

XIANJIN KONGZHI XITONG YINGYONG YU WEIHU

先进控制系统

应用与维护

潘立登 潘仰东 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

XIANJIN KONGZHI XITONG YINGYONG YU WEIHU

先进控制系统

应用与维护

潘立登 潘仰东 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍了系统辨识技术、软测量技术、先进控制算法和优化算法等理论与技术,这些技术与流程工业有着密切的联系。本书内容具体包括小波变换用于数据处理,动态模型和稳态模型的建模技术:增广最小二乘法、多变量脉冲响应、子模型、子子模型、状态空间子空间辨识法和传递函数辨识法、主元分析法、主元回归、部分最小二乘法、神经网络的原理、支持向量机及它们在软测量技术中的应用;统计过程质量控制、先进的模型 PID 控制、内模控制、IMC-PID 控制、预测控制、模糊控制和遗传算法,以及粒子群和蚁群优化算法与 NLJ 优化算法和它们在工业现场在线优化控制中的应用。全书理论联系实际,具有较多流行先进控制软件在炼油、石化工业装置中的应用实例,并有先进控制系统的详细实施和维护方法,便于在流程行业的企业大力推广先进控制系统。

本书可作为自动化、检测技术及计算机应用类专业师生的教学学习用书,也可供研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进控制系统应用与维护 / 潘立登, 潘仰东编著. —北京:
中国电力出版社, 2010.1

ISBN 978-7-5083-9685-9

I. 先… II. ①潘…②潘… III. 自动控制系统 IV. T P273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 200827 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 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

*

2010 年 5 月第一版 2010 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.25 印张 722 千字

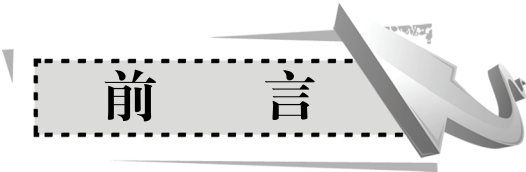
印数 0001—3000 册 定价 49.80 元

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



前言

随着经济全球化的发展，国际竞争日益激烈，我国企业的发展和挑战并存。在全球金融危机的严重影响下，为了提高企业产品竞争力，在国内外的市场经济环境中处于不败之地，石化等企业必须进一步降低生产成本，提高产品质量和节能减排，才能在竞争中处于有利地位。在这种环境下，传统的控制策略已不能完全满足生产要求，全球企业都希望用高科技来抵抗金融危机，我国则要求科技人员与企业对接，用高技术来武装企业。先进控制技术是技术含量很高的技术，它能在金融危机中得到重视与发展。由于先进控制技术不但能降低能耗与生产成本，而且能大幅度提高产品产量和质量，从而提高经济效益。到目前为止，国内众多石化企业已经投用了先进控制技术软件，许多企业也正在实施开发计划。因此，本书能起到用高科技武装企业的纽带和桥梁作用。

现代控制理论和人工智能几十年来的发展已为先进控制系统奠定了应用理论基础，而控制计算机，尤其是集散控制系统（DCS）的普及与提高，则为先进控制应用提供了强有力的硬件和软件平台。工业企业的需求以及控制理论和计算机技术的发展是先进控制理论与在线优化技术发展强有力的推动力。先进过程控制（Advanced Process Control, APC）技术，简称先进控制或 APC，是对那些不同于常规单回路控制，并具有控制效果比常规 PID 控制更好的控制策略的统称，而非专指某种计算机控制算法。该算法要求有过程的数学模型或带有人工智能的性质。这些控制策略的先进性在于它们目前在工业过程中尚未广泛使用。由于先进控制的内涵丰富，同时带有较强的时代特征，因此，至今对先进控制还没有严格、统一的定义。尽管如此，先进控制的任务却是明确的，即用来处理那些采用常规 PID 控制或串级控制效果尚不满足过程要求，甚至无法进行自动控制的复杂工业过程控制的问题。国家和企业领导都已经关注到这个问题，我国“十一五”规划中明确提出要推进科技进步和技术创新。因此，一些新的企业，在设计和建厂过程中就要采用先进控制与优化技术，以及信息化系统，尤其要加强自主知识产权的技术开发。我国石油化工企业已经推广应用 100 多套多约束模型预测控制的工程化软件包，如 Aspen Tech 公司的 DMC Plus，Honeywell 公司的 RMPCT，IDCOM-M，SMCA 及 PFC 等。同时，我国国内也自主开发了一些先进控制和优化软件，如浙江大学研发的 APC-Hiecon，APC-PFC，FRONTAPC，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。通过最近十几年的应用和研究，有关模型识别、优化算法、控制结构分析、参数整定及稳定性和鲁棒性等的一系列工作有了显著进展，基于模型控制的理论体系也已基本形成，并成为目前过程控制应用最成功，也最具有前景的先进控制策略之一。

先进控制系统的应用与实施，使过程控制更为平稳，有条件实现更严格的卡边条件在线优化控制，从而带来显著的经济效益。以石化行业为例，一个先进控制项目的年经济效益在百万元以上，其投资回收期一般在一年以内。通过实施先进控制与在线优化，可以改善过程

动态控制的性能,减小过程变量的波动幅度,使之更接近其优化目标值,从而将生产装置推向更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。因此,中国石油化工集团公司和中国石油天然气集团公司以及其他流程工业对推广应用先进控制与在线优化技术都非常重视,该技术已经在不少企业试点应用,目前正在逐步大力推广应用。北京化工大学自动化研究所十多年来已在先进控制技术研究与应用方面积累了一些经验,并已在常减压蒸馏装置、催化裂化装置、醋酸装置、异丙醇装置、聚丙烯腈装置、聚丙烯装置、苯乙烯装置、丙烯腈装置和乙丙橡胶装置上得到应用,其中包括常压塔常一线的脱空度和干点,常三线的闪点和黏度,乙醛氧化生成醋酸的转化率以及聚合过程质量的软仪表等。借此机会对参加这些工作的赵恒永教授、曹柳林教授、靳其兵教授、马俊英教授、龚剑平副教授、赵众教授、陈娟教授、闻光辉副教授、王文新博士、黄晓峰博士和魏环博士,以及硕士生谢成祥、张智萍、张晓炯、武春燕、游浩、杨军、聂雪媛、吴宁川、罗元浩、田国光、时瑞研、李全善、陈景霞、王全良、赵晓伟等表示感谢。因此,为了迅速推广先进控制技术,改造传统的过程控制,特编著本书,并用较大篇幅介绍这些先进控制系统在工业生产中的应用、实施和维护,以供广大自动控制工程技术人员和自动控制领域的师生参考。

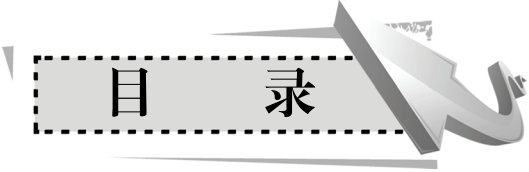
本书的编写过程得到信息科学与技术学院院长朱群雄教授、赵恒永教授、靳其兵教授、曹柳林教授等的热情支持、关怀和指导,并对本书提出了宝贵意见,借此表示衷心的感谢!

限于作者水平,加之时间仓促,书中不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 著 者

于北京化工大学自动化研究所

2009年4月



目 录

前 言

第 1 章 概述	1
1.1 先进过程控制	1
1.2 小波分析及其应用	8
1.3 系统辨识	9
1.4 人工神经网络及其应用	9
1.5 统计过程建模	10
1.6 多变量统计过程控制	11
1.7 软测量技术	12
1.8 在线优化	13
1.9 先进控制系统的应用与维护	13
第 2 章 小波变换用于数据处理	15
2.1 傅里叶变换	15
2.2 小波变换	21
2.3 一维连续小波变换	25
2.4 一维离散小波变换	27
2.5 多分辨率分析	28
2.6 一维 Mallat 算法	29
2.7 提升小波变换	31
2.8 几种常用的小波基函数	33
2.9 小波变换在信号处理中的应用	35
思考题	48
第 3 章 系统辨识技术	49
3.1 系统辨识建模	49
3.2 增广最小二乘法	51
3.3 多变量系统辨识	54
3.4 闭环系统辨识	74
3.5 传递函数模型辨识	77
思考题	81
第 4 章 人工神经网络理论及其在建模和控制中的应用	82
4.1 概述	82
4.2 BP 神经网络及其应用	84

4.3	RBF 神经网络及其应用	87
4.4	采用双模型结构改善软仪表性能	94
4.5	B 样条神经网络	99
4.6	用支持向量机构建软仪表	106
4.7	用神经网络建立动态软仪表模型	110
4.8	用 RBF 神经网络建立控制用的动态模型	116
4.9	基于 RBFNN 的非线性神经网络内模控制	120
	思考题	123
第 5 章	多变量统计建模方法及其在软测量中的应用	125
5.1	相关分析	125
5.2	多元线性回归分析	128
5.3	多元逐步回归方法	134
5.4	主元分析法	139
5.5	部分最小二乘法	147
5.6	基于 Chebyshev 多项式的部分最小二乘法	159
5.7	五种建模方法应用示例比较	160
5.8	基于核函数的建模方法与应用示例	163
	思考题	167
第 6 章	多变量统计过程控制的应用	168
6.1	概述	168
6.2	单变量统计过程控制	168
6.3	多变量统计过程监控	173
6.4	多尺度主元分析的多元统计过程监控	180
6.5	递推 PCA 的多元统计过程监控	185
6.6	多 PCA 模型的多元统计过程监控	186
6.7	多元统计过程监控的发展	188
6.8	用 PCA-RBFN 建立可侦破故障的反应器自校正模型	189
	思考题	193
第 7 章	鲁棒内模控制及其应用	194
7.1	概述	194
7.2	鲁棒控制	197
7.3	内模控制	200
7.4	模型不确定性界和 IMC 设计及其鲁棒性能	205
7.5	IMC-PID 控制	213
7.6	IMC-PID 软件包	220
7.7	多变量系统解耦内模控制	224
7.8	模型 PID 控制	234
	思考题	236

第 8 章 预测控制	238
8.1 概述	238
8.2 预测控制	244
8.3 广义预测控制	250
8.4 广义预测控制快速算法	263
8.5 多变量单值预测控制	265
8.6 广义预测-PID 串级控制	270
8.7 时滞多变量连续时间广义预测控制	273
8.8 基于差分方程的单变量预测函数控制	280
8.9 基于 NLJ 优化算法的多变量约束预测函数控制	288
8.10 多变量协调预测控制及其应用	292
思考题	299
第 9 章 模糊控制理论与应用	300
9.1 概述	300
9.2 模糊控制原理	301
9.3 模糊控制器的设计	308
9.4 自适应模糊控制器	312
9.5 常压塔塔底液位非线性控制	314
9.6 塔底液位非线性区域控制	316
9.7 自适应塔底液位非线性区域控制	317
9.8 模糊自适应调整内模控制滤波器时间常数	323
9.9 基于 FCMA 算法的自学习粗糙——模糊控制器	325
思考题	328
第 10 章 优化算法在软测量和在线优化中的应用	329
10.1 概述	329
10.2 遗传算法	331
10.3 粒子群优化算法	344
10.4 蚁群优化算法	352
10.5 NLJ 优化算法	360
10.6 复合形优化算法	362
10.7 过程在线优化控制	365
思考题	372
第 11 章 先进控制系统的应用	373
11.1 常减压蒸馏装置的先进控制	373
11.2 催化裂化生产过程控制	384
11.3 催化重整生产过程控制	387
11.4 延迟焦化生产过程控制	390
11.5 精馏过程的先进控制	394

11.6 乙烯裂解装置的先进控制方案·····	398
11.7 聚丙烯装置的先进控制方案·····	403
11.8 芳烃装置上的 APC 应用·····	408
思考题·····	412
第 12 章 先进控制系统的实施与维护 ·····	414
12.1 概述·····	414
12.2 RMPCT 先进控制在催化裂化装置上的实施·····	415
12.3 APC 性能的评价·····	438
12.4 控制系统的维护·····	442
思考题·····	459
附录 A F 分布表和 t 分布表 ·····	461
参考文献 ·····	464

概 述

1.1 先进过程控制

1.1.1 先进控制的发展现状

在过程工业界,从 20 世纪 40 年代开始,采用 PID 控制规律的单输入单输出简单反馈控制回路已成为过程控制的核心系统。目前,PID 控制仍应用广泛,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%。从 20 世纪 50 年代开始,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(当时称为先进控制系统),从而在很大程度上满足了单变量控制系统的一些特殊控制要求。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,并存在着苛刻的约束条件,更重要的是,它们大多数是生产过程的核心部分,直接关系到产品的质量、产率和消耗等有关指标。随着过程工业日益走向大型化,对过程控制的品质提出了更高的要求,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。自 20 世纪 50 年代末发展起来的、以状态空间方法为主体的现代控制理论,为过程控制带来了状态反馈、输出反馈、解耦控制、自适应控制等一系列多变量控制系统的设计方法;对于状态不能直接测量的情形,也有观测器和估计器等工具。然而,当现代控制理论真正应用于工业过程控制时,却遇到了前所未有的困难,以致产生了它是否适用于过程控制的困惑。究其原因发现,除了上述多变量控制策略自身的不足外(如解耦控制在约束处理和参数变化时缺乏灵活性),工业过程的复杂性使得建立其精确数学模型也比较困难。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过程控制界所熟悉和了解。与此同时,计算机技术的持续发展使得计算机控制在工业生产过程中得到了广泛的应用,强大的计算能力可以用来求解许多过去认为是无法求解计算的问题,这一切都孕育着过程控制领域的新突破。

1980 年前后,过程控制界的两位探索者 J. Richalet 和 C. R. Cutler 分析报道了其各自研究的、有关解决实时动态环境下带约束多变量耦合系统控制问题的成果。这就是著名的模型预测启发式控制和动态矩阵控制。这一事实表明,过程工业已开始接受现代控制的概念,从而引发了预测控制在工业过程控制中的大量应用。20 世纪 80 年代,出现了许多约束模型预测



控制的工程化软件包。通过模型识别、优化算法、控制结构分析、参数整定和有关稳定性和鲁棒性研究等一系列工作，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，也最具有前景的先进控制策略。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的设计中；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两类混合，并提炼这些经验使之成为知识进而改善已有控制的先进控制的重要内容。由于许多重要的工业过程（如 pH 中和过程）都表现出内在的非线性，因此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。经典控制理论中，稳定裕度可反映系统鲁棒性。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所有希望的操作条件下都具有良好性能的控制器的设计，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，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，使先进控制具备鲁棒性将是今后重要的发展方向。

内模控制（IMC）是 Garcia C. E. 和 Morari M 于 1982 年提出的，由于其设计原理简单，参数整定直观明了，能兼顾控制性能和鲁棒性，因此一直为工程控制界所重视。基于内模控制的 IMC-PID，不但保持了传统 PID 控制的特点，具有内模控制的所有优点，而且便于在 DCS 上实现，控制性能优良、便于维护、易于为广大工程技术人员接受和理解，并易于推广应用。

1.1.2 先进过程控制的特点及其核心内容

先进过程控制（Advanced Process Control, APC，简称为先进控制）不同于常规控制，其特点主要表现在以下方面：

（1）与常规的 PID 控制不同，先进控制是一种基于模型的控制策略，如模型预测控制、推断控制、内模控制、IMC-PID 控制及模型 PID 控制等。目前，基于知识的控制，如模糊控制、神经网络控制和专家系统等智能控制正成为先进控制的一个重要发展方向。

（2）先进控制通常用于处理复杂的多变量过程控制问题，如大时滞、多变量耦合、被控变量与控制变量存在着各种约束等。先进控制是建立在常规单回路控制之上的动态协调约束控制，可使控制系统适应实际工业生产过程的动态特性和操作要求。

（3）先进控制的实现需要足够的计算能力作为支持平台。由于先进控制受控制算法的复



杂性和计算机硬件两方面因素的影响,因此早期的先进控制算法通常是在上位机上实施的,这种系统对数据通信和维护技术要求较高,且维护工作量大。随着 DCS 功能的不断增强,更多的先进控制策略可以与基本控制回路一起在 DCS 上实现。后一种方式可有效地增强先进控制的可靠性、可操作性和可维护性。从全厂综合自动化的角度看,先进控制恰好处于承上启下的重要地位。性能良好的先进控制可在线优化得以有效实施的前提下,将企业领导者的经营决策、生产管理和调度的有关信息及时落实至全厂生产装置的实际运行中,并可真正实现全厂的综合优化控制。先进控制在工厂综合优化控制中的作用已受到企业领导的普遍关注。

作为一个整体,先进控制的核心内容应包括基于 OPC 通信的数据采集及预处理、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。

一、数据的采集、处理和软测量技术

利用大量的实测信息是先进控制的优势所在。由于来自工业现场的过程信息通常带有噪声,因此数据采集时应作滤波处理。同时,采集到的数据还应进行过失误差的检测与识别,以及过程数据的有效性检验和数据调理工作。这是先进控制应用的重要保障。小波分析在信号处理中占有重要地位,它的应用已受到普遍关注。数据校正技术在先进控制和过程优化中已得到应用。基于可测信息和模型,实时计算不可测量的变量也即软测量技术。该技术是先进控制中不可缺少的内容。例如,汽油饱和蒸汽压、粗汽油干点、轻柴油倾点、催化裂化中的反应热、再生器的烧焦状况、反应产品分布和催化剂循环量,以及某些精馏塔的两端质量指标估计等,这些关系到产品质量的关键变量,因质量测量仪表的缺乏或不可靠而无法获得实时、可靠的在线信息。因此,可采用工艺稳态模型、神经网络模型和动态数学模型来推断估计。

二、多变量动态过程的模型辨识技术

获取对象的动态数学模型是实施先进控制的基础。对于复杂工业过程,需要强有力的辨识软件,以便在剔除一些过失虚假数据的基础上,把分段有效数据有机地组合起来,最终将实际工业生产环境下进行现场装置试验的数据,获得多输入多输出(MIMO)动态数学模型。有关闭环系统的辨识技术对建立工业过程的模型来说尤为重要。实际工业过程模型化是一项专门的技术,它涉及过程动态学、系统辨识、统计学及人工智能等多种知识。尽管目前类似模型预测控制这样的先进控制策略均采用工业试验的方法来获取控制模型,但那些准确并可靠的机理模型和智能模型的建立也有望成为有效的控制模型。

三、先进控制算法

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。

(1) 先进控制主要解决个别重要过程变量控制性能的改善,主要采用内模控制、IMC-PID 控制、单变量模型预测控制与原控制回路构成的“透明控制”等方式。

(2) 解决约束多变量过程的协调控制问题,主要采用带协调层的多变量预测控制策略。

(3) 推断质量控制,利用软测量的结果实现闭环的质量卡边控制。涉及的主要控制策略有模型预测控制、推断控制、协调控制、质量卡边控制、统计过程控制、正在兴起与开发中的模糊控制、神经控制、非线性控制和鲁棒控制。

为了更好地理解和认识先进控制在整个控制域中的地位,可引用著名过程控制专家 D. E. Seborg 给出的有关过程控制算法分类的详情:



第一类：传统控制算法，包括手动控制、PID 控制、比值控制、串级控制、前馈控制。

第二类：先进控制——经典技术，包括增益调整、时滞补偿、解耦控制。

第三类：先进控制——流行技术，包括内模控制、模型预测控制、自适应控制、统计质量控制。

第四类：先进控制——潜在技术，包括最优控制、非线性控制、专家控制、神经控制、模糊控制。

第五类：先进控制——研究中的策略，包括鲁棒控制、 $H\infty$ 控制、 μ 综合。

四. 先进控制策略

实施先进控制，采用什么样的控制结构和方式，属于控制策略问题。通常存在如下策略：

1. 控制方式

目前主要采用离散控制算法（以 Z 变换为数学基础）和连续控制算法（拉氏变换为数学基础）。应该说在过程工业控制中，大多数都已经采用 DCS 控制，也就是说都采用计算机控制，进行数字计算，在 PID 计算中也采用离散 PID 算法。应该强调指出，不要以为采用离散 PID 控制算法就是采用离散控制了。在 DCS 中的离散 PID 计算，并不是实施离散控制，而是连续控制算法的近似方法。因为在 DCS 中，采样时间非常短，仅 100~200ms，采用这么短采样时间，是为了更逼近连续控制，其对象的传递函数与采样时间大小无关。如果是采用离散控制，对象参数是随采样时间大小而变化的，所以它的采样时间应该按对象的时间常数大小来选择，而不是采用这么短的采样时间。

2. 连接结构

连接结构有如图 1-1 所示的三种方式。

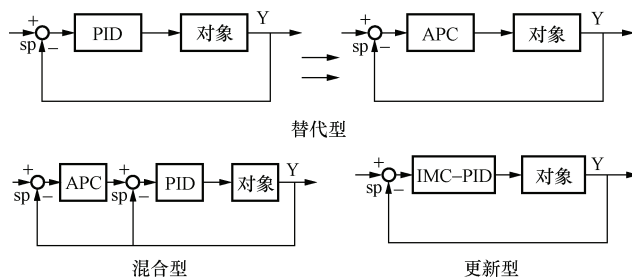


图 1-1 实施先进控制的三种连接方式

早年采用工业控制机实施先进控制，都采用替代型。用先进控制算法直接取代原来的 PID 控制算法。这种方式表面上看简单，但其安全性，可靠性，手动自动的互相转换，PID 控制和 APC 控制的转换等都要由设计者考虑，如果考虑不周，会引起很多麻烦或停车危险；目前多数先进控制都采用混合型，即先进控制算法在上位机上计算，其结果作为 DCS 上的 PID 控制回路的外部设定值控制。一旦 APC 有故障，或通信间断，只要将 DCS 上的 PID 控制回路转为内部设定值控制，这样就不会出现停车等现象而影响生产。但是这种控制方式控制速度较慢，往往不很及时；采用更新型，即将 DCS 上的 PID 控制算法转换为先进控制算法，如 IMC-PID 算法，这样，其控制速度如同 PID 那样快速，而控制效果又有了明显提高，使过程能快速跟踪，平稳，而且能保留 DCS 本身的安全性和可靠性，这是非常好的控制方式。



1.1.3 先进控制工程化方法及其软件的产业化

要使先进控制达到预期的经济效益，必须严格地按一定的程序完成先进控制的工程化工作，而且与所选用的工作平台无关。其工程化主要步骤如下：

一、定义目标

首先应将整个企业的目标细化为装置的目标、过程单元的目标及最终主要过程设备的目标。过程装置的目标可表述为以一定的产率生产出满足一定规格的某些产品，其性能指标可以是生产成本、产品质量或处理量。干扰可能是进料中的组分或生产负荷变化。装置在经受所有波动和扰动的环境下必须满足预定的性能指标。

在一个装置内，应对各主要设备建立控制目标，从而将过程装置的目标分解至最底层的各个设备。尽管对每个设备而言，存在各种扰动，但是其控制在不得违反任何安全和设备约束前提下始终要满足目标。

二、识别先进控制的适用性

先进控制的适用性是指通过采用先进控制能否达到减少主要过程变量变化的预期目标。如果先进控制不适用，就需考虑工艺过程自身的改进。根据先进控制所面临的问题，在研究适用性时可采取两种方法。对于待建装置，可以依据工程经验或者通过稳态、动态仿真来识别是否有必要应用先进控制策略；对于现有装置，可以利用已有的大量过程运行数据及相关工艺设计数据得到过程的实际运行趋势和相关图表，进而分析过程的运行状况和控制系统的工作情况，判断先进控制的适用性。

三、制订功能标准

对每个要实施的先进控制算法必须规定其功能标准。标准的主要内容包括控制目标、过程简单描述、控制算法、涉及的硬件、仪表、控制回路、程序框图等。这种标准在详细工程设计时可进一步扩展并最终成为先进控制的技术文档。

四、先进控制的实现

先进控制方案确定以后，首先进行详细的工程设计，包括控制回路连接图、系统仪表配置一览表、先进控制操作界面等，最终生成可实现的控制软件。

先进控制在实施时需要解决的具体工程问题包括：

(1) 合理地选择被控的区域。这不仅意味着系统的平稳性，更重要的是它直接决定着先进控制所能获得的经济效益。

(2) 正确整定基本 PID 控制回路和先进控制系统。整定基本回路是为实施先进控制奠定基础，因为它可以使先进控制系统的建模打好基础；整定先进控制则是为在动态响应与鲁棒性之间作出权衡。

(3) 合理限制控制变量的变化量和变化率，保证控制系统的平稳性和对不确定因素的鲁棒性。

(4) 确保数据通信的安全高速运行，建立良好的先进控制人机界面，确保在最常用的流程图画面上看得到先进控制的信息，以便于投用、维护和操作。

五、调试

调试是检验先进控制方案和生成的控制软件是否正确过程。因此，首先应进行在线实时仿真和跟踪，测试先进控制系统的输出方向和数值是否在可行的范围内，符合设计要求后



方可开始试运行。运行中,适当调整有关参数,使先进控制的结果与原简单 PID 控制相比,达到预测设计的目标。先进控制与人的关系,人起主导作用,如果因操作人员对先进控制不理解而使其不能正常工作,则先进控制的效益就不能得到。因此,先进控制的原理必须深入到每个操作者,使他们能认识并熟悉所实施的先进控制原理和操作使用及维护方法,而这些都需要通过培训来实现。由于先进控制系统比较复杂,因此为了培训和维护工作的需要,对先进控制系统必须建立完整的文档资料。

六、先进控制面临的挑战

先进控制的广泛应用为企业带来了显著的经济效益。另一方面,在实施先进控制的过程中,也会碰到许多富有挑战性的问题,反过来又促进了先进控制向更高层次发展。

七、先进控制的效益、成本分析

每个可能的先进控制算法的效益可与实施该算法的成本进行比较。效益、成本分析可以给出是否采用先进控制策略或应当采用哪种先进控制算法。

另一方面,由于先进控制技术难度和实施的复杂,因此必须使该软件产业化才能使先进控制得到推广应用。目前这项技术的软件产业主要掌握在为数不多的公司手中。20 世纪 90 年代初,著名的先进控制软件包主要有美国 Setpoint 公司的 SMCA (Setpoint Multivariable Control Architecture) 和 Dynamic Matrix Control 公司的 DMC。Dynamic Matrix Control 公司是由先进控制理论的创始人之一,Charlie Cutler 本人于 1984 年创办的。该公司长期从事动态矩阵控制软件的研究和应用,其软件的高品质和先进控制的高性能吸引了大量的客户,至 1995 年底,已实施了 600 多个先进控制项目。Setpoint 公司 IDCOM-M 产品的首次应用始于 1987 年,公司曾承担过大量石油化工装置的先进控制项目的设计工作,特点是工程经验丰富,工程业绩遍及全世界。同时,它是最早进入中国的过程控制公司,在中国已有多套由 Setpoint 公司设计的先进控制在运行,至 1995 年底,该公司已实施了 600 多个先进控制项目。上述两家公司均于 1996 年初被美国 Aspen Tech 公司收购。现 Aspen Tech 公司推出的先进控制包融合了 SMCA 和 DMC 两者的优点,其商品名为 DMC Plus。可以说,当前 Aspen Tech 公司已成为力量最强大的先进控制供应商。据统计,至 2000 年底,北美和欧洲共实施先进控制项目约 4600 多套,其中 Aspen Tech 公司所完成的项目最多,达 1850 套,规模最大,共有 603 个被控变量和 283 个操作变量。全世界最大的 5 套催化裂化装置(处理量 600~700 万 t/年)全部采用 Aspen Tech 公司的 DMC 技术。1998 年,Aspen Tech 公司又兼并了加拿大著名过程控制公司 Treiber Control,进一步控制了北美的先进控制业务。

法国 Adersa 公司分别在 1973 年和 1986 年推出自己的先进控制软件包 IDCOM 和 HIECON。

英国 Predictive Control Ltd 公司成立于 1988 年,专门从事先进控制系统的设计,其先进控制软件包 CONNOISSEUR 也具有较高的知名度。

美国 Honeywell 公司原是著名的 DCS 系统供应商,近年来也在向着先进控制和实时优化的方向发展,它兼并了美国的过程控制公司 Profimatics 后,在先进控制的业务上有较大的发展。近年来,该公司致力于推进在中国市场的业务,实施了较多的先进控制项目。Honeywell Hi-Spec Solutions 部门专门从事先进控制和优化业务,它推出的工厂一体化解决方案(Total Plant Solution, TPS)是由先进控制包 TPS Profit 和实时优化包 TPS Profit Max 两部分组成。



成功实施 MPC 多变量模型预测控制这类较复杂、规模较大的先进控制，必须是多专业、跨学科的紧密合作，同时要求具备丰富的工程能力和经验。要由工艺专家和自控专家共同合作来完成工程项目。国外的实践为我们提供了很好的借鉴，如原 Setpoint 公司虽为过程控制公司，但公司技术人员中具有化工背景的职工所占比例高达 70%。

国内各院校和科研院所适应企业需求，在先进控制技术的工程化方面进行了大量工作，并在一些关键复杂装置上取得了成功应用。1988 年，中国石油大学袁璞教授将基于状态空间模型的预测控制应用于催化裂化反再系统反应深度控制。经过近 20 年的开发和应用，形成了一套完整的技术，并开发出先进控制软件 PACROS (Process Advanced Control and Real-time Optimization Solution)，在催化裂化、连续重整等一批装置上成功应用。清华大学自动化系过程控制研究所开发了先进控制软件 SMART (Scalable Multivariable Advanced Robust Technology)，并在常减压等装置上成功应用。浙大中控与法国 Adersa 合作，利用 Hiecon 和 PFC 技术进一步开发了 APC-Hiecon 和预测函数控制软件包 APC-PFC，并在多套装置上成功应用。上海交通大学开发了多变量约束控制器 MCC (Multivariable Constrained Controller)，并在催化裂化装置上应用。北京化工大学自动化研究所将系统辨识与内模控制相结合，开发出 IMC-PID 鲁棒控制算法，并形成软件包，在常减压等装置上成功应用，其优点是易于与 DCS 连接、实施方便。中国科技大学对 MMC 进行了研究并取得了一定的成果。

目前，绝大多数的先进控制技术与软件普遍采用“通用”的技术路线，试图用一套先进控制软件对各种生产装置进行建模、控制器仿真组态、在线控制和管理，这样只能解决各种生产装置的共性问题。因此，针对某一类生产装置开发先进控制软件将具有更强的针对性和灵活性。

上述高校取得了显著的应用和开发成果，但开发出的多数软件在工程化上尚需完善，致使大力推广尚有一定难度。

1.1.4 需深入研究的问题

为了将先进控制的研究和应用推向新的高度，在实现先进控制策略中尚需深入研究以下问题。

一、模型辨识的新工具

为了完成像反应器这样的工业生产过程动态性能的测试，需要耗费数周的时间，这给工程技术人员带来很大的工作量，因此迫切需要更好和更有效的过程动态响应测试和能更充分利用统计信息辨识出动态模型的方法。从事过程控制的人员正致力于新的辨识算法研究，希望采用闭环辨识算法，在非平稳状况下也能获得较好的辨识精度，甚至不要进行专门的现场测试，仅利用过程的历史数据就能获得有效的过程模型，从而为先进控制提供满足工业要求的模型。

二、自适应模型预测控制

针对变增益的工业过程，如油品调和和 pH 控制等，需要应用自适应控制的思想来改进多变量模型预测控制器的性能，如模型参数预测等方法的研究和开发。

三、非线性模型预测控制

普遍应用的模型预测控制软件包采用的是线性模型，在碰到内在非线性问题时，必须将其参数整定，以确保在整定操作区域内的稳定性，其后果是对许多操作区域的控制作用过于



迟缓。为了从根本上解决这一问题，迫切需要非线性模型预测控制工程化软件。

四、多元统计过程质量监控

随着计算机集成控制的广泛应用，大量信号和控制回路的集中管理监督和性能的评判已成为工艺操作者的主要责任；如何加强计算机监控是当今现代工厂企业的重要内容。传统的统计过程控制在处理含有耦合变量的连续过程单元时通常会导致错误。然而，随着主元分析（PCA）和部分最小二乘（PLS）技术的工程化应用研究开发，结合故障诊断与检测，已进入在线应用阶段，含 PCA 和 PLS 的多元统计过程质量监控的应用将会日益增多。

1.2 小波分析及其应用

自法国科学家傅里叶（Fourier）提出傅里叶分析以来，该分析方法就成为频谱分析最有效的数学工具。一种称为小波的数学理论和方法正在科学技术界引起一场轩然大波。小波分析（Wavelet Analysis）是针对傅里叶分析不能做局部分析的缺点而提出来的。由于其分析时间—频率局部化的卓越效果而誉满全球。从此，小波分析成为信号处理、信息获取与处理等许多领域首选的数学分析工具，并在国内外形成一次又一次研究高潮。它与分形理论、神经网络联合互补，对当今的自然科学已产生巨大的冲击力和推动作用。小波分析的最大特点有两个：一是“自适应性”，它能根据被分析的对象自动调整有关参数；二是“数学显微镜”性质，它能依据观察的对象自动“调焦”，以取得令人满意的最佳效果。

1981 年，法国物理学家 Morlet 在分析地质数据时基于群论首先提出了小波分析这一概念。1985 年，法国大数学家 Meyer 首次提出了光滑的小波正交基，后被称为 Meyer 基，对小波理论做出了重要贡献。1988 年，年轻的女数学家 Daubechies 提出了具有紧支集的光滑正交小波基——Daubechies 基，为小波的应用研究增添了催化剂。之后，信号分析专家 Mallat 提出了多分辨率分析的概念，给出了构造正交小波基的一般方法。Mallat 受金字塔算法的启发，以多分辨率分析为基础提出了著名的快速小波算法——Mallat 算法，这是小波理论突破性的成果。Mallat 算法的提出，宣告了小波从理论研究走向广泛的应用研究。

小波分析方法是一种窗口大小（即窗口面积）固定但其形状可改变，时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法，即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率，所以被誉为数学显微镜。正是这种特性，使小波变换具有对信号的自适应性。小波分析是调和分析这一数学领域半个世纪以来的工作结晶，已经和必将广泛地应用于信号处理、图像处理、机械故障诊断与监控、分形以及数字电视等科技及领域。原则上讲，传统上使用傅里叶分析的地方，都可以用小波分析取代。小波分析优于傅里叶变换的地方是，它在时域和频域同时具有良好的局部化性质。由于小波理论处理问题的特殊技巧和特殊效果，小波分析不仅为纯数学与应用数学提供了新的强有力的工具，而且是多媒体、信息高速公路某些核心技术的理论保证。小波分析在图像数据压缩、流体力学、故障诊断、语音信号处理、地质勘探、线性系统、神经网络以及数学、物理和工程中都已得到广泛应用。

通常，小波分析均采用离线处理，但其处理结果表明，小波滤波的效果远远优于传统的滤波方法。然而，工业过程中小波滤波的在线实现才具有真正的意义和价值。过去，由于缺