

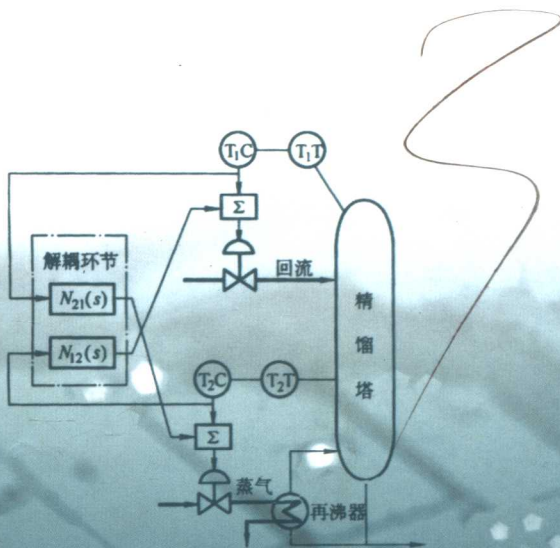


DIANQI
KINXILEI

普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

过程控制系统与仪表

■ 王再英 刘淮霞 陈毅静 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材

过程控制系统与仪表

王再英 刘淮霞 陈毅静 编著
施 仁 杨世兴 审校



机械工业出版社

基于仪表与过程控制系统的最新发展和工程应用,本书在深入分析过程控制中常用(温度、压力、流量、液位、成分)检测仪表、控制仪表/可编程序控制器、执行器及本安防爆技术的基础上,讨论了过程动态特性与建模、单回路控制系统设计与参数整定、复杂控制系统(串级、前馈、比值、均匀、分程、选择、大延迟补偿、解耦控制)的分析与设计;简要介绍了先进控制技术(自适应控制、预测控制、模糊控制、推理控制、专家控制、仿人控制)的相关内容;对 DDC 系统、DCS 系统进行了较为系统的论述,简单讨论了现场总线技术、控制网络的现状及发展趋势。最后对两类典型过程控制系统实例进行了深入分析。全书共 10 章,每章均附有思考题与习题。

本书可作为自动化专业及石化、电力、轻工等专业的教材或参考书,也可供工业控制工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统与仪表/王再英等编著. —北京:机械工业出版社, 2006.1
普通高等教育“十一五”电气信息类规划教材
ISBN 7-111-18308-8

I. 过… II. 王… III. ①过程控制-自动控制系统-高等学校-教材②过程控制-自动化仪表-高等学校-教材 IV. ①TP273②TP216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 161111 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:于苏华 版式设计:张世琴 责任校对:吴美英
封面设计:张静 责任印制:洪汉军
北京双青印刷厂印刷
2006 年 2 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·21.25 印张·527 千字
定价:29.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010) 68326294
封面无防伪标均为盗版

前 言

过程控制是自动化技术的重要分支,在石化、电力、冶金、轻工等连续型生产过程中有着广泛的应用。近年来,过程控制技术本身及其应用领域得到了迅速发展。无论是在现代复杂工业生产过程中,还是在传统生产过程的技术改造中,过程控制技术对于提高劳动生产率、保证产品质量、改善劳动条件以及保护生态环境、优化技术经济指标等方面都起着非常重要的作用。

“过程控制系统与仪表”是自动化专业的主要专业课程之一。本书以“系统、简洁、全面、新颖、实用”的原则,系统介绍了过程控制系统与仪表的理论、技术及工程应用。通过本书的教学,学生可以全面了解和掌握各类典型过程控制系统的组成、各个环节的工作原理以及相关理论与技术最新的发展状况,使学生初步掌握仪表选型、系统设计的基本原理与方法,并对过程控制技术的最新发展有一个比较全面的了解。全书在章节安排上,力求层次清晰、各部分内容系统、完整和整体次序上的合理衔接,以便于阅读理解。

全书共分10章,参考教学时数为60学时。第1章绪论,第2章检测仪表,第3章控制仪表(含PLC),第4章执行器与安全栅,第5章被控过程的数学模型,第6章简单控制的系统设计与参数整定,第7章复杂控制系统(包括串级、前馈、大滞后、比值、均匀、分程、选择及解耦控制),第8章先进过程控制技术,对自适应控制、预测控制、专家控制、模糊控制、神经网络控制、推理控制、仿人控制的基本原理进行了简单介绍,第9章计算机控制系统,对DDC系统、DCS和现场总线技术与FCS、工业控制网络现状进行了简单讨论,第10章过程控制系统应用实例,对精馏塔过程控制系统和工业锅炉控制系统进行了比较深入的分析、讨论。每章后均附有思考题和习题。

第1、6、7、8、10章由王再英编写,第2、3、4章由陈毅静编写,第9章由刘淮霞编写,第5章由刘淮霞、王再英共同编写。全书由王再英主编定稿。西安交通大学原自动控制系统系主任、博导施仁教授仔细审阅了书稿,提出了全面、具体的书面修改意见和建议,并提供了相应的资料;西安科技大学杨世兴教授审阅了书稿,并提出了许多宝贵的意见和建议,他们的意见和建议对本书的完善与提高发挥了极为重要的作用,我们在此对施教授、杨教授表示诚挚的感谢。另外,研究生孙静、王明芳同学参加了本书部分文字处理工作,在此表示衷心感谢。

在多年从事过程控制系统与仪表的各项工程、技术工作以及相关的教学工作中,曾得到许多专家、老师、朋友的帮助与支持;在本书编写过程中广泛参考了许多专家、学者的文章著作以及相关技术文献,作者在此一并表示衷心感谢。

由于水平有限,书中存在缺点、错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编著者

2005年11月

目 录

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 过程控制的特点 1
 - 1.2 过程控制的发展概况 2
 - 1.2.1 过程控制装置与系统的发展 3
 - 1.2.2 过程控制策略与算法的发展 4
 - 1.3 过程控制系统分类及其性能指标 5
 - 1.3.1 过程控制系统的分类 5
 - 1.3.2 过程控制系统的性能指标 6
- 思考题与习题 12

第 2 章 检测仪表 13

- 2.1 检测仪表的基本技术指标 13
- 2.2 温度检测及仪表 15
 - 2.2.1 温度检测方法 15
 - 2.2.2 热电偶 16
 - 2.2.3 热电阻 21
 - 2.2.4 集成温度传感器 22
 - 2.2.5 温度显示与记录 26
 - 2.2.6 温度变送器 30
- 2.3 压力检测及仪表 36
 - 2.3.1 压力检测的方法 36
 - 2.3.2 弹性式压力计 36
 - 2.3.3 电气式压力计 38
 - 2.3.4 智能式差压变送器 44
- 2.4 流量检测及仪表 44
 - 2.4.1 流量的基本概念 45
 - 2.4.2 差压式流量计 45
 - 2.4.3 转子流量计 47
 - 2.4.4 靶式流量计 48
 - 2.4.5 椭圆齿轮流量计 49
 - 2.4.6 涡轮流量计 49
 - 2.4.7 电磁流量计 51
 - 2.4.8 旋涡式流量计 51
 - 2.4.9 超声波流量计 53
- 2.5 物位检测及仪表 55

- 2.5.1 概述 55
 - 2.5.2 差压式液位变送器 55
 - 2.5.3 电容式物位变送器 57
 - 2.5.4 超声波液位计 60
- 2.6 成分检测及仪表 60
- 2.6.1 氧化锆氧量计 60
 - 2.6.2 气相色谱分析仪 62
 - 2.6.3 红外线气体分析仪 66
 - 2.6.4 工业酸度计 68
- 思考题与习题 69

第 3 章 控制仪表 72

- 3.1 基本控制规律及特点 72
 - 3.1.1 双位控制 72
 - 3.1.2 比例控制 (P) 73
 - 3.1.3 比例积分控制 (PI) 75
 - 3.1.4 比例微分控制 76
 - 3.1.5 比例积分微分控制 76
 - 3.2 模拟式控制器 77
 - 3.2.1 DDZ-III 型仪表的特点 77
 - 3.2.2 DDZ-III 型控制器的组成与操作 77
 - 3.2.3 全刻度指示调节器的线路实例 78
 - 3.3 数字式 PID 控制器 87
 - 3.3.1 SLC 单回路可编程调节器的电路原理 87
 - 3.3.2 SLC 的数字控制算法 90
 - 3.3.3 SLC 单回路可编程调节器的用户程序 93
 - 3.3.4 用户程序的写入和调试 99
 - 3.4 可编程逻辑控制器 99
 - 3.4.1 PLC 的主要组成 100
 - 3.4.2 PLC 的内部等效继电器电路 100
 - 3.4.3 PLC 的编程语言 101
- 思考题与习题 106

第 4 章 执行器及安全栅	107	的分析	188
4.1 执行器	107	6.3.2 调节规律的选择	193
4.1.1 气动调节阀	107	6.4 调节器参数的工程整定方法	194
4.1.2 电/气转换器	113	6.4.1 稳定边界法	195
4.1.3 阀门定位器	114	6.4.2 衰减曲线法	196
4.1.4 电/气阀门定位器	115	6.4.3 响应曲线法	197
4.1.5 电动调节阀	116	6.4.4 经验法	200
4.1.6 智能式调节阀	117	6.4.5 几种工程整定方法的比较	201
4.2 安全栅	118	6.5 简单控制系统设计实例	202
4.2.1 安全防爆的基本概念	118	6.5.1 生产过程概述	202
4.2.2 安全火花防爆系统	119	6.5.2 控制方案设计	202
4.2.3 安全栅的工作原理	120	6.5.3 调节器参数整定	205
思考题与习题	124	思考题与习题	205
第 5 章 被控过程的数学模型	125	第 7 章 复杂控制系统	208
5.1 被控过程数学模型的作用与要求	125	7.1 串级控制系统	208
5.2 建立被控过程数学模型的方法	126	7.1.1 串级控制系统的基本结构 与工作原理	208
5.3 机理法建模	128	7.1.2 串级控制系统的特点及其 分析	212
5.3.1 机理法建模的基本原理	128	7.1.3 串级控制系统的设计与参 数整定	216
5.3.2 单容过程建模	129	7.2 前馈控制系统	221
5.3.3 多容过程建模	134	7.2.1 前馈控制的工作原理及其 特点	221
5.4 测试法建模	138	7.2.2 前馈控制系统的结构	224
5.4.1 阶跃响应曲线法建模	139	7.3 大滞后过程控制系统	227
5.4.2 测定动态特性的频域法	145	7.3.1 大滞后过程的采样控制	228
5.4.3 测定动态特性的统计相关 分析法	147	7.3.2 大滞后过程的 Smith 预估补 偿控制	228
5.4.4 最小二乘法建立被控过程的数学 模型	164	7.4 比值控制系统	230
思考题与习题	170	7.4.1 比值控制系统的种类	231
		7.4.2 比值控制系统的设计与参数 整定	233
第 6 章 简单控制系统的设计与 参数整定	172	7.5 均匀控制系统	235
6.1 简单控制系统的结构与组成	172	7.5.1 均匀控制系统的工作原理及 特点	235
6.2 简单控制系统设计	173	7.5.2 均匀控制方案	237
6.2.1 过程控制系统方案设计的基本 要求、主要内容与设计步骤	173	7.5.3 均匀控制系统的参数整定	238
6.2.2 被控参数与控制变量的选择	175	7.6 分程控制系统	239
6.2.3 检测环节、执行器及调节器正 负作用选择	183	7.6.1 分程控制系统的工作原理及 类型	239
6.3 调节规律对控制品质的影响与 调节规律选择	188	7.6.2 分程控制系统的设计及工业	
6.3.1 调节规律对控制品质影响			

应用	241	9.2.2 DDC 系统的设计原则	282
7.7 选择性控制系统	244	9.3 集散控制系统	283
7.7.1 选择性控制系统的类型	244	9.3.1 集散控制系统的发展历程	283
7.7.2 选择性控制系统的设计原则	246	9.3.2 集散控制系统的基本组成与 功能划分	284
7.8 解耦控制系统	247	9.3.3 现场控制站	285
7.8.1 被控过程的耦合现象及对控 制过程的影响	247	9.3.4 DCS 操作站功能	289
7.8.2 解耦控制系统设计	248	9.3.5 DCS 的通信网络	295
7.8.3 解耦控制的进一步讨论	251	9.3.6 DCS 的发展趋势	298
思考题与习题	253	9.4 现场总线技术与现场总线 控制系统	299
第 8 章 先进过程控制技术	256	9.4.1 现场总线发展及几种主要的现场 总线技术	300
8.1 概述	256	9.4.2 现场总线控制系统及其特点	304
8.2 自适应控制	257	9.4.3 控制网络的现状与发展	306
8.2.1 自校正控制系统	257	思考题与习题	308
8.2.2 模型参考自适应控制系统	258	第 10 章 过程控制系统应用实例	309
8.3 预测控制	258	10.1 精馏塔过程控制系统	309
8.3.1 模型算法控制	259	10.1.1 分馏原理	309
8.3.2 动态矩阵控制	261	10.1.2 精馏塔的控制要求及主要 干扰	309
8.3.3 广义预测控制与内部模型 控制	262	10.1.3 精馏塔控制方案	311
8.4 专家控制	263	10.2 工业锅炉自动控制系统	315
8.5 模糊控制	264	10.2.1 锅炉汽包水位控制系统	316
8.5.1 模糊控制系统的基本结构	265	10.2.2 锅炉蒸气温度控制系统	321
8.5.2 模糊控制的几种实现方法	268	10.2.3 锅炉燃烧过程控制系统	324
8.6 神经网络控制	268	10.2.4 锅炉控制系统实例分析	327
8.6.1 神经元模型	268	思考题与习题	329
8.6.2 人工神经网络模型	270	附录	331
8.6.3 神经网络在控制中的应用	271	附录 A 铂铑 10-铂热电偶分度表 (简表)	331
8.7 推理控制	271	附录 B 镍铬-镍硅热电偶分度表 (简表)	331
8.7.1 推理控制系统的组成	272	附录 C 铂热电阻分度表 (简表)	332
8.7.2 推理-反馈控制系统	273	附录 D 铜热电阻分度表	332
8.8 基于规则的仿人控制	274	附录 E 常用压力表规格及型号	333
8.8.1 仿人比例控制	275	参考文献	334
8.8.2 仿人积分控制	276		
思考题与习题	277		
第 9 章 计算机控制系统	279		
9.1 概述	279		
9.2 直接数字控制 (DDC) 系统	280		
9.2.1 DDC 系统的特点及组成	280		

第 1 章 绪 论

1.1 过程控制的特点

自动化技术在工业、农业、科技以及人们的日常生活中发挥着重要的作用。自 20 世纪 90 年代以来,作为信息科学的重要分支,自动化技术本身及其应用领域得到了迅速的提高和发展。自动化技术作为国家高科技的重要组成部分,其水平高低已成为衡量国家科技实力和各个行业现代化水平的重要标志。

过程控制 (Process Control) 通常是指连续生产过程的自动控制,是自动化技术最重要的组成部分之一。其应用范围覆盖石油、化工、制药、生物、医疗、水利、电力、冶金、轻工、纺织、建材、核能、环境等许多领域,在国民经济中占有极其重要的地位。

过程控制的主要任务是对生产过程中的有关参数(温度、压力、流量、物位、成分、湿度、pH 值和物性等)进行控制,使其保持恒定或按一定规律变化,在保证产品质量和生产安全的前提下,使连续型生产过程自动地进行下去。连续型生产过程的特征是:呈流动状的各种原材料在连续(或间歇)流动过程中,伴随着物理变化、化学反应、生化反应、物质能量的转换与传递。连续型生产过程常常要求苛刻的工艺条件,如要求高温、高压等;现场存在易燃、易爆或有害物泄漏等危险,生产条件恶劣;需要有保护人身与生产设备安全的特别措施等。在大型的连续生产系统中,影响生产过程的因素和条件一般不止一个,各自所起的作用也不同,这就决定了过程控制的复杂性和多样性。大型的连续生产过程是一个十分复杂的大系统,存在不确定性、时变性以及非线性等因素,控制相当困难。实际的生产过程千变万化,要解决生产过程的各种控制问题必须采用有针对性的特殊方法与途径。这就是过程控制要研究和解决的课题。

由于控制对象的特殊性,除了具有一般自动化技术所具有的共性之外,过程控制系统相对于其他控制系统还具有以下特点。

1. 控制对象复杂、控制要求多样

连续生产过程多种多样,规模大小不同,工艺要求各异,生产的产品千差万别,因此过程控制的被控过程(也称被控对象)也多种多样。由于机理不同,不同生产过程的控制参数不同,或参数相同,但要求控制的品质有很大差别;不同过程的参数变化规律各异,参数之间的关联特性、对生产过程的影响也不一样。有些过程的工作机理非常复杂,至今尚未被人们所认识,很难用解析方法得出其精确的动态数学模型;有些生产过程在大型设备中进行,它们的动态特性具有大惯性、大时延的特点,常伴有非线性特性。例如:热工过程中的锅炉、热交换器、动力核反应堆,冶金过程中的平炉、转炉,机械工业中的热处理炉,石油化工中的精馏塔、化学反应器等。而有的生产过程则进行得非常迅速,像压力、流量的变化等。要设计能适应各种过程的通用控制系统是非常困难。由于被控过程(包括被控参数)的多样性,使过程控制系统明显地区别于运动控制系统。

2. 控制方案丰富

生产过程的复杂性和工艺要求的多样性, 决定了过程控制系统的控制方案必然是多样的。为了满足生产过程中越来越高的要求, 控制方案也越来越丰富。既有单变量控制系统, 也有多变量控制系统; 有常规仪表控制系统, 也有计算机集散控制系统; 有提高控制品质的控制系统, 也有实现特殊工艺要求的控制系统; 有传统的 PID 控制, 也有新型的自适应控制、预测控制、推理控制、模糊控制等。这些都说明过程控制的控制方案是十分丰富的。本书将主要介绍单回路控制、前馈控制、串级控制、比值控制、均匀控制、分程控制、选择控制以及集散控制系统, 并简要介绍自适应控制、模糊控制、推理控制等新型的先进控制。

3. 控制多属慢过程参数控制

在流程工业中, 常用一些物理量来表征生产过程是否正常。例如石化、冶金、电力、轻工、建材、制药等生产过程中, 这些物理量多半是以温度、压力、流量、液位、成分等参数表示, 被控过程大多具有大惯性、大滞后等特点, 因此, 过程控制具有慢过程参数控制的特点。

4. 定值控制是过程控制的一种主要控制形式

过程控制不同于航空器的姿态控制和机器人的动作控制, 在多数过程控制系统中, 其设定值是保持恒定的或在很小范围内变化, 过程控制系统的主要目的是减小或消除外界扰动对被控参数的影响, 使被控参数维持在设定值或其附近, 达到优质、高产、低消耗与生产持续稳定的目标。所以, 定值控制是过程控制的一种主要控制形式。

5. 过程控制系统由规范化的过程检测控制仪表组成

过程控制通过采用各种检测、控制仪表和计算机等自动化技术工具, 对整个生产过程进行自动检测和控制。传统的简单过程控制系统是由被控过程和过程检测控制仪表(包括测量元件、变送器、调节器和执行器)两部分组成。图 1-1 是传统过程控制系统框图。从图中可以看出, 组成一个完整的过程控制系统一般有调节器(在本书中调节器与控制器含义相同)、执行器、被控过程和测量变送器四个环节, 其中调节器、执行器和测量变送器都属于检测控制仪表, 所以, 也可以认为

过程控制系统 = 检测和控制仪表 + 被控过程

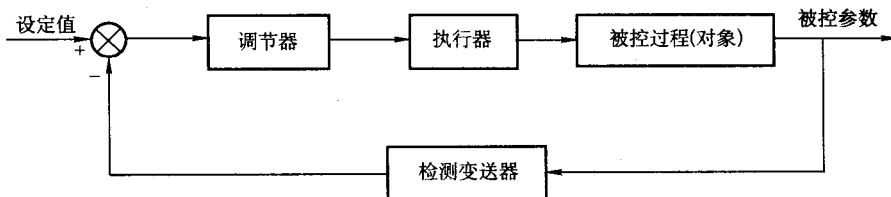


图 1-1 过程控制系统框图

随着过程控制技术的发展, 在先进的过程控制系统(如集散控制系统)中, 图 1-1 中的传统的调节器已被 DDC (Direct Digital Control) 控制器或计算机控制系统替代。

1.2 过程控制的发展概况

19 世纪世界工业革命以来, 工业生产过程经过了由简单到复杂、规模由小到大的不断

发展,出现了许多大型化、现代化、多品种、精细化的过程生产系统,提供各种产品以满足人们的生活需要。由于生产领域的不断扩展、系统规模不断扩大、工艺要求越来越高,对过程控制的功能、效率和可靠性提出了更高的要求,如果没有高性能的过程控制系统,则大型的生产过程根本无法正常运行。

过程控制技术是自动化技术的重要应用领域。随着生产技术水平迅速提高与生产规模的持续扩大,对过程控制系统的要求越来越高,促使过程控制理论研究不断发展,同时,理论研究的成果在电子技术、计算机技术的基础上不断地转化为自动化产品与系统,以满足生产过程不断发展的需要。生产实际问题、控制理论研究和控制系统产品的开发三者相互促进、共同推动着现代过程控制技术的迅速发展。现代过程控制技术在优化生产系统的经济、技术指标、提高经济效益和劳动生产率、改善劳动条件、保护生态环境等方面发挥着越来越大的作用。

下面从过程控制仪表、装置及系统与过程控制策略及算法两个方面简要介绍过程控制的发展过程和发展趋势。

1.2.1 过程控制装置与系统的发展

20世纪40年代以前,工业生产技术水平相对落后,生产过程大多处于手工操作状态,操作工通过目测判断生产过程的状态,手动调整生产过程,生产效率很低。40年代以来,特别是第二次世界大战以后,工业生产过程自动化技术发展很快,尤其是近些年来,在IT技术(自动化技术也是IT技术的组成部分)的带动下,过程控制技术发展十分迅猛。过程控制装置与系统的发展历程,大致经过以下几个阶段。

1. 局部自动化阶段(20世纪50~60年代)

20世纪50年代,过程控制技术开始得到发展。在这一阶段,过程控制系统绝大多数是单输入—单输出系统;被控参数主要有温度、压力、流量和物位四种参数;控制的目的是保持这些工艺参数的稳定,确保生产安全。当时的生产规模比较小,多用气动仪表进行测量与控制,采用0.02~0.1MPa的气动信号作为统一标准信号,压缩空气为动力的气动仪表实现就地的简单控制,主要解决在生产过程较为正常的情况下,为满足工艺要求的参数而进行的定值控制问题。大多数测量仪表分散在各生产单元工艺设备上,操作人员在生产现场查看仪表及采取相应的操作。

20世纪50年代后期~60年代,先后出现了气动和电动单元组合仪表,采用了集中监控与集中操作的控制系统,实现了工厂仪表化和局部自动化。这对当时迫切希望提高设备效率和扩大生产过程规模的要求起到了有力的促进作用,适应了工业生产设备日益大型化与连续化的客观需要。

2. 集中控制阶段(20世纪60~70年代)

20世纪60年代,工业生产规模不断扩大,生产过程越来越复杂、产品质量要求越来越高,对过程控制技术提出了新的要求,迫切需要生产过程集中控制与管理。

随着电子技术的迅速发展,半导体产品取代了电子真空管。随后,集成电路取代了分立元件,电子仪表的可靠性大为提高,逐步替代了气动仪表。过程控制系统大量采用单元组合仪表和组装式仪表,生产过程实现了车间范围和大型系统的集中监控。为了提高控制质量和满足特殊工艺的控制要求,开发使用了多种复杂控制系统方案,如串级控制、前馈控制、比

值控制、均匀控制等。特别是前馈控制、选择控制的实现,使过程控制品质、安全性大为提高。前馈控制使控制质量显著提高;选择控制自动实现保护性自动控制,以避免强制性连锁停车,改变了过去不得不切向手动或被迫连锁停车的状况,从而扩大了自动化的范围。与此同时,计算机开始在过程控制领域应用。

3. 集散控制阶段(20世纪70年代中期至今)

20世纪70年代,随着大规模集成电路出现及微处理器的问世,计算机的性价比和可靠性大为提高,采用冗余技术和自诊断措施的工业计算机完全满足工业控制对可靠性的要求,为新的过程控制仪表、装置与系统的设计开发提供了强有力的支持。

大型生产过程一般都是分散系统,使生产过程控制分散进行(将发生故障和危险的风险分散)、整个生产过程的监视、操作与管理相对集中的设计思想被大型过程控制系统生产商和用户普遍接受。基于“集中管理,分散控制”理念,在数字化仪表和计算机与网络技术基础上开发的集散型控制系统(DCS, Distributed Control System)在大型生产过程控制中得到广泛应用,使过程控制系统的控制功能、可靠性、安全性、可操作性以及经济效益等方面都达到了新水平。过程控制系统的结构也由单变量控制系统发展到多变量系统,由生产过程的定值控制发展到最优控制、自适应控制等。

进入20世纪90年代以后,随着测量仪表数字化、通信系统网络化和集散型控制技术日益成熟、现场总线技术以及基于现场总线技术的网络化分布式控制系统逐步推广、使用,使过程控制系统的开放性、兼容性和现场仪表与装置的智能化水平发生了质的飞跃。工厂自动化(FA, Factory Automation)、计算机集成过程控制(CIPS, Computer Integrated Process Systems)、计算机集成制造系统(CIMS, Computer Integrated Manufacturing System)和企业资源综合规划(ERP, Enterprise Resource Planning)等方案的规划和实施,正在成为提高工业生产过程经济效益的关键手段。

1.2.2 过程控制策略与算法的发展

在过程控制技术的发展中,控制策略与算法也经历了由简单控制到复杂控制、先进控制的发展历程。通常将出现于1942年的单回路PID(Proportional, Integral and Derivative)控制称为简单控制。以经典控制理论为基础的PID控制过程控制应用最多的控制规律,现在仍然在各种过程控制系统广泛应用。在DCS以及以逻辑控制为主的大型PLC(Programmable Logic Control)系统中,均设有PID控制模块。

从20世纪50年代开始,为了满足生产过程大型化、工艺更为复杂、控制精度要求更高的实际需求,过程控制界发展了串级控制、比值控制、前馈控制、均匀控制、Smith预估控制和选择性控制等控制策略与算法,统称为复杂控制。这些控制策略和算法满足了复杂生产过程控制的实际需要,其理论基础仍然是经典控制理论,但在结构与应用方面各有特色。这些控制策略和算法现在仍在广泛应用,并得到不断地改进、完善与发展。

从20世纪70~80年代开始,在现代控制理论和人工智能发展的基础上,针对生产过程本身存在非线性、时变性、不确定性、控制变量间的耦合性等特性,提出了许多可行的控制策略与方法,如解耦控制、推断控制、预测控制、模糊控制、自适应控制、仿人控制等,一般将这些控制方法统称为先进控制。近年来,以专家系统、模糊逻辑、神经网络、遗传算法等为主要途径的基于知识的智能处理方法已经成为过程控制的重要技术。先进过程控制方法

可以有效地解决那些采用传统控制效果差,甚至无法控制的复杂过程的自动控制问题。应用实践表明,先进控制方法能取得更高的控制品质和更好的经济效益,具有很好的应用与发展前景。

1.3 过程控制系统分类及其性能指标

1.3.1 过程控制系统的分类

鉴于控制过程复杂多样、过程控制方案种类丰富,过程控制系统有多种分类方法。按所控制的参数来分,有温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统等;按控制系统所处理的信号方式来分,有模拟控制系统与数字控制系统;按照控制器类型来分,有常规仪表控制系统与计算机控制系统,而计算机控制系统还可分为 DDC、DCS 和现场总线控制系统(FCS);按控制系统的结构和所完成的功能来分,有串级控制系统、均匀控制系统、自适应控制系统等;按其控制动作规律来分,有比例(P)控制、比例积分(PI)控制,比例、积分、微分(PID)控制系统等;按控制系统组成回路的情况来分,有单回路与多回路控制系统、开环与闭环控制系统;按被控参数的数量可分为单变量和多变量控制系统等。

以上的分类方法只反映了过程控制某一方面的特点,到底采用那种分类方法并无原则性的规定。下面介绍两种常用的分类方法。

1. 按设定值的形式不同划分

过程控制主要是研究反馈控制系统的动态特性。按照设定值变化形式的不同,可将过程控制系统分为三类。

(1) 定值控制系统 定值控制系统是过程控制中最常见的一种控制系统。在工业生产过程中,大多数场合要求被控参数保持恒定或在设定值附近小范围内,以保持生产过程平稳进行。只要被控参数在设定值范围内波动,生产过程及控制系统的工作就是正常的。在定值控制系统中设定值是恒定不变的,引起系统被控参数变化的就是扰动信号。

(2) 随动控制系统 在有些生产过程中,要求被控参数是变化的,即控制系统的设定值是变化的。随动控制系统就是使被控参数准确而及时地跟随设定值的变化而变化。例如在加热炉燃料与空气的混合比控制中,燃料量按工艺要求、随生产负荷变化或其他因素的干扰而改变;在燃料量变化时,控制系统就要使助燃空气的输送量跟随燃料量的变化,按预先规定的比例自动地增减空气量,以保证燃料的经济燃烧,这就是随动控制系统。

(3) 程序控制系统 在程序控制系统中,被控参数的设定值按预定的时间程序变化,被控参数自动跟踪设定值。这类系统在间歇生产过程中比较常见,如食品工业中的罐头杀菌温度控制、造纸中制浆蒸煮的温度控制、机械工业中的退火炉温度控制以及工业炉、干燥窑等周期作业的加热设备控制等。在这类生产过程中,不是要求温度为恒定值,而是按工艺规程规定、随时间变化的函数,如具有一定的升温时间、保温时间和降温时间等。程序控制系统的设定值按程序自动改变,系统按设定程序自动运行,直到整个程序运行完为止。

2. 按系统的结构特点分类

(1) 反馈控制系统 反馈控制系统是按照被控参数与设定值的偏差进行调节,达到减小或消除偏差的目的,偏差值是系统调节的依据。反馈控制系统由被控参数的反馈通道构成闭

合回路，所以又称闭环控制系统。反馈控制系统是过程控制系统最基本的结构形式。

(2) 前馈控制系统 前馈控制系统根据扰动大小进行控制，扰动是控制的依据。前馈控制没有被控参数的反馈，也称为开环控制系统。由于这种控制方法最终无法检查控制的效果，所以在实际生产中往往与其他控制方法组合使用，很少单独应用。

(3) 前馈—反馈复合控制系统 前馈—反馈控制系统是将前馈控制与反馈控制结合在一起构成的复合控制系统。复合控制系统综合了前馈控制对特定扰动及时进行补偿的优势，又保持了反馈控制能够克服多种扰动对被控参数的影响、使被控参数在稳态时能准确稳定在设定值的特点。复合控制系统综合利用了前馈控制与反馈控制各自的优点，可以显著提高系统的控制品质。

1.3.2 过程控制系统的性能指标

在实际生产过程中，对工艺参数都有一定要求。有些工艺参数直接表征生产过程，对产品的产量和质量起着决定性的作用，如在分馏过程中，在操作压力不变的情况下，精馏塔的塔顶或塔底温度必须保持一定，才能得到合格的产品；在冶金生产中，加热炉出口温度的波动不能超出允许范围，否则将影响后一工序的加工效果；在化工生产中，化学反应器的反应温度必须保持平稳，才能使反应效率与质量达到规定指标。有些工艺参数虽不直接影响产品的数量和质量，而保持其平稳却是使生产过程顺利进行的前提。例如，中间储槽的液位高度维持在允许的范围之内，才能使压力稳定，保持连续的均衡生产。有些工艺参数是决定安全生产的重要因素，如受压容器的压力不允许超出规定的限度，否则将危及设备及人员安全。因此在生产过程中，对于以上各种类型的参数都必须进行严格的控制。

1.3.2.1 稳态与动态

控制系统在正常的运行中有两种状态，即稳态和动态。

对于定值控制，当控制系统输入（设定值和扰动）不变时，整个系统若能达到一种平衡状态，系统中各个组成环节暂时不动作，它们的输出信号都处于相对静止状态，这种状态称为稳态（或静态）。例如在锅炉汽包液位控制系统中，当给水量与出汽量平衡时，液位保持不变，此时系统达到（动态）平衡，亦即处于静态。这里所说的静态是指各个参数的变化率为零，即参数保持常数不变，并非指系统内没有物料与能量的流动。稳态时控制过程被控参数与控制变量之间的关系称为静态特性。

定值控制系统的目的就是将控制参数保持在一个不变的设定值上，只有当进入被控过程的物料或能量与流出的物料或能量完全相等时才有可能。对液位控制系统，只有流入容器的液体流量与流出容器的液体流量完全相等——达到平衡时，液位才可能恒定，使液位控制系统处于静态；对于温度控制系统，只有当进入被控过程的热量与输出的热量相等时，被控过程内部的热量达到平衡，被控过程的温度才可能恒定，使温度控制系统处于稳态。

当原先处于稳态（平衡状态）的系统出现外部扰动时，平衡状态遭到破坏，被控参数就会发生变化，偏离原来的稳态值。在控制器的作用下，执行器等自动控制装置就会离开静态位置，产生相应的控制作用以克服扰动的影响，使系统趋于新的平衡。如果控制系统是稳定的，经过一段时间的调节后，被控参数会重新回到原设定值（或其附近），系统又回复到稳态。从外部扰动出现、平衡状态遭到破坏、自动控制装置开始动作，到整个系统又建立新的稳态（达到新的平衡）、调节过程结束的这一段时间，整个系统各个环节的状态和参数都处

于变化的过程之中,这种状态称为动态。另外,在系统设定值变化时,也引起动态过程,控制装置同样使被控参数建立新的平衡。由于被控过程常常受到各种扰动的影响,一个实际运行的生产过程不可能一直工作在稳态,控制系统的目的就是要使进入动态的生产过程尽快地回复到稳态。系统在动态过程中,被控参数与控制变量之间的关系即为控制过程的动态特性。

显然,要评价一个过程控制系统的控制品质,只考察稳态是不够的,还应该考查它在动态过程中被控参数的变化情况。对动态特性的了解与掌握更重要,这是因为在实际的生产过程中,被控过程常常受到各种扰动的影响,不可能一直工作在稳态。只有将控制系统研究与分析的重点放在各个环节的动态特性,才能设计出良好的控制系统。

由于设定值的特点不同,随动控制系统稳态和动态的含义与定值控制系统是不一样的。

1.3.2.2 控制系统的过渡过程

系统从原来的平衡状态,经过动态过程到达新的平衡状态的动态历程称为控制系统的过渡过程。

对于一个稳定的控制系统(所有正常工作的反馈控制系统都是稳定系统),要分析其稳定性、准确性和快速性,就需要对系统的过渡过程进行分析研究。被控参数随时间的变化主要取决于扰动的形式和控制系统的动态特性,而实际生产过程中出现的扰动信号没有固定的形式,大多数属于随机性的信号。为了简化分析,在保证系统安全的条件下,只对一些典型的扰动形式引起的过渡过程进行分析,其中最常用的是阶跃输入。所谓阶跃输入就是在某一时刻,输入变量突然以阶跃式变化加到系统上,并保持在这个幅度不变。阶跃扰动对系统来讲是比较严重的情况,是一种突然而且剧烈的扰动,对系统被控参数的影响大。如果控制系统的被控参数对阶跃扰动有比较好的动态响应特性,或能够及时、有效地克服阶跃扰动的影响,对于其他比较缓和的扰动一般也能满足要求。而且阶跃输入形式简单、容易产生,便于分析、计算和进行实验。

在阶跃输入的扰动作用下,定值控制系统过渡过程有如图 1-2 所示的几种基本形式。

(1) 单调衰减过程 系统受到扰动后,被控参数从设定值一侧单调的变化,最后稳定在某一数值上,如图 1-2a 所示。

(2) 振荡衰减过程 系统受到扰动后,被控参数波动变化,波动幅度逐渐减小,最后稳定在某一数值上,如图 1-2b 所示。

(3) 等幅振荡过程 系统受到扰动后,被控参数波动变化,波动幅度保持不变,如图 1-2c 所示。

(4) 振荡发散过程 系统受到扰动后,被控参数波动变化,波动幅度不断增大,没有最后的稳态值,如图 1-2d 所示。

按照系统的稳定性,可将上面四种形式的过渡过程归纳为三类。

第一类是稳定系统的过渡过程,包括单调衰减过程(图 1-2a 所示)和振荡衰减过程(图 1-2c 所示)两种情况。稳定系统的被控参数偏离设定值后,在控制环节的作用下,经过一段时间的调整后,被控参数逐渐回到原来的设定值或其附近,重新进入稳态。

第二类是不稳定系统的过渡过程,即图 1-2d 所示的振荡发散过程。不稳定系统的被控参数偏离设定值后,系统的控制作用并不能使被控参数回到原来的设定值,反而远离设定

值。这将导致工艺参数超越允许范围，生产过程状况恶化，严重时会导致重大的事故甚至设备的损坏。这是生产上绝对不允许的，应尽力避免。

第三类是临界稳定系统的过渡过程，即图 1-2c 所示的等幅振荡过程。临界稳定系统的过渡过程形式介于稳定与不稳定之间的临界状态，一般工程上也认为是不稳定的过渡过程，工程实际中不能采用。

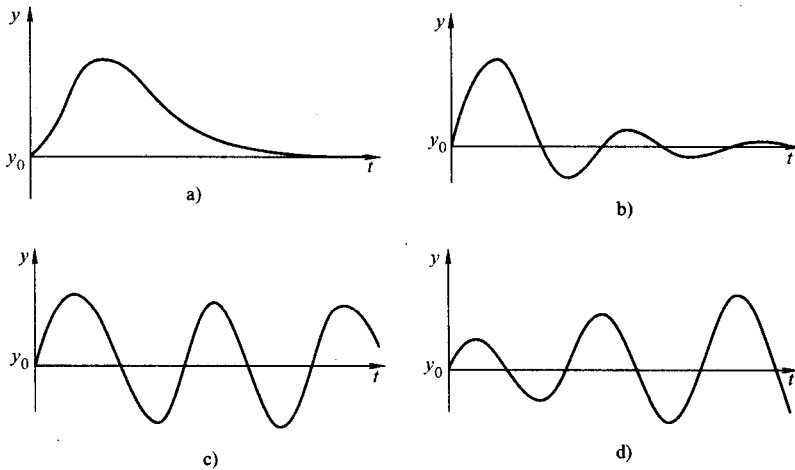


图 1-2 过渡过程的基本形式

a) 非周期衰减过程 b) 衰减振荡过程 c) 等幅振荡过程 d) 振荡发散过程

1.3.2.3 控制系统的性能指标

在比较不同控制方案、评价一个控制系统的性能或在讨论控制器参数的最佳整定时，首先要规定评价控制系统优劣的性能指标。评价一个过程控制系统的性能，主要看它在受到扰动影响偏离设定值后，被控参数能否迅速、准确且平稳（而不是剧烈振荡地）回到设定值；或者设定值发生变化后，被控参数能否迅速、准确且平稳地到达并稳定在新的设定值或其附近，即系统克服扰动造成的偏差而回到设定值的快速性、准确性和平稳性如何。控制性能指标有单项性能指标和偏差积分性能指标两类。单项性能指标以控制系统被控参数的单项特征量作为性能指标，主要用于衰减振荡过程的性能评价；而偏差积分性能指标则是一种综合性指标。

1. 系统阶跃响应的单项性能指标

在工业过程控制中经常采用时域单项性能指标，并以阶跃扰动作用下的过渡过程为基准来定义系统的性能指标。外部扰动阶跃变化时被控参数响应曲线与设定值阶跃变化时的特征是相同的（这是因为二者传递函数的分母多项式，即控制系统的特征方程是相同的），通常采用设定值阶跃变化时被控参数响应的典型曲线（如图 1-3 所示）来定义控制系统的单项性能指标，主要有衰减比、超调量与最大动态偏差、静差、调节时间、振荡频率、上升时间和峰值时间等。

(1) 衰减比 n 和衰减率 ψ 衰减比 n 表示振荡过程衰减的程度，是衡量过渡过程稳定程度的动态指标，它等于两个相邻的同向波峰值之比（见图 1-3）

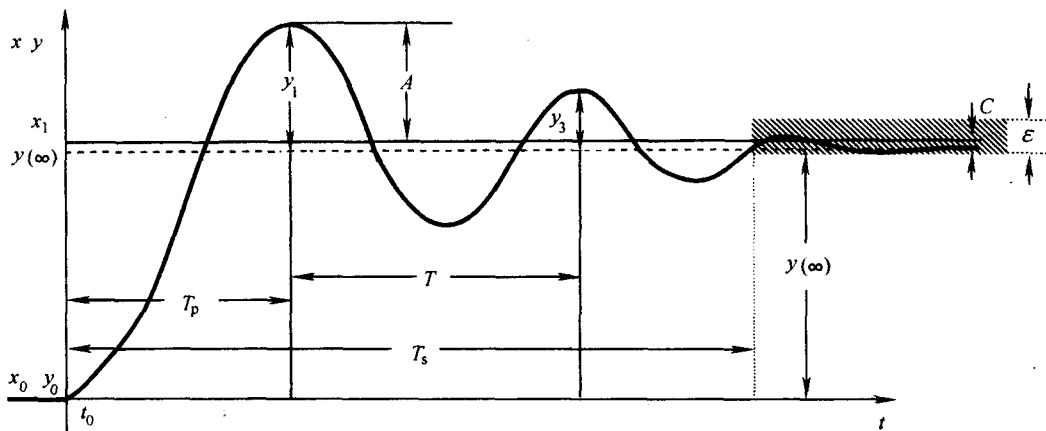


图 1-3 闭环控制系统对设定值阶跃扰动响应曲线

$$n = \frac{y_1}{y_3} \quad (1-1)$$

式中, n 取整数。衰减比习惯上常表示为 $n:1$ 。若 $n < 1$, 表示过渡过程为发散振荡, n 越大, 发散越快; $n = 1$, 过渡过程为等幅振荡; $n > 1$, 过渡过程是衰减振荡, n 越大, 衰减越快; 当 $n \rightarrow \infty$ 时, 系统过渡过程为非周期衰减过程。衰减比究竟为多大才合适, 没有统一的定论。根据实际经验, 为保持足够的稳定裕度, 一般希望过渡过程经过两次左右的波动后趋于新的稳态值, 与此对应的衰减比一般在 $4:1 \sim 10:1$ 的范围内。对于少数不希望有振荡的控制过程, 过渡过程需要采用非周期衰减的形式。

衰减率 ψ 是与衰减比 n 等价的衡量振荡过程衰减程度的另一个动态指标, 它是指经过一个周期后, 波峰幅度衰减的百分数

$$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = 1 - \frac{y_3}{y_1} = 1 - \frac{1}{n} \quad (1-2)$$

衰减比 n 与衰减率 ψ 之间有简单的对应关系, $n = 4:1$ 就相当于 $\psi = 0.75$ 。在过程控制中一般要求衰减比 n 在 $4:1 \sim 10:1$ 之间, 对应的衰减率 ψ 为 $75\% \sim 90\%$ 。

(2) 最大动态偏差 A 和超调量 σ 最大动态偏差或超调量是描述被控参数偏离设定值的最大程度。最大动态偏差是控制系统动态准确性的指标, 也是衡量过渡过程稳定性的动态指标。对于定值控制系统, 过渡过程的最大动态偏差是指被控参数偏离设定值的最大值, 见图 1-3 中的 A 。有时也采用超调量 σ 来表示最大动态偏差偏离设定值 (或新稳值) 的程度, σ 的定义是第一个波峰值 y_1 与最终稳态值 $y(\infty)$ 之比。一般超调量以百分数的形式给出, 即

$$\sigma = \frac{y_1}{y(\infty)} \times 100\% \quad (1-3)$$

最大动态偏差或超调量越大, 被控参数瞬时偏离设定值越远。对于工艺要求较高的生产过程, 需要限制最大动态偏差的允许值; 考虑到扰动会不断出现, 偏差有可能叠加, 这就更需要限制最大动态偏差的允许值。因此, 必须根据工艺条件严格确定最大偏差或超调量的允许范围。

(3) 残余偏差 C 过渡过程结束后, 被控参数所达到的新稳态值 $y(\infty)$ 与设定值之间

的偏差 C 称为残余偏差, 简称残差, 是控制系统稳态准确性的衡量指标, 其容许范围 ϵ 相当于生产中允许的被控参数与设定值之间长期存在的偏差。残余偏差也称静差或余差。设定值是生产过程的技术指标, 被控参数越接近设定值越好, 亦即残差越小越好。但在实际生产中, 也并不是要求所有被控参数的余差都很小, 如一般储槽的液位控制要求不高, 允许液位有较大的变化范围, 残差就可以大一些。而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。对残差大小的要求, 必须结合具体系统分析, 不能一概而论。有余差的控制过程称为有差调节, 相应的控制系统称为有差控制系统。没有残差的控制过程称为无差调节, 相应的控制系统称为无差控制系统。

(4) 调节时间 T_s 和振荡频率 ω 调节时间是指从过渡过程开始到过渡过程结束所需的时间, 理论上它应该为无限长。当被控参数与稳态值的偏差(绝对值)进入稳态值的 $\pm 5\%$ (有时要求 $\pm 2\%$) 范围内, 就认为过渡过程结束。调节时间是从扰动出现到被控参数进入新稳态值 $\pm 5\%$ ($\pm 2\%$) 范围内的这段时间, 在图 1-3 中用 T_s 表示。调节时间是衡量控制系统快速性的指标。过渡过程中相邻两同向波峰(或波谷)之间的时间间隔叫振荡周期或工作周期, 在图 1-3 中用 T 表示, 其倒数称为振荡频率(记为 $f = 1/T$, 对应的角频率 $\omega = 2\pi/T$)。在衰减率 ψ 一定的情况下, 调节时间与振荡频率之间存在严格的对应关系: 振荡频率与调节时间成反比, 振荡频率越高, 调节时间 T_s 越短。因此振荡频率也可作为衡量控制系统快速性的指标。

还有其他一些单项品质指标, 如振荡次数, 是指在过渡过程内被控参数振荡的次数, 在一般情况下过渡过程振荡两次就能稳定下来是较为理想的; 峰值时间是指过渡过程开始至被控参数到达第一个波峰所需要的时间, 在图 1-3 中用 T_p 表示。

过渡过程的最大偏差、衰减比、余差、调节时间等单项指标在不同系统中的重要性是不同的, 各个单项指标相互之间既有联系又有矛盾。当一个系统的稳态精度要求很高时, 可能会引起动态不稳定; 解决了稳定问题之后, 又可能因反应迟钝而失去快速性。在实际工程中, 对于不同的控制系统, 每个性能指标的重要性不同, 应根据具体情况分清主次, 区别对待。对生产过程有决定性意义的主要品质指标应优先予以保证, 但要高标准地满足几个控制指标有时难以做到。对一个控制系统提出的品质要求或评价一个控制系统的质量, 应该从实际需要出发, 性能指标要求合理适当, 不应过分偏高、偏严, 否则就会造成人力物力的巨大浪费, 甚至根本无法实现。

2. 系统阶跃响应的综合性能指标——偏差积分

单项指标虽然清晰明了, 但如何统筹考虑比较困难。有时希望用一个综合性的指标全面反映控制系统的品质。综合性能指标常采用偏差积分的形式, 偏差幅度和偏差存在的时间都与偏差积分指标有关。无论是控制系统过渡过程的动态偏差增大, 或是调节时间拖长, 都表明控制品质变差, 在偏差积分指标上的综合反映就是偏差积分指标值增大。因此, 偏差积分指标可以兼顾衰减比、超调量、调节时间等方面的因素, 偏差积分指标值越小越好。偏差积分指标通常采用以下几种形式。

(1) 偏差积分 IE (Integral of Error)

$$IE = \int_0^{\infty} e(t) dt$$

(2) 绝对偏差积分 IAE (Integral Absolute value of Error)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt$$