

“卓越工程师教育培养计划”规划教材

化工过程参数监测 与自动化

熊远钦 阳卫军 万其中 梁志武 编



化学工业出版社

“卓越工程师教育培养计划”规划教材

化工过程参数监测 与自动化

熊远钦 阳卫军 万其中 梁志武 编



化学工业出版社

·北京·

本书是为适应国家教育部的“卓越工程师教育培养计划”教学的需要而编写的高等学校化工类专业试用教材,除讲述构成化工过程自动控制系统的被控对象、检测元件与传感器、自动控制仪表及执行器等工业仪表知识外,在介绍了基本控制系统的基础上,还分别举例介绍了集散控制系统与现场总线控制系统、几种典型化工单元装置与过程的控制方案。

本书在内容编排和组织上注重实际应用,注意引用工程中的实例,培养学生的工程意识和工程应用能力,适用于高等学校化学工程与工艺专业的教学要求,也适宜于其他一些类型(例如石油、医药、轻工、食品、林业、冶金、煤矿、生物、环境)相关专业,还可供从事连续化工生产过程的工艺技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工过程参数监测与自动化/熊远钦等编. —北京:
化学工业出版社, 2014. 1
“卓越工程师教育培养计划”规划教材
ISBN 978-7-122-19164-9

I. ①化… II. ①熊… III. ①化工过程-参数-监测-
高等学校-教材②化工过程-参数-自动化-高等学校-教材
IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 286494 号

责任编辑: 杨 菁 李玉晖
责任校对: 边 涛

文字编辑: 谢蓉蓉
装帧设计: 张 辉

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 装: 三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张 19½ 字数 483 千字 2014 年 3 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: 46.00 元

版权所有 违者必究

前 言

为适应国家教育部提出的“卓越工程师教育培养计划”，培养和造就一大批创新能力强、适应经济社会发展需要的高质量各类型工程技术人才教学过程的需要，突出工程教育发展的“四个更加重视”，我们依据教育部审定的高等学校化工类专业《化工仪表及自动化》教学大纲的要求，编写了《化工过程参数监测与自动化》这本教材。

本书较系统地介绍了化工过程参数监测及其控制的基础知识、过程控制系统的设计方法等基本理论，并以典型的化工单元控制方案实例予以诠释。全书共分 10 章，前五章重点介绍有关监测仪表的知识，后五章讲述化工过程自动化控制系统方面的知识。第 1 章为化工参数测量的基本知识，介绍化工过程中工艺参数检测的基本概念、测量仪表的分类与性能指标等共通性知识；第 2 章为化工过程压力的监测，主要介绍压力以及压差的检测方法、压力监测仪表及其变送器的工作原理、选用、安装和校验；第 3 章主要介绍化工过程流量的监测，包括流量的测量方法，各种流量仪表及变送器的工作原理、结构特点、仪表的选择、安装与校验；第 4 章讲述化工过程中物位的检测方法，物位监测仪表及变送器的原理、选用、安装与校验；第 5 章是化工过程温度的监测，主要介绍温度的检测方法，各种测温仪表以及变送器的工作原理、选用、安装与校验；第 6 章介绍化工参数控制的基本知识，包括自动控制系统的构成、品质指标以及工程化图示，描述被控对象的特性参数及其响应的动态曲线；第 7 章为自动控制系统及仪表，主要介绍各种常用控制规律，控制器、执行器、电气转换器、阀门定位器的结构、原理及应用；第 8 章介绍基本控制系统，包括简单控制系统、控制器参数的工程整定，还介绍了串级、比值、均匀、前馈等常用复杂控制系统；第 9 章是集散控制及现场总线系统，本章不限于单一的化工装置和参数，而是对工厂、车间整体的集散控制系统，以及现场总线控制系统的结构、特点、功能进行了讨论，并介绍了相应的常见控制系统实例；第 10 章为典型化工单元设备的控制，分别对流体输送设备、换热设备、精馏塔、化学反应器的温度控制进行了介绍。

限于各个学校在化工类专业教学计划中分配给《化工仪表及自动化》课程的教学课时有限，故本书编者力求简明扼要，讲述理论时深入浅出，介绍分类仪表时原理与结构并重，并尽可能地引用图片进行展示，使学生在课堂学习中对化工厂的各类仪表、装置建立起感性认识，有助于后续的下厂实习、摸索工艺流程、理解工艺装置的原理内涵，以促进培养 21 世纪卓越工程技术人才的进程。

本书由湖南大学化学化工学院熊远钦老师策划、组编，熊远钦、阳卫军、万其中和梁志武共同编写，各章分工如下：第 1~5 章由熊远钦编写，第 6~8 章由阳卫军编写，第 9 章由万其中编写，第 10 章由梁志武编写，全书由熊远钦进行统稿及审定。在本书的编写过程中，同院的夏新年、李文生、王勤波老师等都提出了许多宝贵的意见，对他们的支持和帮助深表

感谢。

湖南大学化学化工学院 2009 级化学工程与工艺专业本科生孙青、罗浩、熊振华同学，2010 级王进同学，2011 级硕士生屈晓娟，2012 级硕士生杨忠奎、王钊、高涛、孙宝帅同学对本书写作过程中在文字和图表校对等方面付出了辛勤的劳动，在此也一并表示谢意。

鉴于编者的学识水平有限，成稿时间仓促，书中难免存在不当和瑕疵，在此恳请广大师生和读者不吝指正，提出宝贵的修改意见。我们先致以诚挚的感谢，并在后续的教学和再版中及时改进、完善。

编者
2013 年 9 月

目 录

第 1 章 化工参数测量的基本知识	1
1.1 化工参数的监测过程与测量误差	1
1.1.1 测量的概念	1
1.1.2 测量方法	1
1.1.3 测量误差的特点及规律	2
1.2 检测仪器的组成与分类	4
1.2.1 检测仪器的基本组成	4
1.2.2 检测仪器的分类	4
1.3 检测仪器的性能指标	5
1.3.1 静态指标	5
1.3.2 动态指标	7
思考与练习题	8
第 2 章 化工过程压力的监测	9
2.1 压力的测量方法	9
2.1.1 连通液柱法	10
2.1.2 弹性元件变形法	11
2.1.3 电量转换法	12
2.2 压力监测仪表及变送器	15
2.2.1 弹性式压力计	15
2.2.2 电气式压力计	17
2.2.3 智能型压力变送器	20
2.3 压力仪表的选择、安装与校验	21
2.3.1 检测仪表安装的一般原则	21
2.3.2 各类测压仪表的特点与应用	22
2.3.3 压力表的选择	23
2.3.4 压力表的检定与校验	27
2.3.5 压力检测系统的安装	29
思考与练习题	31
第 3 章 化工过程流量的监测	33
3.1 流量的测量方法	33
3.1.1 基于流体静压力变化测流量	35
3.1.2 基于流体流通面积的改变测流量	38
3.1.3 应用电磁感应原理测流量	40
3.1.4 基于流过的流体容积测流量	41
3.1.5 基于流过流体的质量测流量	41
3.1.6 基于流体的动量或动量矩测流量	42
3.1.7 应用超声波测流量	46
3.2 流量监测仪表及变送器	46
3.2.1 差压式流量计	46
3.2.2 转子流量计	52
3.2.3 电磁流量计	57
3.2.4 容积式流量计	59
3.3 流量仪表的选择、安装与校验	63
3.3.1 各类流量仪表的特点及比较	63
3.3.2 差压式流量计的选择、安装与校验	65
3.3.3 转子流量计的选择、安装与校验	72
3.3.4 电磁流量计的选择、安装与校验	74
3.3.5 容积式流量计的选择、安装与校验	76
思考与练习题	79
第 4 章 化工过程中物位的监测	82
4.1 物位的测量方法	82
4.1.1 借助连通器原理测量液位	83
4.1.2 浮力原理测量液位	84
4.1.3 应用液压传递原理测量液位	87
4.1.4 电容式测量液位	89
4.1.5 非接触式测量物位	91
4.2 物位监测仪表及变送器	94
4.2.1 浮力式液位计	94
4.2.2 差压式液位变送器	96
4.2.3 电容式物位计	99
4.2.4 超声波液位计	101
4.2.5 雷达物位计	102
4.3 物位仪表的选择、安装与校验	104
4.3.1 物位仪表的选择	104
4.3.2 物位仪表的安装	108
4.3.3 物位仪表的使用与检定	109
思考与练习题	111
第 5 章 化工过程温度的监测	112
5.1 温度的测量方法	112
5.1.1 温度与温标	112

5.1.2	热膨胀原理测温	114	7.3.2	电-气转换器	194
5.1.3	应用热电效应原理测温	116	7.3.3	阀门定位器	194
5.1.4	应用热电阻测温	120	7.3.4	电动执行器	196
5.1.5	应用热辐射测温	124		思考与练习题	197
5.2	温度监测仪表及变送器	125	第8章 基本控制系统		198
5.2.1	玻璃管温度计	125	8.1	简单控制系统及其控制方案	198
5.2.2	双金属温度计	126	8.1.1	简单控制系统的结构与组成	198
5.2.3	压力式温度计	127	8.1.2	简单控制系统的设计	199
5.2.4	热电偶温度计	127	8.2	控制器参数的工程整定	207
5.2.5	热电阻温度计	134	8.2.1	经验凑试法	207
5.2.6	一体化温度传感器	136	8.2.2	临界比例度法	208
5.2.7	红外线温度计	138	8.2.3	衰减曲线法	209
5.3	温度仪表的选择、安装与校验	139	8.3	复杂控制系统	210
5.3.1	常用测温仪表的测量范围及特点	139	8.3.1	串级控制系统	210
5.3.2	各种测温仪表的选择	139	8.3.2	比值控制系统	215
5.3.3	测温仪表的安装	140	8.3.3	均匀控制系统	219
5.3.4	测温仪表的校验	143	8.3.4	前馈控制系统	222
	思考与练习题	144		思考与练习题	224
第6章 化工参数控制的基本知识		145	第9章 集散控制及现场总线系统		227
6.1	自动控制系统概述	145	9.1	计算机过程控制技术	227
6.1.1	自动控制系统的组成	145	9.1.1	计算机过程控制系统的基本概念及组成	227
6.1.2	自动控制系统的分类	148	9.1.2	计算机过程控制的基本类型及其特点	228
6.1.3	自动控制系统的过渡过程和品质指标	148	9.1.3	计算机过程控制的发展状况	228
6.1.4	工艺管道及控制流程图	152	9.2	集散控制系统(DCS)	230
6.2	描述对象的特性参数	155	9.2.1	DCS的基本概念、结构组成及特点	230
6.2.1	化工过程对象的特性	155	9.2.2	DCS的网络通信与存取控制技术	231
6.2.2	描述对象特性的参数	156	9.2.3	DCS的组态与可靠性	232
	思考与练习题	161	9.2.4	DCS的常用控制算法	233
第7章 自动控制系统及仪表		162	9.2.5	集散控制系统的设计与选型	233
7.1	常用控制规律	162	9.2.6	集散控制系统的安装、调试与验收	235
7.1.1	位式控制	163	9.2.7	全数字化智能型集散控制系统——SUPCON JX-300X简介	236
7.1.2	比例控制	164	9.2.8	大型集散控制系统——TDC-3000简介	241
7.1.3	积分控制	166	9.2.9	DCS的设计及其在大型炼油厂的应用	245
7.1.4	微分控制	167	9.3	现场总线控制系统	247
7.1.5	组合控制	168	9.3.1	现场总线的基本概念、体系结构和特点	247
7.2	控制器	168			
7.2.1	控制器构成原理	168			
7.2.2	气动控制器	169			
7.2.3	电动控制器	169			
7.2.4	智能控制器	170			
7.2.5	可编程控制器	172			
7.3	执行器	183			
7.3.1	气动执行器	184			

9.3.2 现场总线网络协议模式与常见的现场总线系统	249	10.3.1 精馏塔的控制目标	276
9.3.3 现场总线控制系统的集成	251	10.3.2 精馏塔的干扰因素	278
9.3.4 基于现场总线的测量仪表和智能传感变送器	253	10.3.3 精馏塔的控制方案	279
9.3.5 Smart 现场总线系统在乙腈精制装置上的应用	256	10.4 化学反应器的温度控制	287
思考与练习题	258	10.4.1 化学反应器的控制要求和被控变量的选择	287
第 10 章 典型化工单元设备的控制	259	10.4.2 釜式反应器温度的自动控制	288
10.1 流体输送设备的控制	259	10.4.3 固定床反应器温度的控制	289
10.1.1 泵的控制	259	10.4.4 流化床反应器温度的自动控制	290
10.1.2 气体输送设备的控制	263	10.4.5 管式热裂解反应器的控制	291
10.1.3 离心式压缩机的防喘振	266	10.4.6 鼓泡床反应器的控制	293
10.2 换热设备的控制	268	思考与练习题	295
10.2.1 热量传递的方式与传热设备的结构类型	268	附录 1 热电偶分度表 (冷端温度: 0℃)	297
10.2.2 换热器的控制	270	附录 2 热电阻分度表	301
10.3 精馏塔的控制	276	参考文献	302

第 1 章 化工参数测量的基本知识

在化工生产过程中，一切操作过程都必须在预定条件下进行。为了正确地指导生产操作，保证化工过程的安全和产品质量，保障生产过程的稳定，其中必不可少的工作是准确而及时地检测出生产过程相关参数，如压力、流量、物位及温度等。用来检测这些参数的技术工具称为测量仪表，用来将这些参数转换为某种便于传送的信号（如电信号或气压信号）的仪表通常称为传感器，而把传感器的输出信号转换成统一标准的模拟信号或者满足特定标准的数字量信号的仪表称为变送器，将变送器的输出信号用指针、数字、曲线等形式显示出来，与/或同时送到控制器的装置称为显示装置。有时将传感器、变送器和显示装置统称为检测仪表；也常把测量仪表和传感器称为一次仪表，变送器和显示装置称为二次仪表。

为保证化工生产的正常运行和安全、提高产品质量、节约能源，必须准确及时地对压力、物位、流量、温度等参数进行测量和控制。过程参数检测是化工生产过程自动控制系统的重要组成部分。实施任何一种控制，首要问题是要准确及时地把被控参数检测出来，并变换成为调节、控制装置可识别的形式，将测量数据与预定的许可数据相比较，由控制系统根据两者的偏差的正负、大小和变化趋势，按照设定的控制程序进行调节。因此，化工参数的监测是实现生产过程自动化、改善工作环境、提高劳动生产率的首要环节。

1.1 化工参数的监测过程与测量误差

1.1.1 测量的概念

测量就是借助专门的技术工具，并采用某一计量单位把待测量的大小表示出来，实际上，测量是确定某一参数量值的过程。这个过程分为两种情况：一是狭义上的测量，即将被测参数的量值与作为标准量的单位进行比较，从而确定被测参数的量值；二是广义上的测量，将信号检出、放大处理及显示的综合过程。

一个完整的测量过程，一般应包括以下三个过程。

① 信息的提取。由传感器来完成，一般是将被测信息转换成电信号，也就是说，把被测信息转换成电压、电流或电路参数（电阻、电感、电容）等电信号输出。

② 信号的放大及处理。由于传感器输出的信号比较小，不足以驱动显示器显示或指示装置指示，所以一般是由放大器把信号进行放大处理。

③ 放大后的信号送入显示部分进行显示。

工业过程检测涉及的内容很广泛，一般分为：热工量（温度、压力、流量、物位等），机械量（质量、尺寸、力、速度、加速度等），成分量（介质的成分浓度、密度、黏度、湿度、酸度等），电工量（电压、电流、功率、电阻等）。本书主要介绍在化工生产过程中的热工量的检测方法及其仪表。

1.1.2 测量方法

对参数的测量方法，从不同的角度有不同的分类方法。按被测变量变化速度分为静态测

量（习惯称之为检测）和动态测量（习惯称之为监测），化工过程中各种热工量的测量多属于监测的概念；按测量敏感元件是否与介质接触可分为接触式测量和非接触式测量；按比较方式分为直接测量和间接测量；按测量原理分为偏差法、零位法、微差法等。

在实际应用中，更多地按直接测量和间接测量来分。

直接测量方法：是指用事先标定好的仪表或量具直接读出测量值，即把待测量与作为标准量的单位进行比较，确定被测量是标准量单位的倍数，直接得到测量结果的方法。例如，用刻度尺、天平等对长度和质量进行的测量就是直接测量。

间接测量方法：是指用多个仪表（或环节）所组成的一个测量系统（一般包含被测变量的测量、变换、传输、显示、记录和数据处理过程）的方法，这种测量方法在工程中应用广泛。通过测量与待测参数成某种函数关系的几个直接测量量，然后求出待测量。例如人体体温的测量，其测量过程是首先是将温度的变化转换为水银的体积变化，再由玻璃管内部的腔体把水银的体积变化转化为水银柱高度的变化，根据水银柱高度便可知温度的高低。

1.1.3 测量误差的特点及规律

测量的目的是期望能得到测量参数的“真实值”，正确地反映客观实际，但是，无论人们怎么努力（包括从测量原理、测量方法、仪表精度等方面进行努力），都无法测得“真实值”，而只能是尽量接近“真实值”。也就是说，测量值与“真实值”之间始终存在着一定差值，这种差值就是测量误差。在实际的测量过程中，常常是以精度较高的标准仪表指示值作为被测参数的真实值，而把一般检测仪表的指示值与标准仪表的指示值之差称作测量误差，该差值越小，说明测量仪表的可靠性越高。因此，求知测量误差的目的就是用来判断测量结果的可靠程度。

常用的测量误差分类方法有两种：一是按误差的性质分类；二是按误差的量纲分类。

(1) 按误差的性质分类

误差的性质分类有系统误差、随机误差、粗大误差。

① **系统误差** 是指在重复条件下，对同一被测量进行无限多次测量所得到的测量结果的平均值与被测量真值之差。系统误差是由于仪表本身缺陷、仪表使用不当或测量时外界条件变化等原因所引起的。系统误差包括方法误差（测量、计量、操作）和附加误差（环境条件、仪表本身、材料的热胀冷缩、操作者的读数习惯），它的大小、正负是有规律的，可以消除。

这种误差的特点有以下四种规律：a. 恒定的系统误差：数值大小或符号（指正或负的误差）都相同的误差；b. 误差按一定线性规律变化；c. 误差按某一周期规律变化；d. 误差变化没有规律。

必须指出，单纯地增加测量次数，无法减少系统误差对测量结果的影响，但在找出产生误差的原因之后，便可通过对测量结果引入适当的修正值而加以消除。例如采用标准孔板测量蒸汽流量时，如果工作时蒸汽压力和温度与设计孔板孔径时的数值不同，就会引起系统误差，如果已知变动工作状态后的蒸汽压力和温度值，则可以通过一定的函数关系计算，对仪表的指示值进行修正，以消除测量的系统误差。

② **偶然误差**（又称随机误差）是指在重复条件下，对被测量进行测量时，测量值与真实值之差。偶然误差是由许多复杂因素微小变化的综合作用引起的，它是指在相同的条件下，对某一参数进行重复多次测量时，多次测量的误差服从统计规律。这类误差的大小与测量次数有关，其算术平均值将随测量次数的增多而减小（但不是线性关系）。偶然误差决定

了测量的精密度。它的平均值愈小，测量愈精密。

偶然误差是没有规律可循的，在统计学上呈正态分布，具有如下特点。a. 对称性：正、负绝对值相等的误差出现的次数相同。b. 抵偿性：由于正、负绝对值相等的误差出现的次数相同，因此对某一参数进行重复多次测量时，正、负绝对值相等的误差互相抵消。c. 有界性：误差的绝对值不会超过某一值。d. 单峰值：误差的绝对值愈小，出现的次数愈多，因此曲线呈现出单峰性。

③ 疏忽误差（粗大误差） 测量误差明显超出正常测量条件下预期的范围，称为疏忽误差，也称粗大误差。实际测量工作中常常把那些误差明显超大的测量值称为坏值或异常值。

疏忽误差是由于测量人员在使用仪器或仪表时，不能认真地读取或记录测量数据而造成的。这类误差数值的大小很难估计。如果测量值中含有这类误差，那么这样的测量结果毫无意义。疏忽误差是工作责任心问题，由于测量者将仪表指示值读错、记错、仪表操作失误、计算错误等造成的，因此，必须认真工作，杜绝产生这类误差。

在对某一参数进行测量时，采用适当的方法来确定在测量的过程中是否存在系统误差和粗大误差，以提高测量的准确性。消除和削弱系统误差的影响，常用实验对比法和残差校核法；消除粗大误差的依据一般是检验测得的数据是否偏离正态分布函数而建立的。

(2) 按误差的量纲分类

按误差的量纲分类，可分为绝对误差、相对误差和引用误差三种。

① 绝对误差 在一定条件下，某一物理量所具有的客观量值称为真实值。测量的目的就是力图得到真实值。在实际的测量中，由于受测量方法、测量仪器、测量条件以及观测者水平等多种因素的限制，测量结果与真实值之间总存在一定的差异，即总是存在测量误差。这种差值被称为绝对误差。

设测量值为 x_1 ，测量值的真值为 x_t ，绝对误差为 Δ ，则

$$\Delta = x_1 - x_t = x - x_0 \quad (1-1)$$

式中， x 是用测量仪表得到的测量值； x_0 为用“标准仪表”得到的“标准值”

它的量纲与被测量相同，且有正、负之分。显然，绝对误差 Δ 越小，测量结果 x_1 与被测量的真实值 x_t 就越接近，表明测量的准确度越高。绝对误差可以由多种原因产生，引起绝对误差的原因可能有：测量装置的基本误差、非标准工况条件下所增加的附加误差、被测量随时间的变化、测量原理、影响量（不是被测量，但是对测量结果有影响的量）引起的误差、观测人员的疏忽产生的误差。

② 相对误差 用相对误差表示测量过程中某一测量值的精确程度是比较合适的。相对误差 δ 是在测量范围内某一点的绝对误差 Δ 与该点标准值 x_0 之比的百分数。

$$\delta = \frac{\Delta}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0} \quad (1-2)$$

③ 引用误差 引用误差 q 是描述仪表本身的测量准确程度的参数。它是在仪表量程范围内的最大绝对误差 Δ_{\max} 与量程 L 之比的百分数：

$$q = \frac{\Delta_{\max}}{L} = \frac{x - x_0}{L_{\text{上}} - L_{\text{下}}} \quad (1-3)$$

很显然，某个测量数据的引用误差大小不仅与其大小有关，还与仪表的量程大小有关，而且是一个无量纲的数据。

1.2 检测仪表的组成与分类

1.2.1 检测仪表的基本组成

与一般的机械量、电工量的检测有所不同，对于化工生产过程中化工参数的检测普遍是动态检测，这类用于监测的仪表品种多，类型复杂，结构各异。但它们都承担着共同的任任务——动态监测出被测参数的值，因此，它们在基本组成上具有明显的共性，都是由检测传感部分、中间传送（包括放大）部分和显示（包括转换成其它信号）部分构成。

(1) 检测传感部分

① 敏感元件 敏感元件是能够灵敏地感受到被测参数的变化并作出相应响应的元件。例如，弹性膜盒能感受到压力的大小而引起形变。一般用作敏感元件的输入/输出关系必须呈稳定的单值函数关系。

② 传感器 传感器是从被检测参量中提取出有用信息（通常是电量）的器件。其结构由敏感元件本身（有时包括一次或二次转换元件）与/或部分的测量电路构成，有电量传感器（例如热电偶元件）和电参数传感器（例如应变片）两类。

(2) 中间传送部分

中间传送部分（也称信号处理器）是把检测部分的输出信号进行放大、转换、滤波、线性化处理，以推动后级显示器的工作。

转换器是信号处理器的一种。传感器的输出通过转换器把非标准信号转换成标准信号，使之与带有标准信号的输入电路或接口的仪表配套，实现检测或调节功能。所谓标准信号，就是物理量的形式和数值范围都符合国际标准的信号。例如，直流电流 4~20mA、直流电压 1~5V、空气压力 20~100kPa 等都是当前工业控制过程中的通用标准信号。

变送器是传感器与转换器的另一种称呼。凡能直接感受非电性被测量并将其转换成标准信号输出的转换传送装置都可以称作变送器。例如，差压变送器、电磁流量变送器等。

(3) 显示部分

将测量结果用指针、记录笔、数字值、文字符号（或图像）的形式显示出来的器件就是检测仪表的显示部分。

在仪表的生产过程中，根据检测参数性质以及测量原理的不同，有的仪表把上述三部分功能组合在一起，如弹簧管压力表，有的则需要把这三部分制成各自相对独立的仪表，如热电偶温度计。在这种情况下，就有前面叙述过的“一次仪表”和“二次仪表”之分。

1.2.2 检测仪表的分类

化工生产过程中使用的仪表类型繁多、结构各异，因而分类方法也不少，现就常见的几种分类方法简介如下。

① 依据所测参数的不同，可分成压力（包括差压、负压）检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表、温度检测仪表、物质成分分析仪表等。

② 按仪表工作时使用的能源不同，分为气动仪表、电动仪表和液动仪表。

③ 按参数获得、传递、表达的方式不同，可分成检测型、指示型、记录型、信号型、远传指示型、累积型等。

④ 按精度等级以及使用场合的不同，可分为实用仪表、范型仪表、标准仪表。

⑤ 按仪表功能的组合形式不同,分为单元组合仪表和基地式仪表。

1.3 检测仪表的性能指标

尽管现代检测仪器、检测系统的种类、型号繁多,用途、性能千差万别,但仪表的基本性能指标不外乎静态特性、动态特性、可靠性、经济性。以下只讨论其静态特性和动态特性。

1.3.1 静态指标

(1) 量程

每个仪表都不可能在其参数测量值方面做到万能,也就是说,它的测量值总被限制在某个范围之内。在规定的误差极限内,测量仪表所能测得的被测参数的最小值到最大值的范围称为该仪表的测量范围,测量范围的上限与下限的代数差则被称作仪表的量程。

我国对于不同参数的测量仪表分别规定了相应的量程规范化系列数值,在进行仪表量程的选择时必须根据测量值的大小、波动性质和精确度要求,对照确定相应的上下限规格,不能自行随意指定仪表的量程。

(2) 精确度

仪表的精确度是描述仪表测量结果准确程度的指标。在实际的检测过程中,都存在一定的误差,其大小一般用精度来衡量。仪表的精度是仪表最大引用误差 q_{\max} 去掉正负号和百分号后的数值。

工业过程中常用仪表的精度等级来表示仪表的测量准确程度,是由国家统一规定的系列指标,也是仪表允许的最大引用误差,我国仪表精度等级大致有以下几级。

I级标准表——0.005、0.02、0.05。

II级标准表——0.1、0.2、0.35、0.5。

一般工业用仪表——1.0、1.5、2.5、4.0。

仪表的精度等级越小,精确度越高。当一台仪表的精度等级确定后,仪表的允许误差也随之确定了。仪表允许误差表示为 $\delta_{\text{允}}$,合格仪表的精度 q_{\max} 不超过其仪表的最大允许误差。

我们国家规定,每个仪表出厂前,应在其表盘正面的明显位置,用菱形、倒三角形或圆形线框标明其精确度,如图1-1所示。

这里需要特别强调的是,当根据仪表的校验数据来确定仪表的精度等级时,仪表的允许误差应大于或至少等于仪表校验结果所得的最大引用误差,并且要在国家统一规定的仪表等级数值里往大的一侧选最靠近的一个数确定;而根据工艺要求来选择仪表的精度等级时,仪表的允许误差应小于或至多等于工艺上所允许的最大引用误差。下面举例进行说明。

【例1-1】 有一台测压仪表,其标尺范围为 $0\sim 500\text{kPa}$,已知其绝对误差最大值 $\Delta p_{\max} = 4\text{kPa}$,求该仪表的精度等级。

解:先计算

$$q_{\max} = \frac{4}{500-0} \times 100\% = 0.8\%$$

该仪表的最大引用误差大于 0.5% ,而小于 1% ,按仪表精度等级的划分,该仪表的精度为1级。

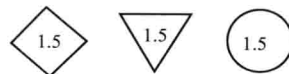


图1-1 仪表精确度的标示

现根据测量的需要,将该仪表的测量范围改为 200~400 kPa,仪表的绝对误差不变,此时仪表的最大引用百分误差为:

$$q_{\max} = \frac{4}{400-200} \times 100\% = 2\%$$

故该仪表的精度等级为 2.5 级。同时也说明,仪表的绝对误差相等,测量范围大的仪表精度高,反之仪表精度低。

【例 1-2】某台测温仪表的测温范围为 0~1000℃。根据工艺要求,温度指示值的误差不允许超过±6%,试问应选择哪个精度等级的仪表才能满足以上要求?如果要求测量的温度值误差不超过±6℃,又该选用哪个等级的仪表呢?

解:根据工艺上的要求,仪表的允许百分误差为

$$q_{\text{允}} = \frac{\pm 6}{1000-0} \times 100\% = \pm 0.6\%$$

如果将仪表的允许误差去掉“±”号与“%”号,该数值介于 0.5~1.0 之间,如果选择精度等级为 1.0 级的仪表,其允许的误差为±1.0%,超过了工艺上允许的数值,故应选择 0.5 级仪表才能满足工艺要求。

对于测温要求绝对误差不允许超过±6℃的情况,要求该仪表的最小相对误差为:

$$\delta_{\min} = \frac{\pm 6}{1000} \times 100\% = \pm 0.6\%$$

那么,这时选择量程为 0~1000℃测温仪表的精度等级应该为 0.5 级。

(3) 线性度

在 1.2.1 章节中曾要求过,一般用作敏感元件的输入/输出关系必须呈稳定的单值函数关系,对于理论上具有线性特性的检测仪表,往往由于各种因素的影响,使其实际测量值的特性曲线偏离理论上的线性值,如图 1-2 所示。

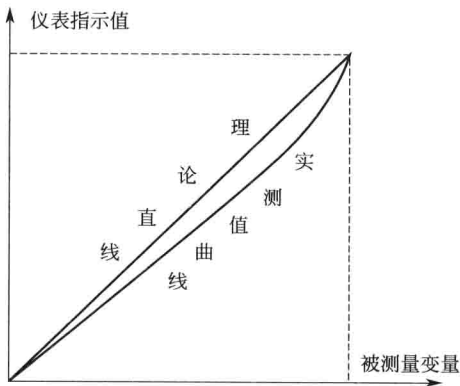


图 1-2 仪表线性度示意

线性度是表征线性刻度仪表的输出量与输入量的实际校准曲线与理论直线的吻合程度。通常总是希望测量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,而数字式仪表也可以不必采取线性化措施。线性度通常用实际测得的输入-输出特性曲线(称为校准曲线)与理论直线之间的最大偏差与测量仪表量程之比的百分数表示。

(4) 回差

回差又称变差,是指在外界条件不变的情况下,用同一仪表对被测量在仪表全部测量范围内进行正、反行程(即被测参数逐渐由小到大和逐渐由大到小)测量时,被测量值正行程和反行程所得到的两条特性曲线之间的最大偏差,如图 1-3 所示。

造成回差的原因很多,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。回差的大小,用在同一被测参数值下正、反行程间仪表指示值的最大绝对差值与仪表量程之比的百分数来表示,即:

$$\text{回差} = \frac{\text{正、反行程测量值的最大绝对差值}}{\text{仪表的量程}} \times 100\%$$

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。

(5) 灵敏度及与灵敏限

仪表针的线位移或角位移，与引起这个位移的被测参数变化量之比值称为仪表的灵敏度，即：

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

式中， S 为仪表的灵敏度； $\Delta\alpha$ 为指针的线位移或角位移； Δx 为引起 $\Delta\alpha$ 所需被测参数变化量。

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）。

所谓仪表的灵敏限，是指能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应不大于仪表允许绝对误差的一半。

检测仪表的灵敏度可以通过增大环节的放大倍数来提高；若仅加大灵敏度而不改变仪表的基本性能，这样来提高仪表精度是不合理的，反而可能出现似乎灵敏度很高，但精度却下降的虚假现象。为防止该现象，通常规定仪表标尺的最小分格值不能小于仪表允许误差的绝对值。

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，往往用分辨力来表示仪表灵敏度（或灵敏限）的大小。分辨力则是指数字显示器的最末位数字间隔所代表的被测参数变化量。

1.3.2 动态指标

上面所介绍的仪表的量程、精确度、回差、线性度、灵敏度及与灵敏限都是稳态（静态）性能指标。动态指标则是指检测仪表受外扰动作用（即参数本身发生变化）后，仪表指示值对被测变量实际值的响应情况。这些情况的不一致是由于检测系统中检测元件的各种运动惯性以及能量形式转换需要时间所造成的。衡量各种运动惯性的大小，以及能量传递的快慢常采用仪表的反应时间、检测系统的时间常数 T 、传递滞后时间（纯滞后时间） τ 三个参数表示。

(1) 仪表的反应时间

当用仪表对被测量进行测量时，被测量突然变化以后，仪表指示值总是要经过一段时间后才能准确地显示出来。反应时间就是用来衡量仪表能不能尽快反映出参数变化的品质指标。反应时间长，说明仪表需要较长时间才能给出准确的指示值，就不宜用来监测变化频繁的参数。因为在这种情况下，当仪表尚未准确显示出被测值时，参数本身早已改变了，仪表始终不能及时指示参数瞬时值的真实情况。所以，仪表反应时间的长短，实际上反映了仪表动态特性的好坏。

仪表的反应时间有不同的表示方法。当输入信号突然变化一个数值后，输出信号将由原来的值逐渐变化到新的稳态值。仪表的输出信号（即指示值）由开始变化到达到新稳态值的 63.2% 所用的时间，可用来表示反应时间，也有用变化到新稳态值的 95% 所用的时间来表示反应时间的。

(2) 时间常数

在各种检测过程中，如果被测参数受到外界的阶跃干扰作用而发生变化，其仪表监测值

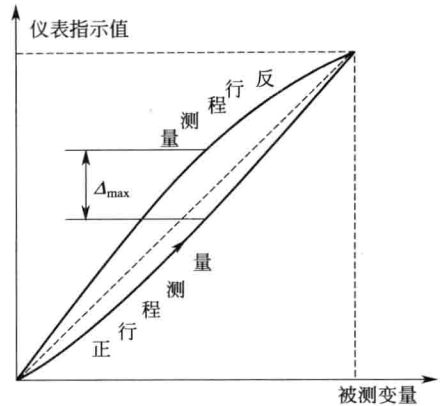


图 1-3 测量仪表的回差示意图

响应曲线从开始变化到达到新的稳定值的过渡时间被称为时间常数 T 。如果时间常数 T 越大, 则响应曲线上升越慢, 仪表检测数据的动态误差存在的时间越长; 反之, 曲线上升越快, 则动态误差存在时间越短。在设计检测系统时, 总希望把 T 值取得小一些。仪表阶跃响应的时间常数如图 1-4 所示, 监测系统的滞后时间如图 1-5 所示。

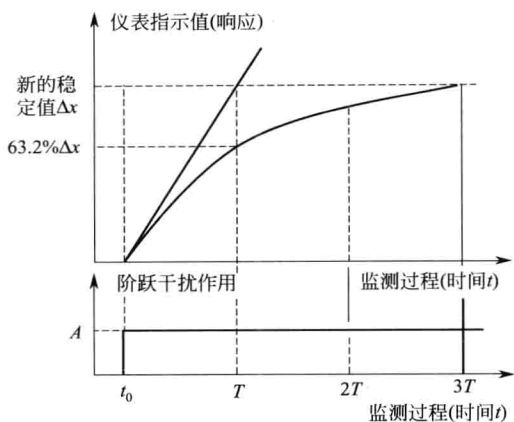


图 1-4 测量仪表对参数变化的响应 (时间常数 T)

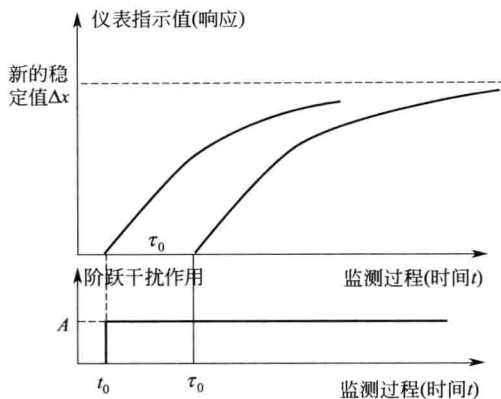


图 1-5 监测系统的滞后时间 τ_0

(3) 滞后时间

在监测系统中, 如果被测参数受到外界的干扰作用后, 被控变量不能立即显示其他变化, 这种现象称为滞后现象。如其中存在较长的取样管线和预处理等环节, 使得系统在显示测量值时存在时间延迟, 即纯滞后时间 τ_0 。在纯滞后时间 τ_0 内, 动态误差最大, 且一直延续到时间 τ_0 结束; 而时间常数 T 对动态误差的影响是逐渐减少的。故在检测系统中 τ_0 的不利影响远远超过时间常数 T 的影响, 应引起足够的重视, 使其越小越好。 τ_0 的产生主要是由于介质的输送需要一段时间而引起的。

思考与练习题

1. 何谓测量误差? 什么是测量误差? 基本误差与附加误差有何不同? 检测仪表的误差有哪几种表示方法? 相对误差与引用误差有何异同? 如何减小系统误差?
2. 工业检测仪表是如何进行分类的? 检测仪表有哪几个基本组成部分? 试述各部分作用。
3. 何谓检测仪表的准确度等级? 我国仪表的精度等级分为多少级?
4. 通过查阅资料, 请你写出我国对于弹簧管压力计和水银温度计分别规定的量程系列。
5. 某温度表的测温范围为 $0\sim 1000^{\circ}\text{C}$, 准确度等级为 0.5 级, 试问此温度表的允许最大误差为多少? 在校验点为 500°C 时, 该温度表的指示值为 504°C , 请问该温度表在这一点上的准确度是否符合 0.5 级, 为什么?
6. 如果有一台压力表, 其测量范围为 $0\sim 1.6\text{MPa}$, 在对其进行常规校验时, 得到如表 1-1 所示的数据。

表 1-1 压力表校验数据

项目	上行程	下行程
被校表读数/MPa	0.0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6	1.6, 1.2, 0.8, 0.4, 0.0
标准表读数/MPa	0.000, 0.386, 0.790, 1.210, 1.595	1.595, 1.215, 0.810, 0.405, 0.000

- (1) 求出该压力表的回差。
- (2) 问该压力表是否符合 1.5 级准确度?

第 2 章 化工过程压力的监测

在化工生产过程中，许多工艺过程只有在一定的压力条件下才能进行，因而经常会遇到比大气压高几百倍，甚至上千倍的压力，或者比大气压低很多的工艺条件。例如，氨的合成必须在 32MPa 的高压下进行；某些精馏或蒸发过程需要很高的负压（也称真空度）。因为压力可以改变化学平衡，影响反应速度，也可以改变物质性质，提高过程质量等。然而，所有工艺设备的承压能力都是有限的，超过设备的额定压力容易造成设备的损坏，甚至造成爆炸事故。因此，为了保证生产始终处于高产、优质、安全、低消耗，以获得最好的技术经济指标，在各种化工过程中，对压力进行监测和控制是十分重要的。

此外，压力测量的意义还不局限于它自身，有些其他参数的测量，如物位、流量等往往是通过测量压力或差压来进行的，即测出了压力或差压，便可确定物位或流量。

2.1 压力的测量方法

压力是一物体施加于另一物体单位面积上的均匀、垂直的作用力（在物理学中称为压强）。在化工生产过程中，流体给器壁的压力是由流体分子的重量和分子运动对器壁撞击而产生，由受力的面积和垂直作用力大小的决定，方向指向受压物体，可表示为：

$$p = \frac{F}{S} \quad (2-1)$$

式中 p ——物体单位面积上所受到的压力， N/m^2 ；

F ——物体受到的垂直作用力， N ；

S ——受力面积， m^2 。

物体单位面积上所受压力的总和称为绝对压力。来源于空气（柱）形成的压力称为大气压力。当绝对压力大于大气压力时，两者的差为正，称为表压。反之，差值为负，称为真空度（有时候也称为负压）。测量绝对压力的仪表称为绝对压力表。普通压力仪表测得的压力是表压。测量负压的仪表一般称为真空表。既能测量表压又能测量负压的仪表称为压力真空表。

由于各种工艺设备和检测仪表通常都是处于大气之中，本身就承受着大气压力，所以工程上经常采用表压力或真空度来表示压力的大小；因此，一般的压力检测仪表所指示的压力也是表压力或真空度。本书在以后章节中所提到的压力，若无特殊说明，均指的是表压。

有时候，工业生产上还需要测量和比较某两个测压点之间的压力差。其中，差压计和差压变送器就广泛应用于节流式流量计和压力式液位计中。

1960 年第 14 届国际权度大会规定以 Pa（Pascal，帕）作为国际制压力单位。它等于每 1m^2 的面积上垂直作用 1N 的力所产生的压力，即 $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。我国也已推行并普遍采用国际制压力单位。

根据流体静力学原理，对于密度为 ρ 、高度为 H 的流体柱，由于其自身重力对容器底部所产生的压力为：