

《信息、控制与系统》系列教材

高等过程控制

王桂增 王诗宓 等编著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



《信息、控制与系统》系列教材

高等过程控制

王桂增 王诗宓 徐博文 李春文 叶 昊 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书系《信息、控制与系统》系列教材之一。它是在清华大学自动化系为本科高年级学生开设的选修课“高等过程控制”讲稿多年教学实践的基础上整理修改而成的。列入本书的多为近 10 多年来过程控制技术领域发展较快,研究较活跃、应用前景较广的一些新理论、新技术、新方法,其中不少是作者及其同行的教学和科研成果。全书共 8 章,主要包括最优预测、预测控制、推理控制、过程优化、多变量控制系统、非线性控制系统的逆系统设计方法、动态系统故障诊断等。书末包括 PLS 算法的一些性质证明等四个附录。本书既可作为自动化有关专业高年级学生的教材,也可作为科研和工程技术人员的参考书。

书 名: 高等过程控制

作 者: 王桂增 王诗宓 徐博文 李春文 叶 昊 编著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 北京昌平环球印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 **印张:** 17.25 **字数:** 395 千字

版 次: 2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-04962-9/TP·2794

印 数: 0001~3000

定 价: 21.00 元

《信息、控制与系统》系列教材

出版说明

《信息、控制与系统》系列教材是一套关于信息、控制和系统学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。选题范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、自动化技术、传感技术、自动化仪表、系统理论、系统工程、机器人控制、智能控制、计算机应用、高等过程控制等方面。主要读者对象为自动控制、计算机、过程自动化、无线电等系科的高年级大学生和研究生,以及在这些领域和部门工作的科学工作者和工程技术人员。

信息、控制与系统科学是在 20 世纪上半叶形成和发展起来的新兴学科。它们的应用和影响已经遍及众多的部门和领域,贯穿其中的许多思想和方法已用于经济和社会现象的研究,而以这些学科为理论基础的自动化技术的广泛应用更是实现现代化的重要标志之一。这套系列教材,正是在这样的客观要求下,为适应教学和科研工作的需要而编写和出版的。它以清华大学自动化系近年来经过教学实践的新编教材为主,力求反映这些学科的基本理论和最新进展,并且反映清华大学在这些学科中科学研究和教学研究的成果。我们希望这套系列教材,既是在校大学生和研究生的教科书,也能为广大科技人员提供有价值的参考。

组编和出版这套教材是一次尝试。我们热忱欢迎选用本系列教材的老师、学生和科技工作者提出批评、建议。

《信息、控制与系统》系列教材编委会

《信息、控制与系统》系列教材编委会

主 编：常 迺

编 委：常 迺 童诗白 方崇智
韩曾晋 李衍达 郑大钟
夏绍玮 徐培忠

责任编辑：蔡鸿程 王仁康

前 言

高等过程控制因其良好的控制效果和明显的经济效益而受到工业界的重视,并且成为过程控制领域的热门研究课题。有关高等过程控制,目前尚无严格而统一的定义。习惯上,将基于数学模型而又必须用计算机来实现的过程控制算法统称为高等过程控制策略,如补偿控制(包括 Smith 补偿控制、前馈控制等)、推理控制、预测控制、自适应控制、多变量控制、非线性控制等。广义地讲,质量预估、过程优化和动态系统故障诊断也可列入高等过程控制的范畴。

“高等过程控制”是清华大学自动化系为本科高年级学生开设的一门选修课,本书内容是在讲稿的基础上整理、修改而成的。由于补偿控制已为大家所熟悉并已在实际中得到广泛应用,自适应控制已有多种专门著作,考虑到篇幅有限,本书均未将其列入。列入本书的内容多为近 10 多年来在过程控制技术领域发展中发展比较快、研究比较活跃的一些新方法,其中包括作者及同事的研究成果。这些方法已取得实验成果或在工业上得到应用,而且具有广阔应用前景。本书可作为自动化有关专业高年级学生的教材,对从事自动化事业的工程技术人员也有一定的参考价值。

本书共分 8 章,第 1、2、6 章由王桂增教授编写,第 3、4 章由王诗宓教授编写,第 5 章由李春文教授编写,第 7 章由徐博文教授编写,第 8 章由王桂增教授和叶昊副教授共同编写。

本书在编写过程中,方崇智教授给予了很多关心和指导,并审阅了全文,在此谨致衷心的感谢。由于作者水平有限,本书的不足在所难免,恳请读者批评指正。

王桂增 王诗宓

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 连续过程自动化的发展趋势	1
1.2 高等过程控制的地位和作用	2
1.3 本书内容安排	3
第 2 章 最优预测	5
2.1 概述	5
2.2 线性系统的动态最优预测	6
2.2.1 最优预测的显式算法	6
2.2.2 最优预测的隐式算法	10
2.2.3 多步预测	11
2.3 回归分析方法	13
2.3.1 引言	13
2.3.2 线性化回归	13
2.3.3 回归系数的显著性检验	16
2.3.4 逐步回归	17
2.4 部分最小二乘法	20
2.4.1 引言	20
2.4.2 主元分析与主元回归	21
2.4.3 部分最小二乘法	25
2.5 数据处理分组方法	28
2.5.1 引言	28
2.5.2 基本的数据处理分组方法	29
2.5.3 改进的数据处理分组方法	32
参考文献	34
第 3 章 预测控制	35
3.1 概述	35
3.2 动态矩阵控制的基本原理	36
3.2.1 预测模型	36

3.2.2	输出预测	37
3.2.3	参考轨迹	39
3.2.4	性能指标	39
3.3	动态矩阵控制的基本算法	39
3.3.1	单值预测	40
3.3.2	多值预测	41
3.3.3	多输入多输出系统的动态矩阵控制算法	43
3.4	动态矩阵控制的性能分析	46
3.5	模型算法控制	49
3.6	预测控制应用中的一些问题	51
3.6.1	控制回路结构	51
3.6.2	非最小相位系统的模型选择	53
3.6.3	多输入多输出情形	54
3.6.4	参数选择	54
3.7	广义预测控制	55
3.7.1	自回归积分滑动平均模型	56
3.7.2	丢番图方程的递推计算	57
3.7.3	滚动优化	59
3.8	广义预测控制的基本特性和参数选择	62
3.8.1	广义预测控制的稳定性	62
3.8.2	广义预测控制的其他性能	64
3.8.3	参数选择	68
	参考文献	69
第4章	多变量控制系统	70
4.1	概述	70
4.2	多变量系统的表示法	71
4.2.1	对象模型的内部描述法	71
4.2.2	对象模型的外部描述法	71
4.2.3	非参数模型	74
4.3	多变量系统的基本关系	75
4.3.1	传递函数矩阵的极点和零点	75
4.3.2	系统的极点和零点	76
4.3.3	系统的能控性和能观性	78
4.3.4	闭环系统的传递函数矩阵	80

4.4	相对增益阵列	81
4.4.1	多回路控制系统的互联	82
4.4.2	相对增益阵列	84
4.5	极点配置问题	86
4.5.1	状态反馈极点配置	87
4.5.2	输出反馈极点配置	89
4.6	解耦控制	91
4.6.1	串联解耦	91
4.6.2	线性状态反馈解耦	92
4.6.3	线性输出反馈解耦	93
4.7	逆奈氏阵列方法	94
4.7.1	对角优势	95
4.7.2	稳定性定理	96
4.7.3	对角优势性的获取	98
4.7.4	前置补偿器的设计	99
4.7.5	闭环特性的估算	99
4.7.6	正奈氏阵列法	100
4.7.7	鲁棒对角优势	102
4.8	特征轨迹方法	103
4.8.1	传递函数矩阵的特征分解和稳定性判据	104
4.8.2	互联和失配角	104
4.8.3	近似可交换控制器	105
4.8.4	近似实特征方向的求取	106
4.8.5	设计方法	107
	参考文献	108
第5章	非线性控制系统的逆系统设计方法	109
5.1	概述	109
5.2	基本原理与设计方法	110
5.2.1	系统的逆	110
5.2.2	逆系统方法原理与单变量系统的设计	115
5.3	多变量系统的设计	117
5.3.1	多变量微分方程系统的设计	117
5.3.2	一类多变量状态方程系统的设计	119
5.3.3	多变量伪线性系统综合	121

5.3.4	解耦与镇定	123
5.4	状态观测器设计	124
5.4.1	规范型观测器理论与设计	125
5.4.2	设计方法的某些推广	128
5.5	应用举例	129
	参考文献	132
第 6 章	推理控制	133
6.1	推理控制系统的组成	133
6.1.1	问题的提出	133
6.1.2	推理控制系统的组成	134
6.1.3	推理控制器的设计	136
6.1.4	静态推理控制	137
6.2	模型误差对系统性能的影响	138
6.2.1	扰动通道模型误差的影响	138
6.2.2	控制通道模型误差的影响	138
6.2.3	推理-反馈控制系统	140
6.3	输出可测条件下的推理控制	141
6.3.1	系统组成	141
6.3.2	模型误差对系统性能的影响	142
6.3.3	自适应推理控制	143
6.3.4	预测推理控制	144
6.4	多变量推理控制	146
6.4.1	控制器的 V 规范型结构	147
6.4.2	V 规范型控制器的设计	148
6.4.3	滤波阵的选择	154
6.5	应用举例	155
6.5.1	应用实例	155
6.5.2	二次输出量的选择	157
6.5.3	控制作用的限幅	157
	参考文献	158
第 7 章	过程优化	159
7.1	概述	159
7.1.1	基本概念	159

7.1.2	实现过程优化的关键技术	160
7.2	过程建模	160
7.2.1	引言	160
7.2.2	数学模型的类型	161
7.2.3	稳态数学模型的建立	162
7.3	过程优化模型	166
7.3.1	目标函数	166
7.3.2	约束条件	167
7.3.3	优化模型的建立	168
7.4	优化算法	170
7.4.1	优化算法的选择	170
7.4.2	基于遗传算法的优化计算	170
7.5	过程优化控制	183
7.5.1	优化控制的功能结构	183
7.5.2	优化控制的实现	183
	参考文献	187
第8章	动态系统故障诊断	188
8.1	基本概念	188
8.1.1	故障与故障诊断	188
8.1.2	故障与故障诊断的分类	189
8.1.3	故障诊断系统性能评价	189
8.2	基于状态估计的故障诊断方法	190
8.2.1	冗余信号的产生	190
8.2.2	故障检测与定位	191
8.2.3	仪表故障诊断实例	194
8.3	故障检测观测器	196
8.3.1	引言	196
8.3.2	故障检测观测器及其结构条件和鲁棒性条件	197
8.3.3	检测观测器组和诊断逻辑的设计	200
8.3.4	故障检测观测器的设计步骤	201
8.3.5	设计举例	203
8.4	基于时序分析的故障诊断方法	206
8.4.1	时序建模	206
8.4.2	判别函数	208

8.4.3 应用举例·····	213
8.5 基于时频分析的故障诊断方法 ·····	216
8.5.1 小波变换简介·····	216
8.5.2 利用观测信号的奇异性进行故障检测·····	218
8.5.3 利用观测信号频率结构的变化进行故障诊断·····	221
8.6 智能故障诊断方法 ·····	226
8.6.1 引言·····	226
8.6.2 人工神经网络简介·····	227
8.6.3 基于递阶神经网络的故障诊断·····	232
8.6.4 基于自适应神经网络的故障诊断·····	234
8.7 大系统的故障诊断 ·····	240
8.7.1 重叠分解的概念·····	241
8.7.2 确定性大系统的重叠分解·····	242
8.7.3 基于重叠分解的大系统的故障诊断·····	244
参考文献·····	250
附录·····	252
附录 A PLS 算法的一些性质的证明 ·····	252
附录 B 能观状态变量的确定 ·····	254
附录 C 检测观测器一些结论的证明 ·····	257
附录 D 辅助矩阵的确定 ·····	260

第1章 绪 论

1.1 连续过程自动化的发展趋势

连续过程自动化涉及炼油、化工、发电、冶金、造纸、医药和轻工等工业部门,对国民经济的发展起着十分重要的作用。连续过程具有连续生产、过程复杂、系统大和安全性要求高等特点,对自动化要求比较高,自动化程度发展也比较快。

连续过程自动化的发展经历了从常规仪表(包括气(液)动和电动仪表)到集散型计算机控制系统(DCS)的发展过程。进入 20 世纪 90 年代,企业的自动化向着以计算机网络为基础的计算机集成系统的方向发展。从系统的功能角度看,连续过程工业自动化由过去的以保证平稳生产为目标的简单控制装置发展到考虑过程非线性、时变性和耦合性等因素的先进控制系统。随着科学技术的发展和市场竞争的日趋激烈,企业把注意力集中到如何形成一个能适应生产环境不确定性和市场供求多变性的,具有高柔性、全局最优、高经济效益和高管理水平的,集生产与经营管理于一体的综合自动化系统,也就是连续生产过程的计算机集成制造系统 CIMS(computer integrated manufacturing system),亦称计算机综合处理系统 CIPS(computer integrated processing system)。连续过程工业的 CIMS 完全摆脱了传统的“孤岛”式的自动化模式,它以计算机的硬、软件系统的集成为基础,实现企业生产信息和管理信息的集成,控制功能、计划调度和管理决策功能的集成,使企业成为一个整体,有机、协调地运行,从而创造最好的经济效益和社会效益。

一个典型的连续过程的 CIMS 系统的功能结构如图 1.1.1 所示。

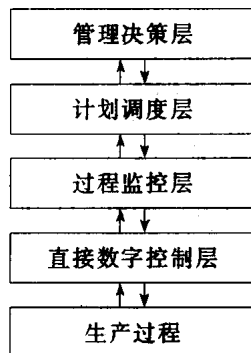


图 1.1.1 连续过程的 CIMS 的功能结构

各层的主要功能如下：

① 直接数字控制层(direct digital control),实现过程变量的数据采集、处理和直接数字控制;

② 过程监控层(supervisory control),实施高等过程控制策略,在已建立起来的生产调度范围内优化装置的操作,并对所辖装置进行故障诊断等;

③ 计划调度层 (production planning and scheduling), 制订生产计划并对生产进行调度;

④ 管理决策层 (management information and decision supporting system), 对生产、经营、仓库和人事等信息进行管理, 并依据企业内部和外部信息对企业的经营、中长期目标和发展规划作出决策。

1.2 高等过程控制的地位和作用

在现代化的大型企业中, 尽管过程控制采用了先进的 DCS 系统, 但绝大部分的控制回路仍采用比例积分和微分 (PID, proportional integral and differential) 控制。据有关资料介绍, 在连续工业过程的控制中, 85%~95% 的控制回路采用 PID 控制, 约有 5%~15% 的控制回路是常规 PID 控制所不能奏效或效果不好的, 而必须采用高等过程控制策略。常规 PID 控制效果不好的原因主要是过程本身存在以下特点:

① 过程本身的严重非线性。当非线性不很严重, 且被控变量在设定值附近很小的范围内变化时, 用线性系统来近似, 这在工程上是可以接受的。但对于存在严重非线性环节的系统, 这样的近似就不行了, 如 pH 值控制、聚合反应过程的控制等。

② 过程的时变性。如换热器的外部结焦或内部结垢, 使换热器的换热系数成为时变的。

③ 过程之间存在相互耦合关系。如在精馏过程及电站锅炉燃烧过程的诸多控制回路中均存在很强的耦合关系。

④ 一些质量参数不能在线测量。在过程控制中, 存在一些在现有技术条件下无法在线测量的质量参数, 或虽能测量, 但设备昂贵, 难以维护, 如蒸馏塔顶(底)产品的成分、聚合反应物的平均分子量等, 而这些量又是产品的重要质量指标, 需要加以测量和控制。

⑤ 系统安全性要求高。随着装置的大型化和复杂化, 安全可靠性愈益显得重要。这是因为, 任何故障都可能造成严重的经济损失, 甚至酿成设备和人身事故。

针对过程本身的特点和过程控制中存在的问题, 过程控制工作者一直在寻求找到更为先进有效的控制系统, 这就是所谓高等过程控制系统。

高等过程控制 APC (advanced process control), 亦称先进过程控制, 目前尚无严格而统一的定义。习惯上, 将基于数学模型而又必须用计算机来实现的控制算法, 统称为高等过程控制策略。如补偿控制 (包括 Smith 补偿控制、前馈控制等)、推理控制、预测控制、自适应控制、多变量控制、非线性控制、分布参数控制等。广义地讲, 质量预估、过程优化和动态系统故障诊断也可列入高等过程控制的范畴。

对于过程控制工作者来说, 建立系统数学模型并不是一个新的课题。常规 PID 控制系统的整定就是基于过程的动态特性参数 (如稳态增益、时间常数和纯时延), 只是这种整定对模型参数的精度要求不高, 而高等过程控制系统对被控对象的数学模型则有比较高的要求。

近年来, 建模研究和开发受到愈来愈多的关心和重视, 建模理论、方法和应用已成为

一门很活跃的学科领域。自 1976 年以来,专门讨论建模理论、方法和应用的国际自动控制联合会(IFAC)有关辨识和参数估计的会议每三年召开一次。很多典型工业对象的数学模型不仅可以从有关的文献中找到,而且有的已成为软件产品投入市场。控制理论、信息理论的发展和计算机的广泛应用,不仅为建模研究和开发,也为高等过程控制系统的实现提供了有利的条件。

所有基于数学模型的控制系统均面临一个共同的问题,即控制系统的鲁棒性问题。任何一个实际的过程,特别是机理比较复杂的过程,要建立其比较精确的数学模型是很困难的。因此,过程控制工作者一方面要努力去建立被控过程的尽可能精确而又实用的数学模型,另一方面,要努力去寻找一种简便而又对模型误差和系统干扰具有比较强的鲁棒性的控制方法。

在过程控制工作者的努力下,高等过程控制系统的研究和应用取得了很大成绩,有些(如多变量控制、预测控制、过程优化等)已在工业实际中产生巨大的经济效益。但由于工业过程机理复杂,往往具有非线性、分布参数、大系统等特点,这些因素仍会给模型的建立和高等过程控制策略的实施带来一定的困难。这项工作本身又是一个涉及建模理论、控制理论、计算机技术和工艺过程等内容的综合性工作。高等过程控制的进展需要研究人员和工程技术人员,以及操作人员和工艺人员的密切配合和长期努力。可以肯定,基于建模和计算机的高等过程控制技术的应用一定会不断取得新进展。

1.3 本书内容安排

一些属于高等过程控制范畴的内容,如补偿类控制,已为大家所熟悉,并已在实际中得到广泛应用,自适应控制已有多种专门著作,考虑到篇幅有限,本书均未列入。列入本书内容的多为近十多年来在过程控制领域中研究比较活跃、具有广阔应用前景的新方法,其中,有的已取得实验室成果,有的在工业上得到应用并有明显经济效益。书中的一些内容是作者及同事多年研究的成果。

本书共分 8 章。

第 1 章简述了连续过程自动化的发展趋势、高等过程控制所覆盖的范围,以及在过程控制领域中的地位 and 作用。

第 2 章主要介绍动态系统的最优预测和质量指标的最优估计方法。动态系统的最优预测主要用于预测控制和自适应控制,而回归分析方法、部分最小二乘法和数据处理分组法(GMDH)等主要用于过程控制中产品关键质量指标的估计。

第 3 章以动态矩阵控制(DMC)为主,介绍了预测控制的基本思想和基本方法,同时对模型算法控制和广义预测控制作了简单介绍。

第 4 章主要介绍多变量系统的描述,以及控制系统的分析和设计方法。

第 5 章主要介绍非线性控制系统的一种新的反馈线性化理论和方法——逆系统设计方法的基本概念、原理和应用。

第 6 章主要介绍推理控制系统的组成、模型误差对系统性能的影响,以及输出可测条件下的推理控制系统的组成和性能。

第7章介绍过程优化的基本概念、主要目标,以及所采用的基本方法。

第8章介绍动态系统故障诊断的基本概念和基本方法,重点是基于状态估计和基于信号分析的故障检测和定位方法。

本书着重介绍各种高等过程控制策略的基本思想和基本方法,各章内容具有相对的独立性,读者可根据需要任意选读。

第2章 最优预测

2.1 概 述

预测是自动控制学科的重要组成部分,它在过程控制中得到广泛应用。预测可分为动态预测和稳态预测两类。为使控制系统获得比较满意的动态性能,在一些高等过程控制算法(如预测控制和自适应控制等)中,要求根据过去和现在的输入甚至未来的控制输入,对系统未来的动态输出进行预测,这种预测称为动态预测。

在过程控制中,还存在另一类情况,即有一些重要的产品质量指标(如聚合物的熔融指数、汽油的干点和柴油的倾点、铁水中的硅含量等),因限于目前的技术条件,尚无法进行在线测量,只能依靠离线的实验室分析去指导生产。但是,由于实验室分析一般周期较长,对生产的指导不及时,因而不能满足生产的要求。为了提高产品的质量,人们寻求通过建立预测模型建立质量指标同操作参数之间的关系,以便依据过去和现时刻的操作参数对未来的质量指标进行估计,这就是质量指标的最优估计。由于实验室分析一般要2~4h才进行一次,因此基于分析数据的质量指标“预测”只能是在对生产过程的纯时延和过渡过程时间作尽可能准确估计的基础上,根据过去和现时的操作参数对未来的稳态质量指标作预测,这种预测称为“稳态预测”。

建立预测模型(也称预测器)的方法有两种。一种是首先通过系统辨识的方法来得到结构已知的时序模型(如自回归滑动平均模型,即CARMA模型),而后再通过对此模型进行简单的代数处理来得到合适的预测器。这种方法首先要确定模型的结构和参数。

另一种方法是假定预测器具有某种形式的函数结构,这种结构不一定对应于系统的真实结构。我们的目的是根据已知的输入、输出数据去确定其中的参数,以使模型的输出尽量接近于真实输出,而不考虑模型的参数同系统真实参数之间的接近程度。这种预测器称为限制复杂性预测器(RCP, restricted complexity predictor)^[1]。之所以称之为限制复杂性预测器,是因为预测器的结构是人为指定的,没有必要去对应真实系统的结构,而且作为自变量的数据也可以是任意的,只要它能为预测器的输出提供信息,就不必像CARMA模型那样对于自变量的选择以及同预测器之间均有严格的函数关系。

作为一个估计器的预测器(其输出或作为实际测量值的一种冗余,或作为不可测量的质量指标的估计值)起到测量仪表的作用,工业上又习惯称其为“软仪表”,或“软测量”(soft measurement)。软仪表跟通常概念上的仪表不同,它不是一个独立的仪表,而是一个从机理上或根据实验数据建立起来的一个模型系统,其输入为来自其他测量仪表的操作参数和物性参数,其输出为所要求的质量指标的估计值。这个模型系统是根据特定的具体对象建立的,而不像一般概念上的仪表可适用于任何对象同类参数的测量。

本章从动态预测和稳态预测两个方面介绍预测的基本方法。2.2节重点介绍动态预