

工业自动化仪表 与过程控制

西安交通大学
施 仁 刘文江 编

国防工业出版社



内 容 简 介

本书讨论生产过程自动化中使用的各种检测、控制仪表的工作原理和过程控制系统的设计整定方法。

全书分上下两篇。上篇为工业自动化仪表,介绍主要的工业参数检测仪表(包括温度、压力、流量、液位及成分分析仪表),调节仪表、记录仪表及执行器的工作原理和使用特点。内容侧重DDZ-Ⅱ型电动单元组合仪表。下篇为过程控制,介绍调节对象动态特性的测试方法(包括时域法、频域法及统计法,其中重点介绍二电平伪随机方波测试法)、单回路调节系统的工程设计整定方法以及串级、前馈等复杂调节系统的工作原理。

本书是工科高等学校自动控制专业的教材。也可供有关专业师生及从事仪表、自动化方面工作的工程技术人员参考。

前 言

本书是高等院校工科电子类自动控制专业统编(试用)教材之一,是根据1978年4月在上海召开的四机部工科电子类自动控制专业组会议所拟订的大纲编写的。

全书分上下两篇。上篇为工业自动化仪表部分,介绍各种工业检测仪表、调节器、执行器和记录仪表。下篇为过程控制部分,介绍对象动特性的测试,单回路调节系统及各种复杂调节系统的设计整定方法。

本书所需教学时数为50学时左右,上下两篇各约25学时。

本课程是自动控制专业学生在学完电子技术基础及自动控制原理课后开设的。要求学生通过学习,掌握工业常规自动化仪表的基本工作原理,以及使用这些仪表设计组成工业自动控制系统的方法。

因为自动化仪表种类繁多,作为教材只能择要予以介绍。在取材上,主要以电动单元组合仪表DDZ-Ⅲ系列为例,重点讨论几个基本单元。在内容上,侧重于讨论基本工作原理和使用特点。关于具体结构和调校则作为实验课的一部分内容。

过程控制部分,以讨论系统对象动特性的测试和数据处理方法、工业自动调节系统设计与整定的一般原理为重点,而不具体针对某工业部门特定的工艺过程。

本书上篇工业自动化仪表部分由施仁执笔,下篇过程控制部分由刘文江执笔。

本书是在我校各级领导同志关怀和支持下编写的。在编写过程中,自动控制教研室的有关同志曾给予不少帮助。本书由华南工学院自动控制教研室罗永炎、高国燊同志主审、又承化自教研室黄孝诚等以及重庆大学杨煜虎同志认真审阅本书初稿,提出了许多宝贵修改意见。对此,编者表示衷心的感谢。

本书编写过程中曾广泛参考国内各兄弟单位编著的各种有关书刊、讲义、资料等,因具体名称较多,恕不在此一一列举。

由于编者水平有限,加之时间仓促。因此,书中错误和缺点在所难免,希望使用本书的教师、同学和其他读者批评指正。

编 者

1980年8月

上篇 工业自动化仪表

工业自动化仪表概述

一、工业自动化仪表及其发展概况	1
二、电动单元组合仪表及其控制系统的组成	2
三、仪表的基本技术指标	4

第一章 检测仪表

1-1 节 温度检测仪表	6
1-1.1 测量温度的主要方法	6
1-1.2 热电偶	7
1-1.3 热电阻	9
1-1.4 半导体热敏电阻	11
1-1.5 热电偶温度变送器的基本结构	11
1-1.6 DDZ-III 型电热偶温度变送器的实际路	15
1-2 节 压力检测仪表	20
1-2.1 弹性式压力测量元件	20
1-2.2 力平衡式压力(差压)变送器	22
1-2.3 位移式差压(压力)变送器	27
1-2.4 固态测压仪表	30
1-3 节 流量检测仪表	31
1-3.1 节流式流量计	32
1-3.2 容积式流量计	35
1-3.3 涡轮流量计	36
1-3.4 电磁流量计	36
1-4 节 液位检测仪表	37
1-4.1 浮力式和静压式液位计	38
1-4.2 电容式液位计	39
1-4.3 超声波液位计	40
1-5 节 成分分析仪表	41
1-5.1 热导式气体分析仪	41
1-5.2 红外线气体分析仪	43
1-5.3 色谱分析仪	45

第二章 调节器

2-1 节 最简单的两位式调节器节	50
2-2 节 连续调节器的调节规律	52
2-3 节 PID 运算电路	53
2-3.1 比例积分运算电路	53
2-3.2 比例微分运算电路	56
2-3.3 PID 运算电路	58
2-3.4 只用一个放大器的 PID 运算电路	60
2-4 节 PID 调节器的阶跃响应	63
2-5 节 PID 调节器的频率特性	64
2-6 节 PID 调节器的线路实例	66
2-6.1 输入电路	68
2-6.2 PID 运算电路	70
2-6.3 输出电路	71
2-6.4 DTL-3110型调节器的传递函数	72
2-6.5 手动操作电路及自动—手动切换	73
2-6.6 测量和给定指示电路	77

第三章 执行器

3-1 节 气动执行器	79
3-2 节 电—气转换器	83
3-3 节 阀门定位器	84
3-4 节 电动执行器	87

第四章 记录仪表

4-1 节 自动平衡式记录仪表的工作原理	89
4-2 节 电子电位差计	90
4-2.1 测量桥路	90
4-2.2 测量桥路的供电	91
4-2.3 对电子放大器的主要要求	92
4-2.4 电子放大器的电路举例	94
4-2.5 可逆电动机	97
4-2.6 电子电位差计的抗干扰	97
4-3 节 自动平衡电桥	100

下篇 过程控制

第五章 调节对象的特性及实验测定

5-1 节 单容对象动特性及其数学描述	103
5-1.1 水槽水位的动特性	104
5-1.2 加热器对象的动特性	106
5-1.3 气罐的动特性	106
5-1.4 对象的自衡特性	108
5-2 节 多容对象的特性、容量滞后、纯滞后	109
5-2.1 双容对象的特性	109
5-2.2 纯滞后	110
5-3 节 对象特性的实验测定、时域法	111
5-3.1 实验测定方法概述	111
5-3.2 测定动态特性的时域方法	112
5-4 节 测定动态特性的频域方法	117
5-4.1 正弦波方法	117
5-4.2 矩形波方法	118
5-4.3 闭路测定法	120
5-5 节 测定动态特性的统计方法	121
5-5.1 平稳随机过程、相关函数、功率密度谱	121
5-5.2 相关分析法识别对象动态特性的原理	124
5-5.3 伪随机信号	127
5-5.4 伪随机序列的产生方法及其性质	128
5-5.5 用 M 序列信号测定对象的动态特性	130

第六章 单回路调节系统的设计及调节器参数整定方法

6-1 节 概述	139
6-2 节 对象动特性对调节质量的影响及调节方案的确定	141
6-2.1 干扰通过动特性对调节质量的影响	141
6-2.2 调节通道动特性对调节质量的影响	143
6-2.3 调节方案的确定	144
6-3 节 调节规律对系统动特性的影响、调节规律的选择	147
6-3.1 在干扰作用下双容对象的比例调节	147
6-3.2 系统调节性能指标、PI、PD 调节作分析	151
6-3.3 调节规律的选择	156
6-4 节 调节器参数的实验整定方法	157
6-4.1 反应曲线法	157

6-4.2 稳定边界法.....	159
6-4.3 衰减曲线法.....	160
6-4.4 三种整定方法的比较.....	161
6-5 节 调节器参数整定的频域法.....	161
6-5.1 M 圆法调节器参数的原理.....	162
6-5.2 按调节对象的幅相特性确定调节器的最佳整定参数.....	167

第七章 复杂调节系统

7-1 节 串级调节系统.....	170
7-1.1 串级调节系统的组成.....	170
7-1.2 串级调节系统的特点和效果分析.....	172
7-1.3 调节器的选型和整定方法.....	175
7-2 节 比值调节系统.....	176
7-2.1 比值调节系统的组成原理.....	176
7-2.2 比值调节系统的整定.....	178
7-3 节 均匀调节系统.....	180
7-3.1 均匀调节系统的组成.....	180
7-3.2 调节器的选型和整定.....	181
7-4 节 前馈调节系统.....	184
7-4.1 前馈控制的工作原理.....	184
7-4.2 扰动补偿规律及其局限性.....	185
7-4.3 复合调节系统的特性分析.....	186
7-4.4 复合调节系统参数的选择.....	189
7-4.5 自治调节系统.....	190

上篇 工业自动化仪表

工业自动化仪表概述

一、工业自动化仪表及其发展概况

看到仪表两个字，人们很容易想到电流表、电压表、示波器等实验室中常用的测试仪器，但是本课程要讨论的却不是这些通用仪表，而是讨论工业自动化中，特别是连续生产过程自动化中必需的一类专门的仪器仪表，称为工业自动化仪表。其中包括对工艺参数进行测量的工业检测仪表、根据测量值对给定值的偏差按一定的调节规律发出调节命令的调节仪表、以及根据调节仪表的命令对进出生产装置的物料或能量进行控制的执行器等。这些仪表的作用是代替人们对生产过程进行测量、控制、监督和保护，因而是任何工业自动化系统的必要组成部分。

如上所述，工业自动化仪表是实现生产过程自动化必不可少的技术工具，各种控制原则和设计思想都要通过它们才能得到实现，因此每个从事自动控制工作的技术人员，都应该在精通控制理论的同时，充分认识自动化技术工具的重要作用，努力掌握自动化仪表的工作原理和性能特点，以便合理地选择和正确地使用它们，组成经济、可靠、品质优良的自动控制系统。

工业自动化仪表作为一类专门的仪表，最早出现于本世纪四十年代初，当时由于石油、化工、电力等工业对自动化的需要，出现了将测量、记录、调节仪表组装在一个表壳里的所谓“基地式”自动化仪表，基地式的名称是指它和后来出现的“单元组合式”仪表相比，比较适于在现场作就地检测和调节之用。仪表的这种结构形式是和当时自动化程度不高，控制分散的状况基本适应的，因而在一段时期内曾获得了普遍的应用。但是随着大型工业企业的出现，生产向综合自动化和集中控制的方向发展，人们发现基地式仪表的结构不够灵活，不如将仪表按功能划分，制成若干种能独立完成一定职能的标准单元，各单元之间以规定的标准信号相互联系，这样仪表的精度容易提高，在使用中可根据需要，选择一定的单元，象搭积木那样把仪表组合起来，构成各种复杂程度不同的自动控制系统，这种积木式的仪表就称为“单元组合式”仪表。显然，将全功能的复杂仪表分解为若干基本单元的做法，无论对仪表制造厂的大量生产，还是对用户的选用维修都是有利的。此外仪表划分为单元后，控制屏上

可只安装最必要的单元，便于实现集中控制，所以目前自动化程度较高的大、中型企业中，几乎都使用单元组合式仪表。只在小型企业或分散设备单机控制中，基地式仪表由于结构紧凑，价格便宜，仍有一定的使用。

工业自动化仪表除了有上述两种不同的结构形式外，根据能源的种类，还可分为电动、气动等不同的类型。其中气动仪表由于发展比电动仪表早，而且价格便宜，结构简单，特别是对石油化工等易燃易爆的生产现场，具有本质性的安全防爆性能，因而在相当长的一段时间里，一直处于优势地位。但从六十年代起，由于电动仪表的晶体管化和集成电路化，控制功能日益完备，在使用低电压小电流工作时，可在电磁上及结构上采取严密措施，限制进入易燃易爆场所的能量，从而保证不会在生产现场发生足以引起燃烧或爆炸的“危险大花”，这样，限制电动仪表使用的主要障碍被扫除，电信号比气压信号在传送和处理上的优越性就能得到充分的发挥。大家知道，气压信号传递速度慢，传输距离短，管线安装不便，相比之下，电信号传输、放大，变换、测量都比气压信号方便得多，特别是电动仪表容易和电子巡回检测装置和工业控制计算机配合使用，实现生产过程的全盘自动化，因此，近年来电动仪表已取得了显著的优势，根据这样的情况，本教材主要讨论电动单元组合式仪表。

二、电动单元组合仪表及其控制系统的组成

我国生产的电动单元组合仪表，到目前为止已有了三代产品，它们分别为：六十年代初生产的以电子管和磁放大器为主要放大元件的 DDZ-I 型仪表；七十年代初开始生产的以晶体管作为主要放大元件的 DDZ-II 型仪表；以及目前正在小批试生产的、以线性集成电路为主要放大元件、具有安全火花防爆性能的 DDZ-III 型仪表。这里的“DDZ”是汉语拼音文字中电(Dian)、单(Dan)、组(Zu)三字的等一个字母的组合。这三代产品虽然电路型式和信号标准不同，性能指标和单元划分的方法也不完全一样，但它们实现的控制功能和基本的设计思想是相同的，只要掌握其中一种，其他产品便不难自己分析。因此在后面的章节中，我们将主要对较先进和较有代表性的 DDZ-III 型电动单元组合式仪表进行讨论。

图 0-1 是使用电动单元组合式仪表构成简单调节系统的例子，从中可以看到单元划分的原则和各单元的功能。图中，被测量一般是非电的工艺参数，如温度、压力等，必须经

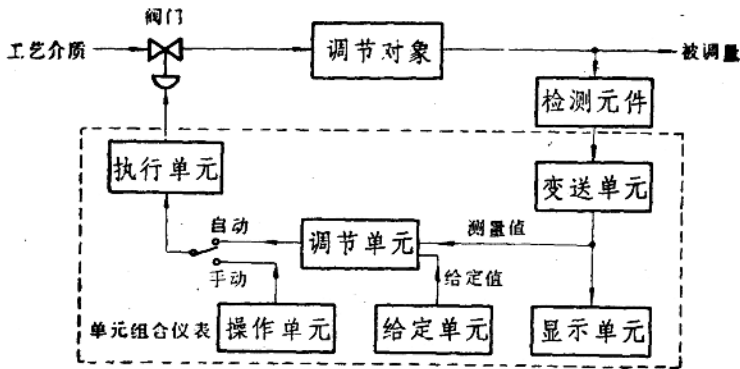


图 0-1 用电动单元组合仪表的构成的调节系统

过一定的检测元件, 将其变换为易于传送和显示的物理量, 检测元件还常称为敏感元件、传感器、换能器、一次仪表等。被称为换能器的理由是工艺参数在检测元件上进行了能量形式的转换, 例如在使用热电偶测温时, 热电偶将温度(热能)转换成了电压(电能); 被称为一次仪表的理由是这些检测元件安装在生产第一线, 直接与工艺介质相接触, 取得第一次的测量信号。

由于检测元件输出的能量很小, 一般不能直接带动显示和调节仪表, 必须经过放大或者再次的能量转换, 才能将检测元件输出的微弱信号变换为能远距离传送的统一标准信号, 图 0-1 中, 起上述作用的环节就是变送单元, 或称变送器, 它有若干不同的类型, 与相应的检测元件相配合。

由变送单元输出的统一标准信号, 一方面送到显示单元供记录或指示, 同时送到调节单元与给定值进行比较, 给定值可以由专门的给定单元取得, 也可由调节单元内部取得, 目前多数调节单元内部都有设定被调量给定值的装置。调节单元又称调节器, 它按比较得出的偏差, 以一定的调节规律, 如比例、微分、积分等运算关系发出调节信号, 通过执行单元改变阀门的开度, 控制进入调节对象的工艺介质的流量, 达到自动调节的目的。

实际上, 除了图 0-1 中表示出来的几种基本单元外, 在电动单元组合式仪表中, 还有实现物理量转换的转换单元、进行加、减、乘、除、平方、开方等运算的计算单元, 以及为保证安全防爆所需要的安全单元等。其中, 转换单元也是常用的单元, 由于目前电动执行器无论在结构、性能、价格及安全方面都不如气动执行器, 所以大部分使用电动单元组合仪表构成的调节系统中, 其执行器却仍然使用气动的, 这样, 就必须使用电—气转换器, 将电动调节仪表输出的电信号转换为气压信号, 以推动气动调节阀实现自动调节。安全单元是安全火花型防爆仪表所特有的一种单元, 它的作用是在易燃易爆的生产现场周围筑起一道安全栅栏, 从电路上对危险场所的线路采取隔离措施, 防止高能量电路与现场线路之间的直接接触, 同时通过电压、电流的双重限制电路, 严格保证进入危险场所的能量在安全范围以内, 因而是实现安全火花防爆的关键环节。

如前所述, 使用单元组合仪表必须有统一的联络信号。目前我国电动单元组合仪表中并存着两种标准信号制度, 在 DDZ-I 和 DDZ-II 型仪表中采用 0-10 毫安直流电流作为标准信号, 而在 DDZ-III 型仪表中, 利用目前国际上统一①的 4-20 毫安直流电流作为标准信号。这两种标准中, 都以直流作为联络信号这一点是相同的, 采用直流信号的优点是传输过程中易于和交流感应干扰相区别, 且不存在相移问题, 可不受传输线中电感、电容和负载性质的限制。采用电流制的优点首先在于可不受传输线及负载电阻变化的影响, 适于信号的远距离传送, 其次由于电动单元组合仪表很多是采用力平衡原理构成的, 使用电流信号可直接与磁场作用产生正比于信号的机械力。此外, 对于要求电压输入的受信仪表和元件, 电流信号也能适用, 只要在电流回路中串入一个电阻便可得到电压信号, 故使用比较灵活。

在这两种信号制度里, 零信号和满幅度信号电流大小的选择是这样考虑的。在 DDZ-III 型仪表中, 以 20 mA 表示信号的满度值, 而以此满度值的 20% 即 4 mA 表示零信号。这种称为“活零点”的安排, 有利于识别仪表断电、断线等故障, 且为现场变送器实现两线制提供

① 1973 年 4 月国际电工委员会(I.E.C.)通过的标准规定, 过程控制系统的模拟信号为直流电流 4-20 mA, 电压信号为直流 1-5 V, 我国的 DDZ-III 型仪表规定, 现场传输信号用 4-20 mA D.C., 控制室内各仪表间的联络信号用 1-5 V D.C.

了可能性。所谓两线制变送器就是将供电的电源线与信号的输出线合并起来，一共只用两根导线。由于信号为零时，变送器内部总要消耗一定的电流，所以用零电流表示零信号时是无法实现两线制的。在工业上使用两线制变送器不仅节省电缆，布线方便，且大大有利于安全防爆，因为减少一根通往危险现场的导线，就减少了一个窜进危险火花的门户。由于活零点的表示法具有上述优点，故受到普遍的欢迎和广泛的采用。至于早期生产的DDZ-I和DDZ-II型仪表中使用0-10mA的信号标准，是与当时的电路技术水平有关的，以零电流作为信号起点的表示法，在信号的变换和运算时比较简单，因而在电子管和晶体管分立元件的时期，为了简化线路而使用它是可以理解的。

在上述信号标准里，信号电流的满度值从安全防爆，以及减少损耗、节省能量考虑，都希望选小一些好。但太小也有限制，因为对力平衡式仪表，电流小了产生的电磁力也小，不易保证这些仪表的精度。此外，在采用活零点的仪表中，降低满度电流的数值，必须同时降低起点电流的数值，但起点电流太小将给两线制仪表带来困难，因为它将要求降低整个仪表在零信号时消耗的总电流，而在目前的元器件水平下，起点电流比4mA再小有时将发生困难，因此，目前国际上采用4-20mA作为标准信号。

三、仪表的基本技术指标

工业自动化仪表和其他仪表一样，在保证可靠工作的前提下，有如下一些衡量其性能优劣的基本指标：

1. 精确度

任何仪表都有一定的误差，因此使用仪表时必须先知道该仪表的精确程度，以便估计测量结果与真实值的差距，即估计测量值的误差大小。

模拟式仪表的精确度一般不宜用绝对误差（测量值与真实值的差）和相对误差（绝对误差与该点的真实值之比）来表示，因为前者不能体现对不同量程仪表的合理要求，后者很容易引起任何仪表都不可能相信的误解。例如对一只满量程为100mA的电流表，在测量零电流时，由于机械摩擦使表针的示数略偏离零位而得到0.2mA的读数，若按上述相对误差的算法，那么该点的相对误差即为无穷大，似乎这个仪表是完全不能使用的，但在工程人员看来，这样的测量误差是很容易理解的，根本不值得大惊小怪，它可能还是一只比较精密的仪表呢！

模拟式仪表合理的精确度，应该以测量范围中最大的绝对误差和该仪表的测量范围之比来衡量，这种比值称为相对（于满量程的）百分误差。例如某温度计的刻度由-50℃到+150℃，即其测量范围为200℃，若在这个测量范围内，最大测量误差不超过3℃，则其相对百分误差 δ 为：

$$\delta = \frac{3}{150+50} = 1.5\%$$

仪表工业规定，去掉上式中相对百分误差的“%”，称为仪表的精确度。它划分成若干等级，如0.1级，0.2级，0.5级，1.0级，1.5级，2.5级等。上述温度计的精确度即为1.5级。

仪表的误差还根据使用条件分的基本误差和附加误差两种。基本误差是指仪表在正常工

作条件下的最大相对百分误差。若仪表不在规定的正常条件下工作，例如因周围温度，电源电压等偏高或偏低而引起的额外误差，称为附加误差。一般仪表的精度等级都是根据其基本误差确定的。

2. 灵敏度和灵敏限

灵敏度表示测量仪表对被测参数变化的敏感程度，常以仪表输出例如指示装置的直线位移或角位移与引起此位移的被测参数变化量之比表示，即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta \alpha}{\Delta x}$$

式中 $\Delta \alpha$ —— 仪表指示装置的直线位移或角位移；

Δx —— 被测参数的变化值。

仪表的灵敏度可用增加放大系统的放大倍数来提高。但是，需要指出，单纯提高仪表的灵敏度并不一定能提高仪表的精度，例如把一个电流表的指针接得很长，虽然可把直线位移的灵敏度提高，但其读数的精确度并不一定提高，相反，可能由于平衡状况变坏而精度反而下降。为了防止这种虚假灵敏度，常规定仪表读数标尺的分格值，不能小于仪表允许误差的绝对值。

仪表的灵敏限，是指仪表能感受并发生动作的输入量的最小值。

3. 变差

在外界条件不变的情况下，使用同一仪表对被测参量进行反复测量（正行程和反行程）时，所产生的最大差值与测量范围之比称为变差。造成变差的原因很多，例如传动机构间存在的间隙和摩擦力，弹性元件的弹性滞后等。在设计和制造仪表时，必须尽量减小变差的数值。一个仪表的变差越小，其输出的可重复性和稳定性越好。

第一章 检测仪表

各种不同的工业部门在实现生产过程自动化时需要检测的工艺参数种类很多,例如在热工过程中,最常遇到的是温度、压力、流量、物位四种参数的检测问题,在化工过程中,除上述四大参数外,还常需进行成分分析和某些物理化学性质如密度、粘度、酸度等的测量,在冶金、钢铁、机械工业中则又需对某些机械参数如重量、力、加速度、位移、厚度等进行检测,在电厂中则还有频率、相位、功率因数等电工量需要测定等等。显然,要把所有的工业参数检测方法都拿来讨论是不可能的,下面将只对几种比较有普遍性的工艺参数进行示例性的讨论,通过一些典型例子,说明目前工业上采用的主要检测手段和达到的技术水平,介绍组成工业检测仪表的基本原则和保证安全可靠工作的一般方法,希望读者在学习了这些有限的例子后,能举一反三,为今后掌握其他检测仪表打下基础。

1—1节 温度检测仪表

温度是工业生产中最常见和最基本的工艺参数之一,任何化学反应或物理变化的进程都与温度密切相关,因此温度的测量与控制是生产过程自动化的重要任务之一。

1-1.1 测量温度的主要方法

测量温度的方法虽然很多,但从感受温度的途径来分,不外下面两大类:一类是接触式的,即通过测温元件与被测物体的接触而感知物体的温度,另一类是非接触式的,即通过接收被测物体发出的辐射热来判断温度。目前常见的接触式测温仪表有如下几种:

1.膨胀式温度计 利用固体或液体热胀冷缩的特性测量温度,例如常见的体温表便是液体膨胀式温度计。利用固体膨胀的,有根据因热胀冷缩而使长度变化制成的杆式温度计和利用双金属片受热产生弯曲变形的双金属温度计。

2.压力式温度计 它是根据密封在固定容器内的液体或气体,当温度变化时压力发生变化的特性,将温度的测量转化为压力的测量。它主要由两部分组成,一是温包,由盛液体或气体的感温固定容器构成,另一是反映压力变化的弹性元件。

3.热电偶温度计 根据热电效应,将两种不同的导体接触并构成回路时,若两个接点温度不同,回路中便出现毫伏级的热电势,这电势可准确反映温度。

4.电阻式温度计 利用金属或半导体的电阻随温度变化的特性测量温度。

非接触式测量仪表是根据物体发出的辐射热测量物体温度。常见的有根据物体在高温时的发光亮度(发光颜色)测定温度的光学高温计,以及将热辐射能量聚焦于感温元件上,再根据全频段辐射能的强弱测定温度的全辐射温度计。

非接触测温方法的优点是测量上限不受感温元件耐热程度的限制,因而最高可测温度原则上没有限制,事实上目前对1800℃以上的高温,辐射高温计是唯一可用的测温仪表。由于非接触测温仪表不需与被测物体进行传热交换,因此不会因测温而改变原来的温度场,

测温速度也快,且可对运动物体进行测量,其缺点是对不同物体进行测量时,由于各种物体的辐射能力不同,必须根据物体不同的吸收系数对读数进行修正,一般误差较大。

综观以上各种测温仪表,机械式的大多只能作就地指示,辐射式的精度较差,只有电的测温仪表精度较高,信号又便于远传和处理,因此热电偶与电阻式两种测温仪表得到了最广泛的应用,下面对这两种元件进行较深入的讨论。

1-1.2 热电偶

热电偶的原理可用图 1-1 来说明,当两种不同的导体或半导体连接成一个回路时,若两个接点温度不同,回路中就会出现热电动势,并产生电流。

从物理上看,这一热势主要是由接触电势组成的。当两种不同导体 A 、 B 接触时,由于两边的自由电子密度的不同,在交界面上产生电子的相互扩散,若 A 中自由电子密度大于 B 中的密度,那么在开始接触的的瞬间,从 A 向 B 扩散的电子数目将比 B 向 A 扩散的多,因而使 A 失去较多的电子而带正电荷,相反 B 带负电荷,致使在 A 、 B 接触处产生电场,以阻碍电子在 B 中的进一步积累,最后达到平衡。平衡时,在 A 、 B 两导体间的电位差称为接触电动势,其数值决定于两种材料的种类和接触点的温度。

图 1-1 表示的热电偶回路中,在温度不同的两个节点上,分别存在两个数值不同的接触电势 $e_{AB}(T)$ 及 $e_{AB}(T_0)$,回路中的总电势为

$$E(T, T_0) = e_{AB}(T) - e_{AB}(T_0) \quad (1-1)$$

式中 e 的下标表示电势的方向, e_{AB} 表示由 A 到 B 的电势。

对一定的热电偶材料,若将一端温度 T_0 维持恒定(这接点称为自由端或冷端),而将另一端插在需要测温的地方,则热电势 E 即为测温端温度 T (这接点又称为工作端或热端)的单值函数,用电表或仪器测定此热电势的数值,便可确定被测温度 T 。

在实际使用热电偶测温时,总要在热电偶回路中插入测量仪表和使用各种导线进行连接,也就是说总要在热电偶回路中插入其他种类的导体,下面我们研究一下,插入另一种导

体是否影响热电势的数值。在图 1-2 中,若除热偶两种材料 A 、 B 外又插入第三种导体 C 组成闭合回路,设 A 、 B 的接触点温度为 T , A 、 C 和 B 、 C 两处接触点的温度为 T_0 ,则回路中总电势为

$$E = e_{AB}(T) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) \quad (1-2)$$

若各接点温度都相同,即若 $T = T_0$,则由热力学第二定律可推断,此时总电势 E 必为零,因如果有电势 E 存在,将必有电流流动,使回路中某一部分加热,在没有外界作功的条件下,这种热量自动由温度低处流向高处的现象是不可能发生的。

因此可写出:

$$e_{AB}(T_0) + e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = 0 \quad (1-3)$$

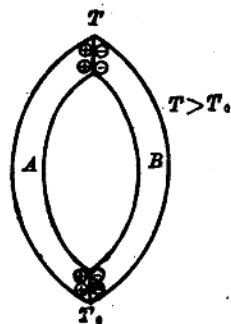


图 1-1 热电偶的原理

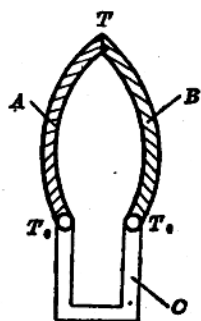


图 1-2 热电偶回路中插入第三种导体的情形

所以

$$e_{ac}(T_0) + e_{ca}(T_0) = -e_{ab}(T_0) \quad (1-4)$$

代入式(1-2)得

$$E = e_{ab}(T) - e_{ab}(T_0)$$

这仍然是式(1-1)的结果。由此可知,只要接入第三种导体的两个连接点温度相等,它的接入对回路电势毫无影响。这一结论在使用上有着重要意义,据此,我们可放心地在回路中插入各种仪表和导线进行测量。

下面再讨论一下热电偶的材料。原则上说,随便两种不同的导体焊在一起,都会出现热电势,但这并不是说所有热电偶都具有实用价值,能被大量采用的材料必须在测温范围内具有稳定的化学及物理性质,热电势要大,且与温度接近线性关系,不随时间而变化。性能一致以便大量复制。表1-1列出了我国目前常用的标准化热电偶的材料和特性。

表 1-1 常用 热 电 偶

热电偶名称及 分 度 号	热电偶丝成分	测量上限		灵敏度 (平均值)	特 点	补偿导线 材 料
		长期 工作	短期 工作			
铂铑30-铂铑6 LL-2	正极铂70%, 铑30% 负极铂94%, 铑6%	1600℃	1800℃	10μV/℃	精度高,性能稳定, 价贵,宜在氧化及 中性气氛中使用	
铂铑10-铂 LB-3	正极铂90%, 铑10% 负极铂100%	1300℃	1600℃	10μV/℃	同 上	铜-铜镍 合金 (铜99.4%, 镍0.6%)
镍铬-镍硅 Eu-2	正极镍89%, 铬10% 锰硅钴少量 负极镍94%, 硅3% 锰钴少量	1000℃	1300℃	40μV/℃	线性好,性能稳定, 宜在氧化及中性气 氛中使用,价格便 宜,镍硅丝较脆	铜-康铜
镍铬-镍铝 Eu-2	正极同 Eu 负极镍94%, 铝硅锰5%	1000℃	1300℃	40μV/℃	性能与镍铬-镍硅 相近,但稳定性不 如前者,故渐被前 者替代	铜-康铜
镍铬-考铜 EA-2	正极同 Eu 负极铜56%, 镍44%	600℃	800℃	80μV/℃	热电势最大,价格 便宜,适用于还原 性及中性气氛	
铜-康铜	正极铜 负极康铜(铜60%, 镍40%)	350℃	450℃	50μV/℃	最便宜,但铜易氧 化,常用来测量- 100℃~+100℃间 温度	

表1-1中,铂及其合金属于贵金属,其组成的热电偶价格很贵,它的优点是热电势非常稳定,故主要用作标准热电偶及测量1100℃以上的高温。在表中的普通金属热电偶中,镍铬-镍硅的电势温度关系线性度最好,镍铬-考铜的灵敏度最高,铜-康铜的价格最便宜。除表中所列出的常用热电偶外,我国还能生产许多新型热电偶,如可用来测2800℃的钨铼超高温热电偶,以及测-270℃的金铁-镍铬低温热电偶等。

热电偶测温的误差,在低温段大约为2.5~5℃,高温段大约为0.4~1%。例如贵金属铂铑10-铂热电偶在0~600℃间的允许误差为±2.4℃,温度高于600℃时为±0.4%T℃。使

用热电偶时必须十分注意其适用条件，在有害的气氛环境下，热电特性会急剧变化，产生很大的测量误差。

为了使热电偶能得到较长的使用寿命，常在热偶丝外面套上金属或石英、陶瓷等制成的保护套管，以隔离有害气体和物质对热电偶的损害。但加套管后，热电偶测温的滞后加大。根据结构的不同，一般热电偶的时间常数约为 1.5 分钟到 4 分钟，小惯性热电偶的时间常数约为几秒钟，特殊的快速薄膜热电偶的时间常数则为毫秒级。

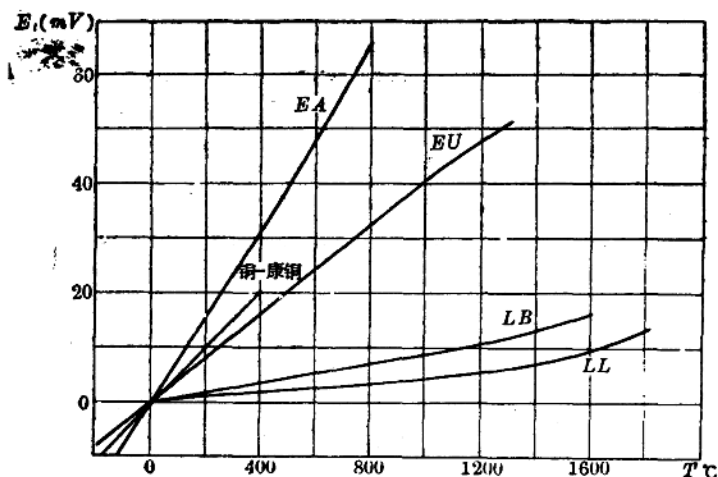


图 1-3 几种常用热电偶的特性 (冷端温度为 0℃)

由于热电偶的热电势大小不仅与测量端温度有关，还决定于自由端(冷端)的温度，所以使用热电偶时，常需保持冷端温度恒定，例如将冷端置于冰瓶内，由冰水混合物保证 0℃ 的稳定温度，在工业测量仪表中通常在电路中引入一个随冷端温度变化的附加电势，自动补偿冷端温度的变化，以保证测量精度。考虑到冷端恒温器或电势补偿装置常离测量点较远，在使用较贵的热电偶时，如果全用热偶丝从测量点引至恒温器，代价将太高，为了节约，工业上选用在较低温度下(100℃ 以下)与所用热电偶的热电特性相近的廉价金属，作为热偶丝在低温区的替代品，称为补偿导线，其接法如图 1-4 所示，这样热偶丝的长度只要足够引至温度 100℃ 以下的地方就行了，其余的长度可用廉价的补偿导线来延伸。例如贵金属铂铑—铂热电偶，可用铜(正极)和铜镍合金(负极)作补偿线，将冷端延伸到离测点较远的地方。工业上，各种补偿导线有规定的显著颜色可供辨认。使用时要注意正负极性不能接错。

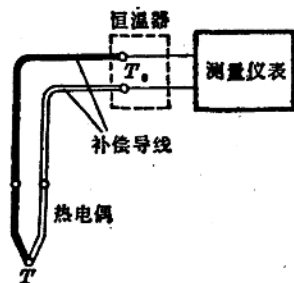


图 1-4 补偿导线的使用

1-1.3 热电阻

测量低于 150℃ 的温度时，由于热电偶的电势较小，常使用金属电阻感温元件(简称热电阻)测量温度。热电阻不象热电偶那样需要冷端温度补偿，测量精度也比较高，故在 -200℃ ~ +500℃ 的温度范围内，获得极为广泛的应用。

热电阻测温仪表是根据金属导体的电阻随温度变化的特性进行测温的，例如铜的电阻温度系数为 $4.25 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ，当温度由 0°C 上升到 100°C 时，铜电阻的阻值约增大 42%，因此对确定的电阻，只要精确地测定其阻值的变化，便可知道温度的高低。

适合作电阻感温元件的材料应满足如下要求：电阻温度系数大，电阻与温度的关系线性，在测温范围内物理化学性质稳定。目前用得最多的是铂和铜两种材料，在低温及超低温测量中则使用铟电阻、锰电阻及碳电阻等。

铂电阻的特点是精度高，性能稳定可靠，故被国际权度委员会规定为 $-259.34^{\circ}\text{C} \sim +630.74^{\circ}\text{C}$ 间的基准器，在工业上则广泛用于 $-200^{\circ}\text{C} \sim +500^{\circ}\text{C}$ 间的温度测量。铂电阻的缺点是其电阻与温度的关系不太线性，在 $0 \sim 630.74^{\circ}\text{C}$ 之间，其阻值与温度关系可表示为

$$R_t = R_0(1 + AT + BT^2)$$

式中 R_t, R_0 分别为 $T^{\circ}\text{C}$ 及 0°C 时的电阻值；

A, B 为常数， $A = 3.98 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ， $B = -5.89 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}^2$ 。

铜电阻的优点是价格便宜，电阻与温度关系的线性度好，但温度稍高便容易氧化，多用于 $-50^{\circ}\text{C} \sim +100^{\circ}\text{C}$ 间的温度测量。

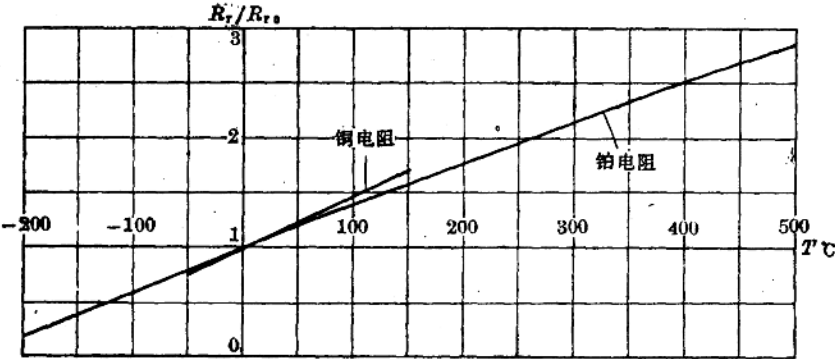


图 1-5 铂电阻及铜电阻的特性

电阻感温元件根据用途不同，做成各种形状和尺寸，但其基本结构都是把很细的电阻丝绕在棒形或平板形的骨架上，骨架由陶瓷或云母等制成，电阻丝在骨架上要求温度变化时不受应力，以保持特性的稳定。在电阻丝外面一般都有保护层或保持套管。为了减小测温的时间滞后，电阻体内部一定要导热良好，并尽量减小热容量，目前国产的电阻感温元件，热惯性大的其时间常数约为 4 分钟左右，热惯性小的约为几秒钟。

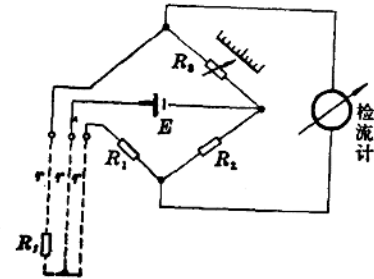


图 1-8 三线热电阻在测量电桥中的接法

在使用热电阻测温时，有一个需要注意的问题，就是电阻体外部的导线电阻是与热电阻串联的，如果导线电阻不确定，测温是无法进行的。因此，不管热电阻和测量仪表之间的距离远近，必须使导线电阻符合规定的数值（通常为 5 欧姆），如果不足，必须用锰铜电阻丝凑足，尽管这样、考虑到导线所处的环境温度变化时，导线电阻仍会变化，使测温产生误差。为此，工业上常使用三根引出线的热电阻，