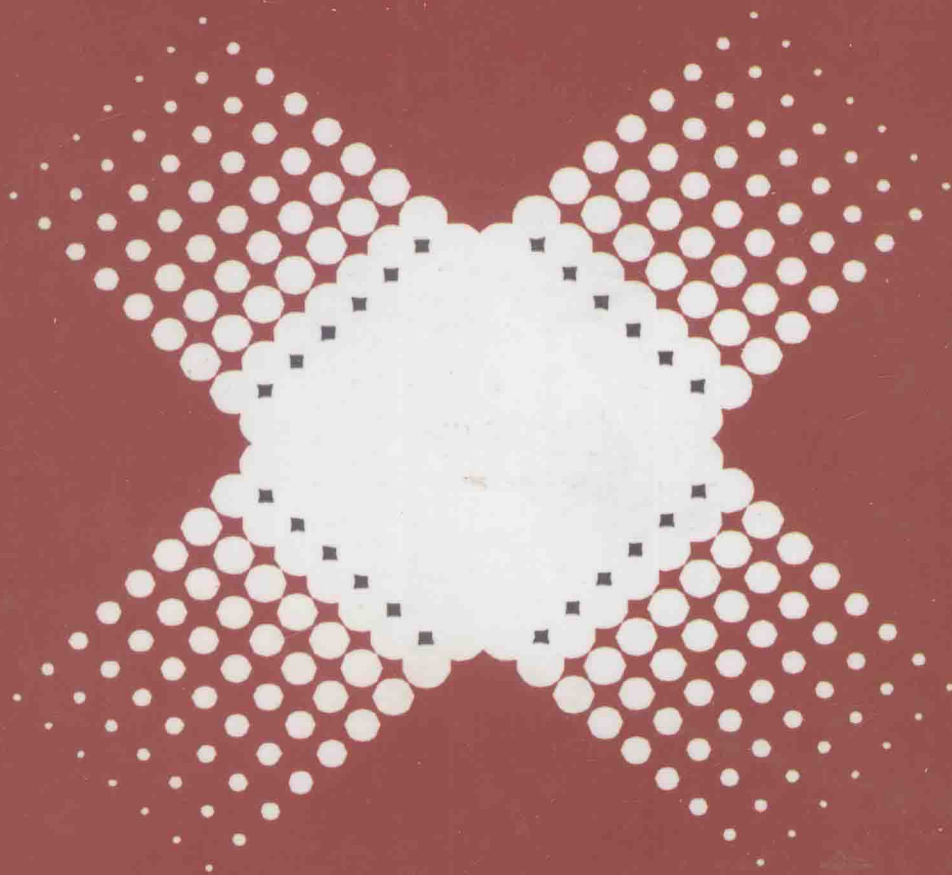


# 弹簧设计与制造工艺新技术 及质量监控实用手册

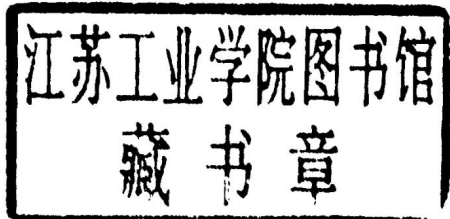
◎ 主编 杨 华



安徽文化音像出版社

# 弹簧设计与制造工艺新技术 及质量监控实用手册

中  
卷



安徽文化音像出版社

## 第十五章 空气弹簧的设计计算

### 第一节 空气弹簧刚度公式的论证

空气弹簧的刚度公式系指垂直刚度和横向刚度公式。

#### 一、垂直刚度公式的论证

##### 1. 垂直刚度公式

根据下面的空气弹簧的垂直刚度公式为：

$$K_{CJ} = p \frac{dF}{dx} - m (p + p_a) \frac{F}{V} \cdot \frac{dV}{dx} \quad (1)$$

$$K_{CJ} = m (p_0 + p_a) (1 + \beta) \frac{F_0^2}{V_0 + V_r} - \alpha p_0 F_0 \quad (2)$$

$$K_C = m (p_0 + p_a) (1 + \beta) \frac{F_0^2}{V_0 + V_f} - \alpha p_0 F_0 + K_{CX} \quad (3)$$

$$\text{其中: } \frac{dF}{dx} = -\alpha F_0$$

$$\alpha = \frac{2}{R} \mu_1 (\varphi, \theta)$$

$$\mu_1 (\varphi, \theta) = \frac{\sin(\varphi + \theta) + (\pi + \varphi + \theta) \sin\varphi \sin\theta}{A}$$

$$A = 2 + 2\cos(\varphi + \theta) + (\pi + \varphi + \theta) \sin(\varphi + \theta)$$

$$\frac{dV}{dx} = -F_0 (1 + \beta)$$

$$\beta = \frac{r^2}{R^2} \mu_2 (\varphi, \theta)$$

$$\mu_2 (\varphi + \theta) = 1 + \frac{(\pi + \varphi + \theta) [\sin(\varphi + \theta) + (\pi + \varphi + \theta) \sin\varphi \sin\theta] + (\sin\theta - \sin\varphi)^2}{A}$$

式中:  $K_{CJ}$ ——空气弹簧计算垂直刚度 (N/m);

$K_C$ ——空气弹簧垂直刚度 (N/m);

$m$ ——多变指数, 静态  $m = 1$ ; 绝热状态  $m = 1.4$ , 一般取  $m = 1.3 \sim 1.4$ ;

$p_0$ ——在设计位置时的空气弹簧内部气压 (表压) (Pa);

$p_a$ ——大气压力,  $p_a = 100\text{kPa}$ ;

$F_0$ ——在设计位置时的有效承压面积,  $F_0 = \pi R^2$  ( $\text{m}^2$ );

$R$ ——有效承压面积的半径 ( $\text{m}$ );

$V_0$ ——在设计位置时, 空气弹簧本体的容积 ( $\text{m}^3$ );

$V_f$ ——附加空气室的容积 ( $\text{m}^3$ );

$r$ ——在设计位置时, 空气弹簧自由圆弧的内半径 ( $\text{m}$ );

$K_{CX}$ ——橡胶囊的垂直刚度 ( $\text{N/m}$ );

$\frac{dF}{dx}$ ——空气弹簧的有效承压面积变化率 ( $\text{m}$ );

$\frac{dV}{dx}$ ——空气弹簧的容积变化率 ( $\text{m}^2$ );

$\alpha$ ——几何形状系数 ( $1/\text{m}$ );

$\beta$ ——几何形状系数。

## 2. 垂直刚度公式的论证

从垂直刚度公式 (3) 中可以看出, 几何形状系数  $\alpha$  和  $\beta$  是由橡胶囊的几何形状决定的; 空气弹簧在设计位置时的有效承压面积  $F_0$ 、内压  $p_0$ 、本体的容积  $V_0$  和附加空气室的容积  $V_f$ , 是由空气弹簧的使用条件和容量决定的; 多变指数  $m$  是由空气弹簧的工作状态 (静态或动态) 决定的; 橡胶囊的垂直刚度  $K_{CX}$  是由橡胶囊本体的结构决定的。

(1) 垂直刚度  $K_{CJ}$  与几何形状系数  $\alpha$ 、 $\beta$  的关系。刚度  $K_{CJ}$  与  $\alpha$ 、 $\beta$  的关系, 主要是  $K_{CJ}$  与  $\mu_1(\varphi, \theta)$ 、 $\mu_2(\varphi, \theta)$  的关系。

$\mu_1(\varphi, \theta)$  与内角  $\varphi$ 、外角  $\theta$  的关系曲线如图 15-1 所示。由图中大致可以看出:

当  $\varphi > 0^\circ$ ,  $\theta > -13^\circ$  时,  $\mu_1(\varphi, \theta) > 0$ ,  $\alpha > 0$ , 则 (2) 式中的第 2 项的绝对值大于零,  $K_{CJ}$  减小;

当  $\varphi$  在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  之间,  $\theta < -13^\circ$ , 或  $\varphi < 20^\circ$ ,  $\theta > -13^\circ$  时,  $\mu_1(\varphi, \theta) < 0$ ,  $\alpha < 0$ , 则 (2) 式中的第 2 项变成正值,  $K_{CJ}$  增大;

当  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$  时,  $\mu_1(\varphi, \theta) = 0$ ,  $\alpha = 0$ , 则:

$$K_{CJ} = m(p_0 + p_a)(1 + \beta) = \frac{F_0^2}{V_0 + V_f} \quad (15-1)$$

$\mu_2(\varphi, \theta)$  与内角  $\varphi$ 、外角  $\theta$  的关系曲线图 15-2 所示。由图中大致可以看出:

当  $\varphi$  在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  之间时,  $\theta < -20^\circ$ , 或  $\varphi > -40^\circ$ ,  $\theta > -20^\circ$  时,  $\mu_2(\varphi, \theta)$  值大致在  $-0.6 \sim 0.4$  之间。除此之外,  $\mu_2(\varphi, \theta) > 0.4$ 。在  $\beta > 0$  时,  $K_{CJ}$  值稍有增大; 在  $\beta < 0$  时,  $K_{CJ}$  值稍有减小。

由于  $\beta = \frac{r^2}{R^2} \mu_2(\varphi, \theta)$ , 所以在  $R \gg r$  时,  $\beta$  值如占  $K_{CJ}$  值的 1% 以下, 对  $K_{CJ}$  值影响很小, 可以略去不计。但当  $r$  值较大,  $R$  值较小时, 则  $\beta$  值不应忽略。

(2) 垂直刚度  $K_{CJ}$  与空气弹簧在设计位置时的内压  $p_0$ 、有效承压面积  $F_0$  的关系。空气弹簧是在支承一定载荷  $W$  下工作的, 即  $W = F_0 p_0$ 。当  $W$  一定时,  $F_0$  和  $p_0$  成反比。(2) 式中的第 1 项与  $F_0^2$ 、 $p_0 + p_a$  成正比。因此, 增加  $p_0$ , 减小  $F_0$ , 则使第 1 项值减小。为便于讨论, 把 (2) 式中的第 2 项改写成  $2\pi\mu_1(\varphi, \theta) R p_0$ , 在  $\mu_1(\varphi, \theta)$  不变

时, 增加  $p_0$  值 (减小  $R$  值), 其绝对值增加。由于第 2 项为负号, 且  $\mu_1(\varphi, \theta)$  又有三种情况, 即: “正”、“负”、“零”, 那么, 在三种不同的情况下, 增加  $p_0$  值, 空气弹簧的垂直刚度  $K_{CJ}$  是增加, 还是减小?

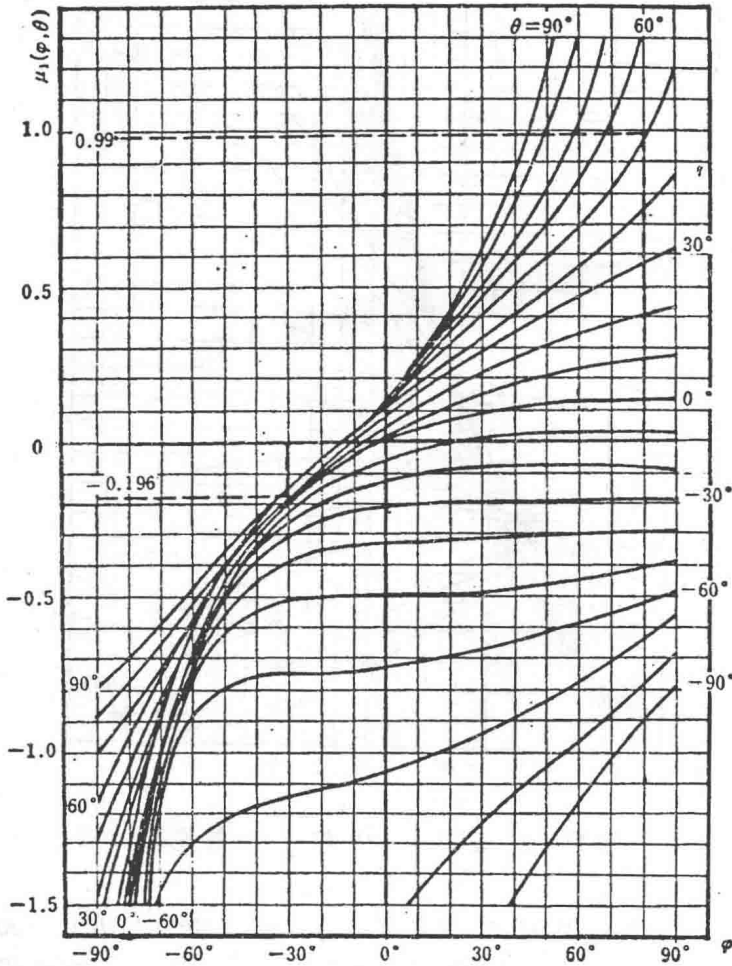


图 15-1  $\mu_1(\varphi, \theta)$  与  $\varphi, \theta$  的关系

当  $\mu_1(\varphi, \theta) = 0$  时, 则第 2 项为零, 刚度  $K_{CJ}$  成为 (15-1) 式。增加  $p_0$  时,  $K_{CJ}$  减小。

当  $\mu_1(\varphi, \theta) < 0$  时, 第 2 项为正。增加  $p_0$  时, 第 1 项减小得快; 第 2 项增加得慢, 则  $K_{CJ}$  仍减小。

当  $\mu_1(\varphi, \theta) > 0$  时, 第 2 项为负。增加  $p_0$  时, 由于第 2 项绝对值增加, 则  $K_{CJ}$  迅速减小。当第 1 项和第 2 项相等时, 则  $K_{CJ}$  为零; 当第 1 项小于第 2 项时, 则  $K_{CJ}$  为负值。

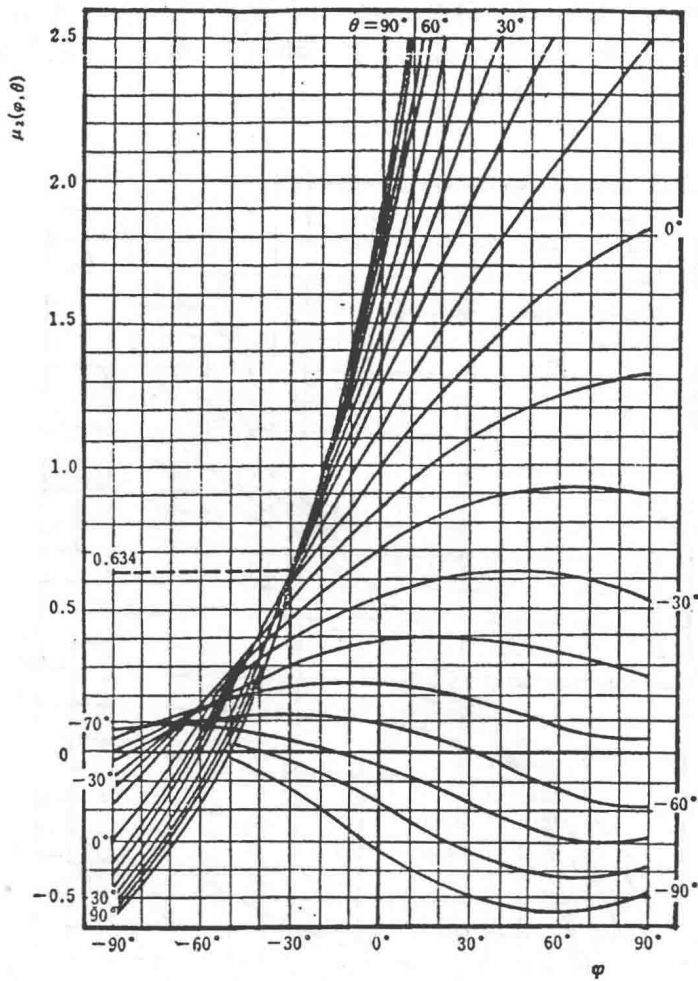


图 15-2  $\mu_2(\varphi, \theta)$  与  $\varphi, \theta$  的关系

为具体说明上述结果，根据 (2) 式，绘制  $S-30^\circ \times 30^\circ$  型和  $B80^\circ \times 50^\circ$  型两种空气弹簧在载荷  $W$  一定时  $K_{CJ} - p_0$  的关系曲线，如图 15-3 所示。 $S-30^\circ \times 30^\circ$  型空气弹簧支承的载荷  $W = 77\text{kN}$ ， $r = 3.5 \times 10^{-2}\text{m}$ ， $\mu_1(-30^\circ, 30^\circ) = -0.196 < 0$ ， $\mu_2(-30^\circ, 30^\circ) = 0.634$ ， $V_0 + V_f = 55\text{L}$ ， $m = 1$ ； $B80^\circ \times 50^\circ$  型空气弹簧支承的载荷  $W = 81\text{kN}$ ， $r = 3.8 \times 10^{-2}\text{m}$ ， $\mu_1(80^\circ, 50^\circ) = 0.99 > 0$ ， $\mu_2(80^\circ, 50^\circ) = 6.4$ ， $V_0 + V_f = 30\text{L}$ ， $m = 1$ 。由图中可以看出，二者的刚度  $K_{CJ}$  都随压力  $p_0$  的增加而减小。前者由于  $\mu_1(-30^\circ, 30^\circ)$  为负值， $K_{CJ}$  减小缓慢；后者由于  $\mu_1(80^\circ, 50^\circ)$  为正值， $K_{CJ}$  减小迅速，很快为零，甚至变成负值，这一点必须充分注意。

因此，欲获得较低的自振频率，就要尽量减小空气弹簧的垂直刚度。在空气弹簧上支承的载荷一定时，在空气源的压力允许的情况下，可尽量提高空气弹簧的内压，但在  $\mu_1(\varphi, \theta) > 0$  时要慎重。

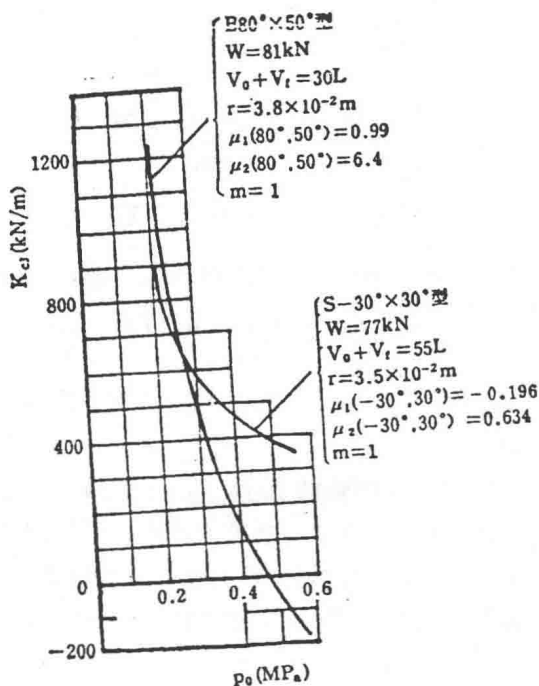


图 15-3  $W$  一定时,  $K_{CJ} - p_0$  的关系曲线图

提高空气弹簧的内压  $p_0$ , 势必减小空气弹簧有效承压面积的半径  $R$ , 但在曲数较多时, 应注意其稳定性。在  $R=0$  时, 空气弹簧就变成一个半径为  $r$  的球, 此时  $F_0=0$ ,  $W=0$ 。一个球不管其内压多么大, 也不可能承受载荷。

在一般情况下, 提高空气弹簧的内压, 橡胶囊的强度是没有问题的。试验表明: 两层帘线的橡胶囊, 在水压达到 3600kPa 时才爆破; 4 层帘线的橡胶囊在水压达到 4500kPa 时也未破裂。一般空气源的压力为 800kPa, 常用的为 600kPa。如果取橡胶囊的安全工作压力为 2000kPa, 在空气源的压力为 800kPa 时, 其安全系数为 2.5。

(3) 垂直刚度  $K_{CJ}$  与空气弹簧在设计位置时的内容积  $V_0$  和附加空气室容积  $V_f$  的关系。由 (2) 式第 1 项可知: 容积  $V_0 + V_f$  对刚度  $K_{CJ}$  的影响是很大的, 往往用增加附加空气室容积  $V_f$  的办法减小刚度  $K_{CJ}$  值。由于结构和安装位置所限, 空气弹簧本体的容积  $V_0$  不可能设计得太大, 只能增大  $V_f$ 。与钢弹簧相比, 这就是空气弹簧得天独厚的特点。增加  $V_f$ , 不一定能使  $K_{CJ}$  值无限地减小, 在不同的情况下有不同的最小值, 有时还会出现负值。

在  $\mu_1(\varphi, \theta) < 0$ ,  $V_f \rightarrow \infty$  时, 则:

$$\lim_{V_0 + V_f \rightarrow \infty} K_{CJ} = K_{CJ\min} = |ap_0 F_0|$$

$$\text{则最低自振频率 } v_{\min} = \frac{\sqrt{g}}{2\pi} \sqrt{\frac{|ap_0 F_0|}{W}} \approx 5\sqrt{|\alpha|} \quad (15-2)$$

在  $\mu_1(\varphi, \theta) = 0, V_f \rightarrow \infty$  时, 则:

$$\lim_{V_0 + V_f \rightarrow \infty} K_{CJ} = K_{CJ\min} = 0, v = 0。$$

在  $\mu_1(\varphi, \theta) > 0$  时,  $V_f = \frac{m(p_0 + p_a)(1 + \beta)F_0}{\alpha p_0} - V_0$ , 则  $K_{CJ} = 0$ ;  $V_f > \frac{m(p_0 + p_a)(1 + \beta)F_0}{\alpha p_0} - V_0$ , 则  $K_{CJ}$  为负值, 没有意义。

附加空气室的容积  $V_f$ , 用改写的 (2) 式进行计算。即:

$$V_f = \frac{m(p_0 + p_a)(1 + \beta)F_0^2}{K_{CJ} + \alpha p_0 F_0} - V_0 \quad (15-3)$$

用上式确定  $V_f$  值时, 根据使用要求, 进行多种计算, 绘制空气弹簧的  $K_{CJ} - V_0 + V_f + V_f$  曲线图, 再寻求合理值。

图 15-4 为 S-30°×30°型空气弹簧的  $K_{CJ} - V_0 + V_f$  与  $v - V_0 + V_f$  的关系曲线。由于  $\mu_1(-30^\circ, 30^\circ) < 0$ ,  $K_{CJ}$  值随  $V_0 + V_f$  值的增加而减小, 开始减小很快, 后来减小越来越慢; 自振频率  $v$  相应地随  $V_0 + V_f$  值的增加也减小, 开始时减小很快, 后来趋于平缓。在  $V_0 + V_f$  为 80L 时,  $v$  在 1Hz 左右。若再增加附加空气室的容积, 自振频率  $v$  减小很少。

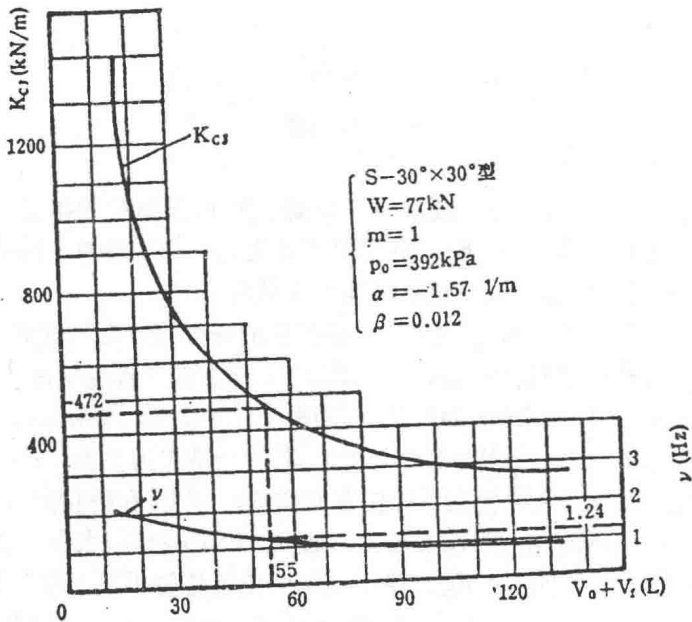


图 15-4  $K_{CJ} - V_0 + V_f$ 、 $v - V_0 + V_f$  的关系曲线图

显而易见, 为降低空气弹簧的刚度而获得较低的自振频率, 增加附加空气室的容积是最简便的办法。但是, 不能任意增大其容积, 应在保证空气弹簧性能的前提下, 根据结构限制和经济效果两方面来考虑, 选择合理的容积。否则, 附加空气室结构庞大, 将浪费大量的压缩空气, 既不合理, 又不经济。对几何形状系数  $\alpha$  大于零的空气弹簧,



在确定附加空气室的容积时，更要特别注意，严防刚度  $K_{CJ}$  等于零，更不能变成负值。

(4) 空气弹簧刚度  $K_{CJ}$  和多变指数  $m$  的关系。空气弹簧由于工作状态不同，静刚度和动刚度是不同的，这也是与钢弹簧的主要区别之一。刚度  $K_{CJ}$  受多变指数  $m$ 、几何形状系数  $\alpha$ 、折算高度  $H$  (主要是附加空气室的容积  $V_f$ ) 的影响。计算空气弹簧静刚度时，视空气弹簧内气体为等温变化过程，取多变指数  $m = 1$ ；计算空气弹簧动刚度时，视空气弹簧内气体为绝热过程，取多变指数  $m = 1.3 \sim 1.4$ 。动刚度与静刚度的比值以  $\lambda$  表示，称为空气弹簧的动倍率。

$$\lambda = \frac{K_{Cd}}{K_{CJ}} = \frac{m (p_0 + p_a) (1 + \beta) \frac{F_0^2}{V_0 + V_f} - \alpha F_0 p_0}{(p_0 + p_a) (1 + \beta) \frac{F_0^2}{V_0 + V_f} - \alpha F_0 p_0}$$

式中： $\lambda$ ——空气弹簧刚度的动倍率；

$K_{Cd}$ ——空气弹簧垂直动刚度 ( $m > 1$ ) ( $N/m$ )；

$$\text{令：} \quad \left( \frac{p_0}{p_0 + p_a} \right) \left( \frac{\alpha}{1 + \beta} \right) H = \Omega, \\ H = \frac{V_0 + V_f}{F_0}$$

$$\text{则：} \quad \lambda = \frac{m - \Omega}{1 - \Omega} \quad (15-4)$$

式中： $H$ ——空气弹簧的折算高度 ( $m$ )。

由 (15-4) 式可以看出：

当  $\mu_1 (\varphi, \theta) > 0$  时， $\alpha > 0$ ， $1 > \Omega > 0$ ，则  $\lambda > m$ ；

当  $\mu_1 (\varphi, \theta) < 0$  时， $\alpha < 0$ ， $\Omega < 0$ ，则  $m > \lambda > 1$ ；

当  $\mu_1 (\varphi, \theta) = 0$  时， $\alpha = 0$ ， $\Omega = 0$ ，则  $\lambda = m$ 。

图 15-5 为三种类型空气弹簧在  $m = 1.4$  时的  $\lambda - H$  的关系曲线。下边的曲线是  $S - 30^\circ \times 30^\circ$  型空气弹簧的  $\lambda - H$  曲线。由于  $\mu_1 (-30^\circ, 30^\circ) < 0$ ，动倍率  $\lambda$  在 1.4 和 1 之间，随折算高度  $H$  的增加而减小。中间的曲线是  $B0^\circ \times 0^\circ$  型空气弹簧的  $\lambda - H$  曲线，由于  $\mu_1 (0^\circ, 0^\circ) = 0$ ，动倍率  $\lambda = m = 1.4$ ，与折算高度  $H$  无关。上边的曲线是  $B0^\circ \times 20^\circ$  型空气弹簧的  $\lambda - H$  曲线，由于  $\mu_1 (0^\circ, 20^\circ) > 0$ ，动倍率  $\lambda > 1.4$ ，随折算高度的增加，呈上升趋势。

为讨论这一上升趋势，仍以  $B80^\circ \times 50^\circ$  型空气弹簧为例查图 15-1 知， $\mu_1 (80^\circ, 50^\circ) = 0.99 > 0$ ，取  $F_0 = 0.21m^2$ ， $r = 3.8 \times 10^{-2}m$ ，在支承载荷  $W$  为 81kN 时，绘制  $\lambda - H$  曲线图，如图 15-6 所示。在  $V_0 + V_f = 30L$ ，折算高度  $H = 0.141m$  时，动倍率  $\lambda = 2.5$ 。就是说，这种空气弹簧在  $H = 0.141m$  时的动刚度为静刚度的 2.5 倍。从图中可以看出：折算高度增加，动倍率显著上升，甚至趋向无限大。这一点在设计时必须予以充分注意。

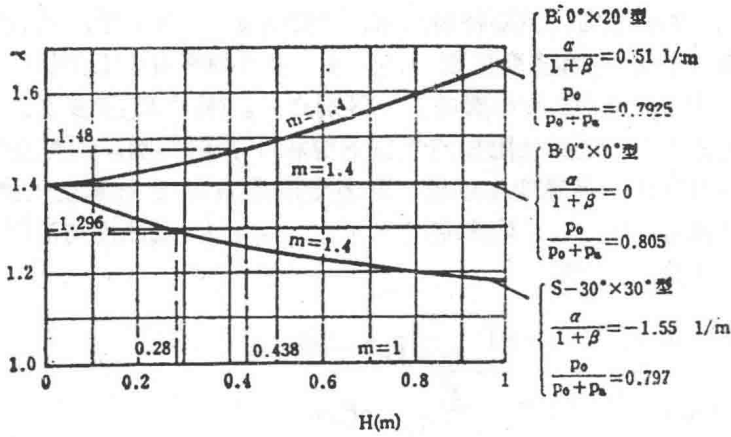


图 15-5  $\lambda - H$  的关系曲线图

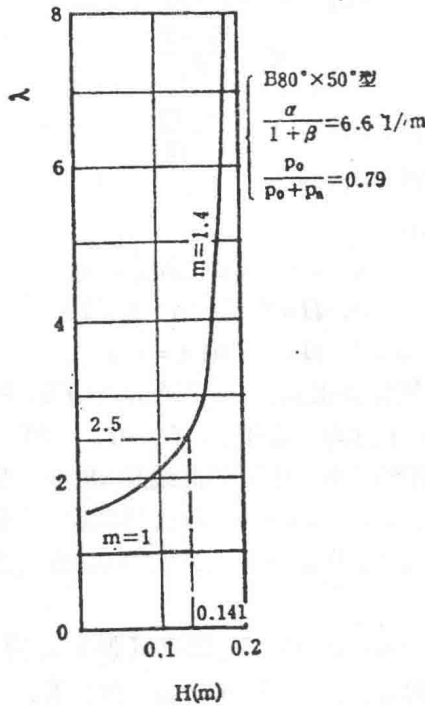


图 15-6 在  $\mu_1(\varphi, \theta) > 0$  时,  $\lambda - H$  的关系曲线图

(5) 垂直刚度  $K_C$  和橡胶囊垂直刚度  $K_{Cx}$  的关系。橡胶囊主要分为内层胶、外层胶和帘线层等。内层胶主要起密封作用, 要有良好的气密性; 外层胶主要起保护作用, 能防老化、龟裂, 耐微量酸、碱、油侵蚀; 帘线可保证强度。一般帘线为两层, 最多不超过 4 层。橡胶囊的厚度一般不超过 6mm。根据国内外试验表明, 橡胶囊的垂直刚度  $K_{Cx}$

值很小，一般可略去不计。因此，空气弹簧的垂直刚度用 (2) 式计算即可。

## 二、横向刚度公式的论证

1. 横向刚度公式：根据下面的空气弹簧的横向刚度公式为：

$$K_{HJ} = \pi R p_0 \frac{dh}{dy} \pi \mu_3 (\varphi, \theta) R p_0 \quad (1)$$

$$K_H = \pi \mu_3 (\varphi, \theta) R p_0 + K_{HX} \quad (2)$$

$$\mu_3 (\varphi, \theta) = \frac{(\pi + \varphi + \theta) \cos \varphi \cos \theta - \sin (\varphi + \theta)}{A}$$

其中： $\frac{dh}{dy} = \mu_3 (\varphi, \theta)$

式中： $K_{HJ}$ ——空气弹簧计算横向刚度 (N/m)；

$K_H$ ——空气弹簧横向刚度 (N/m)；

$K_{HX}$ ——橡胶囊的横向刚度 (N/m)；

$\frac{dh}{dy}$ ——自由圆弧的中心高度变化率。

2. 横向刚度公式的论证：从横向刚度公式 (2) 中可以看出，空气弹簧的横向刚度  $K_H$  为计算横向刚度  $K_{HJ}$  和橡胶囊横向刚度  $K_{HX}$  之和。横向计算刚度  $K_{HJ}$  与由几何形状决定的系数  $\mu_3 (\varphi, \theta)$ 、空气弹簧在设计位置时的有效承压面积半径  $R$ 、内压  $p_0$  成正比。

(1) 横向刚度  $K_{HJ}$  与系数  $\mu_3 (\varphi, \theta)$  的关系。 $\mu_3 (\varphi, \theta)$  与内角  $\varphi$ 、外角  $\theta$  的关系曲线如图 15-7 所示。由图中可以看出：

当  $\varphi$  在  $-90^\circ \sim 90^\circ$  之间， $\theta < 70^\circ$  时， $\mu_3 (\varphi, \theta) > 0$ ，可以选择任意值。但仍须注意  $\mu_1 (\varphi, \theta)$  以及  $\mu_2 (\varphi, \theta)$  值，尤其是  $\mu_1 (\varphi, \theta)$  值，须予以权衡。

当  $\mu_3 (\varphi, \theta) \leq 0$  时，则横向刚度  $K_{HJ}$  为零或变为负值，说明空气弹簧处于失稳状态，必须充分注意。

(2) 横向刚度  $K_{HJ}$  与空气弹簧在设计位置时的有效承压面积半径  $R$ 、内压  $p_0$  的关系。由 (1) 式可知，减小  $R$  或  $p_0$ ，都能使横向刚度  $K_{HJ}$  减小。由于空气弹簧支承的载荷  $W$  是一定的，而  $W = \pi R^2 p_0$ ，因此，减小  $R$  比减小  $p_0$  能使横向刚度  $K_{HJ}$  减小得更快。这与垂直刚度的情况正好相反。因此，对空气弹簧既要求降低垂直刚度，又要求降低横向刚度时，二者必须兼顾，不能为了降低垂直刚度而过大地减小  $R$  值，增加  $p_0$  值。

(3) 如果用单摆原理，把横向刚度化为当量摇枕吊杆长度时，可得：

$$l = \frac{W}{K_{HJ}} = \frac{R}{\mu_3 (\varphi, \theta)}, \quad (15-5)$$

式中： $l$ ——当量吊杆长度 (m)。

(4) 横向刚度  $K_H$  与橡胶囊横向刚度  $K_{HX}$  的关系。橡胶囊的横向刚度，对空气弹簧的横向刚度影响很大。目前国内外尚无计算资料，只能通过对空气弹簧进行各种试验来摸索规律。

橡胶囊的横向刚度与橡胶囊的厚度、硬度，帘线的种类、层数、角度，橡胶囊和上盖、下座的连接方式以及空气弹簧的高度、曲线有关。下面只能通过分析和试验予以定

性说明：

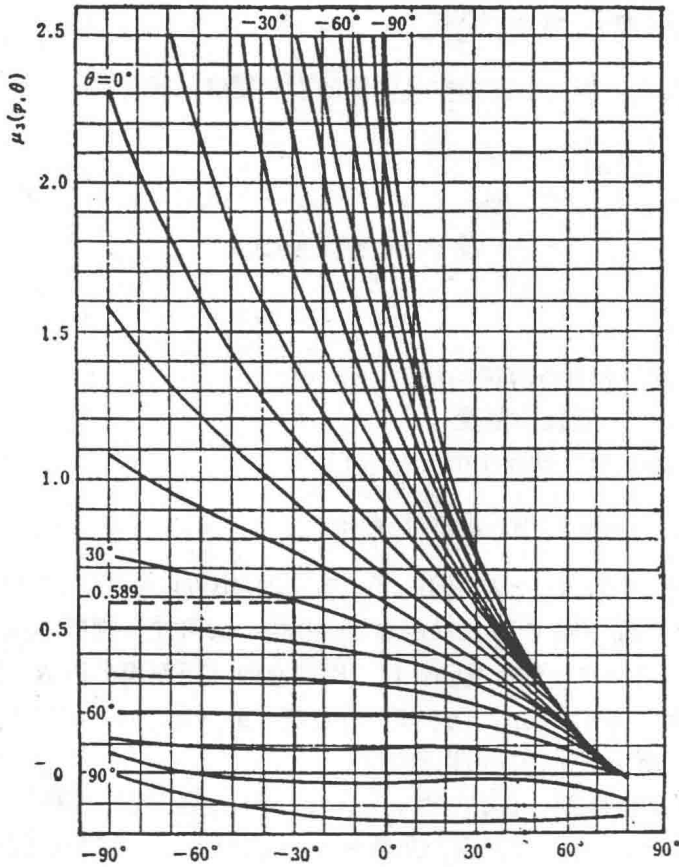


图 15-7  $\mu_3(\varphi, \theta)$  与  $\varphi$ 、 $\theta$  的关系

①橡胶囊的厚度薄、橡胶的硬度低，则横向刚度小，反之亦然。

②帘线的种类和层数不同，橡胶囊的横向刚度也不相同。棉帘线比人造丝帘线的横向刚度大，而人造丝帘线又比尼龙丝帘线的横向刚度大。4层帘线比两层帘线的横向刚度大。

③橡胶囊的帘线角度对橡胶囊的横向刚度影响更大。所谓帘线角，系指帘线与空气弹簧子午线间的夹角。为说明帘线角对橡胶囊横向刚度的影响，取不变角的  $B0^\circ \times 0^\circ$  型空气弹簧做试验。该空气弹簧在试验位置时的有效承压面积半径  $R = 0.261\text{m}$ ，橡胶囊的厚度为  $5\text{mm}$ ，两层尼龙帘线，在帘线角不同的情况下，使内压  $p_0 = 500\text{kPa}$ ，在振幅  $y = \pm 30\text{mm}$  时，测其横向变位与横向载荷的关系值，如图 15-8 所示。从图中可见，横向刚度线性性比较好，迟滞回线较小。空气弹簧在规定的  $\pm 30\text{mm}$  以内，横向刚度几乎不变。由于振幅变化很小，帘线角大时，空气弹簧的刚度也增大，迟滞回线有增大的趋势。

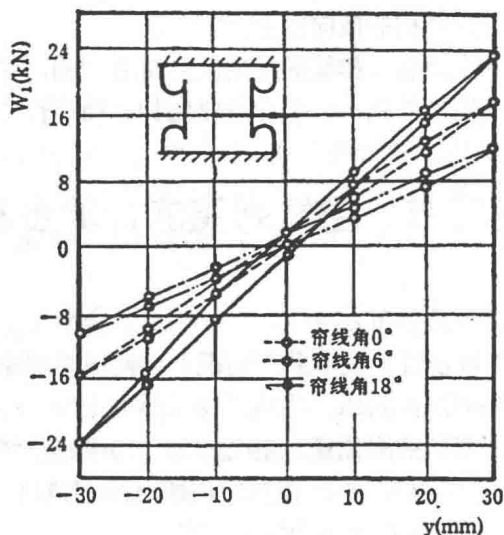


图 15-8 帘线角不同时,  $W_1 - y$  的关系曲线图

仍以  $B0^\circ \times 0^\circ$  型空气弹簧做试验, 改变橡胶囊的帘线角, 把分别不同的内压时所测得的刚度值, 绘制成横向刚度  $K_H - p_0$  关系曲线图, 如图 15-9 所示。图中虚线是用 (1) 式计算出来的  $K_{HJ}$  值。  $K_{HJ}$  值与帘线角为零度时的空气弹簧的横向刚度  $K_H$  值之差, 约为  $70\text{kN/m}$ 。但在帘线角为  $18^\circ$  时, 空气弹簧的横向刚度  $K_H$  则为计算值  $K_{HJ}$  的 2 倍以上。实际上帘线角不能为零度, 只能采用比较小的帘线角。所以, 在设计这种型式空气弹簧的橡胶囊时, 取橡胶囊的横向刚度  $K_{Hx}$  值为  $50 \sim 100\text{kN/m}$ 。这个值变化范围较大, 应根据内压大小而定, 内压高时取得大一些, 内压低时则取得小一些。对某一种型式的空气弹簧, 还是经过精确试验之后, 确定橡胶囊的垂直刚度  $K_{Hx}$  值为宜。

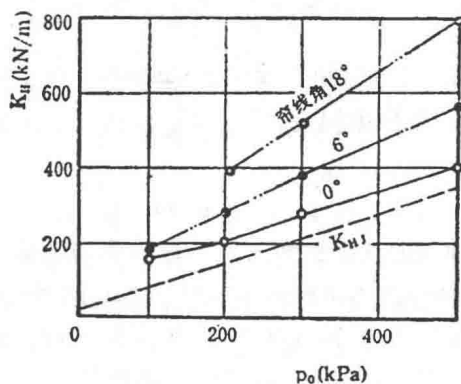


图 15-9 帘线角不同时,  $K_H - p_0$  的关系曲线图

④空气弹簧的橡胶囊与上盖、下座的连接方式，对横向刚度也有影响。用螺栓紧固的密封结构，比靠内压自封结构的横向刚度大。

⑤橡胶囊曲数的多少，对空气弹簧的横向刚度也有影响。橡胶囊的曲数多，空气弹簧的高度增加，其横向刚度也能减小，但会带来结构、稳定性方面的问题，不予推荐。

## 第二节 空气弹簧的计算步骤

空气弹簧的计算程序大致如下：

(1) 根据构造物的实际工况，支承载荷情况，确定只是解决垂直振动问题，还是既解决垂直振动，又解决横向振动问题。明确承受载荷的大小，构造物对自振频率或刚度的要求，了解安装空气弹簧的空间位置，空气源的压力等基本情况。

(2) 根据支承的载荷  $W$ ，确定空气弹簧的内压  $p_0$  和有效承压面积的半径  $R$ 。载荷  $W$  等于内压  $p_0$  和有效承压面积  $F_0$  的乘积：

$$W = F_0 p_0 = \pi R^2 p_0,$$

则：

$$p_0 = \frac{W}{\pi R^2} \quad (15-6)$$

根据最大载荷  $W_{\max}$  和最小载荷  $W_{\min}$ ，确定空气弹簧内空气压力变化范围。

由于空气弹簧在工作过程中产生振动，因此，在计算最大内压时，必须考虑动荷系数。则：

$$p_{\max} = \frac{(1 + \eta) W_{\max}}{\pi R^2} \quad (15-7)$$

式中： $\eta$ ——动荷系数，一般取  $\eta = 0.2$ 。

通常对最小载荷  $W_{\min}$  不考虑动荷系数，则：

$$p_{\min} = \frac{W_{\min}}{\pi R^2} \quad (15-8)$$

一般空气弹簧都设有高度控制阀。空气源的空气压力（或通过减压阀后的空气压力）经过高度控制阀，要产生压力损失，取其压力损失  $\Delta p_1 = 30 \sim 40 \text{ kPa}$ ，空气源的压力以  $p_y$  表示，则：

$$p_{\max} \leq p_y - \Delta p_1$$

$p_{\min}$  的选取，视空气弹簧的气密性而定，随橡胶囊与上盖、下座接触处的连接结构而异。如采用螺栓紧固，最小压力可定得小一些，甚至不考虑；如采用自封型式，则可定得大一些。为确保空气弹簧在低气压时的气密性，取其最小的内压  $\Delta p_2 = 100 \sim 150 \text{ kPa}$ 。为此，选取的压力值  $p_{\min}$ ， $p_{\max}$  应满足下式要求：

$$p_{\min} \geq \Delta p_1, \quad p_{\max} \leq p_y - \Delta p_1$$

在空气源的压力  $p_y = 600 \text{ kPa}$  时，将上式改写如下：

$$p_{\min} \geq 150 \text{ kPa}, \quad p_{\max} \leq 560 \text{ kPa} \quad (15-9)$$

如果只考虑垂直刚度,就尽可能提高内压,则可减小刚度,降低自振频率,还能使结构紧凑。

如果既考虑垂直刚度,又考虑横向刚度,对内压的确定必须兼顾。在任何载荷下,空气弹簧的内压必须满足(15-9)式的要求。

(3) 角度参数  $\varphi$ 、 $\theta$  的选择: 角度参数  $\varphi$ 、 $\theta$  的选择,根据图 15-1、图 15-2、图 15-7 查出系数  $\mu_1(\varphi, \theta)$ 、 $\mu_2(\varphi, \theta)$  和  $\mu_3(\varphi, \theta)$  值的大小,尤其是  $\mu_1(\varphi, \theta)$  和  $\mu_3(\varphi, \theta)$  值,至关重要,必须慎重权衡,不宜取  $\mu_1(\varphi, \theta) > 0$ ,更不能取  $\mu_3(\varphi, \theta) \leq 0$ 。

(4) 橡胶囊自由圆弧内半径  $r$  的确定: 自由圆弧内半径  $r$  的大小对  $\beta$  值有影响,但影响不大,其大小主要是由空气弹簧上下、左右的最大位移量决定。

(5) 附加空气室容积  $V_f$  的确定: 前面已论证过,空气弹簧本体的容积  $V_0$  和附加空气室容积  $V_f$  之和对空气弹簧的垂直刚度影响很大,经常用增加它们容积的办法,降低空气弹簧的垂直刚度,获得较低的自振频率。可是,空气弹簧本体的尺寸,往往由于结构限制,尤其是在考虑横向性能时,不需要设计太高,相反,应尽量设计得低一些。因此,空气弹簧本体的容积  $V_0$  不可能设计太大,这样只能加大附加空气室的容积。附加空气室的容积  $V_f$ ,根据对空气弹簧的使用性能,按照(15-3)式进行多种计算,绘制图 15-4 那样的  $K_{CJ} - V_0 + V_f$ 、 $v - V_0 + V_f$  的曲线来确定合理的容积。

附加空气室的设置,应根据空气弹簧相邻部件的结构情况而定,要尽可能利用与其相连接的部件兼做,既可用空气弹簧下边的,也可用空气弹簧上边的,如结构限制达不到要求时,可上、下连接部件并用,仍达不到要求时,只好把附加空气室设置在远离空气弹簧的地方,有管路把二者连接起来。管路的粗细要根据附加空气室的容积确定。容积大,管路粗一些;容积小,管路细一些。管路不能设计太细,尤其是空气弹簧振动频率偏高时,严防由于管路太细,阻力系数增大,起不到应有的作用。

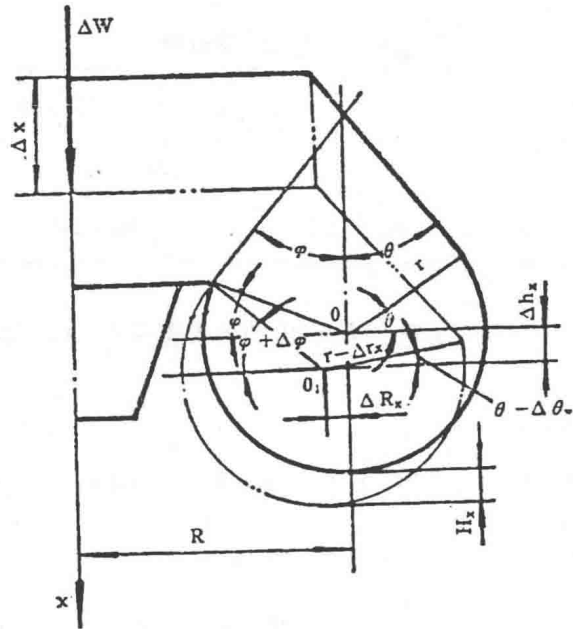
节流孔一般设置在空气弹簧和附加空气室之间。节流孔的阻力系数为节流孔处沿程阻力系数和局部阻力系数之和,一般取 0.8 左右。附加空气室和空气弹簧用管路连接时,如果把管路的沿程阻力系数和局部阻力系数之和,设计在 0.8 左右,可不必另设节流孔。关于节流孔的大小将在第八章中介绍。

(6) 空气弹簧橡胶囊自由圆弧各部分尺寸的确定: 空气弹簧的主要参数: 内角  $\varphi$ 、外角  $\theta$ 、有效承压面积半径  $R$ 、橡胶囊自由圆弧内半径  $r$  确定以后,根据空气弹簧在工作过程中的最大垂直变位量  $\Delta x_{\max}$  或最大横向变位量  $\Delta y_{\max}$ ,计算橡胶囊与上盖、下座接触部位的其他各参数的最大变位量。空气弹簧在无内压时橡胶囊的下降量以及空气弹簧出现异常时的限位量等。这些变位量都是最小的计算值,在实际确定空气弹簧各部分尺寸时,必须留有余地,以保证空气弹簧在任何情况下,不得与相邻的任何物体相碰,才能保证空气弹簧安全、可靠地工作。

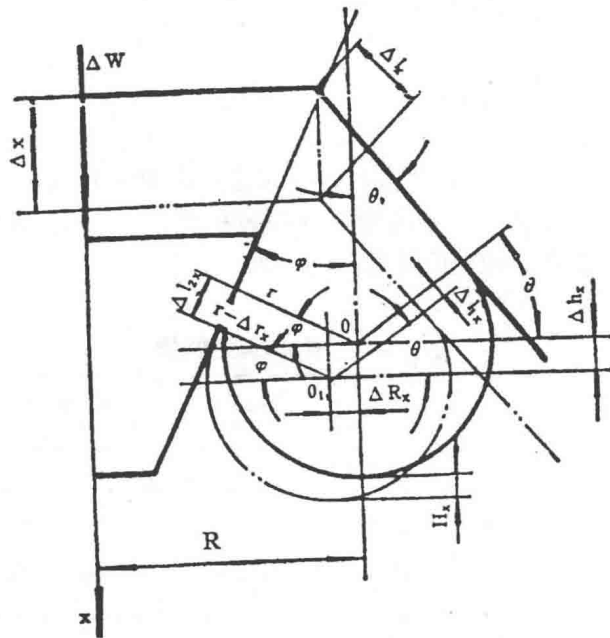
(1) 空气弹簧垂直变位  $\Delta x$  后各参数的变位量。图 15-10 (a)、(b)、(c)、(d) 是内变角、外变角、双变角、不变角型空气弹簧在变位  $\Delta x$  后,各参数变位情况示意图。每种类型空气弹簧参数的变位量见表 15-1。







(c)



(d)

图 15-10 垂直变位  $\Delta x$  时, 各参数的变位

(a) 内变角型空气弹簧的垂直变位; (b) 外变角型空气弹簧的垂直变位; (c) 双变角型空气弹簧的垂直变位; (d) 不变角型空气弹簧的垂直变位