绪　论

一、热工自动化在火电厂热力生产过程中的地位和作用

电厂的锅炉汽轮机组有大量热工参数是需要严格控制和调节的。例如锅炉汽包水位，在锅炉运行中必须保持一定的高度，且只允许在很小范围内波动。水位过高，容易导致蒸汽带水，降低过热蒸汽温度，甚至造成满水事故。水位过低，可以造成干锅爆炸事故。因此严格维持水位在一定高度就成为锅炉调节的一项重要任务。与此同时，像锅炉出口蒸汽压力、温度，锅炉燃煤量、送风量、排烟量以及汽轮机凝汽器水位、加热器水位、除氧器水箱水位、汽封压力等，都要严格加以控制和调节。完成这些热工参数调节任务的办法有两种：一为手动调节，一为自动调节。所谓手动调节就是操作人员根据对参数变化原因的分析去调节某一调节阀的开度，例如送风量过小就去开大送风机挡板；锅炉水位过低就去开大给水调节阀门。由于热力系统运行时参数是经常变化的，运行人员要紧张地监视各个参数的变化，随时进行调节，这样不但劳动强度大，而且容易误操作，特别是大型机组，用人工调节那是根本行不通的。例如一台 300MW 的锅炉汽轮机组，它有 400 多个操作按钮，200 多个报警信号，230 多个电动或液动调节阀门， 200 多个指示仪表，只有 2～3 人值班，没有自动调节给以保证，机组是不能安全运行的。因此为了保证生产安全，改善劳动条件，提高产品产量和质量，降低生产成本，提高劳动生产率，自动化便发展成为电厂生产必不可少的手段，即热工自动化在电厂热力过程中有着重要的地位和作用。

二、热工自动化的组成

火电厂热工自动化的内容一般包括以下四个部分。

1. 热工检测

热工检测是了解热力过程中物质状态及其变化的技术手段。在火电厂中为了保证机组安全、经济运行，必须对表征热力过程状态的各种参数进行连续检查、测量和显示，随时向运行值班人员和自动化装置提供主、辅设备及热力系统的运行情况，以便监视生产，并作为控制和调节的依据。因此，热工检测是热力过程自动化的重要基础环节，所用的检测仪表常被喻为工业的耳目。另外，热工检测还为企业经济分析提供准确的数据，以便综合分析运行情况，寻求经济合理的运行方式。当参数越限时发出报警信号，事故时追忆事故发生前的参数和状态，供分析研究用。

2. 热工信号、保护及连锁

(1) 热工信号：热工信号是在某些被监视的运行参数偏离规定范围时，发出的灯光（光字牌显示信号的内容）和音响（电铃报警）信号，它能引起运行值班人员的注意，以便及时采取相应的措施，消除异常，防止发生事故。

(2) 热工保护及连锁：热工保护及连锁的作用是保证设备及人身安全。当生产系统的某部分在运行中出现异常情况或事故时，它将根据故障的性质和程度，按照一定的规律和

需要全本请访问 www.ertongbook.com

要求，自动地对个别或一部分设备，甚至一系列设备进行操作，以消除异常，防止事故的发生或扩大。

3. 自动调节

在火电厂热力过程中，为了保证机组安全、经济运行，必须要求某些参数始终维持在预定的范围内，或者按照预定的规律变化。但出现外界的扰动或内部的影响而使参数偏离规定值时，就需要进行相应的调节，使之保持或恢复到规定的范围，以保证生产过程的稳定。自动调节就是依靠自动化装置来自动实现这种调节作用的，因此，自动化装置应具有检测、定值、运算和执行等功能。

4. 热工操作控制

热工操作控制是指对某一设备进行单个操作，或对某一工艺系统的每台设备按一定的规律进行成组操作或程序控制。

热工操作控制有远方控制和程序控制两种。

远方控制就是手动远距离操作。在一些调节机构和截止机构上装有远方控制器、电动装置（电动门）或电磁铁牵引装置（电磁门），运行值班人员可在控制台上通过这些控制装置进行远方控制。

程序控制是按照一定的顺序、条件和时间要求，对一台设备或一组设备进行操作控制。

三、热工自动化的发展

回顾自动化技术发展的历史，可以看到它与生产过程本身的发展有着密切的联系，是一个从简单形式到复杂形式，从局部自动化到全局自动化，从低级智能到高级智能的发展过程。自动化在工业生产中的作用，大致经历了三个发展阶段。

20世纪 50年代以前可以归结为自动化发展的第一阶段。在这一时期中，理论基础是用传递函数进行数学描述的，以根轨迹法和频率法作为分析和综合系统基本方法的经典控制理论，因而带有明显的依靠手工和经验进行分析和综合的色彩。

20 世纪 60年代的 10 年，可以认为是工业自动化发展的第二个阶段。 20世纪 50年代末，由于生产过程迅速向着大规模、连续化的方向发展，工业过程的非线性、耦合性和时变性等特点十分突出，原有的简单控制系统已经不能满足要求，自动控制面临着工业生产的严重挑战。值得注意的是，现代控制理论在综合和分析时，已经从外部现象深入到揭示系统内在的规律性，从局部控制进入到在一定意义下的全局最优控制，而且在结构上已从单环扩展到适应环、学习环等。可以说，现代控制理论是人们对控制技术在认识上的一次飞跃，为实现高水平的自动化奠定了理论基础。与此同时，电子数字计算机的发展与普及为现代控制理论的应用开辟了道路，为实现工业自动化提供了十分重要的技术手段。在 20世纪 60年代中期，已出现了用计算机代替模拟调节器的直接数字控制（Direct Digital Control，DDC）和由计算机确定模拟调节器或 DDC 回路最优设定值的监督控制（Supervisory Computer Control，SCC），并有一些成功的报导。

20世纪 70年代中期开始，针对工业生产规模大、过程参数和控制回路多的特点，为满足工业用计算机应具有高度可靠性和灵活性的要求，出现了一种分布式控制系统 Distributed Control Systems，DCS)，又称集散系统，它是集计算机技术、控制技术、通信技

术和图形显示等技术于一体的计算机系统，一经问世，就受到工业界的青睐。可以说，从20世纪 70年代开始，工业生产自动化已进入计算机时代。

总之，在这个阶段中，工业自动化正在发生着巨大的变革，它已突破了局部控制的模式，进入到全局控制，既包含了若干子系统的闭环控制，又有大系统协调控制、最优控制以及决策管理，即人们称之为控制管理一体化的新模式。它的出现将使工业自动化系统在大量获取生产过程和市场信息的基础上，科学地安排、调度生产，充分发挥设备的生产能力，最终达到优质、高产、低消耗的控制目标。

四、课程的特点及学习要求

“热工测量及自动装置”课程是热动类安装与检修专业的一门重要的专业课。在充分考虑成人教育的特点时，应遵循函授教育的规律，注重贯穿因材施教、理论联系实际等教学原则，力求在传授知识的同时，使学员的工作能力得到提高。

对学习的要求是，通过自学、面授、实验等教学手段，使学员初步掌握电厂主要热工参数的测量原理，了解常用热工测量仪表的基本工作原理；初步掌握热工过程自动调节的基本概念；了解火电厂常用控制设备的组成与工作原理；了解常见热力设备及生产过程自动控制系统的构成和工作原理；了解主机及辅机的程序控制系统、联动控制系统、保护系统及报警系统的一般知识。

第一篇　热工测量仪表

第1章　热工测量仪表的基本知识

【内容提要和教学要求】

（一）内容提要

热工测量和热工测量仪表的基本概念；热工测量仪表的组成与分类；测量误差的表示方法及热工测量仪表的主要品质指标。

（二）教学要求

通过本章的学习，应对热工测量和热工测量仪表的基本知识有个概括的了解，知道火电厂主要的热工参数有哪些，热工测量的目的是什么，了解热工测量仪表是由哪三个基本部件组成的，各部件的作用及信号之间的传递过程。知道热工测量仪表如何分类，掌握测量对感受件的要求，测量过程中为什么会产生测量误差。掌握绝对误差、相对误差和折合误差的表示和计算方法，充分理解其含义。知道仪表有哪些质量指标，学习时要着重理解仪表的基本误差、准确度等级和变差的概念，学会综合应用，能通过计算仪表的质量指标来判断和选择仪表。

§1.1　热工测量仪表概述

一、热工测量仪表的组成

“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。测量是按照被测对象的特点，采用某种方法，并通过某种测量系统和某些仪器获得被测量数值的全过程。根据测量对象、测量方法的不同，测量的种类有很多，热工测量只是其中的一种。热工测量是指热力生产过程中各种热工参数的测量，如温度、压力、流量、液位等的测量（热力发电厂中，把成分、输煤量、机械位移、转速、振动等测量也列入其中）。用来测量热工参数的工具称为热工测量仪表。

火力发电厂热力设备的安全、经济运行至关重要，必须依靠自动控制装置予以保证，而自动控制装置的控制指令来自热工测量仪表所提供的被测对象的各种信息，只有通过测量，才能获得被控对象或设备的各种参数值，才能知道控制装置的控制效果。各种热工测量仪表尽管工作原理、结构外形等有千差万别，但从其各部分结构的功能和原理上看，均由以下三部分组成，如图 1-1所示。

1. 感受部件（一次仪表）

感受部件直接与被测对象相联系，其作用是感受被测量的量值，并将感受到的被测量

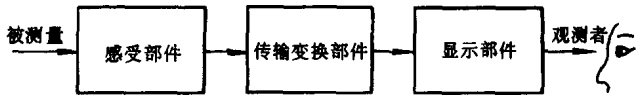


图 1-1　热工测量仪表组成方框图

信号转换成相应的其他信号输送至传输变换部件。对感受部件的要求是：

（1）输出信号与被测参数的变化呈单值函数关系，并有较高的灵敏度。

（2）对于非被测量的变化，感受部件输出应不受影响或受影响极微。

（3）反应快，迟延小。输出信号与输入被测量变化最好呈线性关系。

2. 传输变换部件（中间部件）

传输变换部件的作用是接受感受部件送入的信号，并输送到显示部件。根据信号的强弱，传输变换部件可以直接将信号传输或将信号放大后传输到显示部件。当感受部件的输出信号不便于远距离传送，或者因某些特定要求需变换为统一的某种信号送到显示部件时，传输变换部件可以将感受部件的输出信号变换为相应的其他输出量（电流、电压等），再传输到显示部件，这种传输变换部件常称为变送器。

3. 显示部件（二次仪表）

显示部件接受传输变换部件送入的信号并转变为测量人员可以辨识的信号，它是与人直接联系的部件。根据仪表显示方式不同，仪表一般分为模拟显示仪表、数字显示仪表及图像显示仪表。

二、热工测量 仪表的分类

根据仪表用途、原理及结构等不同，热工测量仪表可分为多种类型：

（1）按被测参数不同，可分为温度、压力、流量、物位、成分分析及机械量（位移、转速、振动等）测量仪表。

（2）按用途不同，可分为标准用、实验室用及工程用仪表。

（3）按显示功能不同，可分为指示式、记录式、积算式、数字式和屏幕式仪表。

（4）按工作原理不同，可分为机械式、电气式、电子式、化学式、气动式及液动式仪表。

（5）按安装地点不同，可分为就地安装式及盘用仪表。

（6）按使用方法不同，可分为固定式和携带式仪表。

§1.2　热工测量仪表的测量误差及品质指标

一、测量 误差的表示方法

在测量过程中，测量方法不完善，测量工具不准确，测量过程中环境条件的波动，测量者知识、经验的限制及操作不当等原因，都会使得测量结果与被测量的真实值之间存在差值，这个差值称为测量误差。仪表的测量误差通常有以下几种表示方法。

1. 绝对误差

仪表的指示值（或称测量值）L 与被测量的实际值（通常由标准表或标准物质提供的约

需要全本请访问 www.ertongbook.com

定真值）A之间的代数差值称为绝对误差 δ，即

$$\delta = L - A \tag{1-1}$$

由上式可知，当绝对误差 δ为正时，表明测量值比实际值大；反之，测量值比实际值小。

2．相对误差

绝对误差与被测量的实际值之比，称为相对误差 γ，常以百分数表示，即

$$\gamma = \frac{\delta}{A} \times 100\% = \frac{L - A}{A} \times 100\% \tag{1-2}$$

对于大小数值不同的测量值，以相对误差更能比较出测量的准确程度，即 γ越小，准确程度越高。

3．折合误差

绝对误差与所用测量仪表的量程之比，称为折合误差 γ_0，以百分数表示，即

$$\gamma_0 = \frac{\delta}{A_{max} - A_{min}} \times 100\% \tag{1-3}$$

式中：A_{max}、A_{min} 分别为测量仪表的上限及下限刻度，$A_{man} - A_{min}$称为测量仪表的量程。

折合误差一般用于比较测量仪表质量的优劣。

二、仪表的质量 指标

1．仪表的基本误差

仪表在规定使用条件下的最大误差，称为仪表的基本误差 R，它一般用折合误差的形式表示，即

$$R = \frac{|\delta_{max}|}{A_{max} - A_{min}} \times 100\% \tag{1-4}$$

式中：$|\delta_{max}|$表示在仪表量程内，各示值绝对误差中的最大值（绝对值）。

2．仪表的准确度等级

仪表在正常工作条件下的基本误差最大允许值，称为仪表的允许误差。允许误差去掉百分号的数值就是仪表的准确度等级。我国规定的准确度等级有 0.005，0.01，0.02，0.04，0.05，0.1，0.2，0.5，1.0，1.5，2.5，4.0等，数值越小，准确度越高。准确度等级通常用阿拉伯数字标志在仪表刻度盘上，等级数字外有一圆圈，如(1.0)表示该仪表为 1.0 级。一块合格的仪表应满足：仪表的基本误差≤允许误差。

【例 1-1】 用一块 0～16MPa 的压力表来测量 10MPa 左右的主蒸汽压力，要求相对误差不超过±0.5%，试选择该压力表的准确度等级。

解　绝对误差＝10×（±0.5%）＝±0.05（MPa）

仪表的折合误差（允许）　$= \frac{\pm 0.05}{16-0} \times 100\% = \pm 0.313\%$

设该仪表的工作条件均满足，则仪表的准确度等级应选为 0.2 级，不能误选为 0.5级。

【例 2-2】 若需测量某 100℃左右的给水温度，要求测量误差不大于 ±5℃。现有两只温度表可供选择，一支量程为 0～1000℃、0.5级；另一支量程为 0～200℃、1.0级，问选用哪一支温度表合适？

解　量程 0～1000℃、0.5级仪表的最大测量误差为

$$|\delta_{max}| = 0.5 \times \frac{A_{max} - A_{min}}{100} = 0.5 \times \frac{1000 - 0}{100} = 5(℃)$$

量程 0～200℃、1.0 级仪表的最大测量误差为

$$|\delta_{max}| = 1 \times \frac{A_{max} - A_{min}}{100} = 1 \times \frac{200 - 0}{100} = 2(℃)$$

因为 0～200℃、1.0级仪表与 0～1000℃、0.5 级仪表比较，前者准确度等级低，量程合适，造价较低，而且测量误差较小，故应选用量程 0～200℃、1.0 级温度表。

选择仪表时应根据测量要求，综合考虑准确度等级及量程。一般选用仪表量程时，对压力表应保证被测参数示值常出现在量程的$\frac{1}{2}$～$\frac{2}{3}$处，对其他测量仪表则出现在量程的$\frac{2}{3}$～$\frac{3}{4}$处，各种仪表被测参数示值都不宜出现在量程的$\frac{1}{3}$以下处。

3. 灵敏度

仪表输出信号的变化 Δa 与产生该变化的被测信号变化 ΔA 之比，称为仪表的灵敏度 S，即

$$S = \frac{\Delta a}{\Delta A} \tag{1-5}$$

如果仪表各刻度点的灵敏度都相同，则仪表输入与输出就呈线性关系；反之则为非线性关系。

4. 不灵敏区

不能引起输出变化的被测信号的最大变化范围，称为仪表的不灵敏区。有时也把能引起仪表响应的输入信号的最小变化称为仪表的灵敏度限或分辨率。一般灵敏度限数值应不大于仪表允许误差的 1/2。

5. 变差

仪表在规定的使用条件下，从上、下行程方向测量同一参数，两次测量值之差，称为变差 Δ，即

$$\Delta = |L_1 - L_2|$$

式中：L_1、L_2 分别是在测量同一参数时，仪表从上升、下降行程所得的测值。

仪表量程内的最大示值变差称为该仪表的变差 γ_Δ，以折合误差的形式表示，即

$$\gamma_\Delta = \frac{\Delta_{max}}{A_{max} - A_{min}} \times 100\% = \frac{|L_1 - L_2|_{max}}{A_{max} - A_{min}} \times 100\% \tag{1-6}$$

一块合格的仪表应满足：仪表的变差≤允许误差。

6. 时滞

仪表对参数进行测量时，其指示值总要经过一段时间之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一段时间称为仪表的时滞或反应时间。如果仪表反应时间过长，则不宜用于测量变化频繁的参数，因为仪表来不及反应被测参数的变化。

学　习　指　导

应掌握本章的重点和难点

重点：热工测量仪表的组成，测量误差的表示方法，测量仪表的主要品质指标。

难点：测量误差和仪表主要品质指标的计算。

复 习 思 考 题

1. 什么是热工测量？热工测量技术在火电厂热力过程中起了什么作用？

2. 热工测量仪表由哪几个功能部件组成？各部件的作用是什么？

3. 测量误差有哪几种表示方法？各代表什么意义？

4. 某工业管道内汽温为 400～500℃，现有 0～500℃、2.0 级和 0～800℃、1.0级的两块温度表，若要求测量绝对误差不超过 ±10℃ （这里只考虑仪表引起的误差），应选用哪一块温度表？为什么？

5. 有一块 0.5 级的温度显示仪表，测量范围为 200～600℃，标尺长度（测量范围内的指针行程距离）为 120mm，其校验记录如下表所示：

被校表示值（℃）		200	250	300	350	400	450	500	550	600
标准表示值（℃）	上行程	200	249	299	348	399	450	501	551	600
	下行程	200	249	300	351	401	451	502	552	600

试求：

（1）各校验点的绝对误差和相对误差。

（2）仪表的基本误差和变差。

（3）仪表的灵敏度和允许的最低分辨力（灵敏限）。

（4）判断仪表是否合格？

（5）若根据校验所得结果计算，你认为该仪表应定为哪一个准确度等级？

第2章　温度测量仪表

【内容提要和教学要求】

（一）内容提要

1. 温度与温标、常用测温仪表的原理及分类。

2. 热电偶测温原理及特性，常用热电偶的种类及结构，热电偶感温元件的安装要求，热电偶冷端温度的修正和处理方法。

3. 热电阻的测温原理及特性，热电阻的种类及结构，热电阻感温元件的安装要求。

4. 动圈式温度指示仪表、电子自动平衡式仪表和小型温度巡测仪的结构及工作原理。

5. 温度变送器的工作原理。

（二）教学要求

学习时先要知道温度和温标的概念，常用测温仪表的大致分类及基本工作原理，然后再根据温度测量系统的构成，从测温元件热电偶开始，理解热电效应原理、热电偶测温的三个基本定律，即均质导体定律、中间温度定律、中间导体定律，并会灵活运用。熟悉常用热电偶、热电阻的种类、结构和安装要求。冷端温度补偿是热电偶测温中十分重要的内容，只有保持冷端温度恒定，才能使热电偶回路中的热电势与热端温度呈单值函数关系，学习时应特别注意，要能够理解热电偶冷端温度补偿原理，会对热电偶的冷端温度进行修正。对于热电阻测温，要理解电阻-温度特性、热电阻不同的接线方式对测量的影响。不同分度号的热电偶和热电阻具有不同的特性，可作不同的用途，其结构主要有普通型和铠装型，学习时可对照实物加深理解。

热电偶和热电阻在现场的安装，应理解其为什么要这样做。温度变送器是温度测量中的中间变换部件，应根据其原理结构方框图来理解温度-电势（电流）的变换过程。动圈式显示仪表、电子自动平衡式显示仪表和小型数字巡测仪表是三种不同的温度测量显示仪表，学习时要分别理解和掌握其特点、基本结构组成和各自实现温度测量的工作原理，能在实际使用中灵活选择仪表。

§2.1　温度测量的基本知识

一、温度和温标

1. 温度

温度是表征物体冷热程度的物理量。温度的宏观概念是建立在热平衡基础上的，从微

观上看，温度的高低反映了物体分子热运动动能的大小。分子热运动越快，物体越热，温度就越高，反之温度越低。

在火电厂热力生产过程中，温度的测量、控制尤为重要。如发电机绕组应维持在适当的温度以下，以防烧毁；汽轮机缸体的温度分布应符合规范，以防产生危险的应力和变形；过热器和水冷壁管温度控制不好，会因过热而爆管；排烟温度比设计值高，锅炉效率会降低；过热蒸汽温度低于设计值时，汽轮机的效率会降低，可见温度是火电厂热力生产过程中一个非常重要的测量参数。

2. 温标

温标是度量温度高低的标尺。在 17、18 世纪，人们只能依据某些测温物质的特性随温度而变化的关系来制定温标，这种温标称为经验温标，如摄氏温标和华氏温标是利用水银在玻璃管内受热后体积膨胀的特性测温的。由于经验温标依附于测温介质的性质，如水银的纯度不同，玻璃管材料的性质不同等，都会影响测温的准确性。于是 1848 年开尔文根据卡诺循环原理提出了热力学温标。该温标与工质本身的种类和性质无关，因而避免了分度的“任意性”。

然而卡诺循环实际上是不存在的，因此热力学温标是一种理想温标。但它可以通过低压下近似于理想气体的氢、氦、氮等测温介质制成的定容气体温度计标定，并经非理想修正之后精密复现。由于气体温度计的结构及使用十分复杂，只有少数国家的实验室才能进行该项标定工作。

为了得到既接近热力学温标，又便于各国复现的统一的实用温标，1927 年国际度量会议通过了第一个国际温标。几经修改，1989 年 27 届国际计量委员会（CIPM）通过了“1990 国际温标（ITS—90）”，从 1990 年 1 月 1 日开始实施，我国规定自 1991 年 7 月 1 日起使用此温标。

“1990 国际温标”规定以热力学温度为基本温度，符号为 T，单位名称是开尔文，单位符号是 K。它规定水的三相点热力学温度为 273.16K，定义 1K 等于水三相点热力学温度的 1/273.16。由于习惯，温度也可以用摄氏温度表示，其符号为 t，单位为℃。它定义为：$t=T-273.15$。

二、常用温度测量仪表的原理及分类

常用测温仪表可分为接触式和非接触式两大类。前者感温元件必须与被测对象直接接触，一般说来测温准确性较高，应用广泛；后者感温元件不直接与被测对象相接触，它通过被测对象与感温元件之间的热辐射作用实现测温，不会破坏被测对象的温度场，通常用于高温测量。根据测温原理不同，两类测温仪表又可分为若干种类，其分类及工作原理、基本特性如表 2-1 所示。

表 2-1　　常用测温仪表的分类及性能

测量方式	仪表名称	测温原理	准确度范围（%）	特点	测量范围（℃）
接触式测温仪表	双金属温度计	固体热膨胀变形量随温度变化	1～2.5	结构简单，指示清楚，读数方便；准确度较低，不能远传	−100～600 一般−80～600

续表

测量方式	仪表名称	测 温 原 理	准确度范围（%）	特　　点	测量范围（℃）
接触式测温仪表	压力表式温度计	气（汽）体、液体在定容条件下，压力大小随温度变化	1～2.5	结构简单可靠，可较远距离传送（小于 60m）； 准确度较低，受环境温度影响较大	0～600 一般 0～300
	玻璃管液体温度计	液体热膨胀体积量随温度变化	0.5～2.5	结构简单，准确度较高，读数不便，不能远传	－200～600 一般－100～600
	电阻温度计	金属或半导体电阻值随温度变化	0.5～3.0	准确度高，便于远传，结构复杂，需外加电源	－258～900 一般－200～650
	热电偶温度计	热电效应	0.5～1.0	测温范围大，准确度高，便于远传，低温测量准确度较低	－269～2800 一般－200～1800
非接触式测温仪表	光学高温计	物体单色辐射强度及亮度随温度变化	1.0～1.5	结构简单，携带方便，不破坏对象温度场； 易产生目测主观误差，外界反射辐射会引起测量误差	200～3200 一般 300～3200
	辐射高温计	物体全辐射力随温度变化	1.5	结构简单，稳定性好； 光路上环境介质吸收辐射，易产生测量误差	100～3200 一般 700～2000

§2.2 热 电 偶

一、热电偶测温原理

热电偶是根据热电效应原理实现温度测量的感温元件。用两种不同的导体或半导体组成闭合回路，如果回路两闭合端接点温度不同，该回路内就会产生热电势，这种现象称为热电效应。

图 2-1所示是由 A、B 两种不同材料组成的热电偶。A 与 B 称为热电偶的热电极，高温端（t 端）通称热端（或测量端、工作端），它置于被测介质中，以感受被测对象的温度；低温端（t_0 端）称为冷端（或参考端、自由端），它应置于被测介质之外。进一步研究指出：热电势是由接触电势和温差电势组成的。

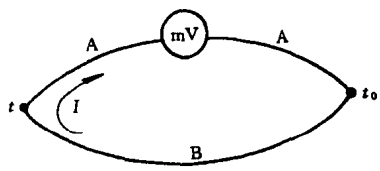


图 2-1　热电效应

1．接触电势

接触电势是在两种不同的导体 A 和 B 接触时产生的。A、B 金属有不同的电子密度，设导体 A 的电子密度 N_A 大于导体 B 的电子密度 N_B，则从 A 扩散到 B 的电子数要比从 B 扩散到 A 的多，A 因失去电子而带正电荷，B 因得到电子带负电荷，于是在 A、B 的接触面上形成了一个从 A 到 B 的静电场。这个电场将阻碍电子扩散的继续进行，同时加速电子向相

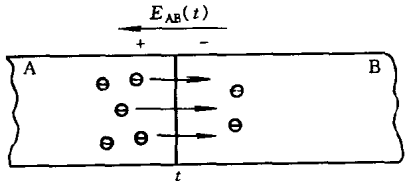


图 2-2　接触电势的产生

需要全本请访问 www.ertongbook.com

反方向转移。当电场力与扩散力相等而达到动态平衡时，在两导体接触界面上就形成一稳定的电位差，该电位差称为接触电势。如图 2-2 所示。

热电极 A、B 接点温度为 t 时的接触电势可表示为 $E_{AB}(t)$，角码顺序表示电势方向是由热电极 B指向热电极 A，如果改变角码顺序，$E_{AB}(t)$ 前面要改变符号。自由电子密度大的导体为正热电极。接触电势与热电极性质及接点温度有关。正负热电极自由电子密度相差越大、接点温度越高，接触电势越大。

2. 温差电势

温差电势是在同一导体中产生的。高温端 t 的电子能量比低温端 t_0 的电子能量大，因而从高温端跑向低温端的电子数比从低温端跑向高温端的要多，结果，高温端因失去电子而带正电荷，低温端因得到电子而带负电荷，从而在高、低温端之间形成一个从高温端指向低温端的静电场。该电场阻止电子从高温端跑向低温端，同时加速电子从低温端跑向高温端，最后达到动态平衡。此时，在导体两端产生一个相应的电位差，该电位差称为温差电势，如图 2-3 所示。

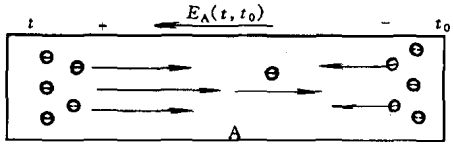


图 2-3　温差电势的产生

导体 A 两端温度为 t、t_0 时的温差电势可表示为 $E_A(t, t_0)$，电势的方向由 t_0 端指向 t 端。温差电势的大小与导体材料的性质及冷热端温度差有关，温差越大，温差电势也越大，当 $t=t_0$ 时，温差电势为零。

3. 热电偶回路的热电势

由 A、B 两种不同材料构成的热电偶，其回路的热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 为两接点 t、t_0 处的接触电势及两导体 A、B 本身温差电势四部分的代数和，如图 2-4 所示，即

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_A(t, t_0) - E_{AB}(t_0) + E_B(t, t_0)$$

当热电偶材料一定时，其热电势 $E_{AB}(t, t_0)$ 只取决于热端温度 t 和冷端温度 t_0 的函数差，即

$$E_{AB}(t, t_0) = f_{AB}(t) - f_{AB}(t_0)$$

若冷端温度 t_0 恒定在某一定值，上式 $f_{AB}(t_0) = C$（常数），即 $E_{AB}(t, t_0) = f_{AB}(t) - C$。此时，热电势就只是热端温度的函数，可以通过测量热电势值而实现温度测量。常用测温热电偶的热电势与热端温度的数值关系是由实验方法得出的，并由国际统一制成表格，称为热电偶分度表。热电偶分度表都是在冷端温度恒定为 0℃条件下得到的，使用时应注意。常用热电偶分度表见附表 1、附表 2、附表 3。

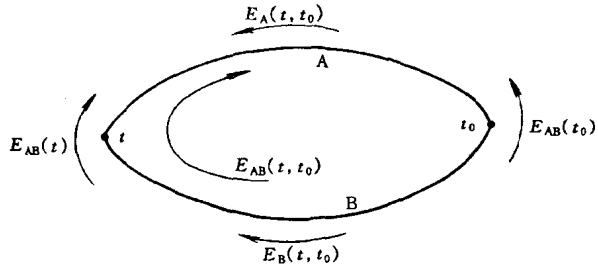


图 2-4　热电偶回路的热电势组成

二、热电偶的基本定律

1. 均质导体定律

由一种均质导体组成闭合回路，不论其长度、截面积及各段温度分布如何，都不会产生热电势。应用该定律可以检查热电极材料的均匀性。

2. 中间导体定律

在热电偶回路内接入第三、第四或更多种均质导体，只要接入导体两端温度相同，则原热电势不变。由中间导体定律可知，只要接入热电偶回路的其他均质导体（例如毫伏表及连接导线）满足定律的条件，就不会改变原来的热电势数值。

3. 中间温度定律

热电偶在热端温度为 t、冷端温度为 t_c 时的热电势等于该热电偶热端温度为 t、冷端温度为 t_n 的热电势与热端温度为 t_n、冷端温度为 t_0 的热电势的代数和。根据该定律，就可以利用分度表求出冷端温度不为 0℃时的热电偶热端温度与热电势值的对应关系，从而扩展了热电偶分度表的应用范围。

三、热电偶的种类

目前国际上被公认的、应用较为普遍的标准化热电偶主要有以下几种：

(1) 铂铑 10-铂热电偶（分度号为 S）：这是一种贵金属热电偶，长期使用的最高温度为 1300℃，短期使用可达 1600℃。它的主要优点是，热电特性稳定、易于复制、测温准确度高，在氧化性和中性介质中具有较高的物理、化学稳定性。可用于精密温度测量和制成标准热电偶。但价格贵，热电势率小，机械强度较差等。

(2) 铂铑 30-铂铑 6（分度号为 B）：也属贵金属热电偶，长期使用最高温度可达 1600℃，短期使用可达 1800℃。它的主要优点和 S 型热电偶的基本相同，而且热电特性更稳定，机械强度也比 S 型热电偶的高，但热电势及热电势率比 S 型热电偶的更小。在冷端温度为 50℃以下使用时，可不必进行冷端温度补偿。

(3) 镍铬-镍硅热电偶（分度号为 K）：这是一种应用很广泛的廉价金属热电偶。测温上限长期使用为 1200℃，短期使用可达 1300℃。该热电偶在高温下抗氧化和抗腐蚀能力都很强，可以在氧化性和中性介质中长期使用。此外，K 型热电偶的热电势率大（比 S 型热电偶大 4～5 倍），热电特性近似为线性，并且易于复制，价格便宜。但它的测温准确度比 S 型热电偶的低。

(4) 镍铬-康铜热电偶（分度号为 E）：也属廉价金属热电偶，测温范围为 －200～900℃，但在 750℃以上只宜短期使用。该热电偶稳定性好，适合在氧化及中性介质中使用，热电势率大（比常用热电偶的热电势率都大），价格便宜，可用于 0℃以下的低温测量。但在高温下易氧化，测温上限不高。

(5) 铜-康铜热电偶（分度号为 T）：也属廉价金属热电偶，测温范围 －200～350℃，短期使用为 400℃ 该热电偶测温准确度高，稳定性好，低温测量灵敏度高。但铜在高温时易氧化，故测温上限不高。

四、热电偶的结构

1. 普通热电偶

普通热电偶通常由热电极、绝缘子、保护套管和接线盒等主要部分组成，如图 2-5 所示。

2. 铠装热电偶

铠装热电偶是由热电极、绝缘材料和金属套管三者组合经拉伸加工而成的坚实组合体，

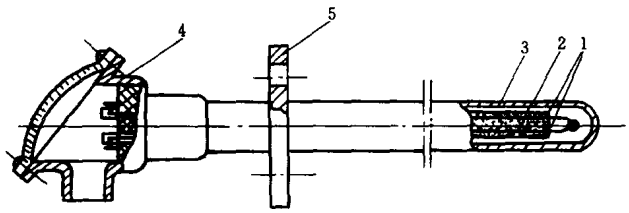


图 2-5 普通型热电偶的结构

1—热电极；2—绝缘子；3—保护套管；4—接线盒；5—安装法兰

其结构如图 2-6 所示。套管材料一般采用不锈钢或镍基高温合金。绝缘材料采用高纯度脱水氧化镁或氧化铝粉末。热电极有单丝、双丝及四丝等。铠装热电偶热端的热容量小，动态响应快，结构坚实，挠性好，耐压高，能弯曲，可安装在结构复杂的装置上。目前在火电厂温度测量中得到广泛的应用。

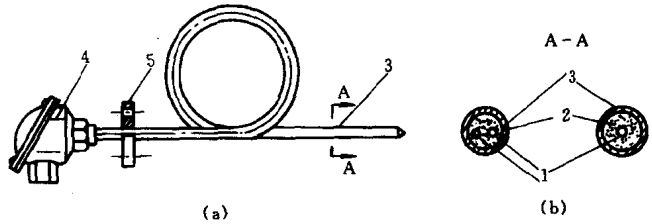


图 2-6 铠装型热电偶的结构

(a) 外形；(b) 横截面

1—热电极；2—绝缘材料；3—金属套管；4—接线盒；5—安装法兰

3. 薄膜热电偶

它是采用真空蒸镀工艺将热电极金属镀在绝缘基板上，形成一层热电极金属膜，厚度仅为 3～6μm。薄膜热电偶热容量极小，测量反应时间非常短（几毫秒），用于测量快速变化的物体表面温度较理想。

五、热电偶的安装要求

热电偶的安装应尽量做到测温准确、安全可靠、维修方便，而且不影响生产过程的进行。

1. 测温准确

(1) 要合理选择测量位置，不能在阀门、管道和设备死角附近装设热电偶。热电偶应具有足够的插入深度。在管道上安装时，其保护套管端部应超过管道中心约 5～10mm，如图 2-7 (a) 所示。如果安装空间有限，可采取倾斜安装方式，倾斜方向应使热端逆向流体方向，如图 2-7 (b) 所示。在压力不高的管道上，也可在管道弯头上安装，如图 2-7 (c) 所示，但在高温、高压管道上，由于弯头处的机械强度最弱，不宜采用这种安装方式。

(2) 热电偶的安装地点应尽量避开其他热物体和强磁场、强电场等，必要时应采取屏蔽措施。

(3) 在负压管道或设备上安装时，要保证安装接口处的密封性，以免外界空气进入管道或设备。

(4) 热电偶安装后，要进行充分保温，以防因散热影响测温的准确性。

(5) 热电偶的接线盒不能与被测介质的管、器壁相接触，以防接线盒内的温度超出 0～

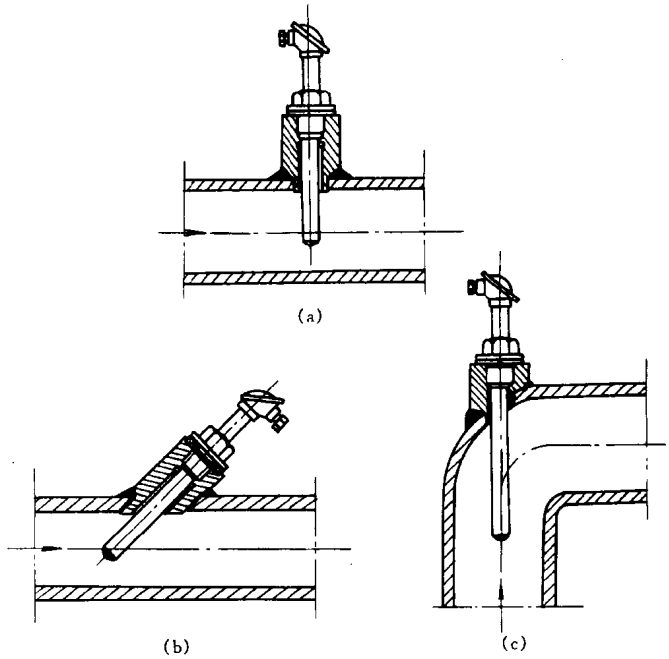


图 2-7 热电偶的安装方式

(a) 垂直安装；(b) 倾斜安装； (c) 在管道弯头处安装

100℃范围。接线盒的出线孔应朝下或水平安装，以防水气、灰尘等沉积造成接线端子短路。

2. 安全可靠

(1) 在压力管道或容器上安装热电偶，或者被测对象为有害介质时，必须保证热电偶保护套管与管道或容器接口处的密封性。

(2) 在高温下工作的热电偶，应尽量垂直安装，以防止保护套管在高温下变形。若只能水平安装，则应采用耐火黏土或耐热金属制成的支架支撑，如图 2-8 所示。

(3) 在大流速的流体管道中，热电偶必须倾斜安装，以免受到过大的冲击。

(4) 在含有粉尘的介质（如煤粉管道）中安装热电偶，应加装保护屏，以防止磨损保护套管。

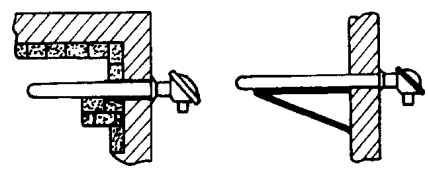


图 2-8 防止热电偶保护套管弯曲变形的安装方式

3. 维修方便

热电偶安装的方法及部位应该便于装卸，热电偶周围应无障碍体和便于操作。对于较长的热电偶还应注意在它外面要留有足够的空间，以便热电偶的插入和取出。若必须在隐蔽处装设热电偶，应把热电偶的接线盒引至便于检修的地方。

在大流速高压管道水平管段上装设热电偶时，应在管道两侧水平方向或稍向下倾斜安装，以便于当热电偶损坏后，在不影响设备运行的情况下，取出保护套管内残存的杂物。

六、热电偶冷端温度的修正和处理方法

由热电偶的测温原理可知，当热电极材料一定时，只有热电偶的冷端温度 t_0 保持不变，

热电偶回路的热电势才与被测温度 t 呈单值函数关系。但在实际应用中，热电偶的冷端离热端很近，容易受高温设备和环境温度波动的影响，因而冷端温度难以保持恒定，为此，采用下述几种冷端温度的修正和处理方法。

1. 计算法

计算法是在热电偶测温的同时，用其他温度计（如水银玻璃管温度计等）测出热电偶冷端所处的温度，然后根据中间温度定律及分度表，计算出温度修正值，修正测量结果。

【例 2-1】 用 K 型热电偶测温，在冷端温度为 25℃时测得热电势为 17.537mV，求热电偶所测的实际温度。

解 查热电偶分度表得 $E_K(25, 0) = 1mV$，则

$$E_K(t, 0) = E_K(t, 25) + E_k(25, 0) = 17.537 + 1 = 18.537 \ (mV)$$

用 18.537mV 查 K 分度表得 $t = 450.5℃$（t 即为所求的实际温度）。

由此例可知，如果冷端温度不修正，而是直接用 $E_K(t, 25) = 17.537$ 查表得 $t = 427℃$，则绝对误差为 −23.5℃。如果将 427℃ 直接加上冷端温度作为测值，即 427＋25＝452℃，则绝对误差为 1.5℃。

计算法结果准确，但手续繁复，适用于实验室或个别间断测量对示值的修正，在生产现场使用不方便。

2. 显示仪表机械零点调整法

工业生产中，对于热电偶冷端非 0℃时的一种处理方法是：将动圈表的机械零点通过机械调零装置预先调整到热电偶冷端温度 t_0 的刻度位置。这样，如果热电偶热端温度和冷端温度 t_0 相同时，热电势为零，无信号输入，仪表就指在 t_0 温度处。当热电偶热端温度上升时，仪表指针也从 t_0 的基础上上升。所以机械零点调整效果相当于在显示仪表上预加了一个 $E_{AB}(t_0, 0)$ 的初始电势。

机械零点调整方法简便，但仅适用于热电偶冷端温度较稳定的场合。如果冷端温度经常变化，此法不宜采用，另外，调整动圈表机械零点时，应在断开热电偶输入电路的情况下进行。

3. 冷端恒温法

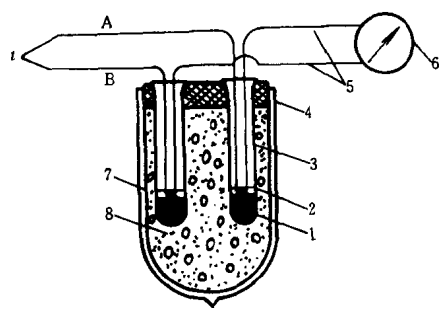


图 2-9 冰点槽冷端恒温法

1—水银；2—变压器油；3—试管；4—盖；5—铜导线；6—显示仪表；7—保温瓶；8—冰水混合物

此法是将热电偶冷端置于恒温器中，使 t_0 恒定。常用的有冰点槽（0℃）和工业恒温箱（50℃），如图 2-9 和图 2-10 所示。冰点槽内盛冰水混和物，热电偶冷端放在其中，保持 0℃，该法一般用在实验室中。50℃恒温器的原理是：当温度达到 50℃时，水银接点接通，继电器 K 动作，常闭接点 K1 断开，加热电炉停止加热；当温度下降到 50℃以下时，水银接点断开，加热电炉通电加热，如此双位控制，使箱内温度保持 50℃。测温热电偶冷端若采用 50℃恒温器恒温，相应的动圈显示仪表机械零点应调整在 50℃位置。

4. 补偿导线法

补偿导线是一对在某一温度范围内（一般为 0～100℃）的热电特性与所连接的热电偶相同或十分相近的廉价金属导线。通过补偿导线可以把热电偶冷端延伸到温度比较稳定的地方，其效果与热电偶本身延长相同，如图 2-11 所示，其中，A′、B′为 A、B 热电偶的补偿导线。各种补偿导线及特性见附表 7。

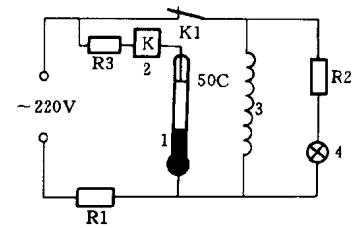


图 2-10　50℃ 恒温线路

1—水银接点温度计；2—继电器；3—加热炉丝；4—指示灯

使用补偿导线应注意：一种补偿导线只能与一种热电偶相配，并且补偿导线正、负极应与热电偶相应的正、负极相接；补偿导线只能在规定的使用范围内（一般为 0～100℃ 使用；补偿导线与热电偶的两个接点温度应相同，否则会产生测量误差。另外，补偿导线本身并不能补偿热电偶冷端温度的变化，只是改变热电偶的冷端位置，减小热电偶冷端温度变化带来的影响，以便于采用其他补偿方法。

5. 冷端补偿器

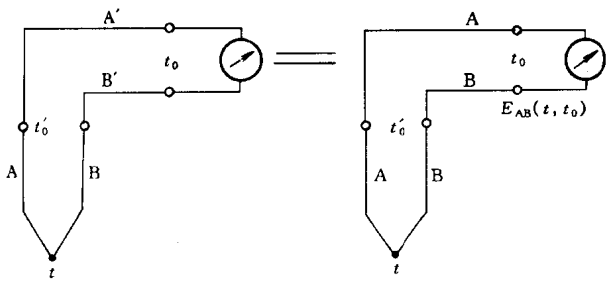


图 2-11　补偿导线的作用

冷端补偿器是利用不平衡电桥产生的电压来补偿热电偶因冷端温度变化而引起的热电势变化。

图 2-12 中虚线圆内的电桥就是冷端补偿器电路。桥臂电阻 R_1、R_2、R_3 和 R_{Cu}与热电偶冷端处于相同的环境温度下。其中 $R_1=R_2=R_3=1\Omega$，均用锰铜线绕制，R_{Cu}系铜线绕制。E（=4V）是电桥直流电源，R_s 是限流电阻，其阻值因热电偶不同而不同。选择 R_{Cu}的阻值使桥路在 20℃ 时处于平衡状态，即 $R_{Cu}^{20}=1\Omega$，此时桥路输出 $U_{ab}=0$，热电偶回路的热电势为 $E_{AB}(t,20)$，冷端补偿器只是以电桥等效电阻的形式存在于线路中。当冷端温度升高（或降低）时，R_{Cu}随着增大（或减小），U_{ab}也随着增大（或减小），而热电偶的热电势 E_x 却随着减小（或增大）。如果 U_{ab}的增大量（或减小量）等于 E_x 的减小量(或增大量)，那么 U_{AB}（$U_{AB}=E_x+U_{ab}$）的大小就不随冷端温度变化了。冷端补偿器技术特性见附表 8。

冷端补偿器一般用在热电偶与动圈表配套的测温系统中。使用时，冷端补偿器与所配热电偶分度号应一致，冷端温度不应超过规定的补偿温度范围，补偿电桥平衡温度应与温度显示仪表的机械零点相一致。某些温度显示仪表，如电子电位差计等，仪表本身已包含有冷端补偿电路，不需另装冷端补偿器。

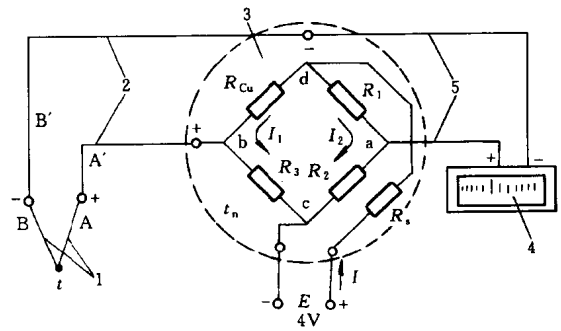


图 2-12　冷端补偿器的原理

1—热电偶；2—补偿导线；3—冷端补偿器；4—显示仪表；5—铜导线

需要全本请访问 www.ertongbook.com