

深入浅出自动化技术丛书

过程控制技术 原理与应用

潘立登 主编
李大宇 张永德 翁维勤 张伟勇 参编

全面介绍过程控制的发展过程、应用现状和最新发展方向

重点讲述过程控制的动态特性、建模方法和控制器原理

详细阐述了计算机控制系统和监控系统与在线优化控制技术

重点剖析典型流程工业生产过程



中国电力出版社
www.infopower.com.cn

深入浅出自动化技术丛书

过程控制技术

原理与应用

李大字 张永德 翁维勤 潘立登 主编
张伟勇 参编



中国电力出版社
www.infopower.com.cn

内 容 简 介

本书以控制系统为主线,全面地介绍了过程动态特性、建模方法、控制器原理、计算机控制系统和监控系统,以及在线优化控制技术。既介绍简单控制系统,又阐述复杂控制系统与先进控制技术,并分析控制方案,对控制器参数进行整定,对典型流程工业生产过程,如化工单元过程、炼油生产过程和电力生产过程的控制系统进行案例分析,并介绍其应用现状和最新发展。

本书内容覆盖面广,强调理论联系实际,不仅可以作为高校自动化专业的过程控制教材,或大学本专科院校有关专业师生的参考资料,也可供流程工业工程技术人员和管理人员自学。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制技术原理与应用/潘立登主编;李大字等编.

—北京:中国电力出版社,2007

(深入浅出自动化技术丛书)

ISBN 978-7-5083-5383-8

I. 过... II. ①潘... ②李... III. 过程控制 IV. TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第023132号

中国电力出版社出版、发行

(北京市三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007年5月第一版 2007年5月北京第一次印刷

787毫米×980毫米 16开本 21.75印张 525千字

印数0001—3000册 定价35.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

《深入浅出自动化技术丛书》

编 委 会

主任委员：吴惕华

副主任委员：潘立登

委 员：（以姓氏笔画为序）

王均术	王振臣	孙晓云	孙会琴	吕卫阳
李大字	李海滨	刘向东	刘东辉	刘朝英
何坚强	张永德	张新岭	张伟勇	娄国煊
郝 成	徐昌荣	翁维勤	黄晓华	蔡满军
薛迎成				

丛书序

日新月异的自动化技术为传统产业的改造、生产水平的提高和产品更新换代注入了强大活力。微电子技术和计算机、通信、网络技术的崛起，给自动化技术架起了腾飞的双翼，成为当代发展最快、影响最大、最引人注目的高技术之一，在百花争艳的信息化舞台上独领风骚。现在，自动化技术不仅渗透于国民经济各行各业，对社会、经济、文化、军事、科技等各个领域都有着深刻的影响，而且正悄然地改变着人们的生产、工作、生活乃至思维方式。一个无处不在的、方兴未艾的自动化时代正在到来。

为了适应自动化技术蓬勃发展的需要，我们组织编写了这套丛书，旨在进一步对自动化技术的应用和推广起到积极的推动作用。本丛书主要面向从事自动化及其相关技术领域的工程技术人员和在校大学生，为他们提供应用自动化技术或解决应用领域中的疑难问题，提高自动化技术水平的参考用书，同时也是他们学习和掌握当前自动化领域涌现的新技术和新方法、知识更新、提高创新能力的良师和益友。许多非自动化专业的工程技术人员，由于工作中常遇到自动化技术问题，有着拓宽知识面，学习和了解有关自动化技术和基本要求的要求，学习本丛书定有裨益。其他凡是对自动化技术有兴趣的初学者均可将本丛书作为快捷的入门先导。

本丛书编写宗旨是面向读者、面向应用，力求突出实用性、适用性、易用性。在编写中注意不仅既要求内容丰富、覆盖面广，又要技术先进、新颖，而且在内容的组织和表述上要求深入浅出、通俗易懂，便于自学，使读者不仅学了就能懂，更要学了就会用。在理论和实际二者兼顾和结合方面，以应用尤其是工程上的实际应用为重点，尽量多采用实例编写；而理论的介绍以应用为目的，注意基本概念，避免面面俱到和“全”而“深”，以“必要”和“够用”为度，尽量减少烦琐的理论推导和公式证明，力求简练实用。在把握先进技术和流行、成熟技术的关系方面，在介绍先进的新技术同时，重点是掌握现阶段的实用的流行技术。

为了保持全套丛书具有科学性、先进性、广泛性和代表性，我们聘请了不同部门和行业各具特长的自动化专家、教授组成了编审委员会。作者均有多年从事自动化专业教学、科研或工程技术工作的经历，具有较丰富的实践经验。为了打造“精品”出好书，本丛书凝聚了作者们的心血和汗水，在此我们致以诚挚的谢意。对丛书中不足之处，还望广大读者批评和指正。

丛书编审委员会
2007年2月于北京

前言

过程控制技术最主要的基础是自动控制理论,同时它也与相关过程机理以及自动化仪表和计算机技术密切相关。因此,过程控制技术是控制理论与工业过程、设备,以及自动化仪表和计算机工具相结合的工程应用科学。为适应我国中长期和“十一五”规划及近期目标,提出了要重点研究大型复杂生产过程和连续生产过程的综合自动化系统,它的任务有两方面,即加强流程工业的基础自动化和先进控制技术的理论准备,开发应用先进控制和综合自动化系统及其装备,以提高企业经济效益,进而增强自身的竞争力是过程工业迎接挑战的重要对策。

过程控制技术原理与应用是自动化专业最主要的专业课。因此,它涵盖控制理论、工业过程特性、建模方法、控制系统分析与设计、工业控制器现场整定等,内容较为丰富,既研究简单控制系统,又阐述复杂控制系统以及先进控制算法、计算机控制系统和监控系统、在线优化技术、化工单元过程控制、炼油过程控制和火电过程控制等工业过程控制案例,还介绍过程控制的发展、应用现状和最新发展。尽管目前已经有不少过程控制方面的书籍,但这本书有很明显的特色,系统性、先进性都很突出,而且有很多工业过程控制的案例,理论联系实际,便于读者学习与理解,直至应用。

全书分十一章,分别介绍了过程控制的发展、应用现状和最新发展;对象动态特性;建模方法;单回路控制系统的组成,方案选择,以及PID控制系统的整定;复杂控制系统设计及其投运;几种先进PID控制、内模控制、模型预测控制和工业应用;计算机控制系统的类型和算法,硬件组成和软件结构以及这些控制系统的设计要素;计算机监控系统与在线优化控制,过程操作条件优化与案例;化工单元过程控制系统分析与设计以及案例分析;炼油工业生产过程控制;火力发电过程控制系统与分析等。最后三章备有很多工业现场应用案例和最新的控制方法。由于本书篇幅所限,有很多相关内容无法展开,只能选择上述核心要点加以阐述。希望读者在学习过程中做到举一反三,融会贯通,既掌握理论,又学会工程应用。

全书由北京化工大学潘立登教授担任主编。第一、三、六、八、十一章由潘立登教授编写,第二、四、五章由北京化工大学李大字副教授编写,第七章由北京化工大学张永德副教授编写,第九章由北京化工大学翁维勤教授编写,第十章由中国石油大学(华东)张伟勇副教授编写。本书编写过程中得到了北京化工大学信息科学与技术学院和中国石油大学(华东)信息与控制学院的大力支持和帮助,借此谨致谢意。

限于作者水平,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者
2007年3月

目录

丛书序

前 言

第一章 概论	1
第一节 过程控制概况	1
第二节 过程控制的发展	2
第三节 目前的主要技术和发展方向	4
第四节 过程控制的主要内容	6
第二章 过程的数学模型	7
第一节 过程动态特性的描述方法	7
第二节 典型过程的动态特性	8
第三节 过程控制系统的性能指标	11
思考题	14
第三章 过程模型的建模方法	16
第一节 过程模型的建模方法	16
第二节 非参数模型测试方法	25
第三节 参数模型辨识算法	27
第四节 传递函数模型辨识	64
思考题	68
第四章 单回路控制系统	69
第一节 单回路 PID 控制系统	69
第二节 单回路控制系统方案选择	73
第三节 单回路控制系统的整定	79
思考题	86
第五章 复杂控制系统	87
第一节 串级控制系统	87
第二节 比值控制系统	95
第三节 均匀控制系统	100
第四节 分程控制系统	105
第五节 前馈控制系统	108
第六节 自动选择性控制系统	115

第七节	控制系统的投运	120
思考题		121
第六章	先进控制	124
第一节	先进 PID 控制	124
第二节	内模控制	131
第三节	关联分析与解耦控制	141
第四节	预测控制	146
思考题		152
第七章	计算机控制系统	153
第一节	计算机控制系统的类型与算法	153
第二节	DCS 集散控制系统	165
第三节	FCS 现场总线控制系统	174
第四节	IPC 工业计算机控制系统	177
思考题		189
第八章	计算机监控系统和在线优化控制	190
第一节	计算机监控系统	190
第二节	在线优化控制	197
第三节	NLJ 优化算法在过程在线优化控制中的应用	201
思考题		205
第九章	化工单元过程控制系统分析与设计	206
第一节	流体输送过程控制	206
第二节	传热设备的控制	220
第三节	精馏过程控制	225
第四节	化学反应过程控制	238
第五节	间歇生产过程控制	253
思考题		265
第十章	炼油工业生产过程控制	266
第一节	炼油工业概述	266
第二节	常减压蒸馏生产过程控制	268
第三节	催化裂化生产过程控制	277
第四节	催化重整生产过程控制	286
第五节	延迟焦化生产过程控制	292
第六节	油品调合	298
思考题		302
第十一章	火力发电过程控制系统与分析	304
第一节	锅炉设备的控制	304

第二节	汽轮机控制	306
第三节	汽轮机转速控制	308
第四节	机炉协调控制	312
第五节	负荷频率控制	322
思考题		329
参考文献		330



第一章 概 论

第一节 过程控制概况

过程控制最主要的理论基础是自动控制理论,同时它也与相关过程机理以及自动化仪表和计算机技术密切相关。因此,过程控制是控制理论与工业过程、设备,以及自动化仪表和计算机工具相结合的工程应用科学。

早年的生产活动都是采用手工操作的。人们在生产实践中不断进行改进,不仅发明制造了一些机器来代替人的操作,而且使这些操作能自动进行,这就产生了自动控制的概念。概括起来,有三种基本控制原理,那就是扰动控制、负反馈控制(亦可称为偏差控制)和复合控制。我们祖先发明的指南车就属于扰动控制,它是一种开环控制,根据不变性原理进行工作。当指南车受到扰动之后,在它还没有影响到指南车的方向时,指南车就开始克服扰动,使指南车仍基本上按既定的方向前进。1787年瓦特发明的离心调速器——蒸汽机的速度调节,被认为是自动控制技术走向大规模应用的一个标志性事件。瓦特发明的蒸汽机离心式调速器属于负反馈控制器,当蒸汽机转速发生变化而偏离给定值时,离心式调速器的平衡锤的位置也随之发生变化,带动蒸汽阀门开度改变,从而使推动蒸汽机旋转的蒸汽流量随之变化,蒸汽机的转速达到新的平衡,实现了转速的自动控制。这属于一种根据偏差实现控制的闭环控制,它是过程控制的主要形式。1868年英国物理学家马克斯威尔采用数学方法对瓦特调速器系统中不稳定现象进行研究,开辟了自动控制作为一门科学发展的开端。复合控制则是一种扰动控制和负反馈控制相结合的控制方法,它既能快速地克服扰动,又能克服偏差,实现高精度的控制。扰动控制虽然能实现快速控制,但一个过程受到的扰动是很多的,对每个扰动都设计控制系统,不仅会使控制系统变得复杂,事实上也是很困难的。我们一般采用主要扰动采用扰动控制,其他扰动采用偏差控制,这种复合控制可以简化控制方案,并能实现高精度的控制。

在工业过程控制中,主要采用PID控制。PID控制是过程控制领域最常用的一种负反馈控制,它是按偏差信号的比例、积分、微分控制规律实现负反馈的闭环控制。在自动控制系统中,控制器和被控对象构成一个回路(有时也含有多个回路)。回路中,把系统的输出信号直接或者经过一些环节后引回到输入端,称为反馈。反馈信号的作用方向与设定值的信号相反,缓解对象中的不平衡,这种反馈称为负反馈。反之,若反馈信号的作用方向与设定值信号相同,加剧被控对象流入量与流出量的不平衡,导致控制系统不稳定,则是正反馈。负反馈是自动控制系统中的一个重要特征,只有负反馈才能实现正确的控制作用。

经过最近30多年的发展,控制技术与控制工具都有了飞速发展,新型仪表控制器、计算机控制、各种类型的集散控制系统(Distributed Control System, DCS)和现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)不断涌现,新型控制算法也有了用武之地,如Smith补偿器、

自适应控制、鲁棒控制、智能控制、内模控制、动态矩阵预测控制、模型算法预测控制、广义预测控制、优化控制等已在工业过程控制中得到推广应用。近年来,装置的过程控制已经逐步发展到整个企业的信息化,如调度优化、计划优化、供应链优化、企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)、制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)等,使企业自动化达到了一个新的高度。

第二节 过程控制的发展

从20世纪40年代开始,在工业过程控制中,就采用了负反馈控制,用PID控制规律,实施单输入单输出的负反馈控制,负反馈控制是过程控制的核心,它以经典控制理论为基础,采用频域分析方法进行控制系统的分析、设计和综合。那时实现单回路控制的自动化仪表工具主要是一些基地式的气动或电动仪表,它的测量与传感元件、显示器和控制器都集中在一个仪表壳内,要想改造一些控制方案是很困难的。到了20世纪50年代中期,开始发展气动或电动单元组合仪表,这就为修改控制方案创造了条件。这个时期,经典控制理论已经很成熟了,并且有大量的相关书籍出版,如1932年奈奎斯特在研究反馈放大器稳定性中提出的稳定性判据及基于频率响应的方法,1948年伊文思提出了根轨迹法并有效地应用于反馈控制系统的分析与综合等,这些理论为经典控制理论奠定了基础。1943年维纳等学者在《行为、目的和目的论》一文中首次提出了控制论的基本思想,并在以后的研究中得到了进一步完善,如1943年美国Hall写的“The Analysis and Synthesis of Linear Servomechanisms”,1947年James、Nichols和Phillips写的“Theory of Servomechanisms”。1948年维纳的名著《控制论》正式出版,标志着控制论的诞生,它明确地阐明了控制科学的研究对象、内容、目的和方法,为控制科学奠定了基础。1951年Ahrendt和Taplin写的“Automatic Feedback Control”,1955年Truxal写的“Automatic Feedback Control System Synthesis”,1958年Smith写的“Feedback Control Systems”,1954年由苏联的索洛多夫尼可夫主编的第一部《自动调节基础》(中译本于1958年出版),1962年Benjamin写的《Automatic Control Systems》(该书影响很大,已经修订很多次),我国的刘豹于1954年写的《自动控制原理》,早年钱学森写的英文版,由戴汝为于1958年翻译出版的《工程控制论》等都是当时很有影响的著作。也就在这个时候,控制系统又从单回路控制逐渐发展了串级、比值、前馈、均匀和Smith预估控制等复杂控制系统,即当时的先进控制系统,它在很大程度上满足了单变量控制系统的一些特殊的控制要求。虽然它们从理论上仍是经典控制理论的产物,但是在结构和应用上已有了新的特点,有了多回路的控制系统。目前这些多回路控制系统仍在继续不断地改进和完善,应用领域也在不断扩大。

20世纪60年代前后,随着宇航事业和计算机技术的发展,控制理论又有了新的发展,前苏联数学家庞特里亚金建立的极大值原理、美国应用数学家贝尔曼提出的动态规划,以及美国学者卡尔曼引入的状态空间法和建立的卡尔曼滤波,这些研究推动了现代控制理论的形成。这些具有里程碑意义的研究成果,为《控制论》的发展作出了重大贡献。《控制论》中是以时域分析为基础,特别是以状态空间方法为主,以准确的模型为依据进行控制系统的设计。过程控制界原以为有了现代控制理论,可以像宇航事业那样会有新的飞跃。遗憾的是,过程控制领域没有获得期望的结果,因为过程的模型太复杂,不仅很难获得准确的模型,即使一时

获得较准确的模型,随着生产的进行,模型又要发生变化,致使现代控制理论在过程控制中未能很快见效。过程控制界一直在寻求、探索现代控制理论的最佳应用方案。20 世纪 60 年代末至 70 年代末出现的预测控制,就是为了克服过程控制中很难获得过程模型的缺点而研究的。在过程控制实践中,摸索出采用冗余量很大的脉冲响应模型或阶跃响应模型,并进行误差反馈校正和滚动优化的方法,实现了用现代控制理论思想建立起来的高性能的过程控制。这个阶段,国际上出版了大量自动控制书籍,如 1974 年美国 William 等写的“Modern Control Theory”,日本绪方胜彦等写的《现代控制工程》。我国原化工部自控中心站也组织了自动化丛书的编写工作,出版了大量有关过程控制、现代控制理论、建模方法等方面的书籍;国内有关人员也组织了几次专业教材的编写工作,比如《化工自动化》,后来的《化工过程控制原理》、《化工过程控制工程》等,这些教材对我国过程控制专业的发展起了很重要的作用。

与此同时,1946 年世界上第一台计算机的诞生以及计算机技术的发展,大大推动了在自动化过程控制中对数字计算机的大规模使用,计算机过程控制有了很大的发展。以 1975 年第一套计算机集散控制出现为标志,工业过程的计算机控制前后经历了两个大阶段。

1957 年~1959 年,美国孟山都公司在世界范围内首先实现了过程计算机控制,我国原化工部瞄准这一目标,1965 年在陕西兴平化肥厂引进巡回检测系统;同年又组织技术力量,在兰化公司化肥厂进行计算机控制的大会战,实现了过程计算机现场控制。1970 年前后,又在北京有机化工厂实现 DDC 控制,后来还进行了优化控制的试验。同一时期,石油系统也在上海炼油厂和兰州炼油厂进行了计算机控制的试验。

当时过程计算机控制出现故障是普遍现象,针对这种问题,研究者们改变全部集中的 DDC 控制的设计思想,提出将“功能、危险和故障分散,管理集中”的新理念,于 1975 年由美国 Honeywell 公司和日本横河公司分别推出了世界上第一套集散控制系统,从此开始了过程计算机控制的新纪元。

DCS 出现之后,可以将过程计算机控制的发展分为三个时期。

第一个时期是 1975 年~1985 年前后。世界上一些有能力的仪表、计算机厂家,纷纷投入开发、制造 DCS。我国原化工部于 20 世纪 80 年代初,率先从日本横河公司引进 DCS 产品 CENTUM 应用于吉化公司。正是这一时期,企业管理者看到了新技术产生的巨大经济效益。

第二个时期是 1985 年~1995 年前后。这一时期,全世界开发的 DCS 有近百种型号,我国也涌现出实力强大的浙大中控和北京和利时公司。DCS 已发展成为现代过程控制的主流,在自动控制技术发展史上有了划时代的进步。由于前期各 DCS 厂家为了争夺市场而实行技术封锁,不同厂家的 DCS 很难进行联通,影响了先进控制的应用。应用户要求,DCS 厂家逐步开始生产开放式的 DCS 产品。

第三个时期是 1995 年至今,DCS 与 FCS 蓬勃发展的时期。几乎绝大多数大中型的化工、石化、炼油企业,都已进行了 DCS 技术改造,中小企业也已使用 DCS、工业 PC 机控制系统和数据采集监控系统。而且,很多企业还有了先进控制算法的技术应用,已经建立计算机网络系统,实现了厂级信息管理。

但是,目前多数企业还是处于 DCS 投资约占控制技术总投资的 70%~80%,获得经济效益为总效益的 25%~30% 左右的状态,事实上,如能再投资 10% 用于实施先进控制,则可以再获得 35%~40% 的效益;如再投资 10% 用于实施优化控制,效益亦可再增加 35%。也就是

说, 深层挖掘 DCS 的应用功能, 效益将比 DCS 的基础应用具有更重要的意义。

提到先进控制技术的应用, 必须提及两位探索者 J. Richalet 和 C. R. Cutler, 他们分别于 1980 年前后, 分析报道了各自研究的解决带约束多变量耦合的动态系统在实时环境下的控制问题的成果, 这就是著名的模型预测启发式控制 (MPHC) 和动态矩阵控制 (DMC)。这一事实表明过程工业已开始接受现代控制理论的概念, 从而引发了预测控制在工业过程控制中的大量应用。此后的一段期间, 出现了许多约束模型预测控制的工程化软件包, 如 Aspen Tech 公司的 DMCPlus、Honeywell 公司的 RMPCT、IDCOM-M、SMCA、PFC, 以及浙江大学研发的 APC-Hiecon、APC-PFC, 清华大学研发的 SMART, 上海交通大学研发的 MCC 以及北京化工大学研发的模型 PID 和 IMC-PID 先进控制等。通过最近十多年的研究、应用, 我们在模型辨识、优化算法、控制结构分析、参数整定和有关稳定性和鲁棒性等一系列工作有了显著进展, 基于模型控制的理论体系已基本形成, 并成为目前过程控制应用最成功、也最具有前途的先进控制策略之一。控制工程应用也在不断发展, 上述这些先进控制方法等已经在各行各业都有了比较广泛的应用。据有关报道, 国际上 (主要在北美, 欧洲和日本) 到 1995 年底已经应用多变量预测控制软件 2233 套, 经过五年时间, 至 2000 年底, 已经发展到 4600 多套。最近的几年, 虽未看到最新统计数字, 不过最近这些年来, 已经看到应用先进控制的经济效益, 致使先进控制技术应用发展迅速, 美国已经在 90% 的主要装置上推广应用先进控制技术, 估计全球应用先进控制约有 8000 套以上。我国自从 1993 年在齐鲁石化公司北催化装置上引进第一套多变量预测控制软件以来, 现在, 在中石化应用 70 多套, 中石油也已应用几十套, 再加上我国自己开发应用的先进控制, 约有 100 多套。

第三节 目前的主要技术和发展方向

值得指出的是, PID 控制虽然历经了半个多世纪, 目前仍在被广泛应用, 即便是在大量采用 DCS 控制的现代化的装置中, 这种负反馈控制回路仍占总控制回路数的 80% 左右。这是因为 PID 控制算法简单、实用, 且应用历史悠久, 工业界对其比较熟悉且容易接受。然而, 随着工业的迅速发展, 单回路 PID 控制已经不能完全适应所有的过程和不同的控制要求, 即便采用串级、比值、前馈、均匀和 Smith 预估控制等复杂控制系统, 而且这些控制系统也在继续不断地改进和完善, 应用领域也在不断扩大, 但在工业生产过程中仍有一些控制问题采用上述控制策略无法奏效, 所涉及的被控过程往往具有强耦合性、不确定性、非线性、信息不完全性和大纯滞后等特征, 并存在苛刻的约束条件, 更重要的是具有这些特性的生产过程往往是核心部分, 直接关系到产品的质量、产率和消耗等有关指标。随着市场竞争的激烈, 为降低成本, 过程工业日益走向大型化, 生产不断强化, 化工生产中化学反应也越来越激烈, 对过程控制的品质也提出了更高的要求, 这种控制与经济效益的矛盾日趋尖锐, 迫切需要一类合适的先进控制策略。

近年来, 人工智能技术有了长足的进步, 并在许多科学与工程领域中取得了较广泛的应用。就过程控制而言, 专家系统、神经网络、模糊系统是最具有潜力的三种工具。专家系统可望在过程故障诊断、监督控制、检测仪表和控制回路有效性检验中获得成功应用。神经网络则可为复杂非线性过程的建模提供有效的方法, 进而可用于过程软测量和控制系统的设计

上。模糊系统不仅是行之有效的模糊控制理论基础,也将是先进控制的重要内容。由于许多重要的工业过程都表现出内在的非线性,如 pH 中和过程,使得那些基于线性模型的控制策略和传统的 PID 控制很难奏效。早期的解决办法有变增益控制或针对特定过程来设计控制系统。近来,有关基于非线性模型(机理和经验)的控制有了较大的发展。但是,非线性控制尚属研发中的先进控制策略,实际的工业应用尚不多见。控制系统的鲁棒性是体现系统性能的一个重要指标,它体现了模型与实际过程有差别的情况下控制品质的变化情况。在经典控制理论中,稳定裕度可反映系统的鲁棒性,当稳定裕度大时,控制系统品质对参数的变化不敏感,即有较好的鲁棒性。现代控制理论则为鲁棒性的分析提供了更多的方法,尤其是鲁棒控制器单独提出之后,这一领域研究一直是控制理论界的研究热点并逐渐成为一个独立分支。事实上,鲁棒控制的目的是要设计出在所有希望的操作条件下都具有良好性能的控制器,这一点符合过程控制的需要。与其说鲁棒控制是一种控制策略,倒不如说它是一种控制系统的设计思想,它可以用于各种类型控制器(包括从 PID 控制到复杂的多变量控制器)的设计与整定。鲁棒控制之所以在过程工业中应用甚少的主要原因在于其原理过于复杂,尤其是对于多变量问题。应当看到,使先进控制具备鲁棒性将是今后重要的发展方向。

现在,装置的过程控制已逐步发展到整个企业的综合自动化,已经从装置的局部优化,发展到考虑企业全局优化、如调度优化、计划优化、供应链优化、制造(生产)执行系统、企业资源计划系统等,形成 ERP-MES-PCS(过程控制系统)三层结构体系,这是当今世界自动化技术的发展趋势。

目前一些大的企业,正在实施企业资源计划系统(ERP)、管理信息系统(MIS)、制造执行系统(MES)、计算机集成制造系统(CIMS)等。ERP 是一个高度集成的信息系统,利用信息技术手段来实现先进管理思想,它是指建立在信息技术基础上,以系统化的管理思想,为企业决策层及员工提供决策运行手段的管理平台。ERP 系统集中信息技术与先进的管理思想于一身,成为现代企业的运行模式,反映时代对企业合理调配资源、最大化地创造社会财富的要求,成为企业在信息时代生存、发展的基石,能支持财务会计、生产计划、物料管理、销售分销、人力资源和企业主要核心业务流程处理等,它是以财务为核心,通过业务实时集成,实现物流、资金流、信息流的“三流合一”。通过 ERP 可最大限度地实现企业经营和业务处理的规范化和自动化,最终实现企业价值的最大化。

MES 是处于计划层和车间层操作控制系统之间的执行层,主要负责生产管理和调度执行,它可以解决企业信息集成问题,具有承上启下,运筹调度中枢的作用;它是一个基础数据处理平台,提供了一种系统地在统一平台上集成诸如质量控制、文档管理、生产调度等功能的方式,并将数据信息从基础自动化级取出,穿过操作控制级,送达管理级,通过连续信息流来实现企业信息全集成。MES 通过对生产系统跟踪和监督,实现生产调度、物料跟踪、生产过程资源配置管理、质量管理、流程模拟以及生产过程系统数据的采集、模拟计算和过程优化等功能。MES 能通过信息传递对从订单下达到产品完成的整个生产过程进行优化管理。当工厂发生实时事件时,MES 能及时反应、报告,并用当前的准确数据对事件进行指导和处理。MES 是围绕企业生产而设计、实施的集成信息系统,所以,工厂利用 MES 能够对条件变化做出迅速响应,减少非增值活动,提高生产运作过程的效率,从而提高工厂及时交货的能力,改善物料的流通性能,提高收益。

PCS 是基础控制系统,对生产工艺过程进行有效的、高精度的、高水平的自动控制,以确保生产的质量、成本等方面具有高的竞争力。这方面,主要由 DCS-FCS-SCADA (Supervisor Control And Data Acquisition, 监控与数据采集系统) 来实现对过程的检测与控制。

集散控制系统或现场总线控制系统-先进过程控制-实时优化系统 (DCS-APC-RTO) 都属于工艺装置级的控制范畴,它的优化效益是很大的,但与企业一级的优化效益相比,企业的优化效益还要大得多。MES 能为企业带来更大的经济效益,它需与控制系统集成以获取实时过程数据,因此必须充分考虑其现状以及接口。先进控制系统 (APC) 将为生产运行系统提供优化的生产计划数据,同时生产运行系统中实际生产运行数据也将反馈到 APC 系统中,支持更准确的、与实际生产条件相符的计划优化。企业资源计划系统 (ERP) 的多个功能模块都与生产运行系统有数据交换,因此, MES 需与 ERP、APC 等集成以建立一致的数据、模型和工作流,取得整个供应链的优化。这一集成使得流程数据 (如产量等) 能够传递并转换为管理数据,在必要时管理数据也可传递回 MES,甚至于 DCS 系统。因而, MES 在管理和优化化工厂时起着核心作用。

监控与数据采集系统是以计算机为基础的生产过程控制与调度自动化系统。它可以对现场的运行设备进行监视和控制,以实现数据采集、设备控制、测量、参数调节以及各类信号报警等各项功能,也可以实时采集现场数据,对工业现场进行本地或远程的自动控制,同时还可以对工艺流程进行全面、实时的监视,并可为生产、调度和管理提供必要的数据库。

企业对生产安全更加重视,要求实现 SIS (安全仪表)、仪表控制和信息管理系统一体化,将 DCS、FCS、SIS 以及 ESD (紧急停车系统)、火灾、易燃、易爆和有毒气体检测系统、以及闭路电视系统、管理系统等集成为一体化系统,实时地实现监督与控制生产过程。

第四节 过程控制的主要内容

过程控制是在自动控制理论的基础上发展起来的,既有理论,又有工程实践。因此,它涵盖控制理论、工业过程特性、建模方法、控制系统分析和设计、工业控制器现场整定等,内容较为丰富,既研究简单控制系统,又阐述复杂控制系统以及先进控制算法。

2

第二章 过程的数学模型

第一节 过程动态特性的描述方法

过程动态特性的重要性是不难理解的,例如,人们知道有些被控对象很容易控制而有些又很难控制,为什么会有此差别呢?为什么有些控制过程进行得很快而有些又进行得非常慢?归根结底,这些问题的关键都在于被控对象本身,在于它们的动态特性。全面了解和掌握被控对象动态特性,才能合理的设计控制方案,选择合适的自动化仪表,进行控制器参数整定。特别是要设计高质量的、新型复杂的控制方案,更需要深入研究被控对象的动态特性。

要精确地描述过程的动态行为就离不开数学模型,工业过程的数学模型分为动态数学模型和静态数学模型。动态数学模型是表示输出变量与输入变量随时间而变化的动态关系的数学描述。从控制的角度看,输入变量就是操纵变量和扰动变量,输出变量就是被控变量。静态数学模型是输入变量和输出变量之间不随时间变化情况下的数学关系。工业过程的动态数学模型的表达方式很多,其复杂程度也各不相同,主要取决于建立模型的目的。

(1) 建立被控对象的数学模型的主要目的有:

- 1) 进行工业过程的操作优化;
- 2) 控制系统方案设计和仿真研究;
- 3) 控制系统的调试和参数整定;
- 4) 基于模型的先进控制;
- 5) 工业过程的故障检测与诊断系统;
- 6) 制定大型设备开、停车的方案;
- 7) 仿真培训系统的开发等。

(2) 建立过程数学模型的基本方法有:

- 1) 机理建模法;
- 2) 实验测试法;
- 3) 机理建模和实验测试法的结合。

(3) 线性过程模型常用表达方式有:

- 1) 微分方程和差分方程模型;
- 2) 传递函数模型;
- 3) 脉冲响应模型;
- 4) 阶跃响应模型;
- 5) 频率响应模型;
- 6) 状态空间模型。

(4) 建模的基本步骤有:

- 1) 模型类型的确定;
- 2) 建模对象的分析和变量选择;
- 3) 模型的建立;
- 4) 模型的处理;
- 5) 模型的评价与校验。

第二节 典型过程的动态特性

过程的数学模型,从其内在规律考虑,往往相当复杂。例如,有非线性、分布参数和时变等情况。然而,当过程在平衡状态附近小范围变化时可以线性化,同时可以集总化;对应于一个特定的时刻,因为过程的时变一般很缓慢,可以认为是正常的。这样,输入输出关系往往可以用传递函数形式描述。

多数工业过程的特性分属六种类型。

一、自衡的非振荡环节

自衡环节是指对象在扰动作用下,平衡状态被破坏以后,不需要操作人员或仪表控制器进行操作,就能依靠系统自身重新恢复平衡的特性。

如图 2-1 所示的液体储罐,系统处于平衡状态。进水量增加后,平衡状态被打破,液位上升;但随着液位的上升,出水阀前的静压增加,出水量也增加,液位的上升速度逐步变慢。这样不需要进行自动控制,最终液位会达到新的稳定值,建立新的平衡。该过程亦称为一阶惯性环节。图 2-2 是典型的自衡非振荡过程的响应曲线。

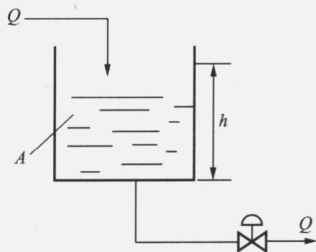


图 2-1 液位对象

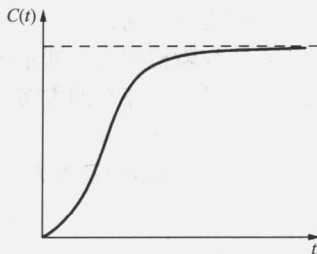


图 2-2 自衡的非振荡过程

自衡非振荡过程的传递函数通常可以写成如下形式

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (2-1)$$

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (2-2)$$

$$G(s) = \frac{K}{(Ts + 1)^n} \quad (2-3)$$