

# 热工测量及显示仪表

沈阳电力学校 孙吉星 冯雅琴编

电力工业出版社

# 热工测量及显示仪表

沈阳电力学校 孙吉星 冯雅琴编

电 力 工 业 出 版 社

## 内 容 提 要

本书分为两篇。第一篇阐述火力发电厂热力过程的主要热工参数，如温度、压力、流量、水位的测量原理，煤量的测量原理，成分分析原理，其中着重介绍传感器的原理、结构、校验方法和安装要求。第二篇阐述火力发电厂常用的显示仪表，如机械式、电气式、平衡式、计算式和数字式显示仪表的原理、结构、使用维修、调整校验以及安装要求。

本书为中等专业学校“电厂热工测量及自动化”专业的教材，也可供火力发电厂中从事热工测量及自动化工作的技术人员和工人参考。

## 热工测量及显示仪表

沈阳电力学校 孙吉星 冯雅琴 编

\*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 19.5印张 442千字  
1981年7月第一版 1981年7月北京第一次印刷  
印数 00001—12720册 定价 1.60元  
书号 15036·4205

# 前 言

本书是根据一九七八年原水利电力部制订的“电力类中等专业学校专业教材编审出版规划(草案)”编写的,可作为中等专业学校“电厂热工测量及自动化”专业热工测量仪表课程的教材。

热工测量仪表课程的教学大纲和教材编写大纲由设有“电厂热工测量仪表及自动化”专业的学校,并邀请电力工业部西安热工研究所和一些火力发电厂的代表共同讨论制订。按教材编写大纲要求,本书内容分为“热工参数测量原理”及“显示仪表”两部分,为此书名定为《热工测量及显示仪表》。根据中等专业学校的教学特点,本书取材注意结合实际,着重阐述热工参数的测量原理、仪表的动作原理及仪表的使用方法,对生产中采用的新测量方法和新仪表,也作了一定的介绍。为避免与本专业其它教材的内容重复,对教材编写大纲规定的某些内容作了一定的删节。

本书由沈阳电力学校孙吉星、冯雅琴编写,重庆电力学校主审,参加审稿的有西安电力学校、北京电力学校、哈尔滨电力学校、江西电力学校。本书在编写过程中,承蒙清华大学、上海自动化仪表研究所、电力工业部西安热工研究所、东北电业管理局技术改进局、西安仪表厂、上海自动化仪表三厂、重庆发电厂和清河发电厂等单位及有关同志,给予大力支持并提供大量资料,在此一并表示衷心感谢。

因编者业务水平有限,书中一定会有不少缺点和错误,热忱希望广大读者给予批评指正。

编 者

一九八〇年十二月

# 目 录

|     |   |
|-----|---|
| 前 言 |   |
| 绪 论 | 1 |

## 第一篇 热工参数的测量原理

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 热工测量的基本知识           | 2  |
| 第一节 测量和测量方法             | 2  |
| 第二节 热工测量仪表的组成和分类        | 3  |
| 第三节 测量误差                | 3  |
| 第二章 热电偶测量温度的原理          | 6  |
| 第一节 温标                  | 6  |
| 第二节 热电偶的热电现象及测温原理       | 7  |
| 第三节 热电极材料及常用热电偶的种类      | 11 |
| 第四节 热电偶冷端温度处理           | 13 |
| 第五节 热电偶感温元件的结构          | 19 |
| 第六节 热电偶的校验及常见故障处理       | 23 |
| 第七节 热电偶感温元件的安装要求及误差分析   | 25 |
| 第三章 热电阻测量温度的原理          | 31 |
| 第一节 导体、半导体的电阻与温度关系      | 31 |
| 第二节 热电阻的材料              | 32 |
| 第三节 电阻感温元件的种类及结构        | 34 |
| 第四节 电阻感温元件的校验、故障处理及安装要求 | 36 |
| 第四章 压力测量原理              | 39 |
| 第一节 压力平衡式测量压力的原理        | 40 |
| 第二节 弹性元件测量压力的原理         | 44 |
| 第三节 被测压力取样              | 48 |
| 第五章 流量测量原理              | 50 |
| 第一节 节流装置测量流量的原理         | 51 |
| 第二节 动压管测量流量的原理          | 72 |
| 第三节 靶式流量变送器原理           | 73 |
| 第四节 流量测量装置的安装及压差信号导管的敷设 | 75 |
| 第六章 锅炉汽包水位测量原理          | 79 |
| 第一节 玻璃水位计               | 79 |
| 第二节 水位-压差转换原理           | 80 |
| 第三节 电极式水位测量原理           | 86 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 第七章 煤量测量原理 .....     | 89  |
| 第一节 应变电阻转换原理 .....   | 89  |
| 第二节 皮带测重机构 .....     | 90  |
| 第三节 传感器 .....        | 92  |
| 第四节 电子线路 .....       | 94  |
| 第八章 氧和氢的含量测量原理 ..... | 100 |
| 第一节 热磁式测氧原理 .....    | 101 |
| 第二节 氧化锆测氧原理 .....    | 106 |
| 第三节 热导式测氢原理 .....    | 114 |

## 第二篇 显 示 仪 表

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第九章 机械式显示仪表 .....             | 119 |
| 第一节 弹簧管压力表 .....              | 119 |
| 第二节 膜盒式微压计 .....              | 123 |
| 第三节 双波纹管压差计 .....             | 124 |
| 第四节 机械式显示仪表指示的远传 .....        | 131 |
| 第十章 动圈式显示仪表 .....             | 136 |
| 第一节 动圈式显示仪表的原理 .....          | 136 |
| 第二节 动圈式显示仪表的结构 .....          | 137 |
| 第三节 动圈式显示仪表配热电偶的测温电路 .....    | 140 |
| 第四节 动圈式显示仪表配热电阻的测温电路 .....    | 141 |
| 第五节 动圈式显示仪表的改刻度和校验 .....      | 143 |
| 第十一章 电子自动平衡式显示仪表 .....        | 146 |
| 第一节 电子自动电位差计原理 .....          | 146 |
| 第二节 电子自动平衡电桥原理 .....          | 156 |
| 第三节 差动变压器测量原理 .....           | 159 |
| 第四节 测量桥路的稳压电源 .....           | 163 |
| 第五节 晶体管放大器 .....              | 165 |
| 第六节 集成电路放大器 .....             | 191 |
| 第七节 电子自动平衡式显示仪表的分类及结构 .....   | 194 |
| 第八节 电子自动平衡式显示仪表的抗干扰问题 .....   | 202 |
| 第九节 电子自动平衡式显示仪表的安装要求和校验 ..... | 208 |
| 第十二章 力矩电机式显示仪表 .....          | 211 |
| 第一节 测量电路 .....                | 211 |
| 第二节 晶体管放大器 .....              | 212 |
| 第三节 力矩电机 .....                | 215 |
| 第四节 越限报警电路 .....              | 215 |
| 第五节 整机电源及整机工作原理 .....         | 217 |
| 第十三章 计算式显示仪表 .....            | 219 |
| 第一节 电子开方器 .....               | 219 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 第二节   | 比例积算器 .....  | 225 |
| 第十四章  | 数字显示式仪表 .....  | 237 |
| 第一节   | 电接点数字显示式水位计 .....  | 237 |
| 第二节   | 数字显示式转速表 .....   | 246 |
| 第三节   | 数字显示式巡回检测仪表 .....  | 259 |
| 附表 I  | 热电偶与热电阻分度表 .....   | 273 |
| I-1   | 铂铑-铂热电偶分度表 .....   | 273 |
| I-2   | 镍铬-镍硅(铝)热电偶分度表 .....   | 277 |
| I-3   | 镍铬-考铜热电偶分度表 .....  | 280 |
| I-4   | 铂热电阻分度表 ( $B_{A1}$ ) .....   | 282 |
| I-5   | 铂热电阻分度表 ( $B_{A2}$ ) .....   | 284 |
| I-6   | 铂热电阻分度表 ( $B_1$ 、 $B_2$ ) .....                                      | 286 |
| I-7   | 铜热电阻分度表 .....  | 286 |
| 附表 II | 节流装置设计用表 .....   | 287 |
| II-1  | 压差计的基本特性 .....   | 287 |
| II-2  | 常用材料的线膨胀系数 $\lambda \times 10^6 / ^\circ\text{C}$ .....              | 288 |
| II-3  | 水的密度 $\rho$ (公斤/米 <sup>3</sup> ) .....                               | 289 |
| II-4  | 水蒸汽的密度 $\rho$ (公斤/米 <sup>3</sup> ) .....                             | 292 |
| II-5  | 水和水蒸汽的动力粘度 $\eta \times 10^6$ (公斤力/米·秒) .....                        | 294 |
| II-6  | 标准孔板的 $\alpha_0 = f(\alpha_0 \beta^2, \text{Re}_D, \beta)$ 关系表 ..... | 295 |
| II-7  | 标准喷嘴的 $\alpha_0 = f(\alpha_0 \beta^2, \text{Re}_D, \beta)$ 关系表 ..... | 299 |

## 绪 论

“测量技术”是研究测量原理、测量方法和测量工具的一门科学，它是随着科学技术的发展而发展的。科学技术的发展需要先进的测量方法和测量工具，而测量技术的发展又促进了科学技术的发展。

“测量技术”在工农业生产的各个领域，在科学研究的各个部门以及在人们的日常生活中都得到广泛的应用。根据被测对象、测量方法和测量参数的不同，测量的种类是很多的，热工测量只是其中的一种。

热工测量是指在热力过程中各种热工参数，如温度、压力、流量等的测量。热工测量的工具称为“热工测量仪表”。

火力发电厂是通过锅炉将燃料（如煤或油）的化学能转换为热能，再经汽轮机将热能转换为机械能，最后由发电机将机械能转换为电能的工厂。在将化学能转换为机械能的热力生产过程中，热工测量是热力设备安全经济运行所必需的，并为热力生产的经济核算提供各种数据；热力设备的各种运行参数又是对热力过程进行控制、调整及计算的重要依据。因此，热工测量的可靠性和精确性是热力设备安全经济运行和实现热力过程自动化的非常重要的条件。可以断言，热工测量技术是与火力发电厂的热力过程自动化有着直接联系的。如果热工测量技术不能满足要求，即便有了先进的自动化装置（如电子计算机等），也不能充分发挥自动化装置的作用，甚至无法实现热力过程自动化。

随着科学技术的不断发展，火力发电厂大容量高参数的机组不断增多，并将走向电厂的全盘自动化。近几十年来，由于电子技术的广泛应用，测量技术和测量仪表在测量精度、测量速度以及测量可靠性方面虽然已有很大提高，但是，还不能满足自动化的要求，自动化技术和设备的应用仍受到一定的限制。所以提高测量的可靠性和精确性仍是当前热工测量技术急待解决的重要课题。此外，由于大容量高参数的机组需要监视和测量的参数很多，表盘面积又是有限的，因此热工测量仪表还应不断地朝着小型化、数字化和多点化的方向发展。



# 第一篇 热工参数的测量原理

## 第一章 热工测量的基本知识

### 第一节 测量和测量方法

所谓测量就是用实验的方法把被测量与所采用的测量单位相比较，求出其数学比值的过程，可用数学形式表示如下：

$$q = \frac{Q}{V} \quad (1-1)$$

式中  $Q$ ——被测量；  
 $V$ ——测量单位；  
 $q$ ——测量结果的数值。

式(1-1)为测量的基本方程式，从式中可见 $q$ 的大小随所选用的测量单位大小而定。因此，为了将测量结果正确地表示出来，在比值 $q$ 的后面要写测量单位。

测量是通过一种便于比较的装置来进行的，这种装置便是测量仪表。

测量方法很多，按获得测量结果的方法不同来分类，可分为直接测量法、间接测量法和组合测量法。

(1) 直接测量法：被测量直接与选用的测量单位相比较而得出结果的方法称为直接测量法。例如用玻璃水面计测量水箱中的水位高度。

(2) 间接测量法：通过直接测量与被测量有确定函数关系的一个或几个量，然后计算出被测量的方法，称为间接测量方法。例如导体的电阻值与其所受的温度有关，通过直接测量电阻值的大小，便可计算出被测温度。

(3) 组合测量法：被测量和几个量在不同条件下可组合成联立方程，通过直接测量几个量后求解联立方程而得出被测量的方法，称为组合测量法。这种方法比较繁杂，通常在实验室和科学研究中采用。

按读数方法不同来分类，测量方法又可以分为直读法，零值法和差值法。

(1) 直读法：直接从仪表的刻度尺上读出测量结果的方法称为直读法。例如用水银玻璃温度计测量温度时，可直接读出温度值。

(2) 零值法：将被测的未知量与已知量相比较，当二者达到平衡时，仪表指示为零，这时已知量的数值就是被测量的数值。这种方法也称为补偿法。电位差计是采用零值法的例子。

(3) 差值法：当未知量尚未完全与已知量平衡时，读取它们之间的偏差，由已知量和偏差量得到被测量。不平衡电桥测量电阻是采用差值法的例子。

在工业生产中，因直读法比较迅速、简便，所以得到广泛采用。

## 第二节 热工测量仪表的组成和分类

火力发电厂热力过程中的热工参数多采用间接测量法测量，因此热工测量仪表通常是由传感单元和显示单元所组成。传感单元包括感受元件和变送器。感受元件是利用物质的某种物理或化学特性，将被测的热工量转换为相应的电量或机械位移量；变送器将感受元件输出的电量或机械位移量进行放大与传输，使其输出量与被测热工参数按一定的比例关系变化。显示单元接受变送器的输出，并将被测参数的大小用指针和刻度标尺、数码管或屏幕显示出来。

热工测量仪表由于用途、原理及结构不同，所以分类的出发点也不同。在火力发电厂中一般按下列几种方法分类。

(1) 按测量参数分：有温度测量仪表、压力测量仪表、流量测量仪表、液位测量仪表、成分分析仪表。除上述几种热工参数测量仪表外，尚有一些非热工参数测量仪表，如：汽轮机振动、转子轴向位移、膨胀及胀差、转数和挠度等测量仪表。它们虽不是热工参数测量仪表，但在电厂中常由热工室进行管理及维修。

(2) 按用途分：有标准仪表、实验室用仪表和工程用仪表。

(3) 按显示特点分：有指示式、记录式、积算式、数字式及屏幕显示式仪表。

(4) 按工作原理分：有机械式、电气式、电子式、化学式、气动式和液动式仪表。

(5) 按装置地点分：有就地安装和盘用仪表。

(6) 按使用方式分：有固定式和携带式仪表。

工程用仪表是在工业生产中广泛采用的测量仪表，它的结构简单、牢固抗震、工作比较可靠，但精度比较低。

实验室用仪表通常用来校对工程用仪表，其精度比较高。

标准仪表可用来复现和保持测量单位，亦可用来校验和刻度工程用仪表。

## 第三节 测量误差

由于仪表本身的不准确性、测量方法存在缺陷，以及观测者的主观错误和客观条件不符合原规定等原因，在测量过程中得到的测量结果往往与真实值存在着差异，这个差异称为测量误差。

### 一、测量误差的种类

根据测量误差的性质，误差可分为系统误差、偶然误差和疏忽误差三类。

#### 1. 系统误差

系统误差也称规律误差，主要是由于仪表未调整好或测量方法不当而引起的，也可能是由一种固定不变的外来影响所引起的。例如环境温度对仪表的影响等。系统误差的数值和符号是有规律的，在测量结果上加以修正即可消除系统误差。

## 2. 偶然误差

偶然误差的数值与符号不是按一定规律变化的。例如在测量过程中，对同一个参数的测量条件相同，使用的测量设备和操作者的仔细程度都一样，但是，多次重复测量的测量结果总是存在着差异，显然，这些差异是由于一些偶然因素引起的。偶然误差直接影响着测量的精确度。

## 3. 疏忽误差

这种误差主要是由于操作上疏忽大意，如读数错误或计算错误所致。也可能是由于突然的冲击或振动等外来因素引起。有这种误差存在的测量结果是不能用的，应将其剔除。

## 二、误差的表示方法

### 1. 示值绝对误差

测量值与被测量真实值之间的差值称为示值绝对误差，即

$$\delta = x - d \quad (1-2)$$

式中  $x$  —— 测量值；

$d$  —— 被测量的真实值。通常以标准仪表的示值作为真实值。

从式(1-2)可知，当示值绝对误差  $\delta$  为正值时，表明测量值比真实值大，反之测量值比真实值小。

若将测量值加上一个与示值绝对误差大小相等，而符号相反的代数值  $C$ ，便可求得被测量的真实值，即

$$d = x + C \quad (1-3)$$

式中  $C$  —— 修正值 ( $C = -\delta$ )。

例如，用一支标准温度计和一支普通温度计去同时测量某介质的温度，将它们测得的结果、示值绝对误差和修正值列于下表中，可见，如在各点上加修正值即可获得被测量的真实值。

从表中看出，10°C和60°C的示值绝对误差虽然相同，但在60°C点上差1°C要比在10°C点上差1°C要准得多。可见只用示值绝对误差尚不能表征仪表的准确程度，因此需要提出示值相对误差的概念。

示值的绝对误差和修正值表

| 标准温度计(°C)  | 0    | 10 | 20 | 30   | 40   | 50   | 60 |
|------------|------|----|----|------|------|------|----|
| 普通温度计(°C)  | -0.5 | 9  | 21 | 29.5 | 40.8 | 50.5 | 59 |
| 示值绝对误差(°C) | -0.5 | -1 | 1  | -0.5 | 0.8  | 0.5  | -1 |
| 修正值(°C)    | 0.5  | 1  | -1 | 0.5  | -0.8 | -0.5 | 1  |

### 2. 示值相对误差

示值相对误差是示值绝对误差与真实值的比值，并以百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\delta}{d} \times 100\% = \frac{x-d}{d} \times 100\% \quad (1-4)$$

如上例中,在测量10℃时的相对误差为-10%;在测量60℃时的相对误差为-1.7%。可见,示值绝对误差虽然都是-1℃,但此两点的测量准确程度是不一样的。

### 3. 折合误差

为了表征仪表的准确度,采用了折合误差的概念。仪表最大的示值绝对误差与仪表的测量范围之比的百分数,称为折合误差即

$$\gamma_A = \frac{\delta_{max}}{A_u - A_L} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中  $\delta_{max}$ ——最大的示值绝对误差;

$A_u$ 、 $A_L$ ——仪表刻度标尺的上限值、下限值。

## 三、仪表的质量指标

### 1. 仪表的基本误差,容许误差和精度等级

仪表的基本误差即是指在正常使用条件下,仪表测量结果的折合误差。根据仪表质量,厂家规定某种仪表的基本误差有一个容许值,称为容许误差,凡基本误差小于容许误差的仪表为合格。将容许误差去掉百分号后的绝对值,称为仪表的精度等级。精度等级是由国家规定的一系列数字来表示的,其序列为:0.005、0.01、0.02、0.04、0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、4.0、5.0。

仪表的精度等级是衡量仪表质量优劣的重要指标之一。若某仪表的基本误差超过了容许误差就不能继续使用,必须经过修调,合格后才能继续按原精度等级使用。若达不到原精度等级,则应根据基本误差的大小降级使用。

### 2. 仪表的灵敏度

仪表显示机构的线位移( $\Delta L$ )或角位移( $\Delta \alpha$ )与引起这个线(角)位移的被测量的变化量( $\Delta A$ )的比值,称为仪表的灵敏度 $S$ ,即

$$S = \frac{\Delta L}{\Delta A} \quad \text{或} \quad S = \frac{\Delta \alpha}{\Delta A}$$

### 3. 不灵敏区及指示变差

使仪表显示机构不能发生位移的被测量的最大变化范围,称为仪表的不灵敏区。

为了确定仪表的不灵敏区,可在仪表的某一点上,逐渐增加和减少输入值,分别记下使显示机构开始动作的增、减两个方向的输入值,并求出它们的最大差值,即为仪表该点的不灵敏区,各点不灵敏区中的最大值即为仪表的不灵敏区。

仪表的变差是,对某刻度点分别由上升和下降两个方向输入对应该点的同一个输入量时,上升和下降示值之差的绝对值与仪表刻度范围比值的百分数,即

$$\Delta = \frac{|A_1 - A_2|}{A_u - A_L} \times 100\% \quad (1-6)$$

式中  $A_1$ 、 $A_2$ ——在同一输入量下,仪表上升、下降时的示值。

仪表变差不得超过仪表精度等级所规定的容许误差。

#### 4. 反应时间

当用仪表对参数进行测量时，仪表的显示值总要经过一段时间后才能正确地显示出来，从测量开始到仪表正确显示出被测量的这段时间称为仪表的反应时间或时滞。一只仪表能否很快地反应出被测量的变化也是仪表很重要的指标之一。如果仪表反应时间过长，就不适合用来测量变化频繁的参数，因为仪表来不及反应被测参数值的变化。

## 第二章 热电偶测量温度的原理

表征发电厂热力过程运行情况的诸参数中，“温度”是一个很重要的参数，它是表示工质质量的重要指标之一。在热力过程中有许多热交换器，如省煤器、过热器、加热器和冷凝器等，它们所以能工作是因为存在着温度差。热机的热效率在理论上只决定于工质进入与排出的温度 $T_1$ 和 $T_2$ ，如果工质温度下降就会引起热效率的显著降低，因此欲使这些交换器能正常工作，必须对工质的温度进行监视。监视温度也是为了保证安全运行，因为热力设备的管道金属温度、转动设备的各轴承温度、发电机定子温升等若超过允许值时均会造成严重事故。可见温度的精确测量，对保证火力发电厂安全、经济运行具有极其重要的意义。温度测量在其它工业上和在日常生活中同样都得到广泛应用。

“温度”是表征物质冷热程度的一个物理量，它反映了物体内部热运动的状况，分子热运动越快温度就越高，反之，温度越高表明物体越热。

人们最早是用自己的感觉器官来衡量物体的温度的，由于科学不断地发展，发现了物体有很多物理性质与物体的温度之间存在着一定的函数关系，这样就可以用物体受热而引起的某种物理性质的变化来反映物体的温度高低。在物理学中知道，任意两个热量不同的物体相接触时，必然要产生热交换现象，直到两个物体热量相等即温度相等达到热平衡为止。利用这个道理，选择一个物体与被测物体相接触，当达到热平衡时被选择的物体温度就与被测物体的温度相等，这时被选择物体的某物理性质的变化，如尺寸、弹性变形、电阻、热电势等等，就可反映被测物体的温度。

我们希望被选择物体的某种物理性质随温度不同而变化的函数关系具有连续性、单值性和直线性，以便实现准确测量。而在实际上并不可能完全符合上述要求，目前比较近于上述要求的物理性质有：热膨胀性质、热电性质以及电阻随温度而变化的性质等。

### 第一节 温 标

为了确定温度的数值，首先要建立一个衡量温度的尺度，称为温度标尺，简称“温标”。

通常在两个容易得到的平衡温度点（如某些化学纯净物质的沸点和凝固点）之间等分成若干格，其中一格称为1“度”，而所有格的总和构成了温度标尺。现在国际上最常用

的温标有三种，即热力学温标（K）、摄氏温标（℃）和华氏温标（°F）。

国际实用温标即热力学温标，又称绝对温标，是1968年10月国际权度委员会根据十三次国际权度大会的决议建立的。规定热力学温标符号为 $T$ ，单位为开尔文（K）。开尔文二度相当于水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

热力学温标的固定点是利用纯物质各相间可复现的平衡状态建立起来的温度点，如平衡氢三相点是在固、液、汽三态平衡时，规定为 $13.81\text{K}$ 或 $-259.34^\circ\text{C}$ ；又如水三相点是在固、液、汽三态平衡时，规定为 $273.16\text{K}$ 或 $0.01^\circ\text{C}$ 。

摄氏温标将冰的熔点定为零度（ $0^\circ\text{C}$ ），水的沸点定为一百度（ $100^\circ\text{C}$ ），中间分成一百等分格，则每一格为摄氏1度（ $1^\circ\text{C}$ ）。摄氏温度用符号 $t$ 表示，单位是摄氏度（℃）。

摄氏温度 $t$ 与热力学温度 $T$ 之间的关系为

$$t = T - 273.15 \quad (2-1)$$

华氏温标用得不多，它是将冰的熔点规定为32度，水的沸点规定为212度，中间等分成180格，每一格为华氏1度。通常也用 $t$ 来表示，单位是华氏度（°F）。华氏温度与摄氏温度的关系为

$$^\circ\text{C} = \frac{5}{9} (^\circ\text{F} - 32) \quad (2-2)$$

## 第二节 热电偶的热电现象及测温原理

目前，广泛应用的测温热电偶是利用热电偶的热电现象而制成的，可用于长时间测量 $1300^\circ\text{C}$ 以下的温度，特殊材料制成的热电偶可测量高达 $2800^\circ\text{C}$ 的温度。通过热电偶能将温度信号转换为电势信号，便于远方显示。热电偶具有性能稳定、结构简单、使用方便、经济耐用、容易维护和体积小等优点，故在工业生产和科学研究中得到广泛采用。

将两种不同材料的金属导体 $A$ 和 $B$ 按图2-1组成闭合回路，2端放在被测介质中感受温度变化，称为工作端或热端，另一端称为自由端或冷端，组成热电偶的金属导体称为热电极。

当热端和冷端温度不同时，在回路中就会产生一定方向和大小的电势 $E_{AB}(t, t_0)$ ，此电势包括接触电势和温差电势。

接触电势是两种不同的金属或合金导体 $A$ 和 $B$ 接触时而产生的电势。由于金属或合金的材料不同，其内部电子密度也不同（所谓电子密度是指单位体积内自由电子的数目），所以要产生电子扩散，电子密度大的金属内的电子就向电子密度小的金属内扩散。假设金属 $A$ 的电子密度比金属 $B$ 的大（见图2-2），则有一些自由电子从 $A$ 跑向 $B$ ，这样 $A$ 因失去电子而带正电， $B$ 因得到电子而带负电，因而在金属 $A$ 与 $B$ 的接触处产生一个静电场，该静电场的电场力阻止自由电子从金属 $A$ 继续向金属 $B$ 扩散，在一定的温度下，当电子的扩散力与电场力达到动平衡时，在两种金属的接触处产生了电位差，称为接触电势。

下面介绍接触电势是如何产生的，讨论这一问题前要假定两金属接触面无明显的分界面，而是有一过渡层，在过渡层中电子密度是连续地从 $N_A$ 变到 $N_B$ （设 $N_A$ 与 $N_B$ 分别为金

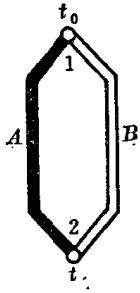


图 2-1 两种不同材料的导体组成热电偶

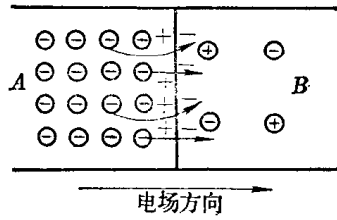


图 2-2 接触电势的产生

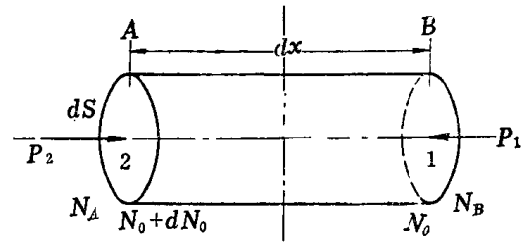


图 2-3 计算电子气体压强图

属A和B的自由电子密度，并且 $N_A > N_B$ ）。在过渡层中割出一个轴线与接触面相垂直、而底面平行于接触面的小圆柱体 $dx dS$ ，如图2-3所示。

根据洛仑兹假说，金属中自由电子形成电子气，这种气体符合气体分子运动论的基本理论。

设底面积1所在处的自由电子密度为 $N_0$ ，底面积2处的自由电子密度为 $N_0 + dN_0$ ，则电子气对面积1的压强为

$$P_1 = N_0 KT \quad (2-3)$$

对面积2的压强为

$$P_2 = (N_0 + dN_0) KT \quad (2-4)$$

式中  $K$ ——波兹曼常数， $K = 1.38 \times 10^{-6}$  尔格/°C；

$T$ ——接触处的绝对温度。

根据式(2-3)和式(2-4)得两个面积上的电子气压差为

$$\begin{aligned} dP &= P_2 - P_1 = (N_0 + dN_0) KT - N_0 KT \\ &= KT dN_0 \end{aligned} \quad (2-5)$$

由于 $dP$ 的作用，电子开始从面积2向面积1移动，因而在底面积2与1之间产生电位差 $dU$ ，这个电位差所产生的电势将阻止电子继续移动。

在圆柱内的电子数为 $N_0 dx dS$ ，如电场强度为 $E$ ，则电场作用于这些电子上的电场力 $dF$ 为

$$dF = E e N_0 dx dS \quad (2-6)$$

式中  $e$ ——电子电荷， $e = 4.802 \times 10^{-10}$  静电单位；

$E$ ——电场强度， $|E| = \frac{dU}{dx}$ 。

所以式(2-6)可以写成

$$dF = e N_0 \frac{dU}{dx} dx dS = e N_0 dU dS \quad (2-7)$$

当电子受力达到动平衡时，则 $\frac{dF}{dS} = dP$ ，所以

$$\begin{aligned} dP &= e N_0 dU \\ KT dN_0 &= e N_0 dU \end{aligned}$$

即

所以 
$$dU = \frac{KT}{e} \times \frac{1}{N_0} dN_0 \quad (2-8)$$

而总的电位差  $U_{AB}$  可由式 (2-8) 积分得到, 即

$$U_{AB} = \int_{N_B}^{N_A} \frac{KT}{e} \times \frac{1}{N_0} dN_0 = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (2-9)$$

由式 (2-9) 可见, 接触电势的大小与接触处的绝对温度有关, 和两种金属的电子密度有关。材料一定时接触电势  $U_{AB}$  只与温度有关, 所以称为热接触电势, 简称为热电势, 通常以  $E_{AB}(t)$  表示, 这时上式可写成

$$E_{AB}(t) = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_A}{N_B} \quad (2-10)$$

温差电势是金属本身两端温度不同而产生的电势。使金属 A 两端温度分别为  $t$  和  $t_0$  (见图 2-4 所示), 且  $t > t_0$ , 由于温度不同, 自由电子所具有的能量也就不同, 温度高能量大, 能量大的自由电子就要往温度低的一端移动, 使温度高的一端带正电, 温度低的一端带负电, 于是在两端之间产生了电位差, 这就是温差电势。同接触电势一样, 温差电势所建立的电场对电子的作用与温差对电子的作用是相反的, 在一定的温差条件下达到动态平衡时, 温差电势则有一定数值。其数值可由下列各式计算:

$$E_A(t, t_0) = \frac{K}{e} \int_{t_0}^t \frac{1}{N_A} d(N_A t) \quad (2-11)$$

式中  $N_A$  —— 金属 A 的电子密度, 它是温度的函数;

$t$  —— 金属 A 所处的环境温度。

由式 (2-11) 可见, 温差电势与金属材料及两端温差有关, 温差越大, 温差电势越大。当  $t = t_0$  时, 则  $E_A(t, t_0) = 0$ 。

在了解接触电势和温差电势之后, 再来分析由两种不同金属所组成的热电偶回路 (见图 2-5)。A 与 B 有两个接触处 1 和 2, 所以产生两个接触电势  $E_{AB}(t)$  和  $E_{AB}(t_0)$ , 又由

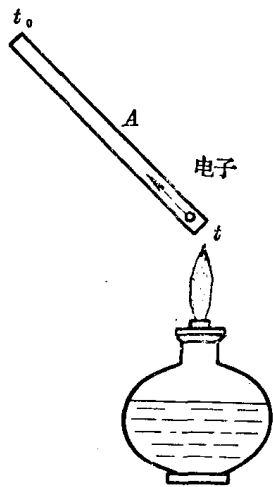


图 2-4 温差电势的产生

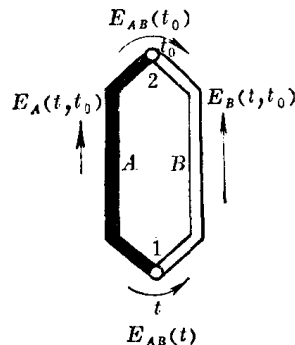


图 2-5 热电势分布



于两端温度不同，如  $t > t_0$ ，则又产生两个温差电势  $E_A(t, t_0)$  和  $E_B(t, t_0)$ 。若以  $E_{AB}(t, t_0)$  表示热电偶回路的总电势，则

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_B(t, t_0) - E_{AB}(t_0) - E_A(t, t_0) \quad (2-12)$$

$E_{AB}(t)$  和  $E_{AB}(t_0)$  在总电势中占主要部分，而  $E_A(t, t_0)$  和  $E_B(t, t_0)$  占极小部分故可忽略不计，这样式 (2-12) 可以写成

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) \quad (2-13)$$

热电偶有以下特性：

(1) 热电偶回路的热电势大小只与热电极材料及热电偶两端温度有关，而与热电极的几何尺寸无关。

(2) 当热电偶两端温度相同，即  $t = t_0$  时，则总热电势为零，即  $E_{AB}(t, t_0) = 0$ 。

(3) 相同电极材料组成的热电偶，由于  $N_A = N_B$ ，则  $\ln \frac{N_A}{N_B} = 0$ ，所以总电势  $E_{AB}(t, t_0) = 0$ 。

(4) 如使热电偶一端温度  $t_0$  不变，则热电势只与另一端温度  $t$  有关，这样只要测得  $E_{AB}(t, t_0)$  的大小即可知道温度  $t$  的大小，这就是热电偶测量温度的原理。

在热电偶的冷端温度  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  时，确定出  $E_{AB}(t, t_0)$  与热端温度  $t$  的数值关系即为热电偶的分度关系。把它们列成表，称为热电偶的分度表。

图2-1的闭合回路热电偶是不能用来测量温度的，要实现温度测量则必须接入导线和仪表，如图2-6(a)所示。这样就相当于在热电偶回路中接入了第三种金属导体  $C$ ，如图2-6(b)所示。根据热电效应原理，接入  $C$  后将产生  $C$  与  $A$  和  $C$  与  $B$  的接触电势  $E_{CA}(t_0)$  和  $E_{BC}(t_0)$ 。因为第三种金属导体两端的温度都为  $t_0$ 。所以其温差电势  $E_C(t_0, t_0) = 0$ ，这时回路的总电势为

$$E_{ABC}(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_B(t, t_0) + E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0) - E_A(t, t_0) \quad (2-14)$$

因温差电势很小可忽略不计，所以上式可简化为

$$E_{ABC}(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0) \quad (2-15)$$

在  $A$ 、 $B$ 、 $C$  三种金属导体组成的闭合回路（见图2-7）中，如各接触点均处于  $t_0$  温度时，则

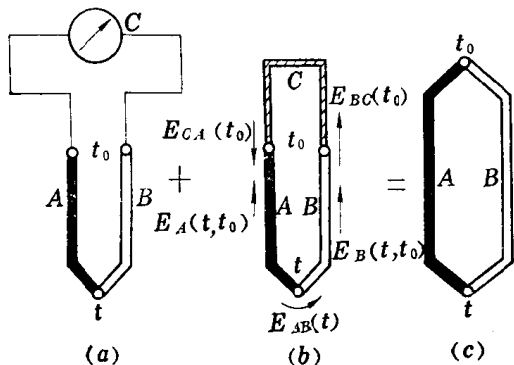


图 2-6 接入第三种金属导体的热电偶回路

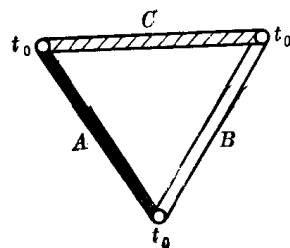


图 2-7 三接触点置于同一温度下，三种导体组成的闭合回路