



成人高等教育教学用书

化工仪表及自动化

(化工类专业适用)
修订版

北京化工大学 厉玉鸣 主编

化学工业出版社

前 言

1985年根据教育部审定的教学大纲而编写的《化工仪表及自动化》适用于职工高等工业专科学校化工类专业，并同时被选定为中央电视大学该课程的教学用书。该书自1987年2月出版以来，多次印刷，被许多学校及单位选用。在使用过程中，得到广大师生及读者的好评，并提出了许多宝贵的意见。在此向广大师生及读者表示衷心的感谢。

根据实际的需要，在化工部人教司及化工出版社领导的支持与帮助下，重新编写了《化工仪表及自动化》一书。本书针对原书存在的问题及当前仪表自动化技术日新月异发展的需要，在原书总体结构不变的情况下，删除了原书中某些在当前已显得陈旧的内容（例气动仪表及某些老型号的仪表）；改写了原书中某些显得繁锁或工艺类人员较少接触的内容；增添了大量反映当前自动化水平的新内容，特别对一些新型仪表、计算机控制系统、集散控制系统及新型控制系统的内容作了简明的、深入浅出的介绍，使工艺类人员对工业自动化的新发展、新技术有了比较全面的了解，以满足能够培养面向二十一世纪工艺技术人材的需要。

该书内容由原来的十一章增加到十五章。全书共分两篇。第一篇是化工测量仪表（由第一章到第五章）。第二篇是化工自动化基础（由第六章到第十五章）。

本书由北京化工大学厉玉鸣教授主编，并编写了第七、十一、十二、十三、十四、十五章。参加编写的还有北京林业大学张谦老师，编写了第二、五、六、八、九章。北京化工大学黄玉洁老师编写了一、三、四、十章。

本书第一版由华东理工大学章先楼教授主审，这次改写后由北京化工大学沈承林教授主审，他对全书作了详细的审阅和修改，在此深表感谢。

厉玉鸣

1996年8月

内 容 提 要

本书是在化工出版社1987年2月出版的《化工仪表及自动化》的基础上，经过内容的增删及修改而成的。本书内容分为两大部分（篇）。第一篇是化工测量仪表，在讲述测量仪表基本知识的基础上，重点介绍了化工生产过程中的压力、流量、物位、温度的测量原理及相应仪表的结构、特点、选型及使用方法。第二篇是化工自动化基础，除定性介绍自动控制系统的基础知识外，重点介绍了化工过程（对象）的特性、控制仪表及装置，并介绍了各种简单、复杂和新型（高级）的控制系统及在化工生产过程中的应用。

本书适用于职工高等工业专科学校的化学工艺类专业，可作为化工、炼油、冶金、轻工、林业等院校及有关企业、单位的职工教育学校、函大、业大的教材，也可供大化工行业中的工艺技术人员参考。

目 录

绪论	1
一、化工自动化意义及目的	1
二、化工自动化的发展概况	1
三、化工仪表及自动化系统的分类	2
第一篇 化工测量仪表	
第一章 测量仪表基本知识	5
一、测量过程与测量误差	5
二、测量仪表的品质指标	6
三、测量系统中的常见信号类型	9
四、测量系统中信号的传递形式	9
五、测量仪表与测量方法的分类	10
六、化工检测的发展趋势	11
例题分析	11
习题与思考题	13
第二章 压力测量	14
第一节 压力单位及测压仪表	14
第二节 弹性式压力计	15
一、弹性元件	15
二、弹簧管压力表	16
第三节 电气式压力计	17
一、应变片式压力传感器	18
二、压阻式压力传感器	19
三、电容式压力传感器	19
第四节 压力计的选用及安装	19
一、压力计的选用	19
二、压力计的安装	20
例题分析	21
习题与思考题	22
附录 常用弹簧管压力表型号与规格	23
第三章 流量测量	25
第一节 差压式流量计	26
一、节流现象与流量基本方程式	26
二、标准节流装置	27
三、力平衡差压变送器	28

四、差压式流量计的测量误差	30
第二节 转子流量计	33
一、工作原理	33
二、电远传式转子流量计	34
第三节 漩涡流量计	36
第四节 质量流量计	37
一、直接式质量流量计	37
二、补偿式质量流量计	38
第五节 其他流量计	39
一、靶式流量计	39
二、椭圆齿轮流量计	40
三、涡轮流量计	41
四、电磁流量计	42
例题分析	43
习题与思考题	43
第四章 物位测量	45
第一节 物位测量的意义及主要类型	45
第二节 差压式液位计	46
一、工作原理	46
二、零点迁移问题	46
三、用法兰式差压变送器测量液位	48
第三节 其他物位计	49
一、电容式物位计	49
二、核辐射物位计	50
三、称重式液罐计量仪	51
例题分析	52
习题与思考题	54
第五章 温度测量	56
第一节 概述	56
一、测温仪表的分类	56
二、温度测量的基本原理	56
第二节 热电偶温度计	58
一、热电偶	58
二、补偿导线与冷端温度补偿	64
三、XCZ-101 型动圈式仪表	67
四、电位差计	69
第三节 热电阻温度计	74
一、热电阻	74
二、XCZ-102 型动圈式仪表	76
三、电子自动平衡电桥	78

第四节 测温仪表的选用与安装	80
一、工业温度计的选用	80
二、测温元件的安装	80
三、连接导线与补偿导线的安装	81
第五节 电动温度变送器	82
一、测量桥路	82
二、电压-电流转换器	84
第六节 数字式显示仪表	85
一、数字式显示仪表的原理及其特点	85
二、模-数转换器	86
三、电子计数器	88
四、显示器	88
五、数字式显示仪表的基本组成	89
例题分析	90
习题与思考题	92
附录一 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	93
附录二 镍铬-铜镍热电偶分度表	97
附录三 镍铬-镍硅热电偶分度表	97
附录四 铂电阻分度表	100
附录五 铜电阻分度表 ($R_0=50\Omega$)	103
附录六 铜电阻分度表 ($R_0=100\Omega$)	104

第二篇 化工自动化基础

第六章 自动控制系统概述	105
第一节 自动控制系统的组成	105
第二节 自动控制系统的方块图	108
一、信号和变量	108
二、自动控制系统方块图	108
三、反馈	110
四、自动控制系统的分类	112
第三节 过渡过程和品质指标	112
一、控制系统的静态与动态	112
二、控制系统的过渡过程	113
三、控制系统的控制指标	115
四、影响控制指标的主要因素	118
例题分析	118
习题与思考题	119
第七章 对象特性和建模	121
第一节 数学模型及描述方法	121
一、被控对象数学模型	121

二、数学模型的主要形式	122
第二节 机理建模	125
一、一阶对象	125
二、积分对象	126
三、时滞对象	127
四、二阶对象	128
第三节 描述对象特性的参数	130
一、放大系数 K	130
二、时间常数 T	132
三、滞后时间 τ	134
第四节 实测建模	137
例题分析	139
习题与思考题	139
第八章 基本控制规律	141
第一节 位式控制	141
一、双位控制	141
二、具有中间区的双位控制	142
三、多位控制	144
第二节 比例控制	145
一、比例控制规律及其特点	145
二、比例度及其对控制过程的影响	147
第三节 积分控制	150
一、积分控制规律及其特点	150
二、比例积分控制规律与积分时间	152
三、积分时间对系统过渡过程的影响	153
第四节 微分控制	153
一、微分控制规律及其特点	153
二、实际的微分控制规律及微分时间	154
三、比例微分控制系统的过渡过程	155
四、比例积分微分控制	156
例题分析	157
习题与思考题	159
第九章 自动控制仪表	161
第一节 控制仪表的作用与分类	161
一、控制仪表的能源形式	161
二、控制仪表的结构形式	161
第二节 电动单元组合式仪表	163
一、DDZ-Ⅲ型电动控制幕	163
二、DDZ-Ⅰ型电动控制幕	173
第三节 可编程调节器	178

一、可编程调节器的主要特点	178
二、可编程调节器的基本构成及原理	178
三、KMM 可编程调节器	180
例题分析	184
习题与思考题	185
第十章 执行器	187
第一节 气动执行器	188
一、气动执行器的组成与分类	188
二、控制阀的流量特性	191
三、控制阀的选择	195
四、控制阀的安装和维护	196
第二节 阀门定位器与电-气转换器	197
一、气动阀门定位器	197
二、电-气阀门定位器	198
三、电-气转换器	198
第三节 电动执行器	199
一、概述	199
二、角行程电动执行机构	199
三、直行程电动执行机构	201
例题分析	201
习题与思考题	201
第十一章 简单控制系统	203
第一节 概述	203
第二节 被控变量的选择	204
第三节 操纵变量的选择	206
第四节 控制器控制规律的选择及参数整定	208
一、控制规律的选择	208
二、控制器参数的工程整定	208
第五节 控制系统的投运及操作中的常见问题	212
一、控制系统的投运	212
二、控制系统操作中的常见问题	215
例题分析	218
习题与思考题	219
第十二章 复杂控制系统	221
第一节 串级控制系统	221
一、串级控制系统概述	221
二、串级控制系统的特点及应用	223
三、主、副控制器控制规律的选择	226
四、主、副控制器正反作用的选择	226
五、控制器参数整定与系统投运	227

第二节 其他复杂控制系统	228
一、均匀控制系统	228
二、比值控制系统	231
三、前馈控制系统	232
四、取代控制系统	233
五、分程控制系统	234
六、多冲量控制系统	235
例题分析	237
习题与思考题	239
第十三章 高级控制系统	240
第一节 自适应控制系统	240
一、参考模型自适应控制系统	240
二、具有被控对象数学模型在线辨识的自适应控制系统	241
第二节 预测控制系统	242
第三节 智能控制系统	243
第四节 模糊控制系统	244
第五节 最优控制系统	246
第六节 控制管理一体化	247
习题与思考题	248
第十四章 计算机控制系统	250
第一节 概述	250
第二节 实时计算机控制系统的基本组成	251
第三节 计算机在控制中的典型应用方式	254
一、数据采集和处理系统	254
二、操作指导控制系统	255
三、直接数字控制系统	255
四、计算机监督控制系统	256
五、集散控制系统	256
第四节 直接数字控制系统	258
一、基本构成	258
二、DDC中的PID算式	259
第五节 集散控制系统	263
一、概述	263
二、集散控制系统的特点	263
三、基本构成	266
例题分析	269
习题与思考题	269
第十五章 典型化工单元的控制方案	270
第一节 流体输送设备的自动控制	270
一、离心泵的自动控制方案	270

二、往复泵的自动控制方案·····	271
三、压气机的自动控制方案·····	272
第二节 传热设备的自动控制·····	274
一、两侧均无相变化的换热器控制方案·····	274
二、载热体进行冷凝的加热器自动控制·····	276
三、冷却剂进行汽化的冷却器自动控制·····	278
第三节 精馏塔的自动控制·····	279
一、精馏塔的干扰因素及对自动控制的要求·····	279
二、精馏塔的控制方案·····	280
第四节 化学反应器的自动控制·····	283
一、化学反应器的控制要求·····	283
二、釜式反应器的温度自动控制·····	284
三、固定床反应器的自动控制·····	285
四、流化床反应器的自动控制·····	286
例题分析·····	288
习题与思考题·····	289
参考书目 ·····	290

绪 论

一、化工自动化意义及目的

化工生产过程自动化,就是在化工设备、装置及管道上,配置一些自动化装置,替代操作工人的部分直接劳动,使生产在不同程度上自动地进行。这种部分地或全部地用自动化装置来管理化工生产过程的办法,就称为化工生产过程自动化,简称为化工自动化。

自动化是提高社会生产力的有力工具之一。实现化工生产过程自动化的主要目的如下。

(1) 加快生产速度、降低生产成本、提高产品产量和质量。在人工操作的生产过程中,由于人的五官、手、脚,对外界的观察与控制的精确度和速度是有一定限度的。而且由于体力关系,人直接操纵设备的力量也是有限的。如果用自动化装置代替人的操纵,则以上情况可以得到避免和改善,并且通过自动控制系统,使生产过程在最佳条件下进行,从而可以大大加快生产速度、降低能耗、实现优质高产。

(2) 减轻劳动强度、改善劳动条件。多数化工生产过程是在高温、高压或低温低压下进行,还有的是易燃、易爆或有毒、有腐蚀性、有刺激性气味。实现了化工自动化,工人只要对自动化装置的运转进行监控,而不需要再直接从事大量而又危险的现场操作。

(3) 能够保证生产安全,防止事故发生或扩大,达到延长设备使用寿命、提高设备利用率、保障人生安全的目的。

(4) 生产过程自动化的实现,能根本改变劳动方式,提高工人文化技术水平,以适应当代信息技术革命和信息产业革命的需要。

二、化工自动化的发展概况

在化工生产过程自动化的发展初级阶段,首先是应用一些自动检测仪表来监视生产。在二十世纪四十年代以前,绝大多数化工生产处于手工操作状况,操作工人根据反映主要工艺参数的仪表指示情况,用人工来改变操作条件,生产过程单凭经验进行。对于那些连续生产的化工厂,在进出物料彼此联系中装设了大的贮槽,起着克服干扰影响及稳定生产的作用,显然生产的效率很低,花在设备上的投资很大。

五十年代和六十年代,人们对化工生产的各种单元操作进行了大量的开发工作,使得化工生产过程朝着大规模、高效率、连续生产、综合利用方向迅速发展。因此,要使这类工厂生产运行正常,如果没有先进的自动检测仪表和控制系统,几乎是不可能的事。此时,在实际生产中应用的自动控制系统主要是压力、流量、液位和温度四大参数的简单控制。同时,串级、比值、多冲量等复杂控制系统也得到了一定程度的发展。所应用的自动化技术工具主要是基地式电动、气动仪表及膜片式的单元组合仪表。此时期由于对化工对象的动态特性了解不够深入,因此,半经验、半理论的设计准则和整定公式,在自动控制系统设计和参数整定中起了相当重要的作用,解决了许多实际问题。

七十年代以来,化工自动化技术水平得到了很大的提高。在自动化技术工具方面,新产品像雨后春笋,气动Ⅱ型和电动Ⅰ型单元组合式仪表刚投入生产不久,气动Ⅲ型和电动Ⅲ型单元组合式仪表就相继问世,并已进一步发展到具有多功能的组装仪表、智能式仪表,为实现各种特殊控制规律提供了条件。新型智能传感器和控制仪表的问世使仪表与计算机之间的

直接联系极为方便。在自动控制系统方面，由于控制理论和控制技术的发展，给自动控制系统的的发展创造了各种有利的条件，各种新型控制系统相继出现，控制系统的设计与整定方法也有了新的发展。近年来，科学技术的发展与革新极为迅速，特别是电子计算机在自动化中发挥越来越巨大的威力，这对常规仪表产生了一系列的影响，促进常规仪表不断变革，以满足生产过程中对能量利用、产品质量、收率等各个方面的越来越高的要求。

化工生产过程自动化是一门综合性的技术学科。它是利用自动控制学科、仪器仪表学科及计算机学科的理论与技术服务于化学工程学科。随着现代科学技术的进步，本学科将不断发展并日益被人们所重视。在化工生产过程中，由于实现了自动化，人们通过自动化装置来管理生产，自动化装置与工艺及设备已结合成为有机的整体。因此，越来越多的工艺技术人员认识到：学习仪表及自动化方面的知识，对于管理与开发现代化化工生产过程是十分必要的。

三、化工仪表及自动化系统的分类

在化工生产过程中，需要测量与控制的参数是多种多样的，但主要的有热工量(压力、流

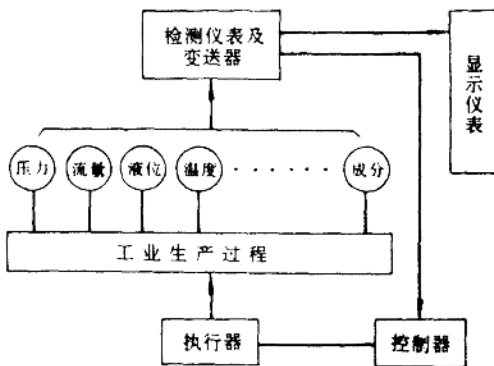


图 0-1 各类仪表之间的关系

量、液位、温度等)和成分(或物性)量。因而化工自动化仪表按其功能不同，大致分成四个大类：即检测仪表(包括各种参数的测量和变送)；显示仪表(包括模拟量显示和数字量显示)；控制仪表(包括气动、电动控制仪表及数字式控制器)和执行器(包括气动、电动、液动等执行器)。这四类仪表之间的关系如图 0-1 所示。

利用上述各类仪表，可以构成自动检测、自动操纵、自动保护和自动控制这样四种自动化系统。它们的主要作用如下。

1. 自动检测系统

利用各种仪表对生产过程中主要工艺参数进行测量、指示或记录的，称为自动检测系统。它代替了操作人员对工艺参数的不断观察与记录，因此起到对过程信息的获取与记录作用。这在生产过程自动化中，是最基本的也是十分重要的内容。

图 0-2 的热交换器是利用蒸汽来加热冷液的，冷液经加热后的温度是否达到要求，可用测温元件配上平衡电桥来进行测量、指示和记录；冷液的流量可以用孔板配上流量计进行检测；蒸汽压力可以用压力表来指示。这些就是自动检测系统。

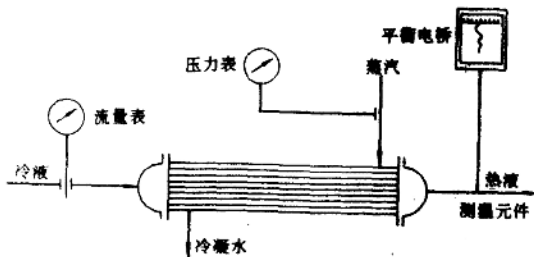


图 0-2 热交换器自动检测系统示意图

自动检测系统中主要的自动化装置为敏感元件、传感器与显示仪表。

敏感元件亦称检测元件，它的作用是对被测的变量作出响应，把它转换为适合测量的物理量。例图 0-2 所示系统中可用孔板将流量转换为差压信号，用热电偶将温度转换为电(毫伏)信号。

传感器可以对检测元件输出的物理量信号作进一步信号转换，当转换后的信号为标准的统一信号(例 0~10mA、4~20mA、0.02~0.1MPa 等)时，此时的传感器一般称为变送器。例流量变送器常采用差压变送器。

显示仪表的作用，是将检测结果以指针位移、数字、图象等形式，准确地指示、记录或储存，使操作人员能正确了解工艺操作情况和状态。例图 0-2 所示系统中的平衡电桥就属于显示记录仪表。

2. 自动信号和联锁保护系统

生产过程中，有时由于一些偶然因素的影响，导致工艺参数超出允许的变化范围而出现不正常情况时，就有可能引起事故。为此，常对某些关键性参数设有自动信号联锁保护装置。当工艺参数超过了允许范围，在事故即将发生以前，信号系统就自动地发出声光信号警报，告诫操作人员注意，并及时采取措施。如工况已到达危险状态，联锁系统立即自动采取紧急措施，打开安全阀或切断某些通路，必要时紧急停车，以防止事故的发生和扩大。它是生产过程中的一种安全装置。例如某反应器的反应温度超过了允许极限值，自动信号系统就会发出声光信号，报警给工艺操作人员以及时处理生产事故。由于生产过程的强化，往往靠操作人员处理事故已成为不可能，因为在一个强化的生产过程中，事故常常会在几秒钟内发生，由操作人员直接处理是根本来不及的。而自动联锁保护系统可以圆满地解决这类问题。如当反应器的温度或压力进入危险限时，联锁系统可立即采取应急措施，加大冷却剂量或关闭进料阀门，减缓或停止反应，从而可避免引起爆炸等生产事故。

自动信号联锁保护电路按其构成元件的不同，可分为有触点式和无触点式两类(有时可采用混合式)。有触点式电路是由各种继电器、按钮、开关等电器组成的继电线路，它是依靠各种电器的触点开合来完成电路的通断和切换。无触点式电路是利用由二极管、晶体管以及集成电路等电子器件构成具有一定功能的电子线路，利用电子器件的导通或阻断特性来实现自动信号的报警和联锁保护作用的。随着电子技术和计算机技术的不断发展，自动信号联锁保护系统可以利用更为先进的可编程控制器(PLC)来实现，比起传统的电路来说，它具有操作方便、应用灵活、安全可靠和维修简单等优点。

3. 自动操纵及自动开停车系统

自动操纵系统可以根据预先规定的步骤自动地对生产设备进行某种周期性操作。例如合成氨造气车间的煤气发生炉，要求按照吹风、上吹、下吹制气、吹净等步骤周期性地接通空气和水蒸汽，利用自动操纵机可以代替人工自动地按照一定的时间程序扳动空气和水蒸汽的阀门，使它们交替地接通煤气发生炉，从而极大地减轻了操作人员的重复性体力劳动。

自动开停车系统可以按照预先规定好的步骤，将生产过程自动地投入运行或自动停车。

4. 自动控制系统

生产过程中各种工艺条件不可能是一成不变的。特别是化工生产，大多数是连续生产，各设备相互关联着，当其中某一设备的工艺条件发生变化时，都可能引起其他设备中某些参数或多或少的波动，偏离了正常的工艺条件。为此，就需要用一些自动控制装置，对生产中某些关键性参数进行自动控制，使它们在受到外界干扰的影响而偏离正常状态时，能自动地调回到规定的数值范围内，为此目的而设置的系统就是自动控制系统。

由以上所述可以看出，自动检测系统只能完成“了解”生产过程进行情况的任务；自动信号联锁保护系统只能在工艺条件进入某种极限状态时，采取安全措施，以免发生生产事故；自动操纵系统只能按照预先规定好的步骤进行某种周期性操纵；只有自动控制系统才能自动地排除各种干扰因素对工艺参数的影响，使它们始终保持在预先规定的数值上，保证生产维持在正常或最佳的工艺操作状态。因此，自动控制系统是自动化生产中的核心部分。

本门课程重点介绍自动检测系统与自动控制系统。

本课程分为两篇，第一篇是化工检测仪表，第二篇是化工自动化基础。实际上，第一篇是研究如何获取化工生产过程中的“信息”；第二篇是研究如何对化工生产过程进行有效的“控制”。所以，从这个意义上来说，“化工仪表及自动化”课程是研究生产过程的“信息与控制”的。

通过本门课程的学习，应能了解主要工艺参数(温度、压力、流量及物位)的测量方法及其仪表的工作原理及特点；能根据工艺要求，正确地选用和使用常见的测量仪表及控制仪表；能了解化工自动化的初步知识，理解基本控制规律，懂得控制器参数是如何影响控制质量的；能根据工艺的需要，和自控设计人员共同讨论和提出合理的自动控制方案；能为自控设计提供正确的工艺条件和数据；能在生产开停车过程中，初步掌握自动控制系统的投运及控制器的参数整定。

第一篇 化工测量仪表

在化工生产过程中，为了有效地进行生产操作和自动控制，需要对工艺生产中的一些主要参数进行自动测量。用来测量这些参数的仪表称为化工测量仪表。本篇将在介绍有关测量和测量仪表的基本知识的基础上，介绍有关压力、流量、液位、温度等参数的测量方法及其相应的测量仪表。

第一章 测量仪表基本知识

一、测量过程与测量误差

所谓测量，就是用实验的方法，求出某个量的大小。比如我们要测量一段导线的长度，就需要用一把米尺与它比试一下，看它有多少米长，即可测知该段导线的长度。用数学式子表示如下：

$$Q=qV$$

式中 Q —— 被测值；

q —— 测量值，即被测量与所选测量单位的比值；

V —— 测量单位。

上述这种测量方法，通常叫做直接测量，除此之外，还有间接测量的测量方法。

无论采用哪种方法进行测量的过程，实质上都是将被测参数与其相应的测量单位进行比较的过程。而测量仪表就是实现这种比较的工具。各种测量仪表不论采用哪一种原理，它们都是要将被测参数经过一次或多次的信号能量的转换，最后获得便于测量的信号能量形式，并由指针位移或数字形式显示出来。例如各种炉温的测量，常常是利用热电偶的热电效应，把被测温度转换成直流毫伏信号(电能)，然后变为毫伏测量仪表上的指针位移，并与温度标尺相比较而显示出被测温度的数值。

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。

测量误差按其产生原因的不同，可以分为三类。

(1) 系统误差(又称规律误差) 这种误差的大小和方向(即符号)均不随测量过程而改变。产生这种误差的原因，主要有仪表本身的缺陷，观测者的习惯或偏向，单因素环境条件的变化等。由于这种误差是有一定规律的，所以在测量过程中是容易消除或加以修正的。

(2) 疏忽误差 产生这种误差的原因，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。只要我们在测量过程中认真、仔细，就可以避免产生这类误差。

(3) 偶然误差 就是在同样的测量条件下，反复多次，每次结果都不重复的误差。这种误差是由一些随机的偶然原因引起的，因此它不易被发觉和修正。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，即绝对表示法和相对表示法。

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

$$\Delta = x_1 - x_i$$

在工程上，要知道被测量的真实值 x_i 是困难的。因此，所谓测量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 —— 绝对误差；
 x —— 被校表的读数值；
 x_0 —— 标准表的读数值。

测量误差还可以用相对误差来表示。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_i (或 x_0) 之比。可用式子表示：

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

式中 Λ —— 仪表在 x_0 处的相对误差。

求取测量误差的目的在于判断测量结果的可靠程度。

二、测量仪表的品质指标

一台仪表的优劣，可用它的品质(性能)指标来衡量。现将几项常见的指标简介如下。

1. 测量仪表的准确度(习惯上称精确度)

前面已经说过，仪表的测量误差可以用绝对误差 Δ 来表示。但是，必须指出，仪表的绝对误差在测量范围内的各点上是不相同的。因此，我们常说的“绝对误差”指的是绝对误差的最大值 Δ_{\max} 。

事实上，由于仪表的准确度不仅与绝对误差有关，而且还与仪表的标尺范围有关。例如，两台标尺范围(即测量范围)不同的仪表，如果它们的绝对误差相等的话，标尺范围大的仪表准确度较标尺范围小的为高。因此，工业仪表经常将绝对误差折合成仪表标尺范围的百分数表示，称为相对百分误差 δ ，即：

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

仪表的标尺上限值与下限值之差，一般称为仪表的量程(Span)。

根据仪表的使用要求，规定一个在正常情况下允许的最大误差，这个允许的最大误差就叫允许误差。允许误差一般用相对百分误差来表示，即某一台仪表的允许误差是指在规定的正常情况下允许的相对百分误差的最大值，即：

$$\delta_x = \pm \frac{\text{仪表允许的最大绝对误差值}}{\text{标尺上限值} - \text{标尺下限值}} \times 100\%$$

仪表的 δ_x 越大，表示它的准确度越低；反之，仪表的 δ_x 越小，表示仪表的准确度越高。

事实上，国家就是利用这一办法来统一规定仪表的准确度(精度)等级的。将仪表的允许相对百分误差去掉“ \pm ”号及“ $\%$ ”号，便可以用来确定仪表的准确度等级。目前，我国生产的仪表常用的准确度等级有 0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 等。如果某台测温仪表的允许误差为 $\pm 1.5\%$ ，则认为该仪表的准确度等级符合 1.5 级。为了进一步说明如何确定仪表的准确度等级，下面再举一个例子。

〔例〕某台测温仪表的测温范围为 $200\sim 700^{\circ}\text{C}$ ，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“ \pm ”号与“ $\%$ ”号，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 级仪表所允许的最大误差，所以，这台测温仪表的精度等级为 1.0 级。

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，仪表准确度等级越高，仪表的准确度也越高。工业现场用的测量仪表，其准确度大多是 0.5 级以下的。

必须指出：在工业上应用时，对测量仪表准确度的要求，应根据生产操作的实际情况和该参数对整个工艺过程的影响程度所提供的误差允许范围来确定，这样才能保证生产的经济性和合理性。

仪表的准确度等级一般可用不同的符号形式标志在仪表面板上，如 $\textcircled{0.5}$ $\triangle 1.0$ 等。

2. 测量仪表的恒定度

测量仪表的恒定度常用变差(又称来回差)来表示。它是在外界条件不变的情况下，用同一仪表对某一参数值进行正反行程(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差值，此差值即为变差，如图 1-1 所示。

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，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. 灵敏度与灵敏限(也叫灵敏阈)

仪表指针的线位移或角位移，与引起这个位移的被测参数变化量的比值称为仪表的灵敏度，用公式表示如下

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

式中 S —— 仪表的灵敏度；

$\Delta\alpha$ —— 指针的线位移或角位移；

Δx —— 引起 $\Delta\alpha$ 所需的被测参数变化量。

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 $0\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的测温仪表，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 。

所谓仪表的灵敏限，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

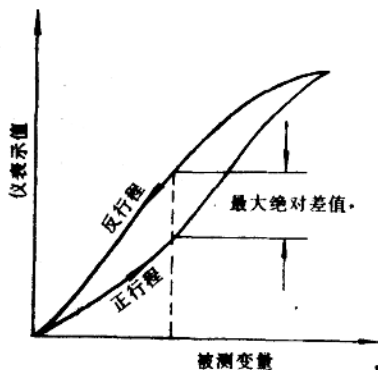


图 1-1 测量仪表的变差