

第一章 仪器制造中的弹性元件

弹性元件为仪器的非常重要的零件之一。

首先我们先来研究一下弹性元件的分类及用途。

§ 1—1 弹性元件的用途及分类

一、弹性元件的用途

1. 储存能量的弹性元件：

它们是把预先加给弹性元件的能量储存起来，在工作过程中，弹性元件再把这些能量放出来，或带动仪器的传动机构、或完成其它的职能。总之，是按一原动机而工作。

例如把钟表的发条预先拧紧，在放开时即可带动钟表机构。自动记录仪器中自动记录纸带的运动亦多为弹簧原动机所带动的，这种弹簧用的很广：如钟表、光学仪器的快门、各种自动记录装置、电报机、电影机及其他特殊用途的仪器。

2. 承受载荷的弹性元件：

这种弹性元件多是作为测量元件的，它们受外力作用而变形，然后再将此变形供给仪器的传动机构，以实现测量的目的。

这种弹簧应用的很广，几乎所有的仪器都运用。

例如：各种压紧程度不同的拉一压弹簧、卷簧、片簧、膜片、膜盒、管弹簧、双金属弹簧等等。

3. 加压零件：

利用弹性元件的变形而产生一定的压力，使其他零件互

相压紧，如压紧型子用的弹簧、滚珠及滚柱离合器中的压紧弹簧等等。

4. 振动元件：

用于声学仪器，测量频率的仪器，测振仪器，钟表摆等等。

二、弹性元件的分类

弹性元件可以按各种不同的标志来进行分类：如按结构、所受的应力、用途、材料等等。我们这里按所受的应力种类，可分为两大类：

1. 承受弯曲应力的弹簧：

1) 螺旋弹簧（发条及游丝）。

属于此类弹簧的有能量储存器、游丝等等，其简图如图 1-1。

2) 卷弹簧（承受弯曲应力的） M 成扭矩作用于弹簧。

3) 片弹簧。

4) 弯弹簧。

2. 承受扭转应力弹簧：

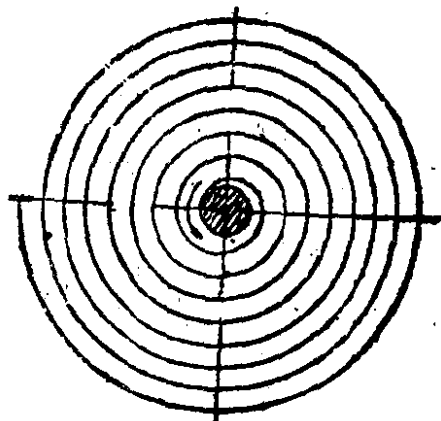


图 1-1 螺旋弹簧

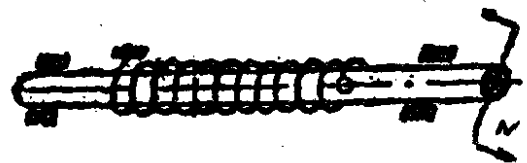


图 1-2 卷簧

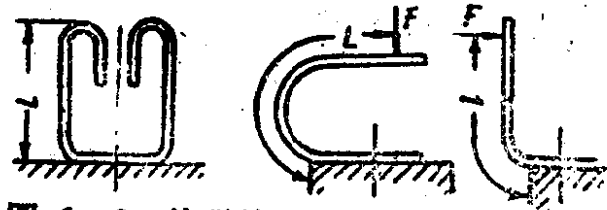
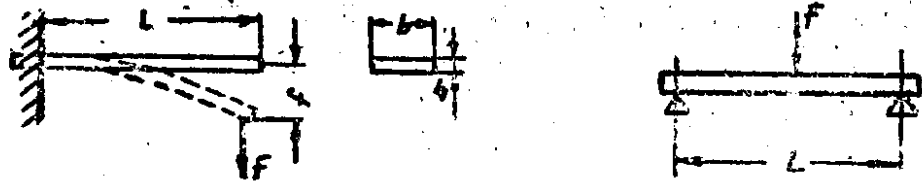


图 1-3 片弹簧

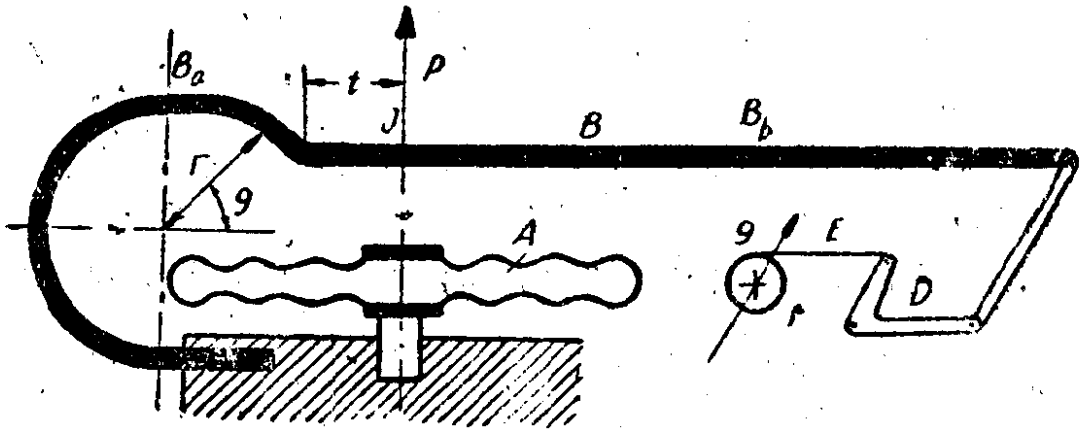


图 1-4 弯弹簧

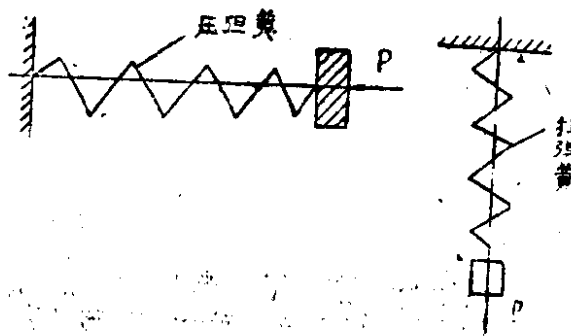


图 1-5 承受扭转应力的卷簧

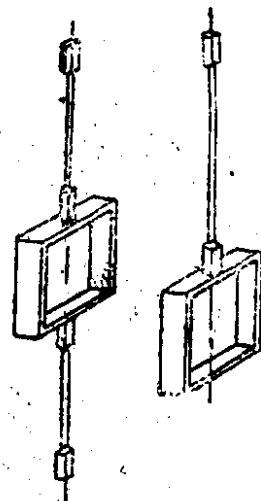


图 1-6 受扭转应力的直簧

1) 卷弹簧 (承受扭转应力及不大的剪切应力)。

2) 直线弹簧。

圆形截面的悬丝, 用的较少。

§ 1—2 制造弹簧用的材料

对于弹簧的材料, 要求在经过适当处理后, 有经久不变的弹性, 很高的强度极限和耐劳极限, 能承受冲击载荷以及有良好的塑性变形等性能。

用来制造弹簧的材料有: 优质碳素钢和有色金属合金 [磷青铜、铍青铜、黄铜、德银、库尼阿尔Б(КУНИАЛЬ Б) 等]。

优质碳素弹簧钢, 价格最便宜, 应用也最广泛。

铬钒弹簧钢, 具有很高的机械性能, 尤其是耐劳强度和抗冲击的能力很高, 因此常在很重要的场合下应用, 例如内燃机中的阀门弹簧, 但是由于价额很贵, 因此, 应用受到限制。

铬锰弹簧钢, 具有很高的机械强度和较好的可淬性, 但抗冲击的能力较低。

硅钢: 机械性能和可淬性都很好, 在含硅量高时可提高抗冲击的能力。缺点是增加表面脱碳和产生石墨化的倾向。

低锰钢: 可淬性好, 表面不易脱碳, 价廉, 因此应用也比较广泛, 缺点是淬火易产生裂纹和有产生热脆性的倾向。

当湿度变化不定, 处于在水、水蒸汽、酸类等促使腐蚀的环境下工作的弹簧, 可采用有色金属合金材料, 如硅锰青铜、锡锌青铜、磷青铜、铍青铜等。铍青铜不仅有很好的抗腐蚀性能, 并且耐劳强度也高, 有持久的弹性稳定性和几乎没有弹性滞后的现象, 因此适用于很重要的承受交变载荷的

場合，是一種很好的彈性元件的材料。

在選擇彈簧材料時，應考慮彈簧的使用條件，功用和重要程度。使用條件是指載荷作用的方式，大小及其循環特性，工作溫度，周圍介質和是否絕緣等情況。

當彈簧用作接觸系統的元件或導流元件時，應選取具有較高的導電率和導熱率的材料。例如磷青銅、黃銅等。

當作用力較大，但要求彈簧撓度不大時，應採用彈性模數較大的材料，如各種鋼，反之如作用力值不大，但需要得到較大的彈簧撓度時，應採用彈性模數較小的材料，如採用銅與銅合金等。（銅的彈性模數 $E = 20 \times 10^3$ 公斤/毫米²，磷青銅的彈性模數 $E = 11 \times 10^3$ 公斤/毫米²）。

當彈簧工作時，可能使其發生很大的變形，在這種情況下就必須選用許用應力值較大的材料。

表 1—1 幾種材料的導電率和導熱率數據

材 料 名 稱	導電率對純銅導電率的百分比	導 熱 率 卡/厘米 ² °C/厘米
銅	98	0.90—0.94
鎳銅 1% Cd	85	0.82
鉍銅 2% Bi 0.5% Cd	23~25	0.25
黃銅	25	0.31
磷青銅	13	0.15~0.20
硬銅	9	0.15

* 1 米長，1 毫米² 截面，硬銅的電阻在 +20°C 下為 0.018 歐。

表 1—2 所列為各種彈簧材料的第一和第二彈性模數，極限許用彎曲應力和極限許用扭轉應力的值。表中都是極限

应力值,在計算中必須引入一定的安全系数 n 。当所用材料的数量有限制或对仪器有使其重量減到最小的要求时,安全系数可降低到1.5,一般固定式的仪器在計算时,取 $n=3\sim 4$,而有些仪器,安全系数达 $8\sim 10$ 。

在以后的計算中,我們將認為所采用的是理想彈性材料,并在彈性极限內工作。

表 1—2 各种彈簧材料的彈性模数和极限許用应力值

材料名称	弹性模数		极限許用应力		成分
	E 公斤/毫米 ²	G 公斤/毫米 ²	$R_{\text{уст}}$ 公斤/毫米 ²	$R_{\text{кп}}$ 公斤/毫米 ²	
鐘表彈簧用鋼	20,000	8,000	220—180	150	碳0.8—1%
帶鋼	20,000	8,000	180—100	70—120	碳0.6—1%
琴絲	20,000	8,000	150—75	50—100	碳0.7—1%
磷青銅	11,000	4,100	60—40	32	銅 32%
德銀	12,500	4,600	50—36	28	磷 8% 銅 65% 錳 13% 鋅 12%
黃銅	9,500	3,500	20—24	18	銅 63% 鋅 37%
鈹銅	13,300	—	60—65		鈹2—2.85% 鋅 0.5% 其他为銅
庫尼阿尔B (КуньяльB)					錳5.5—6.5% 鎢0.2—1.8% 其他为銅

§ 1—3 弹簧原动机的原理与计算

一、弹簧原动机的用途与结构

如前所述，螺絲弹簧（发条）是一个按阿基米德螺綫卷曲的平弹簧，它是作为仪器的原动机而用，采用經過热处理的带鋼制成，应用于各种不同的仪器及器械中，如各种鐘錶机构、信号器、自动記錄装置、电报机、照象机、电影机、光学仪器、尺寸測量仪器及其他各种特殊用途的仪器等。

一般的弹簧原动机是由心軸，卷筒，棘輪装置及主要零件—螺綫弹簧所組成。弹簧的一端固定在軸上，而另一端則固定在卷筒內壁上。所以要将弹簧放入卷筒中，是因为这样可以限制弹簧的外廓尺寸并使弹簧的工作更为可靠。因此采用此种带有卷筒的弹簧是非常合适的，因为它儲存能量最多，同时不仅材料利用的很好，且所占体积及潤滑等方面都較好。

根据結構的不同，弹簧原动机可分为：卷筒不动的和卷筒旋轉的两类。

第一类弹簧原动机如图1—7a所示。

卷筒4 内部装入盘簧，弹簧的一端固定在卷筒壁上，而另一端固定在軸1 上，卷筒的一头有齿圈，卷筒借該齿圈与机构咬合，其另一头用盖封住。在軸1 的正方形部分套上棘輪2，棘輪爪3 挡住在需要的位置上。要上紧弹簧时，即轉动軸1，这样就可以把弹簧紧繞在軸上。由于棘輪2 被爪3 所挡住，故軸不能反向旋轉。在弹簧的作用下，卷筒旋轉并随着使与机构咬合的齿輪也旋轉起来。

当扭紧这种弹簧时，表并不停止工作，因为弹簧力矩此时仍作用在卷筒上。此种結構应用的非常广泛。

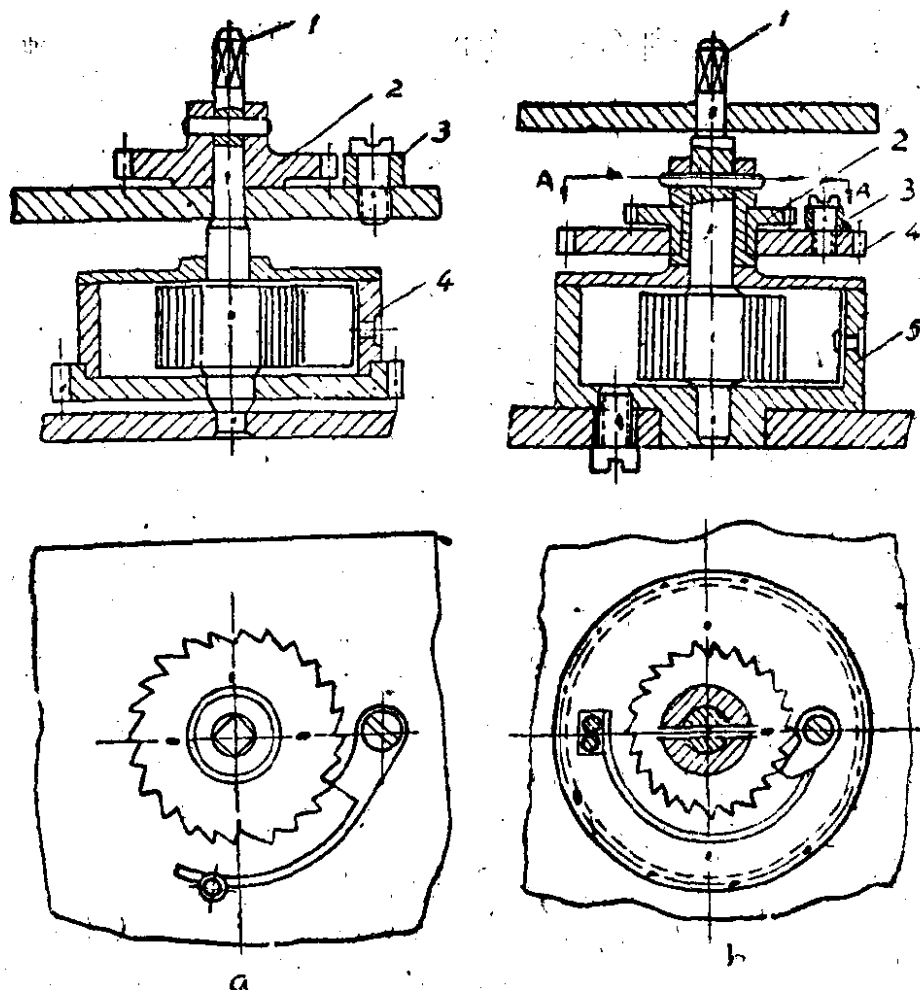


图 1-7 弹簧原动机的结构
a—旋转式 *b*—固定式

第二类弹簧原动机如图 1-7*b* 所示。卷筒 5 用螺钉固定到机构的某一底板上，弹簧内端用销钉固定在轴 1 上，而外端则固定在卷筒内壁上。当扭紧弹簧时轮 4 是不动的，因为它是滑装在轴上，如拧紧弹簧时轴是向右转，则弹簧工作时，轴将向左转，由棘轮 2 的作用带动传动机构动作，当扭紧弹簧时而使轮 4 不能旋转，由于有这个根本性的缺点而限制了它在钟表机构中的应用。

二、发条弹簧所产生的力矩

让我们来研究理想的有载荷的盘簧（图 1-8）这种弹簧

在所有长度上都受到不变的弯曲力矩，圈与圈并不接触，因而圈与圈之間也就沒有摩擦。

这种弹簧所产生的力矩与扭轉角 φ 有关，可用下式表示：

$$M = \frac{EJ}{l} \varphi \quad (1-1)$$

式中 E ——材料的弹性模数（鋼弹簧带的弹性模数 $E = 20000-23000$ 公斤/毫米²）；

J ——弹簧横截面的慣性矩；

l ——弹簧长度；

φ ——扭轉角。

用弹簧的圈数 n ，表示扭轉角 φ 时，可得：

$$\varphi = 2\pi n \quad (1-2)$$

将 φ 的值和 $J = \frac{bh^3}{12}$ 代入公式[1-1]式得：

$$M = \frac{Ebh^3\pi}{6l} \cdot n = cn \quad (1-3)$$

式中 c ——对每一个具体弹簧來說为一常数。

如从图1-9中的曲綫看到的一样，上式指出力矩 M 随弹

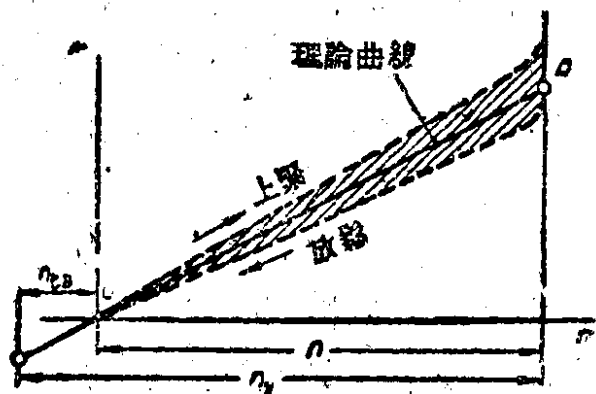
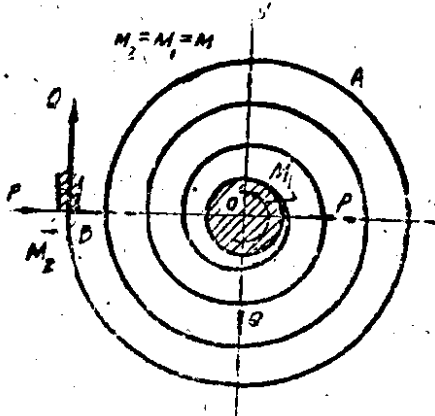


图 1-8 盘簧計算簡图

图 1-9 盘簧的理論图解

簧圈数 n 成直綫变化的規律 (参看直綫 OA)。

但是实际上我們应考虑到, 弹簧完全上紧和放松时, 各圈总是要接触的, 因而圈与圈之間总会有摩擦产生, 所以我們得到的是与理論直綫不同的实际曲綫, 該图解指出上紧弹簧和放松弹簧曲綫之間的差別, 这种差別是由于弹簧圈間摩擦和分子間摩擦所引起的。

实际上分子間摩擦的值很小, 仅占弹簧力矩的2—3%, 而圈間摩擦的損失可能是很大的, 要占弹簧力矩的10—30%, 其大小决定于弹簧外端的固定形式和制造质量。

如果盘簧放在发条鼓中, 則实际的图解将稍有不同。

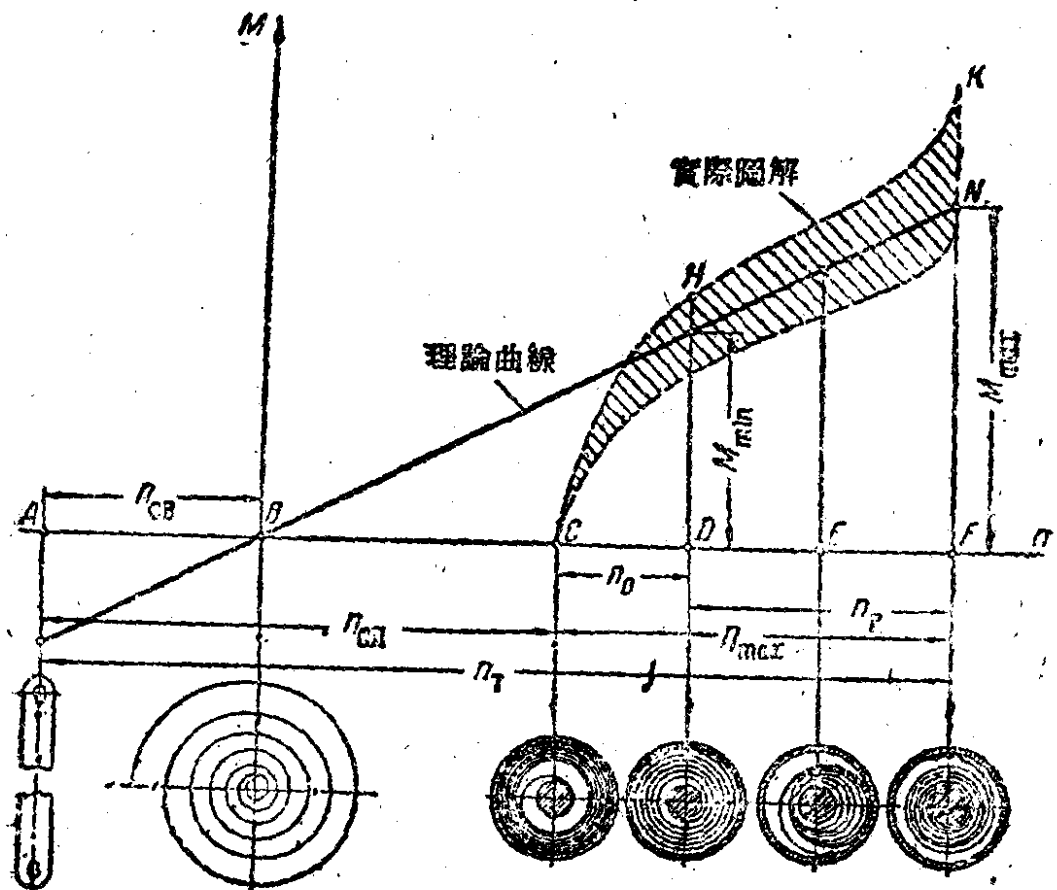


图 1—10 装在卷筒中的盘簧理論图解

讓我們來研究圖 1—10 上的六個有代表性的位置。

點 A 相當於直彈簧。

點 B 相當於彈簧的自由形狀，是把彈簧纏卷，並加以處理之後，由於出現永久變形而得到的。這種彈簧就具有近似阿基米德螺綫的形狀。

點 C 相當於彈簧在發條鼓中放鬆的狀態，此時，彈簧圈壓向發條鼓壁並和發條鼓形成一個整體。在這個位置，彈簧的力矩等於零。

把軸旋轉幾圈之後，壓向發條鼓壁的彈簧各圈，彼此逐漸離開，布滿發條鼓。在這種情況下，彈簧的工作長度幾乎等於全長。如圖 1—10 D 點表示。此時，負荷彈簧的力矩等於縱座標 DH 。

繼續上緊彈簧時，最後一圈離開發條鼓壁之後（如圖 1—10 E 的位置），彈簧各圈或者繼續保持同心圓（在用正確而合理的方法固定彈簧的外端時）或者形成對軸綫偏心的圓（外端的固定方法不合理時）。

在點 F 的位置，彈簧完全被上緊。從圖可看出發條鼓使自由彈簧的外廓尺寸減少。

由圖可知，彈簧的最大與最小轉矩為：

$$M_{max} = \frac{Ebh^3\pi}{6l} (n_T - n_{cB}) \quad (1-4)$$

$$M_{min} = \frac{Ebh^3\pi}{6l} (n_T - n_{cB} - n_p) \quad (1-5)$$

式中 n_T ——彈簧完全擰緊時的圈數；

n_{cB} ——彈簧在自由狀態時的圈數；

n_p ——彈簧的工作圈數。

通常两力矩之比取:

$$T = \frac{M_{\max}}{M_{\min}} = 1.4 \sim 5$$

对标准弹簧来说, 此比值为1.4~1.8的范围以内。

由于弹簧放松时, 却不能放出全部能量, 仍为位能的形式和将部分能量消耗在传动机构上, 这样所得的实际转矩, 要比理论值小, 故需考虑一放松系数, 即表示弹簧能放出能量的有效程度。此系数一般在 $\eta = 0.4 \sim 0.7$ 的范围内, 如采用合理的外端固定时, η 可提高至0.75。

三、弹簧原动机各主要尺寸间的关系

让我们来研究标准发条弹簧的尺寸关系, 即放松与拧紧时的弹簧所占体积相等。

此类弹簧原动机最适合于钟表工业中, 即希望在最小弹簧卷筒外廓尺寸时得到最大的圈数。

弹簧卷筒的圈数可按下式决定: 图 1—11 所示

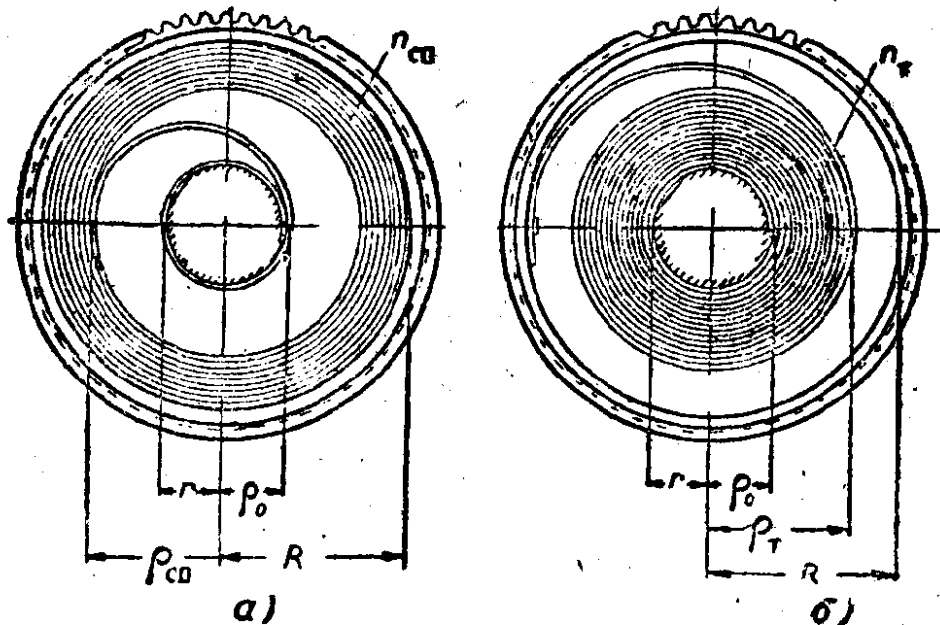


图 1—11 装在卷筒中盘簧筒图

$$n = n_T - n_{cn} \quad (1-6)$$

式中 n —— 弹簧的总圈数；
 n_{cn} —— 弹簧放松后的圈数。
 用弹簧和卷筒的尺寸表示之。

$$n_1 = \frac{\rho_T - \rho_0}{h} \quad (1-7)$$

$$n_{cn} = \frac{R - \rho_{cn}}{h} \quad (1-8)$$

式中 ρ_0 —— 弹簧内端的起始曲率半径；
 ρ_T —— 弹簧上紧后的外半径；
 R —— 卷筒内半径；
 ρ_{cn} —— 弹簧放松后的内半径；
 h —— 弹簧厚度。

$$\text{则} \quad n = n_T - n_{cn} = \frac{\rho_T - \rho_0 - R + \rho_{cn}}{h} \quad (1-9)$$

在进行发条弹簧的结构设计时，应力求获得最大可能的转数。其条件是弹簧所占的体积，在扭转前后是不变的，故可得下述等式：

$$b(\pi R^2 - \pi \rho_{cn}^2) = b(\pi \rho_T^2 - \pi \rho_0^2)$$

因此

$$\rho_{cn} = \sqrt{R^2 + \rho_0^2 - \rho_T^2} \quad (1-10)$$

式中 b —— 弹簧的宽度。

代入 (1-9) 式得：

$$hn = \rho_r - \rho_o - R + \sqrt{R^2 + \rho_o^2 - \rho_r^2} \quad (1-11)$$

式中如已知卷筒和轴的几何尺寸及弹簧的厚度时，旋轉圈数 n 即成为变数 ρ_r 的函数。我們現在决定获得最大 n 的条件：求 n 对 ρ_r 的导数并使其等于零：

$$\frac{hdn}{d\rho_r} = 1 - \frac{\rho_r}{\sqrt{R^2 + \rho_o^2 - \rho_r^2}} = 0 \quad (1-12)$$

由此得：

$$\rho_r = \sqrt{\frac{R^2 + \rho_o^2}{2}} \quad (1-13)$$

将 ρ_r 的值代入 [1-10] 式得：

$$\rho_{cn} = \sqrt{R^2 + \rho_o^2 - \frac{R^2 + \rho_o^2}{2}} = \sqrt{\frac{R^2 + \rho_o^2}{2}} \quad (1-14)$$

这样一来，按照 (1-13) 和 (1-14) 式，获得鼓筒的最大可能旋轉圈数的条件：

$$\rho_r = \rho_{cn} \quad (1-15)$$

亦即弹簧在擰紧后的外半径等于其放松后的內半径，滿足这一条件的弹簧，叫做标准发条弹簧。

与弹簧原动机的最大轉数相应的最合适的卷筒尺寸可用下列由放松及擰紧时之弹簧面积相等的公式而求得：

$$lh = \pi \frac{R^2 - \rho_o^2}{2}$$

所以
$$R = \sqrt{\frac{2lh}{\pi} + \rho_o^2} \quad (1-16)$$

此半径于卷筒的外廓尺寸为最小时，可保証弹簧原动机得到最大的轉数。

将 (1-13) 和 (1-14) 式代入 (1-9) 式得：

$$n_{\max} = \sqrt{\frac{2(R^2 + \rho_0^2)}{h} - (\rho_0 + R)} \quad (1-17)$$

公式中

$$\rho_0 = mh = (15-25)h$$

式中 m ——强度系数。

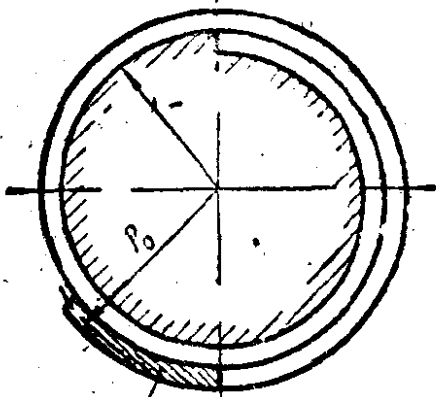
一般避免采用过厚的弹簧钢，弹簧将在半径 ρ_0 的轴上弯曲，因而这种弹簧比薄的弹簧工作不平稳并且容易坏，所以一般取强度系数 m 不小于 15。

通常卷筒的内半径 R 与弹簧起始曲率半径有一定的比例关系，即：

弹簧的曲率半径

关系，即：

$$\frac{R}{\rho_0} = K \quad (1-18)$$



弹簧的弹性部分

图 1-12 弹簧原动机内
轴尺寸间关系图

对标准弹簧原动机来说 R/ρ_0 比值通常是等于 3 或小于 3。而对非标准弹簧原动机来说 R/ρ_0 比值永远大于 3，而在一些个别情况下甚至到 8。

弹簧原动机的内轴的半径可取：（参考图 1-12 所示）

$$r = \rho_0 - 1.5h \quad (1-19)$$

弹簧的有效长度 l 可按 (1-4) (1-5) 式得：

$$l = \frac{Eb\pi n_p}{6l} h^3 = \lambda h^3 \quad (1-20)$$

式中 λ ——计算系数。

则弹簧总长度 L 应等于：

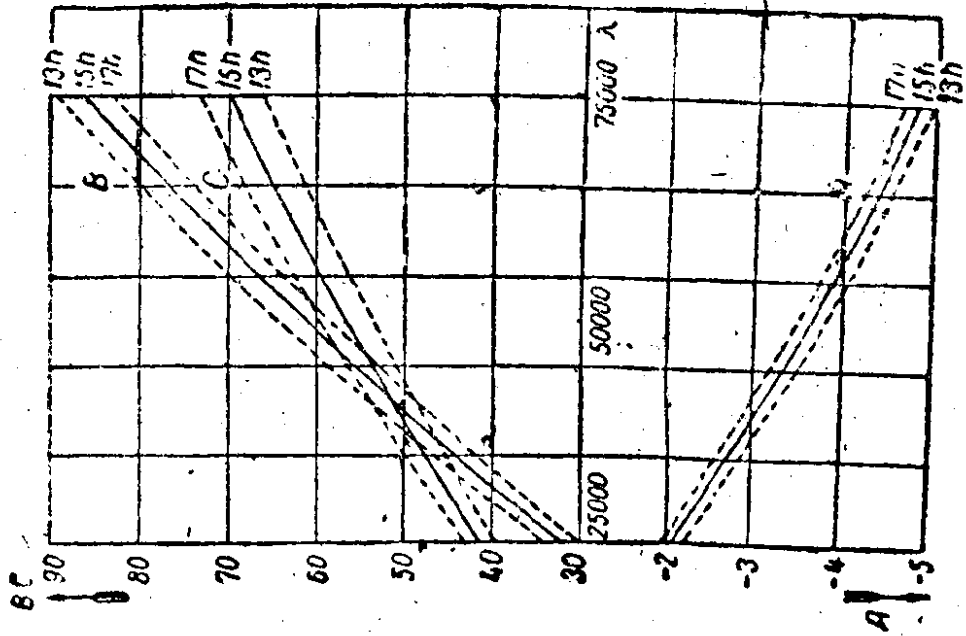


图 1-13a 当 λ 的值从 25000 ~ 75000 时, 决定系数 A , B 和 C 的曲线

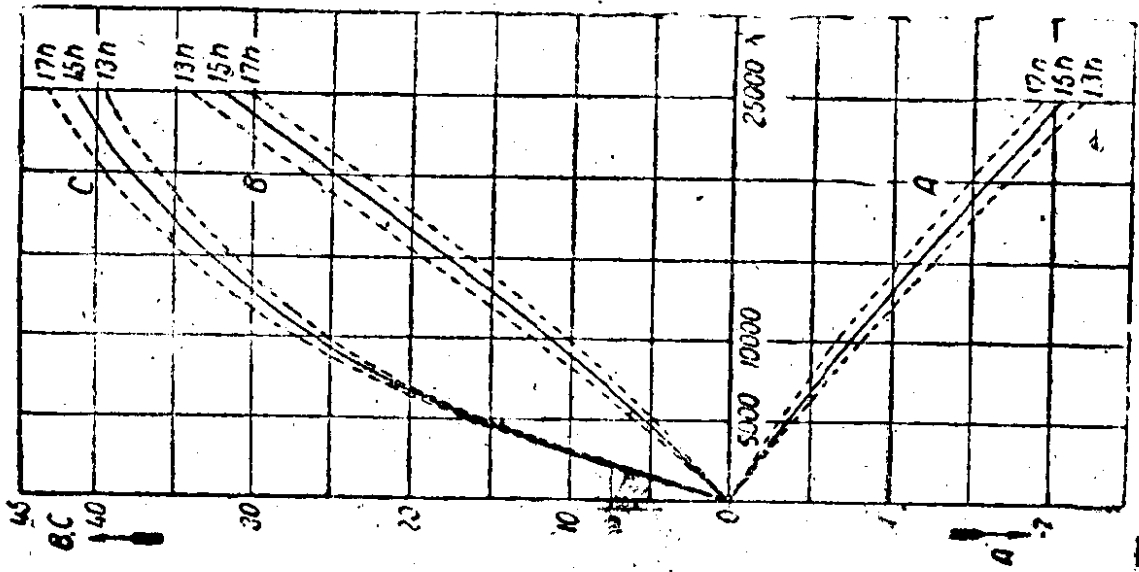


图 1-13 当 λ 的值从 5000 ~ 25000 时, 决定系数 A , B 和 C 的曲线

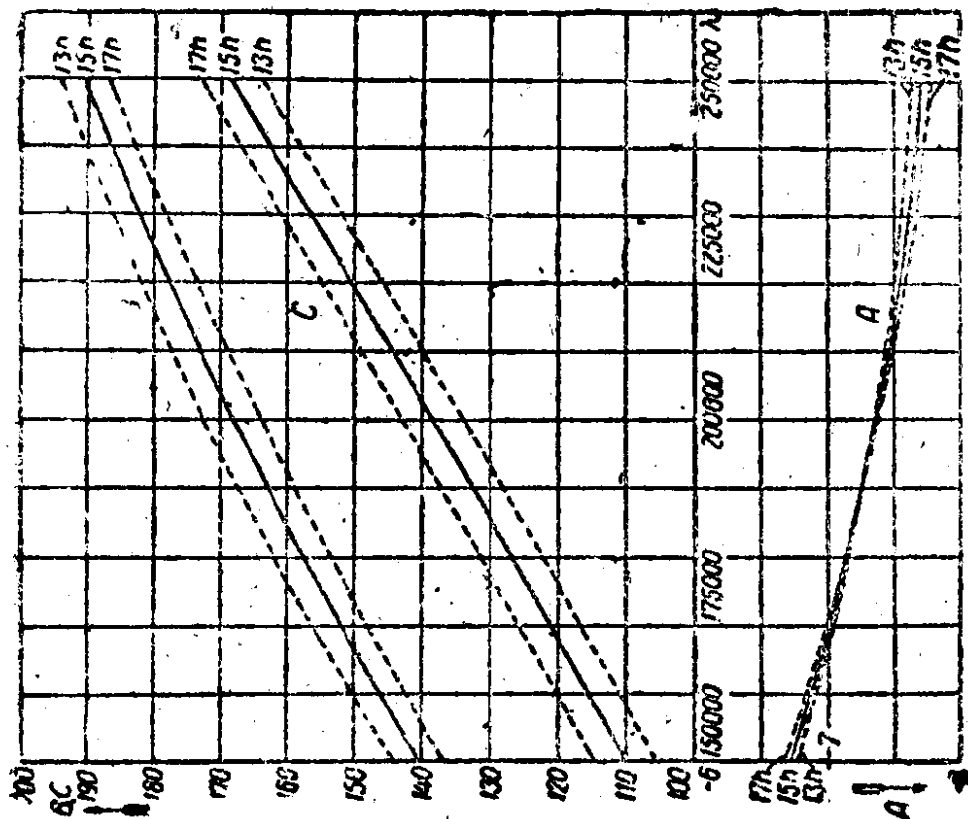


图 1-13c 当 λ 的值从 150000 ~ 250000 时, 决定系数 A, B 和 C 的曲线

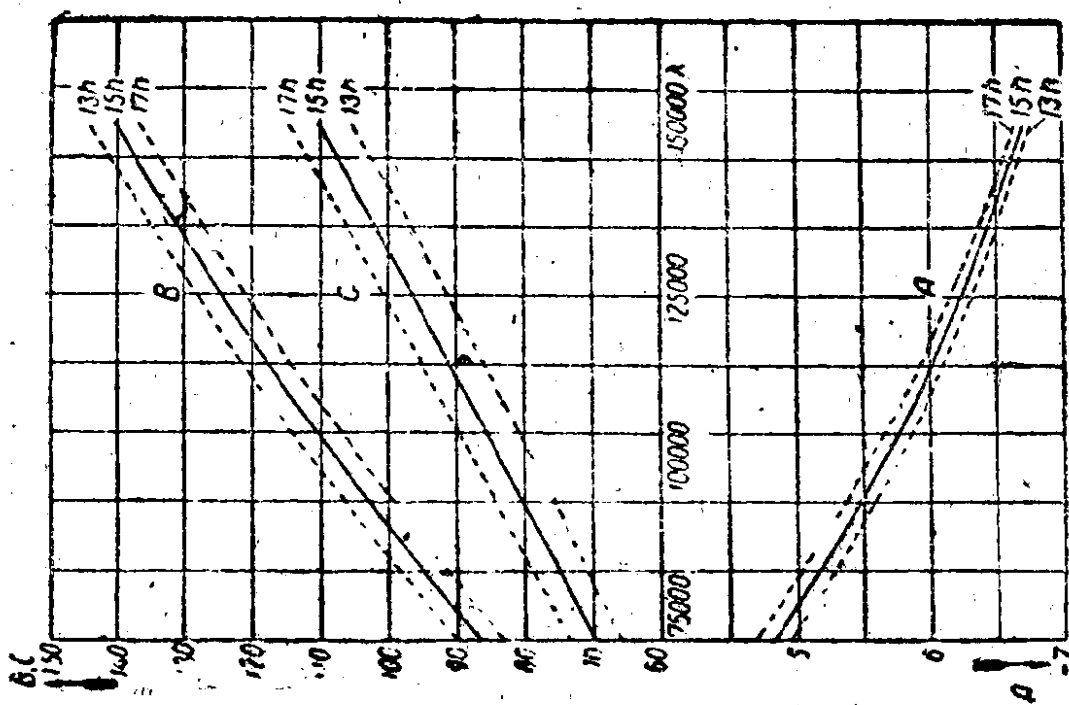


图 1-13b 当 λ 的值从 75000 ~ 150000 时, 决定系数 A, B 和 C 的曲线