



第2章 电阻应变计式传感器

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

2.1

电阻应变计的基本原理与结构

2.2

电阻应变计的主要特性

2.3

电阻应变计的温度效应及其补偿

2.4

电阻应变计的应用

2.5

测量电路

2.6

电阻应变计式传感器

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

一、导电材料的应变电阻效应

电阻应变片的工作原理是基于应变效应，即导体或半导体材料在外界力的作用下产生机械变形时，其电阻值发生变化，这种现象称为“**应变效应**”。

如图2 - 1所示，一根长 l ，截面积为 A 的金属电阻丝，在其未受力时，原始电阻值为：

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2-1)$$

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

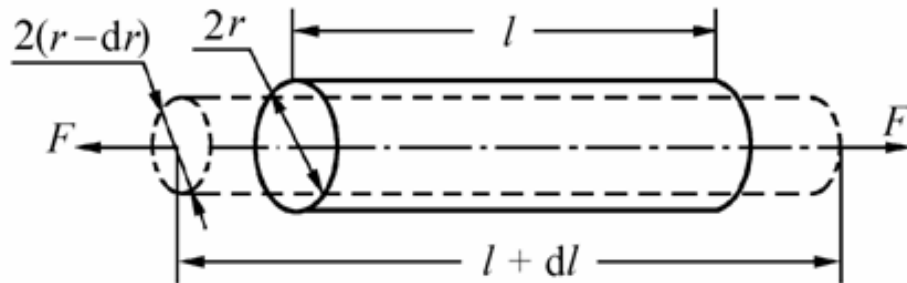


图2.1 导体受拉伸后的参数变化

当电阻丝受到拉力 F 作用时，将伸长 dl ，横截面积相应减小 dA ，电阻率因材料晶格发生变形等因素影响而改变了 $d\rho$ ，从而引起电阻值相对变化量为：

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-2)$$

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

式中 $dl/l = \varepsilon$ ——材料的轴向线应变，常用单位 $\mu\varepsilon$ ($1\mu\varepsilon = 1 \times 10^{-6} \text{mm/mm}$);

dA/A ——圆形电阻丝的截面积相对变化量，设 r 为电阻丝的半径，微分后可得 $dA = 2\pi r dr$ ，则：

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dr}{r} = -2\mu\varepsilon$$

其中 r ——导体的半径，受拉时 r 缩小；

μ ——导体材料的泊松比。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

可得：

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-3)$$

对于金属导体或半导体，上式中右末项电阻率相对变化的受力效应是不一样的，后面分别讨论。

通常把单位线应变能引起的电阻值变化称为电阻丝的**灵敏系数**。其物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化量，其表达式为

$$K = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (2-4)$$

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

$$K = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon}$$

灵敏系数 K 受两个因素影响：材料几何尺寸的变化，即 $1+2\mu$ ；材料的电阻率发生的变化，即 $(d\rho/\rho)/\varepsilon$ 。大量实验证明，在电阻丝拉伸极限内，电阻的相对变化与应变成正比，即 K 为常数。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

1. 金属材料的应变电阻效应

勃底特兹明通过实验研究发现，金属材料的电阻率相对变化与其体积相对变化之间有如下关系：

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V}$$

式中，C由一定的材料和加工方式决定的常数

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{dS}{S} = (1 - 2\mu)\varepsilon$$

代入（2-3），并考虑实际上 $\Delta R \ll R$ 故可得

$$\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)]\varepsilon = K_m \varepsilon$$

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

1. 金属材料的应变电阻效应

由上式

$$\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)]\varepsilon = K_m \varepsilon$$

式中, $K_m = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)]$ 为金属材料的应变灵敏系数 (简称灵敏系数)。

上式表明, 金属材料的电阻相对变化与其线应变成正比, 这就是金属材料的应变电阻效应。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

1. 金属材料的应变电阻效应

对金属材料来说，电阻丝灵敏度系数表达式中 $1+2\mu$ 的值要比 $C(1-2\mu)$ 大得多，显然，金属丝材的应变电阻效应以结构尺寸变化为主。金属材料的电阻相对变化与其线应变成正比。这就是金属材料的应变电阻效应。对金属或合金，一般 $K_m=1.8\sim 4.8$ 。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

2. 半导体材料的压阻效应

史密茨等学者很早就发现，单晶半导体材料（锗、硅）具有压阻效应，当某一轴向受外力作用时，其电阻率 ρ 发生变化的现象。

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi \cdot \sigma = \pi \cdot E \cdot \varepsilon \quad (2-5)$$

式中： π ——半导体材料的压阻系数； σ ——半导体材料的所受应变力； E ——半导体材料的弹性模量； ε ——半导体材料的应变。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

2. 半导体材料的压阻效应

将上式代入（2-3），并写成增量形式可得

$$\frac{dR}{R} = [(1 + 2\mu) + \pi E]\varepsilon = K_s \varepsilon \quad (2-7)$$

式中， $K_s = [(1 + 2\mu) + \pi E]$ 半导体材料的应变灵敏系数
(简称灵敏系数)

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

2. 半导体材料的压阻效应

对半导体材料来说，电阻丝灵敏度系数表达式中压阻效应所致的 πE 远大于尺寸变化所致的 $(1+2\mu)$ ，因此半导体丝材的 $K_s \approx \pi E$ ，半导体材料的应变电阻效应主要基于压阻效应。通常 $K_s = (50 \sim 80) K_m$ 。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

二、电阻应变计的结构与类型

利用导电丝材的应变电阻效应，可以制成测量试件表面应变的传感元件。

为在较小的尺寸范围内敏感有较大的应变输出，通常把应变丝制成栅状的应变传感元件，即电阻应变计（片），简称应变计（片）。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

二、电阻应变计的结构与类型

应变计的结构型式很多，但其主要组成部分基本相同，如图所示给出了丝式、箔式和半导体等三种典型应变计的结构型式及其组成。

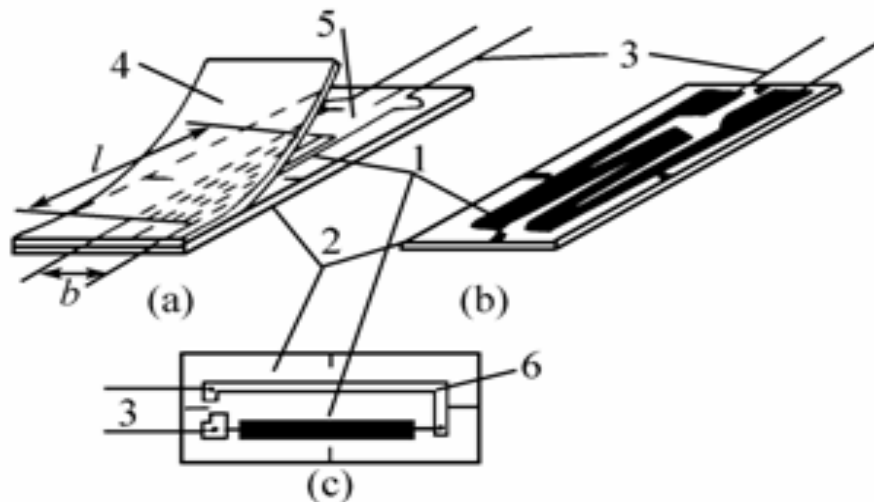


图2.2 典型应变计的结构及组成

(a) 丝式 (b) 箔式 (c) 半导体

1—敏感栅 2—基底 3—引线 4—盖层 5—粘结剂 6—电极

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

二、电阻应变计的结构与类型

结构：

(1) 敏感栅——实现应变-电阻转换的敏感元件。

通常由直径为 $0.015\sim 0.05\text{mm}$ 的金属丝绕成栅状，或用金属箔腐蚀成栅状。

(2) 基底——为保持敏感栅固定的形状、尺寸和位置，通常用粘结剂将其固结在纸质或胶质的基底上。基底必须很薄，一般为 $0.02\sim 0.04\text{mm}$ 。 ■

(3) 引线——起着敏感栅与测量电路之间的过渡连接和引导作用。通常取直径约 $0.1\sim 0.15\text{mm}$ 的低阻镀锡铜线，并用钎焊与敏感栅端连接。 ■

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

二、电阻应变计的结构与类型

(4) 盖层——用纸、胶作成覆盖在敏感栅上的保护层；起着防潮、防蚀、防损等作用。 ■

(5) 粘结剂——制造应变计时，用它分别把盖层和敏感栅固结于基底；使用应变计时，用它把应变计基底粘贴在试件表面的被测部位。因此它也起着传递应变的作用。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

二、电阻应变计的结构与类型

类型：

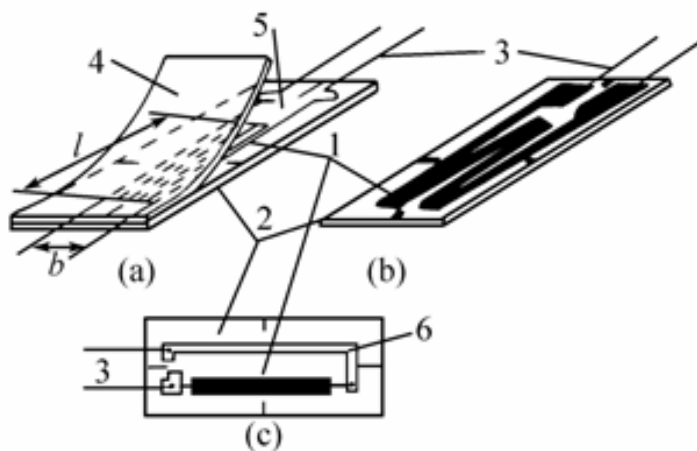


图2.2 典型应变计的结构及组成

(a) 丝式 (b) 箔式 (c) 半导体

1—敏感栅 2—基底 3—引线 4—盖层 5—粘结剂 6—电极 ■

1. 金属丝式应变片

有回线式和短接式二种。回线式最为常用，制作简单，性能稳定，成本低，易粘贴，但横向效应较大。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

二、电阻应变计的结构与类型

类型:

2.金属箔式应变片

利用照相制版或光刻技术将厚约 **0.003 ~ 0.01mm** 的金属箔片制成所需图形的敏感栅，也称为应变花。

3.半导体应变片

由单晶半导体经切型、切条、光刻腐蚀成形，然后粘贴在薄的绝缘基片，最后再加上保护层。但重复性、温度及时间稳定性差。

第二节 电阻应变计的主要特性

- 应变计多为一次性使用，应变计的特性是按规定的条件，从大批量生产中按比例抽样**实测**而得

静态特性

■ 灵敏系数K

当具有初始电阻值R的试件受力引起的表面应变，将传递给应变计的敏感栅，在一定的范围内，产生电阻相对变化为

$$\Delta R/R = K \varepsilon_x$$

ε_x 为应变计轴向应变

$K = \Delta R / (R \varepsilon_x)$ 为应变计灵敏系数，一般 $K < K_0$ （ K_0 敏感栅整长应变丝的灵敏度）

第二节 电阻应变计的主要特性

静态特性

■ 横向效应及横向效应系数H

- 由于试件承受单向力时，其表面处于平面应变状态中，即轴向拉升和横向收缩，粘贴在试件表面上的应变计，其纵栅和横栅各自主要分别敏感 ε_x 和 ε_y ，从而引起总的电阻相对变化为

$$\Delta R/R = K_x \varepsilon_x + K_y \varepsilon_y = K_x (1 + aH) \varepsilon_x$$

式中, k_x 纵向灵敏系数

k_y 横向灵敏系数

$a = \varepsilon_y / \varepsilon_x$ 双向应变比

$H = K_y / K_x$ 双向应变灵敏系数比



第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

- 标定情况下: $a = \varepsilon_y / \varepsilon_x = -\mu_0$

$$\Delta R/R = K_x(1 - \mu_0 H)\varepsilon_x$$

可见，横向效应总是起着抵消纵向应变的作用。应变计这种既敏感纵向应变，又同时受横向应变的影响使灵敏系数和相对电阻减小的现象，称为**横向效应**。

- 非标定情况下（两种情况：（1）试件取泊松比一般材料，主应力和应变轴向不一致），
相对误差为：

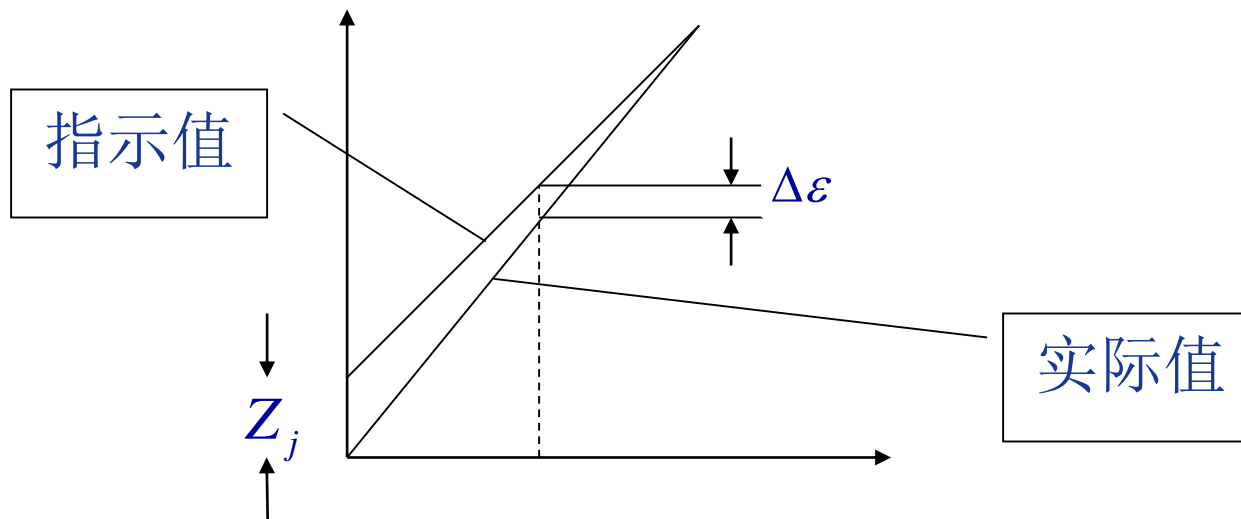
$$\begin{aligned} e &= \frac{K_x(1 + aH)\varepsilon_x - K_x(1 - \mu_0 H)\varepsilon_x}{K_x(1 - \mu_0 H)\varepsilon} \\ &= \frac{H(\mu_0 - a)}{(1 - \mu_0 H)} = \frac{H(\mu_0 - \mu)}{(1 - \mu_0 H)} \end{aligned}$$

可见，要减小误差，必须使H减小

第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

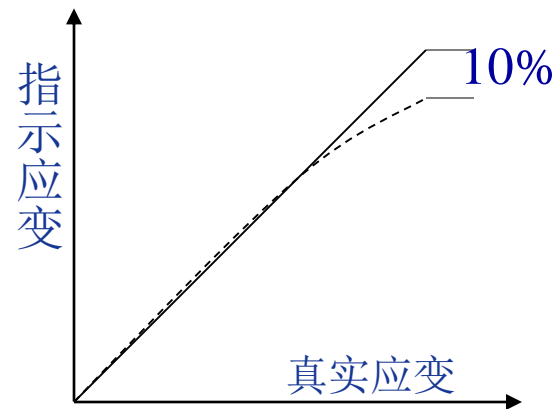
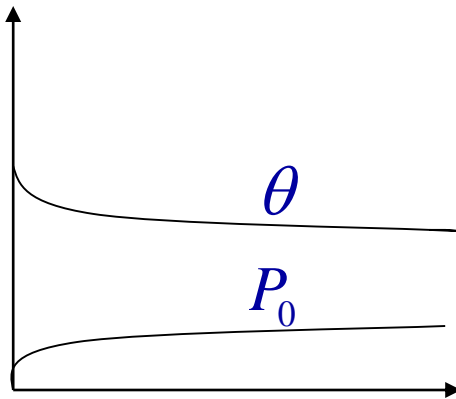
- 对横向效应分析结果的应用结果之一是箔式应变计
- 另外，应变计的纵栅要长、横栅要小，则H越小。
- **机械滞后** Z_j
 - 原因：基底材料、粘结剂的材料、残余变形
 - 通常要求： $Z_j < 10\mu\varepsilon$



第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

- 蠕变 θ 与零漂 P_0
 - 零漂和蠕变反映传感器的长期稳定性
- 应变极限 ε_{lim}
 - 应变计的线性范围，是衡量应变计测量范围和过载能力的指标，一般 $\varepsilon_{\text{lim}} > 8000$



动态特性

- 机械应变以声波的形式和速度在材料中传播的。当它依次通过一定厚度的基底、胶层并引起应变计的响应时，会有时间的迟后。应变计的这种响应迟后对动态(高频)应变测量，尤会产生误差。**应变计的动态特性**就是指其感受随时间变化的应变时之响应特性

- 对正弦信号的响应

图表示一频率为 f ，幅值为 ε_0 的正弦波，以速度 v 沿着应变计纵向 x 方向传播时，在某一瞬时 t 的分布图。应变计中点 x_t 的瞬时应变为

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 \sin(2\pi / \lambda)x_t$$



第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

- 而栅长 l 范围 $[x_t \pm (l/2)]$ 内的平均应变为

$$\varepsilon_p = \frac{1}{l} \int_l \varepsilon_0 \sin \frac{2\pi x}{\lambda} dx = \left(\sin \frac{\pi l}{\lambda} / \frac{\pi l}{\lambda} \right) \varepsilon_t$$

- 相对误差为：

$$e = \left| \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_t}{\varepsilon_t} \right| = \frac{\pi l}{\lambda} \sin \frac{\pi l}{\lambda} - 1 = \frac{1}{6} \left(\frac{\pi l f}{v} \right)^2$$

- 上式表明，当频率增加时，误差增大，因此应使：
 $l < l_{\max} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{6[e]}$ 或 $f_{\max} < \frac{v}{\pi l} \sqrt{6[e]}$

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.3 电阻应变计的温度效应及其补偿

一、温度效应及其热输出

1、温度效应 设工作温度变化为 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ ，则引起粘贴在试件上的应变计电阻的相对变化为：

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t = \alpha_t \Delta t + K(\beta_s - \beta_t) \Delta t \quad (2-7)$$

式中 α_t ——敏感栅材料的电阻温度系数； K ——应变计的灵敏系数； β_s 、 β_t ——分别为试件和敏感栅材料的线膨胀系数。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.3 电阻应变计的温度效应及其补偿

2、热输出

相对的热输出为：

$$\varepsilon_t = \frac{(\Delta R / R)_t}{K} = \frac{1}{K} a_t \Delta t + (\beta_s - \beta_t) \cdot \Delta t \quad (2-8)$$

应变计的温度效应及其热输出由两部分组成：前部分为热阻效应所造成；后部分为敏感栅与试件热膨胀失配所引起。在工作温度变化较大时，这种热输出干扰必须加以补偿。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.3 电阻应变计的温度效应及其补偿

二、热输出补偿方法

1、温度自补偿法

精心选配敏感栅材料与结构参数来实现热输出补偿。

(1) 单丝自补偿应变计

$$a_t = -K(\beta_s - \beta_t) \quad (2-9)$$

在研制和选用应变计时，若选择敏感栅的合金材料，其 α_t 、 β_t 能与试件材料的 β_s 相匹配，即满足 $\varepsilon_t = 0$ ，达到温度自补偿的目的。

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.3电阻应变计的温度效应及其补偿

二、热输出补偿方法

1、温度自补偿法

(2) 双丝自补偿应变计

敏感栅由电阻温度系数一正一负的两种合金丝串接而成。当工作温度变化时，若 R_a 栅产生正的热输出 ε_a 与 R_b 栅产生负的热输出 ε_b 相等或相近，就可达到自补偿的目的，即：

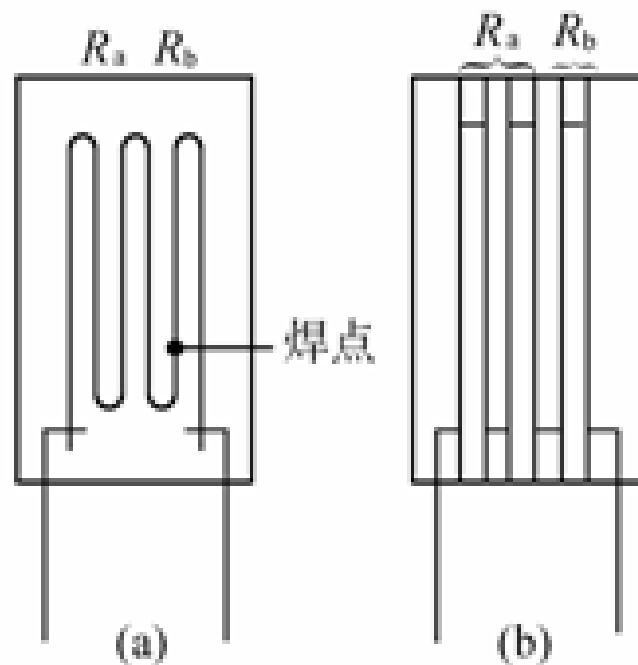


图2.2 (a) 回线式 (b) 短接式

$$\frac{-\varepsilon_{bt}}{\varepsilon_{at}} = -\left(\frac{\Delta R_b}{R_b}\right)_t / \left(\frac{\Delta R_a}{R_a}\right)_t \approx \frac{R_a}{R_b} \quad (2-10)$$

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.3 电阻应变计的温度效应及其补偿

二、热输出补偿方法

2、桥路补偿法

(1) 双丝半桥式

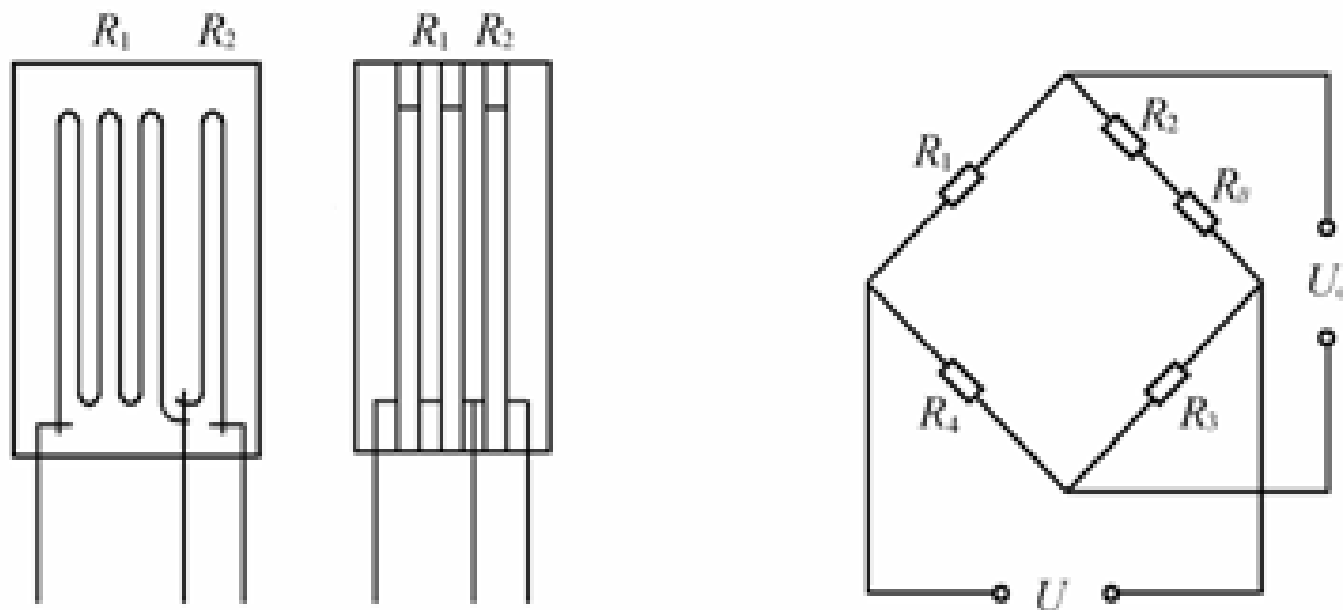


图2.3 双丝半桥式热补偿应变计

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.3 电阻应变计的温度效应及其补偿

二、热输出补偿方法

2、桥路补偿法

(1) 双丝半桥式

敏感栅由同符号电阻温度系数的两种合金丝串接而成，工作栅 R_1 接入工作臂，补偿栅 R_2 外接串接电阻 R_B (不敏感温度影响)接入补偿臂，当温度变化时，只要电桥工作臂和补偿臂的热输出相等或相近，就能达到热补偿目的。

$$R_B \approx R_2 \left[\frac{-\varepsilon_{2t}}{\varepsilon_{1t}} - 1 \right] \quad (2-11)$$

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.3 电阻应变计的温度效应及其补偿

2、桥路补偿法

(2) 补偿块法

使用两个相同的应变计。

R1贴在试件上，接入电桥工作臂，**R2**贴在与试件同材料、同环境温度，但不参与机械应变的补偿块上，接入电桥相邻臂作补偿臂，补偿臂产生与工作臂相同的热输出，通过电桥，起到补偿作用。

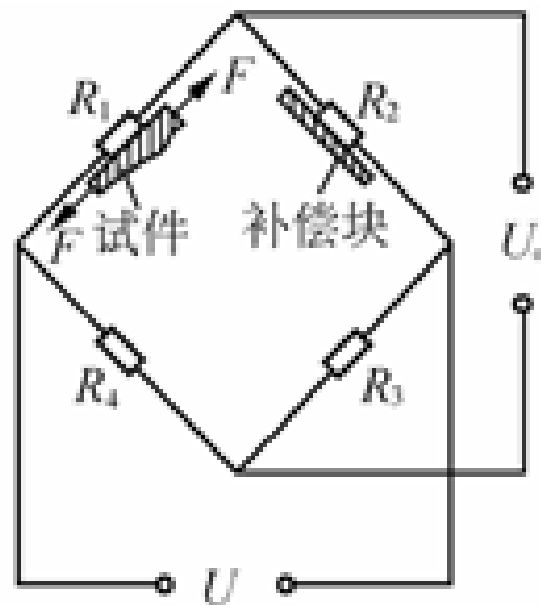


图2.4 补偿块半桥热补偿应变计

2.3 电阻应变计的温度效应及其补偿

2、桥路补偿法

(3) 差动电桥法

巧妙地安装应变片可以起补偿作用并提高灵敏度。

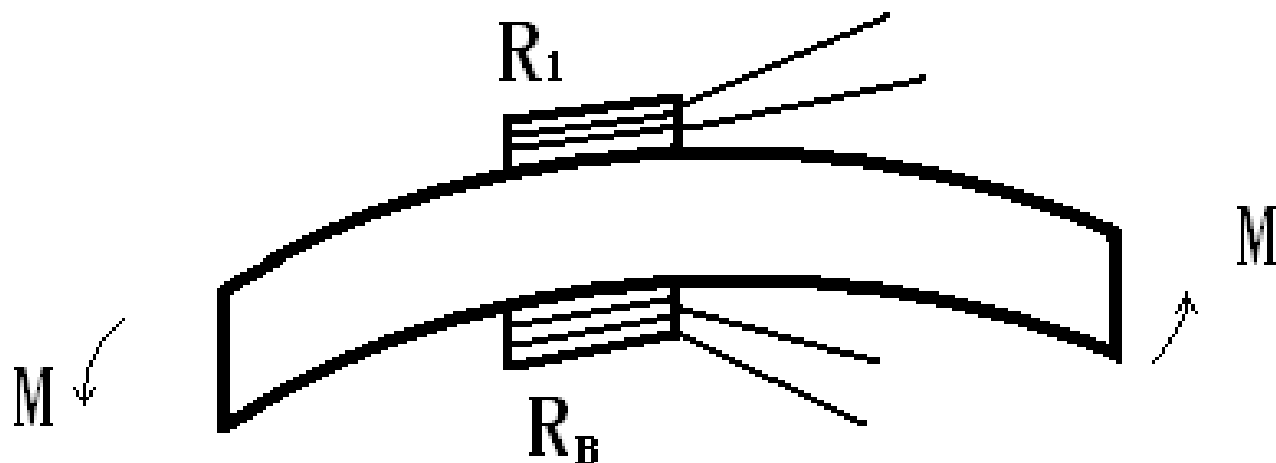


图2.5 差动电桥法

将两个应变片分别贴于测悬梁上下对称位置， R_1 、 R_B 特性相同，所以两电阻变化值相同而符号相反。因而电桥输出电压比单片时增加1倍。当梁上下温度一致时， R_B 与 R_1 可起温度补偿作用。

第四节 电阻应变计的应用

- 首先要确切了解各种应变计的应用特点
- 选用应变计应的方法
 - 选择类型——使用目的、要求、对象、环境等
 - 选择材料——使用温度、时间、最大应变量及精度
 - 选择阻值——根据测量电路和仪器选定标称电阻
 - 选择尺寸——试件表面、应力分布、粘贴面积
 - 其他考虑——特殊用途、恶劣环境、高精度

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

三、电阻应变计的应用

1、应变计的选用

- (1) 选择类型——使用目的、要求、对象、环境等
- (2) 材料考虑——使用温度、时间、最大应变量及精度
- (3) 阻值选择——根据测量电路和仪器选定标称电阻
- (4) 尺寸考虑——试件表面、应力分布、粘贴面积
- (5) 其他考虑——特殊用途、恶劣环境、高精度

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

➤ 应变计的使用

1. 粘接剂的选择

2. 应变计的粘贴

- ① 准备
- ② 涂胶
- ③ 贴片
- ④ 复查
- ⑤ 接线
- ⑥ 防护

第2章 电阻应变式传感器(Resistive Strain Gauge Sensors)

2.1 电阻应变计的基本原理结构和应用

三、电阻应变计的应用

2、应变计的使用

(1) 粘结剂的选择

通常在室温工作的应变片多采用常温、指压固化条件的粘结剂如聚脂树脂、环氧树脂类。

(2) 应变计的粘贴

①准备——试件和应变片；②涂胶；③贴片；
④复查；⑤接线；⑥防护。



第五节 测量电路

应变电桥概述

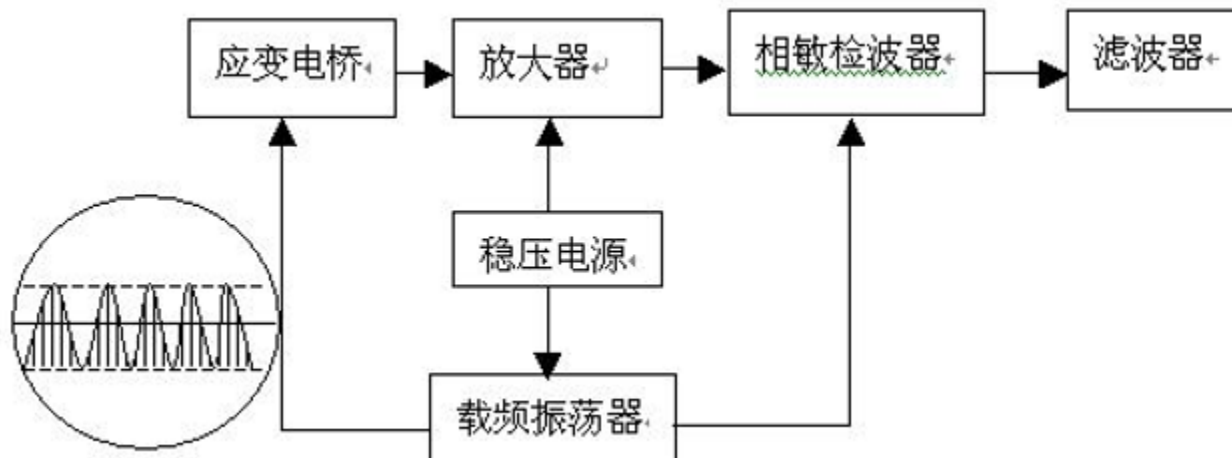
电阻应变计把机械应变信号转换成 $\Delta R / R$ 后，由于应变变量及其应变电阻变化一般都很微小，既难以直接精确测量，又不便直接处理。因此，必须采用测量电路或专用仪器-电阻应变仪，把应变计的 $\Delta R / R$ 变化转换成可用的电压或电流输出。

第2章 电阻应变计式传感器

第五节 测量电路

电阻应变仪简介

电阻应变仪的主要功能是把应变电桥输出的微小电压调整到可供显示、记录的程度。按应变仪所能测量的应变工作频率，可分为静态、动态、遥测等多种类型，但其构成原理基本相同。典型的动态电阻应变仪组成如下图所示。



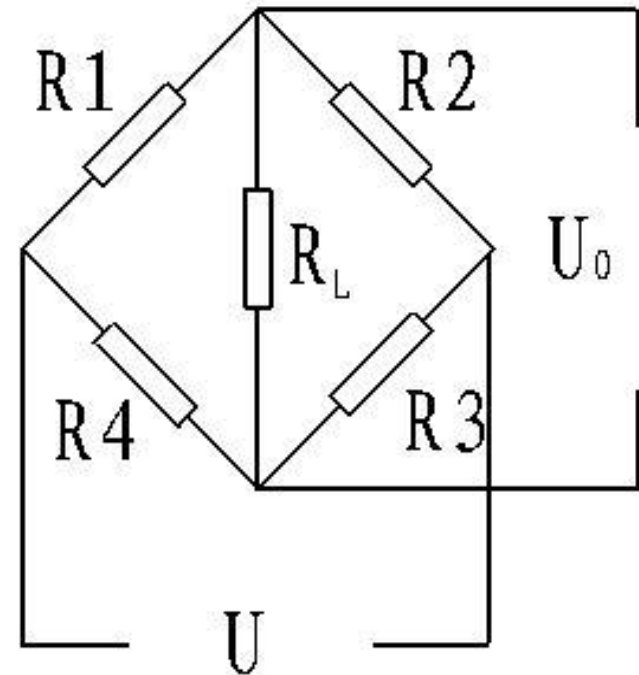
第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

应变电桥

目前最广泛应用于电阻应变计的测量电路为应变电桥，因其灵敏度高、精度高、测量范围宽、电路结构简单、易于实现温度补偿等特点而能很好地满足应变测量的要求。

- 直流电桥与交流电桥
 - 直流电桥只接入电阻
 - 交流电桥可接入LC
- 平衡电桥与不平衡电桥
- 等臂与半等臂
- 输出端对称与电源对称



第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

直流电桥及其输出特性

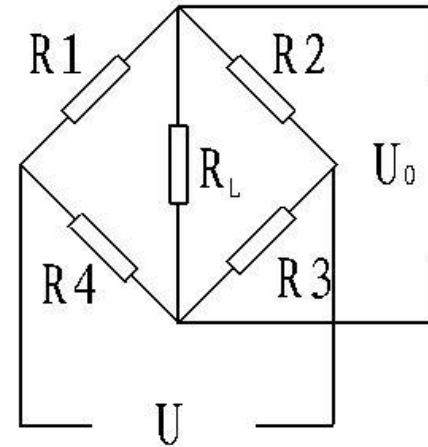
➤ 电桥平衡的条件:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$$

➤ 电压输出桥的输出特性
输出电压:

$$U_0 = U \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_3 + R_4)(R_1 + R_2)}$$





第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

代入 ΔR :

$$\Delta U_0 = U \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)}$$

分子分母同除以 $R_1 R_3$, 另桥臂 $R_2/R_1 = n$ 并略去高阶量, 可得

$$\Delta U_0 = \frac{\frac{nU}{(1+n)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}{1 + \frac{n}{(1+n)} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)}$$

如果为全等臂电桥, 则:

$$\Delta U_0 = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \bigg/ \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} + \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \right]$$

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

可简写为:

$$\Delta U_0 = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) = \frac{U}{4} K (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

如果只有一个臂工作, 如R1, 则:

$$\Delta U_0 = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} \bigg/ \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \right] = \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

因此, 单臂电桥的电压灵敏度为:

$$S_u = \Delta U_0 \bigg/ \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{U}{4}$$



第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

非线性特性

从上述分析的两种输出桥之输出特性可以看出，无论是输出电压还是电流，实际上都与 $\Delta R / R$ 呈非线性关系。只有当 $\Delta R / R$ 很小而作了近似处理后，才简化得线性关系

$$\Delta U_0 = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

非线性误差

仍以全等臂电压输出桥单臂工作情况为例，实际输出 $\Delta U_0'$ 与理想输出 ΔU_0 的误差为

$$e_\varphi = \frac{\Delta U_0' - \Delta U_0}{\Delta U_0} = \frac{\left| \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} \right| / \left[1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \right] - \frac{U}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\frac{U}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1}} = \frac{-K\varepsilon_1}{2 + K\varepsilon_1}$$

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

注意两点

1. 采用金属应变计，在一般应变范围内，非线性误差小于1%，故在此允许的非线性范围内，金属应变计电桥的电压输出特性可由输出特性表示成线性关系；
2. 采用半导体应变计时，由于非线性误差随 K 而增大，必须采用补偿措施
 - 差动电桥补偿
 - 采用恒流源

第六节 电阻应变计式传感器

一. 原理和特点

➤ 电阻应变计有两方面的应用：

- (1) 作为**敏感元件**，直接用于被测试件的应变测量；
- (2) 作为**转换元件**，通过弹性元件构成传感器，用以对任何能转变成弹性元件应变的其它物理量作间接测量。

用作传感器的应变计，应有更高的要求，尤其非线性误差要小 ($<0.05\% \sim 0.1\% \text{F.S.}$)，力学性能参数受环境温度影响小，并与弹性元件匹配。

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

应变计式传感器有如下应用特点：

➤ (1) 应用和测量范围广。

用应变计可制成各种机械量传感器，如测力传感器可测 $10^{-2} \sim 10^7 \text{N}$ ，压力传感器可测 $10^3 \sim 10^8 \text{Pa}$ ，加速度传感器可测到 10^3 级 m/s^2 。

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

- (2) 分辨力($1\mu\varepsilon$)和灵敏度高, 尤其是用半导体应变计, 灵敏度可达几十mV/V; 精度较高(一般达1%~3%F.S., 高精度达0.1%~0.01%F.S.)。
- (3) 结构轻小, 对试件影响小; 对复杂环境的适应性强, 易于实施对环境干扰的隔离或补偿, 从而可以在高低温、高压、高速、强磁场、核幅射等特殊环境中使用; 频率响应好。

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

- (4) 商品化，选用和使用都方便，也便于实现远距离、自动化测量。
- 因此，目前传感器的种类虽已繁多，但高精度的传感器仍以应变计式应用最普遍。它广泛用机械、冶金、石油、建筑、交通、水利和宇航等部门的自动测量与控制或科学实验中；近年来在生物、医学、体育和商业等部门亦已得到开发应用。



二. 应变计式传感器

1. 测力传感器

应变计式传感器的最大用武之地还是称重和测力领域。这种测力传感器的结构由应变计、弹性元件和一些附件所组成。视弹性元件结构型式(如柱形、筒形、环形、梁式、轮幅式等)和受载性质(如拉、压、弯曲和剪切等)的不同，它们有许多种类。



第2章 电阻应变计式传感器

www.seu.edu.cn

2.压力传感器

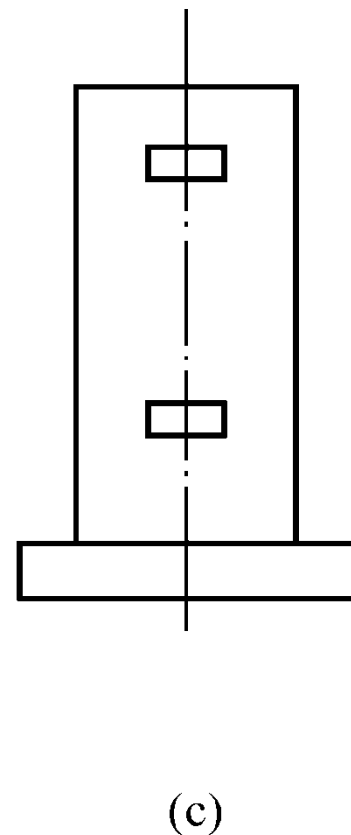
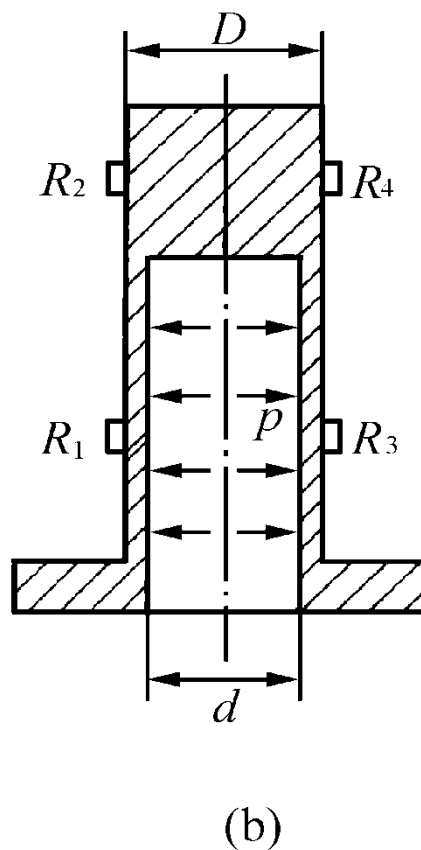
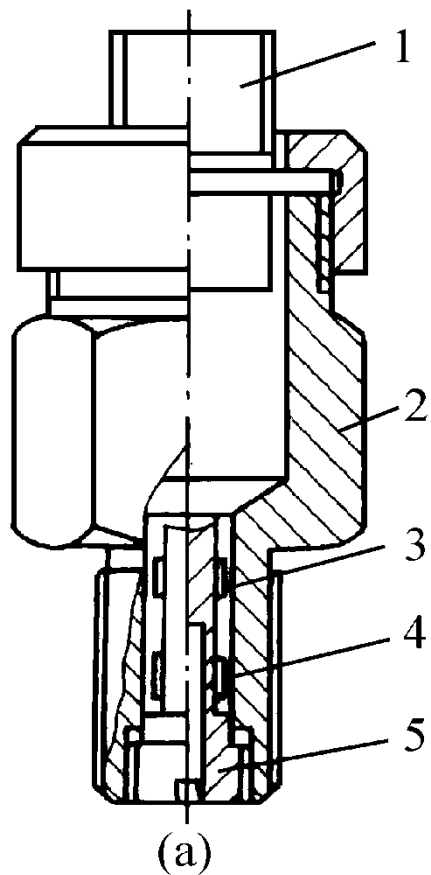
- 压力传感器主要用来测量流体的压力。视其弹性体的结构形式有**单一式**和**组合式**之分。
- **单一式压力传感器**是指应变计直接粘贴在受压弹性膜片或筒上。膜片式应变压力传感器的结构、应力分布及布片，与固态压阻式传感器雷同(参阅2.6节)。

图2.22为筒式应变压力传感器。图中(a)为结构示意图；(b)为材料取 E 和 μ 的厚底应变筒；(c)为4片应变计布片,工作应变计 R_1 、 R_3 沿筒外壁周向粘贴,温度补偿应变计 R_2 、 R_4 贴在筒底外壁,并接成全桥。当应变筒内壁感受压力 P 时,筒外壁的周向应变为:

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn



第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

图2.22 筒式应变压力传感器 (a)结构示意；(b)筒式弹性元件；(c)应变计布片

1—插座；2—基体；3—温度补偿应变计；4—工作应变计；5—应变筒

对厚壁筒

$$\varepsilon_t = \frac{(2 - \mu) d^2}{(D^2 - d^2) E} \cdot P \quad (2-39)$$

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

对薄壁筒

$$\varepsilon_t = \frac{(2 - \mu)d}{(D - d)E} \bullet P \quad (2-40)$$

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

➤ **组合式压力传感器**则由受压弹性元件(膜片、膜盒或波纹管)和应变弹性元件(如各种梁)组合而成。**前者承受压力, 后者粘贴应变计**。两者之间通过传力件传递压力作用。这种结构的**优点**是受压弹性元件能对流体高温、腐蚀等影响起到隔离作用, 使应变计具有良好的工作环境。



3. 位移传感器

应变式位移传感器是把被测位移量转变成弹性元件的变形和应变，然后通过应变计和应变电桥，输出正比于被测位移的电量。它可用来近测或远测静态与动态的位移量。因此，既要求弹性元件刚度小，对被测对象的影响反力小，又要求系统的固有频率高，动态频响特性好。

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

图2.23 (a) 为国产YW系列应变式位移传感器结构。这种传感器由于采用了悬臂梁-螺旋弹簧串联的组合结构，因此它适用于较大位移(量程 $>10\sim100\text{mm}$)的测量。其工作原理如图2.23 (b) 所示。

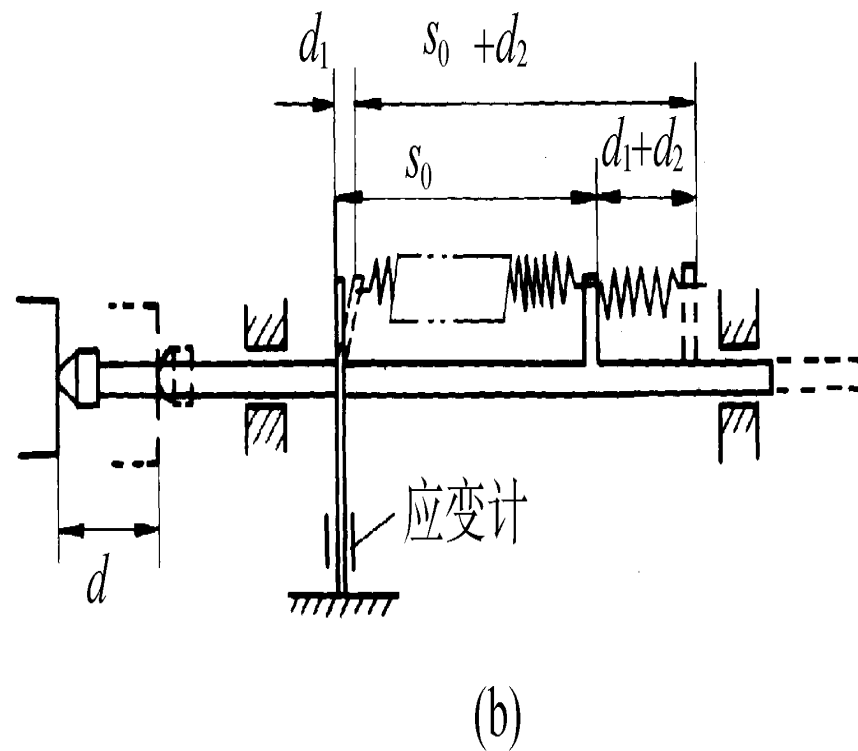
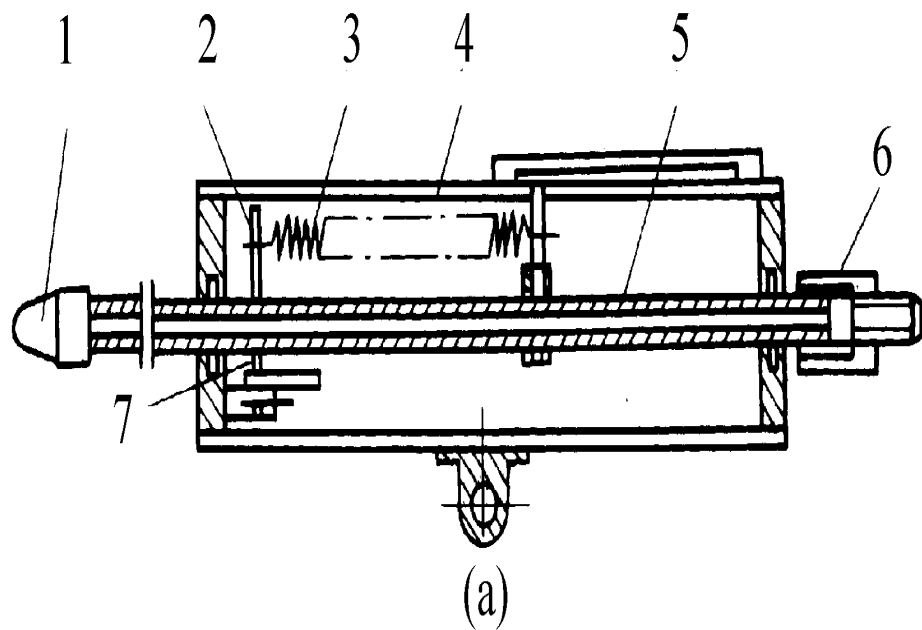
图2.23 YW型应变式位移传感器 (a)传感器结构；(b)工作原理

1—测量头； 2—弹性元件； 3—弹簧； 4—外壳； 5—测量杆； 6—调整螺母； 7—应变计

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn



第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

由于测量杆位移 d 为悬臂梁端部位移量 d_1 和螺旋弹簧伸长量 d_2 之和。由材料力学可知，位移量与贴片处应变 ε 之间的关系为

$$d = d_1 + d_2 = K\varepsilon \quad (2-41)$$

上式表明： d 和 ε 成线性关系，其比例系数 K 与弹性元件尺寸、材料特性参数有关； ε 通过4片应变计和应变仪测得。



4. 其他应变式传感器

利用应变计除可构成上述主要应用传感器外，还可构成其他应变式传感器，如通过质量块与弹性元件的作用，可将被测加速度转换成弹性应变，从而构成应变式加速度传感器。如通过弹性元件和扭矩应变计，可构成应变式扭矩传感器，等等。应变式传感器结构与设计的关键是弹性体型式的选择与计算，应变计的合理布片与接桥。

第2章 电阻应变计式传感器



www.seu.edu.cn

本章结束， 谢谢