



高职高专“十一五”规划教材

LIUCHENG GONGYE GONGCHENG KONGZHI

流程工业工程控制

武平丽 高国光 等编著

DCS



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

流程工业工程控制

武平丽 高国光 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书按照流程工业控制人员的具体工作来选取内容,是由《自动化仪表》、《过程控制系统》和《计算机控制技术》三本书整合精炼而成的。通过总结作者多年的实际工程经验,吸收国内外的实用控制方法和技术,从流程工业自动化系统的开放性、集散型、网络化的观点出发,以现代分布式控制系统(DCS)作为主线索,结合典型工程控制实例,介绍流程工业控制系统的分析设计方法和应用技术,包括基本控制规律及其工程实现,简单控制系统的设计,几种常用复杂控制系统的应用,过程参数的检测原理及方法,检测变送仪表和执行器的选择与使用,计算机控制系统的构成,工控组态软件的基本使用方法,控制网络通信基础技术等知识。

本书可用作高职高专自动化及其相关专业的教材和教学参考书,也可作为广大科技工作者和工程技术人员参考用书。

流程工业工程控制

高国光 武平丽 等编著

图书在版编目(CIP)数据

流程工业工程控制/武平丽,高国光等编著. —北京:化学工业出版社,2008.5

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-02612-5

I. 流… II. ①武…②高… III. 工业控制计算机-高等学校:技术学院-教材 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第052441号

责任编辑:高钰 李娜

文字编辑:冯国庆

责任校对:边涛

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张19½ 字数499千字 2008年7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:33.00元

版权所有 违者必究

前 言

根据国内外综合自动化技术的发展趋势和网络技术的发展现状,流程工业综合自动化技术的总体结构可以分成 PCS/MES/ERP 三层结构。本书立足高职高专教育人才培养目标,依据“必需、够用”为度的职业教育理念,着重介绍以 PCS(过程控制系统)为代表的基礎自动化层的相关内容。

本书基于目前工业生产自控现状和发展,结合学生能力组织教材内容,以加强实践能力培养为原则,有针对性地阐述了简单控制系统的设计方法;介绍了目前生产中普遍采用的自动化仪表的原理、使用及维护;还介绍了现代分布式控制系统(DCS)的硬件结构、软件组态及相关网络通信、系统可靠性等实用技术。

本书与企业联合编写,由高级工程师和工程师亲自执笔有关章节,是一本“工学结合、校企合作”的教材。全书从始至终体现了“从生产实际出发,介绍当前过程控制中最实用的知识,并兼顾发展趋势”的特点;力求通过本书的学习,能够解决相应生产实际问题。

本书由武平丽、高国光等编著,其中武平丽编写了第1章、第6章和第8章;高国光编写了第7章和第9章;万书栋编写了第4章和第10章;杨笋编写了第2章和附录;陈刚编写了第5章;雷云永编写了第3章。在本书编写过程中,得到了和利时工程有限公司张洪垠及培训部满锴等有关人员的支持;参考了大量的文献;本书的出版得到了黄河水利职业技术学院自动化工程系的诚挚帮助。在此一并向关心和支持本书出版的所有单位和个人,以及参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于控制技术的快速发展及编者水平所限,书中难免存在不足和缺点,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 4 月

目 录

第 1 章 流程工业工程控制基础	1	2.2.6 其他温度仪表简介	35
1.1 流程工业工程控制的发展	1	2.2.7 测温仪表的选用与安装	35
1.1.1 流程工业工程控制发展概况	1	2.3 压力测量	36
1.1.2 流程工业综合自动化技术的总体 结构	1	2.3.1 压力的表示方法	36
1.2 过程控制系统基础知识	2	2.3.2 压力检测的主要方法	37
1.2.1 过程控制系统的组成与分类	2	2.3.3 常见压力检测仪表	38
1.2.2 控制系统的过渡过程及其质量 指标	5	2.3.4 智能式压力变送器	41
1.3 基础自动化知识	8	2.3.5 压力仪表的选用和安装	43
1.3.1 自动化仪表概述	8	2.4 流量测量	46
1.3.2 检测仪表的测量误差	8	2.4.1 概述	46
1.3.3 检测仪表的性能指标	9	2.4.2 速度式流量计	47
1.4 计算机控制基础	11	2.4.3 容积式流量计	53
1.4.1 计算机控制系统的原理	11	2.4.4 质量流量计	53
1.4.2 计算机控制系统的组成及特点	11	2.4.5 流量仪表的选用	55
1.5 流程工业控制工程常用图例符号	13	2.5 物位测量	55
1.5.1 自控工程设计中常用图形符号	13	2.5.1 物位仪表的分类	55
1.5.2 字母代号	14	2.5.2 常用物位计	56
1.5.3 仪表位号	16	2.5.3 物位检测仪表的选用	58
1.5.4 控制符号图表示方法示例	16	2.6 成分和物性参数检测	59
1.5.5 用 SAMA 图表示的自动控制系统 统图	16	2.6.1 热导式气体成分检测	59
1.5.6 简单控制系统控制符号图识图 初步	18	2.6.2 磁导式气体成分检测	60
思考题与习题	18	2.6.3 红外式气体成分检测	60
第 2 章 过程参数的检测与变送	20	2.6.4 溶解氧的检测	61
2.1 概述	20	2.6.5 色谱分析	62
2.1.1 检测与变送基本概念	20	2.6.6 pH 值的检测	63
2.1.2 变送器的基本输入输出特性	20	2.6.7 浊度的检测	63
2.1.3 模拟式变送器的基本构成原理	21	2.7 新型测量仪表简介	64
2.1.4 智能式变送器的基本构成原理	21	2.7.1 现场总线仪表	64
2.1.5 变送器的若干共性问题	22	2.7.2 软测量技术	64
2.2 温度检测与变送	25	思考题与习题	65
2.2.1 概述	25	第 3 章 过程控制仪表	67
2.2.2 热电偶	25	3.1 电动仪表的安全防爆	67
2.2.3 热电阻	30	3.1.1 易燃易爆场所对防爆电气设备 要求	67
2.2.4 温度变送器	31	3.1.2 安全栅	68
2.2.5 常用的温度显示仪表	32	3.1.3 易燃易爆场所仪表操作注意事项	70
		3.2 控制器	71
		3.2.1 DDZ-III 型控制器	71

3.2.2 可编程数字控制器	74	范围	119
3.3 执行器	79	5.2.3 串级控制系统的设计	122
3.3.1 电动执行器	80	5.2.4 串级控制系统的投运及参数 整定	125
3.3.2 气动执行器	82	5.3 前馈控制系统	128
思考题与习题	92	5.3.1 前馈控制的基本概念和方 块图	128
第4章 基本控制规律及其工程实现	93	5.3.2 前馈控制的特点和局限性	129
4.1 位式控制	93	5.3.3 前馈控制系统的几种结构 形式	129
4.1.1 双位控制	93	5.3.4 前馈控制系统的选用原则和应用 实例	131
4.1.2 具有中间区的双位控制	93	5.4 比值控制系统	132
4.2 比例控制	94	5.4.1 概述	132
4.2.1 比例控制规律	94	5.4.2 常见的比值控制方案	133
4.2.2 比例度及其对控制过程的影响	94	5.5 均匀控制系统	134
4.3 积分控制及比例积分控制	96	5.5.1 均匀控制原理	135
4.3.1 积分控制规律	96	5.5.2 均匀控制方案	135
4.3.2 比例积分控制规律	97	5.6 分程控制系统	136
4.3.3 积分时间及其对过渡过程的 影响	97	5.6.1 概述	136
4.4 微分控制及比例微分控制	98	5.6.2 分程控制的应用场合	137
4.4.1 微分控制规律	98	5.6.3 分程控制系统应用中应注意的几个 问题	139
4.4.2 比例微分控制规律	99	5.7 选择性控制系统	140
4.4.3 微分时间及其对过渡过程的 影响	99	5.7.1 概述	140
4.5 比例积分微分控制规律	100	5.7.2 选择性控制系统的类型	140
4.6 PID控制器的工程实现	100	5.7.3 选择性控制系统的设计	142
4.6.1 给定值处理	101	5.8 新型控制系统简介	142
4.6.2 被控量处理	102	5.8.1 预测控制	143
4.6.3 偏差处理	102	5.8.2 推理控制	143
4.6.4 PID计算	103	5.8.3 解耦控制	143
4.6.5 控制量处理	104	5.8.4 鲁棒控制	144
4.6.6 自动手动切换	104	5.8.5 自适应控制	144
思考题与习题	106	5.8.6 智能控制	144
第5章 过程控制系统	107	5.9 控制流程图识图	145
5.1 简单控制系统的分析与设计	107	5.9.1 常规控制流程图的识图	145
5.1.1 系统被控变量与操纵变量的 选择	107	5.9.2 计算机控制流程图识图初步	147
5.1.2 测量变送在系统分析设计中的 考虑	108	思考题与习题	148
5.1.3 执行器的选择	111	第6章 过程输入输出通道	150
5.1.4 控制规律的选取	111	6.1 模拟量输入通道	150
5.1.5 控制器的参数整定	112	6.1.1 模拟量输入通道的组成	150
5.1.6 简单控制系统的投运及故障 分析	114	6.1.2 DCS的模拟量输入(AI) 设备	160
5.2 串级控制系统	118	6.2 模拟量输出通道	163
5.2.1 串级控制系统的基本概念	118	6.2.1 模拟量输出通道的组成	163
5.2.2 串级控制系统的特点及应用			

6.2.2	D/A 转换器的性能指标	164	8.3.2	TCP/IP 协议	210
6.2.3	调零和增益校准	165	8.3.3	OPC 技术	211
6.2.4	D/A 转换器输入输出特征	165	8.4	现场总线技术	212
6.2.5	DCS 的模拟量输出 (AO) 设备	166	8.4.1	现场总线技术概念	212
6.3	开关量输入输出通道	168	8.4.2	现场总线的发展现状	212
6.3.1	开关量输入通道	169	8.4.3	基金会现场总线	213
6.3.2	开关量输出通道	170	8.4.4	Profibus 总线技术	214
6.3.3	DCS 的开关量输入/输出 (DI/DO) 设备	172	8.4.5	现场总线的技术特点及前景	215
思考题与习题		176	8.5	工业以太网技术	215
第 7 章 计算机控制系统的抗干扰 技术		177	8.5.1	以太网的优势	215
7.1	干扰的来源与传播途径	177	8.5.2	工业以太网要解决的问题	216
7.1.1	干扰的来源	177	8.5.3	工业以太网解决非确定性问题的 措施	217
7.1.2	干扰的传播途径	178	8.6	工业控制网络现状	218
7.2	硬件抗干扰措施	179	思考题与习题		219
7.2.1	串模干扰及其抑制	179	第 9 章 分布式控制系统		220
7.2.2	共模干扰及其抑制	180	9.1	概述	220
7.2.3	长线传输干扰的抑制	183	9.1.1	DCS 的发展概况	220
7.2.4	信号线的选择与敷设	184	9.1.2	DCS 的特点	221
7.2.5	电源系统的抗干扰	185	9.1.3	DCS 系统的构成方式	222
7.2.6	接地系统的抗干扰	188	9.2	DCS 的硬件体系结构与功能	224
7.3	软件抗干扰措施	191	9.2.1	DCS 的过程控制装置	224
7.3.1	指令冗余技术	191	9.2.2	操作管理装置	228
7.3.2	软件陷阱技术	192	9.2.3	DCS 主要的数据通信系统	230
7.4	程序运行监视系统	192	9.3	DCS 的软件体系与组态方法	230
7.4.1	Watchdog Timer 的工作原理	192	9.3.1	DCS 的软件体系	230
7.4.2	Watchdog Timer 的实现方法	193	9.3.2	DCS 的组态方法	232
思考题与习题		194	9.4	DCS 应用实例	238
第 8 章 控制网络技术		195	9.4.1	概述	238
8.1	数据通信基础	195	9.4.2	装置规模	238
8.1.1	数据通信系统的构成	195	9.4.3	MACS_V 对该装置的控制 方案	239
8.1.2	数据通信方式	196	9.4.4	DCS 与 PLC 及第三方设备的 通信	247
8.1.3	通信同步技术	197	9.5	DCS 的在线调试与投运	248
8.1.4	通信模型	198	9.5.1	DCS 的在线调试	248
8.1.5	通信介质	199	9.5.2	系统投运	251
8.1.6	数据传输编码	201	9.6	几种典型的 DCS 结构与特点	251
8.1.7	多路复用技术	203	9.6.1	Honeywell 公司的 Experion PKS 系统	251
8.2	控制网络技术	205	9.6.2	ABB 公司的 Industrial ^{IT} 系统	253
8.2.1	网络拓扑结构	205	9.6.3	Emerson 公司的 PlantWeb 系统	255
8.2.2	网络控制方法	206	9.6.4	西门子 SIMATIC PCS 7	256
8.2.3	差错控制技术	207	思考题与习题		258
8.3	网络体系结构	208			
8.3.1	开放系统互连参考模型	208			

第 10 章 典型过程的控制	259
10.1 锅炉的过程控制	259
10.1.1 汽包水位控制	259
10.1.2 过热蒸汽温度控制	261
10.1.3 燃烧过程的控制	262
10.1.4 锅炉控制方案实例	263
10.2 化学反应器的过程控制	271
10.2.1 化学反应器的分类方式与 控制	272
10.2.2 化学反应器的典型控制方案	273
10.3 精馏塔的过程控制	275
10.3.1 概述	275
10.3.2 精馏塔控制的基本方案	277
10.4 流体输送设备的过程控制	278
10.4.1 泵的控制	278
10.4.2 离心式压缩机的控制	281
10.5 传热设备的过程控制	283
10.5.1 传热设备的静态数学模型	283
10.5.2 一般传热设备的控制	284
10.5.3 管式加热炉的控制	286
思考题与习题	288
附录	289
附录一 铂铑 ₁₀ -铂热电偶分度表	289
附录二 镍铬-铜镍热电偶分度表	294
附录三 镍铬-镍硅热电偶分度表	295
附录四 铂电阻分度表	299
附录五 铜电阻分度表	302
参考文献	304

第 1 章 流程工业工程控制基础

以连续过程为主要特征的生产行业习惯上被称为流程工业 (Process Industry), 也有人称为过程工业如石油、化工、电力、建材、环保等。流程工业是国民经济发展中极为重要的基础支柱产业。

控制指工业生产中连续的或按一定周期程序进行的生产过程自动控制, 以处理连续或间歇物料流、能量流为主。控制量通常指连续的过程输入输出变量, 如温度 (Temperature)、压力 (Pressure)、流量 (Flow)、液位 (Level) 及质量 (Mass) 等。在国际上, 过程控制 (Process Control) 和过程自动化 (Process Automation) 一般指的都是以连续过程为主要特征的流程工业。

1.1 流程工业工程控制的发展

1.1.1 流程工业工程控制发展概况

流程工业控制是伴随着自动化仪表、控制系统和计算机及网络技术的更新而不断发展的。

20 世纪 70 年代中期, 继集成电路之后, 出现了以集成运算放大器为主要放大元件、24V DC 为能源、4~20mA DC 为统一标准信号的 DDZ-III 型仪表。DDZ-III 型仪表均为安全火花型防爆仪表, 配上安全栅, 构成安全火花防爆系统, 在化工、炼油等行业得到了广泛的应用, 并曾一度占主导地位。进入 20 世纪 80 年代后, 由于微处理器的发展, 又出现了 DDZ-S 型智能式单元组合仪表, 它以微处理器为核心, 能源、信号都同于 DDZ-III 型, 其可靠性、准确性及功能等都远远优于 DDZ-III 型仪表。

20 世纪 80 年代, 我国开始引进和生产以微型计算机为核心, 控制功能分散、显示操作集中, 集控制、管理于一体的分布式控制系统 (DCS), 从而将过程控制仪表及装置推向高级阶段。同时, 可编程序控制器 (PLC) 的应用也从逻辑控制领域向过程控制领域拓展, 以其优良的技术性能和良好的性能/价格比在过程控制领域中占据了一席之地。

20 世纪 90 年代至今, 随着计算机技术和网络技术的迅速发展, 流程工业控制中出现了多学科间的相互渗透与交叉。信号处理技术、计算机技术、通讯技术及计算机网络与自动控制技术的结合使过程控制开始突破自动化孤岛模式。集控制、优化、调度、管理、经营于一体的综合自动化新模式已成为流程工业控制的发展方向。

1.1.2 流程工业综合自动化技术的总体结构

根据国内外综合自动化技术的发展趋势和网络技术的发展现状, 流程工业综合自动化技术的总体结构如图 1-1 所示。

(1) 企业资源计划系统 (ERP)

ERP (Enterprise Resources Planning) 系统是一个在全公司范围内应用的、高度集成的系统, 是指建立在信息技术基础上, 以系统化的管理思想, 为企业决策层及员工提供决策运行手段的管理平台。

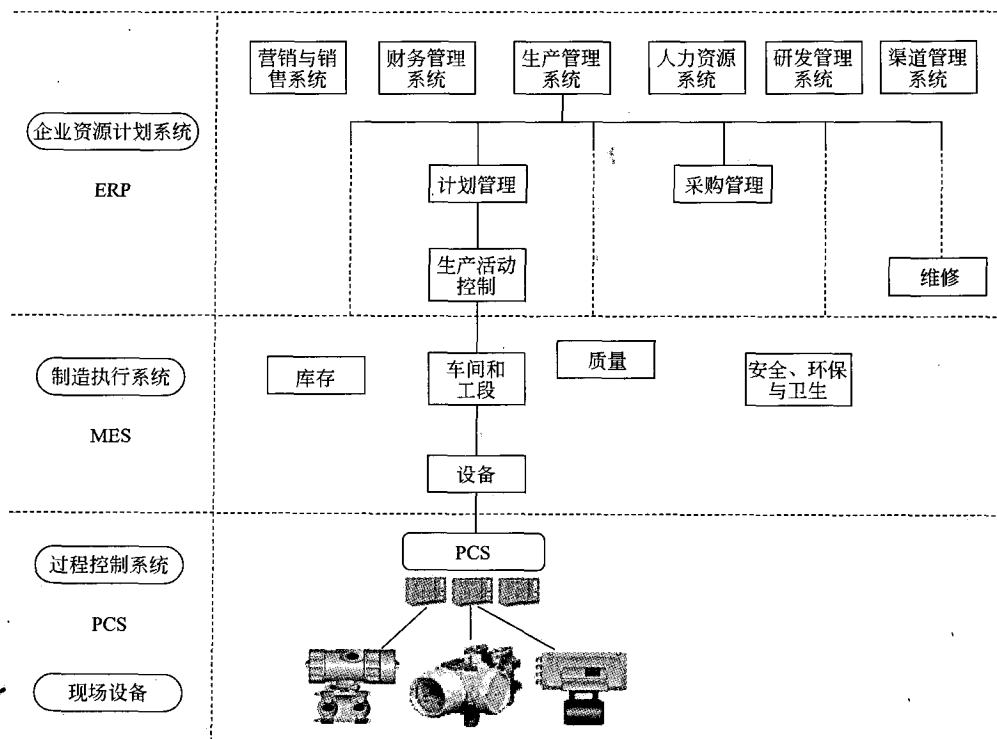


图 1-1 流程工业综合自动化技术的总体结构

ERP 系统可以实现对企业经营全过程物流、信息流和资金流的监控，使销售管理、采购管理、财务管理、人力资源管理、生产管理等内部管理所需的业务应用系统集成一体。对公司内部业务流程和管理过程进行了优化，使主要的业务流程实现了自动化。

（2）制造执行系统（MES）

MES (Manufacturing Execution System) 处于计划层和控制层之间，是 ERP 和 PCS 之间的信息纽带。它接受 PCS 采集来的生产数据并与质量指标进行对比和分析，执行由 ERP 制定的计划，根据实时生产信息调整生产做出调度，并将有关资源利用和库存情况的准确信息实时地提供给 ERP 系统。MES 还能将生产目标及生产规范自动转化为过程设定值，并对应到阀门、泵等控制设备的参数设置。同时，通过控制库存、产品质量、流程指令和设施等工厂资源来提高制造竞争力。总之，MES 能通过信息传递对从订单下达到产品完成的整个生产过程进行优化管理。

（3）过程控制系统（PCS）与现场设备

PCS (Process Control System) 主要指的是现代分布式控制系统 DCS (包含 PLC 及 FCS)，流程工业控制的现场设备主要是变送器（包括传感器等）和执行器。这部分属基础自动化与过程自动化，是本书所要讲的主要内容，将会在随后的章节中陆续加以介绍。

1.2 过程控制系统基础知识

1.2.1 过程控制系统的组成与分类

（1）过程控制系统的组成

过程控制系统能够按照生产要求对各个生产工艺参数进行一定的控制，它由可以替代人

工来操作生产过程的装置组成。在生产过程中,由于定值系统使用最多,所以常常通过定值系统来讨论过程控制系统。

如图 1-2 所示是一个简单的定值系统范例——水槽液位控制系统。其控制的目的是使水槽液位维持在其设定值上(譬如水槽液位满刻度的 50% 的位置上)。

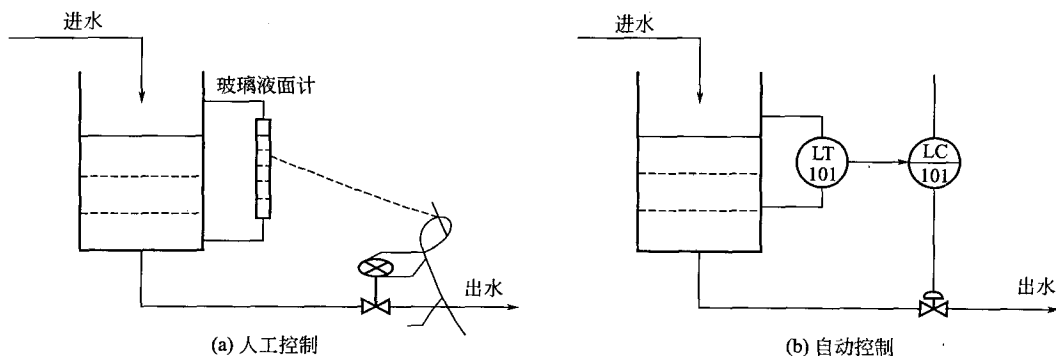


图 1-2 水槽液位控制系统示意图

如图 1-2(a) 所示为人工控制。假如进水量增加,导致水位增加,人眼睛观察玻璃液面计中的水位变化,并通过神经系统传给大脑,经与大脑中的设定值(50%)比较后,知道水位偏高(或偏低),故发出信息,用手开大(或关小)阀门,调节出水量,使液位变化。这样反复进行,直到液位重新稳定到设定值上,从而实现了液位的人工控制。

如图 1-2(b) 所示为自动控制。现场的液位变送器 LT(Level Transmitter) 将水槽液位检测出来,并转换成统一的标准信号传送给控制室内的控制器 LC(Level Controller),控制器 LC 再将测量信号与预先输入的设定信号进行比较得出偏差,并按预先确定的某种控制规律(比例、积分、微分的某种组合)进行运算后,输出统一标准信号给控制阀,控制阀改变开启度,控制出水量。这样反复进行,直到水槽液位恢复到设定值为止,从而实现水槽液位的自动控制。

显然,过程自动控制系统代替人工控制时,基本对应关系如下。

过程控制系统的基本组成框图如图 1-3 所示。从图 1-3 可知,过程自动控制系统主要由工艺对象和自动化装置(执行器、控制器、检测变送器)两个部分组成。

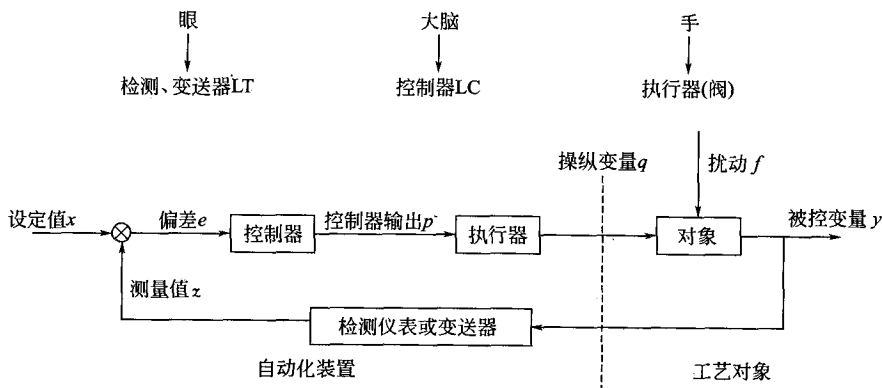


图 1-3 过程自动控制系统的组成框图

① 对象 (Object; Plant) 工艺参数需要控制的工艺设备、机器或生产过程,如上例中

的水槽。

② 检测元件 (Detecting Element) 和变送器 (Transmitter) 其作用是把被控变量转化为测量值, 如上例中的液位变送器是将液位检测出来并转化成统一的标准信号 (4~20mA DC)。

③ 比较机构 (Comparator) 其作用是将设定值与测量值比较并产生偏差值。

④ 控制器 (Controller) 其作用是根据偏差的正负、大小及变化情况, 按预定的控制规律实施控制作用, 比较机构和控制器通常组合在一起, 它可以是气动 (Pneumatic) 控制器、电动 (Electric) 控制器、可程序 (Programmable) 控制器、分布式控制系统 (DCS) 等。

⑤ 执行器 (Actuator) 其作用是接受控制器送来的信号, 相应地去改变操纵变量 q 以稳定被控变 y , 最常用的执行器是气动薄膜控制阀。

⑥ 被控变量 (Process Variable, PV) y 也叫过程变量, 是被控对象中, 通过控制能达到工艺要求设定值的工艺变量, 如上例中的水槽液位;

⑦ 设定值 (Set Value, SV) (给定值) x 被控变量的希望值, 由工艺要求决定, 如上例中的 50% 液位高度。

⑧ 测量值 (Measured Value) z 被控变量的实际测量值。

⑨ 偏差 (Deviation) e 设定值与被控变量的测量值之差。

⑩ 操纵变量 (Control Variable) q 由控制器操纵, 能使被控变量恢复到设定值的物理量或能量, 如上例中的出水量。

⑪ 扰动 (Disturbance) f 除操纵变量外, 作用于生产过程对象并引起被控变量变化的随机因素, 如进料量的波动。

(2) 过程控制系统的分类

过程控制系统一般分为生产过程的自动检测 (Automatic Monitoring)、自动报警联锁 (Auto-alarm And Interlocking)、自动操纵 (Automatic Operation) 和自动控制 (Autocontrol) 系统四大类, 通常所说的过程控制系统就是过程自动控制系统, 是本书所要讲解的主要内容。

过程自动控制系统是用自动控制装置对生产过程中的某些重要变量进行调节, 使受到外界干扰影响而偏离正常状态的工艺变量自动地回复到规定的数值范围的系统。

过程的自动控制系统分类方法很多, 若按被控变量的名称分, 有温度、压力、流量、液位、成分等控制系统; 按控制器的控制规律来分类, 有比例 (P) 控制系统、比例积分 (PI) 控制系统和比例积分微分 (PID) 控制系统等; 按系统性能分, 有线性系统和非线性系统、连续系统和离散系统、定常系统和时变系统; 按被控量的多少来分类, 有单变量控制系统和多变量控制系统等。这里主要讨论按基本结构形式分类的开环控制系统和闭环控制系统两大类。

① 开环控制系统 在开环控制系统中, 系统的输出信号不反馈到系统的输入端, 是控制器与被控对象之间只有顺向控制而没有反向联系的控制系統。操纵变量可以通过控制对象去影响被控变量, 但被控变量不会通过控制装置去影响操纵变量。从信号传递关系上看, 未构成闭合回路。

开环控制系统又分两种: 一种是按设定值进行控制, 如蒸汽加热器, 其蒸汽量与设定值保持一定的函数关系, 当设定值变化时, 操纵变量随之变化, 如图 1-4(a) 所示为其原理图; 另一种是按扰动量进行控制, 即所谓前馈控制, 如图 1-4(b) 所示。在蒸汽加热器中, 若负荷为主要干扰, 如果使蒸汽流量与冷流体流量保持一定的函数关系, 当扰动出现时, 操纵变

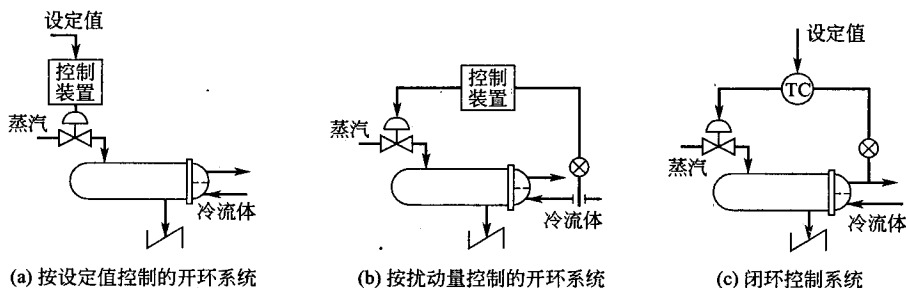


图 1-4 控制系统的基本结构

量随之变化。

② 闭环控制系统 闭环控制系统又称反馈控制系统，是一个封闭的回路，如图 1-3 所示。由图 1-3 可以看出，系统的输出信号（被控变量）通过测量变送环节，又返回到了系统的输入端，控制器与被控对象之间既有顺向控制又有反向联系。如在蒸汽加热器的出口温度控制系统中，温度调节器接受检测元件及变送器送来的测量信号，并与设定值相比较，根据偏差情况，按一定的控制规律调整蒸汽阀门的开度，以改变蒸汽量，其原理图如图 1-4(c) 所示。

闭环控制系统的优点是无论任何扰动引起被控变量偏离设定值，都会产生控制作用以克服被控变量与设定值的偏差。因此闭环控制系统有较高的控制精度和较好的适应能力，其应用范围非常广泛。其缺点是它的控制作用只有在偏差出现后才产生，当系统的惯性滞后和纯滞后较大时，控制作用对扰动的克服不及时，从而使其控制质量大大降低。

在闭环控制系统中，根据设定值的情况不同，又可分为以下三种类型。

a. 定值控制系统 指给定值恒定不变的系统，是工业生产中应用最多的一种工程控制系统。其任务是克服扰动对被控变量的影响，使被控变量始终保持在设定值（给定值）上，或使被控变量保持在允许范围内。

b. 随动控制系统 随动控制系统的设定值是一个未知的变化量，随动控制系统也称自动跟踪系统。系统被控量的给定值跟踪某一特定参数的变化而变化，要求系统抑制各种干扰，使被控量随时能够以尽可能小的误差跟随给定值变化。本书中后面要讲的比值控制系统就属于此类。

c. 程序控制系统 程序控制系统也称顺序控制系统，系统被控量的给定值也是变化的，它不是随机的而是随时间按预定程序变化的，其设定值是一个按一定时间程序变化的时间函数。实质上，程序控制系统是随动控制系统的特殊形式。

1.2.2 控制系统的过渡过程及其质量指标

(1) 系统的静态与动态

自动控制系统的输入有两种：一种是设定值的变化或称设定作用；另一种是扰动的变化或称扰动作用。当输入恒定不变时，整个系统若能建立平衡，系统中各个环节将暂不动作，它们的输出都处于相对静止状态，这种状态称为静态或定态。如图 1-1 所示锅炉汽包水位系统中，当给水量与蒸汽量相等时，水位保持不变，此时称系统达到了平衡，亦即处于静态。注意这里所说的静态并不是指静止不动，而是指各参数的变化率为零。自动控制系统在静态时，生产中的物料和能量仍然有进有出，只是平稳进行没有改变。此时输入与输出之间的关系称为系统的静态特性。

假若一个系统原来处于静态, 由于输入发生了变化, 系统的平衡受到破坏, 被控变量(即输出)发生变化, 自动控制装置就要发挥它的控制作用, 以克服输入变化的影响, 力图使系统恢复平衡。从输入变化开始, 经过控制, 直到再建立静态, 在这段时间中整个系统的各个环节和变量都处于变化的过程之中, 这种状态称为动态。此时输入与输出之间的关系称为系统的动态特性。

在控制系统中, 了解动态特性比静态特性更为重要。因为干扰引起系统变动以后, 需要知道系统的动态情况, 并弄清系统究竟能否建立新的平衡和怎样去建立平衡。而且平衡和静态是暂时的、相对的、有条件的, 不平衡和动态才是普遍的、绝对的、无条件的。干扰作用总是不断地产生, 控制作用也就不断地去克服干扰的影响, 所以自动控制系统总是一直处于运动状态之中。因此, 控制系统的分析重点要放在动态特性上。

(2) 控制系统的过渡过程

在工业生产中, 被控变量稳定是人们所希望的, 但扰动却随时存在。当控制系统受到外界干扰信号或设定值信号变化时, 即输入变化时, 被控变量都会被迫离开原先的值开始变化, 使系统原先的平衡状态被破坏。只有通过调整操纵变量来平衡外界干扰或设定值干扰的作用, 使被控变量回到其设定值上来, 系统才会处于一个新的平衡状态。

控制系统的过渡过程就是在系统的输入发生变化后, 系统在控制作用下从一个平衡状态过渡到另一个平衡状态的动态过程。

对于一个稳定的系统(所有正常工作的反馈系统都是稳定系统)要分析其稳定性、准确性和快速性, 常以阶跃作用为输入时的被控变量的过渡过程为例。因为阶跃作用很典型, 实际上也经常遇到, 且这类输入变化对系统来讲是比较严重的情况。如果一个系统对这种输入有较好的响应, 那么对其他形式的输入变化就更能适应。

如图 1-5 所示为定值控制系统在阶跃干扰作用下的过渡过程的几种基本形式。

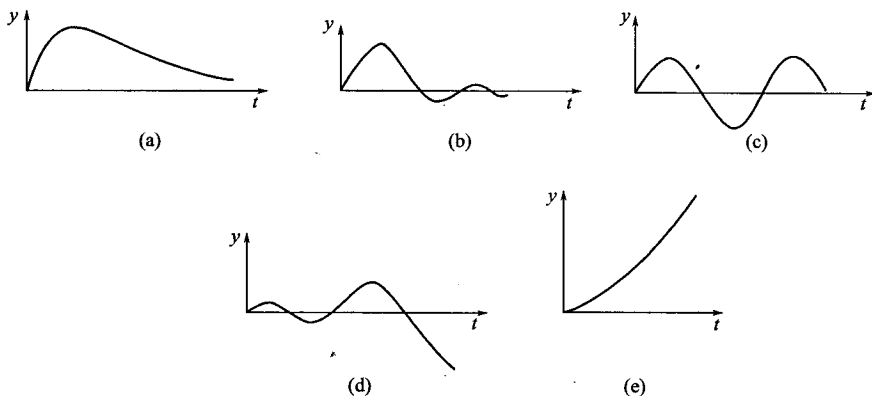


图 1-5 过渡过程的几种形式

图 1-5(a) 为非周期衰减过程, 被控变量在设定值的某一侧作缓慢变化, 没有来回波动, 最后稳定在某一数值上。图 1-5(b) 为衰减振荡过程, 被控变量上下在设定值附近波动, 但幅度逐渐减小, 最后稳定在某一数值上。图 1-5(c) 为等幅振荡过程, 被控变量在设定值附近来回波动, 且波动幅度保持不变。图 1-5(d) 为发散振荡过程, 被控变量来回波动, 且波动幅度逐渐变大, 即偏离设定值越来越远。图 1-5(e) 为单调发散过程, 被控变量虽不振荡, 但偏离原来的平衡点越来越远。

以上过渡过程的五种形式可以归纳为三类。

① 衰减过程 过渡过程形式 (a) 和 (b) 都是衰减的, 称为稳定过程。被控变量经过一段时间后, 逐渐趋向原来的或新的平衡状态, 这是所希望的。对于非周期的衰减过程, 由于过渡过程变化较慢, 被控变量在控制过程中长时间地偏离设定值, 而不能很快恢复平衡状态, 所以一般不采用, 只是在生产上不允许被控变量有波动的情况下才可以采用。

② 等幅振荡过程 过渡过程形式 (c) 介于不稳定与稳定之间, 一般也认为是不稳定过程, 生产上不能采用。只是对于某些控制质量要求不高的场合, 如果被控变量允许在工艺许可的范围内振荡, 那么这种过渡过程的形式是可以采用的。

③ 发散过程 过渡过程形式 (d) 和 (e) 是发散的, 为不稳定的过渡过程, 其被控变量在控制过程中, 不但不能达到平衡状态, 而且逐渐远离设定值, 它将导致被控变量超越工艺允许范围, 严重时会引起事故, 这是生产上所不允许的, 应竭力避免。

(3) 过渡过程的质量指标

对每一个定值控制系统来说, 在设定值发生变化或系统受到扰动作用时, 被控变量应该平稳、迅速和准确地趋近或回复到设定值。

图 1-6 表示了一个定值控制系统受到外界干扰以后的过渡过程曲线, 衡量一个控制系统的好坏常采用以下几个质量指标。

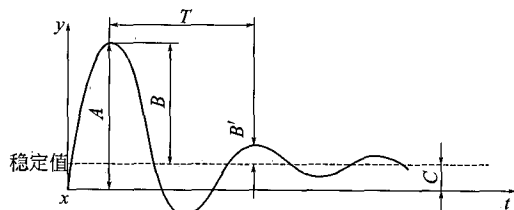


图 1-6 过渡过程控制指标示意图

① 衰减比 n (或衰减率 Ψ) 衰减比是衡量过渡过程稳定性的一个动态指标。它等于两个相邻的同向波峰值之比。在图 1-6 中, 若第一个波与同方向第二个波的波峰分别为 B 、 B' , 则衰减比 $n=B/B'$, 或习惯表示为 $n:1$ 。可见 n 越小, B' 越接近 B , 过渡过程越接近等幅振荡, 系统不稳定; 而 n 越大, 过渡过程越接近单调过程, 过渡过程时间太长。所以一般认为衰减比 $4:1 \sim 10:1$ 为宜。

也可用衰减率来衡量控制系统的稳定性。衰减率是指每经过一个周期后, 波动幅度衰减的比例, 即衰减率 $\Psi=(B-B')/B$ 。衰减比与衰减率之间有简单的对应关系, 例如衰减比 n 为 $4:1$ 就相当于衰减率为 $\Psi=75\%$ 。为了保证控制系统有一定的稳定裕度, 在过程控制中一般要求衰减比为 $4:1 \sim 10:1$, 这相当于衰减率为 $75\% \sim 90\%$ 。这样, 大约经过两个周期以后就趋于稳态, 看不出振荡了。

② 最大动态偏差 A (或超调量 B) 也是衡量过渡过程稳定性的一个动态指标。最大偏差是指在过渡过程中, 被控变量偏离设定值的最大数值。在衰减振荡过程中, 最大偏差就是第一个波的峰值, 在图 1-6 中以 A 表示, 最大偏差表示系统瞬间偏离设定值的最大程度。若偏离越大, 偏离的时间越长, 对稳定正常生产越不利。一般来说, 最大偏差以小为好, 特别是对于一些有约束条件的系统, 如化学反应器的化合物爆炸极限、催化剂烧结温度极限等, 都会对最大偏差的允许值有所限制。同时考虑到干扰会不断出现, 当第一个干扰还未清除时, 第二个干扰可能又出现了, 偏差有可能是叠加的, 这就更需要限制最大偏差的允许值。所以, 在决定最大偏差允许值时, 应根据工艺情况慎重选择。

有时也可以用超调量来表征被控变量偏离设定值的程度。在图 1-6 中超调量以 B 表示。从图中可以看出, 超调量是第一峰值 A 与新稳定值 C 之差, 即 $B=A-C$ 。如果系统的新稳态值等于设定值, 那么最大偏差 A 也就与超调量 B 相等。超调量习惯上用 σ 来表示: $\sigma=(B/C) \times 100\%$ 。

③ 余差 C 余差是衡量控制系统稳定性的静态指标, 当过渡过程终了时, 被控变量的

新稳态值与设定值之差称为余差。余差就是过渡过程终了时存在的残余偏差，在图 1-6 中用 C 表示。设定值是生产的技术指标，所以，被控变量越接近设定值越好，亦即余差越小越好。但实际生产中，也并不是要求任何系统的余差都很小，如一般贮槽的液位控制要求就不高，这种系统往往允许液位有较大的变化范围，余差就可以大一些。又如化学反应器的温度控制，一般要求比较高，应当尽量消除余差。所以，对余差大小的要求，必须结合具体系统做具体分析，不能一概而论。有余差的控制过程称为有差控制，相应的系统称为有差系统；没有余差的控制过程称为无差控制，相应的系统称为无差系统。

④ 过渡时间和振荡周期 T 过渡过程要绝对地达到新的稳态值，需要无限长的时间，而要进入稳态值附近 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 以内区域，并保持在该区域内，需要的时间是有限的。因此，把扰动开始到被控变量进入新的稳态值的 $\pm 5\%$ (或 $\pm 2\%$) 范围内的这段时间，称为过渡时间，它是衡量控制系统快速性的指标。过渡时间短，表示过渡过程进行得比较迅速，这时即使干扰频繁出现，系统也能适应，系统控制质量就高；反之，过渡时间太长，第一个干扰引起的过渡过程尚未结束，第二个干扰就已经出现，这样，几个干扰的影响叠加起来，就可能使系统满足不了生产的要求。

过渡过程同向两波峰（或波谷）之间的时间间隔称为振荡周期或工作周期，其倒数称为振荡频率。在衰减比相同的情况下，振荡频率越高，过渡时间越短，因此，振荡频率在一定程度上也可作为衡量控制快速性的指标。

1.3 基础自动化知识

1.3.1 自动化仪表概述

在流程工业生产过程中，为了有效地进行生产操作与控制，需要用到各种各样的仪表 (Instrument)，这些仪表的分类方法也多种多样，其中以仪表所起的作用为标准是最通用的分类方法。根据仪表在测量和控制系统中所起的作用不同，可分为检测仪表 (Measuring Instrument)、显示仪表 (Display Instrument)、控制器 (Controller) 和执行器 (Actuator) 四大类。

检测仪表通常按被测变量的不同分为温度检测仪表、压力检测仪表、流量检测仪表、物位检测仪表和成分检测仪表几种类型。过程变量的各种信息都是通过检测仪表获取的。

显示仪表用来显示和记录各种过程变量的信息，按显示方式不同，可分为模拟式显示仪表、数字式显示仪表和屏幕显示装置三大类。

控制器和执行器一般统称为过程控制仪表，控制仪表是实现生产过程自动化的重要工具。检测仪表获取的过程变量信息，除了送至显示仪表进行指示和记录外，更重要的是要送至控制器，在控制器内与设定值进行比较后得出偏差，然后由控制器按照预订的控制规律对偏差进行运算，输出控制信号，操纵执行器的执行机构动作，使被控变量达到预期要求，最终实现生产过程的自动化。

1.3.2 检测仪表的测量误差

测量的目的是为了获得过程变量的真实值，而在测量过程中，由于使用的测量工具本身不够精确、观测者的主观性和周围环境的影响等，使得测量值与真实值不可能完全一样，始终存在一定的差值，这个差值就是测量误差 (Measurement Error)。在实际测量中，误差的表示方法有很多种，其含义、用途各不相同。通常分为绝对误差和相对误差。

(1) 绝对误差 (Absolute Error)

绝对误差在理论上是指仪表指示值 x 和被测量的真实值 x_t 之间的代数差, 可表示为

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

在工程中, 要知道被测量的真实值是困难的。因此, 所谓测量仪表在其标尺范围内各点读数的绝对误差, 一般是用标准表 (准确度较高) 和被校表 (准确度较低) 同时对同一参数测量所得到的两个读数之差, 把式(1-1) 中的真实值 x_t 用标准表读数 x_0 来代替, 则绝对误差表示成

$$\Delta = x - x_0 \quad (1-2)$$

(2) 相对误差 (Relative Error)

检测仪表都有各自的测量标尺范围, 即仪表的量程。同一台仪表量程发生变化, 也会影响测量的准确性。因此工业上定义了一个相对误差——仪表引用误差, 它是绝对误差与测量标尺范围之比, 即

$$\delta = \frac{\pm(x - x_0)}{\text{标尺上限} - \text{标尺下限}} \times 100\% \quad (1-3)$$

仪表的标尺上限值与下限值之差, 一般称为仪表的量程 (Span)。

各种测量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。

1.3.3 检测仪表的性能指标

评价一台仪表性能的优劣通常用以下指标进行衡量。

(1) 精确度 (Accuracy)

仪表的精确度简称精度, 是用来表示测量结果可靠程度的指标。任何测量过程都存在着测量误差。在使用仪表测量生产过程中的工艺变量时, 不仅需要知道仪表的指示值, 而且还应该了解仪表的精度。

考虑到整个测量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

$$\delta_{\max} = \frac{\pm(x - x_0)_{\max}}{\text{标尺上限} - \text{标尺下限}} \times 100\% \quad (1-4)$$

仪表的最大引用误差又称允许误差, 它是仪表基本误差的主要形式。仪表的精度等级是将仪表允许误差的“ $\pm$ ”及“ $\%$ ”去掉后的数值, 以一定的符号形式表示在仪表面板上, 如 1.5 外加一个圆圈或三角形。精度等级 1.5, 说明该仪表的允许误差为 $\pm 1.5\%$ 。

仪表的精度是按国家统一规定的允许误差划分成若干等级。目前, 我国生产的仪表常用的精度等级有 0.005, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.0 等。为了进一步说明如何确定仪表的精度等级, 下面举一个例子。

【例 1-1】 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 $\pm 4^\circ\text{C}$, 试确定该仪表的允许误差和精度等级。

解: 仪表的允许误差为

$$\delta_{\max} = \frac{\pm 4}{700 - 200} \times 100\% = \pm 0.8\% \quad (1-5)$$

如果将该仪表的允许误差去掉“ $\pm$ ”号及“ $\%$ ”号, 其值为 0.8。由于我国规定的精度等级中没有 0.8 级仪表, 同时, 该仪表的允许误差超过了 0.5 级仪表允许的最大误差, 所以, 这台测温仪表的精度等级为 1.0 级。