

第 1 章 总 论

弹簧是一种机械零件，它利用材料的弹性和结构特点，在工作时产生变形，把机械功或动能转变为变形能（位能），或把变形能（位能）转变为机械功或动能。由于这种特性，它适用于：①缓冲或减振，如破碎机的支承弹簧和车辆的悬架弹簧等；②机械的储能，如钟表、仪表和自动控制机构上的原动弹簧；③控制运动，如气门、离合器、制动器和各种调节器上的弹簧；④测力装置，如弹簧秤和动力计上的弹簧。除此之外，在机械设备、仪表、日用电器及生活器具上也都使用着各式各样的弹性元件，如螺母防松弹簧垫圈、零件在轴上定位用的卡环、门的启闭装置、玩具的发条等。

1 弹簧的基本性能

在设计弹簧时，应该考虑的基本工作性能有以下几方面：①弹簧的特性线，即载荷和变形的关系；②弹簧的变形能；③弹簧的自振频率；④弹簧受迫振动时的振幅。现对这些性能简单介绍如下。

1.1 弹簧的特性线和刚度

载荷 F （或 T ）与变形 f （或 φ ）之间的关系曲线称为弹簧的特性线，如图 1-1 所示。弹簧的特性线大致有三种类型：

①直线型；②渐增型；③渐减型。

有些弹簧的特性线可以是以上两种或三种类型的组合（图 1-2），称为组合型特性线。如截锥涡卷弹簧的特性线（图 1-2a），加载起始一段为直线型，变形达到一定程度后特性线便成为渐增型；碟形弹簧的特性线（图 1-2b），起始为渐减型，后为渐增型，整个特性线呈 S 形；又如环形弹簧的特性线（图 1-2c），加载时为

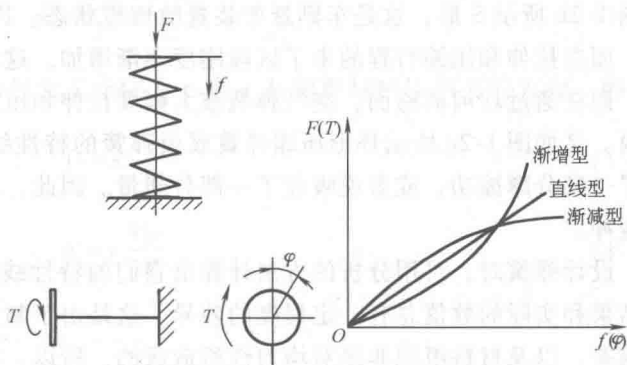


图 1-1 弹簧的特性线

直线型，而卸载时则为渐增型。采用组合弹簧也可以得到组合的特性线，如图 1-2d 所示为两个不同高度的并列组合螺旋弹簧的特性线。加载开始只有一个弹簧承受载荷，所以特性线只是受载荷那个弹簧的特性线。当受载弹簧在载荷作用下变形到一定程度，另一个弹簧也开始承受载荷，这时特性线开始转变为两个弹簧受载的特性线，因而其斜率发生了变化。

载荷增量 dF （或 dT ）与变形增量 df （或 $d\varphi$ ）之比，即产生单位变形所需的载荷，称为弹簧的刚度，对于压缩和拉伸弹簧的刚度为

$$F' = \frac{dF}{df} \quad (1-1a)$$

对于扭转弹簧的刚度为

$$T' = \frac{dT}{d\varphi} \quad (1-2a)$$

特性线为渐增型的弹簧，刚度随着载荷的增加而增大；而渐减型的弹簧，刚度随着载荷的增加而减小。至于直线型的弹簧，刚度则不随载荷变化而变化，即

$$F' = \frac{dF}{df} = \frac{F}{f} = \text{常数} \quad (1-1b)$$

$$T' = \frac{dT}{d\varphi} = \frac{T}{\varphi} = \text{常数} \quad (1-2b)$$

因此，对于具有直线型特性线的弹簧，其刚度也称为弹簧常数。

单位力使弹簧所产生的变形，即刚度的倒数称为弹簧的柔度。

弹簧的特性线对于设计和选择弹簧的类型起指导性的作用。由图 1-2a 所示截锥涡卷弹簧特性线上可以看到，当载荷达到一定程度时，弹簧的刚度急剧增加。由于这种特性，当弹簧受到过大载荷时，弹簧的变形增加的比较小，从而可以起到保护弹簧的作用。所以，具有这种特性线的弹簧适用于空间小、载荷大的情况。如空气弹簧带有高度控制阀，则其特性线如图 1-2b 所示 S 形，这是车辆悬架装置的理想状态。因为这种曲线的中间区段的刚度比较低，而在拉伸和压缩行程的末了区段刚度逐渐增加。这样，可以保证车辆在正常运行时很柔软，而在通过坎坷的路面，空气弹簧被大幅度拉伸和压缩时，逐渐变硬，从而能限制车体的振幅。又如图 1-2c 所示环形压缩弹簧或板弹簧的特性线，表明在加载与卸载过程中弹簧消耗了一部分摩擦功，或者说吸收了一部分能量。因此，具有这类特性线的弹簧，适用于减振和缓冲。

设计弹簧时，可用分析的方法计算出它们的特性线。但即使是最精确和最仔细的计算，其结果和实际的数值总有一定程度的差异，这是由于制成的弹簧不可避免地存在着一定的工艺误差，以及材料组织非绝对均匀性所造成的。所以，在设计弹簧时，如需要保证特性线的要求，必须经过试验，反复修改有关尺寸，最后达到所需要的特性线。

在设计非线性特性线弹簧时，有的要考虑静变形。如图 1-3 所示，静变形系指过特性线上任意点 a ，作切线与横坐标轴相交，其切点与 a 点在横坐标轴上投影的距离即变形量 f_s ，称为切点 a 对应载荷 F_s 的静变形。

1.2 弹簧的变形能

当设计缓冲或隔振弹簧时，弹簧的变形能，也就是在受载荷后所能吸收和积蓄的能量，应该进行计算。

如图 1-4 所示载荷变形图，其变形能对拉伸和压缩弹簧为

$$U = \int_0^f F(f) df$$

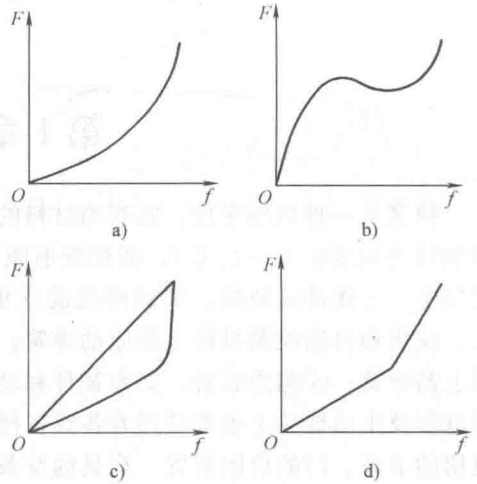


图 1-2 组合型特性线
a) 截锥涡卷弹簧 b) 碟形弹簧
c) 环形弹簧 d) 组合弹簧

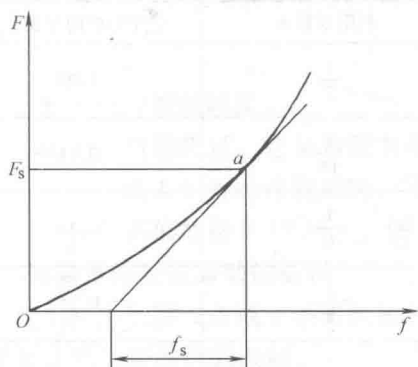


图 1-3 弹簧静变形示意图

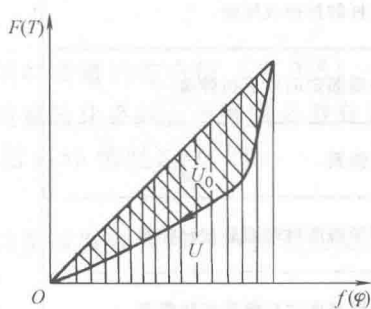


图 1-4 具有能量消耗弹簧的变形能

对扭转弹簧为

$$U = \int_0^{\varphi} T(\varphi) d\varphi$$

就是图中划垂直线阴影部的面积。

当特性线为直线时，则

$$U = \frac{Ff}{2} = \frac{F'f^2}{2} \quad (1-3a)$$

$$U = \frac{T\varphi}{2} = \frac{T'\varphi^2}{2} \quad (1-4a)$$

另外，变形能的另一表示形式为最大工作应力 τ 或 σ 和弹簧材料体积 V 的方程，即

$$U = k \frac{V\tau^2}{G} \quad (1-3b)$$

或

$$U = k \frac{V\sigma^2}{E} \quad (1-4b)$$

式中 G ——弹簧材料的切变模量；

E ——弹簧材料的弹性模量；

k ——比例系数，对不同类型的弹簧有不同的值。它标志着材料的利用程度，所以也称为利用系数，其值见表 1-1。

各种类型弹簧变形能的计算公式见表 1-1。

从式中可以看出，变形能与模量 G 和 E 成反比，因此，低的模量对于要求大的变形能有利。同样，正如以后从弹簧刚度计算式中可以看到的那样，低的模量对弹簧刚度也有利。又变形能的大小与最大工作应力的平方成正比，增大应力就意味着要求材料有高的弹性极限，高的弹性极限也对应着高的模量。但应力是以平方形式出现的，所以在选择材料时，它起决定性作用。

在设计弹簧时，为了得到大的变形能，从方程式中看出，可提高弹簧材料的体积或者应力，或者两者同时提高。

表 1-1 各种弹簧变形能的计算公式和其比值

弹簧类型	变形能 U 计算公式	利用系数 k	变形能的比值 ^①
直杆的拉伸或压缩	$k \left(\frac{V\sigma^2}{E} \right)$	$\frac{1}{2}$	1.00
一端固定的矩形板弹簧		$\frac{1}{18}$	0.11
板弹簧		$\frac{1}{6}$	0.33
圆形截面材料螺旋扭转弹簧		$\frac{1}{8}$	0.25
矩形截面材料螺旋扭转弹簧		$\frac{1}{6}$	0.33
平面蜗卷弹簧		$\frac{1}{6}$	0.33
圆形截面材料扭杆弹簧	$k \left(\frac{V\tau^2}{G} \right)$	$\frac{1}{4}$	0.43
方形截面材料螺旋拉伸或压缩弹簧		$\frac{1}{6.5}$	0.27
矩形截面材料螺旋拉伸或压缩弹簧	$\frac{1}{k_1} \left(\frac{V\tau^2}{2G} \right)$ ^②	—	—

① 比值按 $G \approx \frac{E}{2.6}$, $\tau \approx \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$ 换算的。

② 系数 k_1 见表 15-1。

当加载和卸载的特性线不重合时,如图 1-4 所示,加载与卸载特性线所包围的面积(图中具有斜线阴影部分),就是弹簧在工作过程中由于内耗和摩擦所消耗的能量 U_0 。此值愈大,说明弹簧的减振和缓冲能力愈强。 U_0 与 U 之比称为阻尼系数 ψ ,即

$$\psi = \frac{U_0}{U} \quad (1-5)$$

评定缓冲弹簧系统效能的指标为缓冲效率 η ,其计算式为

$$\eta = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{F_{\max} f_{\max}} \quad (1-6)$$

式中 m ——冲击物体的质量;

v ——冲击物体与弹簧系统接触时的速度;

F_{\max} ——最大冲击载荷;

f_{\max} ——缓冲系统的最大变形。

最理想的情况为 $\eta = 1$ 。但具有线性特性线的弹簧缓冲系统,其刚度为定值,则 η 的最大值为 $1/2$ 。黏弹性缓冲系统,如橡胶缓冲系统,其效率要高些。

1.3 弹簧的自振频率

当弹簧受到高频振动载荷的作用时,为了检验这种受迫振动对弹簧系统的影响,需要计算弹簧系统的自振频率。根据理论推导(见第 9 章 6 节)可知各类弹簧自振频率 ν 可用下式

计算

$$\nu = \sqrt{\frac{F'}{m_e}} \quad (1-7)$$

式中 F' ——弹簧的刚度；

m_e ——当量质量，它是弹簧本身的质量和弹簧所联结的质量的综合值（表 9-5），如图 1-5 所示弹簧系统，其 $m_e = m + \zeta m_s$ ； ζ 为质量转化系数，与弹簧类型有关，其值如图 9-17 所示，图 1-5a 情况 $\zeta = 0.33$ ，图 1-5b 情况 $\zeta = 0.23$ 。

1.4 弹簧系统受迫振动的振幅

图 1-6 为机器设备或车辆的减振弹簧系统。为了检验弹簧减振效果和分析弹簧的受力，则需要计算弹簧系统的振幅。

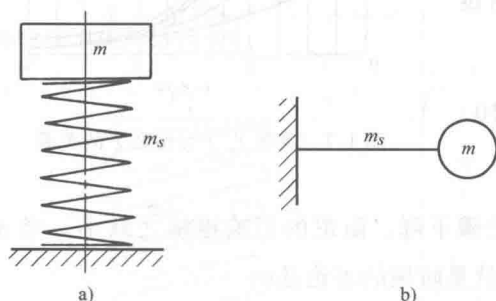


图 1-5 弹簧振动示意图

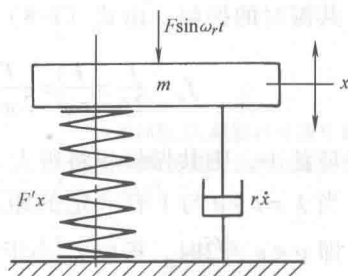


图 1-6 弹簧的支承或悬架系统

当弹簧系统的振动体受到激振力 $F \sin \omega_r t$ 的作用（图 1-6），或其支承（弹簧的固定端）受到激振位移 $f \sin \omega_r t$ 的作用时，其受迫振动可表示为

$$x = f_a \sin(\omega_r t - \varphi)$$

式中 f_a ——受迫振动的振幅；

φ ——振动体位移与激振函数之间的相位差。

受迫振动的振幅 f_{\max} 与所使用阻尼的大小和类型有关。对于黏性阻尼，设其阻尼力为 $r\dot{x}$ ，当振动体受到激振力 $F \sin \omega_r t$ 作用时，其振幅

$$f_a = \frac{f}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (1-8)$$

当支承弹簧的固定端受到激振位移 $f \sin \omega_r t$ 的作用时，振动体的绝对振幅

$$f_a = \frac{f \sqrt{1 + (2\xi\lambda)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}} \quad (1-9)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r}{\omega} = \frac{\nu_r}{\nu}$$

$$\xi = \frac{r}{r_c}$$

$$r_c = 2 \sqrt{mF'}$$

式中 f ——在与激振力幅值 F_a 相等的静力作用下系统的静变形；

λ ——系统频率比；

ω 和 ν ——系统的自振角频率和频率；

ξ ——系统的阻尼比；

r ——系统的阻尼系数；

r_c ——系统的临界阻尼系数；

F' ——弹簧的刚度。

由图 1-7 可以看出，当 $\lambda = \nu_r/\nu \approx 1$ 时，振幅急剧增大，这就是共振现象。在共振区附近，振幅的大小主要取决于阻尼的大小，阻尼越小，振幅越大。共振时的振幅，由式 (1-8) 可知为

$$f_a = \frac{f}{2\xi} = \frac{F}{r\omega} = \frac{F}{2\pi r\nu} \quad (1-10)$$

如阻尼甚小，则共振振幅将很大。

当 $\lambda = \nu_r/\nu$ 与 1 有一定的距离之后，振幅急骤下降，阻尼的影响也随之减小。当 $\lambda > \sqrt{2}$ ，即 $\nu < \nu_r/\sqrt{2}$ 时，振幅 f_a 小于静变形 f ，这也就是防振的理论基础。

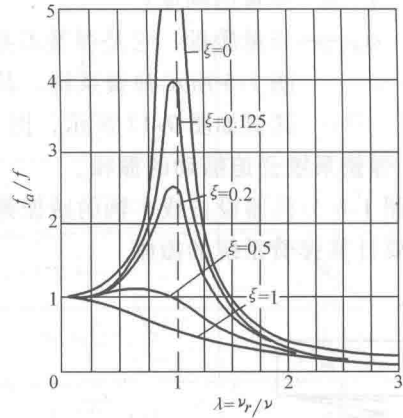


图 1-7 系统 f_a/f 与 λ 和 ξ 的关系

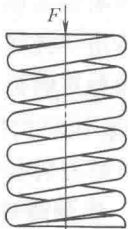
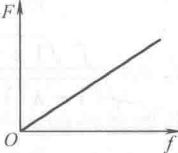
2 弹簧的类型

弹簧的类型很多，其分类方法也很多。按结构形状来分，弹簧大致分为圆柱螺旋弹簧、非圆柱螺旋弹簧和其他类型弹簧，现分述如下。

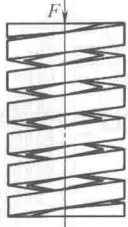
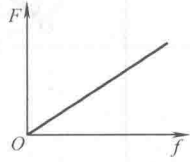
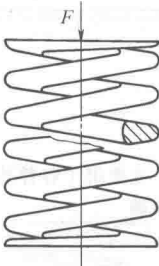

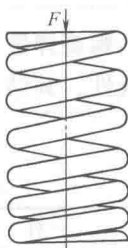
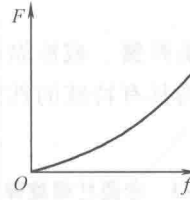
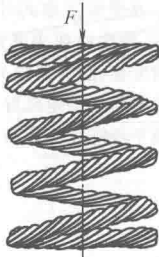
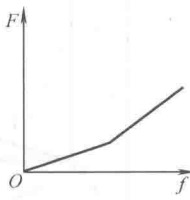
2.1 圆柱螺旋弹簧

圆柱螺旋弹簧应用广泛，按其承受载荷的性能又分为螺旋压缩、螺旋拉伸和螺旋扭转弹簧等。有关它们的结构和性能见表 1-2。

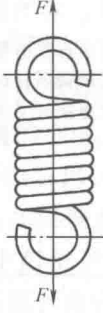
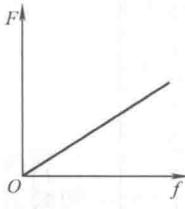
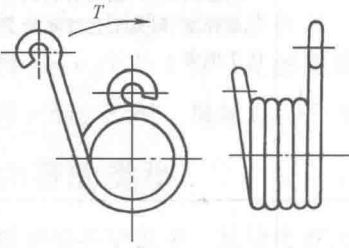
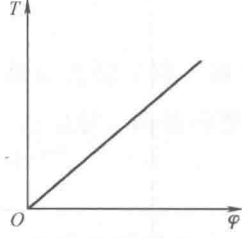
表 1-2 圆柱螺旋弹簧的类型及特性

名称和结构	特性线	性能
<p>圆截面材料圆柱螺旋压缩弹簧</p> 		<p>特性线呈线性，结构简单，制造方便，应用最广</p>

(续)

名称和结构	特性线	性能
矩形截面材料圆柱螺旋压缩弹簧 		在所占空间相同时,矩形截面材料比圆截面材料能吸收的能量多,刚度更接近于常数
扁截面材料圆柱螺旋压缩弹簧 		性能同矩形,截面材料圆柱螺旋压缩弹簧,但其工艺性和疲劳性能优于前者
不等节距圆柱螺旋弹簧 		当弹簧压缩到开始有簧圈接触后,特性线变为非线性,刚度及自振频率均为变值,利于消除或缓和共振的影响,可用于支承高速变载荷机构
多股螺旋弹簧 		当载荷大到一定程度后,特性线出现折点。比相同截面材料的普通螺旋弹簧强度高,减振作用大。在武器和航空发动机中常有使用

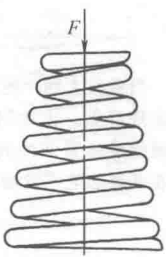
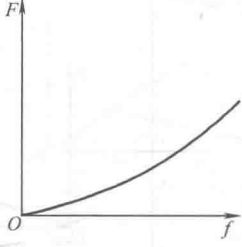
(续)

名称和结构	特性线	性能
圆柱螺旋拉伸弹簧 		用于承受拉伸载荷的场合
圆柱螺旋扭转弹簧 		主要用于各种装置中的压紧和储能

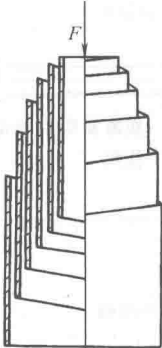
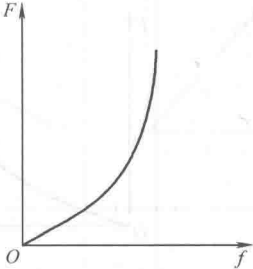
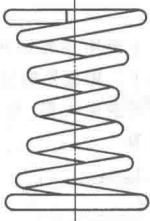
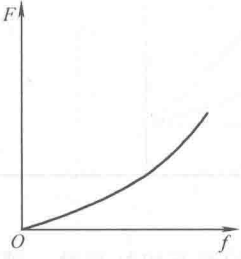
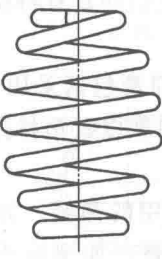
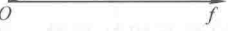
2.2 非圆柱螺旋弹簧

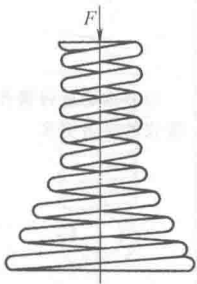
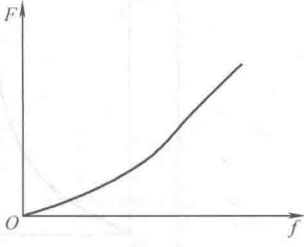
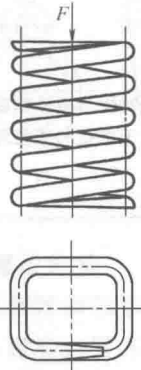
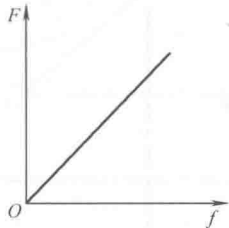
非圆柱螺旋弹簧包括截锥螺旋弹簧、截锥涡卷弹簧、中凹和中凸螺旋弹簧、组合螺旋弹簧以及非圆形螺旋弹簧等。它们均具有特殊的性能，特性线多为非线性，其结构和性能见表 1-3。

表 1-3 非圆柱螺旋弹簧的类型及特性

名称和结构	特性线	性能
截锥螺旋弹簧 		当弹簧压缩到开始有簧圈接触后,特性线变为非线性,自振频率为变值,防共振能力较变节距压缩弹簧强。稳定性好,结构紧凑。多用于承受较大载荷和减振

(续)

名称和结构	特性线	性能
<p>截锥涡卷弹簧</p> 		<p>与截锥螺旋弹簧作用相似,但能吸收的能量更多</p>
<p>中凹形螺旋弹簧</p> 		<p>特性与截锥螺旋弹簧相似,主要用于坐垫和床垫等</p>
<p>中凸形螺旋弹簧</p> 		<p>特性与截锥螺旋弹簧相似</p>

名称和结构	特性线	性能
<p>组合螺旋弹簧</p> 		<p>在需要得到特定的特性线情况下使用</p>
<p>非圆形螺旋弹簧</p> 		<p>主要用在外廓尺寸有限的情况下。根据外廓空间的要求,弹簧圈可制成方形、矩形、椭圆形和梯形等</p>

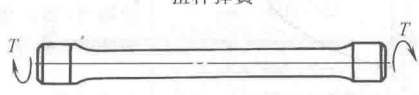
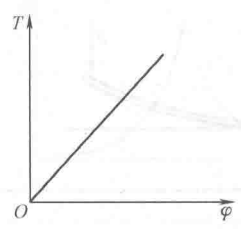
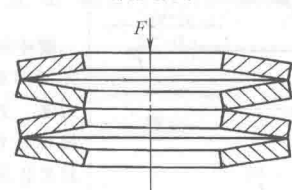
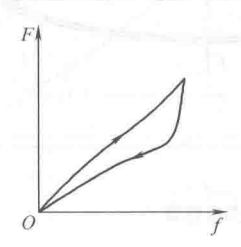
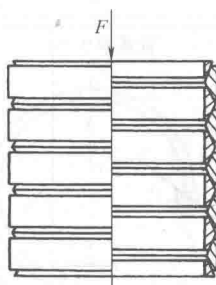
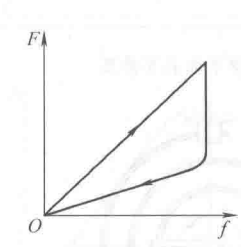
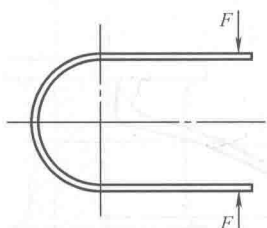
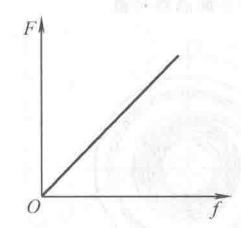
2.3 其他类型弹簧

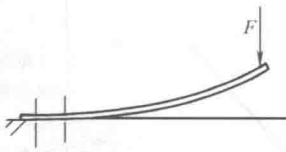
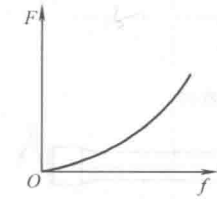
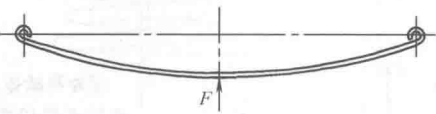
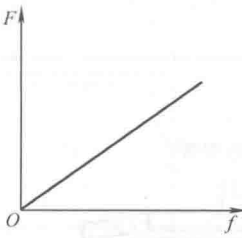
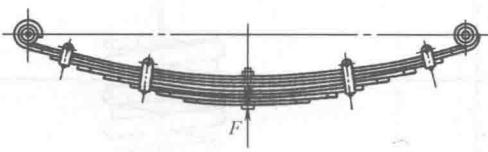
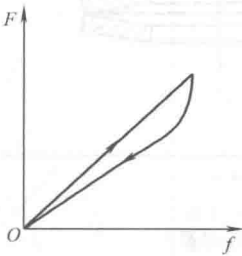
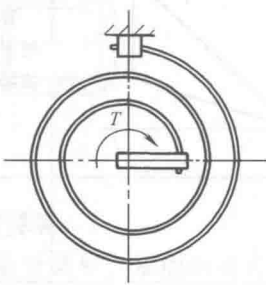
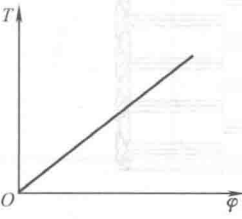
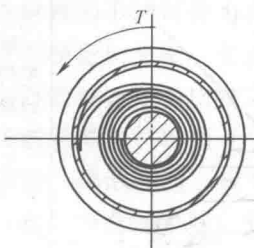
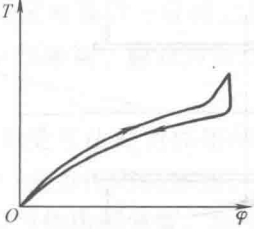
除上述螺旋弹簧外,常用的尚有扭杆弹簧、碟形弹簧、环形弹簧、平面涡卷弹簧、片弹簧、板弹簧、膜片膜盒、压力弹簧管、空气弹簧和橡胶弹簧等。它们均具有特殊的性能和用途,其结构和性能见表1-4。

弹簧按制造材料的不同可分为金属弹簧和非金属弹簧。金属弹簧包括采用钢及钢合金、铜合金和镍合金等制造的弹簧。非金属弹簧包括空气弹簧、橡胶弹簧以及塑料弹簧等。其中以钢和钢合金制造的弹簧用得比较多。

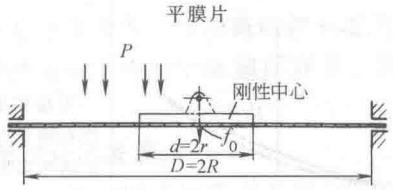
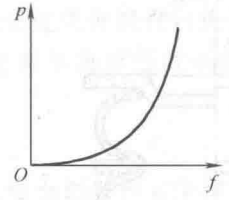
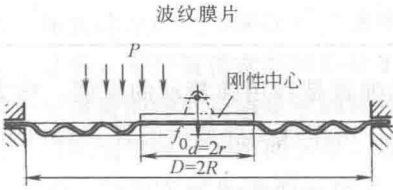
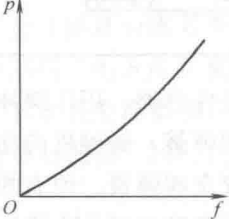
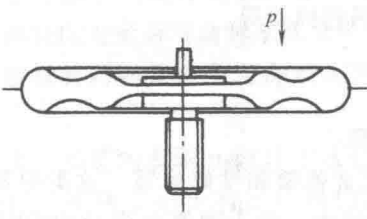
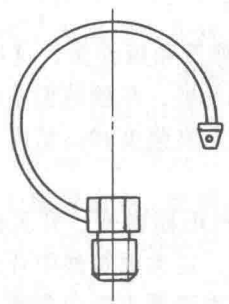
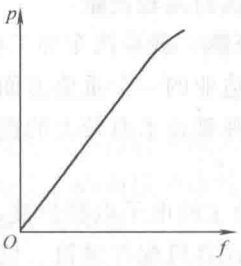
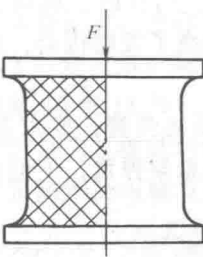
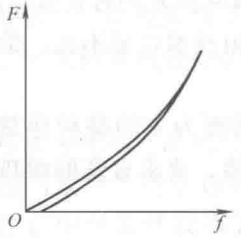
弹簧如按受载后弹簧材料所受应力类型可分为受弯曲应力作用的弹簧,如螺旋扭转弹簧、平面涡卷弹簧、碟形弹簧、板弹簧等;受扭切应力作用的弹簧,如螺旋压缩和拉伸弹簧、扭杆弹簧、截锥涡卷弹簧等;受压缩和拉伸应力作用的弹簧,如环形弹簧;受组合应力作用的弹簧,如受弯曲载荷作用,或受横向载荷作用的螺旋弹簧等。

表 1-4 其他类型弹簧结构和性能

名称和结构	特性线	性能
<p>扭杆弹簧</p> 		<p>结构简单,但材料和制造精度要求高,单位体积变形能大,主要用于车辆的悬架装置</p>
<p>碟形弹簧</p> 		<p>缓冲和减振能力强。采用不同的组合可以得到不同的特性线。多用于重型机械的缓冲和减振装置及车辆牵引钩等</p>
<p>环形弹簧</p> 		<p>有很高的减振能力。用于重型设备的缓冲装置</p>
<p>线性片弹簧</p> 		<p>用金属薄片制成,主要用于载荷和变形小的场合,如仪器、仪表和家用电器等</p>

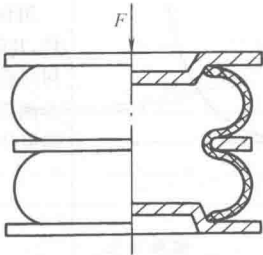
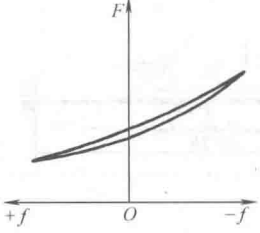
	名称和结构	特性线	性能
片弹簧	<p>非线性片弹簧</p> 		<p>用金属薄片制成,主要用于载荷和变形小的场合,如仪器、仪表和日用电器等</p>
板弹簧	<p>单板弹簧</p> 		<p>缓冲和减振性能好,尤其多板弹簧减振能力强。主要用于汽车、拖拉机和铁道车辆的悬架装置</p>
	<p>多板弹簧</p> 		
平面涡卷弹簧	<p>非接触形平面涡卷弹簧</p> 		<p>圈数多,变形角大,能储存的能量大。多用作压紧弹簧和仪器、钟表中的储能弹簧</p>
	<p>接触形平面涡卷弹簧</p> 		

(续)

名称和结构	特性线	性能
<p>平膜片</p> 		<p>用作仪表的敏感元件,并能起隔离两种不同介质的作用,如因压力或真空产生变形时的柔性密封装置等</p>
<p>波纹膜片</p> 		<p>用作测量与压力成非线性的各种量值,如管道中液体或气体流量、飞机的飞行速度和高度等</p>
<p>膜盒</p> 	<p>特性线随波纹数、密度和深度而变化</p>	<p>为了便于安装,将两个相同的膜片沿周边连接成盒状</p>
<p>压力弹簧管</p> 		<p>在流体的压力作用下末端产生位移。通过传动机构将位移传递到指针上。用于压力计、温度计、真空计、液位计、流量计等</p>
<p>橡胶弹簧</p> 		<p>弹性模量小,容易得到所需要的非线性特性线。形状不受限制,各方向刚度可自由选择。可承受来自多方面的载荷</p>

膜片膜盒

(续)

名称和结构	特性线	性能
<p style="text-align: center;">空气弹簧</p> 		<p>可按需要设计特性线和调节高度,多用于车辆悬架装置</p>

弹簧也可按使用条件分类。用作缓冲或减振的弹簧是利用弹簧动的机能,称为动弹簧,如气门弹簧、车辆悬架弹簧、破碎机的支承弹簧等;用作承受静载荷的弹簧是利用弹簧静的机能称为静弹簧,如安全阀弹簧、钟表的发条等。

弹簧如按特性线的类型也可分为线性和非线性特性线弹簧。属于线性特性线的弹簧,如前所述有普通螺旋压缩、拉伸和扭转弹簧、扭杆弹簧等;属于非线性特性线的弹簧有不等节距螺旋压缩弹簧、截锥螺旋弹簧、碟形弹簧和截锥涡卷弹簧等。

3 弹簧技术发展现状[⊖]

在机电产品中,弹簧种类繁多,主要有以下类型。

1) 以汽车、摩托车、柴油机和汽油机为主的配套弹簧和维修弹簧。这类弹簧有气门弹簧、悬架弹簧、减振弹簧以及离合器弹簧等,用量较大,约占弹簧生产量的50%左右。同时技术水平要求也高,可以说这类弹簧的技术水平具有代表性,它们主要是向高疲劳寿命和高抗松弛方向发展,从而减轻质量。

2) 以铁道机车车辆、载重汽车和工程机械为主的大型弹簧和板弹簧,这些弹簧以热卷成型为主,是弹簧制造业的一个重要方面。随着高速铁路的发展,车辆减振系统的升级,作为车辆悬架的热成型弹簧技术有较大的提高,这类弹簧主要向高强度和高精度方向发展以稳定产品质量。

3) 以仪器仪表为主的电子电器弹簧,典型产品如电动机电刷弹簧、开关弹簧、摄像机和照相机弹簧,以及计算机配件弹簧、仪器仪表配件弹簧等。这类弹簧弹中片弹簧、异形弹簧占较大的比例,不同产品对材质和技术要求差别较大。这类弹簧主要向着既高强度化又小型化的方向发展。

4) 以日用机械和电器为主的五金弹簧,如床垫、沙发、门铰链、玩具、打火机等,这类弹簧需求量较大,但技术含量不高,给小型的弹簧企业提高了发展机会,这类弹簧主要是向小型化方向发展。

5) 以满足特殊需要为主的特种弹簧,如纺织机械用摇架弹簧,要求有高的抗松弛性能;钢包滑水口用弹簧,要求有高的耐热性;矿山振动筛用悬架弹簧,不但要求有高的疲劳

⊖ 本节部分内容摘自张俊论文:当今螺旋弹簧主要制造技术的应用和发展,扬州·中国机械工程学会机械设计分会弹簧装置委员会论文集,2006.9。

性能,而且要求有高的抗腐蚀性,因而采用橡胶金属复合弹簧:为了满足车辆行驶时的舒适度,所采用的空气弹簧等。

对于目前出现的异形截面悬架弹簧和气门弹簧,从轻量化、节省空间,提高舒适性和改善弹簧应力分布考虑,比圆截面弹簧更为合理,但是这类弹簧材料价格高,弹簧制造工艺复杂,使得弹簧成本要高于圆截面弹簧。因此目前还看不出异形截面弹簧取代圆截面弹簧的迹象。

3.1 弹簧设计的发展

目前,广泛应用的弹簧应力和变形的计算公式是根据材料力学推导出来的。若无一定的实际经验,很难设计和制造出高精度的弹簧,随着设计应力的提高,以往的很多经验不再适用。例如,弹簧的设计应力提高后,螺旋角加大,会使弹簧的疲劳源由簧圈的内侧转移到外侧。为此,必须采用弹簧精密的解析技术,当前应用较广的方法是有限元法(FEM)。

车辆悬架弹簧的特征是除足够的疲劳寿命外,其永久变形要小,即抗松弛性能要在规定的范围内,否则由于弹簧的不同变形,将发生车身重心偏移。同时,要考虑环境腐蚀对其疲劳寿命的影响。随着车辆保养期的增大,对永久变形和疲劳寿命都提出了更严格的要求,为此必须采用高精度的设计方法。有限元法可以详细预测弹簧应力疲劳寿命和永久变形的影响,能准确反映材料对弹簧疲劳寿命和永久变形的关系。

近年来,弹簧的有限元设计方法已进入了实用化阶段,出现了不少有实用价值的报告,如螺旋角对弹簧应力的影响;用有限元法计算的应力和疲劳寿命的关系等。

图1-8所示为用现行设计方法计算和有限元法解析应力的比较。对相同结构的弹簧,在相同载荷作用下,从图中可以看出,有效圈少的或螺旋角大的高应力弹簧的应力,两种方法得出的结果差别比较大。这是因为随着螺旋角的增大,加大载荷偏心,使弹簧外径或横向变形较大,因而应力也较大。用现行的设计计算方法不能确切地反映,而有限元法则能较为确切地反映出来。

弹簧有限元分析方法,在弹簧技术水平较高的国家虽已进入实用化,我国虽有这方面的技术开发,但尚未形成实用模型。

另外,在弹簧的设计进程中还引进了优化设计。弹簧的结构较为简单,功能单纯,影响结构和性能的参变量少,所以设计者很早就运用解析法、图解法或图解分析法寻求最优设计方案,并取得了一定成效。随着计算技术的发展,利用计算机进行非线性规划的优化设计取得了成效(见第10章11节)。

可靠性设计是为了保证所设计的产品可靠性而采用的一系列分析与设计技术,它的功能是在预测和预防产品可能发生故障的基础上,使所设计的产品达到规定的可靠性目标值,是传统设计方法的一种补充和完善。弹簧设计在利用可靠性技术方面取得了一定的进展(见第10章12节),但要进一步完善,需要数据的开发和积累。

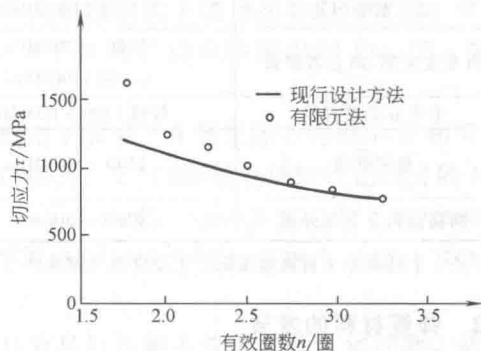


图1-8 现行计算方法与有限元法所得结果的比较

随着计算机技术的发展,在国内外编制出各种版本的弹簧设计程序,为弹簧技术人员提供了开发创新的便利条件。应用设计程序完成了设计难度较大的弧形离合器弹簧和鼓形悬架弹簧的开发等。

随着弹簧应用技术的开发,也给设计者提出了很多需要注意和解决的新问题。如材料、强压和喷丸处理对疲劳性能和松弛性能的影响,设计时难以确切计算,要靠实验数据来定。又如按现行设计公式求出的圈数,制成的弹簧刚度均比设计刚度值小,需要减小有效圈数,方可达到设计要求。当前大批量生产弹簧产品的设计趋势,以最大工作切应力和疲劳寿命要求为例,列于表 1-5。

表 1-5 当前大批量生产弹簧的设计趋势

产品类别	最大工作切应力	相关重要要求
一般机械结构弹簧	静载 900 ~ 1200MPa	开始拥有疲劳寿命要求
	动载 900 ~ 1000MPa	
螺旋扭转簧	900 ~ 1000MPa	
发动机气门弹簧 油泵油嘴弹簧	950 ~ 1200MPa (一般 1100MPa)	疲劳寿命要求 2.3×10^7 次,可靠度 > 90%
汽车变速箱、离合器弹簧	1100 ~ 1200MPa (一般 1100MPa)	有松弛要求,疲劳寿命要求 $(3 \sim 10) \times 10^5$ 次
卡车驻动器弹簧	静载 1100 ~ 1200MPa	有松弛要求
悬架弹簧	1100 ~ 1200MPa	腐蚀疲劳寿命要求 $(3 \sim 5) \times 10^5$ 次
新高速机车悬架弹簧	1000 ~ 1200MPa	

注:上述数据来自当前国际上主要世界级领导性专业公司的产品图样、信息。

3.2 弹簧材料的发展

随着弹簧应用技术的发展,对弹簧材料提出了更高的要求。主要是在高应力下的提高疲劳寿命和抗松弛性能方面;其次是根据不同的用途,要求具有耐蚀性、非磁性、导电性、耐磨性、耐热性等方面。为此,弹簧材料除开发了新品种外,另从严格控制化学成分,降低非金属夹杂,提高表面质量和尺寸精度等方面取得了有益的成效。

(1) 弹簧钢生产工艺的发展 为了提高弹簧钢的质量,工业发达国家已普遍采用炉外精炼技术、连铸工艺、新型轧制和在线自动检测及控制设备等。

为了保证钢的化学成分,降低气体和各种非金属夹杂物的含量,采用大容量电炉或转炉熔炼,采用炉外钢包精炼,使氧含量(质量分数)降至 $(0.0021 \sim 0.0010)\%$,生产出超纯净钢,从而大大提高了弹簧的设计和工作应力。

连铸生产工艺在弹簧钢生产中已被广泛采用。连铸可通过电磁搅拌、低温铸造等技术减小钢的偏析,减小二次氧化,改善表面脱碳,使组织和性能稳定、均匀。

采用分列式全连续轧机,可提高尺寸精度,表面质量,同时也可使钢材沿长度显微组织均匀。在轧制过程中为了保证产品的表面质量采用在线自动检测和控制。为了适应变截面弹簧扁钢生产而开发了奥氏体轧制成形新工艺,即将钢加热到奥氏体区再急冷至亚稳奥氏体区进行塑性加工并淬火处理。这种工艺可使钢在不降低塑性的同时提高强度。此外还有通过轧后在线热处理和表面硬化处理来提高弹簧钢的性能等。

(2) 合金钢的发展 合金元素的主要作用是提高力学性能,改善工艺性能及赋予某种

特殊性能。气门弹簧和悬架弹簧已广泛应用 SiCr 钢。Si 是抗应力松弛最好的合金元素，在 SiCr 钢中添加 V、Mo 形成 SiCrV 和 SiCrMo 钢，可以提高疲劳寿命和抗松弛性能气门的失效多为松弛。同时 SiCr 拉拔钢丝，其在高温下工作时的抗松弛性能，比琴钢丝和重要用途碳素弹簧钢丝要好。随着发动机高速小型化，抗颤振性能好、质量轻、弹性模量小的 Ti 合金得到了较为广泛的应用，其强度可达 2000MPa。

(3) 低碳奥氏体钢的发展 低碳奥氏体钢 38SiMnB 是我国自主研发的一种新型的高性能弹簧钢，在此基础上开发的 38SiMnVBE 更具优越性，具有高强韧性、高淬透性、高应用性和高性能比。在进行超细晶粒控制轧制后，其抗拉强度 $\sigma_b = 2030 \sim 2140\text{MPa}$ ，屈服强度 $\sigma_{0.2} = 900 \sim 2010\text{MPa}$ ，伸长率 $\delta_5 = 12\% \sim 15\%$ ，面缩率 $\psi = 48\% \sim 55\%$ 。为少片变截面板簧提供了高性能的材料。

(4) 不锈钢的发展 我国是生产不锈钢的大国，随着不锈钢的生产发展，自然也开发了不少品种，目前已达 50 多种，基本满足了国内生产发展的需要，对当前开发的一些新品种作简要说明。

1) 奥氏体不锈钢体系的初步形成。为了消除碳元素造成的不锈钢晶界腐蚀疲劳，开发出低碳奥氏体不锈钢 0Cr18Ni9 和 00Cr17Ni2Mo2。为了提高其特殊性能可加 Cu、Ti、Nb、Mn、Cr、Si 和 N 等元素。

2) 含氮不锈钢的发展。在不锈钢中以氮代碳取得了成果。在奥氏体不锈钢中 N 和 C 有许多共同特性。N 稳定奥氏体的作用比 Ni 大，与 C 相当。N 与 Mn 结合能取代比较贵的 Ni。

在奥氏体中 N 也是最有效的固溶强化元素之一。N 与 Cr 的亲合力要比 C 与 Cr 的亲合力小，奥氏体钢很少见到 Cr₂N 的析出。因此 N 能在不降低耐蚀性能的基础上，提高不锈钢强度。

3) 超强铁素体不锈钢的发展。铁素体不锈钢具有良好的耐蚀性能和抗氧化性能，其抗应力腐蚀性能优于奥氏体不锈钢。价格比奥氏体不锈钢便宜。但存在可焊性差、脆性倾向比较大的缺点，生产和使用受到限制。通过降低钢中的碳和氮的含量，添加 Ti、Nb、Zr、Ta 等稳定化元素，添加 Cu、Al、V 等焊缝金属韧化元素三种途径，可以改善铁素体钢的可焊性和脆性。

4) 超级奥氏体钢的发展。超级奥氏体钢指 Cr、Mo、N 含量显著高于常规不锈钢的奥氏体钢。其中比较著名的是含 6% Mo 的钢 (245SMo)。这类钢具有非常好的耐局部腐蚀性能，在海水、充气、存在缝隙、低速冲刷条件下，有良好的抗点蚀性能 ($PI \geq 40$) 和较好的抗应力腐蚀性能，是 Ni 基合金和钛合金的代用材料。

5) 超马氏体不锈钢的发展。传统的马氏体不锈钢 2Cr13、3Cr13、4Cr13 和 1Cr17Ni2 缺乏足够的延展性，在冷顶锻变形过程中对应力十分敏感，冷加工成形比较困难。加之钢的可焊性比较差，使用范围受到限制。为克服马氏体钢的上述不足，近来已找到一种有效途径，就是通过降低钢的 C、Ti 含量，增加 Ni 含量，开发一个新系列合金钢——超马氏体钢。这类钢抗拉强度高，延展性好，焊接性能也得到改善，因此超马氏体钢又称为软马氏体钢或可焊接马氏体钢。

(5) 弹簧钢丝的发展 弹簧钢丝经过 100 多年的发展，工艺技术经历了由铅淬火到油淬火，现又发展到感应加热淬火。再加上工艺技术装备不断创新和完善，品种质量不断更新。近来开发的阀门用弹簧钢丝感应加热淬火和回火处理工艺，试验证明，由于感应加热时