

# 硅酸盐工业仪表及自动控制

华东化工学院 等编



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

# 硅酸盐工业仪表及自动控制

华东化工学院 等编

中国建筑工业出版社

本书共有七章。前四章分别介绍各种常用热工测量仪表和自动调节仪表的工作原理、自动调节的基本概念以及选用仪表的知识，并着重讨论硅酸盐工业生产中主要热工参数的测量和自动调节问题。后三章分别介绍继电器—接触控制、电子顺序控制和工业控制计算机的工作原理，以及它们在硅酸盐工业生产过程中的应用情况。

本书为大专院校硅酸盐工艺类专业试用教材，亦可供有关单位和工厂从事仪表及自动化工作的工人、技术人员阅读参考。

高等学校试用教材  
**硅酸盐工业仪表及自动控制**  
华东化工学院 等编

\*  
中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*  
开本：787×1092毫米 1/16 印张：23<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 字数：569千字  
1981年12月第一版 1981年12月第一次印刷  
印数：1—7,300册 定价：2.40元  
统一书号：15040·4181

## 前 言

近年来,我国硅酸盐工业生产的机械化和自动化水平有了普遍的提高,为了适应这种形势,进一步推动自动控制技术的发展和运用,有关高等院校的硅酸盐专业普遍加强了仪表及自动化课程的教学。

本书根据一九七七年十二月国家建材总局在北京召开的建材专业教材编写会议精神编写,主要供大专院校硅酸盐工艺类专业作试用教材用。

全书共有七章。其中,第一章介绍常用的温度、压力、流量、物位测量仪表,以及气体成分分析仪表;第二章介绍自动调节的基本概念,简单和复杂调节系统;第三章介绍单元组合式和基地式等常用的自动调节仪表;第四章介绍硅酸盐工业生产中主要热工参数的测量和自动调节,其中包括窑压、燃油燃烧、炉温、电炉温度、玻璃液面的各种自动调节系统,并对自控工程设计作了简要的介绍。以上四章为必修部分,暂定为70~80学时。玻璃、陶瓷、水泥等专业可以根据各自的工艺特点和教学要求,适当选取讲授内容和范围。

第五章介绍继电-接触控制原理,以及在火焰换向和配料过程中的实际应用情况;第六章介绍电子顺序控制原理,以及在制瓶机、压砖机、温度程序控制,搪瓷喷花操作等方面的应用;第七章介绍工业控制计算机的工作原理,以及其在玻璃瓶生产的群控、直接数字控制、配料控制等方面的应用。这三章是选修部分,暂定为40学时,各院校可按实际需要选讲。

本课程以安排在《电工学》之后进行教学为宜。

本书由华东化工学院干大川、冯大山主编,清华大学江尧忠、华南工学院吴嘉麟、浙江大学杨家灿参加编写。全书编写分工:第一章,江尧忠;第二章,吴嘉麟;第三章,杨家灿;第四章第四、五、六节和第六章,冯大山;第四章第一、二、三节、第五章和第七章,干大川。

本书由华东化工学院张蕴端、轻工部上海玻璃搪瓷工业研究所李永平主审,建材部建材研究院李志清、同济大学柯为银、武汉建筑材料工业学院张群珍参加审稿。

由于我们的思想水平不高,业务上也不够熟悉,加之时间匆促,本书难免存在一些缺点和错误,恳切希望读者批评指正。

编 者

1980年9月

# 目 录

第一章 热工测量仪表	1
第一节 测量仪表的分类及基本技术性能	1
一、测量仪表的分类	1
二、测量仪表的基本技术性能	2
第二节 温度测量仪表	4
一、热电偶	4
二、动圈式指示仪表	14
三、电子电位差计	17
四、热电阻温度计	26
五、接触式测温元件的安装	33
六、热辐射式高温计	34
第三节 压力测量仪表	41
一、测量压力的仪表	42
二、压力表的选用和安装	46
第四节 流量测量仪表	50
一、差压式流量计	50
二、转子流量计	54
三、椭圆齿轮流量计	57
四、涡轮流量计	59
五、电磁流量计	60
第五节 物位测量仪表	62
一、浮力式液位计	62
二、差压式液位计	64
三、电容式物位计	64
四、其它的料位测量方法	67
第六节 气体成分分析仪表	68
一、热导式气体分析器	68
二、氧分析器	73
三、红外线气体分析器	76
第二章 自动调节系统的基本概念	80
第一节 自动调节系统概述	80
一、自动调节的意义和发展	80
二、自动调节系统的构成及方块图	81
三、关于自动调节系统的几点说明	82
第二节 调节系统的过渡过程和品质指标	83
一、阶跃干扰与过渡过程	84

二、过渡过程的品质指标	85
第三节 调节对象的特征	86
一、放大系数	86
二、时间常数	88
三、滞后时间	90
第四节 调节器的特性	91
一、双位调节	92
二、比例调节	94
三、比例积分调节	97
四、比例微分调节	99
五、比例积分微分调节	101
第五节 测量和传送装置的特性	102
一、静态特性	102
二、动态特性	103
第六节 调节器参数的工程整定	104
一、经验凑试法	105
二、临界比例度法	105
三、衰减曲线法	106
第七节 调节系统之间的相互影响	107
一、改进工艺设备消除相关影响	107
二、以调节器参数的整定来削弱相关影响	108
第八节 复杂的调节系统	109
一、串级调节系统	109
二、比值调节系统	115
三、分程调节系统	118
四、取代调节系统	122
第三章 自动调节仪表	126
第一节 自动调节仪表的分类及特点	126
一、气动单元组合仪表(QDZ)	126
二、电动单元组合仪表(DDZ)	127
第二节 气动单元组合仪表	129
一、气动仪表的基本部件	129
二、调节单元	133
三、显示单元	137
四、转换单元	140
第三节 电动单元组合仪表	140
一、调节单元	140
二、变送单元	146
三、计算单元	155
四、辅助单元	155
五、DDZ-Ⅲ型仪表	156
第四节 基地式仪表	158
一、XCT 动圈式指示调节仪	159

二、TA系列仪表 .....	162
第五节 执行器 .....	168
一、电动执行器 .....	168
二、气动薄膜调节阀 .....	169
第四章 热工参数测量及自动调节系统 .....	174
第一节 窑炉压力调节系统 .....	174
一、窑内压力分布及控制概况 .....	174
二、窑压测量 .....	176
三、窑压调节装置 .....	178
四、窑压自动调节系统的举例 .....	180
第二节 燃油燃烧调节系统 .....	183
一、重油流量、压力、温度的测量和调节 .....	183
二、雾化介质和助燃空气的压力、流量测量和调节 .....	188
三、“油气比值”和“油风比值”调节系统 .....	190
四、二元燃料控制 .....	193
第三节 窑炉温度调节系统 .....	193
一、窑内温度分布及控制概况 .....	193
二、炉温测量 .....	194
三、炉温调节系统的设计 .....	198
四、炉温自动调节系统的举例 .....	201
第四节 电炉温度控制 .....	211
一、位式调节 .....	211
二、可控硅连续调节 .....	213
三、程序温度自动控制 .....	218
四、玻璃电熔窑温度控制 .....	218
第五节 玻璃液面自动调节 .....	220
一、探针式玻璃液面调节系统 .....	220
二、光电式液面调节系统 .....	225
第六节 自控工程设计概述 .....	227
一、自控设计内容 .....	227
二、自控流程图的制定与绘制 .....	227
三、仪表选型 .....	230
第五章 继电—接触控制原理及应用 .....	235
第一节 继电—接触控制原理及系统 .....	235
一、概况 .....	235
二、开关量及其控制 .....	236
三、系统的组成及原理电路图 .....	237
四、继电—接触控制原理及基本线路 .....	238
五、怎样读原理电路图 .....	242
第二节 火焰换向的继电—接触控制 .....	243
一、工艺对火焰换向操作的要求 .....	243
二、三种换向指令方案 .....	244
三、自动换向装置的执行机构 .....	247

四、继电—接触控制系统	248
五、控制原理	249
六、火焰换向自控装置的改进	254
第三节 配料过程的继电—接触控制	258
一、电子式自动磅秤及称量系统	258
二、配料过程的继电—接触控制	264
第六章 电子顺序控制	268
第一节 顺序控制基本知识	268
一、顺控装置的基本逻辑电路	268
二、工业顺序控制装置简介	277
第二节 拨码式顺序控制制瓶机	279
一、工艺要求及设计思想	280
二、主要组成及工作原理	280
三、整机结构与干扰问题	292
第三节 温度程序控制	293
一、工艺要求及设计思想	293
二、主要组成及工作原理	295
第四节 矩阵式顺控压砖机	303
一、矩阵式时间步进顺序控制器	303
二、矩阵式条件步进顺序控制器	309
三、顺控压砖机程序编制	314
第五节 搪瓷喷花顺序控制器	317
一、工艺要求及设计思想	317
二、主要组成及工作原理	318
三、喷枪运行的控制原理	324
第七章 工业控制计算机应用概述	327
第一节 电子计算机基本原理	327
一、电子计算机的组成	327
二、指令和指令系统	329
三、计算机的工作过程	330
第二节 工业控制计算机	332
一、概况	332
二、工业控制计算机的基本组成和特点	334
三、几种应用方式	337
四、计算机应用的准备和工作步骤	341
第三节 玻璃瓶生产的工业控制计算机群控	342
一、概况	342
二、群控的系统组成及方案	343
三、群控的基本工作原理	345
四、程序简介	346
第四节 直接数字控制	349
一、水泥烧成过程的控制	349



二、DDC的基本概念和简单框图 .....	351
三、DDC控制中计算机的选用 .....	353
四、DDC中反馈控制方程的形式 .....	353
第五节 计算机的配料控制 .....	355
一、配料过程 .....	356
二、配比修正计算 .....	358
附录 常用热电偶分度表 .....	360
参考资料 .....	366

# 第一章 热工测量仪表

在硅酸盐工业生产过程中，人们为了有效地进行生产操作和自动调节，必须测量生产中的各种参数（例如：温度、压力、流量、物位以及气体成分等）。测量仪表是人们了解事物的数量关系，探索直观所不能揭示的自然规律的工具之一。

在生产过程中进行必要的热工测量和自动控制，可以加快生产速度，使生产过程在较优的条件下进行。因此，它对提高劳动生产率、产品质量、降低成本、改善劳动条件、延长设备寿命以及保证安全起着重要的作用。

本章主要阐述硅酸盐工业生产过程中一些常用热工测量仪表的构造、工作原理及使用的方法。

水泥、玻璃、陶瓷及耐火材料工业的热工设备类型很多，例如有回转窑、立窑、坩埚窑、池窑、隧道窑、倒焰窑、电热窑炉和干燥器等。测量项目主要可分为如下几类：

1. 温度测量：物料及制品温度、气体温度及设备表面温度等。
2. 压力测量：设备或管道内气体的压力。
3. 流速和流量的测量：流体的流速和流量，物料流量等。
4. 物位测量：液位、料面和相界面位置的测量。
5. 气体成分分析：主要是烟气分析。

硅酸盐生产过程中应用的热工测量仪表品种虽然很多，它们所测量的参数和仪表的结构原理也各不相同。然而，仪表测量过程的本质却有许多相同之处。例如，各种窑炉的温度测量可利用热电偶的热电效应，把被测温度转换成直流毫伏信号，然后变为毫伏计上的指针位移而显示出被测温度的数值。可见，测量仪表的共性在于被测参数都要经过一次或多次的信号转换，最后获得便于测量的信号形成，而由指针位移或数字形式显示出来。所以，测量仪表的测量过程，就是被测参数信号经过一次或多次转换和传送的过程，测量过程实质上也是将被测参数与相应的测量单位进行比较的过程，而测量仪表就是实现这种比较的工具。

## 第一节 测量仪表的分类及基本技术性能

### 一、测量仪表的分类

（一）根据被测参数来分类：有温度计、压力表、流量计、液位计及成分分析仪等，总称为工业用测量仪表。

（二）根据仪表具体显示方式可分为：指示型（有指针、刻度、能反应出参数的瞬时值）；数字显示型；记录型（有记录笔和记录纸，能反应参数的瞬时值和它随时间的变化情况）；累积型（能使参数的瞬时指示值按时间累加起来，因而能反映在某个时间间隔内被测参数的总和）；信号型（仪表能发出警报的灯光或音响信号，例如电接点压力表等）；

调节型（仪表附带有调节器，当与阀门等执行机构相配合时，能对工艺过程进行自动调节）等。实际仪表有时是上述几种型式的混合，既能指示、又能记录、发信号、调节和累积。

（三）按仪表的实际用途分为：标准仪表（也叫范型仪表），它又可分为Ⅰ级（叫初级范型仪表）、Ⅱ级（叫次级范型仪表），它们都是用来作校准、定刻度用的。

和标准仪表相对应的是实用仪表，它可分为：工业用（要求简单、可靠。准确度要求不太高）；实验室用（要求准确度高，但常常结构复杂）；便携式仪表（性能介乎工业用和实验室用之间）。

（四）根据仪表是否直接装在工艺对象上，又分：就地仪表——直接装在工艺对象上或设备附近，只能当地读数，例如水银温度计、U形管压力计、转子流量计、差压式流量计等。远方仪表——不直接装在工艺对象上，在远方仪表盘上进行读数的。例如，利用长的导压管把压力引入装在远方仪表盘上的压力表中进行读数。

远传仪表：这是一种把被测参数转换成便于远距离传送的气信号或电信号后，再传送到远方的仪表盘上进行读数的仪表。对于这类仪表，把那个直接装在工艺对象上感受被测参数的变化、并把变化转换成另一种气信号或电信号的部分叫变送器，也有时称为一次敏感元件或一次仪表；把那个在远方、接受变送器发来的气信号或电信号，并加以显示的仪表叫二次仪表。例如，用热电偶测量温度，则装在工艺对象上的热电偶本身就是一次敏感元件，在远方仪表盘上接受热电偶发来的电信号、并加以指示或记录的毫伏计就是二次仪表。

## 二、测量仪表的基本技术性能

### （一）准确度

测量仪表在其标尺范围内各点的绝对误差，一般是标准表（准确度较高）和被校表（准确度较低）同时对一个参数进行测量时所得到的两个读数之差。绝对误差一般不用来判断仪表的质量，因为仪表的准确度不仅与仪表的绝对误差有关，而且还与仪表的标尺范围有关。标尺范围即测量范围，又称量程。例如，两台标尺范围不同的仪表，如果它们的绝对误差相等，标尺范围大的仪表准确度比标尺范围小的为高。因此，工业仪表不采用绝对误差，而采用折合成仪表标尺范围的百分数来表示，称为相对百分误差 $\delta$ ，即

$$\delta = \frac{x - x_0}{A_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中  $x$ ——被测参数的测量值；

$x_0$ ——被测参数的标准值；

$x - x_0 = \Delta x$ ，为绝对误差；

$A_0$ ——标尺范围，即量程。

**【例题 1-1】** 用普通压力表测量标准值为 2 公斤/厘米<sup>2</sup> 的压力时，得到读数为 1.98 公斤/厘米<sup>2</sup>，压力表的量程为 0~4 公斤/厘米<sup>2</sup>。仪表的相对误差是多少？

**【解】** 相对百分误差：

$$\delta = \frac{2 - 1.98}{4 - 0} \times 100\% = 0.5\%$$

仪表的准确度，工业仪表则称精度，是按国家统一规定的允许误差大小划分成几个等

级。某一台仪表的允许误差是指在规定的正常情况下允许的相对百分误差的最大值，即

$$\text{仪表允许误差} = \frac{\text{允许的最大绝对误差}}{\text{仪表量程}} \times 100\%$$

去掉百分号（%）后的允许误差即为仪表的精确度。例如，某台测温仪表的允许误差为±1.5%，则该仪表的精度等级为1.5级，或称为1.5级表。

一个仪表是1.5级的（用⊙表示），就是指用这个仪表进行测量时的最大绝对误差  $\nabla \frac{1.5}{100} \times \text{仪表量程}$ 。

这样，知道了仪表所允许的最大绝对误差和量程，就能推算出它的精度等级数。反之，知道了仪表的精度等级数和量程，就能知道用该仪表进行测量时，所得结果的最大绝对误差。

**【例题 1-2】** 量程为0~10公斤/厘米<sup>2</sup>的压力表，已知它所允许的最大绝对误差为0.23公斤/厘米<sup>2</sup>，问这个表的精度等级是多少？

**【解】** 仪表的最大允许误差为：

$$\delta_{max} = \frac{0.23}{10-0} \times 100\% = 2.3\%$$

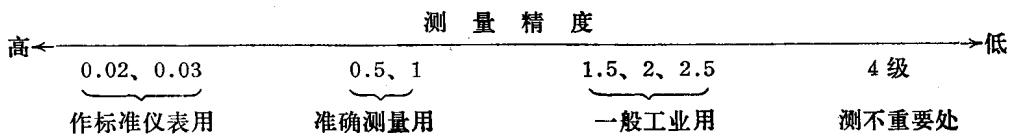
因为精度等级超过2级，所以它的精度等级是2.5级（记作⊙）。

反之，如果知道一个仪表为⊙，它的量程是0~10公斤/厘米<sup>2</sup>，使用这个仪表测量时，可产生的最大绝对误差为：

$$\frac{2.5}{100} \times A_v = \frac{2.5}{100} \times 10 = 0.25 \text{ 公斤/厘米}^2$$

例如，某温度计，其精度为0.5级，若其量程为0~1000°C，则可知最大绝对误差为0.5%×1000=5°C；若其量程为200°C则可知最大绝对误差为0.5%×200=1°C。

我国常用仪表的精度等级有下列数种：



仪表精度等级数的高低，主要决定于仪表制造厂的产品质量，它是仪表本身固有的指标。

在选择仪表时，不应脱离实际需要盲目选用精度过高的仪表，因为仪表越精密，构造一般都比较复杂和精细，需要特别加强维修，价格也较贵。

### （二）灵敏度

仪表的灵敏度是反映仪表对被测参数变化的灵敏程度。常用单位被测参数的变化引起仪表指示机构的角位移或线位移来表示。仪表的灵敏度为

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-2)$$

式中  $\Delta\alpha$ ——仪表指示机构的直线位移或角位移；

$\Delta x$ ——被测参数的变化量。

仪表的灵敏度愈高，就愈能观察微小的参数变化。要提高仪表的灵敏度，可以采用增

大放大系统（机械或电子的）的放大倍数来达到。

### （三）恒定度

它是指仪表读数在相同的外界工作条件下的稳定程度，通常用变差来表示。所谓变差，就是用同一仪表，在相同的外界条件下，对一个被测数值进行正反行程的测量，指针从不同方向接近这个数值时，由于仪表的传动机构多少存在一些摩擦或间隙，以及弹性元件的滞后效应等，会得到二个不同的仪表指示值而有差值。取某点在正反行程时仪表指示值的最大差值数叫变差。例如：真实温度由低升高到100°C时，仪表的读数为99°C（这个读数称为正行读数），而由高温降回到100°C时，读数为101°C（这个读数称为反行读数），则仪表在100°C处有2°C的变差。变差通常也用占仪表量程的百分数来表示，并且要求这个百分数不得超过仪表的精度等级数。在此例中，如仪表的量程为0~400°C，精度等级为1级，则该仪表在100°C处的变差百分数为：

$$\frac{2}{400} \times 100\% = 0.5\%$$

这个结果小于仪表精度等级数所表示的基本误差1%，所以是允许的。仪表的变差太大时，就不能继续使用了。

在仪表的基本技术性能中，以仪表的精度等级数最为重要。

## 第二节 温度测量仪表

在硅酸盐工业生产过程中温度是一个重要的热工测量参数。硅酸盐制品应当在适当的温度下熔制或烧成，温度过高、过低会影响产品质量和产量，甚至造成产品报废和设备的损坏。

测量温度的方法之基本原理，都是利用物体的某些与温度有关的性质。例如，物体的几何尺寸、密度、粘度、弹性、硬度、导电率、导热率、热电势及辐射强度等常与物体的温度有关，当温度不同时，这些物理参数中的一个或几个随之发生变化，测出这些参数的变化就可以间接地知道被测物体的温度。

目前，比较常用的方法有下列几种：

1. 热膨胀：固体、液体或气体的膨胀位移。
2. 电阻变化：导体或半导体受热后电阻值的变化。
3. 热电效应：两种不同性质的导体相接触，当其两接点温度不同时，回路内就产生热电势。
4. 热辐射：物体的热辐射能随温度的变化而变化。

以上几种方法已广泛用于工业生产及科学研究部门。随着科学技术的发展，又应用了一些新的测量原理，如射流测温、激光测温等。

常用测温仪表的分类、测温原理及测温范围见表1-1。

在各种测温仪表中，硅酸盐工业应用最广泛的是热电高温计、光学高温计及辐射高温计。

### 一、热电偶

热电偶是目前温度测量领域里应用最普遍的敏感元件之一。它与其它温度测量敏感元

常用测温仪表的分类

表 1-1

测温仪表分类	测温原理	测温范围(°C)	测量方法	应用
膨胀式温度计(水银、酒精、双金属片)	利用液体或固体受热膨胀的性质	-80~+500	接触法	测量室温及干燥器介质的温度
电阻温度计	利用导体受热后电阻值的变化	-200~+500		测量低温介质的温度,如重油等
热电高温计	利用热电偶的热电效应	-50~+2300		广泛应用于各种窑炉的测温
辐射高温计	利用加热物体所发出的辐射能、辐射强度与温度有一定关系	800~2000	非接触法	隧道窑、倒焰窑、玻璃窑、电热窑炉的测温

件相比具有如下优点: (1) 能测量较高的温度, 常用的热电偶能长期地用来测量300~1300°C的温度, 有些特殊材料制作的热电偶还能测量高达2800°C的温度。(2) 热电偶将温度信号转换成电信号, 因而便于远传和记录, 也利于集中检测和控制。(3) 性能稳定, 结构简单, 经济耐用, 维护方便。(4) 热电偶可以做得很小很薄, 热容量及热惯性都很小, 能用来测量点的温度或表面温度, 也能用于快速测温方面。正是由于它具备了这些优点, 所以无论在工业生产还是科学研究中都广泛地使用热电偶来测温。下面将分别介绍热电偶的测温原理和结构、常用热电偶特点以及正确使用热电偶有关的一些问题。

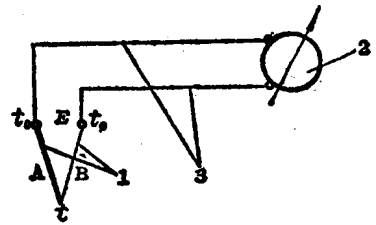


图 1-1 热电偶测温系统

1—热电偶AB, 2—测量仪表, 3—导线

### (一) 热电偶的测温原理

如图1-1所示, 热电偶测量系统是由热电偶1、测量仪表2以及连接导线(铜线及补偿导线)3组成。

热电偶是由两种不同的导体或半导体材料焊接而成, 如图1-2所示。感受温度的一端称为热端(工作端), 另一端称为冷端。如果它们的热端和冷端的温度不同, 例如,  $t > t_0$ , 则在回路中就产生一定大小的电动势 $E_{AB}(t, t_0)$ , 这种物理现象称为热电效应。产生的电动势称为热电势。热电偶就是利用这一效应测量温度的。

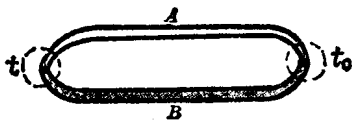


图 1-2 热电偶回路

在图1-2的热电偶回路中, 所产生的热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 由温差电势和接触电势两部分组成。

温差电势: 在同一导体的两端因其温度不同而产生的一种热电势。当同一导体的两端温度不同时, 由于高温端( $t$ )的电子能量比低温端( $t_0$ )的电子能量大,

因而从高温端跑到低温端的电子数比从低温端跑到高温端的要多, 结果高温端因失去电子而带正电荷, 低温端因得到电子带负电荷。从而在高、低温端之间便形成一个从高温端指向低温端的静电场, 如图1-3所示。该电场将阻止电子继续大量地从 $t$ 端跑到 $t_0$ 端, 同时加速电子从 $t_0$ 端跑到 $t$ 端, 最后达到动态平衡, 即从 $t$ 端跑向 $t_0$ 端的电子数等于从 $t_0$ 端跑向 $t$ 端的电子数。此时, 在导体的两端便产生一个相应的电位差 $U_t - U_{t_0}$ , 该电位差称

为温差电势。

接触电势：当两种不同的导体A和B接触时，由于两者的电子密度不同(如 $N_A > N_B$ )，因此电子在两个方向上扩散的速度就不同，从A到B扩散的电子数目比从B到A的为多，A因失去电子带正电荷，B由于得到电子带负电荷，因而在A、B的接触面上便形成了一个从A到B的静电场 $E$ ，如图1-4所示。这个电场将阻碍电子扩散作用的继续进行，同时要把电子从B导体吸向A导体。电场对电子的作用与扩散现象正好相反，在一定条件下(即一定温度下)从A扩散到B去的电子数目和由于电场力的作用从B到A的电子数目达到动态平衡。此时，A、B之间也形成一电位差 $U_A - U_B$ ，这个电位差称为接触电势。其数值取决于两种不同导体的性质和接触点的温度。

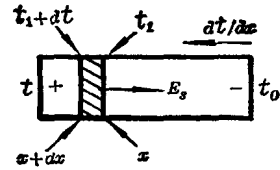


图 1-3 温差电势

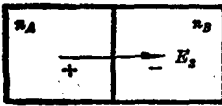


图 1-4 接触电势

$$E_{AB}(t) = U_{At} - U_{Bt} \quad (1-3)$$

$$E_{AB}(t_0) = U_{At_0} - U_{Bt_0} \quad (1-4)$$

式中 $E_{AB}(t)$ 和 $E_{AB}(t_0)$ 为导体A和B的接点在温度 $t$ 和 $t_0$ 时形成的电位差。其中脚码AB的顺序代表电位差的方向，如果改变脚码的顺序， $E$ 前面的符号也应随之改变。

当两导体A、B头尾相接时，如果导体A的电子密度 $N_A$ 大于导体B的电子密度 $N_B$ ，则当两接点温度分别为 $t$ 和 $t_0$ ，且 $t > t_0$ 时，热电偶回路内将产生两个温差电势 $E_A(t, t_0)$ 、 $E_B(t, t_0)$ 及两个接触电势 $E_{AB}(t)$ 、 $E_{AB}(t_0)$ ，如图1-5所示。这时，总电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 即可写成：

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_B(t, t_0) - E_{AB}(t_0) - E_A(t, t_0) \quad (1-5)$$

由于温差电势比接触电势小，又 $t > t_0$ ，所以在总电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 中，以导体A、B在 $t$ 端的接触电势 $E_{AB}(t)$ 所占的百分比最大，故总电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 的方向取决于 $E_{AB}(t)$ 的方向。在图1-5所示的热电偶中导体A的电子密度大，所以A为正极，B为负极。因此称它们为热电极。

热电偶总电势与热电偶材料A、B的电子密度及两接点温度 $t$ 、 $t_0$ 有关。所以，当热电偶材料已选定时，热电偶的总电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 成为温度 $t$ 和 $t_0$ 的函数差。

即：

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t) - f(t_0) \quad (1-6)$$

如果能使冷端温度 $t_0$ 固定，即为某一常数，则对一定的热电偶材料，其总热电势就只与温度 $t$ 成单值函数关系：

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t) - c = \varphi(t) \quad (1-7)$$

当保持热电偶冷端温度不变时，只要用仪表测得热电势 $E_{AB}$ 就可以求得被测温度 $t$ 。

国际上统一规定冷端温度为 $0^\circ\text{C}$ 。通常，热电势的大小与温度 $t$ 的关系被列成表格形式，这种表格称为热电偶分度表，不同的热电偶分度表也不同，这些分度表都是在冷端温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 时得到的。与热电偶配套使用的仪表刻度就是按分度表进行刻度的。

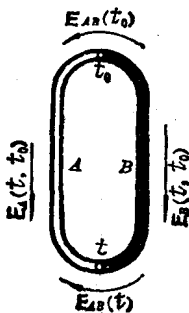


图 1-5 总电势

在实际使用中，热电偶通过连接导线与仪表相接，如图 1-6 所示。这样，在热电偶回路中接入第三种材料的导线 C，只要这第三种导线 C 和 A 及 B 的接点温度相同，热电偶产生的热电势保持不变，不受第三种导线接入的影响。这个结论可证明如下：

在图 1-6 中热电偶回路的总电势为：

$$E_{ABO}(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_{BO}(t_0) + E_{OA}(t_0)$$

根据能量守恒原理可知，多种金属组成的闭合回路内，只要各点温度相等，则闭合回路内的总电势为零。即

$$E_{AB}(t_0) + E_{BO}(t_0) + E_{OA}(t_0) = 0$$

$$E_{BO}(t_0) + E_{OA}(t_0) = -E_{AB}(t_0)$$

所以总电势为：

$$E_{ABO}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) = E_{AB}(t, t_0) \quad (1-8)$$

由式 (1-8) 可见，总电势  $E_{ABO}(t, t_0)$  中导体 C 的影响已完全消去。正是由于存在这个性质，我们才可以在回路中引入各种仪表、连接导线等，而且也允许采用任意的焊接方法来焊制热电偶。同时，应用这一性质，还可以采用开路热电偶测量金属壁面的温度。即有时为了提高测量的准确性和方便起见，热电偶的工作端不焊在一起，而是直接把电极 A、B 的端头焊在被测金属上，如图 1-7 所示。此时，金属壁面即为接入热电偶 A、B 的第三种导体，只要保证两热电极 A、B 插入地方的温度一致，则对整个回路的总热电势将不产生影响。

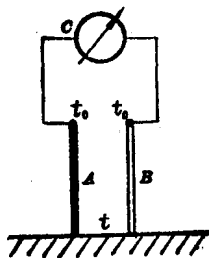


图 1-7 开路热电偶的使用

假如接入的第三种导体的接点温度不等，热电偶的热电势将要发生变化。

### (二) 常用热电偶及特殊热电偶

根据热电效应，任意两种不同性质的导体或半导体都可作为热电极组成热电偶。但实际情况并非如此，对热电极的材料还要进行严格的选择。

热电极材料应满足下列要求：

(1) 物理稳定性要高，即在测温范围内它的热电特性不随时间改变，以保证与其配套的显示仪表刻度的稳定。

(2) 化学稳定性高，即在高温下不受周围气氛的氧化和腐蚀而变质。

(3) 电阻温度系数要小，导电率要高，组成热电偶后产生的热电势要大。

(4) 热电势和温度成线性关系，或有简单的函数关系，这样可以使显示仪表的精度提高，刻度工作简单。

(5) 复现性好。要求同种材料制成的热电偶其热电特性都相同，在使用中也可以保证良好的互换性。

(6) 具有一定的机械强度。

并不是所有的金属材料都能满足上述要求。目前，在国际上被公认的有代表性的应用较为普遍的热电偶只是有限的几种，这些热电极材料都是被精选过的，而且已经标准化了，它们在各自的温度范围内具有良好的性能。

#### 1. 常用热电偶

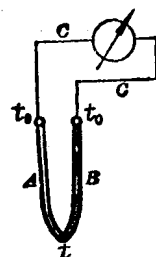


图 1-6 接入第三种导线的连接图



我国目前工业生产和实验研究中广泛采用的几种热电偶特性见表 1-2。

常用热电偶特性

表 1-2

热电偶名称	型号	分度号	极 性	化 学 成 分	识 别		100°C 时电势 (mV)	测量温度 上限(°C)		热电极 直径φ (mm)	适合炉之 气 氛
								长期	短期		
铂铑(30) -铂铑(6)	WRLL	LL-2	+	70%Pt+30%Rh			0.034	1600	1800	0.5	氧化或中性 需用保护套管
			-	94%Pt+6%Rh							
铂铑(10)-铂	WRLB	LB-3	+	90%Pt+10%Ph	较硬	白亮	0.643	1300	1600	0.5	氧化或中性 需用保护套管
			-	100%Pt	较软	白					
镍铬-镍铝 (镍铬-镍硅)	WREU	EU-2	+	90%Ni+10%Cr	无磁性 软	黑褐	4.10	900 ~1000	1200	1~2.5	氧化或中性 气氛
			-	94%Ni+2%Al +4%(Mn, Si, Fe)	有磁性 硬	绿褐					
镍铬-考铜	WREA	EA-2	+	90%Ni+10%Cr	硬	黑褐	6.95	600	800	1~2	中性或还原 气氛
			-	44%Ni+56%Cu	软	银灰					

(1) 铂铑-铂热电偶(WRLB)：以符号LB表示，它又称分度号。WR系指热电偶。其中铂铑是正极，它是由90%的铂和10%的铑制成的合金，纯铂丝为负极。因为这种热电偶材料属贵金属，成本较高，故一般热电偶丝的直径都小于0.5毫米。由于容易得到化学纯的铂和铂铑，物理稳定性较高，因而测量准确性高，便于复制，可以用于精密的温度测量或作为标准热电偶。在氧化及中性气氛中比其它热电偶的物理化学稳定性高，熔点也较高，在1300°C以下可长期使用，在良好的使用环境中可短期测量1600°C的温度。

这种热电偶的主要缺点是灵敏度低，平均只有0.009毫伏/°C。在还原性气体(如H<sub>2</sub>、CO)及侵蚀性气体(如CO<sub>2</sub>)下易受损坏，也不适宜在有金属蒸气及金属氧化物中测量温度，在这种环境下使用时必须加装保护套管，以使热电极与恶劣的环境隔离开来。在高温下热电极材料容易再结晶和升华，铑分子也会使铂毒化，引起热电特性的改变，故使用时必须定期进行校验。

(2) 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶(WREU)：以符号EU表示，它也是分度号。其中镍铬是正极，镍硅是负极。热电偶丝直径一般为1.2~2.5毫米。因为两个电极中都含有大量的镍，化学稳定性较高，抗氧化腐蚀性能较强，可在氧化性或中性介质中长期测量900°C以下的温度，短期可测量1200°C。其材料的复制性好，灵敏度较高，约为0.041毫伏/°C，相当于铂铑-铂热电偶的四倍。价格便宜。

EU热电偶如果用于还原性介质及硫、硫化物介质中，则会很快受到侵蚀，使之变质损坏，必须加装保护套管，精度偏低，但是在工业上已能满足测温要求，是目前工业生产中用最广泛的热电偶。