

职业技术学院教学用书

# 冶金过程检测与控制

郭爱民 主编



YEJIN GUOCHENG JIANCE YU KONGZHI

冶金工业出版社



职业技术学院教学用书

# 冶金过程检测与控制

主 编 郭爱民

北 京

冶金工业出版社

2004

## 内 容 提 要

本书为职业技术学院教学用书。全书共分 10 章,按自动检测、过程控制和计算机应用三部分编写。自动检测部分包括温度测量、压力测量、流量测量、物料称量、物位检测;过程控制部分包括过程控制原理及系统、调节器、执行器、冶金过程仪表检测和控制;计算机应用部分主要介绍计算机控制系统在炼铁、炼钢生产中的应用。

本书可作为职业技术学院钢铁冶炼专业教材,也可作为在职人员的培训教材或自学之用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

冶金过程检测与控制/郭爱民主编. —北京:冶金工业出版社,  
2004.9 (2004.10 重印)

职业技术学院教学用书

ISBN 7-5024-3415-1

I. 冶… II. 郭… III. ①冶金—过程—自动检测—专业学校—教材 ②冶金—过程控制—专业学校—教材 IV. TF01

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 072228 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 俞跃春 美术编辑 李 心

责任校对 侯 璐 李文彦 责任印制 李玉山

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2004 年 9 月第 1 版, 2004 年 10 月第 2 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 11.5 印张; 272 千字; 170 页; 2001-6000 册

20.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

本书是为适应职业教育的需要,根据职业技术学院的教学要求编写的,为钢铁冶炼专业教学用书。

本书以适应我国冶金生产操作的需要为前提,以提高职业教育教学质量为目的,结合生产过程,介绍了工艺参数的检测和控制的基本知识。全书按自动检测、过程控制和计算机应用三个方面进行了编写,适于炼铁、炼钢、轧钢、有色冶金等专业使用。

通过对本书的学习,可使学生熟悉冶金生产过程中主要工艺参数的检测原理和方法;初步掌握选择仪表、使用仪表的基本知识;熟悉生产过程中自动控制的基本原理和方法;了解过程控制技术在冶金生产中的具体应用;为学生在工作岗位上组织正常的冶炼操作,打下必备的基础。

本书由郭爱民任主编。参加该书编写工作的有山西工程职业技术学院郭爱民(编写概述、第1、2、3、4、5章)、曹秀敏(编写第7、8章),太钢杨莉、李勇刚和晋机厂孔祥彪(编写第6、9、10章)。在编写过程中,我们引用了国内部分专家学者的研究成果,在此谨表感谢。

由于编者水平所限,书中不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2004年5月

# 目 录

|                         |   |
|-------------------------|---|
| 0 概述 .....              | 1 |
| 0.1 测量仪表的测量误差 .....     | 1 |
| 0.2 测量仪表的品质指标 .....     | 2 |
| 0.2.1 精度(精确度、准确度) ..... | 2 |
| 0.2.2 变差 .....          | 2 |
| 0.2.3 灵敏度 .....         | 2 |
| 0.3 测量仪表的选择原则 .....     | 3 |
| 0.4 测量仪表的分类 .....       | 3 |

## 自 动 检 测

|                        |    |
|------------------------|----|
| 1 温度测量 .....           | 5  |
| 1.1 温度和温标 .....        | 5  |
| 1.1.1 摄氏温标与热力学温标 ..... | 5  |
| 1.1.2 国际实用温标 .....     | 5  |
| 1.2 热电偶 .....          | 6  |
| 1.2.1 测温原理 .....       | 6  |
| 1.2.2 中间导体定律 .....     | 7  |
| 1.2.3 常用热电偶 .....      | 8  |
| 1.2.4 快速微型热电偶 .....    | 11 |
| 1.2.5 冷端温度补偿 .....     | 11 |
| 1.2.6 热电偶测温线路 .....    | 14 |
| 1.2.7 常见故障及处理 .....    | 15 |
| 1.3 热电阻 .....          | 15 |
| 1.3.1 热电阻结构 .....      | 16 |
| 1.3.2 测温原理 .....       | 16 |
| 1.3.3 使用中的故障处理 .....   | 18 |
| 1.4 温度显示仪表 .....       | 18 |
| 1.4.1 动圈式仪表 .....      | 18 |
| 1.4.2 电子电位差计 .....     | 21 |
| 1.4.3 自动平衡电桥 .....     | 24 |
| 1.4.4 数字式温度显示仪表 .....  | 26 |
| 1.5 温度变送器 .....        | 28 |
| 1.5.1 工作原理 .....       | 28 |
| 1.5.2 量程单元 .....       | 29 |

|       |                |    |
|-------|----------------|----|
| 1.5.3 | 放大单元           | 30 |
| 1.6   | 接触式测温仪表的选择与安装  | 30 |
| 1.6.1 | 温度计的选择         | 30 |
| 1.6.2 | 感温元件的安装        | 31 |
| 1.6.3 | 布线要求           | 32 |
| 1.7   | 带计算机的温度测量      | 32 |
| 2     | 压力测量           | 34 |
| 2.1   | 概述             | 34 |
| 2.2   | 弹性压力计          | 34 |
| 2.2.1 | 弹性元件           | 34 |
| 2.2.2 | 弹簧管压力表         | 35 |
| 2.2.3 | 电接点压力表         | 36 |
| 2.2.4 | 霍尔片远传压力表       | 36 |
| 2.2.5 | 压力计选择与安装       | 38 |
| 2.3   | 压力(压差)变送器      | 39 |
| 2.3.1 | Ⅲ型压力变送器        | 39 |
| 2.3.2 | 压力变送器主要技术性能    | 41 |
| 2.4   | 带计算机的压力测量系统    | 42 |
| 3     | 流量测量           | 44 |
| 3.1   | 概述             | 44 |
| 3.2   | 差压式流量计         | 44 |
| 3.2.1 | 节流装置的类型及特点     | 44 |
| 3.2.2 | 节流原理和流量方程式     | 45 |
| 3.2.3 | 方程中系数讨论        | 46 |
| 3.2.4 | 标准节流装置孔板       | 47 |
| 3.2.5 | 差压式流量计流量测量系统   | 48 |
| 3.3   | 转子流量计          | 49 |
| 3.3.1 | 工作原理           | 49 |
| 3.3.2 | 示值修正与安装        | 50 |
| 3.4   | 电磁流量计          | 51 |
| 3.4.1 | 工作原理           | 51 |
| 3.4.2 | 电磁流量变送器的结构     | 52 |
| 3.4.3 | 电磁流量计的选用、安装和使用 | 53 |
| 3.5   | 其他流量计          | 54 |
| 3.5.1 | 靶式流量计          | 54 |
| 3.5.2 | 均速管流量计         | 55 |
| 3.5.3 | 涡街流量计          | 56 |
| 4     | 物料称量           | 59 |
| 4.1   | 电阻应变式自动称量仪表    | 59 |

|       |               |    |
|-------|---------------|----|
| 4.1.1 | 电阻应变荷重传感器     | 59 |
| 4.1.2 | 显示仪表          | 61 |
| 4.2   | 工业电子秤的应用      | 62 |
| 4.2.1 | 电子皮带秤         | 62 |
| 4.2.2 | 吊车秤           | 63 |
| 4.2.3 | 料斗秤           | 64 |
| 5     | 物位检测          | 65 |
| 5.1   | 浮力式液位计        | 65 |
| 5.1.1 | 恒浮力式液位计       | 65 |
| 5.1.2 | 变浮力式液位计       | 66 |
| 5.2   | 差压式液位计        | 66 |
| 5.2.1 | 用普通差压变送器测量液位  | 66 |
| 5.2.2 | 用法兰式差压变送器测量液位 | 67 |
| 5.3   | 电容式物位计        | 68 |
| 5.3.1 | 检测原理          | 68 |
| 5.3.2 | 电容物位传感器       | 68 |

## 过 程 控 制

|       |               |    |
|-------|---------------|----|
| 6     | 过程控制原理及系统     | 72 |
| 6.1   | 过程控制概述        | 72 |
| 6.1.1 | 自动控制系统的组成     | 72 |
| 6.1.2 | 自动控制系统的分类     | 73 |
| 6.2   | 控制系统过渡过程及品质指标 | 74 |
| 6.2.1 | 自动控制系统的过渡过程   | 74 |
| 6.2.2 | 过渡过程的品质指标     | 75 |
| 6.3   | 被控对象的动态特性     | 76 |
| 6.3.1 | 放大系数          | 76 |
| 6.3.2 | 时间常数          | 77 |
| 6.3.3 | 滞后时间          | 77 |
| 6.4   | 调节器的控制作用      | 78 |
| 6.4.1 | 双位控制作用        | 78 |
| 6.4.2 | 比例、积分、微分控制作用  | 79 |
| 6.5   | 单回路控制系统       | 84 |
| 6.5.1 | 被控量与操纵量的选择    | 85 |
| 6.5.2 | 调节器控制作用的选择    | 86 |
| 6.5.3 | 调节器参数的工程整定    | 86 |
| 6.6   | 系统投运和故障判别     | 89 |
| 6.6.1 | 投运步骤          | 89 |
| 6.6.2 | 系统运行中的故障判别    | 90 |

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| <b>7 调节器</b>          | 92  |
| 7.1 概述                | 92  |
| 7.1.1 调节仪表的种类及发展      | 92  |
| 7.1.2 调节器的基型品种及功能     | 92  |
| 7.2 DDZ-Ⅲ型调节器的结构及工作原理 | 93  |
| 7.2.1 DDZ-Ⅲ型调节器组成原理   | 93  |
| 7.2.2 DDZ-Ⅲ型调节器的使用    | 95  |
| 7.3 可编程调节器            | 97  |
| 7.3.1 可编程调节器的产生及特点    | 97  |
| 7.3.2 可编程调节器的组成及功能    | 99  |
| 7.3.3 可编程调节器的用户编程和操作  | 104 |
| <b>8 执行器</b>          | 108 |
| 8.1 概述                | 108 |
| 8.1.1 执行器的作用          | 108 |
| 8.1.2 执行器的种类及特点       | 108 |
| 8.1.3 执行器的组成和发展       | 108 |
| 8.2 电动执行器             | 109 |
| 8.2.1 电动执行器的种类及作用     | 109 |
| 8.2.2 电动执行器的工作原理      | 109 |
| 8.2.3 伺服放大器           | 110 |
| 8.2.4 执行机构            | 111 |
| 8.3 气动执行器             | 112 |
| 8.3.1 气动执行机构          | 112 |
| 8.3.2 调节阀             | 113 |
| 8.3.3 气动执行器的选择        | 118 |
| 8.4 电-气转换器和阀门定位器      | 121 |
| 8.4.1 电-气转换器          | 121 |
| 8.4.2 阀门定位器           | 122 |
| <b>9 冶金过程仪表检测和控制</b>  | 124 |
| 9.1 炼铁生产过程仪表检测和控制     | 124 |
| 9.1.1 高炉本体检测和控制       | 125 |
| 9.1.2 送风系统检测和控制       | 126 |
| 9.1.3 热风炉煤气燃烧自动控制     | 126 |
| 9.1.4 喷吹重油自动控制        | 128 |
| 9.2 炼钢生产过程仪表检测和控制     | 129 |
| 9.2.1 供氧系统检测和控制       | 129 |
| 9.2.2 烟气除尘系统检测和控制     | 130 |
| 9.2.3 原料系统检测和控制       | 131 |
| 9.2.4 钢水终点温度和终点碳量的检测  | 132 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 9.2.5 连续铸锭系统检测和控制 .....   | 132 |
| 9.3 轧钢生产过程仪表检测和控制 .....   | 133 |
| 9.3.1 连续加热炉检测和控制 .....    | 133 |
| 9.3.2 均热炉热工参数检测和控制 .....  | 137 |
| 9.4 有色冶金生产过程检测和控制 .....   | 139 |
| 9.4.1 回转窑内温度检测与控制 .....   | 139 |
| 9.4.2 回转窑窑头负压的检测与控制 ..... | 142 |

## 计 算 机 应 用

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| <b>10 计算机在生产过程中的应用</b> ..... | <b>143</b> |
| 10.1 计算机控制技术在工业过程中的应用 .....  | 143        |
| 10.1.1 计算机测量与控制系统发展概况 .....  | 143        |
| 10.1.2 计算机控制系统的组成与特点 .....   | 145        |
| 10.1.3 计算机在过程控制中的典型应用 .....  | 149        |
| 10.2 计算机在炼铁生产过程中的应用 .....    | 153        |
| 10.2.1 自动检测在高炉生产中的重要性 .....  | 153        |
| 10.2.2 高炉自动化控制的主要职能 .....    | 153        |
| 10.2.3 高炉本体的检测和控制 .....      | 154        |
| 10.2.4 上料系统的检测和控制 .....      | 159        |
| 10.2.5 炉顶系统的检测和控制 .....      | 160        |
| 10.2.6 热风炉及送风系统的检测和控制 .....  | 162        |
| 10.3 计算机在炼钢生产过程中的应用 .....    | 164        |
| 10.3.1 氧枪系统的检测和控制 .....      | 164        |
| 10.3.2 汽化冷却系统的检测和控制 .....    | 166        |
| 10.3.3 煤气回收系统的检测和控制 .....    | 166        |
| 10.3.4 原料系统的检测和控制 .....      | 166        |
| 10.3.5 连铸系统的检测和控制 .....      | 168        |

# 0 概 述

在冶金、电力、化工等工业生产过程中，为了有效地进行生产操作，就需要对生产过程中的工艺参数（温度、压力、流量等）进行自动检测，并与控制仪表、执行机构相配合，实现对生产过程的自动控制。比如，在高炉炼铁生产中，透气性指数是判断炉况顺行与否的一个重要参数。

$$\text{透气性指数} = (\text{热风压力} - \text{炉顶压力}) / \text{风量}$$

它的值在某一范围，表示炉况顺行；小于某一数值，表示炉况难行，更小时就表明炉子悬料了。如果没有仪表检测，就不能及早发现，有效操作。当高炉恶性悬料时，就会给生产带来严重的后果。我们要检测生产过程中的工艺参数，就要选择合适的测量仪表，采用正确的检测方法进行测量。下面将有关测量仪表的一些基本知识作简略介绍。

## 0.1 测量仪表的测量误差

测量（检测）是指人们借助于专门设备通过实验的方法，对客观事物取得数值观念的认识过程。生产中我们使用仪表把被测参数与该参数已知测量单位相比较，得出被测参数数值的这一过程，就是仪表测量。

测量过程中，由于测量仪表的准确性、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存在一定的差值，这一差值称为测量误差。测量误差为：

$$\gamma = x - x_0 \quad (0-1)$$

式中  $\gamma$ ——绝对误差；

$x$ ——测量值；

$x_0$ ——真实值。

真实值  $x_0$  指所测参数的理论值或定义值，其数值难以得到，在常规测量中，真实值常用比所用测量仪表更精确的标准仪表的测量值  $A$  代替， $A$  称为实际值。这样测量绝对误差通常表示为：

$$\gamma = xA$$

除了绝对误差表示形式之外，测量误差还可以用相对误差表示。

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，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  $\delta$  表示为：

$$\delta = \frac{x - x_0}{a - b} \times 100\% \quad (0-2)$$

式中  $x_0$  和  $x$ ——分别为被测量的真实值和仪表的测量值;  
 $a$  和  $b$ ——分别为仪表测量范围的(标尺)上限值和下限值。

## 0.2 测量仪表的品质指标

一台测量仪表的好坏,是由它的品质指标来衡量的,常用来评价仪表的品质指标有精度、变差和灵敏度。

### 0.2.1 精度(精确度、准确度)

仪表的精度是指仪表的允许误差与仪表量程之百分比,表示为:

$$\text{精度} = \frac{\text{仪表允许误差}}{\text{仪表的量程}} \times 100\% = \frac{(x - x_0)_{\max}}{a - b} \times 100\% \quad (0-3)$$

式中,  $x$ 、 $x_0$ 、 $a$  和  $b$  符号意义与式(0-2)相同。

例如,一台测温仪表,测量范围为  $0 \sim 1200^\circ\text{C}$ ,如果允许误差为  $\pm 12^\circ\text{C}$ ,则这台测温仪表的精度为  $\pm 1.0\%$ ,精度等级为 1.0 级。按仪表工业的规定,精度去掉“%”,并把所得数值圆整到国家规定的精度等级系列值上,此数值就是该仪表的精度等级。国家规定精度等级有:0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 级等。如一台测温仪表,测量范围为  $0 \sim 1100^\circ\text{C}$ ,如果在这个标尺范围内,绝对误差最大不超过  $14^\circ\text{C}$ ,则这台测温仪表的精度为  $\pm 1.3\%$ ,精度等级为 1.5 级。每块仪表的精度通常都用符号  $\bigcirc$  或  $\triangle$  标志在仪表标尺面板上,以方便识别。如上例中 1.5 级的仪表,在标尺面板上,以  $\bigcirc 1.5$  或  $\triangle 1.5$  标志。一般

工业上所用仪表的精度等级为 0.5~4.0 级。

### 0.2.2 变差

在外界条件不变的情况下,使用同一仪表对某一被测参数进行正反行程(即逐渐由小到大到逐渐由大到小)测量时,相同的被测参数所得到的仪表指示值不相等,两者之差即为变差。变差的大小,用同一仪表测量同一个量时,正、反行程测量的指示值之间绝对误差的最大值与仪表量程之百分比表示,如图 0-1 所示。

$$\text{变差} = \frac{(x_{\text{正}} - x_{\text{反}})_{\max}}{a - b} \times 100\% \quad (0-4)$$

式中,  $x_{\text{正}}$ 、 $x_{\text{反}}$  分别为正行程和反行程测量的示值,  
 $a$  和  $b$  符号意义与式(0-2)相同。

变差用来衡量测量仪表的恒定程度(不一致程度)。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、弹性组件弹性滞后的影响等。通常要求仪表的变差不超过仪表精度允许的误差。需要指出,随着仪表制造技术的不断改进,特别是微电子技术的引入,许多仪表全电子化了,无可动部件,模拟仪表改为数字仪表等等,所以变差这个指标在智能型仪表中显得不那么重要和突出了。

### 0.2.3 灵敏度

测量仪表的灵敏度反映了仪表示值对被测参数变化的灵敏程度,一般用仪表输出变化

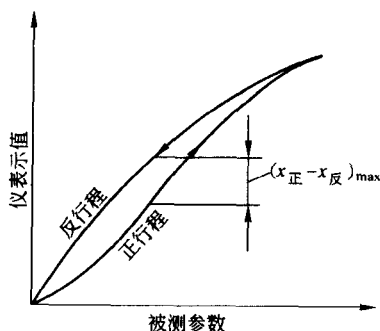


图 0-1 测量仪表的变差

量（例如指针的线位移或角位移） $\Delta\alpha$ 与引起此变化的被测参数的变化量 $\Delta x$ 之比来表示，即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} \quad (0-5)$$

测量仪表的灵敏度可以用增大放大系统（机械的或电子）放大倍数的办法来提高。但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企图达到更准确读数，这是不合理的。反而会出现灵敏度似乎很高，但精度实际上却下降的虚假现象。为了防止这种虚假灵敏度，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。

### 0.3 测量仪表的选择原则

选用测量仪表时，原则上应满足两个条件：

- (1) 满足工艺要求；
- (2) 所选仪表量程上限应尽量接近要测参数的上限值（但弹性压力计除外）。

**例 0-1** 某加热炉最高温度为  $1000^{\circ}\text{C}$ ，工艺要求仪表测量的最大绝对误差不大于  $10^{\circ}\text{C}$ ，问怎样选表？如果选择 1.5 级或选择 0.5 级仪表行不行？

**解：**根据测量仪表的选择原则，选量程为  $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$  的温度表，由

$$\text{精度} = \frac{\pm 10}{1000 - 0} \times 100\% = \pm 1.0\%$$

确定所选仪表的精度等级为 1.0 级。

如果选择 1.5 级仪表，测量中的最大绝对误差大于  $10^{\circ}\text{C}$ ，不能满足工艺要求，所以不行。如果选择 0.5 级仪表，测量中的绝对误差虽然不大于  $5^{\circ}\text{C}$ ，能满足工艺要求，但是测量精度高的仪表，价格也高，且维护技术也要求高，所以也不选用。也就是说，在选择仪表精度等级时，应根据工艺上的实际需要，在满足测量的前提下，不能片面追求高精度，以免造成浪费（弹性压力计的量程选择，我们在第 2 章压力测量中说明）。

### 0.4 测量仪表的分类

在钢铁生产中使用的仪表种类很多，分类方法也不相同，这里介绍几种常见的分类方法：

(1) 按所测参数的不同，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、图像式等仪表。

(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，用来定期检定范型仪表。

### 习 题 与 思 考

0-1 常用来评价仪表质量的品质指标有哪些，它们是如何定义的？

0-2 今有两台测温仪表，其测量范围分别是  $0\sim 800^{\circ}\text{C}$  和  $600\sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，已知其绝对误差的最大值均为

$\pm 6^{\circ}\text{C}$ ，试求它们的精度等级。

0-3 今有一台测量范围为  $0\sim 160\text{kPa}$  的压力表，其校验结果如下：

|                      |   |    |    |     |     |
|----------------------|---|----|----|-----|-----|
| 被校表刻度值/ $\text{kPa}$ | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 |
| 正行程示值 / $\text{kPa}$ | 0 | 39 | 80 | 120 | 159 |
| 反行程示值 / $\text{kPa}$ | 1 | 41 | 81 | 121 | 160 |

试计算此被校表的变差。此表表盘上的标志为 1.0 级，问该表是否合格？根据校验所得结果计算，你认为应该定为哪一个精度级？

# 自动检测

## 1 温度测量

温度是工业生产、科学实验中最普遍、最重要的物理量之一。温度的测量和控制都直接和安全生产、保证产品质量、提高生产效率、节约能源等重大技术经济指标相联系。比如,在炼钢生产中,钢水温度的数值就是衡量钢水质量的主要参数之一。

### 1.1 温度和温标

温度是表征物体冷热程度的物理量。用来衡量物体温度高低的标尺叫温度标尺,简称“温标”。它是用数值表示温度的一种方法或一套规则。它规定了温度的始点(即零点)和测量温度的基本单位。现在使用的温度计、温度测量仪表的刻度数值均由温标来确定。下面介绍几种常用温标。

#### 1.1.1 摄氏温标与热力学温标

摄氏温标是根据水银受热后体积膨胀,并认为体积膨胀随温度的变化是线性而建立起来的。它规定标准大气压下纯水的冰点为 0 度,水的沸点为 100 度,中间线性等分为 100 格,每格为摄氏 1 度,符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。

热力学温标又称开氏温标,它以热力学第二定律为基础,规定分子运动停止(即没有热存在)时的温度为绝对零度(0K)。热力学温标是一种纯理论的、与物体任何物理性质无关的温标,存在实验上的困难,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,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。

#### 1.1.2 国际实用温标

国际实用温标是国际协议性的温标。它是 1927 年国际权度大会提出并采用的(简称 ITS—27),国际温标多年来经多次修改(1948 年,1960 年,1968 年),一直使用至今。我国从 1973 年起正式采用了这种温标,现行的国际温标是 1990 年国际实用温标 ITS—90。

在 1990 年国际实用温标中指出,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  $\text{K}$  表示,它规定水的三相点热力学温度为  $273.16\text{K}$ ,定义开尔文一度等于水三相点热力学温度的  $1/273.16$ 。

在 1990 年国际实用温标中,同时使用国际实用开尔文温度( $T_{90}$ )和国际实用摄氏温度( $t_{90}$ ),作为计量温度的标准。

$T_{90}$  与  $t_{90}$  间的关系为

$$t_{90}(^{\circ}\text{C}) = T_{90}(\text{K}) - 273.15(\text{K})$$

$T_{90}$  和  $t_{90}$  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) 和摄氏度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。在实际使用中, 为了简单, 一般用  $T$  和  $t$  表示温度, 不必另加“90”角码。即

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

当表示温度差和温度间隔时,  $1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$ 。

## 1.2 热电偶

热电偶是工业上应用最广泛的一种测温组件, 通常与显示仪表和连接导线 (补偿导线) 组成测温系统, 如图 1-1 所示。

图 1-1 中 1 为热电偶, 它由 A、B 两种不同材质的导体在端点处焊接而成。焊接的一端称为工作端 (又称热端或测量端), 此接点置于被测对象中, 温度用  $t$  表示; 未焊接的另一端与导线连接, 称为自由端 (又称冷端或参考端), 温度用  $t_0$  表示。导体 A、B 称为热电偶。热电偶将被测温度  $t$  变换成热电势  $E_t$ , 经连接导线传递给显示仪表进行测量, 指示或记录相应的温度。

### 1.2.1 测温原理

热电偶的测温原理是利用热电效应现象进行的, 如图 1-2 所示。

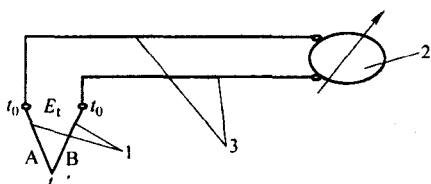


图 1-1 热电偶测温系统

1—热电偶; 2—测量仪表; 3—连接导线

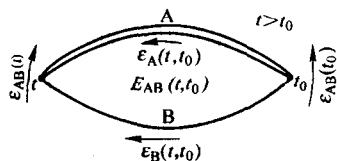


图 1-2 热电偶回路电势

A、B 两种不同材质的导体, 在两个端点处连接起来, 构成闭合回路, 设两接点处的温度为  $t$  和  $t_0$ 。当  $t$  与  $t_0$  不相等且假定  $t > t_0$  时, 回路中有电动势  $E_{AB}(t, t_0)$  产生。这个现象称为热电效应现象, 这个电动势称为热电势。

回路热电势值的大小, 与 A、B 材质有关, 与两接点的温度  $t$ 、 $t_0$  有关, 当热电偶选定 (A、B 材质确定), 固定冷端温度  $t_0$ , 那么回路热电势  $E_{AB}(t, t_0)$  与热端温度  $t$  成单值函数关系。测出这个回路热电势的大小可对应反映热端温度  $t$  的高低。

#### 1.2.1.1 接触电势

两种不同材质的导体 A、B 相接触时产生的电动势叫接触电势。在图 1-2 中, 设 A 导体电子密度为  $N_A$ , 设 B 导体电子密度为  $N_B$ , 且假定  $N_A > N_B$ 。在温度为  $t$  与  $t_0$  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, 从而在接触界面上形成一个 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 A 与 B 间的电子转移数目达到动态平衡时, 在两者的界面上形成一个电位差, 称为接触电势, 对应于接点温度  $t$  和  $t_0$ , 接触电势记为  $\epsilon_{AB}(t)$  和  $\epsilon_{AB}(t_0)$ 。

#### 1.2.1.2 温差电势

同一导体两端温度不同而产生的电势叫温差电势。在图 1-2 中, 设  $t > t_0$ , A 导体

(或 B 导体) 高温端的自由电子的能量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。对应于导体 A 和 B, 温差电势记为  $\epsilon_A(t, t_0)$  和  $\epsilon_B(t, t_0)$ 。

### 1.2.1.3 回路热电势

回路热电势  $E_{AB}(t, t_0)$  是两个接触电势和两个温差电势的代数和, 即:

$$E_{AB}(t, t_0) = \epsilon_{AB}(t) - \epsilon_A(t, t_0) - \epsilon_{AB}(t_0) + \epsilon_B(t, t_0) \quad (1-2)$$

在热电偶回路热电势中 (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  $\epsilon_{AB}(t)$  的方向。脚码的 A、B 排序表示 A 为正极, B 为负极。热电偶回路热电势可采用更简明的表达式:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (1-3)$$

式中  $e_{AB}(t)$ ——对应热端温度  $t$  的热电势。数值相当于冷端温度为  $0^\circ\text{C}$ , 而热端温度为  $t^\circ\text{C}$  的回路热电势  $E_{AB}(t, 0)$ ;

$e_{AB}(t_0)$ ——对应冷端温度  $t_0$  的热电势。数值相当于冷端温度为  $0^\circ\text{C}$ , 而热端温度为  $t_0^\circ\text{C}$  的回路热电势  $E_{AB}(t_0, 0)$ 。

如果固定冷端温度  $t_0$ ,  $e_{AB}(t_0) = C$  (常数), 则:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - C = \Phi(t)$$

即回路热电势与热端 (测量端) 温度  $t$  成单值函数关系。只要仪表测出热电势  $E_{AB}(t, t_0)$  的数值, 就能求得被测温度  $t$ , 这就是热电偶测温的原理。必须强调指出: 冷端温度  $t_0$  要保持不变, 否则会带来测量误差, 这是使用热电偶测温的一个特殊问题。

如果固定冷端温度  $t_0$  为  $0^\circ\text{C}$ , 则热电偶回路热电势为  $E_{AB}(t, 0)$ 。关于回路热电势  $E_{AB}(t, 0)$  与热端温度  $t$  的单值对应关系, 分别见表 1-2、表 1-3、表 1-4。

### 1.2.2 中间导体定律

用热电偶测温时, 必须把图 1-2 所示的热电偶从某点断开, 并接入显示仪表, 如图 1-1。而接入回路的导线和仪表的材料与热电极 A、B 的材质可能是不同的。那么这些导线材料的引入, 对热电偶输出的热电势有没有影响? 中间导体定律就是用来回答这个问题的。

该定律是这样的: 在热电偶回路中插入第三、四、……等几种导体, 只要插入导体的两端温度相等, 且导体是均质的, 则无论插入导体的温度分布如何, 都不会影响原来热电偶热电势的大小。如图 1-3 所示, 热电偶回路中插入均质导体 C, 则整个回路的热电势为:

$$E_{ABC}(t, t_0) = \epsilon_{AB}(t) + \epsilon_{CA}(t_0) + \epsilon_{BC}(t_0) - \epsilon_A(t, t_0) + \epsilon_C(t_0, t_0) + \epsilon_B(t, t_0) \quad (1-4)$$

$$\begin{aligned} \text{其中: } \epsilon_{CA}(t_0) + \epsilon_{BC}(t_0) &= \epsilon_{BA}(t_0) = -\epsilon_{AB}(t_0) \\ \epsilon_C(t_0, t_0) &= 0 \end{aligned}$$

代入式 (1-4) 并参见式 (1-2) 得

$$\begin{aligned} E_{ABC}(t, t_0) &= \epsilon_{AB}(t) - \epsilon_{AB}(t_0) - \epsilon_A(t, t_0) + \epsilon_B(t, t_0) \\ &= E_{AB}(t, t_0) \end{aligned} \quad (1-5)$$

故中间导体定律得到证明。

根据中间导体定律, 只要接入热电偶回路的显示仪表和连接导线

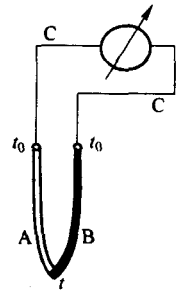


图 1-3 接入中间导体的热电偶回路

两端温度相同，那么它们对热电偶回路的热电势就没有影响。另外，热电偶的焊接点也相当于中间导体，只要整个焊点温度一致，也不影响热电势的大小。这个原理为热电势的测量成为可能提供了依据。

1.2.3 常用热电偶

1.2.3.1 基本结构

图 1-4 是普通热电偶的基本结构，它由热电极、绝缘套管、保护套管和接线盒等部分组成。

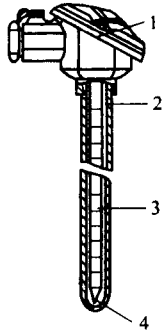


图 1-4 普通热电偶结构图

1—接线盒；2—保护管；  
3—绝缘套管；4—热电极

(1) 热电极。热电极的直径由材料价格、机械强度、电导率以及热电偶的用途和测量范围来决定。贵金属热电偶的热电极大多采用直径为 0.3~0.65mm 的细丝。普通金属热电偶热电极的直径一般为 0.5~3.22mm。热电偶的长度由工作端在介质中的插入深度来决定。

(2) 绝缘套管。它的作用就是防止两个热电极短路。

(3) 保护套管。为使热电极免受化学侵蚀和机械损伤，以得到较长的使用寿命和测温准确性，加保护套管保护。

(4) 接线盒。主要是供连接热电偶和补偿导线使用，它一般由铝合金制成。

1.2.3.2 主要种类

近年来国际电工委员会（IEC）推荐的标准热电偶已有七种，见表 1-1。

表 1-1 标准热电偶的分度号

| 热电偶名称                             | IEC<br>分度号 | 国家分度号 |      | 测 温 范 围                        |
|-----------------------------------|------------|-------|------|--------------------------------|
|                                   |            | 新     | 旧    |                                |
| 铂铑 <sub>10</sub> -铂               | S          | S     | LB-3 | 长期最高使用温度为 1300℃，短期可达 1600℃     |
| 铂铑 <sub>30</sub> -铂铑 <sub>6</sub> | B          | B     | LL-2 | 长期最高使用温度为 1600℃，短期最高使用温度 1800℃ |
| 镍铬-镍硅                             | K          | K     | EU-2 | 长期最高使用温度为 1000℃，短期可达 1300℃     |
| 铜-铜镍（康铜）                          | T          | T     | CK   | 适用 200~400℃ 范围内测温              |
| 镍铬-铜镍（康铜）                         | E          | E     |      | 按其偶丝直径不同，测温范围为 350~900℃        |
| 铁-铜镍（康铜）                          | J          | J     |      | 按其偶丝直径不同，测温范围为 400~750℃        |
| 铂铑 <sub>13</sub> -铂               | R          | R     |      | 同 S                            |

其中最常用的是 S、B、K 三种热电偶。

(1) 铂铑<sub>10</sub>-铂热电偶。该热电偶正极为含铑 10% 的铂铑合金，负极为纯铂，属贵金属热电偶。热电极直径通常为 0.5mm，宜在氧化性和中性气体中使用，在真空中也可短期使用。至于铂铑<sub>13</sub>-铂热电偶，它的性能与铂铑<sub>10</sub>-铂热电偶基本相同，只是它的温度灵敏度稍高些，我国过去基本上不生产这种热电偶，所以目前使用也很少。

(2) 铂铑<sub>30</sub>-铂铑<sub>6</sub>热电偶。该热电偶正极为含铑 30% 的铂铑合金，负极为含铑 6% 的铂铑合金，属贵金属热电偶。它的测温范围最高，宜在氧化性和中性气体中使用，具有铂