



高职高专“十二五”规划教材

化工检测 过程控制

李小玉 周寅飞 主编

HUAGONG JIANCE JI
GUOCHENG KONGZHI



化学工业出版社

高职高专“十二五”规划教材

化工检测及过程控制

李小玉 周寅飞 主 编
曾雪珍 赵 晶 周润堂 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书是根据高职高专院校、应用型本科院校专业教学的特点，基于工作过程导向的项目化教学模式，参考国家相关职业资格标准，重构教学内容体系。旨在服务全国高职高专“化学工程与工艺”、“过程控制”类专业，建立依托“项目”的教学做一体化学习过程。

全书通过“自动检测系统”、“简单控制系统”、“复杂控制系统”、“集散控制系统”、“典型过程控制工程”五个项目的学习和实施使学生掌握化工检测及控制、执行类仪表和常见过程控制方案、控制工程的相关知识，并培养学生正确构建和运行上述四大系统的能力，最后通过一个综合工程可使学生对过程控制获得一个整体的认识和全面的感悟。

本书按照由浅入深、由易到难重构和序化项目内容。最大特色是各项目资讯材料丰富，实践环节具体，很适合教师采用任务驱动方式教学。

本书可作为高职院校化工、食品、制药、环境、轻工、生物等工艺类专业以及相关专业的教材，亦可作为相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工检测及过程控制/李小玉 周寅飞主编. —北京:
化学工业出版社, 2012. 7
高职高专“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-14463-8

I. 化… II. ①李…②周… III. ①化工仪表-检测
仪表-高等职业教育-教材②化工过程-过程控制-高等职业
教育-教材 IV. ①TQ056②TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 121175 号

责任编辑: 旷英姿
责任校对: 吴 静

文字编辑: 孙 科
装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 3/4 字数 440 千字 2012 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

伴随着科学技术的迅猛发展，自动化技术已广泛地应用于石油、化工、制药、冶金、电力、轻工、机械、生物、环境等许多国民经济的重要领域。要实现生产过程的自动化，不但需要自动化专业人员，还需要有各类工艺专业人员和设备设计与管理人士的配合。因此，广大的工艺生产及管理人士有必要学习和掌握必要的检测技术及过程控制方面的知识。本书是根据高职高专院校、应用型本科院校专业教学的特点，基于工作过程导向的项目化教学模式，参考国家相关职业资格标准，组织教学内容体系。按照由浅入深、由易到难重构和序化项目内容。

全书通过五个学习领域项目的学习和实施使学生掌握化工检测及控制、执行类仪表和常见过程控制方案、控制工程的相关知识，并培养学生正确构建和运行上述四大系统的能力，最后通过一个综合工程可使学生对过程控制获得一个整体的认识和全面的感悟。具体内容：项目一为自动检测系统，重点学习各类（温度、压力、流量、物位、成分等）检测变送仪表、显示仪表的基本知识和训练调试仪表及搭建自动检测系统的能力；项目二为简单控制系统，重点学习控制仪表、执行器及简单控制系统、PID 控制规律方面的基本知识和训练搭建运行简单控制系统的能力；项目三为复杂控制系统，重点学习串级、前馈、比值、均匀、分程、选择等常见复杂控制系统的基本知识和训练搭建运行复杂控制系统的能力；项目四为集散控制系统，重点学习集散控制系统软硬件方面的基本知识和训练搭建运行甲醛生产线集散控制系统的能力；项目五为典型过程控制工程，重点学习典型化工单元操作的控制方案和训练设计及搭建带搅拌反应釜成套控制系统的能力。最大特色是各项目资讯材料丰富，实践环节具体，很适合教师采用任务驱动方式教学。

本书由中山火炬职业技术学院李小玉及扬州工业职业技术学院周寅飞主编。详细编写分工如下：李小玉编写项目一的情境四，项目二所有的六个情境，项目三所有的两个情境；周寅飞编写项目五所有的五个情境；江西应用职业技术学院曾雪珍老师编写项目一的情境一、二、三；中信房地产股份有限公司周润堂工程师编写项目四的情境一；浙江中控有限责任公司赵晶工程师编写项目四的情境二、三。本书是中山火炬职业技术学院教材编写项目的研究成果，学院各级领导对本书的编写给予了大力支持。在此，对各位专家、教授和领导表示衷心感谢。本书的编写参考了大量文献和资料，在此对有关单位和作者一并致谢，参考部分版权归原作者。

本书可作为高职院校、应用型本科院校化工、食品、制药、环境、轻工、生物等工艺类专业以及相近专业的教材，亦可作为相关工程技术人员参考用书。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请广大师生和读者批评指正。

李小玉

2011 年 3 月 12 日

目 录

项目一 自动检测系统	1
学习情境一 测量仪表性能	1
学习情境二 四大参数测量仪表	6
任务一 温度测量	6
任务二 压力测量	13
任务三 流量测量	22
任务四 物位测量	31
学习情境三 成分测量仪表	39
任务一 理化成分测量	39
任务二 生化成分测量	49
学习情境四 自动检测系统集成	55
任务一 自动检测系统的组成	56
任务二 利用 R1000 无纸记录仪搭建自动测量系统	60
思考与练习	69
项目二 简单控制系统	72
学习情境一 过程控制系统概述	72
任务一 控制系统的组成	72
任务二 控制系统过渡过程及质量评价	77
任务三 工艺管道及控制流程图	80
学习情境二 被控对象	85
学习情境三 控制规律及参数整定	89
任务一 PID 控制规律	89
任务二 控制器参数的工程整定方法	93
思考与练习	96
学习情境四 过程控制器	96
任务一 DDZ-Ⅲ型控制器	96
任务二 可编程数字控制器	100
学习情境五 执行器	109
任务一 执行器的认知	109
任务二 调节阀的流量特性及选型	118
学习情境六 简单控制系统的集成与投运	124
任务一 简单控制系统的设计	124
任务二 利用 C3000 过程控制器集成简单控制系统	130
思考与练习	148
项目三 复杂控制系统	151
学习情境一 复杂控制系统	151

任务一 串级控制系统	151
任务二 前馈控制系统	155
任务三 比值控制系统	157
任务四 均匀控制系统	159
任务五 分程控制系统	162
任务六 选择控制系统	164
学习情境二 复杂控制系统的集成与投运	165
任务一 复杂控制系统的设计	165
任务二 利用 C3000 过程控制器集成复杂控制系统实例	169
思考与练习	175
项目四 集散控制系统 (DCS)	177
学习情境一 DCS 控制系统	177
任务一 DCS 概述	177
任务二 DCS 的体系结构	184
学习情境二 JX-300XP 集散控制系统	194
学习情境三 利用 JX-300XP 搭建甲醛生产 DCS 控制系统	201
思考与练习	228
项目五 典型过程控制工程	230
学习情境一 流体输送设备的控制	230
任务一 泵的常规控制	230
任务二 压缩机的控制	233
任务三 压缩机的防喘控制	234
学习情境二 传热设备的控制	236
任务一 普通传热设备控制	237
任务二 锅炉设备控制	241
学习情境三 精馏塔控制方案	249
任务一 精馏工艺控制	250
任务二 精馏塔被控变量的选择	252
任务三 精馏塔整体控制方案	254
学习情境四 反应器的控制	258
任务一 化学反应器的类型和控制要求	259
任务二 化学反应器控制方案	263
学习情境五 发酵过程控制方案	266
任务一 发酵过程及控制要求	266
任务二 常见生化过程控制简介	270
思考与练习	271
附录	272
附录一 常用弹簧管压力表	272
附录二 热电偶分度表	272
参考文献	275

项目一 自动检测系统

一切科学都建立在精确的数据上，自然科学是如此，人文科学也是如此。而精确数据的获得依靠的就是检测。检测水平的高低直接反映一个国家科学水平的高低。

在化工、石油以及化学制药等生产过程中，为了有效地进行生产操作和自动调节，需要对工艺生产中的压力、流量、物位、温度、物质成分等参数进行自动测量。用来测量这些参数的仪表称为检测仪表。检测仪表种类繁多，结构复杂，因而分类方法也不少。依据所测参数的不同，可分成压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、温度检测仪表、物质成分分析仪表及物性检测仪表等。

学习情境一 测量仪表性能

一、测量误差

在测量过程中，由于所使用的测量工具本身不够准确、观测者的主观性和周围环境的影响等，使得测量的结果不可能绝对准确。由仪表读得的被测值（测量值）与被测参数的真实值之间，总是存在一定的差距，这种差距就称为测量误差。按产生的原因不同，可将测量误差分为三大类。第一类是系统误差。其产生的原因主要有仪表本身的缺陷，观测者的习惯或偏向，外界因素环境条件的变化等。由于这种误差是有一定规律的，其大小和方向（即符号）均不随测量过程而改变，所以在测量过程中是容易消除或加以修正的。第二类是疏忽误差。它是由于测量者在测量过程中疏忽大意所致的。它比较容易被发觉，并应将它从测量结果中去掉。只要在测量过程中认真、仔细，就可以避免产生这类误差。第三类是偶然误差。它是由于一些随机的偶然原因引起的，亦称随机误差。偶然误差的大小反映了测量过程的精度。

测量误差通常有两种表示方法，即绝对误差和相对误差。

1. 绝对误差

在理论上，绝对误差是指仪表指示值 x_1 和被测量的真实值 x_t 之间的差值，可表示为

$$\Delta = x_1 - x_t$$

在工程上，要知道被测量的真实值 x_t 是困难的。因此，所谓检测仪表在其标尺范围内各点读数的绝对误差，一般是指用被校表（准确度较低）和标准表（准确度较高）同时对同一参数测量所得到的两个读数之差，可用下式表示

$$\Delta = x - x_0$$

式中， Δ 为绝对误差； x 为被校表的读数； x_0 为标准表的读数。

2. 相对误差

某一被测量的相对误差等于这一点的绝对误差 Δ 与它的真实值 x_t （或 x_0 ）之比。可用下面式子表示：

$$\Lambda = \frac{\Delta}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0} \quad \text{或} \quad \frac{x_1 - x_t}{x_t}$$

式中, Δ 为仪表在 x_0 处的相对误差。

二、仪表性能指标

一台仪表的优劣, 可用它的性能 (品质) 指标来衡量。几项常见的性能指标如下。

1. 精度

仪表的精确度 (准确度) 简称精度, 反映了仪表测量值接近真值的准确程度。一般用相对百分误差来表示。相对百分误差是仪表的绝对误差与该表量程的百分比, 即

$$\delta = \frac{\Delta_{\max}}{\text{仪表量程}} \times 100\% = \frac{\Delta_{\max}}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\%$$

式中, δ 为仪表的相对百分误差; $\Delta_{\max}$ 为仪表的最大绝对误差; 仪表量程为标尺上限值与下限值之差。

仪表的精确度通常用精度等级来表示。精度等级就是仪表的最大百分误差去掉“±”和“%”后的数字, 但必须与国家标准相统一。我国统一的仪表精度等级有 0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 等。精度通常以圆圈或三角内的数字标注在仪表面板上, 如 $\overline{0.5}$ 、 $\triangle 1.0$ 等。

仪表准确度等级是衡量仪表质量优劣的重要指标之一。一般数值越小, 说明仪表的精确度越高, 其测量结果越准确。精确度等级表明了该仪表的最大百分误差不能超过的界限。如果某仪表为 A 级精度, 则表明该仪表最大百分误差不能超过 $\pm A\%$ 。在选表和仪表校验后重新定级时应予注意。

【例 1.1.1】 某台测量仪表的测温范围为 $200 \sim 700^\circ\text{C}$, 仪表的最大绝对误差为 $\pm 4^\circ\text{C}$, 试确定该仪表的相对百分误差与准确度等级。

解: 仪表的相对百分误差为

$$\delta = \frac{\pm 4}{700 - 200} \times 100\% = \pm 0.8\%$$

如果将仪表的 δ 去掉“±”和“%”, 其数值为 0.8。由于国家规定的精度等级中没有 0.8 级仪表, 同时, 该仪表的误差超过了 0.5 级所允许的最大误差, 所以, 这台测温仪表的精度等级为 1.0 级。

2. 变差

在相同使用条件下, 同一仪表对同一被测变量进行正行程 (即被测参数逐渐由小到大和逐渐由大到小) 测量时, 仪表正、反行程指示值之间存在的最大差值称为该仪表的变差或回差。造成变差的原因很多, 例如传动机构的间隙、运动件间的摩擦、弹性元件弹性滞后的影响等。变差的大小, 用仪表测量同一参数值, 正、反行程指示值间的最大绝对差值与仪表标尺范围之比的百分数表示 (如图 1.1.1 所示), 即

$$\text{变差} = \frac{\text{最大绝对差值}}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\%$$

必须注意, 仪表的变差不能超出仪表的允许误差, 否则应及时检修。

3. 灵敏度

灵敏度是反映仪表对被测变量变化灵敏程度的指标。当仪表达到稳态时, 仪表输出信号变化量 $\Delta\alpha$ 与引起此输出信号变化的输入信号 (被测参数) 变化量 Δx 之比表示灵敏度 S 。即:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x}$$

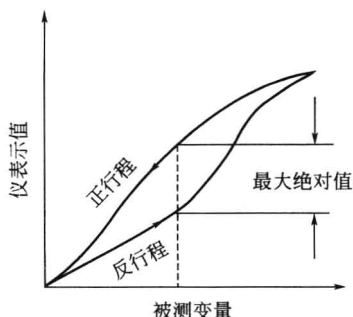


图 1.1.1 变差

所以，仪表的灵敏度，在数值上就等于单位被测参数变化量所引起的仪表指针移动的距离（或转角）。例一台测量范围为 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的测量仪表，其标尺长度为 20mm ，则其灵敏度 S 为 $0.2\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ ，即温度每变化 1°C ，指针移动了 0.2mm 。

仪表的灵敏限是指引起仪表指针发生动作的被测参数的最小变化量。通常仪表灵敏限的数值不大于仪表允许绝对误差的一半。

值得注意的是，上述指标仅适用于指针式仪表。在数字式仪表中，往往用分辨率来表示仪表灵敏度（或灵敏限）的大小。

4. 线性度

线性度用来说明输出量与输入量的实际关系曲线偏离直线的程度。通常人们总是希望检测仪表的输出与输入之间呈线性关系。因为在线性情况下，模拟式仪表的刻度就可以做成均匀刻度，而数字式仪表就可以不必采取线性化措施。此外，当线性的检测仪表作为控制系统的一个组成部分时，往往可以使整个系统的分析设计得到简化。

线性度通常用实际测得的输入-输出特性曲线（称为标定曲线）与理论拟合直线之间的最大偏差与检测仪表满量程输出范围之比的百分数来表示（如图 1.1.2 所示），即

$$\delta f = \frac{\Delta f_{\max}}{\text{仪表量程}} \times 100\%$$

式中， δf 为线性度（又称非线性误差）； $\Delta f_{\max}$ 为标定曲线对于理论拟合直线的最大偏差（以仪表示值的单位计算）。

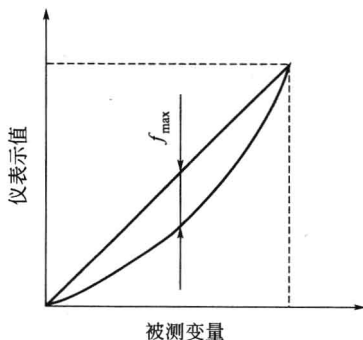


图 1.1.2 线性度

5. 测量范围与量程

测量仪表的测量范围是指按其标定的精确度可进行测量的被测量的变化范围，而测量范

围的上限值 $y_{\max}$ 与下限值 $y_{\min}$ 之差就是仪表的量程 y_m ，即

$$y_m = y_{\max} - y_{\min}$$

有的测量仪表一旦过载（即被测量超出测量范围）就将损坏，而有的检测仪表允许一定程度的过载，但过载部分不作为测量范围，这一点在使用中要注意。

【例 1.1.2】 测量一个约 80V 的电压，现有两台电压表：一台量程 300V、0.5 级，另一台量程为 100V、1.0 级。问选用哪一台为好？

解：如果使用 300V、0.5 级表，其可能的最大相对误差为

$$\Delta = \frac{300 \times 0.5\%}{80} \times 100\% \approx 1.88\%$$

如使用 100V、1.0 级表，其可能的最大相对误差为

$$\Delta = \frac{100 \times 1.0\%}{80} \times 100\% \approx 1.25\%$$

可见，1.0 级精度等级的仪表没有 0.5 级精度等级的仪表高，但由于仪表量程的原因，具体测量一个约 80V 的电压，选用 1.0 级表测量的精度反而比选用 0.5 级表为高。结论是选用 100V、1.0 级的表为好。

此例说明，选用仪表时不应只看仪表的精度等级，还应根据被测量的大小综合考虑仪表的等级与量程。

6. 稳定性

稳定性是指测量仪表在规定的条件下保持其检测特性恒定不变的能力。

三、测量仪表的一般组成

1. 检测仪表的构成

在现代的自动测量系统（检测仪表）中，它的各个组成部分可以先借助“信息流的过程”来粗线条地划分。一般可以分为：信息的获得、信息的转换和信息的显示三部分。因此作为一个完整的自动测量系统，至少应包括传感器（信息的获得）、测量电路（信息的运算、放大、处理和转换）、显示装置（信息的显示）3 个基本组成部分。它们之间的关系可用图 1.1.3 来表示。

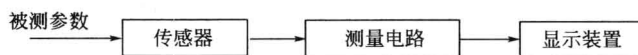


图 1.1.3 检测仪表的构成

传感器是一个获取被测量的装置，是一种获得信息的手段。它获得信息的正确与否，关系到整个测量系统的精度。如果传感器的误差很大，后面的测量电路、显示装置等的精度再高也将难以提高整个测量系统的精度。因此，传感器在自动测量系统中占有重要的地位。

测量电路的作用是把传感器的输出信号（往往是电信号）放大、处理或转换使信号能在显示仪表上指示或在记录仪中记录下来。测量电路的种类常由传感器的类型而定，如电阻式传感器需采用一个电桥电路把电阻值变换成电流或电压输出，所以它属于信号的转换部分。为了能驱动显示仪表工作或记录机构运动，对测量电路的输出信号有一定的要求，所以在测量电路中一般还带有放大器将信号加以放大。

测量的目的是使人们了解要测的数值，所以必须有显示装置，这就是信息的显示。显示的方式，目前常用的有三类：模拟显示、数字显示和图像显示。模拟显示就是利用指针对刻度标尺的相对位置来表示读数；数字显示实际上是直接用数字来表示读数。图像显示是用屏

幕显示读数或者被测参数变化的二维曲线图。

在工程上往往称传感器、变送器为“一次仪表”，检测系统或检测仪表为“二次仪表”。各种检测仪表的用途、名称、型号、性能虽然各不相同，但差别仅在于仪表的前端即配用的传感器和测量线路有所不同，传感器以后的仪器部分及其设计方法基本上都是相同的。

2. 传感器的构成

能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置称为传感器，所以在测量过程中一般都会用到传感器，或选用相应的变送器等。传感器通常由敏感元件和转换元件组成。如图 1.1.4 所示。

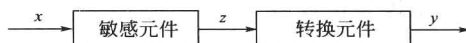


图 1.1.4 传感器

一般传感器是指借助于敏感元件接受某一物理量形式的信息 x ，并按一定规律将它转换成同种或另一种物理量形式信息 y 的器件或装置。变送器是输出为标准信号的传感器。输出 y 和输入 x 之间有确切的函数关系，即

$$y=f(x)$$

图 1.1.3 中，敏感元件是对被测参数 x 敏感，它的输出设为 z ， z 有可能是一种不易处理的物理量形式，不一定能被后继的线路所利用。此时就必须在敏感元件后配以相应的转换元件，该转换元件的输出是易于处理的、能被后继的线路所利用的电信号（例如电压、电流、电阻等）。它具有精度高、动态响应快、易于运算放大、易于远距离传送、易于和计算机接口等优点。

通常还要进一步对输出的电信号进行处理，转换成标准统一信号（例如：直流 4~20mA 或 1~5V 或其他国家标准规定的信号等）时，此时的传感器一般称为变送器。

当今信息处理技术取得的进展以及微处理器和计算机技术的高速发展，在传感器的开发方面也日新月异。微处理器现在已经在测量和控制系统中得到了广泛的应用。随着这些系统能力的增强，作为信息采集系统的前端单元，传感器的作用越来越重要。传感器已成为自动化控制系统和机器人等技术中的关键部件，其重要性变得越来越明显。

四、仪表选型的一般规律

1. 仪表类型的选用

仪表类型的选用必须满足工艺生产的要求。例如是否需要远传变送、自动记录或报警；被测介质的物理化学性质（诸如腐蚀性、温度高低、黏度大小、脏污程度、易燃易爆等）是否对测量仪表提出特殊要求；现场环境条件（诸如高温、电磁场、振动及现场安装条件等）对仪表类型是否有特殊要求等。总之，根据工艺要求正确选用仪表类型是保证仪表正常工作及安全生产的重要前提。例如普通压力计的弹簧管多采用铜合金，高压的也有采用碳钢的，而氨用压力计弹簧管的材料却都采用碳钢的，不允许采用铜合金的。因为氨气对铜的腐蚀性极强，所以普通压力计用于氨气压力测量很快就要损坏。

2. 仪表测量范围的确定

仪表的测量范围是指被测量可按规定精确度进行测量的范围，它是根据操作中需要测量的参数大小来确定的。被测参数不同，测量范围的确定方法不同。四大参数（温度、压力、流量、液位）测量范围的确定通常如下。

(1) 温度测量仪表正常使用温度应为量程的 50%~70%，最高测量值不应超过量程的 90%。

(2) 测量稳定压力时，正常操作压力应为量程的 $1/3 \sim 2/3$ ；

测量脉冲压力时，正常操作压力应为量程的 $1/3 \sim 1/2$ ；

测量压力大于 4MPa 时，正常操作压力应为量程的 $1/3 \sim 3/5$ 。

(3) 流量计分方根刻度范围和线性刻度范围：①方根刻度范围，最大流量不超过满刻度的 95%；正常流量为满刻度的 70%~85%；最小流量不小于满刻度的 30%；②线性刻度范围：最大流量不超过满刻度的 90%；正常流量为满刻度的 50%~70%；最小流量不小于刻度的 10%。

(4) 一般应使正常液位处于仪表量程的 50%左右。

五、自动化仪表技术发展趋势

工业控制系统中的检测技术和仪表系统，是实现自动控制的基础。随着新技术的不断涌现，特别是先进检测技术、现代传感器技术、计算机技术、网络技术和多媒体技术的出现，给传统式的控制系统甚至计算机控制系统都带来了极大的冲击，并由此引出许多新技术的发展。归纳起来，这些发展包括：①成组传感器的复合检测；②微机械量检测技术；③智能传感器的发展；④各种智能仪表的出现；⑤计算机多媒体化的虚拟仪表；⑥传感器、变送器和调节器的网络化产品。

对工业检测仪表控制系统来说，以上的发展还远不是终点。由这些发展所产生的更深层次的变化正在悄然兴起，并越来越得到了各行各业的认同。这些深层次的变化包括：①控制系统的控制网络化；②控制系统的系统扁平化；③控制系统的组织重构化；④控制系统的工作协调化。

如何针对检测技术和仪表系统提出一系列新的概念和必要的理论，以面对高新技术的挑战，并适应当今自动化技术发展的需要，是目前亟待解决的关键问题。

学习情境二 四大参数测量仪表



任务一 温度测量

一、概述

温度是表征物体冷热程度的物理量，是工业生产和科学实验中最普遍、最重要的热工参数之一。物体的许多物理现象和化学性质都与温度有关，大多数生产过程均是在一定温度范围内进行。

测量温度的方法很多，按照测量体是否与被测介质接触，可分为接触式测温法和非接触式测温法两大类。

(1) 接触式测温法的特点是测温元件直接与被测对象相接触，两者之间进行充分的热交换，最后达到热平衡，这时感温元件的某一物理参数的量值就代表了被测对象的温度值。这种测温方法优点是直观可靠，缺点是感温元件影响被测温度场的分布、接触不良等都会带来测量误差，另外温度太高和腐蚀性介质对感温元件的性能和寿命会产生不利影响。

(2) 非接触式测温法的特点是感温元件不与被测对象相接触，而是通过辐射进行热交换，故可避免接触式测温法的缺点，具有较高的测温上限。此外，非接触式测温法热惯性

小,可达 $1/1000\text{s}$,故便于测量运动物体的温度和快速变化的温度。由于受物体的发射率、被测对象到仪表之间的距离以及烟尘、水汽等其他介质的影响,这种测温方法一般测温误差较大。各种温度计的优缺点和使用范围见表 1.2.1。

表 1.2.1 各种温度计的优缺点和使用范围

型式	温度计种类	优点	缺点	使用范围/ $^{\circ}\text{C}$
接触式温度计	玻璃液体温度计	结构简单、使用方便、测量准确、价格低廉	容易破损、读数麻烦、一般只能现场指示,不能记录与远传	$-100\sim 100(150)$ 有机液体 $0\sim 350(-30\sim 650)$ 水银
	双金属温度计	结构简单、机械强度大、价格低、能记录、报警与自控	精度低、不能离开测量点测量,量程与使用范围均有限	$0\sim 300(-50\sim 600)$
	压力式温度计	结构简单、不怕振动、具有防爆性、价格低廉、能记录、报警与自控	精度低、测量距离较远时,仪表的滞后性较大、一般离开测量点不超过 10m	$0\sim 500(-50\sim 600)$ 液体型 $0\sim 100(-50\sim 200)$ 蒸汽型
	电阻温度计	测量精度高,便于远距离、多点、集中测量和自动控制	结构复杂、不能测量高温,由于体积较大,测点温度较困难	$-150\sim 500(-200\sim 600)$ 铂电阻 $0\sim 100(-50\sim 150)$ 铜电阻 $-50\sim 150(180)$ 镍电阻 $-100\sim 200(300)$ 热敏电阻
	热电偶温度计	测温范围广,精度高,便于远距离、多点、集中测量和自动控制	需冷端温度补偿,在低温段测量精度较低	$-20\sim 1300(1600)$ 铂铑 ₁₀ -铂 $-50\sim 1000(1200)$ 镍铬-镍硅 $-40\sim 800(900)$ 镍铬-铜镍 $-40\sim 300(350)$ 铜-铜镍
非接触式温度计	光学温度计	携带用、可测量高温、测温时不破坏被测物体温度场	测量时,必须经过人工调整,有人为误差,不能作远距离测量,记录和自控	$900\sim 2000(700\sim 2000)$
	辐射温度计	测温元件不破坏被测物体温度场,能作远距离测量、报警和自控、测量范围广	只能测高温,低温段测量不准,环境条件会影响精度,连续测高温时须作水冷却或气冷却	$100\sim 2000(500\sim 2000)$

二、热电偶温度计

热电偶温度计的测温范围很广,可测量生产过程中 $0\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度,在特殊情况下,可测至 2800°C 的高温或 4K 的低温。这类仪表结构简单、使用方便、测温准确可靠、便于远传、自动记录和集中控制,因而在化工生产中应用极为普遍。

1. 热电偶测温原理

热电偶温度计是以热电效应为基础将温度变化转换为热电势变化进行温度测量的仪表。根据经典电子理论,由两种不同的金属导体 A 和 B 组成闭合回路,如果两个接触点的温度不同,高温接触点 1 的温度为 t ,冷端接触点 0 的温度为 t_0 ,那么两个接触点的接触电势差分别为 $E(t)$ 和 $E(t_0)$,它们大小不等,方向相反,如图 1.2.1 所示。此闭合回路形成的热电势 $E(t, t_0)$ 应等于两个接触点的接触电势差代数和。

如果冷端接触点的温度已知,并且保持不变,热电势 $E(t, t_0)$ 就是被测温度的单值函数。这就是热电偶的测温原理。只有将冷端温度保持不变,或者进行一定补偿修正才能得到准确的测量结果。

2. 热电偶温度计的组成

图 1.2.2 是热电偶测温系统的简单示意图,它主要由三部分组成:热电偶(AB)是系

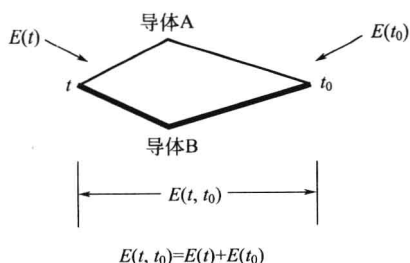


图 1.2.1 热电偶测温

统中的测温元件；检测仪表（毫伏计）是用来检测热电偶产生的热电势信号的，可以采用动圈式仪表或电位差计；补偿导线用来连接热电偶与检测仪表，为了提高测量精度，一般都要考虑冷端温度补偿。下面分别对这三部分作简单的介绍。

(1) 热电偶型号 在热电偶测温系统中，热电偶是必不可少的测温元件，它是由两种不同材料的导体 A 和 B 焊接而成。焊接的一端插入被测介质中，感受到被测温度，称为热电偶的工作端（习惯上称为热端），另一端与导线连接，称为自由端（习惯上称为冷端）。导体 A、B 称为热电极，合称热电偶。

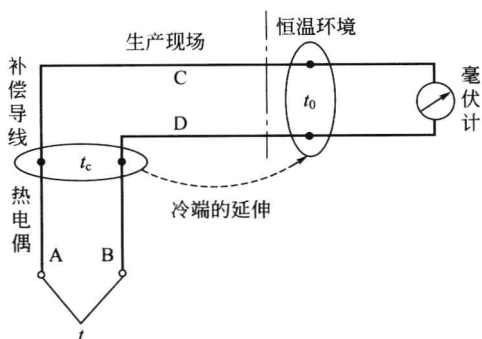


图 1.2.2 热电偶温度计的组成

根据热电偶测温基本原理，理论上似乎任意两种导体都可以组成热电偶。但是，为了保证可靠地进行具有足够精度的温度测量，就不是所有的导体都可以用来作热电偶的材料，工程上必须对它们进行严格的选择。工业上对热电极材料一般有以下要求：

- ① 在测温范围内其热电性质要稳定、不随时间变化；
- ② 在测温范围镍要有足够物理、化学稳定性、不易被氧化或腐蚀；
- ③ 电阻温度系数要小，电导率要高，组成热电偶后产生的热电势要大，其值与温度呈线性关系或有简单的函数关系；
- ④ 复现性要好（同种成分材料制成的热电偶，其热电性质均相同的性质称复现性），这样便于成批生产，而且在应用上也可以保证良好的互换性；
- ⑤ 材料组织均匀、要有韧性、便于加工成丝。

目前采用的热电偶材料中尚有不能完全满足上述要求，在选用时可根据具体测温条件具体决定。表 1.2.2 为我国已定型生产的几种常用热电偶及其主要特性。

表 1.2.2 常用热电偶

热电偶名称	代号	分度号	热电极材料		测温范围/℃	
			正热电极	负热电极	长期使用	短期使用
铂铑 ₃₀ -铂铑 ₆	WRR	B	铂铑 ₃₀ 合金	铂铑 ₆ 合金	300~1600	1800
铂铑 ₁₀ -铂	WRP	S	铂铑 ₁₀ 合金	纯铂	-20~1300	1600
镍铬-镍硅	WRN	K	镍铬合金	镍硅合金	-50~1000	1200
镍铬-铜镍	WRE	E	镍铬合金	铜镍合金	-40~800	900
铁-铜镍	WRF	J	铁	铜镍合金	-40~700	750
铜-铜镍	WRC	T	铜	铜镍合金	-40~300	350

(2) 热电偶温度计结构 热电偶广泛用于温度测量。根据它的用途和安装位置不同，各种热电偶的外形是极不相同的，但其基本结构通常由热电极、绝缘管（绝缘子）、保护管和接线盒等四部分组成，如图 1.2.3 所示。

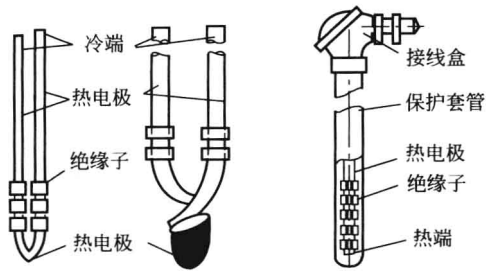


图 1.2.3 热电偶的结构

两根热电偶丝组成热电极，不同热电偶的热电极材料是不同的。热电极的直径由材料的价格、机械强度、电导率以及热电偶的用途和测量范围等决定。贵金属的热电极绝大多数采用直径为 0.3~0.65mm 的细丝，普通金属丝的直径一般为 0.5~3.2mm，其长度一般为 350~2000mm。绝缘管用于防止两根热电极短路，材料的选用由使用的温度范围而定。它的结构型式通常有单孔管、双孔管和四孔管等。保护套管是供热电极和补偿导线连接用的，通常用铝合金制成，一般分为普通式和密封式两种。为了防止灰尘和有害气体浸入热电偶保护套管内，接线盒的出线孔和盖子均用垫片和垫圈加以密封。接线盒内用于连接热电极和补偿导线的螺丝必须紧固，以免产生较大的接触电阻而影响测量的准确性。

在结构上，除了上述带有保护套管的型式外，还有薄膜式热电偶、套管式热电偶等。热电偶的结构型式可根据它的用途和安装位置来确定。

(3) 补偿导线 由热电偶测温原理知道：只要一端温度保持不变，热电势才是被测温度的单值函数。将温度保持不变的一端称为参比端，又称冷端。另一端称为工作端，又称热端。由于热电偶材料较为昂贵，制作热电偶温度计时，其冷端与热端离得不远。但在实际应用时，需要冷热隔离。另外，若冷端暴露在外，容易受到周围环境温度的影响而使冷端温度无法保持恒定。为了使热电偶的冷端温度保持恒定，一般用补偿导线将冷端延长出来并放入温度恒定的地方。

补偿导线是一种与热电偶配套的专用导线，它由两种不同性质的金属材料制成，这两种材料在一定的温度范围内（0~100℃）与所连接的热电偶的两种材料具有相同的热电特性，却又是廉价金属。显然，不同热电偶所配用的补偿导线不同。对于廉价金属材料制成的热电偶，则可用其本身材料作为补偿导线。表 1.2.3 为几种常用的补偿导线。

使用热电偶补偿导线，要注意型号相配，极性不能接触，热电偶与补偿导线连接端所处的温度不要超过 100℃。

表 1.2.3 几种常用的补偿导线

补偿导线 型号	配用热电偶 的分度号	补偿导线合金丝		补偿导线颜色	
		正极	负极	正极	负极
SC	S(铂铑-铂)	SPC(铜)	SNC(铜镍)	红	绿
KC	K(镍铬-镍硅)	KPC(铜)	KNC(铜镍)	红	蓝
KX	K(镍铬-镍硅)	KPX(镍铬)	KNX(镍硅)	红	黑
EX	E(镍铬-铜镍)	EPX(镍铬)	ENX(铜镍)	红	棕
JX	J(铁-铜镍)	JPX(铁)	JNX(铜镍)	红	紫
TX	T(铜-铜镍)	TPX(铜)	TNX(铜镍)	红	白

注：型号的字母与配用热电偶的分度号对应；型号第二个字母 C 表示补偿型，X 表示延长型。

【例 1.2.1】 用镍铬-镍硅（K）热电偶测温，热电偶冷端温度 $t_0=30^{\circ}\text{C}$ ，测得的热电势 $E(t, t_0)=25.566\text{mV}$ ，求被测的实际温度。

解：由 K 分度表中查得 $E(30,0)=1.203\text{mV}$ ，则

$$E(t,0)=E(t,30)+E(30,0)=25.566+1.203=26.769\text{mV}$$

再查 K 热电偶的分度表，得实际温度为 644°C 。

3. 热电偶的安装

热电偶主要用于工业生产中，用做集中显示、记录和控制用的温度检测。在现场安装时要注意以下问题。

(1) 正确选择测温点 由于接触式温度计的感温元件是与被测介质进行热交换而测量温度的，因此，必须使感温元件与被测介质能进行充分的热交换，感温元件放置的方式与位置有利于热交换的进行，不应把感温元件插至被测介质的死角区域。

(2) 应与被测介质充分接触 热电偶温度计保护管的末端应越过管中心线 $5\sim 10\text{mm}$ 。为增加插入深度，可采用斜插安装，当管径较细时，应插在弯头处或加装扩大管，如图 1.2.4 所示。根据生产实践经验，无论多粗的管道，温度计的插入深度为 300mm 已足够，但一般不应小于温度计全长的 $2/3$ 。

另外，热电偶应迎着被测介质流向插入，至少要与被测介质流向成正交（呈 90° ）安装，切勿与被测介质形成顺流。

(3) 避免热辐射、减少热损失 在温度较高的场合，应尽量减小被测介质与设备（或管壁）表面之间的温差。必要时可在热电偶安装点加装防辐射罩，以消除测温元件与器壁之间的直接辐射作用。如果器壁暴露于环境中，应在其表面加一层绝热层（如石棉等），以减少热损失。为减少感温元件外露部分的热损失，必要时也应对热电偶外露部分加装保温层进行适当保温。

(4) 安装应确保正确、安全、可靠 在高温下工作的热电偶，其安装位置应尽可能保持垂直，以防止保护管在高温下产生变形。若必须水平安装时，则插入深度不宜过长，且应装有用耐火黏土或耐热合金制成的支架，如图 1.2.5 所示。

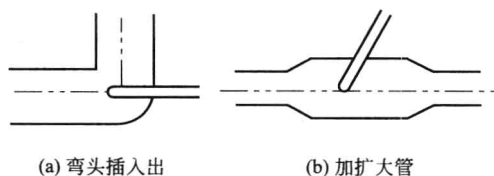


图 1.2.4 热电偶安装图之一

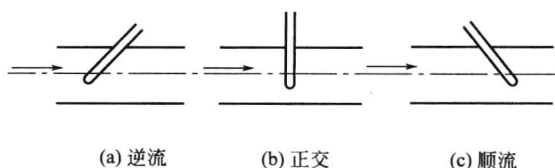


图 1.2.5 热电偶安装图之二

在介质具有较大流速的管道中，安装热电偶时必须倾斜安装，以免受到过大的冲蚀。若被测介质中有尘粒、粉状物，为保护热电偶不受磨损，应加装保护屏。

凡在有压设备上安装热电偶，均必须保证其密封性，可采用螺纹连接或法兰连接，在选择热电偶插入深度 l 时，还应考虑连接体的长度 H ，如图 1.2.6 所示。当介质工作压力超过 10MPa 时，还必须另外加装保护外套。薄壁管道上安装热电偶时，需在连接头处加装加强板。

热电偶接线盒面盖应向上密封，以免雨水或其他液体、脏物进入接线盒中而影响测量。接线盒的温度应保持在 100°C 以下，以免补偿导线超过规定温度范围。

在有色金属设备上安装时，凡与设备接触（焊接）以及与被测介质直接接触的部分，有关部件（如连接头、保护外套等）均须与工艺设备同材质，以符合生产要求。

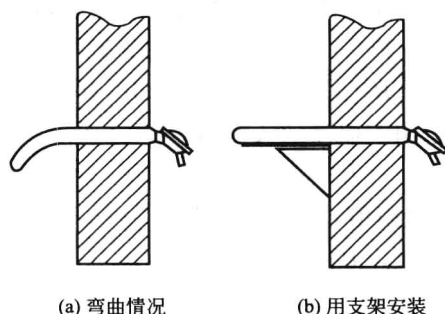


图 1.2.6 热电偶水平安装

三、热电阻温度计

热电偶温度计一般适用于测量 500°C 以上的温度。对于 500°C 以下的中、低温，利用热电偶进行测量，有时就不一定适合。这是由于在中、低温区，热电偶输出的热电势很小。所以，在中、低温区，一般是使用另一种温度计——热电阻温度计来进行温度检测，见图 1.2.7。

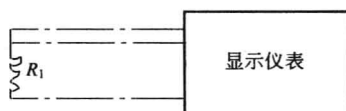


图 1.2.7 热电阻温度计

1. 测温原理

热电阻温度计是基于金属导体或半导体电阻值与温度呈一定函数关系的原理实现温度测量的。

金属导体电阻与温度的关系一般可表示为

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)]$$

式中， R_t 为温度为 $t (^{\circ}\text{C})$ 时的电阻值， Ω ； R_0 为温度为 $t_0 (^{\circ}\text{C})$ 时的电阻值， Ω ； α 为电阻温度系数，即温度每升高 1°C 时的电阻相对变化量。

由上式可知：温度的变化，导致了导体电阻的变化。实践证明，大多数金属在温度每升高 1°C 时，其电阻值要增加 $0.4\% \sim 0.6\%$ ，电阻温度计就是把温度变化所引起导体电阻的变化，通过测量电路（电桥）转换成电压（毫伏）信号，然后送至显示仪表以指示或记录被测温度的。

2. 常用热电阻

对于热电阻丝的材料是有一定技术要求的，一般应具有下列特性：电阻温度系数和电阻率要大；热容量要小；在整个测量范围内，应具有稳定的物理和化学性质；要容易加工，有良好的复制性；电阻值随温度的变化关系，最好呈线性关系，价格要便宜等。

事实上，要完全符合以上要求是很难的。目前，应用最广泛的热电阻材料是铂和铜。以此相对应，工业上定型生产的常用热电阻有铂电阻和铜电阻。

(1) 铂电阻 铂是一种贵金属，它的特点是精度高，稳定性好，性能可靠，尤其是抗氧化性很强。铂在很宽的温度范围内约 1200°C 以下都能保证上述特性。铂很容易提纯，复现性好，有良好的工艺性，可制成很细的铂丝 (0.02mm 或更细) 或极薄的铂箔。与其他材料