrt[4]{\frac{30}{280}}=74.38(\mathrm{mm})\quad(ii)$$

选取(i)、(ii) 当中的大值，从附表 11取$d=75$mm。

§3.8 牙嵌离合器

(1) 力的平衡

$$T=\frac{2}{3}nAR_m\tau_{max}$$

(kgf·mm)　　(1)

$$A=\frac{\pi}{n}BR_m$$

(mm^2)　　(2)

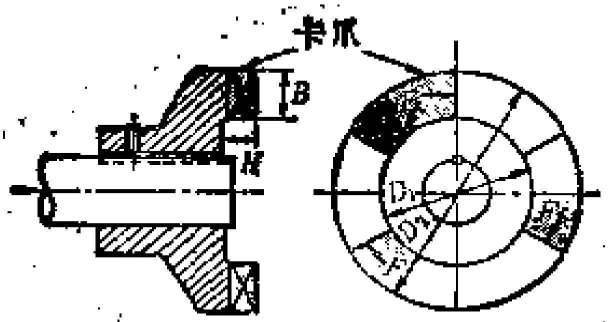


图3.13　牙嵌离合器

T：扭矩 (kgf·mm)

n：卡爪的数量

A：一个爪的截面积 (mm^2)

R_m：卡爪的平均半径 $[=(D_1+D_2)/4]$ (mm)

D_1、D_2：卡爪的内表面、外表面的直径 (mm)

B：卡爪宽 (mm)

τ_{max}：最大剪应力 (kgf/mm^2)

(2) 卡爪的接触面压力

$$T=nBHP_mR_m \quad (kgf\cdot mm)$$　　(3)

H：爪高 (mm)

P_m：平均接触面压力 (kgf/mm^2)

【解说】 主动轴将动力传到从动轴时，工作中需要很简单地将两轴连接或分开。因而采用离合器，如图3.13所示。传递动力是靠安装在两轴端法兰盘的卡爪中心的作用力F。考虑到产生在卡爪根部的剪应力τ(kgf/mm²)，则产生扭矩为

$$T = nA\tau R_m \quad (\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

如果认为最大剪应力τ_{max}是平均剪应力的$\frac{3}{2}$倍，则可得到（1）式。

另外，卡爪的截面积nBH、平均接触面压力P_m和卡爪的平均半径R_m的乘积，即为（3）式。

【例题】 在图3.13中，$D_1=70$mm，$D_2=100$mm，卡爪高$H=15$mm，许用剪应力$\tau(=\tau_{max})=3.0$（kgf/mm²），许用接触面压力$P_m=1.0$ kgf/mm²，轴转速150rpm，卡爪数$n=3$。求传递功率是多少kW？

【解答】 由(1)、(2) 式得

$$T=\frac{2}{3}\pi BR_m^2\tau_{max}=\frac{2}{3}\pi\times\left(\frac{100-70}{2}\right)\times\left(\frac{100+70}{4}\right)^2$$

$$\times 3.0=170235(\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

由(3) 式，得

$$T=nBHP_mR_m=3\times\frac{100-70}{2}\times 15\times\frac{100+70}{4}\times 1.0$$

$$=28688(\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

选取较小的扭矩，求功率。

$$P=\frac{TN}{974000}=\frac{28688\times 150}{974000}=4.418(\text{kW})$$

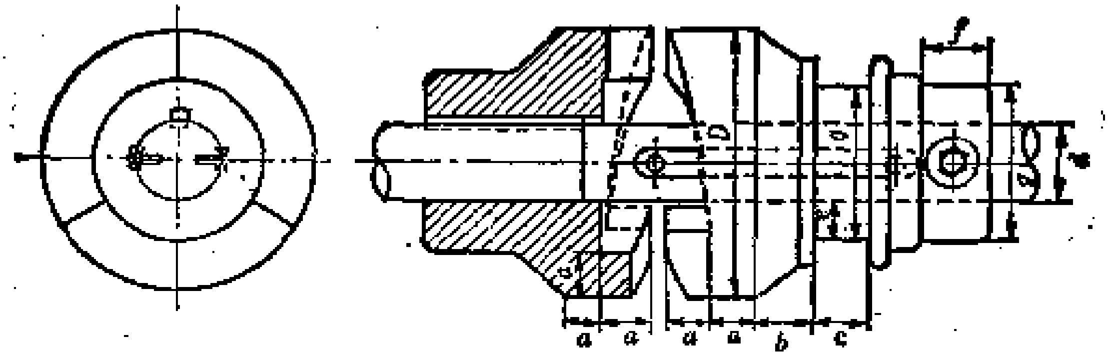
【发展】 实用的牙嵌式离合器，若轴径为d，则

$$B=(1/2\sim 1/3)\,d\ (\text{mm})$$

$$H=B\ (\text{mm})$$

表3.2中列出了牙嵌式离合器的各部尺寸。表3.3绘出了牙嵌式离合器的形状。

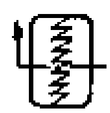
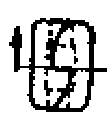
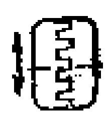
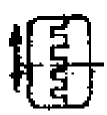
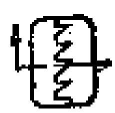
表 3.2　　牙嵌式离合器的主要尺寸示例



d (mm)	40	50	60	70	80	90	100	110	120
D (mm)	100	125	150	175	200	225	250	275	300
a (mm)	20	23	25	30	35	40	45	50	55
b (mm)	40	50	60	70	80	90	100	110	120
c(mm)	20	25	30	35	40	45	50	55	60
e(mm)	16	18	20	22	24	26	28	30	32
f(mm)	30	32	34	36	38	40	42	44	46
g(mm)	72	86	100	114	128	142	156	170	186
卡爪数量	3	3	4	4	4	5	5	6	6

（选自《机械实用手册》修订第4版，日本机械学会编）

表 3.3　　牙嵌式离合器的特征

形状						
离合	运转中可脱开（较低转速时）			也可以在停止时啮合，在运转中拆卸	比左边更易于脱开	
载荷	较轻载荷		较重载荷	重　　载		超重载荷
旋转方向	用在旋转方向改变的场合	旋转方向一定		用在旋转方向改变的场合		旋转方向一定

〔注〕　左为主动轴侧，右为从动轴侧。（选自《机械设计手册》）

§3.9 摩擦离合器

(1) 圆盘离合器传递扭矩T (kgf·mm)

$$T=\frac{1}{2}\mu\pi b D_0^2 f \quad (\mathrm{kgf\cdot mm}) \qquad (1)$$

μ：接触面的摩擦系数

D_1、D_2：接触面内径、外径 (mm)

b：接触面宽度$(D_2-D_1)/2$ (mm)

D_0：接触面平均直径 $(D_2+D_1)/2$ (mm)

f：接触面的平均压力(kgf/mm²)

(2) 圆锥离合器轴向推力F(kgf)

$$F=\frac{2T}{\mu D_0}(\sin\alpha+\mu\cos\alpha) \quad (\mathrm{kgf}) \qquad (2)$$

α：半锥角(°)

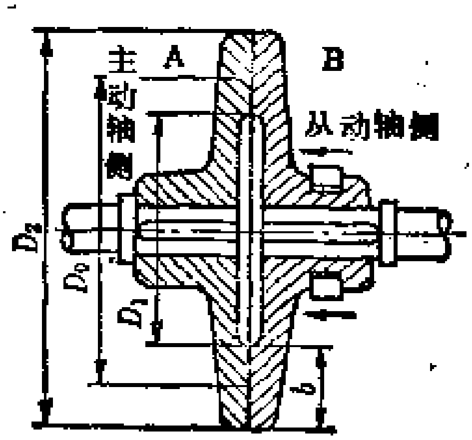


图3.14 圆盘离合器

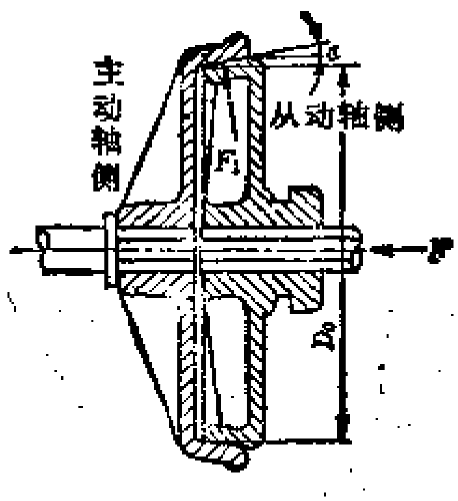


图3.15 圆锥离合器

【解说】 如图3.14所示利用轴向推力所产生的摩擦力来传递动力的离合器，为了使摩擦效果好，使外周接触面中间离开。若接触面的轴向推力为F，则

$$T=\mu F\frac{D_0}{2} \quad (\mathrm{kgf\cdot mm})$$

$$f=\frac{F}{\pi D_0 b} \quad (\mathrm{kgf/mm^2})$$

由此即可得出(1)式。

其次，如果考虑图3.15所示轴向平衡时，则

$$F = F_1\sin\alpha + F_1\mu\cos\alpha = F_1(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) \quad (\mathrm{kgf})$$

再由$T = \mu F_1 \times D_0/2$，即可得出 (2) 式。

【例题】 试求转速$N = 600\mathrm{rpm}$，传递功率$p = 10\mathrm{kW}$的圆盘离合器的内径和外径。设接触面平均压力$f = 0.018(\mathrm{kgf/mm^2})$，摩擦系数$\mu = 0.3$，$D_2/D_1 = 1.5$。

【解答】 将$b = (D_2 - D_1)/2$，$D_0 = (D_2 + D_1)/2$，$T = 974000 \times P/N$，$D_2 = 1.5D_1$代入(1) 式的变换式并整理，得

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{8 \times 2 \times 974000 \times \dfrac{P}{N}}{3.125\mu\pi f}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{8 \times 2 \times 974000 \times \dfrac{10}{600}}{3.125 \times 0.3\pi \times 0.018}} = 169.8(\mathrm{mm})$$

取$D_1 = 160(\mathrm{mm})$，则$D_2 = 1.5D_1 = 240(\mathrm{mm})$

§3.10　径向轴颈

(1)　轴颈强度

(i)　端部轴颈的直径 d (mm)

$$d=\sqrt[3]{\frac{16}{\pi}\cdot\frac{Wl}{\sigma_a}}$$

$$\approx\sqrt[3]{\frac{5Wl}{\sigma_a}}\ (\mathrm{mm}) \qquad (1)$$

(ii)　中间轴颈的直径 d (mm)

$$d=\sqrt[3]{\frac{1.25eWl}{\sigma_a}}\ (\mathrm{mm})$$

W：载荷(kgf)

l：轴颈的长度 (mm)

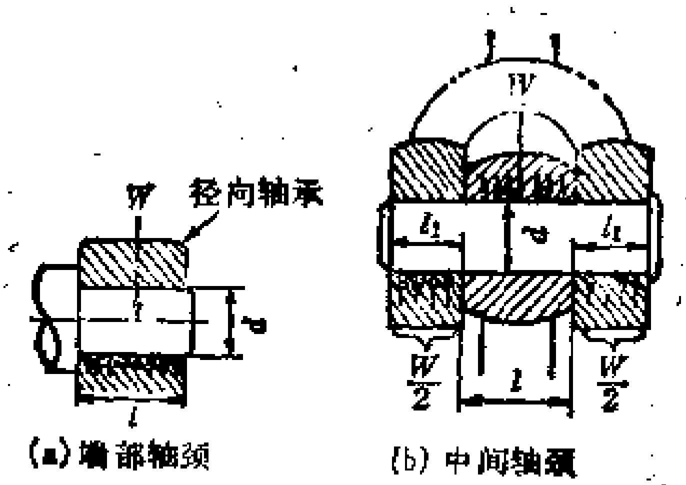


图3.16　径向轴颈

σ_a：许用弯曲应力(kgf/mm²)

l_1：两端的支承部分长度(mm)

L：轴颈的总长度 ($\doteq l+2l_1$) (mm)

e：轴颈的总长度和中间轴颈的长度比($=L/l$)

(2)　轴承压力 p (kgf/mm²) 的强度

(i) 端部　$\frac{l}{d}=\sqrt{\frac{\pi}{16}\cdot\frac{\sigma_a}{p}}\approx\sqrt{\frac{\sigma_a}{5p}}$　　(3)

(ii) 中间 $\frac{l}{d}=\sqrt{\frac{\sigma_a}{1.9p}}$　　(4)

(3)　摩擦热的强度

$$pV=\frac{W}{dl}\cdot\frac{\pi dN}{1000\times60}=\frac{\pi WN}{1000\times60\times l}(\text{kgf/mm}^2\text{、m/s})\qquad(5)$$

V：轴颈的圆周速度(m/s)

μ：摩擦系数

N：轴径的转速(rpm)

【解说】　如图3.16(a)所示，假设总的载荷均匀分布地作用在端部轴颈全长上，最大弯矩为M (kgf·mm)，轴颈的抗弯截面模量为Z (mm^3)，则

$$M=\frac{Wl}{2}=\sigma_a Z=\sigma_a\cdot\frac{\pi d^3}{32}(\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

如果求轴颈的直径，即为公式(1)。

图3.16(b)两端支承的中间轴颈的最大弯矩M发生在轴颈的正中间位置上，所以

$$M=\frac{W}{2}\left(\frac{l+l_1}{2}-\frac{l}{4}\right)=\frac{WL}{8}=\sigma_a Z$$

$$=\sigma_a\frac{\pi d^3}{32}(\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

式中　$L=el$，经过整理求出轴颈的直径，即为公式(2)。

轴承表面承受的平均压力称为轴承压力p。轴承压力可以用

$p=\frac{W}{dl}$ 表示。其大致数值载于附表12、13。对于端部轴颈，即使由

轴的强度和刚度来决定它的直径，但为了保持完整的油膜，$\frac{l}{d}$ 也必

须有适当的范围。即由$W=pdl$可得出

$$M=\frac{Wl}{2}=\frac{pdl.l}{2}=\sigma_{a}\cdot\frac{\pi d^{3}}{32}$$

经过整理后如果求出$\frac{l}{d}$，即为公式(3)。此外，假如是中间轴颈，设$W=pdl$，$e=1.5$代入(2)式，经过整理得(4)式。

在接触面上如果有相对运动，则由于摩擦而发生热量。为了防止轴承部分的过热，必须将轴颈的每单位时间内的摩擦功Af(kgf·m/s)控制在某一许用范围内。设摩擦力为F(kgf)，则

$$Af=FV=\mu WV=\frac{\mu W\pi dN}{1000\times 60}\ (\text{kgf}\cdot\text{m/s})$$

因为该摩擦功Af能够转变成摩擦热，所以为了防止过热，把摩擦功用轴颈投影面积除 使其值保持在某一范围内。即

$$\frac{Af}{dl}=\frac{\mu WV}{dl}=\mu pV(\text{kgf/mm}^{2}\cdot\text{m/s})$$

将该pV值称为最大许用压力速度系数。其值示于附表13。由此得到公式(5)。

【例题】 $W=2000$kgf的载荷加在钢制端部轴颈上，设$\frac{l}{d}=1.5$，许用弯曲应力$\sigma_{a}=4\text{kgf/mm}^{2}$。试求轴颈的直径和轴颈的长度。

【解答】 如将$l=1.5d$代入(1)式的l中，就能求出d

$$d=\sqrt{\frac{5\times1.5W}{\sigma_{a}}}=\sqrt{\frac{5\times1.5\times2000}{4}}=61.24$$

$$\approx63(\text{mm})$$

$$l=1.5d=1.5\times61.24=91.86\approx92.5(\text{mm})$$

§3.11 推力轴颈

(1) 轴承压力 p (kgf/mm²)

图(a) $$p=\frac{W}{\frac{\pi}{4}d^2}\ (\mathrm{kgf/mm^2}) \tag{1}$$

图(b)、(c) $$p=\frac{W}{\frac{\pi}{4}(d_2^2-d_1^2)}\ (\mathrm{kgf/mm^2}) \tag{2}$$

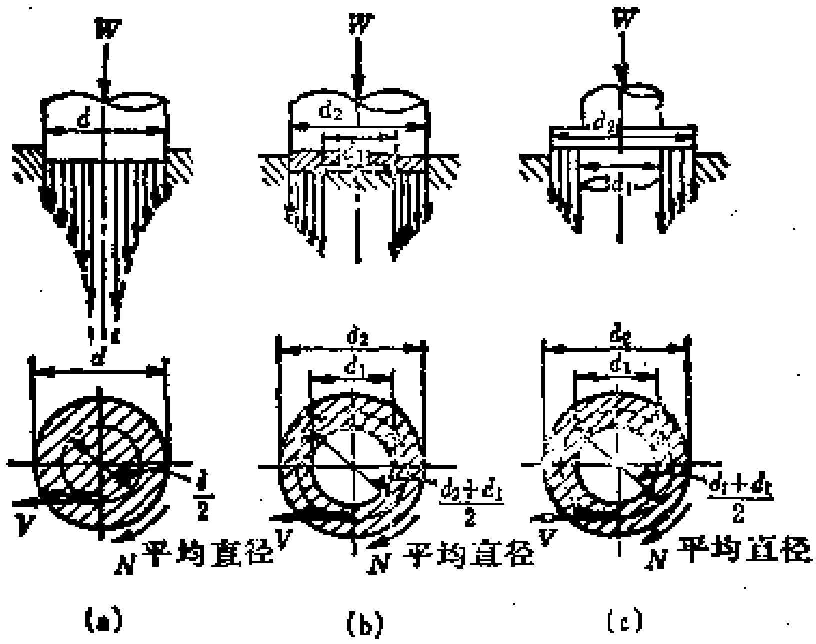


图3.17 薄轴颈的压力分布和摩擦功

W：加在轴颈上的载荷(kgf)

d：轴颈的直径(mm)

d_1、d_2：轴颈的内径、外径(mm)

(2) 摩擦热

图(a) $$d=\frac{WN}{30000pV}\ (\mathrm{mm}) \tag{3}$$

图(b)、(c) $$d_2-d_1=\frac{WN}{30000pV}\ (\mathrm{mm}) \tag{4}$$

轴环数为Z的轴环轴颈

$$d_2-d_1=\frac{WN}{30000ZpV}\ (\mathrm{mm}) \tag{5}$$

N：轴颈的平均转速(rpm)

V：平均直径的圆周速度(m/s)

【解说】 设轴颈的截面积为A，薄轴环的轴颈轴承压力

$p=\frac{W}{A}$，从而可求出(1)式、(2)式。

表 3.4　　薄轴颈的许用轴承压力

材　　料	许用轴承压力 (kgf/mm²)
淬火钢和锡青铜	1.0
没淬火钢和锡青铜	0.4

(选自《机械工程学手册》修订第5版，日本机械学会编)

假如是推力轴颈，则轴承压力、滑动速度由于各部分接触面半径的不同而不同。因此认为轴颈的载荷作用在平均半径上，每单位时间内的摩擦功为Af(kgf·m/s)，设摩擦力为，F(kgf)，则

$$Af=FV=\mu WV\ (\mathrm{kgf\cdot m/s})$$

图(a)

$$V=\frac{1}{1000\times60}\pi\frac{d}{2}N=\frac{\pi dN}{2\times1000\times60}(\mathrm{m/s})$$

因此，每单位面积的Af

$$\frac{Af}{\frac{\pi d^2}{4}}=\frac{\mu W\lambda dN}{1000\times120\times\frac{\pi}{4}d^2}=\mu pV\ (\mathrm{kgf/mm^2\cdot m/s})$$

为了防止轴承部分的过热，将左边的值控制在某范围之内。一般、假如采用普通注油，则pV值在0.17kgf/mm²·m/s以下；假如强……，

则pV值限制在$0.4\sim0.8\,kgf/mm^2\cdot m/s$范围内。由上面的公式可得

$$pV=\frac{\mu W\times\dfrac{\pi dN}{1000\times120}}{\mu\dfrac{\pi}{4}d^2}\approx\frac{WN}{3000d}\ (kgf/mm^2\cdot m/s)$$

求出(3)式。同样也可求出(4)式、(5)式。

【例题】 如图3.17(b)所示，硬钢制的轴颈，受$W=500\,kgf$的垂直载荷作用，以转速$N=200\,rpm$旋转着。设轴承内径$d_1=20\,mm$，$pV=0.17\,kgf/mm^2\cdot m/s$，求轴承的外径是多少？

【解答】 变换(4)式，得

$$d_2=\frac{WN}{30000pV}+d_1=\frac{500\times200}{30000\times0.17}+20$$

$$=39.61\approx50(mm)$$

由(2) 式求得轴承压力

$$p=\frac{W}{\dfrac{\pi}{4}(d_2^2-d_1^2)}=\frac{4\times500}{\pi(50^2-20^2)}\approx0.3032(kgf/mm^2)$$

圆周速度

$$V=\frac{\pi d_2N}{1000\times60}=\frac{\pi\times50\times200}{1000\times60}=0.5236\ (m/s)$$

$$pV=0.3032\times0.5236=0.1588\ (kgf/mm^2\cdot m/s)$$

p值比表中任何值都小，pV值符合要求，故可取$d_2=50$ (mm)。

§3.12 滚动轴承的寿命

(1) 寿命计算公式

滚珠轴承 $L=\left(\frac{C}{P}\right)^{3}\times 10^{6}$ (rev)

滚柱轴承 $L=\left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}}\times 10^{6}$ (rev)

L：额定寿命 (rev)

P：轴承载荷 (kgf)

C：额定动载荷 (kgf)

(2) 载荷修正系数f_W (表3.6)

$P=f_W P_0$ (kgf)

P_0：根据计算求出的载荷 (kgf)

(3) 寿命系数和速度系数 (表3.5)

表 3.5 寿命系数和速度系数 (JISB 0104-1967)

轴承型式	滚珠轴承	滚柱轴承
寿命时间	$L_h=500f_h^{3}$	$L_h=500f_h^{\frac{10}{3}}$
寿命系数	$f_h=f_n\frac{C}{P}$	$f_h=f_n\frac{C}{P}$
速度系数	$f_n=\left(\frac{33.3}{n}\right)^{\frac{1}{3}}$	$f_n=\left(\frac{33.3}{n}\right)^{\frac{3}{10}}$

L_h：轴承的寿命时间 (小时)

f_h：寿命系数

f_n：速度系数

表 3.6 载荷系数f_W值

无冲击的平稳运转	1.0～1.2
普通运转	1.2～1.5
有振动或冲击运转	1.5～2.5

(选自《机械工程学手册》修订第4版，日本机械学会编)

【解说】 滚动轴承的寿命，用套圈滚道和滚动体的表面由于疲劳而引起的开始发生表面成片剥落的总转数表示。使尺寸、结构相同的很多的轴承，在同样的条件下运转时，其中90%的轴承不发生滚动疲劳的材料破坏的总转数(一定旋转速度时的时间)称为额定寿命。

在给出的运转条件下，使一组同样规格的轴承旋转，额定寿命为100万转数（如转速为每分钟33.3转则相当于500小时），所对应的方向和大小都一定的载荷称为额定的动载荷，用C(kgf) 表示。此外，在承受最大应力的接触部分上，能使转动体的永久变形和套圈滚道的永久变形之和，等于滚动体直径的0.0001倍的方向和大小都一定的静载荷称为额定静载荷，用C_0(kgf)表示。以一般的转速使用轴承时，应使其最大的载荷不能超过C。表3.7给出了C和C_0。

表 3.7 径向滚珠轴承的额定动载荷C和额定静载荷C_0

(单位：100kgf，不足100kgf的4舍5入)

号码	型式 / 内径 (mm)	6200		6300		1200		1300		7200		7300	
		C	C_0	C	C_0	C	C_0	C	C_0	C	C_0	C	C_0
00	10	4	2	6	4	4	1	6	2				
01	12	6	3	8	4	5	2	8	3				
02	15	6	4	9	5	6	2	8	3	7	5		
03	17	8	4	10	6	6	2	10	4	8	6	12	8
04	20	10	7	13	8	8	3	10	4	11	8	14	10
05	25	10	7	17	10	9	4	14	6	13	10	20	16
06	30	15	10	22	15	12	6	17	8	18	14	26	21
07	35	20	14	26	18	13	6	20	10	23	19	31	25
08	40	23	16	32	22	15	8	24	12	28	23	38	32
09	45	26	18	35	30	17	9	30	16	32	27	49	43
10	50	29	21	49	36	17	10	35	17	33	29	58	50
11	55	34	26	56	43	21	13	41	22	41	37	67	59
12	60	41	32	64	48	24	15	46	26	49	45	76	67
13	65	45	33	73	55	24	16	49	29	56	53	86	78

续表

号码	型式 / 内径 (mm)	6200		6300		1200		1300		7200		7300	
		C	C_0	C	C_0	C	C_0	C	C_0	C	C_0	C	C_0
14	70	49	39	82	63	27	18	59	35	61	58	97	90
15	75	52	42	89	72	32	20	63	38	64	62	105	100
16	80	57	46	97	80	32	22	69	42	72	70	114	113
17	85	66	55	104	88	39	27	78	48	83	80	123	126
18	90	75	63	112	98	46	30	92	55	94	94	133	140
19	95	86	72	120	112	50	35	104	62	102	108	142	155
20	100	96	82	136	132	55	36	113	71	115	115	161	184

（注） C：额定动载荷，C_0：额定静载荷，7200、7300：接触角20°

（选自《机械工程学手册》修订第4版，日本机械学会编）

【例题】 300kgf的径向载荷加在单列向心推力球轴承6320上，转速为750rpm，试求该轴承寿命。

【解答】 将C＝13600kgf（从上表查出的6320的C值），P＝300kgf，n＝750rpm代入表3.5的式中，求速度系数

$$f_n=\left(\frac{33.3}{n}\right)^{\frac{1}{3}}=\left(\frac{33.3}{750}\right)^{\frac{1}{3}}=0.3541$$

求寿命系数

$$f_h=f_n\cdot\frac{C}{P}=0.3541\times\frac{13600}{300}=16.05$$

求寿命时间

$$L_h=500f_h^3=500\times16.05^3=2067000\ (\text{小时})$$

§3.13　弹簧（一）

(1)　压缩螺旋弹簧

扭矩：$T=\frac{WD}{2}=\frac{\tau\pi d^3}{16}$　(kgf·mm)　(1)

平均剪应力

$$\tau=\kappa\frac{8DW}{\pi d^3}\quad (\text{kgf/mm}^2) \tag{2}$$

应力修正系数：

$$\kappa=\frac{4c-1}{4c-4}+\frac{0.615}{c} \tag{3}$$

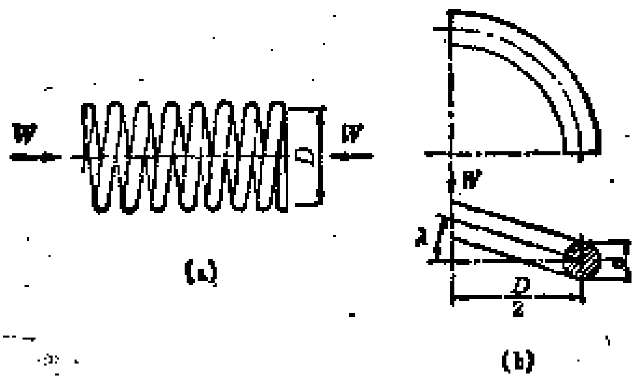


图3.18　螺旋弹簧

弹簧指数：$c=\frac{D}{d}$　(4)

$$\kappa c^3=\tau\cdot\frac{\pi D^2}{8W} \tag{5}$$

有效圈数：$N_e=\frac{GD\delta}{8c^4W}$　(6)

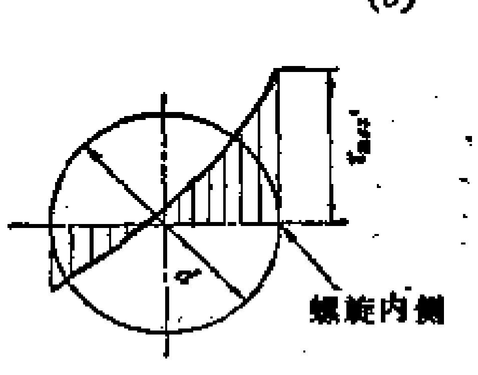


图3.19　螺旋弹簧截面上应力分布状态

W：弹簧轴向载荷 (kgf)

D：平均直径 (mm)

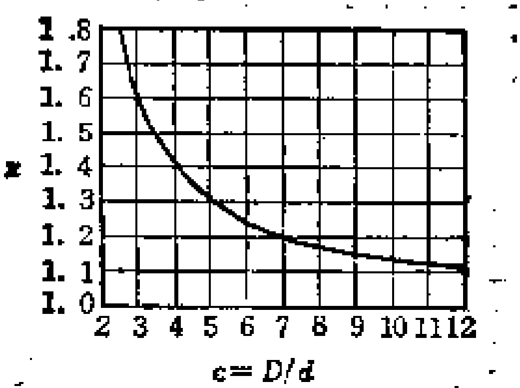
d：簧丝直径 (mm)

G：剪切弹性模量 (kgf/mm²)

δ：轴向位移（mm）

（2） 弹簧的性质：

弹簧常数：$k=\dfrac{W}{\delta}$



$\left(c=D/d,\quad x=\dfrac{4c-1}{4c-4}+\dfrac{0.615}{c}\right)$

图3.20 应力修正系数

合成弹簧常数：

（并联）： $k=k_1+k_2$ (7)

（串联）： $k=\dfrac{1}{\left(\dfrac{1}{k_1}+\dfrac{1}{k_2}\right)}$ (8)

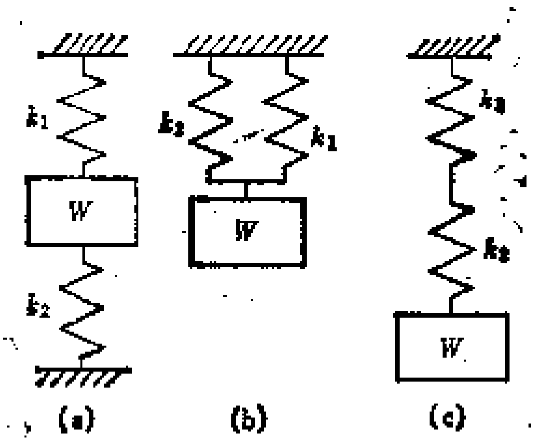


图3.21 弹簧常数

【解说】 如图3.18所示，弹簧受轴向载荷W（kgf）作用，设平均直径为D（mm），则在弹簧上产生$T=WD/2$的扭矩，得到（1）式。在实际压缩螺旋弹簧中，由于作用有载荷方向的压缩应力、弯曲应力等，所以要在上式中乘以修正系数κ。该系数κ称为应力修正系数。应力修正系数可用（3）式求得。式中的c称为弹簧指数。有效圈数用（6）式求。

在弹簧上产生单位轴向变形或扭转角所必需的载荷或扭矩称为弹簧常数，表示弹簧的刚度。弹簧常数的合成如（7）式、（8）式所示。

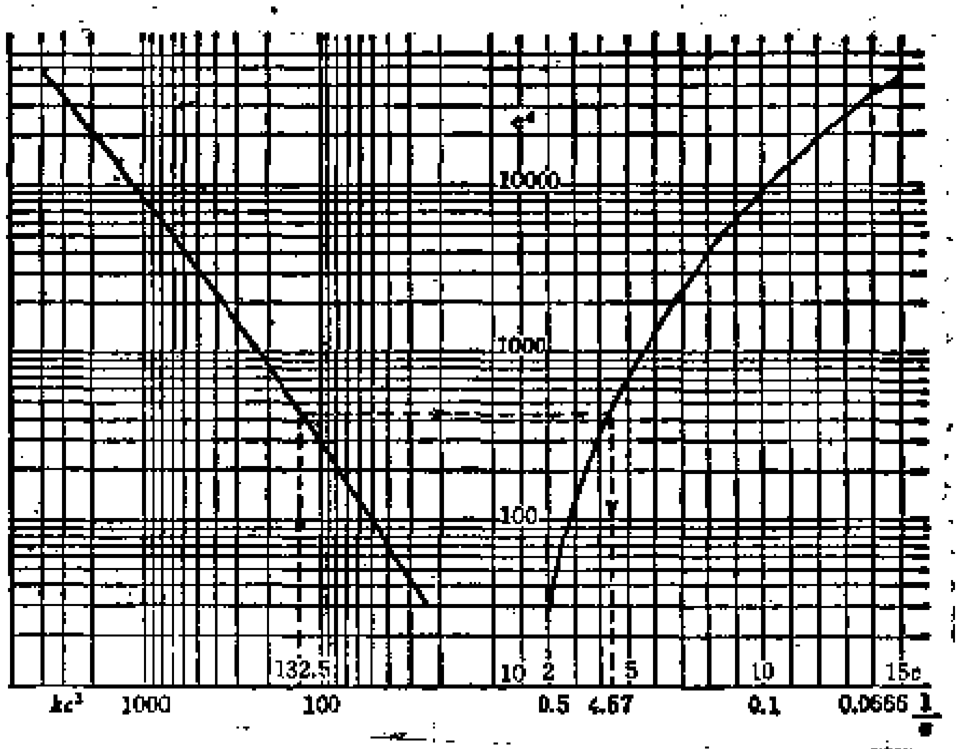


图3.22　圆筒螺旋弹簧设计计算图表

由κc^3求c^4，再由c^4求c（或$1/c$）的曲线（JIS B2704）

【例题】 压缩螺旋弹簧的平均直径$D=45$mm，承受$W=300$kgf的载荷，为了使弹簧产生$\delta=25$mm的轴向位移，求弹簧的簧丝直径、有效圈数应是多少？设材料的许用应力$\tau=50$ kgf/cm²，剪切弹性模量$G=8000$kgf/mm²。

【解答】 由（5）式，得

$$\kappa c^3 = \tau \frac{\pi D^2}{8W} = \frac{50 \times \pi \times 45^2}{8 \times 300} = 132.5$$

根据图3.22，从$\kappa c^3 = 132.5$，查出$c^4 = 410$，再由c^4求出$c = 4.57$。

弹簧的簧丝直径 $d = \frac{D}{c} = \frac{45}{4.57} = 9.847 \approx 10.0$ (mm)

$$\therefore c = \frac{D}{d} = 4.5$$

求有效圈数

$$N_e = \frac{GD\delta}{8c^4W} = \frac{8000 \times 45 \times 25}{8 \times 4.5^4 \times 300} = 9.145 \approx 9.5$$

§3.14 弹簧(二)

(1) 矩形弹簧

$$\left.\begin{aligned} &\text{最大应力}\quad \sigma_{max}=\frac{6Wl}{bt^2}\quad (\mathrm{kgf/mm^2})\\ &\text{挠\quad 度}\quad \delta=\frac{4Wl^3}{Ebt^3}\quad (\mathrm{mm}) \end{aligned}\right\}\quad (1)$$

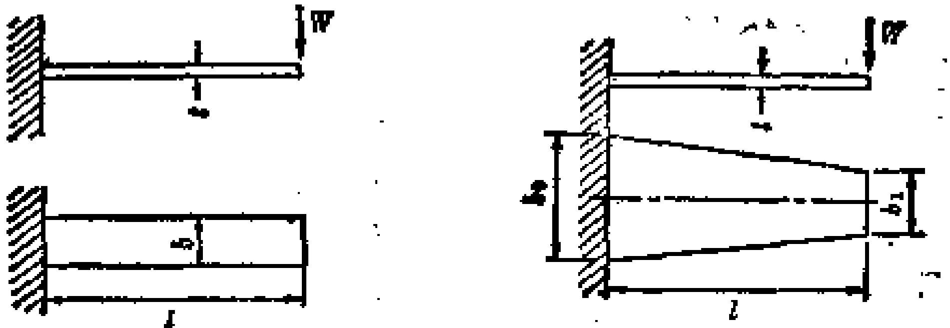
W：加在弹簧上的载荷 (kgf)

l：跨度 (mm)

b：板簧宽度 (mm)

t：板簧厚度 (mm)

E：弹性模量 (kgf/mm²)



(a) 矩形弹簧　　(b)梯形弹簧

图3.23　平板弹簧

(2) 梯形弹簧

$$\left.\begin{aligned} &\text{最大应力：}\ \sigma_{max}=\frac{6Wl}{b_0t^2}\quad (\mathrm{kgf/mm^2})\\ &\text{挠\quad 度：}\ \delta=k\frac{Wl^3}{Eb_0t^3}\quad (\mathrm{mm}) \end{aligned}\right\}\quad (2)$$

形状修正系数：

$$k=\frac{12}{\left(1-\dfrac{b}{b_0}\right)^3}\left[\frac{1}{2}-2\frac{b_1}{b_0}+\left(\frac{b_1}{b_0}\right)^2\left(\frac{3}{2}-\log_e\frac{b_1}{b_0}\right)\right]\quad (3)$$

(3) 叠板弹簧

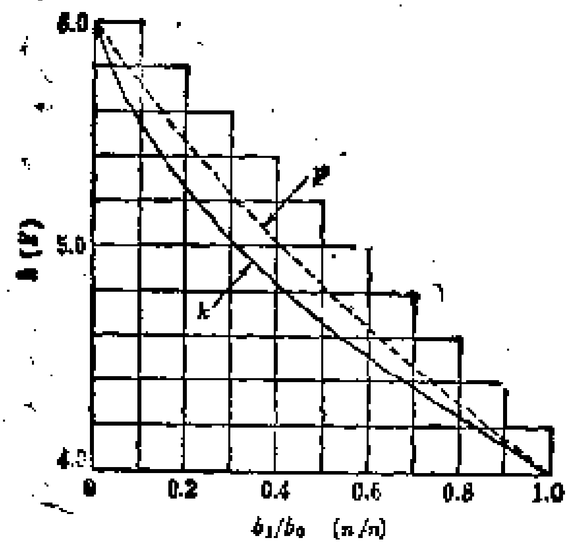


图3.24 梯形弹簧修正系数

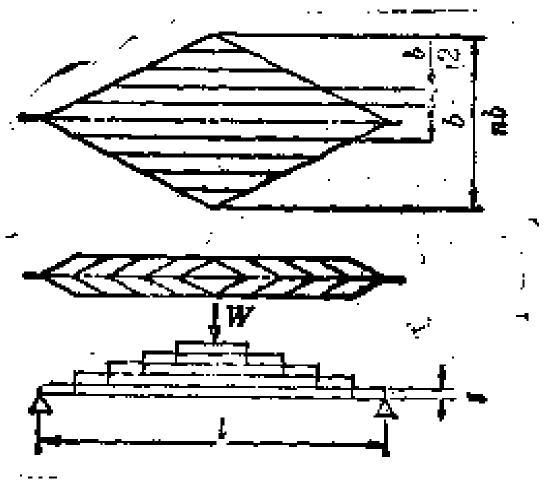


图3.25 叠板弹簧 (1)

$$\left.\begin{aligned} &\text{弯曲应力：}\sigma=\frac{3}{2}\cdot\frac{Wl}{nbt^2}\ (\mathrm{kgf/mm^2})\\ &\text{挠\quad 度：}\delta=\frac{3}{8}\cdot\frac{Wl^3}{nbt^3E}\ (\mathrm{mm})\end{aligned}\right\}\quad(4)$$

n：板的数量

(4) 扭杆弹簧(扭杆)

$$\left.\begin{aligned} &\text{扭角：}\theta=\frac{32}{\pi(d_2^2-d_1^2)}\cdot\frac{Ml}{G}\ (^\circ)\\ &\text{最大剪应力：}\tau_{max}=\frac{16d_2}{\pi(d_2^4-d_1^4)}M\ (\mathrm{kgf/mm^2})\end{aligned}\right\}\quad(5)$$

d_1、d_2：内径、外径 (mm)

l：弹簧有效长度 (mm)

M：扭矩 (kgf·mm)

G：剪切弹性模量 (kgf/mm²)

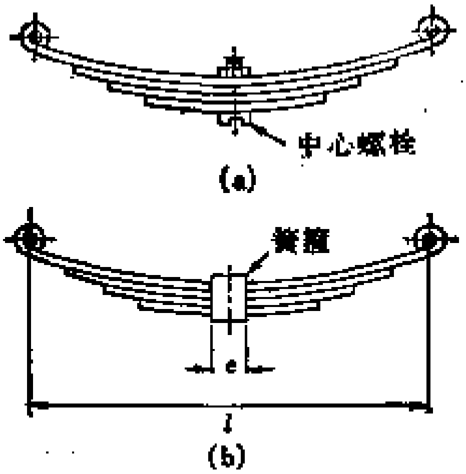


图3.16　叠板弹簧（2）

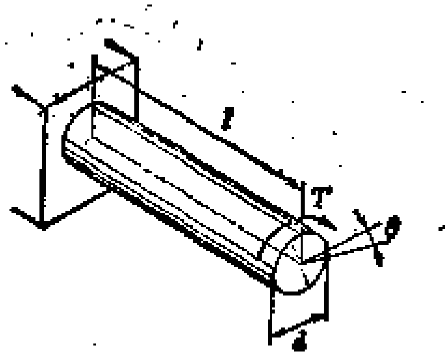


图3.27　扭杆弹簧

【解说】　图3.23所示的板簧最大应力和挠度如（1）式、（2）式。

叠板弹簧如图3.25所示，它是由纵向平板重叠而成的等强度梁。用簧箍箍紧，设簧箍的宽度为 e，$l'=l-0.6e$（mm），用（4）式计算时以 l' 代替 l。

图3.27所示，将利用实心杆或空心杆扭转的弹簧称为扭转杆弹簧或扭杆。扭角、最大剪应力如（5）式。

【例题】　图3.26（b）所示的叠板弹簧，跨度 $l=1200$mm，弹簧宽度 $b=80$mm，簧箍宽度 $e=100$mm，平板的板数 $n=5$，设所有的板厚都相同 $t=12$mm，弹性模量 $E=2.1\times10^4$kgf/mm²，试求当所加载荷 $W=1000$kgf时，所产生的弯曲应力和挠度 δ。

【解答】　有簧箍时的跨度

$$l'=l-0.6e=1200-0.6\times100=1140\ (\text{mm})$$

弯曲应力　σ kgf/mm²，由（4）式得

$$\sigma=\frac{3}{2}\cdot\frac{Wl'}{nbt^2}=\frac{3}{2}\cdot\frac{1000\times1140}{5\times80\times12^2}$$

$$=26.69\ (\text{kgf/mm}^2)$$

挠度 δ（mm）

$$\delta=\frac{3}{8}\cdot\frac{Wl'^3}{nbt^3E}=\frac{3}{8}\cdot\frac{1000\times1140^3}{5\times80\times12^3\times2.1\times10^4}$$

$$=38.28\ (\text{mm})$$

§3.15 块式制动器

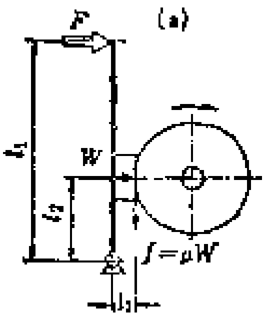
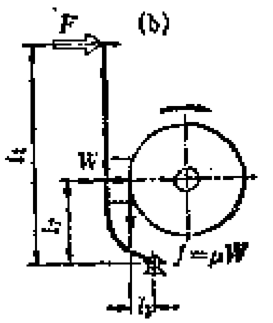
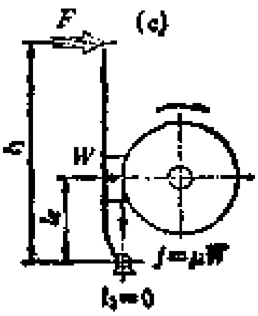
(1) 单块式制动器

制动力矩： $T=\frac{D}{2}\cdot f$ (kgf·mm) (1)

D：制动器圆筒的直径 (mm)

f：制动器上产生的摩擦力 (kgf)

表 3.8 单块式制动器

型式			
顺时针旋转	$F=\frac{f(l_2+\mu l_3)}{\mu l_1}$	$F=\frac{f(l_2-\mu l_3)}{\mu l_1}$	$F=\frac{fl_2}{\mu l_1}$
逆时针旋转	$F=\frac{f(l_2-\mu l_3)}{\mu l_1}$	$F=\frac{f(l_2+\mu l_3)}{\mu l_1}$	

(2) 多块式制动器

制动力： $F=2\frac{fl_2}{\mu l_1}$ (kgf) (2)

l_1：从支点到力F作用点的距离 (mm)

l_2：从支点到块中心的距离 (mm)

μ：摩擦系数

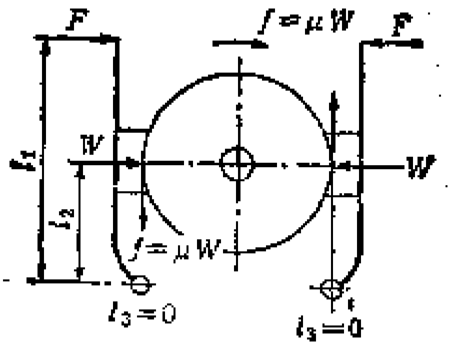


图3.28 多块式制动器

【解说】 块式制动器，在制动器圆筒的圆周上，安装有一个或两个制动片，借助于摩擦吸收动能。单块式制动器的制动力矩T(kgf·mm)用（1）式表达。表3.8给出加在制动器上的力F（kgf）、制动器圆筒和制动片间的摩擦系数μ与摩擦力f（kgf）之间的关系。

多块式制动器，在与轴对称的位置上，安装两个制动片。因为是从制动器圆筒的两侧夹紧的，所以轴承并不格外受力。

【例题】 在表3.8（a）所示的单块式制动器上，设$l_1=800$mm，$l_2=100$mm，$l_3=40$mm，加在杠杆上的力$F=15$kgf，制动片和制动圆筒间的摩擦系数$\mu=0.3$，顺时针旋转，为了得到5000kgf·mm的制动力矩，求制动器的圆筒直径应是多少？

【解答】 求摩擦力f（kgf）。变换表3.8（a）顺时针旋转的公式

$$f=\frac{F\mu l_1}{l_2+\mu l_3}=\frac{15\times0.3\times800}{100+0.3\times40}=32.14 \quad (\text{kgf})$$

变换（1）式，求制动器圆筒的直径D

$$D=\frac{2T}{f}=\frac{2\times5000}{32.14}=311.1\approx320 \ (\text{mm})$$

【发展】 如图3.29所示，两个制动片在制动器内侧制动。制动片向外扩张，与制动器的圆筒相接触而起着制动的作用。

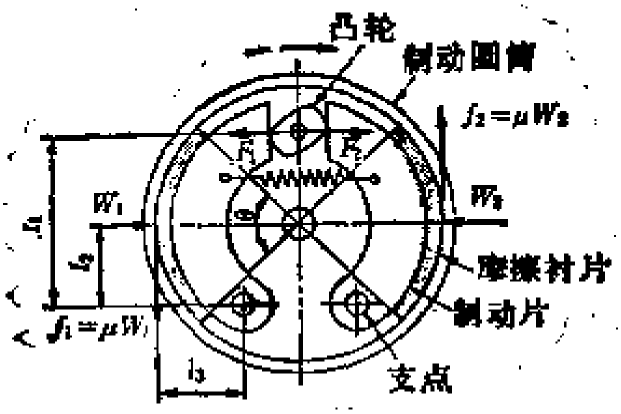


图3.29 内侧制动器

l_1、l_2、l_3：图示制动片的各部尺寸（mm）

μ：摩擦系数

P：作用在制动圆筒上的制动力（kgf）

W_1、W_2：作用在摩擦面上的正压力（kgf）

F_1、F_2：推开制动片的力（kgf）

设 $P=\mu W_1+\mu W_2$ (kgf)

F_1、F_2 的大小随着旋转方向的改变而改变。

即顺时针旋转：

$$F_1=\frac{W_1}{l_1}(l_2+\mu l_3)^* \text{ (kgf)}$$

$$F_2=\frac{W_2}{l_1}(l_2-\mu l_3)^* \text{ (kgf)}$$

逆时针旋转：

$$F_1=\frac{W_1}{l_1}(l_2-\mu l_3)^* \text{ (kgf)}$$

$$F_2=\frac{W_2}{l_1}(l_2+\mu l_3)^* \text{ (kgf)}$$

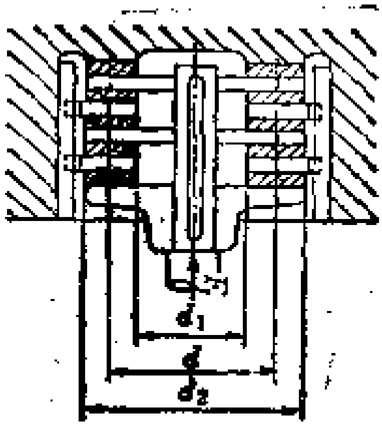


图3.30 圆板制动器

圆板制动器选取图3.30所示的符号。

n：接触面的数目

p：圆板的许用表面压力(kgf/mm²)

制动力：$f=n\mu F=n\mu\frac{\pi}{4}(d_2^2-d_1^2)p$ (kgf)

制动力矩：$T_f=\frac{d}{2}f=\frac{d_1+d_2}{4}n\mu\frac{\pi}{4}(d_2^2-d_1^2)p$ (kgf·mm)

圆板制动器的许用表面压力，钢和青铜配合时为0.04～0.08kgf/mm²，钢和纺织物配合时为0.02～0.03kgf/mm²。

---

*：原文 $F_1=\frac{W_1}{l_1}(l_2-\mu l_3)$；$F_2=\frac{W_2}{l_1}(l_2+\mu l_3)$；

$F_1=\frac{W_1}{l_1}(l_2+\mu l_3)$；$F_2=\frac{W_2}{l_1}(l_2-\mu l_3)$恐有误——译者注

§3.16　带式制动器

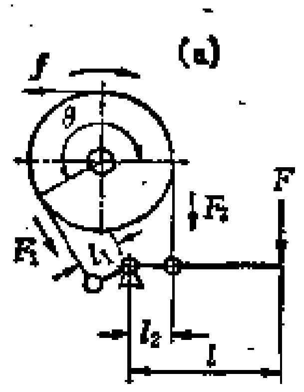
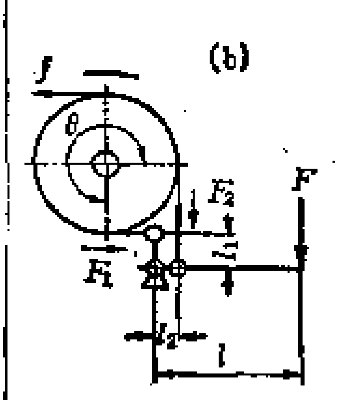
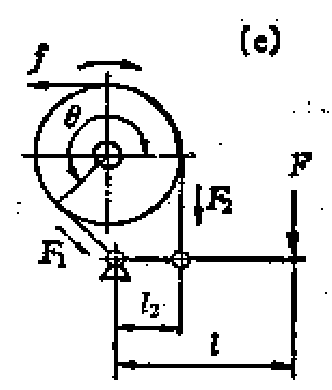
$$F_1 = f\frac{e^{\mu\theta}}{e^{\mu\theta}-1}\ \ (\mathrm{kgf}) \qquad (1)$$

$$F_2 = f\frac{1}{e^{\mu\theta}-1}\ \ (\mathrm{kgf}) \qquad (2)$$

$$\sigma = \frac{F_1}{tb}\ \ (\mathrm{kgf/mm^2}) \qquad (3)$$

F：加在杠杆上的力（kgf）
F_1：带的紧边拉力（kgf）
F_2：带的松边拉力（kgf）
f：制动力（kgf）
θ：制动圆筒和带的接触角（rad）
μ：摩擦系数
σ：带上产生的拉应力（$\mathrm{kgf/mm^2}$）
t：带厚（mm）
b：带宽（mm）

表3.9　　带式制动器

型式			
顺时针旋转	$F=\frac{f}{l}\cdot\frac{l_2}{e^{\mu\theta}-1}$	$F=\frac{f}{l}\cdot\frac{(l_2-l_1e^{\mu\theta})}{(e^{\mu\theta}-1)}$	$F=\frac{f}{l}\cdot\frac{(l_2+l_1e^{\mu\theta})}{(e^{\mu\theta}-1)}$
逆时针旋转	$F=\frac{f}{l}\cdot\frac{l_2e^{\mu\theta}}{e^{\mu\theta}-1}$	$F=\frac{f}{l}\cdot\frac{(l_2e^{\mu\theta}-l_1)}{(e^{\mu\theta}-1)}$	$F=\frac{f}{l}\cdot\frac{(l_2e^{\mu\theta}+l_1)}{(e^{\mu\theta}-1)}$

【解说】　在制动器圆筒的周围卷缠着钢带，用杠杆拉紧带，使带和制

动器圆筒之间产生摩擦力而制动的设备称为带式制动器。带的紧边拉力F_1 (kgf) 和松边拉力F_2 (kgf) 的关系为

$$F_1=F_2\cdot e^{\mu\theta} \quad (\text{kgf})$$

$$f=F_1-F_2 \quad (\text{kgf})$$

由此得 (1) 式、(2) 式。

制动带上产生的拉应力σ (kgf/mm²)，可由 (3) 式求出。

表 3.10 $e^{\mu\theta}$值

θ°	θ(rad)	$e^{\mu\theta}$				
		$\mu=0.1$	$\mu=0.2$	$\mu=0.3$	$\mu=0.4$	$\mu=0.5$
30	0.5236	1.054	1.110	1.170	1.233	1.299
60	1.0472	1.110	1.233	1.369	1.520	1.688
90	1.5708	1.170	1.369	1.602	1.874	2.193
120	2.0944	1.233	1.520	1.874	2.311	2.850
150	2.6180	1.299	1.688	2.193	2.850	3.702
180	3.1416	1.369	1.874	2.566	3.514	4.810
210	3.6652	1.443	2.081	3.003	4.332	6.250
240	4.1888	1.520	2.311	3.514	5.342	8.121
270	4.7124	1.602	2.566	4.111	6.586	10.551
300	5.2360	1.688	2.850	4.810	8.121	13.708
330	5.7596	1.779	3.164	5.629	10.013	17.811

【例题】 有一如表3.9 (a) 所示的带式制动器，安装在传递12kW、180rpm的动力轴上。将衬有厚度3mm的石棉织物($\mu=0.4$) 的带材，安装在直径为350mm的制动器圆筒上，接触角为210°。试求制动时带的宽度。设带材的许用拉应力为5kgf/mm²。

【解答】 制动力矩T (kgf·mm)

$$T=974000\frac{P}{N}=974000\times\frac{12}{180}=64933 \quad (\text{kgf}\cdot\text{mm})$$

摩擦力f (kgf)

$$f=\frac{2T}{D}=\frac{2\times 64933}{350}=371.0 \quad (\text{kgf})$$

当$\theta=210°$、$\mu=0.4$时，从表3.10中查出 $e^{\mu\theta}=4.332$。从（1）式求F_1（kgf），得

$$F_1=f\ \frac{e^{\mu\theta}}{e^{\mu\theta}-1}=371.0\times\frac{4.332}{4.332-1}=482.3 \qquad (\mathrm{kgf})$$

变换（3）式，求出带宽b（mm）。

$$b=\frac{F_1}{\sigma t}=\frac{482.3}{5\times3}=32.15\approx36\ (\mathrm{mm})$$

§3.17 三角皮带传动

(1) 包角θ_1 (°)、θ_2 (°)

$$\left.\begin{aligned}\theta_1&=180°-2\phi\\&=180°-2\sin^{-1}\left(\frac{D_2-D_1}{2C}\right)\ (°)\\\theta_2&=180°+2\phi=180°+2\sin^{-1}\\&\quad\left(\frac{D_2-D_1}{2C}\right)\ (°)\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

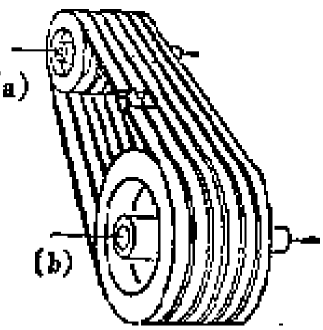


图3.31 三角皮带传动

D_1、D_2：主动轮、从动轮的直径 (mm)

C：轴的中心距 (mm)

ϕ：图中表示的角度 (°)

(2) 三角皮带的长度 (mm)

$$L=2C+\frac{\pi}{2}(D_1+D_2)+\frac{(D_2-D_1)^2}{4C}\ (\text{mm})\qquad(2)$$

(3) 三角皮带传递的动力P (kW)

$$P=0.001087nAv(1-0.006803v^2)\ (\text{kW})\qquad(3)$$

n：三角皮带根数

A：三角皮带截面积 (mm²)

v：三角皮带圆周速度 (m/s)

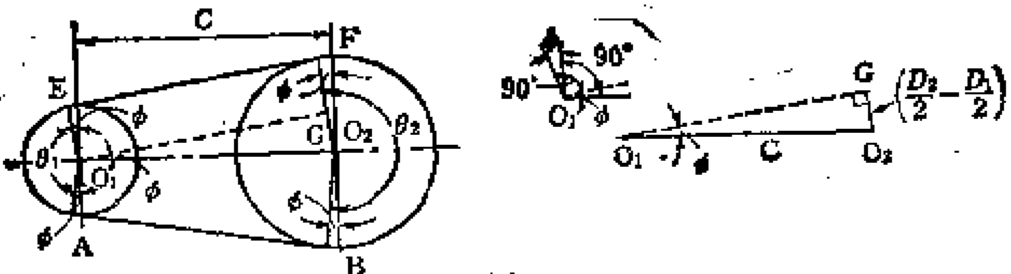


图3.32

【解说】 如图3.31、3.32所示，三角皮带与三角皮带轮的接触角度θ_1、θ_2，分别称为主动轮、从动轮的包角。为了求包角，首先要求出ϕ的大小

$$\sin\phi=\frac{D_2-D_1}{2C}$$

$$\therefore\quad \phi=\sin^{-1}\left(\frac{D_2-D_1}{2C}\right)\qquad (*)$$

从而导出（1）式。皮带的长度近似地等于（2）式。设皮带的有效拉力为Fe（kgf），则传递的动力为$P=nFev/102$。假如是一般三角皮带传动，设摩擦系数$\mu=0.25$，包角$\theta=120°$，三角皮带相对密度1.2，许用拉应力$\sigma_a=0.18\text{kgf/mm}^2$，三角皮带截面积$A$（$\text{mm}^2$），则传递的动力$P$可用（3）式求出。包角超过或小于120°时，每隔10°增加或减少P的4%。

【例题】 用$P=3.5\text{kW}$，$N_1=1450\text{rpm}$的电动机，使$N_2=290\text{rpm}$的泵旋转。设轴的中心距$C=600\text{mm}$，试设计三角皮带传动装置。

【解答】 确定包角$\theta_1=120°$的主动轮、从动轮的公称直径。从（1）式得

$$120°=180°-2\sin^{-1}\left(\frac{D_2-D_1}{2C}\right)$$

$$\therefore\quad \sin30°=\frac{D_2-D_1}{2C}$$

$$D_2-D_1=600\qquad (i)$$

又

$$\frac{D_1}{D_2}=\frac{N_2}{N_1}=\frac{290}{1450}=\frac{1}{5}$$

$$\therefore\quad D_2=5D_1\qquad (ii)$$

将（ii）式代入（i）式，得

$$5D_1-D_1=600$$

$$4D_1=600$$

$$\therefore\quad D_1=150\ (\text{mm})$$

从动轮直径

$$D_2=750\ (\text{mm})$$

求皮带的圆周速度，得

$$v=\frac{\pi D_1 N_1}{1000\times 60}=\frac{\pi\times 150\times 1450}{1000\times 60}=11.39\ (\mathrm{m/s})$$

使用B型的，从表3.11查出$A=137\mathrm{mm}^2$，从表3.12中选取修正系数0.75，变换（3）式可求出n

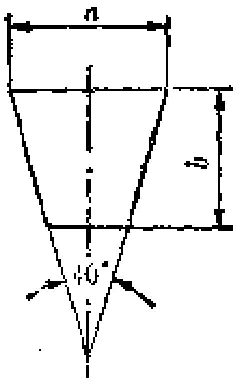
$$n=\frac{P}{0.001087\times A\times v(1-0.0006803v^2)\times 0.75}$$

$$=\frac{3.5}{0.001087\times 137\times 11.39(1-0.0006803\times 11.39^2)\times 0.75}$$

$$=3.018\approx 4\ (根)$$

表3.11　　三角皮带和三角皮带轮的主要尺寸

(a)三角皮带（JISK6323－1973）



型	a (mm)	b (mm)	θ (度)	截面积(约) (mm²)	拉伸强度 (kgf)
M	10.0	5.5	40	44	100以上
A	12.5	9.0	40	83	180以上
B	16.5	11.0	40	137	300以上
C	22.0	14.0	40	237	500以上
D	31.5	19.0	40	467	1000以上
E	38.0	25.5	40	732	1500以上

从（2）式求皮带长度

$$L=2C+\frac{\pi}{2}(D_1+D_2)+\frac{(D_2-D_1)^2}{4C}$$

$$=2\times 600+\frac{\pi}{2}(150+750)+\frac{(750-150)^2}{4\times 600}$$

$$=2764\ (\mathrm{mm})$$

从附表14查出，用（B型）110号（2794mm）的三角皮带4根。

表3.12　　冲击、过载荷修正系数

机械的种类或运转情况	修正系数
起动力矩或最大负荷	
125～150%时	0.75
150～200%时	0.60
200～250%时	0.50
轻微冲击(轻型机床等)	0.90
往复式压缩机(单曲轴)	0.85
急剧逆转(吊车、卷扬机等)	0.75
严重冲击(粉碎机、机床等)	0.70
纺织机械、织布机、矿山机械、油田机械	0.60

(选自《机械工程学手册》修订第6版，日本机械学会编)

§3.18　链轮（滚子链条）传动

(1) 链轮(滚子链轮)的各部尺寸

节圆直径：

$$D_p = p\frac{1}{\sin\dfrac{180^\circ}{Z}} \quad \text{(mm)}$$

外　　径：

$$D_o = p\left(0.6 + \frac{1}{\tan\dfrac{180^\circ}{Z}}\right) \quad \text{(mm)}$$

齿根圆直径：

$$D_B = D_p - D_r \quad \text{(mm)}$$

轮毂直径：

$$D_H = p\left(\frac{1}{\tan\dfrac{180^\circ}{Z}} - 1\right) - 0.76 \quad \text{(mm)}$$

(1)

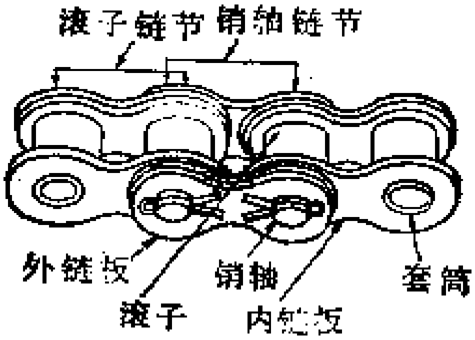


图3.33　滚子链条（JIS B 1801）

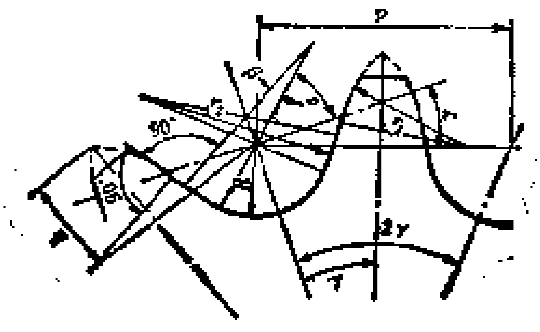


图3.34　链轮的齿形

p：链节距(mm)，D_r：滚子直径（mm）

z：齿数　$R = 0.5025D_r + 0.038$

$$\alpha = 35^\circ + \frac{60^\circ}{z} \qquad \beta = 18^\circ \qquad \gamma = \frac{180^\circ}{z}$$

p：链节距（mm）

Z：齿数

D_r：滚子直径（mm）

（2）链节数L_p

$$L_p = \frac{2C}{p} + \frac{1}{2}(Z_1 + Z_2) + \frac{0.0253p(Z_2 - Z_1)^2}{C} \quad (2)$$

C：两轴的中心距（mm）

Z_1、Z_2：链轮的主动轮、从动轮的齿数

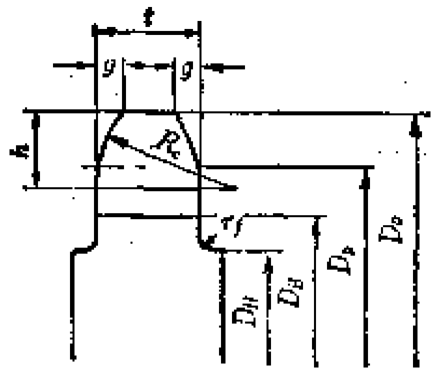


图3.36 链轮的轴向齿形

（3）链条的平均速度v_m（m/s）和传递动力P（kW）

$$v_m = \frac{N_1 p Z_1}{1000 \times 60}$$

$$= \frac{N_2 p Z_2}{1000 \times 60} \ (\mathrm{m/s}) \quad (3)$$

$$P = \frac{F v_m}{102} \ (\mathrm{kW}) \quad (4)$$

N_1、N_2：链轮的主动轮、从动轮的转速（rpm）

F：滚子链条拉力（kgf）

【解说】 图3.33表示滚子链条。把链条销轴中心间的距离称为链节距。当链条卷缠在链轮上，通过链条销轴中心的圆称为节圆。

链节数可用（2）式求出，但小数部分必须四舍五入成为偶数。假如不是偶数时，用补偿链节连接。

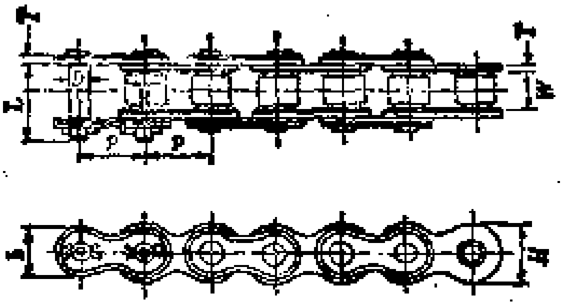
在链条传动中，链速在一个链节距范围内作周期性的变化。平均速度可按照（3）式求出，传递的动力可用（4）式求出。

【例题】 齿数为25的滚子链条的链节距为15.88mm。试求以290rpm旋转时，传递的动力。设安全系数为15。

【解答】从表3.13中查出p＝15.88mm是50号链条，其破坏载荷为

表3.13 滚子链条的尺寸(单列) (JIS B 1801—1970)

(单位mm)



号码	链节距 p	滚子直径 R	内链板间距 W	滚子链平板宽 H	破坏载荷 (kgf)
40	12.70	7.94	7.9	12.0	1420
50	15.88	10.16	9.5	15.0	2210
60	19.05	11.91	12.7	18.1	3200
80	25.40	15.88	15.8	24.1	5650
100	31.75	19.05	19.0	30.1	8850
120	38.10	22.23	25.4	36.2	12800
140	44.45	25.40	25.4	42.2	17400
160	50.80	28.58	31.7	48.2	22700
200	63.50	39.68	38.1	60.3	35400

表3.14 **链轮的尺寸（JIS B 1802—1967）**

（单位mm）

链条名义号码	共同尺寸				齿宽 t（最大）
	倒角宽度 g（约）	倒角深度 h（约）	倒角半径 R_e（最小）	圆角 r_f（最大）	单列
40	1.6	6.4	13.5	0.5	7.2
50	2.0	7.9	16.9	0.6	8.7
60	2.4	9.5	20.3	0.8	11.7
80	3.2	12.7	27.0	1.0	14.5
100	4.0	15.9	33.8	1.3	17.5
120	4.8	19.1	40.5	1.5	23.5
140	5.6	22.2	47.2	1.8	23.5
160	6.4	25.4	54.0	2.0	29.3
200	8.0	31.8	67.5	2.5	35.3

2210kgf。因为安全系数是15，所以

$$F=\frac{2210}{15}=147.3\ (\mathrm{kgf})$$

$$v_m=\frac{NpZ_1}{1000\times60}=\frac{290\times15.88\times25}{1000\times60}$$

$$=1.919\ (\mathrm{m/s})$$

$$P=\frac{Fv_m}{102}=\frac{147.3\times1.919}{102}=2.771\ (\mathrm{kW})$$

§3.19 标准直齿轮

(1) 轮齿的大小

模数：$m=\frac{D}{Z}$ (1)

周节：$t=\frac{\pi D}{Z}=\pi m$ (mm) (2)

节圆直径：$D=mZ$ (mm) (3)

齿顶圆直径：$D_k=D+2m=m(Z+2)$ (mm) (4)

$$\left.\begin{array}{l}\text{齿顶高：} h_k=m \text{ (mm)}\\ \text{齿根高：} h_f\geqslant 1.25m \text{ (mm)}\\ \text{全齿高：} h\geqslant 2.25m \text{ (mm)}\end{array}\right\} \quad (5)$$

Z：齿数

(2) 传动比 i

$$i=\frac{N_2}{N_1}=\frac{D_1}{D_2}=\frac{Z_1}{Z_2} \quad (6)$$

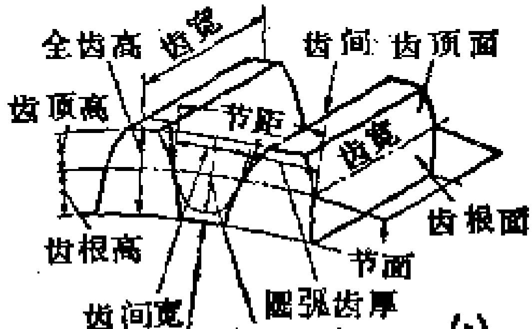
N_1、N_2：主动轮、从动轮转速 (rpm)

D_1、D_2：主动轮、从动轮节圆直径 (mm)

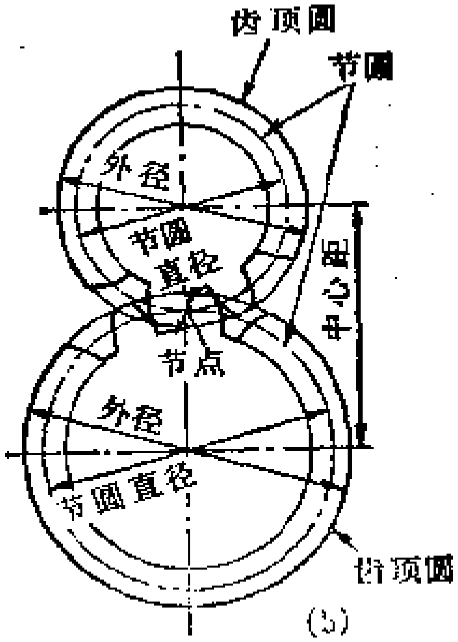
Z_1、Z_2：主动轮、从动轮的齿数

(3) 中心距 a (mm)

$$a=\frac{D_1+D_2}{2}=\frac{m(Z_1+Z_2)}{2} \text{ (mm)} \quad (7)$$



(a)



(b)

图3.36 齿轮各部名称

【解说】 标准直齿轮的尺寸参照JIS B 1701（1973）和JIS B 0102（1966）。在主动齿轮和从动齿轮之间，不象摩擦轮和皮带轮传动那样，它没有滑动，所以齿轮的传动比准确可靠，可用（6）式求出。两轴的中心距可由（7）式求出。

【例题】 有一齿轮以280rpm旋转，模数为3，齿数为30。试求传动比为1/4时与其相啮合齿轮的转速、齿数与中心距。

【解答】 从动齿轮的转速为N_2（rpm），齿数为Z_2，变换（6）式，得

$$N_2=iN_1=\frac{1}{4}\times 280=70\ (\mathrm{rpm})$$

$$Z_2=\frac{1}{i}Z_1=4\times 30=120$$

中心矩：

$$a=\frac{m(Z_1+Z_2)}{2}=\frac{3(30+120)}{2}=225(\mathrm{mm})$$

表3.15　　**标准模数值**（JIS B 1701—1973）

（单位mm）

第一系列	第二系列	第三系列	第一系列	第二系列	第三系列
0.1			1		
	0.15		1.25		
0.2			1.5		
	0.25			1.75	
0.3			2	2.25	
	0.35				
0.4			2.5	2.75	
	0.45				3.25
0.5			3	3.5	
	0.55				3.75
0.6			4		
	0.7	0.65		4.5	
0.8	0.75		5		
	0.9			5.5	

续表

第一系列	第二系列	第三系列	第一系列	第二系列	第三系列
6				18	
		6.5	20		
	7			22	
8			25		
	9			28	
10	11		32		
				36	
12			40		
16	14			45	
			50		

备考 优先选择第一系列，根据需要依次选择第二系列、第三系列。

【例题】 试求模数为4，中心距为160mm，传动比为1/3的一组齿轮的齿数和节圆直径。

【解答】 从(6)式导出： $Z_1=iZ_2$

将上式代人(7)式，得

$$a=\frac{m(Z_1+Z_2)}{2}=\frac{4(\frac{1}{3}Z_2+Z_2)}{2}=2\times\frac{1}{3}Z_2$$

$$\therefore Z_2=\frac{3}{8}a=\frac{3}{8}\times 160=60$$

$$Z_1=iZ_2=\frac{1}{3}\times 60=20$$

从 (3)式得

$$D_1=mZ_1=4\times 20=80\ (\mathrm{mm})$$
$$D_2=mZ_2=4\times 60=240\ (\mathrm{mm})$$

§3.20　根切极限齿数Z

$$Z \geqslant \frac{2h_a}{m\sin^2\alpha_a} = \frac{2}{\sin^2\alpha_a}$$

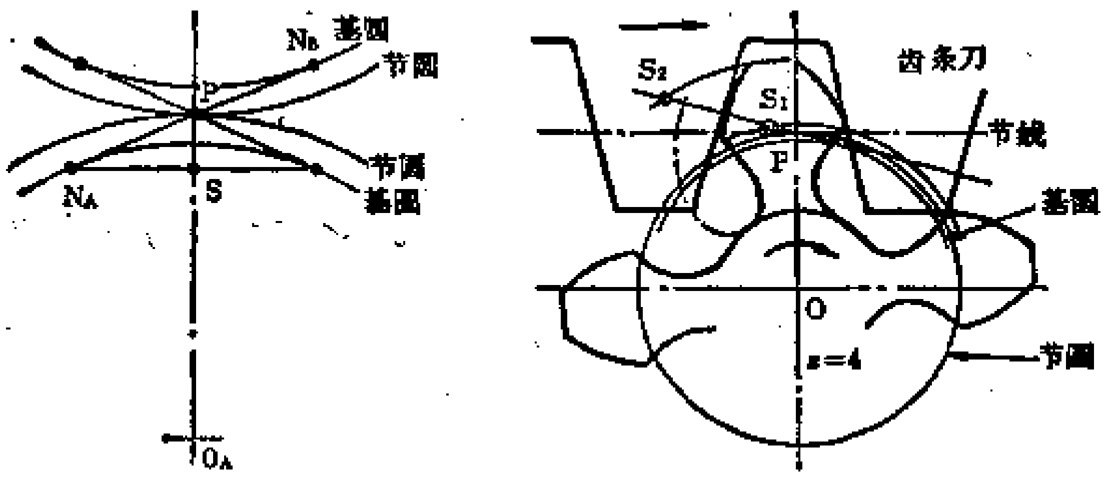
h_a：齿顶高(=m)（mm）

m：模数

α_a：刀具压力角(°)

表3.16　　标准直齿轮根切极限齿数

	极限齿数	
	理论值	实用值
20°标准齿	17	14
14.5°标准齿	32	26



(a)　　(b)

图3.37　齿的根切

【解说】 渐开线齿轮啮合时，在齿数少和齿数比大的情况下，有时大齿轮的齿顶碰上小齿轮的齿根而不能旋转(把这种现象称作齿的干涉)，或切去齿根(把这种现象称作齿的根切)。图3.37(b)是使用齿条刀发生齿的根切例子。使用齿条刀进行标准直齿轮切齿时，不发生根切极限齿数的理论值，可用上式求出。

【例题】 试求在表3.16中的压力角20°、14.5°的标准直齿轮根切极限齿数的理论值。

【解答】 分别将$\alpha_n=20°$、$\alpha_n=14.5°$代入上式，得$\alpha_n=20°$

$$Z \geqslant \frac{2}{\sin^2\alpha_n}=\frac{2}{\sin^2 20°}=\frac{2}{0.3420^2}=17.10$$

$$Z=17$$

$\alpha_n=14.5°$ $$Z \geqslant \frac{2}{\sin^2\alpha_n}=\frac{2}{\sin^2 14.5°}=\frac{2}{0.2504^2}=31.90$$

$$Z=32$$

§3.21　变位齿轮

(1)　变位系数的选择

表3.17　　变位系数的选择

齿数和		变位系数		
(1)	$Z_1+Z_2\geqslant 60$	$x_1=0.4(1-\frac{Z_1}{Z_2})$ $x_1=0.02(30-Z_1)$ 选择其中大的	$x_2=-x_1$	$y=0$，中心距等于标准直齿轮的中心距
(2)	$Z_1+Z_2<60$	$x_1=0.02(30-Z_1)$	$x_2=0.02(30-Z_2)$	$y\neq 0$，中心距改变
(3)	内齿轮（与齿数和无关）	$x_1=0.4$	$x_2=-x_1$	中心距不变

注1）刀具压力角$\alpha_0=20°$时，理论式$x=1-\frac{Z}{17}$（齿条和小齿轮），实用式$x=\frac{14-Z}{17}$（大齿轮和小齿轮）也可以应用。

2）假如是德国标准(DIN E 3994,3995—1959)，可应用$x_1=x_2=0.5$。

3）以上全都只适用于齿数大于8的情况。

(2)　变位齿轮的计算

中心距：

$$a=\frac{Z_1+Z_2}{2}m+ym+a_0\ (\text{mm}) \tag{1}$$

中心距增加系数：

$$\left.\begin{aligned} y&=\frac{Z_1+Z_2}{2}\left(\frac{\cos\alpha_0}{\cos\alpha}-1\right)=\frac{Z_1+Z_2}{2}B_v(\alpha)\\ B_v(\alpha)&=\frac{2(x_1+x_2)}{Z_1+Z_2}=\frac{(\tan\alpha-\alpha)-(\tan\alpha_0-\alpha_0)}{\tan\alpha_0}\end{aligned}\right\}\quad(2)$$

S_0的中心距增量：

$$a_s = \frac{S_s}{2\sin\alpha}(\text{mm}) \qquad (3)$$

齿顶圆直径：

$$\left.\begin{aligned} D_{k1} &= (Z_1+2)m+2(y-x_2)m \\ &\quad +2a_s \qquad (\text{mm}) \\ D_{k2} &= (Z_2+2)m+2(y \\ &\quad -x_1)m+2a_s \qquad (\text{mm}) \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

啮合的节圆直径：

$$\left.\begin{aligned} d_{b1} &= 2a\frac{Z_1}{Z_1+Z_2} \ (\text{mm}) \\ d_{b2} &= 2a\frac{Z_2}{Z_1+Z_2} \ (\text{mm}) \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

全齿高：

$$h=(2+\frac{C_k}{m})m-(x_1+x_2-y)m$$
$$+a_s \ (\text{mm}) \qquad (6)$$

Z_1、Z_2：小齿轮、大齿轮的齿数

S_s：齿隙(mm)

α_s：刀具压力角 (rad)

α_1：啮合角 (rad)

x_1、x_2：小齿轮、大齿轮变位系数

C_k：齿顶间隙(mm)

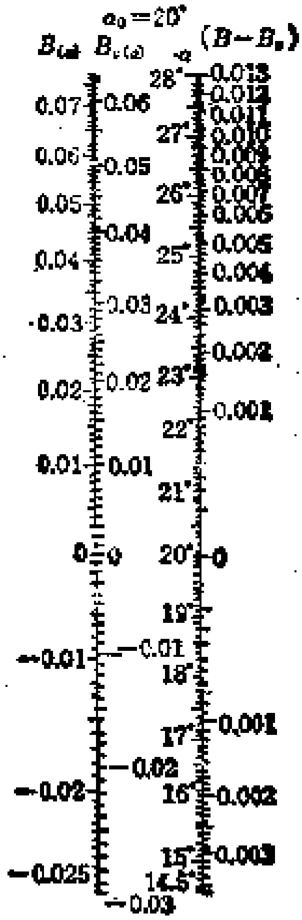


图3.38 变位齿轮的计算图表
(选自《机械工程学手册》修订第6版，日本机械学会编)

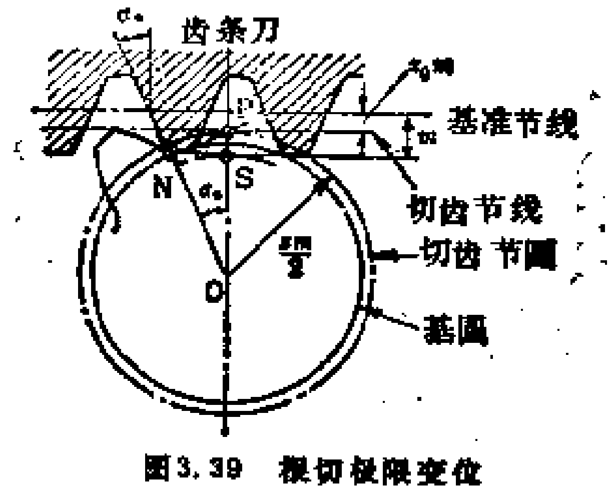


图3.39 根切极限变位

【解说】 如图3.39所示，把齿条刀的基准节线，在齿轮轴的中心方向只移动xm的距离而进行切齿的齿轮，称为变位齿轮。移动的距离xm称为变位量，x称为变位系数。并且，把进刀量浅的变位叫正变位(正修正)，相反把进刀量加深的变位称为负变位(负修正)。

【例题】 试按照表3.17(2)，求出刀具压力角$\alpha_s=20°$，模数$m=4$，齿数$Z_1=12$，$Z_2=32$的一组变位齿轮的尺寸。设齿隙$S_s=0.2$。

【解答】 变位系数：

$$x_1=0.02(30-Z_1)=0.02(30-12)=0.36$$

$$x_2=0.02(30-Z_2)=0.02(30-32)=-0.04$$

从(2)式：

$$B(\alpha)=\frac{2(x_1+x_2)}{Z_1+Z_2}=\frac{2(0.36-0.04)}{12+32}=0.01455$$

由图3.38查出：$\alpha=22.15°$，$B_v(\alpha)=0.00075$，$S_s=0.2$，将这些值代入(3)式，得

$$a_s=\frac{S_s}{2\sin\alpha}=\frac{0.2}{2\times\sin 22.15°}=0.2652\ (\mathrm{mm})$$

$$\therefore\quad y=\frac{Z_1+Z_2}{2}B_v(\alpha)=\frac{12+32}{2}\times 0.00075=0.0165$$

中心距：

$$a=\frac{Z_1+Z_2}{2}m+ym+a_s=\frac{12+32}{2}\times 4+0.0165\times 4$$

$$+0.2652=88.33(\mathrm{mm})$$

啮合节圆直径：

$$d_{b1}=2a\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}=2\times 88.33\times\frac{12}{12+32}=48.18\ (\mathrm{mm})$$

$$d_{b2}=2a\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}=2\times 88.33\times\frac{32}{12+32}=128.5\ (\mathrm{mm})$$

外径：

$$D_{a1}=(Z_1+2)m+2(y-x_2)m+2a_s$$
$$=(12+2)\times4+2(0.0165+0.04)\times4+2\times0.2652=56.98\ (\mathrm{mm})$$
$$D_{a2}=(Z_2+2)m+2(y-x_1)+2a_s$$
$$=(32+2)\times4+2(0.0165-0.36)\times4+2\times0.2652=133.8(\mathrm{mm})$$

全齿高：

$$h=(2+\frac{C_s}{m})m-(x_1+x_2-y)m+a_s$$
$$=(2+0)\times4-(0.36-0.04-0.0165)\times4+0.2652=7.05\ (\mathrm{mm})$$

§3.22 轮系，行星齿轮

（1） 轮系的传动比 i

$$i=\frac{\text{主动侧齿数连乘积}}{\text{从动侧齿数连乘积}}$$

$$=\frac{Z_1}{Z_2}\times\frac{Z_3}{Z_4}\times\cdots\cdots$$

$$=\frac{N_2}{N_1}\times\frac{N_3}{N_2}\times\cdots\cdots$$

$$=i_1\times i_2\times\cdots\cdots$$

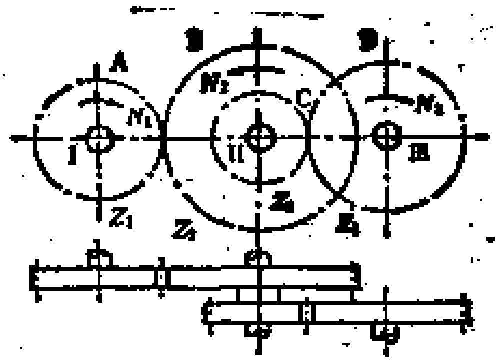


图3.40 轮系

Z_1、Z_2、Z_3、Z_4……：齿轮 A、B、C、D、……的齿数

N_1、N_2、N_3……：Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ ……轴的转速

i_1：Ⅰ、Ⅱ轴间的传动比

i_2：Ⅱ、Ⅲ轴间的传动比

（2） 行星齿轮的转速：参照解说

【解说】 使几个齿轮依次啮合组成轮系，就可以从给出的主动轴转速，得到必需的转速。如果假设中间Ⅱ轴的齿轮B、C 的齿数相同，即$Z_2=Z_3$，则求出的传动比与中间齿轮无关。这时将Ⅱ轴的齿轮称为行星齿轮。

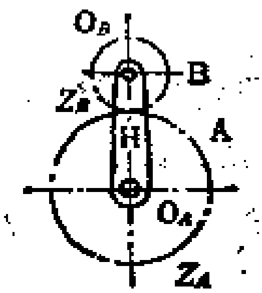


图3.41 行星齿轮装置

图 3.41 所示的齿轮装置称为行星齿轮装置。设齿轮A、齿轮B的齿数分别为100、20。使齿轮A固定，系杆H反时针旋转1圈（+1圈）时，判断齿轮B旋转方向和转速。

（1） 把A、B、H作为一体，停止互相间的相对运动，使全体以O_A轴为中心旋转+1圈。

（2） 其次使系杆H固定，齿轮A旋转−1圈。因为齿轮A、B 是外接齿轮，所以齿轮B的转速为$-(-1)\times\frac{100}{20}=+5$

（3） A、B、H的净转速是（1）、（2）的总和。

把这个归纳成表，如表3.18所示。

表3.18

		A	B	H
1	全体固定	+1	+1	+1
2	系杆固定	−1	$-(-1)\times\frac{100}{20}$	0
3	净转速	0	+6	+1

【例题】 图3.40中的$Z_1=45$，$Z_2=60$，$Z_3=24$，$Z_4=75$，当Ⅰ轴以750rpm旋转时，Ⅱ轴转速为多少？

【解答】 变换上式，得

$$N_2=\frac{Z_1}{Z_2}\times\frac{Z_3}{Z_4}\times N_1=\frac{45}{60}\times\frac{24}{75}\times750=180\ (\mathrm{rpm})$$

【例题】 图3.42中，$Z_1=100$，$Z_2=25$，$Z_3=50$时。试求当齿轮A固定，使系杆H旋转+5圈时，齿轮B、C的净旋转转速和方向。

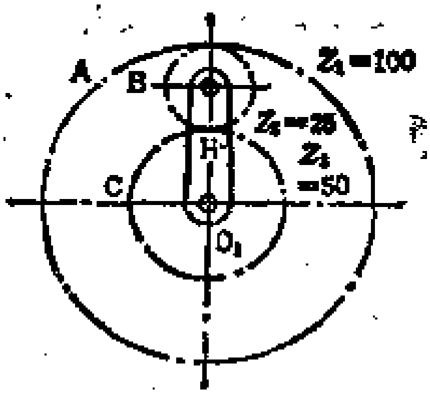


图3.42 行星齿轮计算

【解答】 (1) 全体固定，都旋转+5圈。

(2) 系杆固定，使齿轮A旋转−5圈。

(3) 求(1)、(2)的和，归纳成表，得表3.19。

表3.19

		A	B	C	H
1	全体固定	$+5$	$+5$	$+5$	$+5$
2	系杆固定	-5	$\frac{100}{25}\times(-5)$	$-\frac{100}{50}\times(-5)$	0
3	净转速	0	-15	$+15$	$+5$

【发展】 在上面的例题中，固定齿轮C，使系杆以$+N$圈旋转时，齿轮A、B的旋转方向和净转速如下。

表3.20

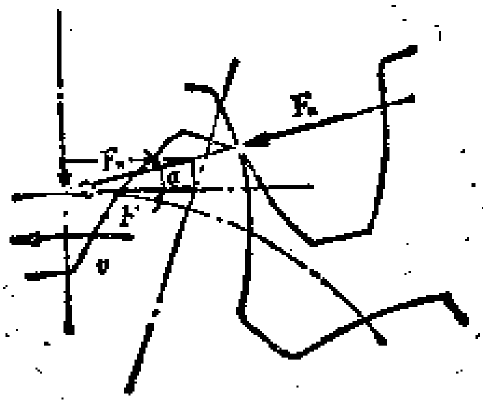
		A	B	C	H
1	全体固定	$+N$	$+N$	$+N$	$+N$
2	系杆固定	$-\frac{Z_3}{Z_1}\times(-N)$	$-\frac{Z_3}{Z_2}\times(-N)$	$-N$	0
3	净转速	$N(1+\frac{Z_3}{Z_1})$	$N(1+\frac{Z_3}{Z_2})$	0	$+N$

§3.23 直齿轮的强度

(1) 弯曲强度(刘伊斯式)

$$F=\sigma_b t b y=\pi\sigma_b b m y \text{ (kgf)} \qquad (1)$$

$$\sigma_b=f_v f_w \sigma_0 \text{ (kgf/mm}^2) \qquad (2)$$



α：压力角

图3.43 作用在轮齿上的力

F：圆周力 (kgf)

σ_b：齿轮动态的许用应力 (kgf/mm²)

t：周节(mm)

b：齿宽(mm)

y：齿形系数(参照附表15)

m：模数，f_w：载荷系数(参照附表16)

f_v：速度系数(参照附表16)

σ_0：齿轮材料的静态许用应力(kgf/mm²)(参照附表17)

(2) 表面压力强度

$$F=f_v k D_1 b \frac{2Z_2}{Z_1+Z_2}=f_v k m b \frac{2Z_1Z_2}{Z_1+Z_2} \text{(kgf)} \quad (3)$$

D_1：小齿轮节圆直径(mm)

Z_1、Z_2：小齿轮、大齿轮的齿数

k：接触面应力系数(参照附表18)

【解说】 齿轮虽然始终有一对以上的轮齿在啮合着，但假设：(1)传递的动力加在齿轮上的载荷，需要一个轮齿。(2)沿着齿宽100%齿面

接触，且载荷均匀分布地作用着．弯曲强度用刘伊斯公式计算．式中的 y 称为齿形系数．刘伊斯公式没考虑由于传递扭矩、齿轮加工安装时的误差、轮齿和轴的变形以及振动等动载荷的影响．设式中的 σ_0 为齿轮材料的静态许用应力，动态的许用应力 σ_b 用公式(2)计算．

发生在齿轮齿面上的表面压力一大，或者引起齿面的点蚀或磨损齿面，所以在设计齿轮时，必须考虑加在齿面上的表面压力强度．用(3)式可计算出表面压力强度．

【例题】　试求表3.21所示的一对标准直齿圆柱齿轮所传递的动力．设载荷系数 $f_w=0.8$．

表3.21

	压力角	模数	齿数	转速(rpm)	齿宽(mm)	材　料
小齿轮	20°	4	30	730	40	S 35 C (H_B150)
大齿轮			60	365		FC 26

【解答】　节圆上的圆周速度 v(m/s)

$$v=\frac{\pi D_1 N_1}{1000\times 60}=\frac{\pi\times 4\times 30\times 730}{1000\times 60}=4.587\ \text{(m/s)}$$

据附表16速度系数 f_v，由低速度公式

$$f_v=\frac{3.05}{3.05+v}=\frac{3.05}{3.05+4.587}=0.3994$$

根据弯曲强度分别求出小齿轮、大齿轮的许用圆周力 F，$f_w=0.8$

1)　小齿轮，许用弯曲应力 $\sigma_0=26(\text{kgf/mm}^2)$(查附表17)，由(2)式得　$\sigma_b=f_v f_w \sigma_0=0.3994\times 0.8\times 26=8.308(\text{kgf/mm}^2)$

齿形系数 $y=0.114$(查附表15)，由(1)式得

$$F=\pi\sigma_b bmy=\pi\times 8.308\times 40\times 4\times 0.114$$
$$=476.1\ \text{(kgf)} \qquad (i)$$

2)　大齿轮，许用弯曲应力 $\sigma_0=11(\text{kgf/mm}^2)$

(查附表17)，由(2)式得

$$\sigma_s = f_v f_w \sigma_b = 0.3994 \times 0.8 \times 11 = 3.515 \ (\mathrm{kgf/mm^2})$$

齿形系数 $y = 0.134$(查附表15)，由(1)式得

$$F = \pi \sigma_s bmy = \pi \times 3.515 \times 40 \times 4 \times 0.134 = 236.8 (\mathrm{kgf}) \quad \text{(ii)}$$

如果根据表面压力强度求许用圆周力F，则由(3)式可得，式中接触面应力系数 $k = 0.039$(查附表18)

$$F = f_v k D_1 b \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 0.3994 \times 0.039 \times 4 \times 30 \times 40$$

$$\times \frac{2 \times 60}{30 + 60} = 99.69 \ (\mathrm{kgf}) \qquad \text{(iii)}$$

选取以上(i)、(ii)、(iii)中的最小值，求传递的动力

$$P = \frac{F v}{102} = \frac{99.69 \times 4.587}{102} = 4.483 \ (\mathrm{kW})$$

§3.24 斜齿轮的强度

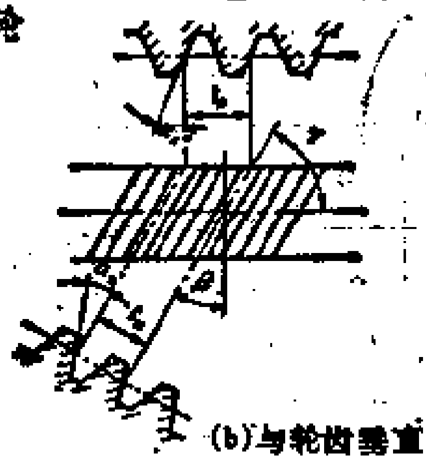


图3.44 斜齿轮的齿形

(1) 斜齿轮的齿形和相当直齿轮

$$t_n = t_s \cos\beta \text{ (mm)} \quad (1)$$

$$m_n = \frac{t_n}{\pi} = \frac{t_s \cos\beta}{\pi} = m_s \cos\beta \quad (2)$$

$$Z_v = \frac{2\pi R}{t_n} = \frac{Z}{\cos^3\beta} \quad (3)$$

t_n: 法面周节(mm)

m_n: 法面模数

t_s: 端面周节(mm)

m_s: 端面模数

β: 螺旋角(°)

Z_v: 相当直齿圆柱齿轮的齿数

R: 节点P的椭圆曲率半径(mm)

Z: 实际齿数

(2) 斜齿轮的强度

$$F = \kappa\sigma_b b m_n y \text{ (kgf)} \quad (4)$$

y: 相当直齿轮的齿形系数

(3) 斜齿轮的尺寸

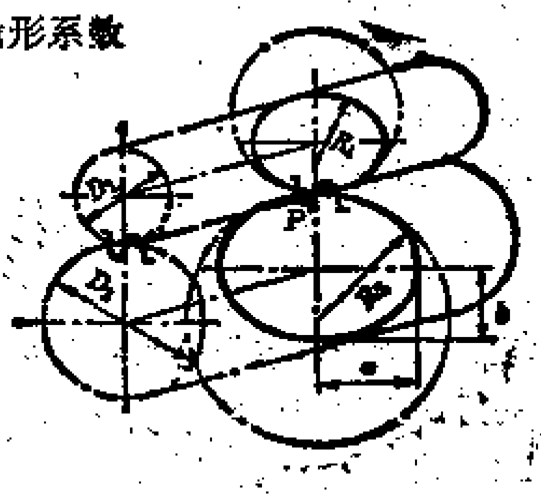


图3.45 相当直齿轮

表3.22 法面和轴面斜齿轮的平面尺寸(JIS B 1701-1963)

项　目	符号	法　向	轴　向
模　数	m	法面模数 m_n	端面模数 $m_s=\dfrac{m_n}{\cos\beta}$
压力角	α	法面压力角 α_n	端面压力角 α_s $\left(\tan\alpha_s=\dfrac{\tan\alpha_n}{\cos\beta}\right)$
周　节	t	$t_n=\pi m_n$	$t_s=\pi m_s=\pi\dfrac{m_n}{\cos\beta}$
节圆直径	D	$Z\dfrac{m_n}{\cos\beta}$	Zm_s
全齿高	h	$2.25m_n$ 以上	$2.25m_n$ 以上
齿顶圆直径	D_k	$\left(\dfrac{Z}{\cos\beta}+2\right)m_n$	Zm_s+2m_n
中心距	a	$\dfrac{(Z_1+Z_2)m_n}{2\cos\beta}$	$\dfrac{(Z_1+Z_2)m_s}{2}$

【解说】 斜齿轮齿形的表示方式按JIS规定有：(1)与齿轮轴相垂直的截面齿形用标准齿条表示的轴向式。(2)与轮齿相垂直的截面齿形用标准齿条表示的法向式。把这个关系用公式表示，则得公式(1)、公式(2)。

如图3.46所示，把斜齿圆柱齿轮的节圆直径D(mm)，假想用与轮齿相垂直的平面切开，则斜齿圆柱齿轮的节圆变成椭圆。设节点P处的椭圆曲率半径为R，把直齿圆柱齿轮的节圆直径当作$2R$时，该直齿圆柱齿轮称为原斜齿圆柱齿轮的相当直齿圆柱齿轮。这个相当齿轮的齿数与实际齿数不同，称为相当齿数。把这个关系用公式表示，则得(3)式。

斜齿轮的强度，应用相当直齿轮的概念来确定。把直齿轮的刘伊斯公式，以同样的方法应用到相当直齿轮上，即可得到(4)式。如果把以上的关系加以归纳，则得到表3.22。

【例题】 试求如下表给出的斜齿圆柱齿轮的节圆直径、外径和中心

距。

	法向		齿　数	转　速 (rpm)	齿宽 (mm)	螺旋角
	压力角	模　数				
小齿轮	20°	3	25	720	30	15°
大齿轮			75	240		

【解答】 小齿轮、大齿轮的节圆直径 D_1(mm)、 D_2(mm)，由表3.22可得。

$$D_1=Z_1\frac{m_n}{\cos\beta}=25\times\frac{3}{\cos15^\circ}=77.65\ (\text{mm})$$

$$D_2=Z_2\frac{m_n}{\cos\beta}=75\times\frac{3}{\cos15^\circ}=232.9\ (\text{mm})$$

求小齿轮、大齿轮的外径 D_{k1} (mm)、D_{k2} (mm)。

$$D_{k1}=D_1+2m_n=77.65+2\times3=83.65\ (\text{mm})$$

$$D_{k2}=D_2+2m_n=232.9+2\times3=238.9\ (\text{mm})$$

求中心距 a (mm)

$$a=\frac{D_1+D_2}{2}=\frac{77.65+232.9}{2}=155.3\ (\text{mm})$$

【发展】 把具有同一螺旋角的两个斜齿圆柱齿轮，使其齿的倾斜方向相反地组合成一个齿轮称为人字齿轮。人字齿轮可用来消除发生在斜齿圆柱齿轮上的轴向力，可传递高速、大动力，且运行平稳。

§3.25 圆锥齿轮

(1) 直齿圆锥齿轮的相当直齿圆柱齿轮(图3.46)

$$\left.\begin{aligned} Z_{v1} &= \frac{Z_1}{\cos\delta_1} \\ Z_{v2} &= \frac{Z_2}{\cos\delta_2} \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Z_{v1}、Z_{v2}：圆锥齿轮A、B的相当直齿圆柱齿轮的齿数

Z_1、Z_2：圆锥齿轮A、B的实际齿数

δ_1、δ_2：圆锥齿轮A、B的节圆锥角(°)

(2) 直齿圆锥齿轮的强度

$$F = \pi\sigma_b bmy\frac{R_e - b}{R_e}\ (\text{kgf}) \qquad (2)$$

F：许用圆周力(kgf)

σ_b：齿轮的许用弯曲应力(kgf/mm²)

b：齿宽(mm)

m：模数

y：相当直齿轮的齿形系数

R_e：外端圆锥距(mm)

(3) 直齿圆锥齿轮的尺寸

表3.23 直齿圆锥齿轮的计算公式(mm)

各部名称	符号	小 齿 轮	大 齿 轮
节圆锥角	δ	$\tan\delta_1 = \dfrac{\sin\Sigma}{\dfrac{Z_2}{Z_1}+\cos\Sigma}$	$\tan\delta_2 = \dfrac{\sin\Sigma}{\dfrac{Z_1}{Z_2}+\cos\Sigma}$
背圆锥角	α	$\alpha_1 = 90° - \delta_1$	$\alpha_2 = 90° - \delta_2$
轴间夹角	Σ	$\Sigma = \delta_1 + \delta_2$	
分度圆直径	D	$D_1 = mZ_1$	$D_2 = mZ_2$

续表

各部名称	符号	小 齿 轮	大 齿 轮
外端齿顶圆直径	D_k	$D_{k1}=D_1+2h_k\cos\delta_1$	$D_{k2}=D_2+2h_k\cos\delta_2$
齿顶高	h_k	$h_k=m$	
齿根高	h_f	$h_f\geqslant1.25m$	
全齿高	h	$h=h_k+h_f\geqslant2.25m$	
外端圆锥距	R_e	$R_e=\dfrac{D_1}{2\sin\delta_1}=\dfrac{D_2}{2\sin\delta_2}$	
齿顶角	θ_k	$\tan\theta_k=\dfrac{h_k}{R_e}$	
齿根角	θ_f	$\tan\theta_f=\dfrac{h_f}{R_e}$	
齿顶圆锥角	δ_k	$\delta_{k1}=\delta_1+\theta_k$	$\delta_{k2}=\delta_2+\theta_k$
齿根圆锥角	δ_r	$\delta_{r1}=\delta_1-\theta_f$	$\delta_{r2}=\delta_2-\theta_f$

【解说】 相交两轴间传递动力时，可用圆锥齿轮。圆锥齿轮是把顶角为2δ的圆锥摩擦轮表面作为基准面而装上齿的齿轮，把该基准面称为节圆锥。图3.46中，在节圆锥顶端和节圆锥母线垂直相交的母线所构成的圆锥称为背圆锥。圆锥齿轮的齿形可认为是，分别以圆锥齿轮的背圆锥的母线O_1P、O_2P为节圆半径的直齿圆柱齿轮的齿形，把这个直齿圆柱齿轮称为圆锥齿轮的相当直齿圆柱齿轮。相当直齿圆柱齿轮可以应用标准齿条的齿形。

【例题】 在正交的两根轴上，安装着压力角 20°，齿数40，模数 3，齿宽 30mm 的铸铁（$FC25$）制的节圆锥角 45° 的圆锥齿轮。求以480rpm旋转时，能够传递多少动力？设载荷系数为 0.8。

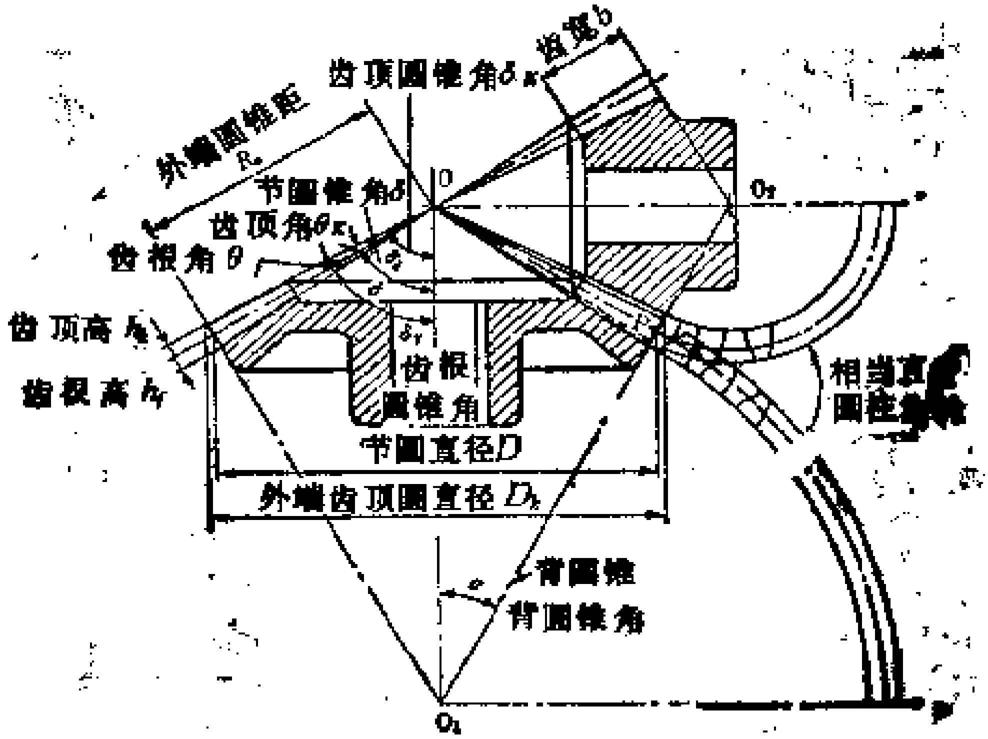


图3.46　圆锥齿轮的各部名称

【解答】　圆周速度

$$v=\frac{\pi D_1 N_1}{1000\times60}=\frac{\pi\times40\times3\times480}{1000\times60}=3.016\ (\mathrm{m/s})$$

速度系数(参照附表16)

$$f_v=\frac{3.05}{3.05+v}=\frac{3.05}{3.05+3.016}=0.5028$$

许用弯曲应力(查附表17，$\sigma_0=11\ (\mathrm{kgf/mm^2})$)

$$\sigma_b=f_v f_w \sigma_0=0.5028\times0.8\times11=4.426\quad(\mathrm{kgf/mm^2})$$

相当直齿圆柱齿轮齿数

$$Z_v=\frac{Z}{\cos\delta_1}=\frac{40}{\cos45^\circ}=56.57$$

$\therefore\ y=0.1326$(查附表15)

外端圆锥距离

$$R_e=\frac{D_1}{2\sin\delta_1}=\frac{40\times3}{2\sin45^\circ}=84.85\ (\mathrm{mm})$$

由（2)式得

$$F=\pi\sigma_{s}bmy\frac{R_{e}-b}{R_{e}}$$

$$=\pi\times4.425\times30\times3\times0.1326\times\frac{84.85-30}{84.85}$$

$$=107.2\ (\mathrm{kg})$$

$$\therefore\quad P=\frac{Fv}{102}=\frac{107.2\times3.016}{102}=3.170\ (\mathrm{kW})$$

§3.26 蜗轮

(1) 蜗轮的弯曲强度 F_t (kgf)

$$F_t=\sigma_b t_n b y=\sigma_b t_a b y\cos\gamma \ (\mathrm{kgf}) \qquad (1)$$

σ_b: 许用弯曲应力(表3.28)($\mathrm{kgf/mm^2}$)

t_n: 蜗杆的法面周节(mm)

b: 齿宽(表3.24)

y: 齿形系数(表3.27)

t_a: 蜗杆的轴面周节(mm)

表3.24　　蜗轮蜗杆的计算公式

蜗杆(头数Z_1)		蜗轮(齿数 Z_2)	
轴面模数	m_a	节圆直径	$D_2=m_a Z_2$
轴面周节	$t=\pi m_a$	根圆直径	$D_f=D_2-2h_k$
节圆直径(轴形)	$D_1=2t+12.7$	外径	$D_{k2}=D_2+2h_f$
节圆直径(多孔)	$D_1=2.4t+28$	齿顶高	$h_k=m_a$
外径	$D_{k1}=D_1+2h_k$	增加量	$(Z_1=1,2)\ h_f=0.75h_k$ $(Z_1=3,4)\begin{cases}h_f=0.50h_k(\alpha<20^\circ)\\h_f=0.375h_k(\alpha>20^\circ)\end{cases}$
齿顶高	$(Z_1=1,2)h_k=m_a$ $(Z_1=3,4)$ $h_k=0.9m_a$	齿顶圆弧半径	$R=D_1/2-h_k$
全齿高	$(Z_1=1,2)$ $h=2.25m_a$ $(Z=3,4)$ $h=2.25m_a$	齿宽	$(Z_1=1,2)\ b=2.4t+6$ $(Z_1=3,4)\ b=2.15t+5$
导程	$l=tZ_1$	轮齿拐角处的圆角	$r=0.25t$
长度	$L=(4.5+0.02Z_2)t$	轮缘厚度	$(Z_1=1,2)\ S=0.632t$ $(Z_1=3,4)\ S=0.563t$
升角	$\gamma=\tan^{-1}\dfrac{l}{\pi D_1}$ 有右螺旋、左螺旋	包角	$\theta=60\sim 30^\circ$
齿厚	$t/2$	中心距	$a=(D_1+D_2)/2$

(选自《齿轮的设计和制造》日本机械学会编)

γ: 蜗杆的升角(°)

(2) 蜗轮的摩损强度

$$F_w = D_2 b_e k \ \text{(kgf)} \qquad (2)$$

F_w: 许用圆周力(kgf)

D_1: 蜗杆节圆直径(mm)

b_e: 有效齿宽(表3.24)(mm)

k: 耐磨损系数(表3.28) (kgf/mm²)

(3) 蜗轮的尺寸

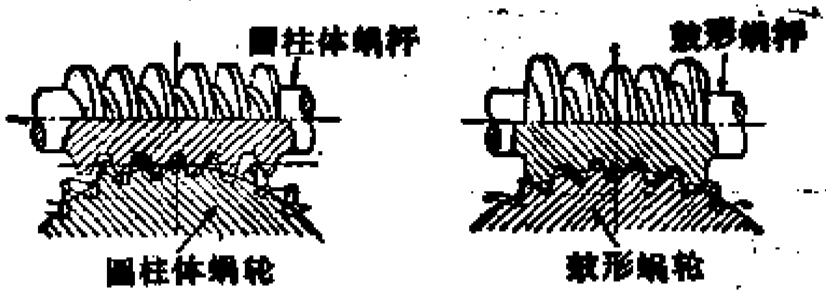


图3.47 蜗杆蜗轮

(4) 蜗轮的传动效率η

$$\eta = \frac{\tan\gamma}{\tan(\gamma+\phi')} \qquad (3)$$

γ: 蜗杆升角(°)

ϕ': 摩擦角($\tan\phi' = \mu/\cos\alpha_n$ (°)

μ: 摩擦系数

α_n: 法面压力角(°)

表3.26 压力角和升角

α_n	γ
14.5°	最大等于15°
20°	最大等于25°
25°	最大等于35°
30°	大于35°

(选自《机械工程学手册》修订第6版，日本机械学会编)

表3.26 蜗轮的许用弯曲应力 σ_b 值

材 质	σ_b (kgf/mm²) 载荷方向不变	σ_b (kgf/mm²) 载荷方向变化
铸铁	8.5	5.6
齿轮用青铜	17.0	11.3
锑青铜	10.5	7.1
合成树脂	3.0	2.0

(选自《机械工程手册》修订第6版，日本机械学会编)

表3.27 齿形系数y值

压力角α_n	齿形系数y
14.5°	0.100
20°	0.125
25°	0.150
30°	0.175

(选自"机械工程手册"修订第6版，日本机械学会编)

表3.28 耐磨损系数k值

蜗　杆	蜗轮	$k(kgf/mm^2)$
钢(HB>250)	磷青铜	0.042
淬火钢	铸铁	0.016
淬火钢	磷青铜	0.056
淬火钢	冷硬磷青铜	0.085
淬火钢	锑青铜	0.085
淬火钢	合成树脂	0.045
铸铁	磷青铜	0.065

(选自《机械工程手册》修订第6版，日本机械学会编)

【解说】 如图3.47所示，两个轴互相垂直的螺旋齿轮，小齿轮的齿数1～4齿，成外螺纹状态的齿轮叫蜗杆，把和蜗杆相啮合的齿轮叫蜗轮．对蜗轮和对其它齿轮一样分析，便得到公式(1)，公式(2)以及表3.24。因为传动效率等于主动轮所做的功与从动轮所做的功之比，所以得(3)式。

【例题】 试求蜗杆的头数等于2，节圆的直径60mm，轴面周节30mm，法面压力角20°，摩擦系数0.02时的蜗杆效率。

【解答】 查表3.24的公式得升角γ(°)

$$\gamma=\tan^{-1}\frac{l}{\pi D_1}=\tan^{-1}\frac{30\times2}{\pi\times60}=17°39'$$

摩擦角 $$\phi'=\tan^{-1}\frac{\mu}{\cos\alpha_n}=\tan^{-1}\frac{0.02}{\cos20°}=1°13'$$

效　率 $$\eta=\frac{\tan\gamma}{\tan(\gamma+\phi')}=\frac{\tan17°39'}{\tan(17°39'+1°13')}=0.9311$$

第四章 机 械 加 工

§4.1 切削速度

（1）主切削运动为回转运动时的切削速度

$$v=\frac{\pi DN}{1000}\ (\text{m/min}) \tag{1}$$

v：切削速度（m/min）

D：在车床上回转工件的直径，或铣刀和钻头等刀具回转时的刀具直径（mm）

N：工件或刀具的转速（r/min）

（2）主切削运动为直线运动时的切削速度

$$v=\frac{nL}{1000a}\ (\text{m/min}) \tag{2}$$

n：每分钟切削工具的往复次数

L：行程长度（mm）

a：当切削刀具往复一次时切削行程的时间比（一般为3/5～2/3）

【解说】（1）式是求在1分钟内转N圈、直径为D（mm）的工件的圆周速度。为了将直径D的mm单位换算成m的单位，用1000一除就可求出（1）式。（2）式的速度比a等于切削速度和回程速度之比。

【例题】用直径20mm的钻头对铸铁材料钻孔。其切削速度为25m/min。试求钻头的转速。

【解答】将$v=25$m/min，$D=20$mm代入（1）式，得

$$25=\frac{\pi\times20\times N}{1000}$$

$$\therefore\quad N=\frac{25\times1000}{20\pi}=398\ (\text{r/min})$$

【例题】牛头刨的切削行程为400mm，平均切削速度为20m/min，

速度比为2/3。求每分钟往复次数。

【解答】 将$v=20\mathrm{m/min}$，$L=400\mathrm{mm}$，$a=\frac{2}{3}$代入（2）式，得

$$20=\frac{n\times 400}{1000\times 2/3}$$

$$\therefore n=\frac{20\times 1000\times 2}{400\times 3}=33\ (\text{回}/\mathrm{min})$$

【例题】 工件直径为50mm，在车床上每分钟转320圈，求切削速度。

【解答】 将$D=50\mathrm{mm}$，$N=320\mathrm{r/min}$代入（1）式，得

$$v=\frac{\pi\times 50\times 320}{1000}=50\ (\mathrm{m/min})$$

§4.2 锥体切削方法

(1) 移动尾架顶尖的方法

$$x=(\text{工件全长})\times\frac{\text{锥度}}{2}=\frac{L(D-d)}{2l}\quad(\mathrm{mm})\qquad(1)$$

x：顶尖的移动量（mm）

L：工件全长（mm）

l：圆锥部分的长度（mm）

D：锥台大端直径（mm）

d：锥台小端直径（mm）

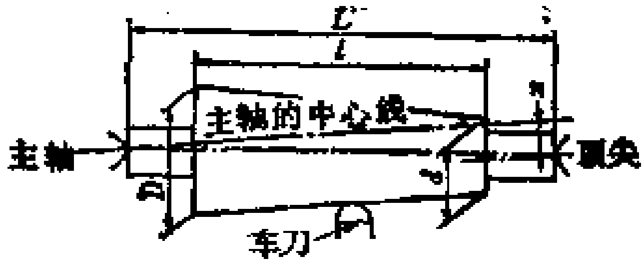


图4.1 锥体的切削

(2) 其他圆锥的切削方法

1） 使用切削圆锥装置的方法：沿导向板切削圆锥的方法，可以对长圆锥进行高精度的切削。

2）倾斜复式刀具台的方法：用复式刀具台，利用旋转台把上面的进给台转过所需角度，用手动进给切削。

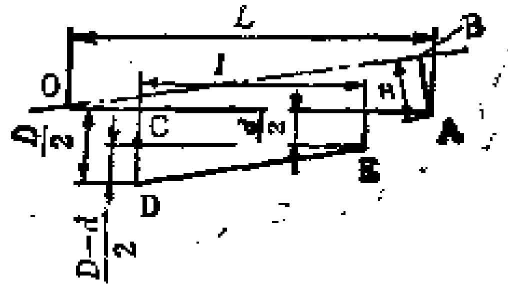


图4.2 锥体切削原理

【解说】 因为图4.2 中$\triangle OAB$和$\triangle ECD$相似，所以

$CE:CD=OB:BA$

在此， $CE=l$，

$CD=(D-d)/2$，$OB=\sqrt{L^2-x^2}\approx L$（因为$x$比$L$ 小得多）

设$BA=x$，则

$l:(D-d)/2=L:x$

即可求出（1）式。

【例题】 工件全长160mm，圆锥部分长为100mm，锥台大端直径为30mm，小端直径为26mm，求尾架顶尖的移动量是多少？

【解答】 将$L=160\mathrm{mm}$，$l=100\mathrm{mm}$，$D=30\mathrm{mm}$，$d=26\mathrm{mm}$ 代入（1）式，得

$$x=\frac{160\times(30-26)}{2\times100}=3.2\ (\text{mm})$$

【例题】 工件全长200mm，锥度1/100，求顶尖移动量是多少？

【解答】 将$L=200$mm，锥度=1/100代入（1）式，得

$$x=200\times\frac{1}{100\times2}=1\ (\text{mm})$$

§4.3　螺纹的切削

(1) 一组挂轮的情况

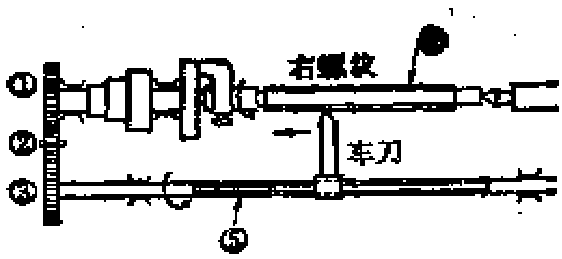


图4.3　螺纹切削原理
①主轴侧齿轮　②介轮　③安装在丝杠上的齿轮
④工件　⑤丝杠

$$\left.\begin{aligned}\frac{p}{P}&=\frac{A}{C}\\ \frac{T}{t}&=\frac{A}{C}\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

p：工件螺纹螺距（mm或in）
P：丝杠螺距（mm或 in）
T：丝杠的每英寸牙数
t：工件螺纹的每英寸牙数
A：安装在主轴侧的齿轮的齿数
C：安装在丝杠上的齿轮的齿数

(2) 两组挂轮的情况　($p/P<1/6$时)

$$\frac{p}{P}=\frac{A}{B}\times\frac{B'}{C},\qquad \frac{T}{t'}=\frac{A}{B}\times\frac{B'}{C}\qquad(2)$$

B和B'：挂轮齿数

【解说】　如图3.4所示，调节挂轮组合，使车刀在主轴旋转一圈时只移动一个螺距（螺纹旋转1圈前进的距离：单头螺纹）。在英制车床中使用的挂轮是在20～120齿之间每隔5个齿有一个挂轮，此外还有127齿的挂轮。公制车床使用的挂轮是在20～64齿之间每隔4个齿有一个挂轮，此外还有72、80和127齿的挂轮。

【例题】 用丝杠螺距为8mm的公制车床切削螺距1.25mm的螺纹，试作挂轮计算。

【解答】 因为p/P小于1/6，所以用两组挂轮。由（2）式得

$$\frac{p}{P}=\frac{1.25}{8}=\frac{5}{32}=\frac{5\times1}{16\times2}=\frac{20}{64}\times\frac{28}{56}$$

$$=\frac{20}{64}\times\frac{24}{48}$$

因而 $A=20$，$B=64$，而B'和C按1∶2选择即可。

【例题】 丝杠螺距为5mm的公制车床，若切削螺距为2mm和6mm的螺纹，应如何调节挂轮？

【解答】 因为螺距是2mm和6mm，其p/P均大于1/6，所以选用一组挂轮。

当螺距为2mm 时 $\frac{p}{P}=\frac{2}{5}=\frac{2\times12}{5\times12}=\frac{24}{60}$

$$A=24,\ C=60$$

当螺距为6mm 时 $\frac{p}{P}=\frac{6}{5}=\frac{6\times4}{5\times4}=\frac{24}{20}$

$$=\frac{48}{40}=\frac{72}{60}=\frac{A}{C}$$

§4.4 铣床的分度

(1) 单式分度

$$n = \frac{R}{N} = \frac{40}{N} \qquad (1)$$

n：分度手柄的转速

N：分度数

R：蜗轮的转速比（1/40）

(2) 差动分度

$$\left.\begin{aligned} n &= \frac{40}{N'} \\ i &= 40\frac{N'-N}{N'} \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

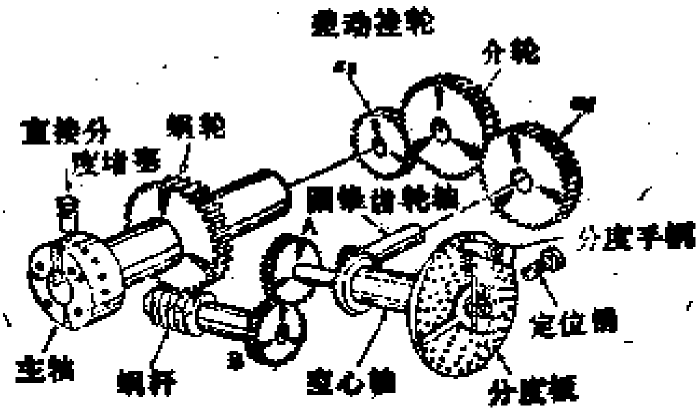


图4.4 分度机构

N'：假定分度数

i：挂轮比

1) 挂轮为2个时（参照图4.4）

$$\frac{Z_s}{Z_W} \qquad (3)$$

2) 挂轮为4个时

$$i = \frac{Z_S \times Z_C}{Z_B \times Z_W} \qquad (4)$$

分度板的孔数

正面	24	25	28	30	34	37	38	39	41	42	43
反面	46	47	49	51	53	54	57	58	59	62	66

【解说】 利用铣床切削齿轮时，必须将圆周等分，这时可利用分度头。

【例题】 用单式分度法分5等分时，怎样分合适？

【解答】 将$N=5$代入（1）式中，得

$$n=\frac{40}{5}=8$$

答 将分度手柄每次转动8圈

【例题】 用差动分度法，拟分成79等分，该怎么分？

【解答】 将假定的分度数$N'=80$代入（2）式，可求出分度手柄的转速n。

$$n=\frac{40}{80}=\frac{1}{2}=\frac{1\times12}{2\times12}=\frac{12}{24}$$

答 使分度手柄每次在24孔圈的圆周上转过12个孔。

将$N'=80$，$N=79$代入（2）式，可求出挂轮比 i。

$$i=40\times\frac{80-79}{80}=\frac{1}{2}=\frac{1\times30}{2\times30}=\frac{30}{60}=\frac{Z_s}{Z_w}$$

§4.5　折弯金属板的力和弯曲板长

（1）弯曲加工时所需的力

精度低时　$P_1 = C_1 \dfrac{bt^2\sigma_B}{a}$（kgf）　　　　（1）

精度高时　$P_2 = C_2 bl\sigma_e$（kgf）　　　　（2）

C_1：根据板材的性质和外形尺寸而改变的系数，一般为0.6～1.2。

b：板宽(折线部位)（mm）

a：阴模两支点间距离（mm）

t：板厚（mm），σ_B：板的抗拉强度（kgf/mm²）

C_2：取值为1～2。

l：受压部分水平投影全长，若（$R+t$）与a比很小的话，可认为$l=a$。

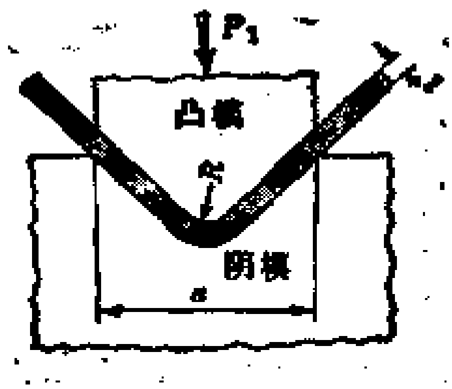


图4.5　弯曲加工

σ_e：板的屈服限（kgf/mm²）

（2）金属板长（各符号参照图4.6）

$$L = A + B + C + 1.57(R_1 + K\cdot t)\frac{\theta_1^\circ}{90^\circ} + 1.57(R_2 + K\cdot t)\frac{\theta_2^\circ}{90^\circ} \quad (3)$$

K：取值为0.3～0.5，板材越硬取值越大

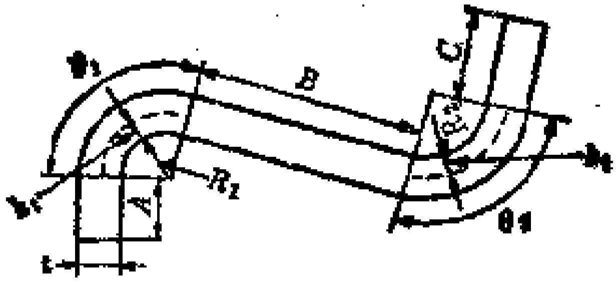


图4.6 产品的形状和金属板的长度

【解说】 (1)、(2)两式基本是利用材料力学的 $\sigma=W/A$ 得到的。

【例题】 厚2mm，宽40mm软钢板，阴模两支点间距为16mm，要弯曲成V型，求精度低时和精度高时所需的力。设软钢的抗拉强度为45kgf/mm²，屈服限为25kgf/mm²，$C_1=0.8$，$C_2=1.5$。

【解答】 将$C_1=0.8$，$C_2=1.5$，$b=40$mm，$t=2$mm，$a=16$mm，$\sigma_B=45$kgf/mm²，$\sigma_s=25$kgf/mm²，$l\approx a$代入（1）、（2）式，得

$$\text{精度低时}\quad P_1=0.8\times\frac{40\times2^2\times45}{16}=360\ (\text{kgf})$$

$$\text{精度高时}\quad P_2=1.5\times40\times16\times25=24000\ (\text{kgf})$$

【例题】 要制成如图4.7所示的产品，求毛坯长是多少？（$K=0.35$）

【解答】 将$A=7$，$B=17$，$\theta=90°$，$R=4$，$t=4$代入（3）式，得

$$L=7+17+1.57\ (4+0.35\times4)\ \times\frac{90}{90}=32.5\ (\text{mm})$$

图4.7 例题图

第五章　流体力学

§5.1　流体重度与比重

(1) 重度

$$\gamma=\frac{W}{V}\quad(\mathrm{kgf/m^3})\tag{1}$$

γ：重度(单位体积的重量)

W：流体重量 (kgf)

V：体积 ($\mathrm{m^3}$)

(2) 比重

$$d=\frac{\text{流体的重度}}{\text{纯水的重度}}=\frac{\gamma(\mathrm{kgf/m^3})}{1000(\mathrm{kgf/m^3})}=\frac{\gamma}{1000}\tag{2}$$

【解说】 在工业中，某一种物质每$1\mathrm{m^3}$的重量称为重度。这个重度与1气压，4°C的$1\mathrm{m^3}$ 水的重度相比叫比重。水在1气压4°C时最重，温度高于或低于 4°C时都轻。

【例题】 测得某流体的体积为$4\mathrm{m^3}$，重量为4100kgf，求该流体的重度和比重。

【解答】 将$W=4100\mathrm{kgf}$，$V=4\mathrm{m^3}$代入 (1) 式，可求得重度

$$\gamma=\frac{4100}{4}=1025\quad(\mathrm{kgf/m^3})$$

将$\gamma=1025\mathrm{kgf/m^3}$代入 (2) 式，可求得比重

$$d=\frac{1025}{1000}=1.025$$

【例题】 有一位国王为了作一顶王冠而给了工匠 2kgf 黄金。把作完的王冠放在装满水的容器中，王冠沉下后有 120ml的水溢出。该王冠在水外边测量是2kgf。王冠是含铅的，求其含铅量是多少？已知黄金的比重是19.32，而铅的比重是11.34。

【解答】 应用(1)、(2) 式的原理，设在王冠中含黄金 x kgf，含铅 y kgf，并列出联立方程，求解

$$x+y=2$$

$$\frac{x\times1000}{19.32}+\frac{y\times1000}{11.34}=120$$

这个王冠含金1.548kgf，含铅0.452kgf。

§ 5.2 压强

(1) 总压力

$P=\gamma AH$　　　(1)

P：总压力（kgf）

γ：重度（kgf/m^3）

A：底面积（m^2）

H：液柱高度（m）

(2) 压强

$$p=\frac{P}{A}=\gamma H \quad (2)$$

p：压强（kgf/m^2）

(3) 表压和绝对压强

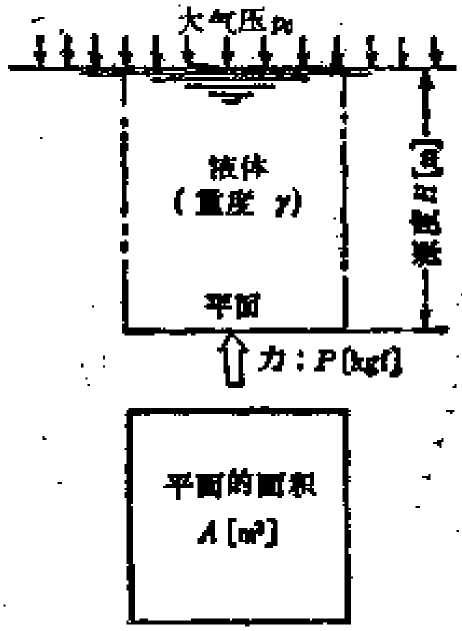


图5.1 液体的压力

以绝对零值(绝对真空)为基准测得的压强叫绝对压强。以大气压作为零基准而测出的压力称为表压。

表压＝绝对压强－大气压强　　　(3)

【解说】所谓压力，即垂直作用在每单位面积上的力的大小，也可以用液柱高来表示。譬如（1）式中，因为γ和A是定值，所以 p与H成正比。

【例题】求水面下10m处的表压和绝对压强是多少？设此时的大气压为$10000kgf/m^2$。

【解答】将$\gamma=1000kgf/m^3$，$H=10m$代入（2）式可求出表压

$$p=1000\times10=10000\ (kgf/m^2)=1\ (kgf/cm^2)$$

将表压$p=10000kgf/m^2$和大气压$p_0=10000kgf/m^2$代入（3)式可求出绝对压强。

$$\text{绝对压强}=10000+10000=20000\ (kgf/m^2)$$
$$=2\ (kgf/cm^2)$$

【例题】求海面下10000m处的表压和绝对压强是多少kgf/cm^2？设海水的重度$\gamma=1025kgf/m^3$，大气压$p_0=10000kgf/m^2$。

【解答】将$\gamma=1025kgf/m^3$，$H=10000m$代入（2）式求出表压。

$$p = 1025 \times 10000 = 10250000 \ (\mathrm{kgf/m^2})$$
$$= 1025 \ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

将 $p = 1025\mathrm{kgf/cm^2}$和大气压 $p_a = 1\mathrm{kgf/cm^2}$代入（3）式求出绝对压强。

$$1025 = \text{绝对压强} - 1$$
$$\text{绝对压强} = 1025 + 1 = 1026 \ (\mathrm{kgf/cm^2})$$

§5.3 用液柱式压力计测量压力

$$P_A+\gamma H=p_0+\gamma' H' \quad (1)$$

P_A：待测容器内的压力（kgf/m²）

γ：容器内液体的重度（kgf/m³）

H：液柱高（m）

p_0：大气压（kgf/m²）

γ'：液柱式压力计中液体重度（kgf/m³）

H'：液柱式压力计中液柱高度（m）

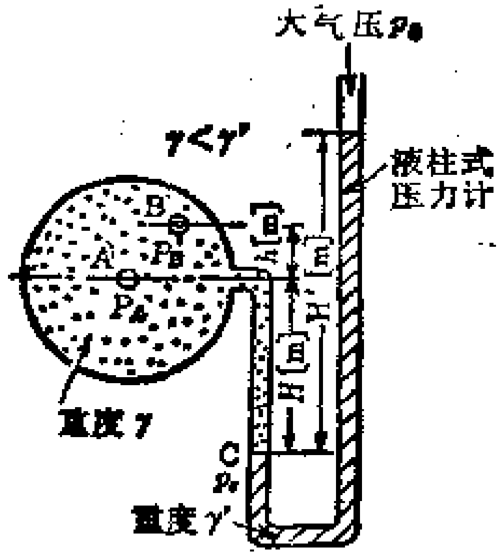


图5.2 压力计

【解说】 液柱式压力计是待测液体的压力与静止的液体的重量相平衡的一种测量仪表。

请注意图5.2中的C点，此点压力 p_c 是内部压力和外部压力相平衡时的压力。故有

外部：p_c的压力＝大气压＋重度γ'的压力

$$\therefore p_c=p_0+\gamma' H'$$

内部：p_c的压力＝A点的压力＋重度γ的压力

$$\therefore p_c=P_A+\gamma H$$

因为内部压力等于外部压力，所以（1）式成立。

【例题】 用水银压力计测量图5.2容器中的压力。其容器中水压 $H=40$cm，水银柱$H'=80$cm，大气压$p_0=1$kgf/cm²，水银和水的

比重为13.6和1。求容器内的表压和绝对压强（kgf/cm^2）是多少？

【解答】 将$p_0=1kgf/cm^2$，$\gamma=1/1000kgf/cm^3$，$H=40cm$，$\gamma'=13.6/1000kgf/cm^3$，$H'=80cm$代入（1）式求出绝对压强。

$$P_A+\frac{1}{1000}\times 40=1+\frac{13.6}{1000}\times 80$$

$$\therefore P_A=1+\frac{13.6}{1000}\times 80-\frac{40}{1000}=2.048\ (kgf/cm^2)$$

将绝对压强$P_A=2.048kgf/cm^2$，大气压$p_0=1kgf/cm^2$代入§5.2的（3）式，得

表压$=2.048-1=1.048\ (kgf/cm^2)$

§5.4　巴斯卡原理

$$p=\frac{F}{A_1}=\frac{W}{A_2}\quad(\mathrm{kgf/m^2})\qquad(1)$$

$$W=\frac{A_2}{A_1}F\quad(\mathrm{kgf})\qquad(2)$$

$$A_1S_1=A_2S_2\qquad(3)$$

p：容器内压力（$\mathrm{kgf/m^2}$）

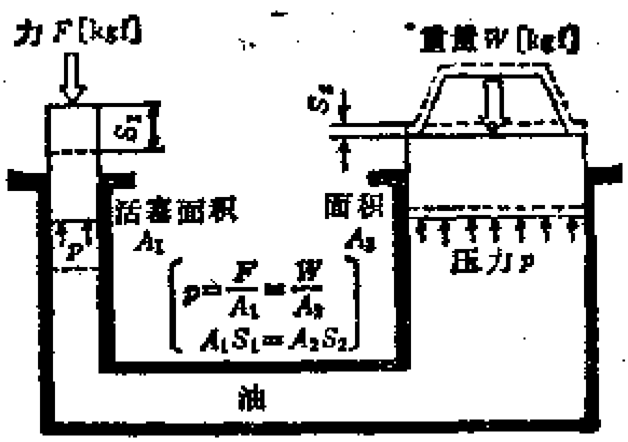


图5.3　巴斯卡原理

F：作用在活塞上的力（kgf）

A_1：小活塞的截面积（$\mathrm{m^2}$）

A_2：大活塞的截面积（$\mathrm{m^2}$）

W：作用在大活塞上的载荷（kgf）

S_1：小活塞的移动距离（m）

S_2：大活塞的移动距离（m）

【解说】　对密闭容器内的静止液体的一部分施加压力时，这个压力以相同的压强传到该容器内液体的各个方向，这就是巴斯卡原理。因为各处的压力相等，所以（1）式成立。（3）式是在密闭的液体无损失，总量不变的情况下求出的公式。

【例题】　图5.3中的活塞1和2的直径各为30mm和500mm。如果不考虑自重，而使2000kgf的物体上升，在活塞1上应该加多大的力？

若使物体升高30mm，活塞1应该下降多少mm？

【解答】 将$A_1=\pi\times3^2/4cm^2$，$A_2=\pi\times50^2/4cm^2$，$W=2000kgf$代入（1）式求出F。

$$F=\frac{\pi\times3^2/4}{\pi\times50^2/4}\times2000=7.2\ (kgf)$$

将$A_2/A_1=50^2/3^2$，$S_2=30mm$代入（3）式求出活塞1的移动量S_1

$$S_1=\frac{50^2}{3^2}\times30=8333\ (mm)$$

【要点】 上面例题，为使物体上升3cm，则小活塞要移动8m以上，这与实际应用不符。在实际中是采用将预先准备的油罐中的油连续地向油缸中注入的方法。

§5.5　物体在流体中的浮力

$$F=\gamma V \quad (\text{kgf})$$

F：浮力（kgf）

γ：流体的重度（kgf/m^3）

V：物体的体积（m^3）

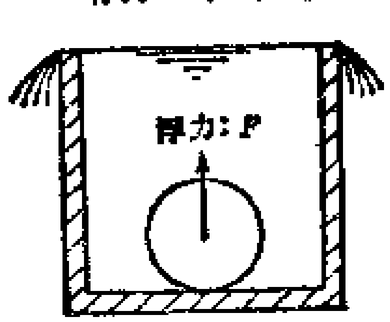


图5.4

【解说】　某物体在流体中受到向上的力作用，此力叫浮力，它等于物体在流体中排出的流体重量。这个原理是阿基米德发现的。如图5.4所示，把体积为V（m^3）的物体放入重度为γ（kgf/m^3）的液体里面，物体排出V（m^3）的液体，液体的重量为γV（kgf）。此排出液体的重量等于浮力，即为（1）式。

【例题】　求体积为1m^3的物体在空气中和在水中的浮力大小。设空气重度是在20℃，1气压时，为1.205kgf/m^3，水的重度为1000kgf/m^3。

【解答】　将$V=1\text{m}^3$，$\gamma=1.205\text{kgf/m}^3$代入（1）式，求出在空气中的浮力。

$$F=1.205\times1=1.205 \quad (\text{kgf})$$

将$V=1\text{m}^3$，$\gamma=1000\text{kgf/m}^3$代入（1）式，求出在水中的浮力。

$$F=1000\times1=1000 \quad (\text{kgf})$$

【例题】　1m^3的物体，在空气中测得重量为1200kgf，在水中测量是多少（kgf）？假定忽略空气的浮力，设水的重度为1000kgf/m^3。

【解答】　将$V=1\text{m}^3$，$\gamma=1000\text{kgf/m}^3$代入（1）式，求出浮力。

$$F=1\times1000=1000 \quad (\text{kgf})$$

因此，在水中物体重量是（空气中物体的重量）－（物体在水中的浮力）。

$$\text{在水中物体重量}=1200-1000=200 \quad (\text{kgf})$$

【例题】　若把某物体放到水中，则该物体浸入水中只有1.2m^3并浮起，物体比重为0.8，求物体的重量和体积是多少？设水的重度为1000kgf/m^3。

【解答】 因为物体的重量和浮力相等，设物体的重量为W (kgf)，将$\gamma=1000\text{kgf/m}^3$，$V=1.2\text{m}^3$代入 (1) 式，得

$$W=F=1000\times1.2=1200\ (\text{kgf})$$

$$V=\frac{W}{\gamma}=\frac{1200}{0.8\times1000}=1.5\ (\text{m}^3)$$

§5.6 连续法则

$$Q=A_1v_1=A_2\ v_2\ (m^3/s)$$
$$=定数 \tag{1}$$

$$\frac{A_1}{A_2}=\frac{v_2}{v_1} \tag{2}$$

Q：流量（m^3/s）

A_1：截面①处截面积（m^2）

A_2：截面②处截面积（m^2）

v_1：截面①处的流体流速（m/s）

v_2：截面②处的流体流速（m/s）

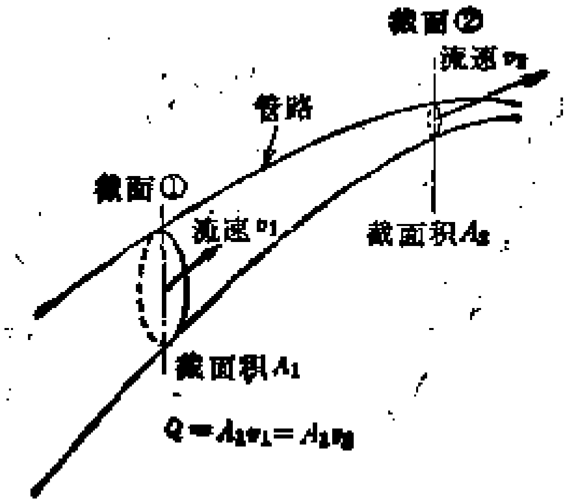


图5.5

【解说】 在管内连续流动的流体，与管的截面积大小无关，流量总是相等的法则称为连续法则。在图5.5中，截面①处流动的流体流量为A_1v_1，截面②处流体流量为A_2v_2。若流体在截面①处没有损失时，截面①、②两处流量相等。

【例题】 如图5.5所示，设截面①处面积为100cm²，流体的平均速度为$v_1=5m/s$，截面②处面积为10cm²，试求截面②处流体的平均速度和流量是多少？

【解答】 将$A_1=100\ cm^2$，$v_1=5m/s$，$A_2=10cm^2$代入（1）式，得

$$100\times5=10\times v_2$$

$$\therefore v_2=\frac{100\times5}{10}=50\ (\mathrm{m/s})$$

将$A_1=100\mathrm{cm}^2=0.01\mathrm{m}^2$，$v_1=5\ \mathrm{m/s}$代入（1）式，得

$$Q=0.01\times5=0.05\ (\mathrm{m}^3/\mathrm{s})$$

【例题】 在图5.5中，管内流量为$1\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$，截面①处流速为$2\mathrm{m/s}$，截面②处流速为$10\mathrm{m/s}$，求截面①、②处截面直径是多少？

【解答】 将$A_1=\dfrac{\pi d_1^2}{4}$，$A_2=\dfrac{\pi d_2^2}{4}$，$v_1=2\mathrm{m/s}$，$v_2=10\mathrm{m/s}$，$Q=1\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$代入（1）式，求出$d_1$、$d_2$。

$$Q=\frac{\pi d_1^2}{4}v_1=\frac{\pi d_2^2}{4}v_2$$

$$\therefore d_1=\sqrt{\frac{4Q}{\pi v_1}}=\sqrt{\frac{4\times1}{\pi\times2}}\approx0.8\ (\mathrm{m})$$

$$d_2=\sqrt{\frac{4Q}{\pi v_2}}=\sqrt{\frac{4\times1}{\pi\times10}}\approx0.36\ (\mathrm{m})$$

§5.7 伯努利定理

$$\frac{v^2}{2g}+Z+\frac{p}{\gamma}=H=\text{定值} \qquad (1)$$

v：管内流体流速（m/s）

g：重力加速度（m/s^2）

Z：到基准面的高度（m）

p：管内流体压力（kgf/m^2）

γ：流体重度（kgf/m^3）

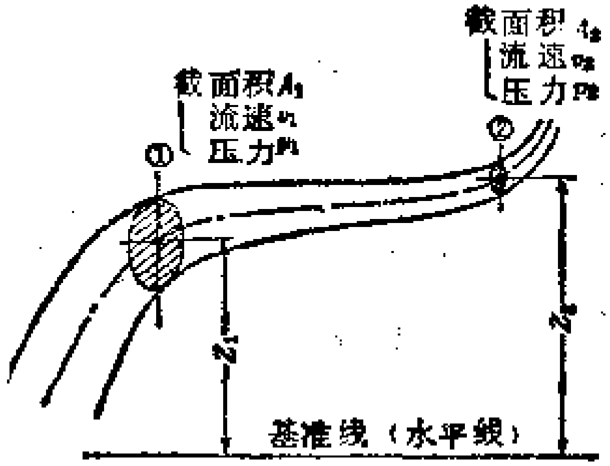


图5.6 伯努利定理

【解说】 伯努利定理是由能量守恒定律而得到的。图5.6 中，在高度为Z（m）的管里流动的不考虑粘度影响，不可压缩的流体（理想流体）其速度为v（m/s），压力为p（kgf/m^2），流体重量为W(kgf)。其总能量是下面三部分能量之和，即动能$\frac{Wv^2}{2g}$（kgf·m）、势能WZ（kgf·m）和压力能$pAl=P\gamma Al/\gamma=Wp/\gamma$。并且这三部分能量之和(总能量)在各点都是相同的。

$$\frac{Wv_1^2}{2g}+WZ_1+\frac{Wp_1}{\gamma}=\frac{Wv_2^2}{2g}+WZ_2+\frac{Wp_2}{\gamma}$$

将上式两边各除以W，即为伯努利定理。

【例题】 图5.7是一个水平放置的文丘里管。截面积$A_1=10cm^2$,

$A_2=5\text{cm}^2$，压力$p_1=4\text{kgf/cm}^2$，流量$Q=0.01\text{m}^3/\text{s}$，求$A_2$截面处的压力。

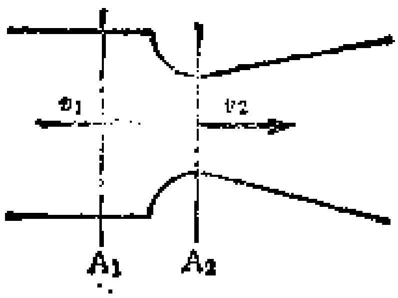


图5.7 例题图

【解答】 将$Q=0.01\text{m}^3/s$，$A_1=10\text{cm}^2=0.001\text{m}^2$，$A_2=5\text{cm}^2=0.0005\text{m}^2$代入§5.6的（1）式，求出$v_1$、$v_2$。

$$v_1=\frac{0.01}{0.001}=10\ (\text{m/s}),\quad v_2=\frac{0.01}{0.0005}=20\ (\text{m/s})$$

将v_1、v_2的数值及$Z_1=Z_2=0$，$p_1=4\times10^4\text{kgf/m}^2$，$\gamma=1000\text{kg/m}^3$代入（1）式，得

$$\frac{10^2}{2g}+0+\frac{4\times10^4}{1000}=\frac{20^2}{2g}+0+\frac{p_2}{1000}$$

$$\therefore\quad p_2=24.7\times10^3\ \text{kgf/m}^2$$

§5.8 托里拆里定理

$$v=\sqrt{2gH}$$

v：流体出口速度（m/s）

g：重力加速度（m/s²）

H：从液面到出口高度（m）

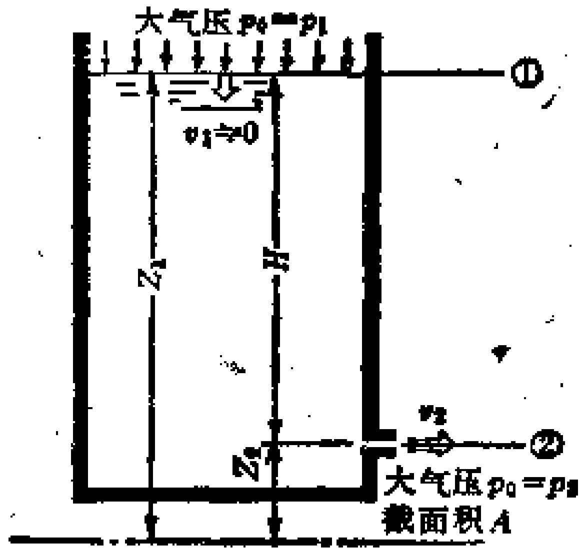


图5.8 托里拆里定理

【解说】 如图5.8所示，在大水槽下面开个孔向外喷水。这个状态可应用伯努利定理。当②向外流水时，水面①几乎是不下降所以$v_1\approx0$。p_1、p_2为①、②处的大气压并且相等 $p_1=p_2$，$Z_1-Z_2=H$。

$$\frac{0^2}{2g}+Z_1+\frac{p_1}{\gamma}=\frac{v_2^2}{2g}+Z_2+\frac{p_1}{\gamma}$$

$$\therefore\quad Z_1-Z_2=\frac{v_2^2}{2g}=H\ (\mathrm{m})$$

H为从液面到出口高度，求出口流速v_2即为（1）式。

【例题】 如图5.8所示，在水槽下面 5m处开一圆孔，其直径为4cm，求该孔出口流速和流量。

【解答】 将$g=9.8\mathrm{m/s^2}$，$H=5\mathrm{m}$代入（1）式，求得流速。

$$v=\sqrt{2\times9.8\times5}=9.9\ (\mathrm{m/s})$$

将$A=\frac{\pi\times0.04^2}{4}$，$v=9.9$m/s代入§5.6的（1）式，得

$$Q=\frac{\pi\times0.04^2}{4}\times9.9=0.012\ (m^3/s)$$

【例题】 求如图5.9所示喷水的喷出速度和流量。设槽中水可得到补充，从而使水位保持一定，管内径为 2cm。

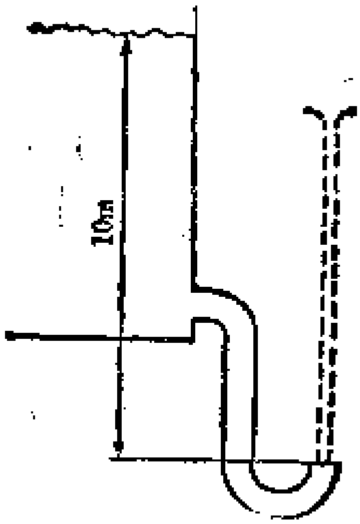


图5.9 例题图

【解答】 将$g=9.8m/s^2$，$H=10$m代入（1）式，求得流速。

$$v=\sqrt{2\times9.8\times10}=14\ (m/s)$$

将$v=14$m/s，$A=\frac{\pi\times0.02^2}{4}$代入§5.6的（1）式，得

$$Q=\frac{\pi\times0.02^2}{4}\times14=0.0044\ m^3/s$$

§5.9 雷诺数

$$Re = v\frac{d}{\nu} \qquad (1)$$

Re：雷诺数

v：管内流速（m/s）

d：管内径（m）

ν：液体的运动粘度（m^2/s）

表5.1　　在1atm下的运动粘度

温度	水的运动粘度 ν（m^2/s）	空气的运动粘度 ν（m^2/s）
0℃	1.792×10^{-6}	13.33×10^{-6}
10	1.302×10^{-6}	14.21×10^{-6}
20	1.004×10^{-6}	15.12×10^{-6}
30	0.801×10^{-6}	16.04×10^{-6}
40	0.658×10^{-6}	16.98×10^{-6}

【解说】 管内流动的流体是层流还是湍流，其界限数值就是雷诺数。如$Re<2320$为层流，在这个范围内即或一时流动不稳定，也会立即变成层流。反之，$Re>2320$即为湍流。

【例题】 内径为10cm的光滑直管，水以2m/s的流速流动，水温为20℃，试问流动的水是层流还是湍流？

【解答】 将$v=2m/s$，$d=0.1m$，ν在20℃时为$1.004\times10^{-6}m^2/s$代入（1）式，得

$$Re = 2\times\frac{0.1}{1.004\times10^{-6}} = 199200$$

因为$Re=199200>2320$，所以是湍流。

【例题】 在内径为5cm的光滑直管内流动着20℃的水，为使其呈层流，求其流速应为多少？

【解答】 将$Re=2320$，$d=0.05\text{m}$，$\nu=1.004\times10^{-6}\ \text{m}^2/s$代入（1）式，得

$$2320=v\times\frac{0.05}{1.004\times10^{-6}}$$

$$\therefore\quad v=\frac{2320\times1.004\times10^{-6}}{0.05}=0.046\ (\text{m/s})$$

故当流速在0.046m/s以下时可呈层流。

【例题】 在内径50cm的管中，有流量为 $2\text{m}^3/\text{s}$的10℃ 水流动，求其Re为多少？

【解答】 将$Q=2\text{m}^3/s$，$A=\dfrac{\pi\times0.5^2}{4}\text{m}^2$代入§5.6的（1）式中求出$v$，再将$d=0.5\text{m}$，$\nu=1.302\times10^{-6}$代入（1）式求出$Re$。

$$v=\frac{4\times2}{\pi\times0.5^2}=10.2\ \text{m/s},\quad Re=\frac{10.2\times0.5}{1.302\times10^{-6}}$$

$$=3.9\times10^{6}$$

§5.10 直管流动损失

(1) 压头损失

$$h=\frac{p_1}{\gamma}-\frac{p_2}{\gamma}=\lambda\frac{l}{d}\cdot\frac{v^2}{2g}\ (\mathrm{m}) \qquad (1)$$

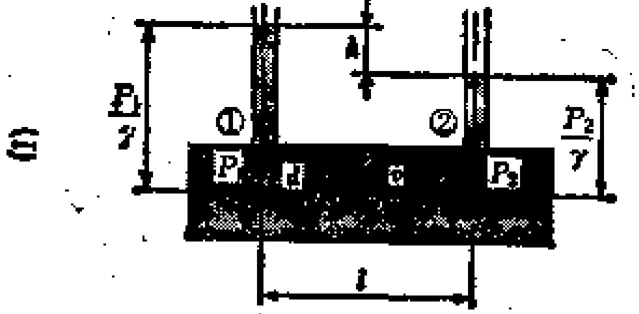


图5.10 流动损失

h：直管的压头损失（m）

p_1：①的水压（kgf/m²）

λ：摩擦系数

p_2：②的水压 （kgf/m²）

l：管长（m）

d：管径（m）

v：管内平均流速（m/s）

g：重力加速度（m/s²）

(2) 摩擦系数(层流时)

$$\lambda=\frac{64}{Re}=\frac{64\nu}{vd} \qquad (2)$$

湍流时，实取$\lambda=0.03$。

Re：雷诺数，ν：运动粘度（m²/s）

【解说】 在直管中流动的流体，只要管子连续，其压力就应该相等。可是实际上如图5.10所示，随着流动，由于摩擦阻力的影响，压力就下降。下降量就是压头损失。在实际应用上是利用（1）式的后部。

【例题】 在管径600mm的管内，水以2.5m/s的平均速度流动，求管

长为100m的摩擦压头损失。设摩擦系数为0.0208。

【解答】 将$\lambda=0.0208$，$l=100\text{m}$，$d=0.6\text{m}$，$g=9.8\text{m/s}^2$，$v=2.5\text{m/s}$代入（1）式，得

$$h=0.0208\times\frac{100}{0.6}\times\frac{2.5^2}{2\times9.8}=1.1\ (\text{m})$$

【例题】 水在新的铸铁管内以平均流速2m/s流动，流动距离为5km，求压头损失。设运动粘度为 $\nu=1.0\times10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$，管内径为30cm。

【解答】 因为是层流，所以将 $v=2\text{m/s}$，$\nu=1.0\times10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$，$d=0.3\text{m}$代入（2）式，求出摩擦系数。再将 $l=5000\text{m}$代入（1）式，求出压头损失。

$$\lambda=\frac{64\times1.0\times10^{-6}}{2\times0.3}=107\times10^{-6}$$

$$h=107\times10^{-6}\times\frac{5000\times2^2}{0.3\times2\times9.8}=0.36\ (\text{m})$$

§5.11　管路形状改变时的损失

$$h=\zeta\frac{v^2}{2g}\ \text{(m)} \qquad (1)$$

h：压头损失（m）

ζ：形状损失系数

v：流体的平均速度（m/s）

g：重力加速度（m/s^2）

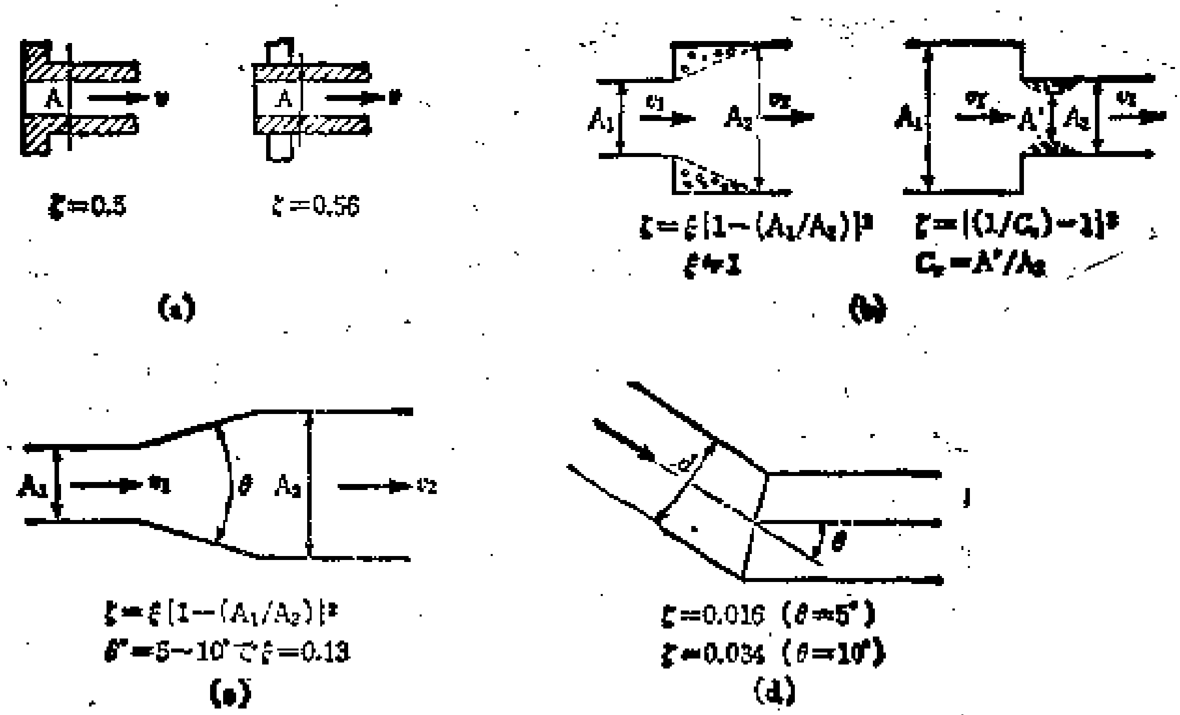


图5.11　形状损失系数

【解说】　管子的动压头为$\frac{v^2}{2g}$，实验证明一般压头损失与动压头成正比。

【例题】　在流量为$4m^3/min$的管中，内径由12cm骤然减小至6cm，其形状损失系数$\zeta=0.32$，求压头损失。

【解答】　将$Q=4m^3/min=4/60m^3/s$，$A_1=\pi\times0.12^2/4m^2$代入§5.6的（1）式，求出流速。再将$\zeta=0.32$代入（1）式，得

$$v=\frac{Q}{A}=\frac{4\times4}{\pi\times0.12^2\times60}=5.9\ \text{(m/s)}$$

$$h=\zeta\frac{v^2}{2g}=0.32\times\frac{5.9^2}{2\times9.8}=0.57\ \text{(m)}$$

§5.12 利用孔板测定流量

(1) 流速的测定

$$v=C_v\sqrt{2gH} \quad (\text{m/s}) \qquad (1)$$

v：流速（m/s），C_v：速度系数

H：由孔板前后压差产生的压头（m）

$$H=(p_1-p_2)/\gamma$$

(2) 流量的测定

$$Q=C\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{2gH} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \qquad (2)$$

Q：流量（m^3/s）

C：孔板流量系数，对于水$C=0.59\sim0.68$。

d：孔板的直径（m）

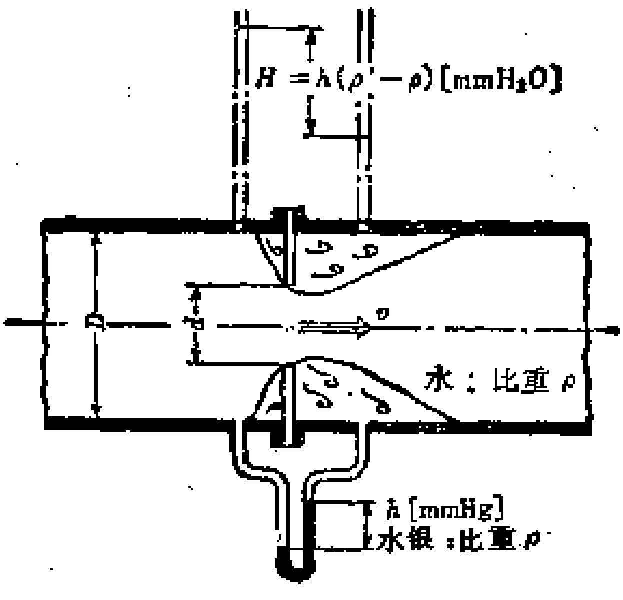


图5.12 管内孔板的原理

【解说】 如图5.12所示，在流量待测处安装孔板，利用孔板前后压差测定流量。

【例题】 如图5.12所示，在管径$D=120$mm的管路中安装直径为60mm的孔板，已测出孔板前后压差为0.6m，求流速、流量的大小。设$C_v=0.95$，$C=0.63$。

【解答】 将$C_v=0.95$，$H=0.6$m代入（1）式求出流速。

$$v=0.95\sqrt{2\times9.8\times0.6}=3.26\ (\mathrm{m/s})$$

将$C=0.63$，$d=0.12$m，$H=0.6$m代入（2）式，得

$$Q=0.63\times\frac{\pi}{4}\times0.12^2\sqrt{2\times9.8\times0.6}=0.024\ (\mathrm{m^3/s})$$

【例题】 管径$D=60$mm，孔板直径$d=20$mm，求流量。设$C=0.63$，$H=1$m。

【解答】 将$C=0.63$，$d=0.02$m，$H=1$m代入（2）式，得

$$Q=0.63\times\frac{\pi}{4}\times0.02^2\sqrt{2\times9.8\times1}=0.000876(\mathrm{m^3/s})$$

§5.13　利用文丘里计测定流量

（1）流速的测定

$$v=\sqrt{\frac{2gH}{1-m_2}}\ \text{(m/s)} \qquad (1)$$

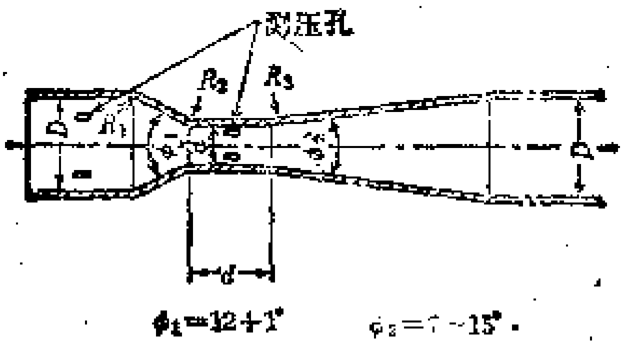
v：流体的速度（m/s）

m：喉径比（d^2/D^2）

H：压头（m）

（2）流量的测定

$$Q=C\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{\frac{2gH}{1-m^2}}\ (\text{m}^3/\text{s}) \qquad (2)$$



d：喉径 D：管路内径

图5.13　圆锥形文丘里管

Q：流量（m^3/s）　　C：流量系数

d：喉部直径（m）

【解说】　如图5.13所示，在管路中装入截面积缩小了的管（文丘里管），测定其前后压差、流速和流量。

根据流体的连续法则 $v_1\pi D^2/4=v_2\pi d^2/4$，因而 $v_1=v_2d^2/D^2$，在伯努利定理中，$Z_1=Z_2$，又设$H=(p_1-p_2)/\gamma$，$d^2/D^2=m$，即可得（1）式。

在$Q=Av$式中，考虑到摩擦损失，即可得（2）式。

【例题】　利用如图5.13所示文丘里计，$D=10\text{cm}$，$d=5\text{cm}$，$H=30\text{cm}$，求管内流体的速度和流量。设$C=0.97$。

【解答】　将$H=0.3$m，$m=5^2/10^2=0.25$，$g=9.8$m/s²代入(1)式，得

$$v=\sqrt{\frac{2\times9.8\times0.3}{1-0.25^2}}=2.2\ (\text{m/s})$$

将$C=0.97$，$d=0.05$m，$m=0.25$，$H=0.3$m代入(2)式，求出流量。

$$Q=0.97\times\frac{\pi}{4}\times0.05^2\sqrt{\frac{2\times9.8\times0.3}{1-0.25^2}}=0.0048\ (\text{m}^3/\text{s})$$

【例题】　接前例题，当流量为0.08m³/s时，其压差是多少？

【解答】　将$C=0.97$，$d=0.05$m，$m=0.5$，$Q=0.08$m³/s代入(2)式，得

$$0.08=0.97\times\frac{\pi}{4}\times0.05^2\sqrt{\frac{2\times9.8\times H}{1-0.5^2}}$$

$$\therefore H=\left(\frac{0.08\times4}{0.97\times\pi\times0.05^2}\right)^2\times\frac{1-0.5^2}{2\times9.8}=67.5\ (\text{m})$$

§5.14 利用皮托管测定流量

(1) 流速的测定

$$v=C\sqrt{2gH}\quad(\mathrm{m/s})\quad(1)$$

v：流体的速度 (m/s)

H：细管B与细管A压头差 (m)

C：皮托管系数(一般取$C\approx1$)

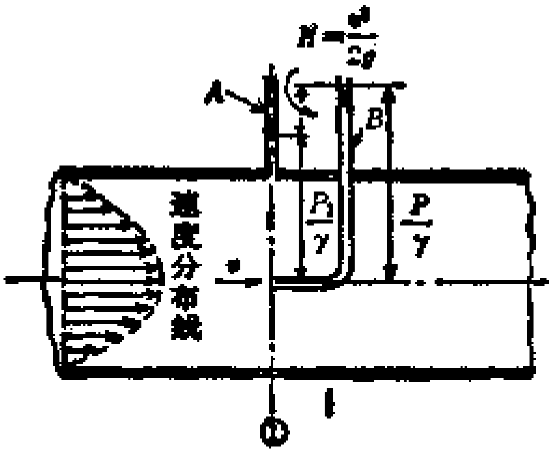


图5.14 皮托管的原理

(2) 流量的测定

$$Q=A\cdot v_m\quad(\mathrm{m^3/s})\qquad(2)$$

Q：流量 ($\mathrm{m^3/s}$)

A：管截面积 ($\mathrm{m^2}$)

v_m：平均流速 (m/s)

【解说】 当流体碰到垂直物体时，流体的速度便会消失，并转化成压力。皮托管即利用这一原理。

【例题】 如图5.14所示，测出皮托管的压头差为20cm，皮托管系数$C=1$，求皮托管顶端的流速。

【解答】 将$C=1$，$H=0.2\mathrm{m}$，$g=9.8\mathrm{m/s^2}$代入(1)式，得

$$v=1\times\sqrt{2\times9.8\times0.2}=1.98\ (\mathrm{m/s})$$

【例题】 在无风天气飞行的飞机，把皮托管伸出机外测出压头差为23.9cmH_2O，求该飞机的速度。设$C=1$，空气重度为1.3kgf/m³。

【解答】 因为23.9cmH_2O=239kgf/m^2，所以$H=\frac{239}{1.3}$．将此值代入（1）式，得

$$v=1\times\sqrt{2\times9.8\times\frac{239}{1.3}}=60\ (m/s)=216\ (km/h)$$

【例题】 管内径为$D=50$cm的水管，用皮托管测出压头的平均值是100mmH_2O，皮托管系数$C=1$，求流量为多少（m^3/s）？

【解答】 将$A=\frac{\pi\times0.5^2}{4}$（m^2），$C=1$，$H=0.1$m代入（1）、（2）式，得

$$Q=A\cdot C\sqrt{2gH}=\frac{\pi\times0.5^2}{4}\times1\times\sqrt{2\times9.8\times0.1}$$

$$=0.27\ (m^3/s)$$

§5.15 射流对平板的作用力

(1) 固定平板的受力

$$F=\frac{\gamma Q}{g}v \ (\text{kgf}) \ (\text{垂直板}) \qquad (1)$$

$$F=\frac{\gamma Q}{g}v\sin\theta \ (\text{kgf}) \ (\text{倾斜板}) \qquad (2)$$

F：平板受力 (kgf)

γ：流体重度 (kgf/m^3)

Q：流体流量 (m^3/s)

v：流体速度(m/s)

θ：平板倾角

(2) 运动平板的受力

$$F=A\rho\ (v-u)^2 \qquad (3)$$

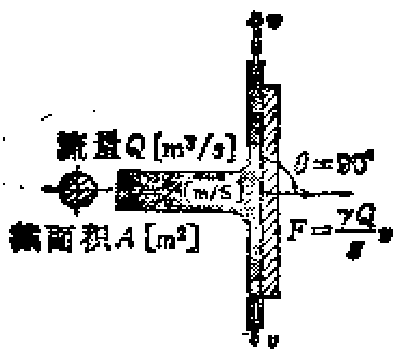


图5.15 固定平板和射流

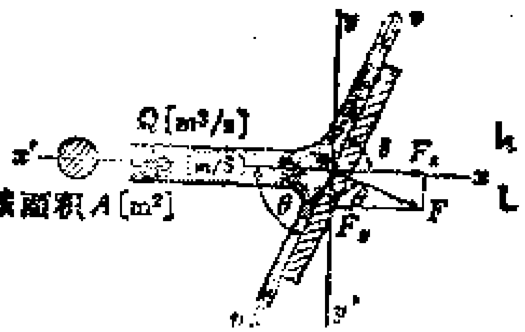


图5.16 射流以倾斜角θ碰撞固定平板

A：射流的截面积 (m^2)

ρ：射流的密度

v：射流的速度 (m/s)

u：平板的速度 (m/s)

【解说】 由喷头喷出的射流，由于压力能变成速度能，从而大大提高流速。设此速度为v (m/s)，流量为Q (m^3/s)。代入牛顿第二定律公式$F=ma$，即可得到 (1) 式。

【例题】 从内径为30mm的喷头，喷出速度为20m/s的水，冲击固定的

垂直板，求作用在平板上力的大小。

【解答】 将$Q=Av=20\times\pi\times0.03^2/4\ m^3/s$，$v=20m/s$，$\gamma=1000kgf/m^3$，$g=9.8m/s^2$代入（1）式，得

$$F=\frac{1000}{9.8}\times\frac{20\pi\times0.03^2}{4}\times20=28.9\ (kgf)$$

【例题】 从内径$d=40mm$的喷头中喷出流速为 50m/s的水，冲击倾斜30°的平板，求斜板受力的大小。

【解答】 将$Q=Av=50\pi\times0.04^2/4\ m^3/s$，$v=50m/s$，$\gamma=1000kgf/m^3$，$g=9.8m/s^2$，$\theta=30°$代入（2）式，得

$$F=\frac{1000}{9.8}\times\frac{50\times\pi\times0.04^2}{4}\times20\times\sin30°=64\ (kgf)$$

§5.16 射流对曲面板的作用力

(1) 固定曲面板受力

$$Fx=\frac{\gamma Q}{g}v\ (1-cos\theta) \qquad (1)$$

Fx：板受到沿水平方向的推力 (kgf)

γ：流体的重度 (kgf/s)

Q：流量 (m^3/s)，

v：速度 (m/s)

g：重力加速度 (m/s^2)

θ：射流进入方向和流出方向间夹角

(2) 运动的曲面板受力

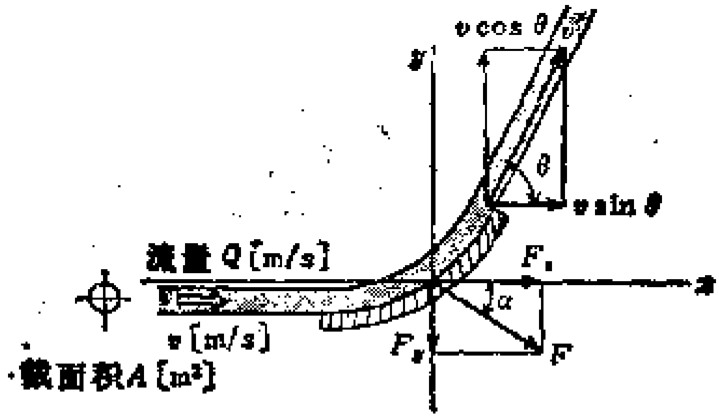


图5.17 射流冲击固定曲面板

$$F_x=\frac{\gamma A}{g}\ (v-u)^2\ (1-cos\theta)$$

$$=\frac{\gamma Q'}{g}\ (v-u)\quad(1-cos\theta) \qquad (kgf) \quad (2)$$

A：射流的截面积 (m^2)

u：曲面板的移动速度 (m/s)

Q'：作用在运动的曲面板上的流量 (m^3/s)

【解说】 珀尔顿冲击式水轮机的叶轮多为曲面，当$\theta=180°$时，受力最大。

【例题】 如图5.17所示，射流冲击固定曲面板，水的流速为 50m/s，流量为$0.08m^3/s$，最初喷射方向为 $\theta=60^\circ$，求曲面板在水平方向上受力大小。

【解答】 将$\gamma=1000kgf/m^3$，$Q=0.08m^3/s$，$g=9.8m/s^2$，$v=50m/s$，$\theta=60^\circ$代入（1）式，得

$$F_x=\frac{1000\times0.08}{9.8}\times50\times(1-\cos60^\circ)=204\ (\mathrm{kgf})$$

【例题】 在180°弯曲的曲面板上，以内径3cm的喷头喷射流速为20m/s的水，曲面板以10m/s的速度移动，求曲面板的受力大小。

【解答】 将 $\gamma=1000kg/m^3$，$A=\pi\times0.03^2/4m^2$，$v=20m/s$，$u=10m/s$，$\theta=180^\circ$代入（2）式，得

$$F_x=\frac{1000}{9.8}\times\frac{\pi\times0.03^2}{4}(20-10)^2(1-\cos180^\circ)$$

$$=14.4\ (\mathrm{kgf})$$

§5.17 流体中物体的阻力和升力

(1) 阻力

$$D=C_D\frac{\gamma}{2g}Av^2\ (\mathrm{kgf}) \qquad (1)$$

图5.18 阻力和推进力

D: 阻力 (kgf)

C_D: 阻力系数(参照附表24)

γ: 流体重度 ($\mathrm{kgf/m^3}$)

A: 垂直于流动方向的投影面积 ($\mathrm{m^2}$)

v: 流体的速度 (m/s)

(2) 升力

$$L=C_L\frac{\gamma}{2g}Sv^2\ (\mathrm{kgf}) \qquad (2)$$

L: 升力 (kgf)

C_L: 升力系数

S: 翼的投影面积 ($\mathrm{m^2}$)

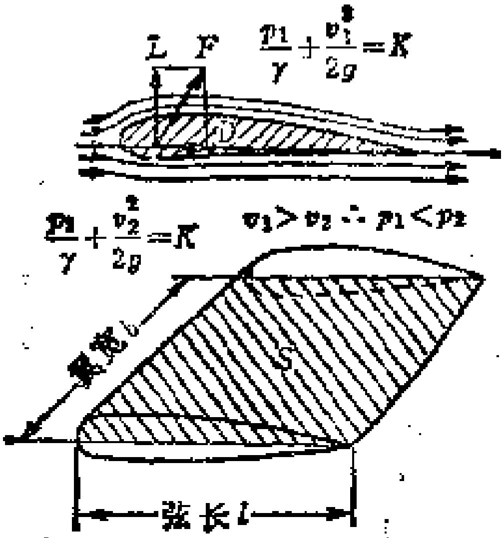


图5.19 升力

【解说】 (1)式是根据惯性定律 $F=\frac{W\cdot v^2}{2g}$而导出的。

【例题】 以180km/h行驶的汽车的投影面积为$2m^2$，求阻力D的大小。设阻力系数$C_D=0.23$，空气重度为$1.25kgf/m^3$。

【解答】 将$C_D=0.23$，$\gamma=1.25kgf/m^3$，$g=9.8m/s^2$，$A=2m^2$，$v=180km/h=50m/s$代入（1）式，得

$$D=0.23\times\frac{1.25}{2\times9.8}\times2\times50^2=73.3\ (kgf)$$

【例题】 飞机机翼的投影面积$s=20m^2$，速度为600km/h，求飞机的升力与阻力是多少？设升力系数$C_L=1.0$，阻力系数$C_D=0.22$，空气重度$1.25kgf/m^3$，翼在运动方向上的投影面积$4m^2$。

【解答】 将$C_D=0.22$，$C_L=1.0$，$\gamma=1.25\ kgf/m^3$，$S=20m^2$，$A=4m^2$，$v=600km/h=167m/s$代入（1）、（2）式，得

$$D=0.22\times\frac{1.25}{2\times9.8}\times4\times167^2=1565\ (kgf)$$

$$L=1\times\frac{1.25}{2\times9.8}\times20\times167^2=3557\ (kgf)$$

§5.18 泵的有效功率、轴功率、效率

(1) 扬程

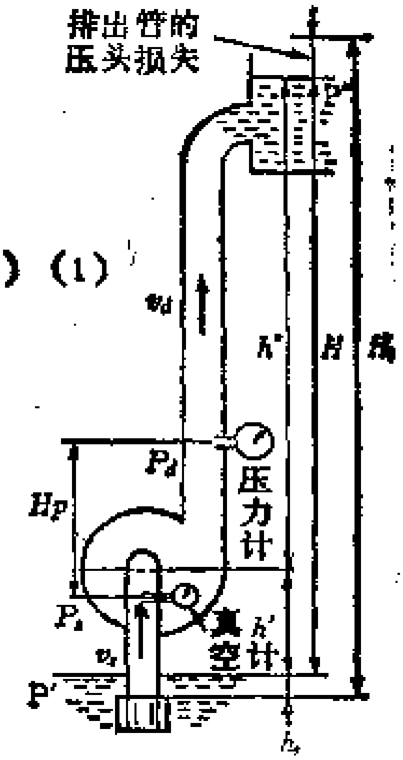


图5.20 泵

$$H_t = H + \frac{P'' - P'}{\gamma} + h$$

$$= \frac{p_d - p_s}{\gamma} + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} + H_p \text{(m)} \quad (1)$$

H_t：总扬程（m）

H：实际扬程（m）

P''：液面出口处的压力（kgf/m²）

P'：吸入液面处的压力（kgf/m²）

h：管路的总损失（m）

p_d：泵的出口压力（kgf/m²）

p_s：泵的入口压力（kgf/m²）

v_d：泵的出口平均流速（m/s）

v_s：泵的入口平均流速（m/s）

H_p：真空计与压力表之间的位差（m）

(2) 有效功率

$$L_W = \gamma Q H_t = \frac{\gamma Q H_t}{102} \text{(kW)} = \frac{\gamma Q H_t}{75} \text{(PS)} \quad (2)$$

(3) 轴功率

$$L = \frac{L_W}{\eta} \quad (\eta\text{，泵的效率，}\eta = 40\sim80\%)^* \quad (3)$$

(4) 泵的效率

$$\eta = \eta_h \cdot \eta_m \cdot \eta_v \quad (4)$$

（η_h：水力效率，η_m：机械效率，η_v：容积效率）

【解说】(1) 式中的 P'和 P''，通常认为两者相等，因而 (1) 式变成$H_t = H + h$。

---

* 实际上离心泵的效率可为65～80%——译者注。

【例题】 从深为6m的水井中将水用泵吸入距地面为15m高处的贮罐中。当管路压头总损失为3m，求总扬程是多少？设吸入管与排出管管径相等。

【解答】 设$P'=P''$，将$H=6+15=21$m，$h=3$m代入（1）式，得

$H_t=21+3=24$（m）

【例题】 总扬程为25m，流量为0.1m³/s，泵的效率为80%，求泵的轴功率。

【解答】 由（2）、（3）式，得

$$L=\frac{\gamma QH_t}{102\eta}=\frac{1000\times0.1\times25}{102\times0.8}=30.6\ (\mathrm{kW})$$

§5.19 离心泵

(1) 理论扬程

$$H_{th}=\frac{L}{\gamma Q}=\frac{1}{g}(u_2v_2\cos\alpha_2-u_1v_1\cos\alpha_1)\ (\mathrm{m})\quad(1)$$

$$H_{th\,max}=\frac{1}{g}u_2v_2\cos\alpha_2=\frac{1}{g}u_2(u_2-w_2\cos\beta_2)\ (\mathrm{m})\quad(2)$$

(当$\alpha_1=90°$时，扬程最大。)

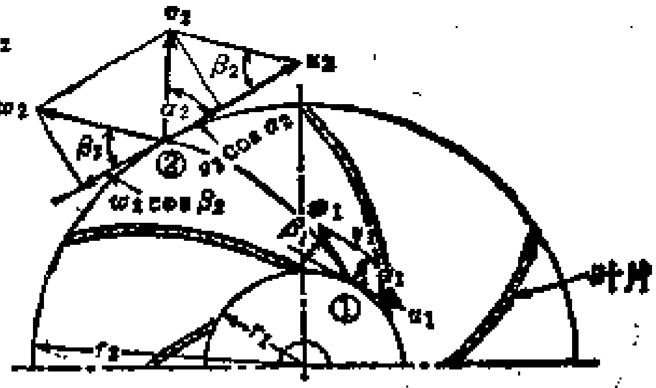


图5.21

H_{th}：理论扬程 (m)

L：叶轮给与水的功率 (kgf·m/s)

Q：排出量 (m^3/s)

u_1、u_2：叶轮入口和出口的圆周速度 (m/s)

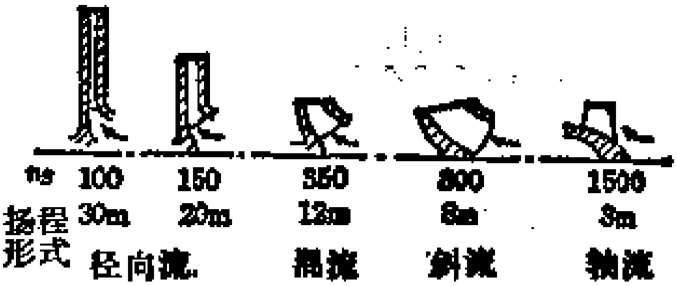


图5.22 叶轮的形状和比转数

v_1、v_2：水的流入、流出速度[1] (m/s)

w_1、w_2：在入口和出口处水相对于叶轮的速度 (m/s)

α_1、α_2：水的流入、流出角[2]

β_1、β_2：相对速度的流入、流出角[3]

(2) 比转数

$$n_s=n\frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}}$$

n_s：比转数

〔1〕水的绝对速度。

〔2〕水的绝对速度与圆周速度间夹角。

〔3〕水的相对速度与圆周速度反方向间夹角。

——译者注。

H：总扬程（m）

Q：排出量（m^3/min）

n：转速（rpm）

【例题】 离心泵叶轮转速为1200r/min，出口直径为600mm，在出口处水对叶轮的相对速度为 $w_2=12m/s$，角度 $\beta_2=30°$，求泵的理论扬程。设$\alpha_1=90°$。

【解答】 将 $u_2=r_2\times2\pi n/60=0.3\times2\pi\times1200/60=37.6m/s$，$w_2=12m/s$，$\beta_2=30°$代入（2）式，得

$$H_{thmax}=\frac{1}{g}u_2(u_2-w_2\cos\beta_2)$$

$$=\frac{1}{9.8}\times37.6(37.6-12\cos30°)\approx104\ (m)$$

§5.20 水力发电的输出功率和效率

(1) 理论输出功率

$$L_{th}=1000QH \quad (\mathrm{kgf\cdot m/s})$$

$$=\frac{1000QH}{102} \quad (\mathrm{kW}) \quad (1)$$

L_{th}：理论输出功率

Q：一台水轮机输入量 $(\mathrm{m^3/s})$

H：有效落差 (m)

(2) 实际输出功率

$$L=L_{th}\cdot\eta \quad (\eta<1) \quad (2)$$

L：实际输出功率

η：泵的效率

(3) 发电站的输出功率

$$N=L_{th}\cdot\eta\cdot\eta' \quad (3)$$

N：发电站的输出功率

η'：发电机的效率

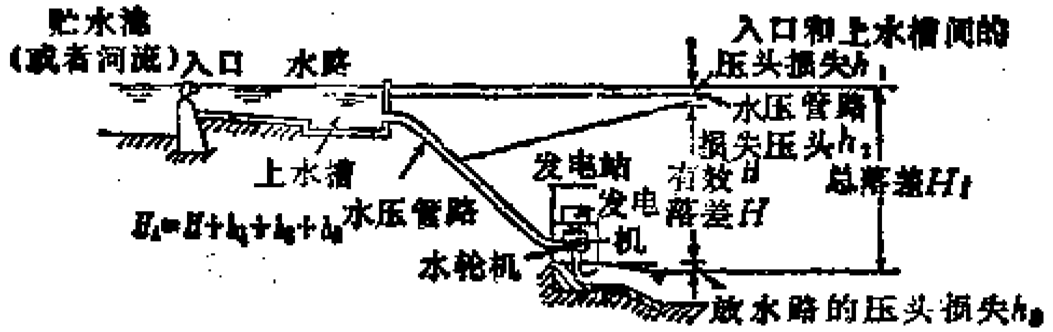


图5.23 水力发电的水路和落差

【解说】 水力发电就是利用水具有的势能使叶轮回转，从而将机械能变成电能。

【例题】 有效落差为 $H=200\mathrm{m}$，流量为 $Q=15\mathrm{m^3/s}$，实际输出功率为25000kW，求这台水轮机的理论输出功率和效率。

【解答】 将$Q=15\mathrm{m^3/s}$，$H=200\mathrm{m}$代入 (1) 式，得

$$L_{有}=\frac{1000QH}{102}=\frac{1000\times15\times200}{102}=29412\ (\mathrm{kW})$$

再将$L_{有}=29412\mathrm{kW}$，$L=25000\mathrm{kW}$代入（2）式，得

$$25000=29412\times\eta$$

$$\therefore\quad \eta=\frac{25000}{29412}=0.85=85\%$$

【例题】 某发电站水轮机的效率为90%，发电机的效率为95%，水轮机的流量为$30\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$，水的有效落差为100m，求发电站的输出功率。

【解答】 将$Q=30\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$，$H=100\mathrm{m}$，$\eta=0.9$，$\eta'=0.95$代入(1)、(3)式，得

$$N=\frac{1000QH}{102}\eta\cdot\eta'=\frac{1000\times30\times100}{102}\times0.9\times0.95$$

$$\approx25150\ (\mathrm{kW})$$

第六章 热 力 学

§6.1 摄氏和华氏

(1) 摄氏和华氏

$$t=\frac{5}{9}(t_F-32) \quad (^\circ C) \qquad (1)$$

$$t_F=\frac{9}{5}t+32 \quad (^\circ F) \qquad (2)$$

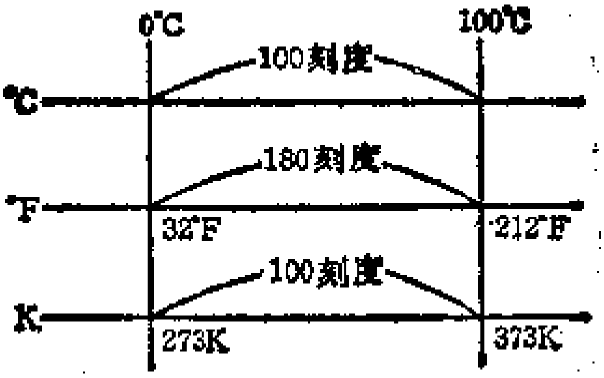


图6.1 摄氏和华氏

t：摄氏温度（°C）

t_F：华氏温度（°F）

(2) 摄氏绝对温度和华氏绝对温度

$$T=t+273.16\approx t+273 \qquad (3)$$

$$T_F=t_F+459.69\approx t_F+460 \qquad (4)$$

T：摄氏绝对温度（K，°C）

T_F：华氏绝对温度（R）

【解说】 把在1个大气压下的冰点和沸点分别定为 0°和100°，将该区间分成100度，称为摄氏温度，单位用°C 表示。另外，若分别将冰点和沸点定为32°和212°，将该区间分成180度，称为华氏温度，单位用°F 表示。

再者，在−273.16°C≈−273°C下，气体分子运动即停止。将这

个温度定为0°所标出的温度叫绝对温度。摄氏绝对温度的单位用 K 表示。华氏绝对温度的单位用 °R 表示。

【例题】 把100 °F换算成摄氏温度，应该是多少度？

【解答】 将 $t_F=100$ °F代入（1）式，得

$$t=\frac{5}{9}(t_F-32)=\frac{5}{9}(100-32)=37.8\ ^\circ\mathrm{C}$$

【例题】 40 °C是华氏多少度？

【解答】 将 $t=40$ °C代入（2）式，得

$$t_F=\frac{9}{5}t+32=\frac{9}{5}\times 40+32=104\ ^\circ\mathrm{F}$$

【例题】 200 °C，其绝对温度是多少 K？

【解答】 将 $t=200$ °C代入（3）式，得

$$T=t+273=200+273=473\mathrm{K}$$

§6.2 热量与比热

$$Q=G\times C\times t \qquad (1)$$

Q：热量（kcal），G：物体重量（kgf）

C：比热（kcal/kgf·°C）

t：要求上升的温度（°C）

表6.1 热量的单位换算表

热量				
J	kcal	Btu	kWh	PSh
1	2.388×10^{-4}	9.478×10^{-4}	2.778×10^{-7}	3.777×10^{-7}
4.187×10^{3}	1	3.968	1.163×10^{-3}	1.581×10^{-3}
1.056	0.252	1	2.931×10^{-4}	3.984×10^{-4}
3.600×10^{6}	859.8	3.412	1	1.360
2.648×10^{6}	632.5	2.510	0.7355	1

【解说】 温度是用来表示粒子热运动的激烈程度的。然而在此，侧重于从数量上来考虑粒子的热运动的能量，称粒子能量的总和为热量。并且把单位质量的物体每升高1°C所需的热量叫作比热。

【例题】 试将600kcal换算成了（焦耳）。

【解答】 根据换算表，得

$$1\text{kcal}=4.187\times10^{3}\text{J}\approx4190\text{J}$$

$$\therefore\quad 600\times4190=2.51\times10^{6}\text{J}$$

【例题】 把重 10kgf 的铁由 300°C升高到1000°C，这时铁的比热为0.187kcal/kgf·°C，求所需热量是多少？

【解答】 将$G=10$kgf，$C=0.187$kcal/kgf·°C，$t=1000-300=700$°C代入（1）式，得

$$Q=G\cdot C\cdot t=10\times0.187\times700=1309\ (\text{kcal})$$

【例题】 把重2kgf的铁加热到800℃后放在15℃的水中冷却，水温升高2℃。若忽略热损失，求水量是多少？（铁的比热是0.111 kcal/kgf℃）

【解答】利用（1）式，因为铁失去的热量和水获得的热量相等，有

$$2\times0.111\times(800-17)=G\times1\times(17-15)$$

$$\therefore\quad G=\frac{2\times0.111\times783}{1\times2}=86.9\ (\mathrm{kgf})$$

§6.3 功和热量

$$Q=AL=\frac{1}{427}L\ (\text{kcal}) \quad (1)$$

$$L=JQ=427Q\ (\text{kgf}\cdot\text{m}) \quad (2)$$

Q：热量（kcal），L：功（kgf·m）

A：功热当量（kcal/kgf·m）

J：热功当量（kgf·m/kcal）

【解说】 把（1）、（2）式称为热力学第一定律。根据这个定律"热是能的一种形式，功可以变成热，热也可以变成功。"。这是在19世纪后半叶，由德国的梅耶、赫姆霍兹和英国的焦耳所确定的。

【例题】 5m³的水，从100m的高处落下。假设全部转变成热。求热量的大小。

【解答】 将$F=5000$ kgf，$S=100$m代入§1.20的（1）式，求出功。

$$L=5000\times100=500000\text{kgf}\cdot\text{m}$$

再将$A=\frac{1}{427}$kcal/kgf·m，$L=500000$kgf·m代入（1）式，得

$$Q=\frac{1}{427}\times500000=1170\ (\text{kcal})$$

【例题】 汽车每小时消耗1.2kgf汽油。求汽车的输出功率是多少？设汽油的热量全部转变成功率。设汽油的发热量是10000kcal/kgf。

【解答】 利用（1）式，设给与的热量＝作功量，即可求得输出功率N(PS)。

发动机每小时作功$l=N\times75\times60\times60$kgf·m

汽油每小时产生的热量$Q=1.2\times10000$kcal

将以上二式代入（1）式，得

$$1.2\times10000=\frac{1}{427}\times N\times75\times60\times60$$

$$\therefore \quad N=\frac{427\times 1.2\times 10000}{75\times 60\times 60}=19\ (\text{PS})$$

【例题】 1kWh，可以得到多少热量？

【解答】 将$L=1\text{kW}\cdot\text{h}=102\times 60\times 60=367200\text{kgf}\cdot\text{m}$代入（1）式，得

$$Q=367200/427\approx 859.9\ (\text{kcal})$$

§6.4 内能和焓

(1) 内能

$$Q=U_2-U_1+AL \text{ (kcal)} \quad (1)$$

Q：外部供热 (kcal)

U_1：气体最初内能 (kcal)

U_2：气体最终内能 (kcal)

A：功热当量 (kcal/kgf·m)

L：功 (kgf·m)

(2) 焓

$$h=u+Apv \text{ (kcal/kgf)} \quad (2)$$

u：内能 (kcal)

h：焓 (kcal/kgf)，p 压力 (kgf/m²)

v：比容 (m³/kgf)

【解说】 如汽缸之类的密闭容器，当在其外部加热时，则汽缸内的气体温度上升，压力提高，不久，开始膨胀，对外作功。依此原理，而得到 (1) 式。另外，由 (2) 式可知，焓是1kgf气体的内能 u与气体对外作功Apv的和。

【例题】 从外部给与某汽缸中的气体25kcal 的热量。活塞对外部作功为10000kgf·m。试求此时内能的变化。

【解答】 将$L=10000$kgf·m, $Q=25$kcal代入(1) 式，求出U_2-U_1。

$$25=U_2-U_1+\frac{10000}{427}$$

$$\therefore \quad U_2-U_1=25-\frac{10000}{427}=1.6 \text{ (kcal)}$$

【例题】 1kgf重气体压力为0.2kgf/cm²，体积为2m³。将其压缩，压力升为8kgf/cm²，体积被压缩为0.1m³。如果内能不变化，则焓变为多少？

【解答】 在 (2) 式中，$p_1=0.2\ \text{kgf/cm}^2=0.2\times10^4\ \text{kgf/m}^2$，$v_1=2\text{m}^3$，$p_2=8\text{kgf/cm}^2=8\times10^4\text{kgf/m}^2$，$v_2=0.1\text{m}^3$，可求出$h_2-h_1$。

$$
\begin{aligned}
h_2-h_1&=u_2-u_1+A(p_2v_2-p_1v_1)\\
&=0+\frac{1}{427}(8\times10^4\times0.1-0.2\times10^4\times2)\\
&=9.37\ (\text{kcal})
\end{aligned}
$$

§6.5 理想气体状态方程式

$$pv = RT \qquad (1)$$

$$pV = GRT \qquad (2)$$

$$pV = nMRT = nR_0T \qquad (3)$$

$$R_0 = MR = 847.8 \ (\mathrm{kgf \cdot m/kmol \cdot K}) \qquad (4)$$

p：压力 $(\mathrm{kgf/m^2})$

v：比容 $(=\dfrac{V}{G}\ \mathrm{m^3/kgf})$

V：体积 $(\mathrm{m^3})$

R：气体常数 $(\mathrm{kgf \cdot m/kgf \cdot K})$

n：千克分子数 $(=G/M)$

M：气体分子量

T：绝对温度 (K)

G：重量 (kgf)

R_0：通用气体常数 $(\mathrm{kgf \cdot m/kmol K})$

【解说】 把上面的 (1)、(2) 式叫波义尔—查理定律，又称气体状态方程式。对于常用气体，如果不是温度很低或压力很高，也都是适用的。上式中R称为气体常数，因气体不同而取不同的值。如空气取值29.27，氧气取值为26.49。

【例题】 求压力$400\mathrm{kgf/m^2}$，温度30°C的空气，比容是多少？设空气的气体常数为29.27。

【解答】 将$p=400\mathrm{kgf/m^2}$，$R=29.27$，$T=30+273=303\mathrm{K}$代入 (1) 式，得

$$400 \times v = 29.27 \times 303$$

$$\therefore \quad v = \frac{29.27 \times 303}{400} = 22.17 \ (\mathrm{m^3/kgf})$$

【例题】 二氧化碳气体的分子量为 44.01，压力为$4\mathrm{kgf/cm^2}$，温度为100°C，视二氧化碳为理想气体。求其比容值。

【解答】 将$M=44.01$代入 (4) 式，求出二氧化碳气体常数。

$$44.01\times R=847.8$$

$$\therefore R=\frac{847.8}{44.01}=19.26\ (\mathrm{kgf\cdot m/kgf\cdot K})$$

将$p=4\ \mathrm{kgf/cm^2}=4\times10^4\mathrm{kgf/m^2}$，$R=19.26$，$T=373\mathrm{K}$代入(1)式，得

$$4\times10^4\times v=19.26\times373$$

$$\therefore\quad v=\frac{19.26\times373}{4\times10^4}=0.18\ (\mathrm{m^3/kgf})$$

【例题】 求20°C，在1 kgf/cm²下，容积为2 m³的氧气的重量。

【解答】 将 $p=10000\mathrm{kgf/m^2}$，$V=2\mathrm{m^3}$，$R=29.49$，$T=293\mathrm{K}$ 代入(2)式，得

$$G=\frac{pV}{RT}=\frac{10000\times2}{29.49\times293}=2.31\ (\mathrm{kgf})$$

§6.6 理想气体状态变化（一）

（1）定容过程

$$\frac{P_1}{T_1}=\frac{P_2}{T_2}=\frac{P}{T}=\text{定值} \qquad (1)$$

$$q=u_2-u_1=C_v(T_2-T_1) \qquad (2)$$

$$l=0 \qquad (3)$$

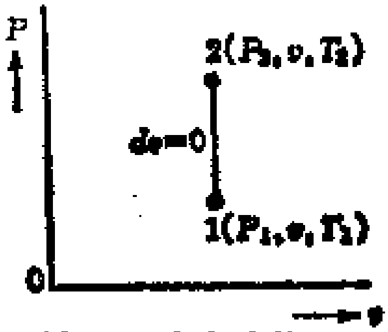


图6.2 定容过程

P_1、P_2、P：理想气体的压力 (kgf/m²)

T_1、T_2、T：理想气体的温度 (K)

q：所加的热量 (kcal/kgf)

u_1、u_2：内能 (kcal/kgf)

C_v：定容比热 (kcal/kgf·K)

l：功 (kgf·m)

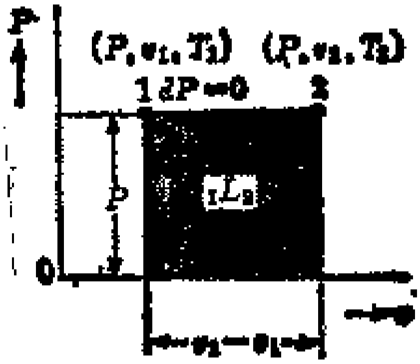


图6.3 定压过程

（2）定压过程

$$\frac{v_1}{T_1}=\frac{v_2}{T_2}=\frac{v}{T}=\text{定值} \qquad (4)$$

$$q=h_2-h_1=C_p(T_2-T_1) \qquad (5)$$

$$l=p(v_2-v_1)=R(T_2-T_1) \qquad (6)$$

v_1、v_2、v：比容 (m³/kgf)

h_1、h_2：焓

C_p：定压比热 (kcal/kgf·K)

【解说】 所谓定容过程是在比容保持不变的情况下进行变化，既不膨胀也不收缩，对外所作的功为零，给予的能全部转化为内能。

所谓定压过程是在压力保持不变的情况下进行状态变化。

【例题】 把10kgf 空气由10℃加热至200℃，保持体积一定不变。求内能的变化。设空气的定容比热$C_v=0.17$kcal/kgf·K。

【解答】 将$C_v=0.17$kcal/kgf·K，$T_2=573$K，$T_1=283$K代入(2)式，得

$$u_2-u_1=0.17(573-283)\times10=493\ (kcal)$$

【例题】 在压力为定值10kgf/cm²的条件下，温度为100°C的1kgf空气，其容积缩小到1/4。求此时的热量。设空气的定压比热为0.17kcal/kgf·K。

【解答】 将$T_1=273K$，$\frac{v_2}{v_1}=\frac{1}{4}$代入(4)式，求出$T_2$ 再将$C_p=0.17kcal/kgf·K$代入(5)式，求出热量。

$$T_2=273\times\frac{1}{4}=93.3K$$

$$q=0.17(93.3-373)=-47.5kcal/kgf$$

§6.7 理想气体状态变化（二）

（1）等温过程

$$p_1v_1=p_2v_2=pv=\text{定值} \quad (1)$$

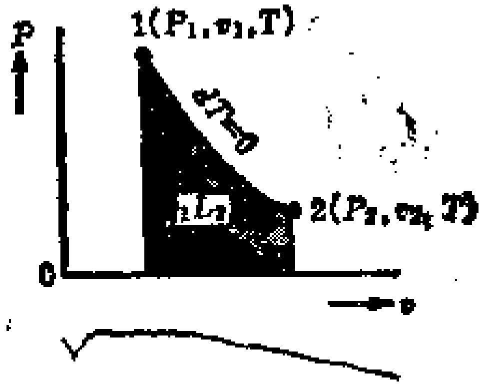


图6.4 等温过程

$$l=2.303\times RT\log\frac{v_2}{v_1}$$

$$=2.303\times RT\log\frac{p_1}{p_2} \quad (2)$$

$$q=Al \text{ (kcal/kgf)} \quad (3)$$

（2）绝热过程

$$p_1v_1^k=p_2v_2^k=pv^k=\text{定值} \quad (4)$$

$$Tv^{k-1}=\text{定值} \quad \frac{p^{\frac{k-1}{k}}}{T}=\text{定值} \quad (5)$$

$$l=\frac{1}{K-1}(p_1v_1-p_2v_2)$$

$$=\frac{R}{K-1}(T_1-T_2) \quad (6)$$

$$h_1-h_2=C_p(T_1-T_2)=kC_v(T_1-T_2) \quad (7)$$

K：绝热指数

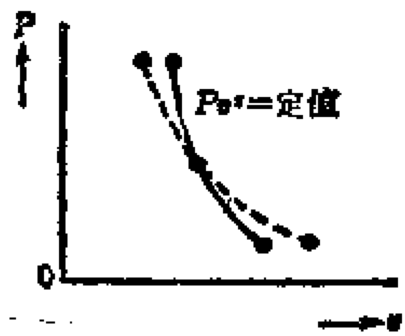


图6.5 绝热过程

【解说】 在温度保持一定的状态变化，叫等温过程。而与外界没有热量交换的状态变化，叫绝热过程。

【例题】 把1kgf空气从压力为$4kgf/cm^2$，温度为100°C经等温过程使其压力变成为$1kgf/cm^2$。求对外界作功和加给空气的热量。设空气的气体常数为29.27kgf·m/kgf·K。

【解答】 将$R=29.27kgf\cdot m/kgf\cdot K$，$T=373K$，$p_1=4kgf/cm^2$，$p_2=1\ kgf/cm^2$代入（2）式，求出绝对功。

$$l=2.303\times 29.27\times 373\log\frac{4}{1}=15140\ (kgf\cdot m)$$

再将$l=15140kgf\cdot m$代入（3）式，得

$$q=Al=\frac{15140}{427}=35.5\ (kcal/kgf)$$

§6.8 多变过程

$$p_1v_1^n=p_2v_2^n=pv^n=\text{定值} \quad (1)$$

$$Tv^{n-1}=\text{定值}\quad \frac{p^{\frac{n-1}{n}}}{T}=\text{定值} \quad (2)$$

$$l=\frac{1}{n-1}(p_1v_1-p_2v_2)=\frac{R}{n-1}(T_1-T_2) \quad (3)$$

$$q=(u_2-u_1)+Al$$

$$=C_v(T_2-T_1)+\frac{AR}{n-1}(T_1-T_2)(\text{kcal/kgf}) \quad (4)$$

n：多变指数

$n=\infty$　$v=$定值　定容过程

$n=0$　$p=$定值　定压过程

$n=1$　$T=$定值　等温过程

$n=k$　绝热过程

$n>0$　多变过程

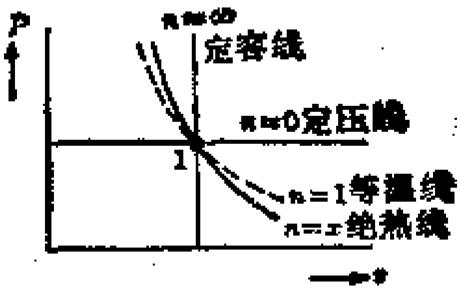


图6.6　多变过程

【解说】 所谓多变过程，就是在实际的内燃机的气缸中，混合气体被压缩和燃烧气体在膨胀时的变化。这是接近实际的适用的变化。随着n值的变化，而适用于各种各样的变化过程。

【例题】 某理想气体，开始时压力为1kgf/cm²，体积为4m³，由于多变过程变化至压力8kgf/cm²，体积1m³，求此时的多变指数。

【解答】 将$p_1=1\times10^4\text{kgf/m}^2$，$v_1=4\text{m}^3$，$p_2=8\times10^4\text{kgf/m}^2$，$v_2=1\text{m}^3$代入（1）式的变换式，求出n。

$$n=\frac{\log p_2/p_1}{\log v_1/v_2}=\frac{\log 8/1}{\log 4/1}=\frac{\log 8}{\log 4}=1.25$$

【例题】 把4kgf空气由压力为1kgf/cm²，温度为20°C按多变压缩至压力为10kgf/cm²，求所需压缩功。设$k=1.4$，$R=29.27\text{kgf}\cdot\text{m/kg}\cdot\text{K}$，$n=1.3$。

【解答】 将$p_1=1\times10^4\text{kgf/m}^2$，$p_2=10\times10^4\text{kgf/m}^2$，$T_1=293K$代入（2）式后求出$T_2=497.6\text{K}$。再将$n=1.3$，$R=29.27\text{kgf}\cdot\text{m/kg}\cdot\text{K}$代入（3）式，求得压缩功。

$$l=\frac{29.27}{1.3-1}(293-497.6)=-19960(\text{kgf}\cdot\text{m/kgf})$$

$$\therefore\quad L=-19960\times4=-79840\ (\text{kgf}\cdot\text{m})$$

§6.9 热力学第二定律

(1) 热机的热效率

$$\eta = \frac{AL}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \qquad (1)$$

η: 热效率

Q_1: 给予热机的热量 (kcal)

Q_2: 散失到外部的热量 (kcal)

A: 热机完成的有效功(kgf·m)

(2) 卡诺循环

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad (2)$$

$$\eta_c = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (3)$$

η_c: 卡诺循环的热效率

(3) 熵

$$S_2 - S_1 = GC \times 2.303 \log \frac{T_2}{T_1} \qquad (4)$$

$$\Delta s = \frac{q}{T} \qquad (5)$$

G: 流体重量 (kgf)

s: 熵 (kcal/kgfK)

C: 比热

【解说】 所谓热力学第二定律，即"高温物体和低温物体相接触时，热总是由高温物体传向低温物体，不能反向传递"。由此定律得出(1)式。

【例题】 输出功率95PS的发动机，每小时消耗 20kgf燃料．设燃料的发热量为 10400kcal/kgf，求热效率是多少？

【解答】 从§6.2的表6.1，把输出功率换算成为kcal，即 $Q = AL =$

95PSh。因为1PSh＝632.5kcal，所以$AL=95\times632.5=60088$kcal，$Q_1=10400\times20=208000$kcal。将这些值代入(1)式，得

$$\eta=\frac{AL}{Q_1}=\frac{60088}{208000}=0.29$$

【例题】 在卡诺循环中，求500℃的高温热源和 20℃ 的低温热源之间的热效率。

【解答】 将$T_1=773$K，$T_2=293$K代入(3)式，得

$$\eta_c=1-\frac{T_2}{T_1}=1-\frac{293}{773}=0.62$$

§6.10 汽车的排气量和压缩比

(1) 排气量

$$V_h=\frac{\pi D^2}{4}S\ (\mathrm{cm}^3) \qquad (1)$$

$$V=V_h\times Z=\frac{\pi D^2}{4}SZ\ (\mathrm{cm}^3) \qquad (2)$$

V_h：排气量（行程容积）(cm^3)

D：气缸内径（cm）

S：行程（cm）

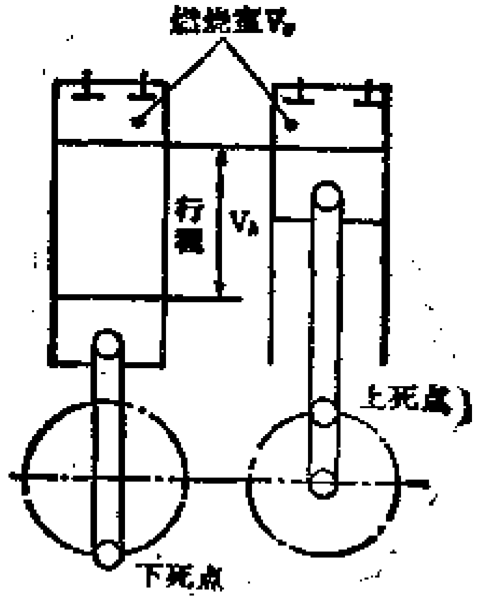


图6.7 发动机的行程

V：总排气量（cm^3）

Z：气缸个数

(2) 压缩比

$$\varepsilon=\frac{V_h+V_c}{V_c}=\frac{V_h}{V_c}+1 \qquad (3)$$

ε：压缩比

V_c：燃烧室容积（余隙容积）(cm^3)

【解说】 在汽车的产品目录中刊载的排气量单位是cc，它和(1)式的单

位 cm^3 相同。排气量等于活塞在一个行程中排除的燃烧气体的体积（行程容积）。因而，若气缸数为 Z，则总排气量（称此为汽车的排气量）为其 Z 倍。

压缩比是燃烧室容积和气缸容积的比值。汽油发动机为 6～10，柴油机为 15～22。

【例题】 求1600ml，4个气缸，压缩比是9的汽车发动机的行程容积和燃烧室容积。

【解答】 每个气缸的容积，即是行程容积 V_s。

$$V_s=\frac{1600}{4}=400\ (\mathrm{ml})$$

将 $\varepsilon=9$，$V_s=400\mathrm{cm}^3$ 代入（3）式，求出燃烧室容积。

$$9=\frac{400}{V_c}+1 \qquad \therefore\ V_c=\frac{400}{9-1}=50(\mathrm{cm}^3)$$

【例题】 燃烧室容积为 $40\mathrm{cm}^3$，行程容积为 $400\mathrm{cm}^3$，求发动机的压缩比是多少？

【解答】 将 $V_s=400\mathrm{cm}^3$，$V_c=40\mathrm{cm}^3$ 代入（3）式，得

$$\varepsilon=\frac{400}{40}+1=11$$

§6.11 内燃机性能（一）

（1）指示功率

$$N_i=\frac{P_{mi}\cdot V_h\cdot Z\cdot n\cdot a}{75\times100\times60}$$

$$=\frac{P_{mi}\cdot\frac{\pi}{4}D^2\cdot S\cdot Z\cdot n\cdot a}{75\times100\times60}(\mathrm{PS})$$

$$=\frac{P_{mi}\cdot V_h\cdot Z\cdot n\cdot a}{102\times100\times60}\ (\mathrm{kW})\qquad(1)$$

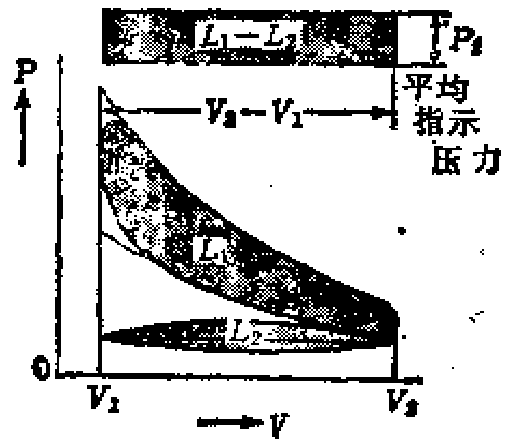


图6.3 四冲程汽油发动机示功图

N_i：指示功率

P_{mi}：平均指示压力(kgf/cm^2)

n：转速（r/min）

a：与完成一个循环时的转速成反比。

当四冲程时，$a=\frac{1}{2}$，二冲程时 $a=1$。

D：气缸内径(cm)

S：行程(cm)

Z：气缸个数

（2）轴功率

$N_e=\eta_m\cdot N_i$

N_e：轴功率

η_m：机械效率

【解说】 实用的内燃机的循环，如图6.8所示。图中画出压力和容积的线图，从这个图的形状求出的功率，叫指示功率。从发动机的输出轴所得到的功率叫轴功率。

【例题】 从汽车的产品目录中查得以下数据：指示平均有效压力为$10kgf/cm^2$，气缸（内径70mm×行程80mm)数为4个，转速为6000r/min，机械效率为84%。求此4个冲程发动机的轴功率。

【解答】 将$P_{mi}=10kgf/cm^2$，$D=7cm$，$S=8cm$，$Z=4$，$n=6000r/min$，$\eta_m=0.84$，$a=\frac{1}{2}$代入（1）、（2）式，得

$$N_e=\eta_m N_i=0.84\frac{10\times\frac{\pi}{4}\times7^2\times8\times4\times6000\times\frac{1}{2}}{102\times100\times60}$$

$$=50.7(kW)$$

【例题】 汽油机的指示功率为100PS，机械效率为80%，求此汽油机的轴功率。

【解答】 将$\eta_m=0.8$，$N_i=100PS$代入（2）式，得

$$N_e=\eta_m N_i=0.8\times100=80\ (PS)$$

§6.12 内燃机性能(二)

(1) 轴扭矩

$$N_e=\frac{2\pi nT}{60\times75}\quad(PS)=\frac{2\pi nT}{60\times102}\quad(\text{kW})\qquad(1)$$

N_e: 轴功率, n: 转速 (rpm)

T: 轴扭矩 (kgf·m)

(2) 实际热效率

$$N_e\text{的单位为PS时}\qquad \eta_e=\frac{75N_eA}{BH_l}\qquad(2)$$

$$N_e\text{ 的单位为 kW 时}\qquad \eta_e=\frac{102N_eA}{BH_l}\qquad(3)$$

η_e: 实际热效率

A: 功热当量=1/427 (kcal/kgf·m)

B: 燃料的消耗量 (kgf/s)

H_l: 燃料的发热量 (kcal/kgf)

(3) 燃料消耗率

$$f_e=\frac{B}{N_e}\qquad(\text{gf/PSh})\qquad(4)$$

f_e: 燃料消耗率 (gf/PSh)

B: 燃料消耗量 (gf/h)

【解说】 所谓轴扭矩,即是活塞在工作时带动轴旋转的力矩的平均值。燃料消耗率是轴功率为1PS每小时所消耗的燃料量。

【例题】 轴扭矩为16kgf·m,转速为3000r/min,求此汽车发动机的轴功率。

【解答】 将T=16kgf·m,n=3000r/min代入(1)式,得

$$N_e=\frac{2\pi nT}{60\times75}=\frac{2\times\pi\times3000\times16}{60\times75}=67\ (\text{PS})$$

【例题】 有一台60PS内燃机,连续运转1小时,消耗汽油12kgf量,

求此机的实际热效率。设汽油发热量为 10400kcal/kgf。

【解答】将 $N_e=60\mathrm{PS}$, $A=\frac{1}{427}=2.34\times10^{-3}$, $B=12/3600=3.33\times10^{-3}\mathrm{kgf/s}$, $H_g=10400\mathrm{kcal/kgf}$ 代入 (2) 式，得

$$\eta_e=\frac{75N_eA}{BH_g}=\frac{75\times60\times2.34\times10^{-3}}{3.33\times10^{-3}\times10400}=0.304=30.4\%$$

§6.13 蒸气的热性质

$$v=v'+x(v''-v') \quad (m^3/kgf) \qquad (1)$$

$$i=i'+x(i''-i')=i'+xr \quad (kcal/kgf) \qquad (2)$$

$$s=s'+x(s''-s')=s'+\frac{xr}{T}(kcal/kgf\cdot K) \qquad (3)$$

v、i、s：湿蒸气的比容、焓 (kcal/kgf) 和熵 (kcal/kgf·K)

v'、i'、s'：饱和水的比容、焓(kcal/kgf)和熵 (kcal/kgf·K)

v''、i''、s''：饱和蒸气的比容、焓 (kcal/kgf) 和熵 (kcal/kgf·K)

x：干燥度，r：蒸发潜热 (kcal/kgf)

T：饱和温度 (K)

【解说】 水在1大气压下经加热后，水温能上升到100℃，但不会超过100℃．而在17.4mmHg条件下，水只能上升至20℃，不会高于20℃。将100℃或20℃称为饱和温度，称此时的水为饱和水．

把饱和水继续加热，饱和水会逐渐变成蒸汽。水和蒸汽共存的状态叫湿蒸气。湿蒸气全部变成蒸汽后的状态叫干燥的饱和蒸汽。

在此，1kgf湿蒸汽中含有 x kgf 蒸汽，剩余 $(1-x)$ kgf 是液体时，x 称为湿蒸气的干燥度，而 $(1-x)$ 为湿度。

【例题】 干燥度为0.92的湿蒸汽，是呈什么状态的蒸汽？

【解答】 蒸汽状态是湿蒸汽1kgf中有0.92kgf蒸汽和0.08kgf的水。

【例题】 求温度250℃，干燥度0.8的湿蒸气的比容、焓和熵。设饱和水的$v'=0.0012512$ (m³/kgf)，$i'=259.23$ (kcal/kgf)，$s'=0.6671$ (kcal/kgf·K)；饱和蒸汽的$v''=0.05006$ (m³/kgf)，$i''=669.1$ (kcal/kgf)，$s''=1.45$ (kcal/kgf·K)。(通常利用附表25蒸汽表查数据)。蒸发潜热为409.9 (kcal/kgf)。

【解答】 将$v'=0.0012512$，$x=0.8$，$v''=0.05006$，$v'=259.23$，$s'=0.6671$，$v''=669.1$，$s''=1.45$，$r=409.9$代入 (1)、(2)、(3) 式，得

$$v=v'+x(v''-v')=0.0012512+0.8\times(0.05006-$$

$0.0012512)=0.0403$ (kcal/kgf)

$i=i'+xr=259.23+0.8\times409.9=587.15$ (kcal/kgf)

$s=s'+x(s''-s')=0.6671+0.8\times(1.45-0.6671)$

$=1.293$ (kcal/kgf·K)

§6.14 燃料的发热量

(1) 固体燃料和液体燃料的低发热量 $H_l=8100C+28600\left(H-\frac{O}{8}\right)+2200S-600W$ (kcal/kgf) (1)

H_l：低发热量 (kcal/kgf)

C：1kgf重燃料中含碳量 (kgf)

H：1kgf重燃料中含氢量 (kgf)

O：1kgf重燃料中含氧量 (kgf)

S：1kgf重燃料中含硫量 (kgf)

W：1kgf重燃料中含水量 (kgf)

(2) 固体燃料和液体燃料的高发热量 $H_h=H_l+600(9H+W)$

$$=8100C+34000\left(H-\frac{O}{8}\right)+2200S\ \text{(kcal/kgf)} \quad (2)$$

H_h：高发热量(kcal/kgf)

(3) 燃烧效率

$$\eta_e=\frac{H}{Hl} \quad (3)$$

η_e：燃烧效率，H：每单位燃料的实际发热量(kcal/kgf)

【解说】 所谓发热量，即是燃料完全燃烧时发出的热量。(1)式是按照某一燃料的化学分析的结果，在1kgf燃料中含有碳、氢、硫、氧、水分别为C、H、S、O和W kgf，所求得的发热量。

【例题】 煤的化学分析结果，在1kgf燃料中，所含成分的重量比如下：碳62%，氢4%，氧10%，硫3%，氮1%，水2%，灰分18%。煤在锅炉中的燃烧效率为90%。试求其发热量。

【解答】 将$C=0.62$kgf，$H=0.04$kgf，$O=0.1$kgf，$S=0.03$kgf，$W=0.02$kgf，$\eta_e=0.9$代入(1)、(3)式，得

$$H_l=\left\{8100\times0.62+28600\times\left(0.04-\frac{0.1}{8}\right)+2200\times0.03-600\times0.02\right\}\times0.9=5298\ \text{(kcal/kgf)}$$

【例题】　汽油的高发热量是 10400kcal/kgf，求此汽油的低发热量。在汽油中，按重量百分比含有水分1％、氢8％。

【解答】　将H_h=10400kcal，W=0.01kgf，H=0.08kgf代入（2）式，得

$$H_l = H_h - 600(9H - W) = 10400 - 600(9 \times 0.08 - 0.01)$$
$$= 9974 \ (\mathrm{kcal/kgf})$$

§6.15 锅炉的性能

(1) 锅炉的换算蒸发量

$$G_e=\frac{G(h_2-h_1)}{538.8}\quad(\text{kgf/h})\qquad(1)$$

G_e：换算蒸发量(又叫相当蒸发量)(kgf/h)

G：锅炉的实际蒸发量 (kgf/h)

h_2：蒸汽的焓 (kcal/kgf)

h_1：给水的焓(kcal/kgf)

(2) 传热面的蒸发率和传热面负荷

$$e=\frac{G(h_s-h_e)}{538.8S}\qquad(2)$$

$$\text{传热面负荷}=\frac{G(h_s-h_e)}{S}\qquad(3)$$

e：传热面蒸发率(kgf/m²·h)

h_s：饱和蒸汽的焓 (kcal/kgf)

h_e：给水的焓 (kcal/kgf)

S：锅炉本体的传热面积(m²)

(3) 锅炉效率

$$\eta=\frac{G(h_2-h_1)}{G_f H_l}\qquad(4)$$

η：锅炉效率

G_f：燃料的供给量 (kgf/h)

【解说】 锅炉的蒸发量是用每小时的蒸发量来表示，而锅炉的性能是用换算蒸发量来表示。换算蒸发量是折合成由100℃的饱和水产生100℃的干燥饱和蒸汽的结果。此时的蒸发热是 538.8kcal/kgf。

【例题】 锅炉给水温度20℃压力15kgf/cm²，每小时产生蒸汽3000kgf，蒸汽温度为400℃。若该锅炉每小时烧重油400kgf，求锅炉的效率是多少？设重油的低发热量为10000kcal/kgf，20℃饱和水的焓为

20.23kcal/kgf，过热蒸汽的焓为 777.9kcal/kgf。

【解答】 将$G=3000$kgf/h，$h_2=777.9$kcal/kgf，$h_1=20.23$ kcal/kgf，$G_f=400$kgf/h，$H_l=10000$kcal/kgf代入(4)式，得

$$\eta=\frac{G(h_2-h_1)}{G_f H_l}=\frac{3000\times(777.9-20.03)}{400\times10000}=0.568=56.8\%$$

§6.16　蒸气透平的性能

(1) 蒸气透平的理论输出功率

$$N=\frac{G_s h_{ad}}{A}=\frac{G_s(h_0-h_1)}{A}\quad (\text{kgf·m/s})\ (1)$$

N：理论输出功率 (kgf·m/s)

G_s：蒸气的供应量 (kgf/s)

A：功热当量$=1/427$ (kcal/kgf·m)

h_{ad}：绝热热降 (kcal/kgf)

(2) 透平输出功率

$$N_e=\frac{G_s\eta h_{ad}}{102A}\quad (\text{kW})\qquad (2)$$

N_e：输出功率 (kW)，η：透平效率

(3) 透平效率

$$\eta=\frac{Al_e}{h_{ad}}=\frac{AG_s l_e}{G_s h_{ad}}\qquad (3)$$

η：透平效率

(4) 蒸气消耗率

$$W=\frac{3600G_s}{N_e}\qquad (4)$$

W：蒸气消耗率 (kgf/kWh)

【解说】 蒸汽透平的性能是通过输出功率、效率、蒸汽消耗率等等而表现出来的.

【例题】蒸汽透平每小时接受2000kgf的蒸汽。蒸汽压力为30kgf/cm²、温度为 300℃。透平使蒸汽膨胀至 10kgf/cm²，蒸汽透平的效率为92%，求此透平的输出功率是多少？设此时绝热热降为 $h_{ad}=55.8$ kcal/kgf。

【解答】 绝热热降可利用图6.9的蒸汽线图. 因此，$h_{ad}=h_0-h_1$，将 $G_s=2000/3600$kgf/s，$\eta=0.92$，$h_{ad}=55.8$kcal/kgf代入 (2)式，

得

$$N_e=\frac{\frac{2000}{3600}\times 0.92\times 55.8}{102\times\frac{1}{427}}=119\ (\mathrm{kW})$$

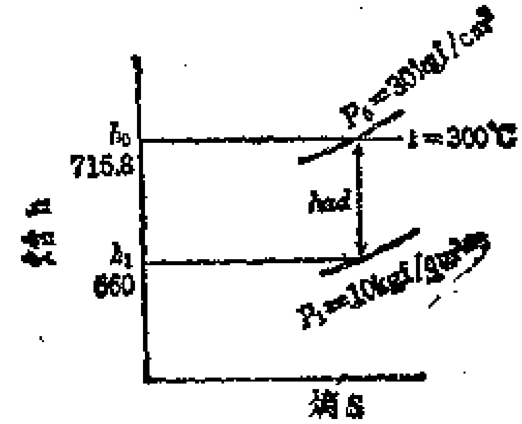


图6.9 蒸汽线图

国际单位制（SI）

1．SI 单位制的重要性

计量单位本来就有地区性。在某一地区内，必须统一处理事物的数量，因而产生了计量单位。因此，在日本国内进行物资交流时，最好是使用国内的单位（度量衡）；可是随着贸易的发展，国际单位制就变得日益重要了。即

(1) 世界各国都采用SI单位制。

(2) 和以前的单位制比较，既合理又方便。

因此，日本国也决定采用 SI单位制。世界的主要国家，也正在按着国际标准 ISO1000"国际单位制的使用方法"把计量单位按 SI 标准化。

2．关于SI单位制

SI (Système International d'Unitès，英文 International System of Units) 基本单位是对一个量规定一个单位，定义明确，因为在现实中能实现高精度，所以是合理的。用SI 列出的七个基本单位和两个辅助单位实行乘除而得出的单位叫导出单位。几乎所有的物理量，用基本单位、辅助单位、导出单位都可以表达出来的。另外，有几个单位并不包含在SI单位制中。由于实用上的重要性，它们与SI制并用。例如，时间的单位：日、时、分；体积单位：升等。

3．SI单位的10的整数倍

基本单位、辅助单位和导出单位，统称为SI 单位。虽然就其整体而言保持了它的连续性，但与常用的量相比较就不一定是很方便的单位了。因此，为了表达极大量和极小量，在SI制中规定了16个词冠，词冠附加在SI单位上，以构成10的整数倍的倍数。

4．单位换算

(1) 力的单位换算（$1N=0.101972kgf\doteq0.1kgf$）

(2) 压力单位换算（$1MP_a=10.1972kgf/cm^2\doteq10kgf/cm^2$）

(3) 应力单位换算（$1MP_a=0.101972kgf/mm^2\doteq0.1kgf/mm^2$）

表1　　金属材料的弹性模量　　单位：GPa

材　　料	弹性模量 E	剪切弹性模量 G
纯　铁	210	81
钢(C0.12～0.2%)	208	82
钢(C0.4～0.5%)	205	82
铸　铁	73～140	28～55
镍	200	72
钨	360	157
磷青铜	131	42
黄铜(七三)	96	41
黄铜(四六)	91	39
铝	71	26
锌	98	29

在机械设计中，求传动轴的直径时，设传递扭矩为T(kgf·mm)，许用扭转应力为τ(kgf/mm²)，则由§3.5·(3)式，得

$$d=\sqrt[3]{\frac{16}{\pi\tau_a}T}\ (\mathrm{mm})$$

在此，T的单位用$N\cdot m$，τ_a的单位用P_a，并整理即可得出下式。

$$d=\sqrt[3]{\frac{16\times10^7}{\pi\tau_a}T\times10^2}\approx8\sqrt[3]{\frac{10^7T}{\tau_a}}\quad(\mathrm{mm})$$

【例题】 为了使传动轴传递扭矩 200N·m (≈20000kgf·mm)，求轴的直径是多少？设许用扭转应力 $\tau_a=20$MPa (≈2kgf/mm²)。

【解答】 将$T=200$N·m，$\tau_a=20\times10^6$Pa代入上式，得

$$d=8\sqrt[3]{\frac{0^7T}{\tau_a}}=8\sqrt[3]{\frac{10^7\times200}{20\times10^6}}=37.13\ (\mathrm{mm})$$

从附表11查得 $d=40$mm。

表2

	kW	kgf·m/s	PS
功　率	1	1.01972×10^{2}	1.35962
	9.80665×10^{-3}	1	1.33333×10^{-2}
	7.355×10^{-1}	7.5×10	1

注　1W＝1J/s，PS：公制马力
　　1PS＝0.7355kW(计量法施行法)

(4) 功的单位是焦耳 ($1J=1N\cdot m=1\ Ws$) 功率的单位是瓦特 ($1W=1J/s=1kgf\cdot m^2/s^3$)

功是力F(N)与沿着力的方向移动的距离S(m)的乘积。功的单位在国际单位制中是N·m。但是，由于功和能量单位相同，所以使用焦耳(J)。J由基本单位导出，为$kg\cdot m^2/s^2$。

功率是单位时间内所作的功，在机械工业中叫动力。功率(动力)的单位是J/s，也叫瓦特(W)。即

$$1(J/S)=1(W)=1(N\cdot m/s)=1(kgf\cdot m^2/s^3)$$
$$=0.102(kgf\cdot m/s)$$

现在，如图 1所示，力W(N) 作用在钢板弹簧的端部，使其产生δ(m)的挠度。设弹簧常数为 k(N/m)，则其贮存能量U(J)为

$$U=\frac{1}{2}W\delta=\frac{1}{2}k\delta^2(J)\ \text{或者}U=\frac{W^2}{2k}(J)$$

【例题】 在图1的板弹簧中，当$\delta=5$mm时，其贮存能是多少？设弹簧材料的弹性模量$E=200$GPa。

【解答】 将$E=200\times10^9$ Pa、$l=100$ mm＝0.1m、$t=2$mm＝2×10^{-3}m、$b=12$mm＝12×10^{-3}m代入附表19的公式中，求出k。

$$k=\frac{W}{\delta}=\frac{3E}{l^3}\times\frac{bt^3}{12}=\frac{3\times2\times10^{11}}{(0.1)^3}$$

$$\times\frac{12\times10^{-3}\times(2\times10^{-3})^3}{12}=4.8\times10^3\ (N/m)$$

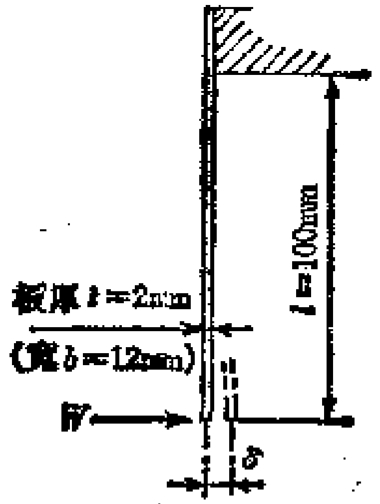


图1　板弹簧及其挠度

再将$\delta=5mm=5\times10^{-3}m$代入上式，得

$$U=\frac{1}{2}k\delta^2=\frac{1}{2}\times4.8\times10^3\times(5\times10^{-3})^2=6\times10^{-2}(J)$$

(5) 热量、能量的单位是焦耳(1J=2.38889 kcal≈2.4kcal)

热是能的一种形式，它具有作功的本领；所以能和功的单位均为焦耳(J)。

热量的单位，从来就是用卡(cal)、千卡(kcal)。但是，因为水的比热随着温度不同而变化，所以卡有几种，在使用上不方便。另外，规定只限于热量使用卡这一特殊单位，因而需要热功当量的概念。热功当量是具有相等的能量变化的功与热量的比值，是单位的换算率。在 SI 单位制中，由于功和热量均用焦耳来测定，因而没有热功当量(代号J)和功热当量(代号A)等概念，所以计算简单。

在工业各部门，必须把以前使用的以千卡(kcal)为单位的数据换算成千焦耳(kJ)。卡的种类有几种，即

用于计量法的千卡：1(kcal)=4.18605(kJ)

国际蒸汽表千卡：1($kcal_{IT}$)=4.1868(kJ)

15℃千卡：1($kcal_{15}$)=4.1855(kJ)

热化学千卡：1($kcal_{th}$)=4.184(kJ)

在表 3中列出了热量(计量法)和其他单位的换算率。

表3

	J	kW·h	kgf·m	kcal
功、能、	1	2.77777×10^{-7}	1.01972×10^{-1}	2.38889×10^{-4}
热 量	3.600×10^{6}	1	3.67098×10^{5}	8.6000×10^{2}
功、能、	9.80665	2.72407×10^{-6}	1	2.34270×10^{-3}
热 量	4.18605×10^{3}	1.16279×10^{-3}	4.26858×10^{2}	1

【例题】 使用热量计测定某种液体燃料的发热量。设坩埚中的燃料质量为 1.021 g，容器中水的质量为 2.5 kg，燃烧前燃料和水的温度为17.520℃，最高温度为20.895℃，这个装置的水当量为0.65kg，水的比热容为4.187kJ/(kg·K)。求该燃料的发热量是多少？

【解答】 (水和装置吸收的热量)＝(燃烧时产生的热量)＝$(2.5+0.65)\times4.187\times(20.895-17.520)=44.51$(kJ)

设该燃料发热量为H(MJ/kg)，则

$$H=\frac{44.51}{1.021\times10^{-3}}=43590(\mathrm{kJ/kg})=43.59(\mathrm{MJ/kg})$$

表4 燃料发热量举例

燃 料	高位发热量 (MJ/kg)	低位发热量 (MJ/kg)
固体燃料(15℃时 kJ/kg)		
无烟煤	34.600	33.900
沥青煤	33.500	32.460
焦 炭	30.750	30.500
液体燃料(15℃时 kJ/kg)		
100 辛烷汽油	47.300	44.000
苯	42.000	40.200
煤油	46.250	43.250
柴油	46.000	43.250
气体燃料(15℃、0.101325MPa 时 kJ/m³)		
煤气	20.000	17.850

续表

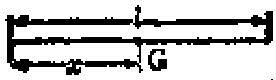
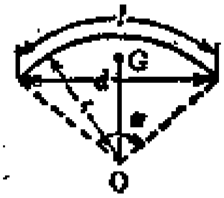
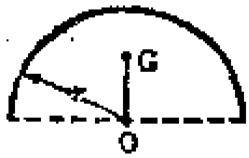
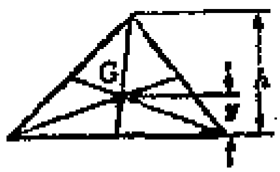
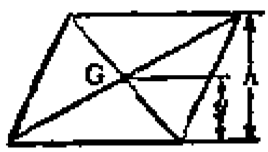
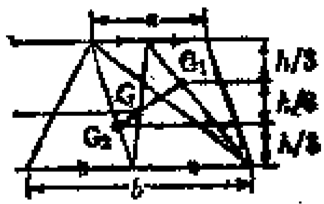
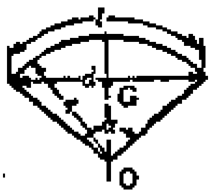
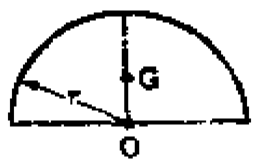
燃　　料	高位发热量(MJ/kg)	低位发热量(MJ/kg)
天然气	36.200	32.600
一氧化碳	11.790	11.790
氢气	11.850	10.000

附 表

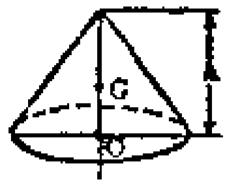
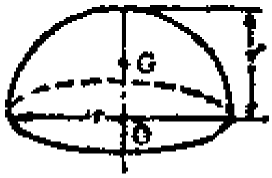
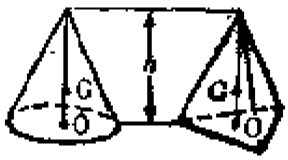
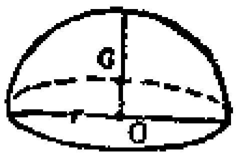
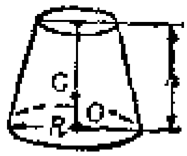
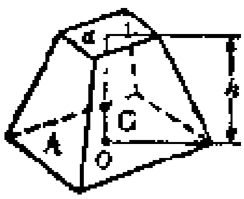
1. 简单图形的形心
2. 简单图形的惯性矩
3. 钢铁的许用应力
4. 截面惯性矩、截面模量、截面惯性半径
5. 公制标准螺纹的基本尺寸
6. 冷轧铆钉公称直径和铆钉孔直径
7. 热轧铆钉公称直径和铆钉孔直径
8. 焊接接头的许用应力和安全系数
9. 焊接接头的强度计算公式……列在书末
10. 焊接坡口形状举例……列在书末
11. 旋转轴的直径（4～500mm）
12. 轴承合金的性质
13. 轴颈轴承的最大许用压力速度系数和标准长径比
14. 三角皮带长度
15. 直齿轮的齿形系数（y）
16. 通用的速度系数（f_v）
17. 齿轮材料的许用弯曲应力σ_b值
18. 轮齿接触面应力系数k值
19. 弹簧形状、应力、载荷、挠度、弹性能量
20. k_1、k_2、k_3值
21. 管内流速的标准
22. 受内压薄壁管的接缝效率和许用应力
23. 配管用碳素钢管
24. 阻力系数C_D
25. 饱和蒸气表（温度标准）
26. 饱和蒸气表（压力标准）
27. 过热蒸气表

28. 希腊字母读法

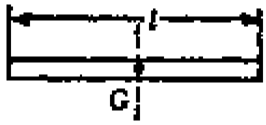
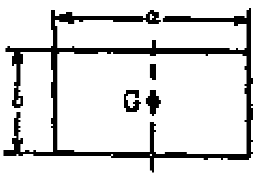
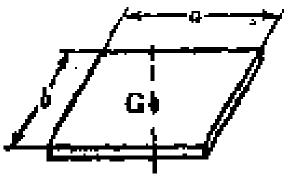
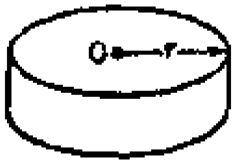
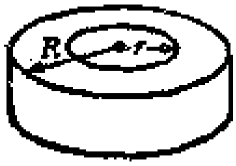
附表1　　简单图形的形心

名　称	图　形	形心位置
1. 线 线段		$x=\frac{l}{2}$
圆弧		中心线上 ①$OG=\frac{rd}{l}$ ②$OG=\frac{2r}{\alpha}\sin\frac{\alpha}{2}$
半圆弧		$OG=\frac{2r}{\pi}$
2. 平面 三角形		三中线的交点 $y=\frac{h}{3}$
平行四边形		对角线的交点 $y=\frac{h}{2}$
梯　形		$y_a=\frac{h}{3}\left(\frac{a+2b}{a+b}\right)$ $y_b=\frac{h}{3}\left(\frac{2a+b}{a+b}\right)$
扇　形		中心线上 ①$OG=\frac{2rd}{3l}$ ②$OG=\frac{4r}{3\alpha_1}\sin\frac{\alpha}{2}$
半　圆		$OG=\frac{4r}{3\pi}$

续表

名　称	图　形	形心位置
3、曲面		
圆锥面		$OG=\frac{h}{3}$
半球面		$OG=\frac{r}{2}$
4、立体		
圆锥 角锥		$OG=\frac{h}{4}$
半球		$OG=\frac{3}{8}r$
切头圆锥		$OG=\frac{h}{4}\cdot\frac{R^2+2Rr+3r^2}{R^2+Rr+r^2}$ $r=0$时，成为圆锥
切头角锥		设a、A为上、下底的面积 $OG=\frac{h}{4}\cdot\frac{A+2\sqrt{Aa}+3a}{A+\sqrt{Aa}+a}$ $a=0$时，成为角锥

附表2　　简单图形的转动惯量

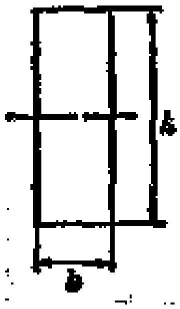
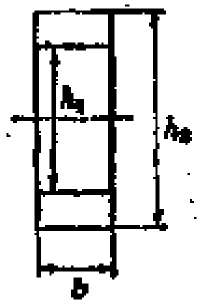
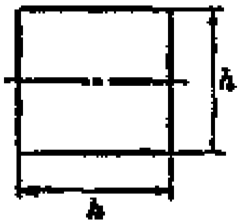
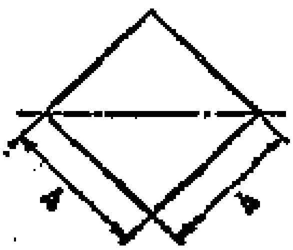
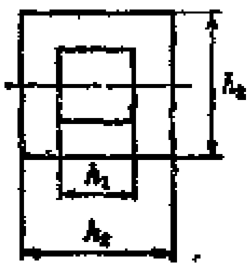
	旋转体的形状	旋转轴位置	I	K^2
细　杆		与杆垂直且通过重心	$\frac{W}{g}\cdot\frac{l^2}{12}$	$\frac{l^2}{12}$
		与杆垂直且通过杆的一端	$\frac{W}{g}\cdot\frac{l^2}{3}$	$\frac{l^2}{3}$
薄矩形板		与b边平行且通过重心	$\frac{W}{g}\cdot\frac{a^2}{12}$	$\frac{a^2}{12}$
(包括长方棒)		与板垂直且通过板的重心	$\frac{W}{g}\cdot\frac{a^2+b^2}{12}$	$\frac{a^2+b^2}{12}$
薄圆板		直径	$\frac{W}{g}\cdot\frac{r^2}{4}$	$\frac{r^2}{4}$
圆　柱 (包括薄圆板)		中心轴	$\frac{W}{g}\cdot\frac{r^2}{2}$	$\frac{r^2}{2}$
空心圆筒 (包括空心圆板)		中心轴	$\frac{W}{g}\cdot\frac{R^2+r^2}{2}$	$\frac{R^2+r^2}{2}$
实心球		直径	$\frac{W}{g}\cdot\frac{2r^2}{5}$	$\frac{2r^2}{5}$

附表3　　钢铁的许用应力 (kgf/cm²)

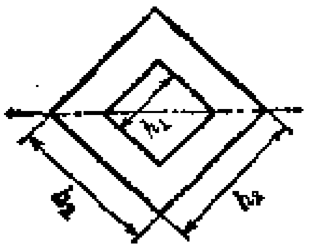
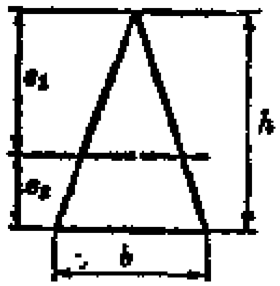
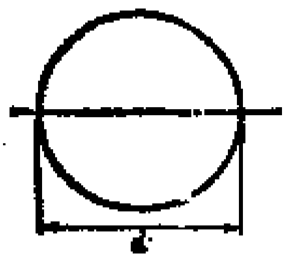
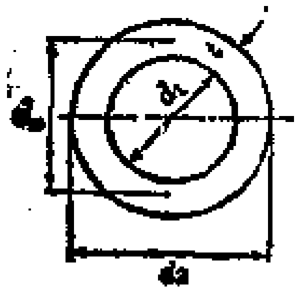
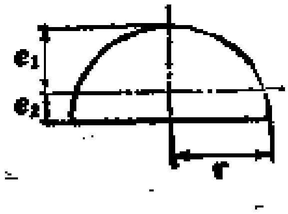
载荷		软钢	中硬钢	铸钢	铸铁
拉伸	Ⅰ	900～1500	1200～1800	600～1200	300
	Ⅱ	600～1000	800～1200	400～800	200
	Ⅲ	300～500	400～600	200～400	100
压缩	Ⅰ	900～1500	1200～1800	900～1500	900
	Ⅱ	600～1000	800～1200	600～1000	600
弯曲	Ⅰ	900～1500	1200～1800	750～1200	—
	Ⅱ	600～1000	800～1200	500～800	—
	Ⅲ	300～500	400～600	250～400	—
剪切	Ⅰ	720～1200	960～1440	480～960	300
	Ⅱ	480～800	640～960	320～640	200
	Ⅲ	240～400	320～480	160～320	100
扭转	Ⅰ	600～1200	900～1440	480～960	—
	Ⅱ	400～800	600～960	320～640	—
	Ⅲ	200～400	300～480	160～320	—

（注） 载荷指　Ⅰ：静载荷
　　　　　　　Ⅱ：重复载荷
　　　　　　　Ⅲ：交变载荷

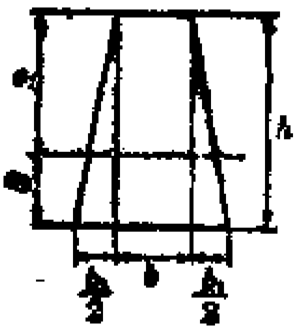
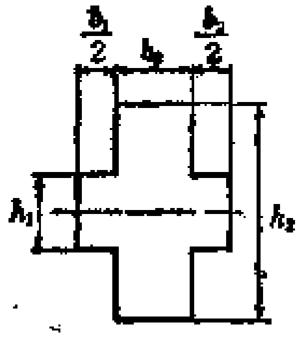
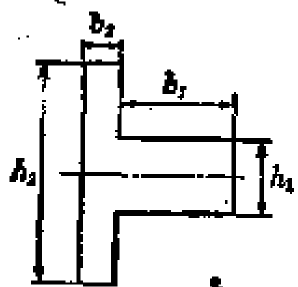
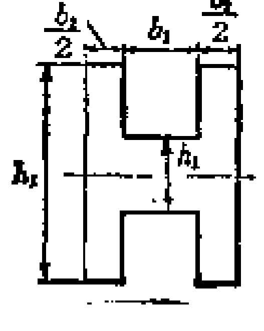
附表4 截面惯性矩、截面模量、截面惯性半径

截面形状	I	Z	i^2
	$\frac{1}{12}bh^3$	$\frac{1}{6}bh^2$	$\frac{1}{12}h^2$ ($i=0.289h$)
	$\frac{1}{12}b(h_2^3-h_1^3)$	$\frac{1}{6}\cdot\frac{b(h_2^3-h_1^3)}{h_2}$	$\frac{1}{12}\cdot\frac{h_2^3-h_1^3}{h_2-h_1}$
	$\frac{1}{12}h^4$	$\frac{1}{6}h^3$	$\frac{1}{12}h^2$
	$\frac{1}{12}h^4$	$\frac{\sqrt{2}}{12}h^3$ $=0.1179h^3$	$\frac{1}{12}h^2$
	$\frac{1}{12}(h_2^4-h_1^4)$	$\frac{1}{6}\cdot\frac{h_2^4-h_1^4}{h_2}$	$\frac{1}{12}(h_2^2+h_1^2)$

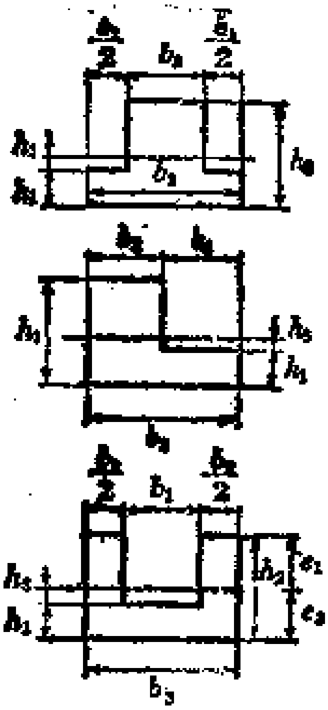
续表

截面形状	I	Z	k^2
	$\frac{1}{12}(h_2^4-h_1^4)$	$\frac{\sqrt{2}}{12}\cdot\frac{h_2^4-h_1^4}{h_2}$ $=0.1179\frac{h_2^4-h_1^4}{h_2}$	$\frac{1}{12}(h_2^2+h_1^2)$
	$\frac{1}{36}bh^3$	$e_1=\frac{2}{3}h,\ e_2=\frac{1}{3}h$ $Z_1=\frac{1}{24}bh^2,$ $Z_2=\frac{1}{12}bh^2$	$\frac{1}{18}h^2$ $(k=0.236h)$
	$\frac{\pi}{64}d^4$	$\frac{\pi}{32}d^3$	$\frac{1}{16}d^2$
	$\frac{\pi}{64}(d_2^4-d_1^4)$	$\frac{\pi}{32}\cdot\frac{d_2^4-d_1^4}{d_2}$ $\fallingdotseq 0.8d_m^2t$ $\left(\frac{t}{d_m}\right.$が小さいとき$\left.\right)$	$\frac{1}{16}(d_2^2+d_1^2)$
	$\left(\frac{\pi}{8}-\frac{8}{9\pi}\right)r^4$ $=0.1098r^4$	$e_1=0.5756r$ $e_2=0.4244r$ $Z_1=0.1908r^3$ $Z_2=0.2587r^3$	$\frac{9\pi^2-64}{36\pi^2}r^2$ $=0.0698r^2$ $(k=0.264r)$

续表

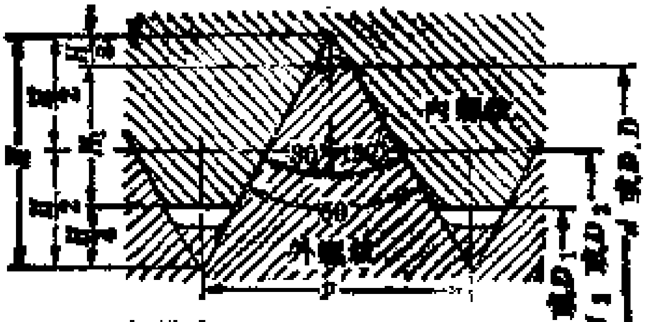
截面形状	I	Z	h^2
	$\dfrac{6b^2+6bb_1+b_1^2}{36\ (2b+b_1)}h^3$	$e_1=\dfrac{1}{3}\cdot\dfrac{3b+2b_1}{2b+b_1}h$ $e_2=h-e_1$ $Z_1=\dfrac{I}{e_1}$ $Z_2=$ $\dfrac{6b^2+6bb_1+b_1^2}{12(3b+2b_1)}h^2$	$\dfrac{6b^2+6bb_1+b_1^2}{18\ (2b+b_1)}h^2$
	$\dfrac{1}{12}\ (b_1h_1^3+b_2h_2^3)$	$\dfrac{1}{6}\cdot\dfrac{b_1h_1^3+b_2h_2^3}{h_2}$	$\dfrac{1}{12}\cdot\dfrac{b_1h_1^3+b_2h_2^3}{b_1h_1+b_2h_2}$

续表

截面形状	I	Z	k^2
	$\frac{1}{3}(b_3e_2^3-b_1h_3^3+b_2e_1^3)$	$e_2=\dfrac{b_1h_1^2+b_2h_2^2}{2(b_1h_1+b_2h_2)}$ $e_1=h_2-e_2$	$\frac{1}{3}\dfrac{b_3e_2^3-b_1h_3^3+b_2e_1^3}{b_1h_1+b_2h_2}$

附表5　公制普通螺纹的基本尺寸

(JIS B 0205-1968)



粗实线表示标准牙型

$H=0.866025p$

$H_1=0.541266p$

$d_2=d-0.649519p$

$d_1=d-1.082532p$

$D=d$

$D_2=d_2$

$D_1=d_1$

(单位：mm)

螺纹名称 1	螺纹名称 2	螺纹名称 3	螺距 p	工作高度 H_1	内螺纹 外径 D / 外螺纹 外径 d	内螺纹 中径 D_2 / 外螺纹 中径 d_2	内螺纹 内径 D_1 / 外螺纹 内径 d_1
M0.25			0.075	0.041	0.250	0.201	0.169
M0.3			0.08	0.043	0.300	0.248	0.213
	M0.35		0.09	0.049	0.350	0.292	0.253
M0.4			0.1	0.054	0.400	0.335	0.292
	M0.45		0.1	0.054	0.450	0.385	0.342
M0.5			0.125	0.068	0.500	0.419	0.365
	M0.55		0.125	0.068	0.550	0.469	0.415
M0.6			0.15	0.081	0.600	0.503	0.438
	M0.7		0.175	0.095	0.700	0.586	0.511
M0.8			0.2	0.108	0.800	0.670	0.583
	M0.9		0.225	0.122	0.900	0.754	0.656
M1			0.25	0.135	1.000	0.838	0.729
	M1.1		0.25	0.135	1.100	0.938	0.829
M1.2			0.25	0.135	1.200	1.038	0.929
	M1.4		0.3	0.162	1.400	1.205	1.075
M1.6			0.35	0.189	1.600	1.373	1.221
	M1.8		0.35	0.189	1.800	1.573	1.421

续表

螺纹名称			螺距 p	工作高度 H_1	内螺纹 外径 D	内螺纹 中径 D_2	内螺纹 内径 D_1
1	2	3			外螺纹 外径 d	外螺纹 中径 d_2	外螺纹 内径 d_1
$M2$			0.4	0.217	2.000	1.740	1.567
	$M2.2$		0.45	0.244	2.200	1.908	1.713
$M2.5$			0.45	0.244	2.500	2.208	2.013
$M3$			0.5	0.271	3.000	2.675	2.459
	$M3.5$		0.6	0.325	3.500	3.110	2.850
$M4$			0.7	0.379	4.000	3.545	3.242
	$M4.5$		0.75	0.406	4.500	4.013	3.688
$M5$			0.8	0.433	5.000	4.480	4.134
$M6$			1	0.541	6.000	5.350	4.917
		$M7$	1	0.541	7.000	6.350	5.917
$M8$			1.25	0.677	8.000	7.188	6.647
		$M9$	1.25	0.677	9.000	8.188	7.647
$M10$			1.5	0.812	10.000	9.026	8.376
		$M11$	1.5	0.812	11.000	10.026	9.376
$M12$			1.75	0.947	12.000	10.863	10.106
	$M14$		2	1.083	14.000	12.701	11.835
$M16$			2	1.083	16.000	14.701	13.835
	$M18$		2.5	1.353	18.000	16.376	15.294
$M20$			2.5	1.353	20.000	18.376	17.294
	$M22$		2.5	1.353	22.000	20.376	19.294
$M24$			3	1.624	24.000	22.051	20.752
	$M27$		3	1.624	27.000	25.051	23.752
$M30$			3.5	1.894	30.000	27.727	26.211
	$M33$		3.5	1.894	33.000	30.727	29.211
$M36$			4	2.165	36.000	33.402	31.670
	$M39$		4	2.165	39.000	36.402	34.670
$M42$			4.5	2.436	42.000	39.077	37.129
	$M45$		4.5	2.436	45.000	42.077	40.129
$M48$			5	2.706	48.000	44.752	42.587
	$M52$		5	2.706	52.000	48.752	46.587
$M56$			5.5	2.977	56.000	52.428	50.046
	$M60$		5.5	2.977	60.000	56.428	54.046
$M64$			6	3.248	64.000	60.103	57.505
	$M68$		6	3.248	68.000	64.103	61.505

注* 优先选择第一系列，根据需要选择第二系列，最后选用第三系列。

附表6 冷轧铆钉公称直径和铆钉孔直径

(JIS B 1213-1966) (mm)

公称直径d	1	1.2	1.4	1.7	2	2.3	2.6	3	4	5	6	8	10	12	14
孔的直径d_1	1.1	1.3	1.5	1.8	2.1	2.4	2.8	3.2	4.2	5.3	6.3	8.4	10.6	12.8	15

附表7 热轧铆钉公称直径和铆钉孔直径

(JIS B 1214-1966) (mm)

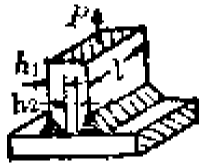
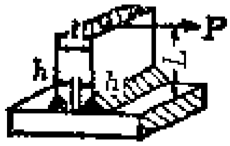
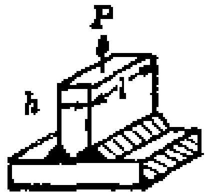
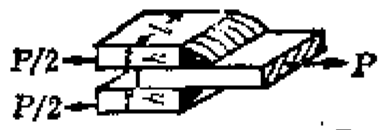
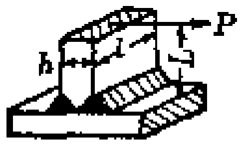
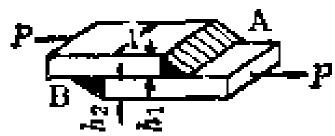
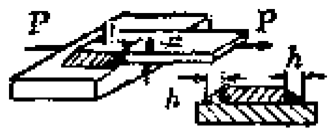
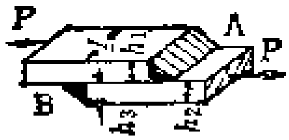
公称直径 d		10	12	14	16	18	20	22	24	27	30	33	36	40
孔的直径 d_1	一般用	11	13	15	17	19.6	21.5	23.5	25.5	28.5	32	35	38	42
	锅炉用	10.8	12.8	14.8	16.8	19.2	21.2	23.2	25.2	28.2	31.6	34.6	37.6	41.6

附表8 焊接接头的许用应力和安全系数

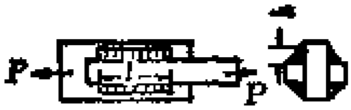
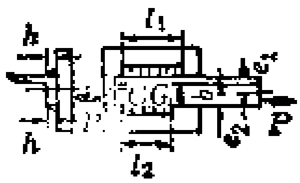
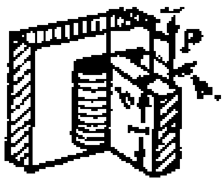
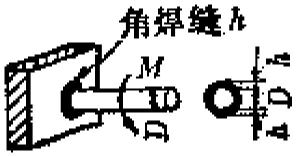
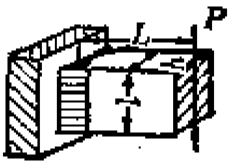
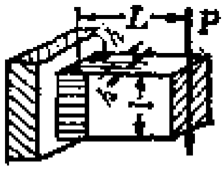
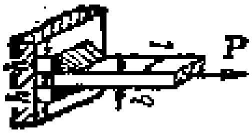
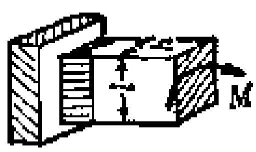
载荷种类		许用应力(kgf/mm²)	安全系数	备考
静载荷	拉伸、压缩	9～12	3.0	但是在下面的场合分别乘百分数 角焊：80% 现场焊接：90% 仰焊：90% 横焊：90% 立焊：90%
	剪　　切	7.2～10		
提升重载荷	拉伸、压缩	5.4～7	5.0	
	剪　　切	4.3～5.6		
振动载荷	拉伸、压缩	4.8～6	8～12	
	剪　　切	3.6～4.8		

(摘自《机械实用手册》日本机械学会编)

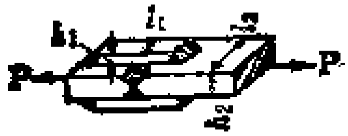
附表9 焊接接头强度计算公式

(1)  $\sigma=\dfrac{P}{hl}$	(7)  $\sigma=\dfrac{P}{(h_1+h_2)l}$
(2)  $\sigma=\dfrac{P}{(h_1+h_2)l}$	(8)  $\sigma=\dfrac{3tPL}{lh(3t^2-6th+4h^2)}$ $\tau=\dfrac{P}{2lh}$
(3)  $\sigma=\dfrac{P}{hl}$	(9)  $\sigma=\dfrac{0.707P}{hl}$
(4)  $\sigma=\dfrac{6PL}{lh^2}$, $\tau=\dfrac{P}{lh}$	(10)  $\sigma=\dfrac{1.414P}{(h_1+h_2)l}$
(5)  $\sigma=\dfrac{6M}{lh^2}$	(11)  $\tau=\dfrac{0.707P}{hl}$
(6)  $\sigma=\dfrac{3tM}{lh(3t^2-6th+4h^2)}$	(12)  角焊缝A $\sigma=\dfrac{1.414P}{(h_1+h_2)l}$ 角焊缝B $\sigma=\dfrac{1.414Ph_2}{h_3(h_1+h_3)l}$

续表

(13)  $\tau=\dfrac{0.354P}{hl}$	(18)  $\tau=\dfrac{0.707P}{hl}$, $\sigma=\dfrac{P}{hl(b+h)}\times\sqrt{2L^2+\dfrac{1}{2}(b+h)^2}$
(14)  $\tau=\dfrac{1.414P}{h(l_1+l_2)}$ $l_1=\dfrac{1.414Pe_2}{\tau hb}$, $l_2=\dfrac{1.414Pe_1}{\tau hb}$	(19)  $\tau=\dfrac{0.707P}{hL}$, $\sigma=\dfrac{4.24PL}{hl^2}$
(15)  $\tau=\dfrac{2.83M}{hD^2\pi}$	(20)  $\sigma=\dfrac{6PL}{hl^2}$, $\tau=\dfrac{P}{hl}$
(16)  $\sigma=\dfrac{4.24M}{h[b^2+3l(b+h)]}$	(21)  $\sigma=\dfrac{3PL}{hl^2}$, $\tau=\dfrac{P}{2hl}$
(17)  $\sigma=\dfrac{0.707P}{hl}$	(22)  $\tau=\dfrac{M(3l+1.8h)}{h^2l^2}$

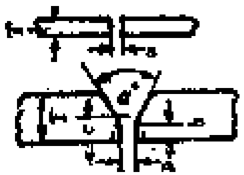
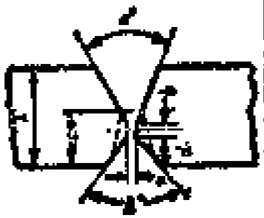
续表

(23)  $\tau=\dfrac{M}{2(t-h)(l-h)h}$	(24)  角焊 $\sigma=\dfrac{1.414P}{2h_1l_1+h_2l_2}$ 对焊 $\sigma=\dfrac{P}{2h_1l_1+h_2l_2}$

σ：正应力 kgf/cm²，τ：剪应力 kgf/cm²，T：扭转力 kgf，
M：弯 矩 kgf·cm，P：载 荷kgf，l：焊接长度 cm，
L：到载荷点距离cm，h：图示焊接处的尺寸cm。

附表10

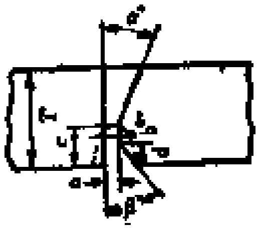
焊接坡口形状举例

		坡口形状		寸法 \ 板厚	2.3	3.2	4.5	6	8	9	10	12	14	15	16	19	20	22	25	28	32	36	38	40	45	50
对接接头	W_1		I形	a max	0	1.6	2.3																			
			V形	$\alpha^{\circ}{}^{+5^{\circ}}_{-2.5^{\circ}}$				60	60	60	60	60	60	60	60	60	60									
				a max				1.6	1.6	1.6	1.6	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3									
				b max				2	2	2	2	2	2	2	2	2	2									
				c min				4	4	4	4	4	4	5	5	5	5									
			X形	$\alpha^{\circ}{}^{+5^{\circ}}_{-2.5^{\circ}}$											60	60	60	60	50	50	50	50	60	50	50	60
				$\beta^{\circ}{}^{+5^{\circ}}_{-2.5^{\circ}}$											80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
				a max											2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
				b max											2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
				d											5	6	6	7	8	9	10	11	11	14	16	18
				c min											9	10	10	11	12	14	15	16	16	17	20	22

续表

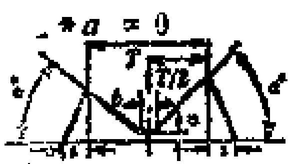
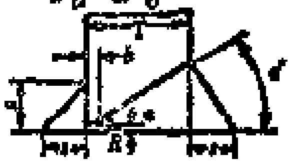
			板厚 / 寸法	2.3	3.2	4.5	6	8	9	10	12	14	15	16	19	20	22	25	28	32	36	38	40	45	50
	坡口形状																								
对接接头 W_2		U 形	±2.5								10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
			max								2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
			b ±0.5								2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
			R								4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
			c min								4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
		H 形	$\theta°$ ±2.5°														10	10	10	10	10	10	10	10	10
			a max														2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
			b' ±0.5														2	2	2	2	2	2	2	2	2
			R														5	5	5	5	6	6	6	6	6
			$\alpha°$														8	8	9	10	11	12	14	16	18
			c min														12	12	13	14	15	15	17	19	24

续表

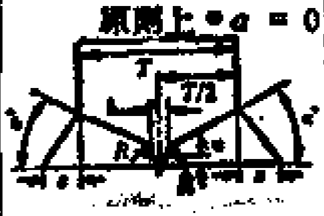
	坡口形状		板厚 寸法	2.3	3.2	4.5	6	8	9	10	12	14	15	16
单面对接接头 W_1		L形	$\alpha^{\circ}\pm2.5^{\circ}$				50	50	50	50	45	45	45	45
			a max				1.6	1.6	1.6	1.6	2.3	2.3	2.3	2.3
			b max				2	2	2	2	2	2	2	2
			c min				4	4	4	4	4	4	5	5
单面对接接头 W_2		K形	$\alpha^{\circ}\pm2.5^{\circ}$											45
			$\beta^{\circ}\pm2.5^{\circ}$											45
			a max											2.3
			b max											2
			d											5
			c min											10

	坡口形状		板厚 寸法	19	20	22	25	28	32	36	38	40	45	50
单面对接接头 W_1		L形	$\alpha^{\circ}\pm2.5^{\circ}$	45	45	40	40	40						
			a max	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3						
			b max	2	2	2	2	2						
			c min	5	5	5	5	5						
单面对接接头 W_2		K形	$\alpha^{\circ}\pm2.5^{\circ}$	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
			$\beta^{\circ}\pm2.5^{\circ}$	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
			a max	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
			b max	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
			d	6	6	7	7	8	10	11	11	14	16	18
			c min	11	11	12	12	13	15	16	16	17	19	24

续表

坡口形状		寸法＼板厚	2.3	3.2	4.5	6	8	9	10	12	14	15	16	19	20	22	25	28	32	36	38	40	45	50
T字接头 原则上 *a = 0 	L形	$\alpha^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$				45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	40					
		*a max				1.6	1.6	1.6	1.6	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3					
		b max				2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2					
		s min				5	5	5	6	6	7	7	8	9	10	11	12	14	16					
原则上 *a = 0 	K形	$\alpha^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$											45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
		*a max											2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
		b max											2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
		s min											5	5	6	6	6	7	8	9	9	10	11	12
原则上 *a = 0 	J形	$\alpha^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$								30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
		*a max								2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
		b ±2.6								2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		R								7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		s min								6	7	7	7	8	9	9	10	11	13	14	15	16	18	20

续表

坡口形状		板厚 寸法	2.3	3.2	4.5	6	8	9	10	12	14	15	16	19	20	22	25	28	32	36	38	40	45	50
T字接头		两面J形 $\alpha^{\circ} \pm 2.5^{\circ}$														30	30	30	30	30	30	30	30	30
		* a max														2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
		b ±0.5														2	2	2	2	2	2	2	2	2
		R														7	7	7	8	8	8	8	8	8
		s min														6	6	7	8	9	9	10	11	17

附表11 旋转轴的直径（4～500mm）（JIS B 0901-1961）（单位：mm）

4	(7)	10	20	40	(70)	100	200	400
	7.1		22*	42*	71	105	(220)	(420)
			22.4		(75)	(110)	224	(440)
4.5	8	11.2		45	80	112	(240)	450
		(12)	25		(85)	(120)	250	(460)
	9				90		(260)	(480)
5		12.5	28	50	(95)	125	280	500
			(30)			130	(300)	
		14	31.5	(55)		140	315	
5.6		(15)		56		(150)	(320)	
(6)		16	(35)	(60)		160	(340)	
		(17)	35.5			(170)	355	
6.3		18		63		180	(360)	
				(65)		(190)	380	

注：一般轴选用没有记号的尺寸。带星号*尺寸的22、42用于安装三相感应电动机的皮带轮。（ ）的尺寸用于转动轴。

设选择表中的数值时，最好选取标准数的R40系列的数值。

附表12　　轴承合金的性质

轴承材料	大约硬度 H_B	最大许用压力 p (kgf/mm²)	最高许用温度 (℃)
铸铁	160～180	0.3～0.6	150
锡青铜	50～100	0.7～2	200
黄铜	80～150	0.7～2	200
磷青铜	100～200	1.5～6	260
Sn系列白合金	20～30	0.6～1	150
Pb系列白合金	15～20	0.6～0.8	150
碱硬化铅	22～26	0.8～1.0	250
镉合金	30～40	1～1.4	250
铅铜	20～30	1～1.8	170
铅青铜	40～80	2～3.2	220～250
铝合金	45～80	2.8	100～150
银（带有覆盖薄层）	25	＞300	250
三层合金(覆盖白合金)		＜300	100～150

（选自"机械工程学手册"修订第5版日本机械学会编）

附表13　　轴颈轴承的最大许用压力速度系数和标准长径比

机械名称	轴承	最大许用压力速度系数 pv (kgf/mm²·m/s)	标准长径比 $k=l/d$
汽车航空发动机	主轴轴承	20	0.8～1.8
	曲柄销	40	0.7～1.4
	活塞销	—	1.5～2.2
气体、重油发动机（4周期）	主轴轴承	1.5～2	0.6～2.0
	曲柄销	2～3	0.6～1.5
	活塞销	—	1.5～2.0
同上（2周期）	主轴轴承	1～1.5	0.6～2.0
	曲柄销	1.5～2	0.6～1.5
	活塞销	—	1.5～2.0
船舶蒸气内燃机	主轴轴承	0.4～0.7	0.7～1.5
	曲柄销	0.7～1	0.7～1.2
	活塞销	—	1.2～1.7
陆地用蒸气内燃机（低速）	主轴轴承	0.2～0.3	1.0～2.0
	曲柄销	0.5～1	0.9～1.3
	活塞销	—	1.2～1.5
同上（高速）	主轴轴承	0.3～0.4	1.5～2.2
	曲柄销	0.4～0.8	0.9～2.0
	活塞销	—	1.3～1.7
往复泵压缩机	主轴轴承	0.2～0.3	1.0～3.0
	曲柄销	0.3～0.4	0.9～1.5
	活塞销	—	1.5～2.0
蒸气机车	传动轴	1～1.5	1.6～1.8
	曲柄销	2～2.5	0.7～1.1
	活塞销	—	0.8～1.3
车辆	轴	1～1.5	1.8～2.0

续表

机械名称	轴　　承	最大许用压力速度系数 pv ($kgf/mm^2 \cdot m/s$)	标准长径比 $k=l/d$
蒸气透平机	主轴轴承	4	1.0～2.0
发电机、电动机、离心泵	转动体轴承	0.2～0.3	1.0～2.0
传动轴	轻载荷	0.1～0.2	2.0～3.0
	自动调心		2.5～4.0
	重载荷		2.0～3.0
机　床	主轴轴承	0.05～0.1	1.0～4.0
冲孔机	主轴轴承	—	1.0～2.0
切断机	曲柄销		1.0～2.0
轧钢机	主轴轴承	5～8	1.1～1.5
减速齿轮	轴　承	0.5～1	2.0～4.0

(选自《机械工程学手册》修订第6版，日本机械学会编)

附表14 三角皮带长度 (JIS K 6323—1973)

(单位：mm)

公称号码	长度(有效周长)	型号 ABC	公称号码	长度(有效周长)	型号 ABCD	公称号码	长度(有效周长)	型号 ABCDE
17	432	○	60	1 524	○○○	110	2 794	○○○○
18	457	○	61	1 549	○○	112	2 845	○○○
19	483	○	62	1 575	○○○	115	2 921	○○○○
20	508	○	63	1 600	○○	118	2 997	○○○
21	533	○	64	1 626	○○	120	3 048	○○○○
22	560	○	65	1 651	○○○	122	3 099	○○○
23	584	○	66	1 676	○○	125	3 175	○○○○
24	610	○	67	1 702	○○	128	3 251	○○○
25	635	○○	68	1 727	○○○	130	3 302	○○○○
26	660	○○	69	1 753	○○	132	3 353	○○
27	686	○○	70	1 778	○○○	135	3 429	○○○○
28	711	○○	71	1 803	○○	138	3 505	○○
29	737	○○	72	1 829	○○○	140	3 556	○○○○
30	762	○○	73	1 854	○○	142	3 607	○○
31	787	○○	74	1 880	○○	145	3 683	○○○○
32	813	○○	75	1 905	○○○	148	3 759	○○
33	838	○○	76	1 930	○○	150	3 810	○○○○
34	864	○○	77	1 956	○○	155	3 937	○○○○
35	889	○○	78	1 981	○○○	160	4 064	○○○○
36	914	○○	79	2 007	○○	165	4 191	○○○○
37	940	○○	80	2 032	○○○	170	4 318	○○○○
38	965	○○	81	2 057	○○	175	4 445	○○○
39	991	○○	82	2 083	○○○	180	4 572	○○○○○
40	1 016	○○○	83	2 108	○○	185	4 699	○○○
41	1 041	○○	84	2 134	○○	190	4 826	○○○
42	1 067	○○○	85	2 159	○○○	195	4 953	○○
43	1 092	○○	86	2 184	○○	200	5 080	○○
44	1 118	○○	87	2 210	○○	205	5 207	○
45	1 143	○○○	88	2 235	○○○	210	5 334	○○○○
46	1 168	○○	89	2 261	○○	215	5 461	○
47	1 194	○○	90	2 286	○○○○	220	5 588	○○
48	1 219	○○○	91	2 311	○○	225	5 715	○
49	1 245	○○	92	2 337	○○○	230	5 842	○○
50	1 270	○○○	93	2 362	○○	240	6 096	○○○
51	1 295	○○	94	2 388	○○	250	6 350	○○
52	1 321	○○○	95	2 413	○○○○	260	6 604	○○
53	1 346	○○	96	2 438	○○	270	6 858	○○○
54	1 372	○○○	97	2 464	○○	280	7 112	○
55	1 397	○○○	98	2 489	○○○	300	7 620	○○
56	1 422	○○	99	2 515	○○	310	7 874	○
57	1 448	○○	100	2 540	○○○○	330	8 382	○○
58	1 473	○○○	102	2 591	○○○	360	9 144	○○
59	1 499	○○	105	2 667	○○○○	390	9 906	○
			108	2 743	○○○	420	10 668	○

附表15　　直齿轮的齿形系数（y）

齿数	标准齿	短　齿	内　齿　轮	
			小齿轮	齿　圈
12	0.078	0.099	0.104	—
13	0.082	0.103	0.104	—
14	0.088	0.108	0.105	—
15	0.092	0.111	0.105	—
16	0.094	0.115	0.106	—
17	0.096	0.117	0.109	—
18	0.098	0.120	0.111	—
19	0.100	0.123	0.114	—
20	0.102	0.125	0.116	—
21	0.104	0.127	0.118	—
22	0.105	0.129	0.119	—
24	0.107	0.132	0.122	—
26	0.110	0.135	0.125	—
28	0.121	0.137	0.127	0.220
30	0.114	0.139	0.129	0.216
34	0.118	0.142	0.132	0.210
38	0.122	0.145	0.135	0.205
43	0.126	0.147	0.137	0.200
50	0.130	0.151	0.139	0.195
60	0.134	0.154	0.142	0.190
75	0.138	0.158	0.144	0.185
100	0.142	0.161	0.147	0.180
150	0.146	0.165	0.149	0.175
300	0.150	0.170	0.152	0.170
齿　条	0.154	0.175	—	—

齿数不在表内的，从前后齿数的值用比例求出。设压力角$\alpha=20°$。短齿齿顶高$h_k=0.8m$。

（选自"机械设计"日本机械学会编）

附表16 通用速度系数（f_v）

f_v计算公式	应用范围	应用实例
$f_v=\frac{3.05}{3.05+v}$	不进行机械加工或只进行粗加工的齿轮 $v=0.5\sim10$m/s(低速用)	起重机、卷扬机、水泥碾磨机等
$f_v=\frac{6.1}{6.1+v}$	进行机械加工的齿轮 $v=5\sim20$m/s（中速用）	电动机及其它一般机械
$f_v=\frac{5.55}{5.55\times\sqrt{v}}$	进行精密切削加工、剃齿、磨削加工、研磨加工的齿轮 $v=20\sim50$m/s(高速用)	蒸气透平、鼓风机及其它高速机械
$f_v=\frac{0.75}{1+v}+0.25$	非金属材料的齿轮	用于制造机械

载荷系数f_w，根据载荷状态如下取值。
静载荷时，$f_w=0.80$
动载荷时，$f_w=0.74$
冲击载荷时，$f_w=0.67$

附表17　　齿轮材料的许用弯曲应力σ_0值

种　类	材料符号	拉伸强度 σ (kgf/mm²)	硬　度 H_B	许用弯曲应力 σ_0 (kgf/mm²)
铸　铁	FC 15	>15	140～160	7
	FC 20	>20	160～180	9
	FC 25	>25	180～240	11
	FC 30	>30	190～240	13
铸　钢	SC 42	>42	140	12
	SC 46	>46	160	19
	SC 49	>49	190	20
机械、结构用碳素钢	S 25C	>45	123～183	21
	S 35C	>52	149～207	26
	S 45C	>58	167～229	30
表面渗碳硬化处理钢	S 15 CK	>50	油淬火400	30
	SNC21	>80	水淬火600	35～40
	SNC22	>100		40～55
镍 铬 钢	SNC 1	>75	212～255	35～40
	SNC 2	>85	248～302	40～60
	SNC 3	>95	269～321	40～60
锡青铜		>18	85	>5
高强度黄铜		35～60	—	10～20
磷青铜(铸件)		19～30	70～100	5～7
镍青铜(铸件)		64～90	180～260	20～30
苯酚树脂等				3～5

（选自《机械工程学手册》修订第4版，日本机械学会编）

附表18　　齿轮接触面应力系数k值

齿轮材料		k(kgf/mm²)		齿轮材料		k(kgf/mm²)	
小齿轮	大齿轮	压力角α		小齿轮	大齿轮	压力角α	
(硬度H_B)	(硬度H_B)	14.5°	20°	(硬度H_B)	(硬度H_B)	14.5°	20°
钢(150)	钢(150)	0.020	0.027	钢(400)	钢(400)	0.234	0.311
钢(200)	钢(150)	0.029	0.039	钢(500)	钢(400)	0.248	0.329
钢(250)	钢(150)	0.040	0.053	钢(600)	钢(400)	0.262	0.348
钢(200)	钢(200)	0.040	0.053	钢(500)	钢(500)	0.293	0.389
钢(250)	钢(200)	0.052	0.069	钢(600)	钢(600)	0.430	0.569
钢(300)	钢(200)	0.066	0.086	钢(150)	铸铁	0.030	0.039
钢(250)	钢(250)	0.066	0.088	钢(200)	铸铁	0.059	0.079
钢(300)	钢(250)	0.081	0.107	钢(250)	铸铁	0.098	0.130
钢(350)	钢(250)	0.098	0.130	钢(300)	铸铁	0.105	0.139
钢(300)	钢(300)	0.098	0.130	钢(150)	磷青铜	0.031	0.041
钢(350)	钢(300)	0.116	0.154	钢(200)	磷青铜	0.062	0.082
钢(400)	钢(300)	0.127	0.168	钢(250)	磷青铜	0.092	0.135
钢(350)	钢(350)	0.137	0.182	铸铁	铸铁	0.132	0.188
钢(400)	钢(350)	0.159	0.210	镍铸铁	镍铸铁	0.140	0.186
钢(500)	钢(350)	0.170	0.226	镍铸铁	磷青铜	0.118	0.156

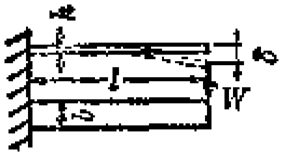
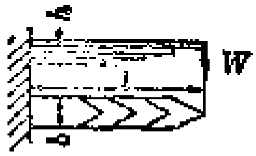
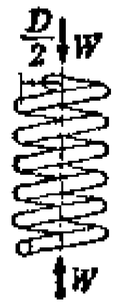
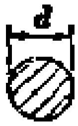
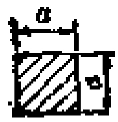
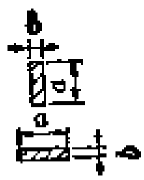
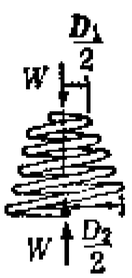
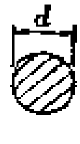
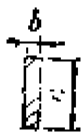
(选自《机械工程学手册》修订第4版，日本机械学会编)

附表20 k_1、k_2、k_3值

a/b	k_1	k_2	k_3
1.0	0.2082	0.1406	0.1541
1.2	0.2189	0.1661	0.1443
1.4	0.2273	0.1869	0.1383
1.6	0.2343	0.2037	0.1348
1.8	0.2404	0.2174	0.1329
2.0	0.2459	0.2287	0.1322
2.5	0.2576	2.494	0.1330
3.0	0.2672	0.2633	0.1356
4.0	0.2817	0.2808	0.1413
5.0	0.2915	0.2913	0.1458
6.0	0.2984	0.2983	0.1492
8.0	0.3017	0.3071	0.1536
10.0	0.3123	0.3123	0.1562
∞	0.3333	0.3333	0.1667

（选自《机械工程学手册》修订第 5 版，日本机械学会编）

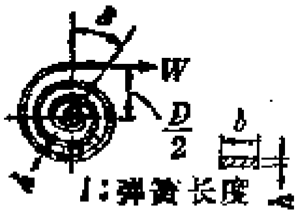
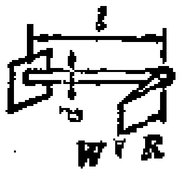
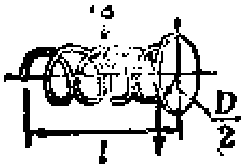
附表19 弹簧形状、应力、

弹簧种类	弹簧形状		最大应力 σ, τ
平板弹簧	 弹簧形状		$\sigma=\frac{6lW}{bh^2}=\frac{3hE\delta}{2l^2}$
叠板弹簧			$\sigma=\frac{6lW}{nbh^2}=\frac{hE\delta}{l^2}$
圆筒形螺旋弹簧			$\tau=\frac{8DW}{\pi d^3}=\frac{dG\delta}{\pi nD^2}$
			$\tau=\frac{DW}{0.4164a^3}=\frac{aG\delta}{0.74\pi nD^2}$
			$\tau=\frac{DW}{2k_1ab^2}=\frac{2k_2bG\delta}{\pi k_1nD^2}$
圆锥形螺旋弹簧			$\tau=\frac{8D_2W}{\pi d^3}$ $=\frac{4D_2dG\delta}{\pi n(D_1+D_2)\cdot(D_1^2+D_2^2)}$
			$\tau=\frac{D_2W}{2k_1ab^2}$

载荷、挠度、弹性能量

载荷 W	挠度 δ	单位体积能量 u
$\frac{bh^3E}{4l^3\delta}\delta=\frac{bh^2\sigma}{6l}$	$\frac{4l^3W}{bh^3E}=\frac{2l^2\sigma}{3hE}$	$\frac{1}{18}\cdot\frac{\sigma^2}{E}$
$\frac{nbh^3E}{6l^3}\delta=\frac{nbh^2\sigma}{6l}$	$\frac{6l^3W}{nbh^3E}=\frac{l^2\sigma}{hE}$	$\frac{1}{6}\cdot\frac{\sigma^2}{E}$
$\frac{d^4G}{8nD^3}\delta=\frac{\pi d^3\tau}{8D}$	$\frac{8nD^3W}{d^4G}=\frac{\pi nD^2\tau}{dG}$	$\frac{1}{4}\cdot\frac{\tau^2}{G}$
$\frac{a^4G}{5.575\pi nD^3}\delta=\frac{0.4164a^3\tau}{D}$	$\frac{5.575\pi D^3W}{a^4G}=\frac{2.3\pi nD^2\tau}{aG}$	$0.164\frac{\tau^2}{G}$
$\frac{4k_2ab^3G}{\pi nD^3}\delta=\frac{2k_1ab^2\tau}{D}$	$\frac{\pi nD^3W}{4k_2ab^3G}=\frac{\pi k_1nD^2\tau}{2k_2bG}$	$k_3\frac{\tau^2}{G}$
$\frac{d^4G\delta}{2n\cdot(D_1+D_2)\cdot(D_1^2+D_2^2)}=\frac{\pi d^3\tau}{8D_2}$	$\frac{2n(D_1+D_2)\cdot(D_1^2+D_2^2)W}{d_4G}=\frac{\pi n(D_1^2+D_2^2)\tau}{2D_2dG}$	$\frac{D_1^2+D_2^2}{8D_2^2}\cdot\frac{\tau^2}{G}$
$\frac{16k_2ab^3G\delta}{\pi n(D_1+D_2)\cdot(D_1^2+D_2^2)}$	$\frac{\pi k_1n(D_1+D_2)}{8k_2bGD_2}\times\frac{(D_1^2+D_2^2)\tau}{1}$	$\frac{k_3(D_1^2+D_2^2)}{4D_2^2G}\times\frac{\tau^2}{1}$

续表

弹簧种类	弹簧形状	最大应力 σ, τ
盘簧		$\sigma=\frac{3DW}{bh^2}=\frac{hE\delta}{lD}$
扭转弹簧		$\tau=\frac{16RW}{\pi d^3}=\frac{1}{2}\cdot\frac{dG\delta}{lR}$
扭转螺旋弹簧		$\sigma=\frac{16DW}{\pi d^3}=\frac{dE\delta}{lD}$

（选自《机械实用手册》修订第4版。

k_1、k_2、k_3 参照附表20

σ：最大弯曲应力（kgf/mm²）

E：弹性模量（kgf/mm²）

W：载　　荷（kgf）

n：叠板弹簧的块数或螺旋弹簧的有效圈数

u：每单位体积内的能量（kgf·mm/mm³）

载荷 W	挠度 δ	单位体积能量 u
$\frac{bh^2\sigma}{3D}$	$\frac{3lD^2W}{bh^3E}=\frac{lD\sigma}{hE}$	$\frac{1}{6}\cdot\frac{\sigma^2}{E}$
$\frac{\pi d^3\tau}{16R}$	$\frac{32lR^2W}{\pi d^4G}=\frac{2lR\tau}{dG}$	$\frac{1}{4}\cdot\frac{\tau^2}{G}$
$\frac{\pi d^3\sigma}{16D}$	$\frac{16lD^2W}{\pi d^4E}=\frac{lD\sigma}{dE}$	$\frac{1}{8}\cdot\frac{\sigma^2}{E}$

日本机械学会编）

τ：最大剪应力（kgf/mm^2）

G：剪切弹性模量（kgf/mm^2）

δ：挠度（mm）

附表21 管内流速的标准

流体	用途	平均流速(m/s)
水	上水道（长距离）	0.5～0.7
	上水道（中距离）	～1
	上水道（近距离） 直径3～15mm	～0.5
	直径～30mm	～1
	直径>100mm	～2
	水利发电厂引水管	2～5
	消防用软管	8～10
	低压离心式水泵吸入排出管	1～2
	高压离心式水泵吸入排出管	2～4
	往复泵吸入管（长管）	<0.7
	往复泵吸入管（短管）	1
	往复泵排出管（长管）	1
	往复泵排出管（短管）	2
	暖气热水管	0.1～3
空气	低压空气管	10～16
	高压空气管	20～25
	小型气体石油内燃机吸入管	15～20
	大型气体石油内燃机吸入管	20～25
	小型柴油机吸入管	14～20
	大型柴油机吸入管	20～30
蒸气	饱和蒸气管	12～14
	过热蒸气管	40～80
煤气	煤气管	2～6

（选自《机械设计》日本机械学会编）

附表22 受内压薄壁管的接缝效率和许用应力

材质		接缝效率 η	拉伸强度 σ (kgf/mm²)	许用应力 σ_a (kgf/mm²)	腐蚀和磨损常数 c (mm)	
普通铸铁				2.5	$t\leqslant55$	$6\left(1-\frac{Dp}{27500}\right)$
高级铸铁				4	$t\geqslant55$	0
铸钢			45	6	$t\leqslant55$	$6\left(1-\frac{Dp}{66000}\right)$
					$t\geqslant55$	0
铜			20～25	2	$d\leqslant100$ $100<d\leqslant125$	1.5 0
钢		无缝钢管	1.00			
		锻接管	0.80	34～45	8	1
		纵向单列铆接管	0.57～0.63	45～55	10	
铅	纯			1.25	0.25	0～3
	1～3% Sb				0.60	
聚（氯）乙烯				5～6		

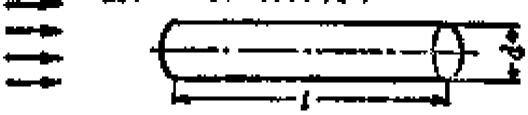
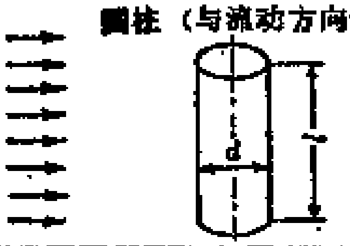
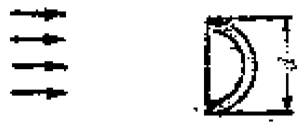
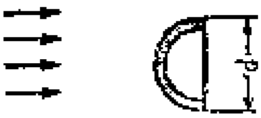
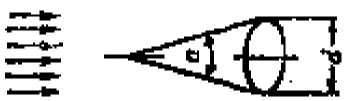
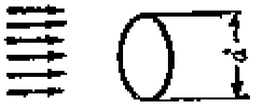
（选自《机械设计》日本机械学会编）

附表23 配管用碳素钢管 (JIS G 3452—1965)

管的名称		外径	厚度
A	B	(mm)	(mm)
6	1/8	10.5	2.0
8	1/4	13.8	2.3
10	3/8	17.3	2.3
15	1/2	21.7	2.8
20	3/4	27.2	2.8
25	1	34.0	3.2
32	1¼	42.7	3.5
40	1½	48.6	3.5
50	2	60.5	3.8
65	2½	76.3	4.2
80	3	89.1	4.2
90	3½	101.6	4.2
100	4	114.3	4.5
125	5	139.8	4.5
150	6	165.2	5.0
175	7	190.7	5.3
200	8	216.3	5.8
225	9	241.8	6.2
250	10	267.4	6.6
300	12	318.5	6.9
350	14	355.6	7.9

注：管子的名称，可以用A和B中的任意一个字，但必须在各自数字的后面记入A或B加以区别（6A、6B、10B等）。

附表24 **阻力系数C_D**

物体的形状和位置	尺寸比	标准面积	C_D值
圆柱（与流动方向平行）	$l/d=1$ 2 4 7	$\frac{\pi d^2}{4}$	0.91 0.85 0.87 0.99
圆柱（与流动方向垂直）	$l/d=1$ 2 5 10 40 ∞	$d\cdot l$	0.63 0.68 0.74 0.82 0.98 1.20
矩形板（与流动方向垂直）	$a/b=1$ 2 4 10 18 ∞	$a\cdot b$	1.12 1.15 1.19 1.29 1.40 2.01
半球（无盖）	—	$\frac{\pi d^2}{4}$	0.34
半球（无底）	—	$\frac{\pi d^2}{4}$	1.33
圆锥	$\alpha=30°$ $\alpha=60°$	$\frac{\pi d^2}{4}$	0.34 0.51
圆板（与流动方向垂直）	—	$\frac{\pi d^2}{4}$	1.2

附表25 饱和蒸汽表（温度标准）

温度 t°C	压力 p kg/cm²	比容 m³/kg v′	比容 m³/kg v″	焓 kcal/kg i′	焓 kcal/kg i″	焓 kcal/kg r = i″ − i′	熵 kcal/kg·K s′	熵 kcal/kg·K s″	熵 kcal/kg·K r/T = s″ − s′
0	0.006 228	0.001 000 2	206.3	0.00	597.1	597.1	0.000 0	2.186 0	2.186 0
5	0.008 891	0.001 000 0	147.1	5.03	599.3	594.3	0.018 2	2.154 9	2.136 7
10	0.012 513	0.001 000 4	106.4	10.04	601.5	591.5	0.036 1	2.125 0	2.088 9
15	0.017 378	0.001 001 0	77.94	15.04	603.8	588.7	0.053 5	2.096 5	2.043 0
20	0.023 830	0.001 001 8	57.80	20.03	605.9	585.9	0.070 8	2.069 3	1.998 5
25	0.032 291	0.001 003 0	43.37	25.02	608.1	583.1	0.087 6	2.043 1	1.955 5
30	0.043 261	0.001 004 4	32.91	30.00	610.2	580.2	0.104 2	2.018 2	1.914 0
35	0.057 337	0.001 006 1	25.23	34.99	612.4	577.4	0.120 7	1.994 3	1.873 6
40	0.075 220	0.001 007 9	19.53	39.98	614.5	574.5	0.136 7	1.971 3	1.834 6
50	0.125 81	0.001 012 1	12.04	49.95	618.8	568.8	0.168 0	1.928 1	1.760 1
60	0.203 16	0.001 017 1	7.673	59.94	622.9	563.0	0.198 4	1.888 3	1.689 9
70	0.317 80	0.001 022 8	5.043	69.93	627.0	557.1	0.228 0	1.851 4	1.623 4
80	0.482 97	0.001 029 0	3.407	79.95	631.1	551.1	0.256 8	1.817 3	1.560 5
90	0.714 93	0.001 035 9	2.360	89.98	635.0	545.0	0.284 7	1.785 5	1.500 8
100	1.033 23	0.001 043 5	1.673	100.04	638.8	538.8	0.312 0	1.755 9	1.443 9
110	1.460 9	0.001 051 5	1.210	110.12	642.5	532.4	0.333 8	1.728 3	1.389 5
120	2.024 5	0.001 060 3	0.891 6	120.25	646.1	525.9	0.364 8	1.702 3	1.337 5
130	2.754 4	0.001 069 7	0.668 1	130.42	649.6	591.1	0.390 3	1.677 8	1.287 5
140	3.684 8	0.001 079 8	0.508 7	140.64	652.8	512.1	0.415 3	1.654 7	1.239 4
150	4.853 5	0.001 090 6	0.392 6	[illegible]	655.8	504.9	0.439 8	1.632 8	1.193 0
160	6.302 1	0.001 102 1	0.306 9	161.26	658.6	497.3	0.463 8	1.611 9	1.148 1
170	8.075 9	0.001 114 4	0.242 7	171.68	661.1	489.5	0.487 5	1.591 9	1.104 4
180	10.224	0.001 127 5	0.194 0	182.18	663.4	481.2	0.510 8	1.572 7	1.061 9
190	12.799	0.001 141 5	0.156 4	192.78	665.4	472.6	0.533 7	1.554 1	1.020 4
200	15.856	0.001 156 5	0.127 3	203.49	667.0	463.5	0.556 4	1.536 1	0.979 7

续表

温度 t℃	压力 p kg/cm²	比容m³/kg		焓 kcal/kg			熵 kcal/kg·K		
		v'	v''	i'	i''	$r=i''-i'$	s'	s''	$r/T=s''-s'$
210	19.456	0.001 172 6	0.104 3	214.32	668.3	454.0	0.578 9	1.518 5	0.939 6
220	23.660	0.001 190 0	0.086 11	225.29	669.2	443.9	0.601 1	1.501 2	0.900 1
230	28.534	0.001 208 7	0.071 50	236.41	669.7	433.3	0.623 1	1.484 2	0.861 1
240	34.144	0.001 229 1	0.059 69	247.72	669.7	421.9	0.645 1	1.467 3	0.822 2
250	40.564	0.001 251 2	0.050 06	259.23	669.1	409.9	0.667 1	1.450 5	0.783 4
260	47.868	0.001 275 5	0.042 15	270.97	668.0	397.0	0.688 9	1.433 5	0.744 6
270	56.137	0.001 302 3	0.035 60	282.98	666.3	383.3	0.710 7	1.416 3	0.705 6
280	65.456	0.001 332 1	0.030 13	205.30	603.8	368.6	0.732 6	1.398 7	0.666 1
290	75.915	0.001 365 5	0.025 53	307.99	660.5	352.5	0.754 7	1.380 7	0.626 0
300	87.611	0.001 403 6	0.021 63	320.98	656.3	335.3	0.776 9	1.362 0	0.585 1
310	100.65	0.001 447 5	0.018 31	334.47	651.1	316.6	0.799 5	1.342 4	0.542 9
320	115.14	0.001 499 2	0.015 46	348.72	644.5	295.8	0.822 9	1.321 6	0.498 7
330	131.20	0.001 561 9	0.012 98	363.97	636.4	272.4	0.847 4	1.299 1	0.451 7
340	148.98	0.001 640 8	0.010 79	380.59	626.1	245.5	0.873 7	1.274 0	0.400 3
350	168.63	0.001 746 8	0.008 811	399.3	612.4	213.0	0.902 6	1.244 5	0.341 9
360	190.40	0.001 907	0.006 937	421.8	592.9	171.1	0.937 0	1.207 2	0.270 2
370	214.68	0.002 231	0.004 99	453.1	560.1	107.0	0.984 5	1.150 9	0.166 4
374.15	225.65	0.003 18	0.003 18	505.6	505.6	0	1.064 2	1.064 2	0

(选自日本机械学会修订蒸汽表)

附表26

饱和蒸汽表（压力标准）

压 力 p kg/cm^2	温 度 t °C	比容 m^3/kg v'	v''	焓 kcal/kg i'	i''	$r = i'' - i'$	熵 kcal/kg·K s'	s''	$\frac{r}{T} = s'' - s'$
0.010	6.700	0.001 000 1	131.6	6.73	600.1	593.4	0.024 3	2.144 6	2.120 3
0.015	12.735	0.001 000 7	89.56	12.78	602.8	590.0	0.045 6	2.109 2	2.063 6
0.020	17.202	0.001 001 3	68.25	17.24	604.7	587.4	0.061 1	2.084 3	2.023 2
0.025	20.774	0.001 002 0	55.24	20.80	606.2	585.4	0.073 4	2.065 1	1.991 7
0.030	23.771	0.001 002 7	46.30	23.79	607.5	583.7	0.083 5	2.049 5	1.966 0
0.04	28.641	0.001 004 0	35.43	28.65	609.6	581.0	0.099 7	2.024 8	1.925 1
0.05	32.55	0.001 005 2	28.70	32.55	611.3	578.8	0.122 6	2.005 8	1.883 2
0.1	45.45	0.001 010 1	14.04	45.41	616.8	571.4	0.153 8	1.947 3	1.793 5
0.2	59.66	0.001 016 9	7.737	59.60	622.7	563.1	0.197 4	1.869 5	1.672 1
0.3	68.67	0.001 022 0	5.323	68.60	626.5	557.9	0.224 1	1.856 1	1.632 0
0.5	80.86	0.001 029 6	3.299	80.81	631.4	550.6	0.259 2	1.814 5	1.555 3
0.7	89.45	0.001 035 5	2.408	89.43	634.8	545.4	0.283 2	1.787 2	1.504 0
1.0	99.09	0.001 042 8	1.725	99.12	638.5	539.4	0.309 6	1.758 6	1.449 0
1.5	110.79	0.001 052 3	1.180	110.92	642.8	531.9	0.340 8	1.726 2	1.385 4
2.0	119.62	0.001 060 0	0.901 8	119.86	646.0	526.1	0.363 8	1.703 3	1.339 5
3.0	132.88	0.001 072 5	0.617 0	133.36	650.5	517.1	0.397 5	1.671 0	1.273 6
4.0	142.92	0.001 082 8	0.470 9	143.63	653.7	510.0	0.422 5	1.648 2	1.225 7
5.0	151.11	0.001 091 8	0.381 8	152.04	656.1	504.1	0.442 5	1.630 5	1.188 0
6.0	158.08	0.001 099 8	0.321 5	159.25	658.1	498.8	0.459 2	1.615 8	1.156 6
7.0	164.17	0.001 107 0	0.277 9	165.60	659.7	494.1	0.473 7	1.603 4	1.129 7
8.0	169.61	0.001 113 9	0.244 9	171.26	661.0	489.8	0.486 6	1.592 7	1.106 1
9.0	174.53	0.001 120 2	0.219 1	176.45	662.2	485.8	0.498 1	1.583 1	1.085 0
10	179.04	0.001 126 2	0.198 1	181.19	663.2	482.0	0.508 6	1.574 5	1.065 9
12	187.08	0.001 137 3	0.166 2	189.67	664.8	475.2	0.527 1	1.559 5	1.032 4
14	194.13	0.001 147 6	0.143 6	197.18	666.1	468.9	0.543 6	1.546 6	1.003 8

续表

压力 p kg/cm^2	温度 t℃	比容 m^3/kg v'	v''	焓 kcal/kg i'	i''	$r = i''-i'$	熵 kcal/kg·K s'	s''	$r/T = s''-s'$
16	200.43	0.001 157 1	0.126 3	203.98	667.1	463.1	0.557 4	1.535 3	0.977 9
18	206.15	0.001 166 2	0.112 6	210.14	667.9	457.7	0.570 3	1.525 3	0.955 0
20	211.38	0.001 174 9	0.101 5	215.82	668.5	452.7	0.582 0	1.516 1	0.934 1
25	222.90	0.001 195 3	0.081 53	228.52	669.4	440.9	0.607 5	1.496 2	0.888 7
30	232.75	0.001 214 1	0.068 00	239.51	669.7	430.2	0.629 2	1.479 5	0.850 3
35	241.41	0.001 232 1	0.058 22	249.35	669.6	420.3	0.648 2	1.464 9	0.816 7
40	249.17	0.001 249 2	0.050 79	258.25	669.2	410.9	0.665 2	1.451 8	0.786 6
50	262.70	0.001 282 6	0.040 26	274.15	667.6	393.5	0.694 7	1.428 8	0.734 1
60	274.29	0.001 314 7	0.033 12	288.24	665.3	377.0	0.720 1	1.408 8	0.688 7
70	284.48	0.001 346 6	0.027 95	300.93	662.4	361.5	0.742 6	1.390 7	0.648 1
80	293.62	0.001 378 6	0.024 04	312.65	659.1	346.4	0.762 7	1.374 0	0.611 3
90	301.91	0.001 411 4	0.020 95	323.51	655.4	331.9	0.781 2	1.358 3	0.577 1
100	309.53	0.001 445 2	0.018 46	333.84	651.3	317.5	0.798 5	1.343 4	0.544 9
120	323.14	0.001 517 6	0.014 65	353.44	642.2	288.7	0.830 5	1.314 8	0.484 3
140	335.08	0.001 599 4	0.011 85	372.21	631.5	259.3	0.860 4	1.286 7	0.426 3
160	345.74	0.001 697 5	0.009 629	391.2	618.8	227.6	0.890 0	1.257 7	0.367 7
180	355.35	0.001 820	0.007 800	410.6	602.8	192.2	0.920 0	1.225 8	0.305 9
200	364.09	0.002 004	0.006 16	433.0	582.9	149.0	0.954 0	1.187 8	0.233 8
220	372.04	0.002 385	0.004 49	464.3	548.1	83.8	1.001 1	1.131 0	0.129 9

（选自日本机械学会修订蒸汽表）

附表27

过热蒸汽表

压力kg/cm²（饱和温度°C）		蒸汽温度°C 100	150	200	250	300	350	400	450	500
0.05 (32.55)	v	35.10	39.81	44.52	49.23	53.94	58.65	63.35	68.06	72.77
	i	642.1	664.9	687.9	711.2	734.8	758.8	783.1	807.8	832.9
	s	2.096 7	2.154 0	2.205 4	2.252 3	2.295 4	2.335 5	2.373 0	2.408 4	2.442 0
0.1 (45.45)	v	17.54	19.90	22.26	24.61	26.97	29.32	31.68	34.03	36.38
	i	641.9	664.8	687.8	711.1	734.8	758.7	783.1	807.8	832.9
	s	2.020 0	2.077 5	2.129 0	2.175 8	2.218 9	2.259 0	2.296 6	2.332 0	2.365 6
0.2 (59.66)	v	8.754	9.941	11.12	12.30	13.48	14.66	15.84	17.01	18.19
	i	641.6	664.6	687.7	711.1	734.7	758.7	783.0	807.8	832.9
	s	1.942 9	2.000 8	2.052 4	2.099 3	2.142 5	2.182 6	2.220 2	2.255 6	2.289 2
0.5 (80.86)	v	3.486	3.967	4.442	4.916	5.388	5.860	6.332	6.803	7.274
	i	640.6	664.1	687.4	710.8	734.5	758.6	782.9	807.7	832.8
	s	1.839 8	1.898 8	1.950 7	1.998 0	2.041 3	2.081 4	2.119 1	2.154 5	2.188 1
1.0 (99.09)	v	1.729	1.975	2.216	2.454	2.691	2.928	3.164	3.400	3.636
	i	638.9	663.2	686.8	710.4	734.3	758.3	782.8	807.5	832.7
	s	1.759 8	1.820 8	1.873 6	1.921 0	1.964 5	2.004 8	2.042 5	2.078 0	2.111 6
2.0 (119.62)	v		0.979 0	1.102	1.223	1.342	1.461	1.580	1.698	1.817
	i		661.4	685.7	709.7	733.7	757.9	782.4	807.3	832.4
	s		1.741 0	1.795 4	1.843 5	1.887 4	1.927 9	1.965 7	2.001 3	2.035 0
3.0 (132.88)	v		0.646 8	0.730 8	0.812 4	0.892 8	0.972 6	1.052	1.131	1.210
	i		659.5	684.6	708.9	733.1	757.5	732.1	807.0	832.2
	s		1.692 8	1.748 8	1.797 7	1.841 9	1.882 7	1.920 6	1.956 3	1.990 1

续表

压力kg/cm² (饱和温度℃)		蒸汽温度℃								
		100	150	200	250	300	350	400	450	500
4.0 (142.92)	v		0.480 5	0.545 2	0.607 2	0.668 0	0.728 2	0.788 0	0.847 6	0.906 9
	i		657.5	683.4	708.1	732.5	757.0	781.7	806.7	832.0
	s		1.657 4	1.715 2	1.764 9	1.809 5	1.850 5	1.888 6	1.924 4	1.958 2
5.0 (151.11)	v			0.433 7	0.484 0	0.533 2	0.581 6	0.629 6	0.677 4	0.725 0
	i			682.2	707.3	731.9	756.6	781.4	806.4	831.7
	s			1.688 6	1.739 1	1.784 1	1.825 3	1.863 6	1.899 5	1.933 4
6.0 (158.08)	v			0.359 3	0.401 9	0.443 2	0.483 8	0.524 0	0.564 0	0.603 7
	i			680.9	706.5	731.4	756.1	781.0	806.1	831.5
	s			1.666 5	1.717 8	1.763 3	1.804 7	1.843 1	1.879 1	1.913 0
7.0 (164.17)	v			0.306 2	0.343 2	0.379 0	0.414 0	0.448 6	0.482 9	0.517 1
	i			679.7	705.6	730.8	755.7	780.6	805.8	831.3
	s			1.647 4	1.699 6	1.745 5	1.787 2	1.825 7	1.861 8	1.895 8
8.0 (169.61)	v			0.266 3	0.299 2	0.330 8	0.361 6	0.392 0	0.422 1	0.452 1
	i			678.4	704.8	730.1	755.2	780.3	805.5	831.0
	s			1.630 5	1.683 7	1.730 0	1.771 9	1.810 6	1.846 8	1.880 9
9.0 (174.53)	v			0.235 2	0.265 0	0.293 3	0.320 9	0.348 0	0.374 9	0.401 6
	i			677.0	703.9	729.5	754.8	779.9	805.2	830.8
	s			1.615 3	1.669 4	1.716 2	1.758 4	1.797 2	1.833 5	1.867 7
10.0 (179.04)	v			0.210 3	0.237 6	0.263 3	0.288 3	0.312 8	0.337 1	0.361 1
	i			675.7	703.0	728.9	754.3	779.6	805.0	830.6
	s			1.601 5	1.656 5	1.703 8	1.746 2	1.785 2	1.821 6	1.855 8
12.0 (187.08)	v			0.172 9	0.196 4	0.218 3	0.239 4	0.260 0	0.280 3	0.300 5
	i			672.9	701.3	727.7	753.4	778.8	804.4	830.1
	s			1.576 7	1.633 8	1.682 0	1.725 0	1.764 3	1.800 9	1.835 3

续表

压力kg/cm² (饱和温度℃)		蒸汽温度℃ 250	300	350	400	450	500	550	600	650
15 (197.36)	v	0.155 2	0.173 2	0.190 4	0.207 2	0.223 6	0.239 9	0.256 0	0.272 0	
	i	698.5	725.7	751.9	777.7	803.5	829.4	855.4	881.8	
	s	1.605 1	1.654 9	1.698 7	1.738 5	1.775 4	1.810 0	1.842 7	1.873 8	
20 (211.38)	v	0.113 9	0.128 2	0.141 5	0.154 3	0.166 9	0.179 2	0.191 4	0.203 6	
	i	693.6	722.4	749.5	775.9	802.0	828.1	854.4	880.9	
	s	1.566 1	1.618 7	1.664 0	1.704 7	1.742 2	1.777 1	1.810 1	1.841 3	
30 (232.75)	v	0.072 21	0.082 92	0.092 49	0.101 5	0.110 1	0.118 5	0.126 8	0.135 0	
	i	682.7	715.3	744.4	772.0	799.0	825.7	852.4	879.2	
	s	1.504 8	1.564 5	1.613 1	1.655 7	1.694 3	1.730 1	1.763 5	1.795 2	
40 (249.17)	v	0.050 97	0.060 17	0.067 91	0.074 99	0.081 70	0.088 19	0.094 53	0.100 8	
	i	669.9	707.6	738.0	768.0	795.8	823.2	850.3	877.5	
	s	1.453 2	[illegible]	1.574 8	1.619 5	1.659 4	1.695 9	1.730 0	1.762 0	
50 (262.70)	v		0.046 38	0.053 11	0.059 08	0.064 65	0.069 78	0.075 15	0.080 21	
	i		[illegible]	733.4	763.8	792.6	820.6	848.2	875.7	
	s		1.485 9	1.543 2	1.590 2	1.631 5	1.668 9	1.703 5	1.735 9	
60 (274.29)	v		0.037 07	0.043 20	0.048 45	0.053 27	0.057 83	0.062 22	0.060 51	
	i		[illegible]	727.4	759.5	789.3	818.0	864.1	873.9	
	s		1.452 7	1.516 5	1.565 2	1.607 9	1.646 3	1.681 5	1.714 3	
70 (284.48)	v		0.030 27	0.036 07	0.040 84	0.045 13	0.049 14	0.052 99	0.056 72	
	i		679.4	721.0	755.1	786.0	815.3	843.9	872.2	
	s		1.420 7	1.490 6	1.543 1	1.587 4	1.626 7	1.662 5	1.695 8	

续表

压力kg/cm²(饱和温度℃)		蒸汽温度℃								
		250	300	350	400	450	500	550	600	650
80 (293.62)	v		0.025 00	0.030 69	0.035 11	0.039 01	0.042 62	0.046 06	0.049 37	
	i		667.2	714.3	750.4	782.5	812.6	841.7	870.4	
	s		1.388 2	1.467 3	1.523 1	1.569 1	1.609 3	1.645 8	1.679 6	
90 (301.91)	v			0.026 46	0.030 64	0.034 25	0.037 55	0.040 66	0.043 66	
	i			707.2	745.6	778.9	809.9	839.5	868.5	
	s			1.445 1	1.504 5	1.552 3	1.593 7	1.630 8	1.665 1	
100 (309.53)	v			0.023 03	0.027 05	0.030 43	0.033 48	0.036 35	0.039 09	
	i			690.6	740.6	775.3	807.1	837.3	866.7	
	s			1.423 5	1.487 1	1.536 8	1.579 3	1.617 2	1.651 9	
150 (340.55)	v			0.011 99	0.016 09	0.018 89	0.021 25	0.023 37	0.025 36	0.027 23
	i			647.5	712.6	755.8	792.3	825.7	857.2	887.8
	s			1.308 1	1.409 2	1.471 2	1.520 0	1.561 8	1.599 0	1.633 1
200 (364.08)	v				0.010 30	0.013 03	0.015 00	0.016 86	0.018 47	0.019 97
	i				676.5	733.9	776.4	813.4	847.3	879.7
	s				1.333 0	1.415 4	1.472 4	1.518 7	1.558 8	1.594 8
250	v				0.006 37	0.009 44	0.011 37	0.012 94	0.014 34	0.015 61
	i				621.5	708.8	759.4	800.5	837.2	871.4
	s				1.238 6	1.362 8	1.430 6	1.482 1	1.525 4	1.563 5
300	v				0.003 06	0.007 00	0.008 91	0.010 35	0.011 59	0.012 71
	i				523.6	679.1	741.4	787.3	826.8	862.9
	s				1.083 9	1.308 5	1.392 1	1.449 6	1.496 2	1.536 4
340	v				0.002 22	0.005 53	0.007 50	0.008 85	0.009 99	0.011 02
	i				481.9	650.2	726.5	776.7	818.5	856.2
	s				1.018 2	1.260 4	1.362 8	1.425 8	1.475 2	1.517 2

（选自日本机械学会修订蒸汽表）

附表28 希腊字母读法

大写		小写		
A		α	['ælfə]	(Alpha)
B		β	['beltə]	(Beta)
Γ		γ	['gæmə]	(Gamma)
Δ	(α)	δ	['deltə]	(Delta)
E	(e)	ε	['epsilən]	(Epsilon)
Z		ζ	['zi:tə]	(Zeta)
H		η	['i:tə]	(Eta)
Θ	(ϑ)	θ	['θi:tə]	(Theta)
I		ι	[ai'outə]	(Iota)
K		κ	['kæpə]	(Kappa)
Λ		λ	[læmdə]	(Lambda)
M		μ	[mju:]	(Mu)
N		ν	[nju:]	(Nu)
Ξ		ξ	[ksai]	(Xi)
O		o	[ou'maikrən]	(Omicron)
Π		π	[pai]	(Pi)
P		ρ	[rou]	(Rho)
Σ	(s)	σ	[sigmə]	(Sigma)
T		τ	[tɔ:]	(Tau)
Υ		υ	[ju:psilən]	(Upsilon)
Φ	(φ)	ϕ	[fai]	(Phi)
X		χ	[kai]	(Chi)
Ψ		ψ	[psai]	(Psi)
Ω		ω	['oumigə]	(Omega)