

工业自动化仪表

测温元件—原理及应用

上海自动化仪表三厂 编
上海纺织工学院

上海自动化仪表二厂资料室 印

1974

前 言

随着我国社会主义工业的飞跃发展，工业自动化仪表的使用日益广泛，广大工农兵迫切需要了解仪表的工作原理、结构和使用方法。

为了更好地为工农兵服务，我们编印了这本讲义，拟作为仪表教材。在编写过程中，得到了本市各仪表厂的广大工人师傅、技术人员和厂领导的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于我们的马列主义、毛泽东思想和业务水平不高，加上时间匆促，缺点、错误一定很多，恳切希望同志们批评指正。

参考资料：

上海自动化仪表三厂： 《热电偶使用说明书》

《热电阻使用说明书》

上海业余工业大学： 《非电量电测》

上海工业自动化仪表群众协作组

上海自动化仪表三厂： 《热电偶、热电阻与热敏电阻》。

目 录

第一节 概 述.....	1
一、温度与温标.....	1
二、热量单位、热容量、比热.....	2
三、常用测温仪表介绍.....	2
第二节 热电偶.....	5
一、热电偶的测温原理.....	5
二、热电偶的材料、构造和基本技术特性.....	10
三、热电偶的冷端温度补正法.....	19
四、安装与使用.....	24
五、热电偶的应用.....	28
第三节 热电阻.....	34
一、热电阻的测温原理及材料要求.....	34
二、热电阻的构造.....	35
三、基本技术特性.....	38
四、安装与使用.....	41
第四节 热敏电阻.....	45
一、热敏电阻特性.....	45
二、热敏电阻的技术参数及规格.....	47
三、热敏电阻的应用.....	49
附 录	
一、热电偶和热电阻分度特性表.....	53
二、热电偶、热电阻在选型、订货、使用时有关注意 事项.....	69
三、铠装热电偶简介.....	71
四、热电偶的故障、修理及校验.....	72
五、热电偶的校验、故障和修理.....	80

测温元件——原理及应用

第一节 概 述

一、温度与温标

人们对于冷热的认识，最初是由直接感觉得来的，但是单凭人们的直接感觉来判断物体的冷热是不一定可靠的，因为感觉不仅范围有限（过冷和过热都会使皮肤失去知觉）而且常常带有主观性。例如，把右手放在热水里，把左手放在冷水里，过几分钟后，再同时把两手放在一盆温水中，这时我们就会发觉，右手的感觉温水是冷的，左手的感觉温水是热的。由此可见，要正确判断物体的冷热程度，必须建立一套客观的标准。

当两个不起化学作用的物体相接触时，“较冷”的物体就会变热，而“较热”的物体就会变冷，这就是“热交换”现象。经过一段时间后，热交换就会停止，也就是说它们之间达到了“热平衡”，具有了相同温度。因此，当两个物体接触时，如果它们之间没有热交换现象，那么我们称这两个物体的温度是相等的。

上述这些概念都只能对“温度”作定性的表述，但对温度测量来说还是不够的，必须给温度以定量的表述，也就是要建立衡量物体温度的标尺（简称温标）。

测定物质的温度，一般通过某种标准物质与被测物质接触，进行热交换，直至热平衡，再观察标准物质的某些物理性质的变化，来定量地测定。

摄氏温标：它利用物体受热后体积膨胀的性质而建立起来的，（例如水银温度计）。它选取在标准大气压下，冰和水混合时的温度为零度（以 0°C 表示），水的沸点温度为 100 度，（以 100°C 表示），在 0°C 到 100°C 之间分成 100 等分，每一等分就是摄氏一度（以 1°C 表示）。

除了摄氏温标外，还经常遇到所谓“绝对温标”，或称开氏温标，它也将在标准大气压下，水的沸点和冰水共存点之间温度差为一百度，而对冰水共存点，定为 273.15°K 。因此开氏温度（ $^{\circ}\text{K}$ ）

和摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)之间有如下关系:

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

式中 T 代表恺氏温度, t 代表摄氏温度。

我们有时还会遇到华氏温标。它也是根据在标准大气压下, 将冰水共存点和水的沸点作为二个固定点, 在它们之间分成180等分, 并规定冰水共存点温度为 32°F , 因此华氏温度与摄氏温度之间有如下关系:

$$t_c = \frac{5}{9} (t_f - 32)$$

式中 t_c 表示摄氏温度($^{\circ}\text{C}$), t_f 表示华氏温度($^{\circ}\text{F}$)。

二、热量单位、热容量、比热

在日常生活中, 把1公斤的 30°C 的水和1公斤的 10°C 的水混和, 它们之间将发生热交换, 现在要说出原来1公斤 30°C 的水有多少热量被原来1公斤 10°C 的水吸收呢? 这就要有一个热量的计算单位。我们把1克纯水温度升高 1°C 所需的热量作为它的单位, 称为1卡。通常还采用大卡(或仟卡)作为热量的单位, 1大卡=1000卡, 也就是说将1公斤的纯水温度升高 1°C 所需的热量称为1大卡。

若使某物体温度升高 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ 需要热量 ΔQ , 则 $\Delta Q/\Delta t$ 也就是该物体温度平均升高 1°C 所需的热量, 称作该物体的热容量, 1克物质的热容量就称该物质的比热。因此有公式

$$\Delta Q = C \cdot m \cdot \Delta t$$

式中 C 为比热, m 为质量, ΔQ 为该物体温度升高 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ 时所需的热量, 而 $C \cdot m$ 即为该物体的热容量。

三、常用的测温仪表介绍

测量温度的仪表都是利用某一物质与温度有关的某些物理性能来作成的。常用的测温仪表可以分成两大类, 第一类是利用接触测

温方法的仪表，第二类是非接触式的测温仪表，它利用辐射原理来测量温反。

属于第一类的常用测温仪表有以下各种：

1. 利用物体受热膨胀的原理而作成的温度计，其测温质可能是固体、液体与气体。其中最常见的是玻璃管液体温度计，其测温质是玻璃管加上液体。除此以外还包括固体膨胀温度计和压力式温度计（用测温质在密闭系统中膨胀时发生的压力来进行测量）。这类仪表的缺点是难以实现远距离传送，其中大部分品种只能作为就地测量的仪表。

2. 利用物质的热电性质而作成的仪表，这类仪表的特点是可以很方便地实现读数的远距离传送，适用的温度范围也很宽，因此这种测温仪表被广泛地使用于各个工业部门中。

3. 利用物质的电阻的温度系数而作成的仪表，这类仪表可以用金属电阻（温度系数是正值），也可以用半导体（温度系数为负值），它也可以很方便地实现读数的远距离传送。其特点是利用电桥原理测量电阻变化，可以使仪表的灵敏度很高，因此可作成测量范围很狭的仪表。特别是半导体热敏电阻，其温度系数（负值）特别大，因此仪表的灵敏度特高。

非接触式的测温仪表都是利用热体的辐射原理，一般多适用于测量高温（ 1000°C 以上，至少 400°C ），其测量上限在理论上是无限的。它在冶金工业中使用较广。

各种测温仪表的测温范围如表1-1所示：

测温仪表	测温范围℃		测温仪表	测温范围	
	始点	终点		始点	终点
膨胀温度计：			热电偶：		
工业用玻璃管水银温度计	-25	500	铂铑—铂	0	1600*
充有机液体的玻璃管温度计	-200	65	镍铬—镍硅	0	1300**
压力式温度计	0	300	镍铬—考铜	0	800***
			钨—钼	1400	1800
热电阻：			辐射高温计：		
铂热电阻	-200	500	光学的	800	4500
铜热电阻	-50	100	光电的	600	1800
			全辐射的	400	2000

* 长时期测量时，在1300℃以下

** 长时期测量时，在1000℃以下

*** 长时期测量时，在600℃以下

表1-1 各种测温仪表的测温范围

第二节 热 电 偶

用热电偶作为测温元件,目前已广泛应用于冶金、热工、机械及化工等工业上,用以对介质温度进行测量、自动调节等。

热电偶温度计最简单的测温系统如图1-1所示。它包含一个测温元件——热电偶,一个显示仪表(毫伏计或电子电位差计)连接热电偶和显示仪表的导线——补偿导线(实质上是热电偶延长导线)。利用补偿导线可以把热电偶和显示仪表分别安装在相距较远的地方。

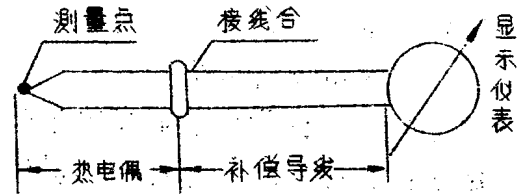


图1-1 热电偶测温系统简图

热电偶式温度计的典型用途如下:

- (1) 测量容器、管道及炉子等内部温度。
- (2) 测量封闭设备内的材料温度。
- (3) 测量流束温度。
- (4) 测量表面温度。

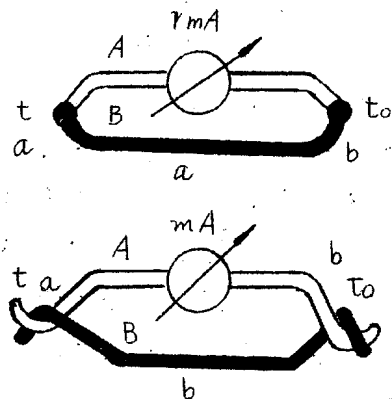
一、热电偶的测温原理

1. 热电效应

热电偶测量温度的基本原理是热电效应,这一现象是将两种不同成份的金属导体或半导体两端相互紧密的连接在一起,组成一个

图1-2 热电偶由两根不同金属导体或半导体所组成

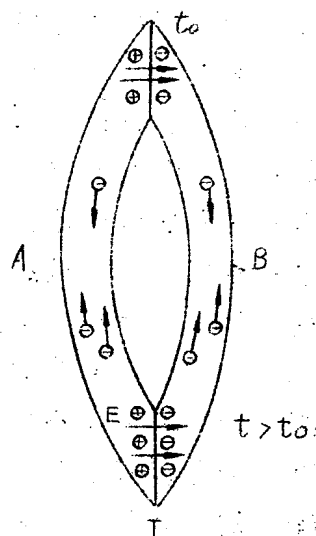
- a、焊接
- b、铰接



闭合回路（见图1-2所示），如两连接点a、b所处温度不同（ $t \neq t_0$ ）则此回路中就会产生电动势，形成热电电流。这一现象称为热电效应。

通常我们把这样两种不同的导体组合，称为热电偶。单独的电极称为热电极，两个连接点中进行测量温度的一端称为工作端，另一端称为自由端。由实验可以发现，当a、b两端温度相差越大时，回路中电动势也越大，根据这一关系我们就可应用热电偶输出电势的大小来测定物体的温度。

热电效应是由于热电偶吸收了外部的热能在内部转变成成为电能的物理现象。从物理学中我们知道：物体中具有自由电子，而且不同物体中的自由电子密度是不同的。当两种不同物体A和B接触时，由于自由电子的密度不同，在接触处便产生电子的扩散作用。如A的自由电子密度大于B的自由电子密度，则在某一瞬间由A扩散到B中去的电子将比由B扩散到A中去的多，因此使A由于失去较多的电子带正电荷（如图1-3所示）而B带负电荷。在扩散的作用下，



由于正、负电荷的存在，致使A、B的接触处产生电场。此电场的方向和扩散进行的方向相反，它将阻碍扩散作用的进一步进行，并且引起反方向的电子转移，两者构成了一个矛盾的统一体。上述过程的持续进行，直到扩散作用与阻碍扩散的作用相等时，即自A导体扩散到B导体的自由电子与在电场作用下自导体B到A导体的自由电子相等时，此过程便处于一种“相对静止状态”，我们称之为“动平衡”。在这种动平衡状态下，A与B两导体之间产生了一定的电位差，此电位差的大小决定于两电极的材料及接触端的温度，而与材料的几何形状及尺寸无关。

由上所述我们得到一个规律：两个不同化学材料的金属彼此接触时，则在接点产生一定的电位差。此电位差的大小决定于温度、

两金属材料的化学性质而与材料的几何形状及尺寸无关。在本例中如A金属材料的自由电子密度大于B金属，则经扩散后A金属带正电位，B带负电位。

因此，在图1-3所示的两种不同导体组成的闭合回路中，当其两端温度不同时，回路中产生的热电势应为两项电位差的代数和。即

导体A和B的接点在温度 t 时形成的电位差 $e_{AB}(t)$ ，
导体A和B的接点在温度 t_0 时形成的电位差 $e_{AB}(t_0)$ ，
这样，此闭合回路的总电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 应为

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

由上述讨论，可得以下几点推论：

(1) 如A、B材料相同（即同种材料），则热电势 $E_{AB}(t, t_0) = 0$ 。

(2) 当 $t = t_0$ ，尽管A、B材料不同，热电势 $E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t_0, t_0) = 0$ 。

(3) 当A、B材料固定后，热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 是温度 t 和 t_0 的函数差，即 $E_{AB}(t, t_0) = f(t) - f(t_0)$ 。

如果一端温度 t_0 保持不变（即 t_0 等于常数），则 $E_{AB}(t, t_0)$ 就成为 t 的单一函数，即

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t) - C = \varphi(t)$$

这一关系式在实际测温中得到广泛使用，当我们保持热电偶冷端温度不变时，则测得的热电势就是被测温度的单值函数。在生产中我们较多的是把自由端保持 0°C ，就可得到热电偶分度表（见本章附录“一”）。

下面我们介绍一下，热电偶部分常用名词定义：

(1) 热电偶：热电偶是一种温度测量仪表，它的感温元件是两根不同材料的导线，其一端彼此联接。当联接的一端与不联接的一端之间有温差时，则产生热电势。温度作为电动势的函数由一个通常与热电偶分开的测量仪表显示出来。

- (2) 热电极：热电极是热电偶的感温元件。
- (3) 偶丝：偶丝是制造热电极的金属丝。
- (4) 工作端：工作端是热电极联接的一端。
- (5) 自由端：自由端是热电极非联接的一端。

2. 常用计算公式及其应用

在应用热电偶测量温度时，我们规定工作端温度为 t ($^{\circ}\text{C}$)，自由端温度为 t_0 ($^{\circ}\text{C}$)。由材料 A、B 所组成的热电偶，其热电势用 $E_{AB}(t, t_0)$ 表示。如为正值，说明 A 的极性为正，B 的极性为负，电流在自由端的方向是由 A 流向 B。

显然，可以写出：

$$E_{AB}(t, t_0) = -E_{AB}(t_0, t) \dots\dots\dots (1-1)$$

$$E_{AB}(t, t_0) = -E_{BA}(t, t_0) \dots\dots\dots (1-2)$$

例 1：LB-3（铂铑-铂）热电偶，工作端温度为 1000°C ，自由端温度为 0°C ，则

$$E_{LB}(1000, 0) = 9.556\text{mv} \quad (\text{L (铂铑) 为正,} \\ \text{B (铂) 为负})$$

$$E_{LB}(0, 1000) = -9.556\text{mv}$$

$$E_{BL}(1000, 0) = -9.556\text{mv}$$

查表只能求出自由端为 0°C 时的热电势，如果自由端温度 t_0 不等于 0°C ，则热电势可通过下式求出：

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, 0) - E_{AB}(t_0, 0) \dots\dots\dots (1-3)$$

例 2：LB-3 热电偶，工作端温度为 1000°C 自由端温度为 30°C ，产生的热电势：

$$E_{LB}(1000, 30) = E_{LB}(1000, 0) - E_{LB}(30, 0) \\ = 9.556 - 0.173 = 9.383\text{mv}$$

将上式推广，可求出下式：

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0') + E_{AB}(t_0', t_0) \dots\dots\dots (1-4)$$

例3：已知 $E_{LB}(1000, 30) = 9.383 \text{ mV}$ ，则可写出

$$E_{LB}(1000, 30) = E_{LB}(1000, 150) + E_{LB}(150, 30)$$

$$E_{LB}(1000, 30) = E_{LB}(1000, 0) + E_{LB}(0, 30)$$

等。

若已知 $E_{AB}(t, t_0)$ 和 $E_{BC}(t, t_0)$ ，则可用下式求出 $E_{AC}(t, t_0)$ ：

$$E_{AC}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_0) + E_{BC}(t, t_0) \dots\dots\dots (1-5)$$

例4：已知铁(Fe)对铂(Pt)工作端为 100°C 自由端为 0°C 时的热电势 $E_{FePt}(100, 0) = 1.8 \text{ mV}$ ，康铜对铂在同样的温度条件下 $E_{康铜, Pt}(100, 0) = -3.5 \text{ mV}$ ，则铁同康铜所组成的热电偶的热电势：

$$\begin{aligned} E_{Fe \text{ 康铜}}(100, 0) &= E_{FePt}(100, 0) + E_{Pt \text{ 康铜}}(100, 0) \\ &= E_{FePt}(100, 0) - E_{康铜, Pt}(100, 0) \\ &= 1.8 - (-3.5) = 5.3 \text{ mV} \end{aligned}$$

最后，在图1-4的情况，如欲求出总的热电势 E ，应为：

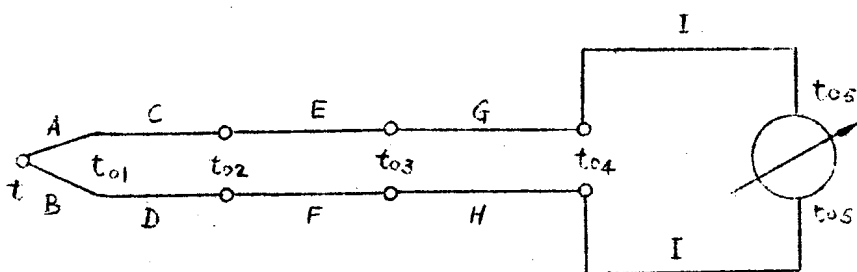


图1-4 复杂的热电偶测温线路

$$\begin{aligned} E &= E_{AB}(t, t_{01}) + E_{CD}(t_{01}, t_{02}) + E_{EF}(t_{02}, t_{03}) \\ &\quad + E_{GH}(t_{03}, t_{04}) \end{aligned}$$

例5. 由铂铑—铂热电偶(LB-3)和其补偿导线(什么叫做

补偿导线，参看本章节“三”）所组成的测温线路，如图 1-5 所示。

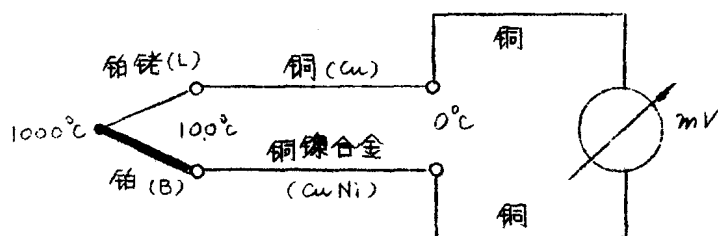


图 1-5 LB-3 热电偶的测温线路

$$E = E_{LB}(1000, 100) + E_{Cu, CuNi}(100, 0)$$

$$\begin{aligned} E_{LB}(1000, 100) &= E_{LB}(1000, 0) - E_{LB}(100, 0) \\ &= 9.556 - 0.643 = 8.913 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$E_{Cu, CuNi}(100, 0) \text{ 为 } 0.64 \pm 0.03 \text{ mV}$$

所以， $E = 8.913 + 0.64 \pm 0.03 = 9.553 \pm 0.03 \text{ mV}$ 这时，补偿导线相当于将热电偶的自由端温度从 100°C 移到了 0°C ，因为算出的 E 同 $E_{LB}(1000, 0)$ (为 9.556 mV) 是接近相等的。

二、热电偶的材料、构造和基本技术特性

1. 热电电极材料的选择

按照基本原理分析，只要是两种不同性质的任何导体或半导体都可配制成一热电偶。但在实际情况下，并不是所有的材料都可以作为热电偶材料的，因为当一热电偶实际用来作为测温元件时，要求有可靠的准确度、较广的测温范围等。因此在实际中用来测量温度的热电偶仅采用有限的几种材料。用作热电偶的材料归结起来有以下几点主要要求：

(1) 受温度作用后，要有较高的热电势产生，且此热电势和温度之间成直线（或近似直线）变化关系。

(2) 能测量较高和广泛的温度范围，且在这范围内经长时间使用后热电性质保持不变。这样可使热电偶式温度计经过一次刻度后

即可保持很长时间的精确性。

(3) 使用时热电偶材料不发生化学和物理性质的改变。

(4) 电阻温度系数小，导电性能好，热容量小。

(5) 材料组织均匀，要有韧性且价格便宜。

应该指出，在目前采用热电极材料中没有一个能完全满足上述要求的，因此我们采用在不同的测温条件下使用不同的热电极材料。常用热电极的材料物理性质见表1—2。

目前，在我国大量生产、并在工业上广泛使用的热电偶只有几种，这些热电偶的热电极材料都是精选过的，而且已使之标准化。它包括了各个温度范围，其使用效果也比较好，而且一般是符合热电极材料的各项要求的。这些热电偶如表1—3。

2. 热电偶构造

各种热电偶的外形是不相同的，但是它们的构造则大致相同，通常一个热电偶由热电极、保护套管和接线盒等几个主要部分构成。现将其各部分的构造分别介绍如下：

(1) 热电极

热电极是热电偶的感温元件，由偶丝制成，偶丝的直径是由材料的价格、机械强度、导电率以及热电偶的用途和测量范围等因素决定。贵金属热电偶的热电极多数采用直径0.35~0.65毫米的细导线，这样的直径不仅保证了必要的强度和降低了成本，而且使整个热电偶的电阻值不会太大（这一点对于用毫伏计测温时非常重要）。用普通金属制成的热电极一般直径是0.5~3.2毫米。热电偶的长度由安装条件，特别是工作端在介质中的插入深度来决定，通常为350~2000毫米。

热电偶的热电极的工作端被牢固地焊接在一起。

(2) 绝缘套管（绝缘子）

热电偶的两个热电极必须加以很好绝缘，防止发生短路或漏电。绝缘套管的形状如图1—6所示，绝缘子一般做成圆形，也有做成椭圆形的，中

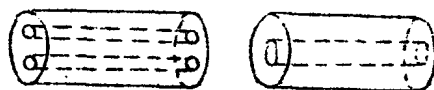


图1—6 绝缘子

间有一个、两个或四个孔，孔的大小视热电极直径而定。

表 1-4 列出了常用的绝缘材料。

表 1-4 常用的绝缘材料和它的能耐温度

材 料 名 称	能耐温度 (°C)
橡 皮	60 ~ 80
丝	100 ~ 130
珐 琅	100 ~ 150
玻 璃 管	500
石 英 管	1000
瓷 管	1300 ~ 1500

目前在常用的绝缘子材料是高级氧化铝或氧化镁（配 LL 热电偶）和高级耐火陶瓷（配 LB、EU、EA 热电偶）。参看表 1-5。

原

书

缺

页

原

书

缺

页