

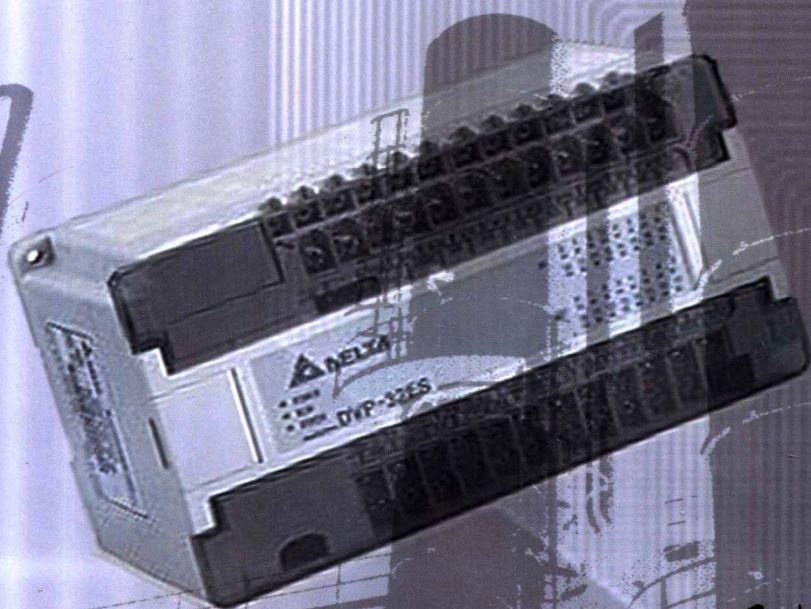


SHIHUA GONGYE GUOCHENG KONGZHIQI DE SHEJI YU YINGYONG

罗 真 编著

石化工业过程控制器

的 设计与应用



石油工业出版社

石化工业过程控制器的 设计与应用

罗 真 编著

石 油 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书结合石化生产过程,介绍了控制技术的发展、控制器的设计、无模型控制技术及应用、预测控制及应用等,理论联系实际,具有很强的实用性。

本书适于从事生产过程自动化、计算机应用和电气自动化领域的工程技术人员阅读,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、自动化仪表、计算机应用等专业的教材和教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

石化工业过程控制器的设计与应用 / 罗真编著 .

北京:石油工业出版社,2008.5

ISBN 978-7-5021-6451-5

I . 石…

II . 罗…

III . ①石油化学工业—过程控制—控制器—设计

②石油化学工业—过程控制—控制器—应用

IV . TE65

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 008208 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂

2008年5月第1版 2008年5月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张: 18.25

字数: 464千字 印数: 1—1000册

定价: 60.00元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

PID 控制是最早发展起来的控制策略之一,由于其算法简单、鲁棒性好和可靠性高,被广泛应用于工业过程控制,尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。而实际工业生产过程往往具有非线性、时变不确定性,难以建立精确的数学模型,应用常规 PID 控制器不能达到理想的控制效果;在实际生产现场中,由于受到参数整定方法繁杂的困扰,常规 PID 控制器参数往往整定不良、性能欠佳,对运行工况的适应性很差。针对这些问题,长期以来,人们一直在寻求 PID 控制器参数的自动整定技术,以适应复杂的工况和高指标的控制要求。随着微处理机技术的发展和数字智能式控制器的实际应用,这种设想已成为现实。同时,现代控制理论(诸如智能控制、自适应模糊控制和神经网络技术等)研究和应用的发展和深入,为控制复杂无规则系统开辟了新途径。近年来,出现了许多新型 PID 控制器,如瑞典著名学者 K.J.Åström 等人推出的智能型 PID 自整定控制器,对于复杂对象,其控制效果远远超过常规 PID 控制。

自 20 世纪 80 年代起,本着安全第一、环境优先的原则,人们对现代复杂的工业生产过程,要求高效、低能耗,对环境污染少,受各种扰动时整个生产过程都能平稳运行。

先进控制在工业界中开始应用,特别是多变量模型预测控制,如今已广泛应用于复杂的炼油、石油化工、电力、冶金等实际工业生产过程,并取得良好的控制效果。

作者在生产第一线从事过程控制 20 余年,能对生产过程中控制的难题加以解决,重新设计控制系统,又参与了若干项科研工作,对新的控制技术加以应用,取得了一些成果。通过对无模型控制技术和预测控制技术的应用,使控制水平又上了一个台阶,对安全生产、平稳运行起到了积极的作用。这本书可以说是作者在工作中的一些经验总结,抛砖引玉,供读者学习参考。

本书有下列特点:(1)取材新颖,内容先进,重点置于学科交叉部分的前沿研究和介绍一些有潜力的新思想、新方法和新技术。(2)系统论述无模型控制算法、UMCCA 控制算法和广义预测控制的理论和技术,取材着重于基本概念、基本理论、基本方法。(3)着重从应用角度出发,突出理论联系实际,具有面向广大工程技术人员的特点,因而具有很强的工程性、实用性。(4)结构合理,力求深入浅出,便于自学。

本书适宜于从事生产过程自动化、计算机应用和电气自动化领域工作的工程技术人员阅读,也可作为大专院校工业自动化、自动控制、自动化仪表、计算机应用等专业的教材和教学参考书。

在本书编著过程中,参考和应用了国内外许多专家和学者所写的论文及著作,第四章大部分由黑龙江大学韩志刚教授提供并指导,第六章大部分由中国科技大学孙德敏教授提供并指导,在这里表示感谢。中国石油大学(北京)罗雄麟教授、左信教授给予了指导帮助,在对生产过程进行控制算法的编程及应用中,杨权文、高志泉、王金安等同志给予了协助,作者在此一并致谢。同时感谢周静、季占武、王一秀等同志,他们在本书打字、绘图等工作中给予了热情的帮助和支持。

由于作者水平所限,书中难免有错误和疏漏,热忱希望广大读者批评、指正。

编者

2007.11

目 录

绪论	1
第一章 典型工业过程控制器的设计与应用	6
第一节 压力控制系统的控制器设计与应用	6
一、Bang-Bang 控制与切换曲面	6
二、变结构控制系统	8
三、催化稳定塔顶压力双模控制器设计与应用	10
四、加热炉瓦斯压力控制器设计与应用	12
第二节 小本体聚丙烯聚合釜的压力控制器的设计与应用	14
一、概述	14
二、工艺简介	14
三、控制方案的设计	14
四、聚合釜的压力程序控制	15
五、应用效果	20
第三节 液面控制系统控制器的设计与应用	20
一、延迟焦化分馏塔底液面控制器的设计与应用	20
二、II 糠醛塔-2/A 液面控制器的设计与应用	26
第四节 气压机防喘振控制器的设计与应用	28
一、概述	28
二、控制系统的实施	28
三、流量的计算及快开、慢关功能的软件实现	30
四、对轴流风机控制系统的改造	32
五、应用效果	33
第五节 利用回归方程在汽油、航煤质量控制中控制器的设计与应用	33
一、概述	33
二、工艺简介	34
三、控制方案构成	34
四、程序的编制	36
五、应用效果	37
第六节 加热炉出口温度控制器的设计与应用	38
一、概述	38
二、工艺简介	38
三、控制方案构成	38
四、控制系统分析	39
五、应用效果	41
第七节 糠醛装置塔-3A 液面与炉-3 出口温度控制系统综合设计与实施	42

一、工艺简介·····	42
二、控制系统分析·····	42
三、控制系统的设计与组成·····	43
四、应用效果·····	45
第二章 PID 参数自整定控制器技术 ·····	46
第一节 KMM 自整定控制器 (STC) ·····	46
第二节 FOXBORO—EXACT 自整定 PID 控制器 ·····	47
一、专家法的算法·····	47
二、特性识别人工智能化·····	47
三、自整定控制器的操作·····	49
四、具体的参数设定·····	50
五、预整定的使用方法·····	51
六、非线性功能 (NLN) ·····	52
第三节 YEW SERIES—80 专家自整定控制器 ·····	52
一、概述·····	52
二、开发目的及特点·····	52
三、STC 的工作原理 ·····	53
四、STC 的动作 ·····	55
第四节 东芝 TOSDIC2 自由度 PID 自整定控制器 ·····	56
一、概述·····	56
二、用户宗旨及特点·····	57
三、软件包·····	57
第五节 TDCS3000—SSC 自整定控制器 ·····	61
一、概述·····	61
二、自整定功能·····	62
第六节 应用范围·····	64
第三章 基于熟练操作员知识的专家智能控制器的研究设计与应用 ·····	65
第一节 PID 算式的研究 ·····	65
一、PID 控制算法 ·····	66
二、PID 算法的改进 ·····	71
三、PID 控制器参数的整定及采样周期的选择 ·····	73
第二节 仿人智能的研究·····	78
一、仿人智能控制的原理与结构·····	78
二、仿真实例·····	84
三、仿人智能控制器的应用实例·····	84
四、应用效果·····	85
第三节 智能控制简介·····	86
一、智能控制及其研究对象和数学工具·····	86
二、智能控制系统·····	88
三、智能控制的发展概况·····	89

第四节 专家智能控制简介	90
一、专家智能控制的基本概念与方法	91
二、专家控制器	93
第五节 基于熟练操作员知识的专家控制器的基本算法	93
一、主环大偏差程序	94
二、副环大偏差程序	96
三、阀位上、下限自适应调整功能的实现	97
四、抑制大的干扰及安全保护功能的实现	103
五、抑制干扰的二段智能阀位功能的实现	106
六、进料量、瓦斯压力等前馈变量的功能实现	106
七、主、副参数变化速率功能的实现	107
八、开关功能的实现	109
第四章 无模型控制器在生产实践中的应用	114
第一节 无模型控制理论基础	114
一、建模与控制一体化途径	114
二、无模型控制律一般形式的收敛性分析	124
三、理论的某些补充	134
第二节 IAS 软模块	142
一、独立模块 IND	142
二、纯滞后模块 DTIME	145
三、超前滞后模块 LLAG	145
第三节 无模型控制器 (NMAC) 和 PID 控制器控制能力的比较分析	149
一、无模型控制律的适应能力	149
二、无模型控制律的收敛性能	151
三、无模型控制律的抗干扰性能和解耦能力	152
四、无模型控制律克服大时滞的性能	153
五、小结	155
第四节 无模型控制器、仿人智能控制器、PID 控制器仿真比较	155
第五节 无模型控制器在生产上的应用	157
一、常压塔一线温度控制	157
二、II 糠醛炉-1 加热炉温度控制系统	160
三、无模型控制器在其他场合的应用	174
第五章 UMCA 控制算法与 UCS 控制系统	178
第一节 UMCA 控制算法	178
一、具有纯滞后环节的模型建立	179
二、复杂算法的建立	179
三、PID 参数的改进	180
第二节 UCS 控制系统软件及硬件组成	181
一、UMCA 控制系统软件	181
二、硬件组成	182

第三节 UCS 控制系统	182
一、UCS-6000 DCS	182
二、UCS-6600 DCS	183
第四节 UMCA 控制技术应用场合及其对比	189
一、UMCA 控制技术应用形式	189
二、UMCA 控制技术与 PID 控制技术、无模型控制技术的比较	190
第五节 UMCA 控制在 DCS 与工控机的通信设计与实现	191
一、概述	191
二、硬件平台	191
三、软件平台	191
四、总体设计	192
五、功能运行程序的主要功能	192
六、运行效果	193
第六节 某炼化总厂糠醛装置 UCS 控制系统	193
一、润滑油糠醛精制装置 UCS 控制系统应用	193
二、糠醛装置 UCS 控制系统详细设计方案	197
第七节 UCS-6000 系统维护方法	202
一、控制器维护	202
二、HMI (人—机界面) 维护	203
三、UCS 控制系统操作规程与维护规程	206
第八节 某炼油厂单塔汽提装置 UCS-6000 应用	207
第九节 控制器参数	209
一、UMCCA 控制器参数	209
二、Smith 算法参数	211
三、UCS 控制器参数	211
第六章 模型预测控制及应用实例	222
第一节 模型预测控制	222
一、模型预测控制的基本概念	222
二、单变量动态矩阵控制	225
三、多变量动态矩阵控制	229
四、模块多变量预测控制	230
第二节 模块多变量预测控制及在羰基合成反应器中的应用	237
一、简介	237
二、羰基合成反应器的控制问题	237
三、模块多变量预测控制算法	239
四、应用	242
第三节 常压加热炉的先进控制与优化	244
一、常压加热炉的控制	244
二、某厂东蒸馏装置常压加热炉工艺及其控制系统	246
三、PID 控制器参数的自动整定	248

四、4 路支管温度平衡控制	249
五、常压加热炉出口总管温度的阶梯式广义预测控制	251
六、常压加热炉出口总管温度的模块多变量预测控制	255
七、常压加热炉燃烧优化	261
八、常压加热炉在线燃烧优化控制	264
九、工业锅炉在线燃烧优化	273
十、广义预测控制 (GPC) 算法与 UMCCA 控制算法的合成应用	277
参考文献	282

绪 论

一、工业自动化技术

近 60 年来,为了使工业生产过程安全、稳定、长期、满负荷以及在优化条件下运行,人们创造和开发了各种各样的控制理论、方法和算法,最典型的是长期从实践经验中创造总结出来的比例 (P) 加积分 (I) 加微分 (D) 的反馈控制算法,通常称为 PID 控制算法;若做成控制仪表,则称为 PID 控制器。直至今日,工业生产过程中大多数单回路控制系统,如温度、流量、压力、液面等控制过程,都采用这种十分有效的控制算法。

PID 控制器在工业生产过程中一直被广泛应用,发挥着巨大的作用,并还在发挥着作用。然而 PID 控制器不是万能的,针对一些生产过程中难以解决的问题如大时滞、非线性、时变系统等,对于需要进行特殊控制和工业要求苛刻的控制并不能满足。在计算机技术高速发展的今天,利用现代控制理论来解决一些难以解决的生产过程问题取得了重大进展,特别是集散型计算机控制系统 (DCS)、工控机、可编程控制器 (PLC)、可编程自动控制器 (PAC) 的应用普及给控制器的发展与提高提供了一个广阔的空间。在石化、冶金、造纸、制药、发电、食品等各行各业的应用出现了针对具体生产过程设计的基于 PID 各种性能的专用控制器,对提高产品收率、保证产品质量、降低能耗起到了积极的作用。

然而,随着工业生产过程复杂性的增加和生产规模的不断扩大,并由于对产品质量的严格要求及能源和原材料的紧缺等,迫切要求企业节能降耗,提高生产效率。在 20 世纪五六十年代,从工业生产过程特点出发,人们提出了许多切合工业生产过程实际的比值控制、均匀控制、选择性控制、阀位控制、超驰控制、串级控制、前馈控制、推断控制以及纯滞后补偿控制等方法。在使用计算机控制系统后,这些方法都能有效地在实际工业生产过程中得以应用,取得很好的效果。同时,在这一时期提出了现代控制理论,用以解决复杂过程的控制问题,如航空航天控制。这种控制包括状态反馈控制、自适应控制、各种改进的 PID 控制、模糊控制、专家控制、神经元控制以及鲁棒控制等。特别是基于模型的多变量预测控制先进控制方法,到 2000 年,世界上在流程工业,如精馏过程、石油化工、造纸、空气分离、炼钢等领域,已有 5000 多个成功应用的实例。最近 20 年我国也从 Adersa、AspenTech、Honeywell 等公司购买了近百套多变量模型预测控制软件,并且 AspenTech、浙大中控软件和 Honeywell 等公司在国内已有近百套成功应用示例。以模型预测控制为代表的先进控制 (APC) 技术,在流程工业中应用已取得重大进展,并且可为企业带来显著的经济效益。国内外应用实践证明,这是一种最适合现代复杂工业生产过程进行优化控制的现代控制方法。

随着我国加入 WTO,我国制造业直接面对世界范围的激烈竞争,为了提高企业的市场竞争能力,都需要采用计算机、网络、信息和自动控制等先进技术,改造传统工业生产过程的管理、运行,有效利用企业资源,进行科学化、精细化和最优化的管理与控制,提升企业的生产技术水平,以达到企业利润最大化的目的。在流程工业中开展计算机集成制造 (CIMS)、企业资源规划 (ERP)、企业管理执行系统 (MES) 等现代企业信息综合集成化建设。这种从现代化管理新理念出发,进行企业信息化建设,虽然花了大量的经费和人力,

但至今还没有很成功的应用例子，其关键问题是缺乏企业活动、运行过程中的真实、准确、一致的数据，以及对管理与控制一个现代化企业本身规律的认识。

二、计算机控制技术

半个多世纪以来，化工自动化检测仪表和自动控制系统经历了气动仪表、电动仪表、计算机控制和网络控制（典型的产品如现场总线控制系统）时代，见表 1。

表 1 工业过程控制系统发展过程

年 份	发明人	内 容
1788	James Watt	首创蒸汽机比例调速控制
1933	Taylor 公司 (ABB)	可调比例气动式控制器
1935	Foxboro 公司	比例积分式 40 气动控制器
1940	Taylor 公司 (ABB)	首推 PID 气动控制器 Fulscope100
1942	Taylor 公司 (ABB)	提出 Ziegler 和 Nichols PID 参数整定准则
1951	Swartwout 公司	第一台电子真空管 PID 控制器
1959	Sailey Meter 公司	第一台全晶体管 PID 控制器
1964	Taylor 公司 (ABB)	第一台全数字 PID 控制器
1969	DEC 公司	第一台可编程控制器 (PLC)
1975	Honeywell 公司	第一台集散型计算机控制系统 (DCS) TDC-2000，从此进入工业过程计算机控制新时代
1976	Richalet	首先提出模型预测控制算法 (MPC)
1978	Adesar 公司	提出 IDCOM 多变量模型预测控制软件
1979	Shell oil 公司	提出动态矩阵控制 (DMC) 算法软件
1982	ASEA	推出 NOVATUNE 自整定 PID 控制器
1984	Foxboro 公司	推出 EXACT 自整定 PID 控制器
1985	IEC	开始制定国际现场总线标准
1992	—	展出现场总线产品 (92' ISA)

随着电子技术、微处理器、网络通信技术以及软件技术的不断发展，测量传感器的二次信号处理与变换，从模拟信号（4 ~ 20mA）转变成数字信号，精度有了很大的提高。在产品质量、成分、形态等“质量”信息的测量方面，引起工业界的极大兴趣，但是对我国来说，测量传感器、质量信息仪表以及特殊的执行器都远落后于国外的产品和发展水平，特别是化工生产过程在线流程分析仪更是缺乏。自 20 世纪 60 年代，计算机开始在化工生产过程中得以应用，那时应用的模式是直接数字控制（DDC）以及对工业生产过程的操作和监视。因为当初计算机控制系统的可靠性以及可使用性较差，所以无法大量推广应用。到了 1975 年，Honeywell 公司首先推出集散型计算机控制系统（TDC-2000），解决了计算机控制系统可靠性以及可使用性较差的问题，尽管其核心控制算法仍旧是 PID 算法，但工

业界广泛接受这样的系统，从而开创计算机在工业生产过程中控制的新时代。随后，国外有众多仪器仪表厂商各自生产这种通称为“DCS”的计算机控制系统。经过近 30 年的发展，DCS 已成为工业生产过程控制最主要的工具。我国对 DCS 的研究开发从 20 世纪 80 年代起，经历了将近 20 年，到 20 世纪 90 年代才有自主的国产 DCS，其中浙大中控、北京和利时、上海新华等在制造 DCS 方面都具有各自的特色。目前，国产 DCS 在国内市场上的占有率已超过半数，并有少量出口。作为计算机控制工业生产过程的另一种自动化工具可编程控制器（PLC），现在发展为可编程自动化控制器（PAC）。PLC 在化学工业中的间歇化学反应、聚合反应、精馏过程、注塑机、干燥、结晶、调和、产品分装等有着广泛的应用。但是，国产的 PLC 十分少见，大量使用的都是日本、德国和美国的产品。最近 20 年，基于网络控制系统的开发研究十分活跃，特别是现场总线控制系统，国际上已有各种成熟可用的产品，如基金会现场总线（FF）、Profibus 总线、LonWorks 总线、WorldFIP 总线、CAN 总线及 P-ENT 总线，我国也有一些引进并用于化工生产过程。20 世纪末国内有些研究单位开始研究基于以太网的现场总线控制系统，并参与了国际实时工业以太网标准的制定工作。DCS、PLC 和现场总线控制系统这 3 种计算机自动控制工具，在技术和应用领域上各有自己的特色和优点，在今后一段时间内，它们之间将会共存并起着互相补充的作用。

三、工业自动化技术展望

进入 21 世纪，计算机、网络已深入到社会各个方面，人们提倡讲科学、讲技术，在这信息爆炸的时代，要保持在全球范围内的竞争实力就要保持更低的价格、更新的产品和可靠的服务，生产过程必须不断融合先进的过程控制技术和信息技术。在此就工业自动化发展中值得关注的几个问题进行一些探讨。

(1) 工业自动化设计理念问题。工业生产过程设计历来都是以工艺为主，自动化为辅，特别是在国内，其自动控制设备（包括动力强电部分）投资，占整个项目投资的比例比国外少。工业自动化设计目标只满足生产过程安全、稳定操作和运行，即满足工艺要求。然而，现代化企业需要对整个企业的物资、能源、设备、资金市场和人力等资源进行实时的整合和优化，需要大量的实时的企业运行过程信息，而现有的石油化工（简称石化）企业都缺少这些真实反映一个企业运行的十分重要的信息。虽然有许多统计报表，却很难准确、及时地描述一个企业的实际运行、管理、控制状况。因此，要从一个企业整体实行科学化管理出发，在企业设计时要将控制理念贯穿于从管理到基本单元的运行和控制，特别是要加强基础自动化的建设内容，即完善的自动测量系统和完好的基本自动控制回路，这才能为企业进行科学化、最优化管理与控制打下良好的基础。

(2) 加强传感器、质量分析仪与计量系统的研究与开发。使用传感器和质量分析仪等测量仪表是了解一个企业生产过程信息唯一的直接方法。随着工业生产的多样化、精细化，对产品质量的严格要求，工业自动化技术必须充分利用更多的现场测量数据来控制日益复杂的工业生产过程。传感器和质量分析仪的不足，将严重影响优化和反馈控制的实施。同时，由于缺乏自己国产的产品，使得国外这类产品在国内价格居高不下。

(3) 大力推广先进控制软件在流程工业中的应用。在国际上，经过 20 多年的研究和开发，基于模型预测的多变量最优控制技术已经成为一种标准的控制技术。众多实践证明，这是一种投资不多收效快的现代先进控制技术。因为工业自动化技术发展到今天，已从单回路控制发展到整个单元或整个生产流程的整体协调控制，基于模型预测多变量最优控制技术是集控制和计算机技术而开发的软件系统，是一种完全可用来稳定地控制整个生产过

程的自动化工具。这一技术在我国的应用还只是刚刚开始，但是在实践中使自动控制工作者常常体会到，要使好的自动化工具发挥出好的作用，必须对被控过程深入地认识和了解，只有成为这一过程工艺、运行、操作的专家，才能设计出合适的多变量控制系统并建立与工业生产实际相符的预测模型。这方面的人才和专家在我国比较缺少。

(4) 流程工业企业综合自动化。为了充分利用企业内部的各种资源，及时进行优化配置与调控，提高在激烈市场中的竞争能力，各个企业都积极加快自身的信息化建设。学术界也提出了各种解决方案，有的还提出了炼厂智能工厂解决方案等。但是十几年的实践表明，CIMS、ERP 是在企业完善自动化基础上，根据企业实际要求，应用计算机、网络和有关系的软件（如关系数据库和实时数据库），可用于解决企业的科学化、最优化的管理和控制问题。因此，企业综合自动化的任务，首先是必须建立完善的基础自动化和信息获取系统，其次是深入了解一个现代化企业的实际运行规律，最后应用计算机和网络等技术为解决企业实际问题服务。

(5) 随着计算机、网络通信和传感器技术广泛普及和应用，控制在人类社会活动和生活中发挥着核心的作用。控制通过测量系统当前的状态来反馈修正系统的行为，从而确保系统达到期望目标。因此，加强控制、计算机、通信和网络技术一体化的研究，其中包括网络化、分布式系统建模和新的控制原理、方法、工具以及可靠的嵌入式实时软件等，是今后控制所面临的主要研究方向。其次是应用运筹学、随机统计等学科知识进行决策控制理论研究，并且直接面向石化企业的运行规律和特点，例如针对不确定情况下企业资源动态分配、动态系统学习与自适应以及人工智能等，进行应用性开发研究。

(6) 控制与生产工业的发展互相促进。除了不断提高产品质量，对污染、安全、能源和原材料消耗的严格要求驱动着控制在过程工业中得到广泛应用。同时，工业生产物理过程的复杂性，如现代化过程系统的非线性动力学特性，其中包括模型的不确定性、执行机构和状态的约束以及系统的高维特性，这又推动和促进控制理论研究的发展。最近几年新的过程工业领域，如纳米材料生产过程、环境科学、生物化学过程等既为控制提供新的应用领域，同时也给控制提出许多挑战性问题。

四、先进控制技术和方法

自动控制理论是应用数学的一个研究方向。多年来，从事控制论的应用数学家取得了许多关于控制论的研究成果，见表 2。然而，从数学观点所开发的控制理论，要在工程实际，如石化过程中应用，还要做许多的工作，因为工业生产实际过程中数学模型的建立是一件很困难的、技术性很强的工作。由于数学模型无法精确建立，使得控制论很难在实际过程中应用。

自 20 世纪 60 年代起，控制论和过程控制科技工作者都致力于控制理论的应用工作，相继提出许多切合工程实际应用的控制技术和方法。而工业生产过程的控制器的设计与应用始终是一个永恒的主题，本书将对典型的工业过程控制器的设计与应用、无模型控制技术、UMCA 控制算法、广义预测控制技术以及它们综合的控制技术构成的控制器的设计与应用进行介绍，以供工业自动化科技工作者和大专院校讲解自动控制的教师作为参考。

表 2 控制论的研究成果

时间	研究人员	研究内容	年代	研究人员	研究内容
1900 年	Liapunov	非线性系统稳定性分析	20 世纪 60 年代	Kalman	滤波理论
1922 年	Minorskv	受控车厢稳定性问题		Rosenbrok	优化设计理论
1930 年	Nyquist	稳定性与频率特性关系		Zames	新的稳定性分析理论
	Black	图解分析技术		Kailath	估计理论
1940 年	Wiener	控制论（滤波与优化理论）	20 世纪 70 年代	Astrom	辨识与自适应控制
20 世纪 40 年代末	Shannon	采样理论		Polak,Mayne	约束优化理论
20 世纪 50 年代	Zadeh	采样数据系统		Richalet	过程优化控制算法
	Beliman	动态规划		Carcia	模型预测控制
	Pontryagin	极大值原理，动态优化控制		Brosilow	推断控制（内模控制）
1956 年	—	国际自动控联（IFAC）成立			

第一章 典型工业过程控制器的设计与应用

在生产过程中由于过程对象的不同，则针对具体过程对象所设计的控制器也不相同。本章介绍一些在实际生产过程中应用成功的范例。

第一节 压力控制系统的控制器设计与应用

对于线性系统，有时为了满足系统的特殊要求，或者为了进一步改善控制系统的性能指标，往往人为地引入非线性控制规律。这类控制系统在过程控制领域不乏范例，如为了达到均匀控制的目的，采用具有不灵敏区的非线性控制规律；为了使随动系统能平稳地达到设定值，采用变增益控制器；为了使系统能从一个工作点最快地移动到另一个工作点，采用最短时间控制；为了节约能量，采用最小能耗控制等。

从方法论的角度来看，最短时间控制与最小能耗控制是属于最优控制的 Bang-Bang 控制问题。20 世纪 90 年代初，受 Bang-Bang 控制的启发，人们在相平面分析法的基础上，发展了一类新颖的控制方法——变结构控制，并受到过程控制界的重视。

一、Bang-Bang 控制与切换曲面

Bang-Bang 控制几乎是最短时间控制的同义词，然而，最小能耗（燃料）控制问题也常常具有 Bang-Bang 控制的特点，但 Bang-Bang 控制是从最短时间控制问题引申出来的，故在此只讨论最短时间控制问题。

最短时间控制指的是在有限的控制作用下，使系统状态 $x(t_0) = x_0$ 能够最快地转移到平衡位置 $x(t_f) = 0$ 。因此，目标函数是：

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 \quad (1-1)$$

约束条件是：

$$|u(t)| \leq 1 \quad (1-2)$$

这类最优控制对间歇过程很有好处，例如有的间歇反应器需以最快的速度升到规定温度，然后保持不变；同样地，对于过程的开工与停工、大幅度扰动的作用以及工作条件的大幅度变化等都是极为适用的。

为了说明最短时间控制的实质，以两阶系统为例予以介绍。

假定过程的传递函数为 $g(s) = \frac{1}{s^2}$ ，写成状态方程形式是：

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1-3)$$

对此系统的最短时间控制问题，其哈密顿函数为：

$$H = 1 + [\lambda_1(t), \lambda_2(t)] \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \right\} = 1 + \lambda_1(t)x_2(t) + \lambda_2(t)u(t) \quad (1-4)$$

根据最优控制的极小值原理，为了使 H 达到最小值，则在 $\lambda_2(t)$ 为负时， $u(t)$ 应取 +1，而在 $\lambda_2(t)$ 为正时， $u(t)$ 应取 -1，即：

$$u(t) = \begin{cases} +1 & \lambda_2(t) < 0 \\ -1 & \lambda_2(t) > 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

在式 (1-5) 中，由于 $\lambda_2(t)$ 是待求的函数，则关键问题是如何确定在一开始时， $u(t)$ 究竟应该取何值；另外在什么时候， $u(t)$ 应予切换。

解决这个问题可通过协状态方程与边界条件，直接确定出 $\lambda_2(t)$ 。然而，更简单的办法是利用相平面分析法，直接画出 $u(t)$ 分别为 +1 与 -1 时， $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的相轨迹，然后找出切换点。

在 $u(t) = +1$ 时：

$$\frac{dx_1(t)}{dx_2(t)} = x_2(t)$$

故

$$x_1(t) = \frac{1}{2}x_2^2(t) + C \quad (1-6)$$

式中 C 为任意常数。

根据式 (1-6)，可在 x_1-x_2 平面上画出相轨迹，得到的相平面图如图 1-1 中的实线所示，箭头表示状态运动的方向。需要注意的是，只有曲线 C_+ 通向原点。

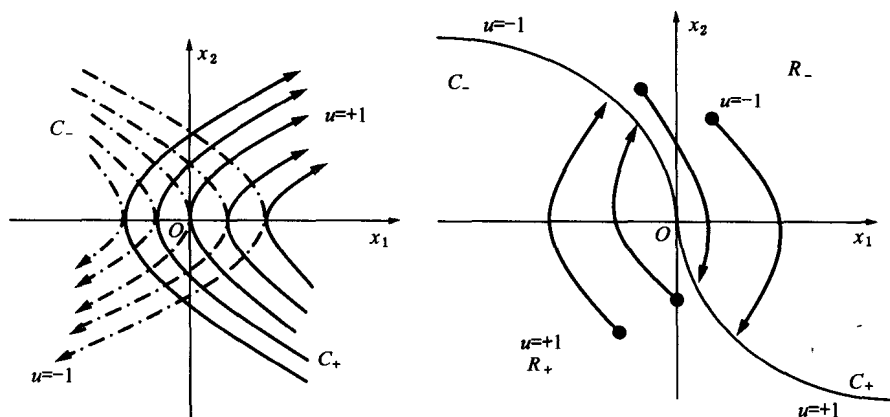


图 1-1 最短时间控制的相轨迹

而当 $u(t) = -1$ 时：

$$\frac{dx_1(t)}{dx_2(t)} = -x_2(t)$$

故

$$x_1(t) = -\frac{1}{2}x_2^2(t) + C \quad (1-7)$$

根据式 (1-7), 同样可画出相轨迹, 如图 1-1 中的虚线所示, 箭头也表示状态运动的方向。这里, 只有曲线 C_- 通向原点。

显然, 从任何一个初始点出发, 遇到曲线 C_- 或 C_+ 时应对 $u(t)$ 进行切换, 然后直趋平衡点。曲线 C_+ 与 C_- 组成了切换曲线 (多变量系统为切换曲面), 其方程由 $x_1(t) = \frac{1}{2}x_2^2(t)$ 与 $x_1(t) = -\frac{1}{2}x_2^2(t)$ 组成, 可表示为:

$$S[x_1(t), x_2(t)] = x_1(t) - \frac{1}{2}x_2(t)|x_2(t)| \quad (1-8)$$

切换曲线把相平面划分为两部分。到切换之后, $u(t)$ 应该取 $u(t) = +1$, 即进入 C_+ 曲线前, $u(t)$ 应该取 $u(t) = -1$, 这区域可用 R_- 表示, 同理, 到切换后应该取 $u(t) = -1$, 即进入 C_- 曲线的, 一开始应该取 $u(t) = +1$, 这区域可用 R_+ 表示。

R_+ 区域位于 C 曲线之右, $x_1(t) \leq \frac{1}{2}x_2(t)|x_2(t)|$, 即 $S[x_1(t), x_2(t)] \leq 0$; R_- 区域位于 C 曲线之左, $S[x_1(t), x_2(t)] \geq 0$ 。

因此可总结得出, 最优控制作用 $u^*(t)$ 是:

$$u^*[x_1(t), x_2(t)] = \begin{cases} +1, & S[x_1(t), x_2(t)] \leq 0 \\ -1, & S[x_1(t), x_2(t)] \geq 0 \end{cases} \quad (1-9)$$

而且还可以通过最优控制理论推出下列结论:

(1) 最优控制作用 $u^*(t)$ 要么取容许最大值, 要么取容许最小值, 因此属 Bang-Bang 控制, 如图 1-2 所示。

(2) 最优控制作用 $u^*(t)$ 的取值经过有限次切换后, 可使系统达到平衡状态, 如系统矩阵 A 的特征值全部为实数, 则 $u^*(t)$ 的切换最多不超过 $(n-1)$ 次。

(3) 最优控制作用 $u^*(t)$ 的取值在相平面的切换曲面上进行切换。

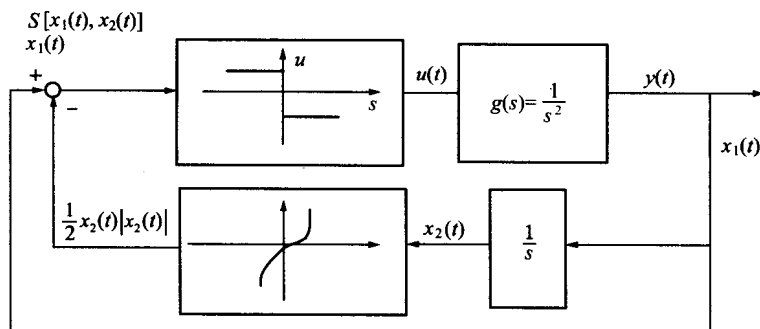


图 1-2 Bang-Bang 控制系统框图

二、变结构控制系统

从上述讨论可知, Bang-Bang 控制采用的控制规律是不连续的双位式控制, 而且当系