高等学校试用教材

离心式压缩机强度

西安交通大学透平压缩机教研室 编著

机械工业出版社

高等学校试用教材

离心式压缩机强度

西安交通大学透平压缩机教研室 编著

机械工业出版社

本书比较全面地阐述了离心式压缩机主要部件设计方面的知识及计算方法。内容包括：用二次计算法计算轮盘强度、用有限元法计算叶轮强度、转子的临界转速及强度计算、转子弯曲振动和扭转振动临界转速的计算、流体动压滑动轴承、轴封装置、气缸的强度计算及转子的轴向力平衡。在有限元法计算叶轮强度和转子临界转速的计算中，还专门介绍了计算机程序。每章都附有必要的例题。

本书可作为高等工业学校动力机械系高年级学生透平压缩机课程的教材，也可供从事离心式压缩机工作的工程技术人员参考。

离心式压缩机强度

西安交通大学透平压缩机教研室编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张16 1/2 ·字数402 千字

1980年9月重庆第一版·1980年9月重庆第一次印刷

印数 0,001—6,600·定价1.70元

*

统一书号：15033·4920

前　　言

本书是在西安交通大学1973年的自用教材基础上编写而成。原书由西安交通大学透平压缩机教研室和沈阳鼓风机厂工人大学合编。

本书主要内容包括：离心压缩机轮盘的应力分析和应力计算方法，介绍二次计算法和有限元法，并给出了有限元法的计算程序；转子的临界转速计算介绍了能量法和普洛尔法，分析了影响转子临界转速的各种因素，给出了计算程序，还介绍了扭转振动计算以及不平衡响应计算概念；轴承和密封方面介绍了基本理论，结构型式以及设计计算方法；在本书最后，介绍气缸的强度计算方法，转子轴向力的计算和平衡方法。

与原书相比，本版中增加了轮盘应力计算有限元法，临界转速计算普洛尔法，不平衡响应计算的概念，并对轴承和密封两章作了较多的修改补充。

本书主要是作为动力机械系高年级学生透平压缩机课程的教材之一而编写的，此外也可供从事透平压缩机工作的工程技术人员参考。

本书的改编工作由西安交通大学苗永淼、牛锡传、蒋潞、许庆余、童榴生、姜桐、刘士学等同志担任，最后由苗永淼同志总编定稿。由于我们水平有限，加之时间匆促，书中肯定存在不少缺点和错误，恳切地欢迎读者批评指正。

在编写过程中，许多兄弟单位的同志提供了不少宝贵意见，特别是陕西鼓风机厂的同志为本书描绘了插图。在此谨致谢意。

西安交通大学透平压缩机教研室

1978年9月

35678

目 录

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

第一章　用二次计算法计算轮盘强度

离心式压缩机轮盘，由于高速旋转造成的离心力及过盈配合的压紧力，会产生很大的应力，为保证安全运行，需要进行轮盘的强度计算。本章介绍轮盘应力的二次计算法。

第一节　计 算 公 式

为了计算轮盘中应力，现切出一半径为 R,$(R+dR)$ 和两个子午面所决定的微元体。两个子午面的夹角为 $d\varphi$，它的厚度为 y 和$(y+dy)$，见图 1-1。设轮盘材料密度为 ρ，则该微元体的质量为：

$$dm=\rho Rd\varphi ydR$$

当以角速度 ω 旋转时，该微元体所产生的离心力为：

$$dP=dmR\omega^2=\rho\omega^2R^2yd\varphi dR$$

力 dP 引起作用于微元体各个表面上的下列诸力：

dA——径向力，作用于微元体的内表面；

dA'——径向力，作用于微元体的外表面；

dT——切向力，作用于微元体的侧表面。

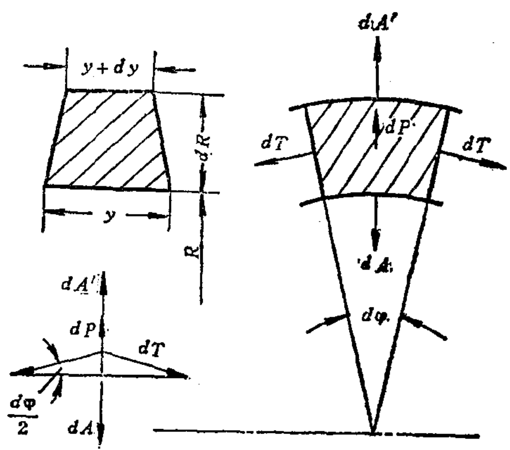

图1-1　轮盘受力分析

并且　$dA=yRd\varphi\sigma_r$

$$dA'=(y+dy)(R+dR)d\varphi(\sigma_r+d\sigma_r)$$

$$dT=ydR\sigma_t$$

式中　σ_r、$(\sigma_r+d\sigma_r)$、σ_t——分别为作用于微元体内外表面和侧面上的应力（公斤/厘米²）。

所有上述作用于该微元体上的力，在半径方向分力之和应等于零，即

$$dP+dA'-dA-2dT\sin\frac{d\varphi}{2}=0$$

因为角度$d\varphi$很小，故可以认为 $\sin\frac{d\varphi}{2}=\frac{d\varphi}{2}$，把上式中的$dP$、$dA$、$dA'$及$dT$ 的表达式代入后，即得下列方程：

$$\rho\omega^2R^2yd\varphi dR+(y+dy)(R+dR)d\varphi(\sigma_r+d\sigma_r)-yRd\varphi\sigma_r-ydRd\varphi\sigma_t=0$$

把括号展开并略去高阶无穷小量，可得下列方程：

$$\frac{d(Ry\sigma_r)}{dR}-y\sigma_t+\rho\omega^2R^2y=0 \tag{1-1}$$

根据虎克定律有：

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_r&=\frac{\sigma_r-\nu\sigma_t}{E}\\ \varepsilon_t&=\frac{\sigma_t-\nu\sigma_r}{E}\end{aligned}\right\}\tag{1-2}$$

式中　ν——泊松比；

ε_r——径向应变；

ε_t——切向应变；

E——弹性模数（公斤/厘米^2）。

变换上述方程组得：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r&=\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_r+\nu\varepsilon_t)\\ \sigma_t&=\frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_t+\nu\varepsilon_r)\end{aligned}\right\}\tag{1-3}$$

轮盘在动应力作用下产生弹性变形，同时，由于沿半径方向轮盘受热不均匀，也产生变形。设在动应力和温度的共同影响下，轮盘在半径R处的径向变形为ξ，在温度的单独作用下的径向变形为：

$$\xi'=\alpha R\bar{t}$$

式中　α——金属的线胀系数（厘米/℃）；

$\bar{t}$——半径R处微元圆环的温度与一个参考温度之差(℃)。

在动应力的单独作用下的径向变形为：

$$\xi''=\xi-\xi'$$

轮盘在半径R处的切向应变为：

$$\varepsilon_t=\frac{2\pi(R+\xi'')-2\pi R}{2\pi R}=\frac{\xi''}{R}=\frac{\xi}{R}-\alpha\bar{t}\tag{1-4}$$

在半径R上，微元长dR的总径向伸长为：

$$\frac{d\xi}{dR}dR$$

而温度的变化使该微元长dR伸长了：

$$\alpha\bar{t}\,dR$$

因此微元 dR 的弹性径向伸长为：

$$\frac{d\xi}{dR}dR-\alpha\bar{t}\,dR$$

由此得径向应变为：

$$\varepsilon_r=\frac{\frac{d\xi}{dR}dR-\alpha\bar{t}\,dR}{dR}=\frac{d\xi}{dR}-\alpha\bar{t}\tag{1-5}$$

把公式(1-4)和(1-5)代入公式(1-3)中得：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r&=\frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{d\xi}{dR}-\alpha\bar{t}+\nu\left(\frac{\xi}{R}-\alpha\bar{t}\right)\right]\\ \sigma_t&=\frac{E}{1-\nu^2}\left[\frac{\xi}{R}-\alpha\bar{t}+\nu\left(\frac{d\xi}{dR}-\alpha\bar{t}\right)\right]\end{aligned}\right\} \tag{1-6}$$

把上式代入公式(1-1)中，经演化可得下式：

$$\frac{d^2\xi}{dR^2}+\left[\frac{d(\ln y)}{dR}+\frac{1}{R}\right]\frac{d\xi}{dR}+\left[\frac{\nu}{R}\frac{d(\ln y)}{dR}-\frac{1}{R^2}\right]\xi$$

$$-(1+\nu)\alpha\frac{d\bar{t}}{dR}-(1+\nu)\alpha\bar{t}\frac{d(\ln y)}{dR}+AR=0 \tag{1-7}$$

式中 $A=\dfrac{(1-\nu^2)\rho\omega^2}{E}$。

一、等厚度轮盘的应力计算

对于等厚度轮盘（y=常数），并且一般离心压缩机温度对应力影响较小，可以忽略不计（$\bar{t}=0$），则方程(1-7)变为下列形式：

$$\frac{d^2\xi}{dR^2}+\frac{1}{R}\frac{d\xi}{dR}-\frac{\xi}{R^2}=-AR \tag{1-8}$$

此方程可改写为：

$$\frac{d}{dR}\left[\frac{1}{R}\frac{d}{dR}(\xi R)\right]=-AR$$

此方程可通过二次积分求解，积分一次得：

$$\frac{1}{R}\frac{d}{dR}(\xi R)=-\frac{A}{2}R^2+2a_1$$

于是 $$\frac{d}{dR}(\xi R)=-\frac{A}{2}R^3+2a_1R$$

再次积分得：

$$\xi R=-\frac{A}{8}R^4+a_1R^2+a_2$$

由此得 $$\xi=a_1R+\frac{a_2}{R}-\frac{A}{8}R^3 \tag{1-9}$$

式中 a_1、a_2——积分常数。

对公式(1-9)微分得：

$$\frac{d\xi}{dR}=a_1-\frac{a_2}{R^2}-\frac{3}{8}AR^2 \tag{1-10}$$

把得到的 ξ 和 $\dfrac{d\xi}{dR}$ 代入公式(1-6)中得：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r&=\frac{E}{1-\nu^2}\left[(1+\nu)a_1-(1-\nu)\frac{a_2}{R^2}-(3+\nu)\frac{AR^2}{8}\right]\\ \sigma_t&=\frac{E}{1-\nu^2}\left[(1+\nu)a_1+(1-\nu)\frac{a_2}{R^2}-(1+3\nu)\frac{AR^2}{8}\right]\end{aligned}\right\} \tag{1-11}$$

假定轮盘内孔R_0处的应力σ_{r0}与σ_{t0}是已知的，那么对于内孔R_0处写出上述方程得：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_{r0}&=\frac{E}{1-\nu^2}\left[(1+\nu)a_1-(1-\nu)\frac{a_2}{R_0^2}-(3+\nu)\frac{AR_0^2}{8}\right]\\ \sigma_{t0}&=\frac{E}{1-\nu^2}\left[(1+\nu)a_1+(1-\nu)\frac{a_2}{R_0^2}-(1+3\nu)\frac{AR_0}{8}\right]\end{aligned}\right\}\quad(1\text{-}12)$$

由此方程组解得积分常数为：

$$a_1=\frac{1-\nu}{2E}\sigma_{r0}+\frac{1-\nu}{2E}\sigma_{t0}+\frac{AR_0^2}{4}$$

$$a_2=\frac{1+\nu}{2E}R_0^2\sigma_{t0}-\frac{1+\nu}{2E}R_0^2\sigma_{r0}-\frac{AR_0^4}{8}$$

将求得的积分常数a_1和a_2代入公式(1-11)中，得半径R处的应力为：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r&=\frac{1+x^2}{2}\sigma_{r0}+\frac{1-x^2}{2}\sigma_{t0}+\frac{\rho}{8}\left[2(1+\nu)x^2+(1-\nu)x^4-(3+\nu)\right]R^2\omega^2\\ \sigma_t&=\frac{1-x^2}{2}\sigma_{r0}+\frac{1+x^2}{2}\sigma_{t0}+\frac{\rho}{8}\left[2(1+\nu)x^2+(1-\nu)x^4-(1+3\nu)\right]R^2\omega^2\end{aligned}\right\}\quad(1\text{-}13)$$

式中 $x=\frac{R_0}{R}=\frac{D_0}{D}$称为直径比，即轮盘内径与计算应力处直径$D$之比，为相对尺寸。后面除整个轮盘的轮毂直径表为$D_0$外，一般轮盘段的内径表为$D_1$，因此相对尺寸$x$的一般表达式为$x=\frac{D_1}{D}$。

令

$$\left.\begin{aligned}\alpha_r&=\beta_t=\frac{1+x^2}{2}\\ \alpha_t&=\beta_r=\frac{1-x^2}{2}\end{aligned}\right\}\quad(1\text{-}14)$$

并以M、N分别代表公式(1-13)中的方括号，内径表示为D_1，那么公式(1-13)变为下列形式：

$$\sigma_r=\alpha_r\sigma_{r1}+\alpha_t\sigma_{t1}+\frac{\gamma}{8g}R^2\omega^2M$$

$$\sigma_t=\beta_r\sigma_{r1}+\beta_t\sigma_{t1}+\frac{\gamma}{8g}R^2\omega^2N$$

因为$g=981$厘米/秒^2；$\omega=\frac{\pi n}{30}$弧度/秒，对一般钢材$\gamma=7.85\times10^{-3}$公斤/厘米^3，那么

$$\frac{\gamma}{8g}R^2\omega^2=\frac{7.85\times10^{-3}}{8\times981}\times\frac{D^2}{4}\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2$$

对于计算直径$D=1000$毫米，$n=1000$转/分的等厚度轮盘，上式的数值为：

$$\frac{7.85\times10^{-3}}{8\times981}\times\frac{100^2}{4}\left(\frac{1000\pi}{30}\right)^2=27.5(\text{公斤/厘米}^2)$$

令

$$\left.\begin{aligned}\alpha_c&=27.5M\\ \beta_c&=27.5N\end{aligned}\right\}\tag{1-15}$$

对于$D=1000$毫米，$n=1000$转/分的等厚度轮盘，其应力计算公式就表示为：

$$\sigma_r=\alpha_r\sigma_{r1}+\alpha_t\sigma_{t1}+\alpha_c(\text{公斤/厘米}^2)$$

$$\sigma_t=\beta_r\sigma_{r1}+\beta_t\sigma_{t1}+\beta_c(\text{公斤/厘米}^2)$$

对于别的直径和别的转速，则因第三项与D^2n^2成正比，故其应力计算公式可表为：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r&=\alpha_r\sigma_{r1}+\alpha_t\sigma_{t1}+\alpha_cT\\ \sigma_t&=\beta_r\sigma_{r1}+\beta_t\sigma_{t1}+\beta_cT\end{aligned}\right\}\tag{1-16a}$$

$$T=\left(\frac{D}{1000}\right)^2\left(\frac{n}{1000}\right)^2=\left(\frac{Dn}{10^6}\right)^2\tag{1-16b}$$

式中　D——计算应力处直径(毫米)；

n——轮盘转速(转/分)。

对于一般钢制轮盘，其泊桑系数，$\nu=0.3$，那么

$$\alpha_c=27.5M=27.5[2(1+0.3)x^2+(1-0.3)x^4-(3+0.3)]$$
$$=-27.5(3.3-2.6x^2-0.7x^4)$$
$$\beta_c=27.5N=27.5[2(1+0.3)x^2-(1-0.3)x^4-(1+3\times0.3)]$$
$$=-27.5(1.9-2.6x^2+0.7x^4)$$

$\alpha_r,\alpha_t,\alpha_c,\beta_r,\beta_t,\beta_c$称为等厚度轮盘的应力计算系数，它们都是相对尺寸（直径比）x的函数。图1-2为这些系数的曲线图。包括后面要讨论的锥形轮盘应力计算系数，都已经制成表格和图线，可以查取。$\alpha_r,\alpha_t,\beta_r,\beta_t$为无因次值；而$\alpha_c$，$\beta_c$的单位是公斤/厘米²，这两个系数反映离心力的影响，与材料比重有关，现在用的曲线和表格适用于各种钢制轮盘，如果用别的材料，比重不同，要进行换算；由查得的α_c，β_c值，除以钢的比重，再乘以所用材料的比重便可。如$\alpha_{c铝}=\alpha_{c钢}\times\dfrac{2.71\times10^{-3}}{7.85\times10^{-3}}$。$\beta_c$也一样。

［例］ 已知：一个等厚度轮盘，内径$D_1=300$毫米，外径$D=500$毫米，$n=4000$转/分。假定已知内径处应力$\sigma_{r1}=200$公斤/厘米²，$\sigma_{t1}=1000$公斤/厘米²。

求：外径处的应力σ_r，σ_t。

解　直径比　$x=\dfrac{D_1}{D}=\dfrac{300}{500}=0.6$

由图1-2查得：

$$\alpha_r=\beta_t=0.68,\quad \alpha_t=\beta_r=0.31,\quad \alpha_c=-62,\quad \beta_c=-28$$

$$T=\left(\frac{Dn}{10^6}\right)^2=\left(\frac{500\times4000}{10^6}\right)^2=4$$

根据公式(1-16)，得外径D处的应力为：

$$\sigma_r=0.68\times200+0.31\times1000-62\times4=198(\text{公斤/厘米}^2)$$

$$\sigma_t=0.31\times200+0.68\times1000-28\times4=630(\text{公斤/厘米}^2)$$

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

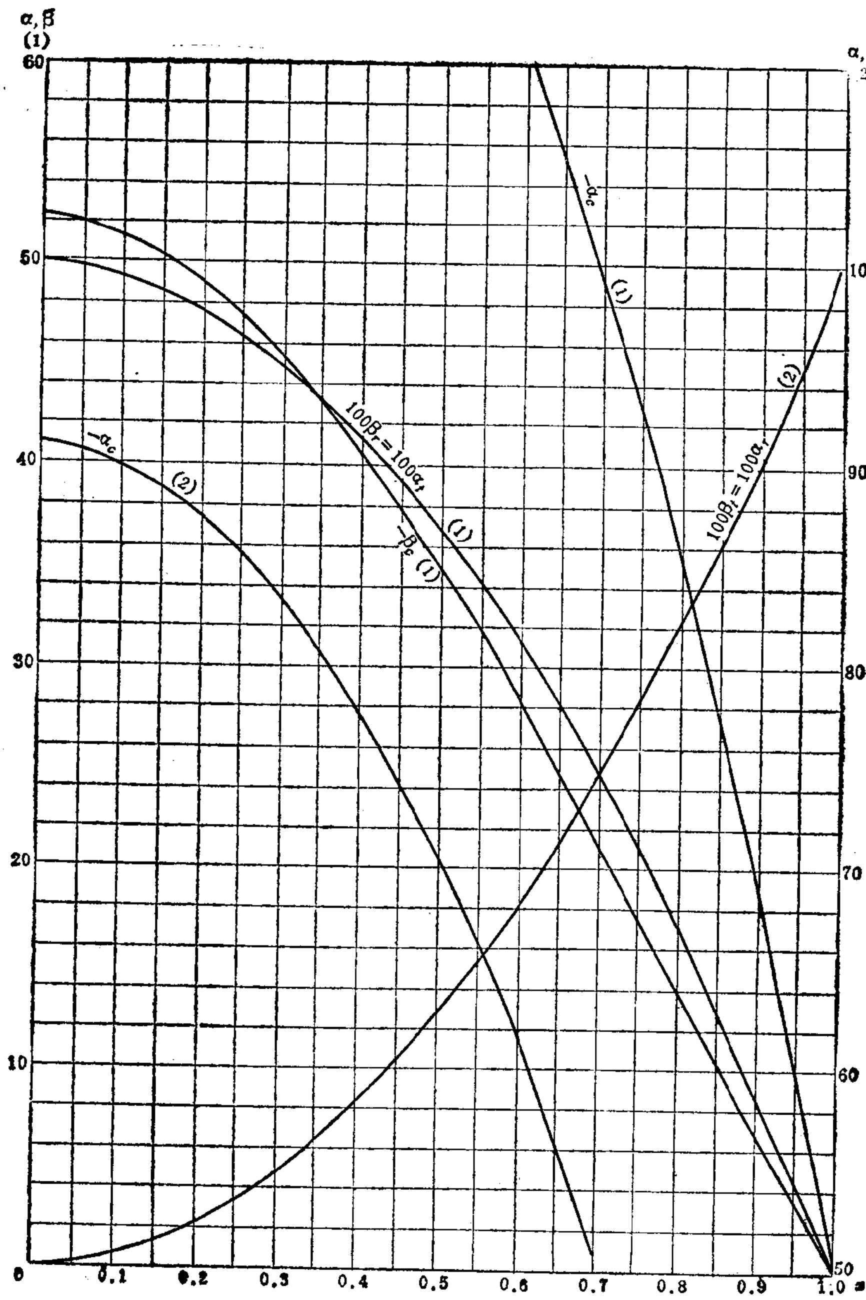

图 1-2　等厚度轮盘的 $\alpha_r, \alpha_t, \alpha_c, \beta_r, \beta_t, \beta_c$ 曲线

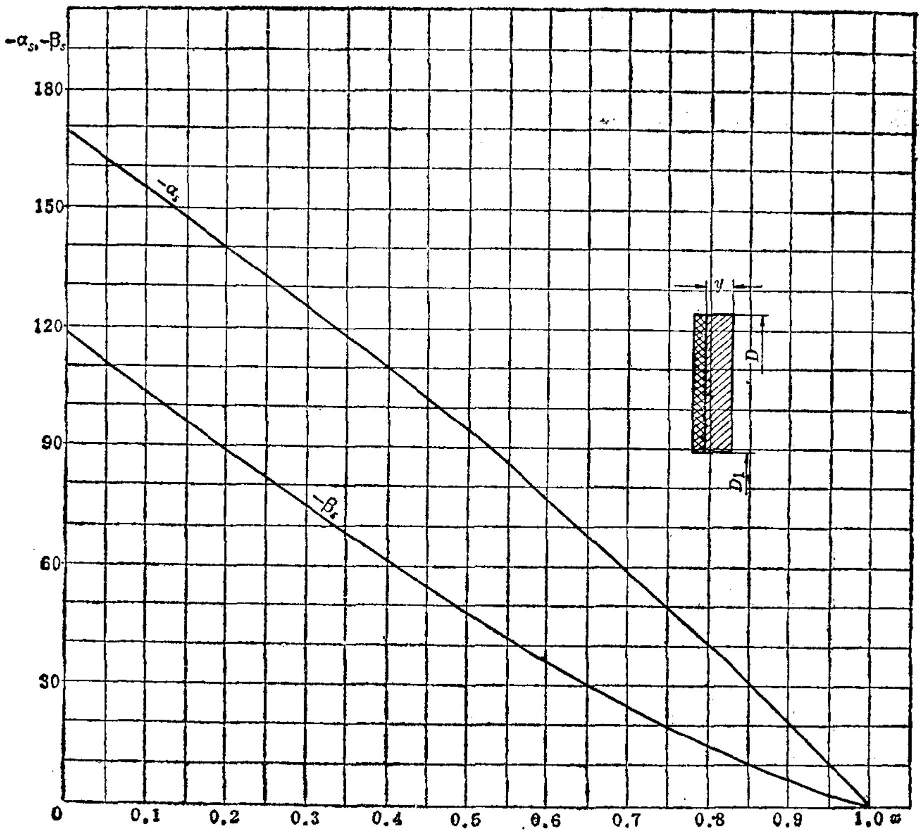

图1-3　等厚度轮盘的α_s，β_s曲线

二、锥形轮盘的应力计算

如图1-4所示的锥形轮盘，当知道其内径D_1处的应力σ_{r1}，σ_{t1}后，可计算其外径D处的应力σ_r，σ_t，具体计算公式如下：

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r&=\alpha_r\sigma_{r1}+\alpha_t\sigma_{t1}+\alpha_c' T_d\\ \sigma_t&=\beta_r\sigma_{r1}+\beta_t\sigma_{t1}+\beta_c' T_d\end{aligned}\right\}\tag{1-17}$$

锥形轮盘的应力计算公式与等厚度轮盘的应力计算公式在形式上是一样的。但是锥形轮盘内径与外径之间的相对尺寸，需同时反映轮盘厚度的变化，因此引用锥顶直径d来反映内径与外径之间的尺寸关系。由图1-4可得锥顶直径为：

$$d=D_1+\frac{y_1}{y_1-y}(D-D_1)$$

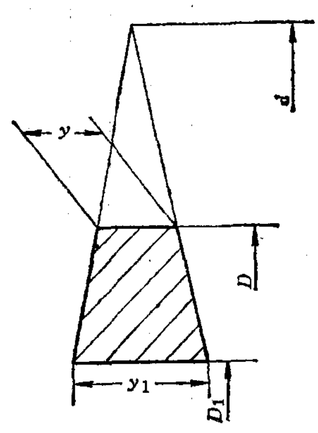

图1-4　锥形轮盘

内外径间的相对尺寸表示为：

$$\left.\begin{aligned}t_1&=\frac{D_1}{d}\\ t&=\frac{D}{d}\end{aligned}\right\}\tag{1-18a}$$

由t_1和t查取应力计算系数。图1-5至图1-10分别为锥形轮盘的系数$\alpha_r,\alpha_t,\alpha_c',\beta_r,\beta_t,\beta_c'$曲线图，同样$\alpha_c'$和$\beta_c'$与材料比重有关。而

$$T_d=\left(\frac{dn}{10^6}\right)^2 \tag{1-18b}$$

即离心力由锥顶处的圆周速度表示。

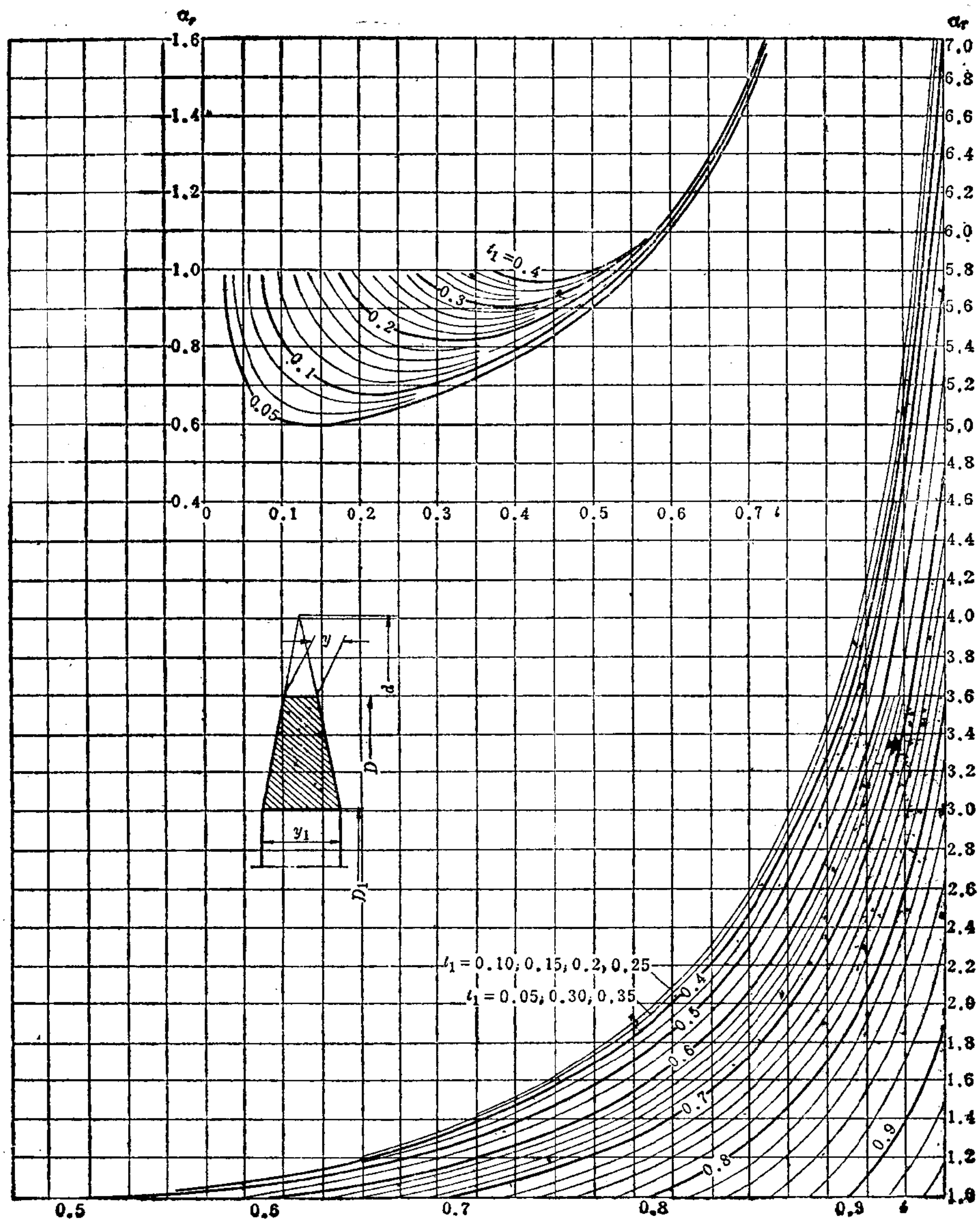

图1-5 锥形轮盘系数 α_r

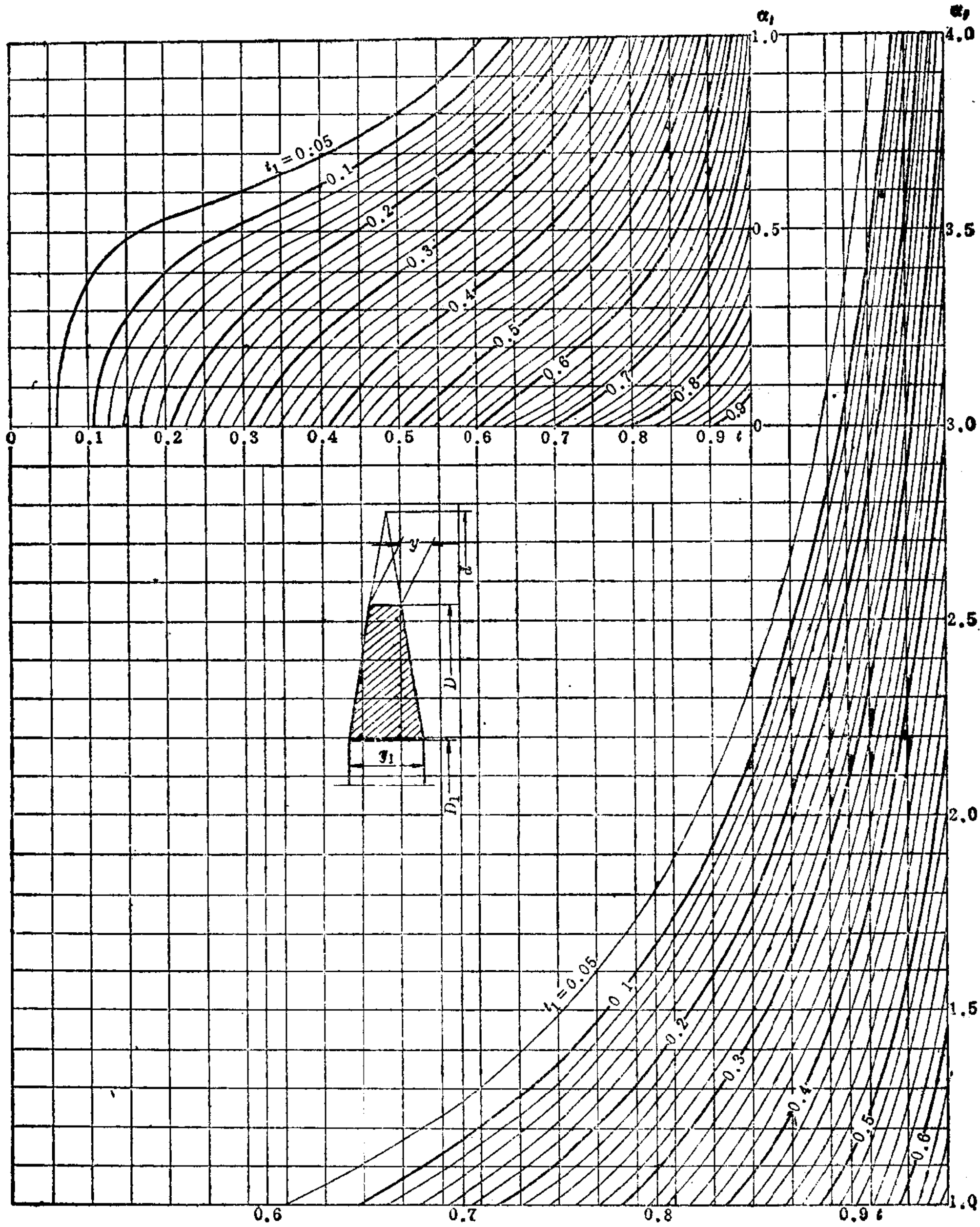

图1-6　锥形轮盘系数 α_s

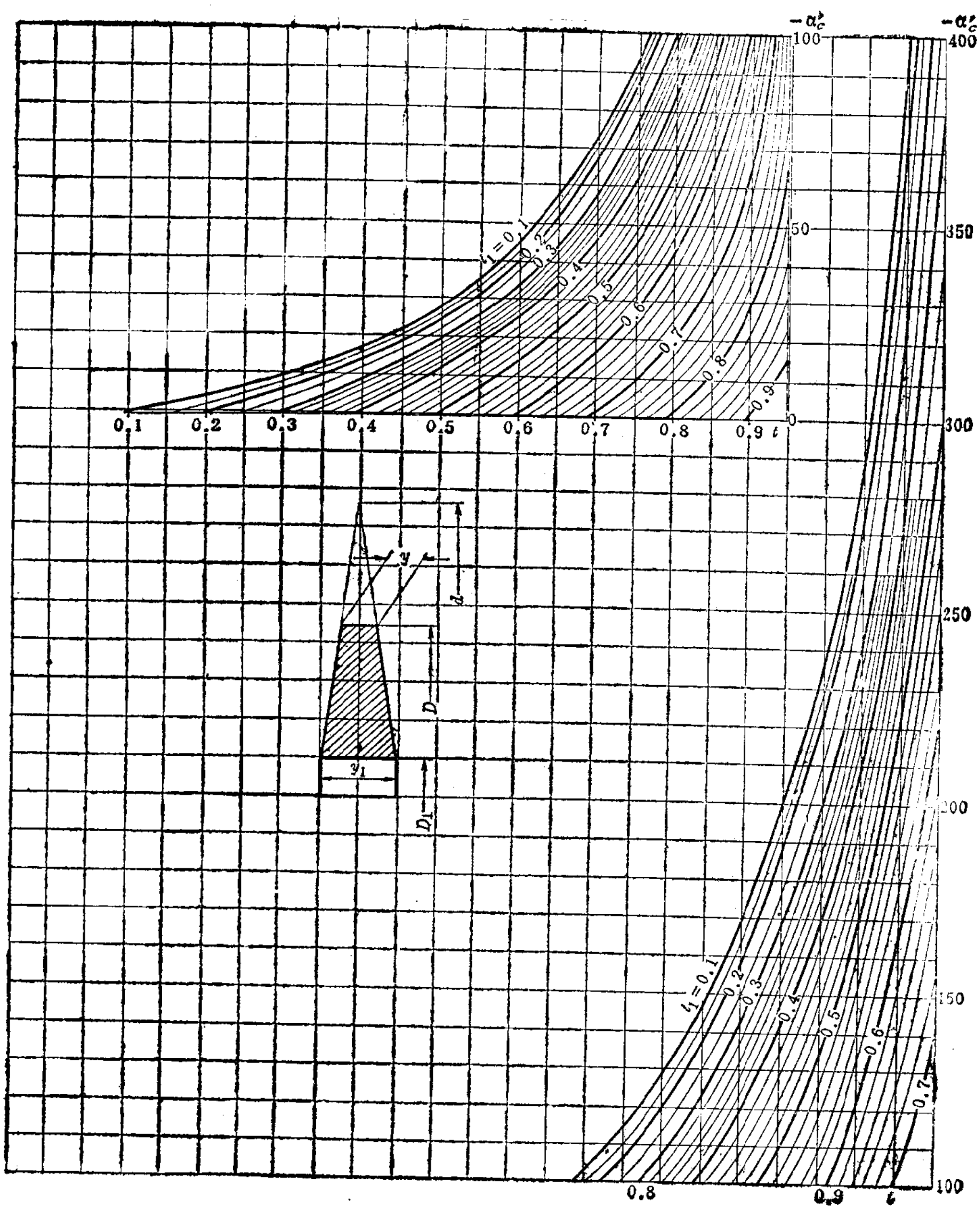

图1-7 锥形轮盘系数 α_c'

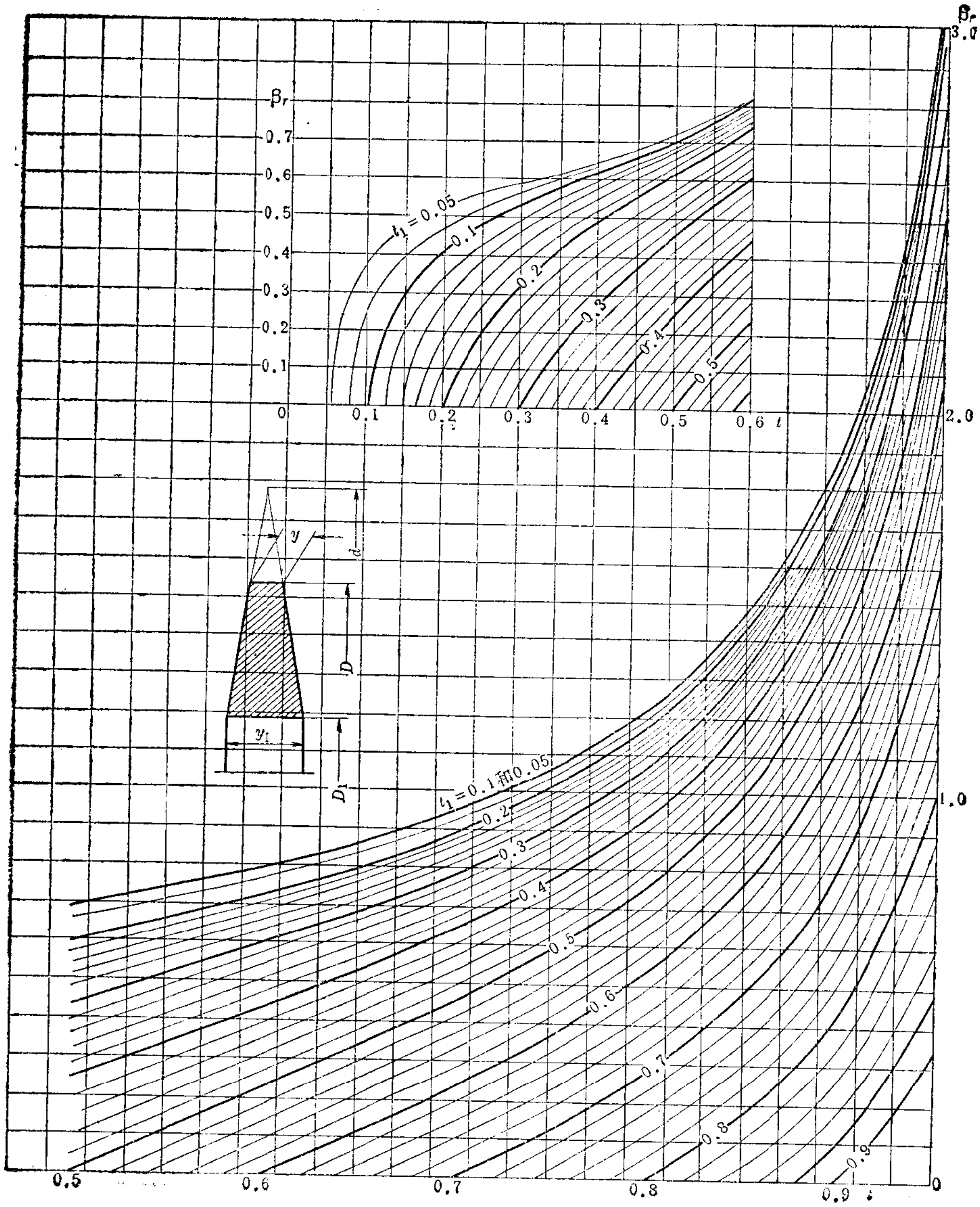

图1-8 锥形轮盘系数β_r

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com