

本书较系统地介绍了应变片电测技术的基本知识。对应变片及其布片方法、粘贴工艺、测量线路、测试方法、记录仪器和装置，从原理、结构、性能到选择使用等方面作了详细的叙述。同时，对常用传感器的设计也提供了有关的参考资料。

本书可供从事机械工程研究设计和生产的工人、技术人员及有关机械专业的师生参考。

应变片电测技术

吉林工业大学农机系 编
第一机械工业部农业机械科学研究院

*

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登记证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ · 印张 $15^{3/8}$ · 插页 2 · 字数 340 千字

1978 年 7 月北京第一版·1978 年 7 月北京第一次印刷

印数 00,001—28,000 · 定价 1.25 元

*

统一书号：15033·4438

目 录

第一章 应变片	1
一、金属导线的应变效应	4
二、应变片的结构和性能	10
1. 应变片的结构	10
2. 应变片的工作特性	17
3. 应变片的主要参数	31
三、粘合剂和应变片的粘贴技术	35
1. 粘合剂的种类和性能	35
2. 应变片的粘贴工艺	44
四、应变片的标定装置	53
五、高温及其他特殊条件下使用的应变片	60
1. 高温应变片	60
2. 其他特殊条件下使用的应变片	86
3. 特殊应变片	92
六、半导体应变片	96
第二章 测量电路与应变仪	108
一、测量电路	108
1. 电位计式电路	108
2. 桥式电路	109
3. 电桥的平衡	114
二、应变仪	118
1. 应变仪的分类	118
2. 应变仪的组成	121
3. 应变仪举例	137
三、应变仪的使用	146

1. 测量时的干扰	146
2. 导线电阻的影响	147
3. 分布电容的影响	150
第三章 记录器	153
一、光线示波器	153
1. 振动子	155
2. 光学示波器的组成	180
3. 现代光线示波器	191
4. 光线示波器的测量误差和使用	203
5. 光线示波器的优点和发展趋势	213
二、记录仪和自动平衡式记录器	216
1. 记录仪	216
2. 自动平衡式记录器	225
三、磁带记录器	227
1. 磁带记录器的工作原理和特点	227
2. 各种记录方式	230
3. 磁带记录器结构和特性	238
4. 磁带记录器的选择和使用	247
四、各种记录器性能比较	253
第四章 应变片的布置和接桥	257
一、测量目的和应变片的布置	257
1. 载荷测量的形式	257
2. 应变测量	258
二、载荷测量	259
1. 基本原理	259
2. 拉(压)力测量	263
3. 弯矩测量	268
4. 扭矩测量	270
5. 圆环测拉(压)力	274

6. 由弯曲应变测量剪力	275
三、适应结构型材特点的应力测量	279
1. 结构型材的应力测量	279
2. 型材断面上的载荷	280
3. 断面上的应力分布	283
4. 载荷分量测量法	287
5. 最大正应力法	293
6. 最大正应力法的分解	294
7. 应力合成与强度校核	300
四、应力测量的一般规律	302
1. 应力与应变	303
2. 单向应力状态	304
3. 平面应力状态 (主应力方向已知)	305
4. 平面应力状态 (主应力方向未知)	306
5. 应变花的使用	309
6. 应变花的计算公式	310
第五章 应变片式传感器的构造和设计	315
一、传感器的工作原理和特性	315
1. 弹性元件和传感器的特性	317
2. 传感器电路的补偿和标准化问题	328
二、传感器的构造和设计	336
1. 测力传感器	336
2. 扭矩传感器和集流环	364
3. 压力传感器	380
4. 加速度传感器	391
第六章 测量误差分析和数据处理	401
一、测量误差分析	401
1. 直接测量的误差	402
2. 间接测量的误差	405
3. 电测误差分析	409

二、测量数据处理	413
1. 分布的概念	414
2. 统计特征数的计算	420
3. 记录曲线的整理	424
4. 随机信号的分析	442
5. 数据系统简介	448
第七章 应用与举例	451
一、测试仪器的供电及交流市电的应用	451
二、交流发电机组	454
1. 消音和排烟	455
2. 发电机组的容量和电压的稳定	455
三、铅酸蓄电池	456
1. 铅酸电池容量的选择	458
2. 蓄电池的电气特性和使用方法	459
3. 蓄电池正常情况下的充电	461
4. 蓄电池异常情况下的充电	462
5. 铅蓄电池使用维护要点	463
6. 蓄电池充电设备	463
四、碱性蓄电池——镉镍蓄电池	464
1. 密封型镉镍蓄电池	464
2. 镉镍密封蓄电池的使用维护	464
3. 镉镍电池的技术数据	465
五、逆变器	468
六、测量举例	470
1. 耕耙犁的基本情况	470
2. 实验目的	471
3. 实验内容及项目	471
4. 田间试验装置及测量方法	471
5. 标定	477
6. 数据处理	478

6. 由弯曲应变测量剪力	275
三、适应结构型材特点的应力测量	279
1. 结构型材的应力测量	279
2. 型材断面上的载荷	280
3. 断面上的应力分布	283
4. 载荷分量测量法	287
5. 最大正应力法	293
6. 最大正应力法的分解	294
7. 应力合成与强度校核	300
四、应力测量的一般规律	302
1. 应力与应变	303
2. 单向应力状态	304
3. 平面应力状态 (主应力方向已知)	305
4. 平面应力状态 (主应力方向未知)	306
5. 应变花的使用	309
6. 应变花的计算公式	310
第五章 应变片式传感器的构造和设计	315
一、传感器的工作原理和特性	315
1. 弹性元件和传感器的特性	317
2. 传感器电路的补偿和标准化问题	328
二、传感器的构造和设计	336
1. 测力传感器	336
2. 扭矩传感器和集流环	364
3. 压力传感器	380
4. 加速度传感器	391
第六章 测量误差分析和数据处理	401
一、测量误差分析	401
1. 直接测量的误差	402
2. 间接测量的误差	405
3. 电测误差分析	409

第一章 应变片

应变片是粘贴式电阻应变计的简称，也有称作电阻应变片或电阻片的。一般的应变片由敏感元件、基底和引线组成。典型的应变片见图 1-1。由高阻金属丝绕成的敏感元件（线栅，或称敏感栅）用粘合剂粘在两张纸片组成的基底之中；线栅的两端焊有较粗的铜线（引线）作为与测量电路连接用。

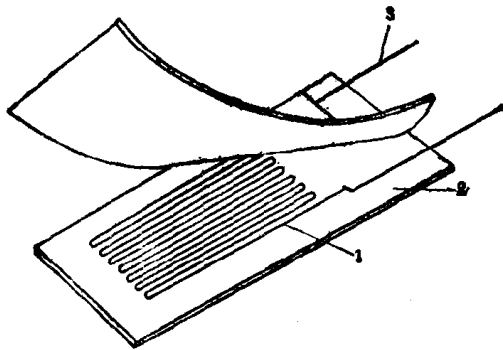


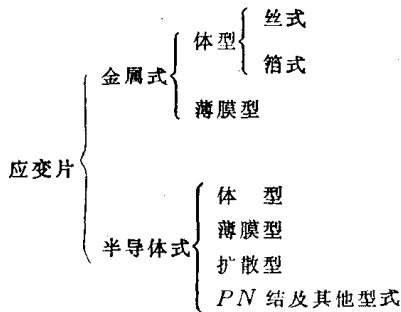
图1-1 应变片

1—敏感元件 2—基底 3—引线

在测量应变时，应变片用粘合剂粘贴在试件上（这里所谓试件包括试棒、机器结构零件，模型和弹性元件等），当试件受载荷后其表面产生微小变形（伸长或缩短），这时贴在其上的应变片的线栅亦随其发生变形。因为金属线材的应变效应，线栅的电阻发生变化（增大或减小），电阻变化率 $\Delta R/R$ 的大小与应变片粘贴处试件的应变 ϵ ($\Delta L/L$) 的大小成比例

(R 是应变片的原始电阻, ΔR 是应变片的电阻变化值, L 是线栅的纵向长度, 亦称应变片的基长, ΔL 是线栅的纵向变形, 亦就是处于线栅下面的长度为 L 的试件表面在同一方向上的变形)。如果用电测仪器测出电阻的变化, 根据某一比例常数, 即可得到试件的应变值。根据弹性力学应力-应变的关系可算出应力值。通常将应力测量和应变测量这两个词混用而不加区别。

根据敏感元件材料的不同, 应变片可分为金属式和半导体式两大类。根据敏感元件的形态可进一步分类如下:



常常将金属丝式和箔式应变片称为常规应变片。

根据基底材料的不同, 应变片可分为纸基应变片、胶基应变片和金属片基应变片(焊接式应变片)。此外, 应变片还可以根据工作温度、敏感元件的几何形状等来分类。

近年来应力测量技术和非破坏检查方法有了很迅速的发展, 许多新的应力探测方法, 如声发射法、红外线法、激光全息摄影法等不断出现。尽管如此, 使用应变片测量系统进行应变测量还是结构强度试验的最主要手段。此外, 用以测量力、扭矩、压强、加速度、位移等物理量的应变片式传感器的使用范围也在不断扩大。

应变片之所以得到这么广泛的应用是和它的优点有关的，主要的优点如下：

(1) 电阻变化率 $\Delta R/R$ 与应变成线性关系（严格地说是非线性很小）。

(2) 尺寸小（例如有一种超小型应变片的线栅尺寸为 0.3×1.1 毫米，基底尺寸为 3.5×2.5 毫米），重量轻（中等尺寸的应变片为 $0.1 \sim 0.2$ 克），所以粘贴在试件表面后对试件的工作状态和应力分布影响极微。

(3) 测量范围广，一般用以测量 10 左右到数千微应变；高精度、高稳定性的测量系统能测出几分之一微应变；在测量橡胶、塑料时，最大测量值达 230000 微应变（ 23% ）。

(4) 频率响应好，可测量 $0 \sim 50000$ 赫的振动。惯性极小，可认为对应变的反应是立刻的。

(5) 误差较小，整个测量系统的误差可控制在 1% 或更小，如用于传感器，误差主要决定于弹性元件设计、制造的质量和标定方法的完善程度，误差可低至 0.1% 。

(6) 通过对测量电路的设计安排，测量信号可相加或抵消，以获得所需要的数据。

(7) 通用性好，不但适用于应变测量，而且对测量力、压强、加速度等物理量都很合适，使和它配合使用的应变仪、记录器等达到很大程度的通用化。

(8) 在各种恶劣的环境条件下，如采取适当措施，能保证正常工作。如从宇宙空间的真空状态到数千个大气压；从接近绝对零度（液氮容器应力测量 -272.2°C ）到 $+1000^\circ\text{C}$ ；从沙漠的极度干燥到长时间浸没于水下；以及大离心力和强烈振动、强磁场和放射性、化学腐蚀的作用等等。

(9) 稳定性和可靠性较高。

(10) 品种多样，在尺寸、灵敏度、工作温度、线栅形状等等方面有很大的选择范围。

(11) 价格便宜，因而可大量使用，这对多点应力测量是十分重要的。

应变片的缺点是：

(1) 常规应变片在大应变状态下电阻变化率与应变呈现较大的非线性。半导体应变片的非线性效应更为明显。当然，非线性可通过测量电路的设计进行补偿。

(2) 常规应变片的输出较小，故信号连接线往往要采取屏蔽措施以防止干扰。

(3) 应变片实际测出的是一点或一小块面积中的应变，并不能显示应力场中应力梯度的情况。

(4) 工作温度超过 300°C 时，要采取多方面的措施才能保证测量精确度。对于超过 1000°C 的情况目前正在发展电容应变计。

一、金属导线的应变效应

应变效应是金属导线的电阻随其变形（伸长或缩短）而发生改变的一种物理现象。

设有一圆断面的导线，其原始电阻为：

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——材料的电阻率；

L ——导线长度；

A ——导线断面积。

如导线沿轴向受力 F 被拉伸如图1-2所示，其应变为 $\epsilon = \Delta L/L$ 。应变 ϵ 表示长度的变化率，为无量纲的值。因为此值通常是很小的，所以常用 (10^{-6}) 来表示，例如 $\epsilon =$

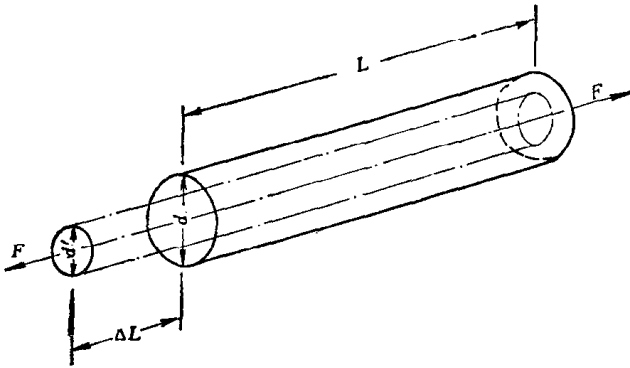


图1-2 金属导线受力变形情况

0.001表示为 1000×10^{-6} ，称为1000微应变或 $1000\mu\varepsilon$ 。

将公式(1-1)取对数并微分，得：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (1-2)$$

上式中 dA 是导线截面积的变化。面积的变化是因为导线受拉伸后直径减小，从 d 变为 d' ，两者的关系为：

$$d' = d(1 - \nu\varepsilon)$$

式中 ν ——导线材料的泊桑比。

导线截面积的变化为：

$$\begin{aligned} dA &= \frac{\pi}{4}(d'^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}[d^2(1 - \nu\varepsilon)^2 - d^2] \\ &= \frac{\pi d^2}{4}(-2\nu\varepsilon) \end{aligned}$$

式中略去了 $\nu\varepsilon$ 的二次项，因为 ν 为 10^{-1} 数量级， ε 一般为 10^{-4} 数量级，故 $\nu\varepsilon$ 为 10^{-5} 数量级，其平方为 10^{-10} 数量级，可忽略不计。故：

$$\frac{dA}{A} = -2\nu\varepsilon \quad (1-3)$$

将公式(1-3)代入公式(1-2)，得：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon (1 + 2\nu)$$

或
$$\frac{dR/R}{\varepsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (1-4)$$

$\left(\frac{dR/R}{\varepsilon}\right)$ 的物理意义为单位应变的电阻变化率，我们称之为金属材料的灵敏系数，用 K_0 表示，即：

$$K_0 = \frac{dR/R}{\varepsilon} \quad (1-5)$$

从公式 (1-4) 可知金属材料的灵敏系数受两个因素的影响：其一是受力后由于材料的几何形状发生变化而引起的，即 $(1 + 2\nu)$ 项；另一个因素是受力后由于材料的电阻率 ρ 发生变化而引起的，由 $\left(\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}\right)$ 项表示。

根据对各种材料进行的实验表明，后一因素的影响确实存在的。因为，如认为电阻变化只是与导线的几何尺寸变化有关，则 $K_0 = 1 + 2\nu$ ，一般金属的泊桑比 $\nu = 0.2 \sim 0.4$ ，故灵敏系数应为 $K_0 = 1.4 \sim 1.8$ 。但从多种金属的实验得出的结果为 $K_0 = -12 \sim +4$ ，所以证明公式 (1-4) 中的 $\left(\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}\right)$ 项是确实存在的，即电阻率亦随应变而发生变化。这是由于材料发生应变时，自由电子的活动能力和数量发生了变化而引起的。因为对电阻率在金属变形时的变化规律还未有深入的研究，所以 K_0 值只能从实验求得。

公式 (1-4) 并无实用价值，常用的是公式 (1-5)，可改写如下：

$$\frac{\Delta R}{R} = K_0 \varepsilon \quad (1-6)$$

此式表示金属导线的电阻变化率与沿着它的轴线方向的应变的关系。

对制做应变片敏感元件的金属材料的要求是：

1. 灵敏系数 K 。在尽可能大的应变范围内是常数，即电阻变化与应变呈线性关系。
2. K 。尽可能大。
3. 具有足够的热稳定性，电阻率受温度变化的影响小，亦即电阻温度系数小，高温时抗氧化性能好。
4. 电阻率高。这样，当要求应变片具有一定的电阻值时（如 120 或 350 欧），线材的长度短，因而线栅的尺寸小。
5. 优良的加工与焊接性能。

制造应变片敏感元件（线栅）的材料主要有下列一些类型：

1. 铜镍合金。含铜55%，含镍45%的康铜是用得最广泛的。因为它具有很多优点，上面提的对材料的五项要求除第二项外都能满足。康铜的 K 值对应变值的稳定性非常高，非但在变形的弹性范围 K 保持为常数，在进入塑性范围后亦基本保持为常数，所以用康铜作为线栅的应变片，测量范围大。康铜的电阻温度系数很小，优质线材的电阻温度系数可控制在 $\pm 2 \times 10^{-6}$ 范围内，所以在测量时因温度变化而引起的误差较小。铜镍合金的电阻温度系数可以通过合金成分的变化、冷加工和不同的热处理规范来加以控制（由负值到正值），因而可用之制成用于各种被测试材料的温度自补偿应变片。在静态应变测量时，康铜的工作温度达 300°C ，在动态测量时可用到 400°C 。它可以在高的流体静压力下和在核辐射的环境下工作，也可用于测量大的应变（高达22%）。

2. 镍铬合金。例如含镍80%、含铬20%的镍铬合金（有时称为镍克洛姆 V），具有较高的电阻率，但电阻温度系数较大，它主要用于动态应变测量，使用温度可达 800°C 。这类

合金可以在核辐射状态下使用。

在镍铬合金中掺入少量其他金属或元素可以改善合金的性能。例如掺入少量的铁、铝制成的 6J22 合金（又称为卡马合金），电阻率比镍克洛姆 V 合金高，电阻温度系数也减少了。对于静态应变测量工作温度可达 450°C ，这是一种较好的合金。这种改良的镍铬合金，当采用适当的合金成分、冷加工与热处理时，可以控制其电阻温度系数，因而可制成温度自补偿应变片。掺加有少量的铝、铜制成的 6J23 合金亦具有相同的性能。

3. 铁铬铝合金。例如含铁70%、含铬25%、含铝5%的 0Cr25Al5 合金，通过调节合金成分和改变热处理规范，可以改变合金的电阻温度系数。这种合金与铜引线连接处由于温度差而产生的热电势很小，只是康铜和铜引线的热电势的 $1/10$ 左右。它的 K_0 值较高，它可以在高温下工作。

4. 铁镍铬合金。常见的为含铁55.5%、含镍36%、含铬8%、含钼0.5%的合金。它的特点是灵敏系数较高，达3.6。但它有两个严重缺点使其应用范围受到限制，其一是 K_0 值在弹性范围和塑性范围时不一样（分别为3.6和2.5）；其二是电阻温度系数大（比康铜高六倍以上），所以用这种合金制成的应变片只适用于动态测量。

5. 贵金属及合金。工作温度较高下测量应变时，使用贵金属及其合金。较常用的有铂及铂钨合金等。这些材料的电阻率较小，灵敏系数较大。电阻温度系数也较大（高温测量时需采取温度补偿措施）。

表 1-1 列出常用应变合金的一般性能。表中电阻温度系数为在室温下 (20°C)，温度升高一度时材料的电阻变化率 ($\Delta R/R$)。应变片的线栅和引线一般由不同的金属制成，所

表1-1 常用应变合金的性能

合金类型	牌号或名称	成分		灵敏系数 K_0	电阻率 ρ (欧·毫米 ² /米)	电阻温度系数 $\gamma_r(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	对铜热电势 (微伏/ $^{\circ}\text{C}$)
		元素	%				
铜镍合金	康铜	Cu	55	1.9~2.1	0.45~0.52	± 20	43
		Ni	45				
铁镍钴合金	—	Fe	55.5	3.6	0.84	300	—
		Ni	36				
		Cr	8				
		Mo	0.5				
镍铂合金	镍克鲁姆V	Ni	80	2.1~2.3	1.0~1.1	110~130	3.8
		Cr	20				
	6J22 (卡马)	Ni	74	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20	3
		Cr	20				
		Al	3				
		Fe	3				
	6J23	Ni	75	2.4~2.6	1.24~1.42	± 20	3
		Cr	20				
		Al	3				
		Cu	2				
铁铂铝合金	0Cr25Al5	Fe	70	2.8	1.3~1.5	30~40	2~3
		Cr	25				
		Al	5				
贵金属合金	铂	Pt	100	4~6	0.09~0.11	3900	7.6
		Ir	20				
	铂-铱	Pt	80	6.0	0.32	850	—
		Ir	20				
铂-钨	Pt	92	3.5	0.68	227	6.1	
	W	8					

以在线栅和两引线的焊接点形成了两个热偶。当应变片粘贴在试件上并在引线上焊上连接导线后，如应变片处在高温或低温下（连接导线与测量仪器相接的一端通常处在常温下），则热偶上产生热电势，其大小与温度差及组成热偶的材料有关。因为两个热偶产生的热电势的方向相反，在通常情况下由热电势产生的测量误差为零或极小。但当两个热偶有温度差时，即应变片处在有温度梯度的温度场中时，并且使用直流电桥进行测量则热偶效应会产生误差。表中给出了各种应变合金的对铜热电势。应变合金在高、低温等特殊条件下的性能在第五节中介绍。

在常温下使用的应变片多由康铜制成，铁镍铬合金因为温度系数较大，所以使用受到限制，其他合金用于高温等特殊条件下。

二、应变片的结构和性能

1. 应变片的结构

(1) 金属丝式应变片。金属丝式应变片分为圆角线栅式(图1-3a)和直角线栅式(图1-3b)两种。前者是最常见的形式，因为制造的设备和技术都较简单。但横向灵敏度较直角线栅式和箔式应变片为大(横向灵敏度会给测量带来一定的误差)。敏感元件——线栅使用圆断面的线材(康铜或其他材料，见表1-1)制成，线材直径在0.012~0.05毫米之间，以0.025毫米左右为最常用。为了使应变片有足够的电阻(一般在100欧以上)以便与测量电路配合，而线材的直径因为拉丝工艺和应变片制作工艺的限制又不能做得太细，应变片的长度又希望不要太大，所以将敏感元件制成栅状。引线多使用直径在0.15~0.3毫米之间的镀锡铜线或铜

带，用钎焊或点焊与线栅相接。基底的质量直接影响应变片的工作性能，其作用是保持线栅的几何形状，并保证线栅和被测试件之间的电绝缘。

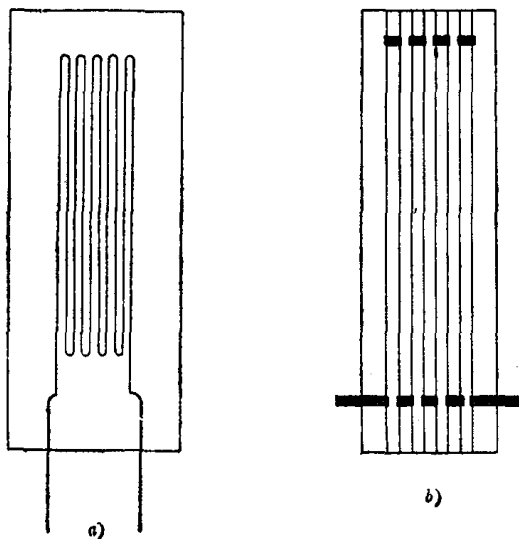


图1-3 金属丝式应变片

a) 圆角线栅式 b) 直角线栅式

基底材料有纸和有机聚合物两大类，具有纸基底的应变片称为纸基应变片，具有有机聚合物基底的称为胶基应变片。

对基底的要求是：

- 1) 机械强度高；
- 2) 粘贴容易；
- 3) 电绝缘性能好；
- 4) 热稳定性好；
- 5) 抗潮湿性能好；
- 6) 挠性好（使应变片能贴在曲面上）；