



21世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information •
Science and Technology

先进控制与在线 优化技术及其应用

潘立登 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

先进控制与在线优化技术及其应用

潘立登 编著

机械工业出版社

本书主要介绍了建模技术、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。具体包括已发展起来的数字处理理论——小波分析以及主要建模方法: 主元分析法、非线性多元回归法、逐步回归法, 以及主元回归、部分最小二乘法等的建模法; 得到广泛应用的神元网络的原理、支持向量机和它们在软测量技术中的应用; 近年蓬勃发展的统计过程质量控制、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优化算法与 LNJ 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, 有很多工业应用实例。

本书适合作为自动化、检测技术以及计算机应用类本科生的选修课教材, 硕士生的必修课教材, 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

先进控制与在线优化技术及其应用 / 潘立登编著. —北京: 机械工业出版社, 2009.4

(21 世纪高等院校电气信息类系列教材)

ISBN 978-7-111-26675-4

I. 先… II. 潘… III. 自动控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 043948 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 时 静

责任编辑: 陈 皓

责任印制: 洪汉军

三河市宏达印刷有限公司印刷

2009 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 26.25 印张 · 647 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-26675-4

定价: 44.00 元

凡购本书, 如有缺页, 倒页, 脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294 68993821

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379753 88379739

封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

随着我国经济体制的转变，国内的众多过程工业企业日益感受到国际间竞争所带来的压力和挑战。在这种大的背景下，积极开发和应用先进控制与在线优化技术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。

现代控制理论和人工智能几十年来的发展已为先进控制与在线优化奠定了应用理论基础，而控制计算机尤其是集散控制系统（Distributed Control System, DCS）的普及与提高，则为先进控制理论与在线优化技术的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，或先进控制，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，而非专指某种计算机控制算法。通常这种算法，都要求有过程的数学模型，或带有人工智能的性质。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的、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 控制或串级控制尚不能满足过程要求，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了这个问题，我国“十一五”规划中就明确提出要推进科技进步和技术创新，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、PFC 等，我们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，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。通过最近十多年的应用、研究，在模型识别、优化算法、控制结构分析、参数整定及有关稳定性和鲁棒性等方面有了显著进展，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中最成功、也最具有前途的先进控制策略之一。

先进控制与在线优化的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，中石化和中油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，已经在不少企业试点应用，目前正在逐步大力推广应用。

生产过程需要对一些关键的变量进行优化或卡边控制，而这些关键变量又通常无法在线测量，故软测量技术、过程数据预处理和过程数据校正技术以及系统辨识和建模技术也包含在先进控制的范畴之内。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，常三线的闪点和粘度，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，赵众教授，陈娟教授，龚剑平副教授，闻光辉副教授，王文新博士，黄晓峰博士，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。

为了迅速推广先进控制技术，改造传统的过程控制，特编写了这本教材，并用较多的篇幅介绍这些先进控制与在线优化方法及其在工业生产中的应用，供广大自动控制工程技术人员和自动控制领域的师生学习或参考。

本书的编写得到了北京化工大学教务处处长张进明教授、信息科学与技术学院院长朱群雄教授的热情支持、关怀和指导，他们对本书提出了很多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于作者的水平有限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 概述	1
1.1 建模的目的和基本方法	2
1.2 小波分析及其应用	3
1.3 统计过程控制	4
1.3.1 相关分析和回归分析	4
1.3.2 主元分析法	4
1.3.3 部分最小二乘法	5
1.3.4 多变量统计过程控制	5
1.4 软测量技术	6
1.5 建模与系统辨识	7
1.6 人工神经网络及其应用	7
1.7 先进过程控制	8
1.7.1 先进过程控制的特点	8
1.7.2 先进控制的发展现状	9
1.7.3 先进控制的核心内容	10
1.7.4 先进控制软件的产业化	11
1.7.5 先进控制的实施	13
1.7.6 先进控制工程化方法	13
1.7.7 需深入研究的问题	15
1.8 在线优化	15
参考文献	16
第 2 章 小波算法用于数据处理	17
2.1 傅里叶变换	17
2.2 小波变换	20
2.2.1 函数空间和广义空间	20
2.2.2 小波变换原理	21
2.2.3 傅里叶变换、短时傅里叶变换和小波变换的比较	23
2.3 一维连续小波变换	24
2.4 高维连续小波变换	26
2.5 一维离散小波变换	27
2.5.1 离散小波变换	27
2.5.2 二进制小波变换	27
2.6 多分辨率分析	29

2.7	一维 Mallat 算法	33
2.8	提升小波变换	34
2.9	几种常用的小波基函数	37
2.9.1	Haar 小波函数	37
2.9.2	Mexican Hat (mexh) 小波函数	37
2.9.3	Daubechies 小波函数系	38
2.9.4	Biorthogonal 小波函数系	39
2.9.5	Symlets 小波函数系	39
2.9.6	Morlet 小波	40
2.9.7	Meyer 小波	41
2.10	小波分析在信号处理中的应用	42
2.10.1	仿真信号	42
2.10.2	一维连续小波分析	42
2.10.3	一维离散小波分析	43
2.10.4	用小波分析进行信号的消噪	45
2.10.5	小波滤波的在线实现	51
2.10.6	用小波分析进行信号的奇异性检测	53
2.10.7	用小波分析进行信号的压缩	55
2.10.8	用小波分析进行信号的发展趋势识别	55
2.10.9	用小波分析进行信号的抑制与衰减	56
2.10.10	用小波分析进行某频率区间信号的识别	58
2.10.11	用小波分析进行信号的自相似性检测	58
2.10.12	结论	59
	思考题与习题	60
	参考文献	60
第 3 章	多变量统计建模方法及其在软测量和统计过程控制中的应用	62
3.1	相关分析	62
3.1.1	相关系数计算公式	63
3.1.2	处理结果	63
3.1.3	相关系数结果分析	64
3.2	多元统计回归分析	65
3.2.1	多元线性回归算法	65
3.2.2	F 检验和 t 检验	66
3.2.3	线性化	67
3.2.4	多元线性回归方法	67
3.2.5	喷射塔中 SO_2 吸收传质系数的软测量	71
3.2.6	多元逐步回归	73
3.2.7	多元逐步回归方法计算步骤	75
3.3	主元分析法	78

3.3.1	概述	78
3.3.2	主元分析方法	79
3.3.3	NIPALS 方法	80
3.3.4	主元回归方法	80
3.3.5	多尺度主元分析	81
3.3.6	递推 PCA	83
3.4	部分最小二乘法	89
3.4.1	部分最小二乘回归法	89
3.4.2	部分最小二乘回归的计算方法	91
3.4.3	部分最小二乘递推算法	96
3.5	4 种建模方法的比较	97
3.6	多变量统计过程监控	100
3.6.1	单变量统计过程控制	101
3.6.2	多变量统计过程监控方法	104
3.6.3	基于多尺度主元分析的多元统计过程监控	107
3.6.4	基于递推 PCA 的多元统计过程监控	115
3.6.5	基于多 PCA 模型的多元统计过程监控	116
	思考题和习题	118
	参考文献	118
第 4 章	鲁棒内模控制及其应用	123
4.1	概述	123
4.1.1	鲁棒控制	124
4.1.2	内模控制	125
4.1.3	IMC-PID 控制	125
4.2	鲁棒控制	126
4.2.1	控制系统的鲁棒性	126
4.2.2	SISO 系统的鲁棒控制所需的系统信息	126
4.2.3	标称性能	127
4.2.4	鲁棒稳定性	128
4.2.5	鲁棒性能	129
4.3	内模控制	129
4.3.1	SISO 稳定系统的内模控制结构	129
4.3.2	IMC 控制器的性能	130
4.3.3	SISO 稳定系统 IMC 控制器的设计	134
4.4	模型不确定性界和控制系统鲁棒性能的研究	136
4.4.1	使用范数有界方法一	136
4.4.2	使用精确不确定性	138
4.4.3	使用范数有界方法二	140
4.4.4	使用一阶 Pade 近似纯滞后计算模型不确定性界的方法	140

4.4.5	比较讨论以上 4 种设计方法	143
4.4.6	预测控制算法本质上都属于 IMC 结构	146
4.5	IMC-PID 控制	150
4.5.1	IMC-PID 控制器的设计	150
4.5.2	IMC-PID 控制器参数设计	152
4.6	IMC-PID 软件包	154
4.6.1	IMC-PID 软件包体系结构	154
4.6.2	IMC-PID 软件包所采用的技术	155
4.6.3	实施 IMC-PID 前后的运行曲线	155
4.7	多变量系统解耦内模控制	158
4.7.1	多变量内模控制及 NLJ 随机搜索算法	158
4.7.2	NLJ 随机搜索算法	160
4.7.3	多变量系统解耦内模控制设计及应用	160
4.7.4	仿真	161
4.7.5	结论	163
4.8	模型 PID 控制	163
4.8.1	模型 PID 控制概述	163
4.8.2	过程模型的闭环辨识	163
4.8.3	过渡过程衰减比的新要求和超调量的约束条件	167
4.8.4	闭环系统控制器 PID 参数设计	167
4.8.5	现场应用示例	168
	思考题与习题	169
	参考文献	169
第 5 章	预测控制	173
5.1	预测控制的产生和类型	173
5.1.1	预测控制产生的背景	173
5.1.2	预测控制的类型	173
5.1.3	预测控制的分析方法	175
5.1.4	预测控制软件包	175
5.1.5	预测控制的应用概况	178
5.2	预测控制的特点、现状和发展	178
5.2.1	预测控制的特点	178
5.2.2	预测控制的现状	179
5.2.3	需要深入考虑的问题	180
5.3	预测控制基本算法	181
5.3.1	动态矩阵控制算法	181
5.3.2	模型算法控制	185
5.4	广义预测控制	187
5.4.1	显式广义预测自校正控制	188

5.4.2	隐式广义预测自校正控制	192
5.4.3	广义预测控制仿真实验	196
5.5	广义预测控制快速算法	202
5.6	多变量单值预估控制	204
5.6.1	多变量单值预估控制算法	204
5.6.2	大滞后系统的多变量单值广义预测控制	206
5.7	广义预测-PID 串级控制	209
5.7.1	GPC-PID 串级控制的结构与特点	209
5.7.2	仿真试验	210
5.7.3	GPC-PID 串级控制的实施方案	213
5.8	基于差分方程的单变量预测函数控制	214
5.8.1	概述	214
5.8.2	基于差分方程的预测函数控制基本原理及算法研究	214
5.8.3	基于差分方程的预测函数控制算法的仿真研究	218
5.8.4	结论	222
5.9	基于 NLJ 优化算法的多变量约束预测函数控制	222
5.9.1	概述	222
5.9.2	多变量预测函数控制算法	223
5.9.3	NLJ 算法	225
5.9.4	仿真结果	225
5.9.5	结论	227
5.10	多变量协调预测控制及其应用	227
5.10.1	约束协调控制	227
5.10.2	多采样周期控制系统	228
5.10.3	预测控制的实施方案	228
5.10.4	催化裂化反应深度多变量预测控制	229
	思考题与习题	232
	参考文献	232
第 6 章	人工神经网络理论及其在软测量中的应用	235
6.1	人工神经网络	235
6.2	BP 神经网络及其应用	237
6.2.1	BP 网络结构	237
6.2.2	BP 算法	238
6.2.3	BP 算法的软件实现	240
6.2.4	BP 算法的性能和问题	240
6.2.5	BP 网络的应用	241
6.2.6	建立非线性函数模型	241
6.3	RBF 神经网络及其应用	242
6.3.1	RBF 网络结构及工作过程	242

6.3.2	RBF 网络的学习方法	244
6.3.3	RBF 网络的算法	249
6.3.4	用 RBF 神经网络建立系统模型	250
6.3.5	RBF 网络的编程实现	252
6.3.6	用 RBF 网络建立油品粘度和闪点的软仪表模型	252
6.3.7	乙醛氧化制醋酸氧化塔收率软仪表的 RBF 模型	254
6.4	用 PCA-RBFN 建立可侦破故障的反应器自校正模型	257
6.4.1	概述	257
6.4.2	PCA-RBFN 自校正模型	258
6.4.3	用 PCA-RBFN 建立可侦破故障的反应器自校正模型	260
6.4.4	结论	261
6.5	B 样条神经网络	261
6.5.1	B 样条函数的构成及其性质	261
6.5.2	B 样条神经网络算法	263
6.5.3	B 样条网络的训练	264
6.5.4	建立聚合反应分子量分布静态模型	265
6.6	用支持向量机构建软仪表	270
6.6.1	概述	270
6.6.2	最小二乘支持向量机算法	271
6.6.3	床层温度拟定态模型	272
	思考题与习题	274
	参考文献	274
第 7 章	模糊控制理论与应用	277
7.1	传统控制的难题	277
7.2	模糊控制技术的发展及应用	277
7.3	模糊控制原理	278
7.3.1	模糊控制的基本思路	278
7.3.2	精确量的模糊化	279
7.3.3	建立模糊控制规则及进行模糊判决	281
7.3.4	反模糊化	281
7.4	模糊控制器的设计	283
7.4.1	基本模糊控制器的设计	283
7.4.2	参数在线自校正模糊控制器的设计	286
7.4.3	自适应模糊控制器	287
7.4.4	常压塔塔底液位非线性控制	289
7.5	模糊控制与 PID 控制的结合	291
7.5.1	模糊控制与 PID 控制的比较	291
7.5.2	模糊控制与 PID 控制串级控制	292
7.6	小结	293

思考题与习题	294
参考文献	294
第 8 章 遗传算法及其工程应用	296
8.1 遗传算法的基本原理和方法	296
8.1.1 概述	296
8.1.2 遗传算法的基本方法	296
8.1.3 遗传算法的理论基础	298
8.1.4 遗传算法的研究进展及应用	299
8.2 自适应遗传算法	300
8.2.1 相似度对遗传算法的影响	300
8.2.2 基于交叉相似度的自适应遗传算法	302
8.2.3 函数优化问题	303
8.3 实数编码遗传算法与优化分布交叉操作	304
8.3.1 实数编码策略	305
8.3.2 实数编码交叉操作的效率分析	305
8.3.3 有效交叉操作和张弛交叉操作	308
8.3.4 实数编码优化分布交叉操作	309
8.3.5 仿真计算	310
8.4 分布式遗传算法	311
8.4.1 遗传算法的并行处理	311
8.4.2 分布式混合遗传算法	311
8.5 用遗传算法估计反应动力学参数	313
8.6 遗传算法用于过程优化	314
8.7 常减压蒸馏装置的优化	315
8.7.1 建立收率的优化模型	315
8.7.2 对收率优化模型进行优化	316
8.7.3 优化结果分析	316
8.8 遗传算法生成模糊规则	316
8.8.1 问题的结构	317
8.8.2 查询表的信息冗余及遗传个体的表示	317
8.8.3 遗传算法的构造	318
8.8.4 结论	320
思考题与习题	320
参考文献	320
第 9 章 计算机监控系统和在线优化控制	324
9.1 计算机监控系统	324
9.1.1 计算机监控系统类型	324
9.1.2 监测控制系统的功能	325
9.1.3 监测控制系统设计要求	326

9.1.4	监测控制系统设计步骤	326
9.1.5	SCADA 系统的功能及其发展趋势	328
9.1.6	SCADA 的硬件结构及数据库	329
9.1.7	SCADA 的软件	331
9.2	在线优化控制	332
9.2.1	优化控制的意义和必要性	332
9.2.2	过程优化技术	332
9.2.3	过程优化的描述	333
9.2.4	优化算法的种类	334
9.3	过程在线优化控制的应用	335
9.3.1	NLJ 优化算法	335
9.3.2	复合形优化算法	338
9.3.3	在线优化应用示例	340
	思考题与习题	344
	参考文献	344
第 10 章	群集智能优化算法及其应用	346
10.1	概述	346
10.1.1	粒子群算法	346
10.1.2	蚁群算法	346
10.1.3	群智能的优点	347
10.2	粒子群优化算法	347
10.2.1	PSO 算法基本原理	348
10.2.2	PSO 算法数学描述	348
10.3	PSO 算法的改进	349
10.3.1	加入惯性权重因子 w 的 PSO 算法	349
10.3.2	基本 PSO 的算法步骤	350
10.3.3	V_{\max} 与 w 对 PSO 算法的影响	351
10.4	PSO 算法的发展	351
10.4.1	自适应 PSO	351
10.4.2	混合 PSO	352
10.4.3	协同 PSO	352
10.4.4	离散 PSO	353
10.5	离散三群粒子群优化算法	353
10.5.1	基本离散粒子群优化算法	353
10.5.2	离散三群粒子群优化算法	354
10.5.3	工业现场的软测量应用	355
10.6	蚁群算法	358
10.6.1	蚁群算法概述	358
10.6.2	蚁群算法的基本原理	360

10.6.3	蚁群算法基本模型的改进技术	363
10.6.4	蚁群算法在连续优化问题中的应用	365
10.6.5	尚需深入研究的问题	367
	思考题与习题	367
	参考文献	368
附录	370
附录 A	MATLAB 程序	370
附录 B	F 分布表和 t 分布表	401

第1章 概述

随着我国经济体制的转变，加入 WTO 后，国内的众多过程工业企业日益感受到国际竞争所带来的压力和挑战。在这种背景下，积极开发和应用先进控制与在线优化技术，以提高企业经济效益、增强自身竞争力，是过程工业迎接挑战的重要对策。

现代控制理论和人工智能几十年来的发展已为先进控制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，则为先进控制与在线优化的应用提供了强有力的硬件和软件平台。先进控制与在线优化技术涉及到较多领域，例如现代控制理论、建模技术、软测量技术、系统辨识技术、优化技术、数据预处理技术以及人工智能理论等。本教材对这些内容都进行了基本介绍。

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发展强有力的推动力。先进控制是对那些不同于常规单回路控制，并且比常规 PID 控制效果更好的控制策略的统称，而非专指某种计算机控制算法。通常这种算法都要求有过程的数学模型，或带有人工智能的性质。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的、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 控制或串级控制无法满足的过程要求，甚至无法进行自动控制的复杂工业过程控制的问题。这个问题已被广泛关注，我国“十一五”规划中就明确提出要推进科技进步和技术创新，一些新的企业，在设计 and 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, 和 IDCOM-M, SMCA, PFC 等，我们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，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。通过最近十多年的应用、研究，在模型识别、优化算法、控制结构分析、参数整定和加强稳定性与鲁棒性等方面的工作有了显著进展，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中最成功，也最具有前途的先进控制策略之一。

先进控制与在线优化技术的实施，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技术，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，中石化和中油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，已经在不少企业试点应用，目前正在逐步大力推广应用。

1.1 建模的目的和基本方法

数学模型分为静态模型和动态模型。静态模型描述的是系统在稳态下的运行规律；动态模型描述的是系统在动态情况下的运行规律。

描述工业过程的数学模型，按连续性可分为连续系统模型和离散系统模型；按模型结构可分为输入输出模型和状态空间模型，而其中的输入输出模型又划分为时域模型和频域模型两大类。在设计控制系统时，可以根据实际情况选择合适的数学模型表达式。

1. 建立数学模型的主要目的

建立数学模型的主要目的是：

- 1) 制订工业过程优化操作方案。
- 2) 制订控制系统的设计方案，利用数学模型进行仿真研究。
- 3) 完成先进控制器设计和系统的调试。

2. 建立模型的基本方法

建立工业过程数学模型的基本方法有：机理分析法和实验法，或者是将这两种方法结合起来半经验半实验的方法。

(1) 机理分析法

机理分析法通常需要通过分析过程的运动规律，运用一些已知的定理、定律和原理（如化学动力学原理、生物学定律、牛顿定理、物料平衡和能量平衡方程、传热传质原理等），建立起过程的数学模型。这种方法也称理论建模。

机理分析法只能用于简单过程的建模，对于比较复杂的实际生产过程来说，这种建模方法有很大的局限性。这是因为进行理论建模时，为了降低问题的复杂性，往往对所研究的对象提出合理的简化假定，然而这些假定并不一定能符合实际情况，而且实际过程的机理有时也并非完全知道。另外，过程的某些因素也在不断变化，且难以精确描述，单纯用机理分析法建立过程的数学模型就目前技术水平来说还是相当困难的。

(2) 实验法

实验法也称测试法。过程的输入输出信号一般总是可以测量的，由于过程的动态特性必然表现在输入输出数据之中，那么就可以利用输入输出数据所提供的信息来建立过程的数学模型，常用的建模手段是系统辨识。

某种意义上讲，实验法较机理法有一定的优越性，因为它无须深入了解过程的机理，但这也不是绝对的。实验法的关键之一是必须选择合适的模型结构并设计一个合理的实验，以获得过程所含的最大信息量，这点往往又是非常困难的，多了解一些机理是会有很大帮助的。

(3) 机理建模和实验建模相结合

上面讲述的机理分析法和实验法在不同的场合各有千秋，实际应用时，两种方法应该互相补充。即将理论建模和实验建模两种方法结合起来使用：机理已知的部分采用机理建模，机理未知的部分采用系统辨识建模。这将充分发挥两种方法各自的优点。

(4) 其他方法

用上述方法对一些慢时变、非线性、大滞后对象建立非线性模型，会遇到很大的困难，有时甚至无能为力。近年来，应用人工神经网络建立复杂系统的模型引起了人们的兴趣，并