



R EGONG CELIANG

热工测量 及过程自动控制

JI GUOCHENG ZIDONG KONGZHI

蒋鉴华 张振刚 编著

江西高校出版社

热工测量及过程自动控制

蒋鉴华 张振刚 编著

江西高校出版社

图书在版编目(CIP)数据

热工测量及过程自动控制/蒋鉴华,张振刚编著. —南昌:江西高校出版社, 2009.1

ISBN 978 - 7 - 81132 - 495 - 2

I. 热... II. ①蒋... ②张... III. ①热工测量 ②热力工程 - 自动控制 IV. TK3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009) 第 013368 号

| | |
|-------|--------------------------------|
| 出版发行 | 江西高校出版社 |
| 社址 | 江西省南昌市洪都北大道 96 号 |
| 邮政编码 | 330046 |
| 总编室电话 | (0791)8504319 |
| 销售电话 | (0791)8508191 |
| 网 址 | www.juacp.com |
| 印 刷 | 南昌市印刷四厂 |
| 照 排 | 江西太元科技有限公司照排部 |
| 经 销 | 各地新华书店 |
| 开 本 | 787mm × 1092mm 1/16 |
| 印 张 | 15 |
| 字 数 | 365 千字 |
| 版 次 | 2009 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 |
| 印 数 | 1 ~ 3000 册 |
| 书 号 | ISBN 978 - 7 - 81132 - 495 - 2 |
| 定 价 | 29.20 元 |

版权所有 侵权必究

前 言

近些年来,随着我国陶瓷工业生产的机械化和自动化水平普遍的提高,为了适应广大从事陶瓷工业生产人员在生产中,对各类测量仪表及自动控制装置了解和掌握的需要,我们结合多年来在陶瓷生产和科研中积累的经验,理论联系实际,注重应用,编写了本书。

全书共有十章,第一章介绍了测量的一些基本知识;第二至第六章分别介绍了温度、压力、流量、物位测量仪表和显示仪表;第七章介绍了气体成分分析仪表;第八至第十章介绍了自动调节系统的基本概念、常用的自动化仪表和典型的陶瓷工业过程控制系统。全书避免了繁琐的数学公式推导,简洁明了地介绍了各种仪表的工作原理及使用方法。

全书由蒋鉴华教授负责编写,张振刚负责制图及文字工作。在编写过程中参阅了大量有关单位编著的书刊文献和资料,在此向有关单位和作者表示谢意。

由于编者水平有限,书中的缺点和错误在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

编者
2009年1月

目 录

第一篇 陶瓷热工测量仪表

| | |
|----------------------|-----|
| 第一章 测量的基本知识 | 1 |
| 1.1 测量及测量误差 | 1 |
| 1.2 测量仪表的品质指标与分类 | 2 |
| 第二章 温度测量仪表 | 6 |
| 2.1 温度测量概述 | 6 |
| 2.2 热电偶温度计的原理 | 9 |
| 2.3 普通热电偶的结构及标准化热电偶 | 14 |
| 2.4 热电偶冷端温度的处理 | 17 |
| 2.5 热电偶的实用测温线路 | 20 |
| 2.6 工业用其他类型热电偶 | 23 |
| 2.7 普通热电偶的使用与安装 | 25 |
| 2.8 热电阻温度计 | 26 |
| 2.9 接触法测温技术 | 30 |
| 2.10 辐射测温仪表 | 33 |
| 第三章 电动显示仪表 | 59 |
| 3.1 电位差计 | 59 |
| 3.2 自动平衡记录仪表 | 60 |
| 3.3 数字式显示记录仪表 | 64 |
| 第四章 压力测量仪表 | 71 |
| 4.1 压力测量的基本知识 | 71 |
| 4.2 压力测量方法 | 72 |
| 4.3 压力测量仪表 | 76 |
| 4.4 压力测量仪表的选择 | 78 |
| 第五章 流量测量仪表 | 80 |
| 5.1 流量测量基本概念 | 80 |
| 5.2 体积流量检测方法 | 82 |
| 第六章 物位测量仪表 | 98 |
| 6.1 物位的定义及物位检测仪表的分类 | 98 |
| 6.2 常用物位测量仪表 | 99 |
| 6.3 影响物位测量的因素 | 107 |
| 第七章 气体成分分析仪表 | 108 |
| 7.1 气体成分分析方法及分析系统的构成 | 108 |

7.2 几种工业用气体成分分析仪表 109
7.3 湿度的检测 119

第二篇 自动调节与控制仪表

第八章 自动调节系统的基本概念 123
 8.1 概述 123
 8.2 调节系统的过渡过程和品质指标 127
 8.3 调节对象的特性 129
 8.4 调节器的特性 135
第九章 过程控制仪表与装置 151
 9.1 概述 151
 9.2 变送器 153
 9.3 电动调节器 192
 9.4 电动执行机构 205
第十章 自动调节系统 216
 10.1 简单控制系统 216
 10.2 复杂调节系统 216
 10.3 典型陶瓷工业过程控制 224
参考文献 231

第一篇 陶瓷热工测量仪表

第一章 测量的基本知识

1.1 测量及测量误差

1.1.1 测量的概念和测量方法

测量就是借助专用的技术工具,通过实验或计算的方法,对被测对象取得测量结果的过程。

任何测量过程都是将被测量与某一标准量进行比较的过程。测量中必不可少的一环就是比较,即被测量与同性质的标准量进行比较,并确定被测量是该标准量的多少倍。通常被测量能直接与标准量比较的场合不太多,大多数的被测量和标准量都要变换到双方便于比较的某个中间量。例如用水银玻璃温度计测量室温时,室温(被测量)被变换成玻璃管内水银柱的热膨胀量,而温度的标准量被传递到玻璃管上的标尺分格,这时被测量和标准量都需变换到同性质的线性位移(中间量),这样就可以比较了。由此可见,通过变换实现了测量。以后可以发现,这种变换是整个测量技术的核心。

实现变换的元件叫变换元件。多个变换元件的有机组合,就构成了自动检测仪表。变换元件中最重要的是敏感元件,它直接与被测对象接触,其工作条件往往最复杂,因而最受重视。根据最终测量结果获得方式的不同,可将测量方法分为直接测量和间接测量两种。

直接测量 它是将被测量与标准量直接进行比较,或用预先按标准校对好的测量仪器对被测量进行测量,并能直接得到被测量的大小。例如用米尺量出一根钢管的长度。

间接测量 它是通过一个或多个直接测量值,代入一定的函数关系式运算才能得到被测量的。例如用节流装置测量流量时,在测量出节流装置前后的压差以后,要代入流量公式才能计算出所对应的流量值。

1.1.2 测量误差

在测量过程中,由于测量工具有限的准确性,观测者的主观性,外界环境条件的变化,实际值,也就是理论值,是无法精确地得到,总是存在一定的差距,这种差距就称为测量误差。在实际应用中,可将标准仪器测得的数值当作真值,或再加上标准仪器本身的修正值后作为真值。

1. 绝对误差

绝对误差在理论上是指仪表示值 x 与被测量的真实值 x_0 之间的差值。在工程上,要知道被测量的真实值是困难的。因此,所谓的测量仪表在其标尺范围内各点读数的绝对误差,一般是指用标准表(准确度较高)和被校表(准确度较低)同时对同一参数测量所得到的两个读数之差,可用下式表示:

$$\Delta = x - x_0 \quad (1-1)$$

式中 Δ —绝对误差;

x —被校仪表的指示值;

x_0 —标准仪表的指示值。

绝对误差不能完全说明仪表的准确程度。例如两个仪表的绝对误差都是 $\pm 1^\circ\text{C}$, 这个数字对体温表来说只能是废品,然而对于测量窑炉内 1000°C 以上的温度表来说,却是较高精度了。绝对误差可以是正值,也可以是负值或零。判断仪表的准确程度不用绝对误差而用相对误差。

2. 相对误差

被校仪表的绝对误差与该仪表的指示值或标准仪表的标准值(真值)之比称为相对误差。用 γ 表示,即

$$\gamma = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1-2)$$

或
$$\gamma = \frac{\Delta}{x_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

在上例中窑炉内温度为 1000°C 时,这个仪表的相对误差为 $\frac{1}{1000} \times 100\% = 0.1\%$; 而体温表假如指示值为 37°C , 则其相对误差为 $\frac{1}{37} \times 100\% = 2.7\%$ 。这两个仪表绝对误差相同;而相对误差相差悬殊。

3. 误差的分类

一个被测物理量难以与真值相符,这是多种原因造成的。根据引起误差的原因,将测量误差分为三类:

(1)系统误差 它是指对同一物理量进行多次重复测量时,所出现的测量误差和误差符号均保持不变或按一定规律变化,此种误差称为系统误差,引起系统误差的原因是仪表工作原理不完善,仪表本身材料、零部件、工艺有缺陷以及环境影响。所以在引入相应的修正值后,系统误差是可以消除的。

(2)粗大误差 它是操作人员读取数据或使用仪器与测试方案不正确等人为因素所引起的误差。

(3)随机误差 它是由随机因素引起的误差,没有固定的规律,但是如果进行多次重复测试,则它们出现的机遇服从正态分布。

1.2 测量仪表的品质指标与分类

1.2.1 测量仪表的品质指标

仪表的品质指标就是用来衡量仪表质量好坏的标准。仪表有很多品质指标,包括全部

出厂检验指标,“部颁标准”中有详细规定,下面仅就其中一些重要指标予以简要说明。

1. 基本误差和精度等级

基本误差 它表示仪表在规定的条件下,指示值与被测量的真值之间的最大相对误差,可用下式表示:

$$A = \frac{\Delta_{\max}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中 x_{\max} —仪表刻度标尺的上限值;

x_{\min} —仪表刻度标尺的下限值;

$\Delta_{\max} = |\chi - \chi_0|_{\max}$,它是表示在整个标尺范围内被校表与标准表示值之间的最大绝对误差,它可以出现在仪表刻度标尺上的任何一点处。

精度等级 把基本误差中的百分号去掉,剩下的数字就称作仪表的精度等级。

我国仪器仪表工业采用下列精度等级序列:

0.001;0.005;0.02;0.05;0.1;0.2;0.35;0.5;1.0;1.5;2.5;4.0。

仪表精度等级的数字愈小,仪表的精度愈高。0.5级的仪表比1.0级仪表精度高。工业用仪表的精度等级一般在0.5~4.0之间。

2. 附加误差

仪表的基本误差是指该表在规定的条件下(例如环境温度为20℃,空气的相对湿度为80%,标准大气压以及一定的供电电压和频率等等),通过与标准仪表相比较而确定的。如果仪表的使用条件与规定条件不同,则仪表的指示值中,除了原有的基本误差以外,还会引入附加误差。一般在仪表说明书上都注明了该仪表的正常工作条件,以及在不同的工作条件下应引入的附加误差是多少,使用仪表时必须注意这一点。

3. 变差

变差可用来表征仪表测量的稳定程度或复现性。

在进行仪表校验时,常常会发现在外界条件不变的情况下,使用同一仪表对相同的被测参数值进行正、反行程(即被测参数逐渐由小到大和逐渐由大到小变化)测量时,在同一刻度值上其所得到的仪表指示值是不相等的,两者之差就称为该仪表在该读数点的变差。造成变差的原因很多,例如传动机构的间隙、运动件的磨擦、弹性元件的弹性滞后影响等。变差的大小,一般是指在同一个被测参数数值下,正、反行程测量时仪表指示值的绝对误差的最大值与仪表标尺范围(量程)之比的百分数表示。

$$\alpha = \frac{\chi_z - \chi_f}{\chi_{\max} - \chi_{\min}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 α —变差;

χ_z —被校验表正行程读数;

χ_f —被校验表反行程读数。

仪表校验时,一般应校验仪表量程范围内10%、50%、90%三个刻度处的变差。其数值都应小于仪表的基本误差。

4. 灵敏度

灵敏度表征仪表对被测参数的灵敏程度。它用被测参数变化一个单位时引起仪表指针偏转的角度或直线位移的距离来表示。

即

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (1-6)$$

式中 S —检测仪表的灵敏度；

$\Delta\alpha$ —仪表指针的转角位移(或直线位移)；

Δx —引起 $\Delta\alpha$ 所需的被测参数变化量。

灵敏度可以用增大放大系统(机械式或电子式)的放大系数来提高。必须指出,仪表的性能主要决定于仪表的基本误差,如果单纯地从加大仪表灵敏度来企图达到更准确的读数,这是不合理的,反而可能出现灵敏度似乎很高,但实际上准确度却下降的虚假现象。为了防止这种虚假灵敏度,通常规定仪表标尺上的分格值不能小于仪表最大绝对误差值 Δx_{\max} 。

5. 始动灵敏限

始动灵敏限是指能引起仪表指针发生动作的被测参数的最小(极限)变化量。通常,仪表的始动灵敏限应小于仪表最大绝对误差值 Δx_{\max} 的一半。

以上指标属于仪表的静态指标。显然在量程一定的情况下,精度越高的仪表,测量准确度也高,变差也小,同时灵敏度越高,始动灵敏限的数值越小。值得注意的是,上述指标仅适应于指针式仪表。在数字式仪表中,往往用分辨力来表示仪表灵敏度(或灵敏限)的大小。数字仪表的分辨力就是在仪表的最低量程上最末一位改变一个数所表示的量。以七位数字显示仪表为例,当量程满值为 1V 时,它的分辨力为 $1\mu\text{V}$ 。数字仪表能稳定显示的位数越多,则分辨力越高。

6. 测量仪表的动态指标

仪表的动态指标主要有两项:

(1)反应时间 它是指从测量仪表的感受元件接受被测参数变化开始,到指针基本稳定地指示出被测参数的变化为止,这段时间称为仪表的反应时间。

仪表反应时间可用来说明测量仪表滞后的大小。显然,测量仪表的反应时间短,滞后小为好。但选用仪表反应时间需与被测参数的变化周期相适应。

测量仪表能不能及时反映出被测参数的变化情况是很重要的动态品质指标。如果仪表需要较长的时间才能得到被测参数的正确指示值,那么该仪表一定不能用来测量频繁变化的参数。因为仪表尚未指示出参数的数值时,参数又已经变化了。所以仪表始终指示不出参数的真实变化情况。一般要求仪表的反应时间小于被测参数的变化周期。

(2)仪表指针走全行程的时间 它是指给仪表输入满量程信号值(阶跃信号)时,仪表指针由刻度下限移动到刻度上限,或由仪表刻度上限移动到刻度下限所需要的时间。

1.2.2 测量仪表的组成及分类

1. 检测仪表的组成及各部分的作用

测量仪表的结构形式是多种多样的,但基本上由三部分组成:

(1)一次仪表 它又称测量元件或传感器,其作用是将被测参数(各种物理量)转换成容易被度量的量,如电量、位移量等。

(2)传输、转换部分 其作用是将一次仪表测出的信号输出、转换或放大后再送至二次仪表。

(3)二次仪表 它又称显示仪表。其作用是将转换、输送部分送来的信号,量度出来或

与标尺比较得出被测物理量的数值。它可以将被测物理量指示、记录或累计下来。

显示方式分为模拟显示(即用指针的位移模拟被测量的大小)、数字显示和屏幕显示。

2. 测量仪表的分类

工业生产过程中所用的检测仪表,其结构和形式是多种多样的,可从不同的角度进行分类。

按仪表使用的动力,测量仪表可分为气动仪表、电动仪表和液动仪表。目前常用的为气动仪表和电动仪表,陶瓷工业中以电动仪表为主。

气动仪表的结构比较简单,工作比较可靠;对温度、湿度、电磁场、放射线等环境影响的抗干扰能力较强;能防火、防爆、价格比较便宜。但气动仪表一般反应速度较慢,传送距离受到限制,与计算机结合比较困难,使远距离集中控制受到限制。

电动仪表以交流电或直流电为能源。信号之间联系比较方便,适宜于远距离传送、集中控制,便于与计算机结合控制生产过程;近年来,电动仪表也可以做到防火、防爆,更有利于电动仪表的安全使用。但电动仪表一般投资大,受温度、湿度、电磁场、放射线影响较大,使可靠性受到限制。

按仪表的结构形式,测量仪表可分为单元组合式仪表、基地式仪表和组装式仪表。

单元组合式仪表是将各参数的测量、信号转换、变送及显示等部分,分别做成能完成某一个功能,而又能各自独立工作的单元仪表(简称单元),根据不同要求可方便地将各单元组合成各种测量系统,适用性和灵活性均较好。

基地式仪表是将测量、显示等部分都装在一个壳体内,成为不可分离的整体。

组装式仪表是近年来出现的组装式电子综合控制装置。它是使用插件板形式来扩大、组合各种应用功能,是一种新式的生产过程自动化成套装置。

按仪表被测参数不同,测量仪表可分为压力测量仪表、流量测量仪表、物位测量仪表、温度测量仪表、以及气体成分分析仪表等。

第二章 温度测量仪表

温度是陶瓷生产中最普遍最重要的热工参数。许多陶瓷产品的质量、产量和能耗都直接与温度参数有关,因此实现准确的温度测量与控制具有重要意义。然而要准确测量温度是很困难的。对于各种各样的测温仪表和测温方法,如果在应用中选择不当,或者测温环境不适宜,都不能得到准确的测量结果。

2.1 温度测量概述

2.1.1 温度

温度是表征物体冷热程度的物理参数。如果温度不同的两物体互相接触,由于它们之间有温度差存在,热量就会从高温物体向低温物体传递,假设这两物体与外界没有能量交换,则经过一段时间后两者就会达到热平衡状态,即两者温度相等。若两物体之一是温度传感器,另一个是被测物体,当两者达到热平衡时,温度传感器就充分反映了被测物体的温度,接触式测温法就是基于这一原理。

2.1.2 温标

上述概念只能对温度作定性的描述,要定量表达就必须用数量的大小来表示。温标就是温度数值化的标尺,它给出了温度数值化的一套规则和方法,并明确了温度的测量单位。人们借助于随温度而变化的物理量(如体积、压力、电阻、热电势等等)来制造各种各样温度检测仪表。它们的分度值都由温标决定。

温标有如下几种:

1. 经验温标 借助于某一种物质的物理量与温度变化的关系,用实验方法或经验公式所确定的温标称作经验温标。它主要指摄氏温标和华氏温标两种。

华氏温标($^{\circ}\text{F}$)是在标准大气压下,将水的冰点和沸点之间的温度差分成 180 等份,每一等份称为一华氏度。并规定冰点的温度数值为 32°F ,沸点为 212°F 。

摄氏温标($^{\circ}\text{C}$)是在标准大气压下,将水的冰点和沸点之间的温度差分成 100 等份,每一等份称为一摄氏度。并规定冰点的温度数值为 0°C ,沸点为 100°C 。

摄氏温标和华氏温标的起点不同,基本单位的大小也不同。

2. 热力学温标(K, 又称开尔文温标) 上述经验温标是用水银作温度计的测温介质,由于依附于具体物质的性质而带有任意性,不能严格地保证世界各国所采用的基本温度单位完全一致。

物理学家开尔文提出,以热力学第二定律为基础的热力学温标,是一种纯理论的温标,无法直接实现。热力学的理论证明,热力学温标与理想气体温标完全一致。所以通常借助于气体温度计来复现热力学温标。

3. 国际温标 气体温度计虽然能复现热力学温标,但它的装置系统复杂,不适于实际应

用。为了实用方便,国际上协商决定,建立一种既使用方便,又具有一定科学技术水平的温标,这就是国际温标。

国际温标的基本内容为:规定不同温度范围内的基准仪器(或称内插仪器),选择一些纯物质的平衡态温度作为温标基准点;建立内插公式可计算出任何两个相邻基准点间的温度值。以上被称作温标“三要素”。

第一个国际温标是1927年建立的,称“1927年国际温标”,记为ITS-27。此后大约每隔20年进行一次重大修改,相继有1948年国际温标(ITS-48),1968年国际实用温标(IPTS-68)和1990年国际温标(ITS-90)。从1990年1月1日开始,各国将陆续采用1990年国际温标。

摄氏温标、华氏温标、热力学温标之间的换算关系:

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

2.1.3 温度测量仪表的分类

温度不能直接测量,而是借助于物质的某些物理特性与温度的函数关系,通过对某些物理特性变化量的测量,间接地获得温度值。

温度测量仪表的分类方法可按工作原理来划分,有时也根据温度范围(高温、中温、低温等)或仪表的精度(基准、标准等)来划分。

根据测量方法不同,温度测量仪表可划分为接触式测温仪表和非接触式测温仪表两大类。

1. 接触式测温仪表

接触式测温法是使感温元件直接与被测介质接触,感受被测介质的温度变化。因此这种测量方法比较直观可靠,但在有些情况下,它将影响被测温度场的分布,带来测量误差。另外在某些介质中,如高温或具有腐蚀性时,对测温元件的寿命会有很大影响。下面介绍常用的接触式测温仪表。

1) 膨胀式温度计

利用物体受热膨胀的原理制成的温度计有液体膨胀式温度计、固体膨胀式温度计和气体膨胀压力表式温度计三种。

(1)液体膨胀式温度计:液体膨胀式温度计最常见的是玻璃管式温度计,如图2-1所示。它主要由液体储存器1,工作液体2,标尺3和毛细管4组成。根据所充填的液体介质不同,能够测量 $-200^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度。

液体温度计结构简单、直观、使用方便,有较高的灵敏度和精度标准温度计分度值可达 (0.01°C) ,价格便宜。但只能直读,不便远距离测量,玻璃管易碎,尤其是水银有毒等。

(2)固体膨胀式温度计:双金属温度计是一种固体膨胀式温度计。他结构简单,牢固,可将温度的变化直接转换成机械量的变化。它是利用两种线膨胀系数不同的材料制成的,有杆式和双



1-液体储存器;2-工作液体;
3-标尺;4-毛细管
图2-1 玻璃水银温度计

金属片式两种,如图 2-2(a)所示,将两种线膨胀系数不同的金属薄片叠焊在一起,将其中一端固定,如果温度升高了,下面的金属片 B(例如黄铜)因膨胀而伸长,而上面的金属片 A(例如因瓦合金)却几乎不变。这样使得双金属片向上翘起。温度越高,则产生的线膨胀差就越大,引起的弯曲角度也越大。其关系可用下式表示:

$$X = G(L^2/d) \cdot \Delta t$$

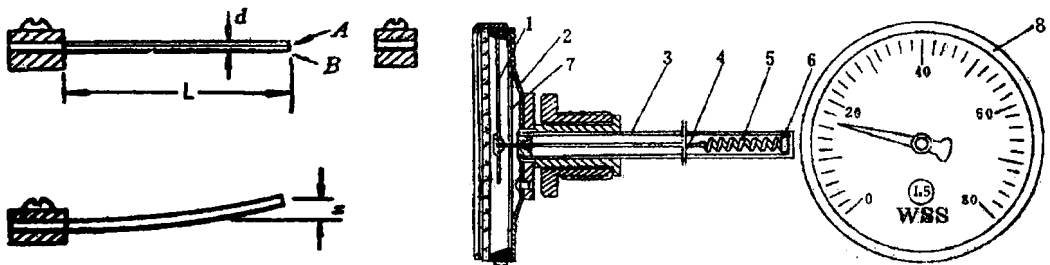
式中 X —双金属片始端的位移(mm);

L —双金属片的长度(mm);

d —双金属片的厚度(mm);

Δt —双金属片的温度变化;

G —弯曲率,取决于双金属片的材质。



(a) 杆式

(b) 双金属片式

1—指针;2—基座;3—外套;4—芯杆;5—螺旋式双金属片;6—顶端;7—弹簧;8—表面

图 2-2 固体膨胀式温度计(双金属片式)

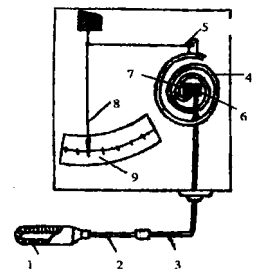
根据上述原理制成的双金属温度计,如图 2-2(b)所示。它的感温元件通常绕成螺旋形,一端固定,另一端连接指针轴,当温度变化时,双金属片因受热或冷的作用,使感温元件的始端位移发生变化,并通过指针轴带动指针偏转,在刻度盘上直接显示出温度变化。

双金属温度计的测温范围为 $-80^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$,精度等级最高为 1.0 级。

除用金属材料外,有时为了增大膨胀系数差,还选用非金属,如石英、陶瓷等。

(3)压力式温度计:压力式温度计是利用密闭容器内工作介质随温度升高而压力升高的性质,通过对工作介质的压力测量来判断温度值的一种机械式仪表。

压力式温度计的工作介质可以是气体、液体或蒸气,其结构如图 2-3 所示。仪表中包括温包 1、金属毛细管 2、基座 3 和具有扁圆或椭圆截面的弹簧管 4。弹簧管一端焊在基座上,内腔与毛细管 2 相通,另一端封死为自由端。自由端通过拉杆、齿轮传动机构与指针相联系,指针的转角在刻度盘上指示出被测度。



1—温包;2—细管;3—基座;4—弹簧管;5—拉杆;6—扇齿轮;7—柱齿轮;8—指针;9—刻度值

图 2-3 压力式温度计

压力式温度计由于受毛细管长度的限制,一般工作距离最大不超过 60 米,被测温度一般为 $-50^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$ 。它简单可靠,抗震性能好,具有良好的防爆性,故常用在飞机、汽车、拖拉机上,也可用它做温度控制信号。但这种仪表动态性能差,示值的滞后较大,也不能测量迅速变化的温度。

2) 热电偶温度计和热电阻温度计

它们是利用物体的电气参数如电势、电阻等随温度变化的物理特性来测量温度的。这两种温度计是接触式测温仪表中最重要、应用最广泛的测温仪表,国内发展也较快。标准化、小型化、多样化和传感、变送一体化是当前接触式测温仪表的发展趋势。

接触式实用温度传感器的分类和性能见表 2-1。

2. 非接触式测温仪表

非接触式测温仪表是利用物体的热辐射特性与温度之间的对应关系,对物体的温度进行非接触测量的仪表,如光学高温计、比色高温计和辐射高温计等等。

表 2-1 接触式实用温度传感器的分类和性能

| 原理 | 大类 | 小类 | 适用温域 | 精度 Δt |
|--------|--------|--|---|---|
| 热膨胀温度 | 压力式 | 气体 | $-270^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ | $0.001^{\circ}\text{C} \sim 1^{\circ}\text{C}$ |
| | | 蒸汽压 | $-20^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ | $0.5^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ |
| | 液体 | $-30^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ | $0.5^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ | |
| 热电阻温度计 | 固体膨胀式 | 双金属 | $-80^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ | $0.5^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ |
| | 液体膨胀式 | 水银 有机液体 | $-80^{\circ}\text{C} \sim 600^{\circ}\text{C}$ $-200^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ | $0.5^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ $1^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ |
| 热电阻温度计 | 金属电阻 | 铂电阻 | $-260^{\circ}\text{C} \sim 850^{\circ}\text{C}$ | $0.001^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ |
| | | 铜热电阻 | $-50^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$ | $0.3\% \sim 0.35\%$ |
| | | 镍热电阻 | $-60^{\circ}\text{C} \sim 180^{\circ}\text{C}$ | $0.4\% \sim 0.7\%$ |
| | | 铑铁电阻 | $0.5\text{K} \sim 300\text{K}$ | $0.001\text{K} \sim 0.01\text{K}$ |
| | | 铂钴电阻 | $1\text{K} \sim 300\text{K}$ | $0.002\text{K} \sim 0.1\text{K}$ |
| | 非金属电阻 | 热敏电阻 锗电阻 碳电阻 | $-50^{\circ}\text{C} \sim 350^{\circ}\text{C}$ $0.5\text{K} \sim 30\text{K}$ $0.01\text{K} \sim 70\text{K}$ | $0.3^{\circ}\text{C} \sim 5^{\circ}\text{C}$ $0.002\text{K} \sim 0.02\text{K}$ 0.01K |
| 热电偶温度计 | 金属热电偶 | 钨铼热电偶 | $0^{\circ}\text{C} \sim 2300^{\circ}\text{C} (3000^{\circ}\text{C})$ | $4^{\circ}\text{C} \sim 1\%$ |
| | | 铂铑热电偶 | $0^{\circ}\text{C} \sim 1800^{\circ}\text{C}$ | $0.2^{\circ}\text{C} \sim 9^{\circ}\text{C}$ |
| 镍铬-镍硅 | | $-200^{\circ}\text{C} \sim 1300^{\circ}\text{C}$ | $1.5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ | |
| 镍铬-金铁 | | $-270\text{K} \sim 300\text{K}$ | $0.5^{\circ}\text{C} \sim 1.0^{\circ}\text{C}$ | |
| 非金属热电偶 | 碳化硼-石墨 | $600^{\circ}\text{C} \sim 2200^{\circ}\text{C}$ | 0.75% | |

2.2 热电偶温度计的原理

图 2-4 是热电偶测温系统原理图。它由热电偶、显示仪表以及连接导线所组成。本节介绍热电偶的工作原理及其应用定则。

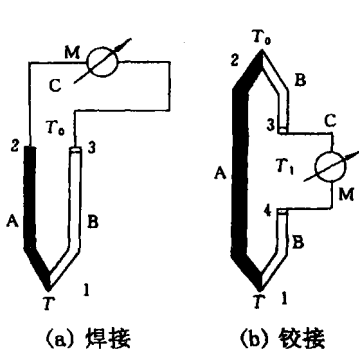


图 2-4 热电偶测温系统图

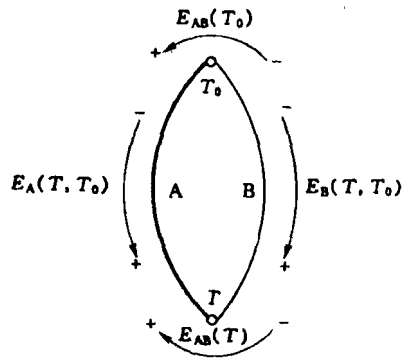


图 2-5 热电偶测温原理及连接

热电偶具有结构简单、制造方便、准确度和灵敏度足够高、信号便于远传与集中检测控制等优点,广泛用于测量 $-200^{\circ}\text{C} \sim 1800^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度,特殊情况下可测至 4K 的低温或 2800°C 的高温。

2.2.1 热电偶的工作原理与特点

1. 工作原理

热电偶是热电偶温度计的敏感元件,它测温的基本原理是基于热电效应(或塞贝克效应)。两种不同的导体将两端互相连接在一起,构成如图 2-5 所示的闭合回路。当两接点 1 与 2 的温度不同时,如 $T > T_0$,则回路中就会产生热电势,这种物理现象称为塞贝克效应(或称热电效应)。而这一电势称为塞贝克电势,通常又称热电势,记作 $E_{AB}(T, T_0)$ 。导体 A、B 称热电极。两热电极 A 和 B 的组合称热电偶。接点 1 是将两电极焊在一起,测温时将它放入被测对象中感受被测温度,故称之为测量端或热端;接点 2 处于环境之中,要求温度恒定,称为参考端或冷端。

热电偶是通过将所测量的温度转换成热电势来实现测温的。该热电势实际上由接触电势(珀尔帖电势)与温差电势(汤姆逊电势)所组成。

1) 接触电势

不同的导体,内部的电子密度是不同的。当两种密度不同的导体 A 和 B 相互接触时就会发生自由电子的扩散现象,自由电子从密度大的导体 A 向密度小的导体 B 扩散。电子扩散的速率与自由电子的密度及所处的温度成正比。假如导体 A 与 B 的电子密度分别为 N_A 、 N_B ,并且 $N_A > N_B$,则在单位时间内,由导体 A 扩散到导体 B 的电子数比从 B 扩散到 A 的电子数多,导体 A 因失去电子而带正电,导体 B 因获得电子而带负电,因此,在 A 和 B 间形成了电势差,如图 2-6 所示。这个电势差在 A、B 接触处形成一个静电场,阻碍扩散作用的继续进行。在某一温度下,电子扩散能力与静电场的阻力达到动平衡,此时在接点处形成的电动势称为接触电势,用符号 $E_{AB}(T)$ 代表,并用下式表示

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} \quad (2-1)$$

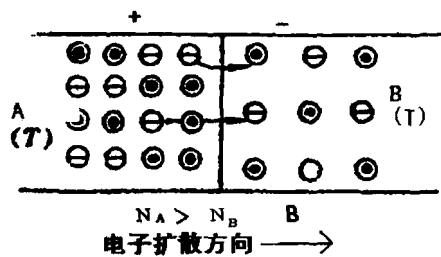


图 2-6 接触电势原理

$$E_{AB}(T_0) = \frac{kT_0}{e} \ln \frac{N_{AT_0}}{N_{BT_0}} \quad (2-2)$$

式中 e —单位电荷, $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{C}$;

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

$E_{AB}(T)$ 和 $E_{AB}(T_0)$ 它们为导体 A 和 B 的两个接点在温度 T 和 T_0 时的电位差。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, 即在热电势符号“ E ”前加“负”号。

N_{AT} 和 N_{AT_0} : A 导体两接端温度分别为 T 和 T_0 时的电子密度。

N_{BT} 和 N_{BT_0} : B 导体两接端温度分别为 T 和 T_0 时的电子密度。

从式中看出, 接触电势的大小与接点温度的高低以及导体 A 和 B 的电子密度有关。温度愈高, 接触电势越大, 两种导体电子密度的比值越大, 接触电势也越大。

2) 温差电势

由于导体两端温度不同产生的电势称温差电势。设导体 A (或 B) 两端温度分别为 T 和 T_0 , 且 $T > T_0$ 时形成温度梯度, 使高温端的电子能量大于低温端的电子能量, 因此从高温端扩散到低温端的电子数比从低温端扩散到高温端的要多, 结果高温端因失去电子带正电荷, 低温端因获得电子而带负电荷。因而, 在同一导体两端便产生电位差, 该电位差阻止电子从高温端向低温端扩散, 最后使电子扩散达到动平衡, 此时所形成的电位差称作温差电势, 如图 2-7 所示。 A 、 B 导体分别都有温差电势产生, 可由下式表示

$$E_A(T, T_0) = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \frac{1}{N_{At}} d(N_{At} \cdot t) \quad (2-3)$$

$$E_B(T, T_0) = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \frac{1}{N_{Bt}} d(N_{Bt} \cdot t) \quad (2-4)$$

式中 N_{At} 、 N_{Bt} 分别为导体 A 和 B 在某温度 t 时的电子密度; $E_A(T, T_0)$ 和 $E_B(T, T_0)$ 分别为导体 A 和 B 两端温度各为 T 和 T_0 ($T > T_0$) 时的温差电势。

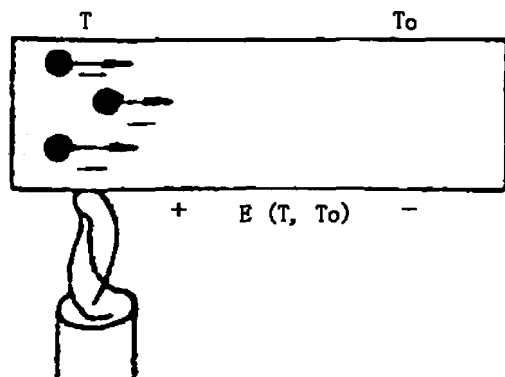


图 2-7 温差电势原理

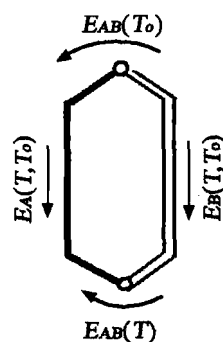


图 2-8 热电偶闭合回路的电势分布

(3) 热电偶闭合回路的总电势

如图 2-8 所示的热电偶闭合回路中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 $E_{AB}(T)$ 、 $E_{AB}(T_0)$ 。由于温差电势比接触电势小, 又 $T > T_0$, 所以在总电势中, 以