

焦小澄 朱张青 编著

Industrial Process Control

工业过程控制



清华大学出版社

Industrial Process Control

工业过程控制

焦小澄 朱张青 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面地介绍了工业过程控制的理论和应用,及典型工业过程控制系统的结构和原理。全书共分12章,前6章包括工业过程控制的介绍、模型和设计;第7章介绍了先进控制方法及其在工业过程控制中的应用;第8~10章介绍了典型的工业过程控制系统;第11章从控制角度介绍化学过程控制方案的设计;第12章介绍了工业过程控制系统中极为重要的防火防爆技术,以及系统的防干扰和防雷击措施。

本书不仅强调控制理论的介绍,更加注重对实际工业过程控制系统的分析,十分贴近生产实际。本书可作为高等院校自动化专业的教材,也可供该领域的研究人员和工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

工业过程控制/焦小澄,朱张青编著.--北京:清华大学出版社,2011.12
ISBN 978-7-302-26361-6

I. ①工… II. ①焦… ②朱… III. ①工业—过程控制 IV. ①TB114.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 156924 号

责任编辑:张占奎 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:25.5 字 数:615 千字

版 次:2011 年 12 月第 1 版 印 次:2011 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.80 元

产品编号:037025-01



FOREWORD

工业过程控制是指对诸如石油化工、电力等流程性工业部门生产过程的自动化。与其他自动控制系统比较,工业过程控制系统具有以下几个主要特点。

(1) 过程控制系统由检测、变送、运算、执行等部分组成,并且有气动、电动之分。

(2) 控制对象复杂,大都具有非线性、时变、时滞等特点。

(3) 生产过程中一般具有各种不确定性,难以获得系统精确的数学模型。

(4) 控制方案具有多样性,同一类型的被控过程,根据控制指标、经济成本、扰动因素等不同,有不同的控制方案。

(5) 其常用形式是定值控制。温度、压力、流量、物位及成分为最典型的被控变量,控制目的是克服扰动和负荷变化,使这些过程变量能够长期稳定在所需的设定值。

本书共分 12 章,主要内容安排如下。

第 1 章 工业过程控制的发展和趋势。简单介绍工业过程控制理论和技术的发展过程及未来发展趋势。

第 2 章 化工控制工艺图。介绍带控制点工艺图的画法,设备、管道等图形符号,设备、仪表位号定义等基础性知识。

第 3 章 执行器。介绍不同调节阀的类型、特性和选用原则。

第 4 章 传感器与变送器。介绍常见传感器的类型及其工作原理、变送器的概念和原理。

第 5 章 工业过程模型。介绍简单对象的数学模型和简化数学模型,以及常用的实验建模方法。

第 6 章 过程控制系统设计。分析了单回路和复杂工业过程控制系统设计的一般方法和理论。

第 7 章 先进控制系统。结合现代控制理论,介绍了工业生产过程中常用和可能将采用的一些典型的先进控制方法。

第 8 章 流体输送设备控制。分析不同类型泵和风机的特性与控制。

第 9 章 换热设备控制。介绍不同的换热器、加热炉和锅炉控制方案。

第 10 章 精馏过程控制。精馏是过程生产工业中最典型的工艺过程之一,本章专门介绍精馏过程控制的各种不同的控制方案。

第 11 章 化学反应过程控制。从控制角度介绍化学反应的特性和控制方案的设计,并

以合成氨生产过程为例介绍化学反应过程。

第 12 章 系统安全保护。由于石化、化工生产大都具有易燃、易爆、易污染和有毒等特点,本章介绍控制系统防火防爆技术,以及系统的防干扰和防雷击措施。

本书是根据南京大学自动化专业本科教育计划安排,由作者多年来的教学建议改编而成,可作为自动化专业本科教材和工程技术人员的参考阅读材料。建议在学时根据实际需求,授课课时安排为 48 学时。

由于工业生产过程大都是流程长、生产工艺复杂、控制要求高的大规模生产过程,内容较多,在编写时,编者已根据工程经验进行了一些增删。但由于编者水平有限,书中难免会出现疏漏、不当,甚至错误之处,敬请广大读者批评指正!

焦小澄, 朱张青
2011 年 8 月于南京大学

目录

CONTENTS

第 1 章 工业过程控制的发展和趋势	1
1.1 工业过程自动化的发展	1
1.2 计算机控制技术的发展	3
习题	8
第 2 章 化工控制工艺图	9
2.1 工艺流程图	9
2.1.1 工艺方案流程图	9
2.1.2 工艺施工流程图	10
2.2 仪表位号	15
2.2.1 仪表位号的表示方式	15
2.2.2 仪表编号	21
2.2.3 工艺流程图中仪表位号标注	21
习题	21
第 3 章 执行器	22
3.1 执行器的分类及特性	22
3.2 阀门特性	25
3.2.1 调节阀的基本结构	25
3.2.2 调节阀的理想流量特性	25
3.2.3 调节阀的选择	30
3.3 电动执行器(调节阀)	31
3.4 气动执行器与电-气变换器	32
3.4.1 气动执行器的结构和原理	32
3.4.2 气动执行机构分析	33
3.4.3 电-气变换器	33
3.4.4 电动阀门定位器	34

3.4.5 气动阀门定位器	35
3.4.6 阀门定位器的主要部件	35
3.4.7 阀门定位器的传递函数	38
3.4.8 阀门定位器的主要特性	39
3.4.9 阀门定位器的选择	39
习题	40
第4章 传感器与变送器	41
4.1 基本概念	42
4.2 传感器和一次变换输出信号的特点	44
4.2.1 工业热电阻	45
4.2.2 热电偶	47
4.2.3 应变式压力传感器	53
4.2.4 电感式压力传感器	53
4.2.5 电容式压力传感器	54
4.2.6 电容式液位传感器	55
4.3 变送器	55
4.3.1 三运放精密差动放大电路	56
4.3.2 变送器的原理	58
4.4 数字线性化简介	75
习题	77
附录1 工业热电阻分度表	77
附录2 工业标准热电偶数学模型系数表	78
附录3 K型热电偶参考数学模型及系数表	82
第5章 工业过程模型	84
5.1 自动控制系统的组成	84
5.1.1 控制性能指标	87
5.1.2 控制方案确定	88
5.1.3 系统控制设计	88
5.1.4 工程设计	89
5.1.5 控制系统调试和运行时的若干问题	89
5.2 简单化工系统的数学模型	90
5.2.1 三大守恒定律	90
5.2.2 简单对象的数学模型	91
5.2.3 无自平衡能力的单容对象的特性	94
5.2.4 多容过程模型	94
5.2.5 不可压缩流体流动模型	96
5.2.6 简单热交换模型	97

5.2.7 管式反应器热平衡模型	98
5.3 理想精馏塔模型	98
5.4 工程建模	102
5.4.1 阶跃响应的获取	103
5.4.2 根据阶跃响应确定近似传递函数	105
5.4.3 频率域测试法	108
5.4.4 测定动态特性的统计相关法	110
习题	116
第 6 章 过程控制系统设计	118
6.1 单回路控制系统设计	118
6.1.1 被控变量的选择	119
6.1.2 测量反馈	119
6.1.3 控制变量的选择	121
6.1.4 执行器(调节阀)的选择	127
6.1.5 调节器正、反作用的确定	128
6.1.6 工业过程常用调节器类型	128
6.1.7 单回路控制系统分析	130
6.2 单回路控制系统调节器参数的整定与投运	132
6.2.1 工程整定法	133
6.2.2 单回路控制系统的投运	136
6.3 常用数字 PID 控制算法	136
6.3.1 数字式 PID 控制算式	136
6.3.2 PID 控制算式的改进	137
6.3.3 数字 PID 控制算法的改进	140
6.4 数字滤波	142
6.5 复杂控制系统	144
6.5.1 串级控制系统	145
6.5.2 前馈控制系统	149
6.6 大时延系统控制	155
6.6.1 微分先行控制方案	156
6.6.2 Smith 预估控制方案	157
6.7 比值控制系统	158
6.7.1 常用比值控制系统类型	158
6.7.2 比值控制系统设计	161
6.8 分程控制系统	164
6.8.1 分程控制系统设计	165
6.8.2 分程控制的目的	167
6.9 均匀控制系统	168

6.9.1 均匀控制的概念	168
6.9.2 均匀控制系统的结构形式	170
6.9.3 调节器的参数整定	174
习题	175
第7章 先进控制系统	179
7.1 关联系统与解耦控制	179
7.1.1 关联系统分类	179
7.1.2 关联系统的稳定性分析	180
7.1.3 关联调节器的整定	182
7.1.4 系统关联分析举例	182
7.1.5 系统耦合分析	185
7.1.6 控制回路的选择原则	191
7.1.7 解耦控制设计	195
7.2 内模控制与模型预测控制	198
7.2.1 内模控制	198
7.2.2 模型预测控制	200
7.2.3 几种常见的模型预测控制算法	201
7.3 自适应控制系统	206
7.4 模糊控制系统	216
7.4.1 模糊集合的基本概念	216
7.4.2 模糊集合的基本运算	218
7.4.3 模糊集合运算的基本性质	219
7.4.4 模糊关系与模糊推理	219
7.4.5 模糊控制系统设计	226
7.4.6 模糊控制系统的应用	230
7.5 其他先进控制技术	231
7.5.1 软测量技术	231
7.5.2 故障检测与诊断	235
7.5.3 智能控制	236
习题	238
第8章 流体输送设备控制	241
8.1 液体输送设备的控制	241
8.1.1 离心泵控制	242
8.1.2 容积式泵控制	245
8.2 压缩机的控制	247
8.2.1 往复式压缩机	247
8.2.2 回转式压缩机	248

8.2.3 离心式压缩机	249
8.3 离心式压缩机的防喘振控制	250
8.3.1 离心式压缩机的特性曲线与喘振	250
8.3.2 引起喘振的因素	252
8.3.3 喘振的极限线方程及安全操作线	252
习题	255
第9章 换热设备控制	257
9.1 换热设备的结构类型	257
9.1.1 热量传递的三种方式	258
9.1.2 传热设备的动态特点	260
9.2 传热对象的数学模型	261
9.2.1 传热对象的静态数学模型	261
9.2.2 换热对象的动态数学模型	264
9.3 换热器控制	266
9.4 加热炉控制	269
9.4.1 加热炉温度单回路控制系统	270
9.4.2 加热炉的串级控制及前馈-反馈控制方案	271
9.4.3 加热炉安全连锁保护系统	272
9.5 锅炉设备的自动控制	273
9.6 锅炉燃烧控制系统	280
9.6.1 蒸汽压力和燃油-空气比值控制系统	281
9.6.2 炉膛负压控制系统	281
9.6.3 过热蒸汽温度控制系统	282
习题	282
第10章 精馏过程控制	284
10.1 精馏过程控制的目标	284
10.1.1 精馏塔的控制目标	285
10.1.2 精馏塔质量指标的选取	287
10.2 精馏塔的基本控制方案	290
10.2.1 塔压控制基本方案	291
10.2.2 精馏塔的物料平衡和能量平衡方程	292
10.2.3 精馏塔的物料平衡控制方案	293
10.2.4 控制一端产品质量	295
10.3 精馏塔的压力控制	302
10.3.1 加压塔的塔压控制	302
10.3.2 常压塔的塔压控制	305
10.3.3 减压塔的塔压控制	305



10.4	具有侧线采出的精馏塔控制	306
10.4.1	具有一个侧线采出的精馏塔控制	306
10.4.2	具有多个侧线采出的精馏塔控制	308
10.5	其他控制方法在精馏塔控制中的应用	310
10.5.1	前馈控制	310
10.5.2	选择性控制	311
10.5.3	内回流及热焓控制	312
10.5.4	浮动塔压控制	314
习题		316
第 11 章	化学反应过程控制	317
11.1	化学反应的特点	317
11.1.1	化学反应过程的特点	317
11.1.2	化学反应器的类型	318
11.1.3	化学反应的基本规律	320
11.2	化学反应器的动态数学模型	324
11.2.1	基本动态方程式	324
11.2.2	非线性模型的线性化	326
11.2.3	反应器的热稳定性	327
11.3	化学反应控制	329
11.3.1	反应器的基本控制方案	329
11.3.2	被控变量的选择	330
11.3.3	以温度作为控制指标的反应器控制方案	332
11.4	釜式反应器的控制方案	335
11.5	合成氨生产过程及控制	338
11.5.1	氨的性质	338
11.5.2	合成氨生产流程	339
习题		354
第 12 章	系统安全保护	356
12.1	系统安全基本概念	356
12.1.1	物理爆炸与化学爆炸	356
12.1.2	爆炸参数	357
12.2	爆炸危险场所的划分	358
12.2.1	我国关于爆炸危险场所的划分和防爆安全法规	358
12.2.2	仪表防护等级标准	361
12.3	电气设备防爆	362
12.3.1	防爆电气设备的分类	362
12.3.2	本安仪表分级	363

12.3.3	关联设备	364
12.3.4	本安电路外部连接电缆的影响	368
12.4	系统接地	370
12.4.1	电气设备和线路的保护接地	370
12.4.2	防静电保护接地	371
12.5	防雷电技术	372
12.5.1	雷电危害的类型	373
12.5.2	雷电感应的防护	375
12.5.3	常用防雷元器件	376
12.6	控制系统的抗干扰	380
12.6.1	噪声与信噪比	380
12.6.2	共模信号与差模信号	380
12.6.3	抗耦合性干扰技术	381
12.6.4	抗传导性干扰技术	383
12.6.5	控制系统的接地技术	383
12.6.6	其他抗干扰技术	385
12.6.7	滤波器	386
	习题	392
	参考文献	393

工业过程控制的发展趋势

1.1 工业过程自动化的发展

从检测和控制的角度来看,工业生产过程大致可分为机电工业和流程工业两大类。机电工业如机床、汽车、家电制造等,其产品按“件”表示,生产过程以零部件的制造和组装为特征,同时由于机电工业产品的多样化,导致生产流程具有灵活调整的特点。流程工业如电力、石油、化工、水泥、城市供水和污水处理等,其产品不能按“件”表示,整个生产过程是从原料到成品逐步变化的过程,同时流程工业过程不仅有物理改变,也有化学变化。此外,不同类型的产品的生产流程不同,因此流程工业是按产品设计的,一般生产产品固定不变。

机电工业以“件”为单位进行计量和制造,具有“离散”特点,大量的控制作用也是“有、无”、“开、关”、“启、停”等过程,以逻辑控制为主,且往往具有大功率特点;而流程工业,以产品的质量为控制目标,如电力生产的功率和频率、化工产品的纯度、供水的质量等,这些指标不随时间而变化,且流程工业的许多生产过程具有易燃、易爆等性质,因此,控制系统对所需的控制能量要求较严格。

从生产过程自动化的发展历史看,早期的自动控制装置有机械式和电子式两大类,由于数字电子计算机的发明和计算机技术的发展,现在绝大多数工业自动控制系统(无论机电工业还是流程工业)都为数字控制系统,它们的核心都是电子数字计算机。因此,在论及生产过程自动化的发展时,就不可避免要提及自动化工具的发展,特别是数字计算机的发展,及它在工业生产应用中对控制理论发展所起的促进作用。

与其他技术科学一样,控制理论的形成和发展是人类社会进步、生产力发展到一定水平的需求,并且由人类已有的技术和知识水平所决定。控制中的一些概念,例如反馈、补偿等,早在一千多年前的中国古代的计时装置——铜壶滴漏中已有所体现。但由于社会需求和技术水平的限制,控制理论没有在我国这片古老文明的土地上产生。直到19世纪中叶(1868年),随着以蒸汽机的发明为标志的工业时代的到来,物理学家J. C. Maxwell发表了关于蒸汽机调速器稳定性分析的著名论文,这是人类历史上第一篇关于控制理论的论文。而自动控制理论作为一门独立的学科,则是20世纪40年代末(1948年)、二次世界大战后,自维纳

(N. Wiener)发表著名著作《控制论》以后,才迅速发展起来。

实际上,在《控制论》出版之前的20世纪30年代,自动化技术已在电子通信工程中取得了惊人的成就。40年代奈奎斯特(Nyquist)等人所开创的基于反馈回路的经典控制理论,以传递函数为基础,适用于单输入单输出(SISO)线性定常系统的分析与综合问题。经典的系统分析方法有时间域法、频率响应法、根轨迹法等。这些方法中尤以频率响应法影响最大,直到今天仍是许多控制系统分析和设计的重要工具,特别在流程工业控制系统设计中,仍占主导地位。系统综合的目标是使系统在满足性能指标要求的同时,具有足够的稳定裕量,保证系统在对象特性发生变化和外部干扰影响下仍能保持可接受的控制品质,而综合的手段是输出反馈校正。20世纪40年代至60年代,经典控制理论为生产过程控制系统的设计提供了强有力的理论支持,以此为基础的单变量控制系统得到了广泛的应用,并达到了相当完善的程度,在这个时期,生产自动化的技术工具是气动或电动模拟仪表(调节器)。

20世纪60年代开始,由于工业生产装置规模的扩大,大型工业装置中单元操作之间的耦合越来越紧密,孤立地考虑一些工艺变量的定值控制,已难以满足稳定生产的基本要求。另外,在社会对产品质量提出更高要求的同时,对环境、能源、原料消耗等的要求也越来越高。而在这一时期航天航空事业获得了飞速的发展,根据输出反馈校正的经典控制理论,通常得不到最优控制效果,不能满足对航天航空器的控制要求。随着人们在航天航空领域的理论知识的发展,理论上体现为对象具有多输入多输出(MIMO)、时变和非线性等特性。不但控制对象的复杂程度大大增加,对系统控制的性能指标也提出了更严格的要求。时代的发展和需要,导致了设计和分析复杂控制系统的新方法——现代控制理论的产生。它是以贝尔曼(Bellman)的动态规划理论(1957年)、卡尔曼(Kalman)等的最优滤波理论(1961年)和庞特里亚金(Pontryagin)等的极大值原理(1962年)为标志的,建立在状态空间上的控制理论。以现代控制理论为基础的控制器设计方法是规范而强有力的,能够有效地处理很多复杂的系统控制问题。这种新的理论和方法很快在航天航空领域得到了越来越多的应用,同时现代控制理论本身也得到了迅速的发展。

相对于经典控制理论来讲,现代控制理论是一大进步,它从理论上解决了许多复杂的控制问题。但在应用到工业生产控制工程中出现了新的问题,现代控制理论严格地依赖于控制对象的数学模型,在工业生产中,要得到被控对象的准确的数学模型非常困难。因此,现代控制理论直到20世纪七八十年代才在工业生产中得到试应用,但直到现在成功应用的实例还不多。

由于流程工业生产过程的复杂性和人类目前的知识水平,建模过程(包括机理建模与辨识)中必要的假设与简化不可避免。在此基础上建立的工业过程被控对象模型中总包含有被称为“未建模动态部分”。由于它的存在,使根据现代控制理论设计的控制系统的品质大大恶化,甚至无法稳定。除了被控对象模型的不准确(正确)外,工业生产过程中的扰动因素更复杂,它们的统计特性往往未知。这些因素都阻碍了现代控制理论在过程工业中的应用。

工业过程自动化的目标是使生产过程达到安全、平稳、优质、高效(高产、低耗),现在更提出了绿色生产。自动化的初级阶段主要目标是使生产过程安全(仅限于越限报警和连锁保护)与平稳地进行。大多数流程工业运行工况都不会偏离额定工况太远,因此许多工业过程对象可以简化为用一阶或二阶带纯滞后的、具有自衡能力的集中参数特性来描述。许多

情况下,生产过程参数用单输入单输出控制方案即可满足控制的要求,这就是为什么经典控制方法至今不衰的重要原因。目前,在流程工业生产过程控制系统中 90% 以上还是采用 PID 及一些简单的多回路控制系统,利用现代控制理论设计的控制系统只是在某些特殊需要并且可能时(如对产品质量控制)才被采用。因此,经典控制理论的学习与认识是工程实际应用的需要,同时也是学习与理解现代控制理论的分析与设计方法的重要基础。

尽管从理论上讲,现代控制理论更系统、更规范、更有效,但是其分析与设计方法的物理意义却远没有经典控制理论清晰。传统的现代控制理论是建立在严格的系统模型基础上的,大量的实践证明它在工业生产过程中应用十分困难。因此,如何弱化现代控制理论对模型的依赖程度,成为近年来控制理论界研究的热点,从而出现了如鲁棒控制、自适应控制、预测控制等新方法的研究。与此同时,一些所谓无模型控制方法如模糊控制、专家系统、人工神经元网络控制等也应运而生。

在工业生产过程控制系统发展中,常规仪表控制系统曾经在工业过程中获得广泛的应用,出现了以 DDZ-II (晶体管为基本元件)、DQZ-II (气动)和 DDZ-III (集成电路为基本元件)等为代表的各类控制仪表。生产过程最重要的指标是产品的质量。但到目前为止,对质量的直接测量还较困难,而在许多工业生产过程中,温度、压力、流量、液面(界面)——俗称四大参量的状态间接反映了产品的质量,而这些参量的测量与控制相对简单。因此,在工业生产控制中,往往通过对温度、压力、流量、液面等工艺参量的控制,来稳定生产过程和保证产品的质量。

当前工业过程自动化研究的另一个热点是以市场为导向的集管理与控制于一体的计算机集成综合自动化系统。随着知识经济时代的到来,仅有生产、制造部门,不能算做一个完整的企业。自动控制系统主要是针对生产系统的,但控制理论的基本概念却适用于各种管理场合。控制理论的应用使企业的经营管理更科学,在科学管理下的生产控制将更合理。因此,企业的经营管理与生产控制结合的综合自动化系统是当今控制理论一个重要的研究内容。在这个范围内研究综合自动化,使得控制理论从系统的总体特征上遇到了前所未有的困难。解决这类问题的重要途径是将控制理论、运筹学与智能控制三者相结合,而这些问题的解决可能意味着新一代控制理论或复杂系统控制理论的产生。

综上所述,自动化是以控制理论为基础的一个涉及范围广、包含内容极丰富的领域,每一种控制理论的提出都有其相应的时代背景和应用对象。本课程以流程工业生产过程为主,介绍工业过程控制的特点和控制系统的设计、调试等基本方法,并以工程实际应用为主,对高级控制系统作简要的概念性介绍。

1.2 计算机控制技术的发展

世界上第一台真正的电子数字计算机是 1946 年出现的。将数字计算机用作控制系统的思想萌生于 1950 年,最初的研究是在导弹和飞机控制方面的应用。由于当时计算机的体积太大、能耗太高,指令执行速度低,并且不可靠,当时研究的结论是:目前的通用数字计算机用于控制系统没有什么潜力。

20 世纪 50 年代中期,开始在过程工业中采用数字计算机控制的研究。最重要的工作是 1956 年 3 月汤姆森·拉莫·伍尔里奇(Thomson Ramo Woolrige, TRW)航空公司与德

士古(Texaco)公司联合提出了一个可行性研究报告,决定针对得克萨斯州(Texas)的波特·阿瑟(Port Arthur)炼油厂的一台聚合装置进行数字计算机控制的研究,设计出采用RW-300 计算机的聚合装置计算机控制系统,并于1959年3月12日在线运行成功。该计算机控制系统共控制26个流量、72个温度、3个压力和3个成分,系统的基本功能为使反应器的压力最小、确定对5个反应器供料的最佳分配、根据对催化剂活性测量的结果来控制热水的流入量,以及确定最佳循环等。

TRW公司的这项开创性工作受到许多方面的注意,引起其他企业和研究单位纷纷开始各种各样的可行性研究,出现了蓬勃发展的局面。由于计算机控制技术的发展非常迅速和多样化,在不同的应用领域和不同的工业部门之间,差异也很大,而且在很大程度上还相互交叠,因此很难清晰地划分各个阶段的精确日期。根据其发展过程,可将计算机控制技术的发展大致分为6个阶段:

- (1) 开创期——约1955年;
- (2) 直接数字控制期——约1962年;
- (3) 小型计算机控制期——约1972年;
- (4) 微型计算机控制期——约1972年;
- (5) 数字技术普遍应用期——约1980年;
- (6) 集散型控制期——约1990年。

1. 开创时期

TRW公司和德士古公司的工作,引起了工业界、计算机工业界和各种研究组织对采用数字计算机进行过程工业控制的极大兴趣。工业界看到的是一种提高自动化水平的潜在手段,计算机工业界看到了新的市场,而大学和科研院所则看到了一个新的研究领域。

1958年前后的数字计算机执行一次加法运算耗时的典型值是1ms,乘法运算为20ms,一台中央处理器的平均无故障时间(MTBF)为50~100h。由于当时的计算机处理能力有限,并且很不可靠,真正对生产过程进行控制的还是模拟调节器。计算机控制系统的工作是对过程参数进行检测和分析计算、打印出操作指令,操作者手工(或由计算机直接)修改模拟调节器的设定值。这时的计算机控制方式实际上是操作指导式或设定值控制,因此称为计算机监督控制,简称计算机监控。计算机控制系统的主要任务是寻找最佳运行条件,统计产量和原材料的消耗,辅助完成调度和生产计划等。

计算机控制在开创阶段取得了许多宝贵的实践经验,对数字计算机用于工业过程控制提出了许多特殊的要求,产生了一系列的实践和理论研究课题,如数字计算机如何对连续变化的生产过程实现有效的控制?计算机如何对过程中出现的意外变化做出迅速响应?这些要求直接导致计算机中断系统概念的提出。作为控制用计算机系统,要直接面向工业过程各种参量的测量,如过程工业要对温度、压力、流量、液位、成分等测量,机电工业要对状态(启动、停止)、位置、速度、加速度、重量等测量。并且要将各种参量(非电量)转换成标准电量信号和数字量信号,以及将计算机系统产生的控制信号转换成适合各种执行机构的信号。这些要求直接推动了各类传感器、变送器和与工业过程连接技术的发展。在这个阶段,数字计算机控制无论在理论上还是在工程上的进展都令人瞩目。到1961年3月,全世界共安装了37套数字计算机控制系统,一年之后,增长到159套,其应用涉及钢铁、化工和电力等工

业领域。但在这个阶段计算机仍处于监控地位,真正对生产过程进行控制的还是模拟调节仪表。

2. 直接数字控制时期

1962年,英国帝国化学工业公司(ICI)制造出一套新的数字计算机控制装置,过程控制中的全部模拟仪表由一台名为费伦蒂·阿格斯(Ferranti Argus)的计算机系统来代替。用一台计算机直接测量 224 个变量和控制 129 个阀门。这是计算机过程控制新纪元开始的标志,即模拟技术直接被数字技术所代替,而系统的功能却保持不变。直接数字控制(Direct Digit Control, DDC)这个名字就是为了强调数字计算机直接控制生产过程这一特征。1962年,一台典型的过程控制计算机完成一次加法的时间为 $100\mu\text{s}$,乘法的时间为 1ms ,平均无故障时间大约为 1000h。

模拟控制系统的价格随控制回路数目的增加呈线性增长,而数字计算机系统虽然最初投资很大,但增加一个控制回路的费用却很小。因此,对于大型装置来说,数字控制系统显得更便宜。此外,数字控制系统的另一个突出的优点是操作方式的改变,一块操作员通信板可代替一大片模拟监视仪表屏。ICI 系统的通信板非常简单,仅包含一台数字显示器和少量的按钮。

灵活性是 DDC 系统的又一个突出的优点。在模拟控制系统中,各控制仪表之间通过导线连接(硬连接)实现控制方案。若要改变控制系统的结构,需要重新接线。而计算机控制系统,所有的控制回路都由一台计算机依次进行计算和控制,通过改变控制逻辑软件(软连接),即可改变控制系统的结构。除此之外,采用计算机控制技术还有更多的优点,比如,它容易实现几个回路之间的相互作用,可以实现模拟调节器难以实现的控制算法等。采用专用的 DDC 语言,用户不必熟悉有关计算机编程的任何知识,只需要将输入、输出、调节器类型、标度因子和调节器参数等直接填入表格,就可以完成控制方案的设计。在用户看来,DDC 系统仿佛是用常规调节器连成的。这种控制方案生成技术最后演化成“系统组态”技术,并且一直沿用至今。DDC 系统是计算机控制系统发展中的重大变革。这种系统实现的是基本的控制功能,而不再是监督功能。

1963—1965年,DDC 系统取得了显著的进展。在这个阶段,计算机系统的性能规格是由用户和厂家共同拟定的,是定制的系统。在这个阶段对采样周期、控制算法以及可靠性等关键问题进行了广泛研究。DDC 的概念很快为人们所接受。

3. 小型计算机时期

过程控制计算机技术与集成电路技术的发展紧密相关。20 世纪 60 年代,由于集成电路技术的发明与发展,数字计算机技术取得了重大突破。计算机变得体积更小,速度更快,可靠性更高,并且越来越便宜。这个时期典型的过程控制计算机(称为小型计算机)的字长为 16 位,内存储器容量为 $8\sim 124\text{K}$ 字,磁鼓(磁盘)作为辅助存储器。控制数据公司(Control Data Corporation, CDC)的 CDC-1700 计算机是这个时期的典型的小型计算机控制系统,它的加法时间为 $2\mu\text{s}$,乘法时间为 $7\mu\text{s}$,中央处理单元的平均无故障时间达 20000h。

由于数字计算机系统的速度及可靠性的提高,价格不断下降,以及数字计算机控制系统的成功应用,小型工程项目采用计算机控制成为合理的选择。过程控制计算机系统从 1970 年