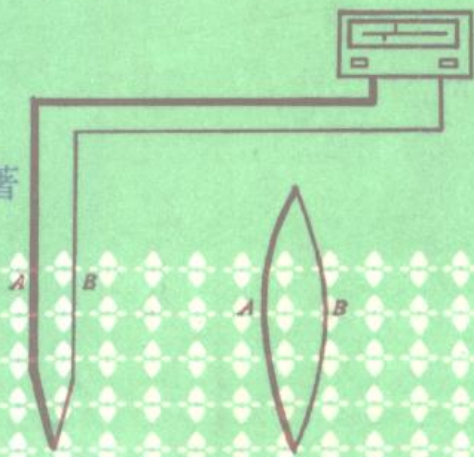


计量检定参考丛书

低温热电偶

宋德华 高鸿春 编著



中国计量出版社

计量检定参考丛书

低温热电偶

宋德华 高鸿春 编著

中国计量出版社

新登(京)字024号

内 容 提 要

低温热电偶包括用于测量 200℃ 以下温度的热电偶。本书主要内容包括: 热电偶测温的基本原理和测量线路; 低温热电偶的材料及类型; 低温热电偶的制作与检定; 低温热电偶的数据处理方法; 低温热电偶的正确使用; 低温热电偶在检定和使用中的误差分析。

可供从事温度计量、测试和控制的工程技术人员阅读, 亦可作为温度计量人员的培训教材, 对大专院校有关专业的师生也有参考价值。

中国计量出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

—*—

开本 787×1092/32 印张 4.625 字数 102 千字

1992年1月第1版 1992年1月第1次印刷

印数 1—5000

ISBN 7-5026-0482-0/TB·376

定价 3.00 元

前 言

热电偶由于其结构简单、使用方便、反应迅速和准确度比较高，故在温度测量中得到广泛的应用；尤其是因为它体积小，不受中间引线的限制，便于远距离传送以及自动测量与控制，因此在工业生产、科学实验和国防工程的温度测量中应用十分普遍。

近年来，由于低温超导技术的迅速发展以及大规模集成电路的问世，导致各种数字温度计的产品犹如雨后春笋般地出现。制作这些测温仪表的敏感元件，必须具备体积小、热容低及反应快的特性。在这方面，热电偶与热电阻比较起来，更显示出它得天独厚的优越性。

热电偶的种类很多，在低温范围内常用的就有数十种，但属于标准化（指国际电工委员会 IEC 颁布的品种）或得到人们公认的品种并不多。这就给选用者带来一定的困难。

本书是一部全面介绍有关低温热电偶使用与检定的参考书。作者试图从热电偶的基础知识、材料选择、热电偶的制作、检定设备、检定方法、数据处理以及误差分析诸方面作较为详细的介绍，以使读者对于如何应用低温热电偶进行测温有一个比较系统的了解。

本书在编写过程中，对于基本原理和物理概念的叙述，力求深入浅出，注重实用；对于低温热电偶丝材的选择，力求全面；在检定方法与设备方面，均从实际出发；对于有关测试方法和技术资料的引用，尽量反映国内外的先进水平，以便于读者参考选用。

由于作者水平有限，加之有关检定规程的知识涉及面广，书中难免存在错误和不妥之处，敬请广大读者及同行批评指正。

编 者

目 录

第一章 热电偶测温的基本原理与测量线路	(1)
1.1 热电偶测温的基本原理	(1)
1.2 热电偶测温的基本定律	(5)
1.3 热电偶测温的基本线路	(7)
第二章 低温热电偶的材料及类型	(11)
2.1 热电偶的种类	(11)
2.2 热电偶丝材的选择	(15)
2.3 热电偶材料的均匀性	(17)
2.4 热电偶的稳定度	(18)
第三章 低温热电偶的制作与检定	(20)
3.1 热电偶焊点的连接	(20)
3.2 检定热电偶的设备	(24)
3.3 低温热电偶的检定方法	(39)
第四章 低温热电偶的正确使用	(42)
4.1 放置与使用	(42)
4.2 热电偶的参考端	(43)
4.3 低温热电偶的测量端	(47)
4.4 低温热电偶测量线路的正确连接	(51)
4.5 环境条件的影响	(56)
第五章 低温热电偶的数据处理方法	(58)
5.1 标准温度计的计算方法	(58)
5.2 低温热电偶检定数据的处理	(63)
5.3 按 ITS-90 方法 273.16 K 以下电阻温度计温度值的 转换与计算	(83)
第六章 低温热电偶在检定和使用中的误差分	

析.....	(96)
6.1 检定结果的总不确定度	(97)
6.2 低温热电阻使用中的误差分析	(116)
6.3 计量标准认证与“建立计量标准技术报告” 的有关问题	(117)
附录 1 0~-200℃范围内 W_{ECT} 表.....	(124)
附录 2 0~-200℃范围内 $t^3(t-100)$ 表.....	(127)
附录 3 0~-200℃范围内铜-康铜热电阻标准分度表.....	(129)
附录 4 国产直流电位差计型号及主要技术参数	(133)
附录 5 国产标准电池型号及主要技术参数	(136)
附录 6 国产检流计型号及主要技术参数	(137)
附录 7 各次国际温标的内插仪器、温度范围和内插公 式.....	(140)

第一章 热电偶测温的基本原理 与测量线路

1.1 热电偶测温的基本原理

热电偶温度计（简称热电偶）系由热偶丝、参考点装置和电测仪表组成。热电偶是目前应用最为广泛的温度传感器之一，与其他温度测量仪表比较，热电偶具有以下特点：探头质量小、结构简单、易于根据实际工作需要用热偶丝自制；另外，热电偶的测温范围宽，低温可测至 -270°C ，高温可达 2800°C ，并且有比较好的计量性能，在某些情况下，它的准确度可达 $\pm 0.01\text{K}$ ，在低温测量中，一般可达 $\pm 0.5\text{K}$ 。

热电现象：

将两根不同成分的金属丝或合金丝 A 与 B ，焊接组成一个闭合回路，称之为热电偶，如图 1-1 所示。 A 、 B 称为热偶丝，也叫热电极。若两个接点处于不同的温度 T 和 T_0 时，则在回路中就会产生电流，相应于两个接点处产生的电动势称为温差电动势或简称为热电动势。

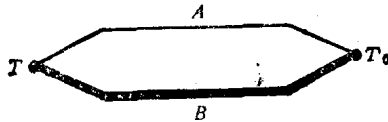


图 1-1

放置在被测温度为 T 的介质中的接头，称为测量端（或工作端）；另一接头则称为参考端（或自由端）。在实际测量中参考端并不焊接，而是接入测量仪表，其温度 T_0 。通常是某个恒定温度（如冰点、氮或氦的沸点）。当热电偶两端温度 $T \neq T_0$ 时，回路中就有电流发生。产生这种电流的电动势称为热电势即 $E = E_{AB}(T, T_0)$ ，这种物理现象称为热电现象。当参考端的温度 T_0 保持一定时，热电势 E 只是测量端温度 T 的函数。这就是热电偶测温的物理基础。由物理学可知，热电势是由接触电势和温差电势两部分组成。

1.1.1 接触电势

两种不同性质的金属 A 和 B 的接触处，由于其内部的电子密度（单位体积中的自由电子数）不同，在 A 与 B 的接触处就会发生自由电子的扩散现象。自由电子由密度大的金属 A 扩散到密度小的金属 B ，这样就会使金属 A 由于失去电子而带正电，金属 B 由于得到电子而带负电，如图 1-2 所示。于是在金属 A 、 B 之间产生电位差，在接触处建立静电场 U ，这个静电场对电子的作用与电子的扩散作用的方向相反。在一定的温度下，如果从金属 A 扩散到金属 B 的电子数等于从金属 B 吸向金属 A 的电子数时，就达到了动态平衡。这时金属 A 、 B 之间形成的电位差称为接触电势，又称珀尔帖（Peltier）电势，记作 $E_{AB}(T)$ 。根据物理学的推导，接触电势为：

$$E_{AB}(T) = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} \quad (1-1)$$

式中： e ——电子电荷量，等于 4.802×10^{-10} 绝对静电单位；

K ——波尔兹曼常数，等于 1.38×10^{-16} 尔格/度；

T ——接触处的热力学温度, K;

N_{AT}, N_{BT} ——金属 A、B 在温度 T 时的自由电子密度。

从上式可知, 接触电势的大小与接头处温度和金属的种类有关。

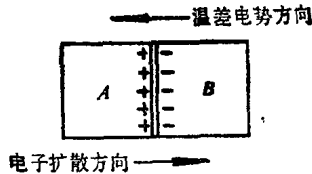


图 1-2

1.1.2 温差电势

在一根均匀导体中, 若两端温度不同, 则自由电子将按温差在导体中形成密度梯度, 如图 1-3 所示。金属 A 两端的温度分别为 T 和 T_0 , 当 $T > T_0$ 时, 自由电子将从 T 端向 T_0 端扩散, 使 T 端失去电子带正电, T_0 端得到电子带负电, 于是在金属两端之间形成电位差。电位差所建立的静电场吸引电子从温度低的一端流向温度高的一端, 在一定的条件下达到动态平衡, 这时的电位差称为温差电势, 又称汤姆逊 (Thomson) 电势, 记作 $E_A(T, T_0)$ 。根据物理学的推导, 当金属两端温度为 T 和 T_0 时, 温差电势为:

$$E_A(T, T_0) = \frac{K}{e} \int_{T_0}^T \frac{1}{N_A} d(N_A T) \quad (1-2)$$

式中, N_A 是金属 A 的自由电子密度, 它是温度的函数。

为了便于分析问题, 上式可以写成函数差的形式

$$E_A(T, T_0) = E_A(T) - E_A(T_0) \quad (1-3)$$

以上两式都表示温差电势的大小与导体的种类和两端的温差大小有关。

1.1.3 热电偶回路的热电势

在热电偶回路中，两电极接触处有接触电势 $E_{AB}(T)$ 和 $E_{AB}(T_0)$ ，A 和 B 的两端之间有温差电势 $E_A(T, T_0)$ 和 $E_B(T, T_0)$ ，若 $T > T_0$ ，各电势的方向如图 1-3 所示。回路的总电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 称作塞贝克 (Seebeck) 电势，它等于回路中各电势的代数和，即

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) + E_B(T, T_0) - E_{AB}(T_0) - E_A(T, T_0)$$

将式 (1-3) 代入上式，得

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= [E_{AB}(T) + E_B(T) - E_A(T)] \\ &\quad - [E_{AB}(T_0) + E_B(T_0) - E_A(T_0)] \\ &= f_{AB}(T) - f_{AB}(T_0) \end{aligned} \quad (1-4)$$

上式表示了热电偶的热电势与温度的关系。如果使 T_0 恒定，则 $f_{AB}(T_0)$ 为常数，于是，回路热电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 就只与温度 T 有关，而且是 T 的单值函数。这就是应用热电偶测温的原理。

热电偶的热电势 $E_{AB}(T, T_0)$ 由实验测定。将其实验数据整理列成表格，称为热电偶的分度表。

热电极极性的规定：测量端失去电子的热电极为正极，得到电子的热电极为负极。在热电偶符号中，规定正极写在

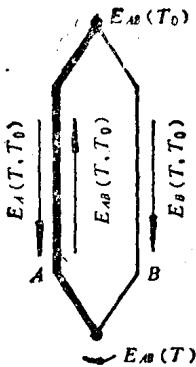


图 1-3

前面，负极写在后面。在应用中，识别热电偶热电势的极性，可将热电偶测量端稍加热，在参考端用直流电表判断。若直流表指示为正，则接电表正端子的热偶丝为正极，接负端子的热偶丝就是负极。

1.2 热电偶测温的基本定律

由热电偶测温原理和实验总结出的三个基本定律——均质导体定律、中间导体定律和中间温度定律——它完整地概括了温差电路的基本性质，成为热电偶实际测温的重要理论基础和指导准则。

1.2.1 均质导体定律

两种均质金属组成的热电偶，其热电势数值与热电极的直径、长度及沿热电极长度上的温度分布无关，只与热电极材料和两端温度有关。热电势值是两端温度函数之差，如果两端温度相等，则热电势为零；如果材质不均匀，则当热电极上各处温度不同时，将产生附加热电势，造成无法估计的测温误差。所以热电极材料的均匀性是衡量热电偶质量的重要指标之一。

1.2.2 中间导体（或中间金属）定律

用热电偶测温时，在测量回路中必须引入显示仪表和连接导线等，而这些导线和热电极材料往往是不同的。于是，就提出这样一个问题，当其他金属材料引入热电偶测量回路后，对温度测量有没有影响？这个问题，从中间导体定律中即可得到答案：“在热电偶回路中，只要中间导体两端温度相同，那么，接入中间导体后，对热电偶回路的总热电势没有影响”。

用中间导体C接入热电偶回路不外乎图1-4所示的两种

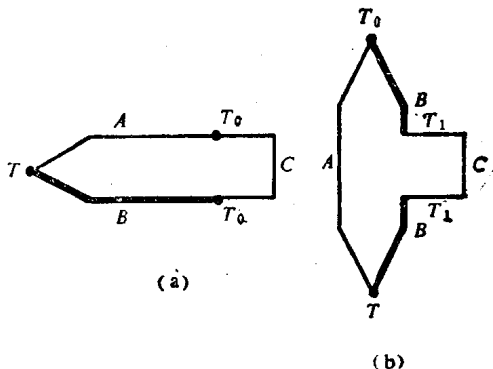


图 1-4

形式。

先讨论图 1-4 (a)，由式 (1-5) 可知，热电偶回路的热电势等于各接点热电势的代数和。

$$E = \sum e(T) \quad (1-5)$$

也即如式 (1-6) 所表示

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) \quad (1-6)$$

如果图 1-4 (a) 所示的回路各接点温度均为 T_0 ，则回路的热电势应等于零，即

$$\begin{aligned} e_{AB}(T_0) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) &= 0 \\ e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) &= -e_{AB}(T_0) \end{aligned} \quad (1-7)$$

将式 (1-7) 代入式 (1-6) 中，得

$$\begin{aligned} E_{ABC}(T, T_0) &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \\ &= e_{AB}(T) + e_{BA}(T_0) \\ &= E_{AB}(T, T_0) \end{aligned} \quad (1-8)$$

由上式可知，当中间导体两端温度相同时，它将不影响

总热电势。

对于图 1-4 (b) 所示的情况，接入中间导体 C 后，如果其两端的温度相同，那么也不会影响回路总的热电势。对于在回路中接入多种导体后，只要每一种导体两端的温度相同，也可以得到同样的结论。

利用热电偶测温时，显示仪表和连接导线可看作中间导体。根据中间导体定律，只要显示仪表和连接导线两端的温度相同，则它们对热电偶产生的热电势就没有影响。

1.2.3 中间温度定律

热电偶接点温度为 T_0 和 T 的热电势，等于接点温度分别为 T_0 、 T_n 和 T_n 、 T 时相应的热电势的代数和。由此定律可以得出：已知热电偶在某一给定参考点温度进行的分度，就可以根据此定律求出参考点为任何固定点温度时的热电偶热电势。

同一种热电偶，当其两接点温度 T 、 T_n 不同时，则产生的热电势也不同。要将对应各种 (T, T_n) 温度的热电势-温度关系都列成图表是不现实的。中间温度定律为制订分度表奠定了理论基础。根据这一定律，只要列出参考温度为 0°C 时的热电势-温度关系，则参考端温度不等于 0°C 的热电势都可按下式求出

$$E_{AB}(T, T_n, T_0) = E_{AB}(T, T_n) + E_{AB}(T_n, T_0) \quad (1-9)$$

根据理论还可以推出，当接入与热电偶同样热电性质但成本较低的补偿导线时，相当于把热电偶延长而不影响热电偶的热电势，这就为工业测温中应用补偿导线提供了理论依据。

1.3 热电偶测温的基本线路

前面提到，热电偶的测温原理是由于两个接点的温度之

差形成不同的热电势，也就是两个接点的热电势之差，而不单纯是两个接点的温度之差。如果保持一个接点的温度不变（一般称为参考端温度），则热电势就取决于另一接点（称为测量端）的温度了，或者说热电势就是测量端温度的单值函数。在实际测量中，参考端取什么温度，视需要而定，一般都取冰点或水三相点，但也有取氮沸点（ $\sim 77\text{ K}$ ）或氦沸点（ 4.2 K ）的，至于为了测温差，参考端就可以任选了。热电偶线路的连接方法有如下几种：

1 串连线路

这种线路多用于小温差测量或需要较大灵敏度的场合。在低温测量时，热电偶的灵敏度都比较低，有时只有 $14\sim 15\ \mu\text{V/K}$ ，此时为了获得较大的热电动势输出，往往将若干支同种类热电偶，按正负极连接，如图 1-5 所示。这种线路称为串联线路。

设串联线路总热电动势为 $E_{\text{串}}$ ，则有：

$$E_{\text{串}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = n\bar{E} \quad (1-10)$$

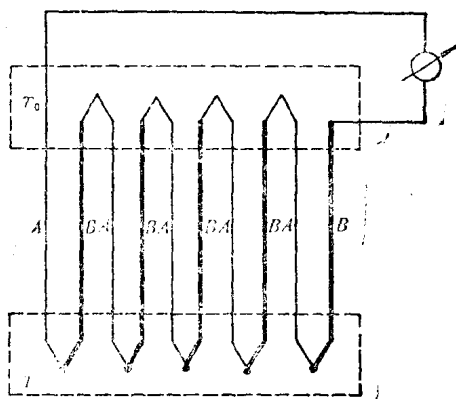


图 1-5

式中, E_1, E_2, \dots, E_n 为单支热电偶的热电势, \bar{E} 是 n 支热电偶的平均热电势。

将多支热电偶的两个接点, 分别集中在一起, 然后串联起来组成的热电偶, 通常称为热电堆。这种线路最大的缺点是, 只要有一支热电偶断路, 整个热电堆就不能正常工作。这种热电偶串联线路多见于低温控温和配显示仪表等各类实验中。

2 并联线路

当需要测量平均温度或准确地测量温度时, 往往采用并联线路, 即将若干支同种类热电偶, 正极与正极, 负极与负极分别连接在一起, 如图 1-6 所示, 称为并联线路。

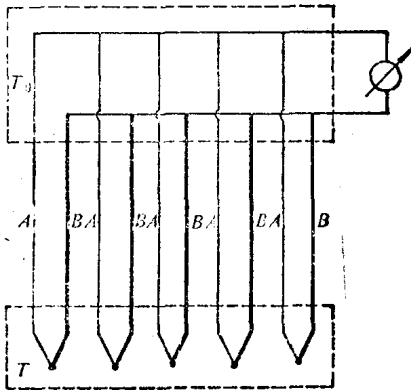


图 1-6

如果 n 支热电偶的热电势相差不多, 且偶丝的电阻相等, 则并联测量线路的总热电势等于 n 支热电偶热电势的平均值, 即:

$$E_{\#} = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{n} = \frac{\Sigma E_i}{n} \quad (1-11)$$

式中各符号的意义与上式相同。

这种并联线路多用于低温比热、热导和热膨胀等的测量中。与串联线路相比，并联线路的热电动势虽小，但其相对误差也很小，仅为单支热电偶的 $1/\sqrt{n}$ ，而且，当其中一支热电偶断路时，不影响整个测温工作的进行。

3 反向串联线路

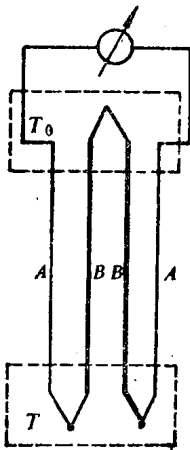


图 1-7

将两支同种型号或同种材料热电偶反向连接（见图 1-7），用以测量温差热电势的线路称为反向串联线路。其线路总热电势等于两支热电偶的热电势之差，即：

$$E_{\bar{x}} = E_1 - E_2 \quad (1-12)$$

此种线路常用来测量两处的温差，例如测量低温恒温器中温屏与恒温块的温场分布（或两点之间的温差）。