



江苏大学五棵松文化丛书

RESEARCH ON THE SOFT-SENSING AND
OPTIMIZATION CONTROL OF
MARINE BIOLOGICAL ENZYME
FERMENTATION PROCESSES

海洋生物酶

发酵过程软测量
与优化控制方法研究

朱湘临 著



江苏大学专著出版基金资助出版

海洋生物酶

发酵过程软测量 与优化控制方法研究

朱湘临 著

RESEARCH ON THE SOFT-SENSING AND
OPTIMIZATION CONTROL OF
MARINE BIOLOGICAL ENZYME
FERMENTATION PROCESSES

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

海洋生物酶发酵过程软测量与优化控制方法研究 /
朱湘临著. — 镇江: 江苏大学出版社, 2018. 2
ISBN 978-7-5684-0771-7

I. ①海… II. ①朱… III. ①海洋生物—水产食品—
酶法—发酵—食品加工 IV. ①TS254.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 041215 号

海洋生物酶发酵过程软测量与优化控制方法研究

Haiyang Shengwumei Fajiao Guocheng Ruanceliang Yu Youhua
Kongzhi Fangfa Yanjiu

著 者/朱湘临

责任编辑/徐 婷

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/丹阳市兴华印刷厂

开 本/890 mm×1 240mm 1/32

印 张/5. 625

字 数/158 千字

版 次/2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0771-7

定 价/35. 00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

随着科学技术的发展和人们对海洋资源开发意识的增强,以及海洋生物酶促进国民经济发展的重大理论和现实意义,海洋生物酶已经成为 21 世纪世界各国学者竞相研究的热点。为充分发挥海洋生物酶独特的酶学特性,最大限度提高海洋生物酶的生产效率和产品品质,降低生产成本,提升海洋生物酶产业的规模化、集约化生产进程,需要对海洋生物酶发酵过程进行动态调控和实时优化,将其准确地控制在最佳工艺条件下进行生产。然而,海洋生物酶发酵过程机理复杂,是一个多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output-pits, MIMO)的动态生化反应过程,菌株的生长、繁殖及产酶代谢过程中需要动态调控的参数众多,且各参数之间存在复杂的动态关系,其具有高度的非线性、时变性与强耦合特征,造成一些直接反映海洋生物酶发酵品质的关键过程变量难以在线实时检测,使先进的优化控制算法和策略难以实现,给海洋生物酶发酵过程的实时优化控制带来了困难。现今,海洋生物酶发酵过程的软测量和优化控制技术已成为生物技术领域的重要研究内容,其研究对其他酶制剂发酵过程的动态调控具有一定的借鉴意义,对推进我国海洋生物酶产业的规模化与集约化生产进程提供了应用基础,同时对提高海洋资源的开发利用水平及能力,实现我国经济的健康、可持续发展都具有重要意义。

为此,在“十二五”国家 863 重点科技项目(2011AA09070301)、江苏省自然科学基金项目(SBK20140568、BK201123588)和江苏省高校自然科学研究面上项目(14KJB510007)的资助下,本书将支持向量机与传统的逆系统方法相结合,提出了支持向量机逆软测量建模方法,从理论上给出并证明了逆软测量模型存在的条件,并采

用支持向量机逼近逆软测量模型中难以显式解析表示的非线性函数,建立了支持向量机逆软测量模型,突破了实际工程应用中逆系统方法解析表达式难以获得的瓶颈,为海洋生物酶发酵过程进一步解耦和优化控制奠定了基础。其次,为了实现海洋生物酶发酵过程的解耦与优化控制,提出了支持向量机逆系统控制方法,并在此基础上将逆系统方法与内模控制相结合;提出了支持向量机逆系统内模控制新方法,提高了逆系统控制方法的鲁棒性和抗干扰能力;将理论研究结果应用于工程化软件开发中,取得了较好的效果。

全书共分为6章。第1章介绍了海洋生物酶发酵工程的现状和特点,分析了海洋生物酶发酵过程的主要研究内容和研究热点问题,对其软测量与解耦控制方面的热点问题做了叙述,并介绍了本书的研究背景、主要贡献和意义及内容和结构安排。

第2章主要介绍了LS-SVM逆软测量建模方法,首先提出了“虚拟传感器”及其逆系统的概念,并在此基础上研究了一般非线性系统的逆软测量原理,给出了“虚拟传感器”的建模算法及其可逆条件,进而建立起了逆软测量模型。最后采用LS-SVM逼近逆软测量模型中难以显式解析表达的非线性函数,从而得到了LS-SVM逆软测量模型,突破了实际工程应用中逆系统方法解析表达式难以获得的瓶颈。LS-SVM逆软测量建模方法作为一种新型的建模方法,本章最后将其与传统LS-SVM建模方法进行比较,并讨论了其优缺点。

第3章主要介绍了基于LS-SVM逆系统的非线性内模控制方法,首先从一般非线性系统逆系统的定义出发,给出了静态逆系统和动态逆系统的构造算法,导出了系统可逆的充要条件,给出了一般非线性系统的逆系统化解耦控制实现的结构形式,并将LS-SVM与逆系统控制方法相结合,构造了基于LS-SVM逆的非线性控制方法,进一步为了增强LS-SVM逆系统控制方法在发酵过程存在建模误差或过程参数时变情况下的鲁棒性,提出了LS-SVM逆系统内模控制方法;其次给出了LS-SVM逆系统内模控制方法

的结构和实现方法,并分析了闭环系统的稳定性及滤波器参数和结构对性能的影响,使读者对基于 LS - SVM 逆系统的非线性内模控制方法能有完整的了解。

第4章将提出的 LS - SVM 逆软测量方法应用于海洋生物酶实际发酵过程,首先基于海洋生物酶连续发酵过程物料平衡关键建立了过程“灰箱”模型,分析逆系统的存在性并引入发酵过程特征信息构造逆扩展模型,然后利用多输入多输出 LS - SVM 加8个微分器建立 LS - SVM 逆软测量模型,它成功地实现了对海洋生物酶发酵过程中难以直接测量的关键过程变量的在线预测。进一步,将 LS - SVM 逆系统内模控制方法应用于海洋生物酶发酵过程的关键过程变量解耦优化控制中,仿真结果表明,LS - SVM 逆系统内模控制方法有效、可行,且具有良好的控制性能。

第5章为了推广使用本书介绍的基于 LS - SVM 的逆生物发酵过程软测量及控制方法,并提高我国发酵过程控制的自动化水平。基于前面章节介绍的生物发酵过程软测量和解耦优化控制技术,结合工业实际海洋生物酶发酵生产的工艺规范,研制开发集远程监测与智能控制于一体的海洋生物酶发酵过程先进控制系统软件(MPAPC),系统软件可实现海洋生物酶发酵关键过程变量的预测、发酵过程实时远程监测和智能控制等功能,并基于嵌入式系统开发了海洋碱性蛋白酶 MP 发酵过程智能测控系统,操作系统移植了嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$,满足了系统较高的实时性需求,方便了系统的软硬件功能修改、扩充、升级等需求,大大缩短了系统的开发周期,降低了研发成本。

第6章是对本书所做工作的一个总结,并指出了今后研究的方向。

本书既是一部科研成果专著,又注重理论联系实际,不仅希望为海洋生物酶发酵过程提供新的有效控制手段,而且希望能在理论研究与工程应用上给读者有所启发与帮助,提高我国工程应用中海洋生物酶发酵过程这类非线性系统的控制水平。

阅读本书需要高等数学、线性代数、酶工程、发酵过程、系统辨

识、机器学习、控制理论的基础知识,最好能先阅读相关专业类书籍。本书可作为我国电气工程及其自动化等电类专业、控制科学与控制工程学科用书,也可作为培养高层次的创新型人才(硕士和博士研究生)的“软测量与优化控制”教材和科研用书,还可作为自学者、有关技术人员、工程师的参考书。

由于作者水平有限,不足和疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

目 录

- 第1章 绪 论 001
 - 1.1 研究背景和意义 001
 - 1.2 支持向量机逆系统方法综述 005
 - 1.3 发酵过程软测量方法综述 007
 - 1.3.1 软测量基本原理 008
 - 1.3.2 发酵过程软测量方法研究现状 009
 - 1.4 发酵过程解耦控制方法综述 023
 - 1.5 主要内容与创新点 025
 - 1.5.1 主要内容 025
 - 1.5.2 主要创新点 027

- 第2章 最小二乘支持向量机逆软测量方法 029
 - 2.1 引 言 029
 - 2.2 逆软测量原理 029
 - 2.3 逆软测量模型的构建 035
 - 2.3.1 “虚拟传感器”的建模算法 036
 - 2.3.2 “虚拟传感器”的可逆性 038
 - 2.3.3 逆软测量模型的结构 039
 - 2.4 最小二乘支持向量机逆软测量模型 040
 - 2.4.1 最小二乘支持向量机 041
 - 2.4.2 LS-SVM 逆软测量模型的结构 049
 - 2.4.3 LS-SVM 逆软测量模型的实现 050
 - 2.5 LS-SVM 逆软测量方法与 LS-SVM 软测量方法的比较 052
 - 2.6 小 结 054

第3章 最小二乘支持向量机逆系统内模控制方法 055

- 3.1 引言 055
- 3.2 非线性系统的逆系统控制方法 056
 - 3.2.1 逆系统控制方法 056
 - 3.2.2 逆系统的构造算法 059
- 3.3 LS-SVM 逆系统控制方法 061
 - 3.3.1 LS-SVM 逆系统的结构及扩展 063
 - 3.3.2 LS-SVM 逆系统的工程实现 065
- 3.4 LS-SVM 逆系统内模控制方法 068
 - 3.4.1 内模控制基本原理 069
 - 3.4.2 基于 LS-SVM 逆系统的内模控制结构 070
 - 3.4.3 控制方法系统性能分析 073
- 3.5 小结 075

第4章 逆系统方法在海洋碱性蛋白酶 MP 发酵过程中的应用 077

- 4.1 引言 077
- 4.2 海洋碱性蛋白酶 MP 发酵工艺简介 078
- 4.3 海洋碱性蛋白酶 MP 发酵过程的动力学模型 082
- 4.4 LS-SVM 逆软测量方法的应用 087
 - 4.4.1 逆软测量模型构建 087
 - 4.4.2 LS-SVM 逆软测量模型的结构与实现 093
 - 4.4.3 实验仿真分析 098
- 4.5 LS-SVM 逆系统内模控制方法的应用 102
 - 4.5.1 可逆性分析 102
 - 4.5.2 LS-SVM 逆系统内模控制结构与实现 107
 - 4.5.3 实验分析与仿真 108
- 4.6 小结 114

第5章 海洋生物酶发酵过程监控软件开发和硬件系统设计 115

- 5.1 引言 115
- 5.2 MPAPC 监控软件 116
 - 5.2.1 系统初始化 117
 - 5.2.2 COM 组件构建 118
 - 5.2.3 数据输入与远程传输 121
 - 5.2.4 预测与优化控制 125
 - 5.2.5 人机交互界面 125
 - 5.2.6 其他功能 127
- 5.3 智能测控系统 128
 - 5.3.1 数据处理单元 130
 - 5.3.2 数据采集通道 132
 - 5.3.3 输出控制通道 140
 - 5.3.4 人机接口通道 143
 - 5.3.5 系统软件设计 145
- 5.4 小 结 147

第6章 总结与展望 148

- 6.1 研究工作总结 148
- 6.2 展 望 149

参考文献 151

- 附录 A 雅克比矩阵与亚纯函数域 163
- 附录 B 隐函数定理、反函数定理及恒等定理 166
- 附录 C 五点数值求导法 167

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

蛋白酶是三大工业用酶之一,其独特的生理功能及广泛的应用领域,奠定了其在酶制剂产业的重要地位。

2016年全球工业酶年产值约为47亿美元,75%的产值由水解酶类带来,而蛋白酶的销售额占整个工业酶产值总额的60%。蛋白酶按其pH值分为酸性蛋白酶、中性蛋白酶和碱性蛋白酶。碱性蛋白酶最早发现于猪胰脏中,是一类适宜在偏碱(pH 9~10)范围内水解蛋白质肽键的酶类。与酸性蛋白酶和中性蛋白酶相比,碱性蛋白酶具有更强的水解能力和耐碱能力,有较大耐热性且具有水解酯键、酰胺键和转酯及转肽的能力,这些优良的特性使得碱性蛋白酶成为国内外学者的研究热点。目前,碱性蛋白酶已广泛应用于加酶洗涤剂、制革、丝绸、医药、食品、环保、废弃物的水解利用及乳制品生产等行业。尤其是作为无磷洗衣粉的添加剂使用,已使碱性蛋白酶商业制剂的销售占整个蛋白酶市场的30%以上。

目前我国海洋生物酶发酵行业普遍存在着工艺与装备落后,缺乏工业规模的发酵过程控制的系统性研究等问题,许多有关过程控制、状态监测、动态优化等新型产业化技术的研究还基本处在起步状态。随着海洋生物酶发酵行业的迅速发展和进步,为最大限度提升发酵生产效率和产品得率,降低生产能效,提高发酵行业的经济效益,迫切需要利用优化控制技术对发酵过程进行动态调控和实时优化。然而由于涉及海洋生物酶菌种的生长繁殖、代谢

过程,海洋生物酶发酵过程存在的复杂特性造成了控制的技术困难:①海洋生物酶发酵过程非常敏感和复杂,碱性蛋白酶的生物合成、细胞的生长繁殖和代谢产酶过程受外界环境影响较大,各状态参量之间存在着复杂的非线性动态关系,动力学模型呈高度的非线性。目前已有的动力学方程只是基于细胞生长动力学、反应基质消耗动力学和酶生长动力学的简化动力学模型,难以完整地描述海洋生物酶的生物合成、细胞的生长繁殖和代谢产酶过程动力学特征。②反映海洋生物酶发酵过程品质的相对酶活、菌体浓度、基质浓度等关键参量目前还缺乏有效的在线测量手段,新型的生物传感器在测量稳定性、操作维护条件、价格等方面存在着严重缺陷,成为制约动态调控的瓶颈问题。③海洋生物酶发酵过程是一个多输入多输出(MIMO)的动态生化反应过程,细胞生长、繁殖及产酶代谢过程中需要动态调控的参量众多,且各参量相互之间的关系非常复杂,呈现强耦合特性,已有的解耦控制方法由于只能实现近似地稳态解耦,不能实现系统的完全动态解耦,难以胜任海洋生物酶生产过程这一复杂非线性系统的实时调控需求。

目前,对于难以直接测量的关键参量(如相对酶活、菌体浓度、基质浓度等)主要采取在线取样和离线分析的测重方法,存在较大的测量延时,难以实施实时控制,同时在线取样容易引入人为污染,降低发酵过程品质;海洋生物酶发酵过程的控制主要通过对一些环境参量(如温度、pH、溶氧浓度、CO₂含量、搅拌转速等)的检测,凭借工人经验和感官进行手动调控,自动化水平低,技术落后,无法满足海洋生物酶生产过程优化运行控制的要求,且生产过程中错误和故障不易及时发现,造成原材料的浪费和设备的空转,严重制约着海洋生物酶产业的精细化、集约化生产进程,因此,如何克服以上问题带来的缺陷成为海洋生物酶产业界亟须解决的关键问题之一。

对上述问题的解决有两种方法:一是研究新的检测手段,研制高性能传感器。近年来一些在线分析仪器(传感器)已经出现,但价格昂贵,且在测量稳定性、操作维护等方面存在着严重问

题,使得其在海洋生物酶发酵中的实际应用还有待时日。二是采用间接测量方法,即软测量技术对关键过程参量进行在线预测。软测量技术(Soft-Sensing Technique)是近几年发展起来的解决上述关键过程参量检测问题的一种有效方法,该方法引起了国内众多研究者和发酵生产企业的高度关注,围绕该技术的研究报道不断涌现。

(4) 目前,国内海洋生物酶发酵过程控制主要依赖于对直接可测过程参量(如温度、pH、溶氧浓度、CO₂含量、搅拌转速等)的单回路反馈控制,自动化程度低,技术落后,同时对关键过程参量的解耦控制一直没有得到很好的解决。尽管国内有人将专家系统、模糊逻辑及神经网络等智能控制方法用于发酵过程解耦优化控制,并取得了一定的效果,但由于智能控制方法本身存在的一些缺陷,如专家系统对于知识获取、表达和学习等难以保证,模糊控制难以对稳定性和鲁棒性等系统的动态性质进行严格的理论分析,神经网络存在诸如模型结构的选取、算法的收敛性、解的唯一性等问题,这使得对发酵过程的优化控制效果不理想或达不到优化控制的目的,发酵过程的自动控制水平远远落后于其他非线性系统的控制,进而导致高端的国外生物发酵设备大量进入国内,占据国内很大的市场份额,严重制约了我国生物技术的研究和生物制品的开发。

(5) 发酵产品质量波动大,错误和故障不易早期发现,一旦发现,发酵过程已不可逆转,造成原料的浪费和设备的空转。因此,如何实现发酵过程中关键过程变量的在线软测量,并最终实现发酵过程的解耦优化控制,已成为我国生物发酵过程中迫切需要解决的关键问题。

逆系统的方法是非线性反馈线性化方法中的一种方法,由于物理概念清晰直观、使用方法简单等特点,在非线性系统软测量与控制中得到了广泛的重视和发展。但是在实际应用中存在所谓的“瓶颈”问题,即应用逆系统方法时,要求关联对象的数学模型和具体的系统参数必须预先知道,这在实际微海洋生物酶发酵过程中

是很困难的(生物发酵过程呈现强烈的时变性、耦合性和非线性,难以精确建模)。除此之外,采用逆系统方法时,要求能获得发酵过程的逆系统,即求解出逆系统的解析表达式。这些都大大限制了逆系统方法在海洋生物酶发酵过程中的应用。

针对逆系统在发酵过程应用中的“瓶颈”问题,有研究者将智能控制的思想引入逆系统方法,用神经网络来逼近逆系统,提出了神经网络逆系统方法,并将该方法应用到红霉素发酵过程软测量及解耦控制中,取得了良好的应用效果,为逆系统方法的完善及在发酵过程中的应用起到了很好的推动作用。但是传统的神经网络方法是基于样本数目趋于无穷大时的渐进理论,而实际问题中样本数目往往是有限的,在很多情况下,特别是像微生物发酵过程这种强耦合、大滞后的非线性系统,精确样本数据的获得极其困难,同时神经网络还有诸如模型结构的选取、算法的收敛性、解的唯一性等问题。因此,如何在小样本情况下,研究适用于微生物发酵过程(多输入多输出的强耦合系统)且在工程上易于实现的智能控制方法对逆系统在微生物发酵过程中的应用和推广具有十分重要的理论意义与广阔的应用前景。

同时随着计算机技术、测控技术的迅速发展,发酵过程监控系统在发酵工业生产中得到越来越广泛的应用,为发酵过程实现智能检测与优化控制提供了前提和基础。然而,目前发酵过程测控系统缺少关键过程变量智能检测和控制单元,并且采用单元式结构,不能满足发酵过程远程控制和优化的需要。

因此,研究海洋生物酶发酵过程关键过程变量(菌体浓度、基质浓度、相对酶活)在线软测量方法,以及进一步研究关键过程变量的解耦优化控制方法,并开发出相应的系统监控软件,对提高发酵产品得率,降低原材料和动力能源消耗具有最直接的意义,进一步对促进我国海洋生物酶发酵技术的发展,提高经济效益,提升我国微生物发酵工业整体水平,推动我国生物技术的现代化和产业化进程具有非常重大的意义。因此,本书以海洋生物酶发酵过程为研究对象,对发酵过程关键过程变量的软测量方法、解耦优化控

制方法及系统监控软件开发展开研究,具有很好的理论意义和实践应用价值。

1.2 支持向量机逆系统方法综述

近20年来,反馈线性化方法已经成为非线性系统理论中一种有效的方法,包括基于微分几何理论的状态反馈线性化方法、直接反馈线性化方法和逆系统方法等。由于逆系统含义比较明确且容易理解,因此它使得非线性系统的逆系统方法具有理论形式统一、物理概念清晰直观、使用方法简单等特点,因此逆系统方法在非线性系统的软测量与控制中得到了广泛的重视和发展。

基于逆系统的非线性测量(控制)的基本思想是:针对多输入多输出(MIMO)一般非线性系统,首先构造其逆系统,将该逆系统与原非线性串联形成伪线性复合系统,进而实现对系统的线性化和解耦;然后,用线性系统的理论来完成对这种伪线性系统的测量(控制),进而可以对非线性系统实现在线性系统中能够实现的诸多方法。由此可见,逆系统方法实现的关键在于逆系统的构造,一旦逆系统构造成功,一个复杂的非线性系统软测量(控制)的设计问题就简化为线性系统测量(控制)的设计问题。

针对MIMO仿射非线性系统,Hirschorn等首次比较系统地给出了其求逆算法(Hirschorn算法)。接下来,Singh在Hirschorn算法的基础上做了许多关于仿射非线性系统的右逆系统的重要工作,指出了Hirschorn算法中的不足,提出了一种新的算法,并得到了新的判断系统可逆性的充分条件,适用于范围更大的一类仿射非线性系统,此文中的算法就是现在常用到的“著名”的Singh算法。Singh对这一问题做了进一步的讨论,提出了一种采用动态补偿方法构造逆系统的算法。Singh算法可以深刻地反映出系统的结构信息及系统的输入输出关系特性。它是一个构造性算法,不仅可以用来判断系统的可逆性,而且还可以用它求出原非线性系统的逆系统(如果系统可逆)。李春文等在深入研究仿射非线性系

统 Singh 算法的基础上,利用分析学中的隐函数定理给出了一般非线性系统的逆算法,并依据此算法建立起了一般非线性系统的逆系统理论。

Filess 等首先将微分代数的研究方法引入逆系统的研究,研究了基于输入输出微分方程描述的仿射非线性系统的可逆性。曹立等研究了非线性逆系统的规范形设计问题,而陈庆伟等则详细研究了基于逆系统方法的非线性内模控制问题。另外, Davasia 等研究了非最小相位非线性系统中的稳态逆系统的构造问题,给出了相应的构造算法,并对多输入多输出非线性系统进行认定,得到了有意义的结果。文献研究了逆系统方法在实际系统中的应用问题。

伴随着现代控制科学的不断完善与发展,逆系统方法作为非线性系统研究的理论方法之一,特别是在非线性系统线性化方面,得到了显著的发展,取得了一系列的理论研究成果,并在非线性系统测量和控制领域中取得了很大的进展。

逆系统方法虽然物理概念清晰,易于理解和分析,然而该方法应用于微生物发酵过程中尚存在较大的困难:首先,逆系统方法要求相关联非线性系统的数学模型精确已知,而海洋生物酶发酵过程的非线性特性常常难以确切描述;其次,即使建立起发酵过程的数学模型(动力学模型),利用这些复杂的非线性模型又极难求出逆模型的解析解。因此,依靠精确模型解析式的逆系统方法在海洋生物酶发酵过程中的应用存在很大的障碍,它的推广也受到很大的限制。

针对逆系统的这两个“瓶颈”问题,有许多学者引入了智能控制的思想。例如,东南大学戴先中教授等提出了用神经网络来逼近原系统和逆系统的神经网络逆系统方法,针对连续和离散及单变量和多变量的非线性系统,讨论了神经网络逆系统的实现方法,并将其应用于红霉素发酵过程软测量和解耦控制,取得了很好的应用效果,为逆系统方法的完善及在海洋生物酶发酵过程中的应用起到了很好的推动作用。

尽管神经网络具有强大的逼近非线性映射的能力,比较适应于那些具有不确定性或高度非线性的非线性系统,然而,利用神经网络进行系统辨识还存在许多待解决的问题,如神经网络的训练问题、局部最小值问题及神经网络的推广问题等。这是由于神经网络是建立在传统统计学基础上的,而传统的统计学习理论是基于样本无穷大的渐近理论,但实际问题中样本数目往往是有限的,而且在很多情况下,特别是像微生物发酵过程这种强耦合、大滞后的非线性系统,精确样本数据的获得极其困难。因此,在仅仅知道少量输入输出数据的情况下,如何辨识出逆系统的结构,对逆系统的实际应用和推广起着无比重要的作用。

近年来成为研究热点的统计学习理论克服了神经网络固有的缺陷,它是一种专门研究小样本情况下的机器学习理论。该理论针对小样本统计问题建立了一套新的理论体系,在这种体系下的统计推理规则不仅考虑了对渐近性能的要求,而且追求在现有有限信息的条件下得到最优结果。有着坚实理论基础的统计学习理论为解决有限样本的学习问题提供了一个统一的框架。在这一理论基础之上发展起来的支持向量机可以说是统计学习理论的重要组成部分,也是极其实用的部分。

建立在统计学习理论基础之上的支持向量机在研究小样本情况下表现了极好的性能,而且具有很好的泛化能力和非线性辨识能力。最小二乘支持向量机是标准支持向量机的一种扩展,它是支持向量机在二次损失函数下的一种形式,与标准的支持向量机相比,其运算速度更快,模型参数确定更方便,在函数估计和系统辨识中得到了广泛的应用。因此将最小二乘支持向量机(LS-SVM)引入逆系统方法有助于形成处理上述复杂问题的一种有效的途径。

1.3 发酵过程软测量方法综述

将软测量方法应用于微生物发酵过程中,对关键过程变量进