

自动化国家级特色专业系列教材

过程测控技术 及仪表装置

孙自强 主编

刘 笛 刘 济 参编



化学工业出版社

自动化国家级特色专业系列教材

过程测控技术 及仪表装置

孙自强 主编

刘 笛 刘 济 参编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书介绍过程控制中各种常见变量的检测和控制技术,以及相应的仪表、计算机控制系统及装置,并结合测控技术的发展,介绍一些新的应用方法。在过程测量仪表方面主要介绍温度、压力、流量、物位、成分分析的检测技术和仪表,以及过程变量显示记录仪表。在过程控制仪表方面主要介绍变送器、执行器、控制器。在计算机控制系统及装置方面主要介绍可编程控制器、计算机监督控制系统、集散控制系统和现场总线。此外还介绍了软测量技术、多传感器数据融合技术、虚拟仪器以及无线传感器网络技术过程测控新技术。

本书将基本原理介绍与实际应用相结合,可作为高等院校自动化专业、测控技术与仪器专业以及其他涉及过程测量与控制的专业(如石油、石化、化工、制药、食品、冶金、纺织、轻工等)教材使用,也可用于过程自动化专业技术培训,供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程测控技术及仪表装置/孙自强主编;刘笛,刘济
参编. —北京:化学工业出版社,2017.9

自动化国家级特色专业系列教材

ISBN 978-7-122-30326-4

I. ①过… II. ①孙… ②刘… ③刘… III. ①过
程控制-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 181307 号

责任编辑:郝英华

责任校对:王素芹

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 刷:三河市延风印装有限公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 403 千字 2017 年 11 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:42.00 元

版权所有 违者必究

前 言

生产过程需要对相关工艺参数进行监控,以保证生产过程安全和正常运行,保证产品质量和产量,并且满足绿色环保和节能降耗的要求。要实现对相关工艺参数的监控,首先要利用检测技术采集工艺变量信息,在经过适当的处理之后,将检测信息传输给系统的控制器;控制器对输入信息按照一定控制规律运算加工,形成控制信号,通过执行器对生产过程施加控制作用。这一切工作都是通过自动化仪表和计算机装置来完成的,因此信息时代工业生产离不开自动化技术的支持。从事过程控制的专业技术人员必须具备检测技术、自动控制技术、计算机技术和通信网络技术等方面的基础理论知识和工程应用能力。

本书是有关过程测量和控制技术及其相关仪表和系统装置的基础理论与应用技术的教材,主要结合化工生产过程介绍过程控制中各种常见变量、部分成分和物性参数的检测技术及其相应的仪表原理和工程实际应用知识,介绍过程控制常用的控制规律方法和控制仪表。鉴于计算机在过程控制领域的应用日益普及,本书在介绍经典的检测控制技术和仪表装置的基础上,介绍了控制系统中相关的计算机应用技术。此外,结合测控技术的发展,还简单介绍了一些新的测控技术,引导读者开拓视野。希望通过本书能够帮助读者系统了解和掌握过程测控技术,并能应用到实际工作中去,以期达到“既能仰望星空,又能脚踏实地”的学习效果。

本书共有 14 章,第 1 章绪论,介绍过程测控技术的一些基本概念和基础知识;第 2 章至第 6 章分别介绍温度、压力、流量、物位、成分分析的检测方法;第 7 章为显示仪表,介绍过程变量测量后的显示记录方法;第 8 章介绍过程控制中常见的变送器;第 9 章为执行器,主要介绍过程控制中常用的执行机构和控制阀,及其辅助装置;第 10 章介绍常用控制规律以及控制器;第 11 章至第 13 章分别介绍近年来随着计算机技术应用的普及而得到推广应用的可编程序控制器、计算机监督控制系统、集散控制系统和现场总线;第 14 章介绍现代测控技术和仪表的一些新发展及其应用,包括软测量技术、多传感器数据融合技术、虚拟仪器以及无线传感器网络技术。

本书由华东理工大学孙自强主编,刘笛、刘济参加了编写。其中第 1~7 章由孙自强编写;第 8~10 章由刘笛编写;第 11~14 章由刘济编写。

本书配有电子课件,供选用本书作为教材的院校使用,如有需要,请发邮件至 cipedu@163.com 索取。

过程测控技术是多学科交叉技术,新技术和新仪表装置不断出现在生产现场,且更新周期越来越短。由于编者水平和知识有限,书中难免有不足之处,真诚欢迎广大读者批评、指正。

编者

2017 年 7 月于上海

目 录

第1章 绪论

1.1 过程测控仪表在自动控制系统中的作用和发展状况	1
1.1.1 过程测控仪表在自动控制系统中的作用	1
1.1.2 过程测控仪表发展状况	2
1.2 测控仪表主要相关基础知识	4
1.2.1 仪表主要性能指标	5
1.2.2 测量误差	6
1.2.3 测量误差与仪表精度等级的关系	7
1.3 化工过程生产安全防爆技术简介	8
思考题与习题	9

第2章 温度检测

2.1 温度检测方法	10
2.2 热电偶	11
2.2.1 热电偶工作原理	11
2.2.2 热电偶种类	12
2.2.3 热电偶结构	13
2.2.4 补偿导线	14
2.2.5 热电偶参比端温度补偿	14
2.2.6 热电偶串、并联线路	16
2.3 热电阻	16
2.3.1 金属热电阻	16
2.3.2 半导体热敏电阻	17
2.4 热电偶、热电阻的选用	18
2.4.1 选择	18
2.4.2 安装	18
2.4.3 使用	19
2.5 辐射式测温仪表	19

2.6 光纤温度传感器.....	21
思考题与习题	21

第3章 压力检测

3.1 压力单位和压力检测方法.....	22
3.1.1 压力的单位	22
3.1.2 压力的表示方法	23
3.1.3 压力的检测方法	23
3.2 常用压力检测仪表.....	23
3.2.1 弹性式压力表	23
3.2.2 液柱式压力计	25
3.2.3 负荷式压力计	25
3.2.4 压力传感器	25
3.2.5 压力开关	28
3.3 压力表的选用.....	29
思考题与习题	29

第4章 流量检测

4.1 流量基本概念和检测方法.....	30
4.1.1 流量基本概念	30
4.1.2 流量检测的主要方法	31
4.2 体积式流量计.....	32
4.2.1 差压流量计	32
4.2.2 电磁流量计	42
4.2.3 转子流量计	45
4.2.4 涡轮流量计	47
4.2.5 旋涡流量计	47
4.2.6 超声流量计	48
4.2.7 容积流量计	48
4.3 质量流量计.....	50
4.3.1 科里奥利质量流量计	50
4.3.2 热式质量流量计	52
4.3.3 间接式质量流量计	54
4.4 流量测量仪表现场校验.....	54
4.4.1 零点校验	55
4.4.2 示值校验	55
4.5 流量检测仪表的选用.....	57
4.5.1 仪表选型步骤	57
4.5.2 按仪表性能方面选用	59
4.5.3 按流体特性方面选用	60
4.5.4 安装条件方面	61

4.5.5 环境条件方面 62

4.5.6 经济方面 63

思考题与习题 64

第5章 物位检测

5.1 物位检测方法 65

5.2 常用物位检测仪表 66

5.2.1 浮力式液位计 66

5.2.2 差压式液位计 66

5.2.3 电容式物位计 68

5.2.4 超声波物位计 69

5.2.5 核辐射式物位计 70

5.2.6 雷达物位计 70

5.2.7 伺服液位计 71

5.2.8 磁致伸缩液位计 72

5.2.9 物位开关 72

5.3 物位检测仪表的选用 73

思考题与习题 74

第6章 成分分析仪表

6.1 成分分析方法 75

6.1.1 热导式气体成分检测 75

6.1.2 磁导式含氧量检测 76

6.1.3 氧化锆分析器 77

6.1.4 红外线成分检测 77

6.1.5 电导式浓度监测 78

6.1.6 色谱分析 78

6.1.7 酸度 (pH) 检测 80

6.1.8 湿度检测 81

6.1.9 密度检测 81

6.1.10 水质浊度计 82

6.1.11 溶解氧分析仪 82

6.1.12 微量氧分析仪 83

6.1.13 可燃气体及有毒气体报警器 84

6.2 成分、物性检测的静态特性 84

6.3 成分、物性检测的动态特性 85

思考题与习题 86

第7章 显示仪表

7.1 模拟式显示仪表 88

7.1.1 电子电位差计 88

7.1.2 电子自动平衡电桥 90

7.2 数字式显示仪表	91
7.2.1 数显仪表的分类	91
7.2.2 数显仪表的主要技术指标	91
7.2.3 数显仪表的基本组成	92
7.3 新型显示仪表	95
7.3.1 显示仪表发展动态	96
7.3.2 无纸记录仪	97
7.3.3 虚拟显示仪表	97
思考题与习题	98

第8章 变送器

8.1 变送器的构成	99
8.1.1 模拟变送器的构成	99
8.1.2 智能变送器的构成	100
8.1.3 量程调整、零点调整和零点迁移	101
8.2 差压变送器	102
8.2.1 电容式差压变送器	102
8.2.2 压阻式差压变送器	111
8.2.3 智能式差压变送器	113
8.3 温度变送器	114
8.3.1 模拟式温度变送器	114
8.3.2 一体化温度变送器	126
8.3.3 智能式温度变送器	127
思考题与习题	128

第9章 执行器

9.1 执行器的基本概念	129
9.1.1 执行器的组成	129
9.1.2 执行器的作用方式	129
9.2 电动执行机构	130
9.3 气动执行机构	130
9.3.1 薄膜式	131
9.3.2 活塞式	132
9.4 控制阀	133
9.4.1 控制阀结构	133
9.4.2 控制阀类型	133
9.4.3 控制阀的流量特性	135
9.5 阀门定位器	139
9.5.1 气动阀门定位器	139
9.5.2 电-气阀门定位器	140
9.5.3 智能阀门定位器	141

9.6 控制阀的选用	142
9.6.1 控制阀结构形式及材质的选择	142
9.6.2 控制阀流量特性的选择	144
9.6.3 控制阀口径的确定	145
9.7 自力式调节阀	146
9.7.1 自力式压力调节阀	146
9.7.2 自力式温度调节阀	147
9.7.3 自力式流量调节阀	148
9.8 数字阀和智能控制阀	148
9.8.1 数字阀	148
9.8.2 智能控制阀	149
思考题与习题	149

第10章 控制器

10.1 控制器的基本概念	150
10.1.1 控制规律	150
10.1.2 PID 控制规律及其特点	151
10.2 PID 算法实现	156
10.2.1 模拟 PID 算法实现	156
10.2.2 离散 PID 算法实现	157
10.2.3 采用离散 PID 算法与连续 PID 算法的性能比较	158
10.3 基型控制器	158
10.3.1 原理方框图	159
10.3.2 线路分析	159
10.3.3 基型控制器的使用	168
10.4 数字式控制器	169
10.4.1 数字式控制器的主要特点	169
10.4.2 数字式控制器的基本构成	170
思考题与习题	173

第11章 可编程控制器

11.1 概述	174
11.1.1 可编程控制器	174
11.1.2 可编程控制器基本结构	175
11.1.3 可编程控制器工作原理	177
11.1.4 可编程控制器的编程语言	178
11.2 常见可编程控制器及其应用	185
11.2.1 西门子 S7 系列 PLC 概述	185
11.2.2 西门子 S7 系列 PLC 的应用举例	187
思考题与习题	189

第12章 计算机监督控制系统

12.1 计算机监督控制系统组成结构	191
12.1.1 计算机监督控制系统硬件组成	191
12.1.2 计算机监督控制系统软件组成	195
12.2 典型的组态软件	197
12.2.1 iFix 组态软件	197
12.2.2 组态王	200
思考题与习题	203

第13章 集散控制系统和现场总线

13.1 概述	204
13.2 集散控制系统	205
13.2.1 集散控制系统组成	205
13.2.2 集散控制系统通信网络	207
13.2.3 典型集散控制系统及其应用	210
13.3 现场总线	219
13.3.1 几种常见的现场总线	219
13.3.2 实时工业以太网技术	223
13.3.3 现场总线控制系统	227
思考题与习题	229

第14章 现代测控技术与仪表

14.1 软测量技术	230
14.1.1 软测量的概念	230
14.1.2 软测量技术的实现方法	231
14.1.3 软测量建模技术	232
14.2 多传感器数据融合技术	233
14.2.1 概述	233
14.2.2 多传感器数据融合结构	234
14.2.3 多传感器数据融合方法	235
14.3 虚拟仪器	236
14.3.1 概述	236
14.3.2 虚拟仪器结构和硬件模块	237
14.3.3 虚拟仪器的软件技术	238
14.4 无线传感器网络技术	239
14.4.1 无线传感器网络的概念和特点	239
14.4.2 无线传感器网络的结构	240
14.4.3 无线传感器网络的关键技术	241
思考题与习题	242

第1章 绪 论

现代生产过程离不开检测与控制。所谓“检测”，是采取各种方法获得反映客观事物或对象的运动属性的各种数据，对数据进行记录并进行必要的处理；“控制”，是采取各种方法支配或约束某一客观事物或对象的运动过程以达到一定的目的。

1.1 过程测控仪表在自动控制系统中的作用和发展状况

1.1.1 过程测控仪表在自动控制系统中的作用

以锅炉汽包液位控制系统为例，介绍过程测控仪表在自动控制系统中的作用。

如图 1-1 所示是工业生产常见的锅炉汽包示意图。其液位是一个重要的工艺参数。液位过低，影响产汽量，且易烧干而发生事故；液位过高，则会影响汽包内的汽水分离，使蒸汽中夹带水分，对后续生产设备造成影响和破坏。因此对汽包液位应严加控制。

在图 1-1 中，如果一切条件（包括给水流量、蒸汽量等）都近乎不变，只要将进水阀置于某一适当开度，则汽包液位能保持在一定高度。但实际生产过程中这些条件是变化的，例如进水阀前的压力变化，蒸汽流量的变化等（这些影响汽包液位保持在一定高度的因素都称为扰动作用）。此时若不进行控制（即不去改变阀门开度），则液位将偏离规定高度。因此，为保持液位恒定，操作人员应根据液位高度变化情况，控制进水量。

手工控制时主要有以下 3 个步骤：

- ① 观察被控变量的数值，在此即为汽包的液位；
- ② 把观察到的被控变量值与设定值（指工艺所要求的汽包液位高度）加以比较，根据二者的偏差大小或随时间变化的情况，作出判断，并发布命令；
- ③ 根据命令操作给水阀，改变进水量，使液位回到设定值。

如采用检测仪表和自动控制装置来代替手工控制，就成为测控系统。

图 1-2 为锅炉汽包液位测控系统示意图。当系统受到扰动作用后，被控变量（液位）发生变化，通过检测仪表（液位变送器 LT）得到其检测值。在自动控制装置（液位控制器 LC）中，将检测值与设定值比较，得到偏差，经过运算后，发出控制信号，这一信号作用于执行器（在此为控制阀），改变给水量，以克服扰动的影响，使被控变量回到设定值。这样就完成了所要求的控制任务。这些检测仪表、控制装置、执行机构和被控对象一起也就组

成了一个自动控制系统，其结构如图 1-3 所示。

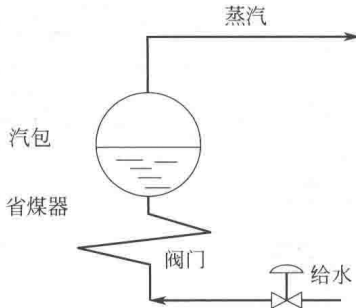


图 1-1 锅炉汽包示意图

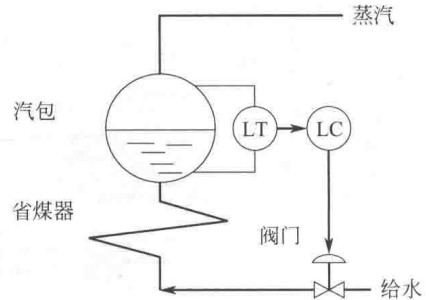


图 1-2 锅炉汽包液位测控系统示意图

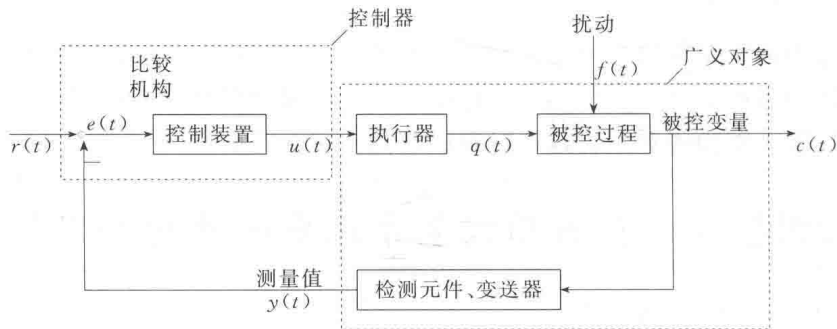


图 1-3 自动控制系统结构方框图

由图 1-3 可以看出，简单的自动控制系统除了被控过程单元，还需要三个测控仪表单元：检测元件和变送器、控制器、执行器。

检测元件和变送器单元的功能是感受并测出被控变量的大小，变换成控制器所需要的信号形式。一般检测单元为敏感元件、转换元件及信号处理电路组成的传感器，若检测单元输出的是标准信号，则称检测单元为变送器。

控制器包括比较机构和控制装置，将检测单元的输出信号与被控变量的设定值进行比较，得出偏差信号，根据这个偏差信号的正负、大小变化情况，按一定的运算规律计算出控制信号传送给执行机构。

执行器的作用是接收控制器发出的控制信号，相应地去改变控制变量。

除此以外，自动控制系统还可根据需要设置转换器、运算器、操作器、显示装置和各类自动化仪表和装置系统，以完成复杂的测控任务。

1.1.2 过程测控仪表发展状况

(1) 过程检测仪表的发展状况

传统的检测仪表是模拟式仪表。检测元件和变送器将被控变量（物理量或化学量）变换成另一物理量，此物理量（常见为电压、电流等）随被控变量作相应变化，这种变化是对被控变量的模拟，与此相配套的仪表称模拟式仪表。模拟式仪表常用电压、电流传输信号，用标尺、指针、曲线等方法显示、记录被控变量检测值。

随着脉冲数字电路的发展以及微处理技术、数字通信技术在测控仪表中的应用，仪表产品全面由模拟式向数字式方向发展。数字式仪表是直接由数字量显示或以数字形式记录打印

被测变量值的仪表。它具有模/数转换器,可将被测变量转换成十进制数码,显示清晰直观,无读数视差。由于其内部没有模拟式仪表中所必需的机械运动结构,因此检测和显示速度、检测准确性及重现性等都有很大提高。数字式仪表在数字显示的同时还可以直接输出代码,与计算机接口通信,可直接用于生产过程计算机控制系统中。若在数字式仪表内部配以数/模转换电路,则可输出模拟信号供生产过程控制器用。如再配置某种调节或控制电路就成为集检测显示与调节于一身的数字显示调节仪;配以微处理器可组成带有自诊断、自校正、非线性补偿等功能的智能化数显仪表。数字式仪表能与多种传感器配合检测显示各种工艺参数,并可进行巡回检测、越限报警及实现生产过程自动控制。由于数显仪表结构紧凑、功能齐全、可靠性强,且其价格正不断下降,因而在当今现代化生产过程中得到越来越广泛的应用。数显仪表正逐步取代模拟式显示仪表,在自动控制中起着重要作用。

近年来,随着科学技术尤其是电子信息技术的高速发展,检测仪表的内涵较之以往也发生了很大变化。其自身结构已从单纯机械结构、机电结合或机光电结合的结构发展成为集传感技术、计算机技术、电子通信技术、现代光学、精密机械等多种高新技术于一身的系统,其用途也从单一功能发展为集数据采集、信号传输、信号处理以及控制为一体的测控过程系统,并且已经向智能化、虚拟化、网络化和微型化发展。

(2) 过程控制仪表的发展状况

过程控制系统的发展需要相配套的测控仪表。从过程控制系统结构来看,经历了以下四个阶段。

20世纪50年代是以基地式控制器等组成的控制系统,如自力式温度控制器、就地式液位控制器等,它们的功能往往限于单回路控制。

20世纪60年代出现单元组合仪表组成的控制系统,单元组合仪表有电动和气动两大类。所谓单元组合,就是把自动控制系统仪表按功能分成若干单元,依据实际控制系统结构的需要进行适当的组合。因此单元组合仪表使用方便、灵活。单元组合仪表之间用标准统一信号联系。气动仪表(QDZ系列)为20~100kPa气压信号。电动仪表信号为0~10mA直流电流信号(DDZ—II系列)和4~20mA直流电流信号(DDZ—III系列)。这种控制系统控制策略主要是PID控制和常用的复杂控制系统(例如串级、均匀、比值、前馈、分程和选择性控制等)。

20世纪70年代出现了计算机控制系统,最初是直接数字控制(DDC)实现集中控制,代替常规控制仪表。由于集中控制的固有缺陷,未能普及及推广就被集散控制系统(DCS)所替代。DCS在硬件上将控制回路分散化,数据显示、实时监督等功能集中化,有利于安全平稳生产。就控制策略而言,DCS仍以简单PID控制为主,再加上一些复杂控制算法,并没有充分发挥计算机的功能和控制水平。

20世纪80年代以后出现二级优化控制,在DCS的基础上实现先进控制和优化控制。在硬件上采用上位机和DCS或电动单元组合仪表相结合,构成二级计算机优化控制。随着计算机及网络技术的发展,DCS出现了开放式系统,实现多层次计算机网络构成的管控一体化系统(CIPS)。同时,以现场总线为标准,实现以微处理器为基础的现场仪表与控制系统之间进行全数字化、双向和多站通信的现场总线网络控制系统(FCS)。

智能控制(Intelligent Control, IC)是极受人们关注的又一个领域,最主要的是三种形式:专家系统,模糊控制,人工神经网络控制。与之相对应的智能仪表也相继出现。

控制器种类繁多,有常规控制器和采用微机技术的各种控制器。控制器一般可按能源形式、信号类型和结构形式进行分类。

① 按能源形式划分。控制器按能源形式可分为电动、气动等。过程控制一般都用电动和气动控制仪表，相应地采用电动和气动控制器。

气动控制仪表发展较早，其特点是结构简单、性能稳定、可靠性高、价格便宜，且在本质上安全防爆，因此广泛应用于石油、化工等有爆炸危险的场所。

电动控制仪表相对气动控制仪表出现得较晚，但由于电动控制仪表在信号的传输、放大、变换处理，实现远距离监视操作等方面比气动仪表容易得多，并且容易与计算机等现代化信息技术工具联用，因此电动控制仪表的发展极为迅速，应用极为广泛。近年来，电动控制仪表普遍采取了安全火花防爆措施，解决了防爆问题，所以在易燃易爆的危险场所也能使用电动控制仪表。

目前采用的控制器以电动控制器占绝大多数。

② 按信号类型划分。控制器按信号类型可以分为模拟式和数字式两大类。

模拟式控制仪表的传输信号通常是连续变化的模拟量，其线路较为简单，操作方便，在过程控制中曾经得到广泛应用。

数字式控制仪表的传输信号通常是断续变化的数字量，以微型计算机为核心，其功能完善，性能优越，能够解决模拟式仪表难以解决的问题。近 30 年来数字式控制仪表不断应用于过程控制中，极大地提高了控制质量。数字式控制仪表已经大规模取代模拟式控制仪表。

③ 按结构形式划分。控制器按结构形式可分为基地式、单元组合式、组装式以及基于集散控制和现场总线的控制器。

基地式控制仪表将控制机构与指示、记录机构组成为一体，结构简单，但通用性差，使用不够灵活，一般仅用于一些简单控制系统。

单元组合式控制仪表是将整套仪表划分成能独立实现某种功能的若干单元，各个单元之间用统一标准信号联系。将各个单元进行不同的组合，可以构成具有各种功能的控制系统，使用灵活方便，因此在生产现场得到广泛应用，如电动Ⅲ型控制器在一些老装置上还在使用，气动单元控制器由于控制滞后太大已经很少使用。

组装式控制器是在单元组合仪表的基础上发展起来的一种功能分离、结构组件化的成套仪表装置。

随着计算机技术发展，出现了各种以微处理器为基础的控制器，如可编程序调节器（早期又称“单回路调节器”），对于某些单一回路的控制或只有少数几个回路控制的生产过程来说比较适用。近 30 多年来可编程序控制器（PLC）发展迅速，从原先仅有逻辑控制功能发展到兼有控制回路，在结构、功能、可靠性等各个方面都使控制器进入一个新阶段，应用场合不断扩大，逐渐成为控制器主流品种。此外，基于集散控制系统（DCS）或者现场总线（FB）的控制器，它们除了一般的控制功能外，还具有其他先进控制、优化运算、网络通信等功能，适应信息社会大规模生产需要。

1.2 测控仪表主要相关基础知识

在过程自动化中要通过检测元件获取生产工艺变量，最常见变量是温度、压力、流量、物位。检测元件又称为敏感元件、传感器，它直接响应工艺变量，并转化成与之成对应关系的输出信号。这些输出信号包括位移、电压、电流、电阻、频率、气压等。如热电偶测温时，将被测温度转化为热电势信号；热电阻测温时，将被测温度转化为电阻信号；节流装置测流量时，将被测流量的变化转化为压差信号。由于检测元件的输出信号种类繁多，且信

号较弱不易察觉，一般都需要将其经过变送器处理，转换成标准统一的电气信号（如 4~20mA 或 0~10mA 直流电流信号，20~100kPa 气压信号）送往显示仪表，指示或记录工艺变量，或同时送往控制器对被控变量进行控制。有时将检测元件、变送器及显示装置统称为检测仪表，或者将检测元件称为一次仪表，将变送器和显示装置称为二次仪表。

检测技术的发展是推动信息技术发展的基础，离开检测技术这一基本环节，就不能构成自动控制系统，再好的信息技术也无法用于生产过程。检测技术在理论和方法上与物理、化学、生物学、材料科学、光学、电子学以及信息科学密切相关。目前生产规模不断扩大，技术日趋复杂，需要采集的过程信息种类越来越多。除了需要检测常见的过程变量外，还要检测物料或产品的组分、物性、环境噪声、机械振动、火焰、颗粒尺寸及分布等。还有一些变量如转化率、催化剂活性等无法直接检测，但近年来出现了一种新型检测技术——软测量技术，专门用于解决一些难以检测的问题。

对于检测仪表来说，检测、变送与显示可以是三个独立部分，也可以只用到其中某些部分。例如，热电偶测温所得毫伏信号可以不通过变送器，直接送到电子电位差计显示。当然，检测、变送与显示可以有机地结合在一起成为一体，例如单圈弹簧管压力表。

过程控制对检测仪表有以下三条基本的要求：

- ① 检测值 $y(t)$ 要正确反映被控变量 $C(t)$ 的值，误差不超过规定的范围；
- ② 在环境条件下能长期工作，保证检测值 $y(t)$ 的可靠性；
- ③ 检测值 $y(t)$ 必须迅速反映被控变量 $C(t)$ 的变化，即动态响应比较迅速。

第①条基本要求与仪表的精确度等级和量程有关，与使用、安装仪表正确与否有关；第②条基本要求与仪表的类型、元件材质以及防护措施等有关；第③条基本要求与检测元件的动态特性有关。

1.2.1 仪表主要性能指标

衡量一台仪表性能的优劣通常采用的主要性能指标包括精确度、灵敏度、分辨率、线性度、变差、滞环误差、死区、稳定性、动态误差等。如表 1-1 所示。

表 1-1 仪表主要性能指标

性能指标	描述	说明
精确度(简称精度)	检测结果与被检测(约定)真值的一致程度	按国家统一规定的允许误差大小来划分仪表的精度等级
灵敏度	仪表输出变化量与引起此变化的输入变化量之比	对于模拟式仪表而言,仪表输出变化量是仪表指针的角位移或线位移。灵敏度反映了仪表对被检测变化的灵敏程度
分辨率	仪表输出能响应和分辨的最小输入变化量,又称仪表灵敏限	对于数字式仪表而言,分辨率就是数字显示器最末位数字间隔代表被检测的变化与量程的比值
线性度	仪表实际特性偏离线性的最大程度	
变差	在外界条件不变的情况下使用同一仪表对某一变量进行正反行程(即在仪表全部检测值范围内逐渐从小到大和从大到小)检测时对应于同一检测值所得的仪表读数之间的差异	造成变差的原因很多,例如传动机构的间隙、运动部件的摩擦、弹性元件的弹性滞后等。在仪表使用过程中,要求仪表的变差不能超出仪表的允许误差
滞环误差	全范围上行程和下行程移动减去死区值后得到的被检测两条校准曲线间的最大偏差	
死区	输入变量的变化不至引起输出变量发生变化的有限数值区间	

续表

性能指标	描述	说明
稳定性	系统受外界扰动偏移稳态条件后,当扰动终止时回复到原稳定条件的特性	
动态误差	被检测随时间迅速变化时,仪表输出追随被检测变化的特性	当被检测突然变化后,仪表动作都有惯性迟延(时间常数)和检测传递滞后(纯滞后),必须经过一段时间才能准确显示出来,这样造成的误差就是动态误差

1.2.2 测量误差

在生产过程中对各种变量进行检测时,尽管检测技术有所不同,但从本质上看有共同之处,即可以将检测环节分成两个部分:一是能量形式的一次或多次转换过程;二是将被测变量与其相应的检测单位进行比较并输出检测结果。而检测仪表就是实施检测功能的工具。由于在检测过程中所使用的工具本身准确性有高低之分,或者检测环境发生变化,加之观测者的主观意志的差别,因此检测结果的准确性必然受到影响,使从检测仪表获得的被测值与实际被测变量真实值存在一定的差距,即测量误差。但是被检测的真值是无法真正得到的,可用约定真值(即在没有系统误差的情况下多次检测值的平均值)或相对真值(即用精度更高的标准表得到的检测值)替代被检测的真值。

测量误差有不同分类方法,见表 1-2。

表 1-2 测量误差分类

分类依据	名称		意义	说明
与使用条件的关系	基本误差		在检测工具使用的标准条件下应用所产生的误差	
	附加误差		检测工具偏离标准使用条件下应用所产生的附加误差	
误差数值表示	绝对误差		检测结果 X 和真值 X_0 之间的代数差; $\Delta X = X - X_0$	说明了误差本身的大小
	相对误差	实际	绝对误差 ΔX 和真值 X_0 之比	多用于理论分析或精密检测中
		标称	绝对误差 ΔX 和真值 X 之比	多用于检定和工程检测中
		引用	绝对误差 ΔX 和仪表量程(检测上限与检测下限值之差)之比	用于划分仪表精确度等级
与被检测随时间变化的关系	静态误差		被检测处于稳态时的测量误差	
	动态误差		被检测随时间变化过程中检测所附加的误差	由检测装置的动态特性造成
误差的规律	系统误差		在相同条件下,多次检测同一被检测的过程中出现的误差,其绝对值和符号保持不变,或者在条件变化时按某一规律变化	系统误差可以通过实验或分析的方法,找到其变化规律及产生的原因,对检测结果进行修正。系统误差越小,检测越准确
	随机误差		在相同条件下,多次检测同一被检测的过程中出现的误差,其绝对值和符号以不可预计的方式变化	随机误差是由检测过程中偶发因素引起的,无法消除。单次检测的随机误差难以预测,但是多次重复检测时,随机误差有服从一定的统计规律的分布特性(多为正态分布)。随机误差是检测值与数学期望值之差,表明了检测结果的弥散性。随机误差越小,精密度高
	缓变误差		误差数值随时间缓慢变化	由零部件老化等所致
	粗大误差		明显与事实不符的误差,无规律可循	操作过失或重大干扰所致

粗大误差可以从定性分析和定量分析两个方面进行判断。在检测过程中定量分析时按统计方法进行数据处理,如果发现异常检测值(坏值)就必须剔除,重新检测。常用的剔除准则有拉依达准则(3 σ 准则)、格拉布斯准则、 t 检验准则等。

此外,有些被检测通过间接检测法得到,即通过直接检测 n 个有关量后,根据一定的函数关系算出被检测值,这样直接检测的误差将会传递给由计算而得的被检测值,即产生误差传递。在设计间接检测时需进行误差分配,根据总的误差要求,将误差分配给各直接检测值。一个检测系统在检测过程中会有多个系统误差和随机误差,需将这些单项误差合成为总误差。

1.2.3 测量误差与仪表精度等级的关系

测量误差有绝对误差和相对误差之分。绝对误差是指仪表指示值 x 与被检测的真值 x_0 之间的差值,即

$$\Delta = |x - x_0| \quad (1-1)$$

但是被检测的真值是无法真正得到的。因此在一台仪表的标尺范围内,各点读数的绝对误差是指用标准表(精确度较高)和该表(精确度较低)对同一变量检测时得到的两个读数之差,即把式(1-1)中的被检测真值用标准表的读数代替。

但是检测仪表都有各自检测标尺范围,即仪表的量程。同一台仪表量程若发生变化,也会影响检测的准确性。因此工业上定义了一个相对误差——仪表引用误差,它是绝对误差与检测标尺范围之比,即

$$\delta = \frac{\pm(X - X_0)}{\text{标尺上限} - \text{标尺下限}} \times 100\% \quad (1-2)$$

考虑整个检测标尺范围内的最大绝对误差,则可得到仪表最大引用误差为

$$\delta_{\max} = \frac{\pm(X - X_0)_{\max}}{\text{标尺上限} - \text{标尺下限}} \times 100\% \quad (1-3)$$

仪表最大引用误差又称为允许误差,它是仪表基本误差的主要形式。

各种检测过程都是在一定的环境条件下进行的,外界温度、湿度、电压的波动以及仪表的安装等都会造成附加的测量误差。因此考虑仪表测量误差时不仅要考虑其自身性能,还要注意使用条件,尽量减小附加误差。

仪表的精确度简称精度,是用来表示仪表检测结果的可靠程度。任何检测过程都存在测量误差。在使用仪表检测生产过程中的工艺变量时,我们不仅需要知道仪表的指示值,而且还应该了解仪表的精度。

仪表的精度等级是按国家统一规定的允许误差大小来划分成若干等级的。仪表精度等级数值越小,说明仪表检测准确度越高。目前我国生产的仪表精度等级有0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0等。仪表的精度等级是将仪表允许误差的“ $\pm$ ”号及“ $\%$ ”去掉后的数值,以一定的符号形式表示在仪表标尺板上,如1.0外加一个圆圈或三角形。精度等级1.0,说明该仪表允许误差为1.0%。

校验仪表时确定仪表的精确度等级与根据工艺要求来选择仪表的精确度等级是不一样的。根据仪表校验数据确定仪表精度等级时,仪表的允许误差应比仪表校验所得的引用误差的最大值要大或相等;而根据工艺要求确定仪表精度等级时,仪表的允许误差应该小于或等于根据工艺要求计算出的引用误差的最大值。