



面向 21 世纪课程教材

本书荣获中国石油和化学工业优秀教材奖一等奖

自动检测技术 **及** 仪表控制系统

第三版

张 毅 张宝芬
曹 丽 彭黎辉

编著



化学工业出版社

面向 21 世纪课程教材

自动检测技术及仪表控制系统

第三版

张 毅 张宝芬 编著
曹 丽 彭黎辉



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是有关过程参数检测和自动化仪表系统的基础理论和应用技术的教材。

全书分为五篇共 20 章。第一篇中第 1、2 章介绍检测和仪表的基本知识及误差分析方法，第 3 章介绍检测技术基本方法；第二篇中第 4 章~第 9 章分别介绍温度、压力、流量、物位、机械量、成分分析等参数的检测方法；第三篇中第 10 章介绍自动化仪表特性及发展，第 11 章~第 14 章分别介绍仪表系统中的变送、显示、调节和执行等单元；第四篇中第 15 章、第 16 章分析和讨论由仪表构成的计算机控制系统和现场总线控制系统的相关技术及其发展趋势；第五篇中第 17 章~第 20 章介绍现代检测与仪表技术。

本书作为高校自动化及相关专业的本科生教材，亦可满足相关研究生和工程技术人员的需要。

图书在版编目 (CIP) 数据

自动检测技术及仪表控制系统/张毅, 张宝芬, 曹丽, 彭黎辉编著. —3 版. —北京: 化学工业出版社, 2012. 7

面向 21 世纪课程教材
ISBN 978-7-122-14580-2

I. 自… II. ①张…②张…③曹…④彭… III. ①自动检测-高等学校-教材②自动化仪表-控制系统-高等学校-教材 IV. ①TP274②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 131632 号

责任编辑: 唐旭华
责任校对: 王素芹

文字编辑: 刘立梅
装帧设计: 关 飞

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 19 字数 464 千字 2012 年 9 月北京第 3 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: 36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

现代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，特别是现代传感技术、新一代互联网技术和无线通信技术的不断升级，给传统的自动控制系统带来了新的挑战，并由此引出许多新的发展，如数据融合理论与方法、虚拟仪器、软测量技术、传感器网络技术以及最新发展的物联网技术等。

本书是有关过程参数检测和自动化仪表系统的基础理论和应用技术的教材，由第二版修改和增加相关内容形成。全书在第二版的基础上，根据检测技术和仪表系统发展和实际应用的需要，对已有的少量内容进行了补充，重点针对最新检测技术的应用，补充了一些新的检测方法及应用案例；同时，结合传感器网络和无线通信技术的最新发展，增加了近来广受关注的物联网、车联网和车路协同等技术在状态感知和参数检测中的应用分析。

在再版编写过程中，本书继续坚持突出系统概念、注重理论分析与实例解剖、强调技术和系统的模块化与模型化等原则，维持了原书的整体风格；同时结合最新技术的产生和发展，重点阐述了包括数据融合理论与方法、虚拟仪器、软测量技术、传感器网络和物联网技术等在内的新技术在检测和仪表控制系统中的应用，希望能够为读者打开新的视野。

再版后，本书能更好地满足自动化及相关专业的本科生和研究生的学习需要，同时也能更好地满足相关领域的工程技术人员的工作需要。

全书共分五篇。第一篇介绍检测技术和仪表系统的基础知识；第二篇介绍温度、压力、流量、物位、机械量、成分分析等过程参数的检测技术；第三篇介绍并分析仪表系统所包含的变送、显示、调节和执行等单元；第四篇分析和讨论由仪表所构成的计算机控制系统和现场总线控制系统的相关技术及其发展趋势；第五篇介绍部分现代检测和仪表技术的最新发展和应用。

本书第一版包括第一、二、三和四篇，由清华大学自动化系张毅教授、张宝芬教授和曹丽副教授编著，金以慧教授和王俊杰教授主审。其中第1章及第三和四篇由张毅教授执笔，第4~7章和第9章由张宝芬教授执笔，第2、3章和第8章由曹丽副教授执笔。

本书再版后对第一版包括的前四篇做了少量的删改，并增加了第五篇。增加的第五篇由清华大学自动化系张毅教授、曹丽副教授和彭黎辉副教授编著，张宝芬教授主审。其中第20章由张毅教授执笔，第17章由曹丽副教授执笔，第18、19章由彭黎辉副教授执笔。

本书第三版在内容结构上未做调整，所有修改和补充的内容均在原篇章节内进行。

在教学过程中有需要相关电子教案和帮助者，请联系 cipedu@163.com。另外，由清华大学、浙江大学和天津大学联合编写的《检测控制仪表学习指导》已经出版，内容基本上覆盖了化学工业出版社目前同类教材的所有习题与思考题，该书还收集了大量的例题与习题，给出了例题分析、题解与习题答案，相信会对广大读者学习检测及控制仪表等相关课程有很大的帮助。

限于作者的水平和能力有限，本书难免存在不足或不妥之处，衷心希望得到广大读者的批评和指正。

作者

2012年6月于清华园

目 录

第一篇 基础知识引论

1 绪论	1
1.1 检测仪表控制系统	1
1.1.1 典型检测仪表控制系统	1
1.1.2 检测仪表控制系统结构分析	2
1.2 基本概念	3
1.2.1 测量范围、上下限及量程	3
1.2.2 零点迁移和量程迁移	3
1.2.3 灵敏度和分辨率	4
1.2.4 误差	4
1.2.5 精确度	5
1.2.6 滞环、死区和回差	5
1.2.7 重复性和再现性	6
1.2.8 可靠性	6
1.3 检测仪表技术发展趋势	7
思考题与习题	7
2 误差分析基础及测量不确定度	8
2.1 检测精度	8
2.2 误差分析的基本概念	8
2.2.1 真值、测量值与误差的关系	8
2.2.2 几种误差的定义	9
2.2.3 测量的准确度与精密度	9
2.3 误差原因分析	9
2.4 误差分类	10
2.5 误差的统计处理	10
2.5.1 随机误差概率及概率密度函数的性质	11
2.5.2 正态分布函数及其特征点	11
2.5.3 置信区间与置信概率	12
2.6 误差传递法则	13
2.6.1 误差传递法则	13
2.6.2 不等精度测量的加权及其误差	14
2.7 误差估计	14
2.7.1 平均值的误差表示方法	14
2.7.2 平均值与标准偏差的无偏估计	15

2.7.3	测量次数少的误差估计	15
2.8	粗大误差检验	16
2.9	测量不确定度	16
2.9.1	测量不确定度的由来	16
2.9.2	测量不确定度的分类	17
2.9.3	测量不确定度的评定方法	18
2.10	最小二乘法及其应用	20
2.10.1	最小二乘法原理	20
2.10.2	最小二乘法在多元间接检测中的应用	20
2.10.3	最小二乘法在曲线拟合中的应用	22
	思考题与习题	23
3	检测技术及方法分析	24
3.1	检测方法及其基本概念	24
3.1.1	开环型检测与闭环型检测	24
3.1.2	直接检测与间接检测	25
3.1.3	绝对检测与比较检测	25
3.1.4	偏差法与零位法	25
3.1.5	强度变量检测与容量变量检测	26
3.1.6	微差法	26
3.1.7	替换法	26
3.1.8	能量变换与能量控制型检测元件	26
3.1.9	主动探索与信息反馈型检测	27
3.2	检测系统模型与结构分析	27
3.2.1	检测系统的基本功能	27
3.2.2	信号转换模型与信号选择性	27
3.2.3	检测系统的结构分析	28
3.3	提高检测精度的方法	30
3.3.1	时域信号选择方法	30
3.3.2	频域信号选择方法	30
3.4	多元化检测技术	32
3.4.1	多元检测与检测方程式	32
3.4.2	多元复合检测	33
3.4.3	多元识别检测	34
3.4.4	构造化检测	35
3.4.5	多点时空检测	35
	思考题与习题	36

第二篇 过程参数检测技术

4	温度检测	37
4.1	测温方法及温标	37

4.1.1	测温原理及方法	37
4.1.2	温标	37
4.2	接触式测温	39
4.2.1	热电偶测温	39
4.2.2	热电阻测温	45
4.2.3	集成温度传感器	50
4.3	非接触式测温	51
4.3.1	辐射测温原理	51
4.3.2	辐射测温仪表的基本组成及常用方法	51
4.3.3	辐射测温仪表	52
4.3.4	辐射测温仪表的表观温度	54
4.4	光纤温度传感器	54
4.4.1	液晶光纤温度传感器	55
4.4.2	荧光光纤温度传感器	55
4.4.3	半导体光纤温度传感器	55
4.4.4	光纤辐射温度计	55
4.5	测温实例	56
4.5.1	管道内流体温度的测量	56
4.5.2	烟道中烟气温度的测量	56
4.5.3	非接触法测量物体表面温度	57
	思考题与习题	57
5	压力检测	59
5.1	压力单位及压力检测方法	59
5.1.1	压力的单位	59
5.1.2	压力的几种表示方法	59
5.1.3	压力检测的主要方法及分类	60
5.2	常用压力检测仪表	61
5.2.1	弹性压力计	61
5.2.2	力平衡式压力计	64
5.2.3	压力传感器	64
5.3	测压仪表的使用及压力检测系统	68
5.3.1	测压仪表的使用	68
5.3.2	压力检测系统	69
	思考题与习题	70
6	流量检测	72
6.1	流量检测基本概念	72
6.1.1	流量的概念和单位	72
6.1.2	流量测量涉及的流体力学基本概念	72
6.1.3	流量检测方法 & 流量计分类	74
6.2	体积流量检测方法	76

6.2.1	容积式流量计	76
6.2.2	差压式流量计	78
6.2.3	速度式流量计	88
6.3	质量流量检测方法	92
6.3.1	间接式质量流量测量方法	92
6.3.2	直接式质量流量计	94
6.4	流量标准装置	96
6.4.1	液体流量标准装置	96
6.4.2	气体流量标准装置	97
	思考题与习题	98
7	物位检测	99
7.1	物位的定义及物位检测仪表的分类	99
7.1.1	物位的定义	99
7.1.2	物位检测仪表的分类	99
7.2	常用物位检测仪表	100
7.2.1	静压式液位检测仪表	100
7.2.2	浮力式物位检测仪表	102
7.2.3	其他物位测量仪表	104
7.3	影响物位测量的因素	108
7.3.1	液位测量的特点	108
7.3.2	料位测量的特点	108
7.3.3	界位测量的特点	109
	思考题与习题	109
8	机械量检测	110
8.1	模拟式位移检测	110
8.1.1	电容式位移检测方法	110
8.1.2	电感式位移检测方法	112
8.1.3	差动变压器位移检测方法	113
8.1.4	光纤位移检测方法	114
8.2	光学数字式位移检测	114
8.2.1	光栅标尺	114
8.2.2	莫尔条纹标尺	115
8.2.3	激光扫描测长与图像检测	115
8.3	转速检测	116
8.3.1	离心力检测法	116
8.3.2	光电码盘转速检测法	116
8.3.3	空间滤波器式检测法	117
8.4	力的检测方法	118
8.4.1	金属应变元件	118
8.4.2	半导体应变元件	120

8.4.3	压电效应	120
8.4.4	压敏导电橡胶	121
8.5	加速度与振动检测	121
8.5.1	加速度检测原理	121
8.5.2	动电型振动检测方法	124
8.5.3	微机械加速度传感元件	125
	思考题与习题	125
9	成分分析仪表	126
9.1	成分分析方法及分析系统的构成	126
9.1.1	成分分析方法及分类	126
9.1.2	自动分析系统的构成	126
9.2	几种工业用成分分析仪表	127
9.2.1	热导式气体分析器	127
9.2.2	红外线气体分析器	129
9.2.3	氧化锆氧分析器	130
9.2.4	气相色谱仪	132
9.2.5	半导体气敏传感器	134
9.2.6	工业酸度计	137
9.3	湿度的检测	139
9.3.1	湿度的表示方法及湿度检测的特点	139
9.3.2	干湿球湿度计	140
9.3.3	电解质系湿敏传感器	140
9.3.4	陶瓷湿敏传感器	141
9.3.5	高分子聚合物湿敏传感器	141
	思考题与习题	142

第三篇 仪表系统分析

10	仪表系统及其理论分析	143
10.1	仪表发展概况	143
10.2	常用仪表分类及特性	144
10.2.1	常用仪表分类	144
10.2.2	电动单元组合仪表及 DDZ-Ⅱ型和 DDZ-Ⅲ型仪表比较	145
10.3	仪表输入输出静态特性分析	146
10.3.1	输入输出特性分析	146
10.3.2	仪表特性线性化处理分析	147
10.4	仪表系统建模	148
10.4.1	时域模型	148
10.4.2	频域模型	149
10.4.3	离散模型	150
10.5	仪表系统时域分析	151

10.5.1	时域分析指标	151
10.5.2	阶跃扰动动态特性分析	152
10.5.3	等速扰动动态特性分析	152
10.6	仪表系统频域分析	153
10.6.1	正弦扰动动态特性分析	153
10.6.2	频率响应 Bode 图分析	154
10.6.3	频带分析	155
10.7	混合仪表系统浅析	156
10.7.1	混合仪表系统建模	156
10.7.2	时域分析	157
10.7.3	频域分析	157
	思考题与习题	158
11	变送单元	159
11.1	常用变送器工作原理	159
11.1.1	常用变送器结构分析	159
11.1.2	力矩平衡式原理	160
11.1.3	桥式电路原理	160
11.1.4	差动方式原理	161
11.2	DDZ-Ⅲ型差压变送器	162
11.3	DDZ-Ⅲ型温度变送器	165
11.3.1	直流毫伏输入电路	165
11.3.2	热电偶输入电路	166
11.3.3	热电阻输入电路	167
11.4	新型变送器	168
11.4.1	微电子式变送器	168
11.4.2	数字式变送器	169
	思考题与习题	170
12	显示单元	171
12.1	显示仪表工作原理	171
12.1.1	显示仪表结构分析	171
12.1.2	电位差计式自动平衡原理	172
12.1.3	电桥式自动平衡原理	172
12.1.4	差动变压器式自动平衡原理	173
12.2	传统显示及记录仪表	173
12.2.1	电位差计式自动平衡显示仪表	173
12.2.2	电桥式自动平衡显示仪表	174
12.3	数字式显示及记录仪表	177
12.3.1	数字模拟混合记录仪	177
12.3.2	全数字式记录仪	179
	思考题与习题	180

13 调节控制单元	181
13.1 常规控制规律.....	181
13.1.1 典型控制系统.....	181
13.1.2 基本控制规律.....	182
13.1.3 常规控制规律.....	183
13.1.4 实用 PID 控制规律的构成	186
13.2 调节器控制规律的实现.....	188
13.2.1 DDZ-III 型调节器 PID 控制规律的实现	188
13.2.2 数字式调节器控制规律的实现.....	193
13.3 常规调节器基本电路分析.....	195
13.3.1 DDZ-III 型调节器基本电路分析	195
13.3.2 数字式调节器基本电路分析.....	196
13.4 可编程序调节器.....	198
13.4.1 可编程序调节器的工作原理.....	198
13.4.2 程序控制规律的构成和实现.....	200
13.5 先进调节器.....	201
13.5.1 增强型调节器.....	201
13.5.2 改进型 PID 控制算法	203
思考题与习题.....	204
14 执行单元	206
14.1 执行器工作原理.....	206
14.1.1 执行器分类与比较.....	206
14.1.2 执行器基本构成及工作原理.....	206
14.2 气动执行器.....	207
14.2.1 气动执行器基本构成.....	207
14.2.2 阀门定位器.....	208
14.3 电动执行器.....	209
14.4 调节阀.....	210
14.4.1 调节阀工作原理.....	210
14.4.2 调节阀结构及分类.....	211
14.4.3 调节阀的流量特性.....	213
14.4.4 调节阀的流量系数.....	214
思考题与习题.....	214

第四篇 系统控制技术

15 计算机仪表控制系统	216
15.1 仪表控制系统.....	216
15.1.1 闭环回路控制系统.....	216
15.1.2 闭环回路连续特性分析.....	217
15.1.3 闭环回路数字化离散分析.....	217

15.1.4	闭环回路控制系统网络化分析	218
15.2	计算机控制系统	220
15.2.1	计算机控制系统的发展和评价	220
15.2.2	集中控制系统	221
15.2.3	集散控制系统	221
15.2.4	分布式控制系统	222
15.3	计算机控制系统发展趋势	223
15.3.1	控制系统的控制网络化	223
15.3.2	控制系统的系统扁平化	224
	思考题与习题	225
16	现场总线控制系统	227
16.1	现场总线控制系统的发展	227
16.1.1	现场总线的产生	227
16.1.2	现场总线系统的发展过程	227
16.1.3	底层总线系统	228
16.1.4	现场总线控制系统特征	229
16.2	主要现场总线系统	230
16.2.1	CAN 总线系统	230
16.2.2	LonWorks 总线系统	232
16.2.3	ProfiBus 总线系统	233
16.2.4	FF 总线系统	234
16.3	现场总线控制系统	236
16.3.1	现场总线单元设备	236
16.3.2	现场总线控制系统结构	237
16.3.3	现场总线系统集成与扩展	238
16.4	现场总线控制系统发展趋势	241
16.4.1	控制系统的组织重构化	241
16.4.2	控制系统的工作协调化	241
	思考题与习题	242

第五篇 现代检测与仪表技术

17	虚拟仪器	243
17.1	虚拟仪器概念及发展	243
17.2	虚拟仪器结构和硬件模块	244
17.3	虚拟仪器的软件技术	246
	思考题与习题	248
18	软测量方法及技术	249
18.1	软测量概述	249
18.2	基于统计方法的软测量方法	250
18.3	基于状态估计的软测量方法	252

18.4	基于神经网络技术的软测量方法	252
18.5	软测量方法应用实例	253
	思考题与习题	257
19	多传感器数据融合技术	258
19.1	多传感器数据融合概念	258
19.2	多传感器数据融合框架	259
19.2.1	多传感器数据融合中的传感器工作方式	259
19.2.2	多传感器数据融合结构	261
19.3	多传感器数据融合算法	262
19.3.1	基于 Kalman 滤波的多传感器数据融合方法	262
19.3.2	基于贝叶斯决策的多传感器数据融合方法	266
19.3.3	基于 DS 证据论的多传感器数据融合方法	267
19.4	多传感器数据融合应用实例	270
	思考题与习题	272
20	传感器网络	273
20.1	传感器网络的产生与发展	273
20.1.1	传感器网络	273
20.1.2	传感器网络的构成	274
20.1.3	传感器网络的发展	274
20.2	传感器网络功能与特点	275
20.2.1	传感器网络主要功能	275
20.2.2	传感器网络主要特点	276
20.3	传感器网络关键技术	277
20.3.1	自组织网络体系结构	277
20.3.2	自组织路由算法	278
20.3.3	信道接入技术	279
20.3.4	电源管理技术	279
20.3.5	微型化技术	279
20.3.6	检测与数据融合技术	279
20.4	传感器网络的延展和应用	280
20.4.1	物联网	280
20.4.2	车联网	282
20.4.3	传感器网络应用案例分析	283
	思考题与习题	288
	参考文献	289

第一篇 基础知识引论

1 绪 论

任何一个工业控制系统都必然要应用一定的检测技术和相应的仪表单元，检测技术和仪表两部分是紧密相关和相辅相成的，它们是控制系统的重要基础。检测单元完成对各种过程参数的测量，并实现必要的数据处理；仪表单元则是实现各种控制作用的手段和条件，它将检测得到的数据进行运算处理，并通过相应的单元实现对被控变量的调节。新技术的不断出现，使传统的自动控制系统以及相关的检测和仪表技术都发生了很大变化。

据此，本书的编排以典型工业仪表控制系统为主线，阐述相关的理论和技术。围绕该主线，全书分别就检测技术和仪表系统两大部分进行讨论，并在此基础上分析了各种仪表系统控制技术。

本章从分析典型的工业检测仪表控制系统入手，给出了常规检测仪表控制系统的组成及结构，并介绍有关检测和仪表相关技术必须需要的基本概念和名词术语。

1.1 检测仪表控制系统

1.1.1 典型检测仪表控制系统

典型的检测仪表控制系统，以化学工业中用天然气做原料生产合成氨的控制系统为例，此系统如图1-1所示为脱硫塔控制流程图。天然气在经过脱硫塔时，需要进行控制的参数分别为压力、液位和流量，这将构成（PC）、（LC）和（FC）三个单参数调节控制系统。

例如实现脱硫塔压力调节控制的单参数控制子系统（PC），该系统的结构框图如图1-2所示，进行压力参数检测及实现检测信号转换和传输的单元称为压力变送单元，实现调节控制规律计算的单元称为调节单元，最终实现被控变量控制作用的单元称为执行单元。为了实现调节控制作用，首先测量进入脱硫塔的天然气压力，检测到的信号经转换后，以标准信号制式传输到实现调节运算的调节单元；调节单元在接收到测量信号后，即与给定单元的设定压力值进行比较，并根据设定的控制规律计算出实现控制调节作用所需的控制信号；为保证能够驱动相应的设备实现对被控变量的调节，控制信号还需借助专用的执行单元机构实现控制信号的转换与保持。

同理，考虑单独实现脱硫塔流量调节控制的情况，则控制子系统（FC）的结构框图如图1-3所示。其中流量变送单元是专门用于流量检测信号转换和传输的仪表变送单元，而安全栅

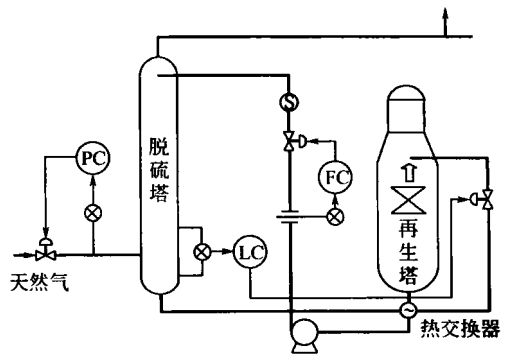


图 1-1 脱硫塔控制流程图

的增加则是为了实现安全火花防爆特性。

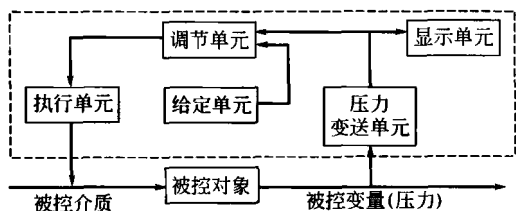


图 1-2 天然气压力控制系统结构框图

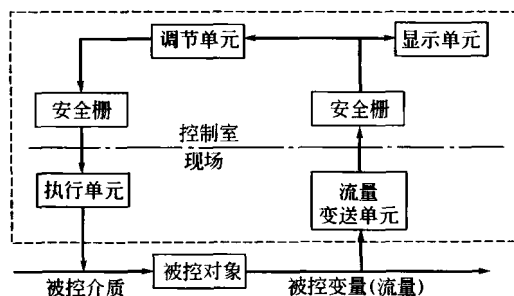


图 1-3 脱硫塔流量控制系统结构框图

在无特殊条件要求下，常规工业检测仪表控制系统的构成基本相同，而与具体采用的仪表类型无关。这里所说的基本构成包括被控对象、变送器、显示仪表、调节器、给定器和执行器等。由于各控制子系统被控变量的不同，各子系统采用的变送器和调节器的控制规律因而有所不同。

1.1.2 检测仪表控制系统结构分析

总结上一节所述的几种情况，并由此推广到常规情况下的工业过程控制系统，检测仪表控制系统的一般结构可概括如图 1-4 所示。

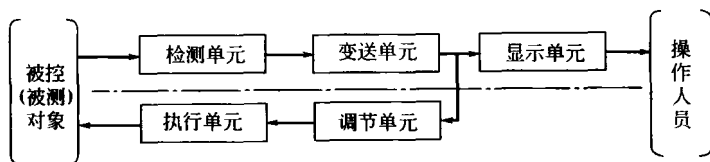


图 1-4 典型工业检测仪表控制系统结构图

显然，图 1-4 是一个闭环回路控制系统，只是为了突出被控对象和操作人员在这控制系统中的地位，对传统意义上的回路结构进行了适当的调整。

被控（被测）对象是控制系统的核心，它可以是单输入单输出对象，即常规的回路控制系统；也可以是多输入多输出，此时通常需采用计算机仪表控制系统，如直接数字控制系统 DDC、分布式控制系统 DCS 和现场总线控制系统 FCS。

检测单元是控制系统实现控制调节作用的基础，它完成对所有被控变量的直接测量，包括温度、压力、流量、液位、成分等；同时也可实现某些参数的间接测量，如采用信息融合技术实现的测量。

变送单元完成对被测变量信号的转换和传输，其转换结果须符合国际标准的信号制式，即 1~5V DC 或 4~20mA DC 模拟信号或各种仪表控制系统所需的数字信号。

显示单元是控制系统的附属单元，它将检测单元测量获得的有关参数，通过适当的方式显示给操作人员，这些显示方式包括曲线、数字和图像等。

调节单元完成调节控制规律的运算，它将变送器传输来的测量信号与给定值进行比较，并对比较结果进行调节运算，以输出作为控制信号。调节单元采用的常规控制规律包括位式调节和 PID 调节，而 PID 控制规律又根据实际需要的情况产生出了各种不同的改进型。

执行单元是控制系统实施控制策略的执行机构，它负责将调节器的控制输出信号按执行

机构的需要产生出相应的信号，以驱动执行机构实现对被控变量的调节作用。通常执行单元分气动、液动和电动三类。

这里需要特别说明的是，图 1-4 所述的只是控制系统的逻辑结构。当采用传统检测和仪表单元构成控制系统时，这种结构与实际系统相同，即图中相关两个单元间采用点对点的连接方式。但是有时检测单元和变送单元及显示单元的界限并不明显，会构成功能组合单元。而在网络化的控制回路系统中，由于多数检测和仪表单元均通过网络相互连接。有关网络化控制回路系统的详细分析，详见第 15 章相应部分。

1.2 基本概念

本小节介绍检测和仪表中常用的基本性能指标，包括测量范围及量程、基本温差、精度等级、灵敏度、分辨率、漂移、可靠性以及抗干扰性能指标等。

1.2.1 测量范围、上下限及量程

每个用于测量的仪表都有测量范围，它是该仪表按规定的精度进行测量的被测变量的范围。测量范围的最小值和最大值分别称为测量下限和测量上限，简称下限和上限。

仪表的量程可以用来表示其测量范围的大小，是其测量上限值与下限值的代数差，即

$$\text{量程} = \text{测量上限值} - \text{测量下限值} \quad (1-1)$$

使用下限与上限可完全表示仪表的测量范围，也可确定其量程。如一个温度测量仪表的下限值是一 50°C ，上限值是 150°C ，则其测量范围可表示为一 $50\sim 150^{\circ}\text{C}$ ，量程为 200°C 。由此可见，给出仪表的测量范围便知其上下限及量程，反之只给出仪表的量程，却无法确定其上下限及测量范围。

1.2.2 零点迁移和量程迁移

仪表测量范围的另一种表示方法是给出仪表的零点即测量下限值及仪表的量程。由前面的分析可知，只要仪表的零点和量程确定了，其测量范围也就确定了。因而这是一种更为常用的表示方式。

在实际使用中，由于测量要求或测量条件的变化，需要改变仪表的零点或量程，为此可以对仪表进行零点和量程的调整。通常将零点的变化称为零点迁移，而量程的变化则称为量程迁移。

以被测变量值相对于量程的百分数为横坐标标记为 X ，以仪表指针位移或转角相对于标尺长度的百分数为纵坐标标记为 Y ，可得到仪表的标尺特性曲线 X - Y 。假设仪表标尺是线性的，其标尺特性曲线可如图 1-5 中的线段 1 所示。

考虑单纯的零点迁移情况，如线段 2 所示，此时仪表量程不变，其斜率亦保持不变，线段 2 只是线段 1 的平移，理论上零点迁移到了原输入值的 -25% ，终点迁移到了原输入值的 75% ，而量程则仍为 100% 。考虑单纯的量程迁移情况如线段 3 所示，此时零点不变，线段仍通过坐标系原点，但斜率发生了变化，理论上量程迁移到了原来的 70% 。

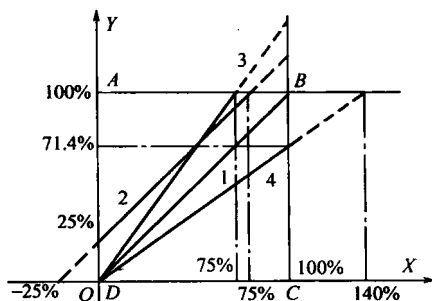


图 1-5 零点迁移和量程迁移示意

由于受仪表标尺长度和输入通道对输入信号的限制，实际的标尺特性曲线通常只限于正

边形 ABCD 内部，即用实线表示部分；虚线部分只是理论上的结果，无实际意义。因此，线段 2 的实际效果是标尺有效使用范围迁移到原来的 25%~100%，测量范围迁移到原来的 0~75%。线段 3 的实际效果是标尺仍保持原来有效范围的 0~100%，测量范围迁移到了原来的 0~70%。同理，考虑图中线段 4 所示的量程迁移情况，其理论上零点没有迁移，量程迁移到原来的 140%；而实际上标尺只保持了原来有效范围的 0~71.4%，测量范围则仍为原来的 0~100%。

零点迁移和量程迁移可以扩大仪表的通用性。但是，在何种条件下可以进行迁移，以及能够有多大的迁移量，还需视具体仪表的结构和性能而定。

1.2.3 灵敏度和分辨率

灵敏度是仪表对被测参数变化的灵敏程度，常以在被测参数改变时，经过足够时间仪表指示值达到稳定状态后，仪表输出变化量 ΔY 与引起此变化的输入变化量 ΔU 之比表示，即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \quad (1-2)$$

可见，灵敏度也就是图 1-5 所示标尺特性曲线的斜率。因此，量程迁移就意味着灵敏度的改变；而如果仅仅是零点迁移则灵敏度不变。

由灵敏度的定义表达式 (1-2) 可知，灵敏度实质上等同于仪表的放大倍数。只是由于 U 和 Y 都有具体量纲，所以灵敏度也有量纲，且由 U 和 Y 确定；而放大倍数没有量纲。所以灵敏度的含义比放大倍数要广泛得多。

常容易与仪表灵敏度混淆的是仪表分辨率。它是仪表输出能响应和分辨的最小输入量，又称仪表灵敏限。分辨率是灵敏度的一种反映，一般说仪表的灵敏度高，则其分辨率同样也高。因此实际中主要希望提高仪表的灵敏度，从而保证其分辨率较好。

在由多个仪表组成的测量或控制系统中，灵敏度具有可传递性。例如，首尾串联的仪表系统（即前一个仪表的输出是后一个仪表的输入），其总灵敏度是各仪表灵敏度的乘积。

1.2.4 误差

仪表指示装置所显示的被测值称为示值，它是被测真值的反映。严格地说，被测真值只是一个理论值，因为无论采用何种仪表测到的值都有误差。实际中常将用适当精度的仪表测出的或用特定的方法确定的约定真值代替真值。例如，使用国家标准计量机构标定过的标准仪表进行测量，其测量值即可作为约定真值。

示值与公认的约定真值之差称为绝对误差，即

$$\text{绝对误差} = \text{示值} - \text{约定真值} \quad (1-3)$$

绝对误差通常可简称为误差。当误差为正时表示仪表的示值偏大，反之偏小。

绝对误差与约定真值之比称为相对误差，常用百分数表示，即

$$\text{相对误差}(\%) = \frac{\text{绝对误差}}{\text{约定真值}} \quad (1-4)$$

虽然用绝对误差占约定真值的百分数来衡量仪表的精度比较合理，但仪表多应用在测量接近上限值的量，因而用量程取代式 (1-4) 中的约定真值则得到引用误差如下式所示：

$$\text{引用误差}(\%) = \frac{\text{绝对误差}}{\text{量程}} \quad (1-5)$$