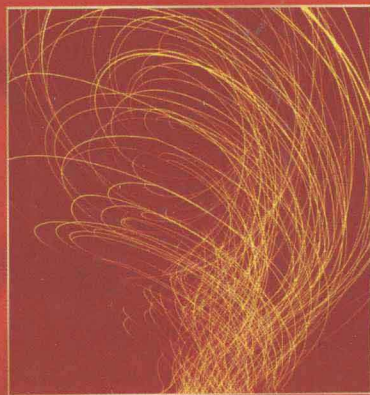


非线性系统建模与故障诊断应用

• 孔祥玉 马红光 韩崇昭 著 •



科学出版社

非线性系统建模与故障诊断应用

孔祥玉 马红光 韩崇昭 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要讨论一类非线性系统的时间域辨识、频率域辨识、总体最小二乘辨识、广义频率函数建模、输出频率函数建模、电路系统故障诊断应用等内容。全书可以分为三部分:第一部分介绍 Volterra 级数模型基本理论,重点介绍 Volterra 级数时域分析和频域分析方法;第二部分研究 Volterra 级数模型的辨识与建模方法,介绍 Volterra 级数模型的时域辨识方法、频域辨识方法、总体最小乘方法及其非线性系统应用等;第三部分研究广义频率函数 GFRF 建模方法,及其在参数估计、自适应控制和故障诊断中的应用。全书内容新颖,反映了国内外非线性系统建模与辨识等领域研究和应用的最新进展。

本书适合电子、通信、自动控制、计算机、系统工程、模式识别、信号处理等相关学科有关教师、研究生和科研人员学习使用。

图书在版编目(CIP)数据

非线性系统建模与故障诊断应用/孔祥玉,马红光,韩崇昭著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-036414-2

I. 非… II. ①孔…②马…③韩… III. ①非线性系统(自动化)-系统建模②非线性系统(自动化)-故障诊断 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 319081 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

文林印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 11 1/2

字数: 230 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着人们认识世界的深入和改造世界能力的提升,出现了一些复杂系统,这些系统规模大、造价高,一旦出现故障,其后果往往是灾难性的,因此要求这种系统具有极高的安全性和可靠性。如何描述这些复杂系统?如何对这些复杂的非线性系统进行建模?如何及时发现系统中的故障并加以定位?如何对这些复杂系统将来可能出现的故障进行预测?这些问题都是现代信息科学与技术各学科,如电子、通信、自动控制、计算机、系统工程、模式识别、信号处理等面临的共性问题。

我们一直从事信号处理、自动控制、神经网络和故障诊断的教学、科研和工程应用等工作,深刻感受到非线性系统建模及应用在信息科学与技术各学科科学研究中所起的重要作用,感到有必要对过去的工作加以总结,为相关的学习研究提供一些参考,因此我们以十余年来国内外相关方面的研究成果为基础,总结多年来在国内外著名期刊上发表的学术研究和工程科研成果,写成本书,试图对该领域有所促进,供相关领域的科技工作者阅读参考。书中第一章至第六章由孔祥玉执笔,第七章与第八章由马红光执笔,主要内容取自孔祥玉、马红光、韩崇昭等的研究成果,全书由孔祥玉统稿。

全书共八章,其主要内容可概括如下:

第一章绪论,概述非线性系统建模与应用领域技术的国内外研究现状和发展趋势;第二章阐述基于 Volterra 级数的一类非线性系统基本理论及其时间域和频率域方法;第三章研究 Volterra 级数的时间域辨识方法及各种解耦算法;第四章讨论 Volterra 级数 affine projection 算法和并行递推 AP 算法及在非线性时间序列和混沌时间序列预测中的应用;第五章研究总体最小二乘问题及自适应求解,在输入和输出均含噪声的环境中非线性系统参数估计方法;第六章探讨非线性系统总体最小二乘和鲁棒总体最小二乘法及其在参数估计与故障诊断中的应用;第七章研究基于混沌和 GFRF 的故障诊断方法及在非线性电路系统中的应用;第八章研究频域 Volterra 核的测量、基于 GFRF 和 NOFRF 的故障诊断方法。

本书参考了大量有关非线性系统、时间序列分析及故障诊断等方向的论文和著作,特别参考了西安交通大学曹建福教授、空军工程大学魏瑞轩教授、西安电子科技大学冯大政教授、清华大学张贤达教授等发表的相关论著,也参考了国外 Billings、Griffith、Powers、Huffel 等学者的学术论文。在此向这些文献的作者表示衷心感谢!

在编写本书的过程中,得到了第二炮兵工程大学胡昌华教授,西安交通大学曹

建福教授、段战胜副教授,第二炮兵工程大学邵军勇主任、王虎副处长,山西师范大学安秋生教授,中国铁道科学研究院吕晓军博士等的热情鼓励和支持,在此深表感谢!

衷心感谢国家自然科学基金面上项目(61074072、61174207)、国家杰出青年基金项目(61025014)、国家自然科学基金重点项目(60736026)、中国博士后基金特别资助项目(200801480)、第二炮兵工程大学导航制导与控制国家重点学科专项建设经费的支持。感谢科学出版社给予的支持和帮助!

由于我们水平所限,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2012年3月于西安

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 Volterra 级数发展概述	2
1.3 Volterra 模型辨识综述	3
1.4 基于非线性频谱分析的故障诊断	7
1.4.1 故障诊断方法综述	7
1.4.2 基于非线性频谱分析的故障诊断方法	9
1.5 本章小结	10
参考文献	10
第二章 Volterra 级数模型基本理论	22
2.1 引言	22
2.2 非线性系统的 Volterra 级数表示	22
2.2.1 Volterra 级数的时域表示形式	22
2.2.2 Volterra 级数的频域表示形式	23
2.2.3 广义频率响应函数的性质	26
2.3 非线性系统 Volterra 级数模型的建立	27
2.3.1 时域 Volterra 级数模型的辨识	27
2.3.2 频域 Volterra 级数模型的辨识	28
2.3.3 差分方程描述的非线性系统的广义频率响应函数	29
2.3.4 微分方程描述的 SISO 多项式类非线性系统的广义频率响应函数	30
2.4 非线性系统 Volterra 级数模型的自适应辨识	31
2.4.1 Volterra 级数模型的 LMS 算法	32
2.4.2 Volterra 级数模型的 AP 算法	32
2.4.3 Volterra 级数模型的 TLMS 算法	33
2.4.4 Volterra 级数模型的 RLS 算法	33
2.5 基于广义频率响应函数分析的故障诊断的原理	33
2.6 基于广义频率响应函数分析的故障诊断实例	35

2.7 本章小结·····	37
参考文献·····	37
第三章 Volterra 系统时域解耦辨识 ·····	40
3.1 引言·····	40
3.2 基于 Volterra 级数模型的 LMS 自适应辨识·····	41
3.2.1 Volterra 滤波器·····	41
3.2.2 部分解耦 Volterra 滤波器与相应的 LMS 算法·····	43
3.2.3 Volterra 滤波器转换域部分解耦 LMS 算法·····	45
3.3 基于 Volterra 级数模型的 RLS 自适应辨识·····	46
3.3.1 Volterra 系统的 RLS 算法·····	46
3.3.2 Volterra 系统的部分解耦 RLS 算法·····	48
3.4 基于 Volterra 级数模型的全解耦并行辨识算法·····	49
3.4.1 Volterra 级数模型的伪线性组合结构·····	49
3.4.2 Volterra 系统全解耦并行辨识算法的导出及实现·····	50
3.4.3 仿真实验研究·····	53
3.5 本章小结·····	56
参考文献·····	56
第四章 Volterra 级数仿射投影算法及应用 ·····	58
4.1 引言·····	58
4.2 Volterra 级数 AP 自适应算法·····	58
4.2.1 仿射投影算法·····	58
4.2.2 Volterra 级数仿射投影算法·····	60
4.3 一种 Volterra 级数并行递推 AP 算法·····	61
4.4 Volterra 级数时间序列预测·····	63
4.4.1 Volterra 级数故障预测应用研究·····	63
4.4.2 Volterra 级数混沌时间序列预测·····	66
4.5 本章小结·····	72
参考文献·····	72
第五章 总体最小二乘问题及自适应求解 ·····	75
5.1 引言·····	75
5.2 总体最小二乘问题·····	76
5.2.1 经典总体最小二乘解·····	76

5.2.2 经典总体最小二乘问题解存在和唯一性条件	79
5.3 总体最小二乘迭代求解	80
5.3.1 总体最小二乘迭代求解方法综述	80
5.3.2 一个新的 TLS 线性核及其自稳定算法	81
5.3.3 采用确定性连续时间系统对所提算法的性能分析	84
5.3.4 采用随机离散时间方法对所提算法的瞬态行为分析	88
5.3.5 计算机仿真实验	91
5.4 本章小结	95
参考文献	95
第六章 非线性系统总体最小二乘求解及应用	99
6.1 引言	99
6.2 非线性系统总体最小二乘求解	99
6.3 非线性系统鲁棒的总体最小二乘问题	100
6.3.1 一种稳定总体最小二乘算法的导出	101
6.3.2 算法的稳定性分析与步长因子范围的确定	102
6.3.3 仿真实验研究(一)	104
6.3.4 输入含有色噪声或有外在冲击时的总体最小二乘算法导出	108
6.3.5 非线性的选择	109
6.3.6 仿真实验研究(二)	109
6.4 总体最小二乘算法在参数估计和自动控制中的应用	113
6.5 总体最小二乘方法在非线性系统故障诊断中的应用	117
6.5.1 A 机的分块广义频率响应函数模型	117
6.5.2 B 机的分块广义频率响应函数模型	119
6.5.3 结果分析	121
6.6 本章小结	122
参考文献	123
第七章 Volterra 级数频域辨识及故障诊断应用	125
7.1 引言	125
7.2 Volterra 级数频域核辨识	126
7.2.1 广义频率响应函数的直接辨识	126
7.2.2 广义频率响应函数简化模型辨识	127
7.3 基于混沌和广义频率响应函数的故障诊断方法	128

7.3.1 基于电路模型的前三阶广义频率响应函数算法	128
7.3.2 基于电路仿真的前三阶广义频率响应函数算法	134
7.3.3 基于测试数据的前三阶广义频率响应函数算法	137
7.4 本章小结	144
参考文献	144
第八章 基于广义频率响应函数和非线性输出频率响应函数的故障诊断方法	
.....	147
8.1 引言	147
8.2 多音激励信号的设计方法	148
8.2.1 多音激励下 Volterra 系统的频率输出特性	148
8.2.2 多音激励信号的设计	150
8.2.3 多音激励信号在非线性模拟电路 Volterra 模型辨识中的应用	151
8.3 多音信号激励下的 Volterra 频域核的辨识方法	154
8.3.1 多音激励下 Volterra 频域核的性质	154
8.3.2 多音激励下 Volterra 频域核的测量	156
8.3.3 各阶输出分离的 Vandemode 法	157
8.3.4 Volterra 频域核的测量	157
8.3.5 实例仿真	158
8.4 基于非线性频谱特征及核主元分析的模拟电路故障诊断	160
8.4.1 基于 Volterra 级数的故障特征提取	160
8.4.2 基于核主元分析的故障特征压缩	160
8.4.3 多故障的分类支持向量机算法	162
8.4.4 基于 KPCA-MSVM 的模拟电路故障诊断	164
8.5 NOFRF 辨识的改进算法及在模拟电路故障诊断中的应用	166
8.5.1 非线性输出频率响应函数核函数的自适应辨识算法	168
8.5.2 在非线性模拟电路故障诊断中应用	170
8.6 本章小结	172
参考文献	172

第一章 绪 论

1.1 引 言

严格地讲,在我们的现实世界中几乎所有的控制系统都是非线性的,线性只是在一定范围内和一定程度上对系统的近似描述。之前,由于对控制系统的精度和性能要求较低,系统的非线性因素往往被忽略,或者局部线性化,仅在一定范围内可满足对控制的要求。因此,非线性系统没有形成像线性系统那样完整、系统的理论体系。

控制理论发展到今天,面临着一系列的挑战^[1]。最大的挑战是对象的本质非线性,而且近代控制对象的运动是大范围的,如卫星的定位与姿态控制、机器人控制、精密数控机床的运动控制等,这些都不可能采用线性模型。同时,现代非线性科学所揭示的大量有意义的事实,如混沌、分叉、分形、奇异吸引子等,都远远超过人们熟知的非线性现象——自振,无法用线性系统的理论来解释。所有这些都呼唤着在非线性控制理论和应用方面取得突破,并促进非线性系统理论及其研究方法的快速发展。

计算机技术的飞速发展和数学工具的突破,为发展一般的非线性控制理论提供了可能性。20 世纪 80 年代以来,非线性科学越来越受到人们的重视,数学中的非线性分析、非线性泛函和物理学中的非线性动力学都发展迅速。与此同时,非线性系统理论也得到了蓬勃发展,研究方法已从经典的相平面法、描述函数法、绝对稳定性理论、李亚普诺夫稳定性理论、输入输出稳定性理论等发展到了现代的微分几何方法、微分代数方法、变结构控制理论、逆系统方法、神经网络方法、混沌动力学方法以及非线性频域控制理论等。由于非线性问题的复杂性和多样性,很难找到一种统一的理论和方法来处理所有的非线性问题,非线性系统的研究还有许多问题有待于进一步探讨。

研究解决非线性问题的基础是建立描述非线性系统的数学模型。最初人们只是针对一些特殊类型的非线性系统建立模型,如双线性系统模型、Hammerstein 模型^[2]、Wiener 模型^[3]、非线性时间序列模型^[4]、输出仿射模型^[5]等。随着人们对非线性问题研究的日益深入,建立更为一般的普适性非线性模型显得日益重要。例如,Volterra 级数模型^[3]、NARMAX 模型^[6,7]、神经网络模型^[8,9]、模糊系统模型等,其中 Volterra 级数模型可以描述一大类非线性系统,其输出是系统输入的非

线性函数的线性组合,是一种非参数模型,具有物理意义明确、适用范围广等优点。基于 Volterra 级数模型的非线性系统的研究及应用已经成当前非线性研究领域的一个热点。因此,研究基于 Volterra 模型的非线性系统辨识及故障诊断应用对于非线性系统理论的发展及应用都将有着极大的促进意义。

1.2 Volterra 级数发展概述

早在 1887 年,意大利数学家 Volterra 在研究非线性解析泛函时,提出了 Volterra 级数的概念。Frechet 应用 Weierstrass 多项式逼近理论,证明了所有的连续函数都可用 Volterra 级数表示^[10]。20 世纪 40 年代,控制论的奠基人 Wiener 首次使用 Volterra 级数描述非线性系统,把这种级数用于非线性电路的分析^[11]。1958 年,他又把 Volterra 级数表示为多维卷积和的形式(G-泛函数),形成函数空间的直交集合^[12]。这些贡献都为基于 Volterra 级数的时间域和频率域的非线性系统控制理论奠定了基础。其后,一些学者继续从事 Volterra 级数的研究工作,美国加州伯克利大学蔡少堂教授在非线性自治振荡系统分析与 Volterra 核测量等方面做出了突出贡献^[13]。Brockett 和 Sanberg 的开创性研究,把 Volterra 级数应用到控制系统的分析中,Brockett 研究了 Volterra 级数与几何控制论的关系^[14],Sanberg 研究了非线性系统的 I/O 描述问题^[15]。

将 Volterra 核通过多变量傅里叶变换或多变量拉氏变换,形成 Volterra 频域核以便在频域内对非线性系统进行分析,这一思想是在 20 世纪 60 年代末 70 年代初建立的。Volterra 频域核或称广义频率响应函数(generalized frequency response function, GFRF),是线性系统的频率响应函数在非线性系统中的推广,GFRF 能够直观地表示出非线性系统的许多频域特性,而且便于实验。与线性系统的频率响应函数相比,GFRF 是一种高维频率响应函数,其物理意义的解释和计算要复杂得多。20 世纪 80 年代以后,以英国谢菲尔德大学的 Billings 教授为首的一批学者在非线性频域分析方面做出了许多出色的工作^[16~29],他们提出了非线性系统频率响应分析的一般理论,导出了基本的计算公式,发展了非线性系统高阶频率响应函数的计算方法。在国内,韩崇昭教授等对多项式类微分方程提出了一种计算 GFRF 的迭代算法^[1]。

建立非线性系统的模型是研究非线性问题的基础。1980 年 Fakhouri 提出了非线性系统 Volterra 核辨识的理论框架^[30]。1989 年,Billings 等提出了线性频谱分析的一系列概念和方法^[16~18]。到了 90 年代,Power 等提出了 2 阶及 3 阶谱估计的方法^[31~33],Mathews 等提出了 Volterra 核的时域辨识方法^[34,35]。Baker 等学者研究了输入信号的选择问题,得出结论:利用伪随机三值输入能计算出一阶、二阶 Volterra 核^[36]。但是上述非线性系统频域辨识方法的计算量都太大,大多数仅

考虑前两阶核。韩崇昭教授提出一种新的频域辨识和拟合算法,其思想是把非线性系统的频域辨识问题转化为高阶频率响应函数的泛函方程求解问题,仿真表明算法的结果具有很强的模型泛化能力,对工程应用有重要的潜在价值^[37]。Volterra 级数可以建模一大类非线性系统,是研究非线性系统最强有力的模型之一,其缺点是核系数的数量随着非线性的阶次和 Volterra 核的记忆长度成几何级数增长,对 Volterra 级数模型的辨识较线性模型的辨识要复杂得多。因此,对 Volterra 级数模型辨识方法的研究一直是非线性系统辨识方法研究的一个热点。

近年来,Lang 等在仔细研究了典型非线性系统在外加的谐波信号激励下的 Volterra 核函数的收敛性^[38]和以 NARX 模型表示的 GFRF 核函数边界特性^[39]的基础上,针对 Volterra 核函数在工程应用中面临的问题,提出了一种新的描述非线性系统的核函数-输出频率响应函数(output frequency response function-OFRF)^[40]。在此基础上,他们又深入地研究了 OFRF 核函数表示的非线性系统的谐振频率特性^[41],进而提出了非线性输出频率响应函数(nonlinear output frequency response function,NOFRF)的概念^[42],探讨了 NOFRF 核函数在检测桁条裂缝所具有的特点和优势^[43],并将该核函数应用到更加复杂的多输入^[44]、多自由度非线性系统^[45]的建模与状态检测中,为复杂非线性系统的故障诊断奠定了坚实的理论基础。Jing 在深入研究 OFRF 时域特性的基础上^[46],提出了广义输出函数的概念(generalized output function)^[47]。与此同时,Lang 和 Peng 深入研究了 NOFRF 与具有一阶自由度的双线性模型之间的内在关系^[48],将其拓展到多自由度模型并应用于检测机械振动系统的非线性状态特征^[49]和故障诊断^[50]。通过研究,他们还发现了确定复杂系统中非线性环节的方法^[51]。

1.3 Volterra 模型辨识综述

建立描述非线性系统的模型是研究非线性问题的基础,模型研究是非线性科学的一个基本问题。由于非线性问题的复杂性和多样性,至今仍没有一种能够描述任意非线性系统的通用模型。对于非线性系统参数模型的辨识问题,最初人们只是针对一些特殊类型的非线性系统建立了它们的模型^[2~5],基于这些模型,各国学者已做了大量的研究工作,提出了不少辨识算法,同时也对这些算法的估计一致性问题进行了讨论。随着对非线性建模问题研究的深入,更为一般的普适性模型,即 Volterra 级数模型^[3]、NARMAX 模型^[6,7]、神经网络模型^[8,9]、模糊系统模型^[52]等引起人们的广泛关注,这些模型为非线性系统的研究提供了更丰富的手段。

针对 NARMAX 模型的结构辨识、参数估计和模型检验等问题,Billings 等作了大量的开创性工作^[16~29]。NARMAX 模型具有逼近精度高、收敛速度快的优

点,缺点是对非线性参数的子集模型辨识比较困难,且参数估计的精度在很大程度上依赖于模型结构的准确性。此外,NARMAX模型的鲁棒性较差,参数的微小变化就会导致系统性能的重大变化。神经网络模型具有很强的非线性变换能力和高度的并行运算能力,已成为非线性系统辨识和控制的一种有效手段和模型^[53]。基于神经网络的辨识,其收敛速度不依赖于待辨识系统的维数,只与神经网络本身及其所采用的学习算法有关。在使用神经网络建模时,要考虑的主要问题是网络的规模和学习算法的收敛性^[54]。神经网络模型的缺点是泛化能力差,需要丰富的训练样本才能保证建模的准确性。

Volterra级数理论为一大类非线性系统提供了一种非常简洁明了的描述模型,该理论在非线性系统的分析中占有非常重要的地位。Volterra级数模型(包括时域形式和频域形式)是一种非参数模型,与线性系统的脉冲和频率响应函数一样,它能够描述非线性系统的本质特性。从近二十年来的研究可以看出,Volterra级数模型已经成为一种为广大研究人员和技术人员所普遍接受的、非常重要的非线性系统模型,受到了人们广泛的重视和研究。

基于Volterra模型的非线性系统辨识包括对广义脉冲响应函数(Volterra时域核)和广义频率响应函数(Volterra频域核)的辨识,因而可以分为时域辨识和频域辨识两大类。关于Volterra模型的辨识主要有以下几点。

(1) 算法计算复杂度的减小

Volterra级数模型辨识的主要困难是维数灾难问题,即如果线性核需要 L 个参数表示,那么第 $n(n>1)$ 阶Volterra核需要用 L^n 个参数表示,从而 N 阶Volterra级数模型有 $\sum_{n=1}^N L^n$ 个核参数需要估计。大量的参数极大地增加了Volterra模型辨识的困难,因此如何简化辨识算法,降低算法的复杂度成为研究人员关注的一个问题。

算法计算复杂度的减小主要体现在以下几个方面。

① 寻求降低算法的复杂度。RLS算法的收敛特性远远好于梯度算法及其他算法,然而其计算复杂度高达 $O(N^4)$ 。该算法目前很难应用到实际,因此很有必要在保持算法良好收敛性的同时减小其计算复杂度。为此,人们提出了许多快速RLS算法^[55~59]。文献[60],[61]则提出了基于Volterra级数的AP算法与SAP算法,该类算法的计算复杂度低于RLS算法和快速RLS算法,而其收敛性要低于RLS算法和快速RLS算法。

② 减小Volterra的规模。为此,人们已经提出了三类方法,即矩阵分解技术^[62,63]、递归滤波技术^[64~76]、频域技术^[77~82]。第一类方法是应用奇异值分解技术将二阶Volterra滤波器转变为并行层叠结构并通过去掉一些小特征值的通道而实现的。第二类方法虽然可以大大减小Volterra的规模,但存在的主要问题

是其稳定性不能保证。稳定性条件不但依赖于滤波系数,而且依赖于输入信号,对 Volterra 滤波器而言这一条件的确定要复杂得多,文献[83]~[87]给出了该类算法的稳定条件。第三类方法是在频域对 Volterra 系统进行辨识。在频域,Power 等首先提出利用系统的输入输出测量值的高阶谱分析辨识二阶 Volterra 系统的 RLS 方法和 LMS 方法^[78]。之后, Kim 和 Power 提出采用特定的直交输入向量集的非线性系统直接频域辨识方法^[77]。在国内,韩崇昭等提出一种求解 GFRF 简化模型的算法^[37],仿真验证此方法计算量小,且有很强的鲁棒性和很好的模型泛化能力。

③ 设法减少辨识参数的数目。唐晓泉等提出子集优化算法^[88,89],该算法剔除掉 Volterra 核参数矩阵中数值接近 0 的参数,从而可有效减少参数数目,大大减小计算量。李涌等提出了参数空间分割递推辨识算法^[90,91],该算法对模型降维和辨识同时完成,降维依据是辨识模型和实际系统的输出拟合均方误差,算法最终得到输出拟合均方误差意义上的准最优解。欧文等提出一种 Volterra 核参数降维算法^[92,93],该算法先通过 QR 分解进行参数估计,在利用 Householder 变换实现矩阵的 QR 分解过程中,利用输入向量对输出向量的影响因子进行矩阵的列选择从而简化参数数目。最近,文献[94],[95]采用自适应遗传算法来约简 Volterra 核参数。杨家树等提出一种少参数 Volterra 滤波器^[96,97]减少待辨识的参数数目,进行混沌序列实时预测。

(2) 辨识算法的性能改进

辨识算法的性能改进主要体现在以下几个方面。

① 寻求解耦辨识算法和快速算法。Griffith 和 Arce 提出部分解耦算法^[98,99],该算法先辨识确定一阶核参数,然后再逐次辨识高一阶的核参数,使低阶 Volterra 核系数的修正不受到高阶 Volterra 核系数变化的影响。魏瑞轩提出全解耦算法^[100~102],该算法进一步解除了各阶非线性因素之间的耦合,提高了算法的收敛性能与辨识精度。孔祥玉提出了一种全解耦的 RLS 算法^[103]。Osowsk 等将 Volterra 滤波器实现为多层神经网络结构,以减小在线计算量^[104]。

② 探索并行辨识算法。Nowak 和 Van 提出一种并行辨识算法,该算法通过正交分解将 Volterra 滤波器分解为多个子滤波器的并行组合,实现并行计算^[105]。Panicker 和 Mathews 提出将高阶 Volterra 滤波器变换成多个低阶 Volterra 滤波器的并行分级连接的方法,以实现并行计算^[63,106,107]。

③ 提高辨识算法的收敛速度和跟踪能力。为此,文献[60]提出了一种 Volterra 系统的 AP 辨识算法。针对辨识系统的加性噪声与环境不断变化的特点,文献[61]提出一种 Volterra 系统的 Summational AP 算法。为了进一步提高算法的收敛速度和跟踪能力,孔祥玉提出一种并行递推 AP 算法,来进行某陀螺漂移数据预测^[108]。

(3) Volterra 系统的自适应辨识

自适应辨识以迭代方式实现,可以在线实时运行,且每步计算量较小,较之于一次完成的辨识方法,更适合于辨识技术的在线应用,因此对 Volterra 系统自适应辨识方法的研究已成为非线性系统辨识方法研究的一个热点。近年来,关于 Volterra 系统自适应滤波的研究非常重视,有大量文献出现。Lee 和 Mathews 利用快速 RLS 多通道滤波的思想,提出了一种快速 RLS 自适应 Volterra 滤波算法,并对该算法的性能从理论上进行了分析^[109]。为了减小由测量噪声引起的估计偏差,Zhu 和 Leung 使用一个改进的最小二乘目标函数,建立了一个能够跟踪时变多项式非线性系统的自适应滤波器,并将这一滤波器应用于混沌通信系统中^[110]。Ogunfunmi 和 Chang 基于离散非线性 Wiener 模型为 2 阶 Volterra 系统的辨识提出一种非线性 LMS 自适应滤波算法^[111]。该算法包括三个环节,主要是使用 Wiener 模型对截断的 Volterra 级数实施完全的正交化,其优点是收敛速度快,利用离散非线性 Wiener 模型仅需使用较少的系数项就可表示一个完整的 Volterra 系统。

(4) Volterra 核的盲辨识

近年来,基于 Volterra 模型的盲辨识已成为非线性系统盲辨识的主要方法。Volterra 核的盲辨识方法通常有三种。一是使用系统输出的高阶统计量实现核参数的盲辨识,该方法的缺点是计算复杂且计算量大,为此 Tan 和 Chow 使用神经网络逼近 2 阶 Volterra 系统的核参数与系统输出的第 3 阶累量之间的非线性关系,通过学习可使网络的输出收敛到期望的 Volterra 核,该方法避免了直接求解高阶累量估计 Volterra 核的复杂性^[112]。二是使用子空间方法实现 Volterra 核的盲辨识,方洋旺等研究基于单输入多输出 Volterra FIR 系统的 MIMO 线性模型,使用子空间方法盲辨识 Volterra 核^[113]。三是使用最小二乘方法实现 Volterra 核的盲辨识,Raz 对这一方法进行了研究^[114]。此外,魏瑞轩等使用 Volterra 系统盲辨识的线性 MIMO 模型,应用多项式矩阵理论,提出基于噪声多项式向量空间基的 Volterra 系统的盲辨识方法,该方法仅需使用部分噪声向量便可实现 Volterra 系统的盲辨识,而且可以并行计算,有效地减少了 Volterra 系统盲辨识的计算量^[115]。

(5) Volterra 系统的总体最小二乘辨识

早在 1901 年,人们就有了总体最小二乘(total least square, TLS)的基本思想,但对于 TLS 问题的一些有效的递推求解方法 1992 年后才被逐渐提出。Davila^[116]基于 Kalman 增益向量的双通道快速算法提出一种 TLS 递推算法,该方法构造复杂,且要进行矩阵逆运算,因而存在着潜在的数值不稳定问题。Xu 等使用反 Hebb 学习规则提出一种求取最优拟合问题 TLS 解的次元分析(minor component analysis, MCA)算法^[117]。Gao 基于对反 Hebb 学习规则的修正,提出一种具有最

小内存要求的反 Hebb 学习算法^[118],该算法已被证明需要初始权值取特定的值,否则算法将不能收敛到 TLS 解^[119]。Luo 提出另一种形式的 MCA 算法,并用李亚普诺夫方法对其稳定性进行了分析^[120]。Feng 等提出能够全局收敛的 TLMS 算法,但要求学习因子必须足够的小^[121]。文献[122]提出一种 TLS EXIN 算法,并应用一些加速技术改进其收敛性能。文献[123]提出一类 TLS 的自适应 IIR 滤波算法,该类算法可以实施滤波器权的自适应更新而不需要标准化处理。以上这些研究都是针对线性系统进行的,唐晓泉首次研究使用总体最小二乘技术辨识 Volterra 核^[88]。魏瑞轩等提出一种总体均方最小自适应算法,并用该算法辨识输入输出均含有噪声的 Volterra 系统^[124~126]。文献[127]提出一种基于 Volterra 级数的稳定简化的总体最小二乘辨识算法,用于输入输出数据中均含噪声的非线性系统的参数辨识。

(6) Volterra 模型辨识的应用研究

如前所述,Volterra 级数模型可以建模一大类非线性系统,是研究非线性系统最强有力的模型之一。随着 Volterra 系统辨识理论、方法和技术的快速发展,Volterra 模型辨识的应用范围日益广泛,基本上包括了非线性系统辨识的所有应用领域,如通信系统的非线性通道均衡^[128~133]、非线性回波消除^[134~139]、数据传输系统的性能分析^[140~144]、声学系统非线性扭曲的消除^[145~152]、图像处理^[153~157]、生物工程^[158~160]、语音处理^[161]、消噪^[162,163]、工业控制^[164]、故障诊断^[90,91,165~168]、河流工程^[169]和生态系统^[170]等。

1.4 基于非线性频谱分析的故障诊断

如果一个系统的输入输出关系可以用 Volterra 级数来描述,则描述其输入输出关系的 Volterra 级数是唯一的。若将 Volterra 级数的这一性质用于非线性系统的故障诊断,就确保了诊断结果的唯一性和可靠性^[1]。这解决了一直困扰非线性系统故障诊断结论中的唯一性和稳健性问题。Volterra 级数模型的表达方式有别于其他几种数学模型的方式,它是线性系统频谱响应分析法在非线性系统中的延拓,可以用工程技术人员习惯使用的曲线来描述非线性系统的各种动态特性,因而易被人们理解和接受。为了对基于非线性频谱分析的故障诊断方法有一个更深入的认识,我们先综述一下现有的故障诊断方法,然后再对基于非线性频谱分析的故障诊断方法的发展及研究现状作简要分析。

1.4.1 故障诊断方法综述

故障诊断对于系统和设备的正常安全运行有着非常重要的意义,现代大型复杂系统,如大型电站、大型化工、制药设备和航天飞行器等,对系统运行的可靠性及

安全性具有很高的要求。对日常生产、生活中的许多系统和设备,人们同样希望其可靠安全的工作。但是,由于材料的缺陷、制造的误差、运行环境的影响等因素的存在以及疲劳和老化等效应的不可避免,系统在运行过程中发生故障是必然。因此,对系统的运行状态进行检测与诊断,实现故障预报,就成为提高系统运行的可靠性与安全性的的重要手段。

故障可以理解为至少一个系统的重要变量或特性偏离了正常范围。广义地讲,故障可以理解为系统的任何异常现象,使系统表现出所不期望的特性。根据故障发生的部位,可以把动态系统的故障分为元部件故障、传感器故障和执行器故障。根据故障的时间特性,可以把故障分为突变故障和缓变故障。根据故障发生的形式,可以把故障分为加性故障和乘性故障。故障诊断技术包含了故障检测、故障分离和故障辨识等内容。故障检测就是判断系统中是否发生了故障以及检测出故障发生的时刻。故障分离就是在检测出故障后确定故障的类型和位置。故障辨识就是分离出故障后确定故障的大小和时变特性。评价一个故障诊断系统性能的指标主要有故障检测的及时性、早期故障检测的灵敏度、故障的误报率和漏报率、故障定位和故障评价的准确性、故障检测和诊断系统的鲁棒性。

现有的故障诊断方法主要分为基于解析模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法^[171]。下面作一简单介绍。

(1) 基于信号处理的方法

基于信号处理的方法通常利用信号模型,如相关函数、频谱和自回归滑动平均等,直接分析可测信号,提取诸如方差、幅值和频率等特征值,从而检测故障的发生。近年来出现了一些新的基于信号处理的故障诊断方法,主要有以下方法:利用Kullback 信息准则检测故障^[172]、基于自适应滑动窗格形滤波器的故障检测方法^[173~175]、基于信号模态估计的故障诊断方法^[176]、基于小波变换的故障诊断方法^[177,178]。

(2) 基于解析模型的方法

基于解析模型的方法又可以分为状态估计方法、等价空间方法和参数估计方法。这些方法虽然是独立发展起来的,但它们彼此之间并不是孤立的,而是存在一定的关系。状态估计方法是利用系统的定量模型和测量信号重建某一可测变量,将估计值与测量值之差作为残差,以检测和分离系统故障^[179~181]。等价空间方法的基本思想就是利用系统的输入输出的实际测量值检验系统数学模型的等价性(一致性)以检测和分离故障,等价空间方法包括基于约束优化的等价方程方法^[182]、广义残差产生器方法^[183]、具有方向性的残差序列的方法^[184]、基于近似扰动解耦的等价空间方法^[185]。参数估计方法根据模型参数及相应的物理参数的变化来检测和分离故障^[186],与状态估计的方法相比,参数估计法更有利于故障的分离,参数估计方法要求找出模型参数和物理参数之间的一一对应关系,且被控过程