

# 模块一 传感器技术基础

## 模块导读

人类已经进入科学技术空前发展的信息社会,计算机、移动通信、机器人、自动控制技术及单片机嵌入系统迅速发展,尤其是物联网技术的突起,都迫切需要种类繁多的传感器。传感器是系统的“电五官”,负责信息的感知和采集,并将这些信息转化为能被系统处理的信号。在现代信息科学的三大支柱技术中,传感器技术居于首位。

本模块重点介绍传感器的定义、分类、特性及标定和校准,使读者对传感器技术有一个基本的认识 and 了解。

## 学习单元一 传感器与自动测控系统

世界是由物质组成的,表征物质特性或其运动形式的参数很多,根据物质的电特性,可分为电量和非电量两类。人类为了认识物质,需要对物质特性进行测量,测量中大多是针对非电量的测量,如力、位移、温度等。由于非电量不能直接使用一般电工仪表和电子仪器测量,电信号则易于直接用电子仪器测量和传输,因此常常将非电量转换成有对应关系的电量,如电流和电压,然后进行测量。实现这种转换技术的器件即为传感器。自动检测和自动控制系统处理的大都是电量,需要通过传感器对非电量的原始信息进行精确可靠的捕获并转换为电量。

### 一、传感器概述

传感器的作用是将被测非电物理量转换成与其有一定关系的电信号,它获得的信息准确与否,直接关系到整个系统的精确度。中华人民共和国国家标准《传感器通用术语》(GB/T 7665—2005)规定的传感器的定义为:能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置,通常由敏感元件和转换元件组成。敏感元件是指传感器中能直接感受或响应被测量的部分;转换元件是指传感器中能将敏感元件感受或响应的被测量转换成适于传输或测量的电信号的部分。传感器的组成框图如图 1-1 所示。

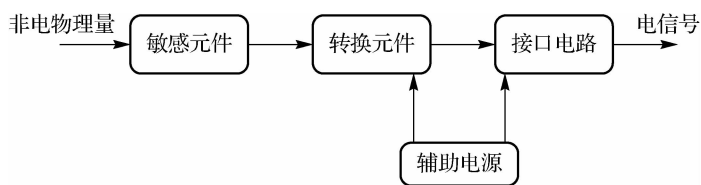


图 1-1 传感器的组成框图

传感器是一种检测装置,能感受到被测量的信息,并能将其按一定规律变换成为电信号或其他所需形式的信息输出,以满足信息的传输、处理、存储、显示、记录和控制在要求。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。传感器是以一定的精度和规律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装置。中国物联网校企联盟认为:传感器的存在和发展,让物体有了触觉、味觉和嗅觉等感官,让物体慢慢变得活了起来。根据传感器的敏感元件进行分类,可将传感器分为物理类(基于力、热、光、电、磁和声等物理效应)、化学类(基于化学反应的原理)和生物类(基于酶、抗体和激素等分子识别功能);根据传感器的基本感知功能可将其分为热敏元件、光敏元件、气敏元件、力敏元件、磁敏元件、湿敏元件、声敏元件、放射线敏感元件、色敏元件和味敏元件等十几大类。

人们为了从外界获取信息,必须借助于感觉器官;而单靠人们自身的感觉器官,在研究自然现象和规律,以及生产活动中就远远不够了。为了适应这种情况就需要传感器。因此,传感器是人类五官的延伸,又称之为“电五官”。人们常将传感器的功能与人类五大感觉器官相比拟:

- 光敏传感器——视觉;
- 声敏传感器——听觉;
- 气敏传感器——嗅觉;
- 化学传感器——味觉;
- 压敏、温敏、流体传感器——触觉。

目前,最新的技术已经实现了意念的感知和传递。2014年2月,美国科学家完成了“阿凡达猴子实验”,实现了两只猴子之间的意念传递。通过一只猴子的意念控制另一只猴子的行为,即意念的测控(感知、传递、控制)。

生物电传感器等——意念。

新技术革命的到来,使世界开始进入信息时代。在利用信息的过程中,首先要解决的问题就是获取准确可靠的信息,而传感器是获取自然和生产领域中信息的主要途径与手段。

在现代工业生产尤其是自动化生产过程中,要用各种传感器来监视和控制生产过程中的各个参数,使设备工作在正常状态或最佳状态,并使产品达到最好的质量。因此,没有众多的优良的传感器,现代化生产也就失去了基础。

在基础学科研究中,传感器更具有其突出的地位。随着现代科学技术的发展,传感器进入了许多新领域。例如,在宏观上要观察上千光年的茫茫宇宙,微观上要观察小到飞米( $\text{fm}$ ,  $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ )的粒子世界;纵向上要观察长达数十万年的天体演化,短到飞秒( $\text{fs}$ ,  $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ,光在真空中  $1 \text{ fs}$  仅走  $0.3 \mu\text{m}$ )的瞬间反应。此外,还出现了对深化物质认识,开拓新能源、新材料等具有重要作用的各种极端技术研究,如超高温、超低温、超高压、超高真空、超强磁场、超弱磁场等。显然,要获取大量人类感官无法直接获取的信息,没有相适应的传感

器是不可能的。许多基础科学研究的障碍,首先就在于对象信息的获取存在困难;而一些新机理和高灵敏度的检测传感器的出现,往往会导致该领域内的突破。一些传感器的发展,往往是一些边缘学科开发的先驱。

传感器的发展趋势是微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化、网络化,它不仅促进了传统产业的改造和更新换代,而且可能建立新型工业,从而成为 21 世纪新的经济增长点。总体上看,传感器技术是涉及能量转换原理,材料选择和制造,器件设计、开发和应用等的多项综合技术。传感器早已渗透到诸如工业生产、宇宙开发、海洋探测、环境保护、资源调查、医学诊断、生物工程甚至文物保护等极其广泛的领域。可以毫不夸张地说,从茫茫的太空到浩瀚的海洋,以至各种复杂的工程系统,几乎每个现代化项目都离不开各种各样的传感器。

由此可见,传感器技术在发展经济、推动社会进步方面的作用是十分重要与明显的。世界各国都十分重视这一领域的发展。相信在不久的将来,传感器技术将会出现一个飞跃,达到与其重要地位相称的新水平。

## 二、自动测控系统概述

自动检测和自动控制技术是人们对事物的规律进行定性了解和定量掌握所从事的一系列技术措施。自动测控系统是完成这一系列技术措施的装置之一,它是检测控制器与研究对象的总和,通常可分为开环与闭环两种,其框图如图 1-2 和图 1-3 所示。

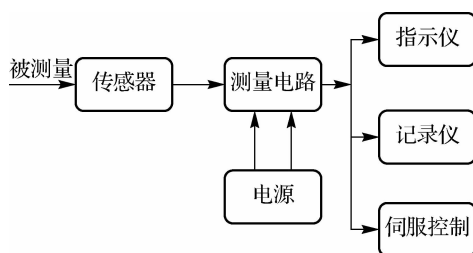


图 1-2 开环自动测控系统框图

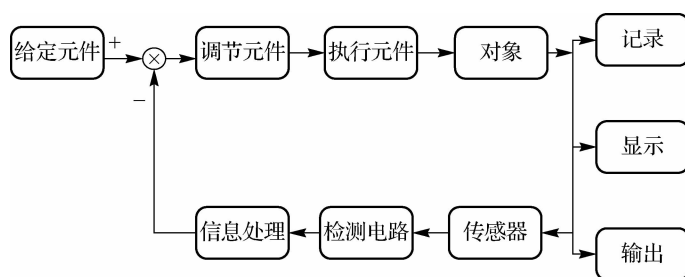


图 1-3 闭环自动测控系统框图

由图可以看出,一个完整的自动测控系统一般由传感器、测量电路、显示记录装置或调节执行装置、电源四部分组成。

 思考与练习

问题1 传感器的定义是什么?它由哪几部分组成?它在自动测控系统中起什么作用?

思考: .....

.....

.....

.....

问题2 为什么称传感器为电五官?谈谈传感器在信息社会中的地位。

思考: .....

.....

.....

.....



## 学习单元二 传感器的分类

根据某种原理设计的传感器可以同时测量多种非电物理量,而有时一种非电物理量又可以用几种不同传感器测量。因此,传感器有许多分类方法,常见的分类方法有两种:一种是按被测物理量来分,另一种是按传感器的工作原理来分。

### 一、按被测物理量分类

传感器按被测物理量的性质可分为温度传感器、力敏传感器、磁敏传感器、光敏传感器、位移传感器、加速度传感器、湿度传感器、声音传感器、色彩传感器、红外传感器、流量传感器、液位传感器等。

这种分类方法把种类繁多的被测量分为基本被测量和派生被测量两类。例如,力可视为基本被测量,从力可派生出压力、重力、应力、力矩等派生被测量。当需要测量这些被测量时,只要采用力敏传感器就可以了。了解基本被测量和派生被测量的关系,对选用传感器类型很有帮助。

常见的非电基本被测量和派生被测量见表 1-1。

表 1-1 常见的非电基本被测量和派生被测量

基本被测量		派生被测量
温度		热容量、气体速度、涡流
力		压力、重力、应力、力矩
光		光通量与密度、光谱分布
位移	线位移	长度、厚度、应变、振动、磨损、不平度
	角位移	旋转角、偏转角、角振动
速度	线速度	速度、振动、流量、动量
	角速度	转速、角振动
加速度	线加速度	振动、冲击、质量
	角加速度	角振动、扭矩、转动惯量
时间		频率、周期、计数、统计分布
湿度		水气、水分、露点

按被测物理量的性质进行分类的优点是比较明确地表达了传感器的用途,便于使用者根据其用途选用;缺点是没有区分每种传感器在转换机理上有何共性和差异,不便于使用者掌握其基本原理及分析方法。

## 二、按传感器的工作原理分类

传感器按工作原理可分为电阻式、电容式、电感式、热电式、光电式、磁电式、压电式等。通常同一机理的传感器可以测量多种物理量,而同一被测物理量又可以采用多种不同类型的传感器来测量。

传感器按工作原理的分类见表 1-2。

表 1-2 传感器按工作原理的分类

工作原理	传感器举例
变电阻	电位器式、应变式、压阻式、光敏式、热敏式
变电容	电容式、湿敏式
变磁阻	电感式、差动变压器式、涡流式
变电荷	压电式
变电势	霍尔式、感应式、热电偶式
变谐振频率	振动膜式

下面简单介绍几种常见传感器。

### 1. 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器的基本原理是将被测的非电量转换成电阻值的变化,再经过转换电路变成电量输出。其实现方法是将电阻应变片粘贴在弹性元件表面上,当力、扭矩、速度、加速度等物理量作用在弹性元件上时,会导致弹性元件和粘贴的电阻应变片发生应变效应,进而引起电阻应变片电阻的变化。

电阻应变片简称应变片,是一种能够将机械构件上应变的变化转换为电阻变化的传感器,其转换原理是基于金属电阻丝的电阻应变效应。电阻应变效应是指金属丝在外力作用

下发生机械变形时,其电阻值发生变化的现象。

## 2. 热电式传感器

热电式传感器是一种将温度的变化转换成电量变化的装置。它利用敏感元件的电参数随温度变化的特性,对温度和与温度有关的参量进行测量,是众多传感器中应用最广泛、发展最快的传感器之一。

热电式传感器所基于的物理原理主要包括热电效应、热阻效应、热辐射、磁导率随温度变化的特性等,因此按照工作原理,可将热电式传感器分为热敏电阻、热电偶、PN 结型测温传感器、辐射高温计等。下面主要介绍热敏电阻。

热敏电阻是最常见的温度检测元件之一,其测量精度高、种类多、发展较成熟,它由一种半导体材料制成,特点是电阻随温度变化而显著变化,能直接将温度的变化转换为电量的变化。

热敏电阻是利用半导体的电阻值随温度变化的特性制成的一种热敏元件。热敏电阻的导电性能主要由内部的载流子(电子和空穴)密度和迁移率所决定,当温度升高时,外层电子在热激发下大量成为载流子,载流子的密度大大增加,活动能力加强,从而导致其阻值的急剧下降。

按照电阻的阻值随温度变化的情形,可将热敏电阻分为三类:阻值随温度的上升而减小的负温度系数(negative temperature coefficient,NTC)热敏电阻,它的主要材料是过渡金属氧化物半导体陶瓷;阻值随温度的上升而增加的正温度系数(positive temperature coefficient,PTC)热敏电阻,其主要材料是掺杂的半导体陶瓷;临界温度系数热敏电阻(critical temperature resistor,CTR),它的阻值在特定的温度范围内随温度升高而降低3~4个数量级,主要材料是二氧化钒,并添加了一些金属氧化物,可组成理想的控制开关。在温度测量中,主要采用的是 NTC 和 PTC 热敏电阻,尤其是 NTC 热敏电阻。

热敏电阻主要用作检测元件和电路元件。热敏电阻在温度计、温度补偿、湿度计、分子量测定、液位报警、流速计、气体分析仪、真空计等仪器仪表中用作检测元件;在偏置线圈的温度补偿、仪表温度补偿、热电偶温度补偿、晶体管温度补偿、恒压电路、延迟电路、保护电路、自动增益控制电路、RC 振荡电路、振幅稳定电路等电路中用作电路元件。

## 3. 光电式传感器

光电式传感器是利用光电器件把光信号转换成电信号的装置。光电式传感器工作时首先把被测量的变化转换成为光量的变化,然后通过光电器件把光量的变化转换为相应的电量的变化,从而实现非电量的测量。光电式传感器的敏感元件是光电器件。

光电式传感器的工作原理基于光电效应。光电效应是指物体吸收了光能后,光能转换为该物体中某些电子的能量,从而产生电流的电效应。光电效应分为外光电效应和内光电效应两大类。能产生光电效应的器件称为光电效应器件,常见的有光敏电阻、光电池和光敏晶体管等,下面主要介绍光敏电阻。

光敏电阻是利用硫化镉或硒化镉等半导体材料制成的特殊电阻器,表面涂有防潮树脂,具有光电效应。光敏电阻对光线十分敏感。在无光照时,电阻值(暗电阻)很大;当光敏电阻受到一定波长范围的光照时,它的阻值(亮电阻)急剧减小。这种特性可以应用在光控器件中,实现对设备的自动化控制。例如,光电式传感器的一个应用是烟尘浊度监测仪。烟道里的烟尘浊度是通过光在烟道里传输过程中的变化大小来检测的。如果烟道浊度增加,光源

发出的光被烟尘颗粒的吸收和折射增加,到达光检测器的光减少,因而光检测器输出信号的强弱便可反映烟道浊度的变化。另外,光电式传感器也应用于光电式转速传感器、光电式液位传感器、无触点式路灯控制电路等。

#### 4. 磁电式传感器

磁电式传感器是对磁场参量敏感的元器件,具有把磁物理量转换成电信号的功能。在磁电式传感器中,主要利用的是霍尔效应和磁阻效应。磁电式传感器主要分为三类:霍尔元件、磁敏电阻、磁敏二极管和三极管。其中,霍尔元件及霍尔传感器的应用量最大。

霍尔元件的工作原理基于霍尔效应。霍尔效应是指磁场作用于载流金属导体、半导体中的载流子时,产生横向电位差的物理现象,输出的稳定电势差即霍尔电压。根据霍尔效应制成的霍尔器件可用于磁场和功率测量,也可制成开关元件。

磁敏电阻是基于磁阻效应的磁敏元件。将一载流导体置于外磁场中,其电阻会随着磁场的变化而变化,这种现象称为磁阻效应。磁敏电阻的应用范围比较广,可以利用它制成磁场探测仪、位移和角速度检测器、安培计及磁敏交流放大器等。

磁敏二极管是PN结型磁电转换元件,在磁场强度的变化下电流也发生变化,具有输出信号大、灵敏度高、工作电流小和体积小等特点,因此适合磁场、转速、探伤等方面的检测和控制。

磁敏三极管与磁敏二极管一样,是PN结型磁电转换元件。磁敏三极管在正、反向磁场作用下,其集电极电流出现明显的变化,这样就可以利用磁敏三极管来测量弱磁场、电流、转速、位移等物理量。磁敏三极管的应用领域与磁敏二极管相似,主要应用于测量磁场、大电流、磁力探伤、接近开关、程序控制、位置控制、转速测量和各种工业工程自动控制等技术领域。

#### 5. 压电式传感器

压电式传感器是利用某些物质的压电效应制成的,当被测量物因为受力而产生变化时,传感器能够产生静电电荷或电压变化。

压电效应是指某些介质,当沿着一定方向施加力使之变形时,其内部产生极化现象,同时在表面上产生符号相反的电荷;外力去掉后又恢复不带电状态的现象。

大多数晶体都具有压电效应,其中石英晶体是性能比较好的材料,它被广泛应用于电子信息产业的各领域,如家电、无线电通信等。

压电式力敏传感器是利用压电元件直接实现力电转换的传感器,在拉力、压力测量时,通常较多采用双片或多片石英晶片做压电元件,其特点是刚度大、测量范围宽、线性好。压电式力传感器按照测力状态可分为单向、双向和三向传感器,它们的结构基本一致,都是通过弹性膜、盒等收集压力并转换成力,再传递给压电元件。

压电式加速度传感器又称为压电加速度计。它是利用某些物质(如石英晶体)的压电效应,在加速度计受振动力作用时,加在压电元件上的力也随之变化。当被测物的振动频率远低于加速度计的固有频率时,力的变化与被测加速度成正比。

#### 6. 光纤传感器

光纤传感器一般由光源、光导纤维、光传感器元件、光调制机构和信号处理器等部分组成,其工作原理是:光源发出的光经光导纤维进入光传感元件,而在光传感元件中受到周围环境场的影响而发生变化的光再进入光调制机构,由其将传感元件测量检测的参数调制成幅度、相位、偏振等信息,这一过程称为光电转换过程,最后利用微处理器如频谱仪等进行信

号处理。光纤传感器具有强抗干扰性,所以应用范围很广,尤其适用于恶劣环境,具有很大的市场需求,如石油化工系统、矿井、大型电厂等需要检测氧气、碳氢化合物、一氧化碳等气体的场所。采用传统的传感器不但达不到要求的精度,而且易引起安全事故,光纤气敏传感器则可以安全有效地实现上述检测。

这种分类方法的优点是对传感器的工作原理比较清楚,类别少,有利于传感器专业工作者对传感器的深入研究分析;缺点是不便于使用者根据用途选用。

### 三、其他分类方法

传感器按输出量分类有模拟式、数字式传感器;按工作效应分类有物理传感器、化学传感器、生物传感器等;按能量关系分类有能量转化型、能量控制型传感器等。

无论是哪一种分类方法,对于传感器来说,都有一些基本要求,具体表现为:

- (1)足够的容量。传感器的工作范围或量程需要足够大,且具有一定的过载能力。
- (2)灵敏度高,精度适当。输出信号与被测信号呈确定的关系,通常为线性关系,并且比值要尽量大;同时,传感器的静态响应与动态响应的准确度能满足要求。
- (3)响应速度快,工作稳定,可靠性好。
- (4)使用性和适应性强。体积小,质量轻,动作能量小,对被测对象的状态影响小;内部噪声小且不易受外界干扰的影响;其输出力求采用通用或标准形式,以便与系统对接。
- (5)使用经济。成本低,寿命长,便于使用、维修和校准。

本书介绍的传感器主要是按被测物理量分类,针对测量任务组织章节编写的,适当加以工作原理的分析,重点讲述各种传感器的用途,侧重培养应用技术能力,使读者学会应用传感器,并进一步开发利用新型传感器。

### 思考与练习

问题 传感器的分类方法主要有哪几种?各有什么优点和缺点?

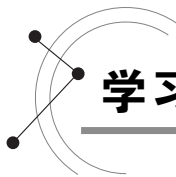
思考: .....

.....

.....

.....

.....



## 学习单元三

## 传感器的命名、代号和图形符号

中华人民共和国国家标准《传感器命名法及代码》(GB/T 7666—2005)规定了传感器的命名方法及图形符号,并将其作为统一传感器命名及图形符号的依据。该标准适用于传感器的生产、科学研究、教学及其他相关领域。



## 一、传感器的命名

根据 GB/T 7666—2005 的规定,传感器的全称应由“主题词+四级修饰语”组成,即主题词——传感器;

一级修饰语——被测量,包括修饰被测量的定语;

二级修饰语——转换原理,一般可后缀以“式”字;

三级修饰语——特征描述,指必须强调的传感器结构、性能、材料特征、敏感元件及其他必要的性能特征,一般可后缀以“型”字;

四级修饰语——主要技术指标(如量程、精度、灵敏度等)。

## 二、传感器的代号

根据 GB/T 7666—2005 的规定,传感器的代号应包括以下四部分:

a——主称(传感器);

b——被测量;

c——转换原理;

d——序号。

传感器产品代号的编制格式如图 1-4 所示。在被测量、转换原理和序号三部分代号之间须用连字符“-”连接。

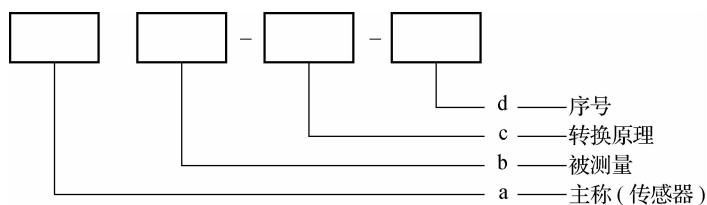
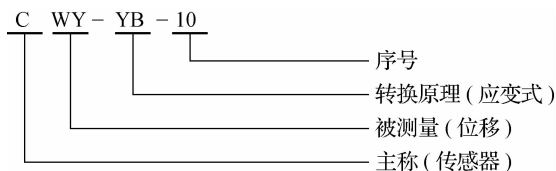


图 1-4 传感器产品代号的编制格式

例如:



## 三、传感器的图形符号

图形符号通常在图样或技术文件中用来表示一个设备或概念的图形、标记或字符。由于它能象征性或形象化地标记信息,因此可以越过语言障碍,直接地表达设计者的思想和意图,在实际中应用广泛。传感器的图形符号是电气图用图形符号的一个组成部分。

1994 年 2 月 1 日国家批准实施的《传感器图用图形符号》(GB/T 14479—1993)是与国际接轨的。按照此规定,传感器的图形符号由符号要素正方形和等边三角形组成,如图 1-5 所示。其中,正方形表示转换元件,等边三角形表示敏感元件。

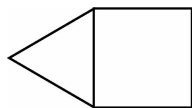


图 1-5 传感器的图形符号

图 1-6 所示是几种典型传感器的图形符号。

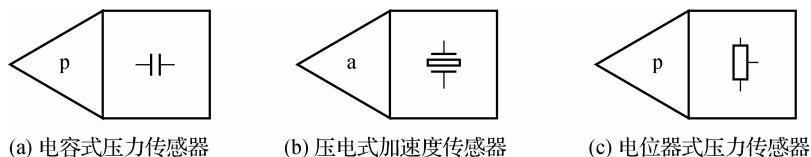


图 1-6 几种典型传感器的图形符号

GB/T 14479—1993 给出了 43 种常用传感器的图形符号示例。标准规定,对于采用新型或特殊转换原理或检测技术的传感器,亦可参照标准的有关规定自行绘制,但必须经主管部门认可。

### 思考与练习

问题 传感器的图形符号由哪几部分组成?

思考:

.....

.....

.....

.....

## 学习单元四 传感器的特性

传感器测量静态量表现为静态特性,测量动态量表现为动态特性。为了降低或消除传感器在测控系统中的误差,传感器需要具有良好的静态特性和动态特性,才能准确地感知和转换信号或能量。

### 一、传感器的静态特性

静态特性是指对静态的输入信号,传感器的输出量与输入量之间所具有的相互关系。因为这时的输入量和输出量都和时间无关,如热电阻的阻值随温度变化特性,它们之间的关系,即传感器的静态特性可用一个不含时间变量的代数方程,或以输入量(如温度)作为横坐标,把与其对应的输出量(如阻值)作为纵坐标而画出的特性曲线来描述。

表征传感器静态特性的主要参数有线性度、灵敏度、重复性、迟滞和分辨力等。下面具体介绍几种传感器的静态特性指标。

#### 1. 线性度

线性度是传感器输出量与输入量之间的实际关系曲线偏离直线的程度,又称非线性误差。

通常情况下,传感器的实际静态特性输出是一条曲线而非直线。在实际工作中,为使仪表具有均匀刻度的读数,常用一条拟合直线近似地代表实际的特性曲线,线性度(非线性误差)就

是这个近似程度的一个性能指标。拟合直线(见图 1-7)的选取有多种方法,如将零输入和满量程输出点相连的理论直线作为拟合直线;或将与特性曲线上各点偏差的平方和为最小的理论直线作为拟合直线,称为最小二乘法拟合直线。显然,选取的拟合直线不同,所得的线性度值也不同。选择拟合直线应保证获得尽量小的非线性误差,并考虑使用与计算方便。

## 2. 灵敏度

灵敏度是传感器在稳态下输出增量与输入增量的比值。对于线性传感器,其灵敏度就是它的静态特性的斜率;非线性传感器的灵敏度是一个随工作点而变的变量,用  $S$  表示灵敏度,如图 1-8 所示。

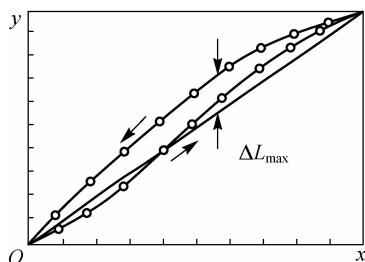


图 1-7 拟合直线

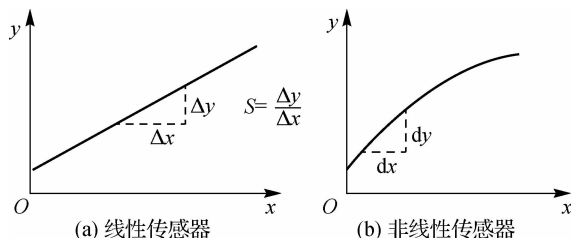


图 1-8 灵敏度

## 3. 重复性

重复性是传感器在输入量按同一方向做全量程多次测试时,所得特性曲线不一致性的程度。

如图 1-9 所示,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  $\Delta R_{\max 2}$ 。重复性偏差取这两个最大偏差中的较大者,记为  $\Delta R_{\max}$ 。多次重复测试的曲线越重合,说明重复性越好,误差也小。重复性的好坏是与许多随机因素有关的。传感器输出特性的不重复性主要是由传感器机械部分的磨损、间隙、松动,部件的内摩擦、积尘,电路元件老化、工作点漂移等原因导致的。

## 4. 迟滞

迟滞是指传感器在正向行程(输入量增大)和反向行程(输入量减小)期间,输出-输入特性曲线不一致的程度,如图 1-10 所示,图中用  $\Delta H_{\max}$  表示最大迟滞偏差。

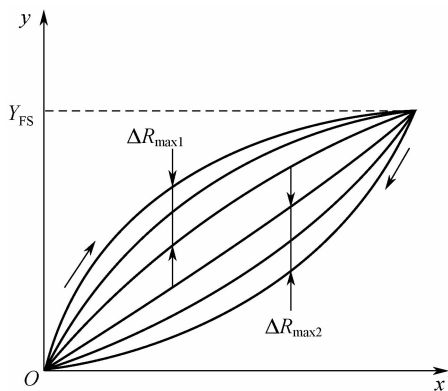


图 1-9 重复性

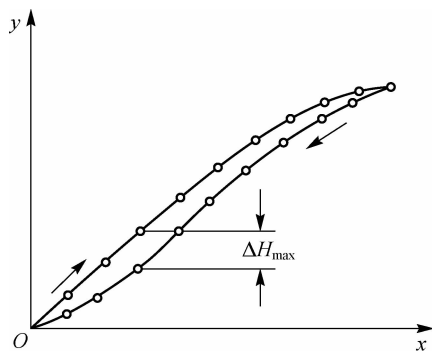


图 1-10 迟滞特性

产生这种现象的主要原因是传感器机械部分存在不可避免的缺陷,如轴承摩擦、间隙、紧固件松动、材料内摩擦、积尘等。迟滞特性一般由实验方法确定。

### 5. 分辨力

传感器的分辨力是在规定测量范围内所能检测的输入量的最小变化量,有时也用该值相对满量程输入值的百分数表示。

### 6. 稳定性

稳定性有短期稳定性和长期稳定性之分。传感器常用长期稳定性,它是指在室温条件下,经过相当长的时间间隔,如一天、一月或一年,传感器的输出与起始标定时输出之间的差异。

### 7. 漂移

传感器的漂移是指在外界的干扰下,输出量发生与输入量无关的、不需要的变化。漂移量的大小也是衡量传感器稳定性的重要性能指标。传感器的漂移有时会导致整个测量或控制系统处于瘫痪状态。漂移包括零点漂移和灵敏度漂移等,零点漂移和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,零点或灵敏度随时间的缓慢变化;温度漂移是环境温度变化引起的零点或灵敏度的变化。

## 二、传感器的动态特性

传感器的动态特性是指输入量随时间变化时传感器的响应特性。由于传感器存在惯性滞后,当被测量随时间变化时,传感器的输出往往来不及达到平衡状态,即处于动态过渡过程之中,因此传感器的输出量表征为时间函数关系。在动态(快速变化)的输入信号情况下,要求传感器能迅速准确地响应和再现被测信号的变化。也就是说,传感器要有良好的动态特性。研究传感器的动态特性时,通常从时域和频域两方面采用瞬态响应法和频率响应法来分析。由于传感器及系统的动态特性取决于传感器及系统本身及输入信号的形式,因此工程上常用单位阶跃函数和正弦函数等作为“标准”输入信号,对传感器及系统的动态特性进行分析,据此确立传感器及检测系统动态特性的指标。最常用的是通过几种特殊的输入时间函数,如阶跃函数和正弦函数来研究其响应特性,称为阶跃响应法和频率响应法。

### 1. 阶跃响应特性

给传感器输入一个单位阶跃函数信号:

$$u(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$$

其输出特性称为阶跃响应特性,如图 1-11 所示。由图可衡量阶跃响应的几项常见指标。

(1) 上升时间  $t_r$ 。传感器输出值由稳态值的 10% 上升到 90% 所需的时间。

(2) 响应时间  $t_s$ 。输出值达到允许误差范围  $\pm \Delta\%$  所经历的时间。

(3) 超调量  $\alpha$ 。输出值第一次超过稳态值的峰高,即  $\alpha = y_{\max} - y_c$ ,常用  $\alpha/y_c \times 100\%$  表示。

上升时间  $t_r$ 、响应时间  $t_s$  表征系统的响应速度性能,超调量  $\alpha$  则表征传感器的稳定性。通过这两个方面可以比较完整地描述传感器的动态特性。

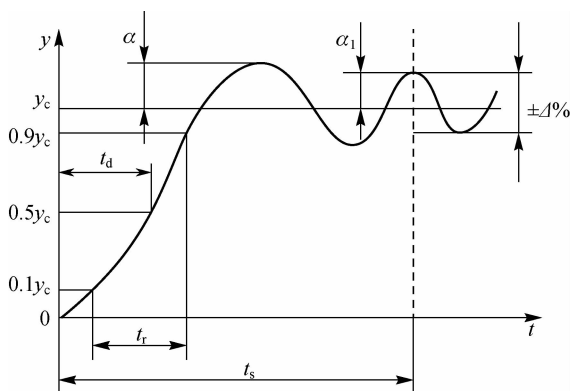


图 1-11 传感器的阶跃响应特性

## 2. 频率响应特性

由控制理论可知,在初始条件为零时,传感器及系统输出的傅里叶变换和输入的傅里叶变换之比,即为传感器及系统的频率响应函数。

将各种频率不同而幅值相等的正弦信号输入传感器,其输出正弦信号的幅值、相位与频率之间的关系,称为频率响应特性。幅频特性即输出与输入的幅值比,相频特性即输出与输入的相角差。由于相频特性与幅频特性之间有一定的内在关系,因此在表示传感器的频响特性及频域性能指标时主要用幅频特性。图 1-12 所示为典型的对数幅频特性曲线。工程上通常将 $\pm 3$  dB 所对应的频率范围称为频响范围,又称通频带。对于传感器,则常根据所需测量精度来确定正负分贝数所对应的频率范围,称为工作频带。

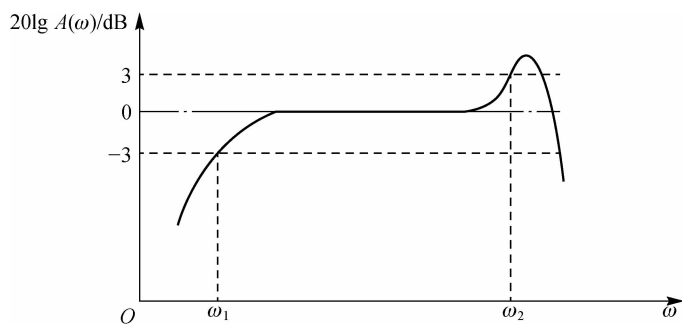


图 1-12 典型的对数幅频特性曲线

### 思考与练习

问题 1 什么是传感器的静态特性?它由哪些技术指标描述?

思考:

.....

.....

.....

.....

问题 2 什么是传感器的动态特性？其分析方法有哪几种？

思考：

.....

.....

.....

## 学习单元五 传感器的标定与校准

任何一种传感器在装配完成后都必须按设计指标进行全面严格的性能鉴定。使用一段时间后(中国计量法规定一般为一年)或经过修理,也必须对主要技术指标进行校准试验,以确保传感器的主要性能指标达到要求。

### 一、标定与校准的方法

传感器标定就是利用精度高一级的标准器具对传感器进行定度的过程,从而确定传感器输出量和输入量之间的对应关系,同时也确定不同使用条件下的误差关系。

传感器校准是指传感器须定期检测其基本性能参数,判定是否可继续使用,若能继续使用,则应对其有变化的主要指标(如灵敏度)进行数据修正,确保传感器测量精确度的过程。校准与标定的内容是基本相同的,下面对标定进行介绍。

工程测试中传感器的标定,应在与其使用条件相似的环境状态下进行,并将传感器所配用的滤波器、放大器及电缆等和传感器连接后一起标定,标定时应按照传感器规定的安装条件进行安装。传感器标定系统一般由被测物理量的标准发生器,被测物理量的标准测试系统,待标定传感器所配接的信号调节器和显示、记录器等组成。

### 二、静态标定

输入已知标准非电量,测出传感器的输出,给出标定曲线、标定方程和标定常数,计算灵敏度、线性度、滞差、重复性等传感器的静态特性指标的过程称为静态标定。

传感器的静态标定设备有力标定设备(如测力砝码、拉压式测力计)、压力标定设备(如活塞式压力计、水银压力计、麦氏真空计)、位移标定设备(如量块、直尺等)、温度标定设备(如铂电阻温度计、铂铑-铂热电偶、基准光电高温比较仪)等。

对标定设备的要求是:具有足够的精度,至少应比被标定的传感器及其系统高一个精度等级,并且符合国家计量量值传递的规定,或经计量部门检定合格;量程范围应与被标定的传感器量程相适应;性能稳定可靠;使用方便,能适用多种环境。

例如,应变式测力传感器静态标定设备系统框图如图 1-13 所示。测力机用来产生标准力,高精度

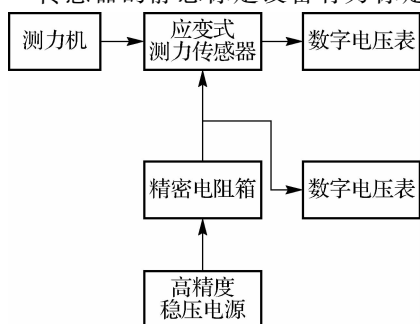


图 1-13 应变式测力传感器静态标定设备系统框图

稳压电源经精密电阻箱衰减后向传感器提供稳定的电源电压,其值由数字电压表读取,传感器的输出由高精度数字电压表读出。

### 三、动态标定

动态标定用于确定传感器的动态性能指标,它是指通过确定其线性工作范围(用同一频率不同幅值的正弦信号输入传感器,测量其输出)、频率响应函数、幅频特性和相频特性曲线、阶跃响应曲线来确定传感器的频率响应范围、幅值误差和相位误差、时间常数、阻尼比、固有频率等。

传感器种类繁多,动态标定方法各异。标定中常用的动态激励设备有激振器(如电磁振动台、低频回转台、机械振动台等)、激波管、周期与非周期函数压力发生器等。其中,激振器可用于加速度、速度、位移、力、压力传感器的动态标定。

### 思考与练习

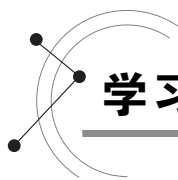
问题 传感器的标定和校准是如何定义的?为什么要进行标定和校准?

思考: .....

.....

.....

.....



## 学习单元六

## 改善传感器性能的主要技术途径

传感器的性能指标包括很多方面,要使某一传感器的各项指标都优良,不仅设计制造困难,而且在实用上也没有必要。因此,应根据实际要求与可能,在保证主要性能指标的前提下,放宽对次要性能指标的要求,从而提高性能价格比。在设计、使用传感器时采用以下一些技术措施可改善传感器性能:

### 1. 稳定性技术

传感器作为长期测量或反复使用的元件,其稳定性尤为重要,甚至超过精度指标。因为后者只要知道误差的规律就可进行补偿或修正,前者则不然。造成传感器不稳定的原因是随时间推移或环境条件变化,构成传感器的各种材料与元器件性能发生变化。为提高传感器性能的稳定性,应对材料、元器件或传感器整体进行稳定性处理,如结构材料的时效处理,永磁材料的时间老化、温度老化,电气元件的老化、筛选等。在测量要求较高的情况下,传感器的附加调整元件、电路的关键器件也要进行老化、筛选。

### 2. 抗干扰技术

传感器可看成一个复杂的输入系统,输入信号除有被测量外,还有外界干扰因素。为减小测量误差,应设法削弱或消除外界干扰因素对传感器的影响,方法有以下两种:

- (1)减少影响传感器灵敏度的因素,如采用补偿、差动全桥等措施。
- (2)降低干扰因素对传感器的实际作用的功率,如采用屏蔽、隔离措施等。

### 3. 补偿校正技术

当传感器或检测系统的系统误差的变化规律过于复杂,采取一定的技术措施后仍难满足要求,或者可满足要求,但经济上不合算或技术过于复杂而无现实意义时,可找出误差的方向和数值,采用修正曲线方法加以补偿或校正。

### 4. 合理选择传感器材料、结构与参数

选用传感器时,应根据要求,合理选择传感器的基本参数、环境参数,并根据使用条件选择合适的种类及结构和材质等。

## 思考与练习

问题 改善传感器性能的主要技术途径有哪些?

思考: .....

.....

.....

.....

## 课堂体验

### 基本内容

找出日常生活中的传感器,并说说它们的类别和作用。

本环节由教师组织学生进行,教师和学生一起讨论日常生活中用到的传感器,学生根据前面所学知识对传感器采集的信息进行分析,并对传感器进行分类,如电阻式、电容式、电感式、光电式、热电式、压电式、磁电式等。

# 学习单元七 传感器的发展趋势

传感器作为人类认识和感知世界的一种工具,其发展历史相当久远,可以说它是伴随着人类文明的进程而发展起来的。传感器技术的发展程度,影响、决定着人类认识世界的程度与能力。

随着科学的进步和社会的发展,传感器技术在国民经济和人们日常生活中占有越来越重要的地位。人们对传感器的种类、性能等方面的要求越来越高,这也进一步促进了传感器技术的快速发展。许多国家都把传感器技术列为重点发展的关键技术之一。美国曾把 20 世纪 80 年代看成传感器技术时代,并将其列为 20 世纪 90 年代 22 项关键技术之一;日本把传感器技术列为 20 世纪 80 年代十大技术之首。从 20 世纪 80 年代中后期开始,我国也把传感器技术列为国家优先发展的重要技术之一。



传感器技术是一项与现代技术密切相关的尖端技术,近年来发展很快,其主要特点及发展趋势表现在以下几个方面:

### 1. 发现利用新现象、新效应

利用物理现象、化学反应和生物效应是各种传感器工作的基本原理,所以发现新现象与新效应是发展传感器技术的重要工作,是研制新型传感器的理论基础,其意义极为深远。例如,日本夏普公司利用超导技术研制成功高温超导磁性传感器,是传感器技术的重大突破,其灵敏度之高,仅次于超导量子干涉器件。但它的制造工艺远比超导量子干涉器件简单,可用于磁成像技术,具有广泛的推广价值。

### 2. 开发新材料

传感器材料是传感器技术发展的物质基础,随着材料科学的快速发展,人们可根据实际需要控制传感器材料的某些成分或含量,从而设计制造出用于各种传感器的新的功能材料。例如,用高分子聚合物薄膜制成温度传感器,用光导纤维制成压力、流量、温度、位移等多种传感器,用陶瓷制成压力传感器,用半导体氧化物制成各种气体传感器等。这些新材料的应用,极大地提高了各类传感器的性能,促进了传感器技术的发展。

### 3. 采用高新技术

随着微电子技术、计算机技术、精密机械技术、高密封技术、特种加工技术、集成技术、薄膜技术、网络技术、纳米技术、激光技术、超导技术、生物技术等高新技术的迅猛发展,传感器技术进入了一个更为广阔的发展空间。高新技术成果的采用,成为传感器技术发展的技术基础和强大推动力。因此,传感器的高科技化,不但是传感器技术的主要特征,而且是新世纪传感器及其产业的发展方向。

### 4. 拓展应用领域

目前,检测技术正在向宏观世界和微观世界的纵深发展。空间技术、海洋开发、环境保护及地震预测等都要求检测技术满足开发、研究宏观世界的要求,而细胞生物学、遗传工程、光合作用、医学及微加工技术等又希望检测技术跟上研究微观世界的步伐。因此,科学的发展对当前传感器技术的研究、开发提出了许多新的要求,其中重要的一点就是要拓宽应用领域和检测范围,不断突破参数测量的极限。通过这些应用领域的开发和研究,不但可以提高传感器的应用性能,而且可以促进其他相关技术的发展,甚至会诞生一些新学科。

### 5. 提高传感器的性能

检测技术的发展,必然要求传感器的性能不断提高。例如,对于火箭发动机燃烧室的压力测量,希望测量精度高于0.1%;对于超精密机械加工的在线测量,要求误差小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 等。因此需要人们研制出更多性能优异的各类传感器。

对传感器而言,其主要性能指标包括检测精度、线性度、灵敏度和稳定性等。其中,检测精度是最重要的性能指标。在20世纪30年代至40年代,其检测精度一般为百分之几到千分之几。近年来,随着传感器技术的不断发展,其检测精度提高很快,有些被测量的检测精度可达万分之几,甚至百万分之几。例如,用直线光栅测线位移时,测量范围在几米时,误差仅有几微米。

### 6. 传感器的微型化与低功耗

目前,各种测控仪器设备的功能越来越强大,同时各个部件的体积却越来越小,这就要求传感器自身的体积也要小型化、微型化,现在一些微型传感器的敏感元件采用光刻、腐蚀、沉积等微机械加工工艺制作而成,尺寸可以达到微米级。此外,由于传感器工作时大多离不开电

源,在野外或远离电网的地方,往往是用电池或太阳能等供电,因此,开发低功耗的传感器及无源传感器就具有重要的实际意义,这样不仅可以节省能源,也可以提高系统的工作寿命。

### 7. 传感器的集成化与多功能化

所谓传感器的集成化,是指将信息提取、放大、变换、传输及信息处理和存储等功能都制作在同一基片上,实现一体化。与一般传感器相比,它具有体积小、反应快、抗干扰、稳定性好及成本低等优点。随着半导体集成技术与厚、薄膜技术的不断发展,传感器的集成化已成为传感器技术发展的一种趋势。

传感器的多功能化是与集成化相对应的一个概念,是指传感器能感知与转换两种以上不同的物理量。例如,使用特殊的陶瓷材料把温度和湿度敏感元件集成在一起,制成温湿度传感器;将检测几种不同气体的敏感元件用厚膜制造工艺制作在同一基片上,制成检测氧、氨、乙醇、乙烯等气体的多功能传感器等。利用多种物理、化学及生物效应使传感器多功能化,已日益成为传感器发展的方向。

### 8. 传感器的智能化与数字化

利用计算机及微处理技术使传感器智能化是 20 世纪 80 年代以来传感器技术的一大飞跃。智能传感器是一种带有微处理器的传感器,与一般传感器相比它不仅具有信息提取、转换等功能,而且具有数据处理、双向通信、信息记忆存储、自动补偿及数字输出等功能。

随着人工神经网络、人工智能和信息处理技术(如多传感器信息融合技术、模糊理论等)的进一步发展,智能传感器将具有更高级的分析、决策及自学功能,可完成更复杂的检测任务。此外,目前传感器的功能已突破传统的界限,其输出不再是单一的模拟信号,而是经过微处理器处理过的数字信号,有的甚至带有控制功能,这就是所谓的数字传感器。数字传感器的特点:一是将模拟信号转换成数字信号输出,提高了传感器的抗干扰能力,特别适用于电磁干扰强、信号传输距离远的工作现场;二是可通过软件对传感器进行线性修正及性能补偿,减少了系统误差;三是一致性与互换性好。

可以预见,随着计算机和微处理技术的不断发展,智能化、数字化传感器一定会迎来更为广阔的发展前景。

### 9. 传感器的网络化

传感器的网络化是传感器领域近些年发展起来的一项新兴技术,它利用 TCP/IP 协议,使现场测量数据就近通过网络与网络上有通信能力的节点直接进行通信,实现了数据的实时发布和共享。由于传感器自动化、智能化水平的提高,多台传感器联网已推广应用,虚拟仪器、三维多媒体等新技术已开始实用化。传感器网络化的目标就是采用标准的网络协议,同时采用模块化结构将传感器和网络技术有机地结合起来,实现信息交流和技术维护。



## 思考与练习

问题 传感器的发展趋势是什么?

思考: .....

.....

.....

.....

# 模块二 温度传感器

## 模块导读

从人体温度、环境气温到工业炉温,从空间、海洋到家用电器,各个技术领域都离不开测温 and 控温。温度是与人类的生活、工作息息相关的物理量,也是各门学科与工程研究设计中经常遇到和必须精确测量的物理量。因此,测温技术是传感技术中应用范围最广的技术之一。温度传感器是指能感受温度并将其转换成可用输出信号的传感器。温度传感器按测量方式可分为接触式和非接触式两大类,按传感器材料及电子元件特性分为热电阻和热电偶。温度传感器所涉及的内容主要包括热电阻传感器、热电偶传感器、集成温度传感器等,本模块针对常见的温度传感器进行教学,使学生掌握利用温度传感器进行温度测量的各种方法。

温度是表征物体冷热程度的物理量,是物体内部分子无规则运动剧烈程度的标志,是工业生产和科学实验中最普遍、最重要的热工参数之一。物体的很多物理现象和化学性质都与温度有关,在很多生产过程中,温度都直接影响着生产的安全、产品质量、生产效率、能源的使用情况等,因而对温度的检测及检测的准确性提出了更高的要求。

为了定量地描述温度,引入温标的概念。温标是衡量物体温度的标准尺度,是温度的数值表示方法,它给出了温度数值化的一套规则和方法,同时明确了温度的测量单位。温标就是以数值表示温度的标尺,它应具有通用性、准确性和再现性,在不同地区或不同场合测量相同的温度应具有相同的数值。

温标的种类很多,目前国际上常用的温标有摄氏温标、华氏温标、热力学温标和国际实用温标。

摄氏温标是根据液体(水银)受热后体积膨胀的性质建立起来的。摄氏温标的单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ ,变量符号为 $t$ ,它规定在标准大气压下纯水的冰熔点为 $0^{\circ}\text{C}$ ,水沸点为 $100^{\circ}\text{C}$ 。华氏温标也是根据液体(水银)受热后体积膨胀的性质建立起来的,其单位符号为 $^{\circ}\text{F}$ ,标准大气压下纯水的冰熔点为 $32^{\circ}\text{F}$ ,水沸点为 $212^{\circ}\text{F}$ 。热力学温标又称开氏温标,是国际统一的基本温标,单位符号为 $\text{K}$ ,变量符号为 $T$ 。热力学温标有一个绝对零度,它规定分子运动停止时的温度为绝对零度,因此它又称为绝对温标。由于热力学温标是理论温标,因而无法付诸实用。为此,需要建立一种紧密接近热力学温标的简单温标,即国际实用温标。国际实用温标是用来复现热力学温标的,其单位符号也为 $\text{K}$ (开尔文)。

摄氏温标与国际实用温标的换算关系为

$$t(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$$

温度的检测方法按照感温元件是否与被测对象接触,可分为接触式与非接触式两大类。

接触式测温就是使温度敏感元件与被测对象相接触,使其进行充分的热交换,当热交换平衡时,温度敏感元件与被测对象的温度相等,测温传感器的输出大小即反映了被测温度的高低。常用的接触式测温传感器有热膨胀式温度传感器(见图 2-1)、双金属温度计(见图 2-2)、热电阻、热电偶、集成温度传感器等。接触式测温传感器的优点是结构简单,工作可靠,测量精度高,稳定性好,价格低;缺点是有较大的滞后现象(测温时要进行充分的热交换),不方便对运动物体进行温度测量,被测对象的温场易受传感器的影响,测温范围比较小。



图 2-1 热膨胀式温度传感器



图 2-2 双金属温度计

非接触式测温就是利用被测对象的热辐射能量随其温度的变化而变化的原理,通过测量一定距离处被测物体发出的热辐射强度来确定被测对象的温度。常见的非接触式测温传感器有红外辐射传感器(见图 2-3)、光高温计(见图 2-4)等。非接触式测温传感器的优点是不存在测量滞后和温度范围的限制,可测高温、腐蚀、有毒、运动物体及固体、液体表面的温度,不影响被测温度;缺点是受被测对象热辐射率的影响,测量精度低,使用中测量距离和中间介质时对测量结果有影响。



图 2-3 红外辐射传感器



图 2-4 光高温计

本模块将重点介绍热电阻、热电偶和集成温度传感器。

## 学习单元一 热电阻传感器

热电阻是中低温区最常用的一种温度检测器,它是基于金属导体的电阻值随温度的增加而增加的特性来进行温度测量的。其主要特点是测量精度高、性能稳定,因此应用广泛。本学习单元主要是让学生掌握热电阻的基本工作原理和应用方法。

### 一、金属热电阻

热电阻大都由纯金属材料制成。金属热电阻常用的感温材料种类较多,最常用的是铂丝。铂热电阻的测量精确度是最高的,它不仅广泛应用于工业测温,而且被制成标准的基准仪。目前,工业测量用的金属热电阻材料有纯金属材质的铂(Pt)、铜(Cu)、镍(Ni)和钨(W)等,以及合金材质的铱铁及铂钴等,如图 2-5 所示。

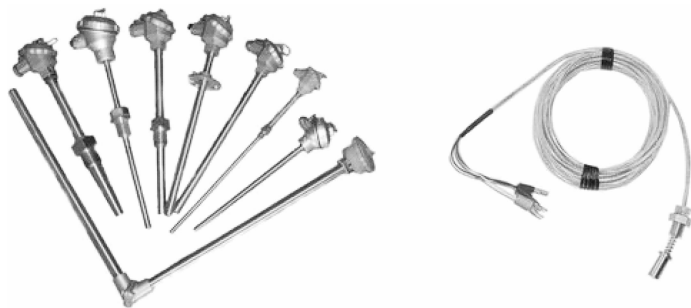


图 2-5 金属热电阻

金属热电阻随温度变化的曲线如图 2-6 所示。

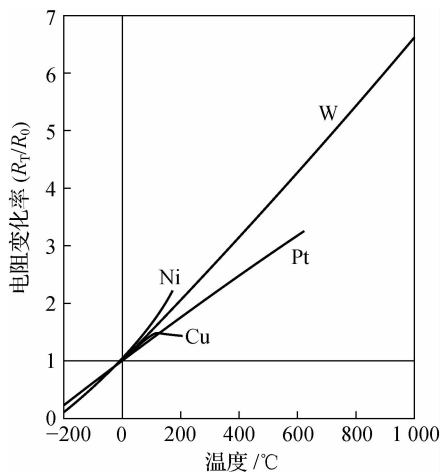


图 2-6 金属热电阻随温度变化的曲线

### 1. 工作原理

热电阻通常是把电阻信号通过引线传递到计算机控制装置或其他仪表上。

### 2. 主要类型

(1)普通型热电阻。从热电阻的测温原理可知,被测温度的变化是直接通过热电阻阻值的变化来测量的。因此,热电阻体的引出线等各种导线电阻的变化会给温度测量带来影响。

(2)铠装热电阻。铠装热电阻是由感温元件(电阻体)、引线、绝缘材料和不锈钢套管组合而成的坚实体,与普通型热电阻相比,它有下列优点:体积小,测量滞后小;机械性能好,耐振,抗冲击;能弯曲,便于安装;使用寿命长;等等。

(3)端面热电阻。端面热电阻感温元件由特殊处理的电阻丝材绕制,紧贴在温度计端面。它与一般轴向热电阻相比,能更准确和快速地反映被测端面的实际温度,适用于测量轴瓦和其他机件的端面温度。

(4)隔爆型热电阻。隔爆型热电阻使用特殊结构的接线盒,生产现场不会引起爆炸。它可用于具有爆炸危险场所的温度测量。

### 3. 标准热电阻——铂电阻

如图 2-7 和图 2-8 所示,铂电阻的阻值会随着温度的变化而改变,其使用测温范围为  $-200\sim+850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,分度号为 Pt100 和 Pt10。它们在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的阻值分别是  $100\ \Omega$  和  $10\ \Omega$ 。其阻值会随着温度上升匀速增长。

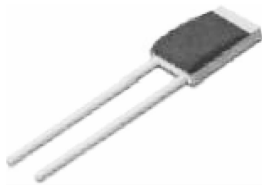


图 2-7 Pt100 薄膜铂电阻



图 2-8 Pt10 铂电阻

常见的 Pt100 感温元件有陶瓷元件、玻璃元件和云母元件,它们是由铂丝分别绕在陶瓷骨架、玻璃骨架和云母骨架上再经过复杂的工艺加工而成的。云母铂电阻示意图如图 2-9 所示。



图 2-9 云母铂电阻示意图

Pt100 传感器是利用铂电阻的阻值随温度变化而变化、并成一定函数关系的特性进行测温的,其温度-阻值的对应关系如下:

(1)当温度为  $-200\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,铂电阻的阻值为

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

(2)当温度为  $0\sim 850\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,铂电阻的阻值为

$$R_t = 100(1 + At + Bt^2) \quad (2-2)$$

式中,系数  $A = 3.968\ 74 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ;  $B = -5.874 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$ ;  $C = -4.22 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}^4$ 。

铂电阻应用范围很广,可用于医疗、电机、工业、温度计算、卫星、气象、阻值计算等高精

温度设备上。

#### 4. 标准热电阻——铜电阻

铜电阻的使用测温范围为 $-40\sim 140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，分度号为Cu50和Cu100，它们在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的阻值分别为 $50\ \Omega$ 和 $100\ \Omega$ 。铜热电阻线性好、价格低，但电阻率低，因而体积大，热响应慢，而且铜电阻容易氧化，因此测温范围小。

铜电阻的阻值和温度之间的关系可以表示为

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

式中， $R_0$ 为铜电阻在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的阻值； $\alpha$ 为铜电阻的电阻温度系数， $\alpha = (4.25 \sim 4.28) \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。

工业上常用铜电阻的 $R_0$ 值可以通过对应的分度表查得。

#### 5. 标准热电阻的分度表

标准热电阻的分度表是以列表的方式表示温度与热电阻阻值之间的关系。与标准热电阻对应的分度表有四个，即Pt100和Pt10、Cu50和Cu100。分度表是由标准热电阻数学模型计算得出的，在相邻数据之间可采用线性内插法求出中间值。铂电阻Pt100的分度表见表2-1。

表 2-1 铂电阻 Pt100 的分度表

$t/^{\circ}\text{C}$	-200	-190	-180	-170	-160	-150	-140	-130	-120	-110	-100
$R/\Omega$	18.52	22.83	27.10	31.34	35.54	39.72	43.88	48.00	52.11	56.19	60.26
$t/^{\circ}\text{C}$	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10
$R/\Omega$	64.30	68.33	72.33	76.33	80.31	84.27	88.22	92.16	96.09	100.00	103.90
$t/^{\circ}\text{C}$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$R/\Omega$	107.79	111.67	115.54	119.40	123.24	127.08	130.90	134.71	138.51	142.29	146.07
$t/^{\circ}\text{C}$	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
$R/\Omega$	149.83	153.58	157.33	161.05	164.77	168.48	172.17	175.86	179.53	183.19	186.84
$t/^{\circ}\text{C}$	240	250	260	270	280	290	300	310	320	330	340
$R/\Omega$	190.47	194.10	197.71	201.31	204.90	208.48	212.05	215.61	219.15	222.68	226.21
$t/^{\circ}\text{C}$	350	360	370	380	390	400	410	420	430	440	450
$R/\Omega$	229.72	233.21	236.70	240.18	243.64	247.09	250.53	253.96	257.38	260.78	264.18
$t/^{\circ}\text{C}$	460	470	480	490	500	510	520	530	540	550	560
$R/\Omega$	267.56	270.93	274.29	277.64	280.98	284.30	287.62	290.92	294.21	297.49	300.75
$t/^{\circ}\text{C}$	570	580	590	600	610	620	630	640	650	660	670
$R/\Omega$	304.01	307.25	310.49	313.71	316.92	320.12	323.30	326.48	329.64	332.79	335.93
$t/^{\circ}\text{C}$	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780
$R/\Omega$	339.06	342.18	345.28	348.38	351.46	354.53	359.59	360.64	363.67	366.70	369.71
$t/^{\circ}\text{C}$	790	800	810	820	830	840	850				
$R/\Omega$	372.71	375.70	378.68	381.65	384.60	387.55	390.84				

## 二、半导体热敏电阻

热敏电阻是敏感元件的一类，按照温度系数不同分为正温度系数(PTC)热敏电阻和负

温度系数(NTC)热敏电阻。其典型特点是对温度敏感,不同温度下表现出不同的电阻值。正温度系数热敏电阻在温度越高时电阻值越大,负温度系数热敏电阻在温度越高时电阻值越低,它们同属于半导体器件。

热敏电阻是开发早、种类多、发展较成熟的敏感元器件。热敏电阻采用半导体材料制成,大多为负温度系数,即阻值随温度增加而降低。温度变化会造成较大的阻值改变,因此它是最灵敏的温度传感器。但热敏电阻的线性度极差,并且与生产工艺有很大关系。热敏电阻体积非常小,对温度变化的响应也快。常用热敏电阻如图 2-10 所示。



图 2-10 常用热敏电阻

### 1. 热敏电阻的主要特点

热敏电阻的优点如下:

- (1) 灵敏度较高,其电阻温度系数要比金属大 10~100 倍以上。
- (2) 工作温度范围宽,常温器件适用于  $-55\sim+315\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高温器件适用温度高于  $315\text{ }^{\circ}\text{C}$  (目前最高可达到  $2\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),低温器件适用于  $-273\sim-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
- (3) 体积小,能够测量其他温度计无法测量的空隙、腔体及生物体内血管的温度。
- (4) 使用方便,电阻值可在  $0.1\sim 100\text{ k}\Omega$  任意选择。
- (5) 易加工成复杂的形状,可大批量生产。

热敏电阻的缺点如下:

- (1) 阻值与温度的关系非线性严重。
- (2) 元件的一致性差,互换性差。
- (3) 元件易老化,稳定性较差。
- (4) 除特殊高温热敏电阻外,绝大多数热敏电阻仅适合  $0\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,使用时必须注意。

### 2. 正温度系数热敏电阻

正温度系数(positive temperature coefficient,PTC)热敏电阻(见图 2-11)的阻值随温度上升而增大。具有正温度系数的热敏电阻可专门用作恒定温度传感器。该材料是以  $\text{BaTiO}_3$ 、 $\text{SrTiO}_3$  或  $\text{PbTiO}_3$  为主要成分的烧结体,其中掺入微量的 Nb、Ta、Bi 等的氧化物进行原子价控制而使之半导体化,常将这种半导体化的  $\text{BaTiO}_3$  等材料简称为半导(体)瓷;同时,还添加增大其正电阻温度系数的 Mn、Fe、Cu、Cr 的氧化物和添加物,采用陶瓷工艺成形、高温烧结而使钛酸钡等及其固溶体半导体化,从而得到正特性的热敏电阻材料。

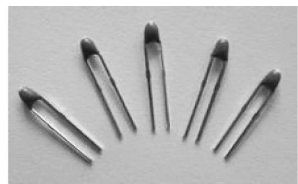


图 2-11 PTC 热敏电阻

实验表明,在工作温度范围内,PTC 热敏电阻的电阻-温度特性可近似用实验公式表示为

$$R_t = R_0 \exp[B_p(T - T_0)]$$

式中, $R_t$ 、 $R_0$  表示温度为  $T$ 、 $T_0$  时热敏电阻的阻值; $B_p$  为该种材料的材料常数。可以通过计



算,将测得的电阻值转化为温度值。

PTC 热敏电阻于 1950 年出现,1954 年出现了以  $\text{BaTiO}_3$  为主要材料的 PTC 热敏电阻。PTC 热敏电阻在工业上可用作温度的测量与控制,也用于汽车某部位的温度检测与调节,还大量用于民用设备,如控制瞬间开水器的水温、空调器与冷库的温度,以及用于对加热器、电机、变压器、大功率晶体管等电器的加热和过热保护方面的应用。

PTC 热敏电阻除用作加热元件外,还能起到“开关”的作用,称之为热敏开关。电流通过元件后引起温度升高,即发热体的温度上升,当超过居里点后,电阻增加,从而限制电流增加,于是电流的下降导致元件温度降低,电阻值的减小又使电路电流增加,元件温度升高,周而复始,因此具有使温度保持在特定范围的功能,起开关作用。利用这种阻温特性做成加热源,作为加热元件应用的有暖风器、电烙铁、烘衣柜、空调等,还可对电器起到过热保护作用。

高分子 PTC 热敏电阻用于过流保护,又经常被称为自恢复保险丝。由于它具有独特的正温度系数电阻特性,因而极为适合用作过流保护器件。它与普通保险丝一样,是串联在电路中使用的。当电路正常工作时,热敏电阻温度与室温相近、电阻很小,串联在电路中不会阻碍电流通过;而当电路因故障而出现过大电流时,热敏电阻由于发热功率增加,导致温度上升,当温度超过开关温度时,电阻骤增,回路中的电流迅速减小到安全值。热敏电阻动作后,电路中电流有了大幅度的降低。由于高分子 PTC 热敏电阻的可设计性好,可通过改变自身的开关温度来调节其对温度的敏感程度,因而可同时起到过温保护和过流保护两种作用。例如,KT16-1700DL 型热敏电阻由于动作温度很低,因而适用于锂离子电池和镍氢电池的过流及过热保护。

### 3. 负温度系数热敏电阻

负温度系数(negative temperature coefficient,NTC)热敏电阻(见图 2-12)的阻值随温度上升而减小。利用锰、铜、硅、钴、铁、镍、锌等两种或两种以上的金属氧化物进行充分混合、成形、烧结等工艺制成的半导体陶瓷,可制成 NTC 热敏电阻。其电阻率和材料常数随材料成分比例、烧结气氛、烧结温度和结构状态不同而变化。现在还出现了以碳化硅、硒化锡、氮化钽等为代表的非氧化物系 NTC 热敏电阻材料。NTC 热敏半导体大多是尖晶石结构或其他结构的氧化物陶瓷,具有负温度系数,电阻值与温度的关系可近似表示为

$$R_t = R_0 \exp[B_n(1/T - 1/T_0)]$$

式中, $R_t$ 、 $R_0$  分别为温度为  $T$ 、 $T_0$  时的电阻值; $B_n$  为材料常数。

陶瓷晶粒本身由于温度变化而使电阻率发生变化,这是由半导体的特性决定的。



图 2-12 NTC 热敏电阻

#### 4. 临界温度系数热敏电阻

如图 2-13 所示,临界温度系数热敏电阻(critical temperature resistor,CTR)具有负电阻突变特性,在某一温度下,电阻值随温度的增加急剧减小,具有很大的负温度系数。其构成材料是钒、钡、锶、磷等元素氧化物的混合烧结体,是半玻璃状的半导体,也称为玻璃态热敏电阻。骤变温度随添加锆、钨、钼等的氧化物而变,这是不同杂质的掺入使氧化钒的晶格间隔不同造成的。CTR 能够作为控温报警等应用。

#### 5. 温度特性

如前所述,热敏电阻按温度特性可分为正温度系数(PTC)热敏电阻、负温度系数(NTC)热敏电阻和临界温度系数热敏电阻(CTR)三类,其电阻和温度的变化关系曲线(温度特性曲线)如图 2-14 所示。

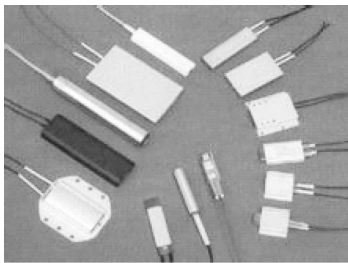


图 2-13 CTR

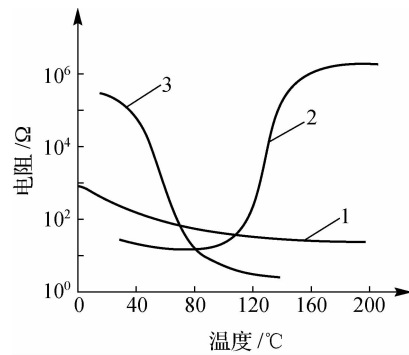


图 2-14 热敏电阻的温度特性曲线

1—负温度系数; 2—正温度系数; 3—临界温度系数

#### 6. 其他应用

热敏电阻也可作为电子线路元件,用于仪表线路温度补偿和温差电偶冷端温度补偿等。利用 NTC 热敏电阻的自热特性可实现自动增益控制,构成 RC 振荡器稳幅电路、延迟电路和保护电路。在自热温度远大于环境温度时,阻值还与环境的散热条件有关,因此在流速计、流量计、气体分析仪、热导分析中常利用热敏电阻制成专用的检测元件。PTC 热敏电阻主要用于电气设备的过热保护,无触点继电器,恒温、自动增益控制,电机起动,时间延迟,彩色电视自动消磁,火灾报警和温度补偿等方面。

### 思考与练习

问题 1 求铂电阻 Pt100 在 50 °C 时的电阻值,并用查分度表的方法验证。

思考: .....

.....

.....

.....

.....

问题2 常见的热敏电阻有哪几种?其主要应用在哪些方面?

思考:

## 课堂体验

### 基本内容

#### 1. 铂电阻

(1)将铂电阻 Pt100 固定在面包板上。

(2)用万用表测量铂电阻的阻值变化,查看室温下的阻值。用手指接触铂电阻,查看阻值变化情况。

(3)记录实验数据,通过分度表查到对应的温度值。

(4)利用铂电阻 Pt100 的温度公式计算温度值,与查表结果进行比较。

(5)将测量得到的数据进行加工,使用 Excel 软件做出阻值和温度特性统计曲线,认识铂电阻的  $R-t$  特性曲线。

#### 2. 热敏电阻

(1)将热敏电阻固定在面包板上。

(2)用万用表测量热敏电阻的阻值变化,查看室温下的阻值。用手指接触热敏电阻,查看阻值变化情况。

(3)记录实验数据,通过分度表查到对应的温度值。

(4)利用热敏电阻的温度公式计算温度值,与查表结果进行比较。

(5)将测量得到的数据进行加工,使用 Excel 软件做出阻值和温度特性统计曲线,认识热敏电阻的  $R-t$  特性曲线。

(6)比较铂电阻和热敏电阻在测量温度时的异同。

### 拓展知识

利用铂电阻 Pt100 或热敏电阻测温,使用 LabVIEW 软件和相应的硬件设计一个温度数据采集系统。

(1)硬件选择。NI cDAQ-9174 和信号调理卡,或使用 NI ELVIS- II 和 LECT-1302 实验电路板。

(2)软件选择。LabVIEW 软件。

系统采用间接方式进行温度检测,连接硬件后,将铂电阻接入恒流源,利用硬件采集卡测量铂电阻 Pt100 或热敏电阻两端的电压,通过 LabVIEW 软件计算得到电阻( $R=U/I$ ),输入铂电阻的温度公式,计算得到温度值,进行温度比较,对所采集的温度进行判断,即当实际的温度值超过所设定的上下限值时,进行报警并点亮 LED 灯,同时将温度值直接输入到波形图表中显示。

(3)前面板设计。基于 LabVIEW 的温度数据采集系统的前面板如图 2-15 所示。

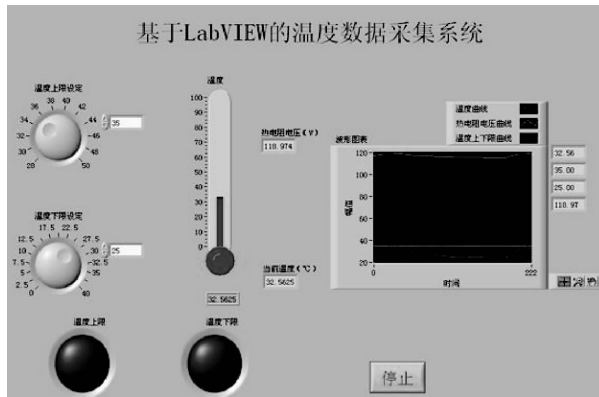


图 2-15 基于 LabVIEW 的温度数据采集系统的前面板

(4)程序框图设计。基于 LabVIEW 的温度数据采集系统的程序框图如图 2-16 所示。

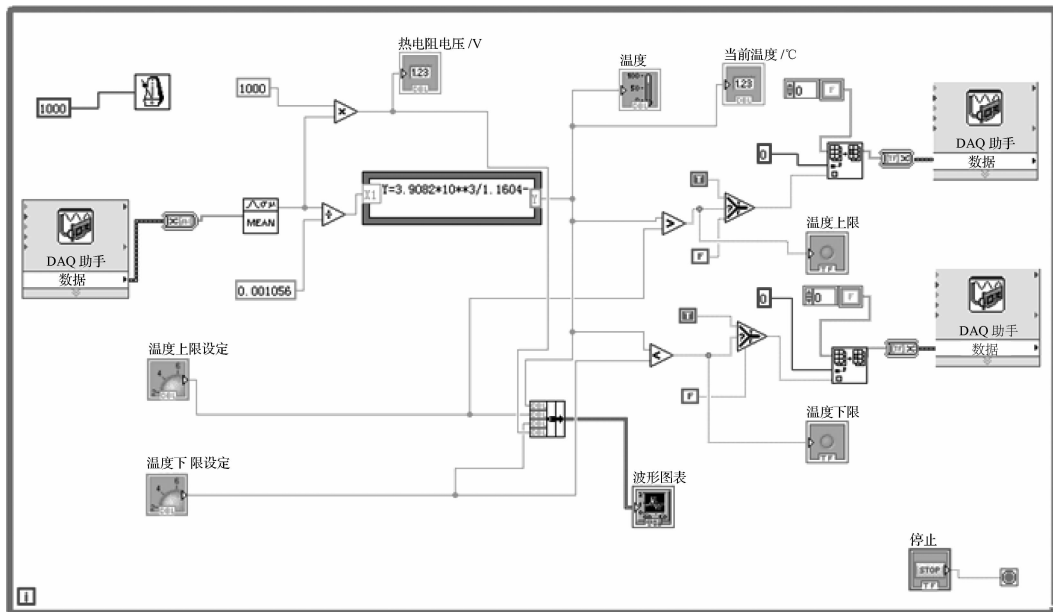


图 2-16 基于 LabVIEW 的温度数据采集系统的程序框图

系统设计完成后,可以通过 LabVIEW 软件打包的功能生成可执行程序,在计算机上执行安装程序,实现相应的功能。

## 学习单元二 热电偶传感器

热电偶是工业上常用的温度检测组件之一,它是一种将温度量转换为电动势大小的热电式传感器,具有测温范围宽、测量精度高、性能稳定、结构简单,且动态响应较好,可直接输出电信号,快速测量,远距离传输,便于集中检测、调节和控制的特点,因此在冶金、机械和化工等领域有广泛的应用。本学习单元主要是让学生掌握热电偶的基本工作原理和应用方法。

### 一、热电偶测温原理

热电偶的测温原理基于热电效应。将两种不同的导体 A 和 B 组成闭合回路,若两端节点处的温度不同(分别为  $T_0$  和  $T$ ),则回路中将产生电流,相应的电动势称为热电动势,这个物理现象称为热电动势效应,简称热电效应。热电效应是 1821 年由德国人塞贝克发现的,因此又称塞贝克效应。构成这种热电变换的元件称为热电偶(见图 2-17),导体 A 和 B 称为热电极,通常把两热电极的一个节点固定焊接,用于对被测介质进行温度测量,这一节点称为测量端或工作端,俗称热端;两热电极的另一节点处通常保持为某一恒定温度或室温,被称为基准点或参考端,俗称冷端。冷端与显示仪表或配套仪表连接,显示仪表会指示出热电偶所产生的热电势。



图 2-17 热电偶

根据热电动势与温度的函数关系,制成热电偶分度表。分度表是自由端温度在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的条件下得到的,不同的热电偶具有不同的分度表。

热电偶实际上是一种能量转换器,它将热能转换为电能,用所产生的热电势测量温度。对于热电偶的热电势,应注意如下几个问题:

- (1) 热电偶的热电势是热电偶工作端的两端温度函数的差。
- (2) 当热电偶的材料均匀时,热电偶所产生的热电势的大小与热电偶的长度和直径无关,只与热电偶材料的成分和两端的温差有关。
- (3) 当热电偶的两个热电极材料成分确定后,热电偶热电势的大小只与热电偶的温差有关;若热电偶冷端的温度保持一定,热电偶的热电势仅是工作端温度的单值函数。

热电偶的热电动势由两种导体的接触电动势和同一导体的温差电动势组成。接触电动势是由于两种不同导体的自由电子密度不同,而在接触处形成的电动势,接触电动势的数值取决于两种不同导体的材料特性和接触点的温度。两个节点的接触电动势  $e_{AB}(T)$  和  $e_{AB}(T_0)$  可表示为

$$e_{AB}(T) = \frac{KT}{Q_0} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

$$e_{AB}(T_0) = \frac{KT_0}{Q_0} \ln \frac{N_A}{N_B}$$

式中,  $N_A$ 、 $N_B$  是材料自由电子密度;  $Q_0$  是电子电荷量, 为  $1.6 \times 10^{-19}$  C;  $K$  是玻尔兹曼常数, 为  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K。

温差电动势是在同一导体中, 由于两端温度不同而使导体内高温端的自由电子向低温端扩散形成的电动势。高温端的电子能量要比低温端的电子能量大, 从高温端跑到低温端的电子数比从低温端跑到高温端的要多, 结果高温端因失去电子而带正电, 低温端因获得多余的电子而带负电, 在导体两端便形成温差电动势。温差电动势大小可表示为

$$\begin{aligned} e_A(T, T_0) \\ e_B(T, T_0) \end{aligned}$$

热电偶回路如图 2-18 所示。

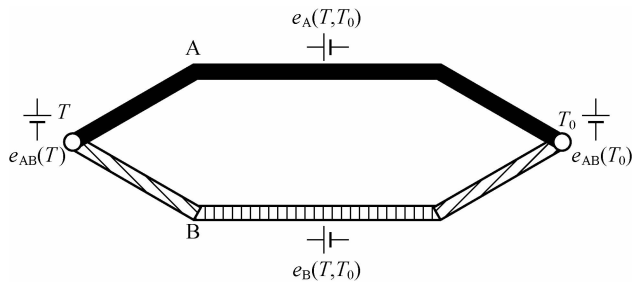


图 2-18 热电偶回路

热电偶的热电动势为

$$e_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_B(T, T_0) - e_{AB}(T_0) - e_A(T, T_0)$$

其中, 接触电动势远远大于温差电动势, 因此可以把温差电动势忽略。故有

$$e_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = \frac{k}{Q_0} (T - T_0) \ln \frac{N_A}{N_B}$$

综上所述, 可以得出以下结论: 热电偶热电动势的大小, 只与组成热电偶的材料和两个节点的温度有关, 而与热电偶的形状和尺寸无关。对于已选定的热电偶, 当参考端温度  $T_0$  恒定时,  $e_{AB}(T_0) = c$  (常数), 则总的热电动势就只与温度  $T$  成单值函数关系, 即

$$e_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - c = f(T)$$

可见, 只要测出  $e_{AB}(T, T_0)$  的大小, 就能得到被测温度  $T$ , 这就是利用热电偶测温的原理。

## 二、热电回路的基本定律

### 1. 均质导体定律

由同一种导体组成的闭合回路, 无论节点的温度如何, 均不产生热电动势, 这是因为同一种导体不产生接触电动势, 温差电动势也相抵消, 所以总的热电动势为零。

### 2. 中间导体定律

在热电偶回路中接入中间导体(第三种导体), 只要中间导体两端温度相同, 热电偶的热电动势就不变。

热电偶的热电动势测量必须有连接导线和仪表, 若把连接导线和仪表看成第三种导体, 只要它们的两端温度相同, 就不影响总热电动势。在实际测温系统中, 常采用热端焊接、冷端开路的形式, 由冷端连接导线和显示仪表构成。

### 3. 中间温度定律

热电偶回路两节点(温度为  $T$ 、 $T_0$ )间的热电动势, 等于热电偶在温度为  $T$ 、 $T_0$  时的热电

动势与在温度为  $T_a$ 、 $T_0$  时的热电动势的代数和,其中  $T_a$  为中间温度。

$$e_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T, T_a) + e_{AB}(T_a, T_0)$$

在实际热电偶测温回路中,利用中间温度定律,可对参考端温度不为  $0^\circ\text{C}$  的热电动势进行修正。

#### 4. 标准电极定律

工作端和自由端温度为  $T$ 、 $T_0$  时,用导体 AB 组成热电偶的热电动势等于 AC 热电偶和 CB 热电偶的热电动势之代数和。

$$e_{AB}(T, T_0) = e_{AC}(T, T_0) + e_{CB}(T, T_0)$$

利用标准电极定律可以方便地根据几个热电极与标准电极组成热电偶时所产生的热电动势,求出这些热电极彼此任意组合时的热电动势,而不需要逐个进行测定。

### 三、热电偶的外形结构和种类特性

热电偶按照用途不同可以制成不同形式,常见的有普通型热电偶、铠装热电偶和薄膜型热电偶。

(1)普通型热电偶又称工业装配式热电偶。普通型热电偶已经标准化、系列化,一般由热电极、绝缘套管、保护套管和接线盒等几部分组成。

(2)铠装热电偶又称缆式热电偶,是由热电极、绝缘材料和金属保护管三者结合,焊接成一个坚实的整体。铠装热电偶已实现标准化、系列化,具有体积小、精度高、动态响应快、耐振动、耐冲击、机械强度高、可挠性好、便于安装等优点。

(3)薄膜型热电偶采用真空蒸镀的方法,将两种热电极材料蒸镀到绝缘基板上,形成薄膜状热电极及热接点。为了防止热电极氧化并与被测物绝缘,在薄膜热电偶表面涂覆一层  $\text{SiO}_2$  保护层。薄膜型热电偶可以做得很薄,尺寸可以很小,因此具有热容量小、响应速度快的特点。

常用热电偶可分为标准热电偶和非标准热电偶两大类。

(1)标准热电偶是指国家标准规定了其热电势与温度的关系、允许误差并有统一的标准分度表的热电偶,它有与其配套的显示仪表可供选用。

(2)非标准热电偶在使用范围或数量级上均不及标准热电偶,一般也没有统一的分度表,主要用于某些特殊场合的测量。

为了便于工业使用,国际电工委员会推荐了八种工业用标准热电偶。国家标准规定了标准热电偶有统一的标准分度表,其名称用专用字母,即热电偶型号标志,称之为分度号。热电偶名称由热电极材料命名,前面是正极,后面是负极。

表 2-2 中列出了这八种标准热电偶。

表 2-2 标准热电偶

热电偶分度号	热电极材料	
	正 极	负 极
S	铂铑 <sub>10</sub>	纯铂
R	铂铑 <sub>13</sub>	纯铂
B	铂铑 <sub>30</sub>	铂铑 <sub>6</sub>
K	镍铬	镍硅
T	纯铜	铜镍

续表

热电偶分度号	热电极材料	
	正 极	负 极
J	铁	铜镍
N	镍铬硅	镍硅
E	镍铬	铜镍

注:铂铑<sub>10</sub>指含铑为10%,含铂90%,以此类推。

理论上讲,任意两种不同导体(或半导体)都可以配制成热电偶,但是作为实用的测温元件,对热电偶的要求是多方面的。为了保证工程技术中的可靠性,以及足够的测量精度,并不是所有材料都能组成热电偶,一般对热电偶电极材料的基本要求如下:

(1)在测温范围内,热电性质稳定,不随时间而变化,有足够的物理化学稳定性,不易氧化或腐蚀。

(2)电阻温度系数小,导电率高,比热小。

(3)测温中产生热电势要大,并且热电势与温度之间成线性或接近线性的单值函数关系。

(4)材料复制性好,机械强度高,制造工艺简单,价格便宜。

不同分度号的热电偶具有不同的分度表,表 2-3 是 S 型热电偶分度表,参考端温度为 0℃。

表 2-3 S 型(铂铑<sub>10</sub>-铂)热电偶分度表

测量端 温度/℃	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	热电动势/mV									
0	0.000	0.055	0.113	0.173	0.235	0.299	0.365	0.432	0.502	0.573
100	0.645	0.719	0.795	0.872	0.950	1.029	1.109	1.190	1.273	1.356
200	1.440	1.525	1.611	1.698	1.785	1.873	1.962	2.051	2.141	2.232
300	2.323	2.414	2.506	2.599	2.692	2.786	2.880	2.974	3.069	3.164
400	3.260	3.356	3.452	3.549	3.645	3.743	3.840	3.938	4.036	4.135
500	4.234	4.333	4.432	4.532	4.632	4.732	4.832	4.933	5.034	5.136
600	5.237	5.339	5.442	5.544	5.648	5.751	5.855	5.960	6.065	6.169
700	6.274	6.380	6.486	6.592	6.699	6.805	6.913	7.020	7.128	7.236
800	7.345	7.454	7.563	7.672	7.782	7.892	8.003	8.114	8.255	8.336
900	8.448	8.560	8.673	8.786	8.899	9.012	9.126	9.240	9.355	9.470
1 000	9.585	9.700	9.816	9.932	10.048	10.165	10.282	10.400	10.517	10.635
1 100	10.754	10.872	10.991	11.110	11.229	11.348	11.467	11.587	11.707	11.827
1 200	11.947	12.067	12.188	12.308	12.429	12.550	12.671	12.792	12.912	13.034
1 300	13.155	13.276	13.397	13.519	13.640	13.761	13.883	14.004	14.125	14.247
1 400	14.368	14.489	14.610	14.731	14.852	14.973	15.094	15.215	15.336	15.456
1 500	15.576	15.697	15.817	15.937	16.057	16.176	16.296	16.415	16.534	16.653
1 600	16.771	16.890	17.008	17.125	17.243	17.360	17.477	17.594	17.711	17.826



## 四、热电偶的冷端补偿

### 1. 基准节点

热电偶的热电势由其冷热两个节点间的温差决定,因此需要设置基准节点。通常选用冷节点作为基准节点;然而,冷节点的温度变化并不意味着被测温度的变化。因此,要确定不同方式的基准节点,即冰点式基准节点、电子冷却式基准节点、恒温槽式基准节点、补偿式基准节点和室温式基准节点等。

(1)冰点式基准节点。如图 2-19 所示,将热电偶延长在瓶中,基准节点与连接热电偶和计量仪器的导线接在一起,瓶中放入冰水混合液,由于冰水保持热平衡,因此,基准节点就保持在冰点处。

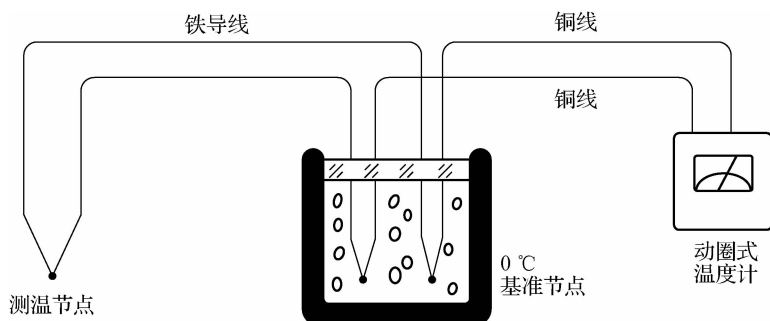


图 2-19 冰点式基准节点

冰点式基准节点要用洁净的饮用水,瓶中要保持水与冰处于良好的平衡状态。长时间使用时热电偶周围的冰就会熔化,若水少则冰中出现空隙,在节点周围会有空气侵入,这时就不是冰点状态;若水多则冰就会漂浮在水上,则节点就会置于水中,这时也不是冰点状态。因此,重要的是要经常检查,随时补充水。为了避免插入深度不同引起的误差,热电偶浸入冰水的长度要足够长。冰点式基准节点常用于实验室温度测量及温度计校准等要求精度较高的场合。

(2)电子冷却式基准节点。它是利用珀尔帖效应(热电制冷现象)的热电半导体元件使密闭的水槽冷却,当槽中水变为冰时,利用其体积变化进行温度调节,这样,使基准节点保持在冰点状态。

(3)恒温槽式基准节点。它是用温度调节器将基准节点的温度调整为恒定温度,这时,须用温度计测量基准节点的温度,对基准节点的温度进行补偿。

(4)补偿式基准节点。如图 2-20 所示,这是在测量仪器的一部分测量电路中,采用温度系数较大的基准节点补偿电阻  $R_c$ ,将基准节点的温度变化引起的电压变化加到热电偶的热电势中对其进行补偿的方式,其工作电源采用电池或稳压二极管构成的稳压电源。

(5)室温式基准节点。这种情况下不特意设置基准节点装置,一般须另置温度计以测量基准节点的温度,对基准节点的温度进行补偿。

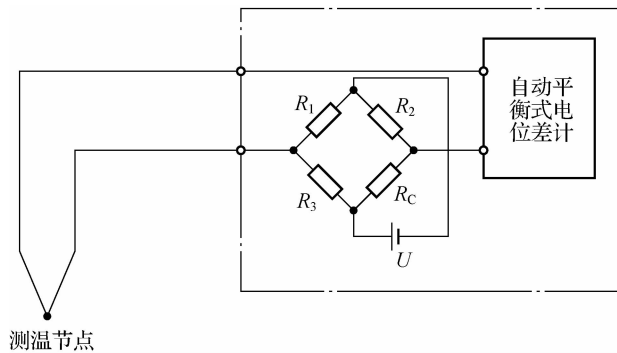


图 2-20 补偿式基准节点

## 2. 对基准节点温度进行补偿

理想基准节点的温度应保持恒定,但工业用的基准节点的温度保持恒定非常困难,这时就需要对测量值进行补偿。

对于基准节点温度校正为  $0^{\circ}\text{C}$  的热电偶温度计,若使用时其基准节点温度为  $t_0(^{\circ}\text{C})$ ,测温节点温度为  $t(^{\circ}\text{C})$ ,则可采用以下三种方法求出:

(1)若测量的热电势为  $E(t, t_0)(\text{mV})$ ,基准节点的温度为  $0^{\circ}\text{C}$ ,测温节点的温度为  $t(^{\circ}\text{C})$  及  $t_0(^{\circ}\text{C})$  时,各自热电势为  $E_t(\text{mV})$  及  $E_0(\text{mV})$ ,则测温节点的温度  $t(^{\circ}\text{C})$  对应于下式中  $E_t(\text{mV})$  的温度。

$$E_t = E(t, t_0) + E_0$$

(2)动圈式计量仪器用温度进行刻度时,通过指针调节装置进行调节,使其端子短接时的指示值为基准节点温度  $t_0(^{\circ}\text{C})$ 。若基准节点的温度变化,则用这种方法得到与(1)同样的结果。

(3)若热电偶的热电势特性曲线为线性,基准节点温度为  $t_r$ ,则测温节点的温度  $t(^{\circ}\text{C})$  为

$$t = t_r + t_0$$

## 3. 用补偿导线进行补偿

当测温节点与基准节点之间距离相当长时,要用高价热电偶,如 B、R 和 S 型热电偶,但接线也非常难,电阻显著增大。因此,热电偶端子与基准节点间可用其他廉价热电偶代替,这时就要用导线连接,称为补偿导线。

补偿导线随使用的热电偶及其构成材料是不同的,它要与各自对应的热电偶组合使用。使用时热电偶的“+”端要接补偿导线的“+”侧芯线,热电偶的“-”端要接补偿导线的“-”侧芯线,如图 2-21 所示。

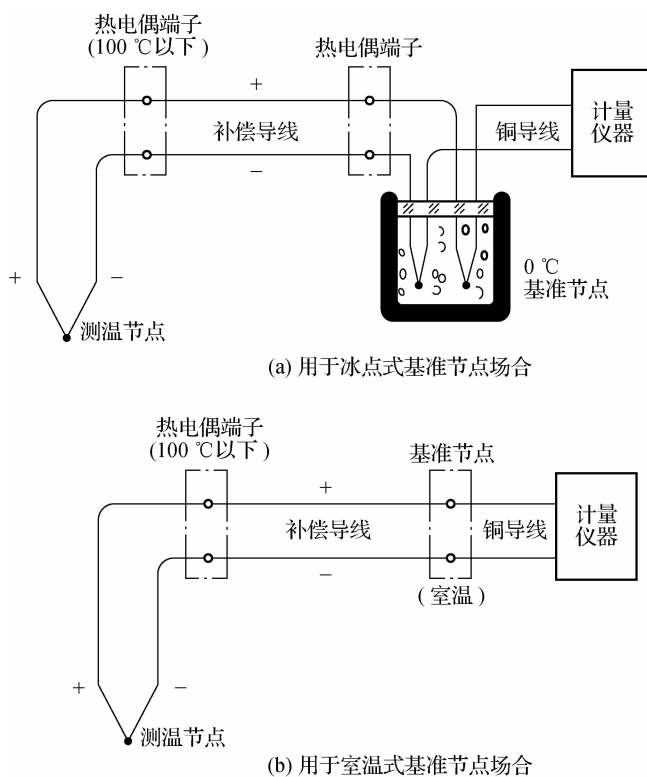


图 2-21 接有补偿导线的测量电路

### 五、热电偶传感器的使用

热电偶是两种不同的导体连接在一起形成的,当测量及参考节点分别处于不同温度上时即产生出所谓的热电势。在常规工业应用中,热电偶元件一般端接在接头上;但参考节点却很少位于接头上,而是利用适当的热电偶延伸线来转接到温度比较稳定的被控环境中。

选择热电偶时要考虑被测温度范围、所需响应时间、节点类型、热电偶或护套材料的抗化学腐蚀能力、抗磨损或抗振动能力、安装及限制要求等因素。

#### 思考与练习

问题 1 用 K 型热电偶测量炉温,冷端为 20 °C,仪表测得当时热电势为 40.557 mV,则炉温为多少?

思考: .....

.....

.....

.....

.....

问题 2 用镍铬-镍硅热电偶测炉温,冷端为  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,测得热电动势为  $39.17\text{ mV}$ ,若用冷端为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  测量该炉温,则测得的热电动势为多少?

思考: .....

.....

.....

.....

.....

## 课堂体验

### 基本内容

思考应用热电偶测量温度,所产生的热电动势的大小量级,测量信号是否需要连接放大电路? 经过放大并采集得到的信号,是否可以使用电压表或者示波器显示测量结果?

### 拓展知识

通过采集卡或 NI ELVIS 平台得到的信号,同样可以利用 LabVIEW 软件自己动手设计测温监控程序。

当然,也可以通过 LabVIEW 软件的打包功能生成可执行程序,然后在计算机上执行安装程序以实现相应的功能,具体操作可参考以下步骤:

(1)如图 2-22 所示,在计算机中安装好 NextPAD,打开桌面快捷键,在 NextPAD 中选择 Setting 功能。

(2)在 Setting 界面中,单击“加载”按钮,到相应位置中找到“Lect-1302.nex”文件,确认选择该文件,程序会自动加载 1302 的 APP 文件,如图 2-23 所示。



图 2-22 NextPAD 设定界面



图 2-23 LECT-1302 实验面板

(3)设置好后,在 NextPAD 面板上可看到 1302 按钮,双击进入实验面板,选择温度测量,选择热电偶,测量得到热电动势。同时采集铂电阻测量得到的冷端温度,运用中间温度定律进行温度补偿,完成热端温度测量的实验内容。

## 学习单元三 集成温度传感器

集成温度传感器是利用晶体管 PN 结的正向压降随温度升高而降低的特性,将晶体管的 PN 结作为感温元件,把敏感元件、放大电路和补偿电路等部分集成并封装在同一壳体里的一种一体化温度检测元件,又称温度 IC。它与半导体热敏电阻一样具有体积小、反应快的优点,同时具有线性好、性能高、价格低、抗干扰能力强等特点。虽然由于 PN 结耐热性能和特性范围的限制,只能用来测量  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下的温度,但集成温度传感器仍在许多领域得到了广泛的应用。本学习单元主要介绍集成温度传感器的基本工作原理和应用方法。

### 一、半导体管温度传感器

半导体二极管温度传感器由 PN 结构成,根据 PN 结的伏安特性可以导出 PN 结正向压降随温度变化的关系为温度升高,PN 结正向压降就下降,如图 2-24 所示。利用二极管的这一特性,就可以进行温度的测量。

除扩散电流外,半导体二极管的正向电流中还包含空间电荷区的复合电流和表面复合电流成分,这两种复合电流成分将使得半导体二极管的实际特性曲线偏离理想曲线,线性误差较大。而半导体三极管在正向工作状态下的温度特性更理想,具有良好的线性度。当集电极电流为恒定电流时,发射结压降  $V_{be}$  与温度  $T$  成线性关系,可以根据这个关系通过发射结压降来测量温度。

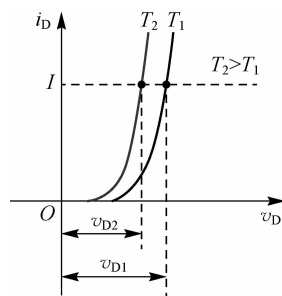


图 2-24 二极管的温度特性

### 二、集成温度传感器的工作原理与应用

三极管由于仅有一个发射结电压  $V_{be}$ ,因此其具有的线性度和一致性不太理想。在集成温度传感器中,可以采用一对非常匹配的半导体管做差分对管,利用它们的发射结电压  $V_{be}$  之差所具有的良好正温度系数来制作集成温度传感器。在较宽的温度范围内可以做到发射结电压  $V_{be}$  之差就是温度  $T$  的理想线性函数,这也是集成温度传感器的基本工作原理,并以此为基础设计出各种不同电路和不同输出类型的集成温度传感器。

集成温度传感器内将温敏晶体管与相应的辅助电路集成在同一芯片上,能直接给出正比于绝对温度的理想线性输出,一般用于  $-50\sim+120\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度测量。集成温度传感器按照输出方式有电压型和电流型两种,其中电流输出型集成温度传感器在一定温度下相当于一个恒流源,因此不易受接触电阻、引线电阻、电压噪声的干扰,具有很好的线性特性。

下面以电流输出型集成温度传感器 AD590 为例介绍其工作原理与应用,同时简单介绍电压输出型集成温度传感器 LM35 和智能温度控制器 DS18B20 的应用。

#### 1. 电流输出型集成温度传感器 AD590

AD590 是美国 Analog Devices 公司生产的电流型集成温度传感器,其采用 TO-52 金属圆壳封装结构,其外形、引脚排列和电路符号如图 2-25 所示。



图 2-25 AD590 的外形、引脚排列和电路符号

AD590 的主要特性如下：

(1) 流过器件的电流( $\mu\text{A}$ )在数值上等于器件所处环境的热力学温度,即

$$I_r/T=1$$

式中, $I_r$  为流过器件(AD590)的电流, $\mu\text{A}$ ;  $T$  为热力学温度,K。

(2) AD590 的测温范围为 $-55\sim+150\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(3) AD590 的电源电压为 $4\sim30\text{ V}$ ,可以承受 $44\text{ V}$ 正向电压和 $20\text{ V}$ 反向电压,因而器件即使反接也不会被损坏。

(4) 输出电阻为 $710\text{ m}\Omega$ 。

(5) 精度高,在 $-55\sim+150\text{ }^\circ\text{C}$ ,其非线性误差仅为 $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。

利用 AD590 可以构建测量热力学温度的基本应用电路,如图 2-26 所示。由于流过 AD590 的电流与热力学温度成正比,当电阻  $R_1$  和电位器  $R_2$  的电阻之和为  $1\text{ k}\Omega$  时,输出电压  $V_o$ 。随温度的变化率为  $1\text{ mV/K}$ ;但由于 AD590 的增益有偏差,电阻也有误差,因此应对电路进行调整。调整的方法为:把 AD590 放于冰水混合物中,调整电位器  $R_2$ ,使  $V_o = 273.2\text{ mV}$ ;或在室温( $25\text{ }^\circ\text{C}$ )条件下调整电位器,使  $V_o = (273.2 + 25)\text{ mV} = 298.2\text{ mV}$ 。但这样调整只能保证其在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  或  $25\text{ }^\circ\text{C}$  附近有较高精度。由于电阻的阻值随温度变化存在误差,因此也可以把电阻设为电位器,根据温度变化随时进行零点调整,保证测量结果的准确性。

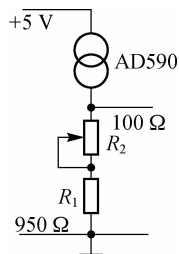


图 2-26 AD590 的基本应用电路

## 2. 电压输出型集成温度传感器 LM35

LM35 是电压输出型集成温度传感器,它具有很高的工作精度和较宽的线性工作范围,该器件输出电压与摄氏温度线性成比例。因而,从使用角度来说,LM35 与用开尔文标准的线性温度传感器相比更有优越之处。LM35 无须外部校准或微调,可以提供 $\pm 1/4\text{ }^\circ\text{C}$ 的常用室温精度。它从电源吸收的电流很小且几乎不变,所以芯片自身几乎没有散热的问题。LM35 有多种封装形式,包括密封 TO-46、塑料 TO-92、贴片 SO-8 和 TO-220 等,如图 2-27 所示。

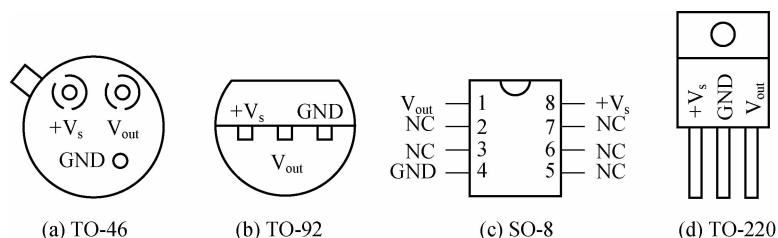


图 2-27 LM35 的封装形式

LM35 系列集成温度传感器的特性如下:

- (1) 使用温度为  $-55 \sim +150$   $^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 工作电压为直流  $4 \sim 30$  V。
- (3) 输出阻抗小,  $1$  mA 负载时为  $0.1$   $\Omega$ 。
- (4) 非线性值仅为  $\pm 1/4$   $^{\circ}\text{C}$ 。
- (5) 精度为  $0.5$   $^{\circ}\text{C}$  (在  $+25$   $^{\circ}\text{C}$  时)。
- (6) 静止空气中自热效应低, 小于  $0.08$   $^{\circ}\text{C}$  的自热。

### 3. 智能温度控制器 DS18B20

DALLAS 半导体公司生产的 DS18B20 型单线智能温度传感器, 属于新一代适配微处理器的智能温度传感器, 可直接将被测温度转化为串行数字信号供微机处理, 广泛用于工业、民用、军事等领域的温度测量及控制仪器、测控系统和大型设备中。

(1) DS18B20 的特性。

① 采用单总线专用技术, 被测温度用符号扩展的 16 位数字量串行输出, 无须经过其他变换电路。

② 测温范围为  $-55 \sim +125$   $^{\circ}\text{C}$ , 在  $-10 \sim +85$   $^{\circ}\text{C}$ , 精度为  $\pm 0.5$   $^{\circ}\text{C}$ 。

③ 内含 64 位经过激光修正的 ROM。

④ 适配各种单片机或系统机。

⑤ 用户可分别设定各路温度的上、下限。

⑥ 其工作电源既可在远端引入, 也可采用寄生电源方式产生。

以上特点使 DS18B20 非常适用于远距离多点温度检测系统。

(2) DS18B20 的内部结构和封装形式。DS18B20 内部结构如图 2-28 所示, 主要由四部分组成: 64 位光刻 ROM、温度传感器、高速暂存器和高低温触发器 TH 和 TL、配置寄存器。DS18B20 具有 3 引脚 TO-92 小体积和贴片封装形式, 其引脚排列如图 2-29 所示。DQ 为数字信号输入/输出端; GND 为接地端;  $V_{\text{DD}}$  为外接供电电源输入端 (在寄生电源接线方式时接地)。

(3) 使用 DS18B20 的注意事项。DS18B20 虽然具有测温系统简单、测温精度高、连接方便、占用口线少等优点, 但在实际应用中也应注意以下几方面的问题。

① 较小的硬件开销需要相对复杂的软件进行补偿。由于 DS18B20 与微处理器间采用串行数据传送, 因此在对 DS18B20 进行读写编程时, 必须严格保证读写时序, 否则将无法读取测温结果。在使用 PL/M、C 等高级语言进行系统程序设计时, 对 DS18B20 操作部分最好采用汇编语言实现。

② 在单总线上所挂 DS18B20 超过 8 个, 就需要解决微处理器的总线驱动问题, 这一点在进行多点测温系统设计时要加以注意。

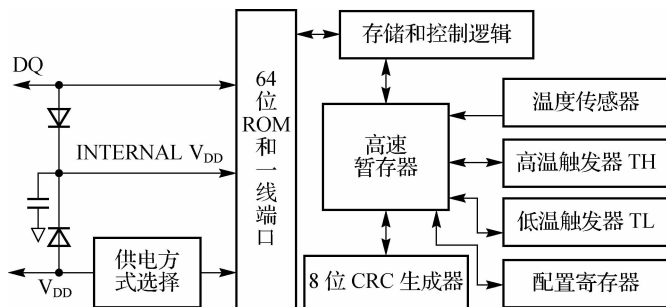


图 2-28 DS18B20 内部结构

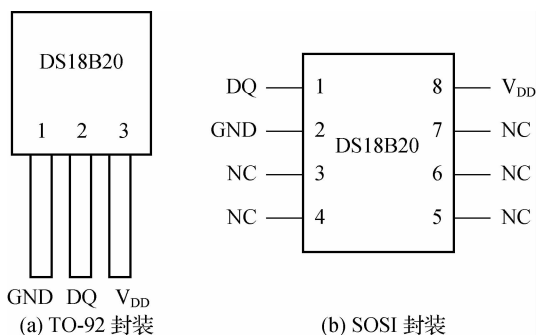


图 2-29 DS18B20 的引脚排列

③连接 DS18B20 的总线电缆是有长度限制的。普通信号电缆的传输长度不超过 50 m。当将总线电缆改为双绞线带屏蔽电缆时,正常通信距离可达 150 m。因此,在用 DS18B20 进行长距离测温系统设计时,要充分考虑总线分布电容和阻抗匹配问题。测温电缆线建议采用屏蔽 4 芯双绞线,其中一组接地线与信号线,另一组接  $V_{DD}$  和地线,屏蔽层在源端单点接地。

### 思考与练习

问题 请说明 AD590 的工作原理。

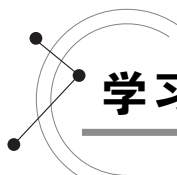
思考:

.....

.....

.....

.....



## 学习单元四 温度传感器应用实例

温度传感器的应用范围十分广泛,在家用空调、冰箱、冰柜、热水器、汽车发动机控制系统里都有使用。除了前面学习的热电阻、热敏电阻、热电偶、集成温度传感器外,测量温度的



器件还有双金属温度传感器、红外线温度传感器、光纤温度传感器等。本学习单元重点针对双金属温度传感器、热敏电阻和集成温度传感器进行介绍。

### 一、双金属温度传感器的应用

#### 1. 双金属温度传感器在室温测量中的应用

双金属温度传感器(双金属温度计)结构简单、价格便宜、刻度清晰、使用方便、耐振动,常用于驾驶室、船舱、粮仓等室内温度测量。图 2-30 所示为盘形双金属温度计。

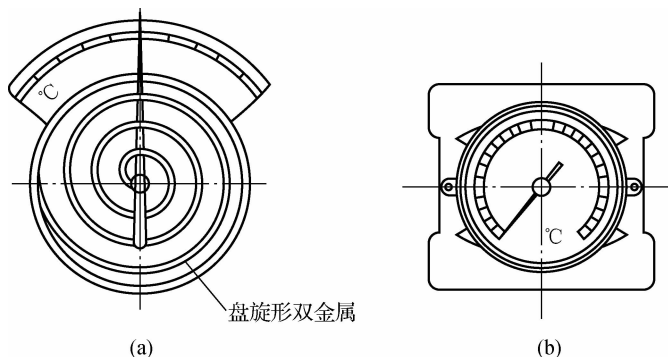


图 2-30 盘形双金属温度计

#### 2. 双金属温度传感器在电冰箱中的应用

电冰箱压缩机温度保护继电器内部的感温元件是一片碟形的双金属片,如图 2-31 所示。

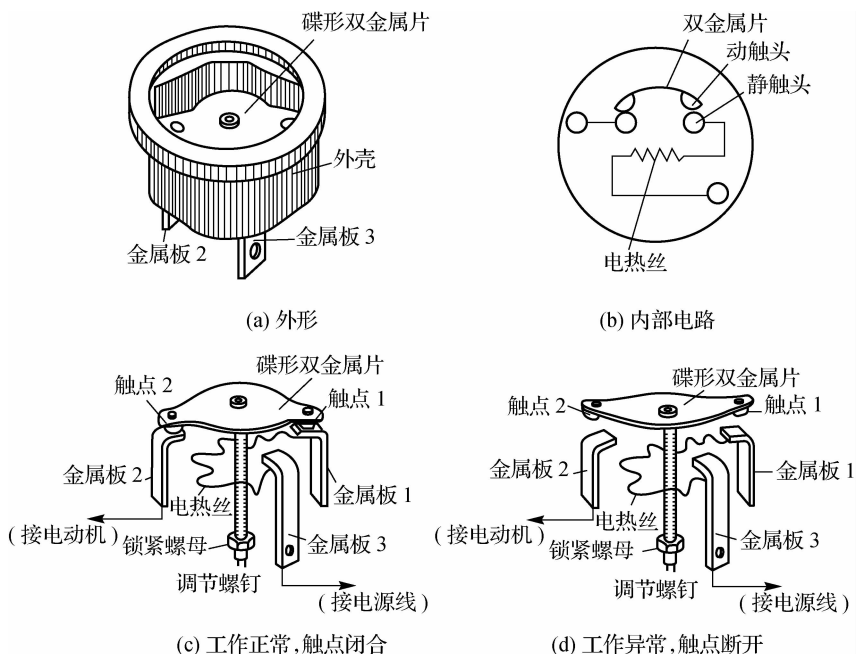


图 2-31 电冰箱中的碟形双金属温度传感器

在双金属片上固定着两个动触头(常闭触点),在碟形双金属片的下面安放一根电热丝,该电热丝与这两个常闭触点串联连接。压缩机电机中的电流过大时,这一大电流流过电热丝后,使它很快发热,放出的热量使碟形双金属片温度迅速升高到它的动作温度,碟形双金属片翻转,带动常闭触点断开,切断压缩机电机的电源,保护全封闭式压缩机不致损坏。

## 二、热敏电阻温度传感器的应用

图 2-32 所示为汽车水箱测温电路。其中,  $R_t$  为负温度系数热敏电阻,不同温度时  $R_t$  的阻值不同;用于温度显示的表头为电磁式表头。由于汽车水箱水温测量范围小,要求精度不高,因此电路相对简单。

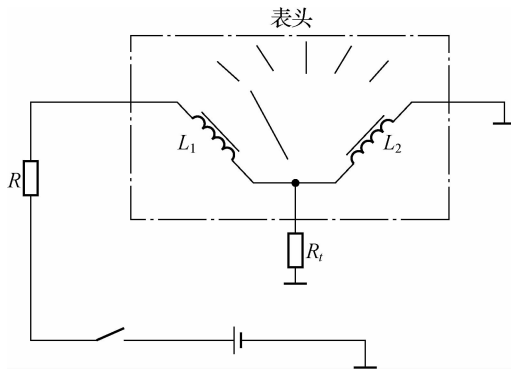


图 2-32 汽车水箱测温电路

## 三、集成温度传感器的应用

LM35 系列集成温度传感器的应用电路介绍如下:

(1)基本使用电路。单电源供电时,通过在输出端  $V_{out}$  接一个电阻,在 GND 引脚对地之间串接两个二极管,电路如图 2-33(a)所示。图中,电阻为  $18\text{ k}\Omega$  的普通电阻,  $VD_1$ 、 $VD_2$  为 1N4148,  $+V_o$  为与温度相应的输出电压。在双电源供电情况下,在输出端与负电源接一个电阻,就可以得到全量程的温度范围,电路如图 2-33(b)所示。  $R_1$  的阻值为

$$R_1 = V_s / (50\ \mu\text{A})$$

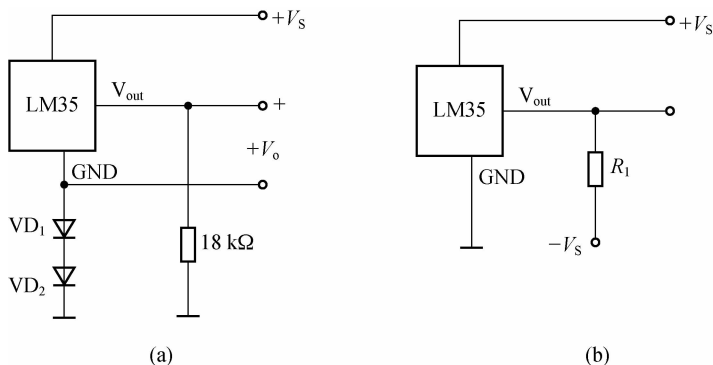


图 2-33 采用 LM35 构成的单电源温度传感器电路

(2)温度/频率转换电路。采用温度传感器 LM35D 的温度/频率转换电路如图 2-34 所示。

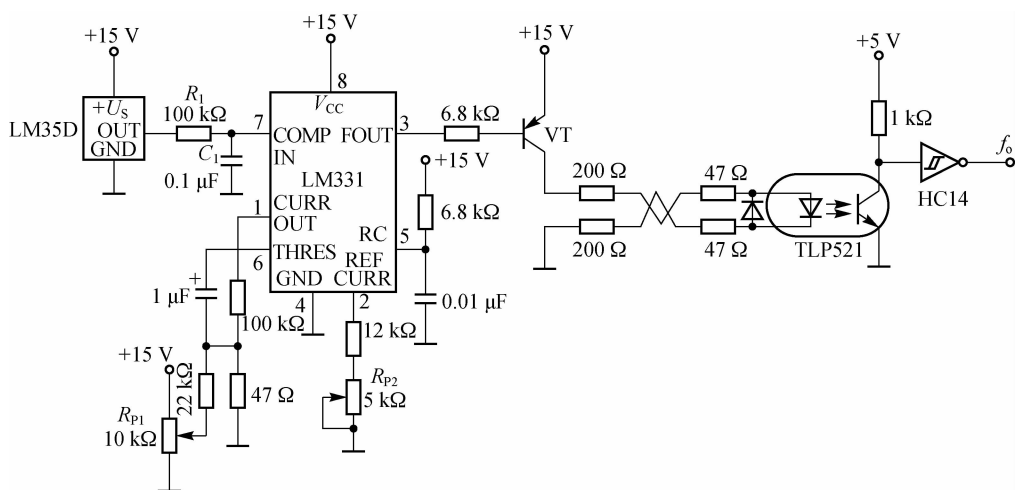


图 2-34 采用温度传感器 LM35D 的温度/频率转换电路

它将  $20\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度转换为  $200\sim 1\ 500\text{ Hz}$  的 TTL 电平输出频率信号,其测量温度范围为  $-55\sim +150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,灵敏度为  $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

### 思考与练习

问题 常用的温度传感器有哪些? 试比较它们的异同。

思考: .....

.....

.....

.....

.....

.....

### 课堂体验

#### 基本内容

上网查询资料,除了本书中介绍的 AD590 和 LM35 外,还有哪些常用的集成温度传感器?

#### 拓展知识

数字显示温度控制器(见图 2-35)是一种用于测量各种液体、气体及蒸气的温度并将温度信号转换成电信号,进行自动控制与安全保护的仪表。它采用了低功耗、高精度热电阻型传感器;电路结构采用了高性能单片机和数字显示技术,以及开关输入的人机界面。它具有量程宽、抗干扰能力强、密封性能好等特点。一般配有高亮数码显示器;控制限 A、B 的控制类型组合可选(双上限型、上下限型、双下限型);控制限可方便地在全量程范围内任意设定。温度值及设定参数全数字显示,无须配置二次仪表就可实现自动测量和控制。数字显示温度控制器能够把测温传感器反馈给仪表的实时温度值与控制器的预置设定控制值进行逻辑

比较、运算和输出控制,以达到稳定控制设定温度的工控目的。配上不同材料的测温传感器,可以广泛应用于冶金、制冷、化工、医疗等行业。



图 2-35 数字显示温度控制器

# 模块三 力敏传感器

## 模块导读

随着计算机控制、通信、网络等技术的发展,信息交换沟通的领域正在迅速覆盖从工厂的现场设备层到控制、管理各个层次。集控数据处理平台业已成熟,网络数据采集传感器在国内尚处萌芽。在力敏传感器的基础上进行技术拓展,提升其信息化水平,形成具有数字化、无线化、智能化和网络化功能的新型智能化网络力敏传感器。

力敏传感器的种类很多,有直接将力变换为电量的如压电式、压阻式等,有经弹性敏感元件转换后转换成电量的如电阻式、电容式和电感式等。它主要用于两个方面:测力和称重。本模块介绍以下几种传感器:①电阻应变式传感器;②压阻式传感器;③压电式传感器;④电容式传感器。针对常见的力敏传感器进行教学,使学生能够掌握利用力敏传感器进行测量的各种方法。

力是物理基本量之一,因此测量各种动态、静态的力是十分重要的。

力敏传感器是能对各种力或者能转化为力的物理量产生反应,并能将其转变为电参数的装置或元件。很显然,要成为真正实用意义上的力敏传感器,这个由力转化为电参数的过程最好是成线性关系。常见的力敏传感器如图 3-1~图 3-3 所示。



图 3-1 电阻应变式传感器



图 3-2 硅压阻式传感器



图 3-3 压电式传感器

## 学习单元一 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器是利用应变效应原理制成的一种测量微小机械变化量的理想传感器。它具有悠久的历史,但新型应变片仍在不断出现,目前仍广泛用于测量力、力矩、加速度、重量等物理量。电阻应变式传感器由弹性敏感元件、电阻应变计、补偿电阻和外壳组成,可根据具体测量要求设计成多种结构形式。弹性敏感元件受到所测量的力而产生变形,并使附着其上的电阻应变计一起变形。电阻应变计将变形转换为电阻值的变化,从而可以测量力、扭矩、位移、加速度和温度等多种物理量。

### 一、电阻应变效应

导体或半导体材料在受到外界力(拉力或压力)的作用下发生机械变形,机械变形会导致其电阻值变化,这种现象称为应变效应,如图 3-4 所示。

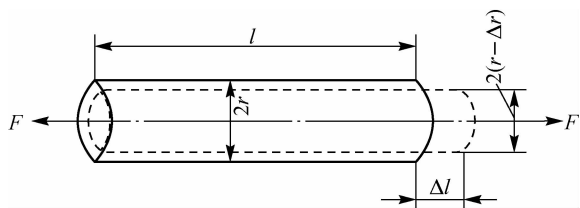


图 3-4 金属电阻丝的应变效应

设有一根长度为  $l$ ,横截面积为  $S$ ,电阻率为  $\rho$  的金属丝,在未受力时,其原始电阻值为

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

设电阻丝在外力  $F$  的作用下被拉伸(或压缩),则其  $\rho$ 、 $l$ 、 $S$  均发生变化,变化量分别为  $d\rho$ 、 $dl$ 、 $dS$ ,电阻值相应变化为  $dR$ ,则有

$$\begin{aligned} dR &= \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial S} dS + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \\ &= \frac{\rho}{S} dl - \frac{\rho l}{S^2} dS + \frac{l}{S} d\rho \end{aligned} \quad (3-2)$$

用相对变化量来表示,则有

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

假设电阻丝的半径为  $r$ ,电阻丝的横截面积为  $S = \pi r^2$ ,则有  $dS = 2\pi r dr$ ,所以  $dS/S = 2dr/r$ 。令电阻丝轴向(纵向)应变为  $\epsilon = dl/l$ ,横向应变为  $dr/r$ ,由材料力学泊松定律可知

$$\frac{dr}{r} = -\mu \left( \frac{dl}{l} \right) = -\epsilon \mu$$

式中, $\mu$  为泊松比。

整理得

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3-4)$$

用增量表示则有

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= (1 + 2\mu)\epsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \\ &= \left(1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon}\right)\epsilon \end{aligned} \quad (3-5)$$

设  $k_0 = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon}$ , 其中  $k_0$  为电阻丝的灵敏系数, 即单位应变所引起的电阻的相对变化。通常把单位应变能引起的电阻值变化称为电阻丝的灵敏系数, 其物理意义是单位应变所引起的电阻相对变化量。

由  $k_0 = 1 + 2\mu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon}$  可知, 电阻丝的灵敏系数受两个因素的影响: 一个是应变片受力后材料几何尺寸的变化, 即  $1 + 2\mu$ , 对某种材料来说, 它是一个常数; 另一个是  $\frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon}$ , 它是由电阻丝电阻率的改变而引起的。

(1) 对于金属材料,  $\frac{\Delta\rho/\rho}{\epsilon}$  是常数, 并且比  $1 + 2\mu$  小很多, 往往可以忽略不计, 故  $k_0 \approx 1 + 2\mu$ 。

(2) 对于半导体材料,  $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$  的值比  $1 + 2\mu$  大得多, 电阻丝的灵敏系数主要由电阻率相对变化所决定。

(3) 大量实验也表明, 在金属电阻丝拉伸比例极限内, 电阻相对变化与轴向应变成正比。通常, 金属丝的灵敏系数  $k_0$  为 2 左右, 不超过 4~5, 半导体应变片的灵敏系数为 100~200。

半导体应变片的灵敏系数比金属电阻丝式应变片高几十倍, 但半导体材料的温度系数大, 应变时非线性比较严重, 使它的应用范围受到一定的限制。

## 二、电阻应变片的结构和特性

### 1. 应变片的分类与结构

应变片可分为金属式和半导体式两大类。金属式又分为丝式、箔式和薄膜式, 而半导体式也可分为薄膜式和扩散式。

应变片根据基底材料不同又可分为纸基、胶基和金属片基等。

各种电阻应变片的结构大致相同, 如图 3-5 所示。其中, 敏感栅是应变片中把应变量转换成电阻变化量的敏感部分, 它是用金属丝或半导体材料制成的单丝或栅状体。引线是从敏感栅引出电信号的丝状或带状导线。

(1) 黏结剂。黏结剂是具有一定电绝缘性能的黏结材料, 用它将敏感栅固定在基底上。

(2) 覆盖层。覆盖层是用来保护敏感栅而覆盖在上面的绝缘层。

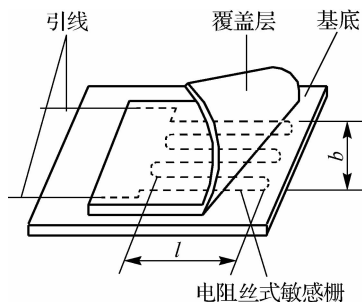


图 3-5 应变片的结构

(3)基底。基底用以保护敏感栅,并固定引线的几何形状和相对位置。用应变片测量应变或应力时,将应变片粘贴到被测对象的表面上。在外力作用下,被测对象产生微小机械变形,应变片的敏感元件敏感栅随着发生相同的变化,同时应变片电阻值也发生相应变化。通过测量转化电路转化为有对应关系的电压或者电流的变化,根据应力 $\sigma$ 与应变值 $\epsilon$ 的关系,得到应力 $\sigma$ 为

$$\sigma = E\epsilon \quad (3-6)$$

式中, $E$ 为材料的弹性模量,Pa; $\sigma$ 为测量的应力,Pa; $\epsilon$ 为应变值。

## 2. 应变片的类型和材料

根据敏感栅的形状,金属电阻应变片分为丝式、箔式和薄膜式三种,其中前两种均须用黏结剂安装在被测试件上,属于粘贴式应变片。

### 1) 金属丝式应变片

敏感栅是应变片的核心部分,它是应变片中将应变量转换成电阻变化量的电阻体,由线径为0.012~0.05 mm的金属电阻丝绕成。它粘贴在绝缘的基片上,通过引线与测量电路相连,表面上有一层起保护作用的覆盖层。对电阻丝(敏感栅)材料应有如下要求:

- (1)灵敏系数大,且在相当大的应变范围内保持常数。
- (2) $\rho$ 值大,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,否则因环境温度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小。
- (5)机械强度高,具有优良的机械加工性能。

常用材料为康铜、镍铬铝合金、铁铬铝合金及铂、铂钨合金等。

### 2) 金属箔式应变片

金属箔式应变片(见图3-6)是利用照相制版或光刻技术将厚度为0.003~0.01 mm的金属箔片制成所需图形的敏感栅,也称为应变花。其优点是:①可制成多种复杂形状和尺寸准确的敏感栅,栅长可做到0.2 mm,以适应不同的测量要求;②与被测件粘贴结面积大;③散热条件好,允许通过的电流大,提高了输出灵敏度;④横向效应小;⑤蠕变和机械滞后小,疲劳寿命长。其主要缺点是电阻值的分散性比金属丝的大,有的相差几十欧姆,须做阻值调整。在常温下,金属箔式应变片已逐步取代了金属丝式应变片。

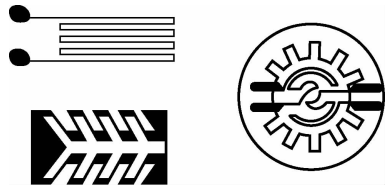


图 3-6 金属箔式应变片

### 3) 金属薄膜式应变片

金属薄膜式应变片是薄膜技术发展的产物。它采用真空蒸发或真空沉积等方法在薄的绝缘基片上形成厚度在0.1  $\mu\text{m}$ 以下的金属电阻材料薄膜的敏感栅,最后加上保护层。

它的优点是应变灵敏系数大,允许电流密度大,工作范围广,可达 $-197 \sim +317$   $^{\circ}\text{C}$ ,易实现工业化生产;缺点是难于控制电阻与温度和时间的变化关系。

## 三、电阻应变片的测量电路及温度补偿

### (一) 测量电路

应变片把机械应变转化为有对应关系的电阻变化后,需要将电阻的变化转换为电压或电流的变化。由于应变量非常小,通常采用测量电桥,将微小的电阻变化转化为电压或电流



的变化。根据电源的不同,可将电桥分为直流电桥和交流电桥。

电桥的一般形式如图 3-7 所示,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为电桥的顶点,  $E$  是直流电源,它以应变片或电阻元件作为桥臂。可取  $R_1$  为应变片,  $R_1$ 、 $R_2$  为应变片或  $R_1 \sim R_4$  均为应变片等几种形式。在其余桥臂中接入电阻温度系数很小的精密无感固定电阻。顶点  $A$ 、 $C$  和  $B$ 、 $D$  分别称为电桥的输入端和输出端。

下面推导输入端加有一定电压时,电桥输出电压的表达式。

先讨论输出端开路的情况。电桥的输出总是接到放大器的输入端,而放大器的输入阻抗一般很大,以致可近似认为电桥的输出端是开路的。在电桥设计中,这种电桥称为电压桥。这样,问题就变为求  $B$ 、 $D$  两点间的电位差。

如图 3-7 所示,设输入电压  $E$  恒定。因为  $B$ 、 $D$  间开路,所以电流为

$$I_{1,2} = \frac{E}{R_1 + R_2}, I_{3,4} = \frac{E}{R_3 + R_4} \quad (3-7)$$

电阻  $R_1$  和  $R_3$  上的电压降分别为

$$U_{AB} = \frac{ER_1}{R_1 + R_2}, U_{AD} = \frac{ER_3}{R_3 + R_4} \quad (3-8)$$

$U_{AB}$  为  $A$  点与  $B$  点之间的电压,  $U_{AD}$  为  $A$  点与  $D$  点之间的电压,即

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

$$U_{AD} = U_A - U_D$$

将两式相减,可得  $D$ 、 $B$  两点间的电位差,即电桥的输出电压为

$$U_D - U_B = U_{AB} - U_{AD} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) E \quad (3-9)$$

记为

$$U = \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \quad (3-10)$$

当  $U=0$  时,表示电桥处于平衡状态,可知

$$R_1 R_4 = R_2 R_3 \text{ 或 } R_1 / R_2 = R_3 / R_4 \quad (3-11)$$

应变片测量电桥在工作前应使电桥平衡,即预调平衡,其相邻两桥臂电阻的比值应相等,或相对两桥臂电阻的乘积应相等,使工作时电桥输出电压只与应变计感受应变所引起的电阻变化有关。

(1)单臂工作。只将应变片接入电桥一臂,电桥原来处于平衡状态,  $R_1$  为工作应变片,  $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$  固定不变,当受力时,  $R_1$  变化为  $R_1 + \Delta R_1$ ,此时电桥不平衡,电桥产生电压输出。

$$\begin{aligned} U &= \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) E \\ &= \frac{\Delta R_1 R_4}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} E \\ &= \frac{\frac{\Delta R_1}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3}}{\left( 1 + \frac{\Delta R_1}{R_1} + \frac{R_2}{R_1} \right) \left( 1 + \frac{R_4}{R_3} \right)} E \end{aligned} \quad (3-12)$$

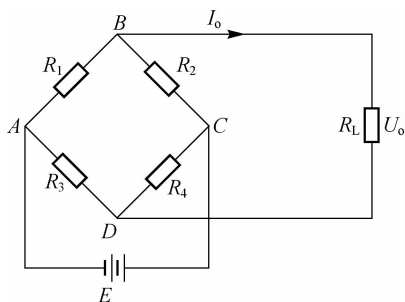


图 3-7 电桥的一般形式

设桥臂比  $n=R_2/R_1$ , 由于电桥初始平衡条件为  $R_1/R_2=R_3/R_4$ , 并且考虑到  $\Delta R_1 \ll R_1$ , 分母中的  $\Delta R_1/R_1$  非常小, 可以略去, 式(3-12)可简化为

$$U = \frac{n}{(1+n)^2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} E \quad (3-13)$$

电桥的灵敏度定义为  $k_u = \frac{U}{\Delta R_1/R_1}$ , 可得单臂应变片的电桥电压灵敏度为

$$k_u = \frac{n}{(1+n)^2} E \quad (3-14)$$

由式(3-14)可以看出, 单臂应变片的电桥电压灵敏度  $k_u$  与电桥电源电压成正比, 电源电压越高, 电桥电压灵敏度  $k_u$  越高。但是电源电压提高, 应变片的功耗也会增加, 即电源电压的提高受到应变片允许功耗的限制。电桥电压灵敏度  $k_u$  是桥臂比  $n$  的函数, 如果恰当选择桥臂比  $n$ , 可使电桥具有较高的电压灵敏度。

下面分析当电源电压  $E$  值确定后, 桥臂比  $n$  取何值时才能使电压灵敏度  $k_u$  最大。设  $dk_u/dn=0$ , 得到  $(1-n)/(1+n)^3=0$ , 所以  $n=1$  时, 即  $R_1=R_2, R_3=R_4$  时电桥的电压灵敏度  $k_u$  最大。

当  $n=1$  时, 由式(3-13)得到

$$U = \frac{E}{4} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-15)$$

$$k_u = \frac{E}{4} \quad (3-16)$$

从式(3-15)和式(3-16)可以看出, 当电源电压  $E$  和电阻相对变化量值一定时, 电桥的输出电压及其灵敏度也是定值, 且与各桥臂电阻阻值的大小无关。  $n=1$  时的电桥称为对称电桥, 实际中常采用这种电桥形式。

直流电桥的优点是高精度直流电源比较容易获得, 电桥平衡调节简单, 传感器及测量电路引线分布参数影响小。

(2)半桥工作(差动电桥)。单臂电桥电路的非线性误差与  $\Delta R_1/R_1$  成正比。对于金属丝应变片,  $\Delta R$  非常小, 非线性误差可以忽略; 对于半导体应变片, 受力产生应变时的  $\Delta R$  很大, 非线性误差不可忽略。为了减小和克服非线性误差, 常采用半桥电路(差动电桥), 即在试件上安装两个工作应变片, 一个受力产生拉应变, 另一个受力产生压应变, 则这两只应变片的电阻变化相等、大小相反。将这两只应变片接入电桥相邻桥臂, 称为半桥差动电路, 如图 3-8(a)所示。

可得差动电桥的输出电压为

$$U = \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) E \quad (3-17)$$

设初始条件为  $R_1=R_2=R_3=R_4=R, \Delta R_1=\Delta R_2=\Delta R$ , 带入式(3-17)可得

$$U = \frac{E}{2} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-18)$$

此时电路输出电压  $U$  与  $\Delta R/R$  成线性关系, 无非线性误差, 电压灵敏度是单臂工作时的 2 倍。此外, 电路还具有温度补偿作用。

(3)全桥工作。若将电桥四臂均接入应变片, 如图 3-8(b)所示, 即两个受拉应变、两个受压应变, 将两个应变符号相反的应变片接入相邻桥臂上, 两个应变符号相同的应变片接入相对桥臂上, 就构成全桥差动电路。与半桥差动电路同理, 可得全桥差动电路的输出电压为

$$U = E \frac{\Delta R_1}{R_1} \quad (3-19)$$

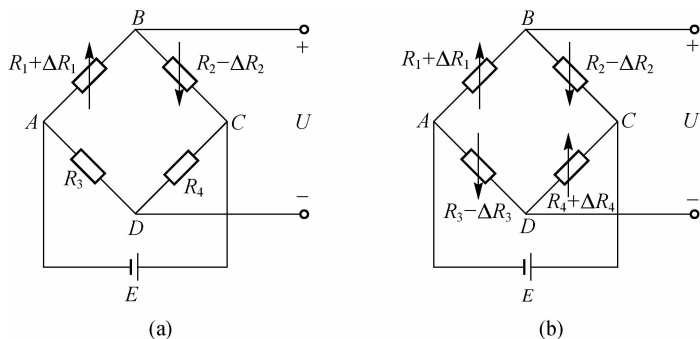


图 3-8 差动电桥

此时电路输出电压  $U$  与  $\Delta R/R$  成线性关系,无非线性误差,电压灵敏度是单臂工作时的 4 倍。

## (二) 温度误差及温度补偿

用应变片进行实际测量时,由于环境温度变化引起的电阻变化与试件应变而产生的电阻变化基本有相同的数量级,因此会产生很大的测量误差。

### 1. 温度误差

(1) 敏感栅电阻随温度变化引起的误差。设当环境温度变化  $\Delta t$  时,应变片敏感栅材料的电阻温度系数为  $a_t$ ,则引起敏感栅电阻相对变化为

$$\left(\frac{\Delta R_t}{R}\right)_1 = a_t \Delta t \quad (3-20)$$

(2) 敏感栅材料和被测量试件材料的线性膨胀系数不同引起的误差。当环境温度变化  $\Delta t$  时,由于敏感栅材料和被测量试件材料的线性膨胀系数不同,应变片将产生附加拉长或压缩,从而引起电阻相对变化为

$$\left(\frac{\Delta R_t}{R}\right)_2 = k(\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (3-21)$$

式中,  $k$  为应变片的灵敏度系数;  $\beta_g$  为试件的膨胀系数;  $\beta_s$  为应变片敏感栅材料的膨胀系数。

所以,当环境温度变化  $\Delta t$  时,应变片产生总的电阻相对变化为

$$\frac{\Delta R}{R} = a_t \Delta t + k(\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (3-22)$$

应变片粘贴在试件表面,当试件不受外力作用,环境温度变化时,应变片的温度误差用应变的形式表现出来,称为热输出  $\epsilon_t$ 。

$$\epsilon_t = \left(\frac{\Delta R}{R}\right) / k = \frac{a_t}{k} \Delta t + (\beta_g - \beta_s) \Delta t \quad (3-23)$$

### 2. 温度补偿

为使应变片的输出与温度变化无关,需要进行温度补偿。温度补偿的常用方法有应变片自补偿法和电路补偿法。

### 1) 应变片自补偿法

(1) 单丝自补偿法。为使应变片的输出与温度变化无关,须使热输出为零,  $\epsilon_t = 0$ , 即满足

$$a_t = -k(\beta_g - \beta_s) \quad (3-24)$$

对于每种材料的被测试件,其线性膨胀系数  $\beta_g$  为定值。如果适当选择应变片敏感栅的温度系数和膨胀系数,以满足式(3-24),就可以在一定的温度范围内实现自补偿,称这种敏感栅应变片为单丝自补偿应变片。

单丝自补偿应变片的优点是结构简单,应变片容易加工和制造,成本低;缺点是只能在一定的温度范围内适用于特定的试件材料。

(2) 双丝组合式自补偿法。两种不同电阻温度系数(一种为正值,一种为负值)的金属丝串接组成金属栅丝。当环境温度在一定范围内变化时,在一定材料上的试件可以实现温度补偿。通过调节两段敏感栅丝的长度来实现应变片的温度自补偿。补偿效果可以达到  $\pm 0.45 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。

### 2) 电路补偿法

电路补偿法是常用的最好的补偿方法。如图 3-9 所示,使用两个特性相同的应变片,一个为工作应变片  $R_1$ , 安装在被测试件的表面;另一个为补偿应变片  $R_B$ , 安装在与被测试件相同的补偿件上,温度与试件相同,但不承受应变,仅随温度发生变形。 $R_1$  与  $R_B$  接入电桥相邻桥臂上,当环境温度变化时,应变片和补偿应变片产生的温度误差  $\Delta R_{1t}$  与  $\Delta R_{Bt}$  相同,根据前面的电桥的理论可知,输出电压与温度变化无关。

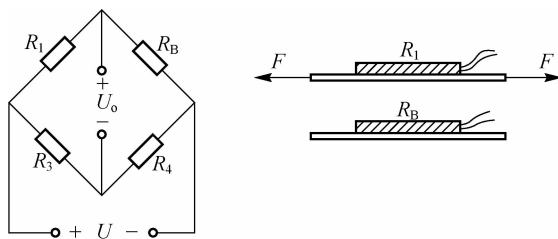


图 3-9 电路补偿法

某些情况下,根据被测试件所受的应变情况,可以无须另外使用补偿试件,而是将补偿片贴在被测试件上。图 3-10 所示为一种测量梁弯曲应变的方法。将两个应变片  $R_1$  与  $R_B$  分别贴到梁臂上下两面的对称位置,  $R_1$  与  $R_B$  特性相同,梁臂弯曲应变时,  $R_1$  与  $R_B$  变形方向相反,分别为  $R_1$  受拉应力与  $R_B$  受压应力,两个电阻变化绝对值相等但符号相反,将它们接入电桥相邻桥臂。电桥的输出电压比单片时增加一倍。当环境温度变化,梁的上下表面温度相同,  $R_1$  与  $R_B$  的阻值变化符号相同、大小相等时,电桥不产生输出,可起到温度补偿的作用。

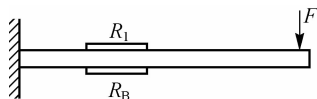


图 3-10 一种测量梁弯曲应变的方法

## 四、应变式传感器的应用

应变式传感器广泛用于测量机械、仪器及工程结构的应力、应变,还常与弹性元件配合,

用于测量力、扭矩、位移和加速度等。

### 1. 柱式力传感器

柱式力传感器的弹性元件分为空心(筒形)和实心(柱形)两种(截面积为  $S$ , 材料弹性模量为  $E$ ), 当柱体轴向受拉(压)力  $F$  作用时, 在弹性范围内, 应力  $\sigma$  与应变  $\epsilon$  成正比。

空心圆筒多用于小集中力的测量。应变片粘贴在弹性柱体外壁应力分布均匀的中间部分, 沿轴向和圆周向对称地粘贴多片应变片, 电桥接线时应尽量减小载荷偏心 and 弯矩的影响。贴片在柱面上的展开位置及其在桥路中的连接如图 3-11 所示, 其特点是  $R_1$ 、 $R_3$  串联,  $R_2$ 、 $R_4$  串联并置于相对位置的臂上, 以减少弯矩的影响。横向贴片用于温度补偿。

地磅秤一般采用柱式力传感器, 如图 3-12 所示。

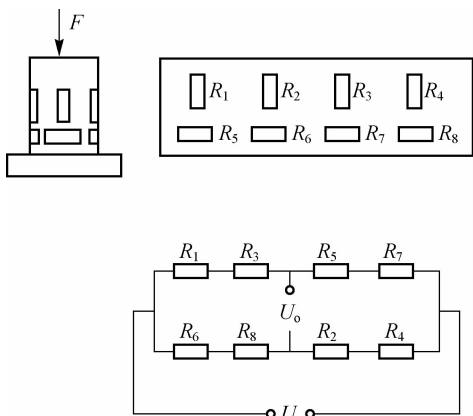


图 3-11 贴片在柱面上的展开位置及其在桥路的连接

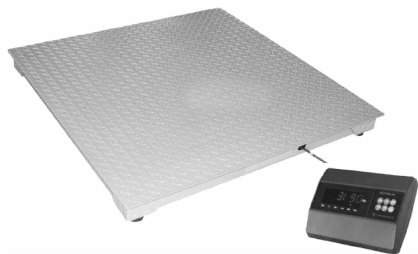


图 3-12 地磅秤

### 2. 悬臂梁式力传感器

悬臂梁式力传感器是一种精度高、性能优良的称重测力传感器, 采用弹性梁和应变片作为转换元件。当力作用在弹性元件(梁)上时, 金属与应变片一起变形, 使应变片的电阻变化。如图 3-13 所示, 弹性元件为一端固定的悬臂梁, 力作用在自由端。在距固定端较近的表面顺着梁的长度方向分别贴上  $R_1$ 、 $R_4$  和  $R_2$ 、 $R_3$  ( $R_2$ 、 $R_3$  在底部, 图中未画出) 4 个电阻应变片。若  $R_1$ 、 $R_4$  受拉力, 则  $R_2$ 、 $R_3$  将受到压力, 两者应变相等, 但极性相反。将它们组成差动全桥, 则电桥的灵敏度为单臂工作时的 4 倍。

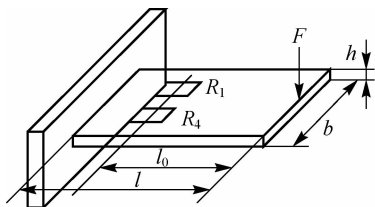


图 3-13 悬臂梁式力传感器

电子秤一般采用悬臂梁式力传感器。

### 3. 薄壁圆环式力传感器

圆环式弹性元件结构也比较简单。如图 3-14 所示,薄壁的厚度为  $h$ 。它的特点是在外力作用下,各点的应力差别较大。它采用图示贴片方式,其非线性误差可达 0.2%。测量时,上下受力方向必须在同一条直径上,而且为点接触。

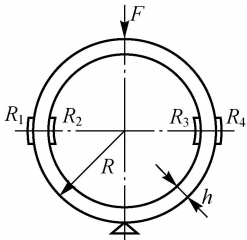


图 3-14 薄壁圆环式力传感器的结构

将应变片按  $\pm 45^\circ$  方向粘贴,8 个应变片分别粘贴在 4 个轮辐条的正反面,组成全桥。

### 4. 轮辐式力传感器

轮辐式力传感器的结构如图 3-15 所示,主要由五部分组成:轮毂、轮圈、轮辐条、受拉和受压应变片。轮辐条可以是 4 根或 8 根,呈对称形状;轮毂由顶端的钢球传递重力,圆球的压头有自动定位功能。当外力  $F$  作用在轮毂上端和轮圈下面时,矩形轮辐条产生平行四边形变形,轮辐条对角线方向产生

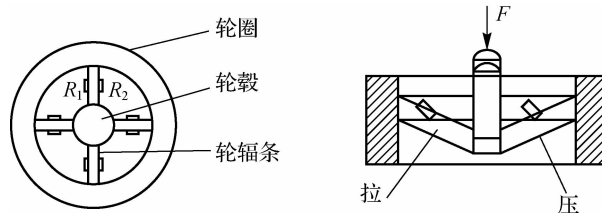


图 3-15 轮辐式力传感器的结构

## 思考与练习

问题 1 电阻应变式传感器常用的转换电路有哪些? 各有什么优缺点?

思考: .....

.....

.....

.....

.....

问题 2 电阻应变式传感器常用什么方法进行温度补偿?

思考: .....

.....

.....

.....

.....

## 学习单元二 压阻式传感器

半导体单晶硅材料在受到外力作用,产生肉眼根本察觉不到的极微小应变时,其原子结构内部的电子能级状态发生变化,从而导致其电阻率剧烈的变化,由其材料制成的电阻也就出现极大变化,这种物理效应称为压阻效应。利用压阻效应开发的传感器称为压阻式传感器。它有两种类型:一种是利用半导体材料的体电阻,其灵敏度要比金属应变片高 2 个数量级;另一种是在半导体单晶硅、锗的基底上利用半导体集成工艺中的扩散技术,将弹性敏感元件与转换元件合二为一,制成扩散硅压阻式传感器。

### 一、压阻式传感器的工作原理

由前述可知,压阻效应的数学描述可用公式表示如下:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \frac{\Delta \rho}{\rho} = \pi \sigma \quad (3-25)$$

式中, $\pi$  是压阻系数,是表征固态材料压阻效应的特性参数。不同材料的压阻系数不同,而且各向异性的同一材料在不同方向其压阻系数也各不相同,所以有

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_r \sigma_r + \pi_t \sigma_t \quad (3-26)$$

式中, $\sigma_r$ 、 $\sigma_t$  分别为纵向应力和横向应力(切向应力); $\pi_r$  为纵向压阻系数,反映由纵向应力引起的纵向电阻的变化率; $\pi_t$  为横向压阻系数,反映由横向应力引起的横向电阻的变化率,大小由所扩散电阻的晶向来决定。

硅压阻式传感器是典型的物性型传感器,它的结构特点是敏感元件由弹性体和转换元件合为一体。这种传感器的灵敏度高(比金属应变计高 50~80 倍)、分辨力高,动态响应好,因无须胶接而滞迟、蠕变、老化现象小,便于生产,成本低。

### 二、压阻式传感器的应用

压阻式传感器广泛应用于航天、航空、航海、石油化工、动力机械、生物医学工程、气象、地质、地震测量等各个领域。在航天和航空工业中,压力是一个关键参数,静态和动态压力、局部压力和整个压力场都要求有很高的测量精度。压阻式传感器是用于这方面的较理想的传感器,如用于测量直升机机翼的气流压力分布,测试发动机进气口的动态畸变、叶栅的脉动压力和机翼的抖动等。在飞机喷气发动机中心压力的测量中,使用专门设计的硅压力传感器,其工作温度达 500 °C 以上。在波音客机的大气数据测量系统中采用了精度高达 0.05% 的配套硅压力传感器。在尺寸缩小的风洞模型试验中,压阻式传感器能密集安装在风洞进口处和发动机进气管道模型中。单个传感器直径仅为 2.36 mm,固有频率高达 300 kHz,非线性和滞后均为全量程的  $\pm 0.22\%$ 。在生物医学方面,压阻式传感器也是理想的检测工具。已制成扩散硅膜薄到 10  $\mu\text{m}$ ,外径仅为 0.5 mm 的注射针型压阻式压力传感器和能测量心血管、颅内、尿道、子宫和眼球内压力的传感器。图 3-16 所示

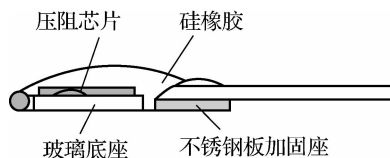


图 3-16 脑压传感器结构图

为一种用于测量脑压的传感器的结构图。压阻式传感器还有效地应用于爆炸压力和冲击波的测量、真空测量、监测和控制汽车发动机的性能及诸如测量枪炮膛内压力、发射冲击波等兵器方面的测量。此外,在油井压力测量、随钻测向和测位地下密封电缆故障点的检测及流量和液位测量等方面都广泛应用压阻式传感器。随着微电子技术和计算机的进一步发展,压阻式传感器的应用还将迅速发展。

### 1. 扩散型压阻式压力传感器

扩散型压阻式压力传感器属于半导体应变片传感器,它是直接在硅弹性元件上扩散出敏感栅,而不是用黏结剂将敏感栅粘贴在弹性元件上。

图 3-17(a)所示为扩散型压阻式压力传感器的结构简图,其核心部分是一块圆形硅膜片,在膜片上,利用扩散工艺设置四个阻值相等的电阻,用导线将其构成平衡电桥。膜片的四周用圆环(硅环)固定,如图 3-17(b)所示。膜片的两边有两个压力腔,一个是与被测系统相连接的高压腔,另一个是低压腔,一般与大气相通。

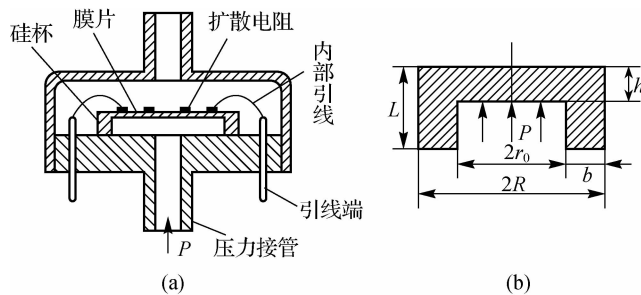


图 3-17 扩散型压阻式压力传感器的结构

当膜片两边存在压力差时,膜片产生变形,膜片上各点产生应力。4 个电阻在应力作用下阻值产生变化,电桥失去平衡,输出相应的电压。该电压与膜片两边的压力差成正比。这样,测得不平衡电桥的输出电压,就测出了膜片所受压力。

### 2. 加速度测量

这种传感器的弹性元件是单晶硅制成的悬臂梁(见图 3-18),在它的自由端上下两面上,对称地连接着两个力矩器线圈,这两个线圈分别空套在上、下磁钢与轭铁形成的环形工作气隙中。在硅梁上还扩散有压阻电桥。当传感器感受到外界加速度时,与硅梁自由端连接的力矩器线圈受到惯性力的作用,使得硅梁发生应变,在硅梁根部的力敏电阻电桥输出电信号。这个信号经放大、整流后再输出时,也把相应的直流电流反馈到力矩线圈中,经与永磁体磁场的相互作用,而产生一个与惯性力大小相等、方向相反的平衡力作用于硅梁自由端,从而实现了零位检测。

由于闭环压阻式加速度传感器采用力平衡工作方式,弹性硅梁没有过大的挠度,因而有利于提高动态频响特性和改善线性。它还具有自检功能。闭环压阻式加速度传感器的特点是精度高,动态范围大,结构复杂,质量和尺寸都相对较大,成本也较高。



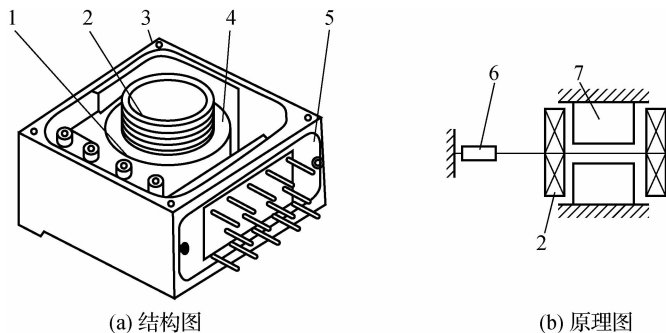


图 3-18 闭环压阻式加速度传感器结构原理图

1—硅梁组件；2—力矩器线圈；3—壳体；4—下磁路组件；5—插头座；  
6—压阻电桥；7—力矩器磁钢

**思考与练习**

问题 压阻式传感器与电阻应变式传感器有什么区别？

思考：.....  
.....  
.....  
.....  
.....

## 学习单元三 压电式传感器

电阻式、电感式和电容式传感器都是无源器件，即它们需要电源才能产生与被测量有关的电信号输出，而压电式传感器是将被测量变化转换成材料受机械力产生静电电荷或电压变化的传感器。它是一种典型的有源、双向机电能量转换型传感器或自发电型传感器。压电元件是机电转换元件，它可以测量最终能变换为力的非电物理量，如力、加速度等。

压电式传感器具有使用频带宽（零点几赫兹到数万赫兹）、灵敏度高、信噪比高、结构简单、工作可靠、质量小等优点。近年来，由于电子技术的飞速发展，与之配套的二次仪表及低噪声、小电容、高绝缘电阻电缆的出现，使压电式传感器的使用更为方便。因此，在工程力学、各种动态力、机械冲击与振动测量、生物医学、电声学、宇航等许多技术领域中，压电式传感器获得了广泛的应用。压电式加速度传感器如图 3-19 所示。



图 3-19 压电式加速度传感器

## 一、压电效应及压电材料

### 1. 压电效应

当晶体受到某固定方向拉力或压力的作用时会发生变形,内部就产生电极化现象,同时某两个表面上产生符号相反的电荷;当外力撤去后,晶体又恢复到不带电的状态;当外力作用方向改变时,电荷的极性也随之改变;晶体受力所产生的电荷量与外力的大小成正比。这种现象称为正压电效应。压电式传感器大多是利用正压电效应制成的,如图 3-20 所示。

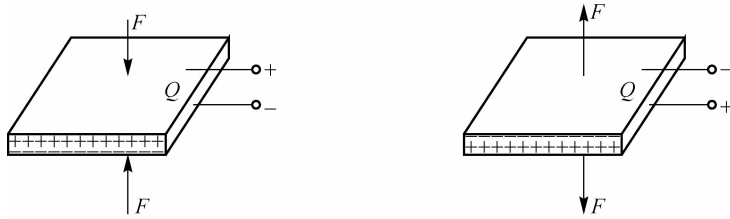


图 3-20 正压电效应

相反,当对某些物质在极化方向上施加一定电场时,材料将产生机械形变,当外电场撤销时,形变也消失,这种现象称为逆压电效应,又称为电致伸缩。用逆压电效应制造的变送器可用于电声和超声工程。压电效应的可逆性如图 3-21 所示,利用这一特性可实现机-电能量的相互转换。

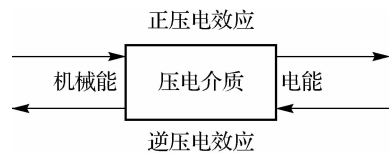


图 3-21 压电效应的可逆性

大多数晶体具有压电效应,但多数晶体的压电效应都十分微弱。随着对压电材料的深入研究,发现石英晶体和人造压电陶瓷是性能优良的压电材料。

### 2. 压电材料

#### 1) 石英晶体

石英晶体是一种性能良好的压电晶体。石英是硅石的一种,现在已能人工制造,它的化学成分是  $\text{SiO}_2$ ,其晶体单元的形状为六角锥体,如图 3-22 所示。其突出的优点是性能非常稳定,介电常数与压电系数的温度稳定性特别好,且居里点高,可以达到  $575\text{ }^\circ\text{C}$ 。此外,石英晶体还具有机械强度高、绝缘性能好、动态响应快、线性范围宽、迟滞小等优点。但石英晶体压电系数较小,灵敏度较低,且价格较贵,所以只在标准传感器、高精度传感器或高温环境下工作的传感器中作为压电元件使用。石英晶体分为天然与人造两种。

石英晶体各方向的特性不同。为了便于研究,人们根据石英晶体的物理特性,在石英晶体内画出三种几何对称轴。连接两个锥顶点的一根轴称为光轴( $z$ 轴),它是晶体的对称轴,光线沿  $z$ 轴通过晶体时,不产生双折射现象,因而以它作为基准轴,又称为中性轴;连接晶体横截面中对角线的三条轴称为电轴( $x$ 轴),该轴的压电效应最为显著;横截面中与电轴相互垂直的三条轴称为机械轴( $y$ 轴),在此轴上加电场,产生机械形变最大,故又称为力轴。

若从晶体上沿  $y$ 轴方向切下一块图 3-22(c)所示的晶片,当在电轴  $x$ 方向施加作用力时,在与电轴垂直的平面上将产生电荷,其大小为

$$q_x = d_{11} F_x \tag{3-27}$$

式中,  $d_{11}$  为  $x$  轴方向受力时的压电系数;  $F_x$  为作用力。

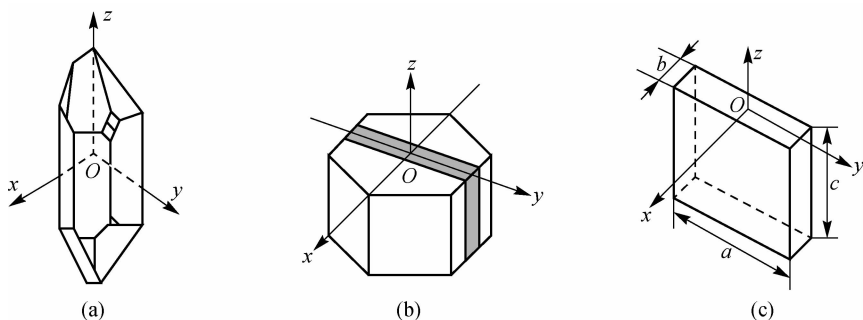


图 3-22 石英晶体结构

若在同一切片上,沿机械轴方向施加作用力  $F_y$ ,则仍在与  $x$  轴垂直的平面上产生电荷  $q_y$ ,其大小为

$$q_y = d_{12} \frac{a}{b} F_y = -d_{11} \frac{a}{b} F_y \tag{3-28}$$

式中,  $d_{12}$  为  $y$  轴方向受力时的压电系数,因为石英轴对称,故  $d_{12} = -d_{11}$ ;  $a$  和  $b$  分别为晶体切片的长度和厚度。电荷  $q_x$  和  $q_y$  的符号由所受力的性质(拉力或压力)决定。 $q_x$  的大小与晶片的几何尺寸无关,而  $q_y$  的大小与晶片的几何尺寸有关。图 3-23 所示为晶体切片在  $x$  轴和  $y$  轴方向受拉力和压力的具体情况。

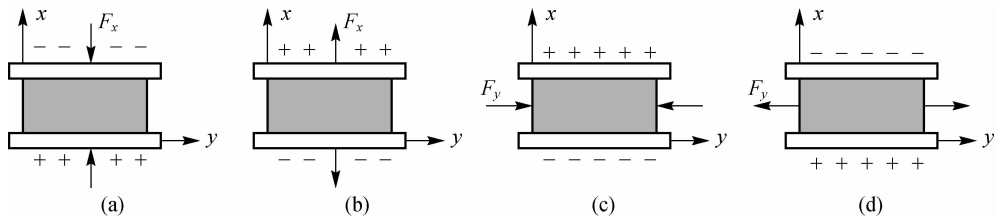


图 3-23 晶体切片在  $x$  轴和  $y$  轴方向受拉力和压力的具体情况

如果在片状压电晶体材料的两个电极面上加以交流电压,那么石英晶体片将产生机械振动,即晶体片在电极方向有伸长和缩短现象,这种电致伸缩现象即为逆压电效应。

石英晶体的上述特性与其内部分子结构有关。在每个晶体单元中有三个硅离子和六个氧离子,在垂直于  $z$  轴的  $xy$  平面上的投影,等效为一个正六边形排列,如图 3-24 所示。图中,“+”表示  $\text{Si}^{4+}$ ,“—”表示  $\text{O}^{2-}$ 。

当不受外力时,正负六个离子( $\text{Si}^{4+}$  和  $\text{O}^{2-}$ )分布在正六边形的六个顶点上,形成三个  $120^\circ$  夹角的电偶极矩  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 。此时正负电荷重心重合,电偶极矩的矢量和等于零,即

$$p_1 + p_2 + p_3 = 0 \tag{3-29}$$

晶体表面不带电荷,呈电中性,如图 3-24(a)所示。

当受到沿  $x$  轴方向的压力作用时,晶体受压缩而产生形变,正负离子相对位置发生改变,此时键角也随之改变,电偶极矩  $p_1$  减小,  $p_2$ 、 $p_3$  增大,因此在  $x$  轴方向上的电偶极矩矢量和不为零,  $p_1 + p_2 + p_3 > 0$ ,在  $x$  轴正向的晶体表面出现正电荷,反向表面出现负电荷。电偶

极矩在  $y$  轴、 $z$  轴方向上的分量都为零,因此无电荷出现,如图 3-24(b)所示。

当受到沿  $y$  轴方向的压力时, $p_1$  增大, $p_2$ 、 $p_3$  减小,因此在  $x$  轴方向上的电偶极矩矢量和不为零, $p_1 + p_2 + p_3 < 0$ ,在  $x$  轴正向的晶体表面出现负电荷,反向表面出现正电荷。电偶极矩在  $y$  轴、 $z$  轴方向上的分量都为零,因此无电荷出现,如图 3-24(c)所示。

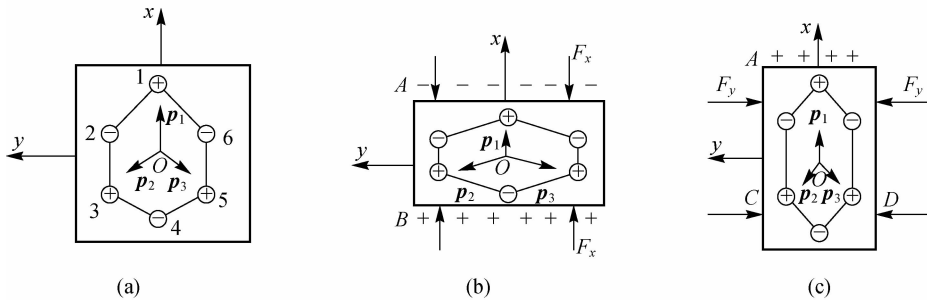


图 3-24 石英晶体压电效应示意图

如果受到沿  $z$  轴方向的作用力,晶体中的硅离子和氧离子沿  $z$  轴平移,因此电偶极矩矢量和等于零;表面沿  $z$  轴方向受力时,无压电效应。

## 2) 压电陶瓷

压电陶瓷是一类具有压电特性的电子陶瓷材料。它与典型的不包含铁电成分的压电石英晶体的主要区别是:构成其主要成分的晶相都是具有铁电性的晶粒。由于陶瓷是晶粒随机取向的多晶聚集体,因此其中各个铁电晶粒的自发极化矢量也是混乱取向的。为了使陶瓷能表现出宏观的压电特性,就必须在压电陶瓷烧成之后,将其置于强直流电场下进行极化处理,以使原来混乱取向的各自自发极化矢量沿电场方向择优取向。经过极化处理后的压电陶瓷,在电场撤销之后,会保留一定的宏观剩余极化强度,从而使陶瓷具有了一定的压电性质。

## 二、常用压电元器件

### 1. 石英晶体元件

#### 1) 石英晶体元件的分类

石英晶体俗称水晶,成分是  $\text{SiO}_2$ ,是一种重要的压电材料,可用于制造压电元器件,如石英晶体谐振器、石英晶体滤波器、石英晶体振荡器、石英晶体传感器等。图 3-25 所示为晶振与石英晶片。石英晶体薄片受到外加交变电场的作用时会产生机械振动,当交变电场的频率与石英晶体的固有频率相同时,振动便变得很强烈,这就是晶体谐振特性的反映。

石英晶体谐振器俗称晶体或无源晶振,它由石英晶体片、外壳、引线等材料密封而成。它是一种提供稳定频率的元器件,其频率调整和封闭方式,根据不同的技术要求和不同的振动方式而有所不同。它广泛应用于测量设备、计算机、家电、通信、军事等领域。

石英晶体滤波器由石英晶体谐振器、外壳、电子电路等封装而成,是一种频率选择器件,与其他类型的滤波器相比,它具有选择性好、温度稳定性高的优点。石英晶体滤波器包括体声波滤波器和声表面滤波器,它应用于无线电通信、载波机、雷达、导航设备等领域。

石英晶体振荡器简称晶振或晶体振荡器,俗称有源晶振。石英晶体振荡器由石英晶体谐振器、外壳、电子控制电路系统组成,它是一种把直流电能转变为交流电能的装置。它采

用了 Q 值极高的石英晶体谐振器,因此比 LC 振荡器更稳定。石英晶体振荡器按其用途和特点可分为普通晶体振荡器(PXO)、温度补偿晶体振荡器(TCXO)、电压控制晶体振荡器(VCXO)、温度控制晶体振荡器(OCXO)和电压-温度控制晶体振荡器(VCOXO)。石英晶体振荡器广泛应用于高端无线电通信设备、发射基站、数字程控交换机、接入网、SDH 等通信设备,主要作为时基信号源。

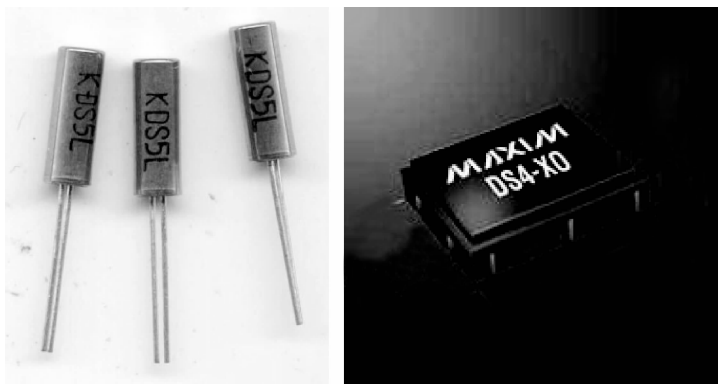


图 3-25 晶振与石英晶片

## 2) 石英晶体振荡器的发展趋势

(1)小型化、薄片化和片式化。为满足移动电话为代表的便携式产品轻、薄、短小的要求,石英晶体振荡器的封装由传统的裸金属外壳覆塑料金属向陶瓷封装转变。例如,TCXO 器件的体积缩小了 30~100 倍。采用 SMD 封装的 TCXO 厚度不足 2 mm,目前,2.5 mm×2.0 mm 尺寸的器件已经上市。

(2)高精度与高稳定度。目前,无补偿式晶体振荡器的总精度也能达到±25 ppm,VCXO 的频率稳定度在-10~7 °C 范围内一般可达±20~100 ppm,而 OCXO 在同一温度范围内频率稳定度一般为±0.000 1~5 ppm,VCXO 控制在±25 ppm 以下。

(3)低噪声,高频化。在 GPS 通信系统中是不允许频率颤抖的,相位噪声是表征振荡器频率颤抖的一个重要参数。目前,OCXO 主流产品的相位噪声性能有很大改善。除 VCXO 外,其他类型的晶体振荡器的最高输出频率不超过 200 MHz。例如,用于 GSM 等移动电话的 UCV4 系列压控振荡器,其频率为 650~1 700 MHz,电源电压为 2.2~3.3 V,工作电流为 8~10 mA。

(4)低功耗,快速启动,低电压工作。低电平驱动和低电流消耗已成为一个趋势。电源电压一般为 3.3 V。目前许多 TCXO 和 VCXO 产品,电流损耗不超过 2 mA。石英晶体振荡器的快速启动技术也取得突破性进展。例如,日本精工公司生产的 VG-2320SC 型 VCXO,在±0.1 ppm 规定值范围条件下,频率稳定时间小于 4 ms。日本京瓷公司生产的 SMD TCXO,在振荡启动 4 ms 后则可达到额定值的 90%。广州天马电讯公司的 OCXO 产品,在预热 5 min 后,则能达到±0.01 ppm 的稳定度。

(5)数字化技术应用。以往都是采取通过调整变容二极管的参数来改变晶体的振荡参数,达到高稳定频率输出。随着单片机技术的应用,实际上可以通过数字化来取代变容二极管的应用技术,从而实现高稳定频率输出。现在市面上已经出现很多数字温补晶振(DCXO),如天马电讯的 DX2116 等产品已成功上市。由于采用了先进的数字化补偿技术,

所生产出来的数字温补晶振已达到中精度 OCXO(俗称三级钟)的技术水平。

## 2. 压电陶瓷元件

压电陶瓷是一种经过极化处理的人工多晶铁电体。多晶是指它由无数细微的单晶组成,铁电体是指它具有类似铁磁材料磁畴的电畴结构。每个单晶形成单个电畴,这种自发极化的电畴在极化处理之前,各晶粒内的电畴按任意方向排列,自发极化的作用相互抵消,陶瓷的极化强度为零。因此,原始的压电陶瓷呈现而不具有压电性。为使其具有压电性,就必须在一定温度下做极化处理。

所谓极化处理,是指在一定温度下,以强直流电场迫使电畴自发极化的方向转到与外加电场方向一致,做规则排列,此时压电陶瓷具有一定的极化强度,再使其冷却,撤去电场,电畴方向基本保持不变,余下很强的剩余极化电场,从而呈现压电性,即陶瓷片的两端出现束缚电荷,一端为正,另一端为负,如图 3-26 所示。由于束缚电荷的作用,在陶瓷片的极化两端很快吸附一层来自外界的自由电荷,这时束缚电荷与自由电荷数值相等、极性相反,故此陶瓷片对外不呈现极性,如图 3-27 所示。

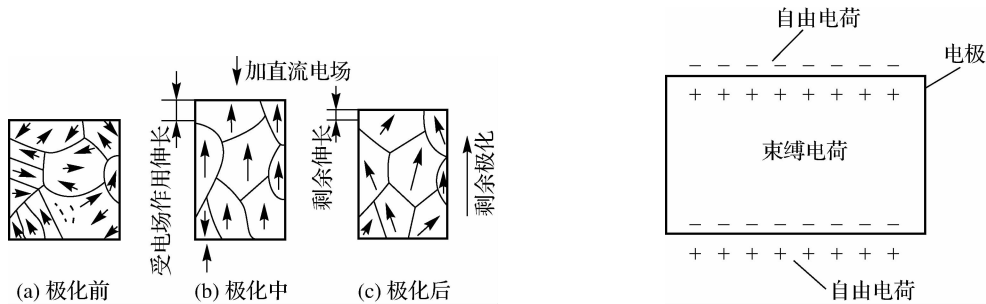


图 3-26 陶瓷极化过程示意图

图 3-27 束缚电荷与自由电荷排列示意图

如果在压电陶瓷片上加一个与极化方向平行的外力,陶瓷片产生压缩变形,片内的束缚电荷之间距离变小,电畴发生偏转,极化强度变小,因此吸附在其表面的自由电荷,有一部分被释放而呈现放电现象。当撤销压力时,陶瓷片恢复原状,极化强度增大,因此又吸附一部分自由电荷而出现充电现象。这种因受力而产生的机械效应转变为电效应,将机械能转变为电能,就是压电陶瓷的正压电效应。放电电荷的多少与外力成正比,即

$$q = d_{33} F \quad (3-30)$$

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

压电陶瓷在极化方向上的压电效应最明显。我们把极化方向称为  $z$  轴,垂直于  $z$  轴平面上的任何直线都可作为  $x$  轴(或  $y$  轴)。

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,但剩余极化强度和特性受温度影响较大。

最早使用的压电陶瓷材料是钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ ),它是由  $\text{BaCO}_3$  和  $\text{TiO}_2$  按一定比例混合后烧结而成的。它的压电系数约为石英的 50 倍,但使用温度较低,最高只有  $70^\circ\text{C}$ ,温度稳定性和机械强度都不如石英。

目前,使用较多的压电陶瓷是锆钛酸铅 [ $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ , PZT 系列],它是由钛酸钡( $\text{BaTiO}_3$ )和锆酸铅( $\text{PbZrO}_3$ )组成的。它有较强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。它是由铌镁酸铅 [ $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3} \cdot \text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ ]、锆酸

铅和钛酸铅按不同比例配成的不同性能的压电陶瓷,具有较高的压电系数和较高的工作温度,而且能承受较高的压力。

### 三、压电式传感器的应用

#### 1. 压电式加速度传感器

压电式加速度传感器又称压电式加速度计,也属于惯性式传感器。它利用某些物质(如石英晶体)的压电效应,在加速度计受振时,质量块加在压电元件上的力也随之变化。当被测振动频率远低于加速度计的固有频率时,力的变化与被测加速度成正比。

压电加速度传感器采用剪切和中心压缩结构形式,其原理是压电晶体的电荷输出与所受的力成正比,而所受的力在敏感质量一定的情况下与加速度值成正比。在一定条件下,压电晶体受力后产生的电荷量与所感受到的加速度值成正比。经过简化后的方程为

$$Q = d_{ij}F = d_{ij}Ma \quad (3-31)$$

式中, $Q$ 为压电晶体输出的电荷量; $d_{ij}$ 为压电晶体的二阶压电张量; $F$ 为所受外力; $M$ 为传感器的敏感质量; $a$ 为所受的振动加速度值。

每只传感器中内装晶体元件的二阶压电张量是一定的,敏感质量  $M$  是一个常量,所以式(3-31)表明压电加速度传感器产生的电荷量与振动加速度  $a$  成正比,这就是压电式加速度传感器完成的机电转换的工作原理。

压电式加速度传感器承受单位振动加速度值能输出电荷量的多少,称为电荷灵敏度,单位为  $\text{pC}/\text{ms}^{-2}$  或  $\text{pC}/\text{g}$  ( $1 \text{ g} \approx 9.8 \text{ ms}^{-2}$ )。

压电式加速度传感器实质上相当于一个电荷源和一只电容器,通过等效电路简化后,则可算出传感器的电压灵敏度为

$$S_V = S_Q/C_a \quad (3-32)$$

式中, $S_V$ 为传感器的电压灵敏度,  $\text{mV}/\text{ms}^{-2}$ ;  $S_Q$ 为传感器的电荷灵敏度,  $\text{pC}/\text{ms}^{-2}$ ;  $C_a$ 为传感器的电容量,  $\text{pF}$ 。

压电式加速度传感器在使用中最主要的三项指标为电荷灵敏度(或电压灵敏度)、谐振频率(工作频率在谐振频率  $1/3$  以下)和最大横向灵敏度比。

IBM ThinkPad 就内置了加速度传感器,能够动态监测出笔记本在使用中的振动,并根据这些振动数据,智能选择关闭硬盘还是让其继续运行,这样可以防止笔记本由于振动造成的损伤,最大限度地保护数据。目前的数码相机和摄像机里也有加速度传感器,用来检测拍摄时候的手部振动,并根据这些振动自动调节相机的焦距。

#### 2. 压电式流量计

压电式流量计是利用超声波在顺流方向和逆流方向的传播速度不同来进行测量的。它的测量装置是在管外设置两个相隔一定距离的收发两用压电超声换能器。每隔一段时间(如  $0.01 \text{ s}$ ),发射和接收互换一次。在顺流和逆流的情况下,发射和接收的相位差与流速成正比。根据这个关系,便可精确地测定流速。流速与管道横截面积的乘积等于流量。

图 3-28 所示为一种工业用压电式流量计的示意图。此种流量计可以测量各种液体的流速,中压和低压气体的流速不受该液体的导电率、黏度、密度、腐蚀性及其成分的影响,其准确度可达  $0.5\%$ ,有的可达到  $0.01\%$ 。

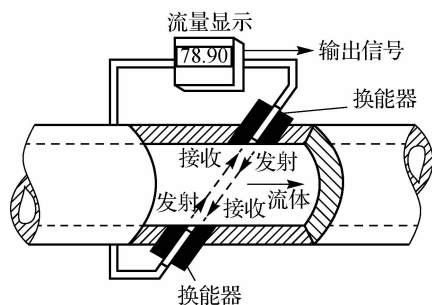


图 3-28 压电式流量计

根据同一道理,可以用于直接测量随海洋深度而变化的声速分布,即以一定距离放置两个正对着的压电陶瓷换能器,一个为发射器,一个为接收器。根据测定的发射和接收的相位差随深度的变化,即可得到声速随深度的分布情况。

### 思考与练习

问题 1 什么是压电效应? 什么是压电效应的可逆性?

思考: .....

.....

.....

.....

.....

问题 2 压电效应有哪些应用?

思考: .....

.....

.....

.....

.....

## 学习单元四 电容式传感器

电容式传感器是将被测量的变化转换为电容量变化的一种装置,它本身就是一种可变电容器。由于这种传感器具有结构简单、体积小、动态响应好、灵敏度高、分辨率高、能实现非接触测量等特点,因而被广泛应用于位移、加速度、振动、压力、压差、液位、成分含量等检测领域。



## 一、电容式传感器的结构及工作原理

电容式传感器的基本工作原理是基于被测物理量的变化可以转换为电容量变化。由物理学知识可知,电容器的电容量是构成电容器的两极片形状、大小、相互位置及电介质介电常数的函数。

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} \quad (3-33)$$

式中, $\epsilon$ 为两极板间介质的介电常数, $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ , $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $\epsilon_r$ 为极板间介质的相对介电常数; $S$ 为两平行板所覆盖的面积; $\delta$ 为两平行板之间的距离。

从式(3-33)可以看出,当被测量使 $S$ 、 $\delta$ 、 $\epsilon$ 三参数中任意一项发生变化时,电容量就要随之变化。这就是电容式传感器的工作原理。如果保持其中的两个参数不变,而仅改变另一个参数,就可把该参数的变化变换为单一电容量的变化,再通过配套的测量电路,将电容的变化转换为电信号输出。根据电容器参数变化的特性,电容式传感器可分为变极距型、变面积型和变介电常数型三种,其中变极距型和变面积型电容式传感器应用较广。

电容式传感器的基本结构如图 3-29 所示。

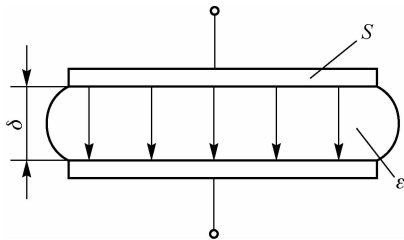


图 3-29 电容式传感器的基本结构

## 二、变极距型电容式传感器

变极距型电容式传感器由一个固定极板和一个可动极板构成。可动极板由被测金属平面充当。当电容式传感器极板间距 $\delta$ 因某个被测量变化而变化 $\Delta\delta$ 时,会引起电容变化 $\Delta C$ 。

$$\Delta C = \frac{\epsilon S}{\delta - \Delta\delta} - \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{\epsilon S \Delta\delta}{\delta(\delta - \Delta\delta)} = C_0 \frac{\Delta\delta}{\delta - \Delta\delta} \quad (3-34)$$

式中, $C_0$ 为极距是 $\delta$ 时的初始电容量。

由式(3-34)可知, $\Delta C$ 与极板间距的变化 $\Delta\delta$ 不是线性关系,说明该类型电容式传感器存在着原理性非线性误差;但当 $\Delta\delta \ll \delta$ (即量程远小于两极板间的初始距离)时,可以认为 $\Delta C$ 与 $\Delta\delta$ 是线性关系。

另外,在 $\delta$ 较小时,对于同样的 $\Delta\delta$ 变化所引起的 $\Delta C$ 可以增大,从而使传感器灵敏度提高。但如果 $\delta$ 过小,容易引起电容器击穿或短路。为此,极板间可采用高介电常数的材料(云母、塑料膜等)做介质,此时电容 $C$ 变为

$$C = \frac{S}{\frac{\delta_g}{\epsilon_0 \epsilon_g} + \frac{\delta_0}{\epsilon_0}} \quad (3-35)$$

式中, $\epsilon_g$ 为云母的相对介电常数, $\epsilon_g = 7$ ;  $\epsilon_0$ 为空气的介电常数, $\epsilon_0 = 1$ ;  $\delta_0$ 为空气隙厚度; $\delta_g$ 为云母片的厚度。

云母片的相对介电常数是空气的 7 倍,其击穿电压不小于 1 000 kV/mm,而空气的仅为

3 kV/mm。因此有了云母片,极板间的起始距离可大大减小。同时,式(3-35)中的 $\frac{\delta_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}$ 项是恒定值,它能使传感器的输出特性的线性度得到改善。

一般变极距型电容式传感器的起始电容为 20~100 pF,极板间距为 25~200  $\mu\text{m}$ ,最大位移应小于间距的 1/10,故在微位移测量中应用最广。

### 三、变面积型电容式传感器

变面积型电容式传感器的原理结构如图 3-30 所示。它与变极距型电容式传感器不同的是,被测量通过动极板移动,引起两极板有效覆盖面积  $S$  改变,从而得到电容的变化。设动极板相对定极板沿长度  $l_0$  方向平移  $\Delta l$ ,则电容为

$$C = C_0 - \Delta C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r (l_0 - \Delta l) b_0}{\delta_0} \quad (3-36)$$

式中, $C_0 = \epsilon_0 \epsilon_r l_0 b_0 / \delta_0$  为初始电容。电容的相对变化量为

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (3-37)$$

从式(3-37)可以看出,这种传感器的输出特性成线性,因而其量程不受线性范围的限制,适合于测量较大的直线位移和角位移。它的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta l} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r b_0}{\delta_0} \quad (3-38)$$

上述讨论只在初始极距  $\delta_0$  精确保持不变时成立,否则将导致测量误差。为减小这种影响,可以使用图 3-30(b)所示中间极移动式结构。

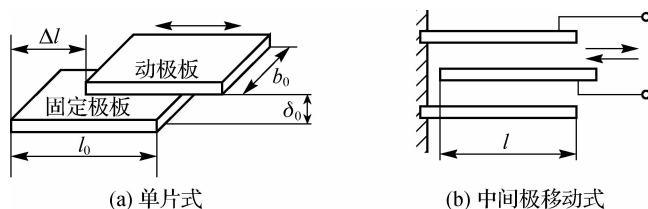


图 3-30 变面积型电容式传感器原理结构

### 四、变介电常数型电容式传感器

#### 1. 平板形变介电常数式

两极板间介质的介电常数  $\epsilon$  变化  $\Delta\epsilon$ ,由此引起的电容量的变化量  $\Delta C$  为

$$\Delta C = \frac{S}{\delta_0} \Delta\epsilon \quad (3-39)$$

引起两极板间介质介电常数变化的因素可以是介质含水量、介质厚度或高度、介质组分含量的变化。因此,它可以用来测量含水量、物位及介质厚度等物理参数。所要注意的是,当变介电常数式电容极板间为导电介质时,在极板表面应涂绝缘层,以防止电极间短路。

#### 2. 圆筒形变介电常数式

因为各种介质的相对介电常数不同,所以在电容器两极板间存在不同介质时,电容器的电容量也就不同,利用此原理制成的电容式传感器称为变介电常数型电容式传感器,常被用来测量液体的液位和材料的厚度。其检测原理图如图 3-31 所示,它是由两个长度均为  $L$ 、半

径分别为  $R$  和  $r$  的圆筒形金属导体组成的。两圆筒间上面一部分充以介电常数为  $\epsilon_1$  的气体,下面一部分充以介电常数为  $\epsilon_2$  的液体,高度是  $H$ ,此时的电容量为

$$C = C_1 + C_2 = \frac{2\pi\epsilon_1(L-H)}{\ln \frac{R}{r}} + \frac{2\pi\epsilon_2 H}{\ln \frac{R}{r}} \quad (3-40)$$

$$C = C_0 + \Delta C \quad (3-41)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_1 L}{\ln \frac{R}{r}} \quad (3-42)$$

$$\Delta C = \frac{2\pi(\epsilon_2 - \epsilon_1)H}{\ln \frac{R}{r}} \quad (3-43)$$

式(3-43)表明,当圆筒形电容的几何尺寸( $L, R, r$ )保持不变,且介电常数也不变时,电容式传感器电容量变化  $\Delta C$  与液位高度  $H$  成正比。另外,两种介质的介电常数的差值( $\epsilon_2 - \epsilon_1$ )越大,则  $\Delta C$  也越大,说明相对灵敏度越高。

如果被测介质为导电液体,上述圆筒形电极将被导电的液体所短路,因此,对于这种介质的液位检测,电极要用绝缘物覆盖作为中间介质,而液体和外圆筒一起作为外电极,如图 3-32 所示。加入中间介质的介电常数为  $\epsilon$ ,电极被导电液体浸没的长度为  $H$ ,此时电容器具有的电容量为

$$C = \frac{2\pi\epsilon H}{\ln \frac{R}{r}} \quad (3-44)$$

式中, $R$  为绝缘覆盖层外半径; $r$  为内电极的外半径。

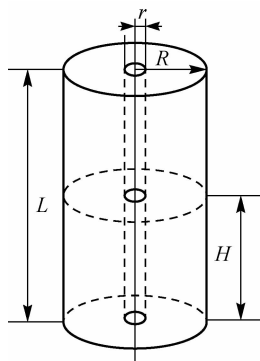


图 3-31 电容液位计原理图

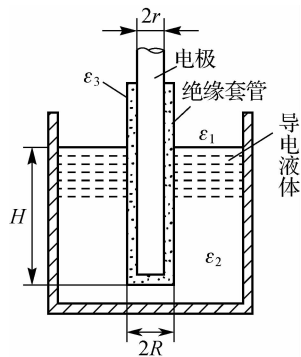


图 3-32 导电液体液位测量示意图

### 五、电容式传感器的信号调理电路

实际上,电容式传感器并不是一个纯电容,其完整的等效电路如图 3-33(a)所示。 $L$  包括引线电缆电感和电容式传感器本身的电感; $r$  由引线电阻、极板电阻和金属支架电阻组成; $C_0$  为传感器本身的电容; $C_p$  为引线电缆、所接测量电路及极板与外界所形成的总寄生电容; $R_g$  是极间等效漏电阻,它包括极板间及极板与外界间的漏电损耗和介质损耗。

在低频时,传感器电容的阻抗非常大,因此  $L$  和  $r$  的影响可以忽略。其等效电路可简化为图 3-33(b),其中等效电容  $C_e = C_0 + C_p$ ,等效电阻  $R_e \approx R_g$ 。在高频时,传感器电容的阻抗

就变小了,因此, $L$ 和 $r$ 的影响不可忽略不计,而漏电阻的影响可以忽略不计。其等效电路可简化为图 3-33(c),其中,等效电容  $C_e = C_0 + C_p$ ,等效电阻  $R_e \approx r$ 。引线电缆的电感很小,只有工作频率在 10 MHz 以上时,才考虑其影响。

传感器电容极板间的有功损耗致使传感器电容电压和电流相位差比  $90^\circ$  小一个  $\delta$  角,利用这些特点又可测量更多的量,如石油的含水量和种子或土壤的湿度等。

由电容式传感器的等效电路可知,它有一个谐振频率,通常为几十兆赫。当工作频率等于或接近谐振频率时,就破坏了电容的正常工作。因此,供电电源频率必须低于该谐振频率,一般为其  $1/3 \sim 1/2$ ,传感器才能正常工作。

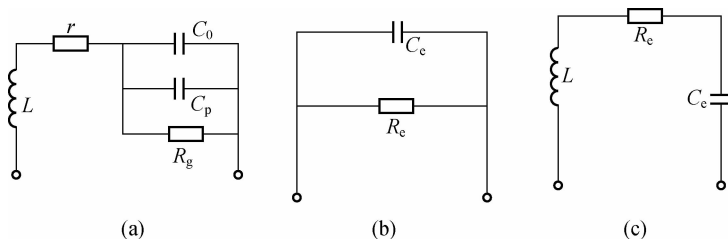


图 3-33 电容式传感器等效电路

### 1. 电桥电路

将电容式传感器接入交流电桥作为电桥的一个臂(另一个臂为固定电容)或两个相邻臂,另两个臂可以是电阻、电容或电感,也可以是变压器的两个次级线圈。其中另两个臂是紧耦合电感臂的电桥,具有较高的灵敏度和稳定性,且寄生电容影响极小,大大简化了电桥的屏蔽和接地,适合在高频电源下工作;而变压器式电桥使用元件最少,桥路内阻最小,因此目前较多采用。

电容电桥的主要特点有:

- (1) 高频交流正弦波供电。
- (2) 电桥输出调幅波,要求其电源电压波动极小,须采用稳幅、稳频等措施。
- (3) 电桥通常处于不平衡工作状态,所以传感器必须工作在平衡位置附近,否则电桥非线性增大,且在要求精度高的场合应采用自动平衡电桥。
- (4) 输出阻抗很高(一般达几兆欧至几十兆欧),输出电压低,必须后接高输入阻抗、高放大倍数的处理电路。

### 2. 调频电路

电容式传感器的转换电路还可利用谐振式调频电路,主要区别在于此时电感固定而电容随被测量的变化而变化。

调频测量电路是将传感器电容  $C_x$  与电感元件,配合放大器构成一个振荡器谐振电路。当电容式传感器工作时,输入量导致电容量发生变化,振荡器的振荡频率就发生变化,将频率的变化通过鉴频电路变换为振幅的变化,经放大后,就可用仪表指示或记录仪器记录下来。

调频接收系统可分为直放式调频和外差式调频两种类型。外差式调频电路比较复杂,但性能远优于直放式调频电路,其主要优点是选择性高、特性稳定、抗干扰能力强。图 3-34 所示为调频电路原理框图。调频振荡器的振荡频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_x \pm \Delta C + C_1 + C_2)}} \quad (3-45)$$

式中,  $L$  为振荡回路的电感;  $C_x \pm \Delta C$  为传感器的电容;  $C_1$  为振荡回路的固有电容;  $C_2$  为传感器引线的分布电容。

当被测信号为零时,  $\Delta C = 0$ , 则总电容  $C = C_x + C_1 + C_2$ , 所以振荡器有一个固有频率  $f_0$ , 其表示式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_x + C_1 + C_2)}} \quad (3-46)$$

当被测信号不为零时,  $\Delta C \neq 0$ , 则振荡频率发生相应的变化, 此时频率变为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_x \pm \Delta C + C_1 + C_2)}} = f_0 \pm \Delta f \quad (3-47)$$

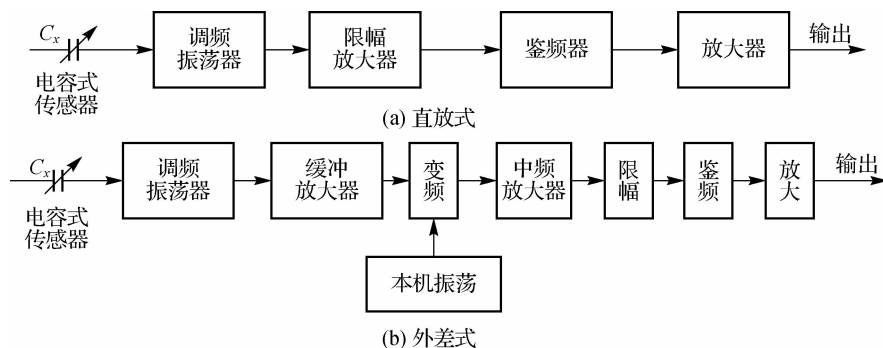


图 3-34 调频电路原理框图

用调频系统作为电容式传感器的测量电路具有下列特点: ①抗干扰能力强, 特性稳定; ②具有较高的灵敏度, 可以测量  $0.01 \mu\text{m}$  级的位移变化量; ③能取得高电平的直流信号(伏特数量级); ④因为是频率输出, 易于用数字仪器测量, 并和计算机接口通信, 可以发送、接收信号, 达到遥测遥控的目的。

### 3. 差动脉冲调宽电路

脉冲宽度调制(PWM)电路利用传感器的电容充放电使电路输出脉冲的占空比随电容式传感器的电容量变化而变化, 再通过低通滤波器得到对应于被测量变化的直流信号。差动脉冲调宽电路如图 3-35 所示, 它由电压比较器  $A_1$  和  $A_2$ 、双稳态触发器及电容充放电回路组成。电容  $C_1$  和  $C_2$  为传感器差动电容, 电阻  $R_1 = R_2$ ,  $U_R$  为参考直流电压。

当双稳态触发器处于某一状态,  $Q=1, \bar{Q}=0$ ,  $A$  点高电位通过  $R_1$  对  $C_1$  充电, 时间常数为  $\tau_1 = R_1 C_1$ , 直至  $C$  点电位高于参比电位  $U_R$ , 比较器  $A_1$  输出正跳变信号。在  $C_1$  充电的同时, 因  $\bar{Q}=0$ ,  $C_2$  上已充电荷通过  $VD_2$  迅速放电至零电平。当  $A_1$  正跳变时, 跳变信号激励触发器翻转, 使  $Q=0, \bar{Q}=1$ , 于是  $A$  点为低电位,  $C_1$  通过  $VD_1$  迅速放电, 而  $B$  点高电位通过  $R_2$  对  $C_2$  充电, 时间常数为  $\tau_2 = R_2 C_2$ , 直至  $D$  点电位高于参比电位  $U_R$ , 比较器  $A_2$  输出正跳变信号, 使触发器再次发生翻转, 重复前述过程, 电路各点波形如图 3-36 所示。当差动电容  $C_1 = C_2$  时, 电路各点波形如图 3-36(a) 所示,  $A, B$  两点间的平均电压值为零。当差动电容  $C_1 \neq C_2$ , 并且有  $C_1 > C_2$ , 则  $\tau_1 = R_1 C_1 > \tau_2 = R_2 C_2$ 。由于充放电时间常数变化, 使电路中各点电压波形产生相应改变, 电路各点波形如图 3-36(b) 所示, 此时  $U_A, U_B$  的脉冲宽度不再相

等,一个周期( $T_1+T_2$ )时间内的平均电压值不为零。 $U_{AB}$ 电压经低通滤波器滤波后,可获得 $U_o$ 输出。

$$U_o = U_A - U_B = \frac{U_1(T_1 - T_2)}{T_1 + T_2} \quad (3-48)$$

式中, $U_1$ 为双稳态触发器输出的高电位; $T_1$ 为 $C_1$ 充电至 $U_R$ 的时间; $T_2$ 为 $C_2$ 充电至 $U_R$ 的时间。

$$T_1 = R_1 C_1 \ln \frac{U_1}{U_1 - U_R} \quad (3-49)$$

$$T_2 = R_2 C_2 \ln \frac{U_2}{U_2 - U_R} \quad (3-50)$$

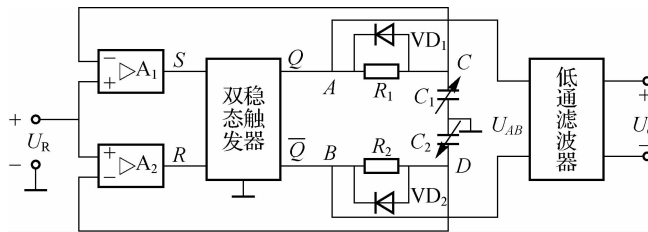


图 3-35 差动脉冲调宽电路

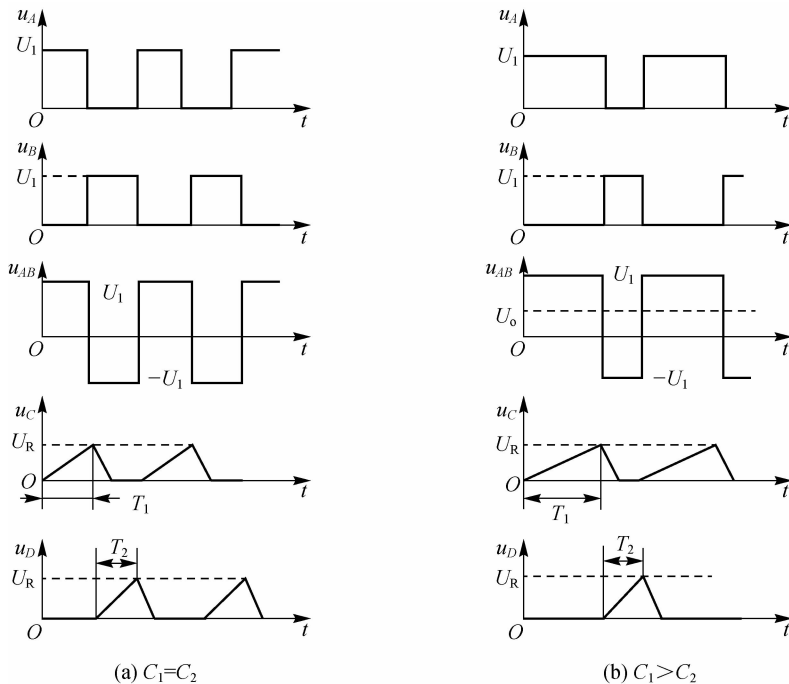


图 3-36 差动脉冲调宽电路波形图

将式(3-49)和式(3-50)代入式(3-48),可得

$$U_o = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} U_1 \quad (3-51)$$

式(3-51)表明,直流输出电压正比于电容  $C_1$  与  $C_2$  的差值。

如果是差动变极距型电容式传感器,设  $C_1 > C_2$ ,即  $C_1 = \frac{\epsilon A}{d_0 - \Delta d}$ ,  $C_2 = \frac{\epsilon A}{d_0 + \Delta d}$ ,将  $C_1$  与  $C_2$  代入式(3-51),可以得到输出电压为

$$U_o = \frac{\Delta d}{d_0} U_1 \quad (3-52)$$

同理,如果是差动变面积型电容式传感器,则输出电压为

$$U_o = \frac{\Delta A}{A} U_1 \quad (3-53)$$

由此可见,差动脉宽调制电路适用于变极距及变面积型差动电容式传感器,并具有线性特性,且转换效率高,经过低通放大器就有较大的直流输出,且调宽频率的变化对输出没有影响。

差动脉冲调宽电路与电桥电路相比,只采用直流电源,无须振荡器和相敏检波器,即能获得直流输出;输出信号一般为 100 kHz~1 MHz 的矩形波,所以直流输出只需经低通滤波器简单地引出。差动脉冲调宽电路虽然对直流电源的电压稳定度要求较高,但比高稳定度的稳频稳幅交流电源易于做到。

#### 4. 运算放大器电路

运算放大器的放大倍数  $K$  非常大,且输入阻抗  $Z_i$  很高。运算放大器的这一特点可以使其作为电容式传感器的比较理想的测量电路。图 3-37 所示为运算放大器式电路原理图。 $\dot{C}_x$  为电容式传感器电容, $\dot{U}_i$  是交流电源电压, $\dot{U}_o$  是输出信号电压。由运算放大器工作原理可得

$$\dot{U}_o = -\frac{C}{C_x} \dot{U}_i \quad (3-54)$$

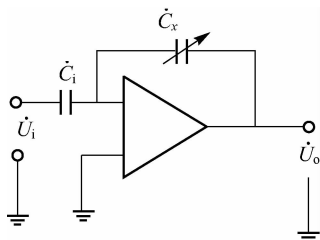


图 3-37 运算放大器式电路原理图

如果传感器是一只平板电容,那么  $\dot{C}_x = \epsilon A/d$ ,有

$$\dot{U}_o = -\dot{U}_i \frac{C}{\epsilon A} d \quad (3-55)$$

式中的“—”号表示输出电压  $U_o$  与电源电压反相。这说明运算放大器的输出电压与极板间距离  $d$  成线性关系。运算放大器电路解决了单个变极距型电容式传感器的非线性问题,但要求  $Z_i$  及  $K$  足够大。为保证仪器精度,还要求电源电压的幅值和固定电容  $C$  值稳定。

## 思考与练习

问题 1 电容式传感器的等效电路是什么样的?

思考: .....

.....

.....

.....

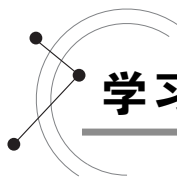
问题 2 电容式传感器常用的测量电路有哪些? 各自有什么特点?

思考: .....

.....

.....

.....



## 学习单元五 力敏传感器应用实例

### 一、在电子皮带秤上的应用

电子皮带秤如图 3-38 所示,称重桥架安装于输送机架上,当物料经过时,计量托辊检测到皮带机上的物料质量通过杠杆作用于称重传感器,产生一个正比于皮带载荷的电压信号。在皮带秤上有一个称重传感器装在称重桥架上,工作时,将检测到皮带上的物料质量送入称重仪表,同时由测速传感器皮带输送机的速度信号也送入称重仪表,称重仪表将速度信号与称重信号进行积分处理,得到瞬时流量及累计量。速度传感器直接连在大直径测速滚筒上,提供一系列脉冲,每个脉冲表示一个皮带运动单元,脉冲的频率正比于皮带速度。称重仪表从称重传感器和速度传感器接收信号,通过积分运算得出一个瞬时流量值和累积质量值,并分别显示出来。

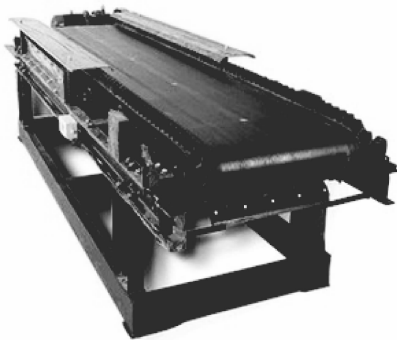


图 3-38 电子皮带秤



## 二、在指套式电子血压计上的应用

在一个心动周期中,动脉血压随心室的收缩和舒张而发生规律性波动,心室收缩时动脉血压的最大值称为收缩压,心室舒张时动脉血压的最小值称为舒张压。将光电式脉搏传感器和压力传感器置于指套式气袖中,工作时,利用充气泵给气袖充气,使其压力达到 200 mmHg,这时气袖紧压血管,使血液不流动,通过压力控制单元控制压力以 3~5 mmHg 的速率下降,同时压力传感器始终测量气袖中的压力。光电式脉搏传感器对准血管检测血流状态。当压力大于收缩压时,因血管受压迫而停止流动,光电式脉搏传感器检测不到脉搏而无血压信号输出;压力继续下降,当达到收缩压时,血液开始断续流动,光电式脉搏传感器测出脉搏信号,此信号由微机检测到,并显示此时气袖中的压力,即为收缩压;压力继续下降,达到舒张压,由于血管不受压迫,血流均匀,光电式脉搏传感器中的脉搏信号消失,微机检测到此状态,此时气袖中的压力即为舒张压,对脉搏信号进行计数与显示即可得到心率指示。

指套式电子血压计由套在手指上的气囊、压力传感器、光电式脉搏传感器、充放气装置和 CPU 系统构成,如图 3-39 所示。其工作过程为:启动血压计,在 CPU 的控制下,通过充气泵对指套式气囊充气,使气压加于指动脉上,再通过红外光的发射与接收,检测到指动脉血流信号,压力传感器始终监测气袖压力,CPU 根据监测到的脉搏信号和压力算出收缩压和舒张压及心率。通过接口电路可显示和打印出测量结果。

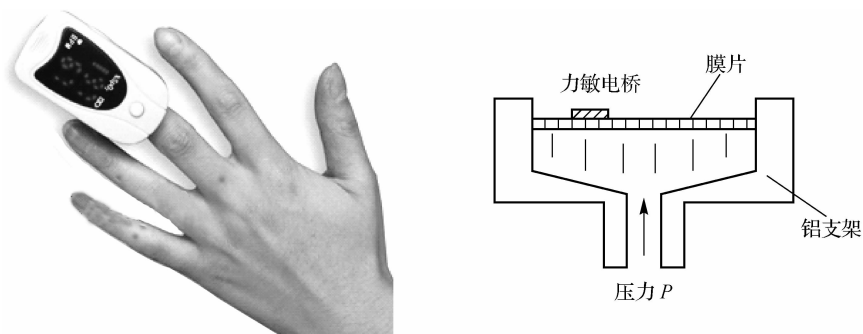


图 3-39 指套式电子血压计与力敏传感器结构图

## 三、在三轴加速度传感器上的应用

目前的加速度传感器有多种实现方式,主要可分为压电式、电容式及热感应式三种,这三种技术各有其优缺点。其中,电容式加速度计能够感测不同方向的加速度或振动等运动状况,其主要结构为利用硅的机械性质设计出的可移动机构,机构中主要包括两组硅梳齿,一组固定,另一组随运动物体移动;前者相当于固定的电极,后者相当于可移动电极。当可移动的梳齿产生了位移,就会随之产生与位移成比例电容值的改变。

当运动物体出现变速运动而产生加速度时,其内部的电极位置发生变化,就会反映到电容值的变化( $\Delta C$ ),该电容差值会传送给一枚接口芯片并由其输出电压值。因此三轴加速度传感器必然包含一个单纯的机械性传感器和一枚 ASIC 接口芯片两部分,前者内部有成群移动的电子,主要测量  $x$ 、 $y$  及  $z$  轴的区域,后者则将电容值的变化转换为电压输出。

加速度传感器在进入消费电子市场之前,实际上已被广泛应用于汽车电子领域,主要集中在车身操控、安全系统和导航,典型的应用如汽车安全气囊、ABS、电子稳定程序、电控悬挂系统等。

车身安全越来越得到人们的重视,汽车中安全气囊的数量越来越多,相应对传感器的要

求也越来越严格,如图 3-40 所示。整个气囊控制系统包括车身外的冲击传感器(安置于车门、车顶),前后座等位置的加速度传感器、电子控制器,以及安全气囊等。电子控制器通常为 16 位或 32 位 MCU,当车身受到撞击时,冲击传感器会在几微秒内将信号发送至该电子控制器;随后电子控制器会立即根据碰撞的强度、乘客数量及座椅/安全带的位置等参数,配合分布在整个车厢的传感器传回的数据进行计算并做出相应评估,并在最短的时间内通过电爆驱动器(squib driver)启动安全气囊,从而保证乘客的生命安全。除了车身安全系统这类重要应用以外,加速度传感器在导航系统中也扮演着重要角色。专家预测,便携式导航设备将成为中国市场的热点,其主要利于 GPS 卫星信号实现定位。而当 PND(便携式自动导航系统)进入卫星信号接收不良的区域或环境时,就会因失去信号而丧失导航功能。基于 MEMS 技术的三轴加速度传感器配合陀螺仪或电子罗盘等元件可创建方位推算系统,对 GPS 实现互补性应用。

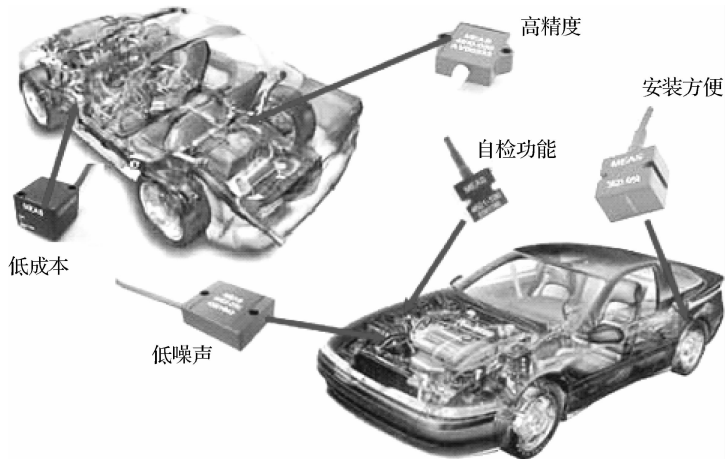


图 3-40 三轴加速度传感器在汽车中的应用

由于海量数据对存储方面的需求,硬盘和光驱等元器件被广泛应用到笔记本计算机、手机、数码相机、便携式 DVD、PMP 等设备中。便携式设备受其应用场合的影响,经常会意外跌落或受到碰撞,而造成对内部元器件的巨大冲击。

为了使设备及其中数据免受损伤,越来越多的用户对便携式设备的抗冲击能力提出要求。一般便携式产品的跌落高度为 1.2~1.3 m,其在撞击大理石质地面时会受到约 500 N 的冲击力。虽然良好的缓冲设计可由设备外壳或 PCB 来分解大部分冲击力,但硬盘等高速旋转的器件却在此类冲击下显得十分脆弱。如果在硬盘中置入三轴加速度传感器,当跌落发生时,系统会检测到加速的突然变化,并执行相应的自我保护操作,如关闭抗震性能差的电子或机械器件,从而避免其受损,或发生硬盘磁头损坏或刮伤盘片等可能造成数据永久丢失的情况。

三轴加速度传感器为传统消费及手持电子设备实现了革命性的创新空间。其可被安装在游戏手柄上,如图 3-41 所示,作为用户动作采集器来感知其手臂前后、左右和上下等的移动动作,并在游戏中转化为虚拟的场景动作如挥拳、挥球拍、跳跃、甩鱼竿等,把过去单纯的手指运动变成真正的肢体和身体的运动,实现以往按键操作所不能实现的临场游戏感和参与感。



图 3-41 游戏中的三轴加速度传感器

### 思考与练习

问题 1 电阻应变式传感器常用的转换电路有哪些？各有什么优缺点？

思考：

.....

.....

.....

.....

.....

问题 2 三轴加速度传感器有哪些种类？主要应用在哪些方面？

思考：

.....

.....

.....

.....

.....

### 课堂体验

#### 电阻应变片的认识与粘贴技术训练

##### 一、实验目的

- (1) 了解应变片的测量原理、结构和种类。
- (2) 掌握应变片的粘贴技术及质量检查与防潮方法。

## 二、实验原理

在机械工程测试技术中,广泛应用电阻应变片是因为它能准确地测量各种力参数。应变片的正确选取和粘贴质量的好坏,将直接影晌应变片的性能和测量的准确性。

### 1. 应变片的分类

应变片可分为金属式和半导体式两大类。金属式又可分为丝式、箔式和薄膜式;半导体式又可分为薄膜式和扩散式。

应变片根据基底材料的不同可分为纸基、胶基和金属片基等。

### 2. 基底材料

基底材料要满足如下要求:机械强度高,粘贴容易,电绝缘性好,热稳定性好,抗潮湿性能好,挠性好(能够粘贴在曲率半径很小的曲面上),无滞后和蠕变。

胶基是含有机聚合材料的薄片。

(1)酚醛、环氧树脂基底(箔式片居多),具有良好的耐热和防潮性能,使用温度达180℃,并且长时间稳定性好。

(2)聚酰亚胺基底,使用温度为-260~+400℃,绝缘性能好,因此可以做得很薄,通常为0.025mm,应变片的柔韧性好。

(3)石棉、玻璃纤维增强塑料做基底,主要在高温下使用。

### 3. 敏感元件材料

对敏感元件材料的要求:灵敏度 $K$ 在尽可能大的应变范围内是常数,且 $K$ 值尽可能大;具有足够的热稳定性;电阻率 $\rho$ 高且受温度变化的影响小;在一定的电阻值要求下,电阻系数越高,电阻丝的长度越短,因此可以减小电阻应变片的尺寸。

康铜的 $K$ 值对应变的稳定性非常好,不但在弹性变形的范围内 $K$ 保持常数,在进入塑性范围后 $K$ 仍基本上保持常数,故测量范围大。康铜具有足够小的电阻温度系数,使测量时因温度变化而引起的误差较小;康铜的电阻率 $\rho$ 很大,便于做成电阻值大而尺寸小的电阻应变片。我国制造的电阻应变片绝大部分以康铜为敏感材料。除康铜外还有镍铬铁合金、镍铬合金等。

### 4. 应变片的主要参数

#### 1) 几何尺寸

(1)基长 $l$ 。沿敏感栅金属丝轴线方向能承受应变的有效长度。

(2)基宽 $b$ 。与金属丝轴线垂直方向敏感外侧之间的距离。

#### 2) 电阻值

电阻值是指应变片既没有粘贴,又不受外力作用的条件下,在室温中测量的原始电阻值。目前,应变片的规格已成标准系列化,我国生产的应变片名义阻值一般为120 $\Omega$ ,此外还有60 $\Omega$ 、80 $\Omega$ 、240 $\Omega$ 等。

#### 3) 灵敏度

当应变片粘贴在试件上之后,在沿应变片轴线方向的单向载荷作用下,应变片的电阻变化率与被敏感栅覆盖下的试件表面上的轴向应变的比值称为应变片的灵敏度,用 $S$ 表示。

$$S = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon}$$

#### 4) 绝缘电阻

绝缘电阻指敏感栅与被测试件之间的电阻。

#### 5) 允许电流

当应变片接入测量电路后,敏感栅中流过一定的电流,使应变片产生温升,一般在静态测量中允许电流为 25 mA,在动态测量中允许电流为 75~100 mA。

### 三、实验仪器和设备

试件	1 个	数字万用表	1 块
应变片	1 枚	惠斯通电桥	1 台
KH-501(502)胶	1 瓶	画线针	1 枚
丙酮(滴瓶装)	1 瓶	放大镜	1 个
镊子	1 个	脱脂棉	若干
小螺丝刀	1 把	聚四氟乙烯薄膜	若干
钢板尺	1 把	细砂布	若干
高度尺	1 把	应变片样本	1 册

### 四、实验内容及步骤

仔细观察电阻应变片的样品,区别纸基、胶基等应变片及其结构,特别注意应变片在粘贴时的正反面区别。

#### 1. 应变片的选择

(1)根据试件大小、工作温度和受力情况,选取合适的应变片。

(2)用 5~10 倍的放大镜选择没有短路、断路、气泡等缺陷,并且表面平整、丝栅排列均匀的应变片。

(3)量出所选取应变片的阻值,使阻值相近的应变片放在一起,应保证同组各应变片的阻值差不超过  $0.5 \Omega$ ,这样在测量时容易调整平衡。

#### 2. 试件的表面处理与画线

##### 1) 预清洗

根据试件的表面状况进行预清洗,一般采用有机溶剂脱脂除渍。

##### 2) 除锈、粗化

一般采用砂布打磨法除掉试件表面的锈渍,使其露出新鲜的金属表层,以便使胶液充分浸润而提高粘贴强度。用细砂布沿着与所测应变轴线成  $45^\circ$  方向交叉轻度打磨,使试件表面呈细密、均匀新鲜的交叉网纹状,这样有利于充分传递应变,打磨面要大于应变片的面积,如图 3-42 所示。

##### 3) 画定位基准线

根据应变片尺寸,利用钢板尺、高度尺、画线针或硬质铅笔画出确定应变片粘贴位置的定位基准线。画线时,不要画到应变片覆盖范围内,如图 3-43 所示。

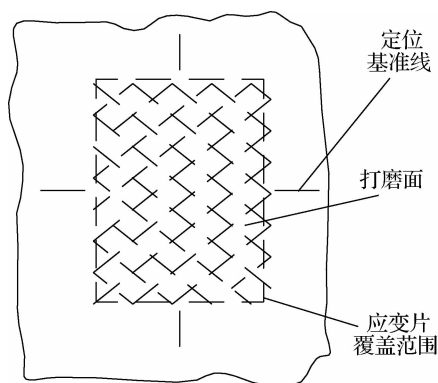


图 3-42 试件的打磨与定位

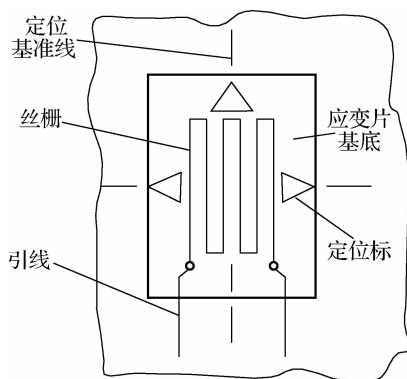


图 3-43 粘贴应变片后的试件

#### 4) 清洗

一般采用纯度较高的无水乙醇、丙酮等,用尖镊子夹持脱脂棉球蘸少量丙酮粗略地洗去打磨粉粒,然后用无污染的脱脂棉球蘸丙酮仔细地由里向外擦拭粘贴表面,擦一次后转换一个侧面再擦,棉球四面都用过后,更换新棉球用同样的方法擦洗,直到没有污物和油渍为止。应变片背面也要轻轻擦拭干净,干燥后待用。

#### 3. 粘贴

在无灰尘的条件下,用清洗过的小螺丝刀蘸取少量 KH-501(502)胶液,在清洗好的试件粘贴表面和应变片背面单方向涂上薄而均匀的一层胶液(单方向涂抹,以防产生气泡),放置少许时间,待涂胶的试件和应变片上胶液溶剂挥发还带有黏性时,将应变片涂胶一面与试件表面贴合,并注意应变片的定位标应与试件上的定位基准线对齐。在贴好的应变片上覆盖一层聚四氟乙烯薄膜并用手指单方向轻轻按压,将余胶和气泡挤出压平。手指按压时不要相对试件错动,按压 3~5 min 后,放在室温下固化待用。

#### 4. 接桥

(1)将干燥固化后的应变片用数字万用表检查有无短路、断路现象,并测出应变片与试件之间的绝缘电阻,长期测量大于  $500\text{ M}\Omega$ ,临时测量大于  $20\text{ M}\Omega$ 。本实验属于短期测量,达到  $20\sim 100\text{ M}\Omega$  以上即可。低于  $20\text{ M}\Omega$  将会严重影响到稳定性,达不到要求的应重新贴片。

(2)检查无误后,按图 3-44 所示焊接成半桥或全桥。

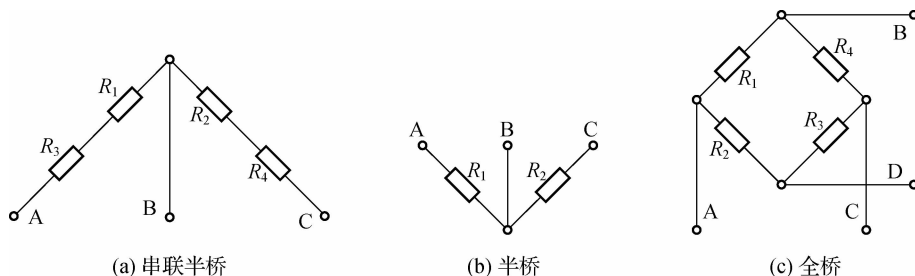


图 3-44 接桥

(3)用万用表检查绝缘及通路。

(4)用惠斯通电桥或数字万用表测量两臂(半桥:AB、BC)或两对角(全桥:AC、BD),检查其阻值是否大致相等,差值最好不超过  $0.5 \Omega$ ,否则应变仪不易调平衡。

### 五、密封、防潮

密封、防潮措施是为了保护粘贴后的应变片避免受到机械损坏,在使用过程中不受环境温度变化的影响,保持良好的绝缘性能。用石蜡涂料(石蜡 40%~45%、松香 30%~35%、凡士林 15%、机油少许)或其他密封涂料涂于试件表面,起到防水、防潮、绝缘作用。