



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

过程控制工程

(第3版)

俞金寿 蒋慰孙 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

过程控制工程

(第3版)

俞金寿 蒋慰孙 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地阐述了过程控制系统的结构、原理、特点、适用场合、系统设计及应用等问题,并在分析稳态和动态数学模型的基础上,探讨了过程工业(石化、化工、轻工、医药等)生产过程中典型单元操作的控制方案,并介绍了典型工业生产过程(合成氨过程、常减压过程、催化裂化过程、乙烯过程、聚合过程、生物发酵过程、制浆造纸过程和冶金过程)的控制。本书的特点是基本理论与领域的最新进展并重,理论与实际结合,内容切合信息时代的需要,并力求深入浅出,着重物理概念。每章结尾提供了丰富的习题。

本书可作为自动化、过程自动化等相关专业本科生及研究生的教材,也可供从事过程控制的工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制工程/俞金寿,蒋慰孙编著. —3版. —北京:电子工业出版社,2007.7

电子信息与电气学科规划教材·自动化专业

ISBN 978-7-121-04593-6

I. 过… II. ①俞…②蒋… III. 过程控制—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 088833 号

策划编辑:凌毅

责任编辑:谭海平 段丹辉

印 刷:北京市通州大中印刷厂

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:22.5 字数:561.6 千字

印 次:2007 年 7 月第 1 次印刷

定 价:32.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

本书的第2版是1999年出版的,到现在将近十年了,使我们深感荣幸的是本书受到了很多大专院校的欢迎,并被选为教材,也受到了许多自动化技术人员的欢迎。本书曾荣获2001年上海市优秀教学成果二等奖、2002年全国普通高校优秀教材一等奖,2006年教育部把《过程控制工程》(第3版)列入“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。

这次再版,我们努力保持第1版和第2版原有的优点,并力求克服原书的缺点,特别是随着科学技术的进步,原书的某些部分显然已落后于时代的节拍。

十多年来,过程控制与整个工业自动化一样,发生了很大的变化,现代控制理论在继续完善和发展,然而并没有像一些理论界所希望的那样在工业上得到足够的推广。但是,来自工业界的一些先进控制策略发展很迅速,预测控制作为先进控制技术的代表,在国际和国内都备受关注,并在国内外得到了广泛应用,取得了明显的经济效益;智能控制的热潮也已来到,如模糊控制、神经网络控制、专家系统等,在过程控制中开始应用;自动化的范畴进一步扩大,现在早已不局限于检测和控制,操作优化带来显著的经济效益,故障检测和诊断提高了生产的安全性和可靠性,与生产管理的结合进而走向综合自动化的目标。本次再版在内容的更新上做了一定努力,如第4章智能控制是重新编写的;为紧密结合工业过程编写了第9章,即典型工业生产过程的控制。为使篇幅不致过于膨胀,也删去了一些现在看来较次要的内容。另外,更换和补充了一些更合适的应用例子。

本书大体上仍保持原来的体系,也保持了紧密结合工业过程实际、理论联系实际的特点。

本书由蒋慰孙、俞金寿编著,由俞金寿担任主编并审阅,刘爱伦、罗健旭、何衍庆参加了本书的编写。书中部分内容的编写参照了有关文献,恕不一一列举,谨对书后所有参考文献的作者表示感谢。

由于作者水平有限,书中不当之处及错误,敬请前辈、同仁们及广大读者批评指正。

作者于华东理工大学

2007年3月

目 录

绪论	1
第 1 章 简单控制系统	7
1.1 控制系统组成和控制性能指标	7
1.1.1 控制系统的组成	7
1.1.2 控制系统的控制性能指标	9
1.2 过程动态特性和过程动态模型的建立	11
1.2.1 典型过程动态特性	11
1.2.2 过程特性对控制性能指标的影响	14
1.2.3 过程动态模型的建立	16
1.2.4 机理建模	18
1.2.5 过程辨识与参数估计	20
1.3 检测变送环节	22
1.3.1 检测变送环节的性能	22
1.3.2 对检测变送信号的处理	24
1.4 控制阀的选择	26
1.4.1 结构形式及材质的选择	26
1.4.2 口径大小及控制阀作用方式的选择	29
1.4.3 控制阀的流量特性	30
1.4.4 控制阀流量特性的选择	32
1.4.5 阀门定位器的选择	35
1.4.6 其他执行器	35
1.5 控制器的控制算法	36
1.5.1 连续 PID 控制算法	36
1.5.2 离散 PID 控制算法	40
1.5.3 双位控制	42
1.6 控制器控制规律选择与参数整定	44
1.6.1 控制器控制规律选择	44
1.6.2 控制器的参数整定若干原则	45
1.6.3 控制器参数工程整定法	46
1.6.4 控制系统的投运	48
思考题与习题	49
第 2 章 复杂控制系统	51
2.1 串级控制系统	51

2.1.1	串级控制系统的基本原理和结构	51
2.1.2	串级控制系统的特点	53
2.1.3	串级控制系统的设计	55
2.1.4	串级控制系统控制器参数整定及投运	59
2.1.5	串级控制系统的变型	59
2.1.6	串级控制系统应用实例	61
2.2	比值控制系统	62
2.2.1	基本原理和结构	62
2.2.2	比值系数的计算	63
2.2.3	比值控制系统设计和工程应用中的问题	66
2.2.4	比值控制系统的参数整定和投运	67
2.2.5	比值控制系统的变型	68
2.2.6	比值控制系统应用实例	69
2.3	均匀控制系统	71
2.3.1	均匀控制系统的基本原理和结构	71
2.3.2	均匀控制系统控制规律的选择及参数整定	73
2.4	前馈控制系统	74
2.4.1	基本原理	74
2.4.2	前馈控制的主要结构形式	75
2.4.3	前馈控制系统的设计及工程实施中若干问题	77
2.4.4	前馈控制系统的投运和参数整定	79
2.4.5	前馈控制系统的应用实例	79
2.5	选择性控制系统	80
2.5.1	基本原理和结构	80
2.5.2	选择性控制系统设计和工程应用中的问题	83
2.5.3	选择性控制系统应用实例	84
2.6	分程控制系统	86
2.6.1	不同工况需要不同的控制手段	86
2.6.2	扩大控制阀的可调范围	87
2.7	双重控制系统	88
2.7.1	基本原理和结构	88
2.7.2	双重控制系统设计和工程应用中的问题	89
2.7.3	双重控制系统应用实例	89
	思考题与习题	90
第3章	先进控制技术	92
3.1	基于模型的预测控制	92
3.1.1	预测控制基本原理	93
3.1.2	预测控制算法	94
3.1.3	预测控制软件包的发展	96
3.1.4	预测控制在国内的应用	97

3.2 推断控制	97
3.2.1 推断控制系统	97
3.2.2 输出可测条件下的推断控制	99
3.2.3 工业应用实例	100
3.3 软测量技术	101
3.3.1 软测量技术	102
3.3.2 软测量工程设计	103
3.3.3 工业应用实例	104
3.4 差拍控制系统	105
3.4.1 差拍控制系统	105
3.4.2 达林控制算法	106
3.4.3 V. E. 控制算法	106
3.5 纯滞后补偿控制系统	106
3.5.1 史密斯预估补偿控制方案	106
3.5.2 自适应史密斯预估补偿控制	107
3.5.3 应用实例	108
3.6 解耦控制系统	109
3.6.1 系统的关联	109
3.6.2 相对增益	110
3.6.3 减少与解除耦合途径	111
3.6.4 串接解耦控制	113
3.6.5 工业应用实例	115
3.7 自适应控制和鲁棒控制	117
3.7.1 自适应控制概述	117
3.7.2 自整定调节器	117
3.7.3 模型参考型自适应控制系统	120
3.7.4 自校正控制系统	120
3.7.5 自适应控制工业应用实例	121
3.7.6 鲁棒控制	122
3.8 故障检测诊断和容错控制	123
3.8.1 故障检测和诊断	123
3.8.2 容错控制	124
3.9 现场总线控制系统	125
3.9.1 现场总线控制系统的主要特点	125
3.9.2 现场总线控制系统	126
3.10 综合自动化系统	130
3.10.1 综合自动化的意义	130
3.10.2 综合自动化系统的特点	131
3.10.3 工业生产过程计算机集成控制系统的构成	132
思考题与习题	133

第4章 智能控制	134
4.1 模糊控制	134
4.1.1 模糊控制的数学基础	135
4.1.2 模糊控制器的基本结构	143
4.1.3 模糊控制器设计的若干问题	145
4.1.4 模糊控制器设计实例	149
4.1.5 模糊控制与传统控制的结合	154
4.2 神经网络控制	156
4.2.1 人工神经元和人工神经网络	157
4.2.2 典型神经网络	159
4.2.3 神经网络建模	163
4.2.4 神经网络控制	165
4.3 专家控制	168
4.3.1 专家系统	168
4.3.2 专家控制	169
4.3.3 专家控制系统应用示例	173
思考题与习题	175
第5章 流体输送设备的控制	176
5.1 概述	176
5.2 泵及压缩机的控制	176
5.2.1 离心泵的控制	177
5.2.2 容积式泵的控制	179
5.2.3 风机的控制	180
5.2.4 压缩机的控制	181
5.2.5 变频调速器的应用	183
5.3 离心式压缩机的防喘振控制	184
5.3.1 离心式压缩机的喘振	184
5.3.2 防喘振控制系统	185
5.3.3 实例分析	189
思考题与习题	194
第6章 传热设备的控制	195
6.1 传热设备的特性	195
6.1.1 传热过程的两个基本方程式	195
6.1.2 换热器静态特性的基本方程式	196
6.1.3 换热器的静态放大系数	197
6.1.4 控制方案的分析	198
6.2 一般传热设备的控制	199
6.2.1 调节载热体流量	199
6.2.2 调节载热体的气化温度	200
6.2.3 将工艺介质分路	200

6.2.4	控制传热面积	202
6.3	传热设备的热焓与热量控制方案	203
6.3.1	热焓控制	203
6.3.2	热量控制	203
6.4	锅炉设备的控制	205
6.4.1	锅炉气包水位的控制	205
6.4.2	锅炉燃烧系统的控制	211
6.4.3	蒸气过热系统的控制	215
6.5	管式加热炉的控制	216
6.5.1	加热炉的简单控制	216
6.5.2	加热炉的串级控制系统	218
6.5.3	安全联锁保护系统	219
6.5.4	加热炉的热效率控制	220
6.6	蒸发器的控制	221
6.6.1	蒸发器的特性	222
6.6.2	蒸发器的主控制回路	222
6.6.3	蒸发器的辅助控制回路	224
6.7	工业窑炉的控制	224
6.7.1	玻璃窑炉的控制	224
6.7.2	燃烧式工业窑炉控制	227
6.7.3	水泥窑炉的控制	229
	思考题与习题	230
第7章	精馏塔的控制	233
7.1	概述	233
7.1.1	精馏塔的控制要求	233
7.1.2	精馏塔的扰动分析	234
7.2	精馏塔的特性	235
7.2.1	物料平衡和内部物料平衡	235
7.2.2	能量平衡关系	237
7.2.3	进料浓度 x_F 和流量 F 对产品质量影响	238
7.3	精馏塔产品质量指标选择	239
7.3.1	采用温度作为间接质量指标	240
7.3.2	采用压力补偿的温度作为间接质量指标	241
7.4	精馏塔的基本控制	242
7.4.1	按精馏段指标的控制	242
7.4.2	按提馏段指标的控制	243
7.4.3	精馏塔的压力控制	244
7.5	精馏塔的节能控制	247
7.5.1	浮动塔压控制	248
7.5.2	能量的综合利用控制	249

7.5.3	产品质量的“卡边”控制	250
7.5.4	双重控制用于精馏塔节能控制	251
7.5.5	控制两端产品质量	251
7.6	精馏塔的先进控制	255
7.6.1	推断控制	255
7.6.2	软测量	257
7.6.3	预测控制	261
7.7	精馏塔优化控制	264
	思考题与习题	268
第8章	化学反应器的控制	269
8.1	概述	269
8.1.1	化学反应器的控制要求	269
8.1.2	化学反应器的基本控制策略	270
8.2	化学反应器的特性	270
8.2.1	化学反应速度	271
8.2.2	化学平衡	271
8.2.3	转化率	272
8.2.4	化学反应器的热稳定性	272
8.3	化学反应器的基本控制	274
8.3.1	出料成分的控制	274
8.3.2	反应过程的工艺参数作为间接被控变量	274
8.3.3	pH 控制	277
8.3.4	化学反应器的推断控制	277
8.3.5	稳定外围的控制	280
8.3.6	开环不稳定反应器的控制	281
	思考题与习题	282
第9章	典型工业生产过程的控制	284
9.1	合成氨过程的控制	284
9.1.1	变换炉的控制	284
9.1.2	转化炉水/碳比控制	285
9.1.3	合成塔的控制	286
9.1.4	大化肥装置的故障安全控制(FSC)系统	288
9.2	常减压过程的控制	292
9.2.1	常减压过程简介	292
9.2.2	常减压塔的控制	292
9.2.3	常压塔的多变量约束预测控制系统	297
9.3	催化裂化过程的控制	299
9.3.1	催化裂化过程反应-再生系统的控制	299
9.3.2	裂解气分馏塔的控制	300
9.3.3	裂解气分馏塔的粗汽油干点软测量	300

9.3.4	吸收-稳定系统的控制	302
9.3.5	催化裂化装置多变量预测控制	303
9.3.6	反应-再生系统先进控制专家系统	304
9.4	乙烯生产过程的控制	306
9.4.1	裂解过程的控制	307
9.4.2	分离过程的控制	310
9.5	聚合过程的控制	313
9.5.1	聚对苯二甲酸乙二酯(聚酯)过程的控制	313
9.5.2	聚氯乙烯过程的控制	314
9.5.3	聚乙烯过程的控制	316
9.5.4	聚乙烯生产装置关键控制回路的预测控制	320
9.6	生化过程的控制	322
9.6.1	常用生化过程控制	322
9.6.2	啤酒发酵过程控制	324
9.6.3	典型生化过程的计算机控制	326
9.7	制浆造纸过程的控制	328
9.7.1	制浆造纸过程的控制	328
9.7.2	硫酸盐法制浆过程的控制	334
9.8	冶金过程的控制	336
9.8.1	转炉炼钢过程的控制	336
9.8.2	氧化转炉炼钢控制	338
9.8.3	初轧生产过程的控制	341
思考题与习题		344
参考文献		345

绪 论

1. 过程控制的发展与趋势

20 世纪 40 年代开始形成的控制理论被称为“20 世纪上半叶三大伟绩之一”，在人类社会的各个方面有着深远的影响。控制理论与其他学科一样，源于社会实践和科学实践。在自动化的发展中，有两个明显的特点：第一，任务的需要、理论的开拓与技术手段的进展三者相互推动，相互促进，显示了一幅交错复杂但又轮廓分明的画卷，三者间表现出清晰的同步性；第二，自动化技术是一门综合性的技术，控制论更是一门广义的学科，在自动化的各个领域，移植和借鉴起了交流汇合的作用。

自动化技术的前驱可追溯到我国古代，如指南车的出现。至于工业上的应用，一般以瓦特的蒸气机调速器作为正式起点。工业自动化的萌芽是与工业革命同时开始的，这时的自动化装置是机械式的，而且是自力型的。随着电动、液动和气动这些动力源的应用，电动、液动和气动的控制装置开创了新的控制手段。

到第二次世界大战前后，控制理论有了很大发展。电信事业的发展导致了 Nyquist(1932 年) 频率域分析技术和稳定判据的产生。Bode(1945 年) 的进一步研究开发了易于实际应用的 Bode 图分析方法。1948 年，Evans 提出了一种易于工程应用的求解闭环特征方程根的简单图解方法——根轨迹方法。至此，自动控制技术开始形成一套完整的、以传递函数为基础的、在频率域对单输入 - 单输出控制系统进行分析与设计的理论，这就是今天所谓的经典控制理论。经典控制理论最辉煌的成果之一是首先推出了 PID 控制规律。PID 控制原理简单，易于实现，对无时间延迟的单回路控制系统极为有效。到目前为止，在工业过程控制中有 80% ~ 90% 的系统还在使用 PID 控制规律。经典控制理论最主要的特点是：线性定常对象，单输入、单输出，完成镇定任务。即便对这些极简单的对象描述及控制任务，理论上也尚不完整，从而促使现代控制理论的发展。

20 世纪 60 年代，控制理论发展迅猛，这是以状态空间方法为基础、以极小值原理(Pontryagin, 1962) 和动态规划方法(Belman, 1963) 等最优控制理论为特征的，而以采用 Kalman 滤波器的随机干扰下的线性二次型系统(LQR)(Kalman, 1960) 宣告了时域方法的完成。现代控制理论在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果。现代控制理论中首先得到透彻研究的是多输入多输出系统，其中特别重要的是对描述控制系统本质的基本理论的建立，如可控性、可观性、实现理论、典范性、分解理论等，使控制由一类工程设计方法提高成为一门新的科学。为了扩大现代控制理论的适用范围，相继产生和发展了系统辨识与估计、随机控制、自适应控制以及鲁棒控制等各种理论分支，使控制理论的内容越来越丰富。现代控制理论虽然在航天、航空、制导等领域取得了辉煌的成果，但对于复杂的工业过程却显得无能为力。

从 20 世纪 60 年代开始，为了解决大规模复杂系统的优化与控制问题，现代控制理论和系统理论相结合，逐步发展形成了大系统理论(Mohammad, 1983)，其核心思想是系统的分解与协调。多级递阶优化与控制(Mesarovic, 1970) 正是应用大系统理论的典范。实际上，大系统理论仍未突破现代控制理论的基本思想与框架，除了高维线性系统之外，它对其他复杂系统仍然束手无策。

20 世纪 80 年代发展起来的智能控制,对于含有大量不确定性和难于建模的复杂系统,基于知识的专家系统、模糊控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制等应运而生,它们在许多领域都得到了广泛的应用,成为自动控制的前沿学科之一。

智能控制(Intelligent Control, IC)是 20 世纪 80 年代以来备受人们关注的一个领域。学术界有不少人认为智能控制将是继经典控制理论方法和现代控制理论方法之后的新一代控制理论方法。理论和应用研究很多,在国内外都是受人瞩目的热点。加上近年来在洗衣机、空调、摄像机等家电产品中广泛采用模糊控制,而像智能仪表、智能大厦等术语在一般报刊上常被看到,智能控制已走进千家万户。

什么是智能控制呢?最直观的定义显然是引入人工智能(Artificial Intelligence, AI)的控制,也就是人工智能与自动控制的结合。傅京孙教授在 1971 年就是这样提出的。人工智能与自动控制两者是不可或缺的。它一方面表明智能控制范围很广,而且会不断接纳新的内容;另一方面也给出明显的界限,与人工智能无关的控制不是智能控制。后来还有各式各样的提法,如美国的 Saridis 教授提出了把运筹学也结合起来的思想等。但是,从交集的角度看,还是以二元结构为宜。

人工智能的内容很广泛,如知识表示、问题求解、语言理解、机器学习、模式识别、定理证明、机器视觉、逻辑推理、人工神经网络、专家系统、模糊理论、智能调度和决策、自动程序设计、机器人学等都是人工智能的研究和应用领域。人工智能是指智能机器所执行的通常与人类智能有关的功能,如判断、推理、证明、识别、感知、理解、设计、思考、规划、学习和问题求解等思维活动。

人工智能中有不少内容可用于控制,当前最主要的有 3 种形式:① 专家系统;② 模糊控制;③ 人工神经网络控制。它们既可以单独应用,也可以与其他形式结合起来;既可以用于基层控制,也可用于过程建模、操作优化、故障诊断、计划调度和经营决策等不同层次。

从控制系统结构来看,已经经历了 4 个阶段。20 世纪 50 年代以基地式控制仪表等组成的控制系统,如自力式温度控制器、就地式液位控制器等,它们的功能往往局限于单回路控制。时至今日,这类控制系统仍没有被淘汰,而且有了新的发展,但在控制系统中所占的比重却大为减少。

20 世纪 60 年代出现了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,目前国内还在广泛应用。由单元组合仪表组成的控制系统,其控制策略主要是 PID 控制和常用的复杂控制系统(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,未能普及和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 年代以后出现了二级优化控制,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,实现了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,实现了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控制系统(FCS)。它将对控制系统结构带来革命性变革,开辟控制系统的新纪元。

2. 当前过程控制系统发展的一些主要特点

(1) 生产装置实施先进控制成为发展主流

早期的简单控制由于受到经典控制理论和常规仪表的限制,难以处理工业过程中存在的耦合性、非线性和时变性等。尽管在20世纪70年代以后,许多生产装置采用了DCS系统,但由于当时的理论和技术原因,控制水平仍停留在单回路PID控制、联锁保护控制等。随着企业提出高柔性、高效益的要求,上述控制方案已经不能适应。以多变量预测控制为代表的先进控制策略的提出和成功应用以后,先进控制受到了过程工业界的普遍关注。先进过程控制(Advanced Process Control, APC)是指一类在动态环境中,基于模型、借助充分计算能力,为工厂获得最大利润而实施的运行和技术策略。这种新的控制策略实施后,系统运行在最佳工况,实现所谓“卡边生产”。据资料报道,一个乙烯装置投资163万美元实施先进控制,完成后预期可获得效益600万美元/年。目前,国内许多大企业纷纷投资,在装置自动化系统中实施先进控制。国外许多控制软件公司和DCS生产商都在竞相开发先进控制和优化控制的商品化工程软件包,主要有:美国DMC公司的DMC, Setpoint公司的IDCOM-M、SMCA, Honeywell Profimatics公司的RMPCT, Aspen公司的DMCPLUS, 法国Adersa公司的PFC, 加拿大Treiber Controls公司的OPC等,成功应用于石油化工中的催化裂化、常减压、连续重整、延迟焦化、加氢裂化等许多重要装置,取得了明显的经济效益。全世界应用APC有数千项,APC软件应用年增长率达到30%左右,先进控制策略主要有:多变量预测控制、推理控制及软测量技术、自适应控制、鲁棒控制、智能控制(专家控制、模糊控制和神经网络控制)等,尤其智能控制已成为开发和应用的热点。

(2) 过程优化得到迅速发展

在过程控制中,过程优化已得到迅速发展。在连续流程工业中,往往上游装置的部分产品是下游装置的原料,整个生产过程存在装置间的物流分配、物料平衡和能量平衡等一系列问题。借助优化可使得整个生产过程获得很好的经济效益和社会效益。在过程优化中,主要是寻找最佳的工艺参数设定值以获得最大的经济效益,这称为稳态优化。稳态优化采用静态模型,进行离线或在线优化计算。离线优化是指利用各种建模优化方法,在约束条件下求解最优的工艺参数,提供操作指导。在线优化是指周期性完成模型计算、模型修正和参数寻优,并将最优的工艺参数值直接送到控制器作为设定值。为获得稳态最优,要求系统工作在一种特定的、保守程度较小的工况之下,但一旦偏离了这种工况,各项指标会明显变差,操作难度增加,有时会导致生产的不安全。随着稳态优化的深入研究,直接影响过程动态品质的最优动态控制也显示出其重要性。

生产过程的优化是指在各种优化条件下,求取目标函数的最优值,通常是复杂的非线性优化问题。应用传统优化理论往往遇到困难。在过程优化中,由于系统的复杂性,求全局最优值十分困难,然而实际过程并不一定要求最优值,而只要求得“优化区域”或“满意解”就可满足要求。在过程优化中,有许多是受工艺的限制。最近有人提出把工艺设计与控制整体考虑,在工艺设计的同时考虑到控制的实施方案及效果,就可以在工艺设计阶段消除那些可能导致控制困难的因素,这种方法正在受到人们的关注。

基于模型的优化算法有解析法、线性规划法、梯度搜索法、数值搜索法、整数规划法等,这些算法比较成熟。当前流程工业一方面向大型化方向发展,另一方面向精细化方向发展。采用传统的优化方法,经常会出现由于问题太复杂导致需要搜索的空间太大而引起的“组合爆

炸”、搜索不收敛或收敛太慢而找不到最优解、收敛在局部最优点而无法抵达全局最优点等问题。为克服这些问题,出现了一些新的现代优化算法,如模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm, SAA)、趋化性算法(Chemotaxis Algorithm, CA)、遗传算法(Genetic Algorithm, GA)、混沌优化算法(Chaos Optimization Algorithm, COA)、免疫算法(Immune Algorithm, IA)、蚁群算法(Ant Colony Algorithm, ACA)、微粒群优化算法(Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO)等。

(3) 故障检测与诊断受到各方面普遍关注

故障检测与诊断技术(Fault Detection and Diagnosis Technology)是发展于20世纪中叶的一门科学技术,是指对系统的异常状态的检测、异常状态原因的识别及包括异常状态预测在内的各种技术的总称。

随着现代工业及科学技术的迅速发展,生产设备日趋大型化、高速化、自动化和智能化,系统的安全性、可靠性和有效性日益变得重要和复杂,故障检测与诊断技术也越来越受到人们的重视。

故障诊断技术是一门综合性技术,它的开发涉及多门学科,如现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别、人工智能等。

故障检测诊断系统要提高故障的正确检测率,降低故障的漏报率和误报率。漏报指发生了故障未报警;误报指未发生故障反而报警。

故障诊断技术经过几十年的发展,到目前为止已经出现了基于各种不同原理的众多方法。同以前相比,这些方法无论是检测性能、诊断性能,还是鲁棒性能都有很大提高,而且对于线性时不变系统已经形成了相对较为完整的体系结构。

对于基于解析冗余的方法,国际故障诊断权威——德国的P. M. Frank教授认为所有的故障诊断方法可以划分为基于知识的方法、基于解析模型的方法和基于信号处理的方法。

故障诊断是一个新兴的研究领域,尽管经过多年的发展,已经取得了很大进步,内容得到很大充实,在工程实践中也得到了一些应用,取得了较为满意的效果,但同时也暴露出了许多尚待解决的问题,如自适应性、综合诊断、阈值、实际应用等。

(4) 传统的DCS走向国际统一标准的开放式系统

自1975年第一套分布式工业控制计算机系统诞生以来,到目前已发展为第4代DCS,如Honeywell公司的Experion PKS(过程知识系统)、Emerson公司的Plantweb、Foxboro公司的A2、Yokagawa公司的CA3000-R3(PRM-工厂资源管理系统)、ABB公司的Industrial IT系统、和利时的Hollias-Mass等。新一代DCS系统是集成化的综合控制系统和信息管理系统,其主要特征是:集成和信息化、实现全厂实时控制及PCS、MES、ERP层的信息集成,混合控制系统PLC、RTU、FCS等进一步分散化;提供了丰富的设备诊断、维修和管理功能。

历经近20年,各家DCS生产厂家的产品大多不能兼容。随着综合自动化的潮流和计算机技术的发展,一些主要的DCS生产商经过激烈竞争,最后终于联手共同推出了一种国际标准的现场总线(Fieldbus)控制系统,它被公认为是具有时代特点的新一代分布式计算机控制系统。它的主要特点为:①开放性,现场总线采用同一种国际标准的通信协议,不同厂家的产品可方便地互连,可与局域网相连;②智能化现场仪表,除了一般现场控制、检测仪表功能以外,还具有诊断、自补偿、现场组态、现场校验功能;③现场仪表采用数字信号传输,提高传输可靠性,节约传输线的投资;④彻底的分散性,简单控制回路基本分散在现场实现,关键数字信号进中央控制室,中央控制室主要完成信息管理、先进控制和优化。

现场总线是自动化领域技术发展的热点之一,它的出现标志着工业控制技术领域又一个

新时代的开始。现场总线控制系统必将逐步取代传统的独立控制系统、集中采集控制系统等,成为 21 世纪自动控制系统的主体。

现场总线的国际标准虽然从 1984 年开始就着手制订,但直到 2003 年 4 月,由 IEC/SC65C 成立的 MT9 现场总线修订小组负责修订的 IEC61158 Ed. 3(现场总线标准第 3 版)才成为正式国际标准,在新版本标准中规定了 10 种类型的现场总线。它们是 Type1 TS61158 现场总线、Type2 ControlNet 和 Ethernet/IP 现场总线、Type3 Profibus 现场总线、Type4 P-Net 现场总线、Type5 FF HSE 现场总线、Type6 Swift-Net 现场总线、Type7 WorldFIP 现场总线、Type8 INTERBUS 现场总线、Type9 FF H1 现场总线以及 Type10 PROFINet 现场总线。

(5) 综合自动化系统(CIPS)是发展方向

流程工业自动化在 20 世纪 90 年代以前仍是自动化孤岛模式。进入 20 世纪 90 年代,国内外企业在国际市场激烈竞争的刺激下,特别是流程工业还受到环境保护的巨大社会压力下,节能降耗、少投入多产出的高效生产和减少污染的洁净生产成为企业的生产模式,企业把提高综合自动化水平作为挖潜增效、提高竞争能力的重要途径。集常规控制、先进控制、过程优化、生产调度、企业管理、经营决策等功能于一体的综合自动化成为当前自动化发展的趋势。综合自动化就是在计算机通信网络和分布式数据库的支持下,实现信息与功能的集成,进而充分调动人的因素的经营系统、技术系统及组织系统的集成,最终形成一个能适应生产环境不确定性和市场需求多变性的全局优化的高质量、高效益、高柔性的智能生产系统,这就是 CIPS 思想在流程工业中的体现。综合自动化系统主要具有以下几个特点:

① 系统的主线采用递阶系统结构形式。人的介入程度是自下而上逐步增加的,人工智能的应用程度也是自下而上逐步增加的,但是工作频率的周期是自下而上逐步减少的,如基础控制级的周期以秒计,先进控制级的周期以分钟计,操作优化级的周期以小时计,调度级的周期以天计,计划级的周期以月、季、年计。

② 系统的主线是控制与管理两个方面。综合自动化系统需选择合适的计算机和网络,实行结构集成。通常由 DCS 或现场总线系统完成控制任务,由中、小型机或微机完成管理任务。

③ 系统信息的集成至关重要。来自基础控制级的直接测量信息,经过数据处理后变成先进控制级中不可直接测量变量的估计信息及车间核算信息和工况信息,经统计、分析和汇总送到调度级和管理级,再经深度加工后进入决策级作为企业领导决策的依据。决策级除来自企业内部的综合信息外,还要掌握市场信息、同行信息等外部信息。

在一些综合自动化系统中,底层控制系统的功能非常先进,高层 ERP 系统的功能也相当完整,但应用效果并不理想。尽管综合自动化系统应用不成功的因素是多方面的,但缺乏面向制造过程的 MES 来连接底层控制系统和高层经营/计划/决策系统是关键性的因素之一。

3. 过程控制工程的研究对象与任务

过程控制工程是自动化的一门分支学科,其研究的任务是对过程控制系统进行分析与设计。这里,设计是指过程控制系统的方案设计。

过程控制工程的第一个任务是对已有的控制系统进行分析,总结控制系统的特点,发现存在的不足并加以改进。第二个任务是生产过程的工艺流程确定后,设计出满足工艺要求的控制方案。第三个任务是在控制方案确定后,如何使控制系统能够正常运行,并发挥其功能。

过程控制工程以过程控制系统为主体,以控制理论为基础,生产过程与工艺为一翼,自动化仪表和计算机为另一翼,其学科结构如图 0.1 所示。

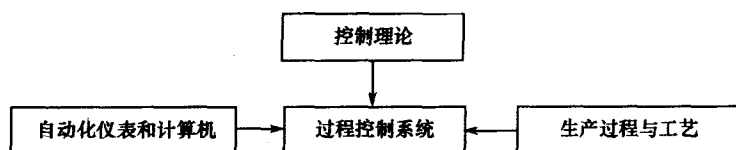


图 0.1 过程控制工程学科的结构

过程控制工程是控制理论在过程控制系统的重要应用。控制理论的移植和改造、控制系统结构的研究、控制算法的设计及控制系统的实现等，是控制理论与生产工艺过程、自动化仪表和计算机的有机结合，是它们在过程控制系统的成功应用。

生产工艺过程的工艺变量(被控变量)要求保持在工艺操作所需的指标(设定值)上，为此需要检测元件和变送器获得这些被控变量，在控制装置中与设定值比较后，按一定的控制规律输出信号到执行器，调整被控变量，使被控变量达到和保持在设定值。总的说来，过程控制工程要解决如图 0.2 所示控制系统的方案设计、分析和应用问题。

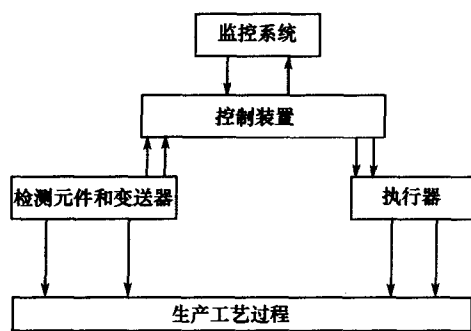


图 0.2 过程控制系统的控制结构

从发展的角度来看，过程控制工程早期是凭经验、凭直觉、凭定性说理的实际控制系统，它逐渐上升为科学性、条理性、有定量理论的指导阶段，最后把控制理论、生产过程与工艺、自动化仪表和计算机有机结合起来，构成一门综合性工程学科。

过程控制工程对过程工业带来了十分明显的经济效益和社会效益，如保证产品质量、提高产量、降低能耗、安全运行、改善劳动条件、提高生产管理水平等。其中，有些经济效益可直接计算得到，有些经济效益带有潜在的性质，如长期稳定运行、减少开停车等，还有提高劳动生产率、改善生存环境等重要的社会效益。