

高等学校教学用书

# 自动检测和过程控制

冶金工业出版社

高等学校教学用书

# 自动检测和过程控制

中南矿冶学院 刘元扬 主编  
刘德溥

冶金工业出版社

高等学校教学用书  
自动检测和过程控制

中南矿冶学院 刘元扬 主编  
刘德溥

冶金工业出版社出版

(北京市灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 20 1/4 字数 484 千字

1980年10月第一版 1980年10月第一次印刷

印数00,001~16,000册

统一书号: 15062·3592 定价 2.10 元

## 前 言

随着现代科学技术的进步,生产自动化的水平也在不断提高。生产过程自动化不仅能保证产品质量,提高产品产量,降低成本,改善劳动条件,而且能保证安全生产。生产过程自动化,实际上就是用一些技术工具——自动控制装置来代替人工操作或人们的重复劳动。

从生产过程自动化的发展情况来看,首先是应用一些自动检测仪表来监视生产;进一步就是应用自动控制仪表及一些控制机构,代替部分人工操作,按工艺要求自动控制生产过程正常进行;在此基础上又进一步发展,使用电子计算机以实现生产过程的全部自动化。可见要全部实现生产过程自动化,首先就要使用各种自动化仪表,对生产过程实现仪表控制。

编写本书的目的就是重点介绍自动检测与过程控制的基本知识,作为冶炼类及材料类专业设置仪表控制方面有关课程的通用教材,使学生掌握常用检测与控制仪表的原理和性能,以及一般使用维护知识,对如何实现生产过程自动化的问题,有一定程度的了解。关于电子计算机应用于过程控制方面的知识,则由另一课程“电子计算机原理”讲授。由于各专业要求与课程学时存在较大差别,在使用本教材时,各校可根据各专业的具体要求加以选择。

本书第一、二、六章由昆明工学院曾祥镇编写,第三、四、五章由重庆大学朱林章编写,第七章由中南矿冶学院刘德溥编写,第八、九、十章由中南矿冶学院张壮辉、刘元扬编写,第十一章由刘德溥、朱林章、曾祥镇编写,全书由刘元扬、刘德溥共同主编,由朱林章主审。在本书编写过程中,兄弟单位有关同志提供了不少资料与宝贵意见,在此一并表示感谢。由于编者水平的限制,本书难免有错误或不当之处,敬希读者及有关同志提出批评指正。

编 者 1979年9月

## 补 充 说 明

1979年8月以后,《工业仪表与自动化》杂志陆续发表了一机部委托上海工业自动化仪表研究所负责制订的“过程检测控制仪表术语”(以下简称“术语”)供有关单位试用并继续征求意见。本书所用名词与“术语”中规定的不完全相同,例如本书所用“给定值、控制器、控制机构、控制阀、操作量、衰减比”等词,就相当于“术语”中的“参比(变)量(设定点)、调节器、调节机构、调节阀、操纵量、递减比”等词。鉴于本书业已定稿发排,上述名词暂不改动,请读者注意。

编 者 1980年7月

# 目 录

## 上篇 自动检测

概述	1
<b>第一章 温度检测仪表</b>	<b>3</b>
第一节 温标及温度计	3
第二节 热电温度计	4
第三节 电阻温度计	35
第四节 辐射式温度计	39
第五节 冶金过程温度检测的特殊问题	49
<b>第二章 压力及真空度检测仪表</b>	<b>54</b>
第一节 概述	54
第二节 弹性式压力计	55
第三节 电气式压力计	59
第四节 真空计	61
<b>第三章 流量检测仪表</b>	<b>68</b>
第一节 节流式流量计	68
第二节 速度头流量计	106
第三节 变面积流量计	109
第四节 电磁流量计	112
第五节 漩涡流量计	117
第六节 堰式流量计	121
第七节 冲量式流量计	123
第八节 其它类型的流量计	126
<b>第四章 物料电子称量仪表</b>	<b>136</b>
第一节 应变电阻重量传感器	136
第二节 应变检测桥路	140
第三节 压磁传感器及其变换器	142
第四节 电子秤的类型	145
<b>第五章 物位检测仪表</b>	<b>153</b>
第一节 浮力式液位计	153
第二节 静压式液位计	156
第三节 电容式物位计	159
第四节 核辐射物位计	162
第五节 其他类型的物位计	164
<b>第六章 成分自动分析仪表</b>	<b>169</b>
第一节 概述	169

第二节	热导式气体分析仪	177
第三节	氧含量分析仪	177
第四节	红外线气体分析仪	179
第五节	工业pH计	186
第六节	气体湿度及固体散料中水分的检测	186
<b>下篇 过程自动控制</b>		
<b>第七章</b>	<b>过程自动控制的基本知识</b>	191
第一节	过程自动控制系统的组成与分类	191
第二节	被控过程的特性	194
第三节	控制器的控制动作	199
第四节	控制系统的稳定性	215
第五节	自动控制器的整定	223
<b>第八章</b>	<b>电动单元组合仪表</b>	228
第一节	概述	228
第二节	DDZ-II型温度变送器	230
第三节	DDZ-II型调节器	235
第四节	DDZ-III型温度变送器	239
第五节	DDZ-III型差压变送器	247
第六节	DDZ-III型调节器	251
第七节	DDZ-III型开方器	262
第八节	DDZ-III型电/气转换器	267
<b>第九章</b>	<b>显示调节仪表</b>	269
第一节	动圈式两位指示调节仪	269
第二节	自动平衡记录调节仪	272
第三节	任意程序给定器	275
<b>第十章</b>	<b>执行器及控制阀</b>	279
第一节	电动执行器	279
第二节	气动执行器及控制阀	281
<b>第十一章</b>	<b>冶金过程控制系统举例</b>	292
第一节	常用过程控制系统	292
第二节	自力式控制器构成的控制系统	298
第三节	电阻炉温度控制系统	300
第四节	热处理炉气氛控制系统	303
第五节	沸腾焙烧炉炉温自动控制系统	304
第六节	浸出过程pH值自动控制系统	306
第七节	电解液密度自动控制系统	308
第八节	高炉热风温度自动控制系统	310
第九节	加热炉炉温自动控制系统	313
第十节	氧气转炉供氧系统自动控制	314

# 上篇 自动检测

## 概 述

冶金工厂应用的自动检测仪表，品种类型甚多，其结构原理也不尽相同，然而从使用仪表进行检测的实质来看，却都有相同之处。它们的共性在于，把被测参数经过一次或者多次的信号、能量形式的转换，最后获得便于检测的信号或能量形式，而由显示仪表指针位移或以数字形式表示出来。例如，热电偶测温是把被测温度转换成直流毫伏信号（电能），然后送至毫伏检测仪表中，变为毫伏检测仪表上指针位移（机械能），并与检测仪表上的温度标尺相比较而显示出被测温度的数值。可见使用各种仪表的检测过程，实质上就是将参数经过一次或多次的转换和传递，并与检测单位进行比较的过程。

### 一、检测仪表的基本组成和分类

一般检测仪表，其基本组成大致可分成三部分，即感受、传递和显示。

**感受部分**（或称检测元件）其作用是感受被测参数的变化，并将感受到的参数信号或能量形式，转换成显示部分所能接受的信号传递出去，因此感受部分通称为传感器。例如，热电高温计中热电偶就是感受部分，它感受被测介质的温度或热能，按照热电原理将热能转换成热电势输出；又例如节流式流量计中，节流装置就是感受部分，它感受被测介质流量的变化，并将流量转换成压力差输出。

**传递部分** 大多数传递部分的作用，均是将感受部分输出的信号或能量传递给显示部分。例如，热电高温计中传递热电势信号的是延伸导线（补偿导线）或普通铜导线；在节流式流量计中，则是传递节流装置前后压力差信号的导压管。

**显示部分** 其作用乃是接受感受部分输出、且由传递部分传送来的信号，并且以适当的形式将被测参数显示出来。例如，用指针指示参数大小，用数字显示参数数值，或用记录装置将被测参数自动记录下来等等，如热电高温计中的动圈指示仪表与电子电位差计、节流式流量计中的显示累积流量的装置，均是检测仪表中的显示部分。

有的检测仪表为了相互配合及信号传递，还使用了相应的变送器。例如，节流式流量计中，节流装置发出的差压信号，如靠导压管直接传递，则输送距离受到限制，因此必须将压力差转换为电的信号，这样可延长传送距离。此外某些显示仪表，恰恰需要接受电的信号时，即使反映流量的压力差传递距离不远，也须加以转换。差压变送器就属于这类装置。

常见的检测仪表可按下列方式分类：

- 1) 按被测参数的不同，分为温度计、压力计、流量计、液位计、成分分析仪等。
- 2) 按被测参数显示表达方式的不同，分为指示式、记录式、积算式、远传变送式等。
- 3) 按作用不同，分为实用型、范型和标准型。实用型仪表即供实际检测用的仪表，包括工业用的仪表和实验室用的仪表等；范型仪表用来复现和保持测量单位，或者用来进行各种实用仪表的校验和刻度工作；具有更高精确度的范型仪表，称为标准仪表，这种仪

表一般在具有良好条件的计量室内使用，并用来定期校验范型仪表。

## 二、检测仪表的品质指标

评定检测仪表品质的技术指标主要有三个：

1) **精度等级** 精度等级是说明检测仪表测量精确程度的指标。精度等级用仪表的最大容许绝对误差与仪表测量范围比值的百分数的数字部分来表示。例如，某测温仪表的最大容许绝对误差为 $\pm 11^{\circ}\text{C}$ ，其测温范围为 $0\sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，则

$$\frac{\pm 11^{\circ}\text{C}}{1100^{\circ}\text{C}} \times 100\% = \pm 1.0\%$$

取其数字部分，则该仪表的精度等级为1.0级。知道了仪表的精度等级，便可算出该仪表可能产生的最大绝对误差。所谓绝对误差是指使用的仪表(生产、科研、实验中使用的仪表或被检定的仪表)测量某一参数数值时，仪表的指示值与该参数的实际值(标准仪表的读数)之差。

由于仪表的精度等级是以仪表最大绝对误差与仪表测量范围的比值进行计算的，因此在选用仪表测量范围时，应使仪表尽量在接近刻度上限的区域内工作，这样才有最合理的

相对误差。例如，上述测温仪表，当测量 $1100^{\circ}\text{C}$ 时，其相对误差为 $\frac{\pm 11^{\circ}\text{C}}{1100^{\circ}\text{C}} \times 100\% = \pm$

1.0%，而用同一测温仪表测量 $550^{\circ}\text{C}$ 时，则其相对误差为 $\frac{\pm 11^{\circ}\text{C}}{550^{\circ}\text{C}} \times 100\% = \pm 2\%$ ，因此，

应该避免用测温范围高的仪表去测量低的温度。

在选用仪表的精度等级时，应根据实际需要，不能片面追求高精度，以免造成浪费。因为精度高的仪表，其测量结果虽较准确，但往往结构复杂，使用维护技术要求较高，而且价格也贵。

2) **灵敏度** 仪表的灵敏度是反映检测仪表对被测参数变化的灵敏程度，是仪表到达稳态后输出变化与引起此变化的输入变化之比。例如，在测温仪表中，通常是用被测温度变化 $1^{\circ}\text{C}$ 时，仪表指针位移(直线距离或旋转角度)的大小来衡量的。如果某仪表温度变化 $1^{\circ}\text{C}$ 时指针移动 $1\text{mm}$ ，而另一仪表温度变化 $1^{\circ}\text{C}$ 时指针移动 $2\text{mm}$ ，则后者较前者灵敏度高。仪表的灵敏度可以用增大放大系统(机械的或电子的)放大倍数的办法来提高。但是必须指出，仪表的性能主要决定于它的精度等级，所以不能认为只要加大灵敏度就能得到更准确的读数。为此，常规定仪表标尺上的最小分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。

3) **稳定性** 稳定性是指：当所有条件保持恒定时，仪表在规定时间内输出保持不变的能力。通常用“变差”来表示。所谓“变差”，就是用同一仪表，在相同条件下，对一个被测数值从不同的方向(由低于被测值增至被测值或由高于被测值降至被测值)进行多次测量，在所得到的不同测量结果中取其最大的差值(绝对值)。例如，某测温仪表对实际温度 $100^{\circ}\text{C}$ (用标准仪表测出)进行测量，由低温升高到 $100^{\circ}\text{C}$ 时，该仪表的指示值为 $99^{\circ}\text{C}$ ，而由高温下降到 $100^{\circ}\text{C}$ 时，指示值为 $101^{\circ}\text{C}$ ，则该仪表在 $100^{\circ}\text{C}$ 处有 $2^{\circ}\text{C}$ 的变差。对被测参数的不同的测点，其变差不一定相同，各测点中的最大变差就是仪表的变差。“变差”通常也用它与仪表测量范围的比值百分数来表示，一般要求这个百分数不得超过仪表精度等级。



# 第一章 温度检测仪表

## 第一节 温标及温度计

温度是工艺生产中一个非常重要的参数。温度是表示物体冷热程度的物理量。量度温度的标尺简称温标，温标是为量度物体温度高低而对温度零点和分度方法所作的一种规定，是温度的单位制。

日常用的温标有摄氏温标与华氏温标两种。摄氏温标又称“百分温标”，规定在一大气压下水的冰点为0度，沸点为100度，中间分为100等分，每等分代表1度，用 $^{\circ}\text{C}$ 表示。华氏温标规定在一大气压下水的冰点为32度，沸点为212度，中间分为180等分，每等分代表1度，用 $^{\circ}\text{F}$ 表示。摄氏温度（C）与华氏温度（F）之间的换算关系为：

$$F = \frac{9}{5}C + 32 \quad \text{或} \quad C = \frac{5}{9}(F - 32)$$

目前国际上统一使用的温标是1968年国际权度委员会制定的国际实用温标（ $\text{IPTS}-68$ ），简称“68温标”。我国自1973年起已正式采用“68温标”。“68温标”规定：热力学温度是基本温度，用符号 $T$ 表示，其单位是凯尔文，符号为 $\text{K}$ 。并定义凯尔文1度等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。水的三相点是一个固定点，等于 $273.16\text{K}$ ，它是热力学温标和国际实用温标的共同值。国际实用凯尔文温度及国际实用摄氏温度用符号 $T_{68}$ 和 $t_{68}$ 来区别，两者的关系是

$$t_{68}(^{\circ}\text{C}) = T_{68}(\text{K}) - T_0(\text{K}) = T_{68}(\text{K}) - 273.15(\text{K})$$

$T_{68}$ 和 $t_{68}$ 的单位与热力学温度 $T$ 和摄氏温度 $t$ 一样，仍为凯尔文（符号 $\text{K}$ ）和摄氏度（符号 $^{\circ}\text{C}$ ）。实际工作中， $T_{68}$ 与 $t_{68}$ 均用 $T$ 与 $t$ 表示，可不必另加“68”角码。

“68温标”是用十一种化学纯净物质的三相点（气、液、固态三相共存点）、凝固点或沸点作为基准而建立起来的。例如定氢的三相点为 $-259.34^{\circ}\text{C}$ ，水的三相点为 $0.01^{\circ}\text{C}$ ，水的沸点为 $100^{\circ}\text{C}$ ，锌的凝固点为 $419.58^{\circ}\text{C}$ ，金的凝固点为 $1064.43^{\circ}\text{C}$ 。另外，还规定了在不同温度范围内使用不同的基准温度计。基准点之间的温度则根据基准温度计的指示值，按国际实用温标所规定的插补公式进行计算得到。

用以检测温度的具体仪器称为测温仪表或温度计。测温仪表是利用物体在温度变化时，它的某些物理量（如几何尺寸、电阻、热电势或辐射强度等）也随着变化的特性来测量温度的。例如常见的水银温度计就是利用水银受热后体积膨胀使水银柱伸长，根据伸长量随温度高低而变化的特性来指示温度的。又例如电阻温度计是根据电阻受热后，电阻值的变化随温度而变的特性，由显示仪表直接显示被测温度的数值。一般说来，任何温度计可认为主要是由感温元件和显示仪表两大部分组成。感温元件可以是一个元件或装置，用以感受被测温度，并使其转换为某些物理量的变化，这些物理量的变化与温度成单值函数关系。显示仪表就是用来测量这些物理变化的数值，并以温度刻度的方式加以显示的装置。工业上常用温度计及其测量范围见图1-1。

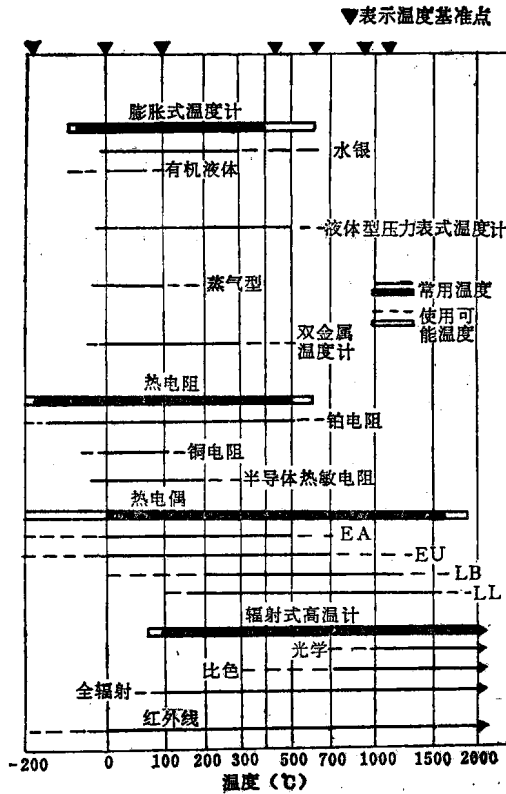


图 1-1 常用温度计及测量范围

## 第二节 热电温度计

热电温度计是冶金工业中用量最多使用最广的一种测温仪表。它的组成原理见图1-2。

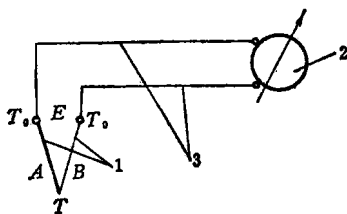


图 1-2 热电温度计组成

1—热电偶；2—显示仪表；3—导线

在由两种不同导体（或半导体） $A$ 、 $B$ 组成的闭合回路（见图1-3）中，当两接点温度不等（ $T > T_0$ ）时，回路中就会有电流产生，这一现象称为热电效应或塞贝克效应。与此相应的电动势称为热电动势或塞贝克电动势，

热电偶把被测物质的温度转变为电动势 $E$ ，显示仪表对这个电动势进行测量并加以显示，连接导线把热电偶和显示仪表连接起来，三者组成一个测温仪表。

### 一、热电偶

#### 1. 测温原理

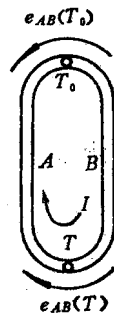


图 1-3 热电偶回路电动势

它在热电偶回路中产生的电流称为热电流。 $A$ 、 $B$ 称为热电极。接点 $T$ 通常用焊接的方法连在一起，测温时将它置于被测温场中，称为工作端（测量端或热端）。接点 $T_0$ 一般要求恒定在某一温度，称为自由端（参考端或冷端）。实验证明，对于一定的热电极材料，其热电势仅与两接点的温度有关，即

$$dE_{AB}(T, T_0) = \alpha_{AB} dT \quad (1-1)$$

式中  $\alpha_{AB}$ ——热电势率或塞贝克系数，其值随热电极材料和两接点的温度而定。

可见，热电偶就是利用热电势随两接点温度变化的特性来测量温度的。当两接点的温度分别为 $T$ 和 $T_0$ 时，回路的总热电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = \int_{T_0}^T \alpha_{AB} dT = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad (1-2)$$

可见，总热电势为两接点分热电势之差。

热电势的角标 $A$ 、 $B$ 均按正电极写在在前，负电极写在后的顺序排列。当 $T > T_0$ 且材料 $A$ 的自由电子密度大于材料 $B$ 的自由电子密度时， $e_{AB}(T)$ 与总热电势（或热电流）的方向一致， $e_{AB}(T_0)$ 与总热电势的方向相反；当 $T_0 > T$ 时， $e_{AB}(T_0)$ 与总热电势的方向一致， $e_{AB}(T)$ 与总热电势的方向相反。因此，接点的分热电势角标的颠倒，不会改变分热电势的大小，而只改变热电势的正负，即

$$e_{AB}(T_0) = -e_{BA}(T_0) \quad \text{或} \quad e_{AB}(T) = -e_{BA}(T)$$

因而公式(1-2)可写成

$$E_{AB}(T, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BA}(T_0) \quad (1-2)'$$

可见，热电偶回路中，各分热电势的角标均沿热电流相反的方向依次排列，如 $e_{AB}$ 、 $e_{BA}$ ，热电偶回路的总热电势等于各接点分热电势之代数和。例如在图1-4中，热电流沿 $B \rightarrow A \rightarrow A' \rightarrow B' \rightarrow B$ 方向流动，四个接点的分热电势之角标就应按相反方向即按 $A \rightarrow B \rightarrow B' \rightarrow A' \rightarrow A$ 的顺序排列，故其总热电势

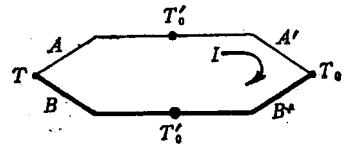


图 1-4 多个导体组成的热电偶回路

$$E_{ABB'A'}(T, T'_0, T_0) = e_{AB}(T) + e_{BB'}(T'_0) + e_{B'A'}(T_0) + e_{A'A}(T'_0) \quad (1-3)$$

实验与理论均已证明，热电偶回路所产生的总热电势，实际上是由接触电势（或称珀尔帖电势）和温差电势（或称汤姆逊电势）所组成。

接触电势是由两种不同导体（或半导体）连接在一起时所产生的。我们知道不同导体（或半导体）的自由电子密度是不同的。当两种不同导体（或半导体） $A$ 、 $B$ 连接在一起时，在 $A$ 、 $B$ 的接触处就会发生电子的扩散，电子扩散的速率与自由电子的密度及导体所处的温度成比例。设导体 $A$ 、 $B$ 的自由电子密度分别为 $n_A$ 、 $n_B$ ，并且 $n_A > n_B$ ，那么在单位时间内，由导体 $A$ 扩散到导体 $B$ 的电子数要比由导体 $B$ 扩散到导体 $A$ 的电子数多。这时导体 $A$ 因失去电子而带正电，导体 $B$ 因得到电子而带负电，于是在接触处便形成了电位差，即电动势（见图1-5）。这个电动势将阻碍电子由导体 $A$ 向导体 $B$ 的进一步扩散。当电子扩散的能力与上述电场的阻力平衡时，接触处的自由电子扩散就达到了动平衡。这种由于两种导体（或半导体）自由电子密度不同而在其接触处形成的电动势，称为接触

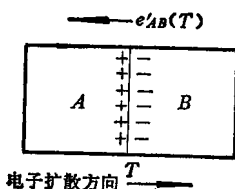


图 1-5 接触电动势

电势, 用符号  $e'_{AB}(T)$  或  $e'_{AB}(T_0)$  表示。根据电子理论

$$e'_{AB}(T) = \frac{KT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} \quad \text{或} \quad e'_{AB}(T_0) = \frac{KT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B}$$

式中  $K$ ——波尔兹曼常数, 等于  $1.38 \times 10^{-16}$  erg/K (尔格/度);

$T, T_0$ ——接触处的绝对温度(K);

$e$ ——电子电荷量, 等于  $4.802 \times 10^{-10}$  绝对静电单位;

$n_A, n_B$ ——分别为导体  $A, B$  的自由电子密度。

由于  $e'_{AB}(T)$  与  $e'_{AB}(T_0)$  的方向相反, 故回路的总接触电势

$$e'_{AB}(T) - e'_{AB}(T_0) = \frac{KT}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} - \frac{KT_0}{e} \ln \frac{n_A}{n_B} = \frac{K}{e} (T - T_0) \ln \frac{n_A}{n_B} \quad (1-4)$$

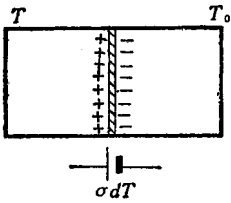


图 1-6 温差电势

上式表明, 热电偶回路的接触电势只与导体材料  $A, B$  的性质及两接点的温度有关。显然, 如两接点温度相同, 尽管两接点处都存在接触电势, 但回路的总接触电势却等于零。

温差电势是在一根均质导体上存在温度梯度而产生的电动势。因为在导体内, 高温处比低温处自由电子扩散的速率大, 因此, 对于导体的某一个薄层来说, 如图 1-6 所示, 温度较高的一边因失去电子而带正电, 温度较低的一边因得到电子而带负电, 从而形成了电位差。当均质导体两端的温度分别为  $T, T_0$  时, 温差电势为

$$e_A(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT \quad \text{或} \quad e_B(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_B dT$$

式中  $\sigma$  称为汤姆逊系数, 它表示温差为一度时所产生的电势值。 $\sigma$  的大小与材料性质和导体两端的平均温度有关。通常规定: 当电流方向与导体温度降低的方向一致时, 则这个导体的汤姆逊系数取正值; 当电流方向与导体温度升高的方向一致时, 则这个导体的汤姆逊系数取负值。对于导体  $A, B$  组成的热电偶回路, 当接点温度  $T > T_0$  时, 回路的温差电势等于导体  $A, B$  温差电势的代数和, 即

$$e_A(T, T_0) - e_B(T, T_0) = \int_{T_0}^T \sigma_A dT - \int_{T_0}^T \sigma_B dT = \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \quad (1-5)$$

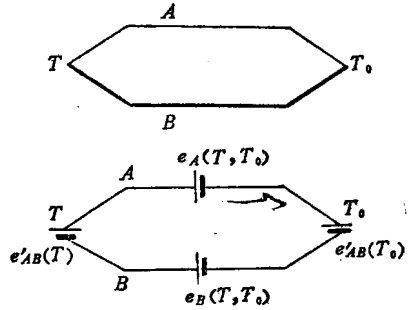


图 1-7 热电偶回路的总热电势

上式表明, 热电偶回路的温差电势只与热电极的材料  $A, B$  和两接点的温度  $T, T_0$  有关, 而与热电极的几何尺寸和沿热电极的温度分布无关。如果两接点温度相同, 则温差电势就等于零。

综上所述, 对于均质导体  $A, B$  组成的热电偶回路(见图1-7), 当接点温度  $T > T_0$  时, 其总热电势

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= e'_{AB}(T) - e'_{AB}(T_0) + \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \\ &= \left[ e'_{AB}(T) + \int_{T_0}^T (\sigma_A - \sigma_B) dT \right] - \left[ e'_{AB}(T_0) + \int_{T_0}^{T_0} (\sigma_A - \sigma_B) dT \right] \\ &= e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中  $e_{AB}(T)$ ——工作端的热电势；

$e_{AB}(T_0)$ ——自由端的热电势。

当热电极  $A$ 、 $B$  选定后，公式 (1-6) 可写为

$$E_{AB}(T, T_0) = f(T) - f(T_0) \quad (1-7)$$

必须注意，热电偶的总热电势是两接点温度的函数差，不是两接点温度差的函数。这与实验测出的结果是一致的。如果能使自由端温度  $T_0$  固定不变，则  $f(T_0) = C$  (常数)。对一定热电极组成的热电偶，总热电势与工作端温度  $T$  之间有单值函数关系，即

$$E_{AB}(T, T_0) = f(T) - C = \varphi(T) \quad (1-8)$$

由此可知，当热电偶自由端温度  $T_0$  不变 (或为  $0^\circ\text{C}$ ) 时，只要用仪表测出总热电势  $E_{AB}(T, T_0)$ ，工作端温度  $T$  就可以求出。因此使用热电偶测温时，必须保证自由端温度  $T_0$  不变。如果  $T_0$  有变化，即使工作端温度  $T$  未变，仪表测得的电势也将有不同的数值，从而造成误差。这是热电偶使用中的一个特殊问题。此外，必须明确，使用热电偶测出的温度，只是工作端所在处某一点的温度，因此正确选定热电偶的安装位置是非常重要的。

根据公式 (1-6) 可以得到有关热电偶应用的几个重要结论。

1) 热电偶产生的热电势与两热电极的材质及两接点的温度有关，而与热电极的长短、粗细、形状等无关。同样材质的热电极，其温度和电势的关系是一样的，因此热电极材质相同的热电偶可以互换。

2) 如果用两种相同的均质导体  $A$  (或  $B$ ) 组成热电偶，无论两接点温度如何，其总热电势为零，因为同种材料，公式 (1-6) 中的接触电势不存在，温差电势互相抵消。如果有热电势输出则说明热电极是不均匀的，因而可据此检查热电极的不均匀性。

3) 即使两种不同导体组成的热电偶，当两接点处温度相同时，总热电势仍然为零，因为公式 (1-6) 中温差电势不存在，两接点处的接触电势由于大小相等方向相反而互相抵消，故回路总电势为零。

4) 在  $A$ 、 $B$  材料组成的热电偶回路中接入第三导体  $C$ ，只要  $C$  两端温度相等，则此导体的引入不会改变总热电势  $E_{AB}(T, T_0)$  的大小。这一性能使我们可以在热电偶回路中接入显示仪表而不会引起热电势的变化。如图 1-8 所示，把铜质导线及测量仪表内部的接线可看作第三导体  $C$ ，接入热电偶回路中，假定  $T \approx T_0$ ，按照公式 (1-3) 则图 1-8 (b) 回路总热电势为

$$\begin{aligned} E_{ABC}(T, T_1, T_0) &= e_{AB}(T) + e_{BC}(T_1) + e_{CB}(T_1) + e_{BA}(T_0) \\ &= e_{AB}(T) + e_{BC}(T_1) - e_{BC}(T_1) - e_{AB}(T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \\ &= E_{AB}(T, T_0) \end{aligned}$$

可见接入第三导体  $C$  之后，对热电偶产生的总热电势没有影响。同理在图 1-8 (a) 的回路中，其总热电势等于

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

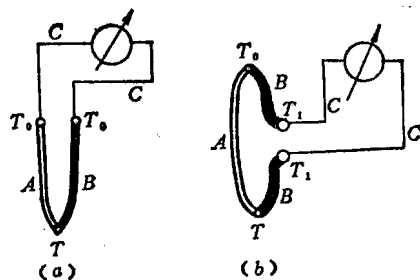


图 1-8 第三种导体  $C$  接入

已知热电回路中各接触点温度相等时 (设为  $T_0$ )，则回路总热电势应为零，即

$$E_{ABC}(T_0, T_0) = e_{AB}(T_0) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = 0 \quad (b)$$

必须注意，虽然各接点温度相等时，总热电势为零，但是各个接点的电势是始终存在的 (大小因各导体材料不同) 并不等于零。此外当各接点温度相等时，各接点电势还存在等效互换关系，例如

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

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

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

可见将式 (d) 代入式 (a) 则

$$E_{ABC}(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) = E_{AB}(T, T_0)$$

这就说明，当将第三根导体 (或更多根导体) 接入热电回路中时，只要接入两端温度相等，并不影响热电回路所生总热电势。

5) 根据公式 (1-6) 很容易证明，热电偶  $AB$  在接点温度为  $T_1$ 、 $T_3$  时的热电势，等于此热电偶在接点温度为  $T_1$ 、 $T_2$  与  $T_2$ 、 $T_3$  两个不同状态下的热电势之和。即

$$\begin{aligned} E_{AB}(T_1, T_3) &= E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3) \\ &= e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_2) + e_{AB}(T_2) - e_{AB}(T_3) \\ &= e_{AB}(T_1) - e_{AB}(T_3) \end{aligned} \quad (1-9)$$

这一结论为延伸导线 (即补偿导线) 的应用提供了依据。从这一结论还可以看出，在使用热电偶测温时，如热电偶各部分感受到的温度不同，热电偶所产生的热电势只与工作端及自由端的温度有关，其他部分温度 (称为中间温度) 的变化，并不影响总热电势的大小，也就是并不影响测量结果。

6) 由  $ABC$  三种导体 (或半导体) 组成热电偶，如图 1-9 所示，当其接点温度均为  $T$ 、 $T_0$  时，导体  $B$  与  $C$  组成热电偶的热电势，等于导体  $A$  分别与  $B$ 、 $C$

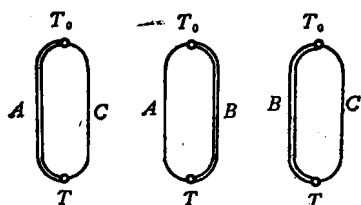


图 1-9 标准热电极

组成热电偶的热电势之差，即

$$\begin{aligned} E_{BC}(T, T_0) &= E_{AC}(T, T_0) - E_{AB}(T, T_0) \\ &= e_{AC}(T) - e_{AC}(T_0) - e_{AB}(T) + e_{AB}(T_0) \end{aligned}$$

按照上述各接点电势的等效互换关系，上式可得到

$$E_{BC}(T, T_0) = e_{BC}(T) - e_{BC}(T_0)$$

这一结论告诉我们，当任意二导体  $B$ 、 $C$  分别与导体  $A$  组成热电偶的热电势已知时，则  $BC$  二导体组成热电偶的热电势即可算出。导体  $A$  称为标准热电极，纯铂 (Pt) 是被选作标准热电极的材料。

## 2. 普通热电偶

(1) 普通热电偶的结构 图 1-10 所示为普通热电偶的基本结构。普通热电偶一般都做成棒形，其组成包括四个部分。

1) 热电极 热电偶常以热电极材料种类来

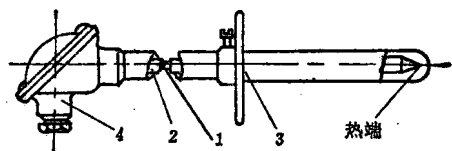


图 1-10 普通热电偶结构

1—热电极；2—绝缘管；3—保护管；4—接线盒

定名。例如铂铑-铂热电偶，镍铬-镍硅热电偶等。其直径大小由材料价格、机械强度、导电率以及热电偶的用途及测量范围等因素决定。贵金属热电偶热电极直径大多是0.3~0.65mm。普通金属热电偶热电极直径为0.5~3.2mm。热电偶的长度由工作端在介质中的插入深度及安装条件决定，通常为350~2000mm。热电极的工作端是焊在一起的。

2) 绝缘管 用来防止两根热电极短路，材料由热电偶的使用温度范围及对绝缘性能的要求而定。通常用陶瓷、石英等作绝缘管。

3) 保护管 它的作用是使热电极与被测温介质隔离，使之免受化学侵蚀或机械损伤。热电极在套上绝缘管后再装入保护管内。对保护管的基本要求是：经久耐用与传热良好。前者指的是能耐高温、耐急冷急热，耐腐蚀，不分解出对电极有害的气体，有良好的气密性及足够的机械强度。后者指的是有良好的导热性，以改善热电极对被测温度变化的响应速度，减少滞后。常用的保护管材料分为金属和非金属两大类，其适用温度见表1-1。应根据热电偶类型、测温范围和气氛条件等因素选择保护管材料。

表 1-1 常用保护管材料

材 料 名 称	长期使用温度 (°C)	短期使用温度 (°C)	材 料 名 称	长期使用温度 (°C)	短期使用温度 (°C)
铜或铜合金	400		高级耐火陶瓷	1400	1600
20# 碳钢	600		再结晶氧化铝	1500	1700
1Cr18Ni9Ti不锈钢	900~1000	1250	高纯氧化铝	1600	1800
28Cr铁(高Cr铸铁)	1100		硼化铝	1800	2100
石 英	1300	1600	石 墨	2000	2500

4) 接线盒 连接导线通过接线盒同测量仪表相接。此外，由于盒盖与盒体的密封，也可防止灰尘、水分及有害气体侵入保护管内，损坏热电偶或者妨碍测量的正确进行。接线端子上注明了电极的正极和负极。

(2) 常用的几种普通热电偶 冶金工业广泛使用的热电偶为铂铑<sub>30</sub>-铂铑<sub>6</sub>；铂铑<sub>6</sub>-铂；镍铬-镍硅；镍铬-考铜四大类。其主要技术特性见表1-2。

### 3. 特殊热电偶

为了适应工业测温的一些特殊要求(如超低温、超高温、快速测温等)，需要一些特殊结构或特殊材料做成的特殊热电偶。

我国已生产的特殊热电偶主要有以下几种。

(1) 钨铼系热电偶 在超高温测量中，钨、铼或钨铼合金是目前较为适用的热电极材料。我国生产的钨铼<sub>5</sub>-钨铼<sub>20</sub>、钨铼<sub>5</sub>-钨铼<sub>26</sub>和钨-钨铼<sub>26</sub>等热电偶，使用范围一般为300~2000°C，能用于真空或氢、氩等保护性气氛中。钨铼系热电偶的测温上限主要受绝缘材料的限制，仅达2400°C，如能找到耐更高温度的绝缘材料，其测温上限可望进一步提高。

(2) 镍铬-金铁热电偶 这是一种较理想的低温热电偶，它在4K时也能保持大于10  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 的热电势率，可以在2~273K广泛的范围内使用。其热电极材料易于复制，正极为镍90%+铬10%合金，负极为金铁合金(有金0.02%铁、金0.03%铁或金0.07%铁等数种)，实验表明，当负极中含铁量较低时，则热电偶在4K范围内的热电势率较大；当负极中含铁量较高时，在4K处的热电势率变小，而在20K以上的温度范围内，其热电势率较大(其变化范围在12.30~21.786)，具体数值可参看有关资料。

表 1-2 普通热电偶主要技术特性

热电偶名称	分度号	热 电 极			使用温度 (°C)		允 许 误 差 (°C)①				主 要 优 缺 点
		极 性	识 别	化 学 成 分②	长 期	短 期	测 温 范 围	允 差	测 温 范 围	允 差	
铂铑 <sub>10</sub> -铂 (简称铂铑)	LB-3	正	较硬	Pt90%Rh10%	1300	1600	≤600	±2.4	>600	±0.4% t	使用温度范围广,性能稳定,精度高,热电势较大,宜在氧化、中性气氛中使用。价格贵,不宜在还原性气氛中使用
		负	柔软	Pt100%							
铂铑 <sub>30</sub> -铂铑 <sub>6</sub> (简称双铂铑)	LL-2	正	较硬	Pt70%Rh30%	1600	1800	≤600	±3	>600	±0.5% t	使用温度高,范围广,性能稳定,精度高,宜在氧化、中性气氛中使用,自由端温度在40°C以下,不需修正。价格贵,电势小,不适于还原性气氛。
		负	稍软	Pt94%Rh6%							
镍铬-镍硅 (镍铬-镍铝)③	EU-2	正	不亲磁	Cr9~10% Si0.4% Ni90%	1000	1200	≤400	±4	>400	±0.75% t	热电势大,精度较高,价格便宜,宜在中性及氧化性气氛中使用。但均匀性差,线质硬。
		负	稍亲磁	Si2.5~3% Co≤0.6% Ni97%							
镍铬-考铜	EA-2	正	色较暗	Cr9~10% Si0.4% Ni90%	600	800	≤400	±4	>400	±1% t	热电势更大,灵敏度高,价格便宜,宜在还原性气氛中使用。但均匀性差,易氧化。
		负	银白色	Cu56~57% Ni43~44%							

- ① 化学成分均指名义成分。
- ② 镍铬成分相同,镍铝: Al2%, Mn2.5%, Si1.0%, Ni94.5%。
- ③ 允许误差是指热电偶热电势与分度表之偏差。

(3) 快速微型热电偶 快速微型热电偶又称消耗式热电偶,已经广泛用来间断地测量钢水、铁水和其它熔融金属的温度,此外还可用来间接确定钢水中的含碳量,其结构见图1-11。在U-型石英管中穿入直径0.1mm、长25~40mm的一对热电极(通常是铂铑-铂或双铂铑),通过相应的延伸导线接到接触点上,热电势由此导出经测温枪(实质上是个安装热电偶及连接导线的金属导管)内的导线接至快速电子电位差计。使用时,操作者通过测温枪将热电偶推入熔融的金属中。保护帽避免石英管及热偶丝损坏,在热电偶感受到熔体温度后(约5~10秒)即熔化,石英管及热电偶丝均被烧毁。由于陶瓷及纸板管导热很差,在测温期间其内部温度不

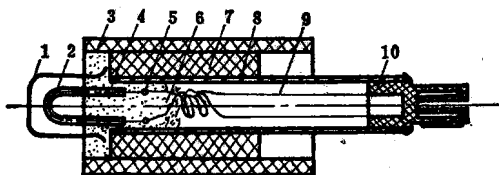


图 1-11 快速微型热电偶结构

- 1—外保护帽; 2—U型石英管; 3—外纸管; 4—高温水泥; 5—热电偶自由端; 6—填塞物; 7—绝热纸管; 8—小纸管; 9—延伸导线; 10—塑料插件



高，测量得以顺利进行。一个热电偶只能使用一次，故称为消耗式热电偶。因其测量结果可靠、互换性好，同时所用材料大多价廉，铂铑丝极细且用量不多，因而价格仍然便宜，已经广泛使用。

(4) 铠装热电偶 铠装热电偶通过特殊的加工方法，把热电极、绝缘材料和金属套管三者组合为一个整体。其结构的一种断面示于图1-12中。热电极与套管之间充有极致密的金属氧化物（MgO、BeO等）粉末，作为绝缘材料，使热电极之间相互绝缘。热电极与管壁间的间距对称，相互间的距离应满足绝缘电阻的要求。两热电极在端部焊接，可露出套管外，也可与套管顶部焊在一起或者与顶部相隔一段距离再焊接起来。

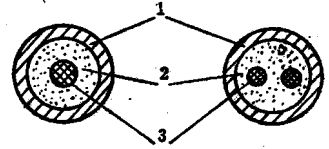


图 1-12 铠装热电偶断面  
1—金属套管；2—绝缘材料；3—热电极

铠装热电偶热惰性小，可以快速测量。因其体积及热容小，测量小物体的温度也能得到足够的准确度；它可以弯曲，特别适用于复杂结构（如狭小弯曲管道内）的温度测量；由于它是一坚实的组合体，能耐较强烈的机械震动和冲击，故可用于高压下测温。

(5) 表面热电偶 测量固体表面温度的热电偶，随着被测固体表面的形状大小不同，可有不同的形状和安装方式，有的固定安装或焊接在被测表面，也可做成可装卸的携带形式，其共同要求是装上热电偶之后，既不扰乱原有温度场，又能快速准确地测出其表面温度。

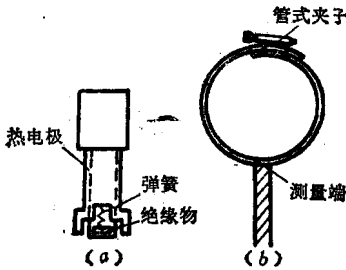


图 1-13 表面热电偶

例如图1-13(a)是一种探头型表面热电偶，适于短时间或间断性的温度测量，连接测量端的探头有时制成可互换的，其型式应根据被测物体表面的具体情况来选定。这种弹簧加压型的探头，适用于静态或低速旋转物体的表面温度测量。图1-13(b)是一种可装卸的管夹式表面热电偶，热电偶工作端牢固地焊在一个管夹上，适用于测量管道表面温度，装卸都比较方便。

为了快速测量小物体的表面温度，可采用薄膜热电偶(见图1-14)。这种热电偶是用真空蒸镀等方法，将热电极材料（金属）蒸镀到绝缘基板上形成薄膜电极，两个电极再牢固地接合起来，构成薄膜状热接点；在镀膜表面上再镀上一层二氧化硅膜，既可防止热电极氧化，又可作为热电偶与被测物间的绝缘层。由于蒸镀的热电极很薄（可达0.01~0.1μm），尺寸也小，使用时热电偶与被测物表面用粘接剂粘牢，因此热接点的热容量小，热量损失极小，测量反应时间很快，一般为10ms（毫秒）到1s（秒），故测量精度能大大提高。镍铬-镍铝、铁-康铜、铜-康铜等材料做成的薄膜热电偶，可用于测量300°C以下低温，若用能耐高温的高温胶，其使用温度可以更高。这种热电偶主要用于微小面积上的温度测量，因其响应快，可测量瞬变的表面温度。

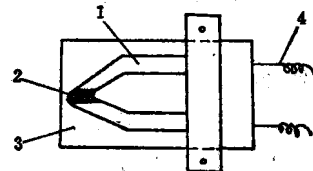


图 1-14 薄膜热电偶  
1—热电极；2—热接点；3—绝缘基板；4—引出线

(6) 非金属热电偶 一般的热电极材料多是金属制成的，但金属热电极有其局限