

第3章

应变式传感器

参数型传感器

工作原理：将被测物理量转化为电路参数

主要参数：电阻、电容、电感

一、电阻式传感器

基本原理

- 将被测量变化转换成传感器元件电阻值变化
- 经过转换电路变成电信号输出
- 常用于测量力、压力、位移、应变、扭矩、加速度等

可变电阻传感器的传感元件

- 电位计(a)：直线位移
- 电阻应变片(b)：应变
- 热敏电阻(c)：温度
- 气敏电阻：气体浓度或成分
- 湿敏电阻：介质含水量
- 光敏电阻：光信号强弱
- 热线风速计(d)：加热金属被流动介质冷却使电阻变化以测量流速
- 金属丝压敏传感元件(e)：流体压力

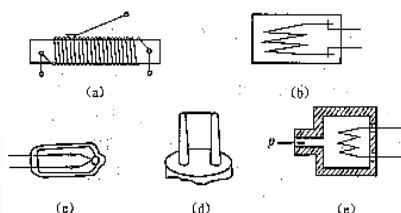
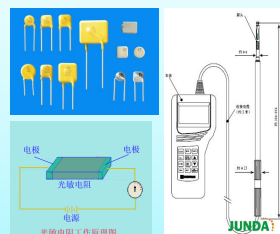


图 3-1 可变电阻传感元件

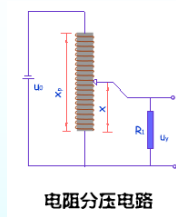


(一)大电阻变化式

输入量变化时，电阻值在0~100%范围内变化，

如：测量线位移或角位移的滑线式变阻器(电位器)

电刷在一根导线上 电刷通过两根导线
电位计导线



电阻分压电路

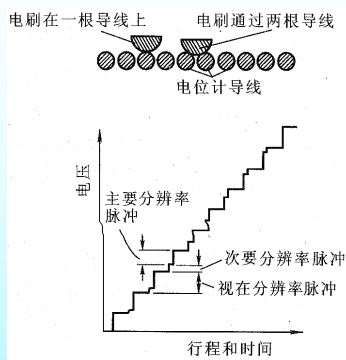
原理

- 电阻材料导线覆以绝缘涂层后排绕而成
- 在工作表面上磨去绝缘层
- 弹性导体制成的电刷在工作表面上滑动
- 电刷位移的变化而引起电阻值变化



常见问题

- 线绕电位器呈非平滑、连续变化
- 电刷每走一个线径电阻突变一次
- 电阻呈大、小阶梯形变化
降低了被测参数的分辨力
- 电刷处在两导线间时
会造成两圈之间的短路
- 电刷磨损严重会造成三圈短路



解决办法

- 采用表面光滑型碳膜、金属膜和导电塑料
- 导电塑料没有线绕，其特性呈连续变化
- 动态测试中，电刷是弹性振动系统，有固有频率
- 共振：电刷在间断平面以一定速度滑动，受迫振动频率若与固有频率相近，电刷会引起较大振动响应
- 输出特性急剧恶化：振动造成电刷脱离接触或产生噪声
- 弹性振动系统固有频率较低，测量速度受限制
光滑表面的导电塑料可缓解这一问题

(二)微电阻变化式

• 被测物理量变化时，传感元件电阻值变化范围很小

• 原始阻值的变化小于10%

电阻应变片，若原始电阻为120Ω，电阻变化均在1Ω以下

• 电阻应变片是应用最广泛的传感元件之一

体积小、动态响应快、测量精度高、使用简便

• 光刻技术的突破，使精度和可靠性提高

应用领域越来越广

1. 电阻应变片的工作原理与结构

工作原理

• 电阻应变式传感器

机械变形 → 电阻应变片形变 → 电阻变化 → 电量输出

• 被测物理量

由电量变化的大小反映

• 构成

在弹性元件上 + 电阻应变敏感元件

• 应用

测量力、力矩、压力、加速度、重量等

应变效应

导体或半导体材料在外力作用下产生机械变形，其电阻值发生变化的现象——“应变效应”。

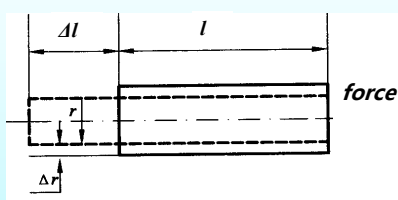
金属电阻丝不受力时的电阻值：

$$R = \rho \frac{l}{F} \quad (3-1)$$

式中：ρ——电阻丝的电阻率；

l——电阻丝的长度；

F——电阻丝的截面积。



• 电阻丝在长度方向变形时

长度 l、截面积 F 和电阻率 ρ 均会变化，并引起电阻 R 变化

• 三个增量 dl、dF、dρ 所引起的 dR 可由多元函数微分导出

• 若电阻丝是半径为 r 的圆形截面，则 $F = \pi r^2$ ，故：

$$R = \rho \frac{l}{F} \Rightarrow R = \rho \frac{l}{\pi r^2} \quad (3-2)$$

由于

$$\begin{aligned} dR &= \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial r} dr + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \\ &= \frac{\rho}{\pi r^2} dl + \frac{2\rho l}{\pi r^3} dr + \frac{l}{\pi r^2} d\rho \\ &= R \left(\frac{dl}{l} + 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \right) \end{aligned}$$

$$\text{电阻的相对变化为} \quad \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3-3)$$

• 若应变片沿长度方向受力而伸长 Δl

• 纵向应变 ε：长度方向的相对变形或长度变化率(无量纲)

$$\varepsilon = \Delta l / l = dl / l$$

• 电阻丝沿其轴向拉长必然使其沿径向缩小

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l}$$

式中：μ——电阻丝材料的泊松比

式(3-3)中的 dρ/ρ 是电阻丝的电导率相对变化，与轴向正应力 σ 有关：

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi_L \frac{\sigma}{E}$$

式中：π_L——电阻丝材料的压阻系数

σ——电阻丝所受轴向正应力

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} + 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho}$$

轴向正应力 σ

式中：E——电阻丝材料的弹性模量

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi_L \frac{\sigma}{E}$$

将各参量式代入式(3-3)可得

$$\frac{dR}{R} = \left(1 + 2\mu - \pi_L \right) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3-4)$$

式(3-4)中：

• 右侧第一项：电阻丝几何尺寸变化而引起的电阻相对变化量

• 右侧第二项：电阻丝电导率因材料变形引起的电阻相对变化（压阻效应）

• 电阻应变片的灵敏度：

$$S = \frac{dR/R}{dl/l} = \frac{dR/R}{d\varepsilon} \quad (3-5)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta E}{E} \right) \quad (3-4)$$

- 应变电阻丝常采用金属材料，也可采用半导体材料制作
- 应用 **金属材料** 制作应变电阻，主要利用式(3-4)中等号右侧的前项

$$\frac{dR}{R} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L}$$

所以
$$\frac{dR}{R} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} \quad (3-6)$$

- 金属应变片的材料有：
铜镍、镍铬、镍铬铝、铁铬铝合金以及贵金属铂和铂钨合金等
- 灵敏度 S 在 **1.7~3.6** 之间，常用的灵敏度 S 为 **2.08**

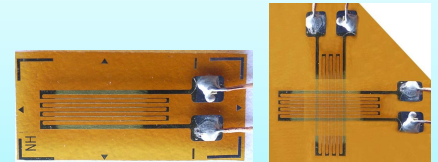
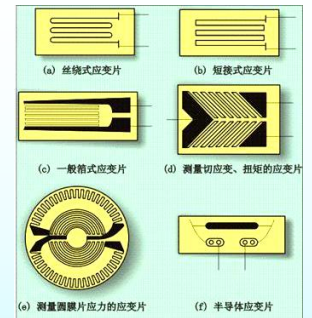
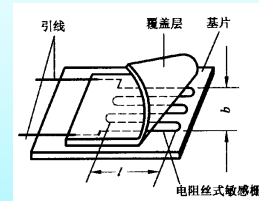
• 电阻应变片的种类

金属应变片：**丝式、箔式和薄膜式**

半导体应变片：**体型、薄膜型、扩散型、外延型**

• 组成

敏感栅、基片、覆盖层和引线



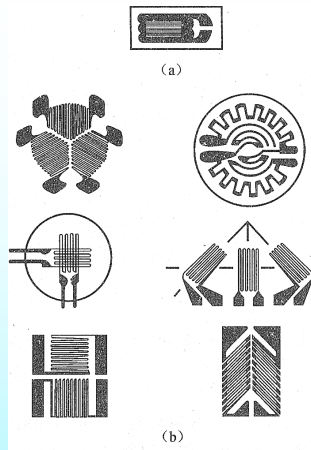
• 金属材料应变片的早期结构

金属丝排布、粘贴在基体上

- 采用照相光刻，制成金属箔式应变片
适合于大量生产，金属箔与基片的
- 粘结可靠，可制成复杂形状**

厚度薄、面积大、散热与稳定性好

- 右图(b)是用来测量多个方向应变的应变片——“**应变花**”
- 光刻工艺的发展，图样、分层和微小的结构不断问世，以适应不同需要。



应变片与应变花

• 半导体电阻材料应变片

$$\frac{dR}{R} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta E}{E} \right) \quad (3-4)$$

压阻效应

工作原理

- 利用半导体材料的电阻率随应力变化
- 式(3-4)中等号右侧的第二项——“**压阻效应**”。

- 常用半导体应变材料：**有P型和N型硅或锗**
- 原理：单晶半导体在**外力**作用下，**原子点阵**排列改变，**导致载流子迁移率及载流子浓度变化而引起电导率变化**
- 方向性：对于P型硅半导体当应力沿 $[1, 1, 1]$ 晶轴方向作用时，
对于N型硅半导体当应力沿 $[1, 0, 0]$ 晶轴方向作用时，
——**压阻效应最大**
- 灵敏度：制造时必须沿**晶轴方向**切割半导体单晶
- 优点：**半导体**应变片灵敏度**100~175**，比**金属**应变片大**10倍**
机械滞后小、横向效应小，体积小
- 性能缺陷：应变灵敏度随**温度**变化较大
对半导体材料进行适当掺杂可以加以改善
灵敏度离散性大、大应变下的非线性大

- 使用应变片，需粘贴在被测构件上
- 粘贴工艺和粘结剂很重要
应变片的误差、可靠性等取决于粘贴工艺
- 制作工序
对被测构件表面打磨、清洗、胶层涂布、粘贴、胶层固化等
否则会严重影响使用效果，甚至导致失效
- 应变片粘结胶
赛璐璐、酚醛树脂、502胶、环氧树脂等
高温下，使用无机粘结剂如专用陶瓷等
- 根据实际使用条件选择材料
以保证粘结强度、绝缘性能、抗蠕变性能、温度范围等技术要求和粘贴操作方便等。

•弹性敏感元件及其基本特性

□ 几个概念

变形、弹性变形、弹性元件

□ 基本特性

刚度：弹性元件受外力作用下变形大小的量度。

$$C = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta x}$$

灵敏度：单位力作用下弹性元件产生的变形大小。

刚度的倒数。

$$S = \frac{1}{C} = \frac{dx}{dF}$$

灵敏系数 K

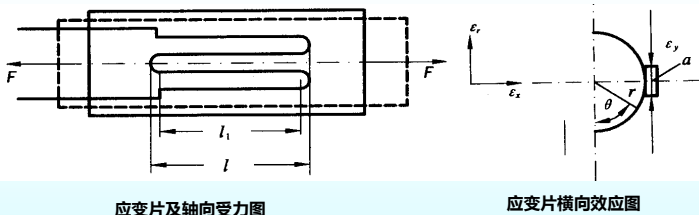
- 定义：安装在被测件上的应变片受轴向应力时，引起的电阻相对变化 $(\Delta R/R)$ 与其单向应力引起的试件表面轴向应变 (ε_t) 之比。

$$K = (\Delta R/R) / \varepsilon_t$$

- 说明：应变片灵敏系数并不等于敏感栅应变丝全长的灵敏系数。

单向应力产生应变时，灵敏系数除受敏感栅结构形状、成型工艺、粘结剂和基底性能影响外，还受到栅端圆弧部分横向效应影响。

•横向效应



应变片及轴向受力图

应变片横向效应图

- 现象：在拉力作用下，轴向电阻丝拉伸，半圆电阻丝受压
- 结果：应变片灵敏度小于整长电阻丝灵敏度
- 解决办法：多采用箔式应变片

•绝缘电阻和最大工作电流

- 绝缘电阻：应变片的引线与被测件之间的电阻值 R_m 。
绝缘电阻越大越好。
- 最大工作电流：应变片允许通过敏感栅而不影响其工作特性的最大电流 I_{max} 。
工作电流大，敏感度高，但会使应变片过热；
应视材料选取不同电流。

•应变片的温度误差及补偿

应变片温度误差——由于测量现场环境温度改变而带来的附加测量误差。

(1) 电阻温度系数的影响

$$R_t = R_0 (1 + \alpha_t t)$$

当温度变化 Δt 时，则电阻的变化为

$$\Delta R_t = R_t - R_0 = R_0 \alpha_t \Delta t$$

•应变片的温度误差及补偿 (续)

(2) 温度系数和线膨胀系数引起的虚应变

设：电阻丝和试件温度 0°C 时的长度为 L_0 ，温度变化后的长度分别为：

$$\left. \begin{array}{l} \text{电阻丝: } l_s = L_0 (1 + \alpha_s t) \\ \text{试件: } l_g = L_0 (1 + \alpha_g t) \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta L = l_g - l_s = (\alpha_g - \alpha_s) L_0 t$$

$$\text{附加应变: } \varepsilon_g = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{l_g - l_s}{L_0} = (\alpha_g - \alpha_s) t$$

$$\text{附加电阻变化: } \Delta R_g = K_0 R_0 \varepsilon_g = K_0 R_0 (\alpha_g - \alpha_s) t$$

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{\Delta R_g + \Delta R_t}{R_0} = \alpha_t t + K (\alpha_g - \alpha_s) t$$

当量电阻温度系数：

虚应变为：

$$\varepsilon_g = \frac{\Delta R_t / R_0 - \alpha_t t}{K} = \frac{\Delta R_t / R_0}{K} - \frac{\alpha_t}{K} t$$

•应变片的温度误差及补偿 (续)

(1)应变片的自补偿法

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} - \frac{\Delta R_g}{R_0} - \frac{\Delta R_s}{R_0} = \Delta \varepsilon_0 + t K (\alpha_g - \alpha_s) = 0 \Rightarrow \Delta \varepsilon_0 = K (\alpha_g - \alpha_s)$$

当被测试件的线膨胀系数 β_g 已知时, 如果合理选择敏感栅材料, 即:

电阻温度系数 α_g 、灵敏系数 K 和线膨胀系数 β_s , 使

$$\alpha_0 / K + (\beta_g - \beta_s) = 0$$

则不论温度如何变化, 均有 $\Delta R_t / R_0 = 0$, 从而达到温度自补偿目的。

•应变片的温度误差及补偿 (续)

(2)线路补偿法

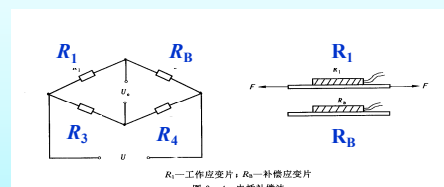
初始状态 $U_0 = A (R_1 R_4 - R_B R_3) = 0$

温度变化后 $U_0 = A [(R_1 + \Delta R_{1t}) R_4 - (R_B + \Delta R_{Bt}) R_3] = 0$

承受应变后 $U_0 = A [(R_1 + \Delta R_{1t} + \Delta R_1) R_4 - (R_B + \Delta R_{Bt}) R_3]$
 $= A \Delta R_1 R_4 = A R_1 R_4 K \varepsilon$

$$R_1 = R_B$$

$$R_3 = R_4$$



•电阻应变片的测量电路 (直流电桥、交流电桥)

(1)直流电桥

直流电桥平衡条件: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ 则: $U_0 = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$

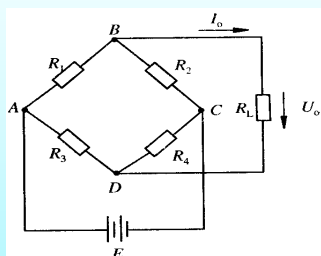
$$U_0 = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) = E \frac{\frac{R_4}{R_3} - \frac{R_1}{R_2}}{(1 + \frac{R_1}{R_2})(1 + \frac{R_4}{R_3})}$$

令: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = n$

又: $\frac{R_1}{R_2} / R_1$ 很小

则: $U_0 = E \frac{n}{(1+n)^2} \frac{\Delta R_1}{R_1}$

灵敏度: $K_U = \frac{U_0}{\Delta R_1 / R_1} = E \frac{n}{(1+n)^2}$



•关于电压灵敏度的几点说明

电桥电压灵敏度正比于电桥供电电压, 供电电压的提高受应变片允许功耗限制, 应作适当选择;

电桥电压灵敏度是桥臂电阻比值 n 的函数, 恰当地选择桥臂比 n 的值,

保证电桥具有较高的电压灵敏度 $K_U = \frac{U_0}{\Delta R_1 / R_1} = E \frac{n}{(1+n)^2}$

要使灵敏度最大 $\frac{dK_U}{dn} = 0 \Rightarrow (1+n)^2 = 2n(1+n) \Rightarrow n = 1$

此时

$$U_0 = E \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1}$$

$$K_U = \frac{E}{4}$$

•非线性误差及其补偿方法

应变片使用时, 其所处温度不变的时:

□ 应变片电阻值变化与应变值之间存在单值函数关系

□ 环境温度变化、电阻丝工作电流产生热量会使工作温度变化

应变电阻随温度变化, 可能大于应变信号引起的电阻变化

□ 温度变化引起的电阻变化可造成电阻应变片的“温度误差”

•非线性误差及其补偿方法

$$U_0 = E \frac{n \frac{\Delta R_1}{R_1}}{(1+n \frac{\Delta R_1}{R_1})(1+n)}$$

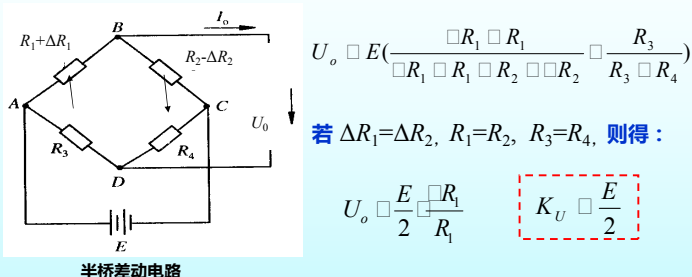
□ 由于 U' 与 $\Delta R/R$ 是非线性关系;

□ 故测量中不可避免会存在非线性误差;

□ 为消除非线性误差, 常采用半桥和全桥两种电路

半桥电路

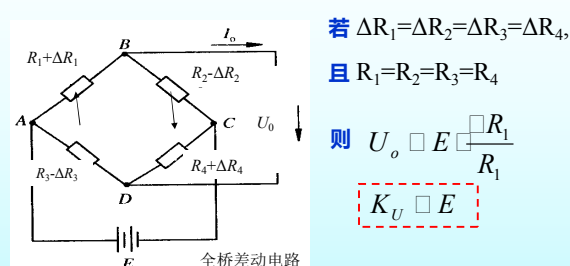
在试件上安装两个工作应变片，一个受拉应变，一个受压应变，接入电桥相邻桥臂，称为半桥差动电路，该电桥输出电压为：



U_o 与 $(\Delta R_1/R_1)$ 呈线性关系，差动电桥无非线性误差，而且电桥电压灵敏度 $K_U = E/2$ ，比单臂工作时提高 1 倍，并具有温度补偿作用。

全桥电路

在试件上安装 4 个工作应变片，2 个受拉应变，2 个受压应变，将 2 个应变符号相同的接入相对桥臂上，构成全桥差动电路，



此时全桥差动电路不仅没有非线性误差，而且电压灵敏度是单片的 4 倍，仍具有温度补偿作用。

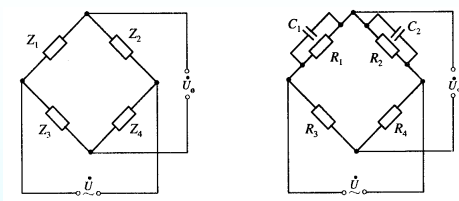
交流电桥

供桥电压：交流

优点：消除零漂

$$Z_1 \approx \frac{R_1}{1 + j\omega R_1 C_1}$$

$$Z_2 \approx \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$



$$Z_4 \approx R_4 \quad Z_3 \approx R_3$$

$$\text{平衡条件: } Z_1 Z_4 \approx Z_2 Z_3 \quad \text{即} \quad \frac{R_1}{R_2} \approx \frac{R_3}{R_4} \quad \text{和} \quad \frac{R_1}{R_2} \approx \frac{C_2}{C_1}$$

当应力变化引起 $Z_1 = Z_0 + \Delta Z$, $Z_2 = Z_0 - \Delta Z$ 变化时

$$\text{电桥输出为 } U_o \approx U \left(\frac{Z_0 + \Delta Z}{2Z_0} - \frac{1}{2} \right) \approx \frac{1}{2} U \frac{\Delta Z}{Z_0}$$

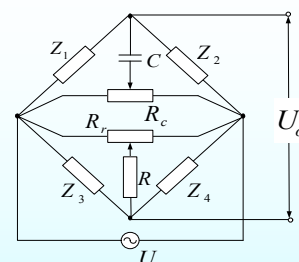
交流电桥

平衡条件： $Z_1 Z_4 \approx Z_2 Z_3$

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

$$\frac{R_1}{R_2} \approx \frac{C_2}{C_1}$$

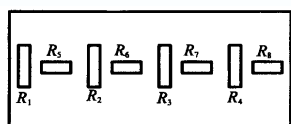
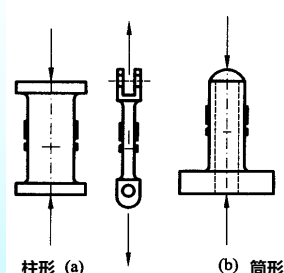
即



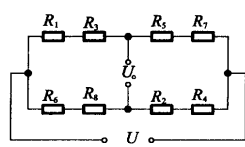
- 交流电桥的调零需要同时调节 R 和 C 两个参数；
- 上图是交流电桥的平衡调节电路——调零电路；
- 需要同时调节 R_c 和 R_r ，才可补偿电桥阻抗的不平衡。

应变式传感器的应用（1）

圆柱（筒）式力传感器



(c) 圆柱形展开图

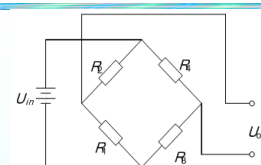
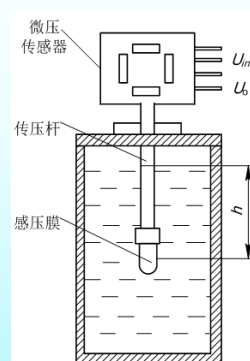


(d) 桥路连接图

纵向应变片用于测力，横向应变片不受力（接入桥路用作温度补偿）

应变式传感器的应用（2）

膜片式力传感器



微压传感器等效为一个感压的电桥电路，此时输出电压为

$$U_o \approx K h \rho g$$

式中： K 为传感器传输系数；

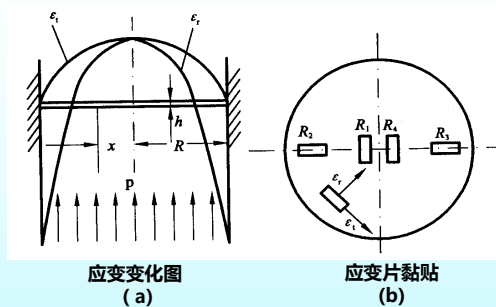
ρ 为液体的密度。

$h A \rho g \approx Q$ 为感压膜上液体重量，则 $U_o \approx \frac{K Q}{A}$

式中： Q 为容器内感压膜上面溶液的总重量；

A 为柱形容器的截面积。

- 应变式传感器的应用 (2)



膜片式压力传感器

The End