

项目二

煤矿轨道矿车重量检测

力/压力传感器是支撑工业过程自动化的四大传感器之一。电子称、汽车、机床、桥梁的检测都需要力传感器。例如一座桁架结构的桥梁，车辆经过大桥时的运动会引起结构的振动（不断变化的载荷），有必要使用力传感器对桥梁结构的振动进行实时监测，避免桥梁因其强度不够造成的倒塌。化纤厂、化肥厂、炼油厂需要测量气体压力和液体压力。例如，在化工生产过程中，氨的合成须在 32MPa 的高压下进行；在某些精馏或蒸发过程中却需要很高的负压（也叫真空度）。因为气压和液压的大小可以改变化学平衡，影响反应速度，也可以改变物质性质，提高过程质量等。因此正确地测量和控制力/压力是保证生产过程良好运行，防止生产设备因力/压力过压大而引起设备损坏的有力保证。

【学习目标】

1. 知识目标

- ① 了解压力测量的基本知识；
- ② 掌握电阻应变式传感器的结构、测量电路和工作原理；
- ③ 掌握压电式传感器的结构、测量电路和工作原理。

2. 能力目标

- ① 能利用电阻应变式传感器实现压力等信号的检测；
- ② 能利用压电式传感器实现压力等信号的检测。

2.1 项目描述

煤矿副井提升罐笼称之为矿井的提升机，如图 2-1 所示。罐笼一般用于矿井的副井提升，主要用于提升人员、矿石、设备、材料等。对于中、小型矿井，罐笼也可以作为主井提升，因此保证提升的安全特别重要。在运送综采支架等大型设备时，其重量往往是平时运送的几倍，如果在不知道矿车质量的情况下盲目下放，可能会造成重载下放或超载提升，容易引起提升事故，因此应在矿车进入罐笼前测量矿车的质量。

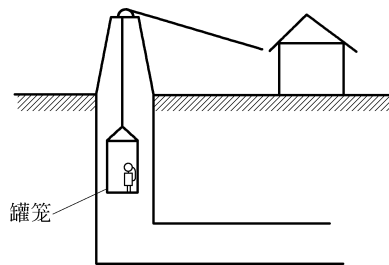


图 2-1 煤矿副井提升罐笼示意图

要求：设计一种矿车轨道称重装置，该装置应用于煤矿地面副井口，在矿车进入罐笼前，经过安装在井口附近轨道上的压力测点时，测得矿车的质量，并将称量结果显示在井口打点室的液晶显示器界面上，如果矿车的质量超过预先设定的报警阈值则进行报警。

2.2 解决方案

轨道矿车重量检测的工作过程示意图如图 2-2 所示。我们关心的是进入矿井口的矿车重量，而矿车的受力点分别在四个车轮上，因此在每个车轮的位置测量车身的重量是这个系统的关键。当矿车经过地面副井口的轨道时，相应安放在轨道的四个称重传感器采集到被测矿车四轮的重量并将其转换成电压信号，通过前端信号处理电路进行准确的线性放大，放大后的模拟电压信号经 A/D 转换电路转换成数字量被送入到控制器中，再经过显示器显示出被测物体的重量，当重量达到并超过预定值时报警。在实际应用中，为提高数据采集的精度并尽量减少外界电气干扰，还需要在传感器与 A/D 芯片之间加上信号调理电路。

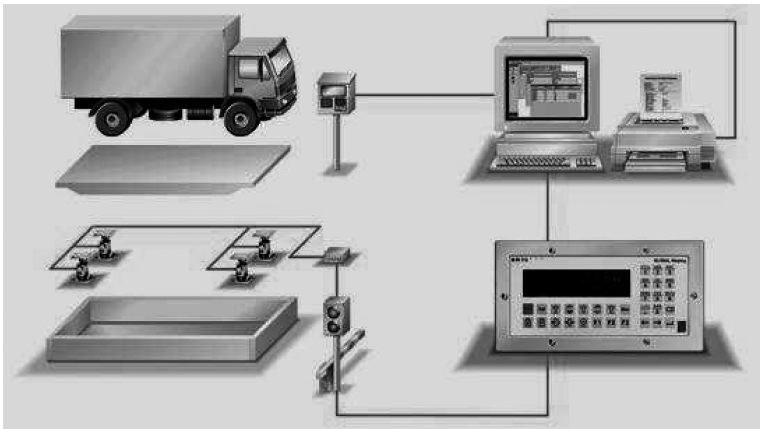


图 2-2 轨道矿车重量检测的工作过程示意图

矿车压力检测系统流程图如图 2-3 所示。

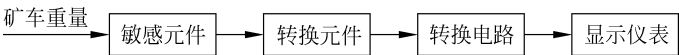


图 2-3 矿车压力检测系统流程图

2.3 相关知识

一、基本概念

1. 力与压力的基本概念

在国际单位制的辅助单位中，压力和力是分别定义的。

(1) 力

力的物理概念在不同的范围内、不同的教科书、资料中有各种不同的解释。通常情况下，都是用牛顿第二定律来描述力，即

$$F = m \cdot a \quad (2-1)$$

式中， F ——作用在物体上的力；

m ——物体的质量；

a ——物体的加速度。

国际单位制中，力是导出单位，单位为牛 [顿] (N)，定义为 1kg 的物体获得 1m/s^2 的加速度所需要的力为 1N。

(2) 压力

工程技术中常说的压力实际就是物理学上的压强。但其定义大多是以压力来定义，如国家计量局 JJG1008—87 规范《压力计量名词术语及定义》一书中明确指出：“压力（压强）(Pressure) 是垂直作用在单位面积上的分布力。”在 JJG1008—87 规范中给出了两个并列的单位，优先使用的是压力。工程技术上几乎都是用压力，因为压力一词由来已久，可说是根深蒂固了，由于人们的习惯有时是很难改变的，如压力变送器基本没有人称它为压强变送器。

国际单位制中，压力的单位是帕斯卡，简称帕，符号为 Pa， $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ 。因帕单位太小，工程上常用 kPa (10^3Pa) 和 MPa (10^6Pa) 表示。

由于历史发展的原因、单位制的不同以及适用场合的差异，压力还有多种不同的单位。目前工程技术部门仍在使用的压力单位有工程大气压、物理大气压、毫米汞柱等。

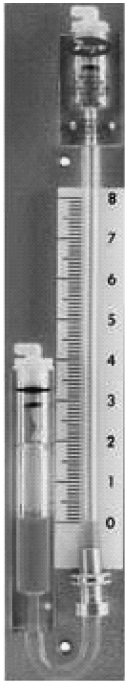
2. 压力的测量方法

工业上，测压力的方法按工作原理主要分为三类：

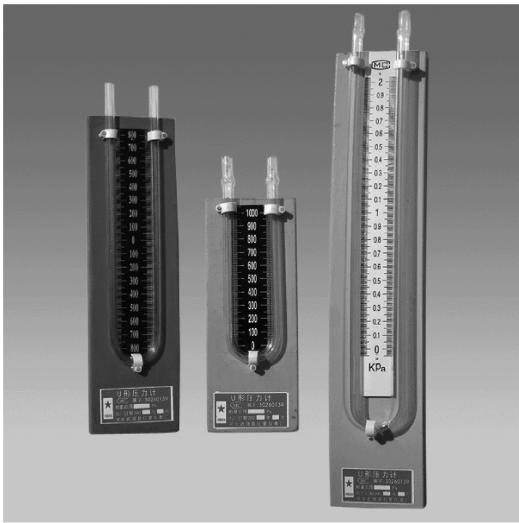
① 重力与被测压力平衡的测量法，如液柱式压力计。

如图 2-4 所示为两种液柱式压力计的实物图。这种方法是利用一定高度的工作液体产生的重力与被测压力相平衡的原理，将被测压力转换为液柱高度来测量。常用的测压指示

液体有酒精、水、四氯化碳和水银。这类仪表的优点是结构简单、反应灵敏、测量准确；缺点是受到液体密度的限制，测压范围较窄，在压力剧烈波动时，液柱不易稳定，而且对安装位置和姿势有严格要求。一般仅用于测量低压和真空度，多在实验室中使用。



(a) 单管压力计



(b) U形管压力计

图 2-4 液柱式压力计

② 弹性力与被测压力平衡的测量法，如弹性式压力计。

如图 2-5 所示为弹簧式压力计的实物图。此类压力计是利用弹性元件受压力作用发生弹性变形而产生的弹性力与被测压力相平衡的原理，将压力转换成位移，通过测量弹性元件位移变形的大小测出被测压力。这类测压仪表结构简单、牢固耐用、价格便宜、工作可靠、测量范围宽，适用于低压、中压、高压多种场合，是工业中应用最广泛的一类压力测量仪表。不过弹性式压力表的测量精度不是很高，且多数采用机械指针输出，主要用于生产现场的就地指示。当需要信号远传时，必须配上附加装置。



图 2-5 弹簧式压力计

③ 物性测量方法，如应变式、压电式压力传感器。

如图 2-6 所示为应变式传感器粘贴在悬臂梁上的称重装置，图 2-7 所示为应变式荷重传感器的实物图。此类传感器是利用敏感元件在压力的作用下，其某些物理特性发生与压力成确定关系变化的原理，将被测压力直接转换为各种电量来测量。它们最大特点就是输出信号易于远传，可以方便地与各种显示、记录和调节仪表配套使用，从而为压力集中监测和控制创造条件。在生产过程自动化系统中被大量采用。

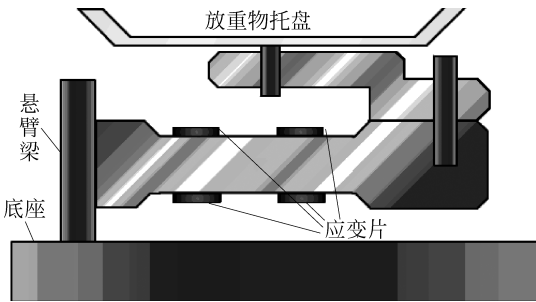


图 2-6 应变式传感器粘贴在悬臂梁上制作的称重装置



图 2-7 应变式荷重传感器的实物图

二、应变式传感器

电阻应变式传感器是利用电阻应变片将应变转换为电阻变化的传感器，传感器由在弹性元件（如悬臂梁）上粘贴敏感元件（如电阻应变片）构成，如图 2-8 所示为贴有应变片的悬臂梁测力的结构简图。当被测物理量作用在弹性元件上时，弹性元件的变形引起应变敏感元件的阻值变化，经过转换电路将其转变成电量输出，电量变化的大小反映了被测物理量的大小。应变式电阻传感器是目前测量力、力矩、压力、加速度、重量等参数应用最广泛的传感器。

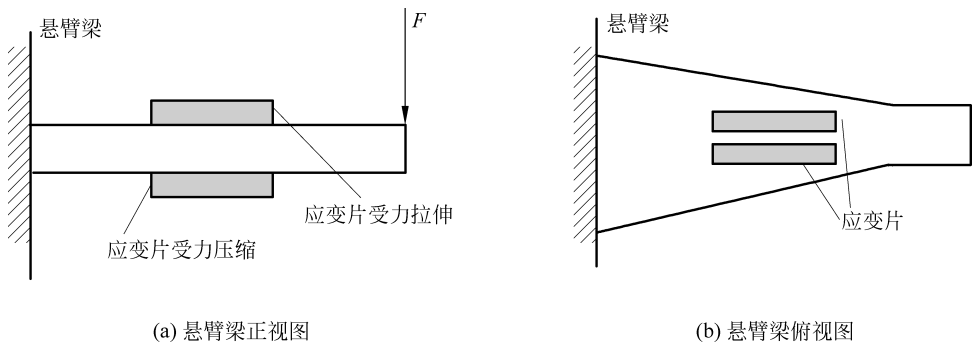


图 2-8 贴有应变片的悬臂梁测力 (F) 结构简图

(一) 工作原理

金属导体的电阻随着机械变形（伸长或缩短）的大小发生变化的现象称为金属的电阻应变效应。如图 2-9 所示，设一根长为 l ，截面积为 S ，电阻率为 ρ 的电阻丝，其电阻值

R 为

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

当电阻丝两端受到拉力 F 作用时，其长度 l 伸长了 dl ，截面积 S 减少了 dS ，电阻率 ρ 变化了 $d\rho$ ，（将上式取对数再取微分），这些量的变化必然引起电阻丝的电阻值变化 dR ，即电阻的相对变化为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (2-3)$$

其中， $S = \pi r^2$ （ r 导线半径）， $dS = 2\pi r dr$ ，

$$\frac{dS}{S} = 2 \frac{dr}{r} \quad (2-4)$$

$\frac{dl}{l}$ 为电阻丝的轴向应变， $\frac{dr}{r}$ 为电阻丝的径向应变。由材料力学可知，在弹性范围内，当金属丝受拉时，沿轴向伸长，同时沿径向缩短，二者之间的应变关系可简化为

$$\left(\text{径向变化}\right) \frac{dr}{r} = -\mu \frac{dl}{l} = -\mu \epsilon \quad (\mu > 0) \quad (2-5)$$

式中， μ ——泊松比，即径向应变 $\frac{dr}{r}$ 与轴向应变 $\frac{dl}{l}$ 的比值，负号表示应变方向相反；

ϵ —— $\frac{dl}{l}$ 电阻丝轴向的相对变化，也就是应变。

将式（2-4）式（2-5）代入式（2-3）得金属电阻丝的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \frac{dl}{l} = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon \quad (2-6)$$

令 $\frac{dR/R}{\epsilon} = K_m$ ，则

$$K_m = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} \quad (2-7)$$

式中， K_m ——金属电阻丝的相对灵敏度系数。其物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化。 K 越大，单位变形引起的电阻相对变化越大，故灵敏度越高。

由式（2-7）可以看出，金属电阻丝的相对灵敏系数受两个因素影响：

① 第一项 $(1 + 2\mu)$ ，它是由于电阻丝受拉伸后，材料的几何尺寸变化所引起的。

② 第二项 $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$ ，它是由于材料发生变形时，其电阻率发生变化引起的。

对于金属电阻丝来说，灵敏度系数表达式中 $(1 + 2\mu)$ 的值要比 $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$ 大得多，即 $K_{\text{金属}} \approx 1 + 2\mu$ ；而半导体材料的 $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$ 项的值比 $(1 + 2\mu)$ 大得多，即 $K_{\text{半导体}} \approx \frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$ 。

由式（2-6）可知，一般情况下，在应变极限内，金属材料电阻的相对变化与应变成正比，即 K_m 为常数，应变电阻效应的表达式为

$$\frac{\Delta R}{R} = K_m \cdot \epsilon \quad (2-8)$$

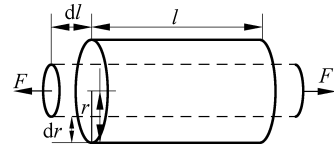


图 2-9 金属的电阻应变效应

用应变片测量应变或应力时，根据上述特点，在外力作用下，被测对象产生微小机械变形，应变片随着发生相同的变化，同时应变片电阻值也发生相应变化。当测得应变片电阻值变化量 ΔR 时，便可得到被测对象的应变值。根据应力与应变的关系，得到应力值 σ 为

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2-9)$$

式中， σ ——试件的应力；

ϵ ——试件的应变；

E ——试件材料的弹性模量。

由此可知，应力值 σ 正比于应变 ϵ ，而试件应变 ϵ 正比于电阻值的变化，所以应力 σ 正比于电阻值的变化，这就是利用应变片测量应变的基本原理。

(二) 电阻应变片的种类和结构

电阻应变片品种繁多，形式多样，但常用的应变片可分为两类：金属电阻应变片和半导体电阻应变片。

1. 金属电阻应变片

金属丝应变片是用金属丝作敏感栅制成的，其工作原理是基于金属材料的电阻应变效应。它由敏感栅、基片、覆盖层和引线等部分组成，如图 2-10 所示为电阻应变片的结构图。

敏感栅是应变片的核心部分，它粘贴在绝缘的基片上，其上再粘贴起保护作用的覆盖层，两端焊接引出导线。金属电阻应变片的敏感栅有丝式、箔式和薄膜式三种。

丝式应变片是将电阻丝绕制成敏感栅粘结在各种绝缘基底上而制成的。

箔式应变片是利用光刻、腐蚀等工艺制成的一种很薄的金属箔栅，其厚度一般为 $0.003 \sim 0.01\text{mm}$ 。其优点是散热条件好，允许通过的电流较大，可制成各种所需的形状，便于批量生产，如图 2-11 所示为箔式应变片的实物图。

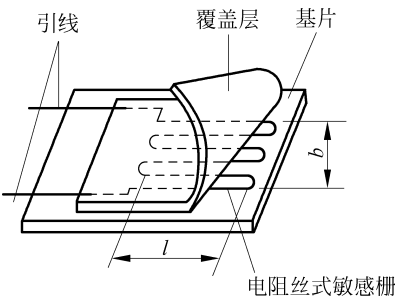


图 2-10 电阻应变片结构图

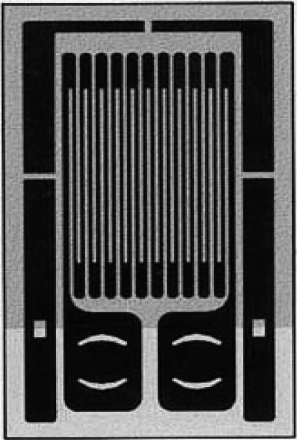


图 2-11 箔式应变片实物图

薄膜应变片是采用真空蒸发或真空沉淀等方法在薄的绝缘基片上形成 $0.1\mu\text{m}$ 以下的金属电阻薄膜的敏感栅，最后再加上保护层。它的优点是应变灵敏度系数大，允许电流密度大，工作范围广。

2. 半导体电阻应变片

半导体应变片是用半导体材料制成的，其工作原理是基于半导体材料的压阻效应。所谓压阻效应，是指半导体材料在某一轴向受外力作用时，其电阻率 ρ 发生变化的现象。

半导体应变片受轴向力作用时，其电阻相对变化为

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-10)$$

式中， $\frac{d\rho}{\rho}$ 为半导体应变片的电阻率相对变化量，其值与半导体敏感元件在轴向所受的应变力关系为

$$\frac{d\rho}{\rho} = \sigma\pi = E \cdot \epsilon \cdot \pi \quad (2-11)$$

式中， π ——半导体材料的压阻系数。

半导体材料的电阻相对变化，可将式 (2-11) 代入式 (2-10) 得

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{dR}{R} = (1 + 2\mu + \pi E) \cdot \epsilon = K_s \epsilon \quad (2-12)$$

式中， K_s 为半导体材料的应变灵敏度系数。

实验证明， πE 比 $(1 + 2\mu)$ 大上百倍，所以 $(1 + 2\mu)$ 可以忽略，因而半导体应变片的灵敏系数为

$$K_s = \frac{\Delta R}{R} \approx \pi E \quad (2-13)$$

半导体应变片突出优点是灵敏度高，比金属丝式高 50~80 倍，尺寸、横向效应和机械滞后都很小，动态响应好。但它有温度系数大、应变时非线性比较严重等缺点。

(三) 横向效应

将金属丝绕成敏感栅构成应变片后，在轴向单向应力作用下，由于敏感栅“横栅段”（圆弧或直线）上的应变状态不同于敏感栅“直线段”上的应变，使应变片敏感栅的电阻变化较相同长度直线金属丝在单向应力作用下的电阻变化小，因此，其灵敏系数 K_0 较电阻丝的灵敏系数 K 有所降低，这种现象称为应变片的横向效应。

此时，电阻应变片的灵敏度系数定义为

$$K_0 = \frac{\Delta R}{R} \epsilon_x \quad (2-14)$$

式中， ϵ_x ——轴向应变或纵向应变。

实验证明，电阻丝的应变灵敏度系数不等于电阻丝应变片的应变灵敏度系数，即 $K \neq K_0$ 。

由图 2-12 可见，敏感栅通常由多条轴向纵栅和圆弧横栅组成，当试件承受单向应力（沿作用力 P 的方向）时，其表面处于轴向拉伸 ϵ_x 和横向收缩 ϵ_y ，弯角部分的电阻变化由两部分组成：一部分是纵向应变 ϵ_x 造成的电阻增加；另一部分是横向应变 ϵ_y 造成电阻减小。经推导可得此时的电阻应变片的灵敏度系数：

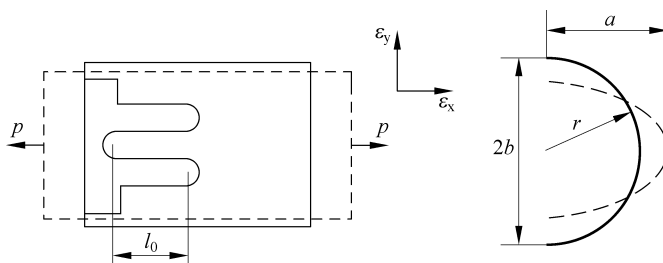


图 2-12 放大的栅状电阻应变片及弯角部分

$$K_0 = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon_x} = K \cdot \frac{\left[n + (n-1) \cdot \frac{\pi r}{2l_0} (1-\mu) \right]}{n + (n-1) \frac{\pi r}{l_0}} \quad (2-15)$$

式中, n ——直线部分栅丝的数目;

$n-1$ ——弯角部分的个数。

可见 $K_0 < K$, 也就是说, 应变片存在横向效应使应变片的灵敏系数小于电阻丝的应变灵敏度系数。

横向效应在圆弧段产生, 消除圆弧段即可消除横向效应。为了减小横向效应产生的测量误差, 现在一般多采用箔式应变片, 其圆弧部分尺寸较栅丝尺寸大得多, 电阻值较小, 因而电阻变化量也就小得多。

(四) 电阻应变片温度误差及补偿

由于测量现场环境温度的改变而给测量带来的附加误差, 称为应变片的温度误差。

理想情况下, $\frac{\Delta R}{R} = f(\epsilon)$, 即应变片的输出电阻是应变的一元函数; 但实际上应变片输出电阻还和温度有关, 即 $\frac{\Delta R}{R} = g(\epsilon, t)$ 。

1. 温度变化引起电阻变化的原因

主要有以下两点:

① 敏感栅电阻本身阻值就是温度的函数,

$$R_{t_1} = R_{t_0} \cdot (1 + \alpha_0 \Delta t) \quad (2-16)$$

式中, α_0 ——应变片电阻温度系数;

R_{t_1} 、 R_{t_0} ——分别为 t_1 与 t_0 温度下的电阻值;

$\Delta t = t_1 - t_0$ ——温差。

因此当温度变化 Δt 时, 电阻丝电阻的变化值为

$$\Delta R_{t\beta} = R_{t_1} - R_{t_0} = \Delta t \cdot \alpha_0 \cdot R_{t_0} \quad (2-17)$$

② 试件材料与应变片材料热膨胀系数不同。

将应变片贴在试件上时, 随着温度的变化, 试件会伸长或缩短, 应变片也会伸长或缩短, 但由于两种材料热膨胀系数不同, 其伸长或缩短的大小也不同, 所以会产生附加变形而引起电阻的变化。其电阻增量表达式为

$$\Delta R_{t\beta} = R_{t_0} k_0 (\beta_g - \beta_s) \cdot \Delta t \quad (2-18)$$

式中, ΔR_{it} ——由热膨胀系数不同产生的电阻增量;

β_g, β_s ——分别为试件、电阻丝的(长度)热膨胀系数。

2. 温度补偿

如果对温度变化引起的电阻相对变化不加补偿, 则应变片几乎不能应用。补偿温度误差的办法有多种, 其中最常用的补偿方法是电路补偿法, 在这里重点讨论差动电桥线路补偿法, 如图 2-13 所示。

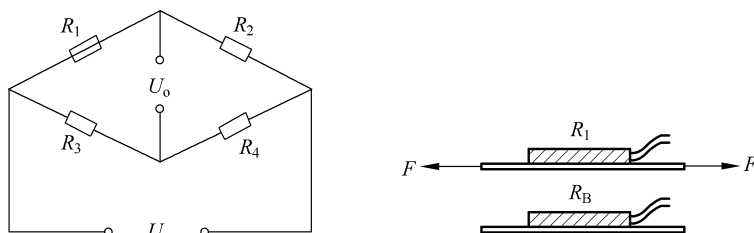


图 2-13 差动电桥补偿法

(1) 补偿原理

电桥相邻两臂增加相同电阻, 对电桥输出无影响。电桥输出电压 U_o 与桥臂参数的关系为

$$U_o = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_B} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) U = \frac{R_1 R_4 - R_B R_3}{(R_1 + R_B)(R_3 + R_4)} U \quad (2-19)$$

$$U_o = A(R_1 R_4 - R_B R_3) \quad (2-20)$$

式中, A ——由桥臂电阻和电源电压决定的常数;

R_1 ——工作应变片的电阻;

R_B ——补偿应变片的电阻。

当 R_3 和 R_4 为常数时, 使 R_1 和 R_B 对输出电压的作用方向相反, 具体做法是 R_1 作为工作片, R_B 作为补偿片(只受温度影响), 这样可实现温补偿。

(2) 温度补偿条件

① $R_3 = R_4$ 。

② R_1 和 R_B 为特性一致的应变片, 且 R_1 和 R_B 对输出电压的作用方向相反。 R_1 作为工作片, R_B 作为补偿片(只受温度影响), 它们处于同一温度场, 且仅工作应变片 R_1 承受应变。

(3) 补偿过程

当温度升高或降低 $\Delta t = t - t_0$ 时, 工作应变片由 R_1 变为 $R_1 + \Delta R_{1t}$, 补偿应变片由 R_B 变为 $R_B + \Delta R_{Bt}$, 且 $\Delta R_{1t} = \Delta R_{Bt}$ 。

此时电桥输出电压为

$$U_o = A[(R_1 + \Delta R_{1t})R_4 - (R_B + \Delta R_{Bt})R_3] = 0 \quad (2-21)$$

若此时被测试件有应变 ϵ 的作用, 则工作应变片电阻 R_1 又有新的增量:

$$\Delta R_1 = R_1 K \epsilon \quad (2-22)$$

式中, k ——应变灵敏度系数。

而补偿片因不承受应变, 故不产生新的增量, 将式(2-21)、式(2-22)代入式(2-20), 此时电桥输出电压为

$$\begin{aligned}
 U_o &= A[(R_1 + \Delta R_{1t} + \Delta R_1)R_4 - (R_B + \Delta R_{Bt})R_3] \\
 &= A\Delta R_1 R_4 \\
 &= AR_1 R_4 K\epsilon
 \end{aligned} \tag{2-23}$$

即 U_o 与 ϵ 成单值函数关系。

(4) 补偿片的三种贴法

① 贴于专用的补偿块上，如图 2-14 所示。

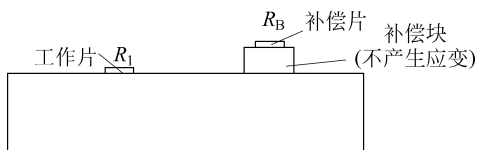


图 2-14 补偿片贴于专用的补偿块上

② 分别贴于试件的两面，如图 2-15 所示。

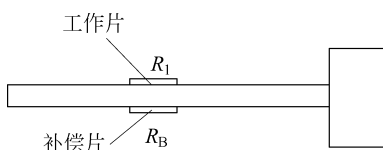


图 2-15 补偿块分别贴于试件的两面

上面受拉（压），下面受压（拉），应变绝对值相等，符号相反，但温度引起的变化是相等的（符号相同），二者相减后，温度引起的变化相抵消，而灵敏度增大一倍。

③ 工作片与受力方向一致，温度补偿片与之垂直，如图 2-16 所示。

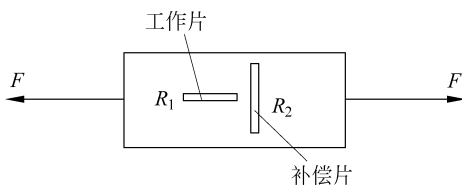


图 2-16 温度补偿片与工作片垂直

(五) 应变片的主要参数

为了更好地使用应变片，还须知道应变片的主要参数。

(1) 几何尺寸

应变片的几何参数有敏感栅基长、基宽、应变片的基底长和基底宽。

综合粘贴方式、定向方便及散热等方面选择应变片的尺寸。

(2) 应变片的初始电阻 R

应变片的初始电阻 R 指应变片在未粘贴以前，在室温下测得的电阻。它是使用中必须知道的参数，绝大多数应变片的阻值为 60、120、200、350、600 或 1000 Ω ，其中最常用的是 120 Ω 应变片。

(3) 绝缘电阻

绝缘电阻指敏感栅与基底间的电阻值，若阻值过低，会造成应变片与试件之间的漏电

而产生误差。

(4) 允许工作电流

允许工作电流也就是最大工作电流，是指允许通过应变片而不影响其工作特性的最大电流值。电流大则输出大，但因本身发热则产生温度误差和漂移。

(六) 电阻应变片的测量电路

由于机械应变一般都很小，要把微小应变引起的微小电阻变化测量出来，同时要把电阻相对变化 $\Delta R/R$ 转换为电压或电流的变化。因此，需要有专用测量电路用于测量应变变化而引起电阻变化，通常采用直流电桥和交流电桥。

(1) 直流电桥

① 直流电桥平衡条件。

直流电桥电路如图 2-17 (a) 所示，不接负载电阻 R_L 时的开路电压为

$$U_o = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) U = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (2-24)$$

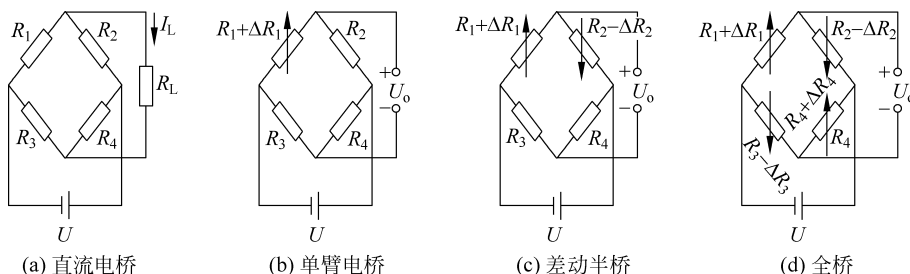


图 2-17 直流电桥

由戴维宁定理可知，任何复杂的含源二端网络都可以化成一个等效的实际电压源，其电动势为该网络开路电压，其内阻为该网络的输出电阻。可将电桥看成一个实际电压源，其内阻为 $R_1 // R_2 + R_3 // R_4$ ，其电动势为 U_o 。

接入负载 R_L 后，流过负载电阻的电流为

$$\begin{aligned} I_L &= \frac{U_o}{R_1 // R_2 + R_3 // R_4 + R_L} \\ &= \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{R_L (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} U \end{aligned} \quad (2-25)$$

所有电桥在使用前都需要进行平衡调整，使得 $I_L = 0$ 。这样得到电桥平衡条件为

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \text{ (或 } R_1/R_2 = R_3/R_4 \text{)} \quad (2-26)$$

即相对两臂电阻的乘积相等（或相邻两臂电阻的比值相等）。

② 直流电桥的电压灵敏度。

电阻应变片工作时的电阻变化很小，相应的电桥输出电压也很小，必须要对电压进一步放大，故需了解 $\Delta R/R$ 与输出电压之间的关系。假设桥臂中 R_1 为应变片，其应变产生的电阻变化为 ΔR_1 ， R_2 、 R_3 、 R_4 为固定电阻。

直流电桥的输出通常很小，不能用来直接驱动指示仪表，其电桥输出端接放大器的输入端，而一般放大器的输入阻抗比电桥内阻高得多，故可认为电桥输出端为开路， R_L 为

无穷大，基本无电流流过 ($I_0 \rightarrow 0$)，只有电压输出，这样的直流电桥叫电压输出桥，如图 2-17 (b) 所示。

此时电桥的输出电压为

$$\begin{aligned} U_o &= \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} U - \frac{R_3}{R_3 + R_4} U \\ &= \frac{R_1 R_4 + R_1 R_3 + \Delta R_1 R_4 + \Delta R_1 R_3 - R_2 R_3 - R_1 R_3 - \Delta R_1 R_3}{(R_2 + R_1 + \Delta R_1)(R_4 + R_3)} \cdot U \end{aligned} \quad (2-27)$$

把平衡条件 $R_1 R_4 = R_2 R_3$ 代入上式，得到

$$U_o = \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot U \quad (2-28)$$

分子分母同除以 $R_3 \cdot R_1$ 得到

$$U_o = \frac{\frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right)} \cdot U \quad (2-29)$$

令桥臂比为 $n = R_2/R_1 = R_4/R_3$ ，略去分母中的 $\Delta R_1/R_1$ ，将上式简写成

$$U_o \approx \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot U \quad (2-30)$$

定义 电桥电压灵敏度为

$$k_u = \frac{U_o}{\Delta R_1/R_1} = \frac{n}{(1+n)^2} \cdot U \quad (2-31)$$

实际电桥中，常使得 $R_2 = R_1$ ， $R_4 = R_3$ ，那么 $n=1$ ，则得到

$$U_o = \frac{U}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-32)$$

$$k_u = \frac{U}{4} \quad (2-33)$$

③ 电桥的非线性误差。

虽然是线性的，但是前面略去分母中的 $\Delta R_1/R_1$ ，故存在非线性误差。实际输出电压由式 (2-29) 得

$$U'_o = \frac{n \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + n + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)(1+n)} \cdot U \quad (2-34)$$

把 $n=1$ 代入上式得到

$$U'_o = \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1}}{2 \left(2 + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right)} \cdot U \quad (2-35)$$

非线性误差为

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{U'_o - U_o}{U_o} = \frac{U'_o}{U_o} - 1 = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1}} - 1 \\ &\approx \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1}\right) - 1 = -\frac{1}{2} \frac{\Delta R_1}{R_1} \end{aligned} \quad (2-36)$$

可见非线性误差 δ 与 $\Delta R_1/R_1$ 成正比，有时能达到可观测的程度。

为了减小和克服非线性误差，可采用差动电桥，如图 2-17 (c) 所示。在试件上安装两个工作应变片：一片受拉伸，一片受压缩。两个应变片分别接入电桥相邻的两臂，跨在电源的两端。此时电桥输出电压为

$$U_o = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) U \quad (2-37)$$

设初始时 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ， $\Delta R_1 = \Delta R_2$ ，则

$$U_o = \frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-38)$$

可见这时的输出电压 U_o 与 $\Delta R_1/R_1$ 成线性关系，没有线性误差，而且灵敏度比单臂时提高了一倍，还具有温度补偿作用。

为了提高电桥的灵敏度，或为了进行温度补偿，在桥臂中往往安置多个应变片，电桥也可采用四等臂电桥，如图 2-17 (d) 所示。即两个受拉应变，两个受压应变，将两个应变符号相同的接入相对桥臂上，构成全桥差动电路，若 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$ ，且 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ，则

$$U_o = U \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (2-39)$$

$$k_u = U \quad (2-40)$$

(2) 交流电桥

直流电桥的优点是高稳直流电源容易获得，电桥平衡调节简单，导线分布参数影响小。但是使用直流电桥还需要后续电路，如放大电路等，这就容易产生零点漂移，且线路变得较为复杂。因此，应变电桥多采用交流电桥。

① 交流电桥的平衡条件。

交流电桥如图 2-18 (a) 所示， Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 为复阻抗， $\dot{U}$ 为交流电压源，空载输出电压为

$$\dot{U}_o = \frac{Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_4)} \dot{U} \quad (2-41)$$

要满足电桥平衡条件，即 $\dot{U}_o = 0$ ，则应有

$$Z_1 Z_4 - Z_2 Z_3 = 0 \text{ 或 } Z_1/Z_2 = Z_3/Z_4 \quad (2-42)$$

若用复指数形式表示复阻抗 $Z = |Z| e^{j\varphi}$ ，代入上式，可将上述平衡条件写成

$$\begin{cases} |Z_1| |Z_4| = |Z_2| |Z_3| \\ \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \end{cases} \quad (2-43)$$

这说明交流电桥平衡需要满足两个条件：相对两桥臂复阻抗的模之积相等，辐角之和相等。

② 交流应变电桥的输出特性及平衡调节。

电桥在使用前都应进行平衡调整，即使 $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$ 。当工作臂为 $Z_1 + \Delta Z_1$ ，式 (2-41) 分子、分母除以 $Z_1 Z_3$ 化简后可得

$$\dot{U}_o = \frac{\frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1}}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} + \frac{\Delta Z_1}{Z_1}\right) \left(1 + \frac{Z_4}{Z_3}\right)} \cdot \dot{U} \quad (2-44)$$

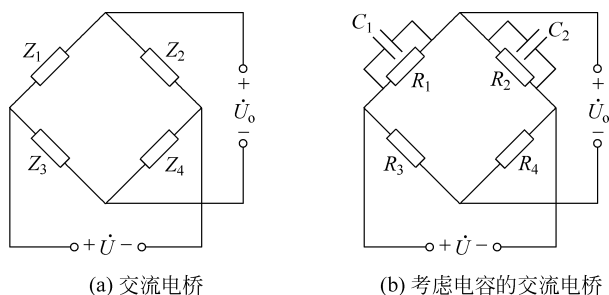


图 2-18 交流电桥

略去分母中的 $\Delta Z_1/Z_1$ ，并设满足条件 $Z_1=Z_2$ ， $Z_3=Z_4$ ，则

$$\dot{U}_o = \frac{\dot{U}}{4} \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \quad (2-45)$$

若一交流电桥如图 2-18 (b) 所示，其中 C_1 和 C_2 为应变片导线或电缆的分布电容。各臂复阻抗分别为 $Z_3=R_3$ ， $Z_4=R_4$ ， $Z_1=R_1/(1+j\omega R_1 C_1)$ ， $Z_2=R_2/(1+j\omega R_2 C_2)$ ，按平衡条件得到

$$\frac{R_3}{R_1} + j\omega R_3 C_1 = \frac{R_4}{R_2} + j\omega R_4 C_2 \quad (2-46)$$

实部和虚部分别相等，平衡条件也可表示为如下形式：

$$R_2/R_1 = R_4/R_3 \quad \text{或} \quad R_2 R_3 = R_4 R_1 \quad (2-47)$$

$$R_2/R_1 = C_1/C_2 \quad \text{或} \quad R_1 C_1 = R_2 C_2 \quad (2-48)$$

可见，对这种交流电容电桥，除了要满足电阻平衡条件外，还要满足电容平衡条件。因此在桥路上除了设电阻平衡调节器外，还有电容平衡调节器。常见的调平衡电路如图 2-19 所示。

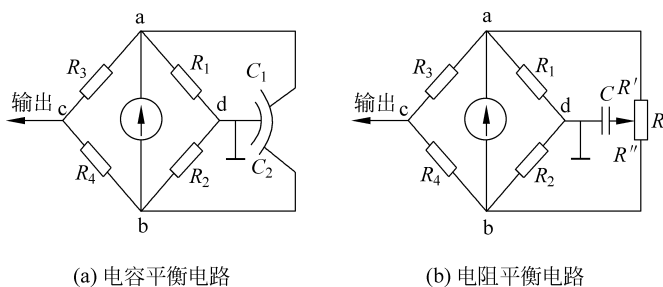


图 2-19 常见交流电桥的电容调平衡电路

三、压电式传感器

压电式传感器的工作原理是基于某些介质材料的压电效应，是典型的有源传感器。当某些材料受力作用而变形时，其表面会有电荷产生，从而实现非电量测量。压电式传感器具有体积小、重量轻、工作频带宽、灵敏度高、工作可靠、测量范围广等特点，因此在各种动态力、机械冲击与振动的测量，以及声学、医学、力学、宇航等方面都得到了非常广

泛的应用。

(一) 压电效应的基本概念

1. 正压电效应

某些物质沿某一方向受到外力作用时，会产生变形，同时其内部产生极化现象，此时在这种材料的两个表面产生符号相反的电荷，当外力去掉后，它又重新恢复到不带电的状态，这种现象被称为压电效应。当作用力方向改变时，电荷极性也随之改变。这种机械能转化为电能的现象称为“正压电效应”或“顺压电效应”，如图 2-20 所示。

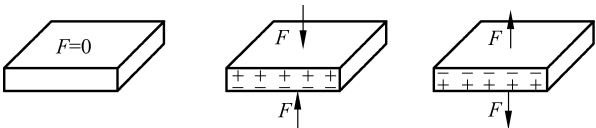


图 2-20 正（顺）压电效应示意图

2. 逆压电效应

当在某些物质的极化方向上施加电场，这些材料在某一方向上产生机械变形或机械压力；当外加电场撤去时，这些变形或应力也随之消失。这种电能转化为机械能的现象称为“逆压电效应”或“电致伸缩效应”。

3. 压电效应的特点

- ① 压电效应具有可逆性，如图 2-21 所示。
- ② 具有瞬时性。当力的方向改变时，电荷的极性随之改变，输出电压的频率与动态力的频率相同。
- ③ 具有不稳定性。当动态力变为静态力时，电荷将由于表面漏电而很快泄漏、消失。

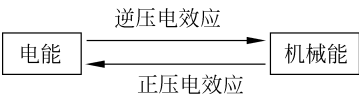


图 2-21 压电效应的可逆性

(二) 不同材料的压电效应

常见的压电材料可分为两类：压电单晶体和多晶体压电陶瓷。

压电单晶体主要包括石英（包括天然石英和人造石英，如图 2-22 所示）、水溶性压电晶体（包括酒石酸钾钠、酒石酸乙烯二铵、酒石酸二钾、硫酸锆等）。由于人工培养的石英晶体的物理和化学性质几乎与天然石英晶体没有区别，因此目前广泛应用成本较低的人造石英晶体。

多晶体压电陶瓷主要包括钛酸钡压电陶瓷、锆钛酸铅系压电陶瓷、铌酸盐系压电陶瓷和铌镁酸铅压电陶瓷等。

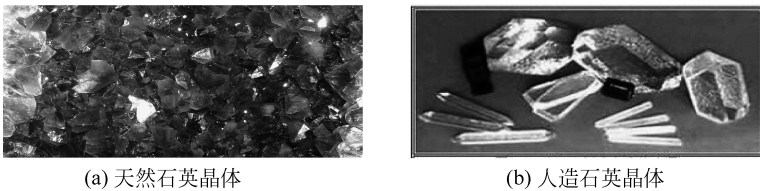


图 2-22 石英晶体实物图

1. 石英晶体压电效应

天然石英 (SiO_2) 晶体如图 2-23 (a) 所示, 它是一个正六面体, 在晶体学中, 用三根互相垂直的轴建立描述晶体结构形状的坐标系, 如图 2-23 (b) 所示。石英晶体中间棱柱断面的下半部分, 其断面为正六面形。 z 轴是晶体的对称轴, 称它为光轴, 沿 z 轴方向受力时不产生压电效应; x 轴称为电轴, 垂直于 x 轴晶面上的压电效应最显著; y 轴称为机械轴, 在电场的作用下, 沿此轴方向的机械变形最显著。如果从石英晶体上切割出一个平行六面体, 如图 2-23 (c) 所示, 称为压电晶片, 在垂直于光轴的力 (F_y 或 F_x) 作用下, 晶体会发生极化现象, 并且其极化矢量是沿着电轴 (x 轴), 即电荷出现在垂直于电轴 (x 轴) 的平面上。

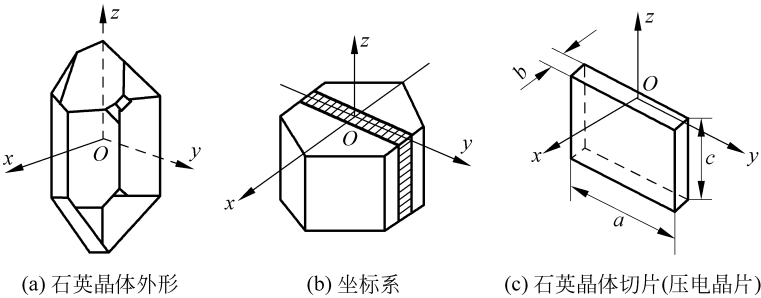


图 2-23 石英晶体

在沿着电轴 x 方向力的作用下, 产生电荷的现象称为纵向压电效应; 而把沿机械轴 y 方向力的作用下, 产生电荷的现象称为横向压电效应。在压电晶片上, 产生电荷的极性与受力的方向有关系, 图 2-24 给出了电荷极性与受力方向的关系。若沿晶片的 x 轴施加压力 F_x , 则在加压的两表面上分别出现正负电荷, 如图 2-24 (a) 所示。若沿晶片的 y 轴施加压力 F_y 时, 则在加压的表面上不出现电荷, 电荷仍出现在垂直 x 轴的表面上, 只是电荷的极性相反, 如图 2-24 (c) 所示。若将 x 、 y 轴方向施加的压力改为拉力, 则产生电荷的位置不变, 只是电荷的极性相反, 如图 2-24 (b) 和图 2-24 (d) 所示。值得注意的是纵向 (x 方向) 压电效应与元件尺寸无关, 而横向 (y 方向) 压电效应与元件尺寸有关。

2. 压电陶瓷

与石英晶体不同, 压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料。材料内部具有类似铁磁材料磁畴结构的电畴结构, 电畴是分子自发形成的区域, 它有一定的极化方向, 从而存在电

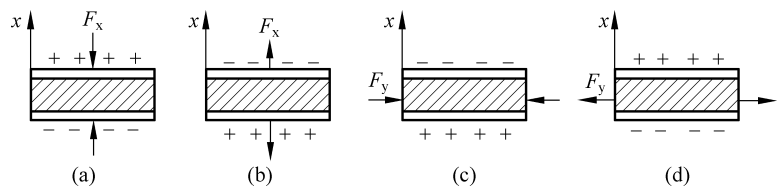


图 2-24 晶片受力方向与电荷极性的关系

场。在无外电场作用时，电畴在晶体中杂乱分布，它们的极化效应被相互抵消，压电陶瓷内极化强度为零。因此原始的压电陶瓷呈中性，不具有压电性质。

在压电陶瓷上施加外电场时，电畴的极化方向发生转动，趋向于按外电场方向的排列，从而使材料得到极化。外电场强度大到使材料的极化达到饱和的程度，即所有电畴极化方向都整齐地与外电场方向一致时，当外电场去掉后，电畴的极化方向基本不变化，即剩余极化强度很大，这时材料才具有压电特性，如图 2-25 所示。

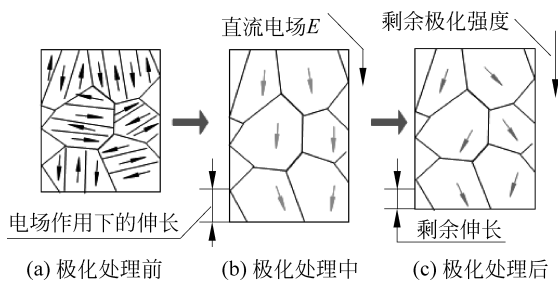


图 2-25 压电陶瓷极化过程图

(三) 压电式传感器的等效电路

1. 压电式传感器的测量特性

压电式传感器基本原理为压电材料的压电效应，即当有力作用在压电材料上时，传感器就有电荷或电压输出。压电式传感器不能用于静态测量，外力作用在压电材料上产生的电荷只有在无泄漏的情况下才能保存，需要测量回路具有无限大的输入阻抗，这实际上是不可能的。压电式传感器适用于动态测量，压电材料在交变力的作用下，电荷可以不断补充，以供给测量回路一定的电流。

压电式传感器在有些测量中需要预载。压电式传感器在测量低压力时线性度不好，这主要是传感器受力系统中力传递系数为非线性所致，即低压力下力的传递损失较大。为此，在力传递系统中加入预加力，称预载。预载除了消除低压力使用中的非线性外，还可以消除传感器内外接触表面的间隙，提高刚度。拉力和拉压交变力及剪力和扭矩，只有在加预载后才能用压电式传感器测量。

2. 压电元件的连接方式

单片压电元件产生的电荷量甚微，为了提高压电传感器的输出灵敏度，在实际应用中