

王肖芬◎著

徐科军◎导师

流量传感器信号建模、信号处理及 系统研究

LIULIANG CHUANGANQI
XINHAO JIANMO XINHAO
CHULI JI XITONG YANJIU

HUBING BOSHI WENCONG

斛
兵
博
士
文
丛



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

流量传感器信号建模、 信号处理及系统研究

王肖芬 著 徐科军 导师

合肥工业大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流量传感器信号建模、信号处理及系统研究/王肖芬著. —合肥: 合肥工业大学出版社, 2012. 10

(斛兵博士文丛)

ISBN 978 - 7 - 5650 - 0484 - 1

I. ①流… II. ①王… III. ①流量计量—传感器—研究 IV. ①TB937
②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 231242 号

流量传感器信号建模、信号处理及系统研究

王肖芬 著 徐科军 导师

责任编辑 郑洁

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2012 年 10 月第 1 版
地 址	合肥市屯溪路 193 号	印 次	2012 年 10 月第 1 次印刷
邮 编	230009	开 本	710 毫米×1010 毫米 1/16
电 话	总 编 室: 0551 - 2903038	印 张	9
	市场营销部: 0551 - 2903198	字 数	140 千字
网 址	www. hfutpress. com. cn	印 刷	合肥工业大学印刷厂
E-mail	press@hfutpress. com. cn	发 行	全国新华书店

ISBN 978 - 7 - 5650 - 0484 - 1

定价: 22.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题, 请与出版社市场营销部联系调换。

《斛兵博士文丛》出版委员会学术委员会

主任委员：徐枏巍

副主任委员：刘光复 赵韩

委员：（按姓氏笔画为序）

刘全坤 刘光复 陈心昭

陈翌庆 罗建平 祖方道

赵韩 徐枏巍 徐科军

梁昌勇

出版编辑委员会

主任委员：刘心报

委员：高隽 陈翌庆 黄康

李克明 孟宪余

史维芳 权怡

出版说明

为贯彻教育部《关于实施研究生教育创新计划 加强研究生创新能力培养 进一步提高培养质量的若干意见》（教研〔2005〕1号）文件精神，培养研究生创新意识、创新能力，提高研究生培养质量，合肥工业大学设立了研究生科技创新基金，以支持和资助研究生的教育创新活动，为创新人才的成长创造条件。学校领导高度重视研究生教育创新，出版的《斛兵博士文丛》就是创新基金资助的项目之一。

《斛兵博士文丛》入选的博士学位论文是合肥工业大学2008届部分优秀的博士学位论文。为提高学位论文的出版质量，《斛兵博士文丛》以注重创新为出版原则，充分展示我校博士研究生在基础与应用研究方面的成绩。

《斛兵博士文丛》的出版，得到了相关兄弟院校和有关专家的大力支持，也得到了研究生导师和研究生的热情支持，我们谨此表示感谢，希望今后能继续得到他们的支持与帮助。

我们力求把这项工作做好，但由于我们经验不足和学识水平有限，书中难免存在不足之处，敬请读者给予批评指正。

合肥工业大学研究生学位论文出版编辑委员会

2011年11月

总 序

胡锦涛总书记指出，为完成“十二五”时期经济社会发展的目标任务，在激烈的国际竞争中赢得发展的主动权，最根本的是靠科学技术，最关键的是大力提高自主创新能力。“提高自主创新能力，建设创新型国家”已明确写进了党的十七大报告。而创新型国家的建设靠人才，人才的培养靠教育。博士生教育与我国科学技术的进步与发展，与社会经济的发展有着直接而密切的联系，是国家创新体系的重要组成部分，研究生尤其是博士研究生培养质量如何，将集中体现一所高校的教育和科研水平。

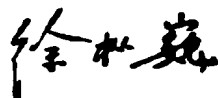
博士论文的研究工作一般都能体现本领域学科发展的前沿性和某些行业多元发展的战略性，应具有一定的创新性。为鼓励广大研究生，特别是博士研究生选择具有重大意义的科技前沿课题进行研究，进一步提高研究生的创新意识、创新精神、创新能力，激励、调动我校博士研究生及其指导教师进一步重视提高博士学位论文质量和争创优秀博士学位论文的主动性和积极性，展示我校博士研究生的学术水平，学校经过精心筹划，编辑出版了《斛兵博士文丛》。

此次入选《斛兵博士文丛》的论著，均为2008年毕业并获得博士学位的优秀博士研究生学位论文。我校的优秀博士学位论文评选工作旨在逐步建立有效的质量监督和激励机制，培养和激励我校在学博士生的创新精神，构建高层次创造性人才脱颖而出的优良氛围。同时优秀博士学位论文代表着我校博士生培养的最高水平，对我校博士生教育起到了示范作用。这套丛书中的论文大体上都有以下几个显著特点：一是选题均为本学科的前沿，具有较大的挑战性；二是论文的创新性突出，或是在理论上或是在方法上有创新；三是论文的成果较为显著，大多都在国际学术刊物上发表了与该论文有关的学术论文。

《斛兵博士文丛》的出版也是我校实施研究生创新工程的一个重要举措。伴随着办学条件的不断改善、人才培养政策的日趋完善和高层次创新型人才成长的良好环境的不断构建，一定能达到多出人才、快出人才、出好人才的目标。

我衷心希望广大研究生发扬我校的优良传统，在严谨求实、开放和谐、充满生机与活力的学术环境中奋发努力、锐意进取、勇于创新，通过自己的辛勤劳动和刻苦钻研写出更好的论文，为进一步提高我校的学术水平作出更大的贡献，为把学校建设成为国内先进、国际知名的创新型高水平大学而不懈努力。

合肥工业大学校长
教授、博士生导师



二〇一一年十一月

目 录

第 1 章 传感器动态非线性块联模型辨识方法研究	(001)
1.1 传感器动态非线性建模研究的意义及其研究现状	(001)
1.2 传感器动态非线性数学模型	(003)
1.2.1 核函数模型	(003)
1.2.2 NARMAX 模型	(004)
1.2.3 神经网络模型	(005)
1.2.4 块联模型	(005)
1.3 动态非线性块联模型参数辨识方法	(006)
1.3.1 基于 Vandermonde 分解的参数辨识方法	(006)
1.3.2 两步参数辨识方法	(009)
1.3.3 辨识方法仿真	(010)
1.4 本章小结	(017)
第 2 章 热膜式 MAF 传感器动态非线性建模	(018)
2.1 热膜式 MAF 传感器简介	(018)
2.1.1 热膜式 MAF 传感器工作原理	(019)
2.1.2 热膜式 MAF 传感器动态特性国内外研究现状	(021)
2.2 热膜式 MAF 传感器标定实验	(021)
2.2.1 静态标定实验	(022)
2.2.2 动态标定实验	(023)
2.3 基于块联模型的 MAF 动态非线性建模	(024)
2.3.1 静态非线性环节模型	(024)

2.3.2	动态线性环节模型	(025)
2.4	热膜式 MAF 传感器性能指标评定	(030)
2.4.1	静态性能指标	(030)
2.4.2	动态性能指标	(031)
2.5	本章小结	(032)
第 3 章	电磁流量传感器信号建模研究	(033)
3.1	引言	(033)
3.2	电磁流量计工作原理及其传感器信号模型	(035)
3.3	传感器信号模型两步参数辨识方法	(037)
3.4	传感器信号实验建模及模型验证	(038)
3.4.1	实验	(038)
3.4.2	模型辨识	(039)
3.4.3	模型验证	(043)
3.5	本章小结	(045)
第 4 章	正弦激励电磁流量传感器信号处理方法研究	(046)
4.1	引言	(046)
4.2	信号处理方法基本原理	(047)
4.3	实验结果	(048)
4.4	本章小结	(051)
第 5 章	基于小波变换的涡街流量传感器信号处理方法	(052)
5.1	引言	(052)
5.2	小波变换的分频特性及其滤波器理论	(054)
5.3	二进离散小波变换及其小波滤波器	(055)
5.4	利用小波变换捕捉信号基波	(057)
5.5	小波滤波器的设计	(059)
5.5.1	双正交小波的设计原则	(060)
5.5.2	Daubechies 小波滤波器的设计	(061)

5.5.3 Butterworth 小波滤波器设计和实现	(062)
5.6 基频的估计	(065)
5.7 仿真结果	(068)
5.7.1 波捕捉基频仿真	(068)
5.7.2 运用小波变换测量基频	(069)
5.8 本章小结	(073)
第 6 章 数字滤波与频谱分析相结合的涡街流量计信号处理方法	(075)
6.1 算法基本原理及其实现	(075)
6.1.1 信号的数字滤波	(076)
6.1.2 信号频谱估计	(076)
6.1.3 涡街频率估计	(078)
6.2 算法仿真结果	(079)
6.3 本章小结	(080)
第 7 章 基于 DSP 的涡街流量计数字信号处理系统研制	(082)
7.1 系统硬件设计	(082)
7.1.1 硬件整体结构框图	(082)
7.1.2 DSP 的选择和配置	(083)
7.1.3 模拟信号输入调理和转换模块	(084)
7.1.4 数字信号处理模块	(085)
7.1.5 电源管理模块	(085)
7.1.6 工作流程	(086)
7.2 系统软件设计	(086)
7.2.1 软件总体框图	(086)
7.2.2 主监控程序	(087)
7.2.3 中断模块	(087)
7.2.4 初始化模块	(088)
7.2.5 计算模块	(089)
7.2.6 输出模块	(093)

L 流量传感器信号建模、信号处理及系统研究

7.2.7 “看门狗”软件操作模块	(093)
7.2.8 人机接口模块	(093)
7.3 本章小结	(106)
第8章 涡街流量计信号处理系统的调试和标定	(108)
8.1 系统调试	(108)
8.1.1 硬件调试	(108)
8.1.2 软件调试	(109)
8.2 温度实验	(110)
8.3 标定实验	(112)
8.3.1 安庆石化总厂计量中心水标	(113)
8.3.2 安徽省流量仪表检定站气标	(113)
8.3.3 重庆耐德正奇流量仪表有限公司标定	(114)
8.3.4 山东龙口博思达仪器仪表公司气标	(116)
8.4 本章小结	(117)
第9章 总结和展望	(118)
9.1 总结	(118)
9.2 展望	(120)
参考文献	(122)
攻读博士学位期间发表和投稿论文及获得奖励	(129)

第1章 传感器动态非线性块联模型辨识方法研究

第1章和第2章研究热膜式MAF传感器的动态非线性问题。为了准确地描述这一具体传感器的动态非线性特性,本章首先研究一般传感器的动态非线性模型及其辨识方法。在分析现有传感器动态非线性模型的基础上,选择块联模型为主要研究对象。深入研究块联模型的两种辨识方法:Vandermonde法和两步参数辨识法,并进行仿真验证,为解决热膜式MAF传感器的动态非线性问题奠定理论基础。

1.1 传感器动态非线性建模研究的意义及其研究现状

传感器是仪器仪表和测量系统的核心部件,是机器人的“五官”,是获取原始信息的重要装置。在工业自动化领域中,传感器为控制系统提供被控参量的信息,是自动化装置中必不可少的“环节”。传感器的研发、性能评定和使用始终是人们关注的热点。

传感器的优劣由其性能指标来衡量。传感器性能指标分为静态和动态两类。静态指标用于衡量传感器精度,规定传感器测量被允许的误差范围。目前,对传感器静态性能的研究已经比较深入和全面了。动态性能指标用于衡量传感器测量快速变化信号的能力,即当信号突变时,传感器能否及时反映被测信号的变化。动态性能指标具体分为时域和频域两种。时域指标主要为调整时间(当被测信号突然变换时传感器跟踪所需时间)和超调量(用于衡量传感器在跟踪突变被测信号过程中的“过冲”程度)。频域指标主要是工作频带(表示传感器能够测量信号的频率范围)。与传感器静态性能

的研究相比,传感器动态性能的研究相对滞后。究其原因,一是因为相关理论还不完善;二是因为需要专门的传感器动态性能校准设备。因此,无论理论上,还是应用上,均需要进一步研究传感器的动态性能。

传感器动态特性研究的主要内容是对传感器进行建模,建立其动态数学模型,描述传感器测量突变信号的特性。利用模型,采用数字处理方法,确定传感器的各项性能指标。传感器动态建模方法有两种:机理分析建模法和实验建模法。

机理分析建模法是根据传感器工作原理,结合力学、电磁学、热力学等基本理论知识,经过分析和抽象,建立传感器的数学模型。该方法推导过程清晰,数学模型能够清楚地反映传感器输入、输出和各参数之间关系。但是,由于在建模过程中常常对一些条件做假设和简化,导致建模结果与实测结果相差很大。所以,这种方法实用性较差,仅仅适用于结构和原理简单的传感器。

实验建模法的基本原理是将传感器当成一个“黑箱”,对传感器进行动态标定实验,根据实验记录的传感器输入、输出数据,采用系统辨识等方法,建立传感器的动态数学模型。因为动态标定实验对传感器实际使用情况进行了真实模拟,所以建立的动态模型,能真实反映传感器的动态性能。该建模方法实用价值较高。

对传感器进行实验建模,关键在于“传感器黑箱”模型结构的确定及模型的辨识方法。按照是否考虑非线性因素的原则,传感器动态实验建模可分为动态线性建模和动态非线性建模。当传感器线性度很好或者非线性影响较弱时,可进行动态线性建模。目前,传感器动态线性建模理论研究工作已日臻完善。动态线性模型,按照形式不同分为:(1)微分方程;(2)传递函数;(3)差分方程;(4)状态方程。通过拉普拉斯变换/反变换、 z 变换/反变换,不同形式模型之间可以相互转换。动态线性模型的辨识方法有:最小二乘辨识方法、沃尔什变换法、时间序列分析法、神经网络方法和基于快速傅立叶变换的频域辨识方法等。

当传感器超出线性工作范围或者传感器非线性因素影响较强时,传感器的输入与输出,在一定时域与频域内不再满足齐次性和叠加性原理,若进行线性建模,就无法准确描述传感器的工作特性。严格地说,一切实际应用的传感器都属非线性系统,准确描述传感器工作特性,预测传感器输出,对

传感器进行动态非线性建模才是根本的解决方法。因为非线性系统描述的复杂性,所以,研究动态非线性建模难度很大。尽管如此,有关系统动态非线性模型及其辨识方法、建模应用方面的探讨、研究工作,一直在国内外持续展开。

N. Wiener 首先将 Volterra 级数用于描述非线性,并在时域和频域内对模型进行了详细的分析,后来又运用正交分解原理,推导出 Wiener 非线性模型^[15]。Mrad 等采用时变自回归滑动平均(Time-Varying Auto Regressive Moving Average with Exogenous Inputs, TVARMA)模型对 MAF 传感器的动态响应进行预测^[20]。Ho-En Liao 等用色散函数对 NARMAR 模型中延迟因子进行预测^[16]。S. Beling 等用前馈神经网络描述气体传感器的非线性特性^[19]。Antonio Pardo 等提出基于神经网络的非线性逆动态系统,去解决气敏传感器系统的动态非线性问题^[22]。国内焦李成等对基于 Volterra 核函数的动态非线性模型进行了研究,并将该模型应用于 MOSFET-C 滤波器的非线性分析^[1]。合肥工业大学贾林采用一步辨识方法,对机器人腕力传感器进行 Hammerstein 模型的建模,并且对其进行了动态非线性校正,效果良好^[12,19]。

1.2 传感器动态非线性数学模型

能够描述传感器动态非线性特性的模型,按照结构的不同,分为四种:核函数模型、NARMAX 模型、神经网络模型和块联模型。

1.2.1 核函数模型

根据扩展 Weierstrass 函数逼近定理,由连续泛函表征的动态非线性系统,可由一函数序列来无限逼近。这种由函数级数逼近的动态非线性模型即为核函数模型,用来逼近非线性系统以函数级数为模型的核函数。目前以 Volterra 级数模型为主要代表,其数学表达式如下:

$$y(t) = y_0 + \int h_1(\tau)x(t-\tau)d\tau + \iint h_2(\tau_1, \tau_2)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \cdots \quad (1.1)$$

式中, $h_1(\tau)$ 、 $h_2(\tau_1, \tau_2)$ 分别为一阶、二阶 Volterra 核, y_0 为零输入响应, 通常在系统分析时默认为零或者从输出中减掉。如果将 $\int h_1(\tau)x(t-\tau)d\tau$ 作为系统的一次输入响应即系统的线性部分响应, $\iint h_2(\tau_1, \tau_2)d\tau_1 d\tau_2$ 作为系统的二次输入响应, 则系统的输出可表示为各次输出的叠加:

$$y(t) = \sum_{n=1}^{+\infty} y_n(t) \quad (1.2)$$

$$y_n(t) = \int \cdots \int h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n)x(t-\tau_1)x(t-\tau_2)\cdots x(t-\tau_n)d\tau_1 \cdots d\tau_n \quad (1.3)$$

式中, $h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n)$ 为系统的 n 阶 Volterra 核。通过多维傅立叶变换, 上述的 Volterra 级数动态非线性模型的频域表达式为:

$$Y(f) = H_1(f)X(f) + \frac{1}{2\pi} \iint_{f_1+f_2=f} H_2(f_1, f_2)X(f_1)X(f_2)df_1 df_2 + \cdots \quad (1.4)$$

其中 $H_1(f)$ 、 $H_2(f_1, f_2)$ 分别是一阶、二阶 Volterra 核的傅立叶变换。同理, $H_n(f_1, \cdots, f_n)$ 为 n 阶 Volterra 核 $h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n)$ 的傅立叶变换。

Volterra 级数模型给动态非线性系统提供了一个整体式的描述方案, 一般的动态非线性系统均可通过 Volterra 级数模型来表达。从结构角度来说, 采用 Volterra 级数描述动态非线性系统, 具有两个独特的优势: (1) Volterra 模型与幂级数有着天然的联系, 易为工程技术人员和科研人员所接受。当 $h_n(\tau_1, \cdots, \tau_n) = a_n \delta(\tau_1) \cdots \delta(\tau_n)$ 时, Volterra 级数就完全退化为幂级数的形式, $y(t) = a_1 x + a_2 x^2 + \cdots$; (2) Volterra 核具有鲜明的物理意义。通过多维傅立叶变换, Volterra 核具有自己的频域表达式。与采用一维傅立叶变换和线性传递函数分析处理线性系统类似, 可采用多维傅立叶变换和类似的非线性传递函数, 对 Volterra 级数模型描述的非线性动态系统进行分析处理。但是, 从辨识应用角度来说, 模型中需要辨识的 Volterra 核被包含于积分之中, 因而 Volterra 级数模型极难辨识, 尤其是高阶 Volterra 级数模型。总之, Volterra 级数模型对非线性系统理论、逼近理论和辨识方法等的发展有着重要的推动作用, 但是, 它很难应用于工业过程建模。

1.2.2 NARMAX 模型

一般非线性系统可由一个连续非线性泛函来表征, NARMAX(Non-Linear

Auto-Regressive Moving Average with Exogenous Inputs) 模型即采用非线性函数来描述离散非线性系统,其数学表达式为:

$$y(k) = F[y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k-1), \dots, u(k-n_u), e(k-1), \dots, e(k-n_e)] + e(k) \quad (1.5)$$

式中, $F(\cdot)$ 是一个非线性函数, $u(k)$ 和 $y(k)$ 分别是模型的输入和输出, $e(k)$ 是一个不可观测的零均值和有限方差的独立噪声, $k=0, 1, \dots$ 是离散事件标量。其多项式表达形式为:

$$y(k) = \sum_j^m P_j(k) Q_j + e(k) \quad (1.6)$$

其中, $P_j(k) = P_j[y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k-1), \dots, u(k-n_u), e(k-1), \dots, e(k-n_e)]$ 为回归项, 是一些事件延迟的输入、输出和噪声的乘积, 最大乘积数即为模型的度, Q_j 为被估计的参数。多项式 NARMAX 模型可进一步推广, 回归项中包含超越函数, 如指数函数, 形成推广 NARMAX 模型。

NARMAX 模型提供了一个统一的动态非线性系统表达式, 它的逼近精度高、收敛速度快, 但是, 模型的度和乘积组合方式很难确定。目前对于线性参数模型可采用最小二乘法实现模型结构和参数的辨识, 但是, 对于非线性参数模型, 仍没有方法实现模型结构和参数的辨识, 有待于进一步研究和突破。

1.2.3 神经网络模型

当前广泛使用的神经网络模型有两种, 一种为多层神经网络, 另一种为循环神经网络。多层神经网络用于描述静态非线性系统, 循环神经网络用于描述动态非线性系统。从结构上来看, 神经网络模型具有天然的非线性, 描述非线性系统的能力非常强, 但其参数辨识方法复杂耗时, 计算量大, 难以收敛。所以, 采用神经网络模型进行建模, 均离不开计算机的辅助, 只能离线进行。

1.2.4 块联模型

根据非线性的动态分解原理, 由连续泛函所表征的非线性动态系统, 当其输入信号的能量有限时, 可以分解成一个线性动态系统和一个非线性即

时系统的串联^[7]。串联形式有两种：一是 Wiener 模型，其动态线性子系统在前，静态非线性子系统在后，如图 1-1 所示；二是 Hammerstein 模型，其静态非线性子系统在前，动态线性子系统在后，如图 1-2 所示。这里的子系统也可称为环节。图 1-1 和图 1-2 中， $x(t)$ 、 $z(t)$ 、 $y(t)$ 分别代表系统输入、中间变量和系统输出。 $h(t)$ 为线性环节，它的模型有两种，一种是参数模型，形式为：

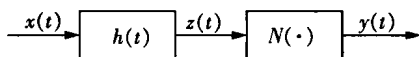


图 1-1 Wiener 模型框图

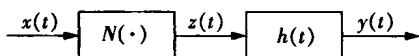


图 1-2 Hammerstein 模型框图

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \cdots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_n z^{-n}} \quad (1.7)$$

其中， $H(z)$ 是线性子系统的脉冲传递函数，待辨识的参数为 $a_0, a_1, \cdots, a_n, b_0, b_1, \cdots, b_m, m, n$ 皆为线性环节的阶数；另一种模型为非参数模型，表示为线性子系统的脉冲响应序列 $\{h(n)\}$ 。 $N(\cdot)$ 代表静态非线性环节，其形式为： $N(\cdot) = r_1 x(t) + r_2 x^2(t) + \cdots + r_l x^l(t)$ ，其待测参数为 $r_1, r_2, \cdots, r_l, l$ 为静态非线性环节的阶数。相对于上述三种模型，块联模型结构简单，它将动态非线性系统分解为静态非线性环节（由幂级数描述）和动态线性环节。另外，块联模型结构较易于后续的传感器信号处理，如校正处理^[8,12]，用于提高传感器动态响应性能等。传感器的输入信号一般都有一定的能量范围，对于输入信号能量有限的动态非线性系统，块联模型均能描述，所以这里选择块联模型作为研究对象，着重研究其辨识方法。

1.3 动态非线性块联模型参数辨识方法

1.3.1 基于 Vandermonde 分解的参数辨识方法

1.3.1.1 Wiener 模型的辨识

由图 1-1 可知，Wiener 模型的输入输出关系如下形式：