

项目一

检测技术基础知识



知识目标

掌握测量、测量误差、传感器的基本概念；
掌握测量、测量误差、传感器的分类。



技能目标

掌握检测系统的组成,并了解检测系统各部分的作用；
了解传感器型号中各部分的含义。



相关知识

科学技术的发展与检测技术的发展是密切相关的,现代化的检测手段所具有的水平在很大程度上决定了科学技术的发展水平。检测技术达到的水平越高,科学技术的水平也就越高。另一方面,科学技术的进步又为检测技术提供了新的发展方向 and 有力保证。

检测技术就是利用传感器,将生产科研需要的电量和非电量信息转化成为易于测量、传输、显示和处理的电信号的过程。

传感器处于研究对象与测控系统的接口位置,是感知、获取与检测信息的窗口。在一切科学实验和生产过程中,特别是在自动检测和自动控制系统中获取的信息,都要通过传感器转换为易于传输与处理的电信号。

为了更好地掌握传感器与检测技术,需要对测量的基本概念、测量误差、传感器特性等方面的理论以及工程方法进行学习和研究。只有了解和掌握了这些基本理论,才能更有效地完成检测任务。

任务一 测量概述

在工程实践和科学实验中要获取检测对象信息的大小,即被测量的大小,就必须正确、及时地掌握各种信息。因此,信息采集的主要含义就是测量以及取得结果。

在工程中,需要将传感器与多台仪表组合在一起,才能完成信号的检测,这样便形成了测量系统。随着计算机技术及信息处理技术的发展,测量系统所涉及的内容不断得到充实。

一、测量的定义

测量是检测技术的重要组成部分,是以确定被测量值为目的的一系列操作。测量能够

帮助人们获得对客观事物定性的认识及定量的信息,寻找并发现客观事物的发展规律。在工业现场,测量更进一步的目的是利用测量所获得的信息来控制某一生产过程,通常这种控制作用是与检测系统紧密相关的。

测量过程实质上是一个比较过程,是一种把物理参数转换成具有意义的数字的过程。也就是说,测量是将被测量与同种性质的标准量进行比较,从而确定被测量相对于标准量的倍数。其数学表达式为

$$x = Ax_0 \quad (1-1)$$

式中, x 为被测量; A 为测量值; x_0 为标准量。

式(1-1)称为测量的基本方程式。它说明测量值 A 与标准量 x_0 有关, x_0 越小, A 越大。因此,一个完整的测量结果应包含 A 和 x_0 两部分内容。

二、测量方法的分类

针对不同测量任务进行具体分析以找出切实可行的测量方法,这对测量工作来说是十分重要的。从不同角度测量方法有不同的分类。

1. 按测量过程的特点分

测量方法按测量过程的特点可分为直接测量法、间接测量法和组合测量法。

1) 直接测量法

直接测量法是指在使用仪表或传感器进行测量时,不需要经过任何运算就能直接从仪表或传感器上读出测量结果的方法,如用电位差计测电动势等。直接测量法的优点是测量过程简单、迅速,缺点是测量精度不高。

2) 间接测量法

间接测量法是指用直接测量法测得与被测量有确切函数关系的一些物理量,然后通过计算求得被测量的方法,如通过测量电压 U 和测量电流 I 求功率 P 等。间接测量法的中间过程较多,花费时间较长,一般用在不方便直接测量或者缺少直接测量手段的场合。

3) 组合测量法

组合测量法是指被测量必须经过求解联立方程组,才能得到最后结果的方法。组合测量法是一种特殊的精密测量方法,不但操作起来复杂,而且花费时间长,因此,多用于科学实验或特殊场合。

2. 按测量仪表的特点分

测量方法按测量仪表的特点可分为接触测量法和非接触测量法。

1) 接触测量法

接触测量法是指传感器与被测量直接接触,承受被测量参数的作用,感受其变化,从而获得信号,并测量其信号大小的方法,如用体温计测体温等。

2) 非接触测量法

非接触测量法是指传感器不与被测量直接接触,只是间接承受被测量参数的作用,感受其变化,从而获得信号并测量其信号大小的方法,如用辐射式温度计测量温度和用光电转速表测量转速等。非接触测量法不干扰被测量,既可进行局部点检测,又可进行整体扫描,特别是对于运动的对象、腐蚀性介质及危险场合的参数检测,显得更为方便、安全和准确。

3. 按测量对象的特点分

测量方法按测量对象的特点可分为静态测量法和动态测量法。

1) 静态测量法

静态测量法是指当被测量处于稳定情况下所进行的测量。此时被测量参数不随时间的变化而变化,故又称为稳态测量。

2) 动态测量法

动态测量法是指被测量处于不稳定的情况下进行的测量。此时被测量参数随时间的变化而变化,因此,这种测量必须瞬时完成,才能得到动态参数的测量结果。

由于过程检测中被测量参数多是随时间变化的,因此,过程检测实际上就是动态测量。但如果被测量参数随时间的变化很缓慢,而测量所需时间相对又很短,则过程检测可近似作为稳态测量。这种近似处理也是产生测量误差的原因之一。

任务二 测量误差及其分类

一、测量误差的概念

测量既是一个转换、选择、放大、比较、显示诸功能综合作用的过程,又是一个对比、示差、平衡、读数的比较过程。如果这些过程是在理想的环境、条件下进行,即假设一切影响因素都不存在,测量将是十分精确的。但是,这种理想的环境和条件在实际中是不存在的,无论是测量设备还是测量对象、方法,都不同程度地受到本身和周围各种因素的影响。当这些因素变化时,必然会影响到测量值的大小,使测量值与被测量的真值之间产生差异,这个差异就是测量误差。

真值是指在一定的时间及空间(位置或状态)条件下,被测量所体现的真实数值。通常所说的真值可以分为理论真值、约定真值和相对真值三种。

1) 理论真值

理论真值又称为绝对真值,是指在严格的条件下,根据一定的理论按定义确定的数值。如三角形的内角和恒为 180° 。一般情况下,理论真值是未知的。

2) 约定真值

约定真值是指用约定的办法确定的最高基准值,它被认为充分接近于真值,因而可以代替真值来使用,如基准“米”的定义为光在真空中 $1/299\,792\,458\text{ s}$ 的时间间隔内的行程。测量中修正过的算术平均值也可作为约定真值,这是因为误差对称分布时正负误差出现的机率相等,在没有系统误差(或系统误差用校正法可以消除)的情况下,各次测量值相加以后求平均值,就能得到极接近于真值的数值。由于测量次数总是有限的,所以平均值还不是真值,只能将它称为约定真值。

3) 相对真值

相对真值又称为实际值,是指将测量仪表按精度不同分为若干等级。高等级的测量仪表的测量值即为相对真值,如标准压力表所指示的压力值相对于普通压力表所指示的压力值而言,即可认为是被测压力的相对真值。通常,高一级测量仪表的误差若为低一级测量仪

表误差的 $1/10 \sim 1/3$, 即可认为前者的测量值是后者的相对真值。相对真值在测量误差中的应用较为广泛。

测量的最终目的是求得被测量的理论真值, 但是理论真值是永远测量不到的, 只能以不同的精度接近理论真值。在实际中对给定的测量任务只需达到规定的精度即可, 而不是精度越高越好。盲目地提高测量精度的做法, 往往会带来相反的效果。

在解决生产过程中的测量任务时, 必须根据测量的目的, 全面考虑测量的可靠性、精度、经济性和使用简便性, 而在科研工作中测量精度的要求是放在第一位的。

二、测量误差的分类

在测量中由不同因素产生的误差是混合在一起同时出现的。为了便于分析研究误差的性质、特点和消除方法, 可对各种误差进行分类。

1. 按表示方法分

测量误差按表示方法可分为绝对误差和相对误差。

1) 绝对误差

绝对误差是指被测量的测量值与被测量的真值之间的差值, 即

$$\Delta = A_x - A_0 \quad (1-2)$$

式中, Δ 为绝对误差; A_x 为被测量的测量值; A_0 为被测量的真值, 可为约定真值或相对真值。

绝对误差 Δ 说明了被测量的测量值偏离被测量的真值的大小, 其值可正可负, 具有和被测量相同的量纲。

2) 相对误差

有时绝对误差不足以反映被测量的测量值偏离被测量的真值的程度, 所以引入了相对误差。相对误差用百分比的形式来表示, 一般多取正值。在实际测量中相对误差有以下几种表示形式:

(1) 实际相对误差。实际相对误差 γ_A 用绝对误差 Δ 与被测量的真值 A_0 的百分比表示, 即

$$\gamma_A = \pm \frac{\Delta}{A_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

(2) 标称相对误差。标称相对误差 γ_x 用绝对误差 Δ 与被测量的测量值 A_x 的百分比表示, 即

$$\gamma_x = \pm \frac{\Delta}{A_x} \times 100\% \quad (1-4)$$

(3) 满度相对误差。满度相对误差 γ_m 用绝对误差 Δ 与仪器满量程 A_m 的百分比表示, 即

$$\gamma_m = \pm \frac{\Delta}{A_m} \times 100\% \quad (1-5)$$

当式(1-5)中的 Δ 取值为最大绝对误差 Δ_m 时, 满度相对误差可被用来确定仪表的精度等级 S (最大满度相对误差), 即

$$S = \frac{|\Delta_m|}{A_m} \times 100 \quad (1-6)$$

我国电工仪表精度等级分为七级, 即 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 级。它们分别表

示对应仪表的满度相对误差不应超过的百分比。从仪表面板上的标志可以判断出仪表的精度等级。仪表在正常工作条件下使用时,仪表的精度等级和最大满度相对误差见表 1-1。

表 1-1 仪表的精度等级和最大满度相对误差

精度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
最大满度相对误差	±0.1%	±0.2%	±0.5%	±1.0%	±1.5%	±2.5%	±5.0%

例 1-1 现有精度等级为 0.5 级,量程为 0~300 °C 和精度等级为 1.0 级,量程为 0~100 °C 的两个温度计,要测 80 °C 的温度,试问采用哪一个温度计好?

解 用精度等级为 0.5 级的温度计测量时,最大标称相对误差为

$$\gamma_{x1} = \pm \frac{\Delta_{m1}}{A_x} \times 100\% = \pm \frac{300 \times 0.5}{80 \times 100} \times 100\% = \pm 1.875\%$$

用精度等级为 1.0 级的温度计测量时,最大标称相对误差为

$$\gamma_{x2} = \pm \frac{\Delta_{m2}}{A_x} \times 100\% = \pm \frac{100 \times 1.0}{80 \times 100} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

由此可得 $\gamma_{x2} < \gamma_{x1}$,显然用精度等级为 1.0 级的温度计测量比用精度等级为 0.5 级的温度计测量更合适。因此,在选用传感器时应同时兼顾精度等级和量程。

例 1-2 某压力表精度等级为 5.0 级,量程为 0~1.5 MPa,测量结果显示为 0.70 MPa,试求:

(1)可能出现的最大满度相对误差 γ_m 。

(2)可能出现的最大绝对误差 Δ_m 。

(3)可能出现的最大标称相对误差 γ_x 。

解 (1)可能出现的最大满度相对误差可以从精度等级直接得到,即 $\gamma_m = \pm 5.0\%$ 。

(2)可能出现的最大绝对误差为

$$\Delta_m = \pm \frac{SA_m}{100} = \pm \frac{5 \times 1.5}{100} \text{ MPa} = \pm 0.075 \text{ MPa}$$

(3)可能出现的最大标称相对误差为

$$\gamma_x = \pm \frac{\Delta_m}{A_x} \times 100\% = \pm \frac{0.075}{0.70} \times 100\% = \pm 10.71\%$$

2. 按误差出现的规律分

测量误差按误差出现的规律可分为系统误差、随机误差和粗大误差三种。

1) 系统误差

在相同条件下,多次重复测量同一被测量时,其测量误差的大小和符号保持不变,或在条件改变时,误差按某一确定的规律变化,这种测量误差称为系统误差。若系统误差值恒定不变,则称为定值系统误差;若系统误差值变化,则称为变值系统误差。

系统误差产生的原因大体上可归纳为以下几种:

(1)测量所用的工具(仪器、量具等)本身性能不完善或安装、布置、调整不当而产生的误差。

(2)在测量过程中,因温度、湿度、气压、电磁干扰等环境条件发生变化而产生的误差。

(3)因测量方法不完善,或者测量所依据的理论本身不完善等而产生的误差。

(4)因操作人员读数方式不当而造成的读数误差等。

总之,系统误差的特征包括测量误差出现的有规律性以及其产生原因的可预知性。系统误

差产生的原因和变化规律一般可通过实验和分析查出。因此,系统误差可被设法确定并消除。

系统误差表明了测量值偏离实际值的程度。系统误差越小,测量值越准确,所以常常用精度来表示系统误差的大小。

2) 随机误差

当多次重复测量同一被测量时,若测量误差的大小和符号均以不可预知的方式变化,则该误差称为随机误差。随机误差产生的原因比较复杂,虽然测量是在相同条件下进行的,但测量环境中某些因素总会发生微小变化,因此,随机误差是对测量值影响微小且又互不相关的大量因素所引起的综合结果。随机误差就个体而言并无规律可循,但其总体却服从统计规律。总的来说,随机误差具有以下特性:

- (1) 对称性。绝对值相等、符号相反的随机误差在多次重复测量中出现的可能性相等。
- (2) 有界性。在一定测量条件下,随机误差的绝对值不会超出某一限度。
- (3) 单峰性。绝对值小的随机误差比绝对值大的随机误差在多次重复测量中出现的概率高。
- (4) 抵偿性。随机误差的算术平均值随测量次数的增加而趋于零。

随机误差的变化通常难以预测,也无法通过实验方法确定、修正和清除。但是通过多次测量比较可以发现随机误差服从某种统计规律,如正态分布、均匀分布和泊松分布等。

随机误差决定了测量的精密度。随机误差越小,测量的精密度越高。如果一个测量的精密度和准确度都很高,就称此测量的精确度很高。

3) 粗大误差

明显偏离真值的误差称为粗大误差,也称为过失误差。粗大误差主要是由测量人员的粗心大意及电子测量仪器受到突然强大的干扰所引起的。就测量的大小而言,粗大误差明显超过正常条件下的误差。当发现粗大误差时,应予以剔除。

为了加深对精密度、准确度和精确度的理解,下面用打靶的例子来说明。子弹着点的分布如图 1-1 所示,子弹落在靶心周围有三种情况,图 1-1(a)的子弹着点很分散,表明它的精密度很低;图 1-1(b)的子弹着点集中但偏向一方,表明它的精密度高,但准确度低;图 1-1(c)的子弹着点集中在靶心,则表明它的精密度和准确度都很高,即精确度高。

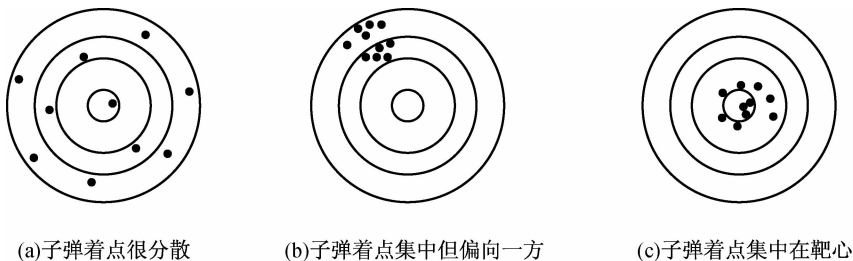


图 1-1 子弹着点的分布

3. 按使用条件分

测量误差按使用条件可分为基本误差和附加误差。

1) 基本误差

基本误差是指检测系统在规定的标准条件下使用时所产生的误差。所谓规定的标准条件是指一般传感器在实验室、制造厂或计量部门标定刻度时所保持的工作条件,如电源电压

(220 ± 5) V、温度(20 ± 5) °C、湿度小于 80%、电源频率(50 ± 1) Hz 等。此外,基本误差也是检测仪表在额定条件下工作所具有的误差,检测仪表的精确度是由基本误差决定的。

2) 附加误差

当使用条件偏离规定的标准条件时,除产生基本误差外,还会产生附加误差,如由于温度超过规定的标准而引起的温度附加误差、电源附加误差以及频率附加误差等。这些附加误差在使用时应叠加到基本误差上去。

4. 按被测量随时间变化的速度分

测量误差按被测量随时间变化的快慢可分为静态误差和动态误差。

1) 静态误差

当被测量不随时间变化时所产生的误差称为静态误差。

2) 动态误差

当被测量随时间迅速变化时,系统的输出量在时间上不能与被测量的变化精确吻合,这种误差称为动态误差。例如,将水银温度计插入 100 °C 的沸水中,水银柱不可能立即上升到 100 °C,如果此时就记录读数,必然会产生误差。

引起动态误差的原因很多。例如,用笔式记录仪记录心电图时,由于记录笔有一定的惯性,因此,记录的结果在时间上滞后于心电的变化,有可能记录不到特别尖锐的窄脉冲;用放大器放大含有大量高次谐波的周期信号(如很窄的矩形波)时,由于放大器的频响及电压上升率不够,故造成高频段的放大倍数小于低频段,最后在示波器上看到的波形失真,以致产生误差。如图 1-2 所示,用不同品质的心电图仪测量同一个人的心电图时,由于其中一台放大器的带宽不够,动态误差较大,描绘出的窄脉冲幅度偏小。

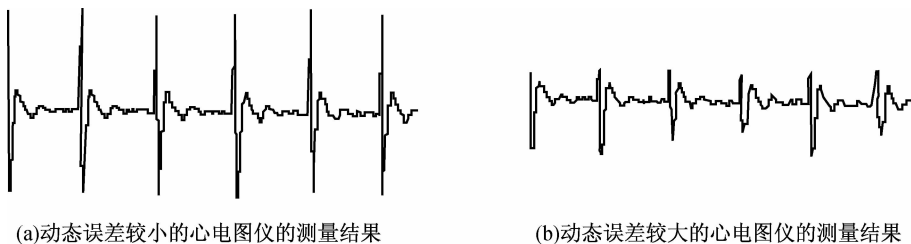


图 1-2 不同品质的心电图仪描绘出心电图的比较

一般静态测量要求仪器的带宽从 0 Hz(直流)至 10 Hz 左右,而动态测量要求带宽超过 10 kHz。这就要求采用高速运算放大器,并尽量减小电路的时间常数。

对用于动态测量带有机结构的仪表而言,应尽量减小机械惯性,提高机械结构的谐振频率,才能尽可能真实地反映被测量的迅速变化。

任务三 传感器基本知识

在当今信息时代,人们越来越迫切地希望能准确地掌握自然界和生产领域中的各类信息,而传感器则是人们获取这些信息的主要途径和手段,因此,传感器与人们的关系越来越密切。传感器是实现自动检测和自动控制的首要环节,它对于提高生产的自动化程度,促进

现代科学技术的发展具有极其重要的作用。

一、传感器的概念

传感器是指能感受规定的被测量并按一定规律转换成可用输出信号的元件或装置。也就是说,传感器是一种按一定的精度把被测量转换为与之有确定关系的、便于应用的某种物理量的测量元件或装置,用于满足系统信息的传输、存储、显示、记录及控制等要求。

传感器的定义包含了以下几方面的含义:

- (1)传感器是一种测量装置,能完成检测任务。
- (2)传感器的输入量是某一被测量,可能是物理量,也可能是化学量、生物量等。
- (3)传感器的输出量是某种物理量,这种量可以是气量、光量、电量,但主要是电量。
- (4)传感器的输入和输出有对应关系,且有一定的精确度。

二、传感器的组成

传感器一般是利用物理、化学和生物等学科的某些效应或机理,按照一定的工艺和结构研制出来的,因此,传感器组成的细节有较大差异。但是总的来说,传感器一般由敏感元件、转换元件和测量转换电路三部分组成,其组成框图如图 1-3 所示。

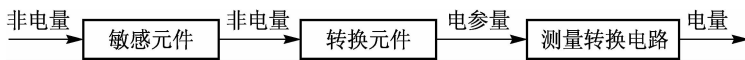


图 1-3 传感器的组成框图

1. 敏感元件

敏感元件是指传感器中能直接感受被测量的变化,并输出与被测量有确定关系的某一物理量的元件。敏感元件是传感器的核心,也是研究、设计和制作传感器的关键。如图 1-4 所示为一种气体压力传感器的示意图。膜盒 2 的下半部与壳体 1 固定连接,上半部通过连杆与磁芯 4 相连,磁芯 4 置于两个电感线圈 3 中,电感线圈 3 接入转换电路 5。这里的膜盒 2 就是敏感元件,其外部与大气压力相通,内部感受被测压力 P 。当 P 变化时,膜盒 2 上半部移动,即输出相应的位移量。

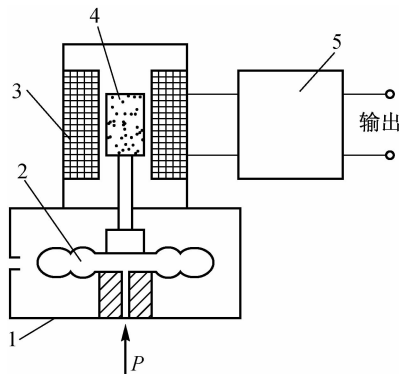


图 1-4 气体压力传感器的示意图

1—壳体; 2—膜盒; 3—电感线圈; 4—磁芯; 5—转换电路

2. 转换元件

敏感元件的输出就是转换元件的输入,转换元件把敏感元件的输入转换成电参量输出。在图 1-4 中,电感线圈 3 就是转换元件,它把输入的位移量转换成电感的变化。

3. 测量转换电路

测量转换电路的作用是将转换元件输出的电参量进行转换和处理,如放大、滤波、线性化和补偿等,以获得更好的品质,便于后续电路实现显示、记录、处理及控制等功能。测量转换电路的类型由传感器的工作原理和转换元件的类型而定,一般有电桥电路、阻抗变换电路和振荡电路等。

不是所有的传感器都由以上三部分组成。最简单的传感器是由一个敏感元件(兼转换元件)组成的,它感受被测量的变化时直接输出电量,如热电偶传感器。有些传感器由敏感元件和转换元件组成,而没有测量转换电路,如压电式加速度传感器,其中质量块是敏感元件,压电片(块)是转换元件。有些传感器的转换元件不止一个,要经过若干次转换。一般情况下,测量转换电路的后续电路,如信号放大、处理、显示等电路就不应包括在传感器的组成范围之内。

三、传感器的分类

传感器技术是一门知识密集型技术,它的原理多种多样,种类繁多,分类方法也很多。

1. 按被测量分

传感器按被测量可分为加速度传感器、速度传感器、位移传感器、压力传感器、负荷传感器、扭矩传感器和温度传感器等。这种分类方法对于用户来说是一目了然的。但是,这种分类方法的弊病是传感器的名目繁多,把原理互不相同的同一用途的传感器归为一类,这就很难找出各种传感器在转换原理上的共性与差异,不利于掌握对传感器的原理与性能的分析方法。

2. 按工作原理分

传感器按工作原理可分为电阻式传感器、电容式传感器、电感式传感器、压电式传感器、霍尔传感器、光电式传感器和热电偶传感器等。这种分类方法的优点是划分类别较少,有利于对传感器的工作原理与设计进行归纳性的分析研究,使设计与应用更合理、灵活,缺点是对传感器不够了解的用户会感到使用不便。

3. 按能量的传递方式分

传感器按能量的传递方式可分为有源传感器和无源传感器。

1) 有源传感器

有源传感器可视为一台微型发电机,能将非电量转换为电量,它所配用的测量转换电路通常是信号放大器。所以有源传感器是一种能量变换器,如压电式传感器、热电偶传感器、电磁式传感器和电动式传感器等。在有源传感器中,有些传感器的能量转换是可逆的;有些传感器的能量转换是不可逆的。有些有源传感器通常附有力学系统,只能用在接触式的测量中,如压电式加速度传感器;有些有源传感器不具有直流响应能力,只能用于动态测量中,如热电偶传感器,它是利用两种不同金属的温差所产生的电动势进行测量的。

2) 无源传感器

无源传感器不进行能量的转换,被测非电量仅对传感器中的能量起着控制或调节的作

用,所以它必须具有辅助能源(电源),如电阻式传感器、电容式传感器和电感式传感器等,遥感技术中的微波传感器和激光传感器等也可以归结为此类。无源传感器本身并不是一个信号源,因此,它所配用的测量转换电路与有源传感器不同,通常是电桥电路或谐振电路。由于无源传感器具有直流响应能力,一般不配力学系统,因而适用于静态测量和动态测量,有时还可以用在非接触的测量场合。

4. 按输出信号的性质分

传感器按输出信号的性质可分为模拟传感器和数字传感器。模拟传感器的输出信号要通过 A/D 转换器转换为数字信号后,才能交给计算机进行信号分析、加工与处理。数字传感器则可直接输入计算机进行处理。

四、传感器的特性

在生产过程和科学实验中,传感器要对各种各样的参数进行检测和控制,这就要求传感器能感受被测非电量的变化并将其不失真地转换成相应的电量,这取决于传感器的基本特性,即输入—输出特性。如果把传感器看做两端口网络,即有两个输入端和两个输出端,那么,传感器的输入—输出特性是与其内部结构参数有关的外部特性。传感器的基本特性可用静态特性和动态特性来描述。

1. 静态特性

传感器的静态特性是指当被测量的值处于稳定状态时,输入量与输出量的关系。只有传感器处于稳定状态时,输入量与输出量的关系式中才不会含有时间变量。衡量静态特性的重要指标包括线性度、灵敏度、迟滞、重复性、分辨力、稳定性、漂移和可靠性等。

1) 线性度

线性度是指传感器输入量与输出量之间的静态特性曲线偏离直线的程度,其又称为非线性误差。静态特性曲线可通过实际测试获得,在实际使用中,大多数传感器的静态特性曲线是非线性的,为了得到线性关系,常引入各种非线性补偿环节,如采用非线性补偿电路或计算机软件进行线性化处理等。但如果传感器非线性的阶数不高,输入量变化范围较小,则可用一条直线(切线或割线)近似地代表实际曲线的一段,这条直线称为拟合直线,如图 1-5 所示。

静态特性曲线与拟合直线之间的偏差称为传感器的非线性误差(或线性度),通常用相对误差 γ_L 表示,即

$$\gamma_L = \pm \frac{\Delta L_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-7)$$

式中, ΔL_{\max} 为最大非线性绝对误差; Y_{FS} 为满量程输出值。

图 1-5 中即使是同类传感器,拟合直线不同,其线性度也是不同的。选取拟合直线的方法很多,常用的有理论直线法、端点法、割线法、切线法、最小二乘法和计算机程序法等,其中,用最小二乘法求取拟合直线的拟合精度最高。

2) 灵敏度

灵敏度是指传感器输出量的增量与引起输出量增量的输入量的增量的比值,通常用 k 表示,即

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-8)$$

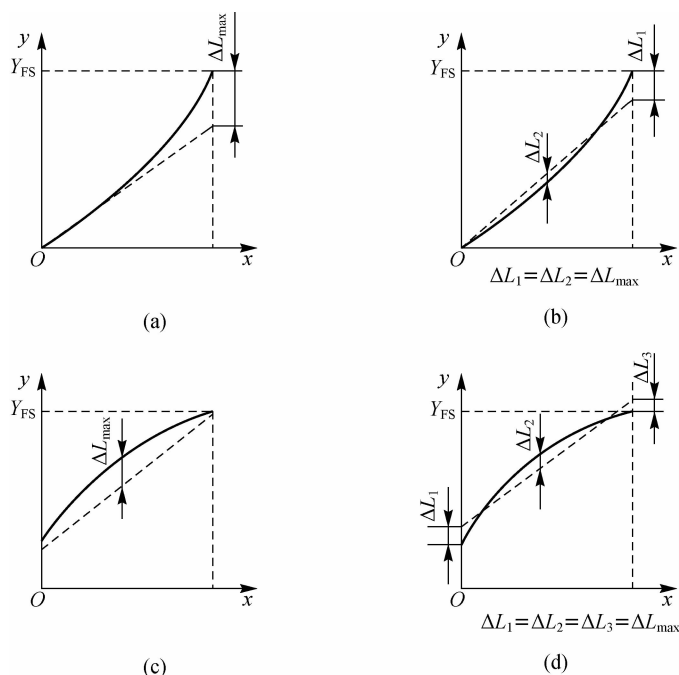


图 1-5 几种拟合直线

式中, Δy 为输出量的增量; Δx 为引起输出量增量的输入量的增量。

线性传感器的灵敏度就是其输入—输出特性曲线的斜率, 是一个常数, 与输入量的大小无关; 而非线性传感器的灵敏度是一个随工作点变化的变量, 如图 1-6 所示。一般希望传感器具有较高的灵敏度, 且在满量程的范围内是恒定的, 这样就可保证在传感器输入量相同的情况下, 输出信号尽可能大, 从而有利于对被测量的转换和处理。

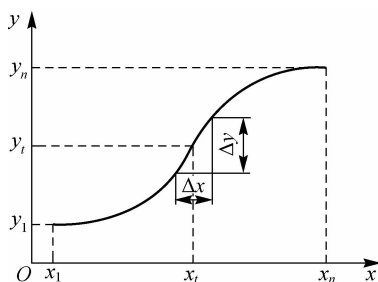


图 1-6 非线性传感器的输入—输出特性曲线

输出灵敏度是指传感器在额定载荷作用下, 测量电桥供电电压为 1 V 时的输出电压。有时用输出灵敏度这个性能指标来表示某些传感器的灵敏度, 如应变片式压力传感器。

3) 迟滞

迟滞是指传感器在输入量由小到大(正行程)及输入量由大到小(反行程)变化期间其输入—输出特性曲线不重合的程度, 如图 1-7 所示。也就是说, 对于同一大小的输入量, 传感器正反行程的输出量的大小不等。产生这种现象的主要原因是传感器中敏感元件材料的物理性质和机械零部件有缺陷。

迟滞误差是指对应同一输入量的正反行程输出值间的最大差值与满量程输出值的百分比,通常用 γ_H 表示,即

$$\gamma_H = \pm \frac{\Delta H_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-9)$$

式中, ΔH_{\max} 为正反行程输出值间的最大差值。

4) 重复性

重复性是指传感器在输入量按同一方向进行全量程多次测试时,所得输入—输出特性曲线不一致的程度,如图 1-8 所示。多次按相同输入条件测试的输出特性曲线越重合,其重复性越好,误差越小。

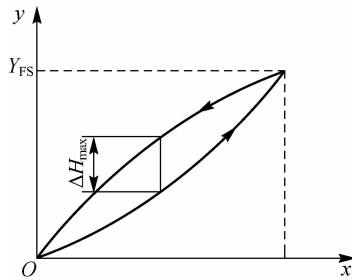


图 1-7 传感器的迟滞特性

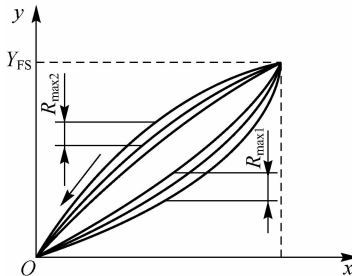


图 1-8 传感器的重复性

重复性误差是指各测量值正反行程标准偏差的两倍或三倍与满量程输出值的百分比,通常用 γ_R 表示,即

$$\gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)\sigma}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-10)$$

式中, σ 为正行程标准偏差。

此外,重复性误差也可用正反行程中的最大偏差 ΔR_{\max} 表示,即

$$\gamma_R = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta R_{\max}}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (1-11)$$

式中, ΔR_{\max} 为正行程中的最大偏差。

5) 分辨力

分辨力是指传感器能检测到输入量最小变化量的能力。对于某些传感器,如电位器式传感器,当输入量连续变化时,输出量只发生阶梯变化,则分辨力就是输出量的每个阶梯所代表的输入量的大小。对于数字式仪表,分辨力就是仪表指示值的最后一位数字所代表的



值。当被测量的变化量小于分辨力时,数字式仪表的最后一位数不变,仍指示原值。当分辨力以满量程输出值的百分数表示时,则称为分辨率。

6) 稳定性

稳定性是指传感器在一个较长的时间内保持其性能参数的能力。理想的情况下是指不论什么时候,传感器的特性参数都不随时间变化。但实际上,随着时间的推移,大多数传感器的特性会发生改变,这是因为敏感元件或构成传感器的零部件,其特性会随时间发生变化,从而影响了传感器的稳定性。

稳定性一般以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的输出之间的差异来表示,这种差异称为稳定性误差。稳定性误差可用相对误差表示,也可用绝对误差来表示。

7) 漂移

漂移是指在外界的干扰下,在一定时间间隔内,传感器输出量发生与输入量无关、不需要的变化。它包括零点漂移和灵敏度漂移,如图 1-9 所示。零点漂移或灵敏度漂移又可分为时间漂移和温度漂移。时间漂移是指在规定的条件下,零点漂移或灵敏度漂移随时间的缓慢变化。温度漂移是指当环境温度变化时,引起的零点漂移或灵敏度漂移。

传感器的漂移有时会导致整个测量系统或控制系统处于瘫痪,一般可通过串联或并联可变电阻来消除。此外,漂移量的大小也是衡量传感器稳定性的重要性能指标。

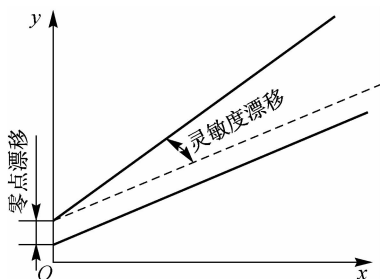


图 1-9 传感器的漂移

8) 可靠性

可靠性是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。可靠性技术是研究如何评价、分析和提高产品可靠性的一门综合性边缘科学。产品的可靠性是一个与许多因素有关的综合性质量指标,主要特点如下:

(1) 时间性。产品的可靠性是指产品在使用过程中,主要性能指标的保持能力。保持的时间越长,产品的使用寿命越长,所以产品的可靠性是时间的函数。

(2) 统计性。产品的可靠性指标与产品的技术性指标之间有很大区别。产品的可靠性指标是通过产品的抽样实验,利用统计理论估计整批产品的可靠性;而产品的技术性指标可以利用仪器仪表直接测量得到,如线性度、灵敏度、迟滞和重复性等。

(3) 可比性。产品的可靠性指标具有可比性,如产品的工作条件、环境不同,可靠性就有很大的差异;规定的使用时间不同,可靠性也不同;产品的功能判断不同,将得到不同的可靠性评定结果。

(4) 典型指标。传感器或检测系统一旦出现故障,就会导致整个自动化系统瘫痪,有时

会造成严重的生产事故,所以必须十分重视传感器的可靠性。衡量其可靠性的指标有:

①平均无故障时间。平均无故障时间是指传感器或检测系统在正常的工作条件下,连续不间断地工作,直到发生故障丧失正常工作能力所用的时间。

②平均修复时间。平均修复时间是指排除故障所花费的时间。

③故障率。故障率也称为失效率,它是平均无故障时间的倒数。

2. 动态特性

大多数情况下传感器的输入信号是一个随时间变化的动态信号,这就要求传感器能时刻精确地跟踪输入信号,按照输入信号变化规律来输出信号。当传感器输入信号变化缓慢时,很容易被跟踪,但随着传感器输入信号变化加快,其跟踪性能就会逐渐下降。输入信号变化时,引起输出信号也随时间变化,这个过程称为响应。传感器的动态特性就是其对于随时间变化的输入信号的响应特性,通常要求传感器不仅能精确地显示被测量的大小,还能显示被测量随时间变化的规律,这也是传感器的重要特性之一。

影响传感器的动态特性主要是传感器的固有因素,如温度传感器的热惯性等。不同的传感器,其固有因素的表现形式和作用程度不同。另外,传感器的动态特性还与传感器输入量的变化形式有关,也就是说,在研究传感器的动态特性时,通常是根据不同的输入变化规律来考察传感器的动态特征。由于激励传感器信号的时间函数是多种多样的,在时域内研究传感器的响应特性与分析自动控制系统一样,只能通过对几种特殊的输入时间函数来研究其响应特性。在时域内通常利用正弦函数研究传感器的频率响应特性。为了便于比较、评价或动态定标,最常用的输入信号为阶跃信号和正弦信号,与其对应的方法为阶跃响应法和频率响应法。

1) 阶跃响应法

研究传感器的动态特性时,在时域中对传感器的响应和过渡过程进行分析的方法称为时域分析法,这时对传感器所加激励信号的响应称为阶跃响应。常用的激励信号有阶跃函数、斜坡函数和脉冲函数等。下面以最典型、最简单、最易实现的阶跃信号作为标准输入信号来分析评价传感器的动态特性性能指标。

当给静止的传感器输入一个单位阶跃函数信号 $y(t) = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ 1 & (t > 0) \end{cases}$ 时,其输出特性为阶跃响应特性(或瞬态响应特性)。阶跃响应特性曲线如图 1-10 所示。

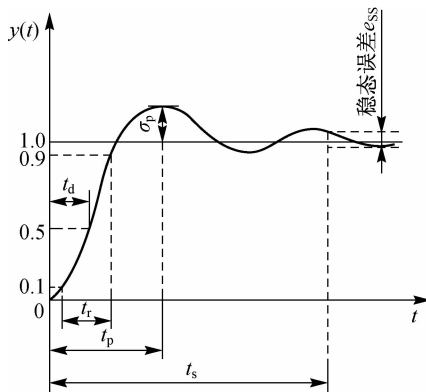


图 1-10 阶跃响应特性曲线

衡量传感器阶跃响应特性的几项指标如下:

(1)最大超调量。最大超调量 σ_p 就是阶跃响应特性曲线偏离稳态值的最大值,常用百分数表示。

(2)延滞时间。延滞时间 t_d 是指阶跃响应特性曲线达到稳态值的 50% 所需的时间。

(3)上升时间。上升时间 t_r 是指阶跃响应特性曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间,常用它来描述无振荡的传感器。

(4)峰值时间。峰值时间 t_p 是指阶跃响应特性曲线从零到第一个峰值时所需的时间。

(5)响应时间。响应时间 t_s 是指从阶跃函数信号输入开始到其输出值进入稳态值所规定的范围内所需要的时间。

2) 频率响应法

频率响应法是指从传感器的频率特性出发研究传感器的动态特性。传感器对正弦输入信号的响应特性称为频率响应特性。对传感器动态特性的理论研究,通常是先建立传感器的数学模型,通过拉氏变换求出传递函数的表达式,再根据输入条件得到相应的频率特性。大部分传感器可简化为单自由度一阶系统或单自由度二阶系统,即

$$H(j\omega) = \frac{1}{\tau(j\omega) + 1} \quad (1-12)$$

式中, τ 为时间函数(s)。

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + 2j\xi \frac{\omega}{\omega_n}} \quad (1-13)$$

式中, ω_n 为传感器的固有频率(rad/s); ξ 为阻尼系数(s^{-1})。

衡量传感器频率响应特性的几项指标如下:

(1)频带。传感器的增益保持在一定频率范围内,这一频率范围称为传感器的频带或通频带,对应有上截止频率和下截止频率。

(2)时间函数。可用时间函数 τ 来表征传感器单自由度一阶系统的动态特性。时间函数 τ 越小,频带越宽。

(3)固有频率。传感器单自由度二阶系统的固有频率 ω_n 可用来表征其动态特性。

对于传感器单自由度一阶系统,减小时间函数 τ 可改善传感器的频率特性。对于传感器单自由度二阶系统,为了减小动态误差和扩大频率响应范围,一般需提高传感器的固有频率 ω_n ,而固有频率 ω_n 与传感器运动部件的质量 m 和弹性敏感元件的刚度 C 有关,即

$$\omega_n = \sqrt{\frac{C}{m}} \quad (1-14)$$

由式(1-14)可知,增大弹性敏感元件的刚度 C 和减小传感器运动部件的质量 m 可提高固有频率 ω_n ,但弹性敏感元件的刚度 C 增加,会使传感器灵敏度降低,所以在实际应用中,应综合各种因素来确定传感器的各个特征参数。

任务四 检测系统的组成

检测系统既指由众多环节组成的复杂的系统整体,又指检测系统中的各组成环节。因此,检测系统的概念是广义的。在检测信号的流通过程中,任意连接输入、输出并有特定功能的部分,均可视为检测系统。对检测系统的基本要求就是使检测系统的输出信号能够真实地反映被测量的变化过程,而不使信号发生畸变,即实现不失真检测。一个完整的检测系统通常由传感器、测量转换电路、显示与记录装置、数据处理装置和调节执行装置组成,它们之间的关系如图 1-11 所示。

传感器是把被测的非电量转换成与之有确定对应关系,且便于应用的电量的检测装置。传感器获得信息的正确与否,关系到整个检测系统的测量精度。因此,它在自动检测系统中占有重要的位置。

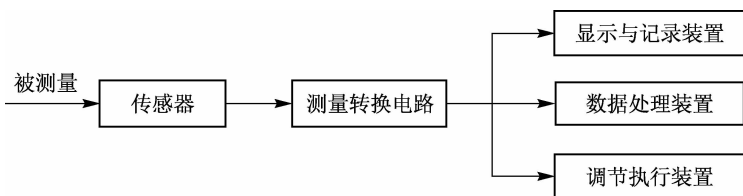


图 1-11 检测系统各组成环节之间的关系

测量转换电路的作用是把传感器输出的电量变成具有一定功率的电压或电流信号,以推动后级的显示与记录装置、数据处理装置及调节执行装置的执行。

显示装置是指把转换来的电信号显示出来,便于人机对话。显示方式有模拟显示、数字显示和图像显示等。记录装置包括模拟记录仪和数字采集记录系统等。

数据处理装置用来对检测的结果进行运算、分析,对动态测试结果作频谱分析、幅值谱分析和能量谱分析。

调节执行装置带动各种设备,为自动控制系统提供控制信号,使控制对象按人们设定的工艺过程进行工作。

技能实训

如图 1-12 所示为电子秤制作的实训电路。

1) 实训设备

(1) IC_1 选用 ICL7126 集成块, IC_2 、 IC_3 选用高精度低温标精密运放 OP07, IC_4 选用 LM385-1.2 V 集成块。

(2) 传感器 R_1 选用 E350-ZAA 箔式电阻应变片,其常态阻值为 $350\ \Omega$ 。

(3) 各电阻元件宜选用精密金属膜电阻。

(4) R_{P1} 选用精密多圈电位器, R_{P2} 、 R_{P3} 经调试后可分别用精密金属膜电阻代替。

(5) 电容中 C_1 选用云母电容或瓷介电容。

2) 实训内容及步骤



(1) 电子线路的制作。设备布置时要横平竖直、间距适当。锡焊时要控制焊点大小,注意虚焊。

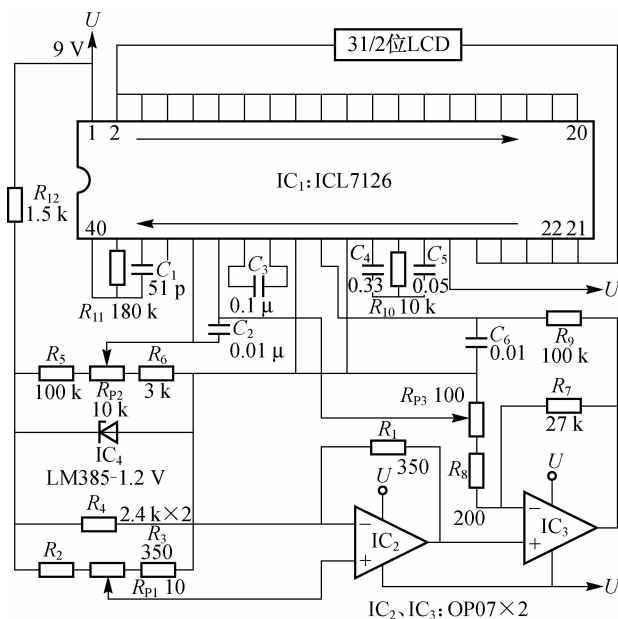


图 1-12 电子秤制作的实训电路

(2) 变形钢件的制作。可用普通钢锯条制作,先将锯齿磨平,再将锯条加热弯成 U 形,并在对应位置钻孔,用来装显示器;然后再进行淬火和表面处理,将秤钩黏于钢件底部,将应变片用应变胶黏剂黏于钢件变形最大的部位。

(3) 在秤体自然下垂无负载时调节 R_{P1} ,使其显示为零。

(4) 调节 R_{P2} ,使秤体承担满量程 2 kg。

(5) 然后在秤钩下悬挂 1 kg 的标准砝码,观察显示器是否显示 1.000,如有偏差,可调节 R_{P3} ,使显示器准确显示 1.000。

(6) 重新进行步骤(4)、(5),使显示器均满足要求为止。

(7) 准确测量 R_{P2} 、 R_{P3} 的值,并用精密金属膜电阻代替。

3) 实训报告

(1) 画出实训电路的接线图。

(2) 将原始数据记录下来,进行数据处理后,得出实训结果。

(3) 总结实训中出现的现象。



思考与练习

1. 在检测系统中常用的测量方法有哪些?
2. 什么是直接测量、间接测量和组合测量?
3. 什么是测量误差? 研究测量误差的意义是什么?
4. 在实际测量中相对误差有哪几种表示形式?

5. 被测电压的实际值为 10 V, 现有精度等级为 0.5 级, 量程为 150 V 和精度等级为 2.5 级, 量程为 15 V 的两种电压表, 试问选择哪一种电压表较好?
6. 什么是系统误差和随机误差? 它们有何区别与联系?
7. 何谓传感器? 一般传感器由哪几部分组成?
8. 传感器的分类方法有哪些?
9. 什么是传感器的静态特性?
10. 衡量传感器静态特性的主要性能参数有哪些?

项目二

电阻式传感器



知识目标

掌握电阻应变式传感器、热电阻式传感器、气敏电阻式传感器、湿敏电阻式传感器的工作原理。



技能目标

观察和分析电阻式传感器的应变效应；
熟悉应变电阻桥的各种接法及特点。



相关知识

电阻式传感器是一种将各种被测非电量(如力、位移、形变、速度和加速度等)的变化量,转换成与其有一定关系的电阻的变化,通过对电阻的测量达到测量非电量目的的传感器。

电阻式传感器结构简单,线性和稳定性较好,与相应的测量转换电路可组成测力、测压、称重、测位移、测加速度、测扭矩和测温度等检测系统。电阻式传感器已成为生产过程检测及实现生产自动化不可缺少的手段之一。

电阻式传感器包括电阻应变式传感器、热电阻式传感器、气敏电阻式传感器和湿敏电阻式传感器等。

任务一 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器可用于测量力、力矩、加速度和质量等参数,它是利用应变效应制成的,是一种测量微小变化量的理想传感器。

一、电阻应变式传感器的工作原理

导体或半导体材料在外力作用下产生机械变形,其电阻发生变化的现象称为应变效应。电阻应变片就是利用这一现象制成的。

一根金属电阻丝未受力时,其初始电阻为

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

式中, ρ 为电阻丝的电阻率($\Omega \cdot \text{m}$); l 为电阻丝的长度(m); A 为电阻丝的横截面积(m^2)。

如图 2-1 所示,当电阻丝受拉力 F 作用时,将伸长 Δl ,横截面积相应地减小 ΔA ,电阻率

将因晶格发生变形等因素而改变 $\Delta\rho$, 故引起电阻的相对变化量为

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

式中, $\Delta l/l$ 为电阻丝长度的相对变化量, 也可称为电阻丝的轴向应变, 用 ϵ 表示, 即 $\epsilon = \Delta l/l$; $\Delta A/A$ 为电阻丝横截面积的相对变化量; $\Delta\rho/\rho$ 为电阻丝电阻率的相对变化量。

对于半径为 r 的电阻丝, 横截面积 $A = \pi r^2$, 则有 $dA = 2\pi r dr$, 由此可得

$$\frac{\Delta A}{A} = \frac{2\Delta r}{r} \quad (2-3)$$

在弹性范围内金属丝受拉力时, 沿轴向伸长, 沿径向缩短, 则轴向应变与径向应变的关系为

$$\frac{\Delta r}{r} = -\mu \frac{\Delta l}{l} = -\mu \epsilon \quad (2-4)$$

式中, μ 为电阻丝材料的泊松比。

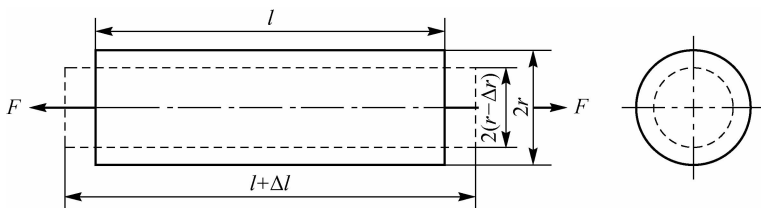


图 2-1 电阻丝的拉伸

由 $\epsilon = \Delta l/l$ 及式(2-2)~式(2-4)可得

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{\Delta \rho}{\rho} = k\epsilon \quad (2-5)$$

式中, k 为电阻丝的灵敏度。

对于不同的金属材料, 电阻丝的灵敏度 k 略有不同, 一般为 2 左右。而对于半导体材料而言, 由于其感受到应变时, 电阻率会产生很大变化, 因此, 其灵敏度比金属材料大几十倍。

严格来讲, 由于电阻丝与应变片之间存在蠕变等影响, 因此, 这两者的应变是有差异的。但这差异并不大, 工程上允许忽略。

二、电阻应变片的类型结构、粘贴与特性

1. 电阻应变片的类型结构

根据所使用的材料不同, 电阻应变片可分为金属电阻应变片和半导体应变片。

1) 金属电阻应变片

金属电阻应变片又可分为金属丝式应变片、金属箔式应变片和金属薄膜式应变片。

(1) 金属丝式应变片。金属丝式应变片是由敏感栅、基片、覆盖层和引线等部分组成的, 如图 2-2 所示。

其中, 敏感栅是金属丝式应变片实现应变(电阻转换)的最重要的传感元件, 一般采用的栅丝直径为 0.015~0.05 mm。它粘贴在绝缘的基片上, 其上面再粘贴起保护作用的覆盖层, 两端焊接出引线。

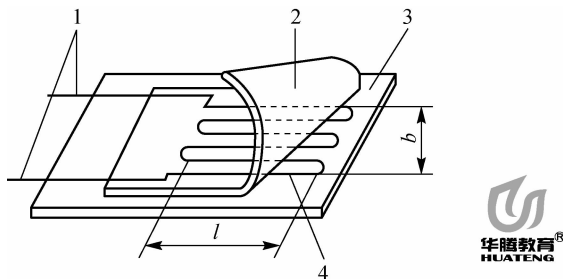


图 2-2 金属丝式应变片的基本结构

1—引线；2—覆盖层；3—基片；4—敏感栅

(2)金属箔式应变片。金属箔式应变片的基本结构如图 2-3 所示。它是利用光刻、腐蚀等工艺制成的一种很薄的金属箔栅,其横向部分特别粗,可大大减小横向效应,且敏感栅的粘贴面积大,能更好地随同被测物体变形。此外,与金属丝式应变片相比,它还具有散热条件好,允许通过的电流较大,可根据使用要求制成各种形状,便于批量生产等优点,所以其使用范围日益扩大,已逐渐取代金属丝式应变片。

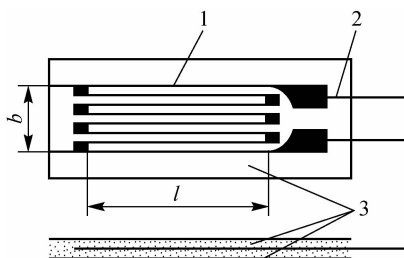


图 2-3 金属箔式应变片的基本结构

1—敏感栅；2—引线；3—基片

(3)金属薄膜式应变片。金属薄膜式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,其上面加有保护层。它的优点是应变灵敏度高、允许电流密度大、工作范围广。

2) 半导体应变片

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。它的突出优点是灵敏度高、尺寸小、横向效应小、动态响应好。但它有温度系数大、应变时非线性关系比较严重等缺点。

2. 电阻应变片的粘贴

电阻应变片通常用黏合剂粘贴到被测物体或电阻应变式传感器的弹性元件上。在测试被测量时,黏合剂所形成的胶层起着非常重要的作用。它要正确无误地将被测物体或弹性元件的应变传递到电阻应变片的敏感栅上去。黏合剂的性能和粘贴工艺在很大程度上影响着电阻应变片的工作特性,如蠕变、零点漂移、迟滞、灵敏度、线性度以及这些特性随时间或温度变化的程度。因此,不仅要选择性能良好的电阻应变片,还应根据电阻应变片的材料、性能选择合适的黏合剂和粘贴工艺。

1) 电阻应变片的检查

电阻应变片的检查包括外观检查和电阻检查。

(1) 外观检查。检查敏感栅排列是否整齐、均匀,是否存在破损,引线是否焊接牢固等。

(2) 电阻检查。电阻检查要精确到 0.05Ω 。

2) 被测物体的表面处理

为了保证一定的黏合强度,须将被测物体表面处理干净,清除杂质、油污和表面氧化层。粘贴表面应保持平整、光滑。粘贴表面积约为应变片的 $3\sim 5$ 倍。

3) 确定贴片位置

可用笔在被测物体表面划出定位线,粘贴时应使电阻应变片的中心线与定位线对准。精度要求较高时,可以用光学投影的方法来确定贴片位置。

4) 粘贴电阻应变片

首先用甲苯、丙酮等溶剂清洗被测物体表面,然后在清洗过的表面上均匀地涂一薄层黏合剂作为底层。待其晾干后,再在此底层和电阻应变片基片的底面(也要先用溶剂清洗)各涂一层薄而均匀的黏合剂,待稍干后将电阻应变片粘贴在划线处,在电阻应变片上放一张玻璃纸,用手指按压,将多余的黏合剂和气泡挤出。

5) 黏合剂的固化处理

粘贴好电阻应变片后,根据所使用黏合剂的固化工艺要求进行固化处理。

6) 粘贴质量检查

检查粘贴位置是否正确,黏合层是否有气泡和漏贴,敏感栅是否有短路和断路现象,以及敏感栅绝缘性能是否良好等。

7) 引线的焊接与防护

检查合格后即可焊接引线。电阻应变片的引线最好采用中间连接片引出,并加以固定。为保证电阻应变片工作的长期稳定,应采取防潮措施,如在电阻应变片及其引线上涂以石蜡、环氧树脂等作为防护层。

3. 电阻应变片的特性

1) 电阻应变片的横向效应

当将如图 2-4 所示的电阻应变片粘贴在被测物体上时,由于其敏感栅是由 N 条长度为 l 的直线段和直线段端部的 $(N-1)$ 个半径为 r 的半圆弧组成的,若该应变片承受轴向应力而产生纵向拉应变 ϵ_x ,则各直线段的电阻将增加,但半圆弧则受到从 ϵ_x 到 $-\mu\epsilon_x$ 变化的应变,其电阻的变化将小于沿轴向安放的一样长度电阻丝电阻的变化。因而将直的电阻丝绕成敏感栅后,虽然长度不变,应变状态相同,但由于电阻应变片敏感栅的电阻变化减小,因而其灵敏度较整个电阻丝的灵敏度要低,这种现象称为电阻应变片的横向效应。

为了减小电阻应变片横向效应产生的测量误差,一般多采用金属箔式应变片。

2) 电阻应变片的初始电阻

电阻应变片未粘贴时,在室温下所测得的电阻称为电阻应变片的初始电阻,用符号 R_0 表示。一般情况下, R_0 越大,其允许的工作电压也越大,有利于灵敏度的提高。 R_0 常用的有 60Ω 、 120Ω 、 250Ω 、 350Ω 和 1000Ω 等,其中以 120Ω 最为常用。

3) 电阻应变片的温度误差及补偿

电阻应变片的敏感栅是由金属或半导体材料制成的,在工作时能感受应变。又因为应变会引起电阻变化,所以要提高测量精度,就必须消除或减小温度误差的影响。下面分析产



生温度误差的原因及温度补偿方法。

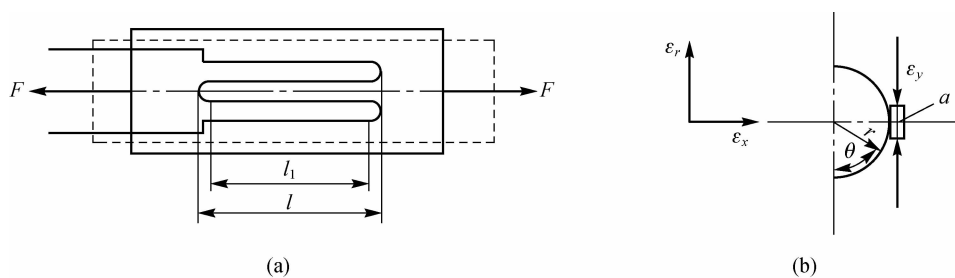


图 2-4 电阻应变片的轴向受力图及横向效应图

(1)产生温度误差的原因。实际上,电阻应变片的电阻受环境温度(包括被测物体的温度)的影响很大。因环境温度改变而引起电阻应变片的电阻变化主要有两个因素:其一是电阻应变片的电阻丝具有一定温度系数,其二是电阻应变片的电阻丝材料与被测物体材料的线膨胀系数不同。

当温度变化为 Δt ,敏感栅材料的电阻温度系数为 α 时(即 $1\ \Omega$ 的电阻当温度变化 $1\ ^\circ\text{C}$ 时的改变量),则电阻的相对变化为

$$\Delta R_{t\alpha} = R_t - R_0 = R_0 \alpha \Delta t \quad (2-6)$$

式中, R_t 为温度为 t 时的电阻(Ω),且 $R_t = R_0(1 + \alpha \Delta t)$; R_0 为温度为 t_0 时的电阻(Ω)。

另外,当温度变化 Δt 时,由于电阻应变片敏感栅材料和被测物体材料的线膨胀系数不同,电阻应变片产生附加的拉长(或压缩),引起电阻的相对变化。

设电阻丝和被测物体在温度为 $0\ ^\circ\text{C}$ 时的长度均为 l_0 ,线膨胀系数分别为 β_s 和 β_g ,若两者不粘贴,则它们的长度分别为

$$l_s = l_0(1 + \beta_s \Delta t) \quad (2-7)$$

$$l_g = l_0(1 + \beta_g \Delta t) \quad (2-8)$$

当两者粘贴在一起时,电阻丝产生的附加变形 Δl 、附加应变 $\epsilon_{i\beta}$ 和附加电阻变化 $\Delta R_{i\beta}$ 分别为

$$\Delta l = l_g - l_s = (\beta_g - \beta_s) l_0 \Delta t \quad (2-9)$$

$$\epsilon_{i\beta} = \frac{\Delta l}{l_0} = (\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (2-10)$$

$$\Delta R_{i\beta} = R_0 k \epsilon_{i\beta} = R_0 k (\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (2-11)$$

因此,由于环境温度变化形成电阻总的相对变化为

$$\frac{\Delta R_t}{R_0} = \frac{\Delta R_{t\alpha} + \Delta R_{i\beta}}{R_0} = \alpha \Delta t + k(\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (2-12)$$

(2)温度补偿方法。通常采用线路补偿法和电阻应变片的自补偿法,对电阻应变片的温度误差进行补偿。

①线路补偿法。电桥补偿法是最常用的且效果较好的线路补偿法,如图 2-5 所示为电桥补偿法的原理图。图中 R_1 为工作应变片, R_B 为补偿应变片, R_2 和 R_3 为固定电阻,且 $R_2 = R_3$ 。工作应变片 R_1 粘贴在被测物体上需要测量应变的地方,补偿应变片 R_B 粘贴在补偿块上,与被测物体温度相同,但不承受应变。

电桥输出电压 U_o 与桥臂电阻的关系为

$$U_o = A(R_1 R_2 - R_B R_3) \quad (2-13)$$

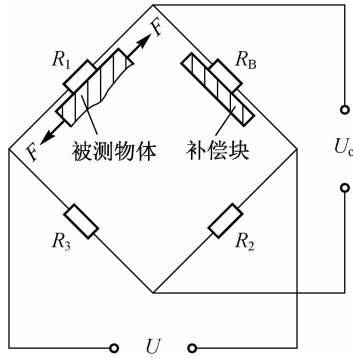


图 2-5 电桥补偿法的原理图

式中, A 为由电桥输出电压和桥臂电阻所决定的常数。

由式(2-13)可知, 当 R_2 和 R_3 为常数时, R_1 和 R_B 对电桥输出电压 U_o 的作用方向相反。利用这一基本关系可实现对温度的补偿。

当被测物体不承受应变时, R_1 和 R_B 又处于同一环境温度 t 的温度场中, 调整桥臂电阻, 使之达到平衡, 即

$$U_o = A(R_1 R_2 - R_B R_3) = 0 \tag{2-14}$$

工程上, 一般按 $R_1 = R_B = R_2 = R_3$ 来选取桥臂电阻。当温度变化 $\Delta t = t_0 - t$ 时, R_1 和 R_B 两个电阻应变片因温度变化而引起的电阻变化量相等, 电桥仍处于平衡状态, 即

$$U_o = A[(R_1 + \Delta R_{1t})R_2 - (R_B + \Delta R_{Bt})R_3] = 0 \tag{2-15}$$

若此时被测物体有应变 ϵ 的作用, 则工作应变片 R_1 又有新的增量, 即 $\Delta R_1 = R_1 k \epsilon$, 而补偿应变片因 R_B 不承受应变, 故不产生新的增量, 此时电桥输出电压为

$$U_o = A R_1 R_2 k \epsilon \tag{2-16}$$

由式(2-16)可知, 电桥的输出电压 U_o 仅与被测物体的应变 ϵ 有关, 而与环境温度无关。应当指出, 若要实现完全补偿, 上述分析过程必须满足以下三个条件:

- i) R_1 和 R_B 两个应变片应具有相同的电阻温度系数 α 、线膨胀系数 β 、灵敏度 k 和初始电阻 R_0 。
- ii) 粘贴在补偿应变片 R_B 上的补偿块的材料和粘贴在工作应变片 R_1 上的被测物体的材料必须一样, 两者的线膨胀系数必须相同。
- iii) R_1 和 R_B 两个应变片应处于同一温度场中。

电桥补偿法的优点是简单易行, 且能在较大的温度范围内实现补偿, 缺点是上述三个条件不易满足, 尤其是第三个条件, 由于温度梯度变化大, 因而 R_1 和 R_B 两个应变片很难处于同一温度场中。

②电阻应变片的自补偿法。当温度发生变化时, 电阻应变片自身的电阻为零, 这种特殊的电阻应变片称为自补偿电阻应变片。

由式(2-12)可知, 欲使 $\Delta R_t / R_0$ 不受 Δt 的影响, 需满足

$$\alpha = -k(\beta_g - \beta_s) \tag{2-17}$$

因此, 当被测物体材料的线膨胀系数 β_g 已知时, 合理选择电阻应变片的敏感栅材料, 使其电阻温度系数 α 、灵敏度 k 以及线膨胀系数 β_s 之间的关系满足式(2-17), 则不论温度如何变化, 均有 $\Delta R_t / R_0 = 0$, 进而达到了温度自补偿的目的。

电阻应变片的自补偿法的特点是容易加工,成本低,缺点是只适用特定材料,温度补偿范围较窄。

三、电阻应变式传感器的测量转换电路

电阻应变片的电阻变化范围很小,如果直接用欧姆表测量其电阻的变化是十分困难的。要把因微小应变引起的微小电阻的变化测量出来,同时还要把电阻相对变化 $\Delta R/R$ 转换为电压或电流的变化,就需要有专门用于测量应变变化而引起电阻变化的测量转换电路,通常采用桥式测量转换电路。按电源性质可分为交流电桥和直流电桥;按桥臂工作数量可分为单臂工作桥、半桥和全桥。下面以直流电桥为例分析其工作原理及特性,如图 2-6 所示为直流电桥式测量转换电路。

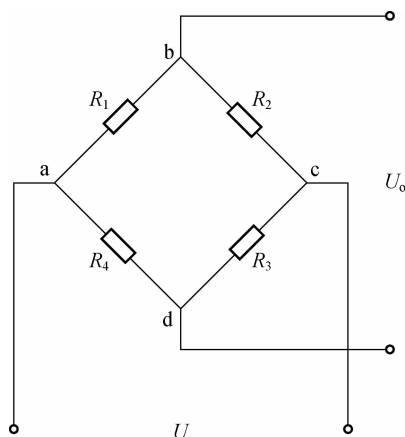


图 2-6 直流电桥式测量转换电路

直流电桥的一个对角点为输入电源电压 U ,另一个对角点为输出电压 U_o 。 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 均为桥臂电阻。

当负载电阻为无限大时,直流电桥的输出电压 U_o 为

$$U_o = U \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (2-18)$$

当直流电桥平衡时, $U_o = 0$, 则有

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (2-19)$$

当每个桥臂电阻的变化量 ΔR_i 远小于 R_i , 直流电桥负载电阻为无限大时, 直流电桥输出电压可近似表示为

$$U_o = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) U \quad (2-20)$$

通常采用全等桥臂形式工作, 即初始值 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, 则式(2-20)可变为

$$U_o = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (2-21)$$

当每个桥臂电阻应变片的灵敏度 k 都相同时, 则式(2-21)可变为

$$U_o = \frac{U}{4} k (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (2-22)$$

电阻应变片接入电桥电路通常有以下几种工作方式：

(1)单臂工作桥工作方式。单臂工作桥工作方式是指电桥一个桥臂接入应变片,其他三个桥臂采用固定电阻。若 R_1 为受力应变片,其余各桥臂为固定电阻,则式(2-21)可变为

$$U_o = \frac{U \Delta R_1}{4 R_1} = \frac{U}{4} k \epsilon_1 \quad (2-23)$$

(2)半桥工作方式。半桥工作方式是指电桥两个桥臂接入应变片。若 R_1 、 R_2 为受力应变片, R_3 、 R_4 为固定电阻,则式(2-21)可变为

$$U_o = \frac{U}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} \right) = \frac{U}{4} k (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (2-24)$$

(3)全桥工作方式。全桥工作方式是指电桥四个桥臂都接入应变片。若电桥的四个桥臂都为应变片,此时电桥输出电压的公式就是式(2-22),这种方式灵敏度最高。

在使用式(2-22)时,应注意应变值的符号。 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 、 ϵ_4 既可以是被测物体的纵向应变,又可以是被测物体的横向应变,它取决于应变片的粘贴方向。若是压应变, ϵ 应以负值代入;若是拉应变, ϵ 应以正值代入。

由式(2-23)和式(2-24)可知,电桥的输出电压 U_o 与电阻的变化 $\Delta R_i/R_i$ 以及应变值 ϵ 成正比。但上面讨论的各式都是在式(2-21)的基础上求得的,而式(2-21)只是一个近似式,对于单臂工作桥工作方式,实际输出 U_o 与电阻的变化量及应变之间存在一定的非线性关系。当应变值较小时,非线性关系可以忽略;而对于半导体应变片,尤其在测量较大应变时,非线性关系则不可忽略。对于半桥工作方式,两应变片处于差分工作状态,即一个应变片感受正应变,另一个应变片感受负应变,经推导可证明其理论上不存在非线性关系。全桥工作方式也是如此。因此,在实际使用时,应尽量采用这两种工作方式。此外,采用恒流源作为桥路电源也能减小非线性误差。

任务二 热电阻式传感器

测量温度的传感器种类很多。常用的有热电阻、热电偶、PN 结测温集成电路、红外辐射温度计等。本任务主要介绍热电阻式传感器。

热电阻式传感器是利用导体或半导体的电阻随温度变化而变化的原理进行测温的。它可分为金属热电阻式传感器和半导体热敏电阻式传感器。

一、金属热电阻式传感器

1. 金属热电阻式传感器的工作原理

物质的电阻率随温度变化而变化的现象称为热电阻效应。当温度改变时,金属导体或半导体的电阻随温度的变化而变化。对金属导体来说,温度上升时,金属导体的电阻将增大。这样,在一定温度范围内,可以通过测量电阻的变化而得出温度的变化。

假定取一个 220 V/60 W 的灯泡,用万用表测量其电阻,冷态时其电阻为几十欧姆,但根据公式 $R=U^2/P$ 计算得到的额定热态电阻为 807 Ω ,两者相差很多倍。由此可知,金属丝在不同的温度下电阻是不同的。

温度升高,金属导体内部电子热运动加剧,从而使自由电子通过金属导体时的阻力增

大,宏观上表现出电阻率变大,电阻增大;反之,则电阻减小。因此,金属导体具有正的温度系数,即电阻与温度的变化成正比。

2. 金属热电阻的分类和结构

1) 金属热电阻的分类

用于测量温度的金属热电阻,其材料的电阻温度系数应尽可能大且稳定;电阻率高,有利于减小体积,减小热惯性;在测量范围内,物理、化学性能稳定;工艺性能好,易于提纯、加工和复制。根据对金属热电阻的要求及金属材料的特性,目前使用最广泛的金属热电阻材料是铂和铜,另外,随着低温和超阻测量技术的发展,已开始采用钢、锰和碳等作为金属热电阻材料。

(1)铂热电阻。铂具有稳定的物理、化学性能,是目前制造金属热电阻的最好材料。它通常用作标准温度计,被广泛应用于温度的基准、标准的传递。其测量范围一般为 $-200\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$,是目前最好的温度计。

当温度 t 在 $-200\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内时,铂热电阻与温度的关系为

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3 (t - 100)] \quad (2-25)$$

当温度 t 在 $0\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内时,铂热电阻与温度的关系为

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2) \quad (2-26)$$

式中, A 为常数, $A = 3.96847 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; B 为常数, $B = -5.847 \times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}$; C 为常数, $C = -4.22 \times 10^{-12}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}$ 。

由式(2-25)和式(2-26)可知,铂热电阻 R_t 不仅与 t 有关,还与其在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的电阻 R_0 有关。即在同样温度下, R_0 的取值不同, R_t 的值就不同。因此,必须每隔 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测出铂热电阻在规定的测量范围内的 R_t 与温度 t 之间的所对应的电阻,并列成表格,这种表格称为金属热电阻的分度表。

(2)铜热电阻。在测量精度不太高、测量范围不太大的情况下,可以用铜热电阻来代替铂热电阻,这样可以降低成本,同时也能达到精度的要求。

用铜热电阻的主要缺点是电阻率小,因此,铜热电阻常用于介质温度不高、腐蚀性不强、测温元件体积不受限制的场合。

铂热电阻和铜热电阻的主要技术性能见表 2-1。

表 2-1 铂热电阻和铜热电阻的主要技术性能

材 料	铂	铜
测量范围/ $^{\circ}\text{C}$	$-200\sim 850$	$-50\sim 150$
电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	$9.81 \times 10^{-8} \sim 10.6 \times 10^{-8}$	1.7×10^{-8}
特 性	近似于线性、性能稳定、精度高	线性较好、价格低、体积大

2) 金属热电阻的结构

金属热电阻主要由热电阻丝、绝缘骨架、引线等组成。其中,热电阻丝是金属热电阻的主体。铂热电阻的结构如图 2-7 所示,铜热电阻的结构如图 2-8 所示。

3. 金属热电阻式传感器的测量转换电路

工业用的金属热电阻安装在生产现场,而其指示或记录仪表则安装在控制室,两者间的引线很长,如果仅用两根引线接在金属热电阻两端,那么两根引线本身的电阻势必和金属热

电阻串联在一起,造成测量误差。这个误差很难修正,因为引线的电阻随环境温度的变化而变化,环境温度并非处处相同,且又难以控制。因此,两线制连接方式不宜在工业热电阻上应用。

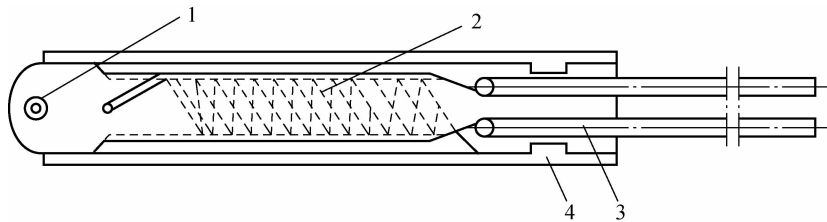


图 2-7 铂热电阻的结构

1—铆钉; 2—热电阻丝; 3—引线; 4—绝缘骨架

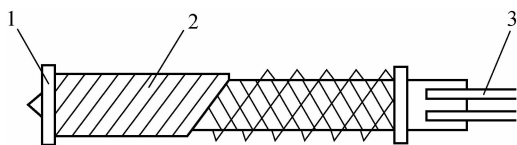


图 2-8 铜热电阻的结构

1—绝缘骨架; 2—漆包铜线; 3—引线



如图 2-9 所示,为避免或减小引线电阻对测量结果的影响,工业热电阻多采用三线制接法。即从工业热电阻引出三根引线,这三根引线粗细相同、长度相等,且电阻均为 R 。当工业热电阻和电桥配合使用时,采用这种引线方式可以较好地消除引线电阻的影响,提高测量精度。

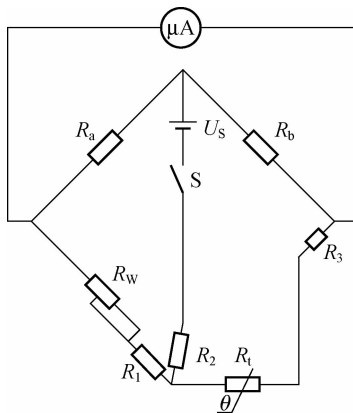


图 2-9 热电阻的三线制接法

二、半导体热敏电阻式传感器

半导体热敏电阻式传感器是一种对温度反应较敏感,且电阻会随温度的变化而变化的非线性电阻式传感器。它可以直接将温度的变化转化为电信号的变化。

1. 半导体热敏电阻式传感器的特性

金属的电阻随温度的升高而增大,但半导体却相反,它的电阻随温度的升高而急剧减小,并呈现非线性关系,如图 2-10 所示。

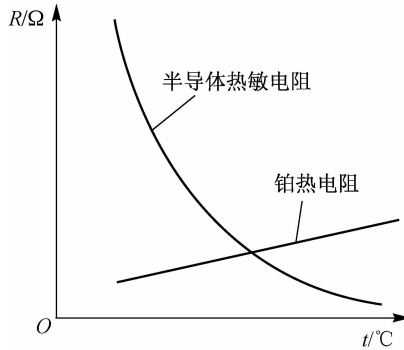


图 2-10 铂热电阻和半导体热敏电阻的温度特性曲线

由图 2-10 可知,在温度变化时,半导体热敏电阻变化得非常迅速。因此,可用它来测量较小的温度差异。

半导体的这种温度特性是因为它的导电方式是载流子(电子、空穴)导电。由于半导体中载流子的数目远比金属中的自由电子少得多,因而它的电阻很大。随着温度的升高,半导体中参加导电的载流子数目就会增多,因此,它的电阻率减小,电阻降低。

半导体热敏电阻正是利用半导体的电阻随温度变化这一特性而制成的热敏元件。

2. 半导体热敏电阻的分类与结构

1) 半导体热敏电阻的分类

半导体热敏电阻按温度系数可分为正温度系数热敏电阻 PTC 和负温度系数热敏电阻 NTC 与 CTR,三者的温度—电阻特性曲线如图 2-11 所示。正温度系数是指半导体热敏电阻的变化趋势与温度的变化趋势相同;负温度系数是指半导体热敏电阻的变化趋势与温度的变化趋势相反。

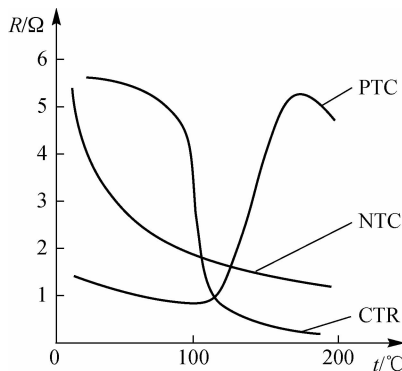


图 2-11 半导体热敏电阻的温度—电阻特性曲线

(1) PTC 热敏电阻。PTC 热敏电阻是一种具有温度敏感性的半导体热敏电阻,一旦超过一定的温度时,它的电阻会随着温度的升高呈阶跃式升高。典型的 PTC 热敏电阻通常是

在钛酸钡中掺入其他金属离子,以改变其温度系数和临界点温度。它的温度—电阻特性曲线呈非线性关系,见图 2-11。PTC 热敏电阻在工业上可用于温度的测量与控制,也可用于汽车某部位的温度检测与调节,还可大量用于民用设备,如控制瞬间开水器的水温,控制空调器与冷库的温度等。

由于 PTC 热敏电阻受温度影响较大,只要流过很小的电流,就能产生明显的电压变化,而电流对其自身又有加热的作用,所以使用时要注意勿使电流过大,以避免产生过大的测量误差。

(2)NTC 热敏电阻。NTC 热敏电阻主要由铁、镍、锰、钴、铜等金属氧化物混合烧结而成,改变混合物的成分和配比,就可以获得测量范围、电阻及电阻温度系数不同的 NTC 热敏电阻。它具有很高的负温度系数,特别适合于检测 $-100\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间的温度变化,并在点温、表面温度、温差、温场等测量中得到日益广泛的应用,同时也广泛地应用在自动控制及电子线路的热补偿线路中。

(3)CTR 热敏电阻。CTR 热敏电阻又称为临界温度型热敏电阻,是以三氧化二钒与钽、硅等氧化物,在磷、硅氧化物的弱还原气体中混合烧结而成的。通常,CTR 热敏电阻用树脂封装成珠状或厚膜形使用,其电阻在 $1\sim 10\text{ k}\Omega$ 之间。

CTR 热敏电阻随温度变化的特性属于剧变性,且具有开关特性,见图 2-11。当温度上升到某临界点时,其电阻会突然下降,突变的数量级为 $2\sim 4$ 。

由于 CTR 热敏电阻温度特性存在剧变性,因此,不能像 NTC 热敏电阻那样用于大范围的温度控制,而 CTR 热敏电阻在某一小范围内的温度控制却是十分优良的,可在特定的温度区间内使用。

2) 半导体热敏电阻的结构

半导体热敏电阻主要由热敏探头、引线和壳体组成,如图 2-12 所示。

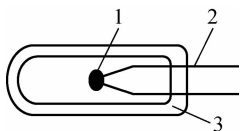


图 2-12 半导体热敏电阻的结构

1—热敏探头; 2—引线; 3—壳体

任务三 气敏电阻式传感器

现代社会中,人们在生产与生活中往往会接触到各种各样的气体,由于这些气体有许多是易燃、易爆的,如氢气、一氧化碳、煤气、天然气、液化石油气等,因而就需要对它们进行检测和控制。气敏电阻式传感器就是一种将检测到的气体成分与浓度转换为电信号的传感器。人们根据这些信号的强弱,就可以获得气体在环境中存在的信息,从而进行监控或报警。

一、气敏电阻式传感器的工作原理

气敏电阻式传感器是利用气体在半导体表面的氧化还原反应导致敏感元件电阻变化而制成的。当半导体表面被加热到稳定状态时,气体接触半导体表面而被吸附,吸附的分子首先在半导体表面自由扩散,失去运动能量,一部分分子被蒸发掉,另一部分分子固定在吸附



处。如果半导体的功函数小于吸附分子的电子亲和力所具有的能量,则吸附分子将从半导体中夺得电子而形成负离子吸附,从而导致半导体表面呈现电荷层。具有负离子吸附倾向的气体,如氧气等,被称为氧化型气体或电子接收型气体。如果半导体的功函数大于吸附分子的离解能,则吸附分子将向半导体中释放出电子而形成正离子吸附。具有正离子吸附倾向的气体,如氢气、一氧化碳、碳氢化合物和醇类等,被称为还原型气体或电子供给型气体。

二、气敏电阻式传感器的结构和分类

气敏电阻式传感器一般由敏感元件、加热器和外壳三部分组成。

1. 按结构分

气敏电阻式传感器按结构可分为烧结型气敏电阻式传感器、薄膜型气敏电阻式传感器和厚膜型气敏电阻式传感器,如图 2-13 所示。

1) 烧结型气敏电阻式传感器

图 2-13(a)中的烧结型气敏电阻式传感器是以氧化物半导体材料(如 SnO_2)为基体,将电极和加热器埋入金属氧化物中,经加热或加压成形后,再用低温($700\sim 900\text{ }^\circ\text{C}$)制陶工艺烧结制成,因此,它又称为半导体陶瓷。这种气敏电阻式传感器的制作方法简单、寿命较长,但由于烧结不充分,使得其机械强度较差,且所用电极材料较为昂贵。此外,由于其电特性误差较大,因而应用受到一定限制。

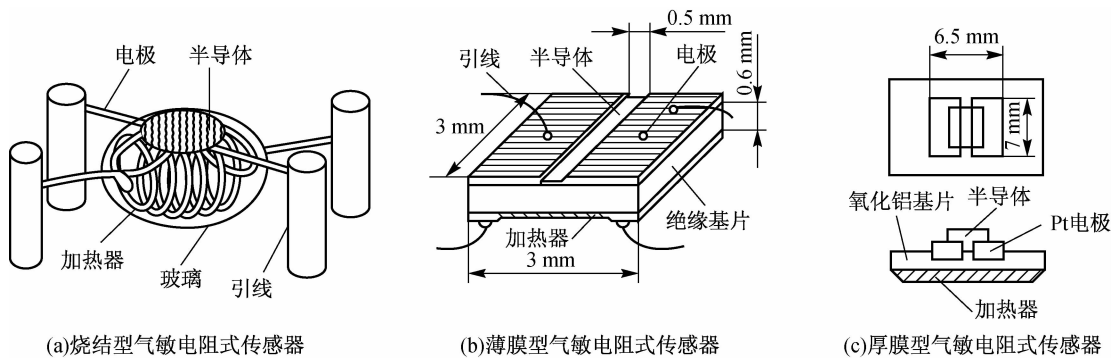


图 2-13 气敏电阻式传感器的结构

2) 薄膜型气敏电阻式传感器

图 2-13(b)中的薄膜型气敏电阻式传感器用蒸发或溅射方法在绝缘(石英或陶瓷)基片上形成金属氧化物薄膜(厚度在 100 nm 以下)。用这种方法制成敏感元件的薄膜的颗粒很小,因此,它具有很高的灵敏度和响应速度。敏感元件的薄膜化有利于实现气敏电阻式传感器的低功耗、小型化,以及与集成电路制造技术兼容,所以它是一种很有发展前景的气敏电阻式传感器。

3) 厚膜型气敏电阻式传感器

图 2-13(c)中将气敏材料与一定比例的硅凝胶混制成能印刷的厚膜胶,把厚膜胶用丝网印刷到事先安装有铂电极的氧化铝基片上,在 $400\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ 下烧结 $1\sim 2\text{ h}$ 便制成厚膜型气敏电阻式传感器。用厚膜工艺制成的电阻式传感器的一致性较好、机械强度高,适合于批量生产。

这些气敏电阻式传感器全部附有加热器,它的作用是烧掉附着在探测部分的油雾和尘

埃,同时加速气体的氧化还原反应,从而提高气敏电阻式传感器的灵敏度和响应速度。

2. 按加热方式分

气敏电阻式传感器按加热方式可分为直热型气敏电阻式传感器和旁热型气敏电阻式传感器。

1) 直热型气敏电阻式传感器

直热型气敏电阻式传感器又称为内热型气敏电阻式传感器,其芯片的结构、符号及应用连接方式如图 2-14 所示。该气敏电阻式传感器是由芯片(包括敏感元件和加热器)、基座和金属防爆网罩组成的。其芯片结构的特点是在以氧化锡 SnO_2 为主要成分的烧结体中,埋设两根作为电极并兼作加热器的螺旋形铂-铱合金线(电阻约为 $2\sim 5\ \Omega$)。这种气敏电阻式传感器虽然结构简单、成本低廉,但其热容量小,易受环境气流的影响,稳定性差。

2) 旁热型气敏电阻式传感器

旁热型气敏电阻式传感器实际上是一种厚膜型气敏电阻式传感器,其管芯结构和符号如图 2-15 所示。在一根内径为 $0.8\ \mu\text{m}$,外径为 $1.2\ \mu\text{m}$ 的薄壁陶瓷管的两端设置一对金属电极及铂-铱合金丝引出线,然后在陶瓷管的外壁涂上以基础材料配制的浆料层,经烧结后形成厚膜气体敏感层。在陶瓷管内放入一根螺旋形高电阻金属丝(如 Ni-Cr 丝)作为加热器(其电阻约为 $30\sim 40\ \Omega$)。这种管芯结构的测量电极与加热器分离,避免了相互干扰,而且敏感元件的热容量较大,减少了环境温度变化对敏感元件特性的影响。其可靠性和使用寿命都比直热型气敏电阻式传感器高。

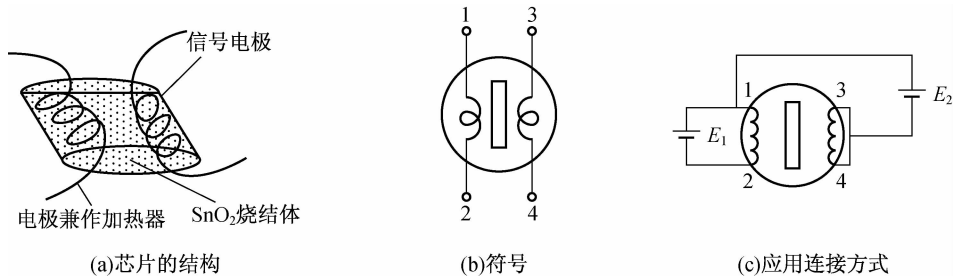


图 2-14 直热型气敏电阻式传感器

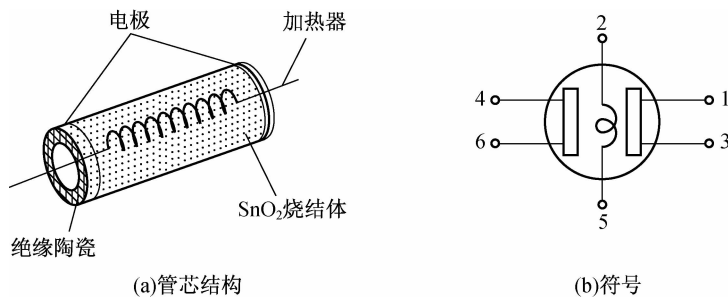


图 2-15 旁热型气敏电阻式传感器

任务四 湿敏电阻式传感器

湿敏电阻式传感器是由湿敏元件和测量转换电路等组成,能感受外界湿度(通常将空气或其他气体中的水分含量称为湿度)的变化,并通过湿敏电阻式传感器的物理或化学性质的变化,将环境湿度变换为电信号的装置。

与温度测量相比,对湿度进行精确地测量是很困难的。其原因在于空气中的水蒸气含量极少,并且难以集中在湿敏元件表面;此外,水蒸气会使一些感湿材料溶解、腐蚀、老化,从而丧失原有的感湿功能;再者,湿度信息的传递必须通过水分对感湿元件直接接触来完成,因此,感湿元件只能暴露在待测环境中,而不能密封,易于损坏。20世纪50年代后,陆续出现了电阻型等湿敏计,使湿度的测量精度大大提高,但是与其他物理量的检测相比,无论是在性能上,还是在制造工艺上都难得多。近几年出现的半导体湿敏电阻式传感器和MOS型湿敏电阻式传感器已达到较高水平,且具有工作范围宽、响应速度快、环境适应能力强等特点。

一、大气湿度与露点

所谓湿度是指空气中所含有水蒸气的量。它表明大气的干湿程度,常用绝对湿度和相对湿度表示。

1. 绝对湿度和相对湿度

1) 绝对湿度

地球表面的大气层是由78%的氮气、21%的氧气和一小部分二氧化碳、水蒸气以及其他一些惰性气体混合而成的。由于地面上的水和动植物存在着水分蒸发现象,使得地面上不断地生成水蒸气,因而大气中含有水蒸气的量在不停地变化着。水分的蒸发和凝结的过程总是伴随着吸热和放热,因此,大气中水蒸气的多少不但会影响大气的温度,而且会使空气出现潮湿或干燥现象。大气的绝对湿度是用大气中水蒸气的密度来表示的,通常以每单位体积的混合气体中所含水蒸气的质量表示。绝对湿度一般用符号 AH 表示,单位为 g/m^3 或 mg/m^3 ,其表达式为

$$AH = \frac{m_v}{V} \quad (2-27)$$

式中, m_v 为待测空气中的水蒸气的质量(g); V 为待测空气的总体积(m^3)。

2) 相对湿度

在许多与大气湿度相关的现象中,如农作物的生长、棉纱的断头以及人们的感受等,都与大气的绝对湿度没有直接的关系,而与大气中的水蒸气离饱和状态的远近程度有关。例如,同样是10 mmHg的绝对湿度,如果是在炎热的夏季中午,由于离当时的饱和水蒸气的气压(31.38 mmHg)尚远,使人感到干燥;如果是在初夏的傍晚,由于10 mmHg接近当时的饱和水蒸气的气压(18.05 mmHg),而使人感到潮湿。因此,有必要引入一个新的物理量——相对湿度。

相对湿度是指待测气体中水蒸气的气压与该气体在相同温度下饱和水蒸气的气压的百分比。相对湿度给出大气的潮湿程度,因此,它是一个无量纲的值,一般用符号 RH 表示,其表达式为

$$RH = \frac{P_v}{P_w} \times 100\% \quad (2-28)$$

式中, P_v 为在温度为 t 时待测气体中水蒸气的气压(Pa); P_w 为待测气体在温度为 t 时的饱和水蒸气的气压(Pa)。

在标准大气压的不同温度下饱和水蒸气的气压见表 2-2。

表 2-2 在标准大气压的不同温度下饱和水蒸气的气压

温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气 气压 P_w/Pa	温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气 气压 P_w/Pa	温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气 气压 P_w/Pa	温度 $t/^\circ\text{C}$	饱和水蒸气 气压 P_w/Pa
-20	0.77	-9	2.13	2	5.29	22	19.83
-19	0.85	-8	2.32	3	5.69	23	21.07
-18	0.94	-7	2.53	4	6.10	24	22.38
-17	1.03	-6	2.76	5	6.45	25	23.78
-16	1.13	-5	3.01	6	7.01	30	31.82
-15	1.24	-4	3.28	7	7.51	40	55.32
-14	1.36	-3	3.57	8	8.05	50	92.50
-13	1.49	-2	3.88	9	8.61	60	149.4
-12	1.63	-1	4.22	10	9.21	70	233.7
-11	1.78	0	4.58	20	17.54	80	355.7
-10	1.93	1	4.93	21	18.65	100	760.0

如果已知温度为 t 时空气中水蒸气的气压 P_v , 通过表 2-2 查得温度为 t 时饱和水蒸气的气压 P_w , 就可以利用式(2-28)计算出此时空气的相对湿度。

2. 露点

由表 2-2 可知, 饱和水蒸气的气压是随着空气温度的下降而逐渐减小的, 由此可知, 在同样的气压下, 空气温度越低, 则空气中水蒸气的气压与同一温度下饱和水蒸气的气压的差值就越小。当温度下降到某一温度, 空气中水蒸气的气压与同一温度下的饱和水蒸气的气压相等时, 空气中的水蒸气将向液相转化而凝结为露珠, 其相对湿度 RH 为 100%, 这一特定的温度被称为空气的露点温度; 如果这一特定温度低于 0°C , 水蒸气将会结霜, 因此, 这一温度又称为霜点温度, 通常两者统称为露点。空气中水蒸气的气压越小, 露点越低。因此, 只要知道待测空气的露点温度, 通过表 2-2 就可以查到在该露点温度下的饱和水蒸气的气压, 这个饱和水蒸气的气压也就是待测空气中水蒸气的气压。

二、湿敏电阻式传感器的分类

水是一种强极性电介质。水分子有较大的电偶极矩, 在氢原子附近有极大的正电场, 因而它具有很大的电子亲和力。水分子易于吸附在物体表面并渗透到固体内部的这种特性称为水分子亲和力。水分子附着或浸入湿度功能材料后, 不仅具有物理吸附性, 而且还具有化学吸附性, 其结果使功能材料的电性能产生变化, 如氯化锂、氧化锌材料的阻抗发生变化。因此, 这些材料可制成湿敏电阻式传感器。另外, 利用某些材料与水分子接触的物理效应也可以测量湿度。因此, 可以将湿敏电阻式传感器分为水分子亲和力型湿敏电阻式传感器和

非水分子亲和力和型湿敏电阻式传感器。湿敏电阻式传感器的分类见表 2-3。

表 2-3 湿敏电阻式传感器的分类

按水分子亲和力和分类	湿敏电阻式传感器的类型
水分子亲和力和型	尺寸变化式湿敏电阻式传感器、电解质湿敏电阻式传感器、高分子材料湿敏电阻式传感器、金属氧化物膜型湿敏电阻式传感器、金属氧化物陶瓷湿敏电阻式传感器、硒膜及水晶振子湿敏电阻式传感器
非水分子亲和力和型	热敏电阻式湿敏电阻式传感器、红外线吸收式湿敏电阻式传感器、微波式湿敏电阻式传感器、超声波式湿敏电阻式传感器
其他	CFT 湿敏电阻式传感器等

在现代工业中使用的湿敏电阻式传感器大多是水分子亲和力和型湿敏电阻式传感器，它们将湿度的变化转化为阻抗或电容的变化后输出。

常用的湿敏电阻式传感器主要有金属氧化物陶瓷湿敏电阻式传感器、金属氧化物膜型湿敏电阻式传感器、高分子材料湿敏电阻式传感器等。

1. 金属氧化物陶瓷湿敏电阻式传感器

金属氧化物陶瓷湿敏电阻式传感器是由金属氧化物多孔性陶瓷烧结而成的。烧结体上有微细孔，可使湿敏层吸附或释放水分子，造成其电阻改变。

金属氧化物陶瓷湿敏电阻式传感器是当今湿敏电阻式传感器的发展方向，近几年世界上许多国家通过各种研究发现了不少能作为电阻型湿度多孔陶瓷的材料，如二氧化锡-三氧化二铝-二氧化钛、氧化镍等。

氧化镁复合氧化物-二氧化钛这种湿度材料可制成多孔陶瓷湿-电转换元件，其结构如图 2-16 所示。图中氧化镁复合氧化物为 P 型半导体，它的电阻率低，电阻的温度特性好。在该转换元件的湿敏陶瓷片两面涂覆有多孔金属电极。金属电极与引线烧结在一起，为了减小测量误差，在湿敏陶瓷片外设置由镍铬丝制成的加热线圈，以便对该转换元件加热清洗，减小恶劣气体对它的污染。整个转换元件安装在陶瓷基片上，引线一般采用铂-铱合金。

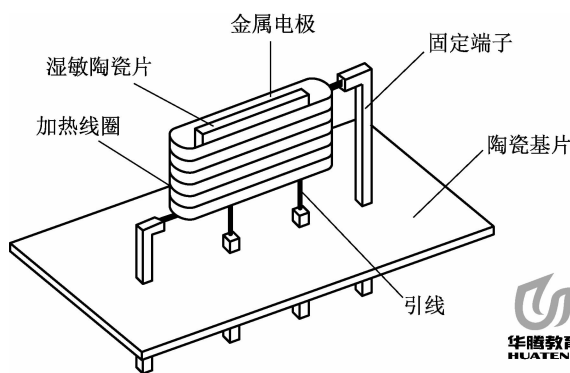


图 2-16 多孔陶瓷湿-电转换元件

氧化镁复合氧化物-二氧化钛陶瓷湿敏电阻式传感器的相对湿度与电阻之间的关系，如图 2-17 所示。由图 2-17 可知，该传感器的电阻既可随所处环境的相对湿度的增加而减小，又可随周围环境温度的变化而变化。

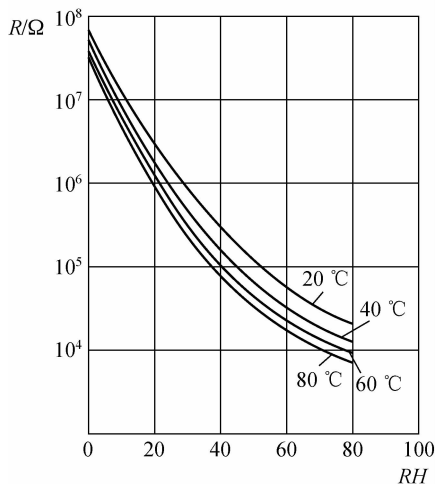


图 2-17 氧化镁复合氧化物-二氧化钛陶瓷湿敏电阻式传感器的相对湿度与电阻的关系

氧化镁复合氧化物-二氧化钛陶瓷湿敏电阻式传感器在使用前,应先加热约 1 min,以消除由油污及各种有机蒸气等的污染所引起的性能恶化。

氧化镁复合氧化物-二氧化钛陶瓷湿敏电阻式传感器的特点是使用范围宽,湿度、温度系数小,响应时间短,特别是对其进行多次加热、清洗后性能仍然较稳定。

2. 金属氧化物膜型湿敏电阻式传感器

三氧化二铁、三氧化二铝、氧化镁等金属氧化物的细粉吸附水分后有极快的速干特性,利用这种现象可以研制生产出多种金属氧化物膜型湿敏电阻式传感器。这类传感器的结构如图 2-18 所示。在陶瓷基片上先制作钯银梳状电极,然后采用丝网印制、涂布或喷射等工艺方法,将调制好的金属氧化物的糊状物加工在陶瓷基片及电极上,采用烧结或烘干方法使之固化成膜。这种膜可以吸附或释放水分子而改变其电阻。通过测量电极的电阻还可检测相对湿度。这类传感器的特点是传感器电阻的对数与湿度呈线性关系,具有测量湿度范围大及工作温度范围大的优点,使用寿命可达两年以上。

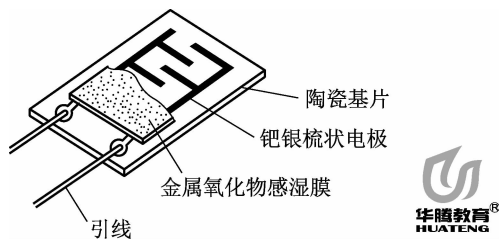


图 2-18 金属氧化物膜型湿敏电阻式传感器的结构

3. 高分子材料湿敏电阻式传感器

高分子材料湿敏电阻式传感器是目前发展较快的一种新型湿敏电阻式传感器。它的外形与应变式荷重传感器相似,只是其吸湿材料是用可吸湿电离的高分子材料制成的。例如,高氯酸锂-聚氯乙烯、四甲基硅烷的共聚膜等。

高分子材料湿敏电阻式传感器具有响应时间快、线性好、成本低等特点。

任务五 电阻式传感器的应用

一、电阻应变式传感器的应用

在测量被测物体的应变时,只要直接将应变片粘贴在被测物体上,即可用测量仪表(如电阻应变仪)测量。而在测量力和加速度时,就需要辅助构件,如弹性元件、补偿元件等,先将这些物理量转换成应变,然后再用应变片进行测量。由于实际使用的电阻式传感器形式很多,下面仅列举几种常见的电阻式传感器。

1. 应变式荷重传感器

测力和称重传感器有较大一部分是采用应变式荷重传感器,如图 2-19 所示为应变式荷重传感器的结构。

应变片粘贴在钢制圆柱(也称为等截面轴,可以是实心圆柱,也可以是空心薄壁圆筒)的表面。在力的作用下,等截面轴产生应变。 R_1 和 R_3 感受到的应变与等截面轴的轴向应变相同,为压应变。 R_2 和 R_4 沿圆周方向粘贴,根据材料力学和日常生活的经验可知,当等截面轴受压时,沿 R_2 和 R_4 的方向上反而是受拉的,即等截面轴的轴向应变与其径向应变符号相反。

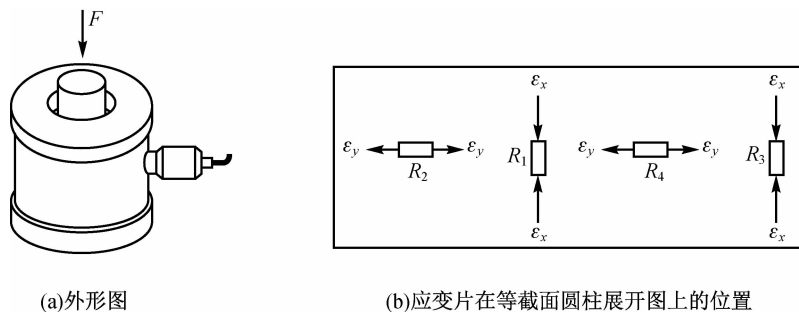


图 2-19 应变式荷重传感器的结构

电子吊车秤是应变式荷重传感器在实际生产中的应用。

1) 应变式荷重传感器安装在吊钩上的安装方式

如图 2-20 所示,这是一种简单的安装方式,此时应变式荷重传感器将承受全部载荷,在起吊过程中由于载荷的转动,使应变式荷重传感器受扭力而产生误差。为了克服此扭力,在吊环与吊钩之间加了一副防扭转臂。此转臂对被测力无影响,而扭力通过吊钩、转臂而作用在吊环上,使吊环、吊钩一起扭转,对应变式荷重传感器的作用就减小了。

应变式荷重传感器安装在吊钩上,使得连接它的信号线也要随吊钩上下运动,需要设计一套电缆收放装置。同时,这种收放装置在被测物料是高温物料(如钢水)时是不能采用的。

2) 应变式荷重传感器安装在钢丝绳固定端的方式

如图 2-21 所示,这种安装方式也比较简单而且传感器远离被吊物体,这对吊装炽热物体尤为有利。

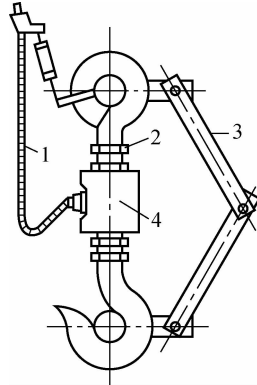


图 2-20 应变式荷重传感器在吊钩上的安装
1—信号电缆；2—限位螺钉；3—防扭转臂；4—应变式荷重传感器

2. 应变式加速度传感器

应变式加速度传感器是一种利用金属箔应变片或半导体应变片作为敏感元件进行加速度测量的传感器。它们可分别组成应变加速度计和压阻加速度计,具有体积小、重量轻、输出阻抗低的优点,可用于飞机、轮船、机车、桥梁等振动加速度的测量。如图 2-22 所示为应变式加速度传感器的结构示意图。在悬臂梁 2 的一端固定惯性质量块 1,梁的另一端用螺钉固定在壳体 5 上,在梁的上下两面粘贴应变片 4。测量振动时,将应变式加速度传感器的壳体 5 和被测物体刚性地固定在一起,因此,作用在惯性质量块 1 上的惯性力使悬臂梁 2 产生弯曲变形(应变),该变形被粘贴在悬臂梁 2 上的应变片 4 感受到并随之产生应变,从而使应变片 4 的电阻发生变化,电阻的变化引起应变片 4 组成的桥路出现不平衡,从而输出电压,即可得出加速度的大小。

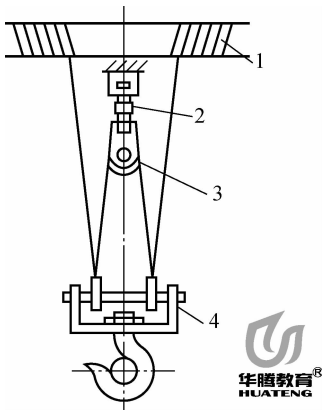


图 2-21 应变式荷重传感器安装在钢丝绳固定端
1—卷扬筒；2—应变式荷重传感器；
3—定滑轮；4—动滑轮

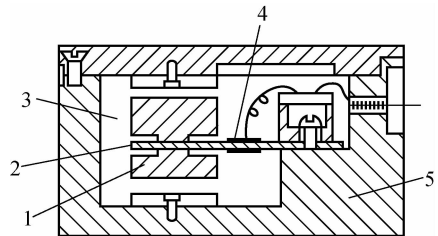


图 2-22 应变式加速度传感器的结构
1—惯性质量块；2—悬臂梁；3—腔体；
4—应变片；5—壳体

3. 压阻式压力传感器

压阻式压力传感器是利用单晶硅的压阻效应制成的器件。压阻式压力传感器精度高,



工作可靠,容易实现数字化,与应变式压力传感器相比,具有体积小、输出信号大的优点,是目前压力测量中使用最多的一种传感器。

1) 压阻式压力传感器的工作原理

压阻式压力传感器是采用集成电路工艺技术,在硅片上制作出四个等值的薄膜电阻,并组成电桥电路。当不受压力作用时,电桥处于平衡状态,无电压输出;当受到压力作用时,电桥失去平衡,有电压输出。其工作原理如图 2-23 所示。

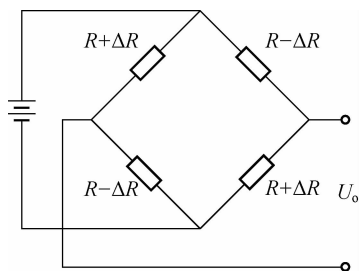


图 2-23 压阻式压力传感器的工作原理

压阻式压力传感器与其他形式的压力传感器相比有许多突出的优点。由于四个扩散型应变电阻是直接制作在同一硅片上的,且硅膜本身就是很好的弹性元件,所以工艺一致性好,灵敏度 k 相等,四个电阻初始值相等,温度引起的电阻漂移能互相抵消,迟滞、蠕变都非常小,动态响应快。又由于半导体压阻系数很高,所以这种压力传感器的灵敏度较高、输出信号大。随着半导体技术的发展,还有可能将信号处理电路、温度补偿电路等一起制作在同一硅片上,所以其性能将越来越好。目前,这种体积小、集成度高、性能好的压力传感器在工业中得到越来越广泛的应用。

2) 压阻式压力传感器的应用

压阻式压力传感器是由外壳、硅膜片和引线组成的。其核心部分是一块圆形的硅膜片,在硅膜片上利用扩散工艺设置四个阻值相等的电阻构成电桥。硅膜片的四周用圆环(硅杯)固定,以减小硅膜片与基座连接所带来的性能变化,如图 2-24 所示。

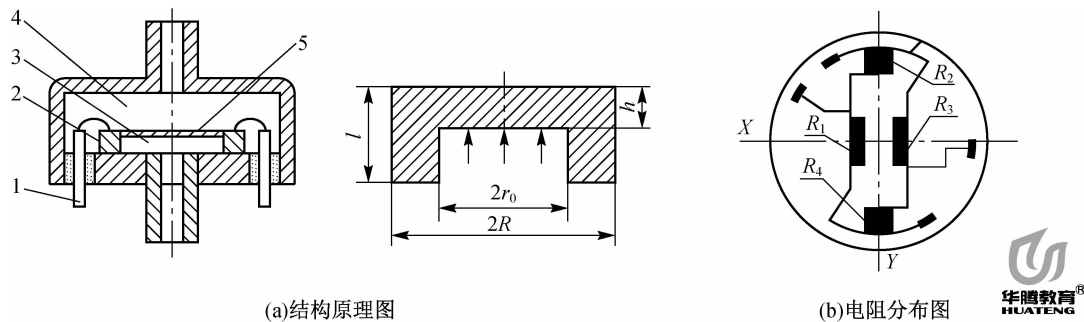


图 2-24 压阻式压力传感器的结构

1—引线; 2—硅杯; 3—高压腔; 4—低压腔; 5—硅膜片

硅膜片 5 的两边有两个压力腔,一个是和被测系统相连接的高压腔 3,另一个是低压腔 4,通常和大气相通,其结构见图 2-24(a)。当硅膜片 5 两边存在压力差时,硅膜片 5 上各点存在应力。四个电阻在应力作用下发生变化,电桥失去平衡,输出相应的电压。该电压和硅

膜片 5 的两边压力差成正比,这样,测出不平衡电桥的输出电压就能求出硅膜片 5 所受的压力差。

二、热电阻式传感器和热敏电阻式传感器的应用

1. 热电阻式传感器的应用

1) 温度测量

利用热电阻的高灵敏度进行液体、气体、固体、固熔体等方面的温度测量,是热电阻的主要应用。在标准测量或实验室精密测量中常用四线制接法,这样不仅可以消除连接引线电阻的影响,而且还可以消除测量电路中寄生电势引起的误差。在测量过程中需要注意的是,流过电阻丝的电流不要过大,否则会产生过大的热量,影响测量精度。如图 2-25 所示为热电阻的温度测量电路。

2) 流量测量

利用热电阻上的热量消耗和介质流速的关系可以测量流量、流速、风速等。如图 2-26 所示为利用铂热电阻测量气体流量的电路原理图。图中热电阻 R_{t1} 放置在气体流的中央位置,它所耗散的热量与被测介质的平均流速成正比;另一热电阻 R_{t2} 放置在不受气体流干扰的平静小室中,它们分别接在电桥的两个相邻桥臂上。测量电路在气体静止时处于平衡状态,桥路输出为零。当气体流动时,被测介质会将 R_{t1} 的热量带走,从而使 R_{t1} 和 R_{t2} 的散热情况不一样,致使 R_{t1} 的电阻发生相应的变化,使电桥失去平衡,产生一个与气体流量变化相对应的不平衡信号,并由检流计 P 显示出来。

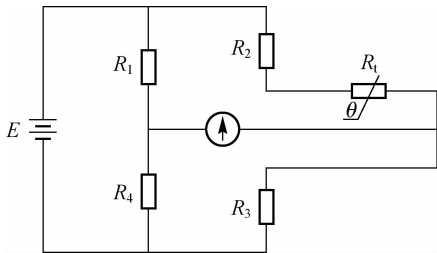


图 2-25 热电阻的温度测量电路

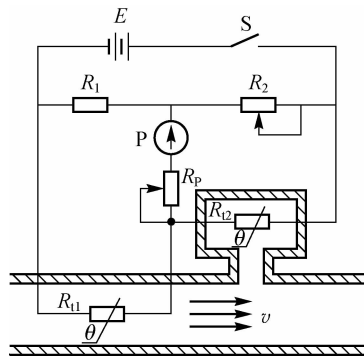


图 2-26 利用铂热电阻测量气体流量的电路原理图

2. 热敏电阻式传感器的应用

由于热敏电阻具有许多优点,所以应用范围很广,可用于温度测量、温度控制、温度补偿、稳压稳幅、自动增益调整、气体和液体分析、火灾报警以及过热保护等方面。下面介绍几种主要应用方法。

1) 温度补偿

仪表中通常用的一些零件多数是金属丝制成的,如线圈、绕组等。金属一般具有正温度系数,采用负温度系数热敏电阻进行补偿,可以抵消由温度变化所产生的误差。实际应用时,将负温度系数热敏电阻与锰铜丝电阻并联后再与被补偿元件串联,如图 2-27 所示。在三极管电路、对数放大器等电路中也常用热敏电阻补偿由温度引起的漂移误差。

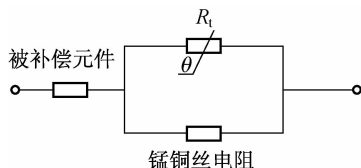


图 2-27 热敏电阻温度补偿

2) 电动机的过热保护控制

电动机往往由于超负荷、断相及机械传动部分发生故障等原因造成绕组发热,当温度升高到超过电动机允许的最高温度时,会使电动机烧坏。利用 PTC 热敏电阻具有正温度系数这一特性可实现电动机的过热保护。

如图 2-28 所示为电动机的过热保护电路, R_{11} 、 R_{12} 、 R_{13} 是特性相同的 PTC 热敏电阻,它们应埋设在电动机绕组的端部,在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时其电阻为 $10\text{ k}\Omega$,在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时其电阻为 $1\text{ k}\Omega$,在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时其电阻为 $0.6\text{ k}\Omega$ 。正常运行时,三极管 BG 截止,继电器 KA 动作。当电动机过载、断相或一相接地时,电动机温度急剧升高,PTC 热敏电阻急剧减小,到一定值时,三极管 BG 导通,继电器 KA 得电吸合,从而实现保护。根据电动机各种绝缘等级的允许温升来调节偏流电阻 R_2 ,从而确定三极管 BG 的动作点,其效果优于熔丝及双金属片热继电器。

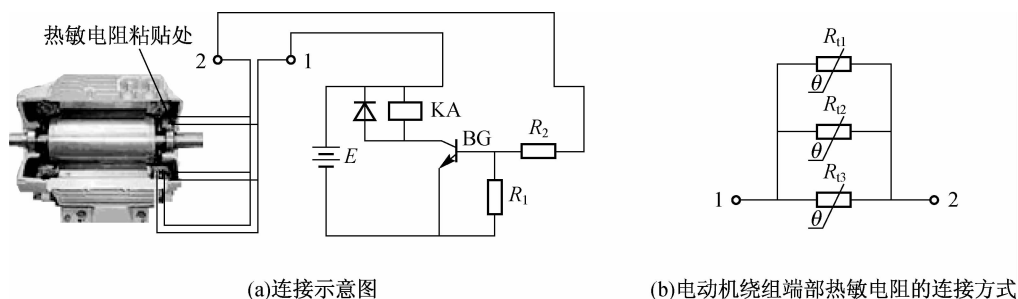


图 2-28 电动机的过热保护电路

三、气敏电阻式传感器的应用

气敏电阻式传感器广泛应用于防灾报警,如可制成液化石油气、天然气、城市煤气、煤矿瓦斯以及有毒气体等方面的报警器,也可用于对大气污染进行监测以及在医疗上用于对氧气和一氧化碳等气体的测量,在日常生活中则可用于空调机、烹调装置、酒精浓度探测等方面。

1. 简易家用气体报警器

如图 2-29 所示为一种最简单的家用气体报警器的内部电路,该电路采用的是直热型气敏电阻式传感器 TGS109。当室内可燃性气体浓度增加时,气敏电阻式传感器接触到可燃性气体而电阻降低,这样流经测试回路的电流增加,可直接驱动蜂鸣器 BZ 报警。

2. 酒精检测报警器

酒精检测报警器必须选用只对酒精敏感的 QM-NJ9 型酒精气敏电阻式传感器。如图 2-30 所示为酒精检测报警器的内部电路。图中三端稳压器 7805 将酒精气敏电阻式传感器的加热电压稳定在 5 V 左右,保证该传感器工作的稳定性和高灵敏度。当酒精气敏电阻

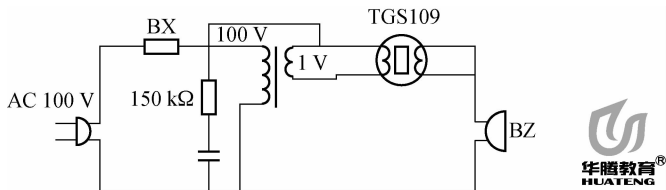


图 2-29 家用气体报警器的内部电路

式传感器接触酒精气味后, B 点电压增大, 且升高值随检测到的酒精浓度增大而增大。语音报警电路中的 IC₃ 和 IC₄ 组成语言声光报警器, 当该电压达到 1.6 V 时 IC₂ 导通, IC₃ 得电后酒精检测报警器发出连续不断的语音报警声, 经 C₆ 输入到 IC₄ 放大后, 由扬声器 Y 发出响亮的报警声, 并驱动 LED 闪光报警, 同时继电器 K 动作, 其常闭触点断开切断点火电路, 强制电动机熄火。酒精检测报警器既可安装在各种机动车上用来限制酒后开车, 又可制成便携式酒精检测报警器供交通人员用于检测交通现场。

图 2-30 中的电路的消耗功率小于 0.75 W, 响应时间小于 10 s, 恢复时间小于 60 s, 适合 -200~50 °C 的环境条件。测试前应接通电源预热 5~10 min, 待其工作稳定后测一下 A 和 B 间的电阻, 看其在洁净空气中的电阻和在含有酒精空气中的电阻差别是否明显, 一般要求两者差别越大越好。全部元件装好后应开机预热 3~5 min, 然后调节 R_P, 使酒精检测报警器处于报警临界状态, 再将低于 39° 的白酒接近探头, 此时酒精检测报警器应发出声光报警, 否则应重新调试。

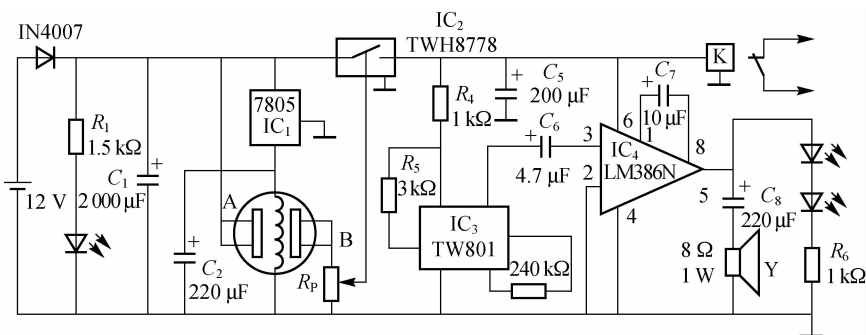


图 2-30 酒精检测报警器的内部电路

四、湿敏电阻式传感器的应用

湿敏电阻式传感器的应用领域非常广阔, 可广泛使用于各种场合的湿度监测、控制和报警。

1. 自动气象站湿度测报

湿敏电阻式传感器广泛用于自动气象站的遥测装置中。耗电量很小的湿敏电阻式传感器可以由蓄电池供电而长期自动工作, 几乎不需要维护。用于无线电遥测自动气象站的湿度测报原理方框图如图 2-31 所示。

氯化锂湿敏电阻式传感器将被测湿度转换为电阻 R , R/f 转换电路将此电阻 R 转换为相应的频率 f , 再经湿度自校准器控制, 使频率 f 与相对湿度一一对应, 最后经门电路记录在记录仪上。如果需要远距离数据传输, 还需要将得到的数字量编码, 调制到无线电载波上

发射出去。

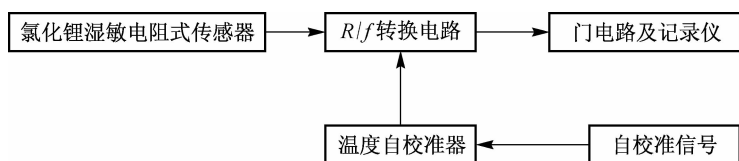


图 2-31 无线电遥测自动气象站的湿度测报原理方框图

2. 汽车后窗玻璃自动去湿装置

如图 2-32 所示为一种用于汽车后窗玻璃自动去湿装置的内部电路，其目的是防止驾驶室的挡风玻璃结露或结霜，保证驾驶员视线清楚，避免事故发生。该电路也可用于其他需要去湿的场合。

图 2-32 中， R_L 为嵌入玻璃的加热电阻，RH 为设置在后窗玻璃上的湿敏电阻式传感器。由 VT_1 和 VT_2 三极管组成施密特触发电路，在 VT_1 的基极接由 R_1 、 R_2 和湿敏电阻式传感器 RH 的电阻组成的偏置电路。在常温常湿条件下，由于 RH 的电阻较大，因而 VT_1 处于导通状态， VT_2 处于截止状态，继电器 K_1 的线圈不工作，加热电阻 R_L 无电流流过。当车内外温差较大，且湿度过大时，湿敏电阻式传感器 RH 的电阻减小，使 VT_1 处于截止状态， VT_2 处于导通状态，继电器 K_1 的线圈工作，其常开触点 K_1 闭合，加热电阻 R_L 开始加热，后窗玻璃上的潮气被驱散。

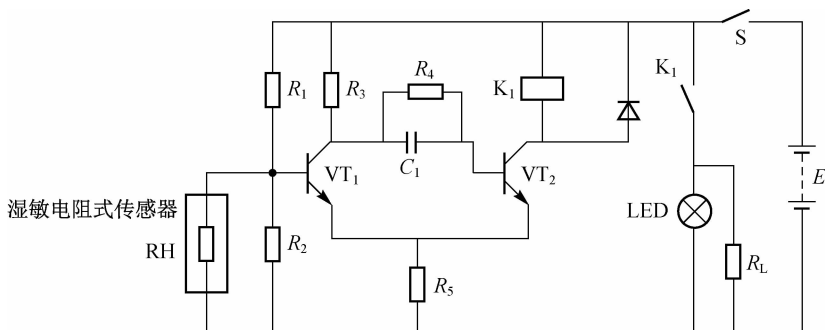


图 2-32 汽车后窗玻璃自动去湿装置的内部电路

技能实训

下面主要介绍电阻应变式传感器灵敏度分析。

1) 实训设备

直流稳压电源、差动放大器、电桥、电阻应变式传感器(电阻应变片)、电压表。

2) 实训内容及步骤

(1) 调零。开启仪器总电源和副电源，差动放大器增益置 100 倍(顺时针方向旋到底)，“+”、“-”输入端用实验导线与大地进行短接，输出端接数字电压表，用调零电位器调整差动放大器，使输出电压为零，然后拔掉实验导线。调零后调零电位器不再变化，关闭仪器电源。测微头装于悬臂梁前端的永久磁铁上并调节，使悬臂梁处于基本水平状态。

(2) 如图 2-33 所示为电阻应变式传感器的实训电路，将应变片与电桥平衡网络、差动放

大器、电压表、直流稳压电源连接起来,组成一个测量电路。这时直流稳压电源应置于 0 V 挡,电压表应置于 20 V 挡。此时,应变片接入图中 R_4 位置。

(3)确认接线无误后开启仪器电源,并预热数分钟。调整电桥电位器 R_P ,使测试系统输出为零。

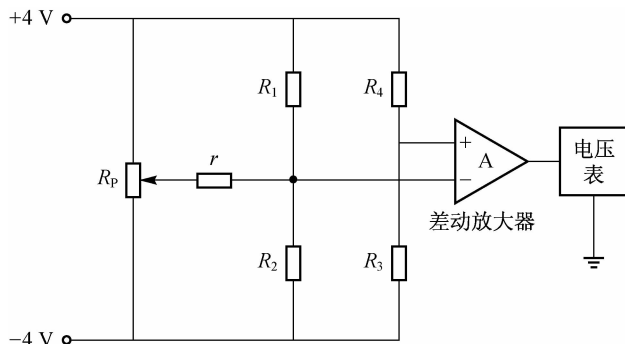


图 2-33 电阻应变式传感器的实训电路

(4)转动测微器,将悬臂梁上振动平台中间的永久磁铁与测微头相吸。必要时松开测微器的固定螺钉,使之完全可靠吸附后,再拧紧固定螺钉,并使悬臂梁处于水平位置(目测)。

(5)将直流稳压电源置于 ± 4 V 挡。选择适当的放大增益,然后调整电桥电位器 R_P ,使表头指零(需预热几分钟表头才能稳定下来)。

(6)依次加上砝码,每加上一个砝码测量一个读数,每次测得的数据见表 2-4。

表 2-4 选择适当的放大增益时测得的数据

质量 m/g										
电压 U/mV										

(7)保持差动放大器增益不变,把 R_3 换成另外一个应变片的电阻(注意要与前一个方向相反),形成半桥,调整电桥电位器 R_P ,使表头指零。依次加上砝码,每次测得的数据见表 2-5。

表 2-5 采用半桥电路时测得的数据

质量 m/g										
电压 U/mV										

(8)保持差动放大器增益不变,将 R_1 、 R_2 换成另两片应变片的电阻,接成一个直流全桥,电桥电位器 R_P 调好零点。依次加上砝码,每次测得的数据见表 2-6。

表 2-6 采用全桥电路时测得的数据

质量 m/g										
电压 U/mV										

3)实训报告

(1)画出实训电路的接线图。

(2)把原始数据记录于表格中,进行数据处理得出实训结果。

(3)计算并分析灵敏度。



思考与练习

1. 什么叫应变效应? 电阻应变片的类型结构有哪些?
2. 简述电阻应变式传感器的工作原理。
3. 试述应变片温度误差的概念、产生原因及补偿办法。
4. 制造热电阻的材料应具备哪些特点? 常用的热电阻材料有哪几种?
5. 热电阻式传感器有哪几种? 各有何特点?
6. 铜电阻 R_t 与温度 t 的关系可用 $R_t = R_0(1 + \alpha t)$ 表示。已知铜电阻 R_0 为 50Ω , 求当温度为 100°C 时的铜电阻。
7. 气敏电阻式传感器有哪几种类型? 简述每种类型的工作原理。
8. 为什么多数气敏元件都附有加热器?
9. 什么是湿敏电阻式传感器? 它有哪些类型?
10. 酒后驾车易出事故, 但判定驾驶员是否喝酒过量带有较大的主观因素。请利用学过的知识, 设计一台交通警察使用的便携式酒后驾车测试仪。

总体思路: 让被怀疑酒后驾车的驾驶员对准探头(内部装有多种传感器)呼三口气, 用一排发光 LED 指示呼气量的大小(呼气量越大, 闪亮的 LED 越多)。当呼气量达到允许值之后, LED 闪亮, 酒精蒸气含量数码管指示出三次呼气的酒精蒸气含量的平均百分比。如果呼气量不够, 则提示重新呼气。当酒精含量超标时, LED 闪亮, 蜂鸣器发出“嘀……”声。

根据以上设计思路, 请按以下要求操作:

- (1) 画出便携式酒后驾车测试仪的外形图, 包括一根带电缆的探头以及主机盒。在主机盒的面板上必须画出电源开关、三个呼气指示 LED、酒精蒸气含量数字显示器、报警蜂鸣器发声孔等。
- (2) 画出测量呼气流量的传感器简图。
- (3) 画出测量酒精蒸气含量的传感器简图。
- (4) 画出测试仪的电气原理框图。
- (5) 简要说明几个环节之间的信号流程。
- (6) 写出该酒后驾车测试仪的使用说明书。

项目三

电感式传感器



知识目标

- 了解自感式传感器的结构、工作原理及测量转换电路；
- 了解差动变压器式传感器的结构、工作原理及测量转换电路；
- 掌握电涡流式传感器的结构、工作原理及测量转换电路。



技能目标

- 掌握电涡流式传感器的静态标定。



相关知识

电感式传感器建立在电磁感应的基础上,把输入物理量(如位移、振幅、压力、流量、比重、力矩、应变等参数)转换为线圈的电感和互感的变化,再由测量转换电路转换为电流或电压的变化。因此,它能实现信息远距离传输、记录、显示和控制,在工业自动控制系统中被广泛采用。

电感式传感器具有结构简单、工作可靠、灵敏度高、分辨率高、线性度较好、测量精度高、零点稳定、输出功率较大等优点,在检测技术、工业生产和科学研究领域得到了广泛的应用。

电感式传感器的种类很多,本项目主要介绍自感式传感器、差动变压器式传感器和电涡流式传感器。

任务一 自感式传感器

一、自感式传感器的工作原理

自感式传感器是指把被测量的变化转换成自感的变化,通过一定的测量转换电路转换成电流或电压输出。如图 3-1 所示为自感式传感器的原理图。图中将一只额定电压为 380 V 的交流接触器线圈 3 与交流毫安表串联后,接到 36 V 交流电源上,这时交流毫安表的测量值为几十毫安。如果用手将交流接触器的衔铁 4 慢慢往下按,就会发现交流毫安表的读数在慢慢减小。当衔铁 4 与固定铁芯 1 的气隙 2 为零时,交流毫安表的读数只有十几毫安。

由电工知识可知,忽略线圈的直流电阻时,流过线圈的交流电流为

$$I = \frac{U}{Z} \approx \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi fL} \quad (3-1)$$

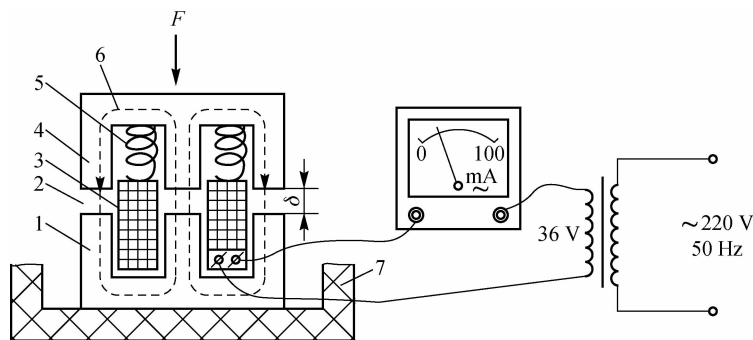


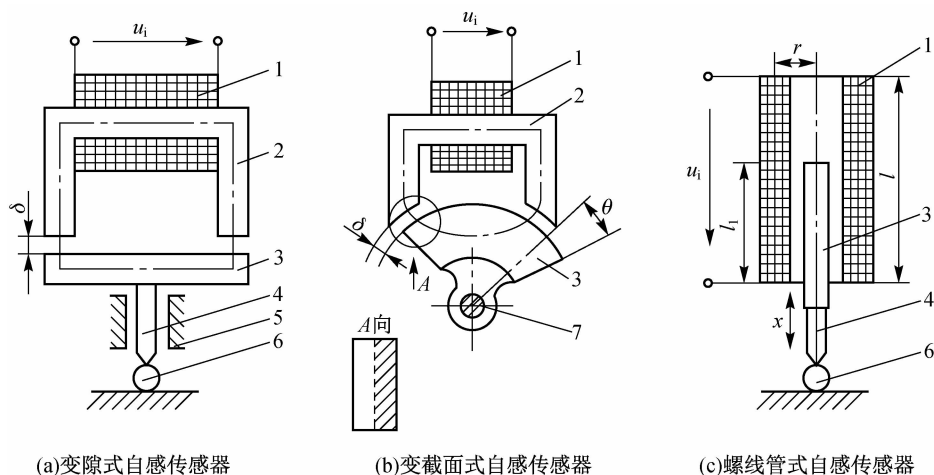
图 3-1 自感式传感器的原理图

1—固定铁芯；2—气隙；3—线圈；4—衔铁；5—弹簧；6—磁力线；7—绝缘外壳

式中, I 为线圈的电流(A); U 为线圈的电压(V); f 为交流电频率(Hz); L 为线圈的电感(H)。

图 3-1 中, 当衔铁 4 移动时, 气隙 2 的厚度 δ 发生改变, 引起磁路中磁阻变化, 从而导致线圈 3 的电感变化, 流过线圈 3 的电流 I 也变化。因此, 可以利用电感随气隙变化而变化的原理来制作测量位移的自感式传感器。

自感式传感器主要由线圈、铁芯、衔铁及测杆等组成。工作时, 衔铁通过测杆(或转轴)与被测物体相接触, 被测物体的位移将引起线圈电感的变化。当传感器线圈接入测量转换电路后, 电感的变化将被转换成电流、电压或频率的变化, 从而完成非电量到电量的转换。按磁路几何参数变化形式分, 目前常用的自感式传感器可分为变隙式自感传感器、变截面式自感传感器和螺线管式自感传感器, 如图 3-2 所示。



(a)变隙式自感传感器

(b)变截面式自感传感器

(c)螺线管式自感传感器

图 3-2 自感式传感器的结构示意图

1—线圈；2—铁芯；3—衔铁；4—测杆；5—导轨；6—被测物体；7—转轴

1. 变隙式自感传感器

变隙式自感传感器的结构见图 3-2(a), 由磁路基础知识可知线圈的电感为

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{2\delta} \tag{3-2}$$

式中, N 为线圈匝数(匝); μ_0 为空气磁导率(H/m); A 为气隙的截面积(m^2); δ 为气隙厚度(m)。

由式(3-2)可知, 当自感式传感器的线圈匝数及铁芯和衔铁的材料及形状确定后, 线圈电感就是气隙厚度和气隙的截面积的函数; 如果气隙的截面积保持不变, 线圈电感则为气隙厚度的单值函数, 从而构成了变隙式自感传感器。在实际应用中, 变隙式自感传感器多用于测量线位移。

变隙式自感传感器的电感与气隙厚度成反比, 其输出特性如图 3-3 所示。

2. 变截面式自感传感器

如果变隙式自感传感器的气隙厚度不变, 铁芯与衔铁之间相对覆盖面积随被测物体的变化而变化, 从而导致线圈电感发生变化, 这种形式称为变截面式自感传感器。变截面式自感传感器的结构见图 3-2(b)。其输出特性如图 3-4 所示。

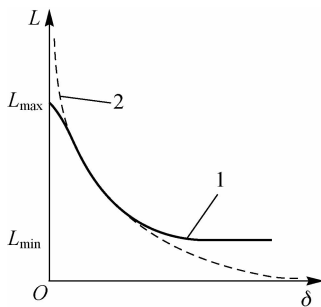


图 3-3 变隙式自感传感器的输出特性
1—实际输出特性; 2—理想输出特性

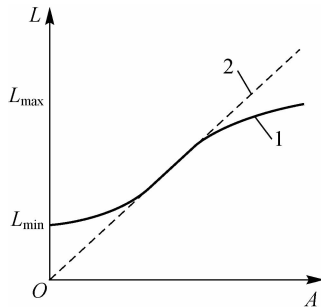


图 3-4 变截面式自感传感器的输出特性
1—实际输出特性; 2—理想输出特性

3. 螺线管式自感传感器

螺线管式自感传感器的结构见图 3-2(c), 主要由一只螺线管和一根柱形衔铁组成, 衔铁插入线圈中可来回移动。随着衔铁插入深度的变化而引起线圈中磁阻的变化, 从而导致线圈电感发生变化。

在这种螺线管式自感传感器中, 活动衔铁随被测物体一起移动, 导致线圈电感发生变化。因此, 这种传感器虽然测量范围大(检测位移量可从几毫米到几百毫米), 但是灵敏度低, 可广泛应用于测量大量程的直线位移中。

自感式传感器按组成方式可分为单一式自感传感器和差动式自感传感器。下面以差动式自感传感器为例进行介绍。

由于上述三种传感器的线圈中均通有交流励磁电流, 因而衔铁始终承受电磁吸力, 会引起附加误差, 且非线性误差较大。另外, 外界的干扰(如电源电压、频率、温度的变化)也会使输出产生误差, 所以在实际工作中常采用差动形式, 这样既可以提高传感器的灵敏度, 又可以减小测量误差。

两个完全相同, 由单个线圈构成的自感式传感器共用一个活动衔铁就构成了差动式自感传感器, 如图 3-5 所示。

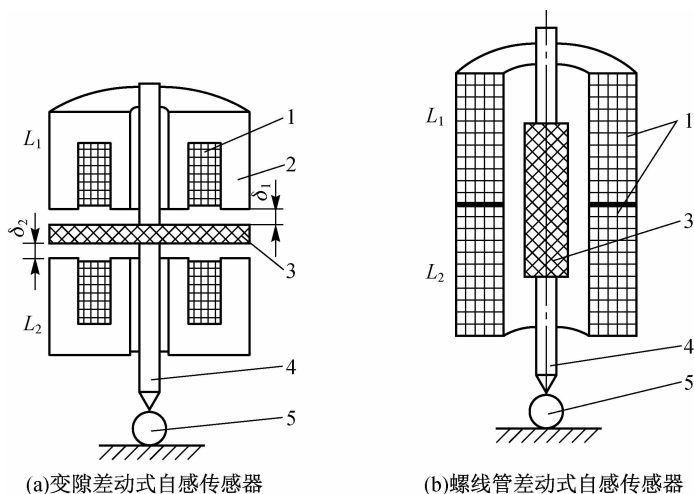


图 3-5 差动式自感传感器的结构

1—差动线圈；2—铁芯；3—衔铁；4—测杆；5—被测物体

差动式自感传感器的结构应满足以下要求：

- (1) 两个自感式传感器导磁体的几何尺寸完全相同。
- (2) 两个自感式传感器的材料和性能完全相同。
- (3) 两个自感式传感器线圈的电气参数和几何尺寸完全相同。

在差动式自感传感器中,当衔铁随被测物体移动而偏离中间位置时,两个线圈的电感一个增加,一个减小,形成差动形式。如图 3-6 所示为差动式自感传感器的输出特性曲线。

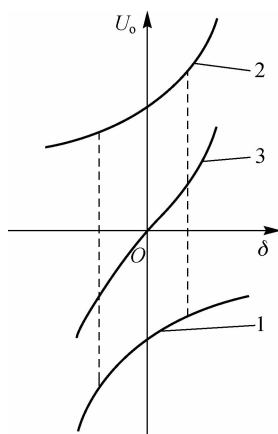


图 3-6 差动式自感传感器的输出特性曲线

1—上线圈的特性；2—下线圈的特性；3—差接后的特性

由图 3-6 可知,差动式自感传感器的线性度较好,输出曲线较陡。采用差动形式除了可以改善线性度、提高灵敏度外,对电源电压与频率的波动及温度变化等外界影响也有补偿作用,从而提高了传感器的稳定性。

二、自感式传感器的测量转换电路

为了测出电感的变化,同时也为了将电感送入下级电路进行放大和处理,自感式传感器要用测量转换电路把电感转换为电流或电压的变化量。一般可将电感的变化转换为电流或电压的幅值、频率和相位的变化,这三种测量转换电路分别称为调幅电路、调频电路和调相电路。自感式传感器的测量转换电路一般采用调幅电路,调幅电路主要包括变压器电桥电路和交流电桥电路,而调频电路和调相电路用得较少。

1. 变压器电桥电路

变压器电桥电路如图 3-7 所示。电桥的工作桥臂为相邻的 Z_1 与 Z_2 ,它们是传感器两个线圈的阻抗,输出电压取自 A 点;另外两个桥臂为变压器次级线圈的 $1/2$ 阻抗,输出电压取自 B 点,即变压器次级线圈的中心抽头。

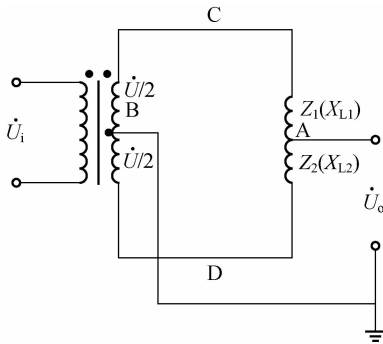


图 3-7 变压器电桥电路

当衔铁处于中间位置时,由于线圈完全对称,因此, $L_1 = L_2 = L_0$, $Z_1 = Z_2 = Z_0$ 。此时电桥桥路平衡,输出电压为 \dot{U}_o 。 \dot{U}_o 表示电压的相量,它包含电压的幅值及相位。当衔铁下移时,下线圈的感抗增加,上线圈的感抗减小,输出电压的绝对值增大,其相位与励磁电源同相;当衔铁上移时,下线圈的感抗减小,上线圈的感抗增加,输出电压的绝对值减小,其相位与励磁电源反相。若在其测量转换电路的输出端接上普通指示仪表,则无法判别输出的相位和位移的方向。

变压器电桥电路的优点是元件少,输出阻抗小,开路时电路呈线性,因此,应用较广。

2. 交流电桥电路

如图 3-8 所示为交流电桥电路及其输出特性曲线,由于交流电桥电路的结构不完全对称,初态时电桥不完全平衡,因而产生静态零偏压,称为零点残余电压。图 3-8(b)中虚线为理想对称状态下的输出特性。

为了既能判断衔铁位移的大小,又能判断衔铁位移的方向,通常在交流电桥电路中引入相敏整流电路,把测量电桥的交流输出转换为直流输出,而后用零值居中的直流电压表测量电桥的输出电压。当衔铁向下移动时,直流电压表检流计的仪表指针正向偏转;当衔铁向上移动时,直流电压表检流计的仪表指针反向偏转,其输出特性如图 3-9 所示。由图 3-9 可知,交流电桥电路引入相敏整流电路后,输出特性曲线通过零点,输出电压的极性随位移方向而发生变化,同时消除了零点残余电压,还提高了线性度。

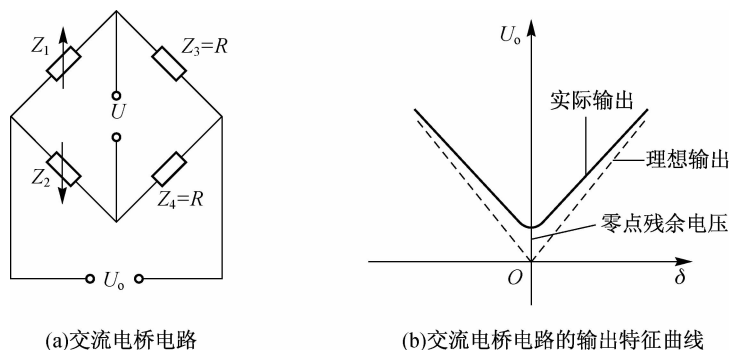


图 3-8 交流电桥电路及其输出特性曲线

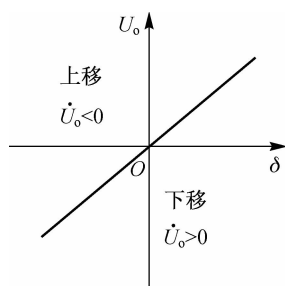


图 3-9 交流电桥电路引入相敏整流电路后的输出特性

任务二 差动变压器式传感器

电源中用到的单相变压器有一个一次绕组,若干个二次绕组。当一次绕组加上交流励磁电压 U_1 后,二次绕组中将产生感应电动势 U_o 。在全波整流电路中,两个二次绕组串联,总电压等于两个二次绕组的电压之和。但是若将其中一个二次绕组的同名端对调后再串联,则总电压相互抵消,这种接法称为差动接法。如果将变压器的结构加以改造,将铁芯做成可以活动的,就可以制成用于检测非电量的另一种传感器——差动变压器式传感器。

差动变压器式传感器是一种能把机械位移转换成电信号的电磁感应互感式位移传感器。差动变压器式传感器的形式很多,但用于位移测量的大多为螺线管差动变压器式传感器。

一、差动变压器式传感器的工作原理

差动变压器式传感器主要由一个线圈绝缘框架和一个衔铁组成。在线圈绝缘框架上绕有一组初级线圈作为输入线路(或称为一次绕组),在同一线圈绝缘框架上另外绕有两组次级线圈作为输出线路(或称为二次绕组)。它们反相串联组成差动形式,如图 3-10 所示。

差动变压器式传感器在理想情况下(忽略涡流损耗、磁滞损耗和分布电容等影响),它的等效电路如图 3-11 所示。

图 3-11 中, \dot{U}_1 为一次绕组励磁电源电压, M_1 、 M_2 分别为一次绕组与两个二次绕组间的互感, L_1 和 R_1 分别为一次绕组的电感和有效电阻, L_{21} 和 L_{22} 分别为两个二次绕组的电感, R_{21} 和 R_{22} 分别为两个二次绕组的有效电阻。

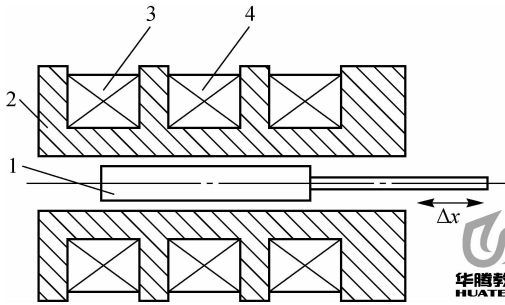


图 3-10 差动变压器式传感器的结构

1—衔铁；2—线圈绝缘框架；3—次级线圈；4—初级线圈

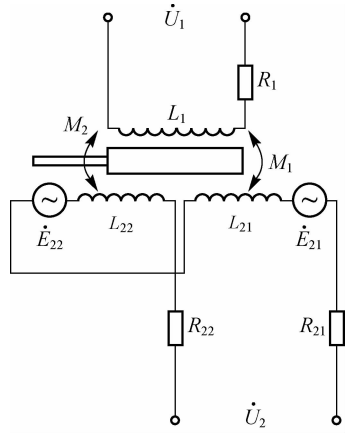


图 3-11 差动变压器式传感器的等效电路

当差动变压器式传感器的衔铁处于中间位置时，因为由一次绕组励磁电源电压引起的感应电动势相同，所以两个二次绕组的互感相同。由于两个二次绕组反向串联，所以差动输出电动势为零。当衔铁向右移动时，在右边次级线圈内穿过的磁通比左边次级线圈内穿过的磁通多些，所以互感也大些，右边次级线圈内产生的感应电动势 \dot{E}_{21} 增加，左边次级线圈内产生的感应电动势 \dot{E}_{22} 随衔铁向右偏离中心位置而逐渐减小；反之，当衔铁向左移动时，感应电动势 \dot{E}_{21} 减小， \dot{E}_{22} 增加。两个次级线圈的输出电压分别为 \dot{U}_{21} 和 \dot{U}_{22} （空载时即为感应电动势 \dot{E}_{21} 和 \dot{E}_{22} ），它们反向串联时传感器的输出电压 $\dot{U}_2 = \dot{U}_{21} - \dot{U}_{22}$ 。当衔铁移动时， \dot{U}_2 就随着衔铁位移 x 线性增加，其输出电压特性曲线如图 3-12 所示，形成 V 形特性。如果以适当方法测量 \dot{U}_2 ，就可以得到与 x 成正比的线性曲线。

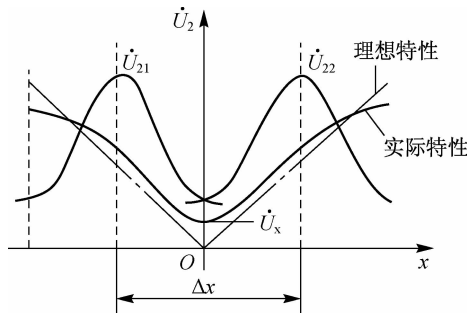


图 3-12 差动变压器式传感器输出电压特性曲线

从图 3-12 中可看出，当衔铁位于中心位置，输出电压 \dot{U}_2 并不是零电位，这个电压就是零点残余电压 \dot{U}_x ，它的存在使差动变压器式传感器的输出电压特性曲线不经过零点，造成实际特性和理论特性不完全一致。零点残余电压的存在，使得差动变压器式传感器的输出特性在零点附近不灵敏，给测量带来误差，此值的大小是衡量差动变压器式传感器性能好坏的重要指标。

二、差动变压器式传感器的测量转换电路

差动变压器式传感器的输出电压是幅值受衔铁位移调制的交流信号,若用交流电压表测量其输出值,只能反映衔铁位移的大小,不能反映移动的方向。另外,其测量值必定含有零点残余电压。为了达到能辨别移动方向和消除零点残余电压的目的,实际测量时,常采用差动整流电路和相敏检波电路。

1. 差动整流电路

差动变压器式传感器最常用的测量转换电路是差动整流电路。如图 3-13 所示,把差动变压器式传感器的两个次级输出电压分别整流,然后将整流的电流或电压的差值作为输出。图 3-13(a)和图 3-13(b)为电流输出电路,用于连接低阻抗负载电路,图中的电位器 R_0 用于调整零点残余电压。图 3-13(c)和图 3-13(d)为电压输出电路,用于连接高阻抗负载电路。采用差动整流电路后,不但可以用零值居中的直流电压表指示输出电压的大小和极性,还可以有效地消除零点残余电压,同时可使线性工作范围得到一定的扩展。

下面结合图 3-13(d)全波电压输出电路,分析差动整流电路的工作原理。全波电压输出电路是根据半导体二极管的单向导通原理进行解调的,设某瞬间载波为正半周,此时差动变压器式传感器两个次级线圈的相位关系为 A 正 B 负、C 正 D 负。在上面的次级线圈中,电流自 A 点出发,流经电容 C_1 的电流方向为从 2 到 4,电容 C_1 两端的电压为 \dot{U}_{24} 。在下面的次级线圈中,电流自 C 点出发,流经电容 C_2 的电流方向为从 6 到 8,电容 C_2 两端的电压为 \dot{U}_{68} 。差动变压器式传感器的输出电压为上述两个电容电压之差,即

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_{24} - \dot{U}_{68} \quad (3-3)$$

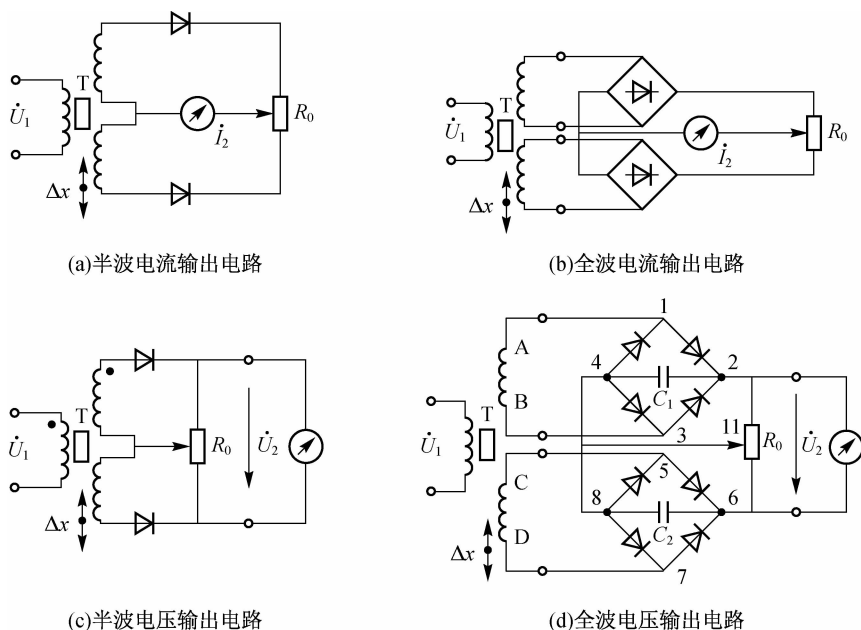


图 3-13 差动整流电路

同理,当某瞬间载波为负半周时,即差动变压器式传感器两个次级线圈的相位关系为 A 负 B 正、C 负 D 正,按照上述分析可知,不论两个次级线圈的输出瞬时电压的极性如何,流经

电容 C_1 的电流方向总是从 2 到 4, 流经电容 C_2 的电流方向总是从 6 到 8, 因此, 差动变压器式传感器的输出电压的表达式仍为 $\dot{U}_2 = \dot{U}_{24} - \dot{U}_{68}$ 。

当衔铁在中间位置时, 由于 $\dot{U}_{24} = \dot{U}_{68}$, 因而 $\dot{U}_2 = 0$; 当衔铁在零位以上时, 由于 $\dot{U}_{24} > \dot{U}_{68}$, 因而 $\dot{U}_2 > 0$; 当衔铁在零位以下时, 由于 $\dot{U}_{24} < \dot{U}_{68}$, 因而 $\dot{U}_2 < 0$ 。

衔铁在零位以上或以下时, 输出电压的极性相反, 于是零点残余电压会自动抵消。由此可见, 差动整流电路可以不考虑相位调整和零点残余电压的影响。此外, 差动整流电路还具有结构简单、分布电容影响小和便于远距离传输等优点, 已获得了广泛的应用。在远距离传输时, 将差动整流电路的整流部分放在差动变压器式传感器的一端, 整流后的输出线延长, 就可避免感应和引出线分布电容的影响。

2. 相敏检波电路

如图 3-14 所示为相敏检波电路的一种形式。相敏检波电路要求参考电压与差动变压器二次侧输出电压的频率相同, 相位相同或相反, 因此, 常接入移相电路。为了提高检波效率, 参考电压的幅值常取信号电压的 3~5 倍。图中的电位器为调零电位器 R_p , 当衔铁处于中间位置时调节电位器, 使输出电压为零。对于小位移测量的差动变压器, 若输出信号太小, 可在相敏检波电路中接入放大器。

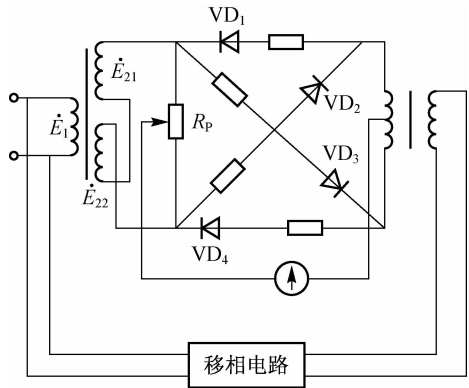


图 3-14 相敏检波电路

任务三 电涡流式传感器

当导体处于交变磁场中时, 由于电磁感应铁芯会在内部产生自行闭合的电涡流, 进而引起发热。因此, 为了减小电涡流和避免发热, 变压器和交流电动机的铁芯都是用硅钢片叠制而成的。

在检测领域, 电涡流式传感器可以对位移、振幅、表面温度、速度、应力、金属板厚度及金属物件的无损探伤等物理量实现非接触式测量。

电涡流式传感器具有结构简单、频率响应快、灵敏度高、测量范围大、抗干扰能力强的优点, 在工业生产和科学技术的各个领域中都得到了广泛的应用。

一、电涡流效应

根据法拉第电磁感应定律, 金属导体置于变化的磁场中时, 金属导体表面就会有感应电流产生。电流的流线在金属导体内自行闭合, 这种由电磁感应原理产生的旋涡状感应电流称为电涡流。电涡流的产生必然要消耗一部分能量, 从而使产生磁场的线圈阻抗发生变化, 这一物理现象称为电涡流效应。电涡流式传感器是利用电涡流效应, 将非电量转换为阻抗的变化而进行测量的。

电涡流式传感器在金属导体中产生的电涡流, 其渗透深度与传感器线圈的励磁电流的频率有关。根据电涡流在金属导体中的贯穿情况, 通常把电涡流式传感器按励磁电源频率

的高低分为高频反射式传感器和低频透射式传感器,前者的应用较为广泛。

二、电涡流式传感器的工作原理

电涡流式传感器的结构非常简单,如图 3-15 所示。它主要是一个固定在框架 2 上的扁平线圈 1,线圈 1 的导线要求选用电阻率小的材料,一般采用多股漆包铜线或银线绕制而成,放在传感器的端部。框架的材料要求损耗小、电性能好和热膨胀系数小,一般可选用聚四氟乙烯或高频陶瓷等。

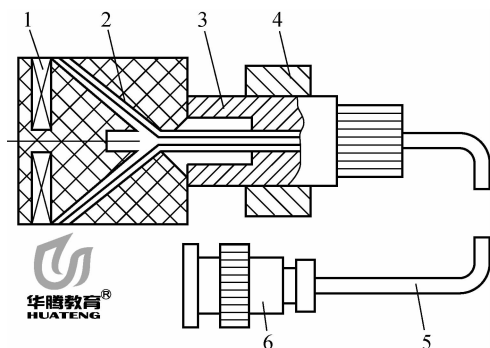


图 3-15 电涡流式传感器的结构

1—线圈; 2—框架; 3—框架衬套; 4—支架; 5—电缆; 6—插头

由电工知识可知,线圈阻抗的变化与金属导体的电导率、磁导率等有关。对于非磁性材料,被测金属导体的电导率越高,则灵敏度越高。但被测金属导体若为磁性材料,则效果相反。因此,与非磁性材料相比,磁性材料的灵敏度低。

为了充分利用电涡流效应,被测金属导体的半径应大于线圈半径的 1.8 倍,否则将导致灵敏度降低。被测金属导体为圆柱体时,它的直径必须为线圈直径的 3.5 倍以上,才不影响测量结果。被测金属导体的厚度不能太薄,一般情况下,被测金属导体的厚度在 0.2 mm 以上,测量才不受影响。另外在测量时,传感器线圈周围除被测金属导体外,应尽量避免其他导体,以免干扰磁场,引起线圈的附加损失。

如图 3-16 所示为电涡流式传感器的工作原理。将一个扁平线圈 L_1 置于被测金属导体附近,当振荡器产生的高频电压施加给靠近被测金属导体一侧的线圈 L_1 时, L_1 产生的高频磁场 H_1 作用于被测金属导体的表面。

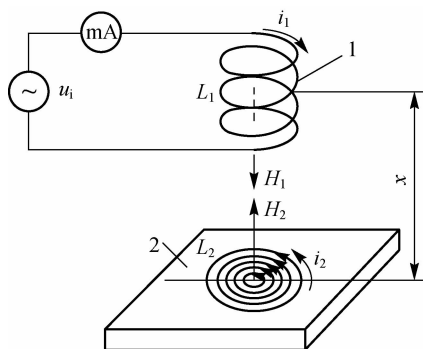


图 3-16 电涡流式传感器的工作原理

1—线圈; 2—被测金属导体

由于趋肤效应,被测金属导体表面产生感应电涡流 i_2 ,将产生一个新的磁场 H_2 , H_1 和 H_2 方向相反,磁场 H_2 的反作用将使线圈 L_1 的有效阻抗发生变化。

当被测金属导体靠近线圈 L_1 时,被测金属导体产生感应电涡流 i_2 的大小与被测金属导体的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、线圈与被测金属导体的尺寸因子 γ 、线圈与被测金属导体间的距离 x 和线圈励磁电源电压的频率 f 等参数有关。如固定其中某些参数,就能按感应电涡流的大小测量出另外一些参数。为了使问题简化,可以把被测金属导体理解为一个短路线圈,并用 R_2 表示这个短路线圈的电阻,用 L_2 表示这个短路线圈的电感,用 M 表示它与线圈之间的互感,再假设线圈的电阻与电感分别为 R_1 和 L_1 ,就可画出如图 3-17 所示的等效电路。

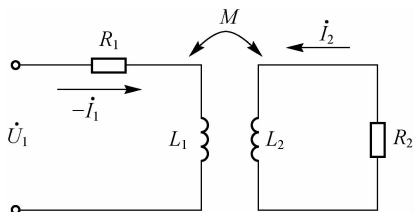


图 3-17 电涡流式传感器的等效电路

经推导,线圈受被测金属导体影响后的等效阻抗为

$$Z = R_1 + j\omega L_1 = F(\rho, \mu, \gamma, x, f) \quad (3-4)$$

式中, ρ 为被测金属导体的电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$); μ 为被测金属导体的磁导率 (H/m); γ 为线圈与被测金属导体的尺寸因子; x 为线圈与被测金属导体间的距离 (m); f 为线圈励磁电源电压的频率 (Hz)。

当被测金属导体和电涡流式传感器的探头被确定以后,影响电涡流式传感器线圈阻抗 Z 的一些参数不再改变,此时只有线圈与被测金属导体间的距离 x 的变化量与线圈阻抗 Z 有关,通过检测电路测出线圈阻抗 Z 的变化量,就可实现对被测金属导体位移量的检测。

三、电涡流式传感器的测量转换电路

电涡流式传感器的线圈与被测金属导体间的距离 x 的变化可以转换为品质因数、阻抗、电感三个参数的变化。检测电路的任务就是将这种变化转换为相应的电流、电压或频率输出。一般来说,利用品质因数的测量转换电路使用较少,这里不作讨论。利用阻抗的测量转换电路一般采用电桥电路,属于调幅电路。利用电感的测量转换电路一般采用谐振电路,根据输出是电压幅值还是电压频率,谐振电路又可分为调幅和调频两种。

1. 电涡流式传感器的电桥电路

电桥电路结构简单,主要用于差动电涡流式传感器中,如图 3-18 所示。图中 L_1 和 L_2 为差动电涡流式传感器的两个线圈,分别与选频电容 C_1 和 C_2 并联组成相邻的两个桥臂,与电阻 R_1 和 R_2 组成另外两个桥臂,电源由振荡器供给,振荡频率根据电涡流式传感器的需求选择。电桥将反应线圈阻抗的变化转换成电压幅值的变化。

当静态时,电桥平衡,输出电压 $u_{AB} = 0$ 。当传感器接近被测金属导体时,电涡流式传感器的线圈阻抗发生变化,电桥失去平衡,即 $u_{AB} \neq 0$,经过线性放大和检波器检波后输出直流电压 U ,显然此输出电压 U 与被测距离成正比,可以实现对位移的测量。

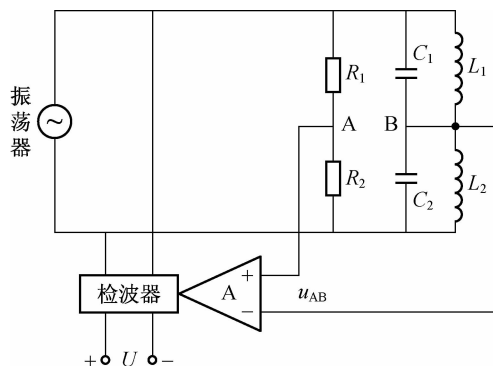


图 3-18 电涡流式传感器的电桥电路

2. 电涡流式传感器的谐振电路

谐振电路可将电涡流式传感器线圈的等效电感的变化转换为电流或电压的变化。电涡流式传感器线圈与电容并联组成并联谐振电路。并联谐振电路的谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3-5)$$

式中, L 为电涡流式传感器线圈的电感(H); C 为并联谐振电路的电容(F)。

并联谐振电路的等效阻抗最大, 即

$$Z_0 = \frac{L}{R'C} \quad (3-6)$$

式中, R' 为并联谐振电路的等效损耗电阻(Ω)。

当电涡流式传感器线圈的电感发生变化时, 并联谐振电路的等效阻抗和谐振频率都将随线圈电感的变化而变化, 因此, 可以利用测量并联谐振电路阻抗的方法或测量并联谐振电路频率的方法, 间接测出电涡流式传感器的被测值。测量并联谐振电路阻抗的电路为调幅式电路, 测量并联谐振电路频率的电路为调频式电路。

1) 调幅式电路

调幅式电路是以输出高频信号的幅度来反映电涡流式传感器的探头与被测金属导体之间关系的。如图 3-19 所示为调幅式电路的原理图。

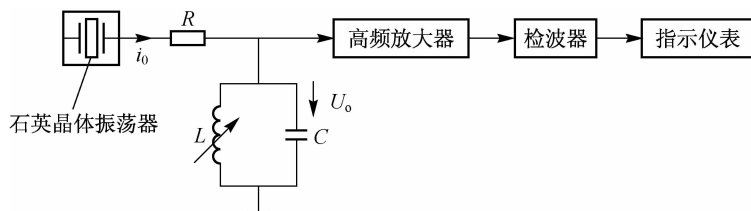


图 3-19 调幅式电路的原理图

石英晶体振荡器起恒流源的作用, 给谐振电路提供一个频率稳定的励磁电流 i_0 , 谐振电路输出电压为

$$U_o = i_0 f(Z) \quad (3-7)$$

当被测金属导体远离电涡流式传感器的线圈或去掉时, 并联谐振电路的谐振频率即为石英晶体振荡器的振荡频率 f_0 , 此时, 并联谐振电路上的阻抗最大, 输出电压也最大; 当被测

金属导体靠近电涡流式传感器的线圈时,线圈与被测金属导体间的距离 x 变化,导致线圈的等效电感发生变化,并联谐振电路的谐振频率和等效阻抗也跟着发生变化,致使并联谐振电路失谐而偏离励磁电源频率,谐振峰将向左或向右移动,输出电压减小。

2) 调频式电路

调频式电路的原理图如图 3-20 所示,电涡流式传感器线圈作为组成振荡器的电感元件,当电涡流式传感器的等效电感 L 发生变化时,引起振荡器的振荡频率变化,该频率可直接由数字频率计测得,或通过 U/f 转换器转换后用数字电压表测量出对应的电压。这种方法稳定性较差,因为振荡器的频率稳定性最高只有 10^{-5} 数量级,虽然可以通过扩大调频范围来提高稳定性,但调频的范围不能无限扩大。

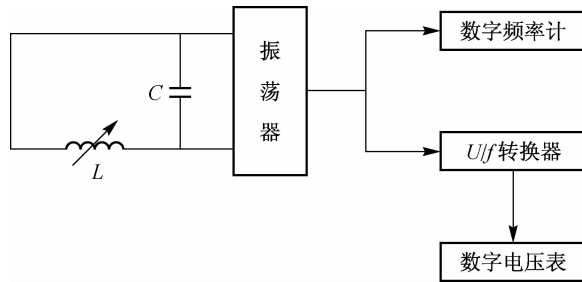


图 3-20 调频式电路的原理图

采用这种测量转换电路时,不能忽略电涡流式传感器与振荡器之间连接电缆的分布电容,电容很小的变化也会使频率变化几千赫兹,严重影响测量结果,因此,可设法把振荡器的电容元件和电涡流式传感器的线圈组装成一体。

任务四 电感式传感器的应用

电感式传感器是被广泛应用的电磁机械式传感器,可以直接用于测量直线位移、角位移的静态和动态量。以电感式传感器为基础,可做成多种用途的传感器,用于测量力、转矩及加速度等。

一、自感式传感器的应用

自感式传感器具有灵敏度较好、输出信号较大、工艺要求不高、加工容易的优点,但是存在非线性输出、消耗功率较大、测量范围较小的缺点。自感式传感器主要用于位移测量,也可用于振幅、压力、荷重、流量、液位等参数的测量。

1. 自感式位移传感器

如图 3-21 所示为螺管式自感传感器的结构图。可换测端 10 用螺纹拧在测杆 8 上,测杆 8 可在导轨 7 上做轴向移动,测杆 8 上端固定着衔铁 3,当测杆 8 移动时,带动衔铁 3 在线圈 4 中移动,线圈 4 放在固定磁筒 2 中,配置成差动形式,即当衔铁 3 由中间位置向上移动时,上面线圈的电感增加,下面线圈的电感减少。两个线圈用引线电缆 1 引出,以便接入测量转换电路。测量力由弹簧 5 产生,防转销 6 用来限制测杆 8 的转动,密封套 9 用来防止尘土等进入可换测端 10 内。导轨 7 消除了径向间隙,使测量精度提高,并且灵敏度和使用寿命

命能达到较高指标。因此,自感式位移传感器可广泛应用于几何量测量领域,如测量位移、轴的跳动、零件的受热变形等。

2. 自感式压力传感器

如图 3-22 所示为一种自感式压力传感器的结构原理图,它采用了变隙式自感传感器,主要由 C 形弹簧管、衔铁、铁芯和线圈等组成。当被测压力 P 进入 C 形弹簧管时,C 形弹簧管产生变形,其自由端发生位移,带动与自由端连接成一体的衔铁运动,使线圈 1 和线圈 2 中的电感产生大小相等、符号相反的变化,即一个电感增大,另一个电感减小。电感的这种变化通过电桥电路转换成电压输出,再通过相敏检波电路等电路处理,使输出信号与被测压力之间成正比关系,即输出信号的大小取决于衔铁位移的大小,输出信号的相位取决于衔铁移动的方向。

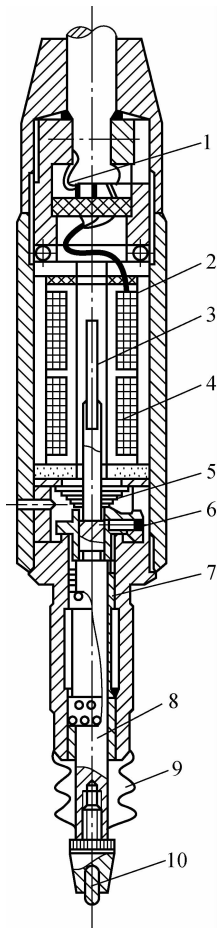


图 3-21 螺管式自感传感器的结构图

- 1—引线电缆；2—固定磁筒；3—衔铁；4—线圈；
5—弹簧；6—防转销；7—导轨；8—测杆；
9—密封套；10—可换测端

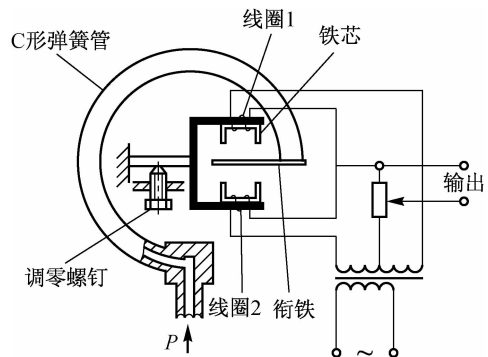


图 3-22 自感式压力传感器的结构原理图

二、差动变压器式传感器的应用

差动变压器式传感器可以直接用于位移测量,也可以测量与位移相关的任何机械量,如力、力矩、压差、振幅、加速度、应变和液位等。

1. 差动变压器式加速度传感器

如图 3-23 所示为差动变压器式加速度传感器的结构原理图。差动变压器式加速度传感器由悬臂梁和差动变压器组成。测量时,将悬臂梁 1 的底座及差动变压器 2 中的线圈骨架固定,而将衔铁的 A 端与被测振动体相连,此时差动变压器式传感器作为加速度测量中的惯性元件,它的位移与被测振动体的加速度成正比,使加速度的测量转变为位移的测量。当被测振动体带动衔铁以 Δx 的振幅振动时,差动变压器 2 的输出电压也按相同的规律变化,通过输出电压值的变化间接地反映了被测振动体的加速度变化。

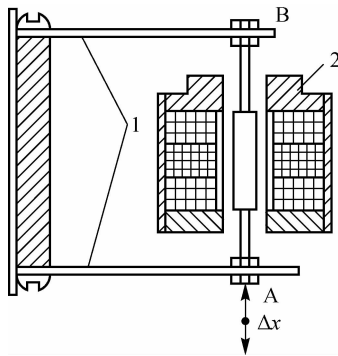


图 3-23 差动变压器式加速度传感器的结构原理图
1—悬臂梁；2—差动变压器

2. 差动变压器式传感器在仿形机床上的应用

在加工复杂机械零件时,采用仿形加工是一种比较简单和经济的方法,如图 3-24 所示为差动变压器式传感器应用在仿形机床的示意图。

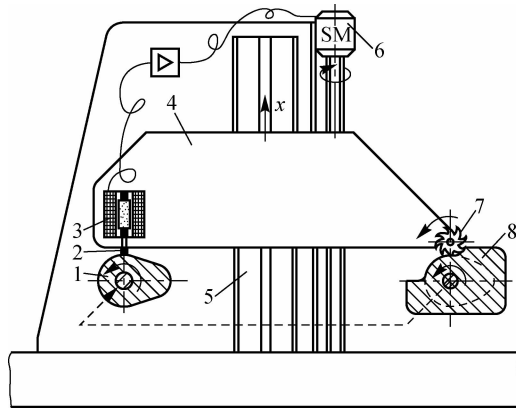


图 3-24 差动变压器式传感器应用在仿形机床的示意图
1—标准凸轮；2—硬质合金测端；3—电感测微器；4—铣刀龙门架；
5—立柱；6—伺服电动机；7—铣刀；8—毛坯

假设被加工的工件为凸轮,机床的左边转轴上固定一个已加工好的标准凸轮 1,毛坯 8 固定在右边的转轴上,左右两轴同步旋转;铣刀 7 与电感测微器 3 安装在由伺服电动机 6 驱动的,可以顺着立柱 5 的导轨上下移动的铣刀龙门架 4 上;电感测微器 3 的硬质合金测端 2 与标准凸轮 1 外表轮廓接触。当衔铁没有处于差动电感线圈的中心位置时,电感测微器 3 有输出。输出电压经伺服电动机 6 放大后,驱动伺服电动机 6 正转(或反转),带动铣刀龙门架 4 上移(或下移),直至电感测微器 3 的衔铁恢复到差动电感线圈的中间位置为止。铣刀龙门架 4 的上下位置决定了铣刀 7 的切削深度。当标准凸轮 1 转过一个微小的角度时,衔铁上升(或下降),电感测微器 3 必然有输出,伺服电动机 6 转动,使铣刀龙门架 4 也上升(或下降),从而减小(或增加)了切削深度。这个过程一直持续到加工出与标准凸轮完全一样的工件为止。

三、电涡流式传感器的应用

电涡流式传感器测量的恒定参数、变化量及主要用途见表 3-1。

表 3-1 电涡流式传感器测量的恒定参数、变化量及主要用途

恒定参数	变化量	主要用途
ρ, μ, γ, f	x	位移、厚度尺寸及振动幅度的测量
μ, γ, x, f	ρ	温度检测及材质的判断
ρ, γ, x, f	μ	应力及硬度的测试
γ, f	ρ, μ, x	物体的探伤

电涡流式传感器在使用中,应该注意被测金属导体的材料对测量的影响。被测金属导体的导电率越高,其灵敏度就越高,在相同量程下,其线性范围越宽。此外,被测金属导体的形状对测量也有影响。当被测金属导体的面积远大于电涡流式传感器检测线圈的面积时,电涡流式传感器的灵敏度基本不发生变化;当被测金属导体的面积为电涡流式传感器检测线圈面积的一半时,电涡流式传感器的灵敏度减小一半;当被测金属导体的面积更小时,电涡流式传感器的灵敏度显著下降。如被测金属导体为圆柱体,当它的直径 D 是电涡流式传感器检测线圈直径 d 的 3.5 倍以上时,不影响测量结果;当它的直径 D 和电涡流式传感器检测线圈的直径 d 相同时,电涡流式传感器的灵敏度降低至 70%。下面简要介绍几种主要的电涡流式传感器的应用实例。

1. 位移测量

由式(3-4)可知,电涡流式传感器的等效阻抗 Z 与被测金属导体的电阻率 ρ 、磁导率 μ 、线圈与被测金属导体的尺寸因子 γ 、线圈与被测金属导体间的距离 x 和线圈励磁电源电压的频率 f 等参数有关。当 ρ, μ, γ 和 f 确定后, Z 只与 x 有关,通过适当的测量转换电路可得出位移—电压关系曲线,如图 3-25 所示。

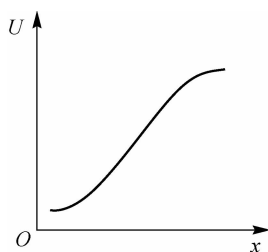


图 3-25 位移—电压关系曲线

2. 振幅测量

利用电涡流式传感器可无接触地测量旋转轴的径向振动。除直接显示读数外,还可用记录仪器记录振动波形。在汽轮机、空气压缩机中常用电涡流式传感器监控主轴的径向振动,如图 3-26 所示。此外,它也可以测量汽轮机涡轮叶片的振幅,如图 3-27 所示。当涡轮叶片进行振动疲劳试验时,可用来监视涡轮叶片共振时的振幅,测量的振幅范围可以从几微米到几毫米。

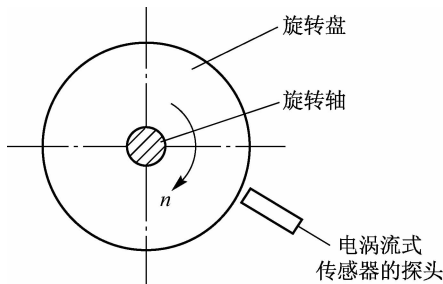


图 3-26 电涡流式传感器监控主轴的径向振动

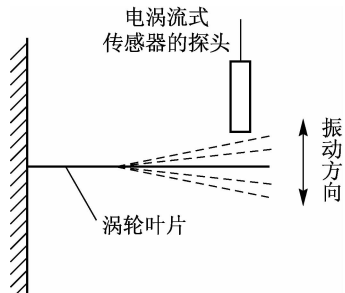


图 3-27 测量汽轮机涡轮叶片的振幅

当研究轴的振动时,常需要了解轴的振动形状,画出轴振图。如图 3-28 所示,通常使用数个电涡流式传感器并排地安置在轴附近,用多通道指示仪输出至记录仪。当轴振动时,可以获得每个电涡流式传感器各点的瞬间振幅值,从而画出轴振图。

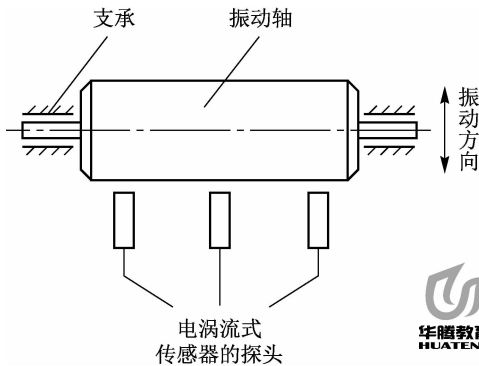


图 3-28 轴的振动测量

3. 厚度测量

利用电涡流式传感器可以无接触地测量金属板厚度和非金属板的镀层厚度。如图 3-29(a) 所示,当被测金属板 1 的厚度变化时,电涡流式传感器的探头 2 与被测金属板 1 间的距离也发生改变,从而引起输出电压的变化。由于在工作过程中被测金属板 1 会上下波动,这将影响测量精度,因此,用电涡流式传感器进行厚度测量时常用如图 3-29(b)所示的方法。在被测金属板 1 的上下方各安装一个电涡流式传感器的探头 2,两个电涡流式传感器之间的距离为 D ,且与被测金属板 1 的上下表面分别相距 x_1 和 x_2 ,这样被测金属板的厚度为 $t = D - (x_1 + x_2)$,当两个传感器在工作时分别测得 x_1 和 x_2 ,转换成电压值后相加,相加后的电压值与两传感器间距离 D 对应的设定电压相减,就得到与金属板的厚度相对应的电压值。



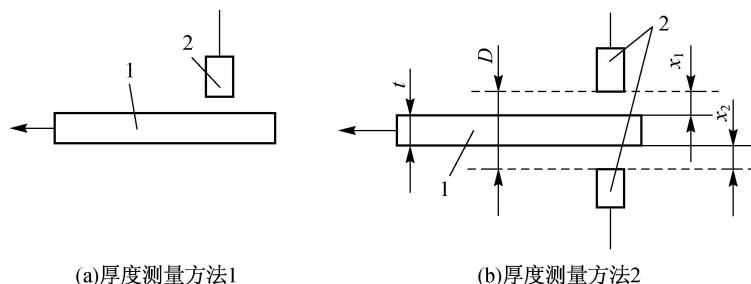


图 3-29 厚度测量的示意图

1—被测金属板；2—电涡流式传感器的探头

4. 转速测量

如图 3-30 所示,在旋转体上开一条或数条槽(或做成齿状),旁边安装一个电涡流式传感器,当转轴转动时,电涡流式传感器周期性地改变着与转轴之间的距离,因此,电涡流式传感器的输出也周期性地发生变化。此输出信号经放大、变换后,可以用频率计测出其变化频率,从而测出转轴的转速。若转轴上开 Z 个槽,频率计读数为 f ,则转轴的转速 n 的表达式为

$$n = \frac{60f}{Z} \quad (3-8)$$

式中, n 为转轴的转速(r/min); f 为频率计读数(Hz); Z 为转轴上槽个数。

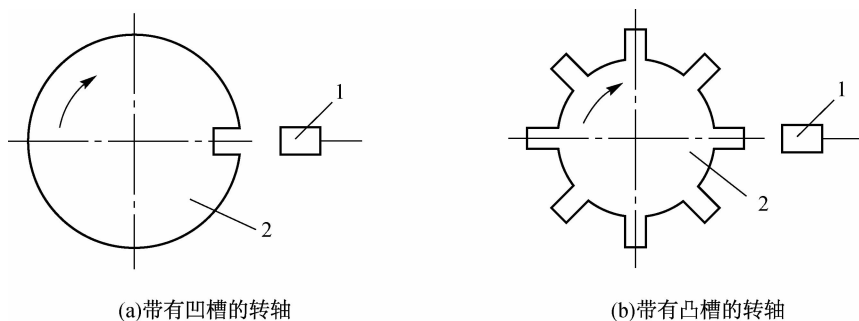


图 3-30 转速测量

1—电涡流式传感器的探头；2—旋转体

5. 涡流探伤

利用电涡流式传感器可以对被测金属导体进行非破坏性的探伤。例如,检查金属的表面裂纹、热处理裂纹以及焊接部位的缺陷等。在检查时,使电涡流式传感器与被测金属导体的距离不变,若有裂纹出现将使电涡流流经的路程变长,阻抗增加,从而使电涡流变小,引起电涡流式传感器的输出电压变化。



技能实训

下面主要介绍电涡流式传感器的静态标定。

1) 实训设备

电涡流线圈、金属涡流片、电涡流变换器、测微头、示波器、电压表。

2) 实训内容及步骤

(1) 安装好电涡流线圈和金属涡流片, 注意两者必须保持平行(必要时可稍微调整电涡流式传感器探头的角度)。然后安装好测微头, 将电涡流线圈接入电涡流变换器的输入端, 电涡流变换器输出端接电压表的 20 V 挡, 如图 3-31 所示。

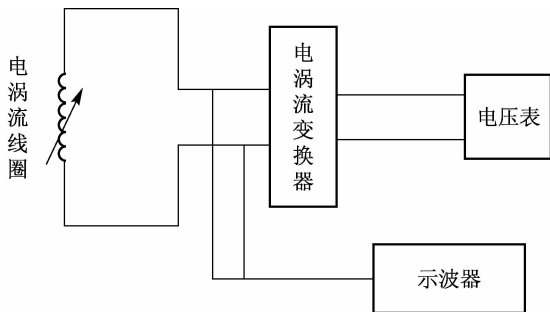


图 3-31 电涡流式传感器静态标定的实训电路

(2) 开启仪器电源, 测微头的尺寸将电涡流线圈与金属涡流片分开一定距离, 此时电涡流式传感器输出端有一电压值输出, 将示波器接入电涡流变换器输入端, 观察电涡流式传感器的高频振荡波形。

(3) 用测微头带动振动平台使电涡流线圈贴紧金属涡流片, 此时电涡流变换器的输出电压为零, 电涡流变换器中的振荡电路停振。

(4) 旋动测微头, 使电涡流线圈离开金属涡流片, 从电压表开始有读数起每移 0.25 mm 记录一个读数, 并用示波器观察电涡流式传感器的高频振荡波形。每次测得的位移与电压的数据见表 3-2。根据表 3-2 中的数据作出位移与电压的关系曲线, 指出线性范围, 求出灵敏度。

表 3-2 每次测得的位移与电压的数据

位移/mm									
电压/V									

3) 注意事项

当示波器接入电涡流变换器的输入端时, 由于一些示波器的输入阻抗不高(包括探头阻抗)以致影响电涡流式传感器的线圈阻抗, 使其输出电压变小, 并造成初始位置附近的一段死区, 因而应将示波器的探头置于 X10 挡。

4) 实训报告

- (1) 把原始数据记录于表格中, 进行数据处理得出实训结果。
- (2) 计算并分析灵敏度。

 **思考与练习**

- 1. 电感式传感器的工作原理是什么? 能够测量哪些物理量?
- 2. 电感式传感器有哪些类型?

3. 简述变隙式自感传感器的组成与工作原理。
4. 简述差动式自感传感器的工作原理及特性。
5. 自感式传感器的测量转换电路有几种？各有何特点？
6. 比较差动式自感传感器和差动变压器式传感器在结构上及工作原理上的异同。
7. 什么是电涡流效应？简述电涡流式传感器的工作原理。
8. 电涡流式传感器常用的测量转换电路有几种？其测量原理如何？各有什么特点？
9. 如何利用电涡流式传感器测量金属板厚度？
10. 怎样利用电涡流式传感器进行转速测量？