

普通高等学校自动化工程技术实践系列教材

先进过程控制技术

主编 陈剑雪

参编 张颖 罗晓 吴健珍 华勇

主审 张莉萍

清华大学出版社

普通高等学校自动化工程技术实践系列教材

先进过程控制技术

陈剑雪 主编

张颖 罗晓 吴健珍 华勇 参编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书重点介绍了复杂控制系统、解耦控制、纯滞后补偿控制、预测控制、自适应控制以及鲁棒控制、软测量技术的原理与实现方法、神经网络控制等,并辅以一系列先进控制系统的计算机仿真。本书共9章,第一部分为过程控制系统的基础知识和先进控制技术概述(第1、2章),介绍了过程模型的类型、先进控制技术的特点和应用、过程控制系统的基本概念和建模方法;第二部分为复杂控制系统建模(第3章),介绍了串级控制系统、前馈控制系统、比值控制系统等典型复杂控制系统的原理和结构;第三部分为先进控制技术的介绍(第4~9章),讲解了解耦控制系统、史密斯预估控制系统、预测控制系统、神经网络控制系统等典型先进控制系统的基本原理和设计方法,以及软测量方法和应用。

本书重点突出,应用性强,可作为普通高校生产自动化专业及自动化相关专业的本科教材,也可作为研究生和相关领域应用工程师的参考书。

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

先进过程控制技术/陈剑雪主编.--北京:清华大学出版社,2014

普通高等学校自动化工程技术实践系列教材

ISBN 978-7-302-35615-8

I. ①先… II. ①陈… 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(2014)第045036号

责任编辑:孙 坚 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址:<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 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:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17 字 数:411千字

版 次:2014年4月第1版 印 次:2014年4月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:35.00元

产品编号:057815-01

前言

FOREWORD

先进控制是对那些不同于常规单回路控制,并具有比常规 PID 控制更好的控制效果的控制策略的统称,通常用于处理复杂的多变量过程控制问题。先进控制的核心内容应包括基于数据采集及预处理、数学模型建立、软测量技术、先进控制策略和工程实施的全部内容。先进控制采用了合理的控制目标和控制结构,可更好地适应工业生产过程的需要,对于提高产品质量以及节能环保等均起着十分重要的作用,先进控制技术已成为工程技术人员和管理人员必备的科学技术知识。

本书将先进控制理论与先进控制系统应用相结合,介绍了过程控制系统和先进控制系统的基本概念、先进控制技术的特点和应用、过程控制系统的建模方法、解耦控制系统的原理和设计方法、纯滞后补偿控制系统的常见类型和基本原理、预测控制的方法和应用、自适应控制和鲁棒控制的基本原理、软测量技术原理及常见的软测量方法,以及神经网络控制,给出了常见先进控制系统的设计方法,并辅以一定的计算机仿真。通过本书的学习,读者可以循序渐进地掌握先进控制技术的知识并能进行一些简单先进控制系统的设计和计算机仿真。本书是编者根据多年从事自动化及相关专业的实践工作经验和教学经验编写的,注重理论联系实际,以及内容的系统性和可教性。

本书编写分工如下:上海工程技术大学陈剑雪编写第 1、2、4、5、8 章,张颖编写第 9 章,罗晓编写第 7 章,吴健珍编写第 6 章,华勇编写第 3 章。上海工程技术大学张莉萍教授为本书的主审。在本书的编写过程中,得到了学院领导和老师们的支持和帮助,编者对所有给予本书以帮助的老师表示衷心的感谢。

由于时间仓促,编者水平有限,尽管我们尽了很大努力,但缺点和错误仍在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

2014 年 3 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 控制理论与工程的发展	1
1.2 过程控制技术的发展、现状与展望	5
1.3 过程控制系统概述	8
1.3.1 系统结构	8
1.3.2 系统特点	10
1.3.3 系统分类	11
1.4 过程控制系统的性能指标	11
1.5 先进过程控制	13
第 2 章 过程控制系统建模	17
2.1 过程模型概述	17
2.1.1 过程数学模型的表达形式	17
2.1.2 过程建模的目的与要求	18
2.1.3 过程模型的特点	18
2.1.4 过程特性参数	19
2.2 过程模型类型	21
2.3 过程建模基础	24
2.3.1 过程建模法分类	24
2.3.2 响应曲线法建模	26
2.4 单容过程模型	27
2.4.1 自衡单容过程	28
2.4.2 无自衡单容过程	30
2.5 多容过程模型	30
2.5.1 无相互影响的双容过程	31
2.5.2 有相互影响的双容过程	33
2.6 阶跃响应曲线方法建模	35
第 3 章 常用复杂控制系统	37
3.1 串级控制系统	37

3.1.1	串级控制系统的结构	37
3.1.2	串级控制系统的优点	39
3.1.3	串级控制系统的设计	40
3.2	比值控制系统	42
3.2.1	比值控制系统的结构	43
3.2.2	比值控制系统的实施方案	45
3.2.3	比值控制系统的投运与参数整定	46
3.3	均匀控制系统	47
3.3.1	均匀控制系统的结构	48
3.3.2	均匀控制系统的优点	48
3.3.3	均匀控制规律与参数整定	49
3.4	前馈控制系统	50
3.4.1	前馈控制的基本原理	50
3.4.2	前馈控制系统的优点	51
3.4.3	前馈控制系统的结构	51
3.5	选择性控制系统	54
3.5.1	选择性控制系统的类型	54
3.5.2	积分饱和及其防止	56
第4章	解耦控制系统	57
4.1	系统的关联分析	57
4.1.1	解耦控制系统概述	57
4.1.2	关联分析	58
4.2	相对增益	60
4.2.1	相对增益的定义	60
4.2.2	求取相对增益的方法	61
4.2.3	相对增益的性质	65
4.2.4	动态相对增益	67
4.3	减少与解除耦合的途径	69
4.4	静态解耦和动态解耦	71
4.5	解耦控制系统的设计	75
4.6	仿真实例	79
第5章	补偿控制系统的设计	90
5.1	纯滞后系统概述	90
5.2	纯滞后对控制质量的影响	91
5.3	补偿控制的基本原理与结构	93
5.4	改进型常规控制方案	94
5.5	史密斯预估补偿控制	96

5.6	改进的史密斯预估控制	99
5.6.1	增益自适应补偿方案	99
5.6.2	大纯滞后过程的双控制器	101
5.7	史密斯预估器与高级控制算法的结合	103
5.7.1	单神经元-史密斯预估控制	103
5.7.2	模糊-史密斯预估控制	105
5.8	观测补偿器控制	107
5.8.1	基本原理和结构	107
5.8.2	观测补偿器控制方案	108
5.9	仿真实例	111
5.9.1	史密斯预估补偿控制系统的仿真	111
5.9.2	增益自适应补偿控制系统的仿真	114
5.9.3	双控制器补偿控制系统的仿真	117
第 6 章	预测控制	120
6.1	引言	120
6.2	预测控制的基本原理	123
6.3	预测控制算法	125
6.3.1	动态矩阵控制	125
6.3.2	模型算法控制	130
6.3.3	广义预测控制	133
6.3.4	仿真实例	138
第 7 章	自适应控制和鲁棒控制	142
7.1	简单自适应控制系统	142
7.1.1	自适应控制概述	142
7.1.2	自适应控制的基本原理和类型	142
7.1.3	自适应控制的应用概况	144
7.2	模型参考型自适应控制系统	149
7.2.1	引言	149
7.2.2	模型参考自适应控制系统的数学描述	150
7.2.3	模型参考自适应系统的设计	155
7.3	自校正控制系统	163
7.3.1	自校正控制基本概念	163
7.3.2	最小方差自校正调节器	164
7.3.3	极点配置自校正控制器	170
7.4	鲁棒控制	171
7.4.1	引言	171
7.4.2	不确定性描述与鲁棒性分析	172

7.4.3	对象的不确定模型	173
7.4.4	鲁棒稳定性	175
7.4.5	鲁棒性能	176
第 8 章	软测量技术	179
8.1	软测量技术概论	179
8.1.1	软测量的辅助变量的选择	180
8.1.2	软测量的数据选择与处理	181
8.1.3	软测量的模型辨识与验证	182
8.2	最小二乘建模	185
8.2.1	最小二乘法	185
8.2.2	最小二乘模型	185
8.2.3	最小二乘法的解	186
8.3	多元线性回归	188
8.3.1	多元线性回归模型	188
8.3.2	回归参数的最小二乘估计	189
8.3.3	多元线性回归模型的统计检验	190
8.4	多元逐步回归法	192
8.4.1	变量选择问题	192
8.4.2	多元逐步回归方法的计算步骤	193
8.5	主元分析方法	194
8.5.1	主元分析	194
8.5.2	主元分析的基本思想	195
8.5.3	主元分析的一般数学模型	196
8.5.4	主元分析的推导	197
8.5.5	主元分析的计算步骤	198
8.5.6	主元分析方法	199
8.5.7	NIPALS 方法	200
8.5.8	主元的主要性质	200
8.5.9	软测量中应用主元回归方法	201
8.6	支持向量机及在软测量中的应用	202
8.6.1	统计学习理论和支持向量机	202
8.6.2	最小二乘支持向量算法	206
8.7	人工神经网络及在软测量中的应用	208
8.7.1	神经元软测量技术的改进	208
8.7.2	基于神经网络的软测量	210
第 9 章	神经网络控制	212
9.1	概述	212

9.2	神经网络控制的设计与实现	221
9.2.1	神经网络控制的设计	221
9.2.2	神经网络控制的实现	222
9.3	神经 PID 控制	230
9.3.1	神经 PID 控制的结构	230
9.3.2	神经 PID 控制的设计	232
9.4	神经自校正控制	244
9.4.1	神经自校正控制的结构	246
9.4.2	神经自校正控制的设计	247
9.5	神经模型参考自适应控制	251
9.5.1	神经模型参考自适应控制的结构	251
9.5.2	神经模型参考自适应控制的设计	252
9.6	神经控制技术及应用及存在的问题	256
参考文献		261

第1章

绪 论

1.1 控制理论与工程的发展

工业过程自动化首先来自于传统机械制造业生产方式的变更,即从汽车流水线开始的。1946年美国福特汽车公司副经理哈特首先提出用“自动化”一词来描述这种流水线。1947年4月,福特汽车公司建立了自动化研究部门,被称做自动化工程师的专家到这个部门工作。不到3年的时间,使汽车成本下降到原来的近1/3,只用8年的时间就使汽车销售价格下跌到原来的9%,使汽车走进了普通家庭。汽车工业的发展,带动了冶金、化工、石油等工业,促进了连续生产过程自动化的发展。

控制与自动化的发展回顾如下。

1) 自动控制装置的出现与应用(18世纪以前)

古代人类在长期的生产和生活中,为了减轻自己的劳动,逐渐利用自然界的动力(风力、水力等)代替人力、畜力,以及用自动装置代替人的部分繁重的脑力活动和体力活动。例如:公元前14—前11世纪,中国和巴比伦出现了自动计时装置——刻漏等。17世纪以来,在欧洲一些国家相继出现了多种自动装置。法国物理学家B.帕斯卡(Pascal)于1642年发明了加法器;荷兰机械师C.惠更斯于1657年发明了钟表,提出钟摆理论,并利用锥形摆作调速器;英国机械师E.李于1745年发明了带有风向控制的风磨,利用尾翼来使主翼对准风向;俄国机械师И.И.波尔祖诺夫于1765年发明了浮子阀门式水位调节器,用于蒸汽锅炉水位的自动控制。

2) 自动化技术形成时期(18世纪末至20世纪30年代)

1788年J.瓦特将离心式调速器与蒸汽机的阀门连接起来,构成蒸汽机转速的闭环自动调速系统,如图1-1所示。这项发明对第一次工业革命和控制理论后来的发展有重要影响。

(1) 自动调节的广泛应用

由于第一次工业革命的需要,人们开始采用自动调节器(regulator)或装置,使一些物理

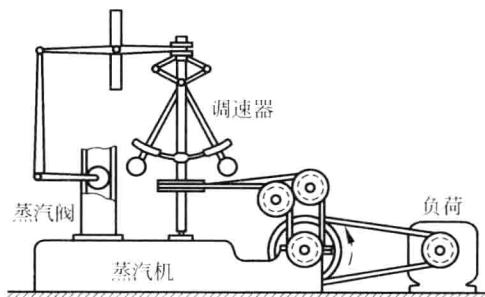


图 1-1 蒸汽机转速的闭环自动调速系统

量保持在给定值附近。自动调节器和被控制对象(如蒸汽机或船舵等)组成自动调节系统(automatic regulation system)。

1868年法国工程师J. 法尔科(Farcot)发明反馈调节器,并把它与蒸汽阀连接起来,操作蒸汽船的舵,他称之为伺服机构(servo-mechanism)。到了20世纪20—30年代,美国开始采用PID调节器(比例-积分-微分调节器),这是一种模拟式调节器,现在还在许多工厂中使用。

(2) 自动调节系统的稳定性问题

当时人们发现在蒸汽机转速的闭环自动调速系统中,系统的被控制量(蒸汽机转速)忽高忽低,即系统发生振荡(不稳定),这使得一些科学家从理论上加以研究,1877年英国数学家E. 劳斯、1895年德国数学家A. 胡尔维茨提出代数稳定判据,沿用到现在。1892年俄国数学家A. 李雅普诺夫提出稳定性的严格数学定义并发表了专著,他的稳定性理论至今还是研究分析线性和非线性系统稳定性的重要方法。

(3) 反馈控制和频率法

进入20世纪以后,工业生产中广泛应用各种自动调节装置,促进了对调节系统的分析和综合的研究。通过在解决电子管放大器失真问题上的研究,1927年美国电气工程师H. 布莱克(Black)引入反馈概念,使人们对自动调节系统中反馈控制的结构有了更深刻的认识。此后在拉普拉斯变换的基础上,传递函数的观念被引入到分析自动调节系统或元件上,成为重要工具。1932年美国电信工程师N. 奈奎斯特提出著名的稳定判据,可以根据开环传递函数判定闭环反馈系统的稳定性。代数稳定判据加上1922年N. 米诺尔斯基发表的“关于船舶自动操舵的稳定性”和1934年美国H. L. 黑曾(Hazen)发表的“关于伺服机构理论”论文,标志着经典控制理论的诞生。

3) 局部自动化时期(20世纪40—50年代)

20世纪40年代是自动化技术和理论形成的关键时期。一些科学家为了解决军事上提出的火炮控制、鱼雷导航、飞机导航等技术问题,逐步形成了以分析和设计单变量控制系统

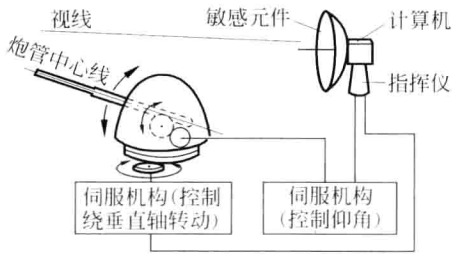


图 1-2 自动防空火力控制系统

为主要内容的经典控制理论与方法。机械、电气和电子技术的发展为生产自动化提供了技术手段。在第二次世界大战期间,为了解决防空火力控制系统和飞机自动导航系统等军事技术问题,各国科学家设计出各种精密的自动调节装置,开创了防空火力系统和控制这一新的科学领域。自动防空火力控制系统如图 1-2 所示。

1946年,美国福特公司的机械工程师D. S. 哈德首先提出用自动化一词来描述生产过程的自动操作。1947年建立第一个生产自动化研究部门。1952年J. 迪博尔德第一本以自动化命名的《自动化》一书出版,他认为“自动化是分析、组织和控制生产过程的手段”。实际上,自动化是将自动控制用于生产过程的结果。20世纪50年代以后,自动控制作为提高生产率的一种重要手段开始推广应用。

(1) 经典控制(classical control)理论的形成和发展(1930—1960年)

在代数稳定判据和传递函数、依据频率响应的频率法判据的基础上,加上W. 埃文斯

(Evans)1948年提出的根轨迹法(root locus method),奠定了适宜用于单变量控制问题的经典控制理论的基础。频域法成为分析和设计线性单变量自动控制系统的主要方法。第二次世界大战后工业迅速发展,随着高速飞行、核反应堆、大电力网和大化工厂提出的新控制问题——非线性系统、时滞系统、脉冲及采样控制系统、时变系统、分布参数系统和有随机信号输入的系统的控制问题等的深入研究,经典控制理论在20世纪50年代有了新的发展。

(2) 局部自动化的广泛应用

第二次世界大战后,在工业上已广泛应用PID调节器,并用电子模拟计算机来设计自动控制系统。当时在工业上实现局部自动化,即单个过程或单个机器的自动化。当时的PID调节器是电动的或气动的、液压的。在20世纪30—40年代出现了统一信号的、通用的、标准的气动单元组合仪表。

(3) 电子数字计算机的发明

1946年由美国宾夕法尼亚大学设计和制造的电子数字积分器和计算器(electronic numerical integrator and calculator, ENIAC)是世界第一台电子计算机。电子数字计算机的发明,为20世纪60—70年代开始的在控制系统广泛应用程序控制和逻辑控制以及应用数字计算机直接控制生产过程,奠定了基础。

4) 综合自动化时期(20世纪50年代末至今)

20世纪50年代研制出了电动单元组合仪表。这些为工业自动化提供了必不可少的技术工具,并使得构成和设计自动控制系统更简便、更工程化了。智能化的仪表和控制器是当时应用较为广泛的产品。20世纪50年代末到60年代初,出现计算机控制的化工厂;60年代末在制造业中出现了许多自动生产线,工业生产开始由局部自动化向综合(全局)自动化方向发展;70年代出现用专用机床组成的无人工厂;80年代初出现用柔性制造系统组成的无人工厂。

20世纪70年代微处理机的出现对实现各种复杂的控制任务起了重大的推动作用。目前小型计算机或单片计算机已成为复杂自动控制系统的一个组成部分,以实现复杂的控制和算法。复杂工业过程和航天技术的自动控制问题,都是多变量控制系统的分析和综合问题,迫切需要加以解决。但经典的控制理论的直接应用遇到了困难。

1956年,苏联数学家庞特里亚金提出极大值原理,同年美国数学家R. 贝尔曼创立动态规划。两者为解决最优控制问题提供了理论工具。1960年美国数学家R. 卡尔曼提出能控性和能观性两个概念,揭示了系统的内在属性。以上标志着现代控制理论的诞生,并得以迅速发展,形成了多个重要分支:系统辨识、自适应控制和自校正控制器、遥测、遥控和遥感、综合自动化、大系统理论、模式识别和人工智能、智能控制。现代控制理论的发展,解决了经典控制理论所不能解决的许多理论问题和工程问题。在自动控制技术的发展中,由于经典控制理论便于工程应用,今后还将继续发挥其理论指导作用,而现代控制理论则可以补其不足。两者相辅相成,不断推动自动控制理论和应用的发展。现代控制理论的主要分支及所研究的内容包含了线性系统理论、最优控制、随机系统理论和最优估计、系统辨识、自适应控制、非线性系统理论、鲁棒性分析与鲁棒控制、分布参数控制、离散事件控制及智能控制等。

(1) 线性控制理论

线性系统是一类最为常见的系统,也是控制理论中讨论得最为深刻的系统。该分支着

重于研究线性系统状态的运动规律和改变这种运动规律的可能性和方法,以建立和揭示系统结构、参数、行为和性能间的确定的和定量的关系。通常,研究系统运动规律的问题称为分析问题,研究改变运动规律的可能性和方法的问题则为综合问题。线性系统理论的主要内容有:系统结构性问题,如能控性、能观性、系统实现和结构性分解等;线性状态反馈及极点配置;镇定;解耦;状态观测器等。

(2) 最优控制

最优控制理论是20世纪50年代中期在空间技术的推动下开始形成和发展起来的。美国学者R. 贝尔曼1957年提出的动态规划和苏联学者庞特里亚金1958年提出的极大值原理,对最优控制理论的形成和发展起了重要的作用。线性系统在二次型性能指标下的最优控制问题则是卡尔曼在20世纪60年代初提出和解决的。

最优控制是现代控制理论的核心,它研究的主要问题是:在满足一定约束条件下,寻求最优控制策略,使得性能指标取极大值或极小值。

(3) 系统辨识、建模与仿真

要精确地研究自动控制系统的稳定性和控制的品质等重要问题,必须用微分方程、拉普拉斯变换等高等数学的工具,来描述每一个环节或元件以及它们组成的自动控制系统。这些微分方程(或拉普拉斯变换后组成的传递函数)被相应地称为环节(元件)和系统的数学模型。

系统辨识是现代控制理论中的一个分支,其根据系统的输入、输出数据为系统建立数学模型。此外建立数学模型还可以采用解析法和实验方法。通过辨识建立数学模型的目的是估计表征系统行为的重要参数,建立一个能模仿真实系统行为的模型,用当前可测量的系统的输入和输出预测系统输出的未来演变以及设计控制器。通常有必要在仿真设备上试验系统,包括建立、修改、复现系统的模型,这就称为系统仿真。

(4) 自适应控制

自适应控制能在对象数学模型变动和系统外界信息不完备的情况下,改变计算机控制的反馈控制器的特性,以保持良好的工作品质。自适应控制实质上是系统辨识与控制技术的结合,通常有自校正控制系统、模型参考自适应控制系统两种类型。

(5) 遥测、遥控和遥感

遥测是对被测对象的某些参数进行远距离测量;遥控是对被控对象进行远距离控制;遥感是利用装载在飞机或人造卫星等运载工具上的传感器,收集由地面目标物反射或发射出来的电磁波,再根据这些数据来获得关于目标物(如矿藏、森林、作物产量等)的信息。

遥测、遥控主要用于人们不易接近的对象,如危险区域、高速运转的物体、高空或地下水(水下)目标、分散的群体等。遥感技术最初用于地形、地物勘测,随着各种遥感器和遥感平台的出现和发展,遥感已广泛用于国土普查、资源调查、环境监测、灾情监测、气象预报以及军事侦察。

(6) 大系统理论

20世纪60年代末开始对出现的大系统——如大电力系统、化工联合企业、钢铁联合企业及社会经济大系统等进行研究。大系统的特征是:规模庞大、结构复杂(环节较多、层次较多或关系复杂)、目标多样、影响因素众多,且常带有随机性。这类系统不能采用常规的建模方法、控制方法和优化方法来分析和设计,因为常规方法无法通过合理的计算工作得到满

意的解答。大系统理论是关于大系统分析和设计的理论,包括大系统的建模、模型降阶、递阶控制、分散控制和稳定性等内容。

(7) 模式识别和人工智能

模式识别(pattern recognition)是对感知信号(图像、视频、声音等)进行分析,对其中的物体对象或行为进行判别和解释的过程。模式分类是模式识别的主要任务和核心研究内容。由于模式识别的对象是存在于感知信号中的物体和现象,它研究的内容还包括信号、图像和视频的处理、分割、形状和运动分析等,以及面向应用(如文字识别、语音识别、生物认证、医学图像分析、遥感图像分析等)的方法和系统研究。

人工智能(artificial intelligence, AI)是研究用计算机来模拟人的某些思维过程和智能行为(如学习、推理、思考、规划等)的学科,主要包括计算机实现智能的原理、制造类似于人脑智能的计算机,使计算机能实现更高层次的应用。该领域的研究包括机器人、语言识别、图像识别、自然语言处理和专家系统等。人工智能更关心符号信息和知识的推理,而模式识别更关心感知信息的处理。

(8) 智能控制

随着人工智能和计算机技术的发展,已经有可能把自动控制和人工智能以及系统科学中一些有关学科分支(如系统工程、系统学、运筹学、信息论)结合起来,建立一种适用于复杂系统的控制理论和技术。智能控制正是在这种条件下产生的。它是自动控制技术的最新发展阶段,也是用计算机模拟人类智能进行控制的研究领域。智能控制(intelligent controls)在无人干预的情况下能自主地驱动智能机器实现控制目标。它的特点是具有智能,能解决一些以往的自动控制解决得不好或者不能解决的控制问题。

它将人工智能中的专家系统、学习控制、模糊逻辑控制和具有多层感知器的神经网络等分别与自动控制和系统工程的一些方法相结合,形成一些新的、具有独特性能的智能自动控制系统,例如智能机器人。

1.2 过程控制技术的发展、现状与展望

1. 过程工业

过程工业大致可分为连续过程工业、离散过程工业和间歇过程工业三大类。过程控制主要是指连续过程工业的控制。连续过程工业涉及的工业部门十分广泛,例如石化、电力、冶金、造纸、化工、医药等。连续工业的发展对我国国民经济有着十分重要的意义。随着我国国民经济的迅速发展,连续工业也在以空前的速度增长。但在生产规模、经济效益、品种、质量以及环境保护等方面与发达国家相比差距仍很大,在国际竞争中面临严峻的形势。因此,必须采用高新技术改造传统工业,以提高我国工业的国际竞争能力。

在工业生产过程中,对各个工艺生产过程中的物理量(或称工艺变量),有着一定的控制要求。有些工艺变量直接表征生产过程,对产品的数量和质量起着决定性的作用。例如,精馏塔的塔顶或塔釜温度,一般在操作压力不变的情况下必须保持一定,才能得到合格的产品;加热炉出口温度的波动不能超出允许范围,否则将影响分馏效果;化学反应器的反应温度必须保持平稳,才能使效率达到指标。有些工艺变量虽不直接影响产品的数量和质量,

然而保持其平稳却是使生产获得良好控制的前提。例如,用蒸汽加热反应器或再沸器,在蒸汽总压波动剧烈的情况下,要把反应温度或塔釜温度控制好会变得极为困难;中间储槽的液位高度和气柜压力必须维持在允许范围之内,才能使物料平衡,保持连续的均衡生产。有些工艺变量是决定安全生产的因素,例如,锅炉汽包的水位、受压容器的压力等,不允许超出规定的限度,否则将威胁生产的安全。还有一些工艺变量直接决定产品的质量,例如,某些混合气体的组成、溶液的酸碱度等。对于以上各种类型的变量,在生产过程中都必须加以必要的控制。

随着现代工业的高速发展,生产规模扩大,过程更为复杂。过程控制的目标不再局限于对某几个生产过程变量的平稳操作。过程控制目标体现出综合性。如:包含节约能源、环境保护、提高经济效益等控制指标。过程控制的任务是了解工艺流程和动静态特性,实现生产过程的控制目标;解决连续过程工业的控制问题,提高连续工业市场竞争能力的迫切要求,促使过程控制把目标放到提高产品质量、节省能源、降低成本、提高生产过程的柔性以适应多变市场的需要这个高度上来。

2. 过程工业的特点

连续工业有明显不同于离散工业和间隙工业的特点,主要表现在以下方面。

(1) 连续工业生产过程伴随着物理化学反应、生化反应、相变过程及物质和能量的转换和传递,因而是一个十分复杂的工业大系统。系统本身存在的复杂性、不确定性和非线性等因素,决定了对它进行控制的困难程度。

(2) 连续生产过程常常伴随十分苛刻的生产条件和环境,如高温、高压、低温、真空,有时甚至是易燃、易爆或存在有毒物质,因此生产的安全性十分重要,对一些关键设备或关键生产过程必须有故障预报和诊断,有时还需要非正常工况下的连锁保护和自启停以保证人身和设备的安全。

(3) 连续生产过程强调生产过程的实时性、整体性,因而应从全局出发协调和处理装置间复杂的耦合、制约关系,求得全局最优。所以,采用集成和智能的理论和来处理这类问题几乎是唯一的出路。

连续生产过程的特点决定了过程控制的艰难进程,但它在国民经济中的重要地位和可望获得的巨大效益使得过程控制在近年来有了飞速的发展。

3. 过程控制的发展过程

过程控制的发展是与控制理论、仪表、计算机以及有关学科的发展紧密相关的。纵观过程控制发展的历史,大致经历了以下几个阶段。

(1) 20世纪50年代前后,经典控制理论发展成熟。一些工厂企业实现了仪表化和局部自动化。这一阶段中,过程控制系统结构大多数是单输入、单输出定值控制系统,用以消除扰动,保持被控变量的稳定。控制要求是安全、平稳。检测和控制仪表普遍采用基地式仪表,将控制器、检测变送装置、显示记录装置乃至执行器合为一体,能完成单回路控制系统的就地检测、记录及调节等全部功能。基地式仪表的优点是简单实用,然而无法用于复杂控制系统。

(2) 20世纪60年代至70年代初期,随着工业生产的发展,对过程控制的要求逐步提高,复杂工业过程和航天技术的自动控制问题,都是多变量控制系统的分析和综合问题,迫

切需要加以解决。但经典的控制理论的直接应用遇到了困难。随着现代控制理论的形成和发展,各种复杂控制系统应用于生产,如串级控制、比值控制、均匀控制和分程控制等,进而出现了选择性控制、前馈控制。这些复杂控制系统解决了简单控制系统难以控制的问题。此外,多变量控制系统、动态最优控制系统以及多种先进控制系统逐步进入生产过程控制领域,使一个系统控制信号从单输入、单输出的对应关系发展到多输入、多输出的对应关系,满足了工艺流程复杂、多种工艺变量交叉影响等情况的控制需要。在这一阶段中,电子技术迅速发展促进了自动化工具的完善,保证了控制方案的顺利实施。单元组合仪表(包括气动和电动)开始问世。所谓单元组合就是把整个控制仪表系统按功能分为若干单元,依据具体控制系统结构的需要进行适当的组合。因此单元组合仪表使用方便、灵活。单元组合仪表之间采用标准统一信号联系。气动仪表(QDZ系列)为20~100kPa气压信号,电动仪表信号为0~10mA直流电流信号(DDZ-II系列)和4~20mA直流电流信号(DDZ-III系列)。气动仪表防爆性能好,生产现场执行器多为气动阀门。电动仪表功能齐全,使用方便,发展极其迅速。为满足定型、灵活和多功能要求,在20世纪60年代末期又出现了电子组装式仪表,它将各个单元划分为更小的功能块,以适应比较复杂的模拟和逻辑规律相结合的控制系统的需要,使仪表结构更为紧凑。在单元组合仪表广泛应用的同时,计算机控制系统也开始应用于过程控制系统,实现直接数字控制(DDC)和监督控制(SPC)。

(3) 20世纪70年代后期至今,随着计算机技术的发展,尤其是微型计算机的开发应用,微型计算机逐渐成为检测控制仪表的核心,仪表性能从此得以提高。各个生产过程分散控制、集中管理的集散控制系统(DCS)的应用,标志着自动控制达到了新水平,控制要求变为优质、高产、低消耗。目前,在大型生产过程控制装置的引进、改造和建设中,DCS占有重要地位,原先自动控制中实施困难的各种优化操作、复杂控制及先进控制技术正不断应用于生产中。

70年代这一时期属于自动化孤岛模式的阶段,其控制目标只能是保证生产平稳和少出事故。70—80年代是发展的第二阶段,分布式工业控制计算机系统(DCS)的出现为实现先进控制创造了条件。多变量预测控制等先进控制方法的应用,使控制达到了新的水平,在实现优质、高产、低消耗的控制目标方面前进了一大步。80年代后期,工业控制中出现了多学科间的相互渗透与交叉,人工智能和智能控制受到人们的普遍关注,信息处理技术、数据库、通信技术以及计算机网络的发展为实现高水平的控制提供了强有力的技术工具。过程控制开始突破自动化孤岛的传统模式,采用计算机集成制造(computer integrated manufacturing, CIM)的思想和方法来组织、管理和指挥整个生产过程,出现了集控制、优化、调度、管理于一体的新模式。在连续工业中,也将这种模式称为综合自动化或计算机集成过程控制系统(computer integrated processing systems, CIPS)。过程控制在CIPS模式中的目标已从保持平稳和少出事故,转向提高产品质量、降耗节能、降低成本、减少污染,并最终效益为驱动力来重新组织整个生产系统,最大限度地满足动态多变市场的要求,提高产品的市场竞争力。

4. 过程控制的发展趋势

1) 简单控制向先进控制发展

早期的控制受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复杂性、耦合性、非线性等,只能按某种原则将复杂系统分解成若干相对独立的单变量系统。这种简单

控制是一种分散自治控制。随着企业提出的高效益、高柔性的要求,上述控制方式已不再适应,先进控制便应运而生。先进控制(advanced process control)是指一类在动态环境中,基于数学模型,借助充分的计算能力,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,达到所谓的“卡边控制”。

2) 封闭的分布式计算机控制系统转向具有国际统一标准的开放式系统

1975年 Honeywell 公司推出第一台分布式计算机控制系统,实现了控制分散、监视集中的功能,提高了系统的可靠性和灵活性,为连续工业自动化建立了丰功伟绩。但 DCS 的一个致命弱点就是封闭性。随着综合自动化的潮流和计算机科学与技术的发展,Fisher-Rosemount、Honeywell 等欧美十余家公司经过激烈的竞争,最后终于联手,共同推出一种国际标准的现场总线控制系统。用新一代的现场总线控制系统(FCS)代替传统的集散控制系统,实现现场通信网络与控制系统的集成。FCS 被公认为是具有时代特点的新一代分布式系统。它的出现标志着控制工具的又一次重大变革,其主要特点为:

(1) 开放性。现场总线技术是在仪表智能化和全数字控制系统的需求下产生的。现场总线是连接智能化现场设备和控制室之间全数字式、开放式和双向的通信网络。现场总线采用同一种国际标准的通信协议,不仅系统内不同型号的装置互连容易,而且可以方便地与通用的局域网相连,为实现综合自动化创造了极有利的条件。

(2) 智能化现场仪表。FCS 废弃了 DCS 的输入、输出单元,由现场仪表取而代之,即把 DCS 控制站的功能化整为零,功能块分散地分配给现场总线上的数字仪表,实现彻底的分散控制。现场设备或现场仪表是指传感器、变送器和执行器等,这些设备通过一对传输线互连。传输线可以使用双绞线、同轴电缆和光纤等。系统中的现场仪表配有自身的 CPU 与模/数转换器,除了完成基本的检测、转换、操作等功能外,还具有自诊断、参数补偿、现场组态及现场校验等功能。这既提高了现场仪表的精度,也将单一功能仪表变成了多功能仪表,使系统的可靠性、灵活性有了很大的提高。

(3) 数字信号传输。DCS 一般是将模拟信号送到集中控制室,经接口电路转换为数字信号进入计算机。采用现场总线后,现场仪表输出均为数字信号,在现场直接通过现场总线进行数字传输,不仅提高了可靠性,而且还可节省 30%~40% 的导线费用。数字信号传输抗干扰能力强,精度高。

(4) 彻底分散性。原来的 DCS 中,传感器、执行器等在现场,控制显示设备在集中控制室。现场总线控制系统则使控制系统进一步分散。简单控制回路基本分散在现场实现,仅将关键参数的数字信号送到中央控制室。这样,在中央控制室主要完成信息管理、先进控制和在线优化等功能,既充分发挥了计算机的作用,又提高了系统的可靠性。因此,具有现场总线的分布式控制系统将对控制系统的发展产生巨大而深刻的影响。

1.3 过程控制系统概述

1.3.1 系统结构

过程控制系统由以下几部分组成:被控过程(或对象);用于生产过程参数检测的检测与变送器;控制器(调节器);执行器;报警、保护和连锁等其他部件。过程控制系统的基本