

化 学 工 业 信 息 化 丛 书

化工过程 先进控制

黄德先 叶心宇 竺建敏 李秀改 编著



化学工业出版社

化 学 工 业 信 息 化 丛 书

化工过程 先进控制

黄德先 叶心宇 竺建敏 李秀改 编著
金以慧 审校



化学工业出版社

· 北京 ·

本书为《化学工业信息化丛书》之一，是针对先进控制技术的应用与发展而编写的。主要内容包括先进控制技术的理论基础、建立过程模型的工程化方法、软测量技术的工程化方法、模型预估控制算法、多变量预估控制软件与工程化技术、其他先进控制技术、先进控制技术的工程实施及维护、先进控制在化工过程典型生产过程中的应用实例。书后附有部分国外公司先进控制与实时优化软件产品介绍。

可供石化企业信息化工作者、管理者、领导者参考，可作为高等院校化工系统工程相关专业教材，也可作为化工信息化认证考试用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工过程先进控制/黄德先等编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 4

(化学工业信息化丛书)

ISBN 7-5025-8550-8

I. 化… II. 黄… III. 化工过程-过程控制
IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 036250 号

化学工业信息化丛书

化工过程先进控制

黄德先 叶心宇 竺建敏 李秀改 编著

金以慧 审校

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 丁建华

责任校对: 郑捷

封面设计: 关飞

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 360 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8550-8

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

总 序

在《化学工业信息化丛书》编委会、中国化工学会秘书处与信息技术应用专业委员会、化学工业出版社以及各位作者和有关部门的共同努力下，历时三年，该《丛书》问世了。我仅以中国化工学会和丛书编委会的名义，对丛书的出版问世表示热烈祝贺！

三年前，我们开始策划出版该套丛书。根据以信息化带动工业化，以工业化促进信息化，走新型工业发展道路的战略思想，中国化工学会信息技术应用专业委员会建议，利用专业委员会在化工信息技术应用领域的代表性和权威性，调动专业委员会内部力量与社会外部力量，尽快编写出一套化工信息化丛书。主要着眼点是总结国内外石油、石化、化工行业信息技术应用的经验，梳理其成长的轨迹，介绍其主流的技术，推荐其优秀的案例，展望其发展的未来，以满足广大石油、石化、化工领域技术工人、工程技术人员和领导干部从事信息化建设的需要，促进、推动在石油、石化、化工行业方兴未艾的企业信息化建设的科学、和谐与健康发展。

本丛书包括《企业信息化组织与管理》、《化工过程控制系统》、《化工过程模拟与优化》、《化工企业资源计划系统 ERP》、《化工生产执行系统 MES》、《化工过程先进控制》、《化工生产计划与调度优化》、《化工实验室信息管理系统 LIMS》和《数字油田》9 个分册。

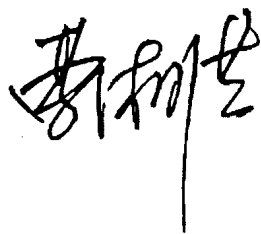
该套丛书的编写，采用了开放的模式，石油、石化、化工行业的信息技术应用专家、科研院所和高等院校的学者和教授，以及国外知名信息技术公司的高层技术主管“三结合”，参与书稿的讨论或撰写，达到了博采众长、兼收并蓄的效果。

该套丛书反映了石油、石化、化工行业信息技术的最新应用成果，具有前瞻性和先进性；同时又深入浅出，具有良好的实用性和可读性。丛书的编写原则是成系列而又不繁杂，选题新颖而又避免重复，突出行业特点而不是仅考虑通用性，重视实用而不仅偏重理论，也可以说是一套具有技术性、实用性、工具性、通俗性的高级科普读物或工具丛书。

在本书编写过程中，许多国内外石油、石化、化工行业的信息技术应用专家，高等院校、科研院所从事信息技术应用教学科研的教授、学者、化工出版社的领导和编辑，以及国内外许多 IT 公司的高级技术总监和顾问为本丛书的策划、组织、编写付出了大量心血，提供了大量资料甚至经费上的支持。在此，我谨代表中国化工学会暨信息技术应用专业委员会、代表丛书编委会向所有为丛书做出贡献的同志、朋友表示衷心的感谢！

社会在进步，科学在发展，技术在不断涌现。我希望这套丛书在知识经济条件下，能成为石油、石化、化工领域的各级管理人员、技术工人和工程技术专家在信息化建设的过程中爱看、经常看的工具书。

中 国 工 程 院 院 士
中 国 化 工 学 会 理 事 长
《化学工业信息化丛书》编委会主任



2006 年 1 月

前 言

20 世纪 80 年代发展起来的先进控制技术，由于突破了常规的单参数 PID 控制模式，着重于装置的整体控制，即以整个装置为对象，把主要被控变量和操纵变量全部纳入控制系统，因而具有良好的跟踪性能，而且所实现的整体控制既保证了整个装置的稳定运行，又可以实现卡边优化生产的目标。先进控制技术是一个投入少、见效快，将基于现代控制理论的最优控制技术、建模技术和基于经典控制理论的反馈控制技术进行完美结合的一门新的应用技术，并已形成了商品化的工程软件，在石油化工过程中获得了广泛应用，在美欧等发达国家已得到普遍的应用，取得了明显的社会和经济效益。我国近年来对此开展了推广应用工作，也获得了一定的应用成果。但由于先进控制的开发、应用实施和运行维护工作都需要有了解化工工艺技术、自动控制技术、计算机技术和具有工程经验的综合性人才，以及我国在生产装置的基础设施、生产工况、管理体制等方面的情况，使得我国先进控制应用的效果尚不尽如人意。

目前，国内外有许多通用先进控制软件，它们都具有较为完善的工具软件，但是如果不了解工艺过程特性和先进控制的基本原理，仅依赖于工具软件不可能做好先进控制的应用。编写本书的目的就是为实施和应用先进控制技术的技术人员提供一些有益帮助，希望他们能较全面地了解 and 掌握先进控制这门综合性的应用技术，更好地在实际生产中应用先进控制技术。为此，本书在编写上力求深入浅出、通俗易懂，在内容安排上，则先补充一些必要的基础知识，再讲述基本概念和进行机理分析，然后结合案例深入介绍各种先进控制技术的原理和特点，最后附录中附上部分国外公司的先进控制与实时优化软件情况介绍，以方便读者查询。

本书共分 9 章。第 1 章引言是由黄德先编写，第 2 章先进控制技术的理论基础、第 3 章建立过程模型的工程化方法和第 5 章模型预估控制算法是由黄德先、李秀改编写，第 4 章软测量技术的工程化方法和第 7 章其他先进控制技术是由李秀改编写，第 6 章多变量预估控制软件与工程化技术是由竺建敏、叶心宇、黄德先编写，第 8 章先进控制技术的工程实施及维护是由叶心宇编写，第 9 章先进控制在化工过程典型生产过程中的应用实例是由黄德先、竺建敏、叶心宇编写。书后附录软件产品介绍是由艾斯本技术（北京）有限公司、霍尼韦尔公司、横河电机公司和英维思过程系统公司提供。全书由金以慧审校、黄德先统稿。

本书在编写过程中，一直得到清华大学金以慧教授的指导和支持，并认真审阅了全文，提出了详细的修改意见，在此向她表示诚挚的感谢。本书的顺利完成得到了中国石油大学的袁璞教授和郑远杨教授的大力支持和帮助，无私地为本书提供了他们二十多年来的科研和教学成果，袁璞教授直接为本书第 6 章和第 9 章撰写了 3 节内容，郑远杨教授为本书第 3 章机理分析建模一节提供了他的授课讲义，在此向他们表示衷心的感谢。最后作者对为本书做出贡献的同事和学生们表示感谢。

由于作者水平有限，缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者于清华园

2006 年 1 月

目 录

第 1 章 引 言	1
1.1 什么是先进控制	1
1.2 化工工业过程先进控制技术发展及其应用	1
1.3 石化过程先进控制的发展趋势	8
1.3.1 加强针对我国国情的先进控制技术的研究与开发	8
1.3.2 融入综合自动化的总体框架	9
参考文献	10
第 2 章 先进控制技术的理论基础	11
2.1 矩阵	11
2.1.1 矩阵的定义和常见矩阵	11
2.1.2 矩阵的运算	12
2.1.3 矩阵的秩	13
2.1.4 矩阵的分块表示	14
2.1.5 矩阵的逆	15
2.1.6 矩阵的奇异值分解	15
2.1.7 二次型与对称方阵	16
2.2 最小二乘估计方法	16
2.3 最优化技术	18
2.3.1 线性规划	19
2.3.2 非线性规划	20
2.3.3 二次规划	20
2.3.4 智能优化算法	21
2.4 最优控制	21
2.4.1 最优控制问题的数学描述	21
2.4.2 线性连续系统的最优控制	22
2.5 推理控制	24
参考文献	26
第 3 章 建立过程模型的工程化方法	27
3.1 模型的描述和建模途径	27
3.1.1 模型主要描述形式	27
3.1.2 建模途径	29
3.2 机理分析建模	30
3.2.1 机理分析建模技术	30
3.2.2 常见生产单元的建模示例	36
3.3 实验建模	48

3.3.1 非参数模型辨识方法	49
3.3.2 参数辨识方法	51
3.4 基于神经网络的智能建模方法	55
参考文献	56
第4章 软测量技术的工程化方法	57
4.1 软测量技术概述	57
4.2 软测量技术的主要工程化方法	58
4.2.1 机理建模	58
4.2.2 状态估计	58
4.2.3 统计建模	59
4.2.4 神经网络	62
4.2.5 模糊技术	63
4.2.6 支持向量机	64
4.2.7 混合建模	64
4.3 软测量实施中的一些问题	65
参考文献	67
第5章 模型预估控制算法	69
5.1 基于阶跃响应的动态矩阵控制 (DMC)	70
5.1.1 模型预估	70
5.1.2 反馈修正	72
5.1.3 滚动优化	72
5.2 基于脉冲响应的模型算法控制 (MAC)	76
5.3 基于 CARMA 模型的广义预估控制	77
5.4 基于状态空间模型的预估控制 (SFPC)	79
5.4.1 基于状态空间模型的预估控制算法	79
5.4.2 基于状态空间模型的预估控制算法的特点	81
5.5 结束语	81
参考文献	82
第6章 多变量预估控制软件与工程化技术	83
6.1 DMCplus 先进控制软件	84
6.1.1 DMCplus 的工程化技术	84
6.1.2 DMC-PLUS 系统特点和功能	87
6.1.3 DMCplus 系统组成	87
6.2 Profit Controller (RMPCT)	88
6.2.1 Profit Controller (RMPCT) 的工程化技术	88
6.2.2 Profit Controller (RMPCT) 的特点和功能	92
6.2.3 Profit Controller (RMPCT) 组成	93
6.3 SMART 多变量预估控制软件	94
6.3.1 SMART 多变量预估控制软件的工程化技术	94
6.3.2 SMART 控制器的功能与特点	97

6.3.3	SMART 控制器组成	98
6.4	PACROS	99
6.4.1	PACROS 的工程化技术	99
6.4.2	PACROS 的特点和功能	103
6.4.3	PACROS 控制器组成	104
6.5	结束语	106
	参考文献	106
第 7 章	其他先进控制技术	108
7.1	内模控制	108
7.2	预测函数控制	109
7.2.1	基函数	110
7.2.2	PFC 的模型预估	110
7.2.3	PFC 中的反馈校正和补偿	110
7.2.4	优化计算	111
7.3	非线性液位控制	111
7.3.1	基于内模和预估的非线性液位控制	111
7.3.2	变周期单值预估控制技术及其应用	112
7.4	加热炉支路温度平衡控制	116
7.4.1	常规的加热炉支路平衡控制方案	117
7.4.2	加热炉支路温度平衡的多变量解耦控制	118
7.4.3	加热炉支路平衡的模型预估控制	119
7.5	双控制器	120
7.5.1	双控制器结构	120
7.5.2	双控制器的控制原理	121
	参考文献	121
第 8 章	先进控制技术的工程实施及维护	123
8.1	先进控制技术的工程实施	123
8.1.1	可行性研究阶段	123
8.1.2	功能设计阶段	125
8.1.3	详细设计阶段	125
8.1.4	试运行阶段	126
8.1.5	工程维护	127
8.2	先进控制技术的维护	127
8.2.1	目前的控制现状	128
8.2.2	过程控制监视系统	128
8.2.3	工程维护	129
8.3	结束语	130
第 9 章	先进控制在化工过程典型生产过程中的应用实例	131
9.1	原油蒸馏装置 (CDU)	131
9.1.1	需要解决的主要问题	131

9.1.2	产品质量指标的软测量	132
9.1.3	先进控制策略	133
9.1.4	应用效果	136
9.2	催化裂化装置 (FCCU)	137
9.2.1	反应再生部分的先进控制与实时优化	138
9.2.2	主分馏塔部分的先进控制与实时优化	145
9.2.3	吸收稳定部分先进控制与实时优化	152
9.3	催化重整装置 (CRU)	159
9.3.1	重整反应器的先进控制与实时优化	159
9.3.2	分离部分的先进控制	165
9.4	延迟焦化装置 (DCU)	169
9.4.1	需要解决的主要问题	169
9.4.2	延迟焦化装置中的软测量	170
9.4.3	先进控制策略	173
9.4.4	现场应用	175
9.5	罐区自动化	178
9.5.1	需要解决的主要问题	178
9.5.2	罐区自动化的解决方案	178
9.5.3	油品调合自动化	179
9.5.4	油品移动自动化	184
9.6	结束语	191
	参考文献	191
附录 A	艾斯本技术 (北京) 有限公司产品介绍	193
附录 B	霍尼韦尔公司产品介绍	207
附录 C	横河-壳牌先进控制与实时优化产品介绍	215
附录 D	英维思过程系统公司产品介绍	222

第 1 章 引 言

自连续生产工业形成大规模生产以来,自动控制就成为连续工业中保证产品质量,提高产率的不可或缺的一部分。在生产过程自动控制中使用最为广泛的是 PID 控制算法,其原因是 PID 算法鲁棒性强、操作方便。但是由于装置处理量不断增大,工艺过程越来越复杂,对自动控制的要求也越来越高。为追求更好的控制性能、更有效的抗干扰能力和更能控制体现产品质量的性能指标, PID 算法显然不能满足人们的要求。开发和应用更先进的控制方法,例如基于模型的控制算法(先进控制算法),便成了近二十多年来的热点。

1.1 什么是先进控制

先进控制(Advanced Process Control, APC)是对那些不同于常规控制,并具有比常规 PID 控制更好的控制效果控制策略的统称,而非专指某种计算机控制算法。但至今对先进控制还没有严格的、统一的定义。尽管如此,先进控制的任务却是明确的,它是用来处理那些采用常规控制效果不好,甚至无法控制的复杂工业过程控制的问题。通过实施先进控制,可以改善过程动态控制的性能、减少过程变量的波动幅度,使之能更接近其优化目标值,从而使生产装置在接近其约束边界的条件下运行,最终达到增强装置运行的稳定性和安全性、保证产品质量的均匀性、提高目标产品收率、增加装置处理量、降低运行成本、减少环境污染等目的。先进控制的主要特点在于:

① 是基于模型的,并以系统辨识(最小二乘法为基础)、最优控制(极大值原理和动态规划方法等)以及最优估计(卡尔曼滤波理论)等现代控制理论为基础的一种控制方法;

② 必需借助于计算机来实现,数据处理与传输、模型辨识、控制规律的计算、控制性能的评价、整体系统的监视(包括统计计算、各种图形显示)等均需依赖于计算机。

从目前来看,预估控制(Predictive Control,又称为预测控制)、推理控制(Inferential Control)、解耦控制(Decoupling Control)、自适应控制(Adaptive Control)、最优控制(Optimal Control)等都应属于先进控制的范畴。

1.2 化工工业过程先进控制技术发展及其应用

在过程工业界,特别是石化过程中,从 20 世纪 40 年代开始, PID 控制算法是单输入单输出简单反馈控制回路的核心算法,其理论基础是经典控制理论,主要采用频域分析方法进行控制系统的分析设计和综合。目前 PID 控制器仍广泛得到应用,即便是在大量采用 DCS 控制的最现代化的装置中,这类回路仍占总回路数的 80%~90%。这是因 PID 控制算法是对人们简单而有效操作方式的总结与模仿,足以维护一般工业过程的平稳操作与运行,而且这类算法简单,应用历史悠久,工业界比较熟悉并容易掌握。然而,单回路 PID 控制并不

能适用于所有的过程和不同的控制要求。从 20 世纪 50 年代开始, 逐渐发展了串级、比值、前馈、均匀和史密斯 (Smith) 预估补偿等复杂控制系统 (即为当时的先进控制系统), 在很大程度上满足了当时生产过程的一些特殊的要求。虽然它们从理论上讲仍然是经典控制理论的产物, 但是在结构和应用上各有特色, 直到目前仍在继续不断地得到改进和应用。

在工业生产过程中, 仍有 10%~20% 的控制问题采用上述控制策略无法奏效, 所涉及的控制过程具有强耦合性、非线性和大纯滞后等特征, 并存在着苛刻的约束条件, 更重要的是这些过程大多处于生产的关键部位, 直接关系到产品的质量、产品收率、原材料消耗和能耗等经济指标。随着过程工业日益向大型化、连续化方向发展, 加上市场的激烈竞争等, 对过程控制的品质和经济指标提出了更高的要求, 迫切需要一类新的先进控制策略。

自 20 世纪 50 年代末发展起来的以状态空间方法为基础的现代控制理论, 为过程控制带来了基于模型的状态反馈、输出反馈、解耦控制等一系列多变量控制系统设计方法; 对于状态不能直接测量的情形, 也有观测器和估计器等技术和工具。然而, 这些方法大多需要对象的数学模型, 而工业过程的复杂性使得建立其正确数学模型比较困难。此外现代控制理论所需的数学基础也在一定程度上限制了它被工业界技术人员所熟悉和了解。

为了把现代控制理论应用于过程控制领域, 解决过程控制中提出的难题, 人们进行了不懈的努力, 20 世纪 70 年代以来, 更是加强了建模理论、辨识技术及最优控制等工程化的研究, 这些研究工作对深入认识连续生产过程的特点和规律起到了重要作用。在此基础上, 并从工业过程的特点出发, 提出了一些对数学模型要求不高, 在线计算方便并有较强鲁棒性的实用控制策略和方法: 如推理控制、鲁棒控制、自适应控制等。直到 20 世纪 70 年代末出现模型预估控制 (MPC), 才使最优控制的思想在过程工业中得到实际应用。模型预估控制以其建模方便、鲁棒性强、适应范围广以及便于实施等优点, 逐渐得到工业界的认可, 也开始了一些应用的尝试, 与其相应的理论基础和设计方法也得到了深入的研究, 为先进控制的实际应用打下了坚实的基础。

1980 年前后, 来自过程控制界的专家 J. Richalet、R. K. Mehra 和 C. R. Cutler 分别报道了解决实时动态环境下带约束多变量耦合系统控制问题的有关研究成果, 这就是著名的模型预测启发式控制 (MPHC)、模型算法控制 (MAC) 和动态矩阵控制 (DMC)。从此, 过程工业界便广泛接受了现代控制理论的概念, 引发了预估控制等先进控制策略在工业过程控制中的大量实际应用。20 世纪 80 年代, 世界上出现了许多约束模型预估控制的工程化软件包。经过模型辨识、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研究, 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中应用最成功, 也最具有前途的先进控制策略。

预估控制是直接从工业过程应用中提出的一类基于模型的优化控制算法。它的产生首先是工业实践的迫切需求, 也是来自对生产过程及其特点深入观察研究的灵感。它的出现使得过程控制中强耦合、大延迟等难题迎刃而解, 为过程控制增添了新的活力。预估控制大体可以用以下三个基本特征来加以描述。

① 预估模型 用模型来预估未来时刻被控对象的运动规律和被控参数的误差, 以之作为确定当前控制作用的依据, 使控制策略适应被控对象的存储性、因果性和滞后性, 可得到预想的控制效果。

② 反馈修正 利用可测信息, 在每个采样时刻对被控参数的预估进行修正, 抑制模型失配和干扰带来的误差。用修正后的预估值作为计算最优控制的依据, 使控制系统的鲁棒

性得到明显提高。

③ 滚动优化 预估控制是一种最优控制策略，其控制目标是使某项性能指标最小，并采用预估偏差来计算控制作用序列，但只有第一个控制作用序列是实际加以执行的。在下一个采样时刻还要根据当时的预估偏差重新计算控制作用序列。这种控制作用序列的计算不像最优控制那样一次计算出最优结果，而是按采样时间周而复始地不断进行，故被称为滚动优化。

预估控制的上述三个基本特征，是控制论中模型、反馈控制、优化概念的具体体现。它继承了最优的思想，提高了鲁棒性，可处理多目标及各种约束，因而符合工业过程的实际要求，故在理论和应用中得到迅速发展。到目前为止，预估控制代表性的算法有基于卷积模型的 MAC 算法、基于阶跃响应模型的 DMC 算法、基于差分方程模型的广义预估控制 GPC 算法、基于状态空间模型的 SFPC 算法和基于系统矩阵模型的 UPC 算法等。近年来，基于非线性模型和神经网络模型的预估控制也受到了关注，并有一些应用案例。

早期预估控制算法一般基于非参数模型，其代表为基于卷积模型的模型算法控制 (MAC) 和基于阶跃响应模型的动态矩阵控制 (DMC)，分别由 Richalet 和 Cutler 等提出。这类算法具有模型可通过脉冲响应测试或阶跃响应测试得到，模型获得容易，不需考虑模型阶次及结构，过程纯滞后包含在模型之中，易于表示动态响应不规则的对象特性，通用性强等优点。Garcia 和 Morari 将这些基于非参数模型的预估控制和其他控制系统统一为内模控制结构，并指出这类控制需满足双稳定原则：控制器和被控对象都稳定。但基于非参数模型的预估控制存在着计算量较大，占用内存较多等缺点。

继而，出现了基于 CARMA 模型或 CARIMA 模型的预估控制算法，它们都具有两部分功能：基于模型的预估控制算法和模型的在线辨识，也即利用在线辨识来构建模型，进行预估，而不是采用非参数模型。虽然利用辨识技术可以提高系统鲁棒性，但若被控对象中有不可测确定性干扰，或随机噪声是有色的，则辨识结果可能有很大误差，影响到控制等效果。

基于状态空间模型的预估控制 (SFPC) 算法综合了预估控制和状态反馈控制的特点，具有跟踪和抑制噪声能力强的优点，能方便地应用于多变量过程。在状态可测时，该算法适合于开环不稳定的被控过程。同时，该算法具有计算量小、内存占用少等优点。

但利用状态反馈预估控制的一个问题是有些状态空间模型的获得比较困难，另一个问题是有些状态不可测，需采用状态观测器来加以观测。另一种方法，基于系统矩阵模型的预估控制，它利用系统矩阵模型来描述被控过程，选取伪状态变量（系统矩阵模型中的变量）为过程中可以实测的变量，使这种描述既反映了输入、输出间的关系，又反映了过程内部的变化状况，应用方便，控制效果也较好。

预估控制之所以被工业界广泛接受，其中一个很重要的原因就是可以在控制器设计过程中系统地处理过程约束。实际过程中，无论是操纵变量（操作变量），还是被控变量（控制变量）、状态变量，经常会受到各种约束条件的限制，例如，幅值约束和速率约束等。约束条件按重要性可分为硬约束和软约束。硬约束是指那些必须满足的约束条件，如装置的物理限制，阀门的上下限等。而软约束则是指那些为满足其他更重要的目标，容许可以暂时违背的约束条件，例如，质量指标限等。当然，对处理过程约束有多种不同的处理方法。

预估控制采用启发式优化的概念，为设计者提供了许多可在线选择的参数。这样，一方

面增加了控制系统的自由度，另一方面也增加了设计的难度。预估控制的主要设计参数都以隐含的方式出现在闭环传递函数中，并且相互影响，难以进行定量分析，这正是预估控制的实施需要有较高的技术水平的原因。许多学者研究了设计参数与控制性能的关系，提出了一些具有指导意义的整定策略。

为了减少预估控制的计算量，便于实施，可以采用控制时域和预估时域分块等方法来进行简化设计。

单值预估控制是一种简单实用的控制算法，它完整地体现了模型预估控制的特点，它以预估时域作为调整参数，对稳定性、鲁棒性等进行协调，可取得与多值预估相当的控制效果，而且便于实施和调整。

针对过程控制提出的要求，国外许多著名的软件公司都推出了基于非参数模型预估控制为基础的多变量约束协调控制软件包，如 Setpoint Inc. 的 SMCA 及其核心软件 IDCOM-M，DMC Corp. 的 [DMC]TM，Honeywell Inc. 的 RMPCT 等。这些软件在石化企业中得到广泛应用，并取得了显著的经济效益。不同的软件包对约束和自由度的处理是不同的，这在很大程度上表征了一个软件包的各自特征。

Setpoint Inc. 的 IDCOM-M 控制器总体控制目标是在操作变量的约束前提下，使操作变量趋近于设定点或者保持在约束区域内。若自由度大于零，则试图将各操作变量趋近于其相应的理想设定值 (IRV)，同时做到不影响控制质量。被控变量给定值 (设定值，RV) 和约束区域由操作目标决定，IRV 根据经济目标来确立，可以人工给定或由过程优化器给出。IDCOM-M 中的约束控制器将若干相关变量的约束按照一定的算法，根据模型关系映射成代表变量的约束，从而减少了约束的个数。IDCOM-M 控制器在常减压蒸馏、催化裂化、分馏塔等装置中都有成功应用。

DMC Corp. 的多变量约束控制软件 [DMC]TM 采用线性规划原理来实现经济性能指标的最优化。通过求解一线性规划 (LP) 问题，控制器给出稳态时操作变量和被控变量的目标值，然后在控制过程中逐步逼近。控制器可以处理在整个动态响应区间内被控变量和操作变量的约束条件，应用方便，且控制效果也较好，同样，它也有大量成功应用的案例。

Aspen Technology 公司兼并了 Setpoint Inc. 和 DMC Corp.，推出了融合 DMC 和 IDCOM-M 的 DMC-Plus 先进控制软件，是目前最为广泛应用的先进控制软件之一。

Honeywell Inc. 的 RMPCT 也采用经济性能指标对操作变量进行优化。为增强鲁棒性，采用了区域控制、“极限漏斗”技术、奇异值门槛等手段对控制器进行设计。RMPCT 用控制时域和预估时域分块来考虑在有限个采样间隔点上的约束。RMPCT 先进控制软件目前在石化企业也得到广泛的应用。

Shell Oil Inc. 作为先进控制的早期使用用户和合作开发者，也在 20 世纪 80 年代开发出 SMOC 控制器，它综合了预估控制的约束处理特点和状态空间控制方法的状态反馈体系结构所带来的优点，能够具有可以用于开环稳定和不稳定的过程，利用显式的干扰模型来描述不可测干扰，利用卡尔曼滤波器来估计过程状态和不可测干扰等特色。

随着生产技术和生产过程的日益复杂，为确保生产装置安全、保证产品质量和卡边优化，推动了产品质量的直接闭环控制、质量约束和安全约束控制的广泛应用。但对产品质量指标等目前还不可测生产装置提出了实时测量被控变量的迫切需求。可是在许多生产装置的这类重要过程变量中，大部分由于技术或是经济上的原因，很难通过传感器进行测量，如催化裂化装置的催化剂循环量、精馏塔的产品组分浓度，生

物发酵罐的菌体浓度等。为了解决这些问题，形成了软测量方法及其应用技术的研究方向，正如著名过程控制专家 MacVoy 发表在 Automatica 上的论文所说，软测量已经成为过程控制的主要发展方向之一。在基于装置级的先进控制和优化的普遍应用以来，软测量技术得到了更为广泛的发展和应用。可以说，软测量在某种意义上决定了先进控制的成败，因而它已成为先进控制中不可或缺的重要部分。

软测量 (Soft-Sensor) 也称为软仪表 (Soft-Instrument)。它是用来“测量”那些难于测量或暂时不能测量的重要变量。其原理是选择那些能与被测变量构成某种数学关系的其他一些容易测量的变量加以测量，然后用此数学关系来推断和估计被测变量。这种不用硬件来测量变量的仪表被称为软仪表。实际上软测量与一般的测量仪表相比，原理上并无本质的区别，如流量变送器将压力传感器测量信号通过变送器内的电子元件或气动元件转换为流量输出信号；又如早期，通过单元组合仪表实现分馏塔内回流的计算，也是利用类似的方法得到了不能直接测量的变量，只不过它们是利用测量仪表内的模拟计算元件或模拟单元组合仪表来实现简单的计算，而不是利用计算机软件来实现的。现在大家对软测量较为普遍的共识是：软测量就是选择与被估计变量相关的一组可测变量，构造某种以可测变量为输入、被估计变量为输出的数学模型，用计算机软件加以实现的对重要过程变量的估计。

软测量方法比较系统的研究是源于 20 世纪 70 年代 Brosilow 提出的推断控制的基本思想和方法，即采集过程中比较容易测量的辅助变量 (Secondary Variable)，构造推断估计器来估计并克服扰动和测量噪声对过程主导变量 (Primary Variable) 的影响。推断控制策略中包括估计器和控制器的设计。现在发展起来的软测量技术就体现了这种估计器的特点。从数学上来看，软测量问题实质上就是一个建模问题。

现在研究和应用的软测量方法有许多种，按其建模方法来分，可以分为基于机理建模方法和基于实验建模方法两大类。

基于机理分析模型的软测量技术，由于工程背景明确，与一般工艺设计和计算关系密切，相应的软测量模型也较为简单，便于应用，因此基于工艺机理分析的软测量是工程中一种常用的方法，同时也是工程界最容易接受的软测量方法。在工艺机理较为清晰的应用场合，基于该方法的软测量往往能取得较好的效果。这种方法容易处理动态、静态、非线性等各种对象，有较大的适用范围，操作条件变化时也可以类推。它的缺点是建模的代价较高，对于某些复杂的过程难于建模，并且难以形成通用的软测量技术。目前，一般都是以针对某个具体生产单元计算包的形式出现。某些商品化的先进控制软件就备有这种软测量软件，一些非商品化的先进控制软件更多地采用这种形式的软测量技术。

另一种基于实验建模的软测量也是一种十分有用的软测量技术，由于它能够形成通用的软测量技术，因此该类软测量技术得到较多的研究，并形成了各种类型的方法，其中基于回归分析方法和基于神经网络模型两种实验建模方法得到了普遍的应用，已经成为先进控制商品化软件中的必备组件。

多线性回归方法 (Multi-Linear Regression, MLR) 是一种最早在化工过程中得到应用的回归分析方法，它是基于最小二乘法参数估计的方法。采用统计回归方法建立软测量估计模型，只要能够将输入输出归纳成 $Y = XB$ 线性方程形式 (X 为输入数据空间， Y 为输出数据空间， B 为回归模型参数向量)，就可以用最小二乘估计方法得到 $B = (X^T X)^{-1} X^T Y$ ，因而可以利用 $Y = XB$ 来进行软测量估算。

但对于多线性回归问题是否有解取决于 $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ 是否存在。当 \mathbf{X} 中存在线性相关的变量时, \mathbf{X} 为病态矩阵, $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$ 不存在, 此时不能采用最小二乘法求解, 只能采用主元回归法 (Principal Component Regression, PCR) 或部分最小二乘法 (Partial Least Squares, PLS)。它们都是基于如下主元分析 (Principal Component Analysis, PCA), 即将处于高维数据空间的 \mathbf{X} 矩阵投影到低维特征空间, 特征空间的主元素保留了原始数据的特征信息而忽略了冗余信息, 且它们之间是两两互不相关的。

PCR 方法是对输入数据空间进行主元分析, 得到能反映输入数据空间主要信息的主元, 完全去除了相关数据的影响。建立主元与输出 Y 的回归关系, 实现由输入变量对输出变量的估计。PLS 方法则不仅对输入数据空间进行主元分析, 也对输出数据空间进行主元分析, 并得到二者间的回归关系, 并保证二者的主元的相关性最大, 实现输入变量对输出变量的最佳估计。因而 PLS 是一种比较优异的统计分析方法, 在软测量中获得了越来越普遍的应用。

基于人工神经网络的软测量方法是当前工业领域中备受关注的热点。它无需具备对象先验知识, 而根据对象的输入输出数据直接建模, 在解决高度非线性方面具有很大的潜力。常用人工神经网络的结构和学习算法如下。

① 多层前向网络 (Multilayer Feed-Forward Networks, MFN) 多层前向网络提供了能够逼近广泛非线性函数的模型结构, 事实上只要允许足够多的神经元, 已经证明任何非线性连续函数都可由一个三层前向网以任意精度来逼近。最早用于该种网络的学习算法是 BP (Back Propagation) 算法, 也是应用最广泛的学习算法, 是一种非线性迭代寻优算法。该网络模型广泛应用于软测量计算。其缺点是有时会产生局部最优问题, 针对这一问题近来也研究出许多改进的学习算法。

② RBF (Radical Basis Functions) 网络 RBF 网络是一个两层前向网络, 输入数目等于所研究问题的独立变量数, 中间层选取基函数作为转移函数, 输出层为一个线性组合器。理论上 RBF 网络具有广泛的非线性适应能力。RBF 网络主要由输入层、隐含层和输出层组成。与 BP 算法相比, RBF 网络的学习算法不存在学习的局部最优问题, 且由于参数调整是线性的, 可望获得较快的收敛速度。相比 MFN, 其神经元函数是局部性函数, 有更高的逼近精度和学习速度, 但对同样规模的问题需要更多的神经元。

当然, 也产生了将各种软测量技术相结合的一些改进方法, 如神经网络和 PLS 相结合的非线性 PLS、神经网络和模糊技术相结合的模糊神经网络等, 都丰富和改进了软测量技术。近年来出现的基于小波神经网络模型和支持向量机模型在软测量方法上的应用研究也已显示出很好的发展前景。小波神经网络模型建模, 网络结构类同 RBF 网络, 但不同的是其网络结构和神经元的选择能够依据小波分解和重构理论的指导, 而非传统神经网络的经验凑试或基于样本数据的聚类算法确定。输出权系数可以使用线性最小二乘法求解, 避免了基于非线性迭代寻优所存在的局部极小和学习时间长而不确定的问题, 并能够像线性最小二乘法一样具有优良的统计性能和方便地转换为递推算法, 便于在线应用。支持向量机是由 Vapnik 建立起来的一种专门研究小样本情况统计学习规律的技术, 对于软测量建模化验样本数据少的情况下具有较大吸引力。

由于先进控制技术突破了常规的单参数 PID 控制模式, 着重于装置的整体控制, 即以整个装置为对象, 把主要被控量和控制量全部纳入控制系统, 因而具有良好的跟踪性能, 整体控制既保证了整个装置的稳定运行, 又达到卡边生产的目标。为此, 国外已有

十几家公司开发了先进控制的工业软件（见表 1.1）。据有关资料统计，国外比较著名的 5 个先进控制软件包在 2000 年已有 4542 套得到应用。据报道，在美国已经有 80% 的石化企业应用了先进控制技术。

表 1.1 著名先进控制软件应用情况总览

应用领域	Aspen Technology	Honeywell Hi-Spec	Adersa	PCL	MDC	合计
石油炼制	1200	480	280	25	—	1985
石化	450	80	—	20	—	550
化工	100	20	3	21	—	144
纸浆造纸	18	50	—	—	—	68
天然气	—	10	—	—	—	10
公用工程	—	10	—	4	—	14
聚酯	17	—	—	—	—	17
采矿/冶金	8	6	7	16	—	37
食品工业	—	—	41	10	—	51
加热炉	—	—	42	3	—	45
航空/国防	—	—	13	—	—	13
汽车制造	—	—	7	—	—	7
其他	40	40	1045	26	450	1601
总计	1833	696	1438	125	450	4542
首次应用时间	DMC:1985 IDCOM-M:1987 OPC:1987	PCT:1984 RMPCT:1991	IDCOM:1973 HIECON:1986	PCL:1984	SMOC:1988	—
最大应用规模	603×283	225×85	—	31×12	—	—

注：引自参考文献 [13]。

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很成功的案例。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。专家系统已在过程故障诊断、监督控制、检测仪表、控制回路和操作优化等方面获得一些成功的应用。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，而且有望成为表达确定性和不确定性经验，并加以提炼使之成为知识，进而改善已有的控制，也将是先进控制中的有力工具。由于许多重要的工业过程都表现出内在的非线性，如：pH 值的控制过程、反应器过程等，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。早期的解决办法是变增益控制或针对特定过程的专用控制系统。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，非线性控制尚属开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，这一领域的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可能的操作条件下都具有良好性能的控制器的，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。要使之成为解决任何控制问题的当然选择，尚需做大量的改进和简化工作。应当看到增强先进控制的鲁棒性将是今后重要的研究发展方向。

面对国际竞争日益激烈的经济形势，我国石化行业已经意识到先进控制和在线优化在生产过程中的重要作用。通过引进国外软件和技术，在近二百套的 DCS 系统上实施了先进控制，取得了明显的经济效益。

近 20 年来，在国家发改委、科技部和其他各部委的大力支持下，批准和支持了流程工业先进控制和在线优化的攻关项目和 863 高科技等项目，开展了大量的研发和应用工作。我国的一些高等院校和研究院，如清华大学、浙江大学、上海交通大学、中国石油大学、华东理工大学、中国科学院自动化研究所及石油化工科学研究院等，已开展了这方面的研究开发工作，取得了一批拥有自主知识产权的成果，并已进行了许多现场应用，获得了一批成功的示范应用，为我国工业过程自动化高技术产业化打下了坚实的基础。

1.3 石化过程先进控制的发展趋势

在当前全球化市场激烈竞争和能源匮乏的情况下，企业的生存与发展不仅取决于企业的发展策略，而且取决于采用什么技术来最快、最好地实现这种策略。应该说，生产企业能以最低成本、最小的能源和原材料消耗，最快满足市场的需求才能立足于不败之地。从目前工业生产情况来看，采用高新技术改造传统企业是当务之急。“信息化带动工业化，工业化促进信息化”的国策就说明了采用先进技术的重要性。从我国石化工业来看，近年来信息化的水平有了很大提高，各大型企业基本都具有厂级计算机网络，全厂信息也能得到沟通，但要做到信息一致，信息共享，尚需继续努力。但更重要的是在建设信息化的同时要关注企业的经济效益，不能只有大量信息在流动，却见不到经济效益的逐渐增长。应该说，信息化的发展应与自动化的实现紧密结合，即充分利用信息和各种自动化技术来实现企业的先进控制、操作优化、计划与调度的优化、资源优化以及供应链协调与优化等功能，以增强市场的竞争能力，才能在国际竞争中占有立足之地。从我国实际情况来看，虽然经过十余年的努力，先进控制上了一个台阶，但由于种种原因真正能在现场长期运行，达到既定目标，稳定地取得应有经济效益的还不多。其原因是多种多样的，例如，先进控制软件实施过于复杂需要高水平的人才；生产过程的时变性、非线性等因素的存在使先进控制的性能变差；生产中经常发生频繁的负荷变化或原料组分变化等大干扰，使先进控制难以持续有效地运行。针对我国现场应用的情况，先进控制的发展应从以下两个方面来进行。

1.3.1 加强针对我国国情的先进控制技术的研究与开发

① 研发具有“傻瓜化”实用先进控制软件，考虑到现场应用的复杂性，应研发专用的先进控制技术与软件，使之便于现场实施，降低对实施人员的技术要求。

② 研发具有适应性的先进控制软件，即能适应过程非线性、时变性的控制软件；能适应运行条件多变（如原料性质变化）的软测量；能适应生产环境多变（扩容、改造）的建模软件等，以适应我国生产条件多变的国情。

③ 把先进控制从一个装置扩展到一批相关的装置群，以达到整套装置的整体控制。因