

温度检测

教学目标

通过本章的学习,读者应理解温标这一概念以及各种测温方式及其原理。重点要掌握热电偶测温原理及其冷端温度补偿方法、热电阻桥路测温原理及其三线制连接方式,了解集成温度传感器和非接触式测温方法。

3.1 概述

温度是国际单位制(SI)7个基本物理量之一,是一个重要的物理量,也是工业生产过程中最常见、最基本的参数之一。物质的许多性质和现象都与温度有关,大多数物理、化学过程都要求在一定的温度条件下进行,温度的变化直接影响到生产的质量、产量、能耗和安全。因此,对温度进行准确的测量和可靠的控制,在生产过程和科学研究中均具有重要意义。

3.1.1 温度及其测量原理

温度是表征物体冷、热程度的物理量,是物体分子运动平均动能大小的标志。温度概念的建立和温度的定量测量都是以热平衡现象为基础的,当两个受热程度不同的物体相接触后,经过一段时间的热交换,达到共同的平衡状态后则具有相同的温度,这就是温度最本质的性质及测量原理。即温度不能直接测量,而是选择一个合适的物体作为温度传感元件,其某一物理性质(如尺寸、密度、硬度、弹性模量、辐射强度等)随温度而变化的特性为已知,通过温度传感元件与被测对象的热交换而测量出相关物性的变化,从而间接确定被测对象的温度。

为了客观地计量物体的温度,必须建立一个衡量温度高低的统一标准尺度,即温度标尺(简称温标)。

3.1.2 温标及其表示方法

建立温标就是规定温度的起点及其基本单位。建立现代的温标必须具备三个条件:①固定的温度点,物质在不同温度下会呈现固、液、气三相,利用物质的相平衡点可以作为温标的固定温度点,也称为基准点;②测温仪器,确定测温仪器的实质是确定测温质和测温量;③温标方程,用来确定各固定点之间任意温度值的数学关系式称为温标方程,也称为内插公式。

随着温度测量技术的发展,温标也经历了一个逐渐发展,不断修改和完善的渐进过程。从早期建立的一些经验温标,发展为后来的理想热力学温标和绝对气体温标,直到现今使用的具有较高精度的国际实用温标,其间经历了几百年时间。

1. 经验温标

由特定的测温质和测温量所确定的温标称为经验温标,它是用实验方法或经验公式所确定。历史上影响比较大、至今还沿用的两个经验温标是华氏温标和摄氏温标。

1) 华氏温标($^{\circ}\text{F}$)

1714 年德国人法勒海特(Fahrenheit)以水银的体积随温度而变化为依据,制成了玻璃水银温度计,并规定了氯化铵和冰的混合物的温度为温度计的 0 度,水的冰点为 32 度,水的沸点为 212 度,在冰点和沸点之间等分 180 份,每一份称为 1 华氏度,记作 1°F ,符号为 θ 。

2) 摄氏温标($^{\circ}\text{C}$)

1740 年瑞典人摄氏(Celsius)提出在标准大气压下,把水的冰点规定为 0 度,水的沸点规定为 100 度,在冰点和沸点之间等分 100 份,每一份称为 1 摄氏度,记作 1°C ,符号为 t 。

摄氏温标 t 和华氏温标 θ 的关系为

$$\theta(^{\circ}\text{F}) = 1.8t(^{\circ}\text{C}) + 32 \quad (3-1)$$

例如, 20°C 时的华氏温度 $\theta = 1.8 \times 20 + 32 = 68^{\circ}\text{F}$ 。西方国家在日常生活中普遍使用华氏温标。

这两种温标的温度特性依赖于所用测温物质的情况,如所用水银的纯度不尽相同,就不能保证测温量值的一致性。

2. 热力学温标

1848 年英国物理学家开尔文(Kelvin)提出将温度数值与理想热机的效率相联系,根据热力学第二定律来定义温度的数值,建立了一个与测温物质无关的温标——热力学温标。即把理想气体压力为零时对应的温度——绝对零度与水的三相点(固、液、气三相共存点)之间的温度分为 273.16 份,每一份称为 1 开尔文(Kelvin),记作 1K,符号为 T 。因此,热力学温标(又称开氏温标)从绝对零度起算,水的冰点为 273.15K,沸点为 373.15K。(注意:水的冰点和三相点是不一样的,两者相差 0.01K。)

热力学温标是理想的、纯理论的,人们无法得到开氏零度,因此不能直接根据它的定义来测量物体的开氏温度。因此需要建立一种实用的温标作为测量温度的标准,这就是国际实用温标。

3. 国际实用温标

国际计量委员会于 1927 年决定采用热力学温标作为国际温标,称为 1927 年国际温标(ITS-27)。以后几乎每 20 年做一次大的修改,如 1948 年国际温标(ITS-48)、1968 年国际实用温标(IPTS-68)和现在使用的 1990 年国际温标(ITS-90)。经过不断地改进,ITS-90 国际温标更符合热力学温标,且有更好的复现性和更方便的使用效果。ITS-90 主要有 3 方面内容。

1) 温度单位

热力学温度是其基本物理量,国际实用温度用符号 T_{90} 表示,单位仍为开尔文(K),K 的大小定义为水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。同时使用的国际摄氏温度的符号为 t_{90} ,单位是摄氏度($^{\circ}\text{C}$)。每一个摄氏度和每一个开尔文的量值相同。国际摄氏温度 $t_{90}(^{\circ}\text{C})$ 与国际实用温度 $T_{90}(\text{K})$ 的关系如同热力学温度 T 和摄氏温度 t 一样,即

$$t_{90}(^{\circ}\text{C}) = T_{90}(\text{K}) - 273.15 \quad (3-2)$$

2) 定义固定温度点

利用一系列纯物质各相间可复现的平衡状态或蒸汽压所建立起来的特征温度点,共有 17 个定义固定温度点。这些特征温度点的温度指定值是由国际上公认的最佳策略手段测定的。

3) 复现固定温度点的方法

把整个温度分为 4 个温区,各个温区的范围、使用的标准测温仪器分别为:

- 0.65~5.0K 间为³He 或⁴He 蒸汽压温度计；
- 3.0~24.5561K 间为³He 或⁴He 定容气体温度计；
- 13.8033K~961.78℃ 间为铂电阻温度计；
- 961.78℃ 以上为光学或光电高温计。

在使用中，一般在水的冰点以上的温度使用摄氏温度单位(℃)，在冰点以下的温度使用热力学温度单位(K)。

3.1.3 测温方式及其原理

温度测量方式有接触式测温和非接触式测温两大类。

采用接触式测温时，温度敏感元件与被测物接触，依靠传热和对流进行热交换，经过充分的热接触后两者温度相等，从而获得较高的测量精度。接触式测温的方法比较直观、可靠，测量仪表也比较简单。但也存在如下缺陷：在接触测温的过程中，有可能破坏被测对象的温度场，从而造成测量误差；有的测温元件不能和被测对象充分接触，不能达到充分的热平衡者达到热平衡的时间较长，因而产生测量滞后带来的误差；有的被测介质有强烈的腐蚀性，因而不能保证测温元件的可靠性和工作寿命；另外，受到耐高温材料的限制，接触式测量不能用于极高温的测量场合。

采用非接触式测温时，温度敏感元件不与被测物接触，而是利用物体的热辐射实现热交换，通过对辐射能量的检测实现温度测量的。非接触式测温方式不破坏温度场，测温响应快，可用于测量高温、运动的被测对象和有强电磁干扰、强腐蚀的场合。其缺点是：易受测温现场的粉尘、水汽等因素的影响而产生较大的测量误差，且结构复杂、价格比较昂贵。

温度检测方式的进一步细分及其测温原理如表 3-1 所示。本章将介绍自动化测控系统中几种常用的测温方式及仪表。

表 3-1 温度检测方式的分类

测温方式	类别	原 理	典型仪表	测温范围/℃
接触式测温	膨胀类	利用液体气体的热膨胀及物质的蒸气压变化	玻璃液体温度计	—100～600
			压力式温度计	—100～500
		利用两种金属的热膨胀差	双金属温度计	—80～600
	热电类	利用热电效应	热电偶	—200～1800
	电阻类	固体材料的电阻随温度而变化	铂热电阻	—260～850
			铜热电阻	—50～150
			热敏电阻	—50～300
	其他电学类	半导体器件的温度效应	集成温度传感器	—50～150
		晶体的固有频率随温度而变化	石英晶体温度计	—50～120
非接触式测温	光纤类	利用光纤的温度特性或作为传光介质	光纤温度传感器	—50～400
			光纤辐射温度计	200～4000
	辐射类	利用普朗克定律	光电高温计	800～3200
			辐射传感器	400～2000
			比色温度计	500～3200

3.2 热膨胀式测温

热膨胀式测温是基于物体热膨胀原理而制成的温度计,多用于现场测量及显示。可分为玻璃管液体温度计、双金属温度计和压力式温度计。

3.2.1 玻璃管液体温度计

1. 构成原理

如图 3-1(a)所示,玻璃管液体温度计由装有液体的玻璃温包、毛细管和刻度标尺三部分构成。它的测温原理是基于液体受热后体积发生膨胀的性质。常用的工作液体主要有水银和酒精,分别称为水银温度计和酒精温度计。

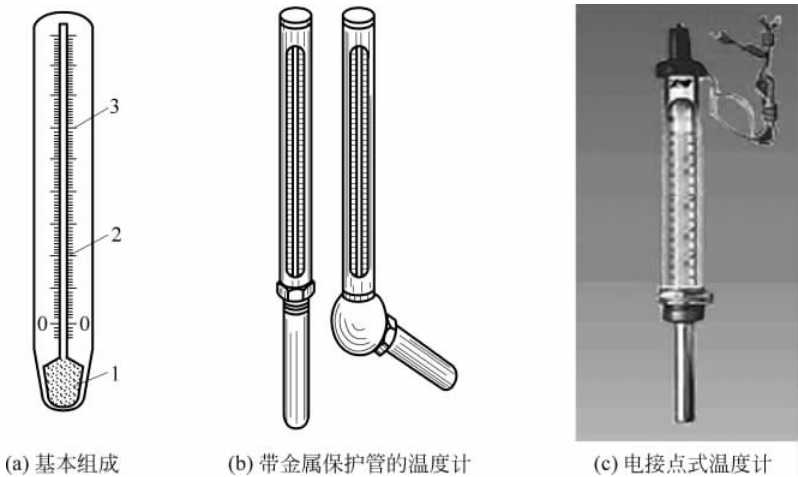


图 3-1 玻璃管液体温度计

1—玻璃温包; 2—毛细管; 3—刻度标尺

2. 性能特点

玻璃管液体温度计虽然易破损,测温值无法自动远传和记录,但由于其结构简单,制作容易,安装使用方便,测温范围较广,且精度高以及价格低廉等优点,在工业上仍然得到广泛的使用。

3. 分类应用

玻璃管液体温度计按照其准确度和用途可分为高精密、标准、工业用和专用温度计四类。按照其浸没方式可分为全浸式、局浸式和完全浸没(潜浸)式三种。

其中,工业用温度计的下部有直的、 90° 角的和 135° 角的。为了避免温度计在使用中被碰伤,在其外面通常罩有金属保护管,如图 3-1(b)所示。由于工业温度计在使用时是把下部全部插入被测介质中,所以在选用时必须考虑温度计下部的长度要适宜。还有一种电接点式温度计,如图 3-1(c)所示,它又分为固定接点和可调接点两种,当温度上升到规定值时,工作液体上升触碰到金属接点而形成闭合回路,就会通过引线使连接的信号器或中间继电器动作,从而完成控制温度的功能,因此这种温度计被广泛应用于恒温控制、信号和报警系统等自动装置之中。

3.2.2 双金属温度计

1. 测温原理及结构

双金属温度计是基于固体受热膨胀这一原理而制成的。它是把两种膨胀系数差异很大的金属薄片叠焊在一起，一端固定，另一端为自由端带动指针轴旋转，其结构与外形如图 3-2 所示。双金属温度计分别由指针 1、表壳 2、刻度盘 7、金属保护管 3、指针轴 4、双金属感温元件 5 和固定端 6 组成。

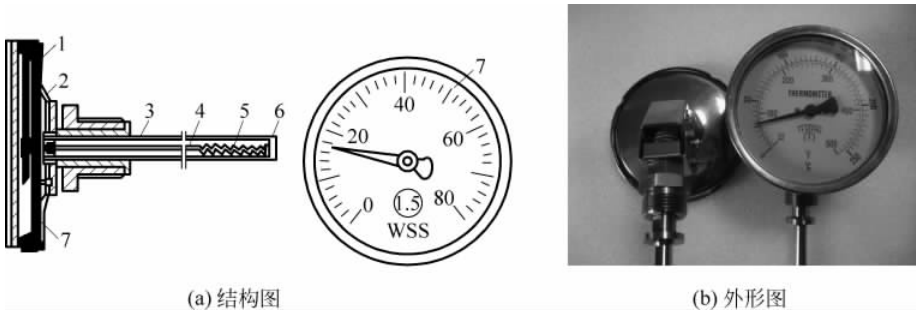


图 3-2 双金属温度计

1—指针；2—表壳；3—金属保护管；4—指针轴；5—双金属感温元件；6—固定端；7—刻度盘

双金属感温元件受热后由于两金属片的膨胀系数不同而产生弯曲变形，导致自由端产生位移。显然，温度越高自由端弯曲的角度越大，产生的位移量也越大。实际应用的双金属温度计是将双金属片制成螺旋形，以提高灵敏度，如图 3-3 所示。

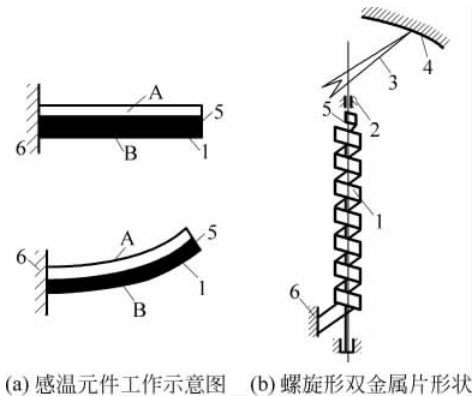


图 3-3 双金属片

1—双金属片；2—指针轴；3—指针；4—刻度盘；5—自由端；6—固定端

2. 性能特点

双金属温度计是目前在工业现场应用非常广泛的现场指示型仪表，不仅具有工业水银温度计的结构简单、成本低廉的优点，而且有坚固、耐用、耐震和读数指示明显等诸多优势，其缺点是精度不高、量程不易做得很小，因此特别适合震动和受冲击的应用场合。

3. 分类应用

根据用途和使用场合不同,双金属温度计可分为普通型、防爆型、电接点型等。防爆型用于现场可能存在易燃易爆混合物的危险场所,电接点型用于需要对温度进行超限报警的场合。作为感温元件的双金属片可以做成各种不同的形状,如 U 形、螺旋形、螺旋管形、直杆形等。

双金属温度计可将温度变化转变成机械量变化,这不仅仅用于温度的测量,还常常应用于温度的控制装置上,如温度继电器控制器、极值温度信号器、温度补偿器等。图 3-4 是一种双金属温度信号器的示意图。当温度变化时,双金属片 1 产生弯曲,且与调节螺钉 2 相接触使电路接通(3 为绝缘板),信号灯 4 发亮。如以继电器代替信号灯便可以用来控制电热丝而成为两位式温度调节器。温度的调节范围可通过改变调节螺钉 2 与双金属片 1 之间的距离来完成。

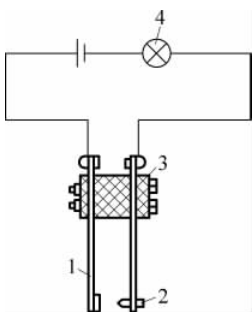


图 3-4 双金属温度信号器
1—双金属片；2—调节螺钉；
3—绝缘板；4—信号灯

3.2.3 压力式温度计

1. 测温原理及结构

压力式温度计根据封闭容器内气体、液体或低沸点液体的饱和蒸汽受热后压力发生变化的原理工作,由于是通过压力表来测量由温度引起的压力变化,故称之为压力式温度计。

压力式温度计由感温元件(温包)、传压管路(毛细管)和压力表三部分组成,如图 3-5 所示。温包是直接与被测介质接触的感温元件,因此要求其具有良好的导热性能,一定的机械强度、较小的膨胀系数及一定的抗腐蚀性能。毛细管用于传递压力的变化,其外径一般为 2.5mm 左右,内径为 0.4mm 左右,为防止毛细管损坏,可用金属软管或金属丝编织软管作保护套管。压力表用于测量压力的变化。在温度计内温包、毛细管和压力表的弹簧管构成一个封闭定容系统,其内充满感温介质。

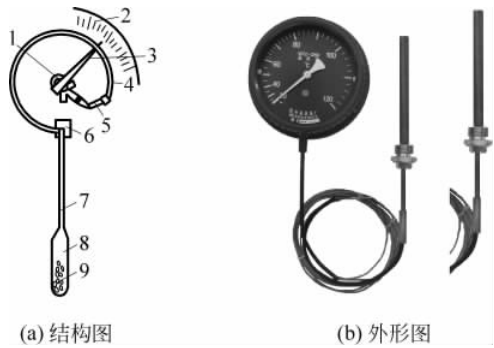


图 3-5 压力式温度计

1—传动机构；2—刻度盘；3—指针；4—弹簧管；5—连杆；6—接头；7—毛细管；8—温包；9—感温介质

测温时将温包置于被测介质中,当温度升高时,感温介质体积受热膨胀,但因处于封闭定容系统内而使体积膨胀受限,导致系统压力增大。该压力变化经毛细管传递给弹簧管使其产生一定的变形,再借助传动放大机构,带动指针偏转,指示出相应的温度值。

根据所用感温介质不同,压力式温度计可分为液体压力式温度计、气体压力式温度计和蒸汽压力式温度计。液体压力式温度计一般以水银、甲醇、二甲苯、甘油等作为感温介质,其测温范围为 $-50\sim 650^{\circ}\text{C}$;气体压力式温度计一般以氮气作为感温介质,其测温范围为 $-100\sim 500^{\circ}\text{C}$;蒸汽压力式温度计一般以丙酮、氯甲烷、氯乙烷、乙醚等低沸点液体作为感温介质,其测温范围为 $-20\sim 200^{\circ}\text{C}$ 。经过技术处理,市场上出现的各种压力式温度计的刻度都是线性的。

2. 特点及应用

压力式温度计适用于一定距离之内的液体、气体和蒸汽温度的测量,也常用于工业设备或汽车、拖拉机内的温度测量。其主要优点是结构简单、坚固耐振、价格低廉,缺点是测量准确度较低(1.0~2.5级)、滞后较大。在使用过程中应注意以下问题。

(1) 压力式温度计应在规定的测量范围、环境温度和湿度下使用,使用时温包应全部浸入被测介质中。

(2) 压力式温度计的毛细管容易被折断或渗漏,除加保护套管外,在安装时要注意其弯曲半径不要小于 50mm,并避开高温热源。

(3) 当液体压力式温度计的温包和表头不在同一水平面上时,两者间的液柱静压差会产生附加系统误差,因此需对温度计进行调零或数值修正。

(4) 蒸汽压力式温度计在使用过程中,当周围环境温度常低于被测温度时,应考虑蒸气在毛细管和弹簧管内冷凝所产生的液柱静压对测量带来的影响。

3.3 热电偶测温

热电偶是一种将温度变化转换为热电势变化的测温器件,是目前接触式热电测温中普遍使用的一种温度传感器,其主要优点是测温范围广,可以在 $1\text{K}\sim 2800^{\circ}\text{C}$ 的范围内使用,而且精度高,性能稳定,结构简单,动态性能好,能够把温度直接转换为电势信号便于信号的处理和远传。

3.3.1 热电偶测温原理

热电偶的测温原理基于热电效应。

1. 热电效应

两种不同材料的金属 A 和 B 构成一个闭合回路,当两个接触端温度不同时(设 $T>T_0$),回路中会产生热电势 $E_{AB}(T, T_0)$,如图 3-6 所示。这种把热能转换成电能的物理现象称为热电效应。其中,这两种不同材料的导体组成的回路称为热电偶,导体 A、B 称为热电极,置于测温场感受被测温度的 T 端称为热端(工作端或测量端),另一个 T_0 端称为冷端(自由端或参比端)。热电偶产生的总的热电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 是由接触电势和温差电势两部分组成。

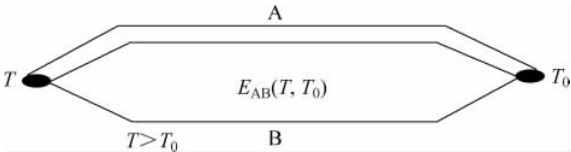


图 3-6 热电偶的热电效应

2. 接触电势

将两种不同的金属 A 和 B 相互接触时,在其接触处会发生自由电子的扩散现象,如图 3-7(a)所示。自由电子会从密度大的金属 A 扩散到密度小的金属 B 中,使 A 失去电子带正电为正极, B 得到电子带负电为负极,直至在接触处形成强大的正负电场,并阻止电子的继续扩散,从而达到动态平衡为止。其接触处就形成一定的电位差,此即接触电势(也叫帕尔帖电势)。其大小可表示为

$$e_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (3-3)$$

式中: $e_{AB}(T)$ 为金属电极 A 和电极 B 在温度为 T 时的接触电势; k 为波尔兹曼常数; T 为接触处的热力学温度; e 为单位电荷量; N_A, N_B 为金属电极 A 和 B 的自由电子密度。

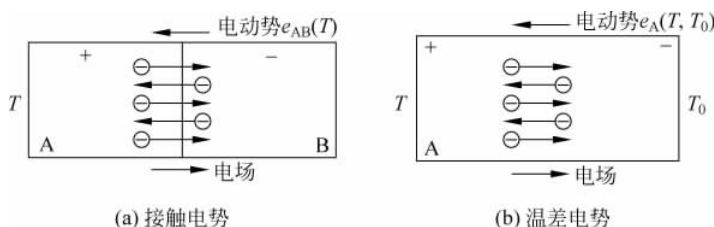


图 3-7 热电偶热电势的形成

3. 温差电势

同一种金属材料如 A, 当其两端的温度不同即 $T > T_0$ 时, 两端的电子能量就不同。温度高的一端电子能量大, 则电子从高温端向低温端扩散的多而返回的少, 最后达到平衡。这样在 A 的两端形成一定的电位差, 即温差电势(也叫汤姆逊电势), 如图 3-7(b)所示。其大小可表示为

$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \delta dT \quad (3-4)$$

式中: $e_A(T, T_0)$ 为 A 材料在两端温度分别为 T 和 T_0 时的温差电势; δ 为汤姆逊系数, 表示温差为 1 时所产生的电势值, 大小与材料的性质有关。

4. 总热电势

在导体 A 和 B 组成的热电偶回路中, 两接触端的温度分别为 T 和 T_0 , 且 $T > T_0$, 则回路的总热电势由两个接触电势 $e_{AB}(T)$ 、 $e_{AB}(T_0)$ 和两个温差电势 $e_A(T, T_0)$ 、 $e_B(T, T_0)$ 组成, 如图 3-8 所示, 图中的箭头表示电势方向(由负指向正)。

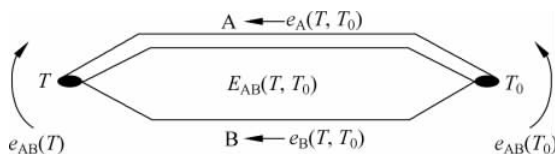


图 3-8 热电偶的总热电势大小和方向

取 $e_{AB}(T)$ 的方向为正方向, 写出总热电势的方程为

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= e_{AB}(T) - e_A(T, T_0) - e_{AB}(T_0) + e_B(T, T_0) \\ &= [e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0)] - [e_A(T, T_0) - e_B(T, T_0)] \end{aligned}$$

$$= \frac{k}{e}(T - T_0) \ln \frac{N_A}{N_B} - \int_{T_0}^T (\delta_A - \delta_B) dT \quad (3-5)$$

从式(3-5)可以看出,若电极 A 和 B 为同一种材料,即 $N_A = N_B$, $\delta_A = \delta_B$,则 $E_{AB}(T, T_0) = 0$; 若热电偶两端处于同一温度下,即 $T = T_0$,也有 $E_{AB}(T, T_0) = 0$ 。因此,热电势存在必须具备两个条件:一是由两种不同的金属材料组成热电偶,二是其两端接触点存在温差,而且温差越大,热电势越大。也就是说,热电偶热电势的大小,只与导体 A、B 的材质有关,与冷、热端的温度有关,而与导体的粗细、长短及两导体接触面积无关。

实践证明,在热电偶回路中起主要作用的是两个接触处的接触电势,而两个电极温差电势的差值很小而忽略不计的话,则有更简洁的工程表达式

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad (3-6)$$

该式清楚地说明,如果热电偶冷端温度 T_0 保持恒定时,热电偶的热电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 就只与被测温度 T 成单值函数关系。根据国际温标规定, $T_0 = 0^\circ\text{C}$ 时,用实验方法测出各种热电偶在不同工作温度下所产生热电势的值列成的表格,称为分度表。

如果以摄氏温度为单位, $E_{AB}(T, T_0)$ 也可以写成 $E_{AB}(t, t_0)$,其物理意义略有不同,但热电势的数值是相同的。

3.3.2 热电偶的应用定则

热电偶在实际测量温度时,需要依据相应的应用定则。

1. 均质导体定则

由一种均质导体所组成的闭合回路,不论导体的截面积如何及导体的各处温度分布如何,都不能产生热电势,此即均质导体定则。而如果产生热电势,则是因为导体材质不均匀又处于不均匀的温度场中所产生的“接触电势”。因此,如果热电偶的热电极是非均匀材质,就会在不均匀的温度场中测温时产生额外的测量误差。所以热电极材质的均匀性是衡量热电偶质量的重要技术指标之一。

2. 中间导体定则

在热电偶回路中,冷端处断开接入与 A、B 电极不同的另一种导体 C 时,只要这个中间导体 C 的两端温度相同,热电偶回路的总热电势值不会受中间导体接入的影响,此为中间导体定则。

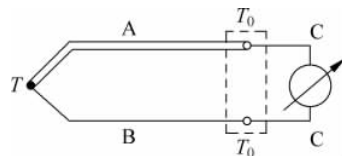


图 3-9 接入第三种导体的热电偶

如图 3-9 所示为热电偶接入中间导体 C 的情况。此时热电偶回路的总热电势为

$$E_{ABCC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{CA}(T_0) + e_{BC}(T_0) \quad (3-7)$$

当回路中各接点温度相等且都为 T_0 时,总热电势为零,即

$$e_{AB}(T_0) + e_{CA}(T_0) + e_{BC}(T_0) = 0$$

则有

$$e_{CA}(T_0) + e_{BC}(T_0) = -e_{AB}(T_0)$$

故可以得到

$$E_{ABCC}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = E_{AB}(T, T_0) \quad (3-8)$$

同理,还可以加入第四种、第五种导体,只要加入导体的两端接点温度相等,回路的总热电势就与原回路的电势值相等。正是根据这一定则,才可以在热电偶测温回路中接入各种

仪表、连接导线和接插件等。

3. 中间温度定则

如图 3-10 所示,在热电偶回路中,如果在热电极 A 和 B 的两端温度 T, T_0 之外,还存在一个中间温度 T_n 的话,则回路的总热电势可以表示为热电偶在接点温度为 T, T_n 和 T_n, T_0 时热电势的代数和,此即中间温度定则。其表达式为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (3-9)$$

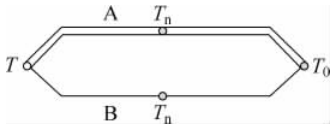


图 3-10 采用中间温度的热电偶

中间温度定则为在热电偶回路中应用补偿导线提供了理论依据,也为制定和使用热电偶分度表奠定了基础。各种热电偶的分度表都是在冷端温度为 0°C 时制成的,如果在实际测温过程中热电偶冷端温度不为 0°C 而是某一中间温度 T_n ,这时仪表的测量值只是 $E_{AB}(T, T_n)$ 而不是与热端温度 T 成对应关系的热电势 $E_{AB}(T, T_0)$,因此需要补上 $E_{AB}(T_n, T_0)$ 。结合分度表,令 $T_0 = 0^\circ\text{C}$,则式(3-9)变为

$$E_{AB}(T, 0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, 0)$$

或

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_n) + E_{AB}(t_n, 0) \quad (3-10)$$

式中: $E_{AB}(t, t_n)$ 为仪表的测量值,而 $E_{AB}(t_n, 0)$ 可以通过分度表查得。获得的 $E_{AB}(t, 0)$ 再通过反查分度表获得被测对象的实际温度值 t ,见后面的例 3-1。

3.3.3 常用热电偶种类

常用热电偶可分为标准化热电偶和非标准热电偶两大类。所谓标准化热电偶是指国家标准规定了其热电势与温度之间的关系、允许误差,有统一的标准分度表的热电偶,且有与其配套的显示仪表;非标准热电偶在使用范围或数量级方面均不及标准化热电偶,也没有统一的分度表,主要用于某些特殊场合的需要。这里主要介绍标准化热电偶。

1. 标准化热电偶

在工业生产中,并不是任意两种不同的金属材料就可以成为热电偶的热电极材料,它必须具备以下性能:

- (1) 优良的热电特性,即热电势率(灵敏度)要大,热电关系接近线性,复现性好,不随时间和被测介质变化;
- (2) 电导率高,电阻温度系数小;
- (3) 物理、化学性能稳定,不易氧化和腐蚀,耐辐射;
- (4) 优良的机械性能,机械强度高有韧性,材质均匀,易于加工成丝;
- (5) 制造成本低,价值比较便宜。

我国的热电偶制造,从 1991 年起便采用了国际计量委员会规定的 1990 年国际温标(简称 ITS-90)的新标准。表 3-2 给出了 8 种常用的标准热电偶及其性能特点。

表 3-2 标准热电偶及其主要性能

热电偶名称	分度号	$E(100,0)$ (mV)	测温范围(℃)		性能特点
			长期使用	短期使用	
铂铑 ₁₀ —铂 ^①	S	0.646	0~1300	1600	热电特性稳定,测温范围广,测温精度高,热电势小,线性差且价格贵。可作为基准热偶和用于精密测量
铂铑 ₁₃ —铂	R	0.647	0~1300	1600	与 S 型热电偶性能几乎相同,只是热电势大 15%
铂铑 ₃₀ —铂铑 ₆	B	0.033	0~1600	1800	稳定性好,在冷端低于 100℃ 时不用考虑温度补偿问题,热电势小,线性较差,价格贵,寿命远高于 S 型热偶
镍铬—镍硅	K	4.096	0~1200	1300	热电势较大,线性好,性能稳定,价格较便宜,抗氧化性强,广泛应用于中高温测量
镍铬硅—镍硅	N	2.774	-200~1200	1300	高温稳定性及使用寿命较 K 型有成倍提高,与 S 型热偶相近,其价格仅为 S 型的 1/10,有全面代替贱金属热电偶和部分代替 S 型热偶的趋势
铜—铜镍(康铜)	T	4.279	-200~350	400	准确度高,价格便宜,广泛用于低温测量
镍铬—铜镍(康铜)	E	6.319	-200~760	850	热电势大,中低温稳定性好,耐磨蚀,价格便宜,应用于中低温测量
铁—铜镍(康铜)	J	5.269	-40~600	750	价格最便宜,耐 H ₂ 和 CO ₂ 气体腐蚀;在含碳或铁的条件下使用也很稳定,适用于化工生产过程的低温域测量

① 铂铑₁₀表示该合金含 90% 的铂及 10% 的铑,以下同。

表 3-2 所列热电偶中,写在前面的热电极为正极,写在后面的热电极为负极。各种标准热电偶的热电势与温度的对应关系可以从热电偶分度表中查得。

2. 热电偶分度表

根据国际温标规定,参比端温度 $t_0=0^{\circ}\text{C}$ 时,用实验方法测出各种热电偶在不同的工作温度下所产生的热电势值,列成一张表格称为分度表,见附录 A。

图 3-11 示出了几种常用热电偶的热电势与温度之间的关系曲线。从图中曲线或分度表中可以得到以下结论:

- (1) 不同型号热电偶的热电势有较大差别,B 型热电势小,E 型热电势最大;
- (2) 热电势是温度的升值函数,其关系为非线性;
- (3) 在 $t=0^{\circ}\text{C}$ 时,它们的热电势均为零;
- (4) 当冷端温度 $t_0\neq 0^{\circ}\text{C}$ 时,需要先补偿电势,再查表获得温度:

$$E(t,0) = E(t,t_0) + E(t_0,0)$$

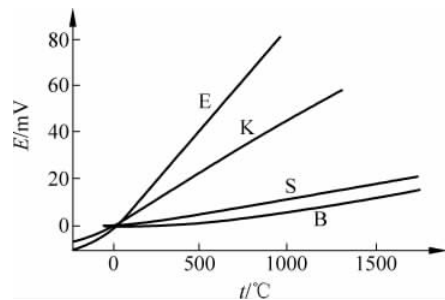


图 3-11 热电偶的热电特性曲线

3.3.4 热电偶的冷端温度补偿

由热电偶测温公式可知,只有在热电偶冷端温度恒定的条件下,热电势才是测量端 t 的单值函数,而且各种热电偶的温度与热电势关系的分度表(热电曲线)都是在冷端温度为 0°C 时得到的,而与热电偶配套使用的显示仪表也是基于热电偶冷端温度为 0°C 时标定的。所以用热电偶测温必须满足其冷端温度为 0°C 的条件,但实际应用中,冷端温度常不为 0°C ,为此必须进行相应的冷端温度补偿。以下介绍几种冷端温度补偿的方法。

1. 补偿导线法

当热电偶冷端处在温度波动较大的地方时,必须首先使用一种廉价的专用导线将冷端延伸到远离热源或环境温度稳定的地方,再考虑将冷端处理或补偿为 0°C 。这种专用的补偿导线在 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,具有与所连接热电偶相同的热电特性,因而它既能保证热电偶冷端温度保持不变,又经济廉价。

补偿导线由合金丝、绝缘层、屏蔽层和护套组成,其结构组成及其延长热电偶冷端的接线如图 3-12 所示。

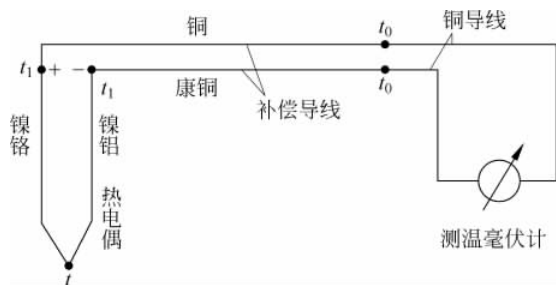


图 3-12 补偿导线结构及其接线图

补偿导线又分为延长型和补偿型两种。延长型补偿导线合金丝的化学成分及热电势标称值与配用的热电偶相同,用字母“X”附在热电偶分度号后表示;补偿型补偿导线合金丝的化学成分与配用的热电偶不同,但其热电势值在 100°C 以下时与配用的热电偶热电势标称值相同,用字母“C”附在热电偶分度号后表示。常用热电偶补偿导线的型号、线芯材质和绝缘层着色如表 3-3 所示。

表 3-3 常用热电偶的补偿导线

补偿导线型号	配用热电偶型号	补偿导线		绝缘层颜色	
		正极	负极	正极	负极
SC	S	SPC(铜)	SNC(铜镍)	红	绿
KC	K	KPC(铜)	KNC(康铜)	红	蓝
KX	K	KPX(镍铬)	KNX(镍硅)	红	黑
EX	E	EPX(镍铬)	ENX(铜镍)	红	棕

使用补偿导线要注意以下问题：

- (1) 补偿导线只能在规定的范围内(一般为 0~100℃)与热电势相等或相近；
- (2) 不同型号的热电偶有不同的补偿导线；
- (3) 热电偶和补偿导线的两个接点处要保持同温度；
- (4) 补偿导线有正负极，需分别与热电偶的正负极相连；
- (5) 补偿导线作用只是延伸热电偶的冷端，当延长后的冷端温度仍不为 0℃时，还需进行其他补偿与修正。

2. 冰点恒温法

将热电偶冷端置于装有冰水混合物的恒温容器中，使冷端温度始终恒定保持为 0℃，如图 3-13 所示。

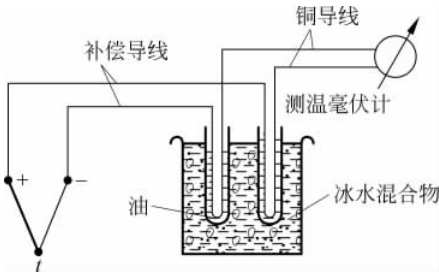


图 3-13 热电偶冷端冰点恒温法

此法也称冷端冰浴法，它彻底消除了冷端温度 t_0 不等于 0℃ 而引起的误差。但由于冰较易融化，且恒温容器也不适宜放置在工业生产现场，故此冰浴法只适用于实验室中的精确测量和检定热电偶时使用。

3. 计算修正法

当热电偶冷端温度即环境温度 $t_0 \neq 0^\circ\text{C}$ 时(一般情形下 $t_0 > 0^\circ\text{C}$)，这时仪表测量出的回路热电势 $E(t, t_0)$ 与冷端为 0℃ 时所测得的热电势 $E(t, 0)$ 不等，即 $E(t, t_0) < E(t, 0)$ 。因此，必须加上环境温度 t_0 与冰点 0℃ 之间温差所产生的热电势后才能符合热电偶测温公式或分度表。计算修正公式即是根据中间温度定则得到的式(3-10)：

$$E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0)$$

【例 3-1】 用 K 型热电偶测炉温时，测得冷端温度 $t_0 = 38^\circ\text{C}$ ，测得测量端和冷端间的热电势 $E(t, 38) = 29.90\text{mV}$ ，试求实际炉温。

解： 这里的冷端温度 t_0 即是中间温度 t_n ，由 K 型热电偶分度表查得 $E(38, 0) = 1.529\text{mV}$ ，由式(3-10)可得

$$\begin{aligned} E(t, 0) &= E(t, t_0) + E(t_0, 0) = E(t, 38) + E(38, 0) \\ &= 29.90 + 1.529 = 31.429 \text{ mV} \end{aligned}$$

再反查 K 型分度表, 由 31.429mV 查得实际炉温 $t=755^{\circ}\text{C}$ 。

由于热电偶所产生的热电势与温度之间的关系是非线性的, 因此在冷端温度不为零时, 将所测得热电势对应的温度值加上冷端的温度, 并不等于实际的被测温度。冷端温度的计算修正曲线如图 3-14 所示。

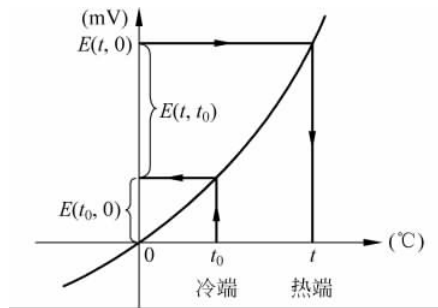


图 3-14 冷端温度的计算修正曲线

若按热电动势 $E(t, 38)=29.90\text{mV}$ 直接查 K 型分度表得对应的炉温 718°C , 与实际炉温 755°C 相差 37°C , 由此产生的相对误差约为 5%。

4. 补偿电桥法

利用直流不平衡电桥产生的相应电势, 来补偿热电偶因冷端温度变化而引起的热电势变化值, 此即热电偶的冷端电桥补偿原理, 如图 3-15 所示。

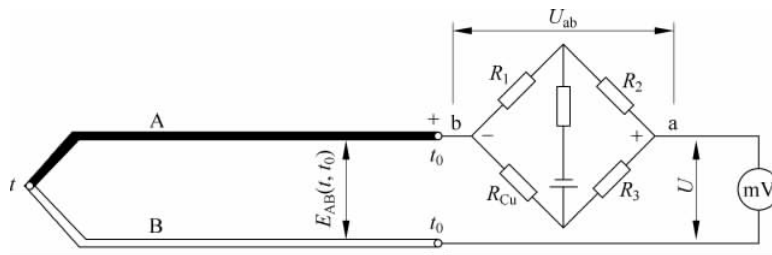


图 3-15 冷端温度补偿电桥原理

在热电偶冷端串联一个由热电阻构成的电桥, 电桥的三个桥臂为锰铜丝绕制的不随温度变化的标准电阻, 另有一个桥臂由随温度变化的铜电阻 R_{Cu} 构成。工作时把(电桥)铜电阻 R_{Cu} 置于冷端温度 t_0 处, 当冷端温度 t_0 变化(例如升高), 热电偶产生的热电势也将变化(减小), 而此时串联电桥中的铜电阻 R_{Cu} 阻值也将变化并使电桥两端的电压 U_{ab} 也发生变化(升高)。如果参数选择得当, 串联电桥产生的电压变化 U_{ab} 正好与热电偶因冷端温度变化而变化的热电势量 $E_{\text{AB}}(t_0, 0)$ 相等, 整个热电偶测量回路的总输出电压(电势) U 正好真实反映了所测量温度 t 的热电势值 $E_{\text{AB}}(t, 0)$ 。

这个补偿原理用公式来表达即

$$\begin{aligned} E_{\text{AB}}(t, 0) &= E_{\text{AB}}(t, t_0) + E_{\text{AB}}(t_0, 0) \\ U &= E_{\text{AB}}(t, t_0) + U_{\text{ab}} \end{aligned}$$

当

$$U_{ab} = E_{AB}(t_0, 0)$$

则有

$$U = E_{AB}(t, 0)$$

在设计时一般使铜电阻 R_{Cu} 的阻值在 0°C (或 20°C) 时等于 R_1 、 R_2 、 R_3 , 则此温度下电桥处于平衡状态, 即 $U_{ab}=0\text{mV}$, 电桥对仪表测量的读数无影响。使用时必须把测量仪表的机械零位调到 0°C (或 20°C)。

这种补偿电桥装置已形成了产品, 简称为补偿器。选用补偿器时应与所使用热电偶型号一一对应。

3.3.5 热电偶的结构

为保证热电偶的正常工作, 热电偶的两极之间以及与保护套管之间都需要良好的电绝缘, 而且耐高温、耐腐蚀和耐冲击的外保护套管也是必不可少的。据此, 热电偶的结构有如下三种。

1. 装配式热电偶

装配式热电偶主要用于测量气体、蒸汽和液体等介质的温度。这类热电偶已做成标准形式, 其中包括有棒形、角形、锥形等。从安装固定方式来看, 有固定法兰式、活动法兰式、固定螺纹式、焊接固定式和无专门固定式等几种。装配式热电偶主要由接线盒、保护管、接线端子、绝缘瓷珠和热电极组成基本结构, 并配以各种安装固定装置组成。如图 3-16 所示为活动法兰式和螺栓安装式

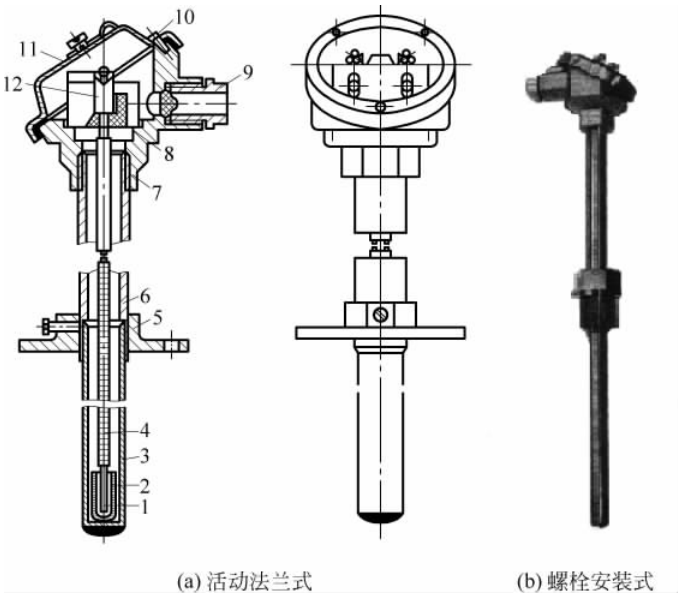


图 3-16 装配式热电偶结构

1—热电偶工作端; 2—绝缘套; 3—下保护套管; 4—绝缘珠管; 5—固定法兰; 6—上保护套管;
7—接线盒底座; 8—接线绝缘座; 9—引出线套管; 10—固定螺钉; 11—接线盒外罩; 12—接线柱

2. 铠装式热电偶

铠装式热电偶是由金属保护套管、绝缘材料和热电极三者组合成一体的特殊结构的热电偶。它是在薄壁金属套管(金属铠)中装入热电极,在两根热电极之间及热电极与管壁之间牢固充填无机绝缘物(MgO 或 Al_2O_3),使它们之间相互绝缘,使热电极与金属铠成为一个整体。它可以做得很细很长,而且可以弯曲。热电偶的套管外径最细能达 0.25mm,长度可达 100m 以上。它的外形和断面如图 3-17 所示。

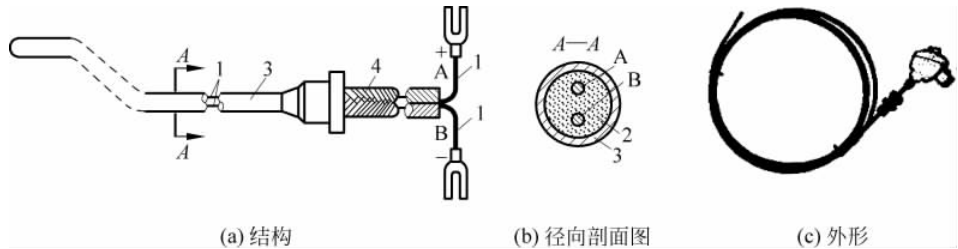


图 3-17 铠装式热电偶

1—内电极; 2—绝缘材料; 3—薄壁金属保护套管; 4—屏蔽层

铠装式热电偶具有响应速度快、可靠性好、耐冲击、比较柔软、可绕性好、便于安装等优点,因此特别适用于复杂结构(如狭小弯曲管道内)的温度测量。

3. 薄膜式热电偶

薄膜式热电偶如图 3-18 所示。它是用真空蒸镀、离子镀或磁控溅射的方法,把热电极材料蒸镀在很薄的绝缘基板(陶瓷片)上,两种不同的金属薄膜形成了热电偶。测量端既小又薄,厚度为 $0.01\sim 0.1\mu m$,热容量小,响应速度快,便于敷贴。适用于测量微小面积上的瞬变温度。薄膜式热电偶的测温上限可达 $1000^{\circ}C$,时间常数可小于 1ms,因而热惯性小反应快,可用于测量瞬变的表面温度和微小面积上的温度。它的结构有片状、针状和把热电极材料直接蒸镀在被测表面上等三种。所用的电极类型有铁-锰白铜、镍铬-锰白铜、铁-镍、铜-锰白铜、镍铬-镍硅、铂铑-铂、铱-铑、镍-铂、钨-铼等。

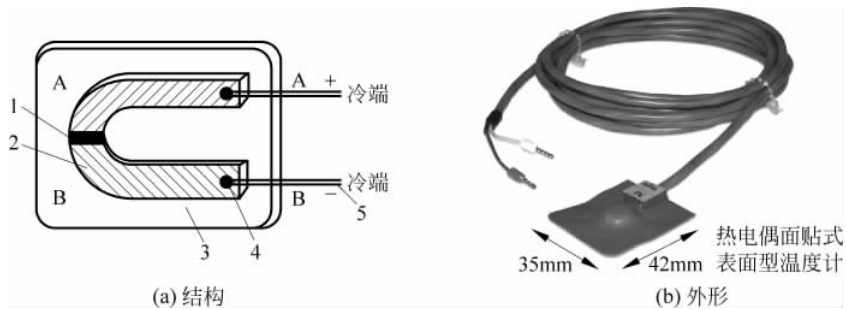


图 3-18 薄膜式热电偶

1—工作端; 2—薄膜热电极; 3—绝缘基板; 4—引脚接头; 5—引出线(材质与热电极相同)

除以上所述之外,尚有专门用来测量各种固体表面温度的表面热电偶,专门为测量钢水和其他熔融金属而设计的快速热电偶等。

3.3.6 热电偶的测温回路

在实际应用中,热电偶的测温回路是由热电偶、补偿导线、冷端补偿器、连接铜线、测量显示仪表等组成的。根据不同工艺要求,其连接电路可以有基本方式、正向串联方式、反向串联方式和并联方式 4 种,如图 3-19 所示。

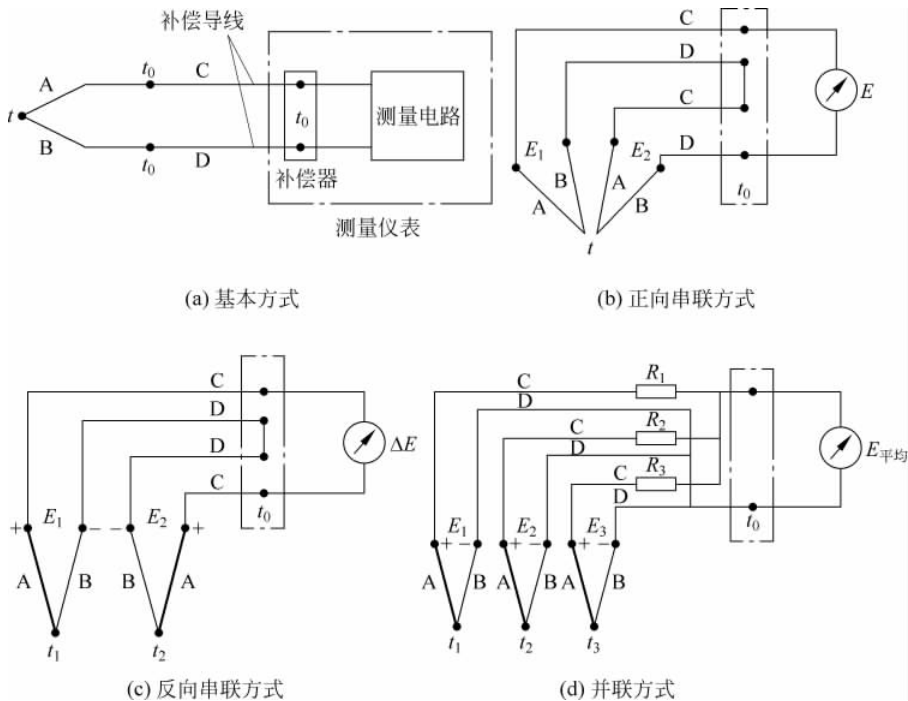


图 3-19 热电偶测温回路的 4 种连接方式

多数工况是对单点测温,常用基本方式;当需要测量热电堆低温或温度变化很小场合时,则用正向串联方式,此时 $E_T = E_{AB}(t, t_0) + E_{AB}(t, t_0) = 2E_{AB}(t, t_0)$; 当需要测量两点间温差($t_1 - t_2$)时,则用反向串联方式,此时 $\Delta E = E(t_1, t_0) - E(t_2, t_0) = E(t_1, t_2)$; 当需要测量几个点的平均温度时,则用并联方式,此时 $E_T = \frac{1}{3}[E_{AB}(t_1, t_0) + E_{AB}(t_2, t_0) + E_{AB}(t_3, t_0)]$ 。

这里要注意的是,当采用多个热电偶的连接方式时,这多只热电偶必须型号相同,而且热电势与温度关系尽量接近为线性,还有它们的冷端温度必须相同。

3.4 热电阻测温

热电阻是一种将温度变化转换为电阻变化的测温器件,也是目前接触式热电测温中普遍使用的一种温度传感器。

3.4.1 热电阻测温原理

热电阻的测温原理是基于热阻效应,即利用金属导体或半导体的电阻值随温度变化而变化的特性来进行温度测量的。它的最大特点是测量精度高,尤其是在 500°C 以下温度时,

它的输出信号比热电偶大得多,不仅灵敏度高,而且稳定性好。因此,在国际实用温标中规定 13.8K~670.74℃之间均采用铂热电阻作为基准仪表,被广泛应用于实验室的精密测量。由于热电阻温度计输出为电信号,便于处理和远传,无须考虑冷端温度补偿,且结构简单,互换性好,所以在中低温区域(−200℃~650℃)测量中得到广泛应用。其缺点是需要电源激励,有自热现象,影响测量精度。

热电阻温度计以热电阻为感温元件,并配以相应的显示仪表和连接导线所组成。需要注意的是:为了防止连接导线过长时,导线的阻值将随环境温度变化而变化给测量带来的附加误差,热电阻连接导线一般采用三线制接法。

3.4.2 常用热电阻种类

尽管许多金属的阻值都随温度而变化,但它们并不都适合做理想的热电阻材料。一般对热电阻的制作材料有如下要求:电阻温度系数要大,以便提高热电阻的灵敏度;电阻率尽可能大,以便在相同灵敏度下减小电阻体尺寸;热容量要小,以便提高热电阻的响应速度;在整个测量温度范围内,应具有稳定的物理和化学性质,电阻值随温度的变化关系最好接近于线性;应具有良好的可加工性与复制性;且价格便宜。

目前工业中常用的热电阻制作材料主要有铂、铜、镍及半导体热敏电阻。其主要性能如表 3-4 所示。

表 3-4 常用热电阻的主要性能

材质	分度号	0℃时的电阻值 $R_0(\Omega)$		测温范围(℃)
		名义值	允许误差	
铜	Cu50	50	± 0.1	−50~+150
	Cu100	100	± 0.1	
铂	Pt10	10	A 级 ± 0.006 B 级 ± 0.012	−200~+850
	Pt100	100	A 级 ± 0.006 B 级 ± 0.012	
镍	Ni100	100	± 0.1	−50~+180
	Ni300	300	± 0.3	
	Ni500	500	± 0.5	

1. 铂电阻

金属铂是一种理想的热电阻材料。铂容易提纯,其物理、化学性能在高温和氧化性介质中很稳定,在很宽的温度范围内都保持良好的性能,且测温精度高,所以它能用作工业测温元件和作为温度标准。

铂电阻阻值与温度变化之间的关系可以近似用下式表示:

在 0~650℃ 温度范围内

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \tag{3-11}$$

在 −200~0℃ 温度范围内

$$R_t = R_0[(1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3)] \tag{3-12}$$

式中: R_0 、 R_t 分别为铂电阻在 0℃ 和 t ℃ 时的电阻值; A 、 B 、 C 为常数, $A = 3.96847 \times$

$10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, $B = -5.847 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$, $C = -4.22 \times 10^{-12}/^{\circ}\text{C}^3$ 。

可以看出,它们的高次项很小,铂电阻在 $0 \sim 100^{\circ}\text{C}$ 时的最大非线性偏差小于 0.5°C 。

工业上常用的标准化铂电阻有两种,其公称电阻分别为 10Ω 和 100Ω ,即 $R_0 = 10\Omega$,对应分度号为 Pt10; $R_0 = 100\Omega$,对应分度号为 Pt100。

各种热电阻的电阻值与温度之间的对应关系参见各自相关的分度表。在实际测量中,只要测得铂热电阻的阻值,便可从分度表中查出对应的温度值。

2. 铜电阻

由于铂为贵金属,一般在测量精度要求不高和测温范围较小时,可采用铜电阻。金属铜易加工提纯,价格便宜,互换性好,电阻温度系数大,且在使用范围内线性关系好。其缺点是电阻率小,体积大,热响应慢,机械性能较差。

铜电阻的使用温度范围为 $-50 \sim +150^{\circ}\text{C}$,其电阻值与温度变化之间的关系是线性的。即

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (3-13)$$

式中: R_0 、 R_t 分别为铜电阻在 0°C 和 $t^{\circ}\text{C}$ 时的电阻值; α 为铜电阻的温度系数, $\alpha = (4.25 \sim 4.28) \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ 。

工业上常用的标准化铜铂电阻也有两种,其公称电阻分别为 50Ω 和 100Ω ,即 $R_0 = 50\Omega$,对应分度号为 Cu50; $R_0 = 100\Omega$,对应分度号为 Cu100。相应的分度表可查阅相关资料。

3. 镍电阻

镍电阻的电阻率及温度系数比铂和铜大得多,灵敏度高,体积小,线性好,稳定性好,价格低廉等特点,是一种性能优良的温度传感器,可在某些领域代替价格昂贵的铂电阻。

镍电阻相应的分度号为 Ni100、Ni300、Ni500、Ni1000,对应的 R_0 分别为 100Ω 、 300Ω 、 500Ω 、 1000Ω 。它的一般使用范围为 $-50 \sim +180^{\circ}\text{C}$,比较适合于楼宇、空调等应用场合。

近年来,在低温和超低温测量方面开始采用一些较为新颖的热电阻,如铈铁电阻、铟电阻、锰电阻、碳电阻等。

有关半导体热敏电阻将在 3.4.5 节介绍。

3.4.3 热电阻的结构

工业热电阻的结构也有普通型和铠装型两种。

1. 普通型热电阻

普通型热电阻的外形结构与普通型热电偶的外形结构基本相同,它们的根本区别在内部结构,即用热电阻体代替了热电极丝。其结构如图 3-20(a)所示,主要由电阻体、绝缘磁管、保护套管和接线盒等组成。为了避免电阻体通过交流电时产生感应电抗,电阻体均采用双线无感绕法绕制而成,如图 3-20(b)所示。

2. 铠装热电阻

铠装热电阻的外形结构及特点也与铠装热电偶相似,是将电阻体预先拉制成型装入不锈钢细管内,内充高密度氧化物绝缘体,形成电阻体与绝缘材料和保护套管连成一体,因而具有外径直径小、易弯曲、抗震、使用方便、测温响应快、使用寿命长等优点,适于安装在结构复杂的部位。

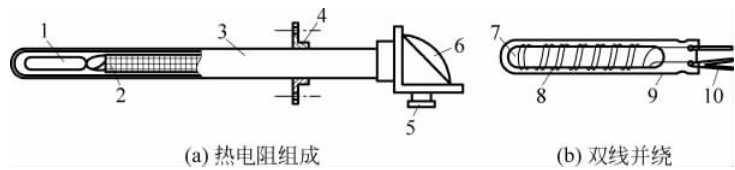


图 3-20 普通型热电阻的结构

1—电阻体；2—瓷绝缘套管；3—不锈钢套管；4—安装固定件；5—引线口；
6—接线盒；7—芯柱；8—电阻丝；9—保护膜；10—引线端

3.4.4 热电阻测温电路

前已表述,热电阻是将温度变化转换为电阻变化的感温器件,而作为测温仪表或测温系统来说,需要把转换后的电阻变化再转换为电压信号。常用的测温电路有两种:①桥式测温电路,②恒流源式测温电路。下面介绍广泛应用的桥式测温电路。

1. 桥路测温原理

利用不平衡电桥把电阻值的变化转换为电压信号的变化,其电路原理如图 3-21(a)所示。热电阻 R_t 和 R_1 、 R_2 、 R_3 组成电桥的 4 个臂,设计时使 $R_1=R_2$ 且远大于 R_3 和 R_t (使流过 R_t 的电流小于 10mA 以降低热效应,且 0°C 时 $R_t=R_3$),则桥路输出电压 $U_{ab}=U_{ac}-U_{bc}=I(R_t-R_3)=I\times\Delta R_t$,即 U_{ab} 与 R_t 成比例关系。

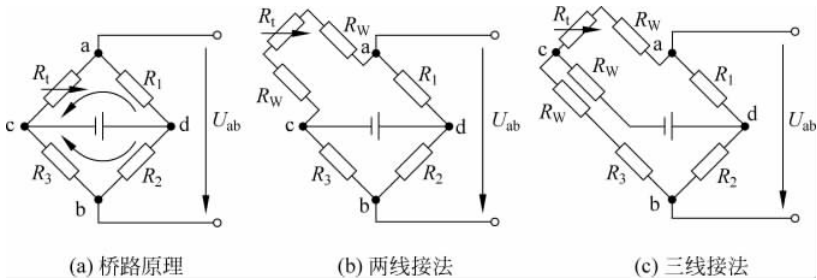


图 3-21 热电阻测温桥路

2. 引线连接方式

实际测温时,热电阻感温元件常常放置在远离测温桥路的现场被测介质中。热电阻的引线电阻对测量结果有较大的影响。目前,热电阻引线方式有两线制、三线制和四线制三种。

1) 两线制接法

如果按桥路原理,把热电阻的两端各连一根引线,直接接入电桥的一个桥臂上,就形成了两线制接法,如图 3-21(b)所示。这种接法虽然配线简单,安装费用低,但引线电阻会和热电阻 R_t 一起构成有效信号转换成测量电压信号,从而影响测量精度。即便在设计施工时事先考虑了引线电阻的阻值,但引线电阻也会随一年四季环境温度的变化而带来附加误差,所以只有当引线不长(引线电阻 R_w 与桥臂电阻 R 满足 $2R_w/R\leq 10^{-3}$)、测温精度要求较低时,才可以采用两线制接法。

2) 三线制接法

在热电阻的一端接出两根引线,其中一根作为电源线,一根与热电阻的另一端引线,分别接入相邻的两个桥臂上,会使引线电阻随环境温度的变化互相抵消,从而消除了引线电阻的影响,如图 3-21(c)所示。这种三线制接法,测量精度高,广泛应用在生产现场中。

3) 四线制接法

在热电阻感温元件的两端各连两根引线,如图 3-22 所示。其中两根引线与恒流源 I 相连,让热电阻 R_t 流过已知电流 I ;另外两根引线将热电阻上压降 U_t 引到仪表(通常为电位差计)的测量端,电位差计测得该电压降,便可得到 $R_t(R_t=U_t/I)$ 。

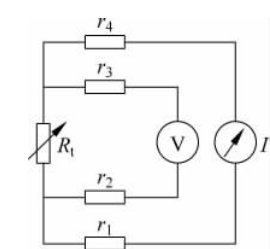


图 3-22 热电阻四线制接法

由于是在电位差计平衡时读数,电位差计不取电流,因此两根测量引线没有电流流过,从而完全消除了引线电阻变化对测温的影响。这种高精度的测量适合于实验室的精准测温。

3.4.5 热敏电阻

热敏电阻是一种半导体感温元件,它是利用半导体的电阻值随温度的变化而显著变化的特性实现测温的。半导体热敏电阻具有电阻温度系数大、电阻率高、机械性能好、响应时间短、寿命长、构造简单等优点。缺点是复现性差、互换性差,其热电特性为非线性,给使用带来不便。但由于其性能在不断改进,稳定性已大为提高,在一些场合下热敏电阻已逐渐取代传统的温度传感器,在自动控制及电子线路的补偿电路中的应用越来越广泛。

1. 热敏电阻类型

热敏电阻是一种新型的半导体测温元件。按温度系数可分为负温度系数热敏电阻(NTC)和正温度系数热敏电阻(PTC)两大类。NTC 热敏电阻以 MF 为其型号,PTC 热敏电阻以 MZ 为其型号。

根据不同的用途,NTC 又可分为两大类。第一类为负指数型,用于测量温度,它的电阻值与温度之间呈负的指数关系。另一类为负突变型,当其温度上升到某设定值时,其电阻值突然下降,多用于各种电子电路中抑制浪涌电流,起保护作用。负指数型和负突变型的温度-电阻特性曲线分别如图 3-23 中的曲线 2 和曲线 1 所示。

典型的 PTC 热敏电阻的温度-电阻特性曲线呈非线性,如图 3-23 中的曲线 4 所示,属突变型曲线,它在电子线路中多起限流、保护作用。当流过 PTC 的电流超过一定限度时,其电阻值突然增大。

近年来,还研制出了线性型 PTC 热敏电阻,其线性度和互换性均较好,可用于测温,其温度-电阻特性曲线如图 3-23 中的曲线 3 所示。

热敏电阻除按温度系数区分外,还有以下三种分类方法:按结构形式可分为体型、薄膜型、厚膜型三种;按工作形式可分为直热式、旁热式、延迟电路三种;按工作温区可分常温区($-60\sim+200^{\circ}\text{C}$)、高温区($>200^{\circ}\text{C}$)、低温区热敏电阻三种。热敏电阻可根据使用要求封装加工成各种形状的探头,如珠状、圆片状、杆状、锥状、针状等,如图 3-24 所示。

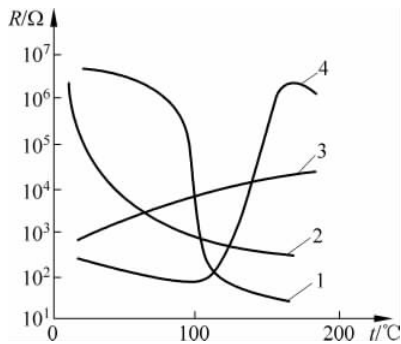


图 3-23 各种热敏电阻的特性曲线

1—负突变型 NTC；2—负指数型 NTC；3—线性型 PTC；4—突变型 PTC

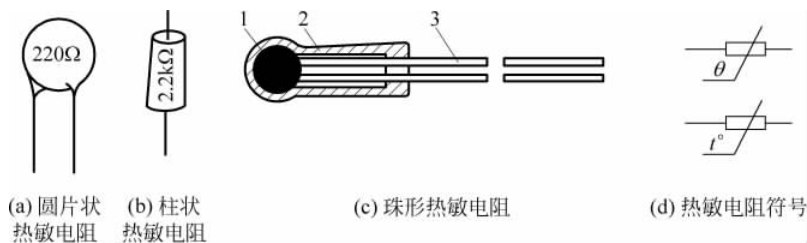


图 3-24 热敏电阻的结构外形及符号

1—热敏电阻；2—玻璃外壳；3—引出线

2. 热敏电阻的特点

- (1) 热敏电阻上的电流随电压的变化不服从欧姆定律。
- (2) 电阻温度系数绝对值大，灵敏度高，测试线路简单，甚至不用放大器也可以输出几伏电压。
- (3) 体积小，重量轻，热惯性小。
- (4) 本身电阻值大，适用于远距离测量。
- (5) 制作简单，寿命长。
- (6) 敏电阻是非线性电阻，但用计算机进行非线性补偿，可得到满意效果。

3. 热敏电阻的应用

热敏电阻在工业上的用途很广。根据产品型号不同，其适用范围也各不相同。以下列举三方面应用。

1) 热敏电阻测温

作为测量温度的热敏电阻一般结构较简单，价格较低廉。没有外面保护层的热敏电阻只能应用在干燥的地方；密封的热敏电阻不怕湿气的侵蚀，可以使用在较恶劣的环境下。由于热敏电阻的阻值较大，故其连接导线的电阻和接触电阻可以忽略，测量电路多采用桥路，因此热敏电阻可以在长达几千米的远距离温度测量中应用。如图 3-25 所示为热敏电阻温度计的原理图。

2) 热敏电阻用于温度补偿

热敏电阻可在一定的温度范围内对某些元件进行温度补偿。例如，动圈式表头中的动

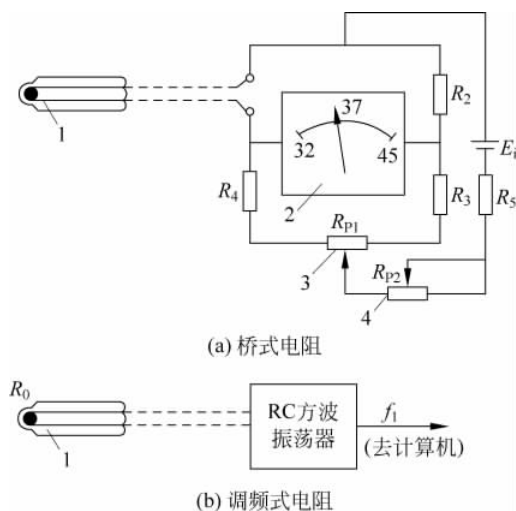


图 3-25 热敏电阻温度计原理图

1—热敏电阻；2—指针式显示器；3—调零电位器；4—调满度电位器

圈由铜线绕制而成。温度升高,电阻增大,引起测量误差。可在动圈回路中串入由负温度系数热敏电阻组成的电阻网络,从而抵消由于温度变化所产生的误差。在三极管电路、对数放大器中也常采用热敏电阻补偿电路,补偿由于温度引起的漂移误差。

3) 热敏电阻用于温度控制

将突变型热敏电阻埋设在被测物中,并与继电器组合成热敏式继电器,可以组成电动机过热保护电路。其工作原理如图 3-26 所示, R_t 为负温度系数热敏电阻,K 为继电器。温度正常时, R_t 阻值较大,A 点电势较低,三极管 VT 不导通,继电器不吸合;温度升高后, R_t 阻值减小,A 点电势升高,三极管导通,继电器吸合。

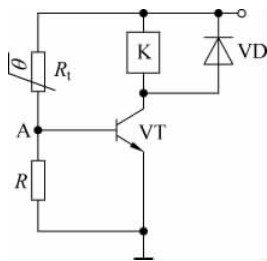


图 3-26 热敏式继电器保护电路

具体使用时,将热敏电阻固定在电动机绕组附近,当电动机过载或出现短路故障时,电动机绕组温度剧增,热敏电阻阻值相应减小,三极管导通,继电器吸合,控制电动机电路断开,起到过热保护的作用。若电动机恢复正常,绕组温度降低,热敏电阻阻值变大,三极管截止,继电器断开,电动机电路又被接通。

这种简单廉价的热敏式继电器用法还可以广泛应用在空调机、微波炉、取暖器、电烘箱等家用电器中。

当然还有一些半导体材料的电阻值会随光照变化而变化,称为光敏电阻;电阻值随磁场变化而变化的,称为磁敏电阻。这些均不在本书讨论范围之内。

3.5 集成温度传感器测温

由于三极管 PN 结上的正向电压降是随温度上升而下降的,其变化线性度和互换性优于二极管。故可采用一对互相匹配的三极管作为温敏差分对管,利用它们的两个 U_{BE} 之差所具有的良好正温度系数,来制作集成温度传感器,即把温敏三极管和激励电路、放大电路

等集成在同一个硅片上。与其他温度传感器相比较,它具有线性度高(非线性误差约为 0.5%)、精度高、体积小、响应快、价格低等优点;缺点是测温范围窄,一般为 $-50 \sim 150^{\circ}\text{C}$ 。

3.5.1 集成温度传感器的基本工作原理

如图 3-27 所示是集成温度传感器的工作原理图。图中, VT_1 和 VT_2 是互相匹配的三极管, I_1 和 I_2 分别是 VT_1 和 VT_2 管的集电极电流,由恒流源供电。则 VT_1 和 VT_2 管的两个发射极和基极电压之差 ΔU 为

$$\Delta U = \frac{k}{q} \ln\left(\frac{I_1}{I_2} \cdot \gamma\right) T \quad (3-14)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数; q 为电子电荷量; γ 为 VT_1 和 VT_2 管发射极的面积之比; T 为绝对温度,单位为 K。

对于确定的传感器, k 、 q 、 γ 均为常数,由式(3-14)可知只要能保证 I_1/I_2 的值为常数,则 ΔU 与被测温度 T 呈线性关系。这就是集成温度传感器的工作原理。在此基础上可以设计出不同的电路以及不同的输出类型的集成温度传感器。

集成温度传感器的输出有电压输出和电流输出两大类,下面分别作简单介绍。

3.5.2 电压输出型温度传感器

如图 3-28 所示为电压输出型温度传感器的工作原理。 VT_1 和 VT_2 是性能相同的两个三极管,其集电极电流分别为 I_1 和 I_2 ,此时两者的发射极电压差 ΔU_{be} 为

$$\Delta U_{\text{be}} = \frac{k}{q} \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) T \quad (3-15)$$

可见,输出电压 ΔU_{be} 跟被测温度 T 呈线性关系。一般情况下 ΔU_{be} 的值比较小,放大后可输出随温度变化的电压,变化量可达 $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

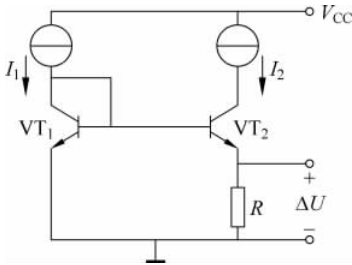


图 3-27 集成温度传感器的工作原理图

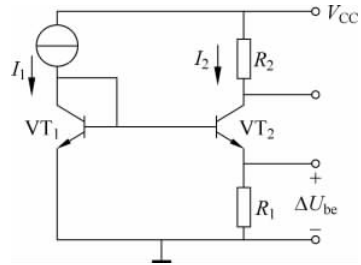


图 3-28 电压输出型温度传感器的原理图

3.5.3 电流输出型集成温度传感器

如图 3-29 所示, VT_1 和 VT_2 是结构对称的两个三极管,其发射极电压 $U_{\text{be}1} = U_{\text{be}2}$,作为恒流源负载, VT_3 和 VT_4 是测温用的三极管,其集电极电流相等,两发射极的面积之比为 γ 。由式(3-14)可知,流过电阻 R 上的电流 I_R 为

$$I_R = I_1 = \Delta U / R = \frac{k}{qR} (\ln \gamma) T \quad (3-16)$$

其中,只要 R 和 γ 一定,传感器电路的输出电流就与温度呈线性关系。通常流过传感器的输出电流应限制在 1mA 左右,可通过调整 R 的大小来实现。

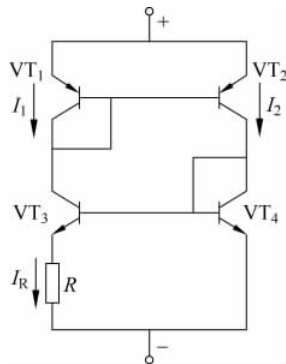


图 3-29 电流输出型温度传感器原理图

典型的电流输出型温度传感器主要有美国 Analog Devices 公司生产的 AD590 系列及我国生产的 SG590 系列。它们的基本电路与图 3-29 一样,只是为了提高工作性能增加了一些启动电路和附加电路。其输出电流与绝对温度成比例,在 $4\sim 30\text{V}$ 电源电压范围内,该器件可充当一个高阻抗、恒流调节器,调节系数为 $1\mu\text{A}/\text{K}$ 。

如图 3-30(a)所示是 AD590 集成温度传感器的外观图,其内部含有放大电路,如配以相应的外电路,就可构成各种应用电路。图 3-30(b)是一个 AD590 测温的基本电路。AD590 在 25°C (298.2K) 时,理想输出电流为 $298.2\mu\text{A}$,但实际上会存在一定误差,可以在外电路中串联一个可调电阻进行修正,如 25°C 时调整 U_T 为 298.2mV ,调整好以后固定可调电阻,即可获得与温度成正比的电压输出 V_T ,其灵敏度为 $1\text{mV}/\text{K}$ 。

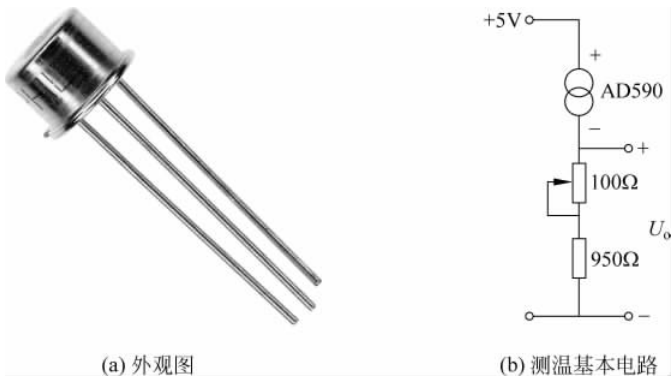


图 3-30 AD590 集成温度传感器

【例 3-2】 摄氏和华氏数字温度计。

AD590 是一个两端器件,只需要一个直流电压源,功率的需求比较低 ($1.5\text{mW}/5\text{V}$)。其输出是高阻抗 ($710\text{M}\Omega$) 的电流,因而长线上的电阻对器件工作的影响不大,适合长线传输,但要采用屏蔽线,防止干扰。

摄氏和华氏数字温度计主要由电流温度传感器 AD590、ICL7106 和显示器组成,如图 3-31 所示。ICL7106 包括模/数转换器、时钟发生器、参考电压源、BCD 的七段译码和显

示驱动器等,它与 AD590 的几个电阻及液晶显示器构成一个数字温度计,而且能实现两种定标制的温度测量和显示。对摄氏和华氏两种温度均采用同一参考电压(500mV)。

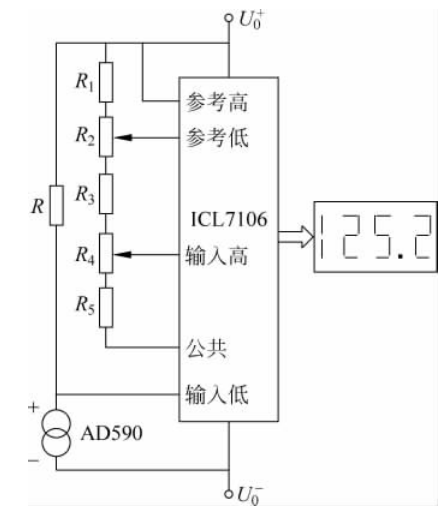


图 3-31 摄氏和华氏数字温度计电路

对于两种温度,各电阻取值见表 3-5。

表 3-5 摄氏和华氏数字温度计电路中各电阻的取值

温度单位	R	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
°F	9kΩ	4.02kΩ	2kΩ	12.4kΩ	10kΩ	0
°C	5kΩ	4.02kΩ	2kΩ	5.1kΩ	5kΩ	11.8kΩ

3.6 非接触式测温

任何物体,其温度超过绝对零度,都会以电磁波的形式向周围辐射能量,温度越高辐射到周围的能量也就越多,而且两者之间满足一定的函数关系。通过测量物体辐射到周围的能量强度就可测得物体的温度,这就是非接触式温度测量的测量原理。由于非接触式温度测量利用了物体的热辐射,故也常称为辐射式温度测量。

辐射式测温仪表主要由光学系统、检测元件、转换电路和信号处理等部分组成,如图 3-32 所示。光学系统包括瞄准系统、透镜、滤光片等,把物体的辐射能通过透镜聚焦到检测元件上;检测元件为光敏或热敏器件;转换电路和信号处理系统将信号转换、放大、进行辐射率修正和标度变换后,输出与被测温度相应的信号。

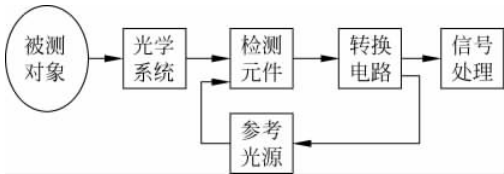


图 3-32 辐射式测温仪表组成框图

光学系统和检测元件对辐射光谱均有选择性,因此产生了辐射式温度计、亮度式温度计和比色温度计等几种测温仪表。

3.6.1 辐射温度计

辐射温度计依据全辐射定律,敏感元件感受物体的全辐射能量来测知物体的温度。辐射温度计的光学系统分为透镜式和反射镜式,检测元件有热电堆、热释电元件、硅光电池和热敏电阻。图 3-33 为这两种系统的示意图,透镜式系统将物体的全辐射能透过物镜及光阑、滤光片等聚焦于敏感元件;反射镜式系统则将全辐射能反射后聚焦在敏感元件上。此类温度计的测温范围在 400~2000℃。

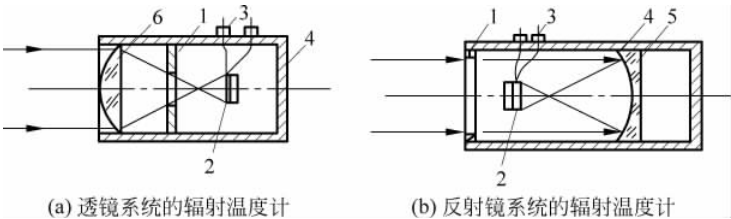


图 3-33 透镜式和反射镜式系统的示意图

1—光阑; 2—检测元件; 3—输出端子; 4—外壳; 5—反射聚光镜; 6—透镜

下面,对红外线测温仪的原理作简单说明。

红外线是太阳光线中众多不可见光线中的一种,位于可见光中红色光以外,又称为红外热辐射;红外线的波长大于可见光线,波长为 0.75~1000μm。红外辐射的物理本质是热辐射,任何物体,只要其温度在绝对零度以上,都会产生红外线向外界辐射出能量,所辐射能量的大小直接与该物体的温度有关,具体地说是与该物体热力学温度的 4 次方成正比,用公式可表示为

$$E = \sigma \epsilon (T^4 - T_0^4) \tag{3-17}$$

式中: E 为物体在温度 T 时单位面积和单位时间的红外辐射总量; σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常量, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ϵ 为物体的辐射率,即物体表面辐射本领与黑体辐射本领的比值,黑体的辐射率 $\epsilon = 1$; T 为物体的温度,单位 K; T_0 为物体周围的环境温度,单位 K。

通过测量物体所发射的能量 E ,就可测得物体的温度 T 。如图 3-34 所示,这种红外线测温仪不需要与被测对象接触,因此属于非接触式测量。红外线测温仪可用于很宽范围的测温,从 -50℃ 直至高于 3000℃。在不同的温度范围,对象发出的电磁波能量的波长分布不同,在常温 (0~100℃) 范围,能量主要集中在中红外和远红外波长。



图 3-34 红外线测温仪外观图

3.6.2 亮度温度计

亮度温度计是利用物体的单色辐射亮度 $L_{\lambda T}$ 随温度变化的原理,以被测物体光谱的一个狭窄区域内的亮度与标准辐射体的亮度进行比较来测量温度。由于实际物体的单色辐射发射系数 ϵ_λ 小于绝对黑体,即 $\epsilon_\lambda < 1$,因而实际物体的单色亮度 $L_{\lambda T}$ 小于绝对黑体的单色亮

度。由于在温度 $T(K)$ 时,绝对黑体的单色辐射量度 $L_{\lambda T}^*$ 为

$$L_{\lambda T}^* = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi} \exp(-c_2/\lambda T) \quad (3-18)$$

式中: c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 2\pi^5 c^2 h = 4.9926 \text{ J} \cdot \text{m}$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = ch/k = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$; λ 为波长; c 为光速; h 为普朗克常数; k 为玻尔兹曼常数。

故实际物体的单色辐射亮度为

$$L_{\lambda T} = \epsilon_{\lambda T} \cdot L_{\lambda T}^* = \epsilon_{\lambda T} \cdot \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\pi} \exp(-c_2/\lambda T) \quad (3-19)$$

从式(3-19)中可以看出物体的单色辐射量度 $L_{\lambda T}$ 与物体的被测温度 $T(K)$ 满足一一对应的函数关系,故只要能测得被测物体的 $L_{\lambda T}$ 便能得到物体的被测温度 $T(K)$ 。

3.6.3 比色温度计

光电比色温度计是以两个波长的辐射亮度之比随温度变化的原理来进行温度测量的,如图 3-35 所示。

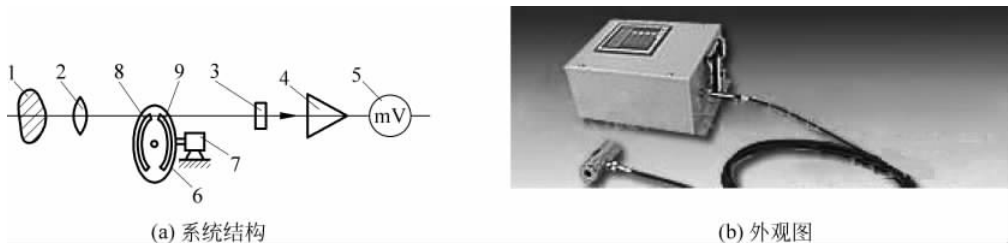


图 3-35 光电比色温度计

- 1—被测对象; 2—透镜; 3—光电器件; 4—放大电路;
5—显示仪表; 6—调制盘; 7—步进电机; 8,9—滤光片

被测对象 1 的辐射射线经过透镜射到由步进电机 7 带动的旋转调制圆盘(调制盘)6 上,在调制盘的开孔上附有两种颜色的滤光片 8 和 9,一般为红色和蓝色,把光线调制成交变的,从而使射到光电器件 3 上的为红、蓝色交变的光线。进而使光电器件输出与相应的红色和蓝色相对应的电信号。然后把这个信号放大并运算后送到显示仪表 5,得到被测物体的温度 T 。

3.7 工程应用

现以设计基于热电阻的单机智能温度巡检仪为例。

为了满足生产过程监控的要求,现设计一个以热电阻为传感器的智能巡回检测仪表,要求具有如下功能:与铂电阻 Pt100 配合,巡回检测 8 路温度;定点显示和巡回显示两种方式;设定超限值,一旦超限则发出报警信号且有常开接点输出;检测的每路温度转变为与之线性对应的 4~20mA 电流输出;支持 RS-485 通信方式,方便组成局域监控网络。

3.7.1 整机电路组成

8 路温度巡检仪的硬件由主机电路、前向通道、后向通道、人机接口电路、通信接口及供电电源几部分组成,如图 3-36 所示。其中,主机电路由 CPU、数据存储、程序存储器、

EEPROM 存储器、定时器/计数器、通用异步串行收发器、中断控制器、WDT 定时器及通用并行接口等部件组成；前向通道电路由 Pt100 转换电路、滤波电路、多路模拟开关电路、放大电路、A/D 转换电路组成；后向通道电路由 D/A 转换电路、多路模拟开关电路、V/I 转换电路、继电器驱动电路组成；人机接口电路由按键和 LED 数码管组成；通信接口电路由 RS-485 接口电路组成；供电电源电路分别向系统数字电路提供逻辑 5V 电源，向模拟电路提供±12V 与±5V 模拟电源。

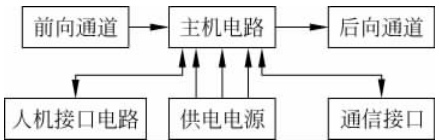


图 3-36 硬件系统方块图

主机电路设计的核心是选择一款恰当的嵌入式处理器，其处理速度、内含的存储器容量、内含的功能部件尽可能满足系统要求又价格不贵，因此选择 AT89C55WD 单片机和 X5045 芯片，就可以满足系统对硬件资源的需求。这里，重点分析说明热电阻测温的前向输入通道。

3.7.2 前向通道电路设计

1. 原理框图

前向通道的任务是接收温度传感器 Pt100 铂电阻的信号，将其转变为单片机能够进行处理的数字信号，由信号转换电路、动态稳零电路、多路模拟开关、阻抗匹配和放大电路、A/D 转换电路等几部分组成。原理框图如图 3-37 所示。硬件电路如图 3-38 所示。

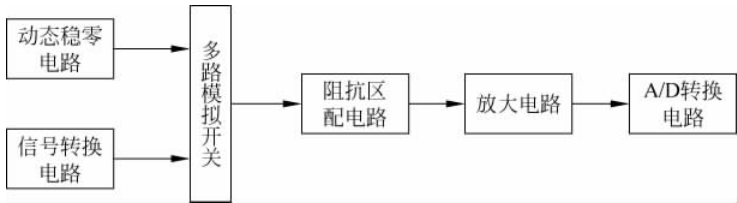


图 3-37 前向通道电路原理框图

2. 信号转换电路

信号转换电路由图 3-38 中的 9 个惠斯登电桥组成(图中仅绘出 3 个,其余同),实现将 8 路 Pt100 温度传感器输出的电阻信号转换为电压信号。其中,第 1 个惠斯登电桥没有外接 Pt100 电阻,而构成了动态稳零(或称数字调零)电路。余下 8 个惠斯登电桥的工作原理完全一致,这里以第 2 个电桥为例,它由 R_5 、 R_6 、 R_7 、 C_3 、 C_4 组成,来自 Pt100 的电阻信号以三线形式接到 a1、b1、c1 处,a1 接 Pt100 的一端,b1、c1 接 Pt100 的另一端,于是由 Pt100、 R_5 、 R_6 、 R_7 构成一个惠斯登电桥。当检测到温度变化时,Pt100 的阻值发生变化,在 A、B 点对应产生一个变化的电压 V_{AB} ,实现了 R/V(电阻/电压转换)转换。

3. 多路模拟开关

图 3-38 中的 CD4052(U1、U2、U3)是一个双端 4 路模拟开关,由 A、B、INH 三个控制引

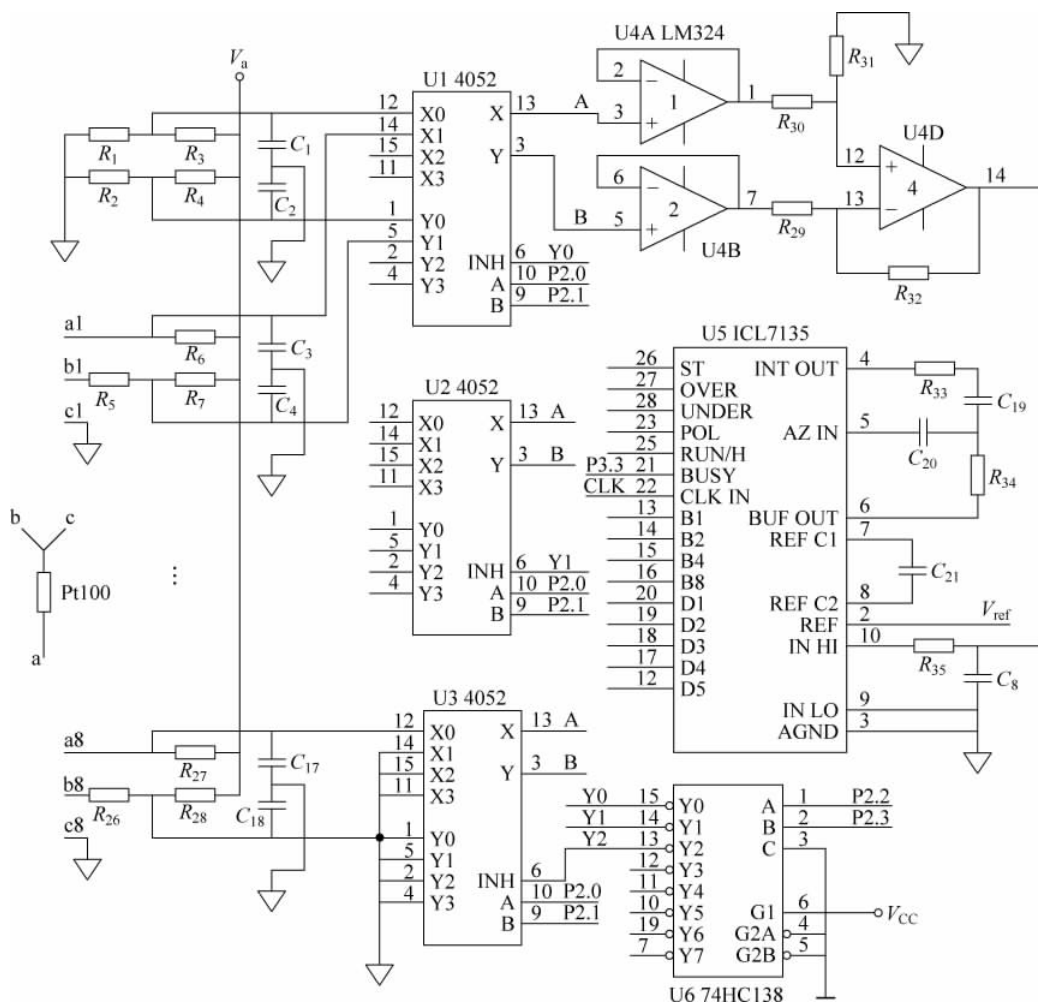


图 3-38 前向通道硬件电路图

脚选择将 X、Y 切向 0、1、2 或 3 通道。三个 CD4052 的输出 X、Y 分别并接在一起,然后接入后级的运放,三个 A 引脚均接单片机的 P2.0,三个 B 引脚均接单片机的 P2.1,三个 INH 引脚分别接三八译码器 74HC138 的 Y0、Y1、Y2。而 74HC138 的 Y0、Y1、Y2 高低电平又受其控制引脚 A、B 的控制,引脚 A、B 接在单片机的 P2.2、P2.3 上。这样,利用单片机的 P2.0、P2.1、P2.2、P2.3 这 4 个 I/O 口,控制三个多路开关和三八译码器,分时将 9 个 R/V 转换桥路的输出接通后级放大电路和 A/D 转换电路。

4. 前置放大电路

图 3-38 中的 U4A、U4B 两个运放组成跟随器实现了阻抗匹配电路,解决了不同通道信号输出阻抗不一致的问题。由 U4D、 R_{29} 、 R_{30} 、 R_{31} 、 R_{32} 构成反相放大器,取 $R_{29} = 1\text{k}\Omega$, $R_{32} = 13\text{k}\Omega$,反相放大器增益为 13,恰好满足后级 A/D 转换器 ICL7135 满码输出对应的模拟电压。

5. A/D 转换电路

A/D 转换电路设计的核心是 A/D 转换器的选择,选择时主要考虑三项技术指标:转换精度、转换速度和对单片机接口资源的耗用。本设计选用美国 Intersil 公司的 ICL7135 双

向积分式 A/D 转换器。

A/D 转换硬件接口电路,是把图 3-38 中的 ICL7135 的 BUSY(21 脚)连到 AT89C55 的 P3. 3/INT1, ICL7135 的 CLK1N(22 脚)同时连到 AT89C55 的 P3. 3/T1 和 P1. 0,即 ICL7135 仅通过两根线与 AT89C55 相接,仅占用 AT89C55 T1、T2 两个计数器及外部中断 INT1。

1) ICL7135 时钟信号的提供

ICL7135 的时钟信号直接来自 AT89C55 的 P1. 0。P1. 0 是 AT89C55 的复用口,当 AT89C55 的 T2 计数器工作于方波产生器方式时,通过该引脚可输出连续的方波信号,频率可通过编程确定。

2) A/D 转换结果的读取

ICL7135 的时钟信号源于 AT89C55 的 T2 计数器方波输出,同时接至 AT89C55 的 T1,利用 T1 计数器记录 BUSY 为高电平时的时钟周期数。BUSY 信号接至 AT89C55 的外部中断 INT1,其意图有两个: 第一,控制 T1 计数,当 T1 计数器工作于方式 1 时,通过软件设置 GATE 控制位为“1”时,T1 计数受 INT1 控制,当 INT1(既 BUSY)为高电平时,T1 可对来自外部的脉冲(既 ICL7135 的时钟周期)计数,INT1 为低电平时,停止计数;第二,在 BUSY 信号由高电平跳变为低电平瞬间,以中断形式通知 CPU,以读出 A/D 转换后的数字码。

其他电路及驱动程序,请参考有关资料。

思考题与习题

1. 说出几种常用的测温仪表类型。
2. 简述热电偶测温的基本原理。
3. 用分度号为 S 的热电偶测温,其参比端温度为 20°C ,测得热电势 $E = (t, 20) = 11.30\text{mV}$,试求被测温度 t 。
4. 在用热电偶测温时为什么要保持参比端温度恒定?一般都采用哪些方法?
5. 画图说明热电偶的冷端温度补偿电桥原理。
6. 常用的工业热电阻有哪几种?各有何特点?
7. 画图说明热电阻桥式测温电路原理。
8. 以电桥法测定热电阻的电阻值时,为什么采用三线制接线方法?
9. 比较热电阻与热敏电阻的异同。
10. 简述集成温度传感器的工作原理。
11. 已知一个 AD590KH 两端集成温度传感器的灵敏度为 $1\mu\text{A}/^{\circ}\text{C}$; 并且当温度为 25°C 时,输出电流为 $298.2\mu\text{A}$ 。若将该传感器按图 3-39 接入电路,问: 当温度分别为 -30°C 和 $+120^{\circ}\text{C}$ 时,电压表的读数为多少(不考虑非线性)?
12. 简述非接触式测温的几种类型及测温原理。

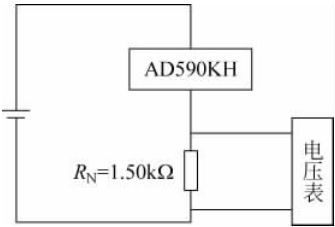


图 3-39 题 11 图