

本书共分十章,较全面系统地阐述了片簧、张丝、吊丝、盘簧、螺旋弹簧、热敏双金属、压力弹簧管、膜片、膜盒、波纹管、振动弦、振动筒等仪器仪表弹性元件的设计与计算,并介绍了它们的制造工艺和测试方法,还列举了一些工程实践中使用方便的曲线图、表。

本书可供从事仪器仪表弹性元件设计与制造方面的工程技术人员,以及大专院校有关专业师生参考。

仪表弹性元件设计基础

翁善臣 林友德 徐振廷 胡寿镛 傅雄刚 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市顺义县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 23 · 字数 557 千字

1982 年 2 月北京第一版 · 1982 年 2 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,800 · 定价 2.40 元

*

统一书号: 15033 · 4973

前 言

弹性元件是仪器仪表的基础元件之一。它能够实现变换、隔离、密封、补偿、贮能和连接等各种不同的功能，而且结构简单、使用方便。因此，弹性元件不仅在仪器仪表中得到广泛应用，而且成为化工、石油、电子、航空及其他工业部门不可缺少的重要元件。

目前，国内系统论述仪器仪表弹性元件方面的书籍十分缺乏。为了促进我国仪器仪表工业的发展，提高基础元器件的设计制造水平，由国家仪器仪表工业总局委托沈阳仪器仪表工艺研究所组织有关单位编写了《仪表弹性元件设计基础》一书。

本书共分十章，系统地阐述各类仪器仪表弹性元件的设计与计算，概略介绍它们的制造工艺和测试方法，并列举了工程实践中使用方便的曲线及图表。本书力求把薄壳力学和弹性元件的设计制造结合起来，在弹性理论与应用实践之间建立联系。

本书的读者对象主要是从事仪器仪表弹性元件设计制造方面的工程技术人员，也可供仪器仪表使用部门和高等学校有关专业师生参考。

参加本书编写的有王健、韩文秀、韩丽珍、李自芳、韩南松、欧锦才、王伯仁、李耀昌、吴家忻、李美、傅雄刚、林友德、胡寿镛、徐振廷、顾广瑞和翁善臣等同志。本书由翁善臣、林友德、胡寿镛、傅雄刚和徐振廷主编，樊大钧、吕虹两位同志审阅。

在编写过程中，得到上海自动化仪表一厂、常州热工仪表厂、北京手表元件厂、上海仪表游丝厂及上海钟表材料厂等单位的积极支持，在此表示衷心地感谢！

由于编者水平所限，书中不可避免会出现许多缺点和错误，敬请读者批评指正。

绪 论

在仪器仪表中，利用材料的弹性特性完成各种功能的元件称为弹性元件。常用的有：片簧、张丝、吊丝、盘簧、螺旋弹簧、热敏双金属、压力弹簧管、膜片、膜盒、波纹管、振动弦、振动筒等。

弹性元件能够完成变换、隔离、密封、补偿、贮能、连接等各种不同的功能，其质量的优劣直接影响到仪器仪表的精度与可靠性，而且它的结构简单，价格低廉，因此，弹性元件在仪器仪表中应用十分广泛，是仪器仪表的主要基础元件之一。

弹性元件能将一些难以直接测量的物理量（如压力、流量、温度等）转换成便于测量的长度、角度等参量，以便于进行测量。在变形不大的情况下，各种弹性元件的弹性特性基本上符合虎克定律，其载荷与位移之间具有一定的函数关系。利用这种特性就可以测量力、压力、压差和力矩等参量。同时弹性元件还能很方便地将很多物理量（如流量、液位、温度、电流、电压等）转换为力、压力和力矩等参量来进行测量。

在气动仪表中，往往需要将压力和力相互变换。尤其是各种力平衡式仪表，就是利用压力和力的相互变换来进行测量的。对于在强腐蚀性或粘滞介质中使用的测量仪表，为了保证仪表安全可靠，必须防止这些介质进入测量元件内部，这时可以采用弹性元件（如波纹管、膜片）进行隔离。在某些既要求密封、又要在较大范围内传递运动的场合，波纹管是理想的密封元件。

有些仪表要求对工作环境变化造成的误差进行补偿，弹性元件能够在一定范围内补偿仪表的误差。例如，利用热敏双金属因环境温度变化产生的变形，来改变传动机构中某个环节的参数，从而补偿仪表的温度误差。

弹性元件还能作贮能元件用，如钟表中的发条是最典型的贮能元件。在位移不大的情况下，一些弹性元件（如片簧、膜片）还可作为直线运动的导向元件，如由片簧组成的十字片簧弹性支承，在力平衡式仪表中应用极为广泛。

解放后，我国仪器仪表工业的发展很快，为了适应仪器仪表工业发展的需要，已建立了弹性元件的专业生产厂和车间，同时还开展了弹性元件基础理论和生产技术的科研工作，在弹性元件的理论、材料、工艺、测试仪器等方面都取得了很大的进展。弹性元件的品种不断增加，质量不断提高，标准化、系列化和通用化工作也取得了一定的成绩。我们相信，在实现四个现代化的新长征中，仪表弹性元件的基础理论、生产技术和应用领域必将得到更快的发展。

目 录

绪论

第一章 弹性元件的基本知识	1
第一节 弹性元件的基本性能	1
一、使用特性	1
二、弹性元件的许用应力和安全系数	4
三、弹性敏感元件的误差	4
第二节 弹性元件的制造过程	6
第三节 弹性元件的材料	7
一、对弹性元件材料的要求	7
二、弹性元件常用材料	8
第四节 应用弹性理论基础	20
一、虚位移原理和最小势能原理	20
二、李滋法	27
三、伽辽金法	30
第二章 片簧、张丝和吊丝	32
第一节 片簧	32
一、片簧的结构与应用	32
二、直片簧的设计计算	35
三、弯片簧的计算	40
四、十字片簧的计算	41
五、片簧的制造	43
第二节 张丝和吊丝	43
一、张、吊丝的结构与应用	43
二、张、吊丝材料	44
三、张、吊丝的计算	45
四、张、吊丝的制造工艺	48
第三章 盘簧	51
第一节 概述	51
第二节 游丝	52
一、游丝的分类、要求和材料	52
二、游丝的结构	53
三、游丝的设计和计算	55
四、游丝的制造	60
第三节 发条	62
一、发条的用途、要求和材料	62
二、矩形截面发条	64
三、弧形截面发条	66

四、带盒发条和标准带盒发条	68
五、发条端部的固定方法	71
六、带盒发条组	73
七、带盒发条的设计与计算	74
八、发条的制造工艺	79
第四章 螺旋弹簧	83
第一节 螺旋弹簧的分类和结构	83
一、螺旋弹簧的分类	83
二、螺旋弹簧的结构	84
第二节 螺旋弹簧的应用和技术要求	86
一、螺旋弹簧在仪器仪表中的应用	86
二、螺旋弹簧的技术要求	88
第三节 螺旋弹簧工作原理	88
一、螺旋弹簧的几何参数	88
二、拉伸、压缩螺旋弹簧的工作原理	88
三、扭转螺旋弹簧的工作原理	89
第四节 螺旋弹簧的位移和刚度	90
一、螺旋弹簧端部的固定方法	90
二、螺旋弹簧末端位移	90
三、螺旋弹簧的刚度	94
第五节 圆柱螺旋拉伸、压缩弹簧弹性特性的非线性误差	94
一、大位移情况下,螺旋弹簧的弹性特性	95
二、螺旋弹簧的无因次弹性特性	96
三、螺旋弹簧弹性特性的非线性误差	97
第六节 圆柱螺旋拉伸、压缩弹簧的应力	101
一、簧丝为圆形截面时的应力	102
二、簧丝为矩形截面时的应力	102
第七节 圆柱螺旋压缩弹簧的稳定性	104
第八节 圆柱螺旋拉伸、压缩弹簧的设计	106
一、弹簧材料的选用和许用应力的确定	106
二、弹簧工作部分的设计计算	106
第九节 圆柱螺旋扭转弹簧的计算	114
一、扭转弹簧的位移(转角)	114
二、扭转弹簧中的应力	114
三、扭转弹簧心杆直径的确定	115
第十节 预应力圆柱螺旋拉伸弹簧	116
一、预应力圆柱螺旋弹簧的受力情况	116
二、预应力圆柱螺旋拉伸弹簧的特点	116
第十一节 圆柱螺旋弹簧的制造	118
一、弹簧丝的检验	118
二、弹簧的绕制与分割	118
三、螺旋弹簧受力端制造	119
四、热处理	119

五、预应力圆柱螺旋拉伸弹簧的绕制	119
六、表面处理	120
七、老化处理	120
八、弹簧的检验	120
第五章 热敏双金属	121
第一节 概述	121
一、热敏双金属及其动作原理	121
二、热敏双金属组合层材料	122
三、热敏双金属的应用	123
第二节 热敏双金属的特性	125
一、热敏双金属的主要物理性能	125
二、常用热敏双金属品种的特性参数	127
三、电阻型热敏双金属	127
四、耐腐蚀型热敏双金属	127
第三节 热敏双金属元件的设计与计算	129
一、元件的设计	129
二、元件的计算	131
第四节 热敏双金属的制造方法	136
一、热敏双金属毛坯的制造	136
二、热敏双金属元件的制造	137
第六章 压力弹簧管	139
第一节 压力弹簧管的基本知识	139
第二节 压力弹簧管弹性特性的计算	142
一、C型平椭圆形截面压力弹簧管的计算	142
二、椭圆截面压力弹簧管的计算	149
第三节 压力弹簧管的应力	150
第四节 压力弹簧管的容积变化	154
第五节 弯矩和集中力作用下压力弹簧管的计算	155
第六节 压力弹簧管的牵引力和牵引力矩	157
一、牵引力矩的计算	157
二、牵引力的计算	158
第七节 螺旋弹簧管(螺旋型和盘簧型)、S型弹簧管和高压偏心弹簧管弹性特性的计算	160
一、螺旋弹簧管和S型弹簧管的计算	160
二、高压偏心型压力弹簧管的计算	161
第八节 压力弹簧管的设计	162
一、截面形状的影响	162
二、轴比 a/b 的影响	162
三、壁厚和曲率半径的影响	164
第九节 压力弹簧管制造工艺	165
一、管坯制造	165
二、成形	168
三、热处理	169

四、组件装配	170
五、表面处理	170
六、螺旋弹簧管制造工艺	170
七、弹簧管特性检验	171
第七章 膜片膜盒	172
第一节 概述	172
第二节 小位移平膜片的设计计算	174
第三节 大位移平膜片的设计计算	179
第四节 旋转柔韧壳的一般方程	188
第五节 跳跃膜片	194
第六节 波纹膜片	201
第七节 用实验法设计波纹膜片	222
第八节 非金属膜片	227
一、非金属膜片弹性特性的计算	228
二、橡胶膜片有效面积的计算	228
第九节 金属膜片和膜盒的制造工艺	231
一、冷轧	231
二、成形	232
三、热处理	236
四、膜片的组合	236
五、膜盒的抽空与灌注	240
六、稳定处理	240
七、膜片、膜盒检验	240
第八章 波纹管	243
第一节 波纹管的基本知识	243
第二节 波纹管的刚度计算	246
一、用能量法计算波纹管刚度	246
二、用数值法计算波纹管的刚度	250
三、用经验公式计算波纹管刚度	252
四、波纹管与螺旋弹簧联用时位移及刚度的计算	253
五、波纹管的弯曲刚度	255
第三节 波纹管中的应力	257
一、波纹管的应力分析	257
二、波纹管的应力计算	260
第四节 波纹管的其它特性	273
一、波纹管的有效面积	273
二、波纹管的耐压力	275
三、波纹管的允许位移	281
四、波纹管的稳定性	286
五、波纹管的寿命	287
第五节 波纹管的设计计算	289
一、波纹管设计计算的依据	289

二、波纹管设计计算的内容及原则	290
第六节 波纹管的制造工艺	295
一、管坯制造	295
二、波纹的成形	300
三、波纹管的整形	304
四、波纹管的稳定处理	304
五、波纹管的性能检测	304
六、波纹管与两端零件的连接	305
第九章 谐振弹性元件	307
第一节 振动弦	307
一、振动弦工作原理及应用	307
二、振弦固有频率的计算	308
三、振动弦的刻度特性	312
四、振动弦的设计计算	316
五、振动弦制造工艺要点	319
六、振动弦和其它弹性元件的组合	320
第二节 振动筒	320
一、振动筒工作原理及应用	320
二、振动筒振型及其固有频率的计算	320
三、振动筒的刻度特性	331
四、振动筒结构参数和温度对固有频率的影响	333
五、振动筒的设计和制造	334
第十章 弹性元件性能测试及仪器	338
第一节 弹性元件测试技术	338
一、弹性元件主要性能及测试特点	338
二、弹性元件测试技术	339
第二节 几种典型元件的性能测试仪器	340
一、张丝、吊丝力矩仪	340
二、游丝力矩仪	341
三、弹簧管特性测量仪	341
四、螺旋圆柱弹簧、波纹管、膜片、膜盒刚度测量仪	341
五、膜片、膜盒、波纹管 p - W 特性测量仪	344
六、螺旋弹簧管、膜片、膜盒、波纹管 $Q(p, l)$ 特性仪	345
七、弹性元件性能通用测量仪	346
第三节 其他性能的测量及数据处理问题	346
一、仪表弹性元件其他性能检测	346
二、刻度特性测量结果的数据处理	347
附录	349
一、张丝、吊丝及导流丝周期-力矩对照表	349
二、热双金属片比弯曲试验方法(JB739-65)	351
三、热双金属片弹性模量试验方法(JB798-66)	353
参考文献	355

第一章 弹性元件的基本知识

第一节 弹性元件的基本性能

一、使用特性

弹性元件的使用特性主要包括：弹性特性、刚度、灵敏度和有效面积等。

(一) 弹性特性

作用于弹性元件上的载荷与弹性元件产生的位移之间的关系称为弹性元件的弹性特性。对于不同结构的弹性元件，这种载荷可以是压力、集中力和力矩，位移可以是线位移和角位移。例如，波纹管、膜片膜盒的弹性特性是指压力与线位移的关系；螺旋弹簧的弹性特性是指力与位移（线位移或角位移）的关系；盘簧的弹性特性则是指力矩与角位移的关系。

弹性特性可以用数学式表示：

$$W = f(P, p)$$

$$\varphi = f(P, p, M)$$

式中 W ——弹性元件的线位移；

p ——作用于弹性元件上的压力；

P ——作用于弹性元件上的集中力；

M ——作用于弹性元件上的力矩；

φ ——弹性元件的角位移。

元件的弹性特性也可以用曲线图表示(图 1-1)。它可以是线性的或非线性的，非线性还可以分为递增特性和递减特性两种。

在位移式仪表中的弹性元件，主要是利用其弹性特性。在设计这类弹性元件时，一般总是力求使元件的输出量与被测参数之间呈线性关系，这样可以采用比较简单的传动放大机构对仪表施行等分刻度。

如果载荷与元件位移的关系偏离了理想的直线关系，这就称为弹性特性的非线性。实际特性与理想线性特性的最大偏差 $\Delta_{\max}$ 对元件最大位移 $W_{\max}$ 的百分比叫非线性度 η ：

$$\eta = \frac{\Delta_{\max}}{W_{\max}} \times 100\%$$

最大偏差 $\Delta_{\max}$ 可按式确定：

$$\Delta_{\max} = (W_s - W)_{\max}$$

式中 W_s ——理想线性时的位移；

W ——实际位移。

由上述关系式可以看出，递增特性的非线性度为正值；递减特性的非线性度为负值。

非线性度的符号和大小并不能完全反映弹性特性曲线的形状。例如图 1-2 中所示的两种

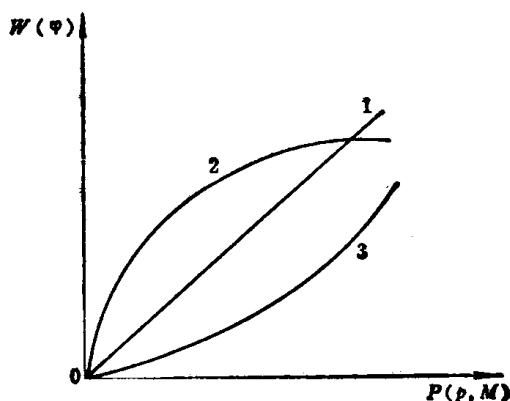


图1-1 弹性元件的弹性特性曲线

1—线性特性 2—递减特性 3—递增特性

特性曲线，它们的非线性度的大小和符号均相同，但曲线的形状是不同的。其中一个适合做弹性敏感元件，而另一个就不适合。因此，非线性度只说明实际特性与理想线性特性的偏离程度，并不说明非线性曲线的形状。为了全面地说明弹性特性，必须给出完整的特性曲线。

(二) 刚度

使弹性元件产生单位位移所需要的载荷称为弹性元件的刚度。刚度一般用“ K ”表示。

当弹性特性为线性时，其刚度为：

$$K_p = \frac{P}{W}$$

$$K_p = \frac{p}{W}$$

$$K_M = \frac{M}{\varphi}$$

当弹性特性为非线性时，其刚度为：

$$K_p = \frac{dP}{dW}$$

$$K_p = \frac{dp}{dW}$$

$$K_M = \frac{dM}{d\varphi}$$

式中 K_p ——集中力刚度（公斤力/毫米）；

K_p ——均布压力刚度（公斤力/厘米²/毫米）；

K_M ——力矩刚度（公斤力·厘米/弧度）。

弹性元件的刚度也可以用弹性特性曲线的斜率表示（图 1-3）。弹性元件在 A 点的刚度为：

$$K_p = \frac{dP}{dW} = \operatorname{tg} \theta_2$$

当弹性特性为线性时， θ_2 角保持不变，因此弹性元件的刚度为——常数。

(三) 灵敏度

弹性元件承受单位载荷时所产生的位移，称为元件的灵敏度。显然，灵敏度就是刚度的倒数。灵敏度一般用“ δ ”表示。

弹性特性是线性时，灵敏度为：

$$\delta_p = \frac{W}{P}$$

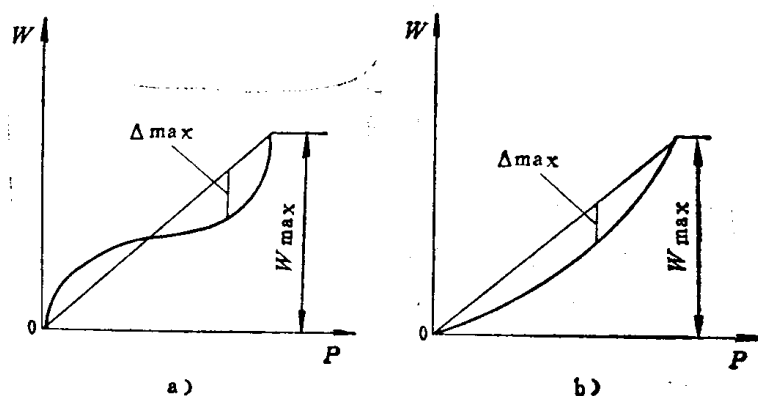


图1-2 几种非线性特性

$$\delta_p = \frac{W}{p}$$

$$\delta_M = \frac{\varphi}{M}$$

当弹性特性是非线性时，灵敏度为：

$$\delta_p = \frac{dW}{dP}$$

$$\delta_p = \frac{dW}{dp}$$

$$\delta_M = \frac{d\varphi}{dM}$$

式中 δ_F 、 δ_p 、 δ_M 分别为弹性元件对集中力、压力和力矩的灵敏度，其单位为相应刚度单位的倒数。

同样地，弹性元件的灵敏度也可以在弹性特性曲线（图 1-3）上求得。在 A 点的灵敏度为：

$$\delta_p = \frac{dW}{dP} = \tan \theta_1$$

弹性元件的刚度和灵敏度是同一使用特性的两种不同表示方法。对不同的场合，为便于分析问题，可以采用其中任何一个。例如：对输出为力的场合（力平衡式仪表），应采用刚度；当输出量为位移时（位移式仪表），一般采用灵敏度指标。

（四）有效面积

对于实现压力-力或力-压力转换的弹性元件，还有一个重要的使用性能是有效面积。有效面积是指元件在单位压力作用下，当位移为零时所能转换的集中力的大小。有效面积一般用“ F_e ”表示，其因次为厘米²。

有效面积与弹性特性及刚度有关。如果两者均为线性时，则有效面积为一常量，其数值为：

$$F_e = \frac{\Delta P}{\Delta p} = \frac{P}{p}$$

如果上述两者之一为非线性或两者均为非线性时，则有效面积为变量，其数值为：

$$F_e = \frac{dP}{dp}$$

弹性元件的集中力刚度和压力刚度分别为：

$$K_p = \frac{dP}{dW}; \quad K_p = \frac{dp}{dW}$$

因此，有效面积可表示为集中力刚度和压力刚度之比

$$F_e = \frac{K_p}{K_p} = \frac{dP}{dp}$$

元件刚性支点处所受的力等于均布压力和有效面积的乘积。

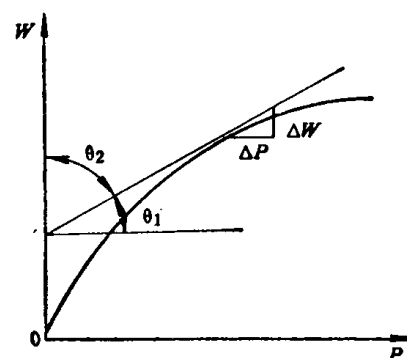


图1-3 元件具有非线性特性时，弹性元件的刚度和灵敏度

$$P = pF_e$$

如果刚性支点与元件原始位置离开一个距离 a ，那末在压力为 p 时，支点所受的力为：

$$P = (p - p_0)F_e$$

式中 p_0 ——弹性元件与支点刚接触时的压力 $p_0 = K_p a$ 。

二、弹性元件的许用应力和安全系数

弹性元件要能正常工作，而不丧失其工作性能，在设计时，必须使弹性元件的工作应力满足下列条件：

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma]$$

式中 $\sigma_{\max}$ ——元件的最大工作应力；

$[\sigma]$ ——元件的许用应力。

最大工作应力可以根据弹性元件的受载条件和几何参数予以计算，这将在以后各章中叙述。

许用应力可按下式计算：

$$[\sigma] = \frac{\sigma_j}{n}$$

式中 σ_j ——极限应力；

n ——安全系数。

由于弹性元件工作条件的不同，极限应力可以有不同的取法：

一般情况下，弹性元件在工作时不应产生明显的塑性变形，因此，极限应力可认为是材料的弹性极限 σ_e ；

在交变载荷作用下的弹性元件，极限应力应选取材料的疲劳极限；

在容易失稳的工作条件下，极限应力应认为是失稳时的临界应力；

在高温条件下工作的弹性元件，极限应力应取作不发生超过允许蠕变值的应力。

安全系数的大小可以由许多因素决定：弹性元件在使用中的重要性和必须具备的可靠性；元件的工作条件和持久性；材料机械性能各参数的准确性以及应力计算的精确性等等。

安全系数的大小又决定于极限应力的类型（强度极限、屈服极限、疲劳强度或蠕变应力等）。大多数的弹性元件是在弹性范围内工作，因此安全系数取材料的弹性极限和最大工作应力之比最为理想，这时安全系数可取得接近于 1。但是多数材料的弹性极限不易查到，通常不得不用屈服极限 σ_s 来计算，这时安全系数 $n_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_{\max}}$ 应取得大一些。在有些情况下，只能采用材料的强度极限 σ_b 来计算，安全系数 $n_b = \frac{\sigma_b}{\sigma_{\max}}$ 应该取得更大一些。

三、弹性敏感元件的误差

弹性敏感元件和其他弹性元件一样，除了应具有足够的强度和所需的刚度以外，还有它的基本质量指标，这就是将被测参数转换为位移或力时所必须的精确性。

由于金属材料微观结构的缺陷等原因，材料常常表现出弹性的不完善性（图 1-4），这是造成弹性元件误差的主要原因之一。

（一）弹性滞后

弹性元件在加载与卸载过程中，弹性特性曲线不相重合的现象称为弹性滞后（图 1-5）。

由图 1-5 中可以看出，在同一载荷 P_0 作用下，加、卸载时的位移不一致，分别为 W_1 和

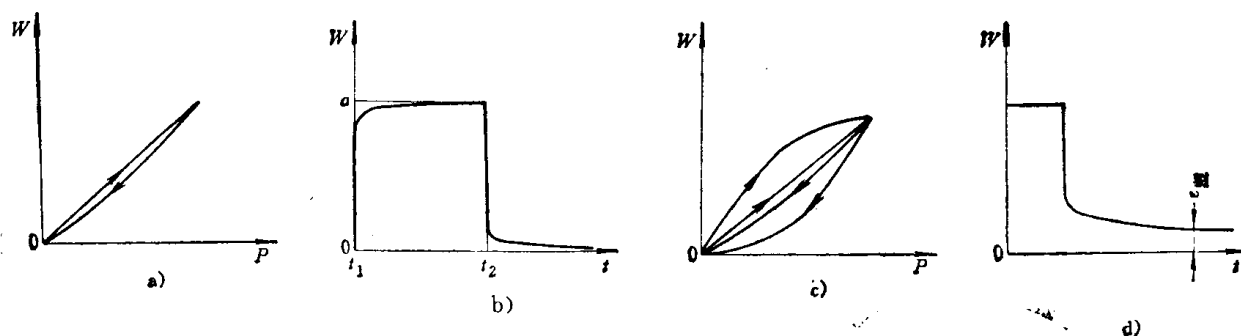


图1-4 材料的弹性不完善性

a) 迟滞回线 b) 变形随时间而变化 c) 迟滞和弹性后效 d) 塑性后效

 t_1 ——加载时刻 t_2 ——卸载时刻

W'_1 。用加、卸载时位移的最大差值和弹性元件最大位移的百分比值表示弹性滞后的大小

$$\gamma = \frac{(W_1 - W'_1)_{\max}}{W_{\max}} \times 100\%$$

(二) 弹性后效

当载荷停止变动或完全卸载后，弹性元件不是立刻完成相应的位移，而是需要经过一段时间才逐渐完成的现象称弹性后效（图 1-6）。由图所示，当作用到弹性元件上的载荷 P 从零迅速增加到 P_1 时，位移由零增加到 W_1 ，然后在载荷不变的情况下，位移继续增大到 W'_1 。反之，当载荷从 P_1 迅速减少到零时，位移由 W'_1 先减到 W'_0 ，然后在完全卸载的情况下又逐渐降低到零。因此，弹性后效表现为弹性元件承受载荷后位移发生了时间的迟后性。

实际上，弹性滞后和弹性后效是同时发生的，如图 1-6 所示。得到的是两者叠加后的发“胖”了的弹性滞后回线。一般不单独考虑，统称为迟滞误差。

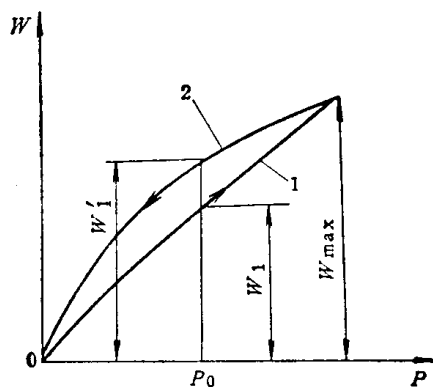


图1-5 弹性元件的弹性滞后

1—加载曲线 2—卸载曲线

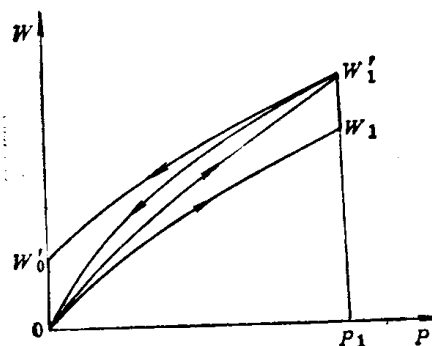


图1-6 弹性元件的弹性后效

(三) 弹性元件的温度误差

弹性元件的工作温度发生变化时，元件的几何尺寸与材料的弹性模量也会随之发生变化，从而产生温度误差。

弹性模量随温度的变化关系可以近似表示为：

$$E_t = E_0 (1 - \gamma_E \Delta t) \quad (1-1)$$

式中 E_t ——温度为 t 时材料的弹性模量；

E_0 ——在标准温度 t_0 时（一般为 20°C ）材料的弹性模量；

γ_E ——弹性模量温度系数;

Δt ——温度变化量 ($\Delta t = t - t_0$)。

几种常用材料的弹性模量温度系数 γ_E 列于表 1-1 中。

表1-1 几种材料的 γ_E

材 料	γ_E ($1/^\circ\text{C}$)	材 料	γ_E ($1/^\circ\text{C}$)
黄铜 H62	4.8×10^{-4}	铍青铜 QBe2	3.1×10^{-4}
锡磷青铜 QSn6.5-0.1	4.8×10^{-4}	不锈钢 1Cr18Ni9Ti	3.5×10^{-4}

弹性元件因温度变化引起的相对误差 η_t 为:

$$\eta_t = -\frac{\Delta W_t}{W_0}$$

式中 ΔW_t ——因温度变化引起弹性元件的位移变化量。

刚度为常数时, 元件的位移 $W = \frac{P}{K}$; 而元件的刚度 $K = CE$ (C 为比例常数), 因此

$$W = \frac{P}{CE}$$

当温度变化为 t 时, 弹性元件的位移变化量等于:

$$\Delta W_t = \frac{dW}{dt} t$$

引入关系式 (1-1), 并将 W 对 t 求导数, 得

$$\frac{dW}{dt} = \frac{P}{C} \frac{\gamma_E}{E}$$

因此, 当弹性元件刚度为常数时, 温度引起的相对误差

$$\eta_t = \gamma_E t \quad (1-2)$$

由式 (1-2) 可以看出, 弹性元件所用材料的弹性模量温度系数愈大, 则弹性模量所引起的温度误差也愈大。

弹性元件受热后会发生膨胀, 引起弹性元件几何尺寸的变化, 这也会产生温度误差。当弹性元件工作尺寸为 l 时, 温度从 t_0 变化到 t , 长度伸长为:

$$l_t = l_0 (1 + \alpha \Delta t) \quad (1-3)$$

式中 l_t ——温度为 t 时弹性元件的工作长度;

l_0 ——在标准温度 ($t_0 = 20^\circ\text{C}$) 时元件的工作长度;

α ——线胀系数。

由式 (1-3) 知道, 元件因温度变化引起工作长度的变化量为 $l_0 \alpha \Delta t$ 。但是线胀系数 α 在数量级上要比弹性模量的温度系数 γ_E 小, 因此这一误差要小得多。

第二节 弹性元件的制造过程

弹性元件是用薄钣料、薄壁筒、金属丝或带材等半成品制造。要使弹性元件达到质量要求, 首先半成品要满足一定的机械性能, 关键尺寸要足够精确。因此, 弹性元件整个制造过程不仅决定于由毛坯加工成弹性元件的困难性, 也决定于获得毛坯的复杂程度。譬如为获得

壁厚公差要求严格的薄壁筒所化费的劳动量,要比由它制成波纹管或弹簧管的工作量大得多。

弹性元件的种类很多,各种弹性元件的制造工艺是各不相同的,它取决于元件的结构及所用的材料。但是,在它们的制造工艺中也有一些共同的地方。

弹性元件的制造过程一般包括两个步骤:一是元件成形过程;二是使成形的元件得到要求的工作性能。在成形过程中,材料要经过冲压、拉伸、弯曲、绕制等工序。使用冷作硬化型材料制造元件时,成形模具的设计比较复杂,模具尺寸中要考虑材料的弹性回复。

当元件材料是通过热处理达到所要求的工作性能时,为了防止在热处理过程中产生变形,需将元件放在专用夹具里进行热处理。为了避免在热处理后表面出现氧化,弹性元件要在有保护气氛的炉子或真空炉中进行热处理。热处理规范要选择适当,这样才能获得材料最佳的弹性。

弹性元件制造工艺中的一个重要环节是元件相互间或与配件间的焊接。焊接方法可以是钎焊或熔焊,要求在焊接过程中元件不发生变形或降低其性能。因此,在材料组织转变温度以上长时间加温的焊接方法是不适宜的。一般均采用点焊和短脉冲缝焊,元件只在一个窄缝处受热,其他部位的材料组织不会发生变化。用于压力作用的弹性敏感元件,焊缝必须确保气密性。

焊接的质量与焊接方法及规范也有很大的关系。目前薄件的焊接广泛采用滚轮短脉冲焊接;电容缝焊可以得到比较好的焊接质量;氩弧焊也有应用。当弹性元件的厚度很薄时,可以采用微束等离子焊等方法。

弹性元件钎焊的设备最为简单。但是钎焊焊缝的强度较低,在焊接过程中元件长时间受热,引起弹性性能变差。另外,钎焊时所用的焊药,会腐蚀弹性元件基体。

弹性元件成形以后,一般要经过稳定化处理。它包括交变载荷处理和长时间超载处理。稳定化处理规范(温度、时间、载荷方式、循环次数等)的选择应根据材料的机械性能和元件的工作条件而定。当前对最佳稳定化处理方法尚无定论,不同企业可按各自的情况和经验处理。

对于测量仪表用弹性敏感元件,必需进行稳定化处理;一般张紧用弹簧或做不重要用途的弹性元件可以不进行稳定化处理。

弹性元件成品还要经过尺寸检验和性能检验(强度、弹性性能、迟滞等)。对于特殊场合应用的弹性元件,应做一些特定项目的试验。例如,对谐振弹性元件除了作一般性能检验外,还需测定其振动稳定性和固有振动频率。

第三节 弹性元件的材料

一、对弹性元件材料的要求

弹性元件的用途很广,工作条件不一,因此,对材料的要求是各种各样的。

电测仪表中的弹性元件,大多数情况下是用非磁性材料制成的;但如果弹性元件是导磁部分的话,则要求材料有足够的导磁率。

有些弹性元件要在高温、高压条件下工作,这时材料必须具备耐热性和抗蠕变性能;如果弹性元件是在低温下工作,这种材料应该避免冷脆性。

当弹性元件需在腐蚀性介质环境中工作时,材料应当有足够的耐腐蚀稳定性。

弹性元件的材料应当具有较高的塑性，因为在它们的毛坯制造和成形过程中，要进行多次辗压和拉伸，会发生很大的变形；当制成元件成品时，要求有高的强度和弹性性能。

在很多情况下，弹性元件制造时必须进行钎焊或熔焊。因此，材料必须具备良好的焊接性能。

对于制造弹性元件的材料来说，要满足各种各样的、有时往往是相互矛盾的全部综合性能是比较困难的。在选择弹性元件的材料时，要着重考虑满足那些最重要的要求，以发挥弹性元件的主要工作性能。

一般情况下，弹性元件的材料应满足下列基本要求：

1. 良好的塑性，便于加工成形；
2. 高的弹性极限、强度极限和疲劳强度，保证元件的正常工作；
3. 有好的焊接性能；
4. 材料的机械性能稳定，尽可能不随时间和温度的改变而变化；
5. 较好的耐腐蚀稳定性。

二、弹性元件常用材料

弹性元件是用薄钣料、金属丝或带料制成，而且其形状往往比较复杂，要求材料具有良好的塑性。但不是所有的塑性材料都能用于制造弹性元件，而只有那些通过以后的热处理或机械处理得到高的弹性和强度的材料才是合适的。

按照获得弹性途径的不同，弹性元件的材料可以分成三类：

1. 冷作硬化型材料：这类材料在退火状态具有高的塑性，由于制作弹性元件时的塑性变形，引起材料的加工硬化，从而显著提高了本身的弹性。黄铜、锡青铜、不锈钢（1Cr18Ni9Ti）等都属于这类材料。用这些材料制造弹性元件的工艺比较简单，弹性元件在成形后一般不需要进行专门的热处理。例如H80黄铜在退火状态的塑性很好，很容易加工成波纹管，由于制造过程中的深度拉伸和变形，提高了它们的弹性和强度。

这类材料的弹性较低，同时由于制造元件时材料中存在相当大的残余应力，造成弹性性能随时间的不稳定性。因此，这类材料基本上不适于做精密测量用弹性元件。

2. 淬火硬化型材料：这类材料在退火状态塑性较高，通过淬火到马氏体然后回火的方法得到所需要的弹性。各种碳素钢、硅合金钢、锰钢、铬钢、钒钢等都属于这类材料。

这些钢类具有很高的强度与弹性，但是它们经热处理强化后塑性很低，一般不用来制作形状复杂的弹性元件。有采用铬钒钢（50CrVA）做螺旋弹簧管的情况，但必须在成形之后再进行强化热处理。

经过专门的热处理（铅淬火）和随后强烈冷拔的弹簧高碳钢丝广泛用于制作螺旋弹簧和片弹簧，它们通常不再进行附加的热处理。

3. 弥散硬化型材料：这类材料和淬火硬化型材料一样，也是通过热处理获得弹性的。不同之处是弥散硬化型材料在淬火状态塑性很好，回火处理（有时也称为时效或调质）可以显著提高它们的弹性。属于弥散硬化型材料的有铍青铜、铁基精密弹性合金（3J1、Ni36CrTiAlMo5、Ni36CrTiAlMo8）等。

淬火状态的弥散硬化型材料具有高的塑性，可以用来制造任何复杂形状的弹性元件。在元件成形过程中没有明显的弹性回跳，可以得到同样的形状和尺寸。在回火时，成形的弹性元件得到高的强度与弹性，它们并不亚于前述钢种淬火到马氏体时的强度。因此，弥散硬化

型材料具有最佳的工艺和使用特性。

同冷作硬化型材料和淬火硬化型材料相比，弥散硬化型材料的弹性不完善性最小。这可以认为，在弹性元件回火强化过程中，材料中的残余应力已经完全被消除，而且强化也比较均匀。

弹性元件的材料很多，还可以有一些其他的分类方法。本书按照使用习惯，将弹性元件的常用材料分为五大类：

1. 弹簧钢；
2. 铜合金；
3. 不锈钢耐酸钢；
4. 精密弹性合金；
5. 非金属弹性材料。

现将各类材料简述如下：

（一）弹簧钢

这类材料主要用于制造各种弹簧，故得其名。高压测量用弹簧管也用这类材料。它们在冷加工后需经淬火、回火处理才能获得良好的弹性。其主要品种包括碳素钢 65 和 75、锰钢（65Mn）、硅锰钢（60Si2Mn 和 60Si2MnA）、铬钒钢（50CrVA）等。

它们的化学成分列于表 1-2；物理——机械性能列于表 1-3；热处理规范列于表 1-4。

表1-2 弹簧钢类的化学成分

材 料	牌 号	化 学 成 分 %					
		C	Mn	Si	Cr	Ni	V
碳素钢	65	0.62~0.70	0.50~0.80	0.17~0.37	≤0.25	≤0.25	—
	75	0.72~0.80	0.50~0.80	0.17~0.37	≤0.25	≤0.25	—
锰钢	65Mn	0.62~0.70	0.9~1.2	0.17~0.37	≤0.25	≤0.25	—
硅锰钢	60Si2Mn	0.57~0.65	0.6~0.9	1.5~2.0	≤0.3	≤0.4	—
	60Si2MnA	0.56~0.64	0.6~0.9	1.6~2.0	≤0.3	≤0.4	—
铬钒钢	50CrVA	0.46~0.54	0.5~0.8	0.17~0.37	0.8~1.1	≤0.4	0.1~0.2

碳素钢 65 和 75 在退火状态具有适宜的韧性与塑性，经热处理可得到较高的强度，用来制作片弹簧和螺旋弹簧。一般常采用铅淬火和强烈冷拔的高碳弹簧钢丝制作小尺寸的螺旋弹簧。锰钢的强度和碳素钢差不多，但淬透性较大，脱碳倾向小，有过热敏感性和回火脆性，适宜于制造较大尺寸的弹簧。硅锰钢强度很高，适宜于制作工作条件比较恶劣的各种弹簧，还可以制作工作温度低于 250℃ 条件下的耐热弹簧。铬钒钢强度较高，耐冲击性能较好，并具有一定的耐热性，主要用来制造高压压力表中的弹簧管，还可用来制造承受应力较高或交变载荷条件下工作的各种弹簧，以及低于 300℃ 条件下的耐热弹簧。

（二）铜合金

这类材料在弹性元件材料中占有很大比重，其中黄铜、锡青铜是制造普通波纹管、片簧和膜片膜盒的常用材料；铍青铜是性能理想的弹性材料，应用更为广泛。现将目前常用的一些品种介绍如下。

1. 黄铜 H80；