

• 高等学校教学用书 •

自动检测和 过程控制

(修订版)

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

冶金工业出版社

PDG

高等学校教学用书

自动检测和过程控制

(修订版)

中南工业大学 刘元扬 主编
刘德溥



冶金工业出版社

2007/10

高等学校教学用书
自动检测和过程控制
(修订版)

中南工业大学 刘元扬 主编
刘德溥

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街高碑院北巷 39 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 17 1/2 字数 412 千字

1987年6月第一版 1987年6月第一次印刷

印数00,001~11,100册

统一书号: 15062·4580 定价2.90元

修订版前言

本教材自1980年出版以来，已经使用了六年。为了提高教材质量，适应教学改革的需要，按照1984~1988年冶金高等院校教材编写、出版规划，对本教材第一版进行了修订。在修订过程中，我们认真总结了几年来的教学经验，广泛征求了兄弟院校及使用单位的意见，对本教材第一版的内容作了较大的调整、充实与提高。主要有如下几个方面：

1. 对全书总篇幅进行了调整。增加了下篇在全书中的比重，由原来约占全书的 $1/3$ 增加到 $1/2$ ，以适应过程控制技术发展的需要。全书字数有所减少。

2. 精选了内容。按照教学要求，对重点的典型仪表进行了较大修改或重新编写，例如节流式流量计以及基本控制作用与模拟调节器等章节，使原有内容得到充实提高。对某些次要内容则进行了删减，例如全辐射高温计及控制系统的稳定性等等。

3. 增加了新的内容。例如增加了国际标准型热电偶与热电阻、热流计、气相色谱仪、数字显示仪表及数字调节器等内容；此外并新增加了一章微型电子计算机在过程控制中的应用，以适应当前技术发展的需要。

4. 采用了国家法定计量单位以及有关的国家专业标准，对教材中的计量单位及公式图表进行了整理和换算，并按国家的规定统一了控制流程图中的图形及文字符号。

本书修订版上篇（自动检测）由刘元扬主编，下篇（过程控制）由刘德溥主编。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、十二章由中南工业大学刘德溥编写，第八、九章由中南工业大学张壮辉编写，上篇概述及第十、十一章由中南工业大学刘元扬编写。在本书修订及审稿过程中，兄弟单位有关同志提供了不少资料与宝贵意见，在此表示衷心地感谢。由于编者水平所限，错误或不当之处在所难免，敬希读者指正。

编者

1986年9月

前 言

随着现代科学技术的进步,生产自动化的水平在不断提高。生产过程自动化不仅能保证产品质量,提高产量,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

目 录

上篇 自动检测

概述	1
第一章 温度检测仪表	5
第一节 温标及温度计	5
第二节 热电偶和热电阻	6
第三节 温度显示仪表	19
第四节 电动温度变送器	30
第五节 接触式测温仪表的选择和安装	35
第六节 辐射式温度计	37
第七节 冶金过程温度检测的特殊问题	43
习题及思考题	47
第二章 压力及真空度检测仪表	49
第一节 概述	49
第二节 弹性式压力计	50
第三节 真空计	54
习题及思考题	57
第三章 流量检测仪表	59
第一节 节流式流量计	59
第二节 转子流量计	75
第三节 电磁流量计	78
第四节 容积式流量计	82
第五节 冲击式流量计	83
第六节 其它流量计	86
习题及思考题	93
第四章 物料电子秤	94
第一节 应变电阻荷重传感器	94
第二节 应变检测电桥	97
第三节 压磁传感器	99
第四节 电子秤	101
习题及思考题	104
第五章 物位检测仪表	105
第一节 浮力式液位计	105
第二节 差压式液位计	106
第三节 电容式物位计	109
第四节 放射性物位计	113
第五节 其他物位计	115
习题及思考题	117

第六章 成分自动分析仪表	118
第一节 热导式气体分析仪	118
第二节 氧化锆式氧量分析仪	120
第三节 红外线气体分析仪	122
第四节 气相色谱仪	125
第五节 工业酸度计	128
第六节 湿度检测仪表	130
第七节 在线成分分析仪使用注意事项	135
习题及思考题	136

下篇 过程自动控制

第七章 过程自动控制的基本概念	137
第一节 过程自动控制系统的组成与分类	137
第二节 自动控制系统的过渡过程	140
第三节 被控对象的特性	144
习题及思考题	152
第八章 基本控制作用及模拟调节器	154
第一节 概述	154
第二节 双位控制作用及双位调节器	155
第三节 比例、积分和微分控制作用	158
第四节 DDZ-Ⅱ型调节器	167
第五节 DDZ-Ⅲ型调节器	174
第六节 基地式调节仪表	182
习题及思考题	186
第九章 执行器	188
第一节 电动执行器	188
第二节 气动执行器及调节阀	190
习题及思考题	201
第十章 单回路控制系统	202
第一节 概述	202
第二节 被控(变)量与操纵(变)量的选择	204
第三节 检测及变送环节的考虑	206
第四节 调节阀的选择	208
第五节 调节器控制作用的选择	211
第六节 调节器参数的工程整定	213
第七节 自动控制系统的投运	218
习题及思考题	220
第十一章 复杂(多回路)控制系统	222
第一节 串级控制系统	222
第二节 比值控制系统	225
第三节 前馈控制系统	231
第四节 其他复杂控制系统	234

习题及思考题	238
第十二章 微型计算机在过程控制中的应用	239
第一节 概述	239
第二节 单回路数字调节器在燃烧控制中的应用	242
第三节 微计算机在均热炉ACC系统中的应用	250
第四节 微计算机在钛还原炉自控系统中的应用	258
第五节 微计算机在铝电解过程控制中的应用	261
习题及思考题	266
附录	267

上篇 自动检测

概 述

在工业生产过程中，为了有效地进行生产操作和自动控制，需对工艺过程中的主要参数，例如温度、压力、流量、液位、成分等进行检测。为此，就要选择合适的测量仪表，采用正确的检测方法去进行测量。现将有关测量和测量仪表的一些基本知识作简要介绍。

一、测量和测量误差

测量（检测）是人们在揭示自然界物质运动的规律中，从数量上描述周围物质世界，从而改造客观世界的重要手段。一个量的大小，用量值表示。量值的获得是通过测量来实现的，而测量是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。这种测量实验过程，是利用一个已知的单位量（即标准量）与被测的同类量进行比较的过程。通过比较定出被测量是已知单位量的若干倍或几分之几，其结果可以在一定准确度内重复实现。为此，测量必须具有一定的手段和方法，测量仪表（检测仪表）就是实现这种过程的技术工具。各种测量仪表共性是，可以将被测量经过一次或多次的信号或能量形式的转换，最后由仪表的指针、数字或图象等显示出其量值。例如，热电偶测量温度，是把被测温度转换成热电势（毫伏），然后变为动圈式仪表的指针位移，与温度标尺的刻度比较而指示出被测温度值。

在测量过程中，由于测量工具准确性、观测者的主观性、外界环境条件的变化以及某些偶然因素等的影响，使得测量结果与被测量的真值之间总有一定的差值，这一差值称为测量误差。它反映了测量质量的好坏。一个测量结果，只有当知道它的测量误差或指明误差范围时，这种测量结果才有意义。因此，我们必须认识和掌握测量误差，并设法估计它、减小它。测量误差可从不同的角度进行分类。

1. 绝对误差和相对误差 误差表示方式可分为绝对误差和相对误差。绝对误差是指测量结果与被测量的真值之间的差值。它既表明误差的大小；又指明其正负方向，即绝对误差 = 测量值 - 真值。应注意：绝对误差与误差的绝对值必须严格区分。

严格地说来，真值是一个理想概念。自然界任何物体都处在永恒的运动之中，一个量随所处时间和空间不同而发生变化，真值常常是不知道的，从而在现实中引出了“实际值”的概念。这是一个接近真值并用来代替真值使用的量值。作为实际值并不是任意的，要求它在一定限定上接近真值，即满足规定的准确度，与真值的差可忽略不计。通常把检定中高一级别的计量标准所测得的量值作为实际值。这时，绝对误差是指用标准仪表（准确度较高）与被校仪表（准确度较低）同时对同一量进行测量，所得两个测量结果之差。绝对误差乘以（-1）就称为修正值，即修正值与误差相等但符号相反，它是消除系统误差用代数法加到测量结果上的值。

相对误差，是指测量的绝对误差与约定值之百分比，是一个无量纲的值。随着采用的约定值不同，相对误差常见有三种表示方式：

- （1）实际相对误差，表示测量的绝对误差与被测量的实际值（真值）之百分比。
- （2）标称相对误差，表示测量的绝对误差与仪表示值之百分比。

(3) 引用相对误差。实际(或标称)相对误差随被测量的变化而变化,当被测量从零变到无穷大时各有不同,于是又引出了引用相对误差。它是指测量的绝对误差与仪表的量程之百分比。所谓仪表的量程,是指仪表测量范围的上限值与下限值之差。引用相对误差 δ 表示为:

$$\delta = \frac{\text{测量的绝对误差}}{\text{仪表的量程}} \times 100\% = \frac{x - x_0}{a - b} \times 100\% \quad (0-1)$$

式中 x_0 和 x ——分别为被测量的实际值(真值)和仪表的测量值;

a 和 b ——分别为仪表测量范围的上限值和下限值。

2. 系统误差、随机误差和粗大误差 测量误差按本身的性质可分为系统误差、随机误差和粗大误差三大类。在偏离测量规定条件时或由于测量方法引入的因素所引起的、按某确定规律变化的误差,称为系统误差。它反映了测量结果对实际值的偏离程度。这种误差的大小和方向有确定的变化规律,一般可以进行修正或通过测量方法来消除它。

在实际测量条件下,多次测量同一个量时,如果误差的绝对值和符号以不可预定方式变化,则这类误差称为随机误差。产生随机误差的因素多种多样,又互不相关,没有规律,它反映了测量结果的分散性。这种误差无法修正,只能用统计理论来估计其影响。

粗大误差是指超出在规定条件下预期的误差。例如错误的读取示值,错误的测量方法等导致的误差,它明显地歪曲测量结果。这种误差在测量中不允许存在,应予剔除。

3. 基本误差、附加误差和允许误差 按仪表工作条件的不同,误差分为基本误差和附加误差。仪表在规定的正常工作条件下(例如电源电压和频率、环境温度和湿度等)所具有的误差,称为基本误差。通常在正常工作条件下的示值误差就是指基本误差。由于仪表超出规定的正常工作条件时所增加的误差,称为附加误差。例如,仪表工作温度超过规定时,将引起温度附加误差,等等。如果不注意仪表的正确安装和使用,附加误差可能很大,甚至超过基本误差,故不可忽视。

仪表所允许的误差界限称为允许误差。它指某一仪表的示值或性能不允许超过某个误差范围。基本误差并不是允许误差,前者是指仪表各点示值的实际误差值,后者是一个许可的误差界限。

4. 静态误差和动态误差 与被测量的变化速度的关系区分,误差分为静态误差和动态误差。与被测量的变化速度无关的称为静态误差,因此,上述几种误差皆属这种误差。在测量系统中,当被测量随时间变化时,在测量信号的转换和传递过程中,会遇到各种运动惯性和时间上的滞后,使得仪表示值(输出量)在时间上不能与被测量的实际值(输入量)精确吻合。这种在被测量的信息处于变动状态下仪表示值与被测量的实际值之间的差异称为动态误差。动态误差反映仪表动态特性的好坏,通常用时间常数和滞后时间来表达。例如,热电偶保护管的热惯性,表现为长达几分钟的时间常数;在工业气体分析中,被分析的气体流经取样装置往往需要几分钟到十几分钟,这就是滞后时间。测量快速变化的参数时,可能导致显著的动态误差,仪表的瞬时示值明显地小于被测的实际值。这一点必须引起足够注意。

二、测量仪表的品质指标

一台测量仪表的质量好坏,可用它的品质指标来衡量。由于测量的目的不同,仪表种类繁多,仪表的品质指标也是多方面的。这里仅举其中最常见的几个指标来讨论。

1. 准确度 (又称精确度) 使用测量仪表对生产过程中的工艺参数进行测量, 不仅需要知道仪表示值是多少, 且还要知道测量结果的准确程度。准确度是指测量结果与实际值相一致的程度, 它是测量的一个基本特征。

绝对误差不能作为仪表准确度的尺度, 因为仪表准确度不仅与绝对误差有关, 且还与仪表的量程有关。例如, 两台量程不相同的同一类仪表, 如果它们的绝对误差相同, 则量程大的仪表准确度较量程小的要高。因此, 为了正确地反映仪表的准确程度, 准确度采用引用相对误差来表示, 即仪表的准确度是指仪表的允许误差与仪表量程之百分比, 表示为:

$$\text{准确度} = \frac{\text{仪表允许误差}}{\text{仪表的量程}} \times 100\% = \frac{(x - x_0)_{\max}}{a - b} \times 100\% \quad (0-2)$$

式中 x 、 x_0 、 a 和 b 符号意义与式(0-1)相同。

例如, 一台测温仪表, 测量范围为 $0 \sim 1100^\circ\text{C}$, 如果允许误差为 $\pm 11^\circ\text{C}$, 则这台测温仪表的准确度为 $\pm 1\%$, 或者准确度等级为1级。

仪表的准确度, 是按照国家规定的允许误差的大小划分成若干等级的。我国的自动化仪表准确度等级有下列几种: 0.005、0.02、0.1、0.35、0.5、1.0、1.5、2.5、4等等级。一般工业用的仪表为0.5~4准确度级。仪表的准确度等级通常都用一定符号形式标志在仪表标尺面板上, 方便识别, 如 Ⓢ 或 △ 等。

同理, 当校验上述测温仪表的示值时, 如果在其测量范围 $0 \sim 1100^\circ\text{C}$ 内, 各校验点的绝对误差最大值不超过 $\pm 11^\circ\text{C}$ 时, 则这台仪表的准确度符合1级的要求, 即其示值误差没有超过准确度为1级的仪表所规定的允许误差。

由于仪表的准确度包含了允许误差和仪表量程两个因素, 故在选用仪表时, 为了获得合理的实际测量准确度, 应该使仪表在接近测量范围上限的区域工作。例如, 上述测温仪表测量 1000°C 时, 标称相对误差为 $\pm 11/1000 \times 100\% = \pm 1.1\%$, 而测量 550°C 时, 标称相对误差为 $\pm 11/550 \times 100\% = \pm 2\%$ 。因此, 应该避免用测温上限高的仪表去测量低的温度。

在选择仪表准确度等级时, 应根据工艺上的实际需要, 不能片面追求高准确度, 以免造成浪费, 因为准确度高的仪表, 价格也高, 且维护技术也要求高。

2. 变差 测量仪表的恒定度用变差(又称来回差)表示。它是指在外界条件不变的情况下, 使用同一仪表对某一个量进行正、反行程(即逐渐由小到大和由大逐渐到小)测量时, 所得的仪表示值是不相同的, 二者之间的差值称为变差。变差的大小, 用同一仪表测量同一个量时, 正、反行程测量的示值之间, 绝对误差的最大值与仪表量程之百分比表示, 即:

$$\text{变差} = \frac{(x_{\text{正}} - x_{\text{反}})_{\max}}{\text{仪表的量程}} \times 100\% \quad (0-3)$$

式中 $x_{\text{正}}$ 和 $x_{\text{反}}$ 分别为正行程和反行程测量的示值

造成变差的原因很多, 例如传动机构的间隙、运动部件的摩擦、弹性元件的弹性滞后的影响等。通常要求仪表的变差不超过仪表准确度等级所允许的误差。

3. 灵敏度与灵敏限 测量仪表的灵敏度反映仪表示值变化对被测量变化的灵敏程度, 一般用仪表的输出变化量(例如指针的线位移或角位移) $\Delta\alpha$ 与引起此变化的被测量的变化量 Δx 之比来表示, 即:

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (0-4)$$

如果被测量的变化很小，仪表示值改变很大，则该仪表的灵敏度高。测量仪表的灵敏度可以用增大放大系统（电子的或机械的）的放大倍数的办法来提高。但是，必须指出，仪表的性能主要取决于仪表的基本误差，如果单纯地加大仪表灵敏度来企图达到更准确的读数，这是不合理的，反而可能出现似乎灵敏度很高，但准确度实际上却下降的虚假现象。为了防止虚假灵敏度，通常规定仪表标尺上的分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。

仪表的灵敏限（又称始动灵敏度），是指能引起示值发生变化的被测量的最小变化量。仪表的灵敏度愈高，灵敏限就愈小。通常仪表的灵敏限数值应不大于仪表允许误差的一半。

三、测量仪表的分类

测量仪表的分类方法常见的有如下几种：

- (1) 按被测参数的不同，分为温度、压力、流量、液位、成分分析等测量（检测）仪表。
- (2) 按显示方式的不同，分为指示式、记录式、累积式、远传式、信号式等仪表。
- (3) 按工作原理的不同，分为模拟式、数字式、图象式等仪表。
- (4) 按作用的不同，分为实用型、范型和标准型仪表。实用型仪表是供实际使用的测量仪表，包括工业生产现场和实验室用的各种仪表。范型仪表用来复现和保持计量单位，或者用来对实用仪表进行校验或刻度。而具有更高准确度的范型仪表称为标准仪表，这种仪表一般在具有良好工作环境的标准计量室内使用，用以保持和传递国家计量标准，并用来定期检定范型仪表。

第一章 温度检测仪表

第一节 温标及温度计

温度，是生产过程和科学实验中最普遍而重要的参数之一。冶金过程通常需要在一定温度条件下才能顺利进行。温度检测及控制，是确保冶金过程优质、高产、低耗和安全的一项重要技术。

温度是表征物体冷热程度的物理量。任何两个不同温度的物体接触时，相互之间必然要进行热交换，热量将由温度较高的物体传给温度较低的物体，直到二者冷热程度完全一致，即达到热平衡状态为止。据此，我们可以选择某一物体与被测物体相接触来测量它的温度。当两者达到热平衡时，通过测量被测物体的随温度变化的物理量（诸如体积、电阻、电动势、辐射强度等），可以定量地给出被测物体的温度数值。例如，用水银温度计测量水温时，可把温度计插到水中，待两者达热平衡状态时，观察温度计内水银的体积变化（毛细管内的水银柱伸缩）来确定被测水温的高低。

一、温标

测量必须将被测量同标准量进行比较。温度测量的标准称为温标。它是衡量温度高低的标尺，是温度这一物理量的数值表示方法。温标规定了温度的始点（即零度）和测量温度的基本单位——“度”。各种温度计的分度数值均由温标来确定。国际上普遍采用的温标有摄氏温标、华氏温标、热力学温标和国际实用温标。前两种温标已为人们熟知。热力学温标又称开尔文温标，是以热力学第二定律为基础的温标，它已由国际权度大会采纳，作为国际统一的基本温标。它规定分子运动停止时的温度为绝对零度。这是一种纯理论的、与物体任何物理性质无关的温标，存在着实验上的困难，不便于实际应用。因此，应当建立一种既符合热力学温标原理而在使用上又方便的温标，这就是已在世界通行的国际实用温标。

国际实用温标是国际协议性的温标，已沿用数十年，几经修改，最近一次定名为1968年国际实用温标(IPTS-68)。我国从1973年起正式采用这种新温标。它不仅与热力学温标相近，而且复现精度高，测量范围广，使用方便。

这一温标选择了一些纯物质的平衡温度作为温标的基准点；规定了不同温度区间内的基准仪器；建立了基准仪器的示值与国际温标间关系的补插公式，应用这些公式可以求出任何两个相邻基准点之间的温度值。

该温标规定，热力学温度是基本温度，用符号 T 表示。温度的单位是开尔文，用符号 K 表示，并定义开尔文一度等于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。国际实用开尔文温度(T_{68})和国际实用摄氏温度(t_{68})间的关系是：

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

T_{68} 和 t_{68} 的单位与热力学温度 T 和摄氏温度 t 一样，仍然用开尔文(K)和摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)表示。在实际工作中，用 T 和 t 表示温度，不必另加“68”角码。当表示温度差和温度间隔时， $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ 。

二、温度计

温度测量范围甚广，测温仪表种类也很多。若按工作原理，可膨胀式、压力表式、热电阻、热电偶及辐射式等五类；按测量方式，则可分为接触式和非接触式仪表两大类。各种温度计的分类及其主要特性列于表1-1中。

温度计主要由感温元件和显示仪表两大功能部件组成。感温元件用以感受温度的变化并转换成与之成单值关系的某些物理量；显示仪表用以测量这些物理量并以温度刻度的方式来显示。

表 1-1 温度计的分类

温度计的分类		工作原理	常用测量范围(℃)	主要特点
接触式仪表	膨胀式温度计 1. 液体膨胀式 2. 固体膨胀式	利用液体（水银、酒精等）或固体（金属片）受热时产生热膨胀的特性	-200~ 700	结构简单，价格低廉，一般只用作就地测量
	压力表式温度计 1. 气体式 2. 液体式 3. 蒸汽式	利用封闭在一定容积中的气体、液体或某些液体的饱和蒸汽受热时其体积或压力变化的性质	0~300	结构简单，具有防爆性，不怕震动，可作近距离传示；准确度低，滞后性较大
	热电阻温度计	利用导体或半导体受热后电阻值变化的性质	-200~650	准确度高，能远距离传送，适于低、中温测量；体积较大，测点温较困难
	热电偶温度计	利用物体的热电性质	0~1600	测温范围广，能远距离传送，适于中、高温测量；需自由端温度补偿，在低温段测量准确度较低
非接触式仪表	辐射式温度计 1. 光学式 2. 比色式 3. 红外式	利用物体辐射能随温度变化的性质	600~2000	适用于不能直接测温的场合，测温范围广，多用于高温测量；测量准确度受环境条件的影响，需对测量值修正后才能获得真实温度

第二节 热电偶和热电阻

一、热电偶

热电偶是工业上应用最广泛的一种感温元件，通常与显示仪表（动圈仪表或电子电位差计）和连接导线（铜导线或补偿导线）组成测温系统，这就是热电偶温度计，如图1-1所示。图中1为热电偶，由A、B两种不同的导体（或半导体）在端点处焊接而成，焊接的一端称为工作端（又称为热端）；未焊接的另一端与导线相接，称为自由端（又称冷端或参考端），导体A、B称为热电极。热电偶将被测温度 t 变换热电势 E_t ，经连接导线传递给显示仪表进行测量并指示或记录出相应的温度。

1. 测温原理 如图1-2所示，两种性质不同的导体A和B在两个端点处连接起来，形成一个闭合回路。设两接点处的温度为 t 和 t_0 。当 t 和 t_0 不相等且假定 $t > t_0$ 时，回路中有电动势 $E_{AB}(t, t_0)$ 产生。这一现象称为热电效应，该电势称为热电势。热电势是由接触电

势和温差电势两部分所组成。

(1) 接触电势。接触电势是两种性质不同的导体相接触时产生的电动势。在图1-2中, 导体A和B因性质不同, 则其自由电子密度不同(假定 $N_A > N_B$)。在温度为 t 及 t_0 的两个接点上, 从A导体扩散到B导体的自由电子数目要比从B到A的多, 在接触界面上便形成一个A侧为正, B侧为负的电场。该电场将阻碍自由电子扩散作用的继续进行, 且促使其向相反方向转移。当在A与B间的电子转移数目达到动态平衡时, 在两者的界面上形

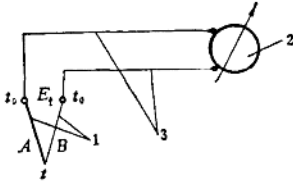


图 1-1 热电偶测温系统

1—热电偶; 2—测量仪表; 3—连接导线

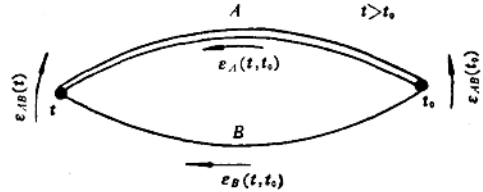


图 1-2 热电偶回路电势

成一个电位差, 称之为是接触电势, 它的大小是热电极材料和接点处温度的函数。根据电子理论, 对应于接点温度 t 及 t_0 , 接触电势 $\epsilon_{AB}(t)$ 及 $\epsilon_{AB}(t_0)$ 可分别表示为:

$$\epsilon_{AB}(t) = \frac{Kt}{e} \ln \frac{N_{At}}{N_{Bt}} \quad (1-1)$$

$$\epsilon_{AB}(t_0) = \frac{Kt_0}{e} \ln \frac{N_{At_0}}{N_{Bt_0}} \quad (1-2)$$

式中 N_{At} 、 N_{At_0} 和 N_{Bt} 、 N_{Bt_0} ——分别表示导体A和B在接点温度为 t 和 t_0 时的自由电子密度;

e ——单位电荷量, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$;

K ——波尔兹曼常数, $K = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ 。

可见, 接触电势的大小, 与两导体材料的性质及两接点处的温度有关。

(2) 温差电势。此电势是指同一导体的两端因温度不同而产生的电动势。在图1-2中, 当同一导体(A或B)两端温度不同(设 $t > t_0$)时, 高温端的自由电子的能量将大于低温端自由电子的能量, 因而从高温端迁移到低温端的电子数目将多于反方向迁移的数目, 与接触电势的道理相同, 在导体上将有一个电位差, 称之为温差电势。根据电子理论, 导体A和B在其两端温度分别为 t 及 t_0 时, 产生的温差电势 $\epsilon_A(t, t_0)$ 及 $\epsilon_B(t, t_0)$ 可分别表示为:

$$\epsilon_A(t, t_0) = \frac{K}{e} \int_{t_0}^t \frac{1}{N_A} \times \frac{d(N_A t)}{dt} dt \quad (1-3)$$

$$\epsilon_B(t, t_0) = \frac{K}{e} \int_{t_0}^t \frac{1}{N_B} \times \frac{d(N_B t)}{dt} dt \quad (1-4)$$

上式中, 除 N_A 及 N_B 表示热电极A和B的自由电子密度(它们是温度的函数)外, 其余符号意义与前述公式相同。

综上所述, 两种不同材料的热电极 A 、 B 组成的闭合回路中, 当 $t > t_0$ 且 $N_A > N_B$ 时, 回路的总热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 是两个接触电势及两个温差电势之代数和, 即:

$$E_{AB}(t, t_0) = \varepsilon_{AB}(t) - \varepsilon_A(t; t_0) - \varepsilon_{AB}(t_0) + \varepsilon_B(t, t_0) \quad (1-5)$$

将式 (1-1)、(1-2)、(1-3)、(1-4) 代入 (1-5) 式, 进行推导整理后可得:

$$E_{AB}(t, t_0) = \frac{K}{e} \int_{t_0}^t \ln \frac{N_A}{N_B} dt \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可知, 总热电势与电子密度 N_A 、 N_B 和两接点温度 t 、 t_0 有关。电子密度不仅取决于两种材料的特性, 且随温度变化而变化。所以, 当两种导体材料的成分一定时, 总热电势成为温度 t 和 t_0 的函数差 (注意: 不是温度差的函数), 可写成:

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

如果能使自由端温度 t_0 恒定, 即 $f(t_0) = C$ (常数), 则

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

即回路总热电势与工作端温度成单值函数关系。只要用仪表测出 $E_{AB}(t, t_0)$ 的数值, 就可求得被测温度 t 。这就是热电偶测量温度的原理。必须强调指出: 自由端温度 t_0 要保持不变, 否则会带来测温误差, 要进行适当的补偿。这是使用热电偶测温的一个特殊问题。

在热电偶回路电势中 (图1-2), 温差电势很小, 接触电势起主导作用。由于 $t > t_0$ 且 $N_A > N_B$, 故总热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 的方向取决于 t 端 (热端) 的接触电势 $\varepsilon_{AB}(t)$ 的方向。脚码 A 、 B 的排列顺序表示 A 为正极, B 为负极。热电偶回路总电势也可采用更简明的表达式:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (1-9)$$

式中 $e_{AB}(t)$ 和 $e_{AB}(t_0)$ ——分别为工作端和自由端的分热电势。

很明显, 如果组成热电偶的两种材料性质相同 (即 $N_A = N_B$), 则无论两接点处的温度如何, 都不会产生热电势; 如果热电偶回路两接点处的温度相同 (即 $t = t_0$), 尽管两种导体取不同性质的材料, 回路总热电势也必然为零。

利用热电偶测温时, 必须要用某些仪表来测量热电势的数值, 这就得在回路中接入导线, 等效为第三种导体 C , 如图1-3所示。导体 C 接入后, 与 A 、 B 形成新的接点, 会不会影响热电偶回路的总热电势呢? 讨论如下:

在图1-3(a)中, 若第三种导体 C 的两端温度相等且为 t_0 , 则回路总热电势 $E_{ABC}(t, t_0, t_0)$ 为:

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) \quad (1-10)$$

若三个接点的温度均为 t_0 时, 根据能量守恒定律, 回路总热电势为零:

$$E_{ABC}(t_0, t_0, t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0$$

移项得

$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = -e_{AB}(t_0) \quad (1-11)$$

将式 (1-11) 代入式 (1-10) 得:

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (1-12)$$

同理, 从图1-3(b)的接法, 也可推导出式 (1-12) 的结果。式 (1-12) 与 (1-9) 的右侧完全相同, 这说明在热电偶回路中插入第三种导体后, 只要该导体两端的温度相同, 则对整个回路的总热电势的大小和方向不产生影响。可以类推, 当回路中串入更多种导体

时, 只要同一导体两端温度相同, 也不会影响热电偶所产生的热电势数值。这个原理为热电势的测量成为可能提供了依据。

2. 常用热电偶

(1) 基本结构。图 1-4 所示为普通热电偶的基本结构。热电偶一般做成棒形, 由下列四个基本部分构成。

1) 热电极。热电偶常以所用的热电极材料的种类来定名, 例如铂铑-铂热电偶、镍铬-镍硅热电偶等。热电极的直径大小由材料的价格、机械强度、导电率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为 $0.015 \sim 0.5\text{mm}$, 普通金属热电偶为 $0.2 \sim 3.2\text{mm}$, 热电偶的长度由工作端在介质中的插入深度及安装条件选定, 通常为 $350 \sim 2000\text{mm}$ 。

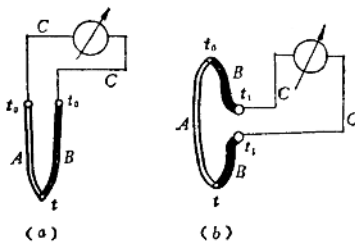


图 1-3 热电偶回路中接入第三种导体

(a) 导体 C 接入方式之一; (b) 导体 C 接入方式之二

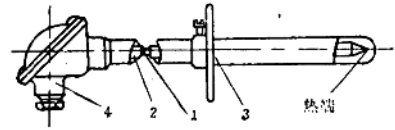


图 1-4 普通热电偶的结构

1—热电极; 2—绝缘管; 3—保护管; 4—接线盒

2) 绝缘管。用以防止两根热电极短路, 其材料由热电偶的使用温度范围及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 1-2。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 1-2 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		碳化硅	1800	2100
石英	1300	1500	石墨	2000	2500

4) 接线盒。连接导线通过接线盒同测量仪表相连, 接线端子上注明了热电极的正极和负极。此外, 由于盒盖与盒体的密封, 可防止灰尘、雨水和有害气体进入保护管内, 损