

自动化仪表与过程控制

施 仁 刘文江 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材由高等学校《计算机与自动控制》专业教材编审委员会《自动控制》教材编审小组评审选定，并推荐出版。

本书是在电子工业出版社1984年出版的、由西安交通大学施仁、刘文江主编、上海自动化仪表研究所吴钦炜同志和华南理工大学叶乐年同志主审的《工业自动化仪表与过程控制》教材多年使用的基础上，根据《自动控制》编审小组审定的第三轮全国统编教材编写大纲，进行修改、补充、编写而成的。

本课程的参考教学时数为60学时，上、下篇各约30学时。其主要内容是：上篇为自动化仪表部分，介绍各种检测仪表、调节仪表、记录仪表、执行器、防爆栅及各种集散型数字控制仪表；下篇为过程控制部分，介绍调节对象动特性的测试、单回路及各种复杂调节系统的设计整定方法和生产过程中的应用实例。

本教材自动化仪表部分，主要以DDZ-Ⅲ型电动单元组合仪表及YS-80、CENTUM型集散型数字控制仪表为重点，介绍一些基本单元的工作原理和使用特点。关于仪表的具体构造和调校方法讨论不多，编者认为，这些内容放在实验课中解决将更为合适。本书的过程控制部分，主要讨论调节对象动特性测试和数据处理方法，以及控制系统设计和整定的一般原理，不具体针对某个部门的特定工艺过程。

本课程是自动控制专业学生在学完电子技术基础、微型计算机原理、以及自动控制理论课程后开设的后续课程。通过学习，要求学生掌握自动化仪表的基本工作原理，以及使用这些仪表组成自动控制系统的方法。

本教材由施仁编写1~4章，刘文江编写5~8章。本书在编写过程中曾广泛参考有关单位编著的各种书刊资料，在此，谨向他们表示深切的谢意。

由于编者水平有限，书中肯定存在不少缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

1990年3月

目 录

上篇 自动化仪表

自动化仪表概述	(3)
0.1 自动化仪表及其发展概况	(3)
0.2 电动单元组合仪表及其控制系统的组成	(4)
0.3 仪表的基本技术指标	(6)
第一章 检测仪表	(8)
1.1 温度检测仪表	(8)
1.1.1 测量温度的主要方法	(8)
1.1.2 热电偶	(9)
1.1.3 热电阻	(12)
1.1.4 半导体热敏电阻	(13)
1.1.5 热电偶温度变送器的基本结构	(14)
1.1.6 DDZ-III型热电偶温度变送器的实际线路	(17)
1.2 压力检测仪表	(22)
1.2.1 弹性式压力测量元件	(23)
1.2.2 力平衡式压力(差压)变送器	(24)
1.2.3 位移式差压(压力)变送器	(29)
1.2.4 固态测压仪表	(32)
1.3 流量检测仪表	(33)
1.3.1 节流式流量计	(34)
1.3.2 容积式流量计	(37)
1.3.3 涡轮流量计	(38)
1.3.4 电磁流量计	(39)
1.3.5 旋涡式流量计	(40)
1.4 液位检测仪表	(42)
1.4.1 浮力式和静压式液位计	(42)
1.4.2 电容式液位计	(43)
1.4.3 超声波液位计	(45)
1.5 成分分析仪表	(45)
1.5.1 热导式气体分析仪	(46)
1.5.2 红外线气体分析仪	(48)
1.5.3 色谱分析仪	(50)
第二章 调节器	(54)
2.1 最简单的两位式调节器	(54)
2.2 连续调节器的调节规律	(55)
2.3 PID运算电路	(57)
2.3.1 比例积分运算电路	(57)
2.3.2 比例微分运算电路	(60)
2.3.3 PID运算电路	(62)

2.3.4	只用一个放大器的PID运算电路	(64)
2.4	PID调节器的阶跃响应	(67)
2.5	PID调节器的频率特性	(71)
2.6	PID调节器的线路实例	(72)
2.6.1	输入电路	(73)
2.6.2	PID运算电路	(74)
2.6.3	输出电路	(76)
2.6.4	调节器的整机传递函数	(77)
2.6.5	手动操作电路及自动-手动切换	(81)
2.6.6	测量及给定指示电路	(82)
2.7	调节器的附加电路	(82)
2.7.1	输出限幅及抗积分饱和电路	(83)
2.7.2	前馈电路	(88)
第三章	执行器、记录仪及防爆栅	(86)
3.1	执行器	(86)
3.1.1	气动执行器	(91)
3.1.2	电-气转换器	(92)
3.1.3	阀门定位器	(95)
3.1.4	电动执行器	(97)
3.2	记录仪	(97)
3.2.1	自动平衡式记录仪的工作原理	(98)
3.2.2	电子电位差计	(102)
3.2.3	磁平衡式记录仪	(114)
3.3	防爆栅	(114)
3.3.1	安全火花防爆系统的概念	(115)
3.3.2	安全火花防爆的等级	(116)
3.3.3	防爆栅的基本工作原理	(117)
3.3.4	隔离式防爆栅	(122)
第四章	集散型数字控制仪表	(122)
4.1	数字控制仪表的发展	(123)
4.2	数字控制算法	(124)
4.2.1	基本PID的离散表达式	(125)
4.2.2	采样周期的选择	(126)
4.2.3	变形的PID控制	(129)
4.2.4	混合过程PID算法	(130)
4.2.5	字长的考虑	(130)
4.3	单回路可编程序控制器	(131)
4.3.1	SLPC型可编程序控制器的电路	(135)
4.3.2	单回路控制器的工作节拍	(136)
4.3.3	用户程序结构及数据格式	(138)
4.3.4	运算模块	(146)
4.3.5	控制模块及编程	(158)
4.3.6	程序的写入和调试	(159)
4.4	集散控制系统	(160)
4.4.1	集散控制系统的组成	(160)

4.4.2 现场控制站的功能	(164)
4.4.3 操作站的功能	(171)

下篇 过程控制

第五章 调节对象的特性及实验测定	(179)
5.1 单容对象动特性及其数学描述	(179)
5.1.1 水槽水位的动特性	(179)
5.1.2 对象的自衡特性	(181)
5.2 多容对象的特性、容量滞后、纯滞后	(183)
5.2.1 双容对象的特性	(183)
5.2.2 纯滞后	(184)
5.3 对象特性的实验测定、时域法	(184)
5.3.1 实验测定方法概述	(184)
5.3.2 测定动态特性的时域方法	(185)
5.4 测定动态特性的频域方法	(191)
5.4.1 正弦波方法	(191)
5.4.2 频域特性的相关测试法	(192)
5.4.3 闭路测定法	(194)
5.5 测定动态特性的统计方法	(194)
5.5.1 平稳随机过程、相关函数、功率密度谱	(195)
5.5.2 相关分析法识别对象动态特性的原理	(198)
5.5.3 伪随机信号	(201)
5.5.4 伪随机序列的产生方法及其性质	(202)
5.5.5 用M序列信号测定对象的动态特性	(204)
第六章 单回路调节系统的设计及调节器参数整定方法	(213)
6.1 概述	(213)
6.2 对象动特性对调节质量的影响及调节方案的确定	(215)
6.2.1 干扰通道动特性对调节质量的影响	(215)
6.2.2 调节通道动特性对调节质量的影响	(217)
6.2.3 调节方案的确定	(218)
6.3 调节规律对系统动特性的影响、调节规律的选择	(220)
6.3.1 在干扰作用下双容对象的比例调节	(221)
6.3.2 系统调节性能指标、PI、PD 调节作用分析	(224)
6.3.3 调节规律的选择	(230)
6.4 调节器参数的实验整定方法	(231)
6.4.1 稳定边界法	(231)
6.4.2 反应曲线法	(232)
6.4.3 衰减曲线法	(233)
6.4.4 三种整定方法的比较	(234)
第七章 复杂调节系统	(236)
7.1 串级调节系统	(236)
7.1.1 串级调节系统的组成	(236)

7.1.2	串级调节系统的特点和效果分析	(238)
7.1.3	调节器的选型和整定方法	(241)
7.2	比值调节系统	(242)
7.2.1	比值调节系统的组成原理	(242)
7.2.2	比值调节系统的整定	(244)
7.3	均匀调节系统	(246)
7.3.1	均匀调节系统的组成	(246)
7.3.2	调节器的选型和整定	(247)
7.4	前馈调节系统	(249)
7.4.1	前馈控制的工作原理	(250)
7.4.2	扰动补偿规律及其局限性	(251)
7.4.3	复合调节系统的特性分析	(252)
7.4.4	复合调节系统参数的选择	(254)
7.4.5	自治调节系统	(256)
第八章	自动调节系统在生产过程中的应用举例	(261)
8.1	石油加工蒸馏装置的仪表控制系统	(261)
8.1.1	石油加工中的仪表控制系统概要	(261)
8.1.2	蒸馏塔的仪表控制系统	(261)
8.2	钢铁工业中加热炉的仪表控制系统	(268)
8.2.1	钢铁生产过程概要	(268)
8.2.2	加热炉的燃烧控制	(270)
8.2.3	燃烧控制的串级比值调节系统	(272)
8.2.4	交叉限幅并联副回路的串级调节	(272)
8.3	锅炉的自动调节系统	(276)
8.3.1	汽包水位的调节	(277)
8.3.2	燃烧过程的调节	(281)
8.3.3	锅炉控制系统举例	(284)
主要参考书	(286)

上篇 自动化仪表

自动化仪表概述

0.1 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。本课程要讨论的不是这些通用仪表，而是讨论生产自动化中，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，称为自动化仪表。其中包括对工艺参数进行测量的检测仪表、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生产装置的物料或能量进行控制的执行器等。这些仪表代替人们对生产过程进行测量、控制、监督和保护，因而是自动控制系统的必要组成部分。

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、性能优良的自动控制系统。

自动化仪表作为一类专门的仪表，最早出现于本世纪40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而得的。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。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。在使用中可以根据需要，选择一定的单元，积木式地把仪表组合起来，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，还是对用户的维修选用都是有利的。此外，仪表划分为单元后，控制屏上可以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，大多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，由于基地式仪表结构紧凑，价格便宜，仍有一定的应用。

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、气动等仪表。其中气动仪表的出现比电动仪表早，而且价格便宜，结构简单，特别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60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、小电流时，可在电路上及结构上采取严密措施，限制进入易燃易爆场所的能量，从而保证在生产现场不会发生足以引起燃烧或爆炸的“危险火花”。这样，限制电动仪表使用的一个主要障碍被扫除，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及数字控制仪表。

0.2 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：60年代中期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；70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80年代初开始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)三字的第一个字母的组合。这三代产品虽然电路形式和信号标准不同，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，其它产品便不难分析。因此，在后面的章节中，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。

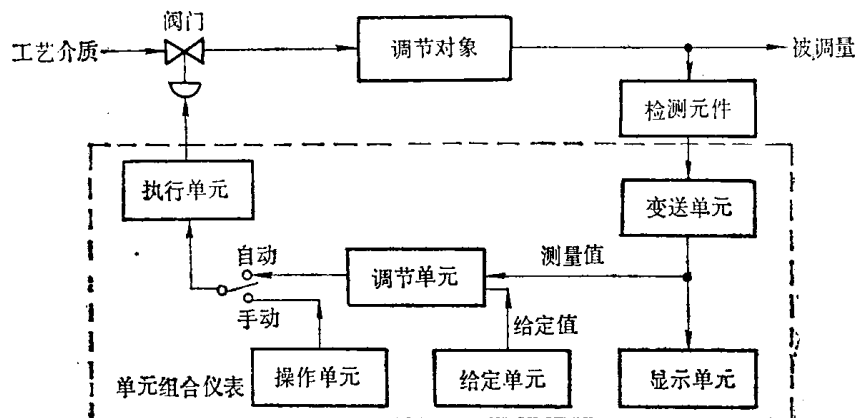


图 0-1 用电动单元组合仪表构成的调节系统

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，被调量一般是非电的工艺参数，如温度、压力等，必须经过一定的检测元件，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，一般不能直接驱动显示和调节仪表，必须经过放大或再一次的能量转换，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、乘方、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，采用目前国际上统一^①的4~20毫安直流电流作为标准信号。这两种标准都以直流电流作为联络信号。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可以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，只要在电流回路中串联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20mA表示信号的满度值，而以此满度值的20%即4mA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，变送器内部要消耗一定的电流，用零电流表示零信号是无法实现两线制的。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，受到普遍的欢迎和广泛的应用。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这种信号标准是可以理解的。

在上述信号标准里，从安全防爆、减少损耗、节省能量考虑，信号电流的满度值都希望选小一些。但太小也有困难，因为对力平衡式仪表，电流小了，产生的电磁力也小，不

^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4~20mA，电压信号为直流1~5V，我国的DDZ-III型仪表规定，现场传输信号用4~20mA DC，控制室内各仪表间的联络信号用1~5V DC。

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，必然同时降低起点电流的数值。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。

0.3 仪表的基本技术指标

自动化仪表和其它仪表一样，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！

模拟式仪表的合理精确度，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为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。仪表的精确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，单纯提高仪表的灵敏度并不一定能提高仪表的精确度，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确度反而下降。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，其输出的重复性和稳定性越好。

仪表除静态误差外，在输入量随时间变化时，由于仪表内部的惯性和滞后，还存在动态误差。对自动化仪表来说，因为它工作在调节系统的闭环之中，其动态特性不仅影响自身的输出，还直接影响整个调节系统的调节质量。例如，在一个调节系统中，若检测仪表的惯性比调节对象的惯性还大，那么不仅系统的调节速度被减慢，而且在过渡过程中检测仪表不能及时反映真实的情况；被调量可能存在很大的冲击和波动，但检测仪表的指示却很平稳，这种虚假的现象会给生产造成严重的损失。因此，在研制和选用自动化仪表时，必须对其动态特性予以充分的重视，根据需要，尽量减小仪表的惯性和滞后，使之快速和准确地响应输入量的变化。

第一章 检测仪表

各种不同的部门在实现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，要把所有的工艺参数检测方法都讨论是不可能的，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，说明目前采用的主要检测手段和达到的技术水平，介绍组成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，为今后掌握其它检测仪表打下基础。

1.1 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，有根据热胀冷缩而使长度变化做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。

非接触式测温仪表是根据物体发出的热辐射测量物体温度。常见的有根据物体在高温

时的发光亮度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，辐射温度计是唯一可用的测温仪表。近年来红外线测温技术的发展，使辐射测温方法由可见光向红外线扩展，对700℃以下不发射可见光的物体也能应用，使非接触测温下限向常温扩展，可用于低到0℃左右的温度测量，且分辨率很高。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，且测温速度快，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。

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闭合回路时，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，这一热电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，那么在开始接触的瞬间，从A向B扩散的电子数目将比B向A扩散的多，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，在温度不同的两个接点上，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 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它种类的导体。下面我们研究一

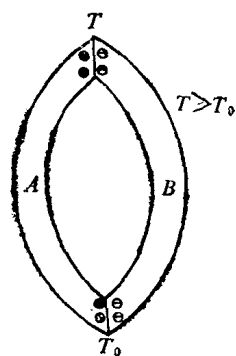


图 1-1 热电偶的原理

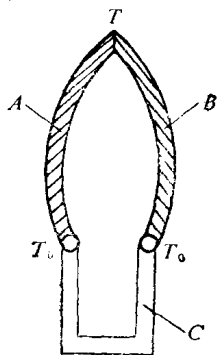


图 1-2 热电偶回路中插入第三种导体的情形

下，插入另一种导体是否影响热电势的数值。在图1-2中，除热电偶两种材料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T₀，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T = T₀，则由热力学第二定律可推断，此时总电势E必为零。因为如果有电势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：

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

所以

$$e_{BC}(T_0) + e_{CA}(T_0) = -e_{AB}(T_0) \quad (1-4)$$

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的意义。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。

下面讨论热电偶的材料。原则上说，随便两种不同的导体焊在一起，都会出现热电势。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。

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) μV/℃	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	10	精度高，性能稳定，价格贵，宜在氧化及中性气氛中使用	
铂铑10-铂 LB-2	正极铂90%，铑10% 负极铂100%	1300	1600	10	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	40	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	正极同镍铬-镍硅 负极镍94%，铝硅锰5%	1000	1300	40	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	正极同镍铬-镍硅 负极铜56%，镍44%	600	300	80	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	50	最便宜，但铜易氧化，常用来测量-100℃~+100℃间温度	