

# 项目一

## 力与压力检测



### 项目导读

在测量上所称的压力就是物理学中的压强。它是反映物质状态的一个参数,是在工业自动化生产过程中重要的工艺参数之一。作为重要的工艺参数之一,如何正确地对其进行测量和控制对保证生产工艺过程的安全性和经济性具有重要意义。压力传感器是将压力转换成电量,然后进行测量的传感器,是工业自动化生产中最为常用的一种传感器,广泛应用于水利水电、铁路交通、智能建筑、生产自控、航空航天、军工、石化、油井、电力、船舶、机床、管道等诸多行业。本项目将结合相应实例对压力传感器及其系统设计作详细介绍。

## 任务一 超市电子秤的设计



### 任务引入

超市里的电子秤能很精确地称出商品的重量,并自动显示出商品的重量、价格等,非常的智能化。那么,它是如何实现这些功能的呢?



### 任务分析

电子秤要实现对物体称重,需要有合适的力传感器将重量转换为相应的电量信号,信号由控制器进行分析、处理和显示。本任务将对此过程及相关知识进行讲解。



## 知识准备



### 一、传感器与检测技术的基础知识

#### (一) 传感器的概念

电信号(电量)一般是指物理学中的电学量,如电压、电流、电阻、电容、电感等;非电信号(非电量)则是指物理学中除电量之外的一些参数,如压力、流量、尺寸、位移量、重量、力、速度、加速度、转速、温度、浓度、酸碱度等。在诸多实际测量中,大多数是对非电量的测量。

传感器是将非电信号转换为电信号的装置,一般由敏感元件、传感元件和测量电路组成。传感器的组成方框图如图 1-1 所示。

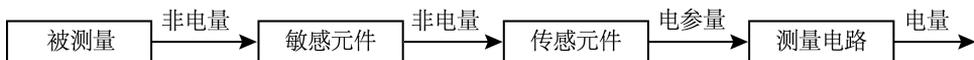


图 1-1 传感器的组成方框图

敏感元件直接与被测量接触,将其转换成与之有确定关系、更易于转换的非电量(如压力转换成位移、流量转换成速度),传感元件再将这一非电量转换成电参量(如电阻、电容、电感)。

由于传感元件输出的信号幅度很小,而且混杂有干扰信号和噪声,所以需要有测量电路。测量电路能够起到滤波、线性化及放大作用,并能将电参量转换成易于测量、处理的电信号,如电压、电流、频率等。

#### (二) 传感器的特性

传感器的特性是指传感器所有性质的总称,而传感器的输入-输出特性是其基本特性。把传感器作为二端网络研究时,输入-输出特性是指二端网络的外部特性,即输入量和输出量的对应关系。

传感器输入量的状态可分为静态量和动态量两类。静态量是指不随时间变化的信号或变化极其缓慢的信号(准静态);动态量通常是指周期信号、瞬变信号或随机信号。根据输入量的状态(静态或动态)的不同,传感器所表现的输入-输出特性也不一样,通常分为静态特性和动态特性。传感器的输入-输出特性决定了传感器能否将被测的非电信号的变化不失真地变换成相应的电信号,其是与传感器的内部结构参数有关的外部特性。

传感器的静态特性是指被测量的值处于稳定状态时,传感器的输入与输出之间的关系。传感器的动态特性是指传感器的输出对随时间变化的输入量的响应特性,反映输出值真实再现变化着的输入量的能力。

衡量传感器输入-输出特性的主要指标包括线性度、灵敏系数、迟滞、重复性、分辨力与阈值、稳定性和漂移。

##### 1. 线性度

传感器的线性度是指传感器的输出与输入之间的线性程度。理想的输出-输入特性应该是线性的,但实际上传感器的特性大多是非线性的。在不考虑迟滞、蠕变等因

素的情况下,传感器的输出-输入特性可用下列多项式表示:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1-1)$$

式中  $y$ ——输出量;

$x$ ——输入量(被测量);

$a_0$ ——零位输出;

$a_1$ ——传感器的灵敏度;

$a_2, a_3, \dots, a_n$ ——非线性项的待定常数。

各项系数的不同,决定了特性曲线的具体形状各不相同。理想特性方程为  $y = a_1x$ , 是一条经过原点的直线,  $a_1$  为一常数。当特性方程中仅含有奇次非线性项, 即  $y = a_1x + a_3x^3 + a_5x^5 + \dots$  时, 特性曲线关于坐标原点对称, 且在输入量  $x$  相当大的范围内具有较宽的准线性。当非线性传感器以差动工作时, 可以消除电气元件中的偶次分量, 显著地改善线性范围, 并使灵敏度提高一倍。

传感器线性度的特性曲线可通过实际测试获得。在实际应用中, 为了得到线性关系, 往往引入各种非线性补偿环节。

## 2. 灵敏系数

灵敏系数是指传感器在稳定状态下的输出变化量  $\Delta y$  与引起此变化的输入变化量  $\Delta x$  的比值, 用  $k$  表示, 即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-2)$$

它表征传感器对输入量变化的反应能力。对于线性传感器, 灵敏系数就是其线性度特性曲线的斜率, 即  $k = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ , 为常数。而非线性传感器的灵敏系数为一变量, 用  $k = \frac{dy}{dx}$  表示。传感器的灵敏系数如图 1-2 所示。

一般希望传感器的灵敏系数高, 且在满量程范围内是恒定的, 即传感器的输出-输入特性为直线。

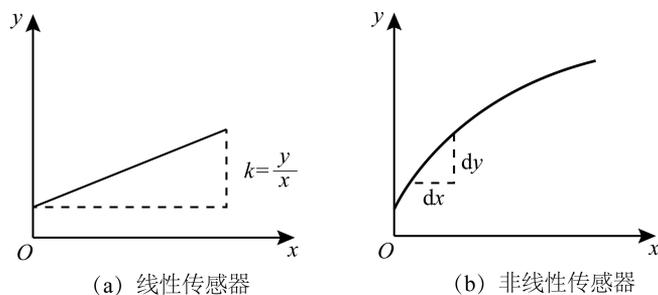


图 1-2 传感器的灵敏系数

## 3. 迟滞

传感器在正(输入量增大)、反(输入量减小)行程中, 其输出-输入特性曲线不重合的现象称为迟滞, 如图 1-3 所示, 也就是说, 对于同一大小的输入信号, 传感器的正、反行程输出信号大小不相等。产生这种现象的主要原因是传感器敏感元件材料的物理

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

性质和机械零部件的缺陷,例如弹性敏感元件的弹性滞后、运动部件的摩擦、传动机构的间隙、紧固件松动等。

迟滞  $\gamma_H$  的大小一般通过实验的方法确定,用正、反行程间的最大输出差值  $\Delta H_{\max}$  或其一半对满量程输出值  $Y_{FS}$  的百分比表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-3)$$

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{2Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-4)$$

#### 4. 重复性

重复性指在同一工作条件下,传感器输入量按同一方向进行全量程连续多次变化时,所得特性曲线不一致的程度。传感器特性曲线越一致,重复性就越好,误差也越小。

如图 1-4 所示为实际输出的校正曲线的重复特性。正行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 1}$ ,反行程的最大重复性偏差为  $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性误差  $\gamma_R$  用这两个最大偏差中较大者  $\Delta R_{\max}$  与满量程输出值的百分比表示,即

$$\gamma_R = \pm \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-5)$$

重复性误差也可用绝对误差表示。

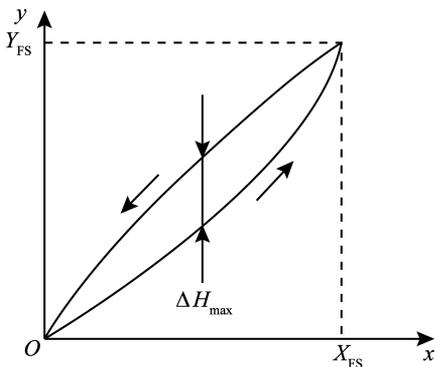


图 1-3 传感器的迟滞

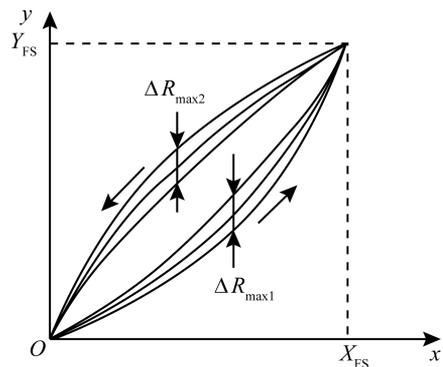


图 1-4 实际输出的校正曲线的重复特性

#### 5. 分辨力与阈值

分辨力是指传感器在规定测量范围内所能检测出的被测输入量的最小变化值。有时对该值用相对满量程输入值的百分数表示,称为分辨力。

阈值是能使传感器的输出端产生可测变化量的最小被测输入量值,即零点附近的分辨能力。有的传感器在零位附近的非线性严重,形成所谓“死区”,则将死区的大小作为阈值。更多情况下阈值主要取决于传感器噪声的大小,因而有的传感器只给出噪声电平。

传感器能检测出的被测量的最小变化值一般相当于噪声电平的若干倍,用公式表示为

$$M = \frac{cN}{k} \quad (1-6)$$

式中  $M$ ——被测量的最小变化值；  
 $c$ ——系数，一般取 1~5；  
 $N$ ——噪声电平；  
 $k$ ——传感器的灵敏度。

## 6. 稳定性

稳定性又称为长期稳定性，是指传感器在相当长时间内保持其原有性能的能力。稳定性一般用在室温条件下经过一规定时间间隔后，传感器的输出与起始标定时输出之间的差异来表示，有时也用标定的有效期来表示。

## 7. 漂移

漂移是指在一定时间间隔内，传感器的输出存在着与被测输入量无关的、不需要的变化。漂移常包括零点漂移和灵敏度漂移两种。

零点漂移和灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移，又称时漂（或零漂）和温漂。时漂是指在规定的条件下，零点或灵敏度随时间的缓慢变化；温漂是指由周围温度变化所引起的零点或灵敏度的变化。

传感器无输入时，每隔一段时间进行读数，若其输出偏离零值，即为零点漂移。传感器的零漂可表示为

$$\text{零漂} = \frac{\Delta y}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中  $\Delta y$ ——最大零点偏差；  
 $Y_{FS}$ ——满量程输出。

## (三) 传感器的选用原则

传感器的选用主要考虑灵敏度、响应特性、线性范围、稳定性、精确度、测量方式六个方面的问题。

### 1. 灵敏度

一般说来，传感器灵敏度越高越好，因为灵敏度越高，就意味着传感器所能感知的变化量越小，即只要被测量有一微小变化，传感器就有较大的输出。但是，在确定灵敏度时，要考虑以下几个问题。

其一，当传感器的灵敏度很高时，那些与被测量无关的外界噪声也会同时被检测到，并通过传感器输出，从而干扰被测量。因此，为了使传感器既能检测到有用的微小信号，又能使噪声干扰小，要求传感器的信噪比越大越好，也就是说，要求传感器本身的噪声小，而且不易从外界引进干扰噪声。

其二，与灵敏度紧密相关的是量程范围。当传感器的线性工作范围一定时，传感器的灵敏度越高，干扰噪声就越大，从而难以保证传感器的输入在线性区域内工作。因此，过高的灵敏度会影响其适用的测量范围。

其三，当被测量是一个向量并且是一个单向量时，就要求传感器单向灵敏度越高越好，而横向灵敏度越小越好；如果被测量是二维或三维的向量，那么还应要求传感器的交叉灵敏度越小越好。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

## 2. 响应特性

实际上,传感器的响应总不可避免地存在一定延迟,但人们总希望延迟的时间越短越好。一般物性型传感器,如利用光电效应、压电效应等传感器,响应时间短,工作频率范围宽;而结构型传感器,如电感、电容、磁电等传感器,由于受到结构特性的影响和机械系统惯性质量的限制,其固有频率低,工作频率范围窄。

## 3. 线性范围

任何传感器都有一定的线性工作范围。在线性范围内,传感器的输出与输入成比例关系。线性工作范围越宽,则表明传感器的工作量程越大。传感器工作在线性区域内,是保证测量精度的基本条件。

## 4. 稳定性

为了保证稳定性,在选择传感器时,一般应注意两个问题:

- ①根据环境条件选择传感器;
- ②要创造或保持良好的环境。

在要求传感器长期工作而不需经常更换或校准的情况下,应对传感器的稳定性有严格的要求。

## 5. 精确度

在选择传感器时,首先应了解测试目的,判断是定性分析还是定量分析。如果是相对比较性的试验研究,只需获得相对比较值即可,那么应要求传感器的重复精度高,而不要求测试的绝对量值准确。如果是定量分析,那么必须获得精确量值。但在一般情况下,要求传感器的精确度越高越好。

## 6. 测量方式

传感器在实际条件下的工作方式,也是选择传感器时应考虑的重要因素。例如接触与非接触测量、破坏与非破坏性测量、在线与非在线测量等,条件不同,对测量方式的要求也不同。

除了以上选用传感器时应充分考虑的一些因素外,还应尽可能兼顾结构简单、体积小、重量轻、价格便宜、易于维修、易于更换等要求。

### (四)检测技术基础

#### 1. 测量的分类

任何实验都离不开测量,没有测量就没有科学。在一定条件下,任何物理量都必然具有某一客观真实的数据。所谓测量,就是以获得某一物理量的值为目的的一系列有意识的科学实践活动。

按测量方法的不同,测量可分为直接测量和间接测量;按测量条件的不同,测量又分为等精度测量和不等精度测量。

##### (1)直接测量和间接测量。

直接测量是指把一个量与同类量直接进行比较以确定待测量的量值的测量。一般基本量的测量都属于此类,如用米尺测量物体的长度、用天平称铜块的质量、用秒表测量单摆的周期等。仪表上所标明的刻度或从显示装置上直接读取的值,都是直接测

量的量值。

在物理实验中,能够直接测量的量毕竟是少数,大多数情况下是由直接测量所得的数据,根据一定的公式,通过运算,得出所需要的结果,这种测量称为间接测量。例如,直接测出单摆的长度  $l$  和单摆的周期  $T$ ,应用公式  $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ ,以求重力加速度  $g$ 。

(2)等精度测量和不等精度测量。

对某一量  $N$  进行多次测量,得  $k$  个数值  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$ 。如果每次测量都是在相同的条件下进行的,则没有理由认为所得的  $k$  个值中,某一个值比另一个值要测得准确些。在这种情况下所进行的一系列测量称为等精度测量。相同条件的含义,是指同一个人,用同一台仪器,每次测量时周围条件都相同(如测量时环境、气温、照明情况等未变动),这种情况就可认为各测量值的精确程度是相同的。

对某一量  $N$  进行了  $k$  次测量,得到  $k$  个值  $N_1, N_2, N_3, \dots, N_k$ 。如果每次测量的条件不同,那么这些值的精确程度不能被认为是相同的。在这种情况下所进行的一系列测量叫作不等精度测量。例如,同一实验者用精度不同的 3 种天平称量某一物体的质量  $m$ ,得到 3 个值  $m_1, m_2, m_3$ ,或者用 3 种不同的方法测量某一物质的密度  $\rho$ ,得到 3 个值  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$ ,这都属于不等精度测量。

## 2. 误差及其分类

用实验方法去研究事物的客观规律,总是在一定的环境(温度、湿度等)和仪器条件下进行的,由于测量条件(环境、温度、湿度等)的变化以及仪器精度的不同,因而在任何测量中,测量结果  $N$  与待测量客观存在的真值  $N'$  之间总存在着一定的差异。测量值  $N$  与真值  $N'$  的差值叫作测量误差  $\Delta N$ ,简称误差,即

$$\Delta N = N - N' \quad (1-8)$$

任何测量都不可避免地存在误差,所以,一个完整的测量结果应该包括测量值和误差两个部分。真值是理想的概念,一般说来是不可能确切知道的。既然测量不能得到真值,那么怎样才能最大限度地减小测量误差,并估算出误差的范围呢?要回答这些问题,就要了解误差产生的原因及其性质。误差主要来源于仪器误差、环境误差、人为误差、方法误差等。为了便于分析,根据误差的性质,可把误差归纳为系统误差和随机误差两大类。

(1)系统误差。

系统误差是指在同一测量条件下,多次测量同一量值时绝对值和符号保持不变,或在条件改变时,按一定规律变化的误差。系统误差在某些情况下对测量结果的影响比较大,因此研究系统误差产生的原因,发现、减小或消除系统误差,使测量结果更加趋于正确和可靠,不仅是误差理论的重要课题之一,而且是数据处理中的一个重要的内容。

需要说明的是,系统误差不具有抵偿性,它是固定的或服从一定的规律。

(2)随机误差。

随机误差又称为偶然误差,是指由于感官灵敏度和仪器精密程度的限制、周围环境的干扰以及伴随着测量而来的不可预料的随机因素的影响而造成的误差。它的特点是大小无定值,一切都是随机发生的。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

通过多次测量求平均值的方法,可以使随机误差相互抵偿。另外,由于算术平均值与真值较为接近,所以一般把其作为测量的结果。

### 3. 误差的表示形式

误差的表示形式有绝对误差和相对误差两种。

绝对误差 $\pm\Delta N$ 表示测量结果 $N$ 与真值 $N'$ 间的相差范围,正负号“ $\pm$ ”表示 $N$ 可能比 $N'$ 大或小。由测量结果 $N$ 及其绝对误差 $\Delta N$ 可以看出,真值所在的可能范围为 $N-\Delta N \leq N' \leq N+\Delta N$ ,或简写为 $N'=N \pm \Delta N$ 。仅仅根据绝对误差的大小还难以评价一个测量结果的可靠程度,还需要参考被测量本身的大小,为此又引入了相对误差的概念。

相对误差表示绝对误差在所测物理量中所占的比重,一般用百分比表示,即 $E = \frac{\Delta N}{N'} \times 100\%$ 。相对误差越小,表明测量结果越可靠。例如,测量一长度时得1 000 m,而绝对误差为1 m;测另一长度时得100 cm,而绝对误差为1 cm。后者的相对误差为1%,而前者为0.1%,所以我们认为前者较后者更可靠。

由于存在误差,所以任何测量值 $N$ 都只能在一定近似程度上表示真值 $N'$ 的大小,而误差范围则大致说明这种近似程度。完整的测量结果,不仅要说明所得数值 $N$ 及其单位,而且还必须说明相应的误差,一般用以下的标准形式表示:

$$N' = (N \pm \Delta N) (\text{单位}) \quad (1-9)$$

$$E = \frac{\Delta N}{N'} \times 100\%$$

不标明误差的测量结果,在科学上是没有价值的。

如果待测量有理论值或公认值,也可用百分差来表示测量的好坏,即

$$\text{百分差 } E_0 = \frac{\text{测量值 } N - \text{公认值 } N'}{\text{公认值 } N'} \times 100\% \quad (1-10)$$

需要特别指出的是,绝对误差、相对误差和百分差通常只取1~2位数字来表示。



#### 想一想

在我们的日常生活中,误差体现在哪里?它们都是由什么原因造成的?



## 二、电阻应变片式传感器

电阻式传感器的种类繁多,应用广泛,其基本原理是将被测物理量的变化转换成电阻值的变化,再经相应的测量电路最后显示被测值的变化。

电阻式传感器与相应的测量电阻组成的测力、测压、测重、测位移、测加速度、测扭矩、测温度等测试系统已成为生产过程检测以及实现生产自动化所不可缺少的手段之一。

在几何量和机械量的测量中,最常用的传感器是由某些金属和半导体材料做成的电阻应变片式传感器。

### (一)电阻应变片式传感器的优缺点

电阻应变片式传感器是以应变片为传感元件的传感器。它具有以下优点:

- (1) 精度高,测量范围广。
- (2) 使用寿命长,性能稳定、可靠。
- (3) 结构简单、尺寸小、重量轻。
- (4) 频率响应快速,应变片的响应时间约为  $10^{-7}$  s。
- (5) 环境适应性强,可在高低温、高速、高压、强烈振动、强磁场、核辐射和化学腐蚀等恶劣环境中工作。
- (6) 种类繁多,性价比高。

但电阻应变片式传感器也存在一些缺点。如在大应变状态下存在较大的非线性,输出信号微弱,不适用于温度超过  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$  的高温环境;应变片实际测出的只是某面积上的平均应变,不能完全适应力场中的瞬时应力变化情况。

## (二)电阻应变片的工作原理

电阻应变片的敏感量是应变。如图 1-5 所示,金属受到拉伸作用时,在长度方向发生伸长变形的同时会在径向发生收缩变形,金属的伸长量与原来长度之比称为应变。按材料分,电阻应变片分为金属电阻应变片和半导体应变片两大类。利用金属应变片与其电阻变化量成正比的原理制成的器件称为金属电阻应变片。利用半导体单晶硅的压阻效应制成的器件称为半导体应变片。金属导体或半导体在外力作用下产生机械变形而引起导体或半导体的电阻值发生变化的物理现象称为应变效应。

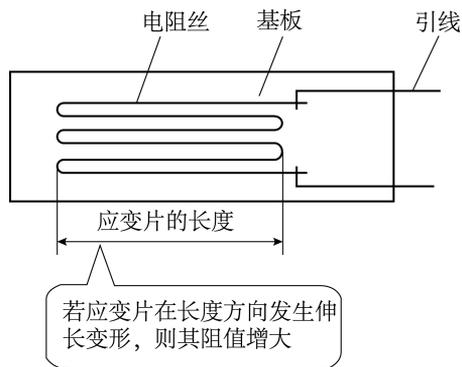


图 1-5 电阻丝式应变片的应变效应

应变片变形时,从引线上测出的电阻值也会相应地变化。只要选择的材料适当,就可以使应变片因变形而产生的应变(应变片的输入)和它的电阻变化值(应变片的输出)呈线性关系。如果把应变片贴在弹性结构体上,当弹性体受外力作用而成比例地变形(在弹性范围内)时,应变片也随之变形,所以可通过应变片电阻值的大小来检测外力的大小。

金属导体的电阻值可用下式表示:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{\pi r^2} \quad (1-11)$$

式中  $\rho$ ——金属导体的电阻率,  $\Omega \cdot \text{cm}^2/\text{m}$ ;

$S$ ——导体的截面积,  $\text{cm}^2$ ;

$l$ ——导体的长度,  $\text{m}$ ;

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

$r$ ——导体的半径。

当导体受力作用时,其长度  $l$ 、截面积  $S$ 、材料的电阻率  $\rho$  相应变化为  $dl$ 、 $dS$ 、 $d\rho$ ,因而引起电阻变化  $dR$ 。

对式(1-11)进行全微分,则为

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-12)$$

式中  $\frac{dl}{l}$ ——电阻丝的轴向应变,  $\frac{dl}{l} = \epsilon_x$ ;

$\frac{dr}{r}$ ——电阻丝的径向应变,  $\frac{dr}{r} = \epsilon_y$ 。

根据材料力学原理,在弹性限度范围内电阻丝轴向应变与径向应变存在如下关系:

$$\epsilon_y = -\mu\epsilon_x \quad (1-13)$$

式中  $\mu$ ——材料的泊松系数,  $\mu = 0 \sim 0.5$ ,负号表示两者变化方向相反。

将上式代入式(1-12)得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} = (1 + 2\mu)\epsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \quad (1-14)$$

### 1. 金属材料的应变电阻效应

对于金属材料有

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (1-15)$$

式中  $C$ ——由一定的材料和加工方式决定的常数;

$V$ ——金属材料的体积。

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{d(\pi r^2)}{r} = (1 - 2\mu)\epsilon_x \quad (1-16)$$

将式(1-15)、式(1-16)代入式(1-14),得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} = (1 + 2\mu)\epsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} = [(1 + 2\mu) + C(1 - 2\mu)]\epsilon_x = K_m \epsilon_x \quad (1-17)$$

式中  $K_m$ ——金属丝材料的应变灵敏系数(简称灵敏系数)。

式(1-17)表明,金属材料的应变电阻效应是指金属材料的电阻相对变化与其轴向应变成正比的现象。对于金属材料的  $K_m$ ,前半部分是受力后金属丝几何尺寸改变所引起的,后半部分则是材料的电阻率变化所引起的。金属丝材的应变电阻效应主要以结构尺寸变化为主。

### 2. 半导体材料的应变电阻效应

对于半导体材料有

$$\frac{d\rho}{\rho} = \pi_x \sigma_x = \pi_x E \epsilon_x \quad (1-18)$$

式中  $\sigma_x$ ——作用于材料的轴向应力;

$\pi_x$ ——半导体材料在受力方向上的压阻系数;

$E$ ——半导体材料的弹性模量。

将式(1-18)代入式(1-14),得

$$\begin{aligned} \frac{dR}{R} &= \frac{dl}{l} - 2 \frac{dr}{r} + \frac{d\rho}{\rho} = (1+2\mu)\epsilon_x + \frac{d\rho}{\rho} \\ &= (1+2\mu)\epsilon_x + \pi_x E \epsilon_x = [(1+2\mu) + \pi_x E] \epsilon_x = K_s \epsilon_x \end{aligned} \quad (1-19)$$

式中  $K_s$ ——半导体材料的应变电阻系数。

式(1-19)表明,半导体材料的应变电阻效应是指半导体晶体材料在某方向受力产生变形时材料的电阻率发生变化的现象。对于半导体材料的  $K_s$ ,前半部分同样是几何尺寸变化引起的,后半部分则是由半导体材料的压阻效应所引起的。

半导体材料的应变电阻效应主要基于压阻效应。使用半导体材料应变片时,应采取温度补偿和非线性补偿措施。

一般常用的应变片灵敏系数大致是:金属导体应变片为 2,最大不会超过 5;半导体材料应变片为 100~200。可见,半导体材料的应变片的灵敏系数值比金属材料的灵敏系数值大几十倍。此外,根据选用的材料或掺杂多少的不同,半导体应变片的灵敏系数可以做成正值或负值,即拉伸时应变片电阻值增加或降低。

### 小提示

应变片的灵敏系数并不等于其敏感栅整长应变丝的灵敏系数,这是因为在单向应力作用下产生应变时,应变片的灵敏系数除受到敏感栅结构形状、成型工艺、黏结剂和基底性能的影响外,还受到栅端圆弧部分横向效应的影响。

## (三)电阻应变片的性能参数

### 1. 灵敏系数

电阻应变片的灵敏系数  $K$  是指在应变片灵敏轴线方向的单一应力作用下,应变片的电阻相对变化  $dR/R$  与应变片试件表面上的轴向应变  $\epsilon_x$  的比值,即

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} = \frac{dR/R}{\epsilon_x} \quad (1-20)$$

电阻应变片的灵敏系数  $K$  主要取决于敏感栅材料的灵敏系数  $K_m$ 。由于信号传递中的失真、横向效应及结构形式和几何尺寸的不同等因素,应变片灵敏系数  $K$  一般低于敏感栅材料的灵敏系数  $K_m$ 。因此,应变片灵敏系数  $K$  必须重新通过实验标定。由于粘贴式电阻应变片一经粘贴测试就无法取下,所以一批产品只能采取抽样(如 5%)的方法标定。实验证明,在相当大的应变范围内,应变片灵敏系数  $K$  为常数。

### 2. 横向效应

沿应变片轴向的应变  $\epsilon_x$ ,必然引起应变片电阻的相对变化。而沿垂直于应变片轴向的应变  $\epsilon_y$ ,也会引起应变片电阻的相对变化。这种现象称为横向效应,其结果是降低了电阻应变片的灵敏度。这种现象的产生和影响与应变片敏感栅的结构有关。敏感栅是纵向栅越窄、越长,横向栅越宽、越短,则横向效应的影响越小。为满足测量精度的要求,需要进行必要的修正。为了减小横向效应产生的测量误差,一般多采用金属箔式应变片。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

### 3. 机械滞后

电阻应变片安装在试件上后,在一定温度下,画出电阻应变片电阻相对变化 $\epsilon_i$ (指示应变)与试件机械应变 $\epsilon_g$ 之间加载的特性曲线,如图1-6所示。实验发现,这两条特性曲线并不重合。在同一机械应变下,卸载时的 $\epsilon_i$ 高于加载时的 $\epsilon_g$ ,这种现象称为应变片的机械滞后。加载特性曲线与卸载特性曲线之间的最大差值 $\Delta\epsilon_m$ ,称为应变片的机械滞后值。

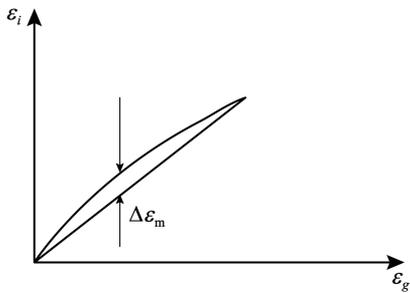


图 1-6 机械滞后

机械滞后主要是由敏感栅、基底和黏结剂在承受机械应变后留下的残余变形造成的。当敏感栅受到不适当的变形,或黏结剂固化不充分,或应变片在较高的温度下工作,都将会使机械滞后增加。为减小机械滞后,除了选用合适的黏结剂外,新安装的电阻应变片最好在经过几次(3次以上)加-卸载循环后再正式测量,以提高测量精度。

### 4. 零漂和蠕变

已粘贴的电阻应变片,在温度保持恒定、试件上没有应变的情况下,电阻应变片的指示值会随时间的增长而逐渐变化,此变化就是应变片的零点漂移,简称零漂。

已粘贴的电阻应变片,在温度保持恒定、承受某一恒定的机械应变长时间的作用时,电阻应变片的指示值会随时间的增长而逐渐变化,此种现象称为蠕变。

零漂和蠕变这两项指标都用于衡量电阻应变片对时间的稳定性,在长时间的测量中,其意义更为突出。

### 5. 应变极限

电阻应变片的应变极限是指在一定的温度下,应变片的指示应变 $\epsilon_i$ 与试件的真实应变 $\epsilon_g$ 的相对误差达规定值(一般为10%)时的真实应变 $\epsilon_j$ 。

### 6. 疲劳寿命

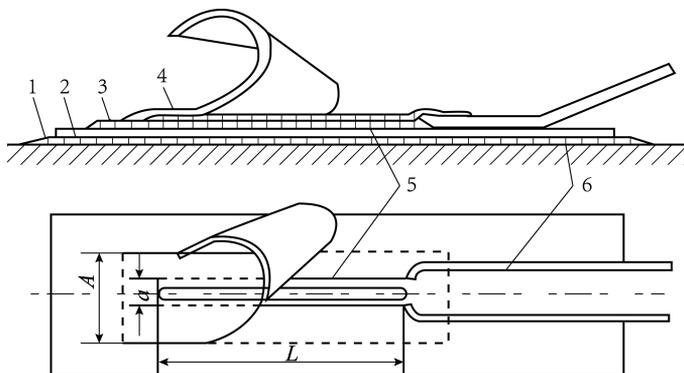
对已安装好的电阻应变片,在恒定幅值的交变压力下,可以连续工作而不产生疲劳损坏的循环次数 $N$ ,称为应变片的疲劳寿命。

疲劳寿命反映了电阻应变片对动态应变测量的适应性。

## (四)电阻应变片的结构与材料

上文讲到,应变片主要分为金属电阻应变片和半导体应变片两类。常用的金属电阻应变片有丝式、箔式和薄膜式三种。前两种为粘贴式应变片,由绝缘的基底、覆盖层

和具有高电阻系数的金属敏感栅及引出线四部分组成。金属丝式应变片的基本结构如图 1-7 所示。



1、3—黏结剂；2—基底；4—盖片；5—敏感栅；6—引出线

图 1-7 金属丝式应变片的基本结构

金属薄膜式应变片是采用真空镀膜(如蒸发或沉积等)方式将金属材料在基底材料(如表面有绝缘层的金属、有机绝缘材料或玻璃、石英、云母等无机材料)上镀一层很薄的敏感电阻膜(膜厚在  $0.1 \mu\text{m}$  以下)而构成的一种应变片。

### 1. 金属电阻应变片的结构

#### (1) 敏感栅。

敏感栅是实现应变-电阻转换的敏感元件,由直径为  $0.015 \sim 0.05 \text{ mm}$  的金属细丝绕成栅状或用金属箔腐蚀成栅状。电阻应变片的电阻值有  $60 \Omega$ 、 $120 \Omega$ 、 $350 \Omega$ 、 $500 \Omega$ 、 $600 \Omega$ 、 $650 \Omega$ 、 $750 \Omega$ 、 $1\,000 \Omega$ 、 $1\,100 \Omega$ 、 $2\,000 \Omega$  等,其中以  $120 \Omega$  最为常用。应变片敏感栅的结构与应用的情况有关,如“T”应变片主要用于柱式、平面弯矩、扭矩测量,双斜栅主要用于扭矩、剪切力测量,圆膜片主要用于压力测量,多栅按角度排列或等距阵列主要用于应力分析等。总之,可以根据不同测试需要选择不同结构的应变片。

金属箔式应变片如图 1-8 所示,其敏感栅是由很薄的金属箔片制成,箔厚仅为  $0.003 \sim 0.10 \text{ mm}$ ,用光刻技术制作。它与金属丝式应变片相比有如下优点:用光刻技术能制成各种复杂形状的应变花;横向应变小;散热性好,允许通过较大电流;可提高相匹配的电桥电压,从而提高输出灵敏度;疲劳寿命长,蠕变小;生产效率高。但是制

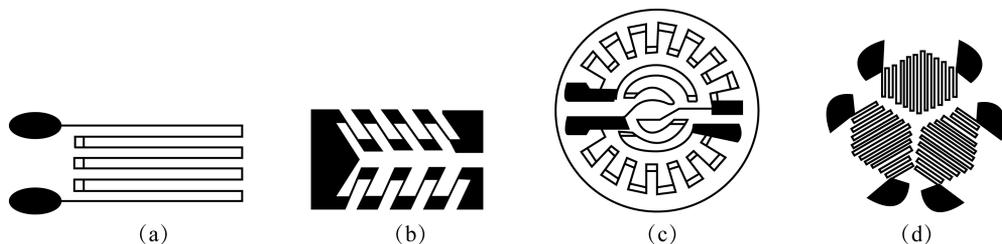


图 1-8 各式金属箔式应变片

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

造金属箔式应变片的电阻值的分散性要比金属丝式应变片的分散性大,有的甚至相差几十欧姆,需要进行阻值的调整。由于金属箔式应变片的一系列优点,它将逐渐取代金属丝式应变片而被广泛应用。

①敏感栅电阻。两焊点之间的电阻为敏感栅电阻。敏感栅电阻应根据应变片的散热面积、导线电阻的影响、信噪比、功耗大小来选择。对于传感器一般推荐选用  $350\ \Omega$ 、 $1\ 000\ \Omega$  的阻值。

应变片电阻大,可以减小导线电阻对电路灵敏度的影响,并能提高电路的信噪比。然而,在面积有限的情况下,若阻值太高,则应变片的栅条将特别细,对任何一点划痕、针孔、缺口都比较敏感,与基底的黏结力也将下降,稳定性将变差,给制造和使用都带来一定的困难。

②敏感栅栅长。敏感栅栅长是指应变片中将应变量转换成电量部分的长度,如图 1-9 所示。敏感栅栅长是应变片选择的一个重要参数。应变片的输出是敏感栅覆盖面积内的平均应变,在应力集中区域,峰值应变常局限于很小的区域内。若选用栅长较长的应变片,将造成明显的测量误差,如图 1-10 所示,对于传感器则灵敏度下降。然而,若选用栅长过短的应变片(如栅长小于  $3\ \text{mm}$ ),许多性能指标将下降,尤其是应变极限蠕变、静态测量稳定性以及疲劳寿命等。

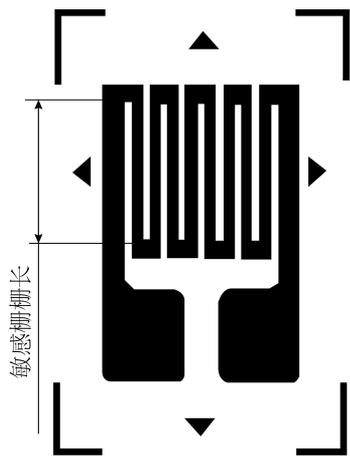


图 1-9 敏感栅示意图

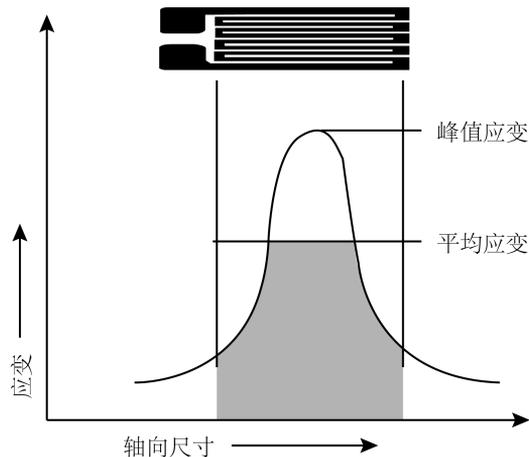


图 1-10 应变片栅长对测量误差的影响

较长的应变片有许多优点,如易于粘贴和接线、散热性好、单位面积上的功耗小,这对于在塑料和其他热传递性能不佳的试件上使用的应变片来说是十分重要的。因为若散热不良,将造成敏感栅、基底、黏结剂和试件表面局部高温,从而严重影响应变片的性能和精度。此外,对于非均匀材料,如混凝土、铸铁、铸钢等,一般要求栅长大于材料的不均匀尺寸,这样才能比较真实地反映结构内的平均应变。然而,栅长也不是越长越好,过长的栅长不仅对应变片性能的改善并不显著,粘贴质量不易保证,而且会使成本增加。

综上所述,应用于金属材料上的测量,一般都选择栅长为  $3\sim 6\ \text{mm}$  的应变片。

## (2) 基底和盖片。

基底用于保持敏感栅、引线的几何形状和相对位置。而盖片既可保持敏感栅和引线的形状和相对位置,又可保护敏感栅。

## (3) 黏结剂。

黏结剂用来将盖片和敏感栅固定在基底上,同时用于将应变片基底黏结在试件表面某一个方向或位置上,也起着传递应变的作用。常用的黏结剂分为有机黏结剂和无机黏结剂两大类。有机黏结剂常用于低温、常温和中温,常用的有丙烯酸酯、酚醛树脂、有机硅树脂、聚酰亚胺等;无机黏结剂通常用于高温,常用的有磷酸盐、硅酸盐、硼酸盐等。

## (4) 引线。

引线是从应变片的敏感栅中引出的细金属线。对于制作引线的材料,其要求是电阻率低、电阻温度系数小、抗氧化性能好、易于焊接。大多数敏感材料都可用于制作引线。

## 2. 半导体应变片的结构

半导体应变片是利用半导体材料的压阻效应工作的,即利用某些半导体材料在某一晶轴方向施加外力时,它的电阻率 $\rho$ 就会发生变化的现象。半导体应变片可分为体型半导体应变片、薄膜型半导体应变片和扩散型半导体应变片三种,如图 1-11 所示。

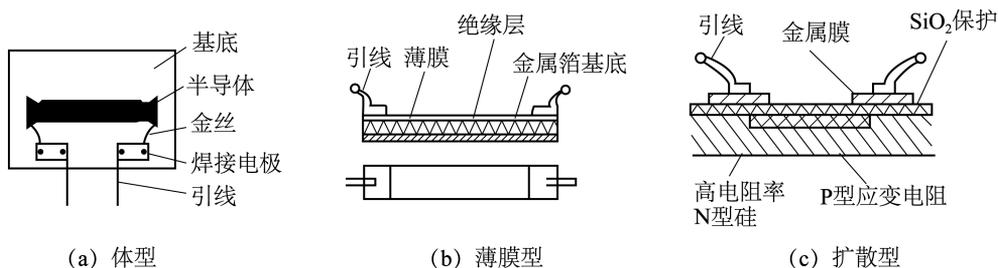


图 1-11 半导体应变片

## (1) 体型半导体应变片。

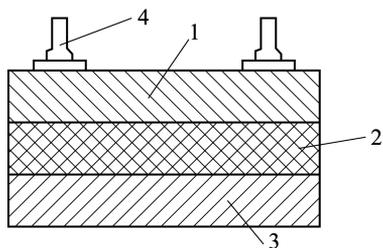
体型半导体应变片是一种将半导体材料硅或锗晶体按一定方向切割成片状小条,经腐蚀压焊粘贴在基片上而成的应变片。

## (2) 薄膜型半导体应变片。

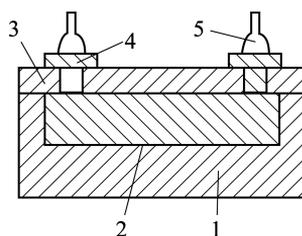
薄膜型半导体应变片是利用真空沉积技术将半导体材料沉积在带有绝缘层的试件上而制成的应变片,其结构示意图如图 1-12 所示。

## (3) 扩散型半导体应变片。

将 P 型杂质扩散到 N 型硅单晶基底上,形成一层极薄的 P 型导电层,再通过超声波和热压焊法接上引线,就形成了扩散型半导体应变片,其结构示意图如图 1-13 所示。扩散型半导体应变片是应用很广的一种半导体应变片。



1—锗膜;2—绝缘层;  
3—金属箔基底;4—引线  
图 1-12 薄膜型半导体应变片



1—N型硅;2—P型硅扩散层;  
3—二氧化硅绝缘层;4—铝电极;5—引线  
图 1-13 扩散型半导体应变片

### 3. 电阻应变片的材料

一般情况下,对电阻丝材料有如下要求:

- ①灵敏系数大,并在较大应变范围内保持常数;
- ②电阻率大,即在同样长度、同样横截面积的电阻丝中具有较大的电阻值;
- ③电阻温度系数小,否则环境温度的变化也会改变其阻值;
- ④与铜线的焊接性能好,与其他金属的接触电势比较小;
- ⑤机械强度高,具有优良的机械加工性能。

康铜是目前应用最广泛的应变丝材料。康铜的灵敏系数稳定,不但在弹性变形范围内能保持为常数,而且在塑性变形范围内也基本上能保持为常数。另外,其电阻温度系数较小且稳定,当采用合适的热处理工艺时,也可使电阻温度系数限制在 $\pm 50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 的范围内,加之其加工性能好,易于焊接,因而国内外多以康铜为应变丝材料。

### 知识拓展

#### 常用电阻丝材料及其性能

常用电阻丝材料及其性能如表 1-1 所示。

表 1-1 常用电阻丝材料及其性能

材料	成分元素 %		灵敏系数	电阻率 $/\mu\Omega \cdot \text{mm}$ (20 °C)	电阻温度 系数 $/(10^{-6} / ^\circ\text{C})$	最高使用 温度 $/^\circ\text{C}$	对铜的 热电势 $/( \mu\text{V} / ^\circ\text{C})$	线膨胀 系数 $/10^{-6} / ^\circ\text{C}$
康铜	Ni	35	1.9~2.1	0.35~0.25	20	300	33	15
	Cu	35						
镍铬合金	Ni	80	2.1~2.3	0.9~1.1	110~130	800	3.8	13
	Cr	20						
卡玛合金 (6J22)	Ni	73	2.3~2.6	1.23~1.32	20	800	3	13.3
	Cr	20						
	Al	3						
	Fe	3						

续表

材料	成分元素 %		灵敏系数	电阻率 $/\mu\Omega \cdot \text{mm}$ (20 °C)	电阻温度 系数 $/(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	最高使用 温度 $/^{\circ}\text{C}$	对铜的 热电势 $/( \mu\text{V}/^{\circ}\text{C})$	线膨胀 系数 $/10^{-6}^{\circ}\text{C}$
镍铬铝合金 (6J23)	Ni	75	2.3~2.6	1.23~1.32	20	800	3	13.3
	Cr	20						
	Al	3						
	Cu	2						
铁铬铝合金	Fe	75	2.8	1.3~1.5	30~40	700	2~3	13
	Cr	20						
	Al	5						
铂	Pt	100	3~6	0.09~0.11	3 900	1 000	7.6	8.9
铂钨合金	Pt	92	3.5	0.68	227	1 000	6.1	8.3~9.2
	W	8						

### (五)电阻应变片使用注意事项

电阻应变片是通过黏结剂粘贴到被测试件表面上使用的。在选用黏结剂时,要根据基底材料的工作条件、工作温度、潮湿程度、稳定性要求、粘贴时间、是否加温加压等因素合理选择。

#### 1. 电阻应变片的粘贴

电阻应变片的粘贴质量将直接影响测量的精度,因此,电阻应变片的粘贴是一个非常关键的环节,必须注意。为提高测量结果的准确性,应在电阻应变片的粘贴过程中认真操作,做到一丝不苟。

在准备粘贴电阻应变片之前,应对电阻应变片作严格仔细的检查,检查的内容如下。

##### (1)电阻应变片的外形检查。

电阻应变片的外形检查,即检查电阻应变片是否存在断路、短路现象,片中各部位是否有损伤、折断,片内是否夹有气泡或霉变现象等。

##### (2)电阻应变片电阻值的检测。

为保证使用的电阻应变片的电阻误差在允许范围内(这个范围通常在 $\pm 0.5 \Omega$ ),可事先用精度较高的欧姆表或采用直流电桥对其进行检测,以免因同组使用的电阻应变片的阻值误差太大而造成测量结果欠准。

##### (3)检查电阻应变片上是否标有中心线。

若电阻应变片没有中心线,则应在其基盖上补划出纵、横线条,这样可方便粘贴电阻应变片。与此同时,在被测试件的表面上应划出定位线,以确保电阻应变片的粘贴到位。若被测试件的表面质量不高,将会影响电阻应变片的粘贴,应使用刮刀或锉刀清除被测点处的氧化皮及污垢,然后用细砂皮纸在试件粘贴部位(一般应为电阻应变

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

片面积 3~5 倍的面)进行打磨,沿贴片方向打磨出 35°的交叉纹,以保证表面足够光滑,最后用划针在被测点处划线,从而保证电阻应变片能牢固、顺利地粘贴。

另外,粘贴电阻应变片前,还需用脱脂棉球蘸上清洁溶剂,如丙酮、无水酒精、四氯化碳等擦洗被测点处的油污,直至棉球上无明显油渍为止,且注意此时勿用手触摸清洗后的表面。然后在电阻应变片的粘贴面处涂上薄薄一层胶水,如 KH501、KH502 胶,一般宜薄不宜厚。粘贴电阻应变片时,将电阻应变片的方位线对准试件上的划线,此时应密切注意电阻应变片的方位线与试件的划线是否重合。这时可在电阻应变片上盖上一层透明纸(或蜡纸),一只手捏住电阻应变片的引线,另一只手反复轻轻滚压透明纸表面,以将里面多余的胶水和气泡挤出。滚压电阻应变片时切记不能垂直用力,不能产生滑动或转动,待胶水和气泡被完全挤出后,还应保持手指不动一分钟左右。当然也可以在试件表面盖上一层玻璃纸,然后垫上一块硅皮,用夹具或平整的压块轻压电阻应变片的粘贴处,这些动作的目的均是为了保证电阻应变片在粘贴过程中不发生位移,保证其方位线与被测试件测试点处的定位线完全重合。

粘贴后的电阻应变片可让其在室温中自然干燥 15~23 h。为节省时间,也可在自然干燥数小时后,用红外线灯进行烘烤,但温度应控制在 3~80 °C。若一开始就烘烤,则电阻应变片敏感栅材料的电阻系数将会随温度的骤然变化而改变,这对于后面的测试工作不利。

## 2. 电阻应变片的保护

电阻应变片的保护措施主要是防潮。常用中性凡士林、石蜡等涂料及环氧树脂防潮剂 etc 对电阻应变片进行密封保护。

## (六)电阻应变片式传感器的测量电路

电阻应变片把机械应变信号转换成  $\Delta R/R$  后,由于应变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,必须采用转换电路或仪器,把应变片的  $\Delta R/R$  变化转换成电压或电流变化。通常采用电桥电路实现这种转换。根据电源的不同,电桥又分直流电桥和交流电桥。

### 1. 直流电桥

按其测量电路(桥式),电阻应变片式传感器的直流电桥可分为单臂式、半桥式和全桥式三种。所谓半桥式,即将电桥的四臂接入四个应变片。其中,一个受拉,一个受压,另外两个应变片不受力。而全桥式是两个受拉,两个受压,故灵敏度比半桥式大一倍。

直流电桥如图 1-14a 所示,图中  $U$  为供桥电源电压, $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  为桥臂, $R_L$  为负载内阻,则负载电流  $I_L$  为

$$I_L = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_L (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)} \cdot U$$

$I_L = 0$  时电桥平衡,即平衡条件为

$$R_1 R_3 - R_2 R_4 = 0 \quad (1-21)$$

这说明,要使电桥平衡,其相邻两臂电阻的比值应相等或相对两臂电阻的乘积应相等。

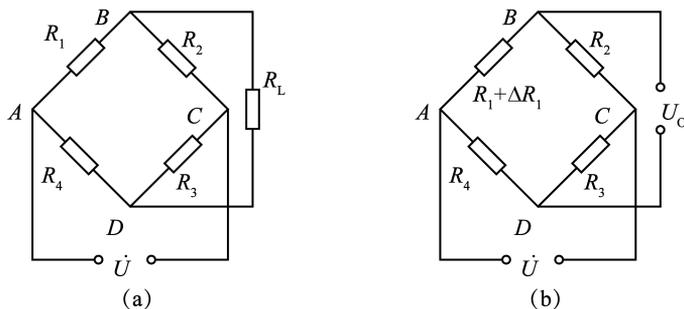


图 1-14 直流电桥

电阻应变片工作时,其电阻变化很小,电桥相应的输出电压也很小。要使记录仪工作,须将输出电压放大,为此必须了解  $\Delta R/R$  与电桥输出电压的关系。

如图 1-14b 所示,设  $R_1$  为工作应变片,由于应变使电阻变化  $\Delta R_1$ ,  $R_2$ 、 $R_3$  和  $R_4$  为固定电阻,  $U_o$  为输出电压。并设  $R_1 = \infty$ , 初始状态电桥平衡,  $U_o = 0$ , 则当有  $\Delta R_1$  时,电桥的输出电压为

$$U_o = \frac{\frac{R_3}{R_4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1}}{\left(1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{\Delta R_1}{R_1}\right) \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)} \cdot U \quad (1-22)$$

设桥臂比  $n = \frac{R_2}{R_1}$ , 由于电桥初始平衡有  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$ , 略去分母中的  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$ , 可得:

$$U_o = \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot U \quad (1-23)$$

可知  $n=1$  时, 即  $R_1=R_2$ 、 $R_3=R_4$  时, 电桥的电压灵敏系数  $S_u$  最高。

此时, 由式(1-23)得电桥的电压灵敏系数为

$$S_u = \frac{U_o}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} \quad (1-24)$$

可得单臂工作应变片的电桥电压灵敏系数为

$$S_u = \frac{n}{(1+n)^2} U \quad (1-25)$$

显然,  $S_u$  与电桥电源电压成正比, 同时与桥臂比  $n$  有关。

$U$  值的选择受电阻应变片功耗的限制。  $U$  值确定后, 取  $\frac{dS_u}{dn} = 0$ , 即  $\frac{1-n}{(1+n)^3} = 0$ 。

可见, 输出电压  $U_o$  与  $\frac{\Delta R_1}{R_1}$  呈严格的线性关系, 没有非线性误差, 而且电桥灵敏系数为

$$S_u = \frac{U_o}{\frac{\Delta R_1}{R_1}} = \frac{U}{4}$$

为了提高电桥灵敏度或进行温度补偿, 在电桥臂中往往安置多个应变片。电桥也可采用两臂或四臂电桥。如果为四臂电桥, 同理可得电桥输出电压为

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

$$U_0 = U \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (1-26)$$

电压灵敏度为  $S_u = U$ , 为单臂情况下的四倍(两臂情况下为单臂时的两倍)。

利用电桥的特性不仅可以提高灵敏度, 还可以抑制干扰信号, 因为当电桥的各臂或相邻两臂同时有某一个增量时, 对电桥的输出没有影响。

直流电桥的优点: 高稳定度的直流电源易于获得; 电桥调节平衡电路简单; 传感器至测量仪表的导线分布对参数的影响小等。

## 2. 交流电桥

采用直流电桥时, 其后续电路要采用直流放大器, 容易产生零点漂移, 线路也比较复杂, 因此应变电桥现在多采用交流电桥。交流电桥示意图如图 1-15 所示。

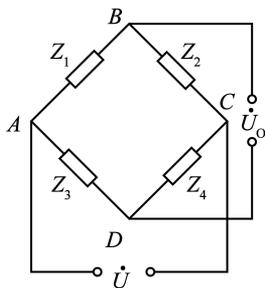


图 1-15 交流电桥示意图

(1) 交流电桥的平衡条件。

设:  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  为复阻抗,  $U$  为交流电压源, 开路输出电压为  $U_0$ 。设

$$Z_i = R_i + jX_i = Z_i e^{j\varphi_i} \quad (i=1, 2, 3, 4)$$

式中  $R_i, X_i$  —— 各桥臂电阻和电抗;

$Z_i, \varphi_i$  —— 各桥臂复阻抗的模和幅角。

因此, 交流电路的平衡条件为

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3 \quad \text{和} \quad \varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3 \quad (1-27)$$

或

$$R_1 R_4 - R_2 R_3 = X_1 X_4 - X_2 X_3 \quad \text{和} \quad R_1 X_4 + R_4 X_1 = R_2 X_3 + R_3 X_2 \quad (1-28)$$

设交流电桥的初始状态是平衡的,  $Z_1 = \infty$ , 当引起  $Z_1$  变化  $\Delta Z_1$  时, 可算出

$$U_0 = \frac{\frac{Z_4}{Z_3} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1}}{\left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} + \frac{\Delta Z_1}{Z_1}\right) \left(1 + \frac{Z_4}{Z_3}\right)} U \quad (1-29)$$

略去分母中的  $\frac{\Delta Z_1}{Z_1}$ , 并设初始时  $Z_1 = Z_2, Z_3 = Z_4$ , 则

$$U_0 = \frac{U}{4} \cdot \frac{\Delta Z_1}{Z_1} \quad (1-30)$$

电桥的调平就是确保试件在未受载、无应变的初始条件下,应变电桥满足平衡条件(初始输出为零)。在实际的应变测量中,由于各桥臂应变片的性能参数不可能完全对称,加之其容抗与供桥电源频率有关,严重影响着交流电桥的初始平衡和输出特性,因此必须进行预调平衡。交流电桥电容分布如图 1-16 所示。

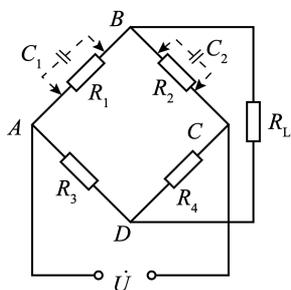


图 1-16 交流电桥电容分布

由图 1-16 可得交流电桥的平衡条件为

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \quad \text{和} \quad R_4 C_2 = R_3 C_1 \quad (1-31)$$

对全等臂电桥,上式即为

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \quad \text{和} \quad C_1 = C_2$$

式(1-31)表明,交流电桥平衡时,必须同时满足电阻平衡和电容平衡两个条件。

(2)交流电桥调平方法。

①电阻调平法。有串联电阻法和并联电阻法两种。

a. 串联电阻法。串联电阻法示意图如图 1-17a 所示,图中  $R_5$  由下式确定:

$$R_5 = \left[ |\Delta R_1| + \left| \Delta R_3 \cdot \frac{R_3}{R_1} \right| \right]_{\max} \quad (1-32)$$

式中  $\Delta R_1$ 、 $\Delta R_3$ ——桥臂  $R_1$  与  $R_2$  和  $R_3$  与  $R_4$  的偏差。

b. 并联电阻法。并联电阻法示意图如图 1-17b 所示。

多圈电位器  $R_5$  对应于电阻应变仪面板上的“电阻平衡”旋钮。调节  $R_5$  即可改变桥臂  $AD$  和  $CD$  的阻值比,使电桥满足平衡条件。

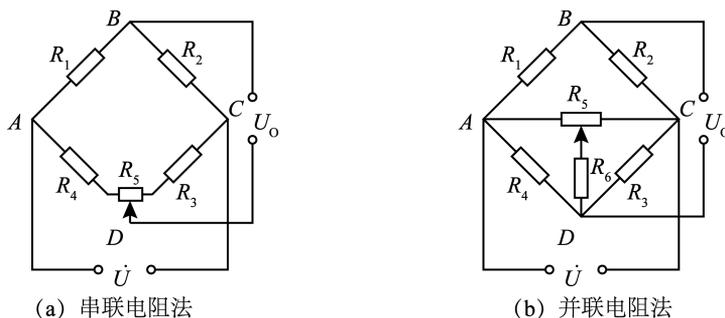


图 1-17 电阻调平法

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

② 电容调平法。有差动电容法和阻容调平法两种。

a. 差动电容法。差动电容法示意图如图 1-18a 所示。 $C_3$  和  $C_4$  为同轴差动电容，调节时，两电容变化大小相等，极性相反，以此调整电容平衡。

b. 阻容调平法。阻容调平法示意图如图 1-18b 所示。它靠接入 T 形 RC 阻容电路起到电容预调平的作用。

必须注意：在同时用电阻、电容调平装置进行阻抗调平的过程中，两者应不断交替调整才能取得理想的平衡结果。

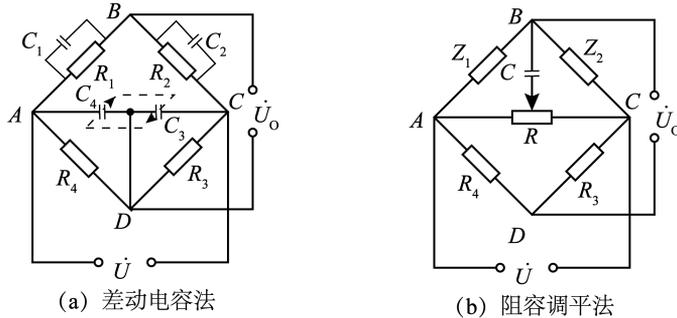


图 1-18 电容调平法

## (七) 电阻应变片式传感器的典型应用

### 1. 测力传感器

测力传感器按其量程大小和测量精度有很多规格。它们的主要差别是弹性元件的结构形式不同，以及应变片在弹性元件上粘贴的位置不同。通常测力传感器的弹性元件有柱式弹性元件、悬臂梁式弹性元件等。

#### (1) 柱式弹性元件。

柱式弹性元件有圆柱形弹性元件、圆筒形弹性元件等几种。圆柱形、圆筒形弹性元件如图 1-19a、b 所示。

柱式弹性元件结构简单、承载能力大，主要用于中等载荷和大载荷（可达数兆牛顿）的拉（压）力传感器。其受力后，产生应变

$$\epsilon = \frac{P}{AE} \quad (1-33)$$

用电阻应变仪测出的柱式应变为

$$\epsilon_i = 2(1 + \mu)\epsilon \quad (1-34)$$

式中  $P$ ——作用力；

$A$ ——弹性体的横截面积；

$E$ ——弹性材料的弹性模量；

$\mu$ ——弹性材料的泊松比。

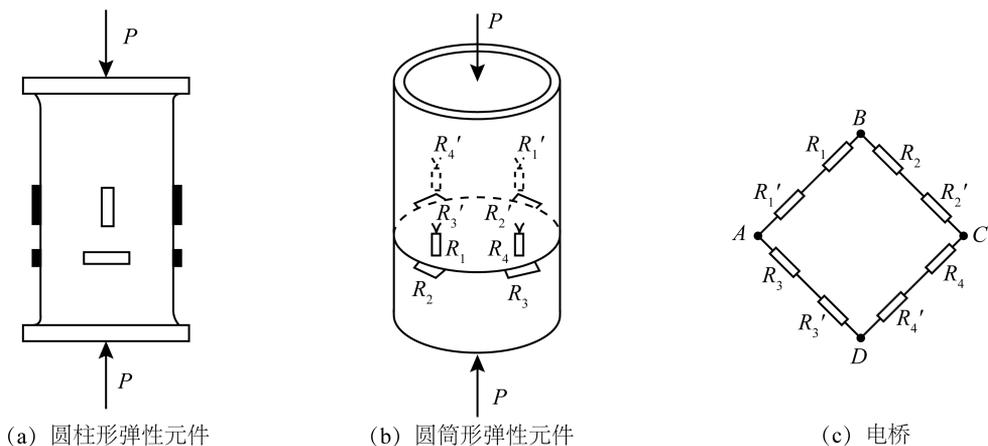


图 1-19 柱式弹性元件及其电桥

## (2) 悬臂梁式弹性元件。

悬臂梁式力传感器是一种结构简单、精度高、应变片容易粘贴、抗偏抗侧性能优越的称重测力传感器,它最小可以测量几十克,最大可以测几十吨的质量。

悬臂梁式力传感器采用弹性梁及电阻应变片作为敏感转换元器件,组成全桥电路。当垂直正压力或拉力作用在弹性梁时,应变片随弹性梁一起变形,其应变使应变片的阻值变化,应变电桥输出与拉力或压力成正比的电压信号。如果配以相应的应变仪、数字电压表或其他仪表,即可显示或记录质量或力。

悬臂梁有两种:一种为等截面梁,另一种为等强度梁。

①等截面梁。等截面梁就是悬臂梁的横截面处处相等的梁,如图 1-20a 所示。当外力作用在梁的自由端时,在固定端产生的应变最大,应变大小为

$$\varepsilon = \frac{6Fl_0}{bh^2E} \quad (1-35)$$

它适合测量 5 000 N 以下的载荷。采用等截面梁的传感器结构简单,灵敏度高。

②等强度梁。等强度梁是一种特殊形式的悬臂梁,如图 1-20b 所示。等强度梁沿梁长度方向的截面按一定规律变化,当外力  $F$  作用在自由端时,距作用点任何距离截面上的应力相等。应变大小为

$$\varepsilon = \frac{6Fl_0}{bh^2E} \quad (1-36)$$

等强度梁的特点是结构简单、加工方便、应变片粘贴容易、灵敏度较高。它主要应用在高精度的拉、压力传感器中,可测量 0.01 N 到几千牛顿的拉、压力。

使用等强度梁时,应在同一截面正反两面粘贴应变片,并应粘贴在该截面中性轴的对称表面上。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

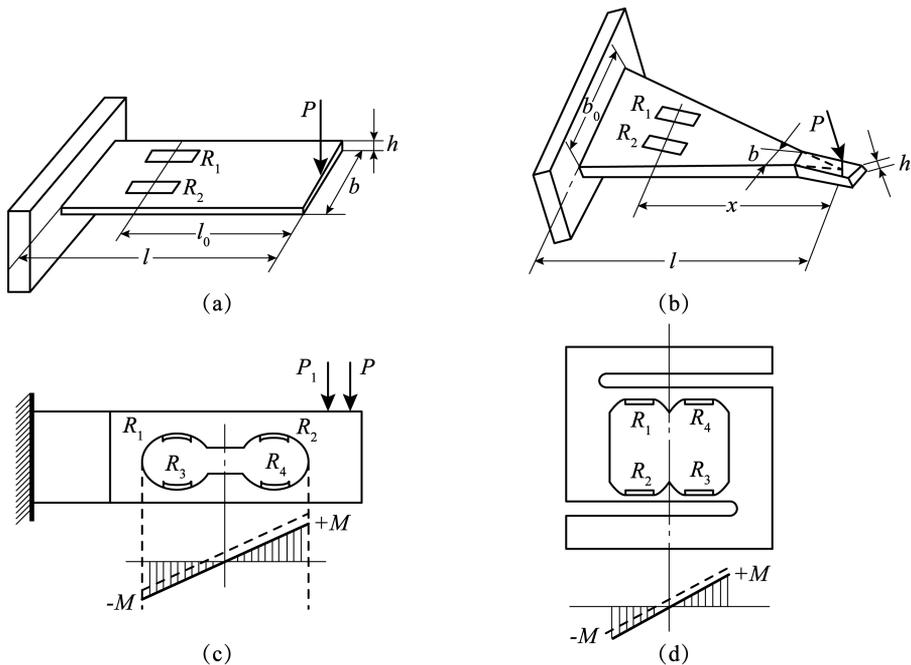


图 1-20 悬臂梁式弹性元件及其电桥

## 2. 压力传感器

压力传感器主要用于测量流体压力,有时也用于测量土壤压力。同样,按传感器所用弹性元件,压力传感器可分为膜式压力传感器、筒式压力传感器等。

### (1) 膜式压力传感器。

膜式压力传感器的弹性元件为四周固定的等截面圆形薄板,又称平膜板或膜片。其一面承受被测分布压力,另一面粘有应变片或专用的箔式应变片,并组成电桥,如图 1-21 所示。膜片在被测压力  $P$  作用下发生弹性变形,应变片在任意半径  $r$  的径向应变  $\epsilon_r$  和切向应变  $\epsilon_t$  分别为

$$\epsilon_r = \frac{3P}{8h^2 E} (1 - \mu^2) (r_0^2 - 3r^2) \quad (1-37)$$

$$\epsilon_t = \frac{3P}{8h^2 E} (1 - \mu^2) (r_0^2 - r^2)$$

式中  $P$ ——被测压力;  
 $h$ ——膜片厚度;  
 $r$ ——膜片任意半径;  
 $E$ ——膜片材料的弹性模量;  
 $\mu$ ——膜片材料的泊松比;  
 $r_0$ ——膜片有效工作半径。

由分布曲线可知,电阻  $R_1$  和  $R_3$  的阻值增大(受正的切向应变  $\epsilon_t$ );而电阻  $R_2$  和  $R_4$  的阻值减小(受负的径向应变  $\epsilon_r$ )。因此,电桥有电压输出,且输出电压与压力成比例。

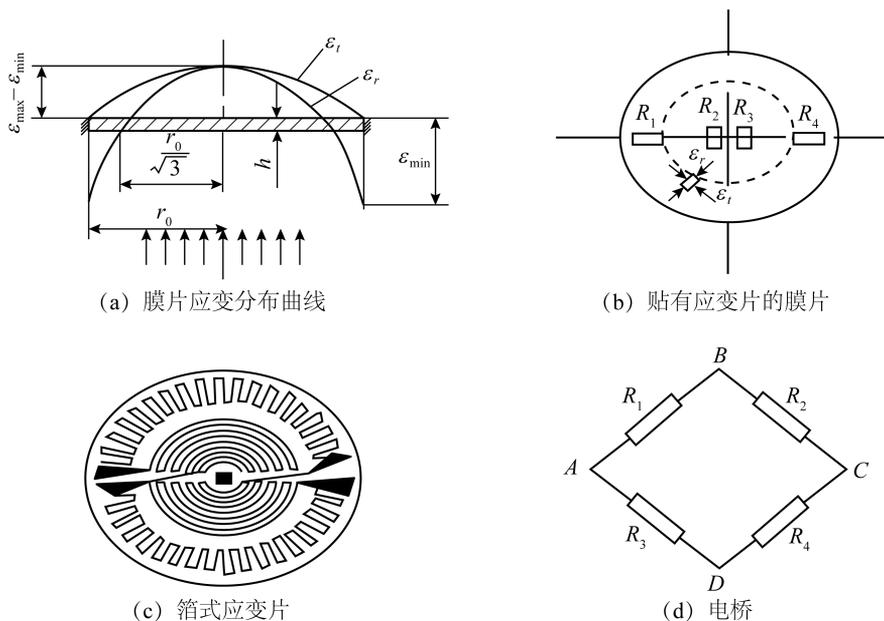


图 1-21 膜式压力传感器

(2)筒式压力传感器。

筒式压力传感器的弹性元件为薄壁圆筒，筒的底部较厚。这种弹性元件的特点是圆筒受到被测压力后表面各处的应变是相同的。因此应变片的粘贴位置对所测应变不影响。如图 1-22 所示，工作应变片  $R_1$ 、 $R_3$  沿圆周方向粘贴在筒壁上，温度补偿片  $R_2$ 、 $R_4$  贴在筒底外壁上，并连接成全桥线路。

筒式压力传感器适用于测量较大的压力。

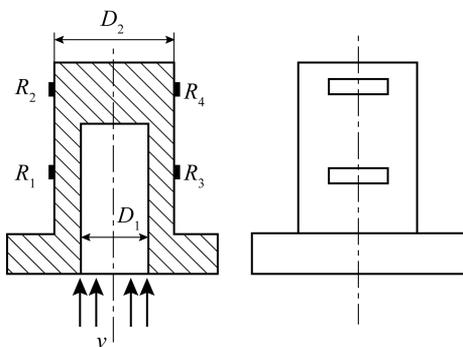


图 1-22 筒式压力传感器

对于薄壁圆筒(壁厚与壁的中面曲率半径之比小于  $\frac{1}{20}$ )，筒壁上工作应变片的切向应变  $\epsilon_t$  与被测压力  $P$  的关系，可用下式求得

$$\epsilon_t = \frac{(2-\mu)D_1}{2(D_2-D_1)E} \cdot P \tag{1-38}$$

- chapter 01
- chapter 02
- chapter 03
- chapter 04
- chapter 05
- chapter 06

对于厚壁圆筒(壁厚与壁的中面曲率半径之比大于 $\frac{1}{20}$ ),则有

$$\epsilon_t = \frac{(2-\mu)D_1^2}{2(D_2^2-D_1^2)E} \cdot P \quad (1-39)$$

式中  $D_1$ ——圆筒内孔直径;  
 $D_2$ ——圆筒外壁直径;  
 $E$ ——圆筒材料的弹性模量;  
 $\mu$ ——圆筒材料的泊松比。



## 知识拓展

### 温度误差及其补偿

#### 1. 温度误差

用应变片测量时,希望其电阻只随应变而变,而不受其他因素的影响。但实际上,当环境温度变化时,也会引起电阻的相对变化,从而产生温度误差。

设工作温度变化为 $\Delta t$  °C,则由此引起粘贴在试件上的应变片电阻的相对变化为

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right) = \alpha_t \Delta t + K(\beta_s - \beta_t) \cdot \Delta t \quad (1-40)$$

式中  $\alpha_t$ ——敏感栅材料的电阻温度系数;  
 $K$ ——应变片的灵敏系数;  
 $\beta_s, \beta_t$ ——试件材料、敏感栅材料的线膨胀系数。

式(1-40)即应变片的温度效应,相应的热输出为

$$\epsilon_t = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_t}{K} = \frac{1}{K} \alpha_t \Delta t + (\beta_s - \beta_t) \Delta t \quad (1-41)$$

从式(1-40)和式(1-41)不难看出,应变片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,温度效应的热输出干扰必须加以补偿。

#### 2. 温度补偿

热输出补偿就是消除 $\epsilon_t$ 对测量应变的干扰。常采用温度自补偿法和桥路补偿法。

##### (1) 温度自补偿法。

温度自补偿法是指通过精心选配敏感栅材料与结构参数来实现热输出补偿的方法。温度自补偿法常用的应变片有单丝自补偿应变片和双丝自补偿应变片两种。

##### ① 单丝自补偿应变片。

由式(1-41)可知,欲使热输出 $\epsilon_t = 0$ ,只要满足条件

$$\alpha_t = -K(\beta_s - \beta_t) \quad (1-42)$$

在研制和选用应变片时,若选择敏感栅的合金材料,其 $\alpha_t, \beta_t$ 能与试件材料的 $\beta_s$ 相匹配,即满足式(1-42),就能达到温度自补偿的目的。为使这种自补偿应变片能适用于不同 $\beta_s$ 材料的试件,实际常选用康铜、卡玛、伊文、铁铬铝等合金作栅材,并通过改

变合金成分及热处理工艺来调整  $\alpha_t$ , 以满足对不同材料试件的热输出补偿。

单丝自补偿应变片的最大优点是结构简单, 制造、使用方便。

### ② 双丝自补偿应变片。

双丝自补偿应变片的敏感栅是由电阻温度系数为一正一负的两种合金丝串接而成的, 如图 1-23 所示。应变片电阻  $R$  由两部分电阻  $R_a$  和  $R_b$  组成, 即  $R=R_a+R_b$ 。当工作温度变化时, 若  $R_a$  栅产生正的热输出  $\epsilon_t$  与  $R_b$  栅产生负的热输出  $\epsilon_b$  大小相等或相近, 就可达到自补偿的目的, 即

$$\frac{-\epsilon_{bt}}{\epsilon_{at}} \approx \frac{\frac{R_a}{R}}{\frac{R_b}{R}} = \frac{R_a}{R_b} \quad (1-43)$$

满足式(1-43)的参数, 可在同种试件上通过试验确定。双丝自补偿应变片的特点与单丝自补偿应变片的特点相似, 但它只能在选定的试件上使用。

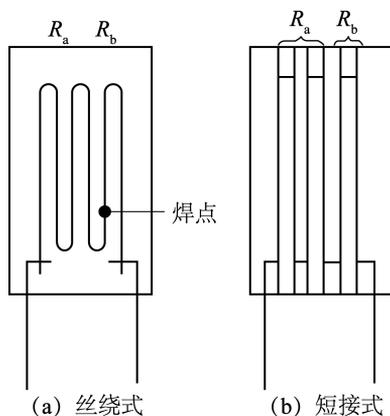


图 1-23 双丝自补偿应变片

### (2) 桥路补偿法。

桥路补偿法是指利用电桥的和、差原理来达到补偿的目的的方法。

桥路补偿法所用应变片的结构与双丝自补偿应变片的结构相似。不同的是, 其敏感栅是由同符号电阻温度系数的两种合金丝串接而成的, 而且栅的两部分电阻  $R_1$  和  $R_2$  分别接入电桥的相邻两臂上: 工作栅  $R_1$  接入电桥工作臂, 补偿栅  $R_2$  串接外接电阻  $R_B$  (不敏感温度影响) 后接入电桥补偿臂; 另两臂照例接入平衡电阻  $R_3$  和  $R_4$ , 如图 1-24 所示。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, 就能达到热补偿的目的, 即

$$\epsilon_{1t} = \frac{\Delta R_{1t}}{K R_1} \approx \frac{\Delta R_{2t}}{K (R_2 + R_B)} = \epsilon_{2t} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_B} \quad (1-44)$$

而外接补偿电阻为

$$R_B \approx R_2 \left[ \frac{\epsilon_{2t}}{\epsilon_{1t}} - 1 \right] \quad (1-45)$$

式中  $\epsilon_{1t}$ 、 $\epsilon_{2t}$  —— 工作栅、补偿栅的热输出。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

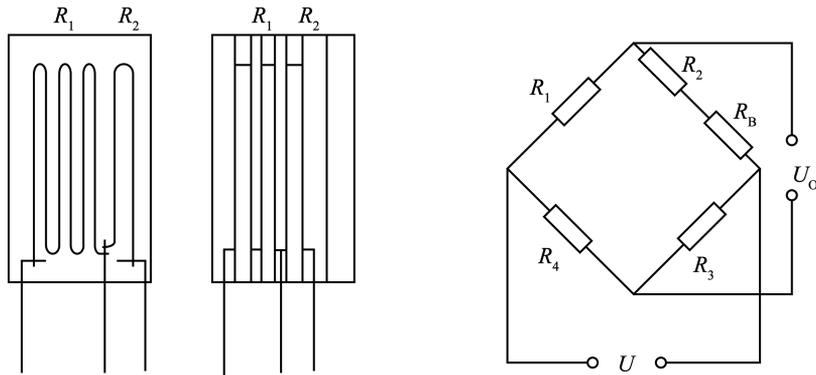


图 1-24 双丝半桥式热补偿应变片

桥路补偿法的最大优点是通过调整  $R_B$  值, 不仅可使热补偿达到最佳状态, 而且还适用于不同线膨胀系数的试件。缺点是对  $R_B$  的精度要求高, 而且当有应变时, 补偿栅同样起着抵消工作栅有效应变的作用, 使应变片输出灵敏度降低。为此桥路补偿法所用应变片必须使用  $\rho$  大、 $\alpha_t$  小的材料作工作栅, 选  $\rho$  小、 $\alpha_t$  大的材料作补偿栅。

## 任务实施

### 1. 方案设计

电子秤设计方案如图 1-25 所示。所设计电子秤由压力传感器、信号滤波放大器、转换器、主控模块(单片机)、键盘、LCD 液晶显示器组成。

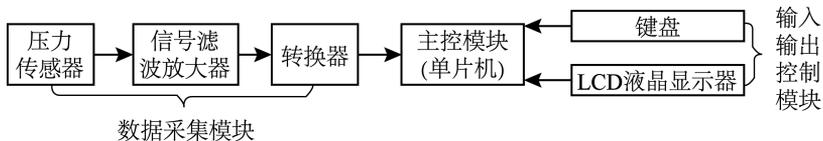


图 1-25 电子秤设计方案

### 2. 硬件电路设计

系统的电路图如图 1-26 所示。下面介绍电路的工作原理。

根据传感器理论, 当称重物时, 电桥电路中的应变片电阻会发生变化, 产生电压。经由传感器或敏感元件转换后输出的信号一般电平较低; 经由电桥等电路变换后的信号也难以直接用来显示、记录、控制或进行信号转换。为此, 测量电路中常设有模拟放大环节。因此, 产生的电压信号输入给 INA126。INA126 芯片内部采用差动输入, 共模抑制比高, 差模输入阻抗大, 增益高, 精度也非常好, 并且具有体积小、功耗低、精度高、噪声低、输入偏置电流低及外部接口简单等特点。

INA126 在外接电阻  $R_G$  时, 可实现  $5 \sim 1\,000\ \Omega$  范围内的任意增益; 工作电源电压范围  $\pm 2.3 \sim \pm 18\ \text{V}$ ; 最大电源电流为  $1.3\ \text{mA}$ ; 最大输入失调电压为  $125\ \text{V}$ ; 频带宽

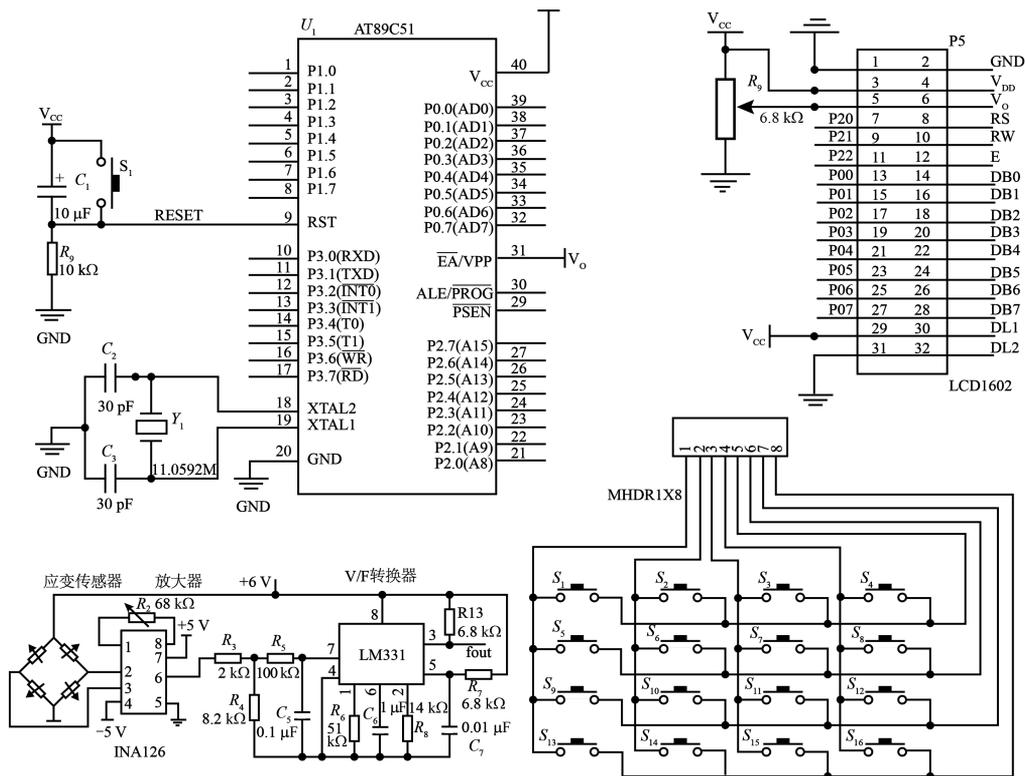


图 1-26 系统的电路图

度为 120 kHz(在  $R_G = 100 \Omega$  时)。

信号转换电路由 LM331 等组成。LM331 是一个 V/F 转换芯片。该芯片控制的原理是利用压控振荡器产生一个振荡频率的电路。当受到一个变化的电压时,压控振荡器中压敏电容的容量会变化,变化的电容引起振荡频率的变化,产生变频。LM331 内部由输入比较器、定时比较器、R-S 触发器、输出驱动、复零晶体管、带隙基准电路和电流开关等部分组成。

在电路中通过 LM331 将放大的电压信号转换为对应的频率信号输入给单片机控制器处理。

系统选择的单片机是 AT89C51。AT89C51 单片机的特点是能与 MCS-51 兼容,有 4 KB 可编程闪存储器,寿命能够达到 1 000 次写/擦循环,全静态工作,三级程序存储器锁定,128×8 位内部 RAM,32 条可编程 I/O 线,2 个 16 位定时器/计数器,5 个中断源,可编程串行通道,低功耗的闲置和掉电模式,片内振荡器和时钟电路。

系统采用 4×4 键盘实现各种数据的输入,采用 LCD1602 液晶显示器实现数据的输出。

### 3. 软件系统设计

软件系统的主程序流程如图 1-27 所示。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

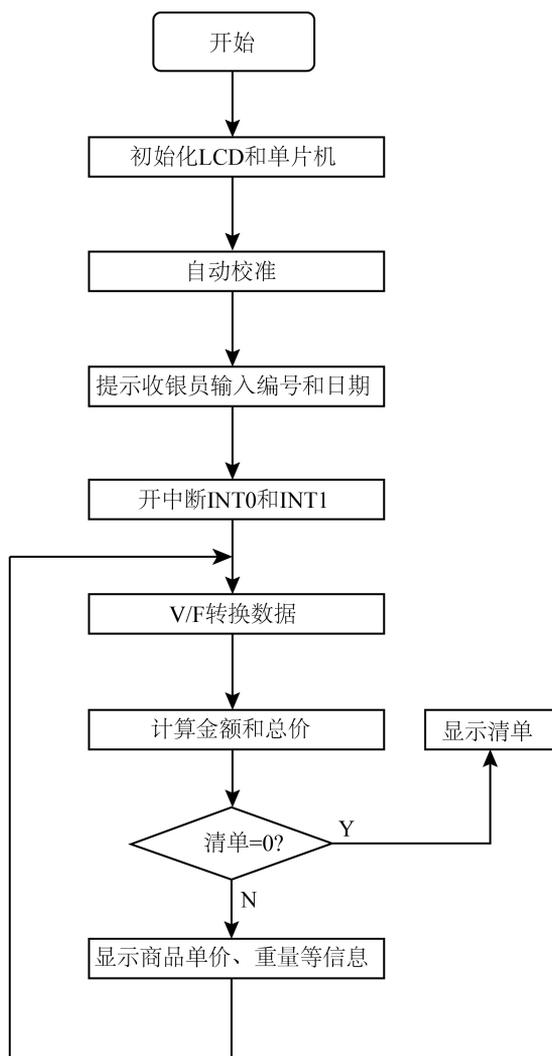


图 1-27 系统流程图

## 任务二 大气压力



### 任务引入

气压计在现实生活中并不是很常见,大部分人在一生中很少甚至是没有接触过。但是在某些领域,气压计又是不可或缺的重要物件,例如国防领域、医疗领域、工业领域。那么,气压计是如何进行大气压力检测的呢?



### 任务分析

要回答上述问题,需要分析气压计是如何对大气压力信号进行采集的,又是怎样将其转换为处理器能够接收的信号并显示的。

## 知识准备

### 一、压电效应

某些晶体或多晶陶瓷,当其沿一定方向受到外力作用而变形时,内部产生了极化现象,同时在其两个表面产生了符号相反的电荷;当外力消失后,又恢复到了不带电状态。这种将机械能转化为电能的现象称为正压电效应。正压电效应原理图如图 1-28a 所示。反之,在某些物质的极化方向上施加一定的电场,在晶体的某一个表面上会产生一定的机械变形,当去掉外加电场时,该物质的变形随即消失,这种将电能转化为机械能的现象称为逆压电效应。逆压电效应原理图如图 1-28b 所示。

具有压电效应的电介质称为压电材料。在自然界中,大多数晶体都具有压电效应,不过有些晶体的压电效应十分微弱。随着对压电材料的深入研究,人们发现石英晶体、钛酸钡和锆钛酸钡是性能优良的压电材料。

需要指出的是,并非所有的陶瓷都具有压电效应。具有压电效应的陶瓷称为压电陶瓷。作为压电陶瓷的原材料,其在晶体结构上一定是不具有对称中心的晶体,如氧化铝、氧化锆等。将这些原材料在高温下致密烧结,制成陶瓷,并将制好的陶瓷在直流高压电场下进行极化处理,才能成为压电陶瓷。常用的压电陶瓷有钛酸钡、钛酸铅、锆钛酸铅以及三元系压电陶瓷等。

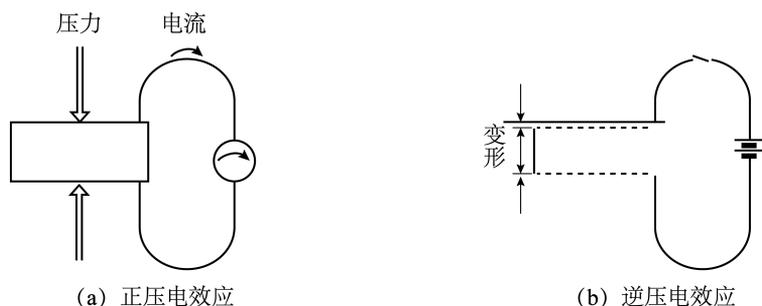


图 1-28 压电效应原理图

#### 1. 石英晶体的压电效应

如图 1-29 所示为天然石英晶体的结构外形,在晶体学中用三根互相垂直的轴  $z$ 、 $x$ 、 $y$  来表示石英晶体的坐标。 $z$  轴为光轴,它是晶体的对称轴; $x$  轴为电轴,该轴压电效应最为明显,也就是说压电效应产生的电荷一般分布在垂直于  $x$  轴的平面上; $y$  轴为机械轴,机械变形一般发生在此轴。

石英晶体的压电效应与其内部结构有关。石英晶体的化学式是  $\text{SiO}_2$ 。为了直观地了解其压电效应,将一个单元中构成石英晶体的硅粒子和氧离子在垂直于  $z$  轴的  $xOy$  平面内进行投影,等效为如

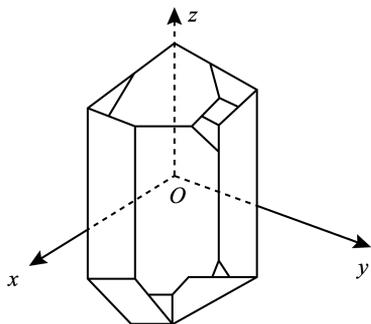


图 1-29 石英晶体的外形图

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

图 1-30a所示的正六边形排列。

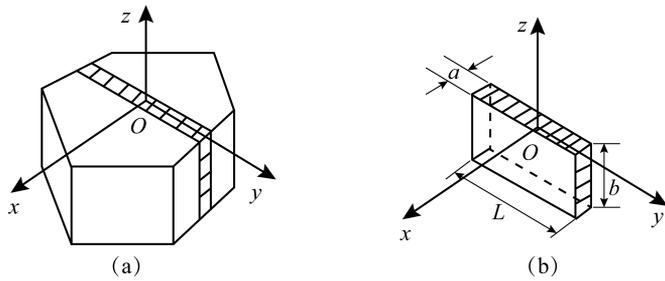


图 1-30 石英晶体的晶轴

当石英晶体未受外力作用时,正、负离子(即  $\text{Si}^{4+}$  和  $2\text{O}^{2-}$ )正好分布在正六边形的顶角上,形成三个大小相等、互成  $120^\circ$  的电偶极矩  $\boldsymbol{p}_1$ 、 $\boldsymbol{p}_2$ 、 $\boldsymbol{p}_3$ ,如图 1-31a 所示。其大小为  $p_1=p_2=p_3=ql$ ,  $q$  为电荷量,  $l$  为正、负电荷间的距离。电偶极矩方向为负电荷指向正电荷。此时,正、负电荷中心重合,电偶极矩的矢量和等于 0,即  $\boldsymbol{p}_1+\boldsymbol{p}_2+\boldsymbol{p}_3=0$ ,晶体表面不产生电荷,从整体上说它呈中性。

当石英晶体受到沿  $x$  轴方向的压力作用时,将产生压缩变形,正、负离子的相对位置随之变动,正、负电荷中心不再重合,如图 1-31b 所示。电偶极矩在  $x$  轴方向上的分量  $(\boldsymbol{p}_1+\boldsymbol{p}_2+\boldsymbol{p}_3)_x > 0$ ,所以在  $x$  轴正方向上的晶体表面出现正电荷;而其在  $y$  轴和  $z$  轴方向上的分量均为 0,所以垂直于  $y$  轴和  $z$  轴的晶体表面上不出现电荷。这种沿  $x$  轴施加作用力,而在垂直于  $x$  轴的晶体表面上产生电荷的现象,称为纵向压电效应。

当石英晶体受到沿  $y$  轴方向的压力作用时,将产生压缩变形,正、负离子的相对位置随之变动,正、负电荷中心不再重合,如图 1-31c 所示。电偶极矩在  $x$  轴方向上的分量  $(\boldsymbol{p}_1+\boldsymbol{p}_2+\boldsymbol{p}_3)_x < 0$ ,因此在  $x$  轴正方向上的晶体表面出现负电荷;而在  $y$  轴和  $z$  轴方向上的分量均为 0,因此垂直于  $y$  轴和  $z$  轴的晶体表面上不出现电荷。这种沿  $y$  轴施加作用力,而在垂直于  $x$  轴的晶体表面上产生电荷的现象,称为横向压电效应。

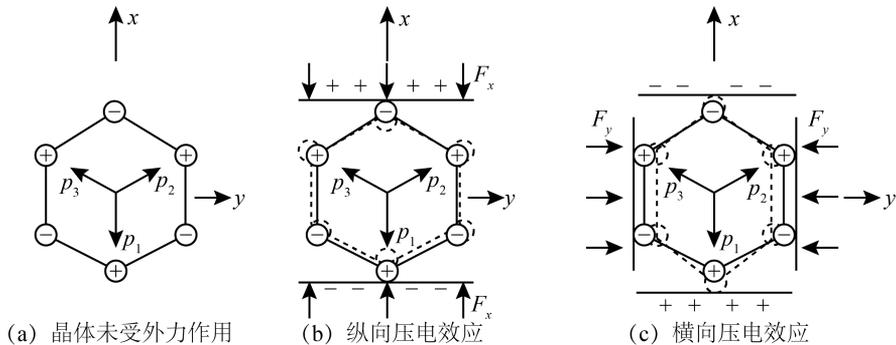


图 1-31 石英晶体压电效应示意图

当晶体受到沿  $z$  轴方向的作用力(无论压力或拉力)时,因为晶体在  $x$  轴和  $y$  轴方向的变形相同,正、负电荷中心保持重合,电偶极矩在  $x$ 、 $y$  轴方向上的分量等于零,所以沿光轴方向施加力,石英晶体不会产生压电效应。

需要指出的是,如果晶体沿  $x$  轴、 $y$  轴方向受到作用力,同样有压电效应,只是电荷的极性将随之改变。石英晶体上电荷极性与受力方向的关系如图 1-32 所示。

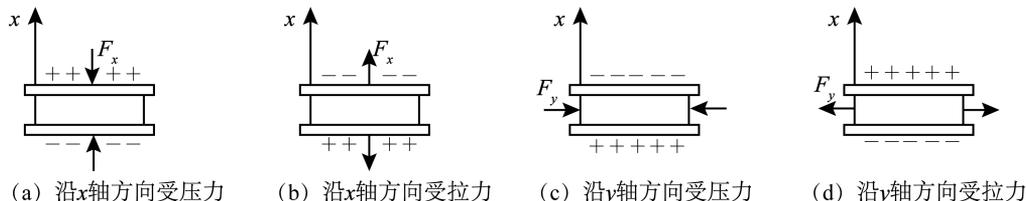


图 1-32 晶体切片上电荷极性与受力方向的关系

## 2. 压电陶瓷的压电效应

压电陶瓷是人工制造的多晶体压电材料,其内部的晶粒有许多自发极化的电畴。电畴有一定的极化方向,从而存在电场。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。陶瓷电容的极化示意图如图 1-33 所示。

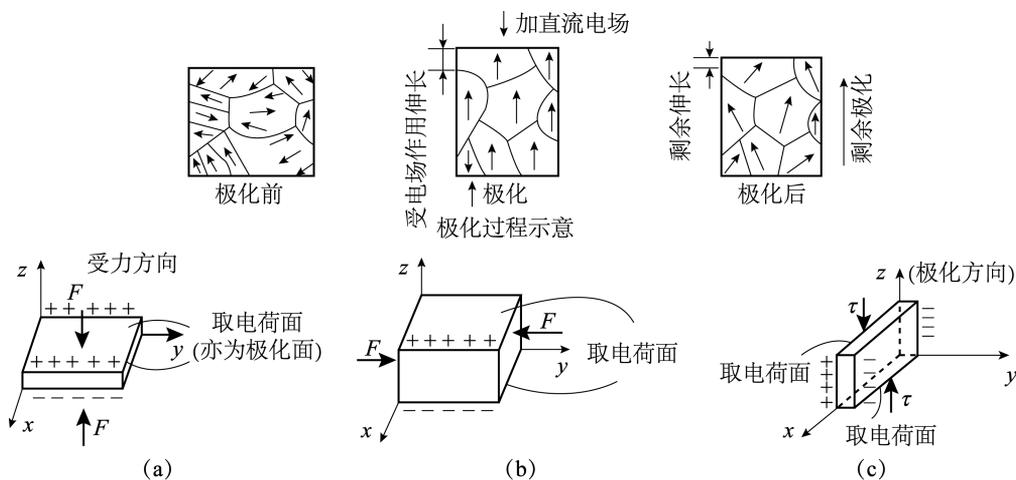


图 1-33 陶瓷电容的极化示意图

在陶瓷上施加外电场时,电畴的极化方向发生转动,趋向于按外电场的方向排列,从而使材料得到极化。外电场越强,就有更多的电畴转向外电场方向。当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,将外电场去掉,电畴的极化方向基本不变,即剩余极化强度很大,这时的材料才具有压电特性。

极化处理后,陶瓷材料内部仍存在有很强的剩余极化。当陶瓷材料受到外力作用时,电畴的界限发生移动,电畴发生偏转,从而引起剩余极化强度的变化,因而在垂直于极化方向的平面上将出现极化电荷的变化。这种因受力而产生的由机械效应转变为电效应,将机械能转变为电能的现象,就是压电陶瓷的正压电效应。电荷量的大小与外力成正比关系,即

$$q = d_{33} F \quad (1-46)$$

式中  $d_{33}$ ——压电陶瓷的压电系数；  
 $F$ ——作用力。

压电陶瓷的压电系数比石英晶体的压电系数大得多，所以采用压电陶瓷制作的压电式传感器的灵敏度较高。极化处理后的压电陶瓷材料的剩余极化强度和特性与温度有关，它的参数也随时间变化，从而使其压电特性减弱。

最早使用的压电陶瓷材料是钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ )，它是由碳酸钡和二氧化钛按一定比例混合后烧结而成的，其压电系数约为石英晶体的 50 倍，但其使用温度较低，最高使用温度只有  $70\text{ }^\circ\text{C}$ ，温度稳定性和机械强度都不如石英晶体。

## 知识拓展

### 响沙的由来

有一个有趣的故事可以让我们来更形象地理解压电效应。

当今世界上已发现响沙一百多处，我国有甘肃敦煌的鸣沙山、宁夏中卫的沙坡头、内蒙古鄂尔多斯的银肯响沙湾，以及内蒙古赤峰市翁牛特旗布力彦的东额其响沙等。响沙的原因并不神秘，由于沙粒机械成分一致，都是中粒沙或细粒沙，几乎没有灰尘，石英的含量又高，在干燥无风的天气里，当给它一定的压力时，便产生了压缩或延伸，这时，它的表面产生电荷，矿物学上称这种特性为压电性质。压电的晶体收缩和膨胀，便产生响声，再加上响沙的沙坡背风向阳，河槽上空形成一道人眼看不见的蒸气墙，与沙坡正好形成一个天然的“共鸣箱”，响声就更大了。其实那响声是挤压的石英沙子产生了电荷，当足够多电荷聚集在地表并上升到空中时，引起电荷放电的声响。这就是响沙的由来。

## 二、压电材料

### (一) 压电材料的主要特性参数

为了更好地了解各种压电材料的特性，以便选择合适的压电材料制作传感器，必须了解压电材料的主要特性参数。

#### (1) 压电常数。

压电常数是反映压电效应强弱的物理参数。它直接关系到压电传感器输出的灵敏度。

#### (2) 弹性常数。

弹性常数是反映压电材料的固有频率和动态特性的特性参数。

#### (3) 介电常数。

对于一定形状、尺寸的压电元件，其固有电容与介电常数有关，而固有电容又影响压电传感器的频率下限。

#### (4) 机电耦合系数。

在压电效应中，转换输出的电能能量与输入的机械能能量之比的平方根称为机电耦合常数。它反映了压电材料机电能量转换的效率。

#### (5) 电阻。

压电材料的绝缘电阻将减少电荷泄漏，从而改善压电式传感器的低频特性。

(6)居里点。

压电材料开始丧失压电特性时的温度称为居里点。

制作压电式传感器时,选择合适的压电材料是关键,所选用的压电材料应具有以下性能:

- ①大的压电常数,有较好的转换性能;
- ②机械强度高,刚度大,有较高的固有振动频率;
- ③高电阻率和大的介电常数,以减弱外部分布电容的影响,获得良好的低频特性;
- ④高的居里点,以期得到较宽的工作温度范围;
- ⑤温度、湿度和时间稳定性好。

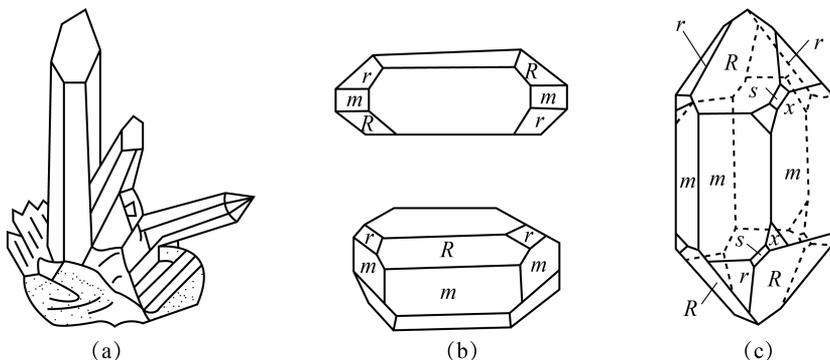
## (二)压电材料的分类及特性

目前,压电材料可分为三大类:一是压电晶体(单晶),包括压电石英晶体和其他压电单晶;二是压电陶瓷(多晶半导瓷);三是新型压电材料。其中,新型压电材料可分为压电半导体材料和有机高分子压电材料两种。

在传感器技术中,目前国内外普遍应用的压电材料有压电晶体中的压电石英晶体和压电陶瓷中的钛酸钡与锆钛酸铅系列压电陶瓷。

### 1. 石英晶体

石英晶体俗称水晶,有天然和人工之分。目前,传感器中使用的均是居里点为 $573\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,晶体结构为六角晶系的 $\alpha$ -石英。其外形呈六角棱柱体,如图1-34a所示。 $\alpha$ -石英由 $m$ 、 $R$ 、 $r$ 、 $s$ 、 $x$  5组共30个晶面组成。在讨论晶体结构时,常采用对称晶轴坐标 $abcd$ ,其中 $c$ 轴与晶体上、下晶锥顶点连线重合,如图1-34c所示(此图为左旋石英晶体,它与右旋石英晶体的结构成镜像对称,压电效应极性相反)。在讨论晶体机电特性时,采用 $xyz$ 右手直角坐标较方便,并统一规定: $x$ 轴与 $a$ (或 $b$ 、 $d$ )轴重合,称为电轴,它穿过六棱柱的棱线,在垂直于此轴的面上压电效应最强; $y$ 轴垂直 $m$ 面,称为机轴,在电场的作用下,沿该轴方向的机械变形最明显; $z$ 轴与 $c$ 轴重合,称为光轴,也叫中性轴,光线沿该轴通过石英晶体时无折射,沿 $z$ 轴方向上没有压电效应。



$m$ —柱面; $R$ —大棱面; $r$ —小棱面; $s$ —棱界面; $x$ —棱角面

图1-34 理想石英晶体

压电石英的主要性能特点如下:

- ①压电常数小,时间和温度稳定性极好,且对温度、湿度的变化不敏感,压电常数

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

和介电常数的温度稳定性好,常温下几乎不变,适用于做工作温度范围很宽的传感器;

②机械强度和品质因素高,弹性模量大,允许应力高达  $6.8 \times 10^7 \sim 9.8 \times 10^7$  Pa,刚度大,固有频率高,动态特性好,且其在冲击力作用下漂移也很小,所以适用于测量大量程的力和加速度;

③居里点为  $573^\circ\text{C}$ ,无热释电性,且绝缘性、重复性均好。

天然石英的上述性能较人工石英要差,但由于天然石英资源少,价格昂贵,而且存在一些缺陷,所以只用于精度和稳定性要求比较高的场合和制作标准传感器。

## 2. 压电陶瓷

压电陶瓷的发现和应时间并不长。最早发现的具有压电性能的陶瓷材料是钛酸钡,时间是在 1942 年。在短短的几十年里,压电陶瓷材料由于制作工艺简单、耐潮湿、耐高温等优点,发展极为迅速,应用日益广泛,从日常生活用的压电式电子打火机到压电扬声器,乃至飞船、导弹中的振动测量传感器,都要用到压电陶瓷材料。

压电陶瓷是人工制作的多晶体,其压电常数为石英晶体的几倍,因此灵敏度高,在检测、电子和超声领域中应用普遍。传感器技术中应用的压电陶瓷,按其组成基本元素多少可分为如下几种:

(1)二元系压电陶瓷。

二元系压电陶瓷主要包括钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ )、钛酸铅( $\text{PbTiO}_3$ )、锆钛酸铅系列(PZT)和铌酸盐系列。其中以钛酸钡,尤其以锆钛酸铅系列压电陶瓷应用最广。

(2)三元系压电陶瓷。

目前应用广泛的三元系压电陶瓷由铌镁酸铅 $[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]$ 、钛酸铅( $\text{PbTiO}_3$ )和锆钛酸铅 $[\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3]$ 三成分配比而成。另外,还有专门制造的具有耐高温、高压和电击穿性能的铌锰酸铅系、镁碲酸铅等。

(3)四元系压电陶瓷。

目前使用较多的四元系压电陶瓷材料是锆钛酸铅 $[\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3]$ ,PZT 系列]。它由钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ )和锆酸铅( $\text{PbZrO}_3$ )组成,具有较高的压电系数和较高的工作温度。铌镁酸铅是 20 世纪 60 年代发展起来的压电陶瓷,是由铌镁酸铅 $[\text{Pb}(\text{MgNb})\text{O}_3]$ 、锆酸铅( $\text{PbZrO}_3$ )和钛酸铅( $\text{PbTiO}_3$ )按不同比例配成的不同性能的压电陶瓷,具有极高的压电系数和较高的工作温度,而且能承受较高的压力。



## 知识拓展

### 新型压电材料

#### 1. 压电半导体材料

硫化锌( $\text{ZnS}$ )、碲化镉( $\text{CdTe}$ )、氧化锌( $\text{ZnO}$ )、硫化镉( $\text{CdS}$ )等,这些材料的显著特点是既具有压电特性又具有半导体特性,因此既可用其压电性研制传感器,又可用其半导体特性制作电子器件,还可以两者合一,集元件与线路于一体,研制成新型集成压电传感器测试系统。

#### 2. 有机高分子压电材料

高分子压电材料大致可分为两类:一类是某些合成高分子聚合物,经延展拉伸

和电极化后具有压电性,称为高分子压电薄膜,如聚氟乙烯(PVF)、聚氯乙烯(PVC)、聚碳酸酯、聚偏二氟乙烯(PVDF)、聚氨酯等。它们的独特优点是质轻柔软、抗拉强度高、蠕变小、耐冲击,击穿强度为 $150\sim 200\text{ kV/mm}$ ,可以大量生产并制成较大的面积。因此,在一些特殊用途的传感器中,此类压电材料获得广泛的应用。另一类是高分子化合物中掺杂压电陶瓷PZT或 $\text{BaTiO}_3$ 粉末制成的高分子压电薄膜。这种复合材料既保持了高分子压电薄膜的柔软性,又具有较高的压电常数和机电耦合常数。

### 三、石英晶体的压电方程

需要指出的是,压电效应式(1-46)只适用于各向同性的电介质材料。对于各向异性的压电材料,方程必须能反映出材料机电特性的方向性。因此,式(1-46)应表示为矢量矩阵形式。

设有一 $X0^\circ$ 切型的正六面体左旋石英晶片,在三维直角坐标系内的力-电作用状况如图1-35所示。图中: $T_1、T_2、T_3$ 分别为沿 $x、y、z$ 向的正应力分量(压应力为负), $T_4、T_5、T_6$ 分别为绕 $x、y、z$ 轴的切应力分量(顺时针方向为负), $\sigma_1、\sigma_2、\sigma_3$ 分别为在 $x、y、z$ 轴面上的总电荷密度(或电位移 $D$ )。

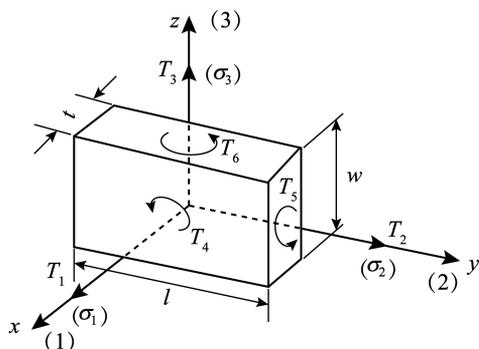


图 1-35 石英晶片的力电分布

因此,各向异性的石英晶片,其单一压电效应可用下式表示

$$\sigma_{ij} = d_{ij} T_j \quad (1-47)$$

式中  $i$ ——电效应(场强、极化)方向的下标, $i=1,2,3$ ;

$j$ ——力效应(应力、应变)方向的下标, $j=1,2,\dots,6$ ;

$T_j$ —— $j$ 方向的外施应力分量,Pa;

$\sigma_{ij}$ —— $j$ 方向的应力在 $i$ 方向的极化强度(或 $i$ 面上的电荷密度), $\text{C/m}^2$ ;

$d_{ij}$ —— $j$ 方向应力引起 $i$ 面产生电荷时的压电常数, $\text{C/N}$ 。

当 $i=j$ 时,石英晶体的压电效应为纵向压电效应;当 $i\neq j$ 时,石英晶体的压电效应为横向压电效应。推广到一般情况,即石英晶片在任意的多方向的力同时作用下的全压电效应,可用下列压电方程表示

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^6 d_{ij} T_j \quad (i=1,2,3) \quad (1-48)$$

写成矩阵形式为

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} \quad (1-49)$$

或简写成

$$\sigma = dT \quad (1-50)$$

式中  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——在  $x, y, z$  轴面上产生的总电荷密度。

因此,完全各向异性压电晶体的压电特性——即机械弹性与电的介电性之间的耦合特性,可用压电常数矩阵表示如下

$$[d_{ij}] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \quad (1-51)$$

对于不同的压电材料,由于各向异性的程度不同,上述压电矩阵的 18 个压电常数中,实际独立存在的个数也各不相同,这可通过测试获得。如  $X0^\circ$  切型石英晶体的压电常数矩阵,具体为

$$[d_{ij}] = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{25} & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1-52)$$

可见,由于石英晶体结构的对称性较好,它是介于各向同性和完全各向异性之间的晶体,因此它独立的压电常数只有两个: $d_{11}, d_{14}$ 。

当  $X0^\circ$  石英晶片自由地处在一定方向外电场  $E_i$  的作用下,导致晶体内应力而产生晶片某方向的应变  $S_i$  时,由实验同样可得,其逆压电方程为

$$S_i = \sum_{i=1}^3 d_{ij} E_i \quad (1-53)$$

写成具体的矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & 0 & 0 \\ -d_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & -d_{14} & 0 \\ 0 & -2d_{11} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1-54)$$

或简写成:

$$S = dE \quad (1-55)$$

可见,逆压电方程的压电常数矩阵是正压电方程压电常数矩阵的转置矩阵。

综上所述,可以归纳出如下结论。

①压电晶体的正压电效应和逆压电效应是对应存在的,若某一方向上有正压电效

应,则在此方向上必定存在逆压电效应,而且力-电之间呈线性关系。

②石英晶体不是在任何方向上都存在压电效应。图 1-36 清楚地表明了这一点。

a. 在  $x$  方向:只有  $d_{11}$  的纵向压电效应(见图 1-36a)、 $d_{12}$  的横向压电效应(见图 1-36b)和  $d_{14}$  的剪切压电效应(见图 1-36c)。

b. 在  $y$  方向:只有  $d_{25}$  和  $d_{26}$  的剪切压电效应(见图 1-36c、d)。

c. 在  $z$  方向:无任何压电效应。

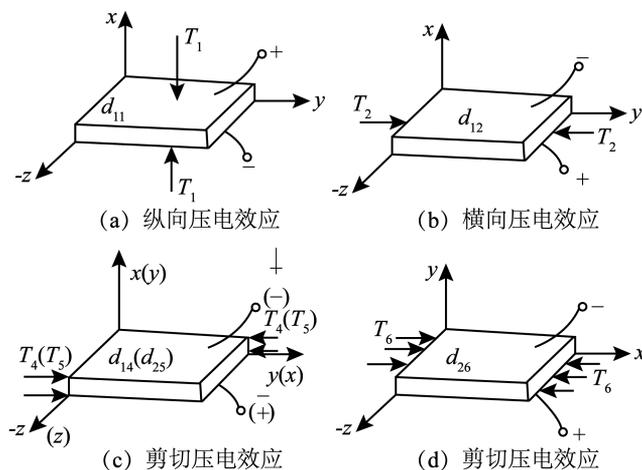


图 1-36 右旋石英晶体的四种压电效应

## 四、压电式传感器

### (一)压电式传感器的基本结构

凡是能转换成力的机械量如位移、压力、冲击、振动、加速度等,都可用相应的压电式传感器测量,它们用以实现力-电转换功能的基本结构是共同的。压电式传感器的基本结构可归纳如下。

#### 1. 基座和外壳

为了隔离试件应变和环境声、磁、热干扰,并增强刚性,基座通常都很厚,并采用刚度大的不锈钢或钛合金材料。而壳体采用与基座相同的材料,起密封、屏蔽作用。

#### 2. 压电元件

根据设计需要,压电元件的材料可取压电晶体或陶瓷,结构形式较多采用双晶片并联形式。压电加速度传感器中常采用平板式或圆筒式结构,取厚度压缩或剪切变形方式。

#### 3. 敏感元件

敏感元件是指加速度传感器中的  $m-k-c$  系统、位移传感器中的弹簧以及压力传感器中的弹性膜片(盒)等。 $m-k-c$  系统中质量块通常采用高比重合金,以利于缩小结构和尺寸。

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

#### 4. 预载件

预载件即压块、弹簧或螺栓螺母等,用以对压电元件施加预紧力。施加预紧力的作用是:

- ①消除压电元件内外接触面的间隙,提高传感器弹性系统的刚度,从而获得良好的静态(灵敏度和线性)、动态特性;
- ②只有足够的预紧力才能确保拉力、剪力和扭矩传感器获得足够的正压力后靠摩擦传递切向力;
- ③利用预载对外力的分载原理,以实现对外力的分载调节,改变传感器的灵敏度、线性或量程。

#### 5. 引线 and 接插件

引线和接插件用于与外接电缆连接。

### (二) 压电式传感器的应用特点

压电式传感器具有 3 大应用特点:

- ①灵敏度和分辨率高,线性范围大,结构简单、牢固,可靠性好,寿命长;
- ②体积小、重量轻,刚度、强度、承载能力和测量范围大,动态响应频带宽,动态误差小;
- ③易于大量生产,便于选用,使用和校准方便,并适用于近测、遥测。

目前,压电式传感器应用最多的仍是测力,尤其是对冲击、振动加速度的测量。在众多的测振传感器中,压电加速度传感器占 80% 以上。

基于逆压电效应的超声波发生器(换能器)是超声检测技术及仪器的关键器件。此外,逆压电效应还可作力和运动(位移、速度、加速度)发生器——压电驱动器。利用压电陶瓷的逆压电效应来实现微位移,可不必像传统的传动系统那样必须通过机械传动机构把转动变为直线运动,从而避免了机构造成的误差,而且其具有位移分辨率极高(可达  $10^{-3} \mu\text{m}$  级),结构简单,尺寸小,发热少,无杂散磁场和便于遥控等特点。

### (三) 压电式传感器的等效电路和测量电路

#### 1. 压电式传感器的等效电路

理想压电式传感器的压电元件的等效电路如图 1-37 所示。由压电元件的工作原理可知,压电式传感器可以看作一个电荷发生器。同时,它也是一个电容器,晶体上聚集正、负电荷的两个表面相当于电容的两个极板,极板间的物质等效于一种介质,则其电容量为

$$C_e = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1-56)$$

式中  $A$ ——极板面积;

$d$ ——压电片厚度;

$\epsilon$ ——压电材料的介电常数。

所以,理想压电式传感器可以等效为一个与电容  $C_a$  串联的电压源,如图 1-38a 所示。电容器上的电压  $U_a$ 、电荷量  $q$  和电容量  $C_a$  之间的关系为

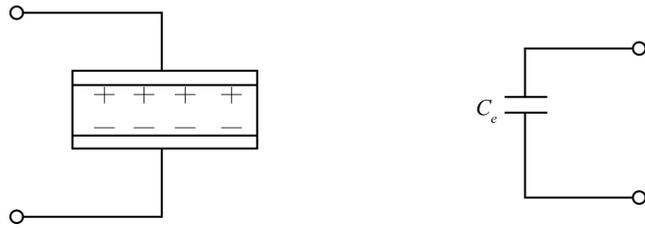


图 1-37 理想压电式传感器压电元件的等效电路

$$U_a = \frac{q}{C_a} \quad (1-57)$$

理想压电式传感器也可以等效为一个电荷源,如图 1-38b 所示。

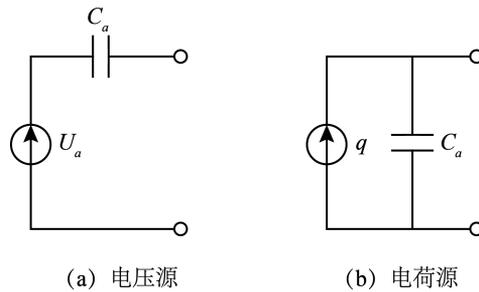


图 1-38 理想压电式传感器的等效电路

当压电式传感器介入测量仪器或测量电路后,必须考虑后续测量电路的输入电容  $C_i$ 、连接电缆的寄生电容  $C_c$ 、后续电路中放大器的输入电阻  $R_i$  和压电式传感器自身的泄漏电阻  $R_a$ 。所以实际压电式传感器在测量系统中的等效电路如图 1-39 所示。

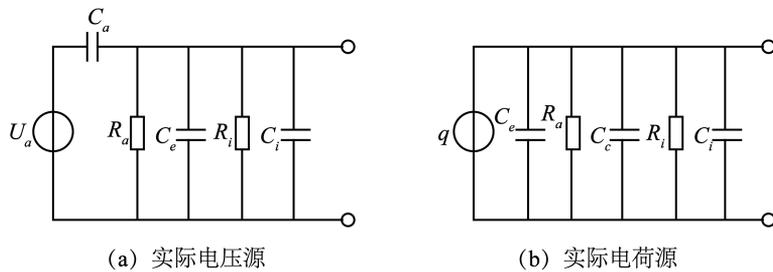


图 1-39 实际压电式传感器的等效电路

压电式传感器的灵敏系数有电压灵敏系数  $k_U$  和电荷灵敏系数  $k_q$  两种。它们分别表示单位力产生的电压和单位力产生的电荷。它们的计算公式及关系为

$$k_U = \frac{q}{C_a F}$$

$$k_q = \frac{q}{F} \quad (1-58)$$

$$k_U = \frac{k_q}{C_a}$$

chapter  
01

chapter  
02

chapter  
03

chapter  
04

chapter  
05

chapter  
06

## 2. 压电式传感器的电压放大器

电压放大器又称为阻抗变换器,其主要作用是把压电元件的高输出阻抗变换为传感器的低输出阻抗,并保持输出电压与输入电压成正比。

(1) 传感器压电输出特性。

传感器压电输出特性即是指放大器输入特性。由图 1-40 可得回路输出为

$$\dot{U}_t = \dot{I} Z = \frac{U_a C_a j\omega R}{1 + j\omega RC}, Z = \frac{R}{1 + j\omega RC'} \quad (1-59)$$

式中  $Z$ ——电阻  $R$  和电容  $C$  并联简化后的阻抗;

$R$ ——测量回路等效电阻,  $R = \frac{R_a R_i}{R_a + R_i}$ ;

$C$ ——测量回路等效电容,  $C = C_a + C' = C_a + C_i + C_c$ ;

$\omega$ ——压电转换角频率。

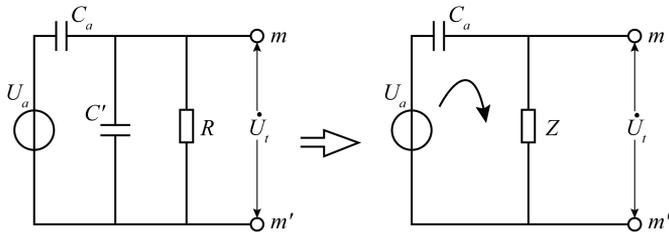


图 1-40 电压放大器简化电路

假设压电元件取压电常数为  $d_{33}$  的压电陶瓷,并在其极化方向上受有角频率为  $\omega$  的交变力  $F = F_m \sin \omega t$ ,则压电器件的输出为

$$\dot{U}_a = \frac{\dot{Q}}{C_a} = \frac{d_{33}}{C_a} \dot{F} = \frac{d_{33}}{C_a} F_m \sin \omega t \quad (1-60)$$

代入式(1-59)可得压电回路输出特性和电压灵敏系数分别为

$$\dot{U}_t = d_{33} \frac{\dot{F} j\omega R}{1 + j\omega RC} \quad (1-61)$$

$$K_u(j\omega) = \frac{\dot{U}_t}{\dot{F}} = d_{33} \dot{F} \frac{j\omega R}{1 + j\omega RC}$$

其幅值和相位分别为

$$K_{um} = \left| \frac{\dot{U}_t}{\dot{F}_m} \right| = \frac{d_{33} \omega R}{1 + (\omega RC)^2}$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctan(\omega RC) \quad (1-62)$$

(2) 动态特性(动态误差)。

这里着重讨论动态条件下压电回路实际输出电压灵敏度相对理想情况下的偏离程度,即幅频特性。所谓理想情况是指回路等效电阻  $R = \infty$ (即  $R_a = R_i = \infty$ ),电荷无

泄漏。这样可得理想情况的电压灵敏系数为

$$K_{um}^* = \frac{d_{33}}{C} = \frac{d_{33}}{C_a + C_c + C_i} \quad (1-63)$$

可见,它只与回路等效电容  $C$  有关,而与被测量的变化频率无关。因此

$$k = \frac{K_{um}}{K_{um}^*} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{\frac{\omega}{\omega_1}}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + (\omega \tau)^2}} \quad (1-64)$$

式中  $\omega$ ——测量回路角频率;

$\tau$ ——测量回路时间常数,  $\tau = \frac{1}{\omega_1} = RC$ 。

综上所述,可得出如下结论。

①在设计或应用压电式传感器时,可根据给定的精度  $\delta$ ,合理地选择电压放大器  $R_i$  或被测量频率限  $f$ 。

②由于采用电压放大器的压电式传感器,其输出电压灵敏度受电缆分布电容  $C_c$  的影响,因此电缆的变动将使已标定的灵敏度改变。可见连接电线不要太长,而且不能随意更换电缆,否则会使传感器实际灵敏度与出厂校正灵敏度不一致,从而导致测量误差。

不过,由于固态电子元件和集成电路的迅速发展,微型电压放大器可以与传感器做成一体,可以克服这种电路的缺点,而且无需特制的低噪声电缆,因此它有广泛的应用前景。电压放大器(阻抗变换器)因其线路简单、成本低、工作稳定可靠而被广泛应用。

### 3. 压电式传感器的电荷放大器

由于电压放大器使所配接的压电式传感器的电压灵敏度随寄生电容及传感器自身电容的变化而变化,而且电缆的更换带来重新校正灵敏度的烦恼,因此又发展出了更便于传输的电荷放大器。目前电荷放大器已被公认是一种较好的冲击测量放大器。

电荷放大器实质上是负反馈放大器,其输出电压与输入电荷成正比。它的基本电路如图 1-41 所示,等效电路如图 1-42 所示。

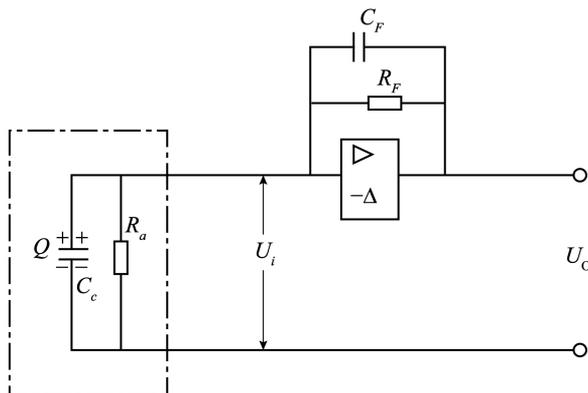


图 1-41 电荷放大器基本电路图

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

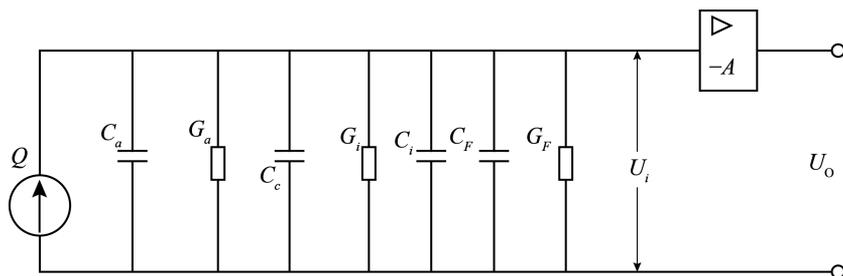


图 1-42 电荷放大器等效电路图

当放大器开环增益、输入电阻、反馈电阻相当大时,输出电压为

$$U_o = \frac{-AQ}{(1+A)C_F + C_a + C_c + C_i} \quad (1-65)$$

式中  $C_a$ ——传感器压电元件的电容;

$C_c$ ——电缆电容;

$C_i$ ——放大器输入电容;

$C_F$ ——放大器反馈电容;

$A$ ——电极之间的横截面积;

$Q$ ——输入电荷。

当  $A$  足够大时,  $(1+A)C_F \gg C_a + C_c + C_i$ , 则

$$U_o = \frac{-Q}{C_F} \quad (1-66)$$

式(1-66)表明,其输出电压  $U_o$  正比于输入电荷  $Q$ , 输出与输入反相, 而且输出灵敏度不受电缆分布电容的影响。但实际上, 电缆电容, 特别是在远距离传输时, 会对测量结果带来影响, 当  $C_i$  太小时, 可以忽略。由此产生的测量误差也叫衰减度, 计算公式如下

$$\delta_r = \frac{C_a + C_c}{C_a + C_c + (1+A)C_F} \quad (1-67)$$

由此可知:

①电荷放大器的输出电压仅与输入电容量和反馈电容有关, 若保持  $C_F$  数值不变, 则输出电压正比于输入电荷量;

②当  $(1+A)C_F \gg 10(C_a + C_c + C_i)$  时, 认为传感器的灵敏度与电缆电容无关, 更换电缆或使用较长的电缆时, 不用重新校正传感器的灵敏度;

③为了得到必要的测量精度,  $C_F$  的温度和时间稳定性要好, 实际电路中, 考虑到被测量的大小,  $C_F$  的容量宜做成可选择的;

④考虑到电容负反馈线路在直流工作时, 相当于开路状态, 因此对电缆噪声比较敏感, 放大器的零漂也比较大, 为了减小零漂, 提高放大器工作稳定性, 一般在反馈电容的两端并联一个电阻  $R_F$  ( $10^{10} \sim 10^{14} \Omega$ ) 以提高直流反馈。

电荷放大器的优点突出, 缺点是线路较复杂, 调整困难, 成本较高。

#### (四) 压电式传感器的应用

##### 1. 压电式测力传感器

压电式测力传感器是利用压电元件直接实现力-电转换的传感器。在拉、压场合,通常较多采用双片或多片石英晶片作压电元件。

压电式测力传感器刚度大,测量范围宽,线性及稳定性高,动态特性好。当采用长时间常数的电荷放大器时,可测量准静态力。按测力状态分,压电式测力传感器有单向、双向和三向三种。它们在结构上基本一样。

图 1-43 为压电石英三向压电式测力传感器的结构简图。其压电元件是由三对不同切型的石英片组成,中间一对由于具有纵向压电效应,可以测得主切削力  $P_z$ ;另外两对具有切向效应,方向互成  $90^\circ$ ,可以测量径向力  $P_y$  与进给力  $P_x$ 。所以,当空间任何方向的力作用在传感器上时,便能自动地分解成三个互相垂直的分力。

多向压电式测力传感器的优点在于可以简化测力仪结构,提高测力仪刚度,降低制造成本。

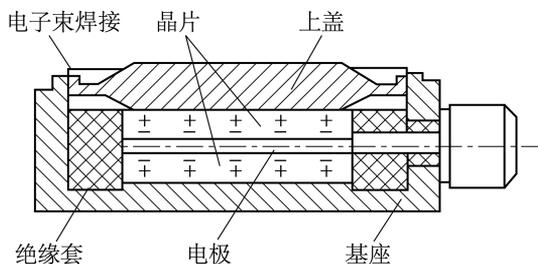


图 1-43 压电石英三向压电式测力传感器

压电式测力传感器在机械制造领域里获得了越来越多的应用。除了广泛用于冲击和振动测量外,它还用于动态测力系统。近年来,在普通机床及机床自适应控制中,利用压电式测力传感器制成的压电动态切削测力仪可以对切削力的大小及其变化进行可靠的监视,还可检查刀具磨损,及时察觉表面质量的变化,防止机床过载,保持切削力恒定,控制和优化切削过程。因此这种测力仪已成为自动反馈控制系统中十分精确的传感元件。

##### 2. 压电式压力传感器

压电式压力传感器的结构类型很多,但它们的基本原理与结构仍与压电式加速度传感器和测力传感器大同小异。其最大的不同在于,压电式压力传感器必须通过弹性膜、盒等把压力收集、转换成力,再传递给压电元件。为保证静态特性及其稳定性,压电式压力传感器通常多采用石英晶体作压电元件。

图 1-44 给出了一种压电式压力传感器的结构。它采用两个相同的膜片对晶体施加预载力,从而可以消除由振动加速度引起的附加输出。

##### 3. 压电式加速度传感器

压电式加速度传感器结构原理图如图 1-45 所示。使用时,传感器固定在被测物体上,感受该物体的振动,惯性质量块产生惯性力,使压电元件产生变形。压电元件产

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

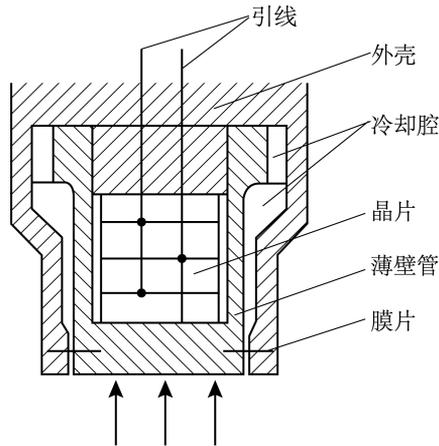


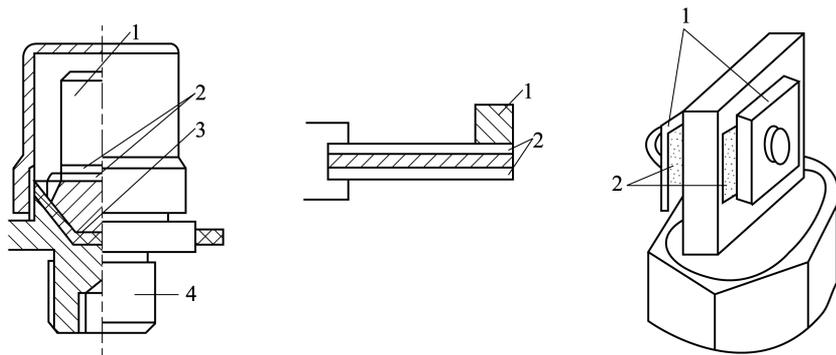
图 1-44 压电式压力传感器

生的变形和由此产生的电荷与加速度成正比。压电式加速度传感器可以做得很小,很轻,故对被测物体的影响很小。压电式加速度传感器的频率范围广、动态范围宽、灵敏度高,应用较为广泛。

图 1-45a 所示为单端中心压缩式加速度传感器结构原理图。其中,惯性质量块 1 安装在双压电晶体片 2 上,后者与引线 3 都用导电胶黏结在底座 4 上。底部螺钉与被测件刚性固联,传感器感受与试件相同频率的振动,质量块便有正比于加速度的交变力作用在晶片上。由于压电效应,压电晶片便产生正比于加速度的表面电荷。

图 1-45b 所示为梁式加速度传感器结构原理图。梁式加速度传感器是利用压电晶体弯曲变形的原理制成的,能测量较小的加速度,具有较高的灵敏度和很低的频率下限,能较好地测量地壳和建筑物的振动,在医学上也获得了广泛的应用。

图 1-45c 所示为挑担剪切式加速度传感器结构原理图。由于压电元件很好地与底座隔离,因此能有效地防止底座弯曲和噪声的影响,只受剪切力的作用,这就有效地削弱了由瞬变温度引起的热释电效应。挑担剪切式加速度传感器在测量冲击、小元件的振动测试中得到广泛的应用。



(a) 单端中心压缩式加速度传感器 (b) 梁式加速度传感器 (c) 挑担剪切式加速度传感器

1—惯性质量块;2—晶体片;3—引线;4—底座

图 1-45 压电式加速度传感器结构原理图

## 任务实施

一个标准大气压(atm)相当于 101.325 kPa。因此,对大气压力的测量可采用满量程为 200 kPa 的绝对压力传感器。

本项目选用 BOSCH 公司生产 HS20 型压电式集成绝对压力传感器。该传感器满量程为 200 kPa,工作电压为 5 V,系统由 10 个发光二极管依次点亮时,分别表示气压从 96 kPa 连续上升至 105 kPa。它能将气压的变化直接转换为输出电压的变化,并且具有温度漂移小和使用方便的优点,其输出电压随大气压力变化的线性较好。其工作原理图如图 1-46 所示。

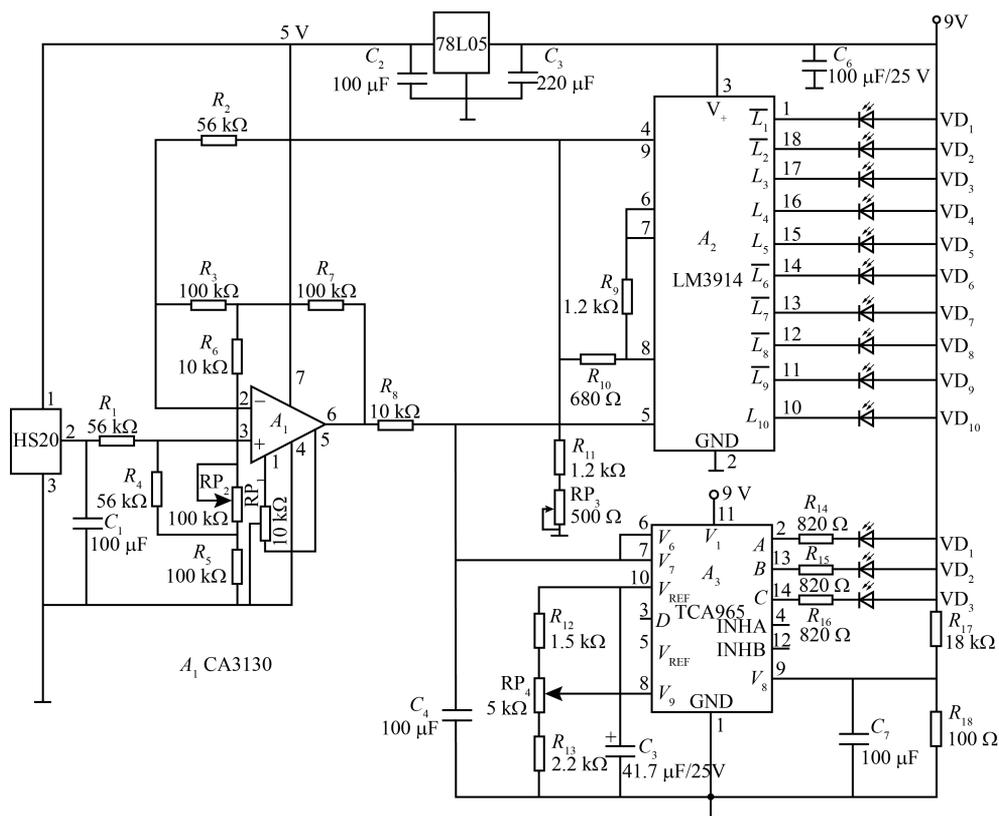


图 1-46 HS20 型压电式集成绝对压力传感器工作原理图

其工作原理如下。

### 1. 传感信号直流放大电路

该传感器是一个内部含有压电片和放大器的三端器件,其 1 脚接 +5 V 直流稳压电源 78L05 的输出(1 脚),3 脚接“地”(电源负端),2 脚为传感器电压输出端。由传感器性能可知,当气压由 96 kPa 上升至 105 kPa 时,传感器电压输出变化量近似等于 0.27 V,这是一个不算小的电压变化量,但按发光二极管驱动电路的输入电压要求而言,这个电压变化量尚不够大。因此,由 CA3130 型高输入阻抗运算放大器组成一个同相直流放大器,以便将传感器输出电压进行放大。该放大器的失调电压由电位器

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

$RP_1$  调整,放大倍数由电位器  $RP_2$  调整。CA3130 的输出电压送至发光二极管驱动器 LM3914 的输入端(5 脚)和窗口鉴别器 TCA965 的输入端。

图中,78L05 是三端式集成稳压器,固定输出稳定电压 +5 V。该电压使传感器 IC1 和运算放大器 IC2 提供稳定的直流电源,从而避免 +9 V 电源电压因驱动电路工作产生波动或电池用久时电压下降的影响。

### 2. 发光二极管驱动电路

发光二极管驱动电路主要由 LED 驱动集成电路 LM3914 及外接的 10 个发光二极管( $LED_1 \sim LED_{10}$ )构成,能按照 LM3914 输入端(5 脚)电平的高低驱动其中一个发光二极管发光。因输入电平高低与气压的高低成正比,所以从  $LED_1 \sim LED_{10}$  旁边的气压定标数字可以读出相应的气压值。为了保证测量的准确性,LM3914 的内部电路含有稳定的 1.2 V 电压基准(7 脚、8 脚为其输出端)以及分压器(4 脚、6 脚为分压器输入端),它们与外接电阻  $R_9 \sim R_{11}$  和电位器  $RP_3$  构成具有 10 级成倍递增的参考电压,用来与输入至 5 脚的直流电压进行比较。其中,接在 7 脚与 8 脚之间的电阻  $R_9$  可调整  $LED_1 \sim LED_{10}$  的发光亮度, $R_9$  阻值选取较大时发光亮度较低,反之则亮度较高。由于 LM3914 采用恒流源方式驱动接在各输出端的发光二极管,所以  $LED_1 \sim LED_{10}$  无需串联限流电阻。同时,LM3914 的基准电压输出还通过  $R_2$  加到 CA3130 的反相输入端,为 CA3130 提供稳定的电压基准。

当 LM3914 的输入端(5 脚)输入的直流电压从 2.13 V 连续升高到 2.40 V 时, $LED_1 \sim LED_{10}$  将依次点亮。于是将 LM3914 和 10 个发光二极管的电路连接在一起时,10 个发光二极管依次点亮,则表示气压从 96 kPa 连续上升至 105 kPa。调节电位器  $RP_3$  可以校准发光二极管所对应的气压值。另外,LM3914 还具有点/条状显示方式选择功能,即 9 脚与 11 脚相接时为点状显示,9 脚与 3 脚相接时为条状显示。例如,点状显示时, $LED_4$  点亮;若改为条状显示,则  $LED_1 \sim LED_4$  均点亮。

### 3. 窗口鉴别电路

TCA965 为集成窗口鉴别器。它与发光二极管  $LED_{11} \sim LED_{13}$ 、电阻  $R_{12} \sim R_{18}$  等组成气压变化趋向指示电路。电位器  $RP_4$  用来调节窗口的中心电平。若在气压稳定不变的情况下调节  $RP_4$  只能使发光二极管  $LED_{12}$  恰好点亮,那么气压升高时只有  $LED_{13}$  点亮,气压下降时只有  $LED_{11}$  点亮。因此,这三个发光二极管能分别指示气压稳定、气压上升和气压下降的三种趋向。TCA965 的输入电压来自 IC2 的输出电压,并经电阻  $R_8$  直接耦合,与 LM3914 的输入电压相同。

3 个电路连接在一起就构成天气预报仪的整机电路。其中,电容  $C_1 \sim C_7$  起去耦或抗杂波干扰的作用,不可随便省略。

## 拓展实训 金属箔式应变片——单臂电桥性能



### 实训目的

1. 了解金属箔式应变片的应变效应;

2. 了解单臂电桥工作原理和性能。



### 实训设备

应变式传感器实验模板,应变式传感器——电子秤、砝码、数显表。



### 实训内容

#### 1. 基本原理

电阻丝在外力作用下发生机械变形时,其电阻值发生变化,这就是电阻应变效应。描述电阻应变效应的关系式为

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (1-68)$$

式中  $\frac{\Delta R}{R}$ ——电阻丝电阻相对变化;

$K$ ——应变灵敏系数;

$\varepsilon$ ——电阻丝长度相对变化,  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 。

金属箔式应变片就是通过光刻、腐蚀等工艺制成的应变敏感元件,通过它可以转换被测部位受力状态变化。

#### 2. 实验步骤

(1)根据图 1-47,应变式传感器(电子秤)已装于应变传感器模板上。传感器中各应变片已接入模板左上方的  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 。加热丝也接于模板上,可用万用表进行测量判别。 $R_1=R_2=R_3=R_4=350\ \Omega$ ,加热丝阻值为  $50\ \Omega$  左右。

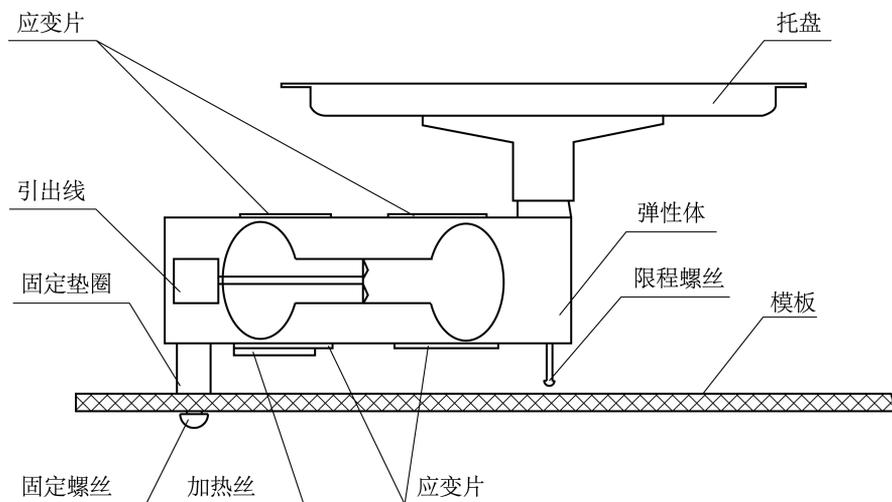


图 1-47 应变式传感器安装示意图

(2)接入模板电源  $\pm 15\text{ V}$ (从主控台引入),检查无误后,合上主控台电源开关,将实验模板调节增益电位器  $RW_3$  顺时针大致调节到中间位置,再进行差动放大器调零。方法为将差放的正负输入端与地短接,输出端与主控台面板上数显表输入端  $V_i$

chapter  
01chapter  
02chapter  
03chapter  
04chapter  
05chapter  
06

相连,调节实验板上调零电位器  $RW_4$ ,使数显表显示为零(数显表的切换开关打到 2 V 挡)。关闭主控箱电源(注意: $RW_3$ 、 $RW_4$  的位置一旦确定,就不能改变,一直到做完实验为止)。

(3)将应变式传感器的其中一个电阻应变片  $R_1$ (即模板左上方的  $R_1$ )接入电桥,作为一个桥臂与  $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$  接成直流电桥( $R_5$ 、 $R_6$ 、 $R_7$  模块内已接好),接好电桥调零电位器  $RW_1$ ,接上桥路电源  $\pm 4$  V(从主控台引入),如图 1-48 所示。检查接线无误后,合上主控台电源开关。调节  $RW_1$ ,使数显表显示为零。

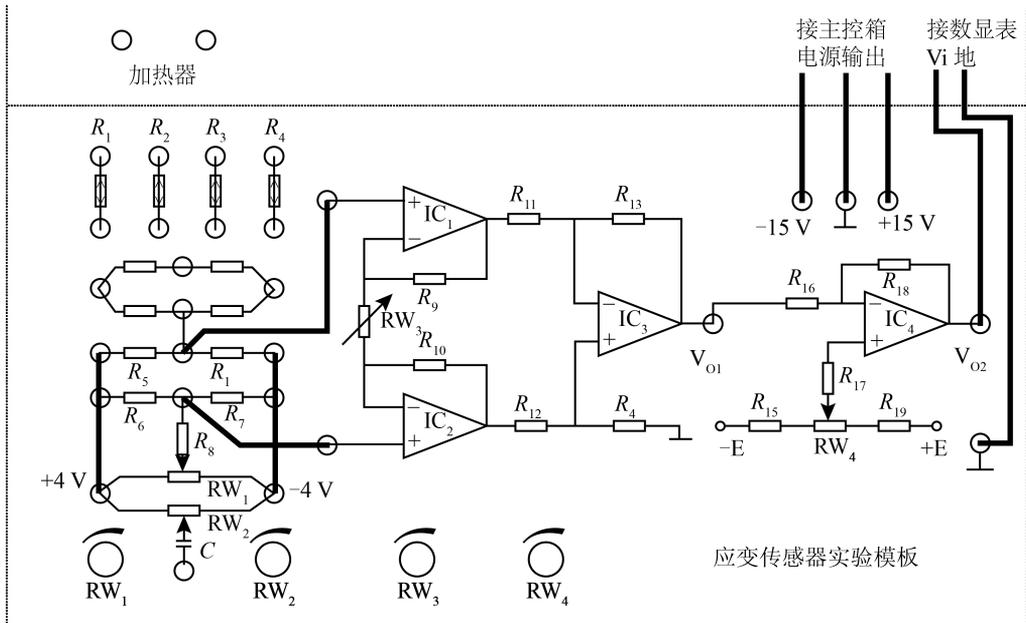


图 1-48 应变式传感器单臂电桥实验接线图

(4)在电子秤上放置一只砝码,读取数显表数值,依次增加砝码并读取相应的数显表值,直到 200 g(或 500 g)砝码加完。记下实验结果填入表 1-2 中,关闭电源。

表 1-2 数据记录表

重量/g									
电压/mV									

(5)根据上表计算系统灵敏系数。

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta W} \tag{1-69}$$

式中  $\Delta U$ ——输出电压变化量;

$\Delta W$ ——重量变化量。

非线性误差为

$$\delta f_1 = \frac{\Delta m}{yF \cdot S} \times 100\% \tag{1-70}$$

式中  $\Delta m$ ——输出值(多次测量时为平均值)与拟合直线的最大偏差;  
 $yF \cdot S$ ——满量程输出平均值,此处为 200 g(或 500 g)。

## 项目检测



### 填空题

1. 传感器是一种检测装置,能感受到被测量的\_\_\_\_\_,如温度、压力、流量、位移等,并将检测到的信息,按一定规律转换成\_\_\_\_\_或其他所需形式的信息输出,用以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录或控制等要求。
2. 传感器一般由\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_组成。
3. 压电式传感器是\_\_\_\_\_传感器。压电效应是可逆的,即存在逆压电效应,是一种“双向传感器”。
4. 当压电式传感器使用的电荷放大器的开环增益足够大时,电荷放大器的输出电压与传感器的\_\_\_\_\_成正比。



### 选择题

1. 利用相邻双臂桥检测的应变式传感器,为使其灵敏度高、非线性误差小,( )。
  - A. 两个桥臂都应当用大电阻值工作应变片
  - B. 两个桥臂都应当用两个工作应变片串联
  - C. 两个桥臂应当分别用应变变化相反的工作应变片
  - D. 两个桥臂应当分别用应变变化相同的工作应变片
2. 金属电阻应变片的电阻相对变化主要是由电阻丝的( )变化引起的。
  - A. 尺寸
  - B. 电阻率
  - C. 形状
  - D. 材质
3. 压电式传感器是个高内阻传感器,因此要求前置放大器的输入阻抗( )。
  - A. 很低
  - B. 很高
  - C. 较低
  - D. 较高
4. 下列选项中,属于传感器动态特性指标的是( )。
  - A. 重复性
  - B. 线性度
  - C. 灵敏度
  - D. 固有频率



### 简答题

1. 金属材料与半导体材料的应变电阻效应有什么不同?
2. 简述电阻应变片产生热输出(温度误差)的原因及其补偿方法。
3. 什么是压电效应? 石英晶体和压电陶瓷的压电效应有何不同之处?



### 计算题

1. 现有栅长为 3 mm 和 5 mm 两种丝式应变片,其横向效应系数分别为 5% 和 3%,欲用来测量泊松比  $\mu = 0.33$  的铝合金构件在单向应力状态下的应力分布(其应力分布梯度较大)。试问:应选用哪一种应变片? 为什么?
2. 如图 1-49 所示电路是电阻应变仪中所用的不平衡电桥的简化电路,图中  $R_2 = R_3 = R$  是固定电阻, $R_1$  与  $R_4$  是电阻应变片,工作时, $R_1$  受拉, $R_4$  受压, $\Delta R$  表示应变片发生应

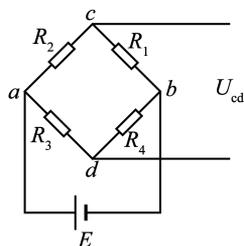


图 1-49 计算题 2 图

chapter 01

chapter 02

chapter 03

chapter 04

chapter 05

chapter 06

变后,电阻值的变化量。当应变片不受力,无应变时, $\Delta R=0$ ,桥路处于平衡状态;当应变片受力发生应变时,桥路失去平衡,这时,就用桥路输出电压  $U_{cd}$  表示应变片应变后电阻值的变化量。试证明: $U_{cd} = -(E/2)(\Delta R/R)$ 。

3. 用石英晶体加速度计测量机器的振动,已知加速度计的灵敏系数为  $5 \text{ pC/g}$  ( $g$  为重力加速度),电荷放大器的灵敏度为  $50 \text{ mV/pC}$ ,当机器振动达到最大加速度时,相应的输出幅值为  $2 \text{ V}$ ,求机器的振动加速度。(  $1 \text{ C}=10^{12} \text{ pC}$  )