

18.1 概 述

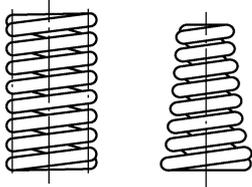
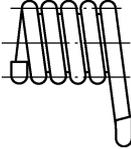
18.1.1 弹簧的功用

弹簧的主要功用如下：①控制机构的运动或零件的位置，如离合器、凸轮机构、阀门及调速器中的弹簧；②缓冲及吸振，如汽车、火车车厢下的减振弹簧，各种缓冲器中的弹簧；③储存能量作为动力源，如机械钟表、仪器、玩具等使用的发条，枪栓弹簧；④测量力和力矩的大小，如弹簧秤、测力器中的弹簧等。

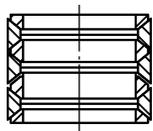
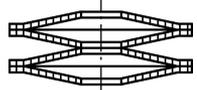
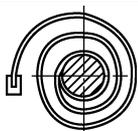
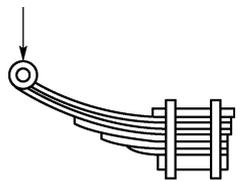
18.1.2 弹簧的种类

弹簧的种类繁多，按受力情况，弹簧主要分为拉伸弹簧、压缩弹簧、扭转弹簧和弯曲弹簧；按照弹簧的形状，又可分为螺旋弹簧、环形弹簧、碟形弹簧、盘簧、板簧等，见表 1。

表 1 弹簧的基本类型（按弹簧的形状分）

类型	图例	受力情况	特点及应用
螺旋弹簧	 圆柱形	拉伸	螺旋弹簧由圆形截面弹簧丝卷绕而成。这种弹簧结构简单、制造方便，应用最广
	 (a) 圆柱形 (b) 圆锥形	压缩	
	 圆柱形	扭转	

续表

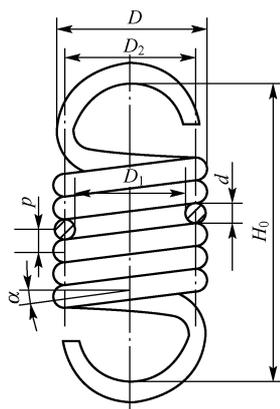
类型	图例	受载情况	特点及应用
环形弹簧		压缩	环形弹簧能够承受较大的冲击，缓冲吸振能力较强，多用于缓冲弹簧
碟形弹簧		压缩	碟形弹簧能够承受较大的冲击，缓冲吸振能力较强，常在重型机械和飞机中作为强力缓冲和减振弹簧
盘簧		扭转	按结构分为非接触型和接触型两种。由于圈数较多，储存能量大，多用于钟表、仪器中的储能元件
板簧		弯曲	板簧是由多层长度不同的弹簧钢板叠合而成的，主要承受弯矩。由于板与板间的摩擦，使板弹簧的加载特性线与卸载特性线不重合，缓冲减振的能力较强，多用于火车、汽车的减振装置中

18.1.3 弹簧的结构

下面以圆柱螺旋弹簧为例分析弹簧的结构。

1. 拉伸弹簧的结构

拉伸弹簧是用圆形弹簧丝卷绕而成的，在卷制时各圈弹簧相互并紧接触，即弹簧间距为零，其结构如图 1 所示。端部制成钩环形式，以便安装和加载。端部结构形式如图 2 所示。



(a) 半圆钩环

(b) 圆钩环

(c) 可转钩环

(d) 可调钩环

图 1 圆柱螺旋拉伸弹簧的结构

图 2 拉伸弹簧的端部结构形式

半圆钩环和圆钩环结构简单、制造方便，但这两种钩环的弯曲应力较大，只适用于中小载荷和不重要的地方。可转钩环和可调钩环适用于受变载荷的情况，但成本较高。

2. 压缩弹簧的结构

圆柱螺旋压缩弹簧的结构如图 3 所示。其中 H_0 为弹簧的自由高度， p 为节距。在自由状态下，各圈均留有一定的间距，以备受载时变形。当弹簧受到最大工作载荷时，弹簧各圈之间仍应留有适当的间隙，使弹簧在压缩后仍能保持一定的弹力，这个间隙称为余隙。一般情况下，余隙可取 0.1 倍的簧丝直径。

压缩弹簧两端各有 $\frac{3}{4} \sim 1 \frac{3}{4}$ 圈并紧，以使弹簧保持平直。工作时这几圈不参与弹性变形，称为支承圈或死圈。常见的支承圈端部结构有并紧不磨平[图 4 (a)]和并紧磨平[图 4 (b)]两种。为使弹簧端面与轴线垂直，重要弹簧端部磨平部分应不小于 $\frac{3}{4}$ 圈，末端厚度应接近于 $\frac{d}{4}$ ， d 为簧丝直径。

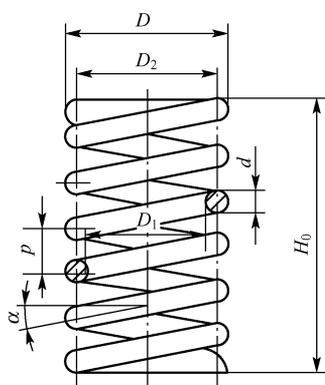


图 3 圆柱螺旋压缩弹簧结构

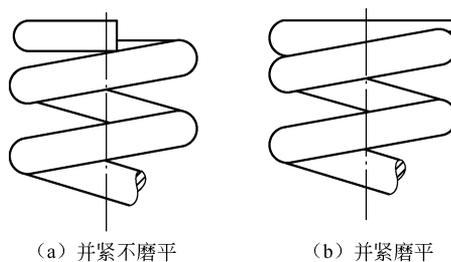


图 4 支承圈端部结构

18.1.4

圆柱螺旋弹簧的几何尺寸

圆柱螺旋弹簧的主要几何参数有弹簧外径 D 、中径 D_2 、内径 D_1 、节距 p 、螺旋升角 α 、自由高度 H_0 、工作圈数 n 、簧丝直径 d 及簧丝展开长度 L 等参数见表 2。

表 2 圆柱螺旋弹簧的几何参数

参数名称及其代号	计算公式		备注
	压缩弹簧	拉伸弹簧	
簧丝直径 d/mm	根据强度条件计算确定		取标准值
簧选中径 D_2/mm	$D_2 = Cd$		取标准值
簧选外径 D/mm	$D = D_2 + d$		
簧选内径 D_1/mm	$D_1 = D_2 - d$		
旋绕比 C	$C = D_2/d$		一般 $4 \leq C \leq 16$ ，常用 $5 \sim 8$

续表

参数名称及其代号	计算公式		备注
	压缩弹簧	拉伸弹簧	
节距 p /mm	$p = (0.28 \sim 0.5) D_2$	$p = d$	
工作圈数 n	根据工作条件确定		一般 $n > 2$
总圈数 n_1	$n_1 = n + (1.5 \sim 2.5)$	$n_1 = n$	
自由高度 H_0 /mm	两端磨平： $H_0 = np + (n_1 - n - 0.5) d$ 两端不磨平： $H_0 = np + (n_1 - n + 1) d$	$H_0 = np + \text{挂钩轴向尺寸}$	
间距 δ /mm	$\delta = p - d$	$\delta = 0$	压缩弹簧工作时 最小轴向间隙 $\delta_1 = 0.1d \geq 0.2\text{mm}$
螺旋升角 $\alpha / (^\circ)$	$\alpha = \arctan \frac{p}{\pi D_2}$		对压缩弹簧推荐 $\alpha = 5^\circ \sim 9^\circ$
弹簧丝展开长度 L /mm	$L = \pi D_2 n_1 / \cos \alpha$	$L = \pi D_2 n + \text{挂钩展开长度}$	

18.2 弹簧的材料与制造

18.2.1 弹簧的材料

弹簧常受变载荷或冲击载荷作用，为了保证正常工作，弹簧材料必须具有足够高的弹性极限和疲劳极限，一定的冲击韧性、塑性和良好的热处理性能等。常用的弹簧材料有碳素弹簧钢、合金弹簧钢、不锈钢及铜合金等。近年来，非金属材料（如塑料、橡胶等）弹簧也有很大的发展。几种主要弹簧材料的使用性能见表 3。

表 3 螺旋弹簧常用材料的许用应力、特点及应用

类别	材料代号	许用应力 $[\tau]$ /MPa			推荐硬度/ HRC	推荐使用 温度/ $^\circ\text{C}$	特性及用途
		I 类	II 类	III 类			
钢丝	碳素弹簧钢 丝 B、C、D 级	0.3 σ_b	0.4 σ_b	0.5 σ_b	—	-40~120	强度高、加工性能好，适用于小尺寸弹簧
	65Mn						
	60Si2Mn	480	640	800	45~50	-40~200	弹性好，适用于大载荷弹簧
	60Si2MnA						
50CrVA	450	600	750		-40~210	疲劳性及淬透性好	

续表

类别	材料代号	许用应力 $[\tau]$ /MPa			推荐硬度/ HRC	推荐使用 温度/°C	特性及用途
		I 类	II 类	III 类			
不锈钢 钢丝	1Cr18Ni9	330	440	550		-250~290	耐腐蚀、耐高温， 适用于做小弹簧
	1Cr18Ni9Ti						
	4Cr13	450	600	750			
铜合金	QSi3-1	270	360	450	90~ 100 (HBW)	-40~120	耐腐蚀，防磁 性、弹性好
	QBe2	360	450	560	37~40	-40~120	耐腐蚀，防磁性、 导电性、弹性好

18.2.2 弹簧的制造

弹簧的制造工艺过程包括卷绕、两端加工（指压簧）或挂钩的制作（指拉簧和扭簧）、热处理和工艺试验。

弹簧的卷绕方法有冷卷法和热卷法。弹簧丝直径在 8mm 以下的用冷卷法，直径大于 8mm 的用热卷法。冷态下卷制的弹簧用冷拉的、经预热处理的优质碳素弹簧钢丝，卷成后一般不再经淬火处理，只经低温回火以消除内应力。在热态下卷制的弹簧卷成后必须经过热处理，通常进行淬火和回火处理。

弹簧制成后，如再进行强压处理，可提高承载能力。强压处理是指将弹簧预先压制到超过材料的屈服极限，并保持一段时间后卸载，使簧丝表面层产生与工作应力方向相反的残余应力，受载时可抵消一部分工作应力，提高弹簧的承载能力。强压处理后不允许再进行任何热处理。

18.3 圆柱螺旋压缩（拉伸）弹簧的设计

18.3.1 弹簧的特性曲线

工作在弹性变形范围内的弹簧，承受轴向载荷后将发生弹性变形。如图 5 所示，圆柱螺旋压缩弹簧受载荷 F 作用而产生压缩变形。若取纵坐标表示弹簧承受的载荷 F ，横坐标表示弹簧的弹性变形 λ ，可得到弹簧的载荷—变形曲线，这样的曲线称为弹簧的特性曲线。为了使弹簧稳定地处于工作位置，通常预加一个最小工作载荷 F_1 ，这时弹簧的变形量为 λ_1 ，长度为 H_1 ；当弹簧受到最大工作载荷 F_2 作用时，变形量为 λ_2 ，长度为 H_2 。最大工作载荷下的变形量 λ_2 与最小工作载荷下的变形量 λ_1 之差，称为弹簧的工作行程，用 λ_0 表示，即

$$\lambda_0 = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (1)$$

使弹簧丝的应力达到材料弹性极限时的载荷 F_{lim} 称为极限载荷。在其作用下，弹簧的

变形量为 λ_{lim} ，长度为 H_{lim} 。

通常取弹簧的最小工作载荷 $F_1 = (0.1 \sim 0.5) F_2$ 。最大工作载荷 F_2 由弹簧在机构中的工作条件决定，但不应达到极限载荷 F_{lim} ，一般取 $F_2 \leq 0.8 F_{\text{lim}}$ 。在弹性极限范围内，对于节距相等的圆柱螺旋弹簧，其载荷与变形基本呈线性关系，即认为

$$\frac{F_1}{\lambda_1} = \frac{F_2}{\lambda_2} = k \quad (2)$$

式中 k ——弹簧的刚度，是表示弹簧特性的主要参数之一。刚度越大，弹簧产生单位变形所需要的力越大，因此弹簧的弹力也越大。

受载和变形的关系，对于圆柱螺旋拉伸弹簧和圆柱螺旋压缩弹簧是一样的，不同的只是一个受拉力作用，产生拉伸变形；另一个受压力作用，产生压缩变形，故不再对圆柱螺旋拉伸弹簧进行受力分析。图 6 所示为圆柱螺旋拉伸弹簧的特性曲线，图 6 (a) 是无预应力的特性曲线，图 6 (b) 是有预应力的特性曲线。对于有预应力的圆柱螺旋拉伸弹簧，受载时先要抵消卷制时在各圈之间产生的预压力 F_0 ，然后才开始变形。因此，在确定弹簧的最小工作载荷时，应使 $F_1 > F_0$ ，并以 $F_1 - F_0$ 和 $F_2 - F_0$ 分别代替式 (2) 中的 F_1 和 F_2 计算弹簧的刚度。

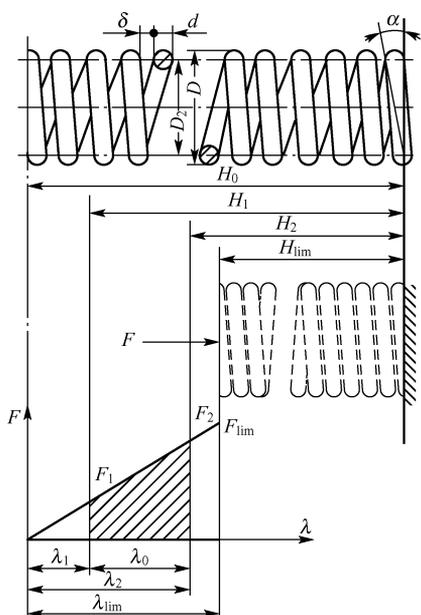


图 5 圆柱螺旋压缩弹簧的特性曲线

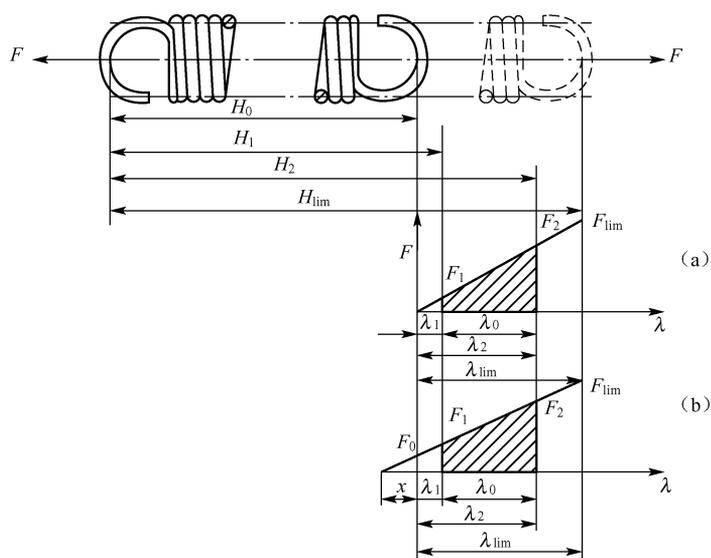


图 6 圆柱螺旋拉伸弹簧的特性曲线

弹簧特性曲线应绘制在弹簧的零件工作图中，作为检验和试验的依据之一。在设计弹簧时，利用特性曲线分析载荷与变形的关系也比较方便。但是，一般弹簧的特性曲线并非直线，如圆锥弹簧和变节距 ($p \neq \text{常数}$) 弹簧。圆柱螺旋弹簧的特性曲线只是近似的直线，矩形截面弹簧的特性曲线近似直线的程度比圆形截面弹簧的好。

18.3.2 弹簧受载时的应力、变形和稳定性计算

下面讨论在Ⅲ类载荷（静载荷）作用下弹簧的应力、变形和稳定性计算。

1. 应力计算

应力计算的目的是确定弹簧丝的直径。图 7 (b) 所示为图 7 (a) 中的压缩弹簧被截去下部，截面通过弹簧的轴线。弹簧中径为 D_2 ，弹簧丝直径为 d ，轴向力 F 作用在弹簧的轴线上。该截面上作用有剪力 F 和扭矩 $T = F \frac{D_2}{2}$ 。

由于弹簧的螺旋升角 α 很小（通常为 $5^\circ \sim 9^\circ$ ），为简化计算，把该截面作为弹簧丝的法截面，即截面积为圆面积；同时考虑到剪力引起的应力远比扭矩引起的应力小，也将其略去。由材料力学可知，弹簧丝截面上的最大应力为

$$\tau_{\max} = \frac{T}{W_T} = \frac{F \frac{D_2}{2}}{\frac{\pi d^3}{16}} = \frac{8FD_2}{\pi d^3}$$

精确的分析应该计入弹簧丝升角和曲率的影响，此时弹簧丝截面上的应力分布如图 7 (c) 所示，在其内侧 M 点处有最大值。为补偿上述简化计算带来的误差，引入曲度系数 K ，并且令 $C = \frac{D_2}{d}$ ， C 称为旋绕比，则曲度系数 K 按式 (3) 计算。

$$K = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (3)$$

可得弹簧丝的强度条件为

$$\tau_{\max} = K \frac{8FD_2}{\pi d^3} = KC \frac{8F}{\pi d^2} \leq [\tau] \quad (4)$$

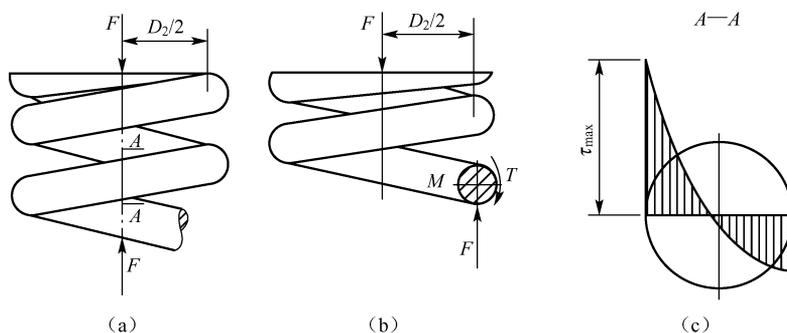


图 7 圆柱螺旋压缩弹簧的受力及应力分析

则弹簧丝直径

$$d \geq \sqrt{\frac{8KFC}{\pi [\tau]}} = 1.6 \sqrt{\frac{KFC}{[\tau]}} \quad (5)$$

式中 $[\tau]$ ——弹簧材料的许用应力 (MPa)，见表 3；

其余各参数的量纲： F (N)、 D_2 (mm)、 d (mm)、 τ_{\max} (MPa)。

2. 变形计算

变形计算的目的是确定弹簧的有效圈数，即工作圈数。由材料力学可知，有效圈数为 n 的压缩弹簧在载荷 F 的作用下，其轴向变形量为

$$\lambda = \frac{8FD_2^3 n}{Gd^4} = \frac{8FC^3 n}{Gd} \quad (6)$$

所以，弹簧圈数 n 为

$$n = \frac{G\lambda d}{8FC^3} = \frac{Gd}{8kC^3} \quad (7)$$

式中 λ ——弹簧变形量 (mm)；

G ——弹簧材料的切变模量 (MPa)，钢： $G=8 \times 10^4$ MPa，青铜： $G=4 \times 10^4$ MPa。

式 (5)、式 (7) 适用于压缩弹簧和无预应力的拉伸弹簧。对于有预应力的拉伸弹簧，应以 $F-F_0$ 代替式中的 F 。

旋绕比和弹簧刚度是弹簧设计中的两个重要参数。由式 (7) 可知，弹簧刚度

$$k = \frac{F}{\lambda} = \frac{Gd}{8C^3 n} \quad (8)$$

可见，旋绕比 C 对弹簧刚度 k 的影响很大。在弹簧丝直径 d 和其他条件相同的情况下， C 值越小， k 越大，弹簧越硬，卷制就越困难，因此 C 值不宜取得过小；反之， C 值也不可取得过大，否则弹簧刚度过小，工作时易颤动。设计时，常取 $C=5 \sim 8$ 。不同弹簧丝直径推荐用的旋绕比见表 4。

表 4 旋绕比 C 的荐用值

弹簧丝直径 d/mm	0.2~0.4	0.5~1.0	1.1~2.2	2.5~6	7.0~16	≥ 18
旋绕比 C	7~14	5~12	5~10	4~9	4~8	4~6

G 、 d 、 C 、 n 对弹簧刚度都有影响，设计时应综合考虑这些因素。

3. 压缩弹簧的稳定性计算

对于圆柱螺旋压缩弹簧，当高度较大、弹簧直径较小时，受力后容易失去稳定性而产生较大的侧向弯曲[图 8 (a)]，使得弹簧不能正常工作。将弹簧的自由高度 H_0 与中径 D_2 的比值称为高径比 b ，即 $b=H_0/D_2$ 。为了保证压缩弹簧的稳定性，应校核其高径比。当弹簧两端为固定端[图 9 (a)]时，取 $b \leq 5.3$ ；当弹簧一端为固定端，另一端为自由转动端(图 9 (b))时，取 $b \leq 3.7$ ；当弹簧两端均为自由转动端时，取 $b \leq 2.6$ 。如果不满足上述条件，应重新选取参数计算，也可通过加装导杆或导套来提高弹簧的稳定性[图 8 (b)、图 8 (c)]。

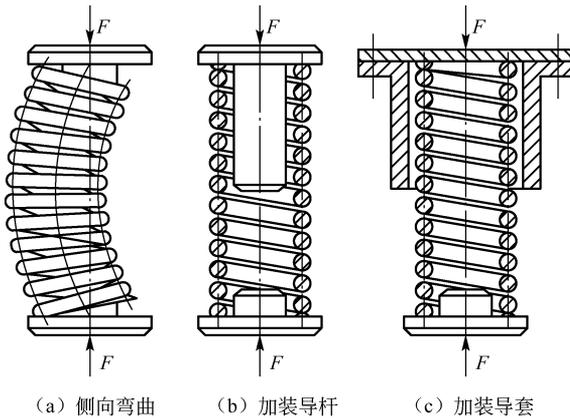


图 8 压缩弹簧的稳定性

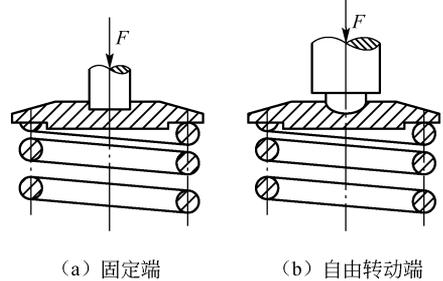


图 9 压缩弹簧的支撑