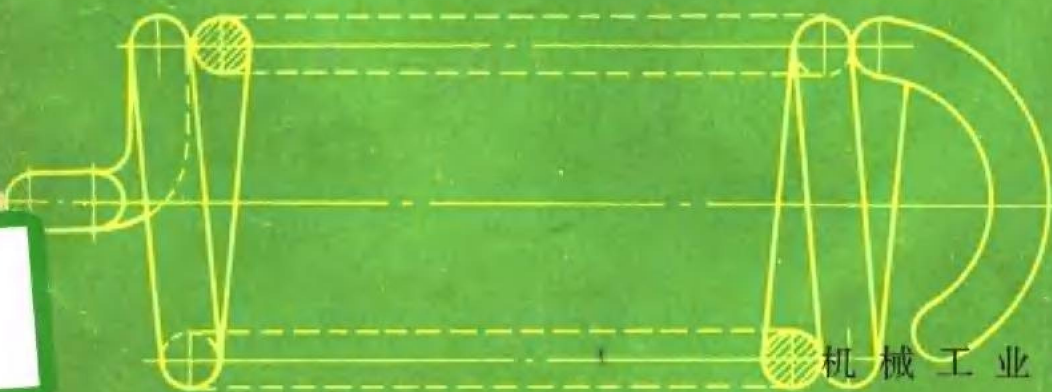
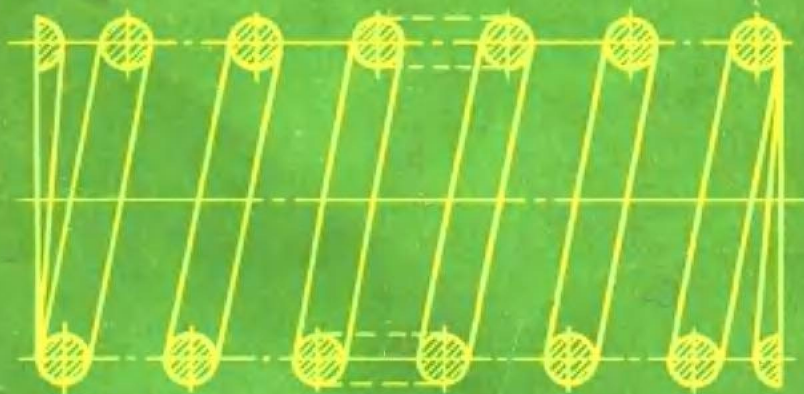


弹簧

张英会主编

TANHUANG ·



机械工业出版社

V

θ —— 扭杆弹簧单位长度的扭转角; 极角 rad
 α —— 系数
 μ —— 泊松比
 σ —— 正应力 kgf/mm²
 σ_b —— 抗拉强度极限 kgf/mm²
 σ_c —— 挤压应力; 抗触应力 kgf/mm²
 σ_j —— 弹簧的工作极限应力 kgf/mm²
 σ_s —— 抗拉屈服极限 kgf/mm²

τ —— 切应力 kgf/mm²
 τ_0 —— 初切应力 kgf/mm²
 τ_b —— 抗扭强度极限 kgf/mm²
 τ_j —— 弹簧的工作极限应力 kgf/mm²
 τ_s —— 抗扭屈服极限 kgf/mm²
 φ —— 扭转变形角 deg; rad
 χ —— 系数
 ψ —— 极角 rad

前 言

弹簧广泛应用于机械、仪表、电器、交通运输工具以及日常生活器具等，所以它是一个影响面比较大的基础零件。近年来，国内外在弹簧的研究和生产技术方面都有很大的发展，本书在总结国内外有关先进理论和生产技术的基础上，对弹簧的理论和设计方法进行了较为系统的阐述，以求提高弹簧的设计理论、方法和制造水平。

弹簧应用广泛、类型繁多，随着科学技术的发展和要求，新的类型不断出现。本书以阐述普通圆柱螺旋弹簧为主，对于国内书刊反映比较少的不等节距螺旋弹簧、蜗卷螺旋弹簧、非圆弹簧圈螺旋弹簧、多股螺旋弹簧等也都做了比较深入的分析 and 介绍，尤其是应用日益广泛的橡胶弹簧和空气弹簧，阐述分析得比较详细，一方面向读者介绍了它们的性能和设计方法，一方面也起到推广它们的作用。

本书从基本理论出发，对弹簧的设计计算方法做了比较系统的分析和推导，以期能使设计技术人员对其有比较全面系统的了解，从而达到正确和灵活运用这些方法的目的。另外，对于一些弹簧的设计计算方法进行了研究和完善，如不等节距弹簧和非圆形弹簧圈弹簧等的设计计算公式，就是在综合归纳的基础上进一步完善而推导出来的，经过多方验证是可行的。为了便于计算，还绘制了一些计算用线图。

此外，本书对弹簧的材料、制造方法和检验也做了比较扼要的阐述。

参加本书编写的有：北京钢铁学院张英会（第一、五~十三章）、罗圣国（第十四~十八章）、青岛四方车辆研究所郭荣生（第十九、二十章）、西安仪表厂马书广（第二、三章）、齐齐哈尔卫东机械制造厂孙守贤（第二、三章）、上海中国弹簧厂项松年（第四章）、西安昆仑机械厂包希曾（第十二章）。另外，北京钢铁学院夏琦参与了第二、三章的编写和整理，陈泽桁为第八~十、十三章提供了部分结构图。在本书编写过程中得到了第一机械工业部标准化研究所崔俊山、王湘，天津弹簧厂肖椿霖，上海压缩机厂朱乃彬，北京工业学院何献忠、丁法乾，北京航空学院郭可谦、白琼林以及弹簧行业组同志们的多方面大力支持，在此表示衷心感谢。

本书稿经齐齐哈尔第二机床厂候锡九同志审校，提出了很多宝贵意见使书稿得到了进一步完善，在此表示深切谢意。

由于编著者水平有限，书中缺点错误在所难免，恳望读者批评指正。

张 英 会

1980年10月

常用符号和单位

A ——弹簧材料截面面积 mm^2 ；当量弯曲刚度 kgf/mm	量 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$
a ——矩形截面材料垂直于弹簧轴线边的边长 mm	m_s ——弹簧的质量 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$
B ——平板的弯曲刚度 kgf/mm	m ——比值, $m = b/a$ ；多股弹簧的钢丝股数
b ——高径比；矩形截面弹簧材料平行于弹簧轴线边的边长 mm	N ——变载荷循环次数
C ——旋绕比；直径比；系数	n ——弹簧的工作圈数
c ——钢索指数	n_1 ——弹簧的总圈数
D ——弹簧外径 mm	n_2 ——弹簧的支承圈数
D_1 ——弹簧内径 mm	P ——弹簧所受载荷 kgf
D_2 ——弹簧中径 mm	P_f ——弹簧的工作极限载荷 kgf
d ——圆形截面弹簧材料直径 mm	P_0 ——圆柱拉伸弹簧的初拉力 kgf
d_0 ——钢索外径 mm	P_r ——弹簧所受径向和剪切载荷 kgf
d_1 ——钢索中心股钢丝直径 mm	P_s ——弹簧的极限载荷 kgf
d_2 ——钢索通过各钢丝中心的圆的直径 mm	P' ——弹簧的刚度 kgf/mm
E ——弹性模量 kgf/mm^2	P'_r ——弹簧的径向和切刚度 kgf/mm
F ——弹簧的变形量 mm	p' ——弹簧每圈的刚度，单片碟形弹簧的刚度 kgf/mm
F_0 ——圆柱拉伸弹簧对应于初拉力 P_0 的假设变形量 mm	p'_0 ——螺旋弹簧单位长度的刚度 $\text{kgf/mm}\cdot\text{mm}$
F_f ——弹簧的工作极限变形量 mm	R ——弹簧簧圈的中半径 mm
F_r ——弹簧的径向或切向变形量 mm	S ——安全系数；切变刚度 kgf/mm
F_s ——弹簧的极限变形量 mm	T ——扭矩 $\text{kgf}\cdot\text{mm}$
F_{st} ——弹簧的线性静变形量 mm	T' ——扭转刚度 $\text{kgf}\cdot\text{mm}/\text{deg}$
f ——螺旋弹簧的单圈变形量；碟形弹簧的单片变形量 mm ；弹簧的自振频率 $\text{Hz}(\text{S}^{-1})$	t ——弹簧的节距 mm
f_r ——变载荷的振动频率 $\text{Hz}(\text{S}^{-1})$	U ——变形能 $\text{kgf}\cdot\text{mm}$ ； $\text{kgf}\cdot\text{mm}\cdot\text{rad}$
G ——弹簧材料的切变模量 kgf/mm^2	u ——比变形能 $\text{kgf}\cdot\text{mm}/\text{mm}^3$
H ——弹簧的工作高度（长度） mm	V ——弹簧的体积 mm^3
H_0 ——弹簧的自由高度（长度） mm	v ——冲击体的速度 mm/s
H_f ——弹簧的工作极限高度（长度） mm	W ——冲击体的重量；承载物体的重量 kgf
h ——碟形弹簧的内截锥高度 mm	W_s ——弹簧自身重量 kgf
I ——惯性矩 mm^4	Z_t ——抗扭截面系数 mm^3
I_p ——极惯性矩 mm^4	Z_b ——抗弯截面系数 mm^3
K ——曲度系数；系数	α ——螺旋角 deg
K_t ——温度修正系数	β ——计算矩形材料圆柱螺旋弹簧的切应力系数；角度 rad
k ——系数	γ ——弹簧材料的重量，对于钢材 $\gamma = 7.85 \times 10^{-6}$ kgf/mm^3 ；弹簧端部的偏转变形的偏转角 rad
L ——弹簧材料的展开长度 mm	ζ ——系数
M ——弯曲力矩 $\text{kgf}\cdot\text{mm}$ ；作用于弹簧上物体的质	ξ ——系数
	η ——缓冲效率；系数

目 录

前言	
常用符号和单位	
第一章 概述	1
一、弹簧的基本性能	1
二、弹簧的类型	7
第二章 弹簧材料	16
一、概述	16
二、弹簧材料的种类	17
三、弹簧钢	19
四、弹簧用特殊钢和弹性合金	23
五、弹簧钢丝	33
六、弹簧用铜合金	35
七、非金属弹簧材料	40
八、弹簧材料的选择	41
第三章 弹簧的制造工艺	46
一、概述	46
二、冷成形弹簧的制造工艺	46
三、热成形弹簧的制造工艺	57
四、弹簧的热处理	60
五、弹簧的机械强化	66
六、弹簧的防腐蚀	70
第四章 弹簧的试验和检查方法	75
一、概述	75
二、圆柱螺旋弹簧的静态试验和检查方法	76
三、圆柱螺旋弹簧的动态试验和检查方法	88
第五章 弹簧的疲劳强度	90
一、变应力的类型和特性	90
二、疲劳失效机理概述	92
三、疲劳曲线 (S-N 曲线)	93
四、影响弹簧疲劳强度的因素	95
五、弹簧的疲劳试验	97
六、试验数据的处理	99
七、极限应力图及其绘制方法	106
八、安全系数的计算	109
九、受稳定变应力压缩螺旋弹簧的 最佳设计原则	101
十、受不稳定变应力弹簧的计算准则	112
十一、断裂力学在弹簧设计中的应用简介	114
第六章 扭杆弹簧	116
一、扭杆弹簧的结构、类型和用途	116
二、扭杆弹簧的载荷计算	117
三、扭杆弹簧的变形和应力的计算	118
四、扭杆弹簧的端部形状和有效工作长度	122
五、扭杆弹簧的材料和许用应力	125
六、扭杆弹簧的制造和检验	125
第七章 圆柱螺旋弹簧的基本理论	129
一、圆柱螺旋弹簧的几何参数	129
二、圆柱螺旋弹簧的受力分析	130
三、圆柱螺旋弹簧的应力分析	133
四、圆柱螺旋弹簧的变形分析	137
五、圆柱螺旋弹簧的稳定性	147
六、圆柱螺旋弹簧的自振频率	153
七、弹簧受冲击载荷作用时的应力 和变形分析	157
第八章 圆柱压缩螺旋弹簧	160
一、圆柱压缩螺旋弹簧的结构设计	160
二、圆柱压缩螺旋弹簧的设计计算公式	164
三、圆柱螺旋弹簧的许用应力	169
四、圆柱压缩螺旋弹簧的设计计算	170
五、大螺旋角圆柱压缩螺旋弹簧的 设计计算	180
六、圆柱压缩螺旋弹簧受振动载荷时的 设计计算	182
七、强压处理的圆柱螺旋弹簧的设计计算	185
八、受轴向和径向载荷作用的 圆柱压缩螺旋弹簧的设计计算	186
九、圆柱组合压缩螺旋弹簧的设计计算	188
十、圆柱压缩螺旋弹簧的调整结构	193
十一、圆柱压缩螺旋弹簧的工作图	194
第九章 圆柱拉伸螺旋弹簧	196
一、圆柱拉伸螺旋弹簧的结构设计	196
二、圆柱拉伸螺旋弹簧的设计计算	201
三、圆柱拉伸螺旋弹簧的拉力调整结构	202

四、圆柱拉伸螺旋弹簧的工作图	203	三、环形弹簧设计参数的选择	308
第十章 圆柱扭转螺旋弹簧	205	四、环形弹簧的材料和许用应力	309
一、圆柱扭转螺旋弹簧的结构设计	205	五、环形弹簧的制造和技术要求	309
二、圆柱扭转螺旋弹簧的设计计算公式	207	第十六章 平面蜗卷弹簧	310
三、圆柱扭转螺旋弹簧的许用应力	210	一、平面蜗卷弹簧的结构、特点和用途	310
四、圆柱扭转螺旋弹簧的设计	210	二、平面蜗卷弹簧的设计计算	310
五、圆柱扭转螺旋弹簧的安装和工作图	214	三、平面蜗卷弹簧的材料和制造	317
第十一章 非线性特性线螺旋弹簧	216	第十七章 片弹簧、线弹簧和弹性挡圈	318
一、不等节距圆柱压缩螺旋弹簧	216	一、片弹簧	318
二、圆锥压缩螺旋弹簧	219	二、线弹簧	332
三、中凹和中凸形螺旋弹簧	228	三、弹性挡圈	334
四、蜗卷螺旋弹簧	231	第十八章 板弹簧	338
第十二章 多股螺旋弹簧	241	一、板弹簧的类型	338
一、概述	241	二、板弹簧的结构	340
二、无中心股多股压缩螺旋弹簧	243	三、板弹簧的计算	343
三、有中心股多股压缩螺旋弹簧	249	四、板弹簧的设计方法	352
四、多股扭转螺旋弹簧	255	五、板弹簧的材料、强压处理和试验	357
五、多股螺旋弹簧的材料和许用应力	256	第十九章 橡胶弹簧	358
六、多股螺旋弹簧的制造和检验	256	一、减振橡胶的工程特性	358
第十三章 非圆形弹簧圈螺旋弹簧	260	二、橡胶弹簧的静特性计算	362
一、矩形弹簧圈压缩螺旋弹簧	260	三、橡胶弹簧的动力学性能	384
二、椭圆形弹簧圈压缩螺旋弹簧	266	四、橡胶弹簧的设计	391
三、卵形弹簧圈压缩螺旋弹簧	267	五、橡胶弹簧的应用实例	396
第十四章 碟形弹簧	272	第二十章 空气弹簧	399
一、碟形弹簧的结构、特点和应用	272	一、空气弹簧的特点及其基本理论	400
二、碟形弹簧的载荷与变形关系	275	二、空气弹簧的类型及其特点	407
三、碟形弹簧的应力计算	285	三、空气弹簧的刚度计算	419
四、碟形弹簧的设计	292	四、空气弹簧的强度计算	434
五、碟形弹簧的材料和制造工艺	294	五、空气弹簧的阻尼特性	439
六、其它类型碟形弹簧计算简介	296	六、高度控制阀的特性	456
第十五章 环形弹簧	300	七、液力-空气弹簧	467
一、环形弹簧的结构、特点和应用	300	参考文献	482
二、环形弹簧的设计计算	302		

第一章 概 述

弹簧是一种机械零件，它利用材料的弹性和结构的特点，在工作时产生变形，把机械功或动能转变为变形能（位能），反之，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挂弹簧等；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，在机械设备和仪表以及生活用具上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，玩具的发条等都属于弹簧的范围。

一、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. 弹簧的特性线和弹簧的刚度

载荷 $P(T)$ 与变形 $F(\varphi)$ 之间的关系曲线称为弹簧的特性线，如图 1-1 所示。弹簧

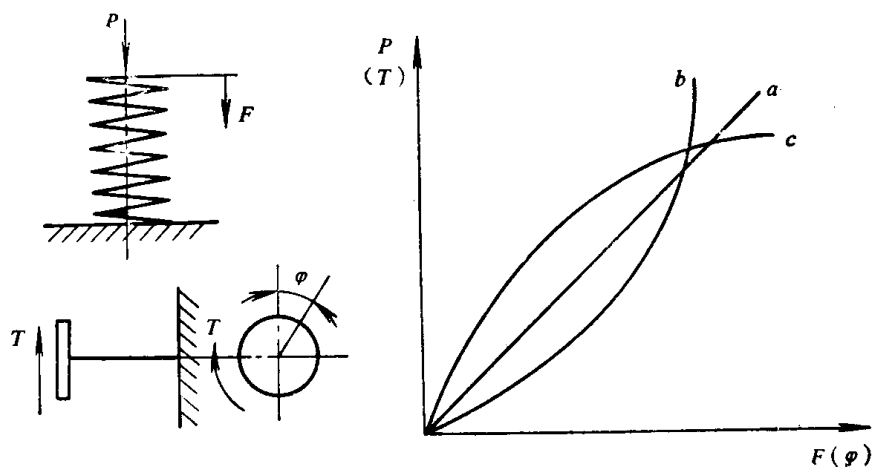


图1-1 弹簧的特性线

a) 直线型 b) 渐增型 c) 渐减型

的特性线大致有三种类型：1）直线型 a ；2）渐增型 b ；3）渐减型 c 。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。如蜗卷压缩螺旋弹簧的特性线（图 1-2 a），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 1-2 b），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 1-2 c），加载时为直线型，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 1-2 d 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。

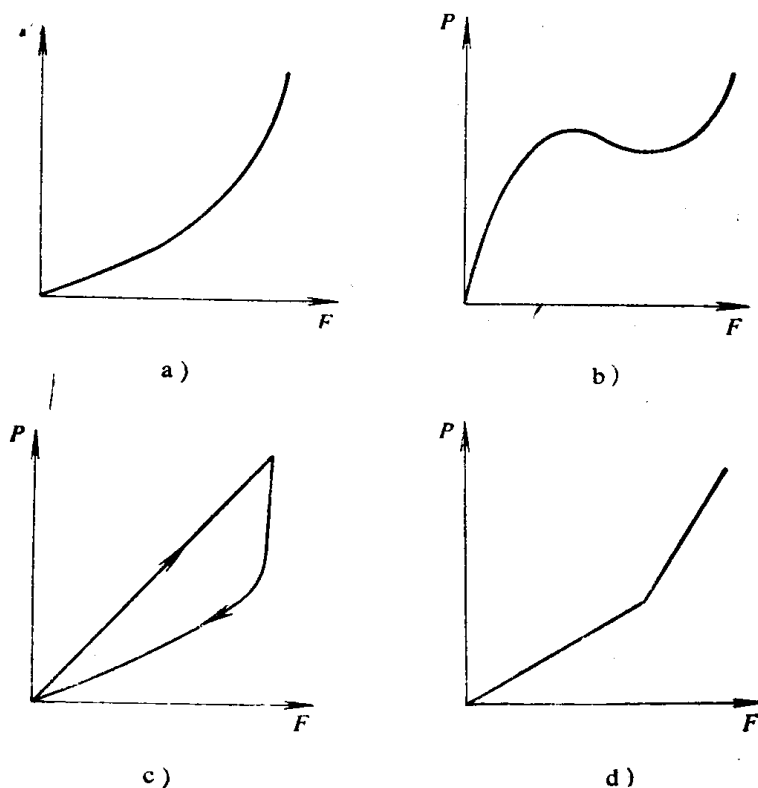


图1-2 组合型特性线

载荷增量 $dP(dT)$ 与变形 $dF(d\varphi)$ 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

$$P' = \frac{dP}{dF} \quad (1-1 a)$$

对于扭转弹簧的刚度为

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

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

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

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

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 1-2 a 所示蜗卷压缩螺旋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1-2 b所示S形，这是车辆悬挂装置的理想状态。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边缘区段则刚度逐渐增加。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1-2 c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的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。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S，作切线与横坐标轴相交，其交点与S点在横坐标轴上距离即变形量 F_{st} ，称为切点S对应载荷 P_{st} 的静变形。

2. 弹簧的变形能

当设计缓冲或减振弹簧时，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

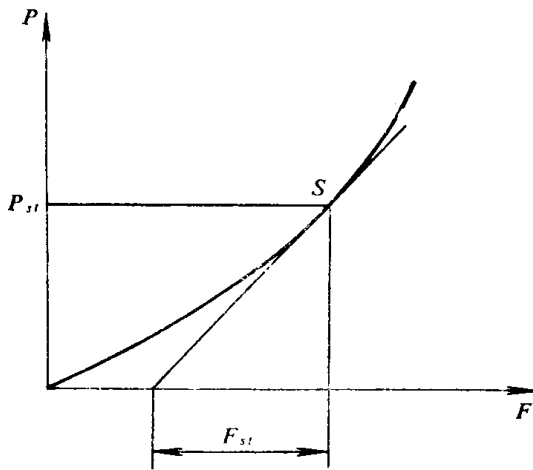


图1-3 静变形示意图

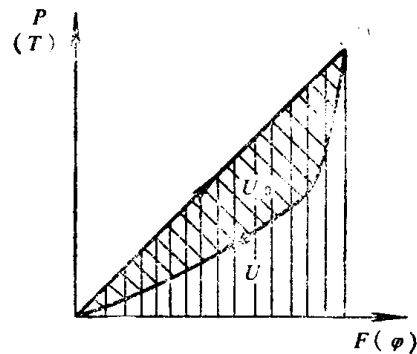


图1-4 具有能量消耗弹簧的变形能

$$U = \int_0^F P(F) dF$$

对扭转弹簧为

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

就是图中下部的面积。

当特性线为直线时，则

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

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

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。

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
圆形截面材料扭转螺旋弹簧		$\frac{1}{8}$	0.25
矩形截面材料扭转螺旋弹簧		$\frac{1}{6}$	0.33
平面蜗卷形弹簧		$\frac{1}{6}$	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
方形截面材料拉伸或压缩螺旋弹簧		$\frac{1}{6.5}$	0.27
矩形截面材料拉伸或压缩螺旋弹簧	$\frac{1}{k_1} \left(\frac{V\tau^2}{2G} \right)$ ②	—	—

① 比值按 $G \approx \frac{E}{2.6}$, $\tau \approx \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$ 换算的；式中 G 为切变模量， E 为弹性模量， τ 为切应力， σ 为正应力。

② 系数 k_1 见表6-1。

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，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。

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，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。

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

评定缓冲弹簧系统效能的指标为缓冲效率 η ，其计算式为

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2}{P_{\max} F_{\max}} \quad (1-6)$$

式中 W ——冲击物体的重量；

g ——重力加速度；

v ——冲击物体与弹簧系统接触时的速度；

P_{\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 $1/2$ 。粘弹性缓冲系统，如橡胶缓冲系统，其效率要高些。

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（见第七章）可知各类弹簧自振频率 f 可用下式计算

$$f = \sqrt{\frac{P'}{m_e}} \quad (1-7)$$

式中 P' ——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（见表 7-5）。

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，其值见图 7-17，图 a 情况 $\zeta = 0.33$ ，图 b 情况 $\zeta = 0.23$ ；

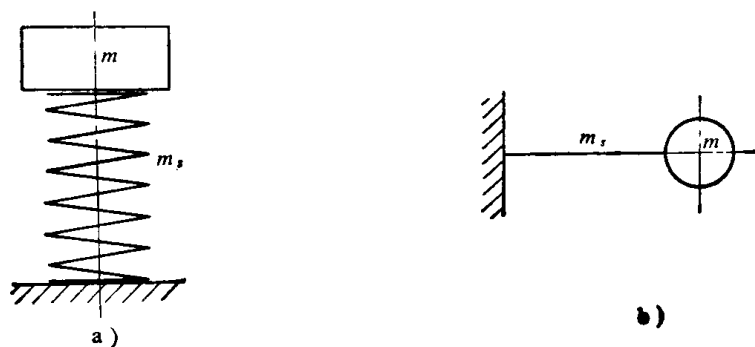


图1-5 弹簧系统

4. 弹簧系统受迫振动的振幅

图 1-6 所示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。

当弹簧系统的振动体受到激振力 $P \sin \omega_r t$ 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 为受迫振动的振幅， φ 为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。对于粘性阻尼，设其阻尼力为 $r\dot{x}$ ，当振动体受到激振力 $P \sin \omega_r t$ 作用时，其振幅

$$F_a = \frac{F}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (1-8)$$

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

$$F_a = \frac{F \sqrt{1 + (2\zeta\lambda)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (1-9)$$

式中 F ——在与激振力幅值 P_a 相等的静力作用下系统的静变形， $F = P/P'$ ， P' 为弹簧系统的刚度；

λ ——频率比， $\lambda = \omega_r / \omega = f_r / f$ ； ω 和 f 为系统的自振角频率和频率， ω_r 和 f_r 为激振角频率和频率；

ζ ——阻尼比， $\zeta = r/r_0$ ； r 为阻尼系数， r_0 为临界阻尼系数， $r_0 = 2\sqrt{mP'}$ 。

图 1-7 所示为振幅比 F_a/F 与频率比 λ 和 ζ 阻尼比的关系。

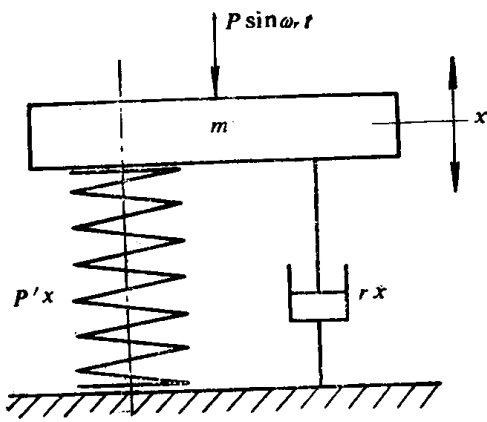


图1-6 弹簧的支承或悬挂系统

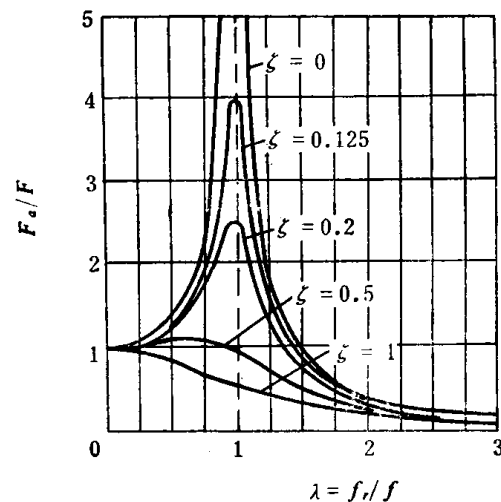


图1-7 F_a/F 与 λ 和 ζ 的关系

由图 1-7 可以看出，当 $\lambda = f_r / f \approx 1$ 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

$$F_a = \frac{F}{2\zeta} = \frac{P}{r\omega} = \frac{P}{2\pi r f} \quad (1-10)$$

如阻尼甚小，则可认为共振振幅就是受迫振动的振幅。

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

二、弹簧的类型

弹簧的类型很多，弹簧的分类方法也很多。按结构形状来分，弹簧大致有如下一些类型。

1. 圆柱螺旋弹簧

(1) 圆柱圆形截面材料压缩螺旋弹簧 (图 1-8) 这种弹簧结构简单、制造方便，特性线接近直线，刚度较稳定，应用最广，一般简称压缩螺旋弹簧。

(2) 圆柱矩形截面材料压缩螺旋弹簧 (图 1-9) 在同样的空间条件下，矩形截面比圆形截面材料的刚度大，吸收的能量多。特性线更接近于直线，刚度更接近于常数。

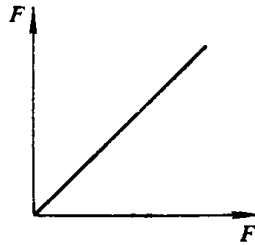
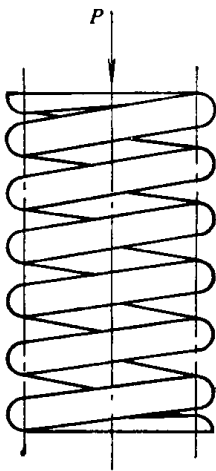


图1-8 圆柱圆形截面材料压缩螺旋弹簧及其特性线

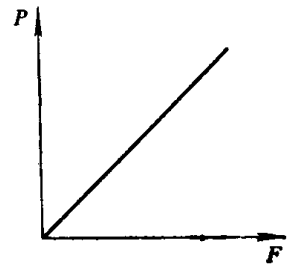
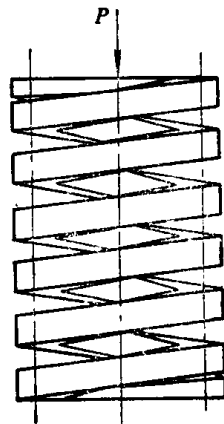


图1-9 圆柱矩形截面材料压缩螺旋弹簧及其特性线

(3) 圆柱不等节距压缩螺旋弹簧 (图 1-10) 这种弹簧当载荷增大到一定程度后，随

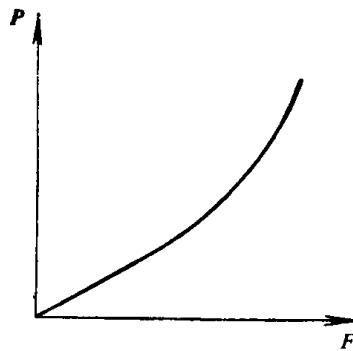
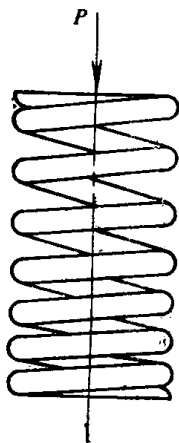


图1-10 圆柱不等节距压缩螺旋弹簧

着载荷的增大，弹簧从小节距开始依次逐渐并紧，刚度逐渐增大，特性线由线性变为渐增型。因此其自振频率为变值，利于消除或缓和共振的影响。多用于高速变载荷的机构。

(4) 圆柱多股压缩螺旋弹簧 (图 1-11) 这种弹簧的材料为细钢丝拧成的钢丝绳。在未受载荷时，钢丝绳各根钢丝材料之间的接触比较松，只有当外载荷达到一定程度时，接触才紧密起来，这时弹簧的刚性也就增大了。因此多股压缩螺旋弹簧的特性线有折点。这种弹簧的柔度比较大，在一定载荷作用下，可以得到小的振幅，它比普通螺旋弹簧的强度要高。由于钢丝之间的相互摩擦，具有减振的作用。

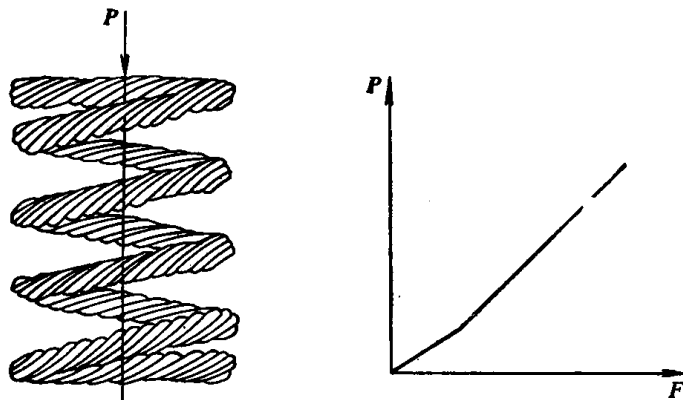


图1-11 圆柱多股压缩螺旋弹簧

(5) 圆柱拉伸螺旋弹簧 (图 1-12) 性能和特点与压缩螺旋弹簧相同，主要承受拉伸载荷。

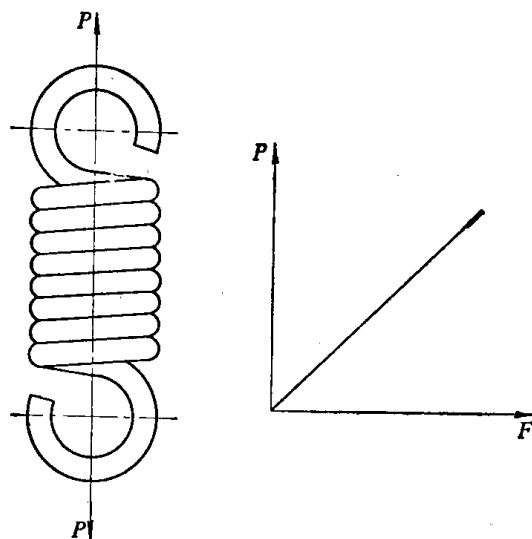


图1-12 圆柱拉伸螺旋弹簧

(6) 圆柱扭转螺旋弹簧 (图 1-13) 这种弹簧承受扭转载荷，主要用于压紧和储能以及传动系统中的弹性环节，具有线性特性线。

2. 变径螺旋弹簧

(1) 圆锥螺旋弹簧 (图 1-14) 这类弹簧的作用与不等节距螺旋弹簧相类似，载荷达

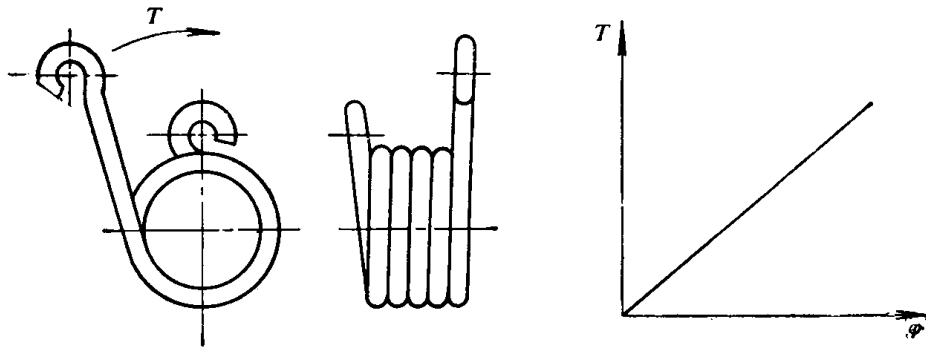


图1-13 圆柱扭转螺旋弹簧

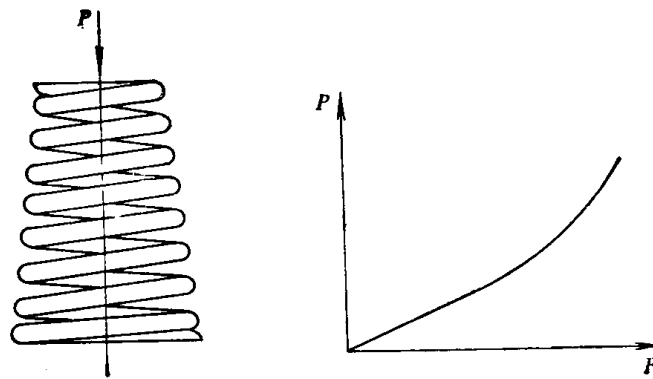


图1-14 圆锥形螺旋弹簧

到一定程度后，弹簧从大圈到小圈依次逐渐并紧，刚度逐渐增大，特性线由线性变为渐增型，有利于消除或缓和共振。这种弹簧结构紧凑，稳定性好，多用于承受较大载荷和减振。

(2) 中凸和中凹形螺旋弹簧(图 1-15) 这类弹簧的特性相当于圆锥形螺旋弹簧。中凸形螺旋弹簧在有些场合下代替圆锥形螺旋弹簧使用。中凹形螺旋弹簧多用作坐垫或床垫。

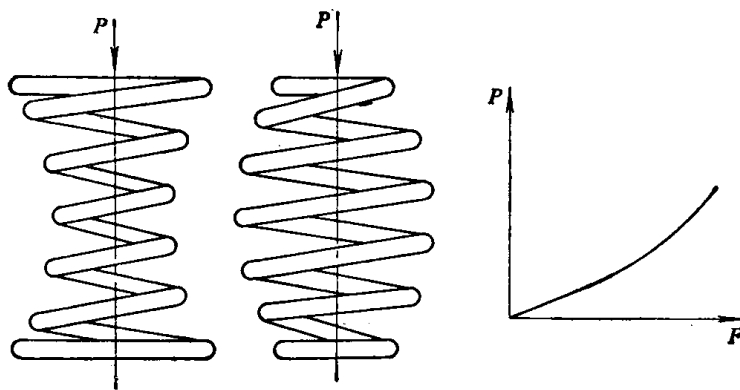


图1-15 中凸和中凹形螺旋弹簧

(3) 组合螺旋弹簧 (图 1-16) 这种弹簧可以采用各种类型的螺旋弹簧进行组合, 因此可以得到任意特定的特性线。

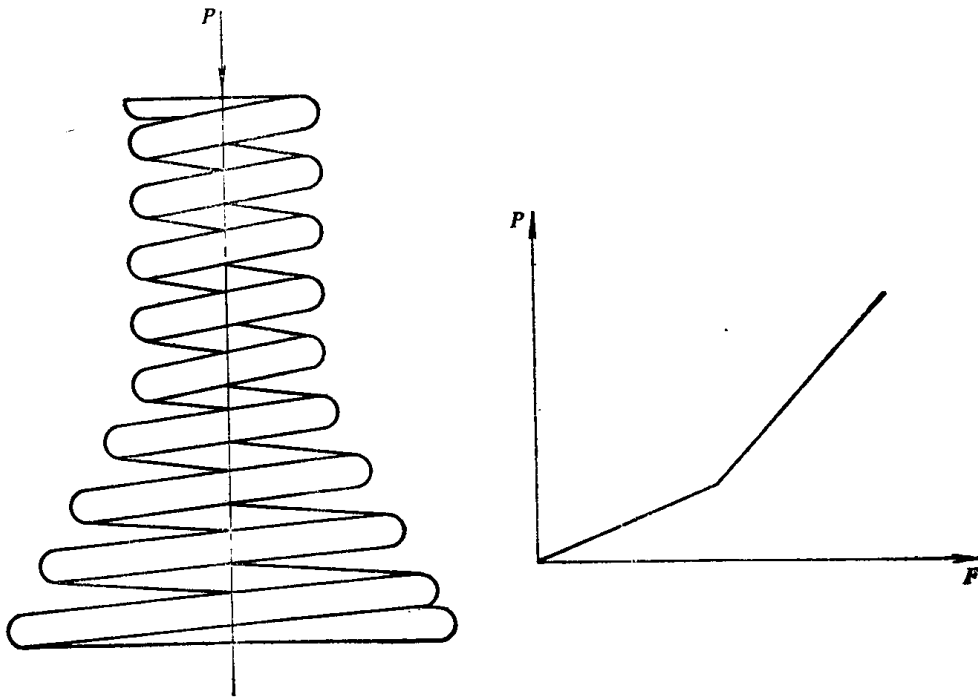


图1-16 组合螺旋弹簧

(4) 蜗卷螺旋弹簧 (图 1-17) 这种弹簧的特性线与圆锥螺旋弹簧相似, 但非线性段是急剧增加的, 在行程不大的情况下, 就能吸收较大的能量。所以结构紧凑, 承受的载荷比较大。这种弹簧制造困难, 除空间受限制外, 一般不采用。

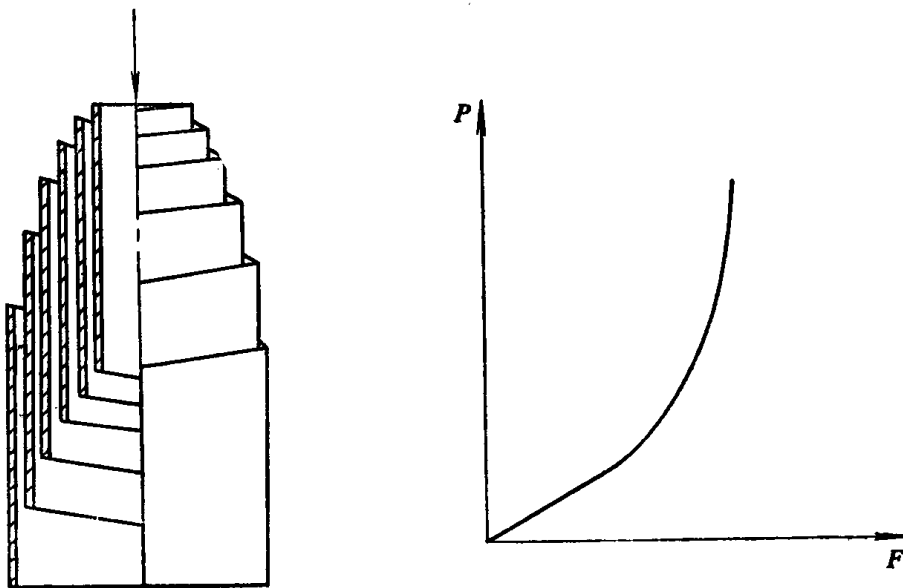


图1-17 蜗卷螺旋弹簧

3. 非圆形螺旋弹簧 (图 1-18) 这种弹簧主要用在外廓尺寸有限制的情况下。根据外廓空间的要求, 弹簧圈可制成方形、矩形、椭圆形、梯形以及其它所需形状。特性线仍为直线型。

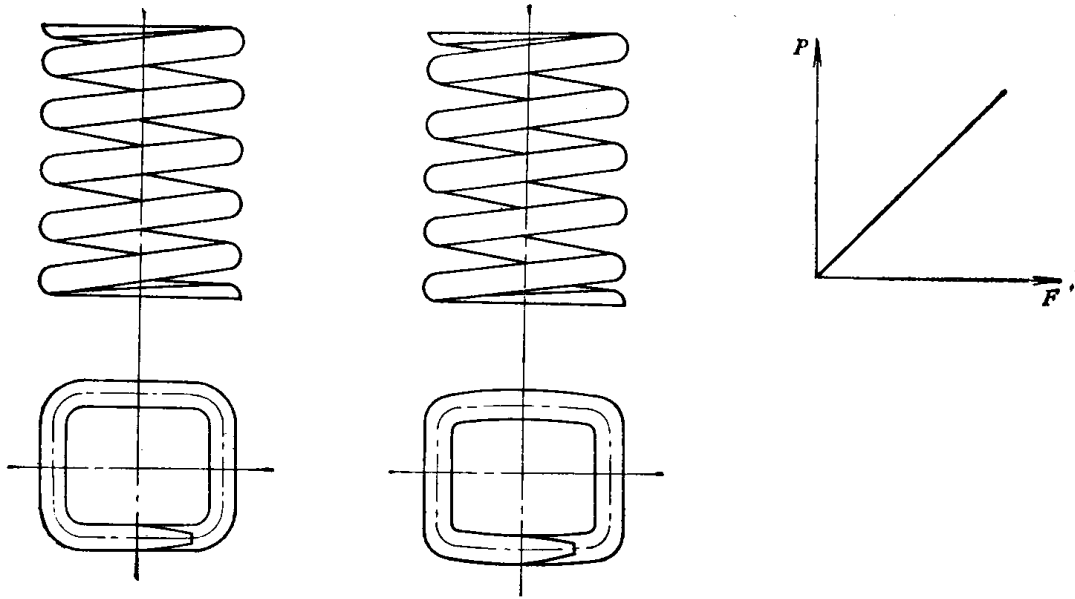


图1-18 非圆形螺旋弹簧

4. 扭杆弹簧 (图 1-19) 这种弹簧的结构简单, 但材料和制造精度要求高。特性线为直线型。单位体积变形能大。主要用于各种车辆的悬挂装置上。

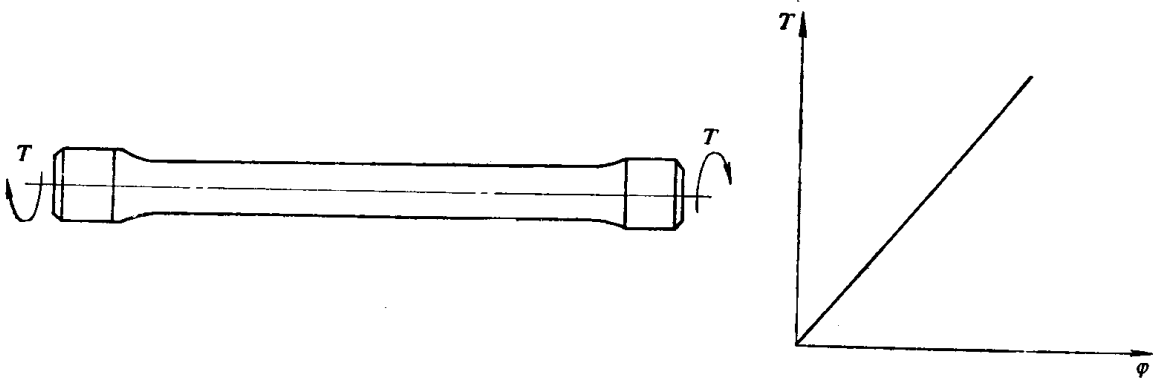


图1-19 扭杆弹簧

5. 碟形弹簧 (图 1-20) 加载与卸载特性线不重合, 在工作过程中有能量消耗, 因此缓冲和减振能力强。碟片可采用不同的组合方式, 从而可以得到不同类型的特性线。多用于要求缓冲和减振能力强的场合。

6. 环形弹簧 (图 1-21) 这种弹簧由钢制成的具有圆锥面的内外环组成。在承受载荷时, 圆锥面之间产生较大的摩擦力, 因而减振能力很强。多用于要求缓冲能力强的场合。