

热电偶的工作原理

1.前言

热电偶是在产业界使用数量最多的温度传感器。他的测量原理和三个基本定律，我们在《热电偶的小知识》中已经介绍过，在此文中我们利用一些计算公式进一步讲解他的工作原理和定律。

2.热电偶的工作原理

2.1 塞贝克效应

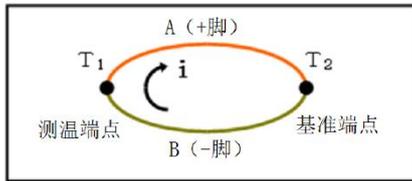


图1

如图 1 所示，当闭合回路由两种均质导体 A 和 B 组成时，假设其两端温度分别为 T_1 和 T_2 ，如果 $T_1 > T_2$ ，则回路中有电流 i 流动。如果 $T_1 = T_2$ ，则没有电流。如果 $T_1 < T_2$ ，则有电流反方向流动。这个现象被称为塞贝克效应，由 T.J.Seebeck 于 1821 年发现。在回路中有电流流动就说明存在电动势，这个电动势被称为热电动势。热电动势的大小由两个导体的材料 A 和 B 及端点温度 T_1 和 T_2 决定。

度 T_1 和 T_2 决定。

2.2 热电动势

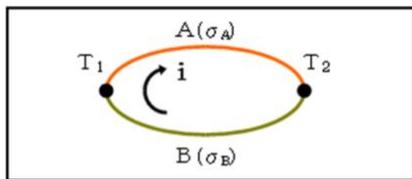


图2

观察热电动势，我们发现他是珀尔帖效应和汤姆逊效应的作用和。

由珀尔帖效应产生的电动势是异种金属接触时产生的接触电动势，根据金属的种类和温度而不同。在图 2 的闭合回路中电动势为，

$$E_p = \pi_{AB} \cdot T_1 + \pi_{BA} \cdot T_2 = \pi_{AB} \cdot T_1 - \pi_{AB} \cdot T_2$$

其中， π_{AB} 是金属 A 和 B 的帕尔贴系数，是温度的函数。

由汤姆逊效应产生的电动势是在同种的金属存在温度梯度时产生的电动势，

$$E_t = \sigma_A(T_2 - T_1) + \sigma_B(T_1 - T_2) = (\sigma_B - \sigma_A)T_1 - (\sigma_B - \sigma_A)T_2$$

其中， σ_A 和 σ_B 分别是金属 A 和 B 的汤姆逊系数。

热电动势是这两个效应的作用和，

$$E = E_p + E_t = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2)$$

我们可以看到E是一个由 T_1 和 T_2 决定的函数。

3.热电偶的三个基本定律

3.1 均质回路定律

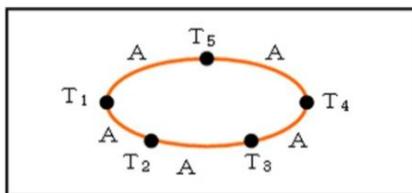


图3

同种金属线（均质的金属）无法像热电偶那样产生热电动势。如图 3 所示，由均质金属 A 组成的闭合回路中，其电动势

$$E = E_{AA}(T_1) + E_{AA}(T_2) + \dots + E_{AA}(T_5) = 0$$

成立。如果 $E \neq 0$ ，则说明金属线有不均质的部分。另外在任意温度 T 下，

$$E_{AA}(T) = 0$$

成立。

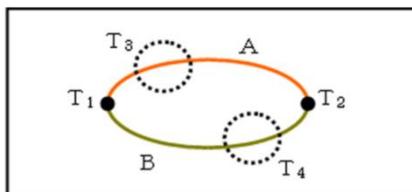


图4

在由均质金属 A 和 B 组成的闭合回路中，如图 4，在中间施加不同的温度时，其电动势为

$$E = E_{AB}(T_1) + E_{BB}(T_4) + E_{BA}(T_2) + E_{AA}(T_3)$$

因为 $E_{BB}(T_4) = E_{AA}(T_3) = 0$ ，所以

$$E = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2)$$

成立。电动势只受端点温度 T_1 和 T_2 的影响，不受中间温度的影响。这就是我们将热电偶连接到设备时不用考虑途中温度的理由。

3.2 中间金属定律

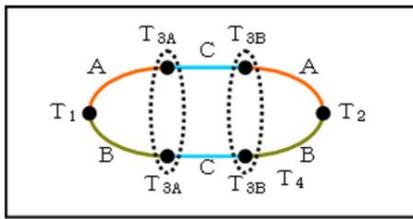


图5

在热电偶中接入异种金属时，如果两端没有温度差，则不会影响温度测量。如果接入的异种金属之间存在温度差则会出现误差。如图 5，在同种金属 A 和 B 组成的回路中接入异种金属 C 时，其电动势为

$$E = E_{AB}(T_1) + E_{BC}(T_{3A}) + E_{CB}(T_{3B}) + E_{BA}(T_2) + E_{AC}(T_{3B}) + E_{CA}(T_{3A}) \quad (1)$$

当金属 C 两端无温度差时，因为 $T_{3A} = T_{3B} = T_3$ ，所以

$$E_{BC}(T_{3A}) + E_{CB}(T_{3B}) = E_{BC}(T_3) + E_{CB}(T_3) = E_{BC}(T_3) - E_{BC}(T_3) = 0$$

成立。

同理,因为 $E_{AC}(T_{3B}) + E_{CA}(T_{3A}) = 0$ ，所以

$$E(V) = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2)$$

成立。就是说如果金属 C 两端没有温度差的话，则电动势仅由端点温度 T_1 和 T_2 决定，与金属 C 无关。如果金属 C 两端有温度差，则如式 (1) 所示会产生误差。

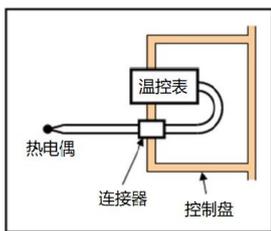


图6

需要注意的是如图 6 所示，在控制面板上有一个连接器，热电偶通过连接器连接到温控仪表。当连接器的针脚由异种金属制作且控制面板内外有温度差时，测量温度会产生误差。

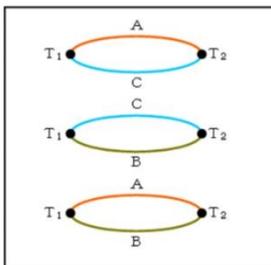


图7

接下来考虑如图 7 所示的情况。热电偶分别由 A, B 和 C 组成，且各端点温度为 T_1 和 T_2 。每个电动势为

$$E_{AC} = E_{AC}(T_1) - E_{AC}(T_2) \quad (2)$$

$$E_{CB} = E_{CB}(T_1) - E_{CB}(T_2) \quad (3)$$

$$E_{BA} = E_{BA}(T_1) - E_{BA}(T_2) \quad (4)$$

成立。分别将等式(2), (3)和(4)两侧相加，

$$E_{AC} + E_{CB} + E_{BA} = (E_{AC}(T_1) + E_{CB}(T_1) + E_{BA}(T_1)) - (E_{AC}(T_2) + E_{CB}(T_2) + E_{BA}(T_2))$$

成立。我们分别观察右侧的第一项和第二项，可以看到三种不同类型的金属连接在一起的闭合回路，放置在等温空间中。此时的电动势为 0。所以，

$$E_{AC} + E_{CB} + E_{BA} = 0$$

$$E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}$$

即金属 A 和 B 形成的电动势，等于金属 A 和 C 形成的电动势与金属 C 和 B 形成的电动势之和。

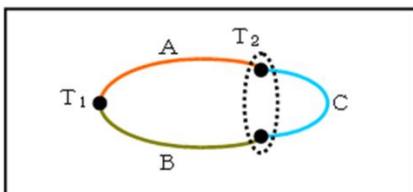


图8

如图 8，考虑在金属 A 和 B 的一端点处接入金属 C 时的电动势。

$$E = E_{AB}(T_1) + E_{BC}(T_2) + E_{CA}(T_2)$$

因为

$$E_{BC}(T_2) + E_{CA}(T_2) = E_{BA}(T_2)$$

成立，所以得出

$$E = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2)$$

成立。当金属 C 的两端温度相同时，电动势与端点温度 T_1 和 T_2 有关，与金属 C 无关。

利用这个原理可以把测量仪表部分看作金属 C。如果测量仪表二端子之间的温度相同，则不会产生测量误差。



另外，如果将金属 C 的部分看作测温点，也可以将其视为热电偶，它可以通过在恒定温度下与金属接触来测量温度。例如校准热电偶，将热电偶插入高温熔化金属钨等，就是利用了这个方法，通常称为测金属熔点法（或金属丝法）。

3.3 中间温度定律

在 T_1, T_2, T_3 不同温度下，用热电偶测量时， T_1 和 T_2 之间形成热电动势 E_1 ， T_2 和 T_3 之间形成热电动势 E_2 ，他们的和等于 T_1 和 T_3 之间形成热电动势 E_3 。

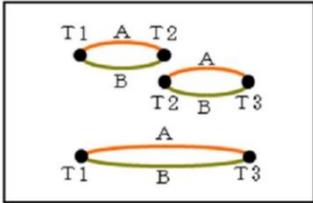


图9

如图 9 所示，在由均质金属 A 和 B 组成的热电偶中，设端点温度为 T_1 和 T_2 时热起电力为 E_{12} ， T_2 和 T_3 时热起电力为 E_{23} ， T_1 和 T_3 时为 E_{13} ，则，

$$E_{12} = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2)$$

$$E_{23} = E_{AB}(T_2) - E_{AB}(T_3)$$

$$E_{13} = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_3)$$

成立。 E_{12} 和 E_{23} 相加整理后得到，

$$E_{12} + E_{23} = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2) + E_{AB}(T_2) - E_{AB}(T_3) = E_{13}$$

其中， T_2 被称为中间温度。从这个方程我们可以得到，在 T_1, T_2 和 T_3 各个温度差下得到的热电动势之和等于全体热电动势之和。

如果选择中间温度 T_2 为基准温度(比如 0°C)，就可以得到任意测量点的温度 T_1, T_3, \dots, T_n 和基准温度的电动势，则任意测量点之间的电动势可以通过计算得到。

例如，在测量仪表和热电偶的组合中，当测温点温度为 T_1 ，基准温度为 $T_2 = 0^\circ\text{C}$ ，测量仪表的测量端子温度为 T_3 （由内置温度传感器测量得到）时， T_1 和 T_3 之间产生的电动势可以由输入回路测量， T_2 和 T_3 之间的电动势可以通过内置温度传感器的测量值进行补偿。这样 T_1 和 T_2 之间的电动势就可以利用中间温度定律来计算了。

在此，基准端点温度 0°C 和任意端点温度之间产生的电动势是已知值，例如查找 JIS 等热电偶电动势表，通过温度换算得到测温点的温度 T_1 。

4. 实际的测量回路

4.1 使用补偿导线的测量回路

下面以 RKC 产品为例解说上述定律的用法。如图 10 所示，测量回路由热电偶 T-101S 和温控仪表 FB900 构成。

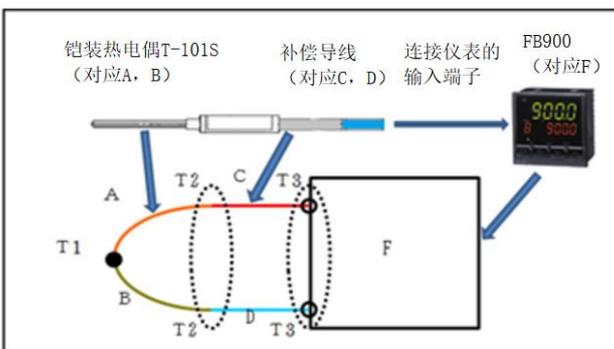


图10

热电偶 A 和 B，补偿导线 C 和 D，温控仪表 F，对应各端点的温度为 T_1, T_2 和 T_3 。回路的起电力为，

$$E = E_{AB}(T_1) + E_{BD}(T_2) + E_{DF}(T_3) + E_{FC}(T_3) + E_{CA}(T_2) \quad (1)$$

成立。如果将 F 看作是中间金属的话，

$$E = E_{AB}(T_1) + E_{BD}(T_2) + E_{DC}(T_3) + E_{CA}(T_2) \quad (2)$$

成立。将中间金属 X 插入式 (2) 右侧的第二项和第四项，

$$E = E_{AB}(T_1) + E_{BX}(T_2) + E_{XD}(T_2) + E_{DC}(T_3) + E_{CX}(T_2) + E_{XA}(T_2) \quad (3)$$

成立。式(3)右侧的第二，及第三、第五和第六项是，

$$E_{BX}(T_2) + E_{XA}(T_2) = E_{BA}(T_2) = -E_{AB}(T_2)$$

$$E_{XD}(T_2) + E_{CX}(T_2) = E_{CD}(T_2)$$

代入式(3)整理后得到，

$$E = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_2) + E_{CD}(T_2) - E_{CD}(T_3) \quad (4)$$

成立。

因为当温度 T 为室温+ α (100°C 或者 150°C 以下) 时, 补偿导线的电动势被设计成,

$$E_{AB}(T) = E_{CD}(T)$$

所以, 式 (4) 变形为

$$E = E_{AB}(T_1) - E_{AB}(T_3) \quad (5)$$

温控仪表 F 测量的温度, 仅由测量点温度 T_1 和温控仪表端点温度 T_3 决定, 可以忽略 T_2 的影响。

实际上, 使用的补偿导线是与热电偶类型相匹配的补偿导线。而且使用热电偶的温控仪表内部, 都有测量端子温度的传感器, 补偿式 (5) 中的 $-E_{AB}(T_3)$ 。通过这样的回路处理, 保证了测量温度的正确。

以上

如有咨询请联系我们: 营业技术部电话(日本): +81-3-3755-6622 (北京时间 7:30-16:15)

咨询网页: <https://www.rkcinst.co.jp/chinese/contact/>