

高 等 学 校 教 材

过程控制工程

第 四 版

俞金寿 顾幸生 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

高等学校教材

过程控制工程

Guocheng Kongzhi Gongcheng

第四版

俞金寿 顾幸生 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

《过程控制工程》第一版于1992年获得第二届普通高等学校优秀教材全国优秀奖,《过程控制工程》第二版于2002年获得全国普通高等学校优秀教材一等奖,《过程控制工程》第三版被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材并荣获2011年上海市普通高校优秀教材一等奖。由俞金寿教授主持的“过程控制工程”课程于2009年被评为国家精品课程。

本书在分析过程稳态和动态数学模型的基础上,主要讨论了简单控制系统、复杂控制系统、先进控制系统的结构、原理、特点、适用场合、系统设计及应用等问题,并阐述了过程工业(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,还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、生化过程、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新的发展并重,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。

本书可作为过程控制课程的教材、继续教育教材或参考书,还可供从事过程控制的自动化工作者和高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制工程/俞金寿,顾幸生编著.--新1版.
--北京:高等教育出版社,2012.2
ISBN 978-7-04-034165-2

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第008560号

策划编辑	韩颖	责任编辑	韩颖	封面设计	于文燕	版式设计	余杨
插图绘制	尹莉	责任校对	窦丽娜	责任印制	张福涛		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 北京七色印务有限公司
开 本 787mm×1092mm 1/16
印 张 27
字 数 590千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
版 次 2012年2月第1版
印 次 2012年2月第1次印刷
定 价 41.80元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物 料 号 34165-00

前 言

《过程控制工程》第一版于1992年获得第二届普通高等学校优秀教材全国优秀奖,《过程控制工程》第二版于2002年获得全国普通高等学校优秀教材一等奖,《过程控制工程》第三版被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材并荣获2011年上海市普通高校优秀教材一等奖。由俞金寿教授主持的“过程控制工程”课程于2009年被评为国家精品课程。

近年来,过程控制与整个的工业自动化一样,出现了很大变化,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应用,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代表,在国际和国内都备受关注,得到了广泛的应用,取得了明显的经济效益;智能控制的热潮也已到来,像模糊控制、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。这次再版,我们努力保持前三版的优点,克服原书的缺点。在认真总结教学实践经验、努力适应当前技术发展需要的基础上,更新了部分内容。例如,将工业生产过程监控与操作优化单列一章,加强了自控设计内容,增加应用案例。为使篇幅保持适当,删除了某些比较次要和陈旧的内容。

本书大体上保持原来的体系,保持紧密结合工业过程实际、理论联系实际,基础与先进紧密结合,教学与科研紧密结合,既讲清楚过程控制工程这门传统学科的基础理论,又及时反映本学科领域的最新科技成果,反映我们最近的科研成果。

本书是在俞金寿、蒋慰孙编著的《过程控制工程》第三版的基础上,由俞金寿、顾幸生任主编,刘爱伦、罗健旭、刘漫丹参加了编写。北京化工大学孙洪程教授在百忙之中仔细审阅了书稿,提出了很好的修改建议,在此致以衷心的感谢。由于编者能力和水平有限,书中定有不妥之处,欢迎读者批评指正。编者 E-mail: jshyu1939@126.com, xsgu@ecust.edu.cn。

编 者

2011年10月于华东理工大学

目 录

绪论	1	1.6.2 最小二乘问题的提法	43
0.1 过程控制技术的发展与趋势	1	1.6.3 最小二乘问题的解	45
0.2 当前过程控制系统发展的一些 主要特点	3	1.6.4 最小二乘参数估计的递推 算法	46
0.3 过程控制工程的研究对象与 任务	7	习题和思考题	49
第1章 过程动态数学模型	9	第2章 简单控制系统	50
1.1 过程动态特性	9	2.1 控制系统组成和控制性能指标	50
1.1.1 典型过程动态特性	9	2.1.1 控制系统的组成	50
1.1.2 过程特性对控制性能指标的 影响	12	2.1.2 控制系统的控制性能指标	53
1.2 过程动态数学模型概论	14	2.2 检测变送环节	55
1.2.1 动态数学模型的作用和 要求	14	2.2.1 检测变送原理	55
1.2.2 建立数学模型的基本方法	15	2.2.2 检测变送环节的性能	57
1.3 机理建模方法	17	2.2.3 检测变送器的选择原则	57
1.3.1 动态方程的一般列写方法	17	2.2.4 对检测变送信号的处理	59
1.3.2 机理模型建立的示例	17	2.3 控制阀的选择	61
1.4 系统辨识概述	28	2.3.1 结构形式及材质的选择	61
1.4.1 辨识的定义	28	2.3.2 口径大小及控制阀作用方式 的选择	65
1.4.2 辨识算法的基本原理	30	2.3.3 控制阀的流量特性	66
1.4.3 辨识的内容和步骤	31	2.3.4 控制阀流量特性的选择	69
1.5 非参数模型辨识方法	37	2.3.5 阀门定位器的选择	73
1.5.1 阶跃响应法	37	2.3.6 其他执行器	74
1.5.2 脉冲响应法	39	2.4 控制器的控制算法	75
1.6 最小二乘类系统辨识方法	42	2.4.1 连续PID控制算法	75
1.6.1 基本概念	43	2.4.2 离散PID控制算法	82
		2.4.3 双位控制	85
		2.5 控制器控制规律选择与参数	

整定	87	3.4.1 基本原理	118
2.5.1 控制器控制规律选择	87	3.4.2 前馈控制的主要结构形式	119
2.5.2 控制器的参数整定若干原则	88	3.4.3 前馈控制系统的设计及工程实施中若干问题	120
2.5.3 控制器参数工程整定法	89	3.4.4 前馈控制系统的投运和参数整定	122
2.5.4 控制系统的投运	93	3.4.5 前馈控制系统的应用实例	123
2.6 简单控制系统设计案例——干燥器温度控制	94	3.5 选择性控制系统	124
2.6.1 控制方案设计	94	3.5.1 基本原理和结构	124
2.6.2 过程检测控制仪表的选用	95	3.5.2 选择性控制系统设计和工程应用中的问题	127
习题和思考题	97	3.5.3 选择性控制系统应用实例	128
第3章 复杂控制系统	99	3.6 分程控制系统	130
3.1 串级控制系统	99	3.6.1 不同工况需要不同的控制手段	131
3.1.1 串级控制系统的基本原理和结构	99	3.6.2 扩大控制阀的可调范围	132
3.1.2 串级控制系统的特点	101	3.7 双重控制系统	132
3.1.3 串级控制系统的设计	104	3.7.1 基本原理和结构	132
3.1.4 串级控制系统控制器参数整定及投运	107	3.7.2 双重控制系统设计和工程应用中的问题	133
3.1.5 串级控制系统应用实例	108	3.7.3 双重控制系统应用实例	134
3.2 比值控制系统	109	3.8 基于模型计算的控制系统	135
3.2.1 基本原理和结构	109	3.8.1 质量流量的控制	135
3.2.2 比值系数的计算	110	3.8.2 具有压力补偿的温度控制	136
3.2.3 比值控制系统设计和工程应用中的问题	112	习题和思考题	137
3.2.4 比值控制系统的参数整定和投运	113	第4章 流体输送设备的流量控制	139
3.2.5 比值控制系统应用实例	113	4.1 概述	139
3.3 均匀控制系统	115	4.2 泵与压缩机的流量控制	139
3.3.1 均匀控制系统的基本原理和结构	115	4.2.1 离心系的流量控制	139
3.3.2 均匀控制系统控制规律的选择及参数整定	117	4.2.2 容积式泵的流量控制	142
3.4 前馈控制系统	118		

4.2.3 风机的控制	143	5.6 蒸发器的控制	186
4.2.4 压缩机的控制	144	5.6.1 蒸发器的特性	187
4.2.5 变频调速器的应用	146	5.6.2 蒸发器的主控制回路	187
4.3 离心式压缩机的防喘振控制	146	5.6.3 蒸发器的辅助控制回路	189
4.3.1 离心式压缩机的喘振	146	5.7 工业窑炉的控制	190
4.3.2 防喘振控制系统	147	5.7.1 玻璃窑炉的控制	190
4.3.3 应用实例	152	5.7.2 燃烧式工业窑炉的控制	192
习题和思考题	156	5.7.3 水泥窑炉的控制	195
第5章 传热设备的控制	158	习题和思考题	196
5.1 传热设备的特性	158	第6章 精馏塔的控制	198
5.1.1 传热过程的两个基本 方程式	159	6.1 概述	198
5.1.2 换热器静态特性的基本 方程式	160	6.1.1 精馏过程的分类	198
5.1.3 换热器的静态放大系数	161	6.1.2 精馏塔的控制要求	201
5.1.4 控制方案的分析	162	6.1.3 精馏塔的扰动分析	201
5.2 一般传热设备的控制	163	6.2 精馏塔的特性	202
5.2.1 调节载热体流量	163	6.2.1 精馏塔的静态特性	202
5.2.2 调节载热体的汽化温度	164	6.2.2 精馏塔的动态特性	208
5.2.3 将工艺介质分路	165	6.3 精馏塔产品质量指标选择	209
5.2.4 控制传热面积	166	6.3.1 采用温度作为间接质量 指标	210
5.3 传热设备的热焓与热量控制 方案	167	6.3.2 采用压力补偿的温度作为 间接质量指标	211
5.3.1 热焓控制	167	6.4 精馏塔的控制方案选择	214
5.3.2 热量控制	168	6.5 精馏塔的基本控制	216
5.4 锅炉设备的控制	169	6.5.1 按精馏段指标的控制	216
5.4.1 锅炉汽包水位的控制	170	6.5.2 按提馏段指标的控制	217
5.4.2 锅炉燃烧系统的控制	175	6.5.3 精馏塔的压力控制	219
5.4.3 蒸汽过热系统的控制	179	6.6 精馏塔的复杂控制系统方案	222
5.5 管式加热炉的控制	180	6.6.1 串级控制系统	222
5.5.1 加热炉的简单控制	181	6.6.2 前馈控制系统	223
5.5.2 加热炉的串级控制系统	182	6.7 精馏塔的能量控制	223
5.5.3 安全连锁保护系统	183	6.7.1 浮动塔压控制	224
5.5.4 加热炉的热效率控制	184	6.7.2 能量的综合利用控制	225
		6.7.3 产品质量的“卡边”控制	227

6.7.4 双重控制用于精馏塔节能控制	228	习题和思考题	269
6.7.5 控制两端产品质量	228	第8章 先进控制技术	270
6.8 精馏塔的先进控制	233	8.1 差拍控制系统	270
6.8.1 推断控制	233	8.1.1 差拍控制的基本原理	271
6.8.2 软测量——加氢裂化分馏塔航煤干点软测量	236	8.1.2 达林算法	271
6.8.3 内回流控制	238	8.1.3 V. E. 控制算法	272
6.8.4 预测控制	240	8.2 纯滞后补偿控制系统	272
6.9 精馏塔的优化控制	243	8.2.1 Smith 预估补偿控制方案 ...	272
习题和思考题	248	8.2.2 自适应史密斯预估补偿控制方案	274
第7章 化学反应器的控制	250	8.2.3 应用实例	275
7.1 概述	250	8.3 解耦控制系统	276
7.1.1 化学反应器的控制要求	250	8.3.1 控制回路间的关联	276
7.1.2 化学反应器的基本控制策略	251	8.3.2 相对增益与控制回路选择	276
7.2 化学反应的基本规律	252	8.3.3 减少和消除耦合的途径	278
7.2.1 化学反应速度	252	8.3.4 串接解耦控制	280
7.2.2 化学平衡	253	8.3.5 工业应用实例	282
7.2.3 转化率	254	8.4 模糊控制	284
7.2.4 化学反应器的热稳定性	254	8.4.1 模糊控制的数学基础	285
7.3 化学反应器的动态特性	256	8.4.2 模糊控制器的基本结构	286
7.3.1 化学反应器的基本方程	257	8.4.3 模糊控制器设计实例	289
7.3.2 连续搅拌槽式反应器的动态特性	258	8.5 神经网络控制	292
7.4 化学反应器的基本控制	259	8.5.1 人工神经元和人工神经网络	292
7.4.1 出料成分的控制	259	8.5.2 典型神经网络	295
7.4.2 反应过程的工艺参数作为间接被控变量	260	8.5.3 神经网络建模	297
7.4.3 pH 控制	262	8.5.4 神经网络控制	299
7.4.4 化学反应器的推断控制	263	8.6 专家控制	301
7.4.5 稳定外围的控制	266	8.6.1 专家系统	301
7.4.6 开环不稳定反应器的控制	267	8.6.2 专家控制	302
		8.7 基于模型的预测控制	305
		8.7.1 预测控制基本原理	306
		8.7.2 预测控制算法	307

8.7.3 预测控制软件包的发展	309	9.2.3 工业生产过程容错控制 技术	344
8.8 推断控制与软测量技术	310	9.3 工业生产过程操作优化方法	346
8.8.1 推断控制	310	9.3.1 操作优化的概念	346
8.8.2 软测量技术	314	9.3.2 常用的最优化方法	351
8.9 自适应控制和鲁棒控制	319	9.3.3 操作优化示例	358
8.9.1 自适应控制概述	319	习题和思考题	361
8.9.2 自整定调节器	320	第10章 典型工业生产过程的 控制	362
8.9.3 模型参考型自适应控制 系统	322	10.1 合成氨过程的控制	362
8.9.4 自校正控制系统	323	10.1.1 变换炉的控制	362
8.9.5 自适应控制工业应用 实例	324	10.1.2 转化炉水/碳比控制	363
8.9.6 鲁棒控制	325	10.1.3 合成塔的控制	364
8.10 现场总线控制系统	326	10.2 常减压过程的控制	366
8.10.1 现场总线控制系统的 主要特点	326	10.2.1 常压塔的控制	366
8.10.2 现场总线控制系统	327	10.2.2 减压塔的控制	368
8.11 综合自动化系统	331	10.3 催化裂化过程的控制	369
8.11.1 综合自动化的意义	331	10.3.1 催化裂化过程反应-再生 系统的控制	369
8.11.2 综合自动化系统的特点	333	10.3.2 裂解气分馏塔的控制	370
8.11.3 工业生产过程计算机集成 控制系统的构成	334	10.3.3 吸收-稳定系统的控制	371
习题和思考题	334	10.4 乙烯生产过程的控制	372
第9章 工业生产过程监控与操作 优化	336	10.4.1 裂解过程的控制	373
9.1 工业生产过程监控技术	336	10.4.2 分离过程的控制	376
9.1.1 过程监控的意义	336	10.5 聚合过程的控制	379
9.1.2 过程监控的一般步骤	337	10.5.1 聚对苯二甲酸乙二醇 (聚酯)过程的控制	379
9.2 故障检测诊断与容错控制 技术	338	10.5.2 聚氯乙烯过程的控制	381
9.2.1 工业生产过程的故障检测 与诊断的一些概念	338	10.5.3 聚乙烯过程的控制	383
9.2.2 故障检测与诊断的主要 方法	340	10.6 生化过程的控制	387
		10.6.1 常用生化过程的控制	387
		10.6.2 啤酒发酵过程的控制	390
		10.7 制浆造纸过程的控制	392
		10.7.1 制浆造纸过程浓度与配浆	

的控制	392	附录 1 工程设计表达与图例符号	
10.7.2 硫酸盐法制浆过程的		规定	404
控制	394	附录 2 控制系统设计文件目录	414
10.8 冶金过程的控制	396	附录 3 自控专业工程设计用标准及	
10.8.1 转炉炼钢过程的控制	396	规范	416
10.8.2 氧化转炉炼钢控制	399	参考文献	419
10.8.3 初轧生产过程的控制	401		
习题和思考题	403		

绪 论

0.1 过程控制技术的发展与趋势

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。控制理论与其他任何学科一样,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,可以追溯到我国古代,如指南车的出现。至于工业上的应用,一般以瓦特的蒸汽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。这时候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 1932 年 Nyquist 频率域分析技术和稳定判据的产生。Bode 于 1945 年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,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要首推 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,直到目前为止,在工业过程控制中有 80% ~ 90% 的系统还使用 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。即便对这些极简单对象的描述及控制任务,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 年代航空航天领域对运载火箭、人造卫星、导弹、飞机等各类飞行器进行精确控制的需求催生了现代控制理论,现代控制理论是以状态空间方法为基础,以极小值原理和动态规划方法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 (LOG) 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、典型型、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参数估计、随机控制、自适应控制以及鲁棒控制等各种理论分支,使控制理论的内容愈来愈

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,在其他领域也有一些应用,但总体上远不如经典控制理论,特别是工业过程控制领域。究其原因,是实际工业过程存在很多不确定因素,难于建立精确数学模型,现代控制理论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。其核心思想是系统的分解与协调,多级递阶优化与控制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 年代以来极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理论控制方法之后,成为新一代的控制理论方法。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、空调器、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会看到,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。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,当前最主要的是三种形式:① 专家系统;② 模糊控制;③ 人工神经网络控制。它们可以单独应用,也可以与其他形式结合起来;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,已经经历了四个阶段。20 世纪 50 年代是以基地式控制仪表等组成的控制系统,像自力式温度控制器、就地式液位控制器等,它们功能往往限于单回路控制,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,已延续四十多年,目前国内还广泛应用。由单元组合仪表组成的控制系统,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,实现多层次计算机网络构成的管控一体化系统即综合自动化。同时,以现场总线为标准,实现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。

0.2 当前过程控制系统发展的一些主要特点

一、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。随着企业提出的高柔性、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”。

先进控制策略的实现一般有三种实施方法:用先进控制算法取代原有的PID控制系统;用先进控制算法改变原有PID控制系统的设定值;先进控制算法与原有的PID控制系统结合为一个整体,从表面上看,它是PID控制系统,实质上,它是一个先进控制系统。

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,这些软件包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:过程变量的采集与处理;过程模型的辨识;故障检测、预报、诊断与处理;产品化的软件与技术服务;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。

二、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的问题。借助优化可使得整个生产过程获得很大的经济效益和社会效益。在过程优化中,主要寻找最佳的工艺参数设定值以获得最大的经济效益,这称之为稳态优化。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、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发展,另一方面向精细化发展。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(SAA——Simulated Annealing Algorithm);趋化性算法(CA——Chemotaxis Algorithm);遗传算法(GA——Genetic Algorithm);混沌算法(COA——Chaos Optimization Algorithm);免疫算法(IA——Immune Algorithm);蚁群算法(ACA——Ant Colony Algorithm);微粒群优化算法(PSOA——Particle Swarm Optimization Algorithm)等。

三、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)是发展于上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以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化和复杂化,故障检测与诊断技术也愈来愈受到人们的重视。

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、人工智能等学科理论。

故障检测诊断系统要提高故障的正确检测率。要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。

故障诊断技术经过十几年的迅速发展,到目前为止已经出现了基于各种不同原理的众多的方法。同以前相比,这些方法不论是检测性能、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,内容充实很多,在工程实践中也得到了一些应用,取得了较为满意的效果;但同时也暴露出许多尚待解决的问题,例如:自适应性、综合诊断、阈值、实际应用等。

四、综合自动化系统是发展方向

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剧烈竞争的刺激下,特别是流程工业还受到环境保护的巨大社会压力。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了当前自动化发展的趋势。

综合自动化系统结构如图 0-1 所示,综合自动化系统可以分为过程控制系统(Process Control System, PCS)、制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)和经营计划系统(Business Planning System, BPS),此层又称为企业资源规划层(Enterprise Resource Planning, ERP)等三层结构。

过程控制系统主要包括过程的数据采集与处理,简单控制系统、常用复杂控制系统、基本数据的统计与分析等;经营计划系统包括资产管理、财务管理和人力资源在内的生产企业资源计划、产品和工艺设计、供应链管理、电子商务以及销售服务管理等涉及经营与生产管理的内容;其中间层制造执行系统主要完成:① 全流程价值链分析,给出产量、质量、消耗、成本及效益等有关综合生产指标的目标值;② 生产计划与调度,在满足各种约束条件下编制产量、质量、消耗、成本、设备运行等生产计划,并提出不同时间尺度的生产计划分解以及相应的生产调度计划;③ 综合生产指标优化,根据全流程模型和约束条件,求解出最优工艺操作指标和工艺约束范围;④ 生产运作管理,给出生产质量、物耗等作业标准、操作允许限等,指挥生产过程的进行和资源的供应和配送。同时还要对生产设备进行动态管理,包括设备的故障诊断与预报维修等;⑤ 先进控制与操作优化,通过先进控制策略和优化模型的求解,保证各项生产指标的实现,使生产运作在优化状态;⑥ 生产过程的实时监控,对整个生产过程进行检测,并不断与各种保证的标准和指标进

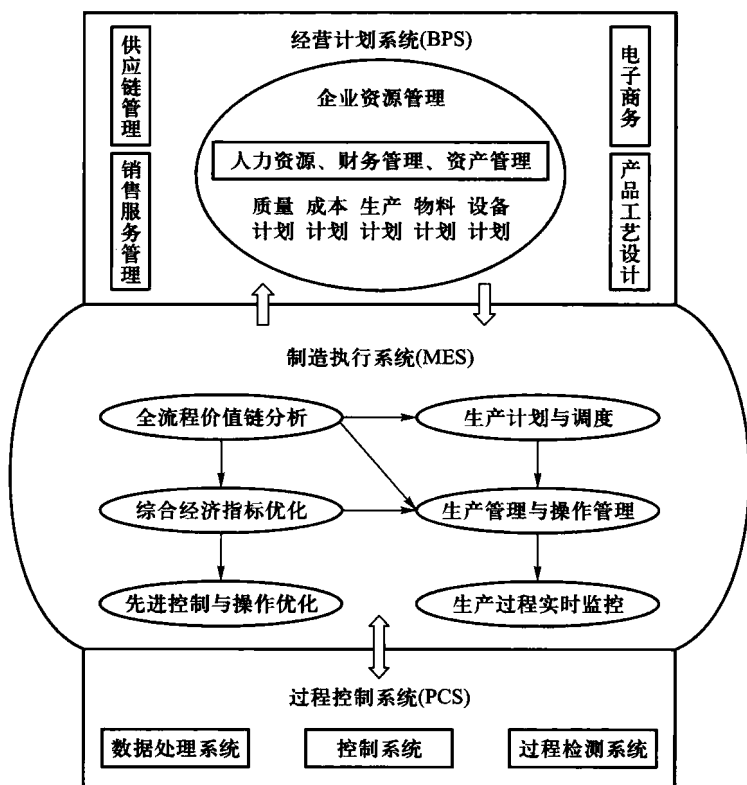


图 0-1 综合自动化系统结构图

行比较和分析,对异常工况进行监督报警和提示。所以 MES 层既执行生产的实时控制与操作管理,又实现了 BPS 与 PCS 这两层的连接,起到了承上启下的作用。

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(humanware)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。综合自动化系统主要特点有:

1. 系统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在秒级,先进控制的周期在分级,操作优化的周期在小时级,调度的周期以天计,计划的周期以月、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中不可直接测量变量的估计信息以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。

0.3 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,研究的任务是对过程控制系统进行分析与设计。工业生产过程对过程控制要求主要是安全性、经济性和稳定性。安全性是指在整个生产过程中,确保人身和设备的安全,这是最重要的也是最基本要求。通常是采用参数越限报警、事故报警和连锁保护等措施加以保证。经济性是指在生产同样数量和质量产品所消耗的能量和原材料最少,需花费的各项生产和管理的支出最少,也就是要求生产成本最低而生产效率最高。最后稳定性是指系统具有抑制各种干扰,保持生产过程长期稳定运行的能力。过程控制的任务就是在了解、掌握工艺流程和生产过程静态和动态特性基础上,应用相关理论对控制系统进行分析和设计以满足安全性、经济性和稳定性。

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。

过程控制工程是以过程控制系统为主体,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,学科结构如图 0-2 所示。

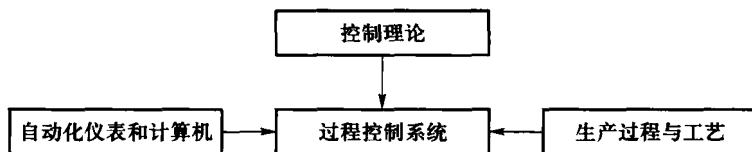


图 0-2 过程控制工程学科的结构

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),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