

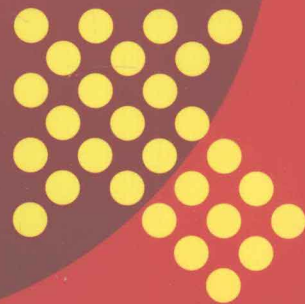
21世纪高等学校规划教材



ZIDONGHUA YIBIAO YU GUOCHENG KONGZHI

自动化仪表与过程控制

张智贤 沈永良 主 编
李吉祥 刘跃军 孙来军 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

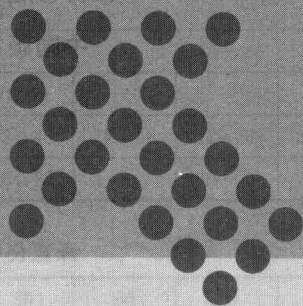
21世纪高等学校规划教材



ZIDONGHUA YIBIAO YU GUOCHENG KONGZHI

自动化仪表与过程控制

主 编	张智贤	沈永良	
副主编	李吉祥	刘跃军	孙来军
编 写	公利滨	姜云霞	崔 洋
主 审	金鸿章		



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

全书分为自动化仪表与过程控制两篇。其中，自动化仪表篇包括自动化仪表概述、过程检测仪表、调节器、执行器、显示记录仪表、自动化仪表的安全与防爆、现场总线技术；过程控制篇包括过程控制系统概述、被控对象的数学模型、单回路过程控制系统设计、复杂过程控制系统、先进过程控制系统简介。

本书可作为普通高等院校自动化专业、电气工程及其自动化专业及相关专业的本科生教材或参考用书，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动化仪表与过程控制/张智贤, 沈永良主编. —北京: 中国电力出版社, 2009

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8428 - 3

I. 自… II. ①张…②沈… III. ①自动化仪表-高等学校-教材②过程控制-高等学校-教材 IV. TH86 TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 014035 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 3 月第一版 2009 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.25 印张 444 千字

定价 29.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着生产技术的迅速提高与生产规模的持续扩大,对过程控制系统的要求越来越高,促使过程控制理论的研究不断发展。现代过程控制技术在提高经济效益和劳动生产率、改善劳动条件、保护生态环境等方面发挥着越来越大的作用。本书系统地介绍了工业自动化仪表与过程控制的基础知识和最新内容。

本书在编写过程中,注重体现“简洁、新颖和实用”的原则。在内容的安排上尽量做到典型、实用。本书具有如下特点:

(1) 体系完整、结构清晰。全书将过程控制系统和自动化仪表分为上下两篇,可根据教学计划的安排,按一门课或两门课来讲;各章节的内容划分体现了即相互独立又相互联系的特点,可根据教学时数的不同,来选择所讲的内容。

(2) 内容简洁、新颖、实用。本书系统地介绍了工业自动化仪表与过程控制的基础知识和最新内容,力求涵盖工业自动化仪表与过程控制系统的精华和实用内容,尽量避免繁琐的公式推导。

(3) 方便教学和自学。在内容的叙述上,做到概念清楚、深入浅出、详略得当,便于提高学生的学习兴趣。各章节中尽量多安排一些应用实例,便于读者快速理解和掌握教材内容。每章后附有小结、思考题与习题,便于读者检查学习效果。

全书共分12章,参考教学时数为60~68学时。

本书第1章和第2章的2.1~2.3节由李吉祥编写,第2章的2.4~2.6节由刘跃军编写,第3章和第4章由孙来军编写,第5章~第7章由沈永良编写,第8章~第10章由张智贤编写,第11章的11.1、11.2节由姜玉霞编写,第11章的11.3节~11.7节由公利滨编写,第12章由崔洋编写,全书由张智贤统稿。

本书由哈尔滨工程大学金鸿章教授主审,对全书提出了许多宝贵的意见,谨此表示诚挚的感谢。在本书编写过程中广泛参考了许多相关技术文献,在此向各文献资料的作者表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2009年1月

目 录

前言

上篇 自动化仪表

1 自动化仪表概述	1
1.1 自动化仪表的发展及分类	1
1.2 仪表的技术指标	3
小结	5
思考题与习题	6
2 过程检测仪表	7
2.1 过程检测仪表的组成	7
2.2 温度检测仪表	7
2.3 压力检测仪表	20
2.4 流量检测仪表	29
2.5 液位检测仪表	40
2.6 成分检测仪表	44
小结	54
思考题与习题	54
3 调节器	56
3.1 常规 PID 调节规律	56
3.2 PID 调节规律的选择	59
3.3 模拟调节器	61
3.4 数字 PID 控制器	71
3.5 自整定 PID 调节器	81
小结	83
思考题与习题	84
4 执行器	85
4.1 气动调节阀	85
4.2 调节阀的流量特性	88
4.3 电—气转换器及电—气阀门定位器	91
4.4 电动调节阀	96
4.5 执行器的安装	97
小结	97
思考题与习题	98
5 显示记录仪	99

5.1	电位差计显示记录仪表	99
5.2	平衡电桥显示记录仪表	101
5.3	无纸记录仪	102
5.4	虚拟显示记录仪表	108
	小结	109
	思考题与习题	109
6	自动化仪表的安全与防爆	110
6.1	安全防爆的概念	110
6.2	爆炸性物质按组别的分类	112
6.3	安全栅	114
	小结	122
	思考题与习题	122
7	现场总线技术	123
7.1	现场总线控制技术	123
7.2	OSI 参考模型	128
7.3	PROFIBUS 现场总线	129
	小结	139
	思考题与习题	139

下 篇 过 程 控 制

8	过程控制系统概述	141
8.1	过程控制系统的组成及其特点	141
8.2	过程控制系统的分类及性能指标	144
	小结	147
	思考题与习题	148
9	被控对象的数学模型	149
9.1	被控对象的动态特性	149
9.2	建立被控对象数学模型的方法	154
	小结	179
	思考题与习题	180
10	单回路过程控制系统设计	182
10.1	过程控制系统设计概述	182
10.2	单回路控制系统方案设计	183
10.3	单回路控制系统整定	194
10.4	过程控制系统的投运	201
10.5	单回路过程控制系统应用实例	201
	小结	204
	思考题与习题	205
11	复杂过程控制系统	207

11.1	串级控制系统	207
11.2	前馈控制系统	220
11.3	大纯滞后控制系统	231
11.4	比值控制系统	235
11.5	均匀控制系统	242
11.6	分程控制系统	246
11.7	选择性控制系统	250
	小结	255
	思考题与习题	256
12	先进过程控制系统简介	258
12.1	自适应控制系统	258
12.2	推理控制系统	263
12.3	预测控制系统	266
12.4	模糊控制系统	270
12.5	专家系统	275
	小结	278
	思考题与习题	278
	附录 A 热电偶分度表	280
	附录 B 热电阻分度表	283
	参考文献	284

上篇 自动化仪表

1 自动化仪表概述

自动化仪表是工业过程实现自动化控制的必备设备,任何一个控制系统都必须用到自动化仪表。各种控制策略和算法也要借助自动化仪表才能在工业过程中实现,同时也需求大量的自动化仪表。设计一个自动控制系统,需要工程人员掌握系统中各种自动化仪表的工作原理和性能等特点。只有这样才能合理地选择和正确地使用,组成性价比较高的控制系统。自动化仪表是衡量自动化水平的一个重要标志,同时自动化水平已成为衡量各行各业现代化水平的一个重要标志。

经历几十年的发展,自动化仪表经历了从气动液动仪表、电动仪表、电子式模拟仪表、数字智能仪表到计算机集散控制系统(DCS)等阶段的发展,为各行各业的现代化大规模生产提供了强大的支持。随着网络技术的快速发展,自动化仪表的网络化方向成为自动化仪表的发展趋势,以自动化仪表的数字化、开放化、网络化为特征的现场总线控制系统(FCS)正在迅猛发展。DCS、现场总线、工业以太网等为自动化仪表的智能化发展提供了必要的使用平台,从而使控制系统网络化,十分有利于工业企业实现高层次的自动化。

自动化仪表与控制理论一样,都是科技工作者的研究内容。控制理论的发展会促进自动化仪表的发展,同时自动化仪表的发展也会提高工业企业自动化水平,还会影响控制理论的研究方向和内容。

1.1 自动化仪表的发展及分类

仪表是用以检出、测量、观察、计算各种物理量、物质成分、物性参数等的器具或设备。而自动化仪表是指具有自动控制、报警、信号传递和数据处理等功能的仪表,例如用于工业生产过程自动控制中的气动调节仪表和电动调节仪表。

自20世纪30年代以来,自动化技术取得了惊人的成就,在国民经济生产中起着关键的作用。

一、自动化仪表的发展过程和趋势

仪器仪表发展已有悠久的历史。据《韩非子·有度》记载,我国在战国时期已有了利用天然磁铁制成的指南仪器,称为司南。古代的仪器在很长的历史时期中多属用以定向、计时或供度量衡用的简单仪器。

17世纪到18世纪,欧洲的一些物理学家开始利用电流与磁场作用力的原理制成简单的检流计;利用光学透镜制成的望远镜,奠定了电学和光学仪器的基础。其他一些用于测量和观察的各种仪器也逐渐得到了发展。

19世纪到20世纪,工业革命和现代化大规模生产促进了新学科和新技术的发展,后来又出现了电子计算机和空间技术等,仪器仪表因而也得到迅速的发展。现代仪器仪表已成为

测量、控制和实现自动化必不可少的技术工具。

从20世纪60年代开始,为满足工业发展的需要,将测量、记录和控制功能组合在一起,这类仪表称为“基地式”仪表,通常是在带有调节单元的显示记录仪“基地”上,配上测量元件及执行器构成的控制系统。随着生产规模的扩大,产生了以功能划分的“单元组合式”仪表,根据控制任务要求,选择相应单元仪表组合起来,构成复杂的自动控制系统。

20世纪80年代,随着计算机技术的发展及其在仪表中的应用,出现了以微处理器为核心器件的仪表,研发了各种类型数字式变送器、数字式调节器、数字显示记录仪、可编程控制器和智能仪表。与模拟式仪表相比,其功能、性能、可靠性、通信功能等有了显著的提高。

为了进一步提高仪器仪表的各种性能,增强耐受各种苛刻使用环境的能力,提高可靠性和使用寿命,仪器仪表将不断利用新的工作原理和新的元器件。例如,利用超声波微波、射线、红外线、核磁共振、超导、激光等原理,以及采用各种新型半导体敏感元件、集成电路、集成光路、光纤等元器件。其目的是实现仪器仪表的小型化、减轻重量、降低生产成本和使仪器仪表便于使用与维修等。

通过微型计算机的使用来提高仪器仪表的性能,提高仪器仪表本身自动化、智能化程度和数据处理能力。仪器仪表不仅可单独使用,而且可以通过标准接口和数据通道,与电子计算机结合起来,组成各种测试控制管理综合系统,满足更高的要求。

二、自动化仪表的分类

自动化仪表的分类方法很多,根据不同原则可以进行相应的分类。例如,按仪表所使用的能源可以分为气动仪表、电动仪表和液动仪表;按仪表组合形式可以分为基地式仪表、单元组合仪表和综合控制装置;按仪表安装形式可以分为现场仪表、盘装仪表和架装仪表;随着微处理机的迅猛发展,根据微处理器的应用情况可分为智能仪表与非智能仪表;根据仪表信号的形式可分为模拟仪表和数字仪表显示仪表;根据记录和指示、模拟与数字等功能又可分为记录仪表和指示仪表、模拟仪表和数显仪表。

调节仪表可以分为基地式调节仪表和单元组合式调节仪表;由于微处理机的引入,又可以分为可编程调节器和固定程序调节器。

执行器由执行机构和调节阀两部分组成。执行机构按能源划分有气动执行器、电动执行器和液动执行器,按结构形式可以分为薄膜式、活塞式(气缸式)和长行程执行机构。调节阀根据其结构特征和流量特性不同进行分类,按结构特点分为直通单座、直通双座、三通、角形、隔膜、蝶形、球阀、套筒(笼式)、阀体分离等,按流量特性分为直线、对数(等面积比)、抛物线、快开等。

任何一种分类方法皆不能将所有仪表分门别类地划分得井然有序,它们中间互有渗透,彼此相通。例如变送器具有多种功能,温度变送器可以划归温度检测仪表,差压变送器可以划归流量检测仪表,压力变送器可以划归压力检测仪表,若用无压法测液位可以划归物位检测仪表,很难确切划归哪一类,中外单元组合仪表中的计算和辅助单元也很难归并。

三、自动化仪表在过程控制过程中的作用

过程参数的检测是实现过程参数显示和过程控制的前提。通过对过程参数的准确检测,可以及时准确地反映工艺设备的运行工况,为操作人员提供必要的操作依据,为自动化装置提供必要的信号,对确保安全生产、提高产品产量、节约能量、提高经济效益等十分重要。

在工业自动化中，特别是连续生产过程的自动化中，自动化仪表就是实现生产过程自动化必不可少的技术工具之一，各种控制原则和设计思想都要通过它们来实现。采用自动化仪表是实现自动检测和自动控制的重要手段。

在许多生产过程中，由于高温、高压、强辐射、剧毒等恶劣环境条件，不允许人工直接在现场操作，必须借助于自动化仪表进行操作。例如，在冶金工业中，上千立方米的高炉，由于炉子是密封的，必须采用自动化仪表来监测炉内各参数的变化；大型纯氧顶吹转炉的容量已达几百吨以上，吹炼时间仅十几分钟，必须配用自动化仪表连续迅速地反应炉内各参数的变化状况，并能及时准确地加以控制。在电力工业生产中，百万千瓦以上的火力发电机组，需要测量、监视的点数达几千个，人工是无法胜任的。在石化工业生产中，年处理1000万t的炼油厂需数万台自动化仪表，年产30万t合成氨厂需280多个品种、3700多台自动化仪表。可见，采用先进的自动化仪表，实现生产过程自动化是安全、稳定、高效连续生产的必要条件。

1.2 仪表的技术指标

1.2.1 技术指标

仪表运行特性通常分为静态特性和动态特性两大类。

一、测量仪表的静态特性

(1) 精确度。与精确度有关的指标有三个，即精密度、正确度和精确度等级。

1) 精密度是指测量仪表表示值的不一致程度。即对某一稳定的被测量在相同的规定的条件下，由同一测量者用同一仪表在相当短的时间内连续重复测量多次，其测量结果的不一致程度。

2) 正确度是指表示值有规律地偏离真值大小值的程度。

3) 精确度指精密度和正确度两者的总和，即测量仪表给出接近于被测真值的能力。

4) 精确度等级是指在规定的条件下，仪表最大允许误差相对于仪表测量范围的百分数，也称精度等级，即

$$\text{仪表精度} = \frac{\text{绝对误差的最大值}}{\text{仪表量程}} \times 100\% = \frac{|x - x_0|_{\max}}{a - b} \times 100\%$$

式中： x 为被测量参数的测量值， x_0 为被测量参数的真实值。 a 、 b 分别为仪表的量程的上限和下限。

根据国家规定的允许误差大小仪表精度分成几个等级。某一类仪表的允许误差是指在规定的正常情况下允许的百分比误差的最大值。我国过程检测控制仪表的精度等级有0.005、0.02、0.1、0.35、0.5、1.0、1.5、2.5、4等。0.1级表示仪表总的误差不超过 $\pm 0.1\%$ 范围。精度等级越小，说明仪表的系统误差和随机误差都越小，也就是这种仪表精密度越高。一般工业用表为0.5~4级精度。在选用仪表的精度等级时，应根据实际需要确定，不能只追求高精度等级的仪表。

(2) 稳定性。稳定性是指在规定的条件下保持其性能不变时，在规定时间内仪表性能保持不变的能力，一般用精密度数值和观测时间长短表示。

(3) 影响系数。影响系数是仪表性能的重要指标。由于仪表实际工作条件要比标准工作

条件差很多,此时影响量的作用可以用影响系数来表示。它是示值变化与影响量变化之间的比值。

(4) 仪表静态输入—输出特性。自动化仪表的静态输入—输出特性包括量程、灵敏度、灵敏限、分辨率、线性度、死区等特性。

1) 灵敏度表征仪表在稳态输出增量与输入增量之间的比值,是静态特性曲线上相对应的斜率。它反映仪表能够测量的最小被测量,即

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

2) 灵敏限是指当仪表的输入量从零不断增加,在仪表示值发生可察觉的极微小变化时,对应的输入量的最小变化值。

3) 分辨率表示仪表能够检测到被测量最小变化的本领。

4) 线性度通常用实际校验曲线与一条通过特性曲线上、下限值的端基直线之间的最大偏差值与最大值之比来衡量。

5) 死区是指没有引起仪表输出的输入值最大变化范围。

6) 回差是指在仪表全部测量范围内被测量值上行和下行所得到的两条特性曲线之间的最大偏差,即

$$\text{回差} = \frac{(x_1 - x_2)_{\max}}{\text{仪表量程}} \times 100\%$$

二、测量仪表的动态特性及动态误差

(1) 动态特性。测量仪表的动态特性是仪表在动态工作中所呈现的特性,它决定仪表测量快变参数的精度,通常用稳定时间和极限频率来概括表示。

稳定时间是指给仪表一个阶跃输入,从输入开始到输出信号最终稳定值小于规定的允许误差时的时间间隔。稳定时间又称阻尼时间。

极限频率是指仪表的有效工作频率,在这个频率以内仪表的动态误差不超过允许值。

(2) 动态误差。动态误差是指仪表在测量被测量过程中所具有的误差,其数值是动态与静态测量结果的差值。

1.2.2 仪表的信号制式及供电

一、仪表的信号制式

在控制系统中,各种仪表的输入/输出之间要相互连接,这就需要有统一的标准联络信号才能方便地把各个仪表组合起来,构成各种控制系统。所以,在设计自动化仪表和装置时,要做到通用性和相互兼容性,就必须统一仪表的信号制式。信号制式即信号标准,是指仪表之间采用的传输信号的类型和数值。

(1) 气动仪表信号标准。国家标准 GB/T 777—1985《工业自动化仪表用模拟气动信号》规定了气动仪表信号的下限值为 20kPa,上限值为 100kPa。

气动单元组合仪表(QDZ)采用 140kPa 压缩空气为气源,输出下限值为 20kPa、上限值为 100kPa 的线性输出标准信号。

(2) 电动仪表信号标准。电的信号包括模拟信号、数字信号、频率信号和脉冲信号等。由于模拟式仪表、装置的结构简单、应用广泛,因此在过程控制系统中,远距离传输和控制室内部仪表之间的信号传输,用得最多的是模拟信号。在模拟信号中,直流电压、直流电流被世界各国普遍用作仪表的统一模拟信号。这是因为直流信号与交流信号相比,具有如下

优点:

1) 直流信号干扰小。在信号传输过程中, 直流信号不受交流感应的影 响, 易于解决仪表的抗干扰能力。

2) 接线简单。直流信号不受传输线路的电感、电容和负载性质的影响, 不存在相位移问题, 使接线简单化。

3) 获得基准电压容易。

4) 便于 A/D 转换和现场仪表与数字控制仪表及装置配用。

DDZ - II 型和 DDZ - III 型电动单元组合仪表技术参数如下:

1) DDZ - II 型。联络信号采用 0~10mA DC (远距离) 或 1~5V DC (柜内传); 电源信号采用 220V AC。

2) DDZ - III 型。联络信号采用 4~20mA DC (远距离) 或 1~5V DC (柜内传); 电源信号采用 24V DC。

其中 DDZ 分别是电动、单元和组合三个词组的第一个汉语拼音。同样, QDZ 分别为气动、单元和组合三个词组的第一个汉语拼音。

二、变送器信号传输方式

变送器是一种现场仪表, 它的气源或电源来自控制室, 输出信号送至控制室。气动变送器用两根气动管线分别传送气源和输出气动信号。电动模拟式变送器采用二线制或四线制传送电源和输出信号, 其中智能式变送器采用双向全数字量传输信号。这里主要介绍电动模拟式变送器的信号传输方式。

(一) 二线制变送器

二线制变送器用两根导线作为电源和输出信号的公用传输线。它相当于一个可变电阻器, 其阻值由被测参数控制, 电源、变送器和负载电阻是串联的。目前大多数变送器均为二线制变送器, 它具有连接电缆短、安全防爆和抗干扰能力强等优点。实现二线制变送器必须具备以下条件:

(1) 变送器的正常工作电流必须小于或等于变送器的输出电流。这是因为在变送器的输出电流下限值时, 半导体器件必须有正常的工作点, 需要有电源供给正常的功率。由于电源线和信号线公用, 电源供给线路的功率是通过信号电流提供的, 因此信号电流必须有活零点。国际统一电流信号采用 4~20mA DC, 为制作二线制变送器创造了条件。凡输出电流采用 0~10mA DC 的仪表是不能采用二线制变送器的。

(2) 变送器的输出端电压等于电源电压减去输出电流在负载电阻和传输导线电阻上的压降。为保证变送器的正常工作, 输出端电压值只允许在限定范围内变化。如果负载电阻要增加, 电源电压就需增大。

(3) 必须单电源供电。

(二) 四线制变送器

四线制变送器的供电电源和输出信号分别各用两根导线传输, 由于电源和信号分别传送, 因此对电流信号的零点及元件的功耗没有严格的要求。

小 结

自动化仪表是控制过程的基本组成单元, 同时也是自动化水平的标志。计算机的发展也

促进了自动化仪表的发展,使自动化仪表和网络控制、计算机集成控制紧密地结合到一起。本章介绍了自动化仪表的概念及其发展趋势,分析了自动化仪表的简单分类和在控制系统中的作用,重点讲解了仪表的基本技术指标。通过本章的学习,需要掌握仪表的测量范围、上下限、灵敏度、分辨率、精确度和重复性等概念。

思考题与习题

1. 按信号能源分类,仪表可以分为哪几种?

2. 什么是仪表的精度?试问一台量程为 $-100\sim+100^{\circ}\text{C}$ 、精度为0.5级的测量仪表,在量程范围内的最大误差为多少?

3. 有一温度参数需要测量,稳定时温度值是 150°C ,要求测量仪表产生的误差不能超过 2°C ,请选择下面两种仪表哪种最适合,精度是多少?

$0^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$, 1级; $0^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$, 0.5级。

4. 什么是仪表的灵敏度和分辨率?两者间存在什么关系?

5. 为什么 $4\sim 20\text{mA}$ 的电流信号适宜采用二线制接线,而 $0\sim 20\text{mA}$ 电流信号不能呢?

6. QDZ和DDZ分别代表什么意思?

2 过程检测仪表

2.1 过程检测仪表的组成

过程参数检测主要是检测连续生产过程中的参数,如生产过程中的温度、压力、液位、流量、成分等参数。过程检测仪表则是检测这些过程参数的仪表。

过程参数的检测是过程参数显示和过程控制的前提。只有准确地检测过程参数,才能准确地显示参数的数值并进行精确的控制。所以,过程控制的检测对于准确地显示生产过程的运行工况,确保生产过程的安全、提高产品的产量和质量等是十分必要的,是实现生产过程自动化所必需的环节。过程参数检测也已经广泛地应用在石化、冶金、电力、环保等生产企业中。

在过程检测时,过程检测仪表一般分为一次仪表和二次仪表。一次仪表一般是将被测量转换为便于计量物理量的仪表,即为检测元件。二次仪表是将测得的信号变送转换为可计量的标准电气信号并显示的仪表,即包括变送器和显示装置,但是很多一次仪表也需要显示所测量的数据。过程检测仪表的组成如图 2-1 所示。传感器将被测物理量(如压力、温度)检出并转换为电量,转换装置对接收到的电信号用硬件电路进行分析处理或经 A/D 转换后用软件进行信号分析,显示记录装置将测量结果显示出来,提供给观察者或其他自动控制装置。

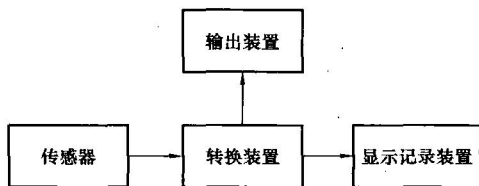


图 2-1 过程检测仪表的组成示意图

2.2 温度检测仪表

生产过程中,温度测量范围广泛,测温仪表种类繁多,按检测方式可分为接触式与非接触式两大类。

接触式:通过测温元件与被测介质接触进行温度测量,这种测量方式存在滞后现象。膨胀式温度计、压力式温度计、热电偶温度计、电阻式温度计属于接触式温度检测仪表。

非接触式:通过被测物体发出的辐射热来测量被测体的温度,这种测量方式滞后小,但是误差较大。常见的非接触式温度检测仪表有光学高温计、辐射高温计和比色温度计。

这里主要介绍工业中常用的热电偶温度检测仪表、热电阻温度检测仪表、双金属温度检测仪表等几种仪表。

2.2.1 热电偶温度检测仪表

热电偶是以热电效应为基础的一种感温元件,它直接测量温度,把温度信号转换成电势信号,通过温度变送器调整成标准信号,输出到控制或显示仪表。

一、热电偶工作原理

热电偶的测温原理是以热电效应为基础,将两种电子密度不同的导体连接成闭合回路

(见图 2-2), 如果两端所处的温度不同, 在该回路内就会产生热电动势和温差电动势, 即热电效应。

热电动势是指两种热电极由于材料不同而具有不同的自由电子密度。如图 2-3 所示, 在热电极接触接触面处产生自由电子的扩散现象, 扩散的结果使得接触面上逐渐形成静电场, 该静电场具有阻碍原扩散继续进行的作用, 当达到动态平衡时, 在热电极接触点处便产生一个稳定电势差, 称为热电动势。在同一种导体的两端因其温度不同, 高温侧电子受热能运动加剧, 高温侧失去电子而带正电, 低温侧得到电子带负电即形成一个静电场, 使两端出现电位差。该电动势为温差电动势, 它比热电动势要小得多。

在实际使用热电偶测量温度时, 热电偶的回路中要接入测量仪表和第三种导线, 如图 2-4 所示。第三种导线的接入会不会影响到热电偶的热电势大小呢? 实际上, 只要第三种导体接入的两端的温度相同, 就不会影响热电偶的热电势的大小, 这就是热电偶基本定律之一——中间导体定律。

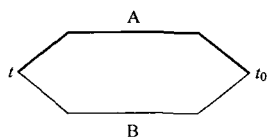


图 2-2 热电偶闭合回路

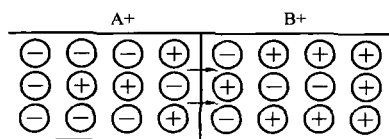


图 2-3 两种金属的接触断面

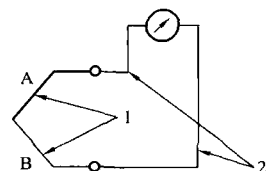


图 2-4 中间导体定律

1—热电偶 AB;

2—热电偶和显示仪表的连接线

(第三种导体)

热电偶的基本定律包括热电偶三大定律和标准电极定律。热电偶三大定律是均质导体定律、中间导体定律和中间温度定律。

定律 1 均质导体定律: 由一种均匀介质导体组成的闭合回路, 不论导体的截面、长度以及各处的温度分布如何, 均不产生热电动势。

该定律说明: 如果热电偶的两根热电极是由两种均质导体组成的, 那么热电偶的热电势仅与两接点温度有关, 与沿热电极的温度分布无关。如果热电极为非均质导体, 当处于具有温度阶梯的情况时, 将会产生附加电势, 引起测量误差。所以, 热电极材料的均匀性是衡量热电偶质量的主要指标之一。

定律 2 中间导体定律: 由导体 A、B 组成的热电偶回路, 当引入第三种导体 C 时, 只要保持第三种导体 C 两端的温度相同, 引入导体 C 后对回路总电动势无影响, 即回路中总的热电势与引入第三导体无关。

根据这一定律, 如果需要在回路中引入多种导体, 只要保证引入的导体两端温度相同,

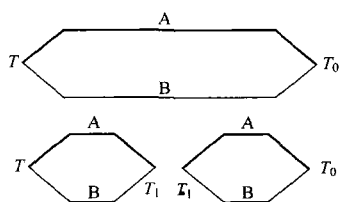


图 2-5 中间温度定律

均不会影响热电偶回路中的热电动势, 根据此定律可以在回路中方便地连接各种导线及显示仪表。

定律 3 中间温度定律: 在热电偶测温回路中, 常会遇到热电极的中间连接问题, 如果连接点的温度为 T_n , 连接导体 A 或 B 的热电特性相同, 则总的热电动势等于热电偶与连接导体的热电动势的代数和。如图 2-5 所示, 有

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T, T_1) + E_{AB}(T_1, T_0) \quad (2-1)$$

根据这个定律,在实际测温中按照现场的安装情况,可以连接热电特性相同的导体 A 或 B,起到延长热电极的作用,以适合不同的安装要求。

定律 4 标准电极定律:如果导体 A、B 分别与第三导体 C 组成热电偶,它们的测量端温度均为 T ,参考端温度均为 T_0 ,产生的热电动势分别为 $E_{AC}(T, T_0)$ 和 $E_{BC}(T, T_0)$,如图 2-6 所示,由导体 A、B 组成的热电偶产生的热电动势的计算式为

$$\begin{aligned} E_{AB}(T, T_0) &= E_{AC}(T, T_0) - E_{BC}(T, T_0) \\ &= E_{AC}(T, T_0) + E_{CB}(T, T_0) \end{aligned} \quad (2-2)$$

这里采用的导体 C 称为标准电极,所用的材料一般为纯铂。因为铂容易提纯,物理化学性质稳定,熔点较高。这种方法大大方便了热电偶的选配工作。只要知道某些材料与标准电极相配的热电动势,就可以由上述定律求出任何两种材料组成热电偶的热电动势。

为了保证热电偶可靠、稳定地工作,对它的结构要求如下:

- (1) 组成热电偶的两个热电极的焊接必须牢固;
- (2) 两个热电极彼此之间应很好地绝缘,以防短路;
- (3) 补偿导线与热电偶自由端的连接要方便可靠;
- (4) 保护套管应能保证热电极与有害介质充分隔离。

二、热电偶的种类及结构形式

常用热电偶可分为标准热电偶和非标准热电偶两大类。标准热电偶是指按照国家标准规定的热电动势与温度的关系、允许误差等条件生产的热电偶。它有与其配套的显示仪表可供选用。非标准化热电偶在使用范围或数量级上均不及标准化热电偶,一般也没有统一的分度表,主要用于某些特殊场合的测量。

我国从 1988 年 1 月 1 日起,热电偶和热电阻全部按 IEC 国际标准生产,并指定 S、B、E、K、R、J、T 七种标准化热电偶为我国统一设计型热电偶。我国自 1994 年 1 月 1 日起全面实施国际温标 (ITS-90)。在国际温标 (ITS-90) 表中,热电偶的分度号主要有 S、R、B、N、K、E、J、T 等几种。其中 S、R、B 属于贵金属热电偶, N、K、E、J、T 属于廉金属热电偶。T、S 分度号的特点是抗氧化性能强,宜在氧化性、惰性气氛中连续使用,使用温度长期为 1400°C 、短期为 1600°C 。在所有热电偶中。S 分度号的精确度等级最高,通常用作标准热电偶。R 分度号与 S 分度号相比,除热电动势大 15% 左右,其他性能几乎完全相同。B 分度号在室温下热电动势极小,故在测量时一般不用补偿导线,它的使用温度长期为 1600°C ,短期为 1800°C ,可在氧化性或中性气氛中使用,也可在真空条件下短期使用。N 分度号的特点是 1300°C 下高温抗氧化能力强,热电动势的长期稳定性及短期热循环的复现性好,耐核辐照及耐低温性能也好,可以部分代替 S 分度号热电偶。K 分度号的特点是抗氧化性能强,宜在氧化性、惰性气氛中连续使用,使用温度长期为 1000°C 、短期为 1200°C ,在所有热电偶中使用最广泛。E 分度号的特点是在常用热电偶中,其热电动势最大,即灵敏度最高,宜在氧化性、惰性气氛中连续使用,使用温度 $0\sim 800^{\circ}\text{C}$ 。J 分度号的特点是既可用于氧化性气氛 (使用温度上限 750°C),也可用于还原性气氛 (使用温度上限 950°C),并且耐 H_2 及 CO 气体腐蚀,多用于炼油及化工工业。T 分度号的特点是在所有廉金属热电偶中

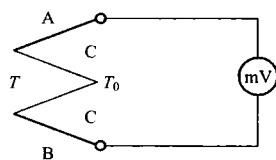


图 2-6 标准电极定律

精确度等级最高，通常用来测量 300℃ 以下的温度。

工业常用标准型热电偶主要有：铂铑₃₀—铂铑₆ 热电偶（也称双铂铑热电偶，分度号 B）、铂铑₁₀—铂热电偶（分度号 S）、镍铬—镍硅（镍铬—镍铝，分度号 K）热电偶、镍铬—康铜（镍铬—铜镍，分度号 E）热电偶等，对应的 ITS-90 分度表见附录 A。

三、热电偶的温度补偿

根据前面提到的热电偶测量温度的基本原理，只有当参考端温度不变时，热电偶输出的热电势和温度之间才能一一对应。根据国际温标（ITS-90），热电偶的分度表冷端参考温度为 0℃。实际测量温度时，热电偶的热端与冷端很近，且暴露在空气中，容易受到环境温度的影响，难以维持在 0℃。为了保证测量准确，必须采取相应措施，使冷端温度不变，或消除其变化的影响，目前常用的方法有四种。

(1) 补偿导线法。为了使冷端温度恒定（最好是 0℃），可以把热电偶做长，使冷端延伸至恒温或温度波动较小的地方（如控制室），但这种方法对贵重金属的热电偶而言，显然不经济。

(2) 计算校正法。如果热电偶冷端温度不是 0℃，而是稳定的 $t_0 > 0℃$ ，这时不能用测得的 $E(t, t_0)$ 值直接查分度表得热端温度 t ，而应按下式进行修正，修正式为

$$E(t, 0) = E(t, t_0) + E(t_0, 0) \quad (2-3)$$

式中： $E(t, 0)$ 为冷端为 0℃、热端为 t 时热电动势的值； $E(t_0, 0)$ 为冷端温度为 0℃、热端温度为 t_0 时热电动势的值； $E(t, t_0)$ 为冷端为 $t_0℃$ 、热端为 t 时热电动势的值。

【例 2-1】 利用 E 分度号的热电偶测量某温度，工作时冷端温度为 30℃，测得的热电势为 55.498mV，试求被测介质的实际温度。

解 由 B 分度表可以查得 $E(30, 0) = 1.801\text{mV}$ ，则

$$E(t, 0) = E(t, 30) + E(30, 0) = 55.498 + 1.801 = 57.299 \text{ (mV)}$$

再查 B 分度表得到 57.299mV 介于 750℃ 对应的 57.083mV 和 760℃ 对应的 57.873mV 之间，利用插值可以得到被测介质的实际温度为 753℃。

(3) 冰浴法。保持冷端温度为 0℃ 的方法是把冷端经补偿导线延伸后，放在盛有绝缘油的试管中，该试管置于装有冰水混合物的容器中，冷端则可保持在 0℃。此方法多用于实验室中。

(4) 补偿电桥法。补偿电桥法是利用不平衡电桥产生的电动势，补偿热电偶因冷端温度

变化而引起的热电动势变化值。如图 2-7 所示，利用电桥不平衡产生的 $U_{ac} \neq 0$ 补偿冷端温度， $E = 4\text{V}$ ，当冷端温度为 0℃ 时， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1\Omega$ 电桥的输出附加电势也为零，其中 R_4 为铜材料的电阻，当温度升高时， R_4 的阻值增大，不平衡电桥输出的附加电势也增大，若使输出的附加电势等于热电偶因冷端温度上升减小的电势，就可以做到完全补偿。补偿导线的参数见表 2-1。

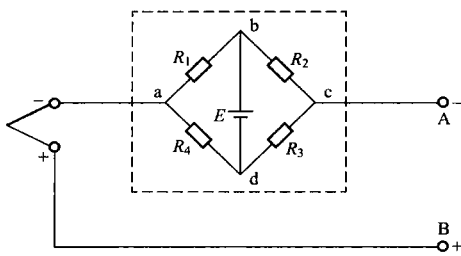


图 2-7 补偿电桥