

FEIXIANXING GUOCHENG KONGZHI

非线性 过程控制

[印度] M.chidambaram 著

焦留成 宋运忠 译

煤炭工业出版社

非线性过程控制

[印度] M. Chidambaram 著

焦留成 宋运忠 译



煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

非线性过程控制 / [印] M. Chidambaram, 著; 焦留成, 宋运忠译. —北京: 煤炭工业出版社, 2001

ISBN 7-5020-2077-2

I. 非… I. ①M…②焦…③宋… II. 非线性系统-过程控制 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 067955 号

M. Chidambaram

Nonlinear Process Control

(First Published)

Wiley Eastern Limited 4835/24 Ansari Road,
Daryaganj New Delhi 110002, India 1995

*

非线性过程控制

[印度] M. Chidambaram 著

焦留成 宋运忠 译

责任编辑: 黄朝阳

*

煤炭工业出版社 出版发行

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

*

开本 850×1168mm^{1/32} 印张 5

字数 140 千字 印数 1—1,200

2001 年 11 月第 1 版 2001 年 11 月第 1 次印刷

社内编号 4848 定价 16.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

无
彩

内 容 提 要

本书是印度工学院化工系系主任、博士生导师 M. Chidambaram 的著作。本书一开始概述了模型参考非线性控制器的基本设计方法,接着对包含积分和微分作用的模型参考非线性控制器、相对阶大于或等于二的被控系统的模型参考非线性控制器、串联级联和并联级联模型参考非线性控制器、执行环节或测量环节具有显著动特性或存在时滞的被控系统的模型参考非线性控制器引入的必要性、设计的原理和方法、特殊要求、有效性评价等给予了详尽和深刻的描述。正文之后有三个关于受控系统的稳定性和鲁棒性分析的附录,书末有经过精心挑选的富有代表性的习题及参考文献。本书始终贯穿理论与实践相结合的原则。每一种模型参考非线性控制器的有效性都经过典型对象的实验验证,工程观念强是本书的一大特色。

本书适合工业过程控制的研究人员,也特别适合化工、机械、建材、冶金、轻工、纺织等行业从事过程控制的工程技术人员阅读,它也可用做控制理论与控制工程专业研究生的非线性过程控制教材。

序

我的专著《非线性过程控制》能被中国学者认可令我非常高兴。我在过程控制及其应用方面做过一些工作。我的中国同行对新知识的渴求和工程发展趋势的重视给我留下了深刻的印象。译者对我著作中文版的热忱工作深深打动了我。中国正在步入一个崭新的时代，过程控制理所当然应该发挥它的作用。鉴于此，在中国应大力推进过程控制的教育以便赢得它 21 世纪的辉煌。《非线性过程控制》被翻译成中文为这一发展潮流起到了推动作用。我真切地期望我的中国读者能透彻地理解工业过程并对其进行良好控制。

感谢焦留成教授和宋运忠老师，是他们的辛苦劳动使得这一切成为现实。从事翻译工作的人们为世界上不同国家人民之间的相互合作和交流架起了友谊的桥梁，这正是当今世界所需要的。

M. Chidambaram

2001 年 8 月

译者的话

M. Chidambaram 先生是颇有影响的过程控制理论和过程控制工程方面的专家，他和他所带领的研究小组在过程控制的各个方面进行了卓有成效的工作。当我们接触到《非线性过程控制》的英文版原著时，发现这是一本难得的好书，于是就萌发了将它译成中文的想法，经过与作者协商，得到 M. Chidambaram 先生的大力支持。不久，我们收到作者本书英文版的赠书及同意本书在我国出版的承诺。后来，M. Chidambaram 先生又给我们寄来他的专著《应用过程控制》和几篇最新发表的论文以表达他对本书出版的支持。我们对 M. Chidambaram 先生对中国人民的友谊和对我们工作的热情支持表示深深的感谢。

在我国，非线性控制理论有已故高为炳院士的专著。过程控制有王骥程、金以慧等教授的著作，另外还有方崇智、吴惕华教授的译著。但是专门针对过程控制的非线性而写的专著在我国仍非常少。相信本书中译本的出版将会对我国在该领域的研究起到一定的推动作用。

参加本书翻译的有焦留成、宋运忠。焦留成对全书作了审校。由于翻译时间仓促，加上译者才疏学浅，表达不恰切乃至错误在所难免，我们恳切期望广大读者提出宝贵意见。

译者

2000年11月

前 言

本书的主要内容是讲述非线性控制系统模型参考非线性控制器设计。模型参考非线性控制器的设计方法是一种系统的、综合的方法。该方法可用于任意相对阶的非线性控制系统，经过改进后可用于执行环节或测量环节具有显著动特性的非线性控制系统，同时也可用于执行环节或测量环节具有时滞的非线性系统的控制。简单的反馈结构、串联级联结构、并联级联结构也可用于非线性系统的控制。我们的方法对具有输入多样性和输出多样性的非线性系统也是适用的。对多变量非线性系统控制这种方法仍然是有效的。

本书内容：第1章引言，说明使用非线性控制器的必要性。第2章讲解模型参考非线性控制器设计的概念以及这种控制器在高度非线性pH过程、不稳定的连续搅拌槽反应器和多变量混合培养生化反应器上的应用。第3章主要讨论采用具有积分和微分作用的模型参考非线性控制器的设计，这种控制器的设计主要是用来保证闭环控制系统的稳定性和鲁棒性。第4章讨论了相对阶大于或等于2的非线性系统的模型参考非线性控制器的设计，并将其用于不稳定的连续搅拌槽反应器的控制。第2章和第4章的所有研究分析都是基于简单的反馈控制结构的。模型参考非线性控制器的串联和并联级联结构

分别在第5章和第6章讨论。具有输入多样性的非最小相位系统的模型参考非线性控制器的设计在第7章分析。为了在控制时使用较小的操作变量，第8章提出了并联级联控制器的设计方法。

执行环节和测量环节具有显著动特性的非线性控制系统的模型参考非线性控制器的设计方法由第9章给出。它主要对不稳定的连续搅拌槽反应器和生化反应器进行应用研究。第10章分析了执行环节或测量环节具有纯时滞的非线性系统的模型参考非线性控制器的设计。第11章给出了输入有约束的非线性系统的模型参考非线性控制器的设计方法。最后一部分提供的相关习题对巩固每章模型参考非线性控制器的设计方法有着不可取代的作用。基于李雅普诺夫 (Lyapunov) 方法对模型参考非线性控制器的稳定性分析在附录 A、B、C 中给出。

我十分愿意在这里对所有帮助我完成本书的人表示感谢。其中特别要提到的是我的学生 J. Bhat 博士、Y. S. N. Malleswarao 博士、Ch. Yugender 和 G. P. Reddy，在本书中我援引了他们的学位论文。我也同样要感激我的同事 K. P. Madhavan 教授，与他的讨论使我受益匪浅，也正是由于他对本书有关内容的评论才使得本书光彩大增。另外我还要感谢印度工学院 Bombay 和 Madras 分校化学工程系的支持。我的部分内容是在 Bombay 分校完成的，我感谢该分校的领导，感谢他们在继续培训中心为本书的编写立项。最后，我要对我的妻子 Sheila 和我的儿子

Srihari Prasath 表示最诚挚的谢意，他们对我工作的一贯支持是保证本书得以出版的重要因素。

M. Chidambaram

目 录

第 1 章 引 言	1
1.1 引入非线性控制器的必要性	1
第 2 章 模型参考非线性控制器	3
2.1 引 言	3
2.2 模型参考非线性控制器的设计	3
2.3 鲁棒性分析	6
2.4 非线性系统的稳定性、可控性、可观性	7
2.5 未知对象动态特性下的应用	8
2.6 pH 过程的控制	9
2.7 在连续搅拌槽反应釜上的应用.....	17
2.8 在混合生化反应器控制中的应用.....	22
2.9 结 论.....	28
第 3 章 引用积分和微分作用的模型参考非线性 控制器的设计	29
3.1 引 言.....	29
3.2 控制器设计.....	29
3.3 pH 值的过程控制	33
3.4 在控制律中包含微分作用的影响.....	35
3.5 结 论.....	38

第 4 章 相对阶大于或等于 2 的系统的模型参考非线性控制器的设计	40
4.1 引 言	40
4.2 相对阶的定义	40
4.3 控制器的设计方法	41
4.4 相对阶大于 2 的系统的模型参考非线性控制器的设计	44
4.5 不稳定连续搅拌槽反应器的控制	46
4.6 仿真结论	49
4.7 结 论	53
第 5 章 非线性系统的串联级联控制	54
5.1 引 言	54
5.2 控制器设计	54
5.3 闭环系统性能的评价	58
5.4 结 论	63
第 6 章 非线性系统的并联级联控制	64
6.1 引 言	64
6.2 控制器设计	64
6.3 控制器性能的评价	68
6.4 结 论	74
第 7 章 具有输入多样性的非线性非最小相位系统的非线性控制	75
7.1 引 言	75
7.2 控制器的设计	76
7.3 在连续搅拌槽反应器上的应用	77

7.4	结 论	84
第 8 章	具有输入多样性的非线性非最小相位系统的 并联级联控制	85
8.1	引 言	85
8.2	控制器的设计	85
8.3	对控制器性能的评价	88
8.4	结 论	92
第 9 章	执行环节和测量环节具有显著动特性和非线性 系统的控制	93
9.1	引 言	93
9.2	控制器的设计	93
9.3	控制器在不稳定连续搅拌槽反应器上的应用	96
9.4	仿真结果	97
9.5	测量环节动特性下模型参考非线性控制器的 设计	100
9.6	在不稳定的生化反应器上的应用	101
9.7	仿真结果	103
9.8	结 论	106
第 10 章	执行环节或测量环节具有纯滞后的非线性 系统的控制	107
10.1	引 言	107
10.2	控制器设计	107
10.3	在生化反应器上的应用	110
10.4	在不稳定的连续搅拌槽反应釜上的应用	114
10.5	结 论	117

第 11 章 具有输入或输出约束的多变量系统的 非线性控制	118
11.1 引 言	118
11.2 输入约束下控制器的设计	118
第 12 章 结 论	121
附录 A	123
附录 B	126
附录 C	129
习 题	132
参考文献	141

第 1 章 引 言

1.1 引入非线性控制器的必要性

大多数化工过程动态特性表现出非线性。这种系统的动态特性常用初始值非线性的普通微分方程描述。对这样的系统常在某一稳态运行点附近局部线性化处理,然后应用标准的线性控制理论,设计基于线性模型的线性控制器。当过程的非线性不太显著时,这种方法还能给出好的控制效果。但是,当系统的非线性加剧时(如 pH 过程,精馏塔对象等),线性控制器的调节效果就很差(Shinskey, 1988)。由于非线性系统被控对象的增益和时间常数随操作工况变化,经典的 PI 调节器要取得好的控制效果,它的参数就需要频繁进行调整。否则,在某一工况点运行完好的 PI 控制器在其它的工况下就可能变得不稳定;当扰动的方向改变时,也会存在同样的问题。更为严重的是,在连续过程的伺服控制(频繁的启动/停止)和间歇过程的优化控制问题中,线性控制理论的应用是不可能的,因为对这样的被控对象不存在可供局部线性化的时不变操作工况点。

克服以上问题最普遍使用的方法是采用最优控制理论,特别是针对间歇过程更是如此。这些最优控制律在开环方式下使用,因而对扰动和建模误差没有进行补偿。这种控制策略在工程中使用,对扰动和建模误差很敏感,鲁棒性很差,结果往往以失败而告终(Fess, 1973)。

最近的兴趣已经转移到基于模型的非线性控制器设计上。已经

有不少学者对非线性过程控制器的使用进行过精彩的评论，如 McLellan (1990)，Kravaris 和 Kantor (1990)，Henson、Seborg 和 Bequette (1991)。这些控制策略有：全局线性化控制器，部分线性化控制器，全局输入/输出线性化控制器，内模控制器，模型预测控制器和模型参考非线性控制器。应用非线性过程模型的非线性控制策略比传统的 PID 调节器的控制效果有明显的改善。其中之一的模型参考非线性控制器 (MRNC) 是我们在本书中关注的焦点。

由于化工过程的特定的非线性特征，下面的相关问题必须使用非线性控制器：

- (1) 输出多样性；
- (2) 输入多样性；
- (3) 系统的非最小相位特性；
- (4) 执行环节或测量环节动特性；
- (5) 执行环节或测量环节的纯滞后；
- (6) 未知或不确定的系统动特性；
- (7) 不可测扰动或不可测状态变量；
- (8) 输出或输入变量有约束；
- (9) 多变量间的耦合。

设定非线性系统具有下面的形式：

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x) + g(x)u + d(t) \\ y &= h(x)\end{aligned}$$

以后各章将针对模型结构的细节进行讨论。控制律的目的在于闭环应用时驱使过程输出很好地跟踪参考模型输出。所研究的参考模型具有下面的形式：

$$\dot{y}_m = \lambda_m y_m - \lambda_m y_r$$

λ_m 的值由系统的开环特征确定。控制律的作用是使参考模型响应和过程响应之差 $y_m - y$ 在每一误差动特性下趋于零。本书重点论述如何设计模型参考非线性控制器以适应各种复杂的被控过程，特别强调对被控过程非线性特征的处理上。

第2章 模型参考非线性控制器

2.1 引言

模型参考非线性控制器的基本设计方法由 Liu (1967), Youcef-Toumi 和 Ito (1987), Bartusiak (1988) 等, Adebekun 和 Schork (1989), Bhat (1990) 等分别提出。本章通过以下例子: ① 强非线性 pH 过程; ② 具有输出多样性的不连续搅拌槽反应釜; ③ 不稳定多变量混合培养生化反应器来评述模型参考非线性控制器设计的理论分析。

2.2 模型参考非线性控制器的设计

研究单输入单输出状态空间法表示的系统,

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_1(x_1, x_2, \dots, x_n)u + d_1(t)$$

.....

.....

$$\dot{x}_n = f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n)u + d_n(t)$$

2-1

$$y = h(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

2-2

这里 u 是操作输入标量, x_1, x_2, \dots, x_n 是状态变量, y 是标量输出, f_i, g_i 是状态变量的非线性函数, d_1, d_2, \dots, d_n 表示干扰。输出变量 y 是标量输出, 而且它是状态向量 x 的非线性函数。

方程 2-1 和 2-2 可以写成状态变量的仿射形式,

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u + d(t) \quad 2-3$$

$$y = h(x) \quad 2-4$$

我们假定标量输出 y 的参考模型为

$$\dot{y}_m = \lambda_m y_m - \lambda_m y_r \quad 2-5$$

其中, y_r 是参考模型的输入, λ_m 是参考模型的特征值。当 λ_m 取绝对值大的负值时我们有 $y_m = y_r$ 。

标量 e 定义为参考值和过程输出值之差,

$$e = y_m - y \quad 2-6$$

控制的目的是使误差在期望的动态特性下消失。

$$\dot{e} = \lambda e \quad 2-7$$

这里 λ 是误差系统的特征值。由方程 2-3 到 2-6, 我们可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{y}_m - \dot{y} \\ &= \lambda_m y_m - \lambda_m y_r - J[f(x) + g(x)u + d(t)] \quad 2-8 \end{aligned}$$

$$= \lambda_m e + \left\{ \lambda_m y - \lambda_m y_r - J[f(x) + g(x)u + d(t)] \right\} \quad 2-9$$

这里,

$$J = \partial h / \partial x$$

重新整理可得:

$$\left\{ \lambda_m y - \lambda_m y_r - J[f(x) + g(x)u + d(t)] \right\} = ke \quad 2-10$$

控制律可以求出为:

$$u = [Jg(x)]^{-1} [\lambda_m y - \lambda_m y_r - Jf(x) - Jd(t) - ke] \quad 2-11$$

方程 2-9 变为:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (\lambda_m + ke) \\ &= \lambda e \quad 2-12 \end{aligned}$$

其中, k 是误差反馈增益标量。由于误差系统方程 2-12 的特征值