

热电偶及其应用

鞍鋼計器及自动調節車間

张世湘 編著

冶金工业出版社

热 电 偶 及 其 应 用

鞍鋼計器及自动調节車間

张世湘 編著



冶金工业出版社

热电偶及其应用

鞍钢计器及自动调节车间

张世湘 编著

编辑：孙文俊 设计：周广、朱英 校对：赵崑方、李慧英

—— 参 ——

冶金工业出版社出版（北京市灯市口甲45号）

北京市书刊出版业营业登记证出字第093号

冶金印刷厂印 新华书店发行

—— 中 ——

1959年7月第一版

1959年7月北京第一次印刷

印数 5,510册

开本850×1168·1/32·124,000字·印张5 $\frac{12}{32}$ ·

—— 参 ——

统一书号 15062·1652 定价 ~~0.55~~元
0.70

出版者的話

热电偶是工业中测量温度最常用的仪器，正确的使用和维护、检修热电偶，不但能节约热电偶本身的消耗，更重要的是能测得准确的温度。

本书对各种热电偶的构造、特性、应用、校准及修理等方面都作了较详细的叙述，文字浅近易懂，是国内介绍热电偶装置方面比较通俗的著作，很适合于各工厂热工和测温人员阅读，亦可作为培养测温员徒工的教材。

目 录

序.....	1
緒言.....	3
第一章 热电偶的一般特性	
1. 基本原理.....	5
2. 四种基本定律及其实际运用.....	10
3. 热电偶配用电极綫的选释.....	18
4. 热电偶的种类和主要特性.....	25
5. 热电偶的保护、构造和型式.....	31
第二章 热电偶的应用	
1. 論概.....	46
2. 几种实用測溫綫路.....	46
3. 冷端溫度变化对測溫准确度的影响及补正方法.....	57
4. 輻射热对准确度的影响及其防止方法.....	71
5. 传导热对准确度的影响及其防止方法.....	79
6. 絕緣度对准确度的影响.....	83
7. 热感度和影响热感度的各問題.....	86
第三章 热电偶的安装	
1. 安装位置和方式.....	93
2. 几种基本安装方法.....	98
3. 几种实用安装方法.....	100
第四章 热电偶的校准和修理	
1. 概論.....	105
2. 校准方法.....	106
3. 校准用設備装置.....	112
4. 修理.....	124
第五章 几种特殊溫度測量用热电偶	
1. 測量鋼液內部溫度用浸入式热电偶.....	128

2. 測量物体表面溫度用热电偶·····	132
3. 測量滾动物体表面溫度用热电偶·····	134
4. 探測物体內部溫度用热电偶·····	136
5. 碳—鎢热电偶·····	136
6. 碳—碳化矽热电偶·····	138

附录一

1. 鉑銠 (90%Pt+10%Rh)—鉑 (100%Pt) 热电偶溫度和热电势等值关系表·····	140
2. 鉑銠 (87%Pt+13%Rh)—鉑 (100%Pt) 热电偶溫度和热电势等值关系表·····	144
3. 鎳鉻—鎳鋁合金热电偶溫度和热电势等值关系表··	145
4. 鎳鉻—考銅合金热电偶溫度和热电势等值关系表··	148
5. 鐵—考銅合金热电偶溫度和热电势等值关系表····	150
6. 銅—考銅合金热电偶溫度和热电势等值关系表····	152
7. 鐵—康銅合金热电偶溫度和热电势等值关系表····	154
8. 銅—康銅合金热电偶溫度和热电势等值关系表····	155
9. HK—CA 热电偶溫度和热电势等值关系表·····	156
10. 鎢—鉑热电偶溫度和热电势等值关系表·····	158

附录二

1. 几种常用材質和純鉑絲在配成热电偶后, 在冷端 为 0°C 和热端为 100°C 时的热电势关系表·····	159
2. 几种常用材質的主要物理特性表·····	160
3. 几种常用材質的輻射系数和吸收系数表·····	161
4. 几种常用材質的热传导系数表·····	161
5. 几种常用型号热电偶的热惰性关系表·····	162
6. 几种常用型号热电偶在 20°C 时的电 阻和允許誤差表·····	162
7. 鉑銠—鉑热电偶在各不同溫度时 最大允許誤差表·····	163

8. 鎳鉻—鎳鉍热电偶在各不同溫度时 最大允許誤差表.....	163
9. 鎳鉻—考銅热电偶在各不同溫度时 最大允許誤差表.....	163
10. 热电偶試驗記錄单格式.....	164
11. 热电偶試驗報告单格式.....	165

序

本書所述及的主要內容，包括有关热电偶的构造、特性、应用以及校准和修理等問題。另外对热电偶本身或者在实际应用中所涉及到的一些密切有关資料也尽可能包括在內。因为所討論的范围，是屬於热电偶的一般基础性質和应用，所以內容都以普通或标准型式的热电偶为范例，各种特殊測溫用的热电偶只作一些附带性的簡要概述。另外牵涉到配用仪表本身的各項問題，不在討論之列。

無論在实际工作中所接触到的或者参考的大部份資料，基本都是苏联的，所以除去少数情况外，書中所提及的都以苏联为范例。

为了使讀者能够較深刻和容易体会所叙述的內容，言詞尽可能通俗，利用簡易的証式并且以多繪图为原则。另外，为了能够与实际相結合，尽可能多列举实例进行解說。

本書所要求的对象，主要为备有初中文化程度以上的专业技术工人和初学技术人員。所希望达到的目的，是对热电偶作为測溫元件有一明确和系統的認識；进一步能够在实际工作中正确地掌握使用，并能够及时处理和发现各种有关問題。

由于有关这方面的专业参考資料很少，本国的更少，所以不少內容是在工作中所体会到的，未必深刻和正确，恐得出錯誤論斷，尙希有关专业讀者多提出指正。

所参考的主要資料如下：

1. Гордов А.Н. Методы измерения температур в промышленности, Металлургиздат, 1952.
2. Митронов К.А., Шипетин Л.И. Теплотехнические измерительные приборы, Машгиз, 1954.
3. Приборы, для измерения температуры и их поверка, Машгиз, 1955.

4. Гупон В.Т. Контрольно—измерительная техника в производстве строительных, промстроинадат, 1954.
 5. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы Госэнергоиздат, 1953.
 6. Иванов В.М. Справочник по тепловому контролю и автоматике в черной металлургии, Металлургияиздат, 1951.
 7. Donald P. Eckman. Industrial instrumentation, 1950.
 8. Ezer Griffiths. Methods of measuring temperature, 1947.
-

緒 言

在工业溫度測量工作中，虽然有多种不同性质的測定方法，但利用热电偶作为測溫元件比較最为广泛，其主要原因可由以下数点說明：

1. 构造简单：热电偶的主体实际仅由两种不同性质的导体或半导体經過互相絕緣和将其一端焊接或絞接后而成；此外，在实用中再稍加适宜的保护装置即可。在一般正常使用情况下，这种保护装置并不需要十分特殊。

2. 有較高的准确度：因为热电偶在測量溫度时，直接和被測物体接触，因此不受中間介质的影响，所以容易得到較高的准确度。

3. 有符合实际需要的測溫范围：一般常用的热电偶，低可以測至 -50°C 、高可以到达 $+1600^{\circ}\text{C}$ 左右的溫度范围。一般工业常用溫度值大部份也都在这个范围内，因此实际已可基本滿足需要。倘配用热电极采取特殊材质时，更可最低測至約 -180°C 和高达約 $+2000^{\circ}\text{C}$ 范围内的溫度。

4. 有良好的热感度：因为热电偶的主要作用处是由构成主体的两极綫所接成的微小一点；另外两极綫本身也可由較細綫径配制，因此可以获得較小的热容量，或者说热惰性小和有高的热感度。

5. 可以远距离传送示数和集中管理：受溫度作用后所产生的热电势，可以用导綫传送到远离測溫的地点，由所配用仪表将被測溫度指示或者記錄下来；这样同时可以达到将各不同地方所測得的溫度集中于一处管理。

6. 使用便利：組成热电偶的两极綫不受其形状和大小的限制，可以按照需要制配成多种不同的尺寸和型式，以及制作成固定的或者便于携带的各种式样。

以上所列举的各项也可以看成为热电偶具有的优点。但在这

些优点中却包含着两种意义。一种是固有的，例如构造简单，远距离传送指示和应用便利等。但另外一种，例如准确度，温度测量范围以及使用寿命等，必须要具备有一定的应用技术水平才有实现的可能。因为热电偶用来作为测温元件，只根据其受热作用时所产生的多种物理现象改变的一种——热电势和温度的关系，然后将被测处的温度值推知，其他跟随产生的变化因素都保持恒定。但在实际测温工作中，尤其是在工业的温度测量工作中，一个热电偶在测温时所受到的外界影响因素是多种多样的，倘其中任何一种处理不当就会产生严重的恶果。小则会产生不应有的测量误差，大则会使测温工作完全失去意义，甚至使热电偶本身遭到不应有的损坏。例如一熟知的铂铑合金—铂热电偶，实际可以有高达 1600°C 甚至更高的测温点，准确度也可以保持到 $\pm 2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 。但这必须要有条件；就是必须在洁净和氧化气体以及有适当的保护装置并且要在一连串的正确应用条件情况下才可以实现。虽然如此，在一较长时间的应用后，也未免要产生原特性的改变，以致发生超过准确度允许以外的误差。相反地，如若将其置放于有害或还原性较强的气体中时，例如一氧化碳，氧化硫或者砒的蒸气等等中，甚至在 400 或者 500°C 的低温度就会使其遭受到重大损伤。

由以上可知，应用热电偶作为测温元件，虽然有多种有利条件，但要想使这些条件全部实现却是一件比较烦杂的工作，尤其是在保证准确度方面；而这一点正是测温工作中占首要地位的一点。因为较高的准确性对温度测量工作来说是起着决定性作用的。但是这并不意味着这些条件不可以实现，问题主要是在如何正确地来认识热电偶本身所具有的特性和如何来运用这些特性以适应于温度的测量工作。热电偶的使用比其他直接测量方法都较烦杂，也可以认为是热电偶存在的固有缺点。在下面各章节中即将分别把有关热电偶的构造、特性、测量原理和正确应用等问题加以述说，以供读者参考。

第一章 热电偶的一般特性

1. 基本原理

凡是两种不同成份的导体或半导体，若将其两端各各互相焊接或绞接，倘此两端所处的温度不同，在其所组成的回路中就有电流产生。这种现象早在1821年首先由傑伯克所发现，所以一般将这种现象称为傑伯克热电效应。如設 A 和 B 为两种不同成份的导线，将其两端 1 和 2 各之互相焊接或绞接，并使所处温度各为 T_1 和 T_2 ，（如图 1 所示）。若 T_1 不等于 T_2 ，这回路内所串接的毫安計就有指数，証明有电流产生。 T_1 和 T_2 相差越大，回路内所产生的电流强度也就越大，或者说电流强度的大小取决于两端所处的温度差，且成正比关系。热电偶就是利用这种温度差和所产生的热电势的关系将被测处的未知温度值求知。一般将温度高的一端称为热接端或簡称为热端，温度低的一端称为冷接端或簡称为冷端。

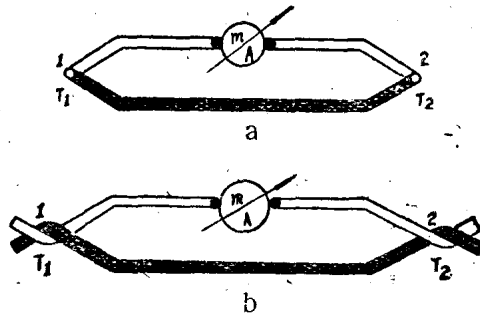


图 1

a—焊接；b—绞接

为了容易理解和便于討論起见，上述关系可以利用等式表示如下：設由图 1 中 A 和 B 两极线所组成的回路内，由于 1 和 2

端各受溫度 T_1 和 T_2 的作用所产生的总热电势为 $E_{A,B}(T_1, T_2)$ ；按照同理則可分別將 1 端所受溫度 T_1 和 2 端所受溫度 T_2 所产生的单独热电势表示为： $E_{A,B}(T_1)$ 和 $E_{B,A}(T_2)$ 。如此总热电势 $E_{A,B}(T_1, T_2)$ 应为两分热电势 $E_{A,B}(T_1)$ 和 $E_{B,A}(T_2)$ 之和。即，

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = E_{A,B}(T_1) + E_{B,A}(T_2) \quad (1)$$

若 1 端和 2 端的溫度相等，或 $T_1 = T_2 = T$ 时；按照热力学第二定律，則迴路內的总热电势恒等于零，或 (1) 式成为：

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = E_{A,B}(T) + E_{B,A}(T) = 0 \quad (2)$$

(2) 式即表示倘若热端和冷端所处的溫度相等时，无論两端所作用的溫度值高低程度如何，迴路內热电势的总和恒等于零，或在这种情况下热电偶不可能将被测处的溫度值测出，完全失去了其測溫作用。將 (2) 式移項，可得：

$$E_{A,B}(T) = -E_{B,A}(T),$$

这就表示 $E_{A,B}(T)$ 和 $E_{B,A}(T)$ 两数值为反方向关系。將上列关系代入 (1) 式可得：

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = E_{A,B}(T_1) - E_{A,B}(T_2) \quad (3)$$

由 (3) 式可以明确地看出在一热电偶迴路內，溫度和热电势的关系为热和冷两端受溫度变化所产生热电势之差。

上述热电现象所以能够出现，主要是由于热电偶本身吸收了外部的热能轉变成成为电能的物理改变现象。其解释方法最好利用电子論加以說明。由于热电偶是由两种性質不同的导体或半导体

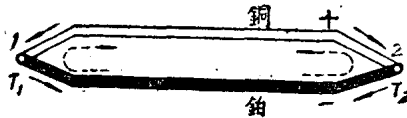


图 2

所組成，因此其所含有的自由电子数量也各不相同，在受到热能的作用后，自由电子存有较多的一方将向少的一方移动，这样在迴路內就形成电子流动现象。失掉电子的一方显示正性，接受电子

的一方就成負性。上述现象可举一实例进一步說明如下：

今設由銅和鉛构成一热电偶迴路，如图 2 所示。若两连接端所处的溫度 T_1 不等于 T_2 时，这迴路內的电子流动方向就如图 中实箭头所示，即銅的电子移向鉛的一方。这样銅在迴路中就显示正性，鉛为負性。由于电子流动的方向和实际应用电流的方向相反，因此迴路中的实际电流方向应如虚箭头所示。

在 (3) 式中， T_1 为被测处的实际溫度，也是需要知道的溫度，因此是一变数；其相应的热电势为 $E_{A,B}(T_1)$ 。但联接于迴路內的仪表溫度指示数却取决于总热电势 $E_{A,B}(T_1, T_2)$ 。由 (3) 式可知总热电势 $E_{A,B}(T_1, T_2)$ 絕不等于由 T_1 所产生的单独热电势 $E_{A,B}(T_1)$ ，因为尚有 T_2 端的热电势 $E_{A,B}(T_2)$ 的存在影响。一般 T_2 实际为一变数，因此 $E_{A,B}(T_2)$ 也同样为一变数。这样可知仪表随时所指示的总热电势值实际为热端溫度变化和冷端溫度变化間的一函热关系，或这一关系可用式子表示为：

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = f(T_1) - f(T_2) \quad (4)$$

在这里应当特別注意的是式 (4) 所表示的热电势和溫度之間的真实变化关系是冷热两端函数变化之差，但决不能誤解为两端溫度差的函数变化关系。两者絕不可互相混淆，因为倘按照后者的解释，(4) 式将写成：

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = f(T_1 - T_2) \quad (5)$$

很明显地，(4) 式不同于 (5) 式，且 (5) 式是錯誤的。这也就意味着在一热电偶迴路中，溫度和热电势的变化关系并不是絕對直綫关系。

为了說明 (4) 和 (5) 式的不同，可举一实例相互比較如下：

設由一鉛銻—鉛热电偶組成一測溫迴路，如图 3 所示。按照式 (3) 或 (4) 的关系可写成：

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = f(1000) - f(50) = 9.569 - 0.301 = 9.268 \text{ 毫伏。}$$

这就表示当毫伏計指示 9.268 毫伏时，被测处的溫度 T_1 恰为 1000°C 。

但若采用錯誤的 (5) 式計算时却得:

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = f(1000 - 50) = f(950) = 8.995 \text{ 毫伏}$$

实际 8.995 毫伏在此情况下应等于:

$$8.995 = f(T) - 0.301, \text{ 或 } f(T) = 8.995 + 0.301 = 9.296 \text{ 毫伏}$$

或 $T = 976.4^\circ\text{C}$ 。

在溫度測量工作中, 最希望的是使仪表所指示的热电势就是被測量端所有的热电势, 或者使 $E_{A,B}(T_1, T_2) = f(T_1)$ 。要想作到这一点, 从 (3) 式或 (4) 式可以看出只要使 $E_{A,B}(T_2) = 0$ 或 $f(T_2) = 0$ 即可。这即表示使冷端溫度保持 0°C 。如此关系式 (4) 可写成为:

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = f(T_1) = f(T) \quad (6)$$

式 (6) 为热电偶測溫时的标准关系式。各种热电偶的标准热电势和溫度之間的等值关系就是根据这一关系式制定的。

在工业的一般測溫情况下, 使冷端溫度恒等于零是一件比較不易的事, 但根据以上所述, 如若将其保持一常数, 或使 $f(T_2) = K$, 經過适当的补正后, 同样也可得到所測量点的真实溫度值。这样 (4) 式成为:

$$E_{A,B}(T_1, T_2) = f(T_1) - K = \Phi(T) \quad (7)$$

相反地, 如若 $f(T_2)$ 不处于以上所提出的情况, 或仍处于一变数状态, 根据上述的原理可知, 根本不可能測知被测处的真实溫度值。这就是一般所說的热电偶冷端对准确度的影响問題, 也是在实际工作中普遍存在而不易处理的一项問題, 以后要詳加討論。

倘若將傑伯克热电现象更进一步分析和理解, 在一热电偶迴路内所产生的总热电势实际是由两种不同性质的热电势組合而成。一为由两联接点 1 和 2 受溫度 t_1 和 t_2 作用后所产生的电势, 可分別写成 $e_{A,B}(t_1)$ 和 $e_{A,B}(t_2)$ 。上述电势一般称作皮耳氏热电效应。另一就是由組成迴路的两热电极綫 A 和 B, 因受到不同溫度梯度本身吸热或放散一定的热量关系, 也各存有一种电势, 这种电势一般称作湯姆生热电效应。假若設 σ 为两极綫的吸热或放热

率（即溫度每相差 1°C 产生 1 安培电流强度时，所吸收或放散的热量），又設 1 点和 2 点間的溫度梯度是均匀的話，則这种电势值可分別写成： $\sigma_A \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right)$ 和 $\sigma_B \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right)^*$ 。如此可知在一热电偶迴路內其总热电势实际由四种电势組成，如图

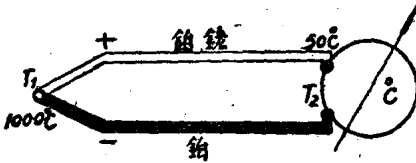


图 3

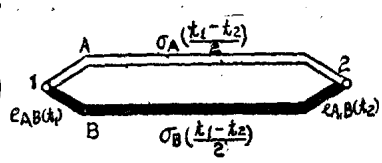


图 4

4 所注。倘将上述关系用式子表示可写成为：

$$E_{A,B}(t_1, t_2) = e_{A,B}(t_1) - e_{A,B}(t_2) + \sigma_A \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right) - \sigma_B \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right) \quad (8)$$

但由 (2) 式知： $E_{A,B}(t_1, t_2) = E_{A,B}(t_1) - E_{A,B}(t_2)$

因此可知：

$$E_{A,B}(t_1) - E_{A,B}(t_2) = e_{A,B}(t_1) - e_{A,B}(t_2) + \sigma_A \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right) - \sigma_B \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right) \quad (9)$$

由 (9) 式可知 (2) 式包含有上述四种热电势的意义。但經過实验証明在一热电偶迴路中起决定性作用的还是两联接点所产生的电势，或为 $e_{A,B}(t_1)$ 和 $e_{A,B}(t_2)$ ，但两极綫本身所产生的电势 $\sigma_A \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right)$ 和 $\sigma_B \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right)$ 以絕不可忽略。

* 两热电极受热的相差梯度在实际情况下，絕不是均匀的，因此其本身所产生的热电势实际为一积分关系，即 $\sigma_B \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right)$ 和 $\sigma_A \left(\frac{t_1 - t_2}{2} \right)$ 应各为

$$\sigma_A \int_{t_1}^{t_2} dt \text{ 和 } \sigma_B \int_{t_1}^{t_2} dt.$$

根据以上所述，本节可得出下面几項簡短結論：

- (1) 凡是两种不同性质的导体或半导体皆可配制成热电偶。
- (2) 热电偶的测量温度主要靠热冷两端温度的差与相应热电势之间的关系，和配用极线的形状和尺寸大小无关。
- (3) 热电偶冷端的温度必须恒定，最好是保持 0°C 。
- (4) 热电偶所测温度和热电势之间的关系，不只完全取决于热端和冷端两接点所产生的热电势，并且还要考虑到组成两电极线本身因受热梯度所产生的热电势。

2. 四种基本定律及其实际运用

运用热电偶实际测量温度之前，应首先了解在一测温组成回路中所存在的几种主要特性，这样才能正确地运用和保证温度测量的准确性。以下是在一热电偶测温回路中的四种主要基本运用定律，今分别述说如下：

(1) 在一由相同导体或半导体所组成的回路内，倘只受到热的作用，无论组成这回路的导体或半导体横截面或长短如何，都不可能产生热电现象。

这种现象的存在，一般都是熟知的，但其原因为何好像不易说明，因此只有利用电子论来作解释。假设利用相同性质的两导线 A 和 A 组成一测温回路，如图 5 所示，两联接端 1 和 2 各

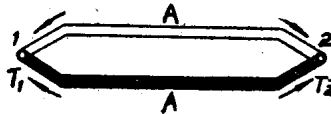


图 5

受到温度 T_1 和 T_2 的作用，这就使两导线受热端都产生自由电子流动现象。但因为 A 和 A 为相同性质的两导线，电子流动强度都相等，所以互相抵消（如图中箭头所示），不产生电流现象。因此可知不论 T_1 和 T_2 的温度值如何，在回路内都不产生电流现象。同时也可知道，电流强度因为是由单位面积所通过的电子量决定，所以对导线的横截面大小并无关系。