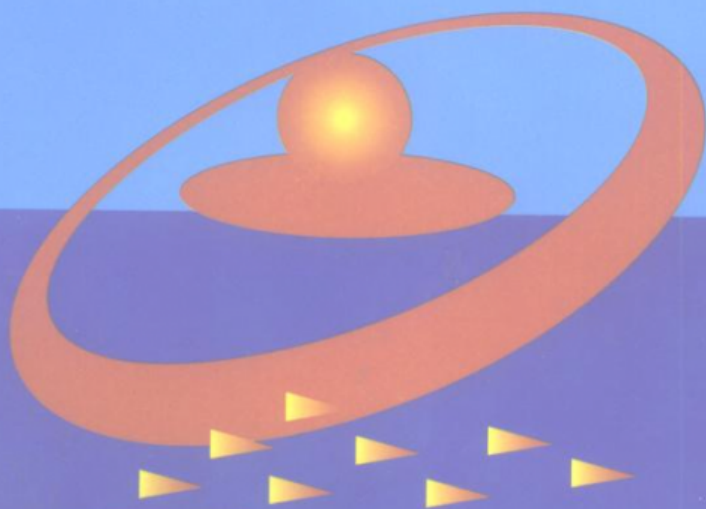




水下自主航行器动力学模型

— 建模和参数估计

吴旭光 徐德民 著



450116

水下自主航行器动力学模型

——建模和参数估计

吴旭光 徐德民 著

西北工业大学出版基金资助出版
国防科工委预研基金资助
船舶工业总公司“九五”预研基金资助

西北工业大学出版社

1998年10月 西安

(陕)新登字 009 号

【内容简介】 本书是关于水下自主航行器研究领域的学术专著。其内容包括：水下自主航行器动力学模型结构与分析、水下自主航行器流体动力参数辨识和估计。书中不但研究了目前已广泛应用的统计辨识算法，而且还讨论了不确定性系统的鲁棒辨识方法和算法，在一定程度上反映出当前系统辨识的最新成果。

书中给出了适用于水下自主航行器建模和参数估计的计算方法。由于本书的研究背景和研究对象具有较强的工程实用性质和应用性质，因而，不但这些方法具有一定理论意义，而且所给出的参数和图表也具有很实际的应用意义与继续研究的价值。

本书可作为从事各类航行器和飞行器研究的科技工作者的参考书，也可作为高校有关水下自主航行器专业的本科生、研究生教材。

0241264

水下自主航行器动力学模型

——建模和参数估计

吴旭光 徐德民 著

责任编辑 王璐

责任校对 钱伟峰

*

©1998 西北工业大学出版社出版发行

(邮编:710072 西安市友谊西路127号 电话:8493844)

全国各地新华书店经销

西北工业大学出版社印刷厂印装

ISBN 7-5612-1005-1/TJ·22

*

开本:850×1168毫米 1/32

印张:5.875 字数:140千字

1998年10月第1版

1998年10月第1次印刷

印数:1—2000册

定价:15.00元

购买本社出版的图书，如有缺页、错页的，本社发行部负责调换。

前 言

随着国民经济的发展和国防建设的需求,研制高性能的水下自主航行器已受到各国科技工作者越来越多的关注。同样,由于水下自主航行器性能的提高,对水下自主航行器在各种不同海洋环境下运动特性的研究不断深入,使水下自主航行器运动数学模型的建立受到工程师们的重视。这因为水下自主航行器数学模型不但与水下自主航行器系统的仿真技术、性能分析和高性能控制器设计有着密切的关系,而且在很大程度上能制约或促进水下自主航行技术的发展。

飞行器气动参数辨识至今已有 80 多年的历史。目前飞行器气动参数,特别是线性气动参数辨识已很成熟,积累了丰富的经验,不但已能采用随意的大幅值机动飞行数据辨识气动和控制参数,而且能处理非线性气动参数模型。水下自主航行器的某些特征虽然与飞行器有着相似之处,但由于航行环境、条件的不同,也存在很大的差异,这使得某些工作相对更难,并且水下自主航行器建模起步较晚,目前仅涉及线性流体参数的辨识与估计。非线性流体参数的辨识与估计还处于探索阶段。

在水下自主航行器建模和参数估计研究领域,本书是国内出版的第一本专著。我们在国防科工委和中国船舶总公司的支持下,做了大量的理论和实验研究工作,本专著正是反映了我们的研究成果。

应用系统辨识技术,从水下自主航行器的航行实验或仿真实验数据中,提取水下自主航行器的流体动力参数和其他能表征系统性能的参数,从而建立水下自主航行器动力学系统的数学模型

或评估系统品质,是本书的主要内容。它研究的对象是水下自主航行器,解决的是流体动力学问题,采用的基本方程是水下自主航行器动力学运动方程组,应用的研究手段是现代控制理论的滤波、预测和估计理论。因此,它是处于流体力学、航行力学、概率统计、计算方法、优化技术和控制理论之间的一门综合应用性研究课题。全书集中研究了水下自主航行器动力学参数的辨识理论与技术。对参数辨识在水下自主航行器工程中的应用技术研究的主要内容包括:

- (1) 水下自主航行器动力学模型结构与性能分析。
- (2) 参数估计理论与算法。
- (3) 水下自主航行器动力学参数辨识理论与算法。
- (4) 数学预处理及相容性检验。
- (5) 不确定性系统及其建模。
- (6) 辨识技术和应用。

应当指出,近年来系统辨识技术发展很快,并且这这也是一个很大的题目。尤其是本书涉及的不确定性系统及其建模,又称为鲁棒建模、 H_∞ 辨识或适合控制的建模,其发展也只是近几年的事。国内外许多学者在系统辨识领域做了大量的工作,提出了各种很好的计算方法。本书只涉及了作者们工作的范围,研究的对象也仅涉及水下自主航行器,但其研究的思路 and 大量实际算法也同样可以应用到飞机导弹等这类航行器的系统建模和参数估计中。

在本书写作过程中,得到许多老师和同行的支持和指导,在此深表感谢。同时也得到作者的研究生,杨益军博士、石峰博士、厉小军博士,以及庞莉、郭文孝、房玉等硕士的大力帮助,他们为本书做了大量工作,在此也深表谢意。

由于著者水平有限,误漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

著者

1998年1月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 系统与模型	1
1.2 系统辨识的定义	3
1.3 系统辨识的理论与技术	4
1.3.1 系统辨识/参数估计	5
1.3.2 辨识的内容与技术的实现	6
1.4 系统辨识的应用	7
1.5 水下自主航行器动力学建模技术与应用	9
1.5.1 水下自主航行器动力学模型研究的必要性	9
1.5.2 航行器动力学模型	10
1.5.3 航行器动力学模型结构	11
1.5.4 航行器动力学模型参数估计问题	12
1.5.5 其他问题	13
第二章 水下自主航行器动力学模型	15
2.1 水下自主航行器的空间运动表示及其运动参数	15
2.1.1 坐标系的选择	15
2.1.2 航行器的运动参数	18
2.1.3 坐标变换矩阵	19
2.1.4 航行器的操纵机构	20
2.2 航行器系统数学模型	21
2.2.1 刚体动力学系统	22

2.2.2 一般空间运动方程组	23
2.3 数学模型的分解和简化	25
2.3.1 航行器纵向运动模型	26
2.3.2 航行器侧向运动模型	27
2.3.3 航行器的横滚运动模型	28
第三章 参数估计理论与算法	30
3.1 最小二乘法	30
3.1.1 最小二乘问题的提法和基本计算公式	30
3.1.2 最小二乘估计的几何意义和统计性质	32
3.1.3 最小二乘参数估计的递推算法	35
3.1.4 数据饱和现象	37
3.2 状态估计和卡尔曼滤波算法	40
3.2.1 卡尔曼滤波基本公式	40
3.2.2 非线性连续-离散系统的卡尔曼滤波	44
3.3 极大似然辨识算法	47
3.3.1 极大似然准则	47
3.3.2 非线性动力学系统极大似然算法	48
3.3.3 极大似然参数估计的近似算法	53
3.3.4 极大似然递推算法	55
第四章 航行器动力学参数辨识	57
4.1 引言	57
4.2 参数辨识问题的描述	58
4.2.1 辨识问题的描述	58
4.2.2 航行器纵向运动的仿真模型	60
4.2.3 航行器纵向运动模型参数灵敏度方程	61
4.2.4 各参数对输出的灵敏度分析	63

4.3 极大似然迭代辨识算法	64
4.3.1 牛顿-拉夫逊算法	64
4.3.2 数值的稳定性	65
4.3.3 迭代步长的优化处理	66
4.3.4 辨识结果和分析	69
4.4 单纯形寻优法	71
4.4.1 算法的描述	72
4.4.2 单纯形寻优法辨识结果	74
4.5 极大似然递推辨识算法	75
4.5.1 算法的描述	76
4.5.2 数值计算问题	77
4.5.3 极大似然递推辨识算法结果和分析	80
4.6 增广的广义卡尔曼滤波算法	82
4.7 结论	85
第五章 数据预处理及相容性检验	87
5.1 前言	87
5.2 数据处理的理论基础	87
5.2.1 信号的分类	87
5.2.2 随机信号的描述	88
5.2.3 白噪声极其性质	90
5.2.4 随机模型	91
5.3 数据预处理	94
5.3.1 野值的识别、剔除与补正	94
5.3.2 传感器安装位置校正	97
5.3.3 低通滤波	98
5.3.4 数据加密	101
5.3.5 数据平滑和微分平滑	102

5.4	数据相容性检验和数据重建	104
5.4.1	相容性检验基本方程	105
5.4.2	简化的相容性检验基本方程	108
5.5	数据相容性检验应用结果	110
5.5.1	第一种相容性检验方程	110
5.5.2	简化相容性检验方程	110
5.6	测量数据含有异常值时的鲁棒估计问题	111
5.6.1	问题的提法	111
5.6.2	鲁棒估计算法	113
5.6.3	参数不确定区间的估计	116
5.6.4	仿真算例	116
5.7	结论	118
第六章	不确定性系统及其建模	119
6.1	不确定性系统的描述	120
6.1.1	统计假设和 UBBE 假设	121
6.1.2	建模不确定性和未建模不确定性	122
6.1.3	航行器系统的不确定性模型	123
6.2	鲁棒辨识理论与技术	123
6.2.1	参数的不确定椭球估计	124
6.2.2	广义估计问题 (Generalized Estimation Problem)	125
6.2.3	L_1 鲁棒辨识	128
6.2.4	H_∞ 鲁棒辨识	131
6.3	离散系统 H_∞ 辨识	132
6.3.1	系统和问题的描述	134
6.3.2	H_∞ 辨识算法	136
6.3.3	仿真算例	138

6.4 连续系统的 H_{∞} 辨识	142
6.4.1 问题的描述和定义	143
6.4.2 连续系统的 H_{∞} 辨识算法	144
6.4.3 水下自主航行器系统辨识算例	148
第七章 辨识技术和应用	150
7.1 递推辨识算法在故障检测中的应用	150
7.1.1 问题的描述与模型结构	150
7.1.2 算法的描述	152
7.1.3 水下自主航行器快变参数的辨识	154
7.2 模型的确认与验证	158
7.2.1 模型的确认(Model Validation)	160
7.2.2 模型的验证(Model Verification)	162
7.2.3 不确定性模型的有效性验证	163
7.3 水下自主航行器建模软件包 TMSP	164
7.3.1 总体说明	165
7.3.2 TMSP 结构及其功能	167
7.3.3 软件包的设计	169
7.3.4 软件包的使用	171
参考文献	173

第一章 绪 论

1.1 系统与模型

系统就是一些具有特定功能的、相互间以一定规律联系着的物体组成的一个总体。显然,系统是一个广泛的概念,毫无疑问它在现代科学研究和工程实践中扮演着重要的角色。不同领域的问题均可以用系统的框架来解决。但究竟一个系统是由什么构成的,这取决于观测者的观点。例如,这个系统可以是一个由一些电子部件组成的放大器;或者是一个可能包括该放大器在内的控制回路;或者是一个有许多这样回路的化学处理装置;或者是一些装置组成的一个工厂;或者是一些工厂的联合作业形成的系统,而世界经济就是这个系统的环境。

一个系统可能非常复杂,也可能很简单,但无论什么系统一般均具有4个重要的性质,即整体性、相关性、有序性和动态性。建立系统概念的目的在于深入认识并掌握系统的运动规律,不仅能定性地了解系统,还要定量地分析、综合系统,以便能更准确地、有效地解决工程、现代社会和自然界中种种复杂的问题。

著名学者 P. Eykhoff 在其论著^[39] 的首页指出:观察与测量是自然科学与工程技术中的普遍方法,根据观察,科学家对他所研究的问题有了透彻的物理认识,并从这种认识出发,通过反复推敲建立起一种理论,这个理论就成为关于他所研究的自然现象的一种设想概念。在这一概念指导下,他再设计一种新的实验,通过观测这些实验的结果或者证实这一理论,或者确定其某种修改,或者完

全否定这一理论。因此,即使一个概念可能是美妙的,并且对科学家具有魅力,但在理论与实验的这种相互作用中,事实的结果却是起决定性作用的。为此,可以肯定地说,在自然科学与工程技术领域中,实验与观察是最根本的手段。

和观察相比几乎具有同等重要性的是关于建立模型的思想,事实上它们之间也很难分开。系统阐述一种理论可以理所当然地称之为“模型建立”。

所谓模型就是把关于系统的本质部分的信息,抽象成有用的描述形式,因此抽象是建模的基础。在数学中,集合的概念是建立在抽象的基础上的,共同的基础使集合论对于建模过程非常有用。这样,数学模型可以看成是由一个集合构造的。

数学模型的应用无论是在纯科学领域还是在实际工程领域中都有着广泛的应用,但通常认为一个数学模型有两个主要的用途:首先,数学模型可以帮助人们不断地加深对实际系统的认识,并且启发人们去进行可以获得满意结果的实验;其次,数学模型有助于提高人们对实际系统的决策和干预能力。

在建立一个数学模型时,需要建立几个抽象概念,即定义几个集合。最基本的有输入、输出和状态变量的集合。同时,这些变量具有数值化的值。再进一步,在这些抽象的基础上,可建立复合的集合结构,特别是要定义它们的函数关系。根据这些函数关系的特征,可将数学模型分类为线性、非线性、时变、定常、连续、离散、集中参数、分布参数、确定、不确定等系统模型。

一个数学模型最终是为应用服务的。因此,抽象必须与真实系统和研究目的相联系。由此可提出一个基本公理:存在一个十分复杂的数学模型,它详细而精确地描述了系统。根据这个公理,可不断地把细节增加到原抽象中去,以达到抽象逼近真实系统。这个过程称为具体化,也就是使抽象不断地变得具体。

在建模方法学中,还有一个基本假设:整个被研究的过程、被

建模的目标,当它们用于某种特殊目的时,至少是“部分可分解”的。可分解的系统允许从系统中取得任何一部分,而不影响其他部分。例如,对大多数航行器的运动,均可在一定范围内将其分解为水平面和纵平面运动。所以,“部分可分解”的系统有着明显的用途。

根据上述的公理和假设,很明显地可以看出,虽然数学模型可为许多目的服务,但如果认为一个特殊的描述对所有研究都适用,那将是十分愚蠢和可笑的。这种情况在定量分析过于繁琐、数学上的严格性过于精确时可能会发生。

1.2 系统辨识的定义

系统辨识是研究建立数学模型的一种技术,是系统建模中的实验建模手段。根据系统建模的条件和目的,系统辨识的定义也有不同。

1962年,L. A. Zadeh在早期曾给辨识下过这样的定义:“辨识就是在输入和输出数据的基础上,从一组给定的模型中,确定一个与所测系统等价的模型。”该定义明确了辨识的三大要素:①输入、输出数据;②模型类;③等价准则。其中数据是辨识的基础,准则是辨识的优化目标,模型类是寻找模型的范围。按照Zadeh的定义,寻找一个与实际过程完全等价的模型无疑是困难的。从实用观点看,对数学模型的要求并非如此苛刻。

P. Eykhoff给辨识下的定义是:“辨识问题可以归结为用一个模型表示客观系统(或将要构造的系统)本质特征的一种演示,并用这个模型把对客观系统的理解表示成有用的形式。”这个定义强调了一个非常重要的概念,最终的模型只应表示动态系统的本质特征,并且把它表示成适当的形式,而不一定是该系统实际结构的一个描述。而这个适当的形式可以是概念的、物理的或数学的。

这个定义强调了适合于应用的特点。

L. Ljung 肯定了真实系统与数学模型是两种不同的东西。我们必须对数学模型采取实用观点,他对辨识是这样定义的:“辨识有三要素:数据、模型类和准则。辨识就是按照一个准则在一组模型集中选择一个与数据拟合得最好的模型。”与 Zadeh 的定义不同点,这个定义仅要求模型能“最好”地与数据拟合,而不是与实际系统等价,而由此带来的问题是模型验证方法的不同。

总之,系统辨识就是通过测量系统在外作用下的系统响应数据,按照确定的辨识准则,利用优化技术,寻求最能反映系统本质属性的数学模型。显见,这是一个优化近似问题,近似的程度取决于对系统先验知识的认识深化程度和对数据集的了解和处理,以及所选用的辨识算法。图 1.1 是 L. Ljung 给出的系统辨识的示意图。

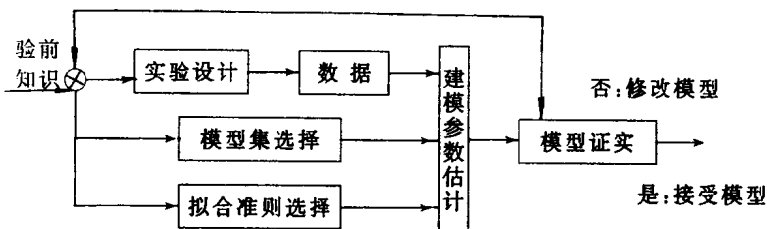


图 1.1 系统辨识的环节

1.3 系统辨识的理论与技术

对系统建模理论产生兴趣,不仅仅是由于需要提高系统的性能(控制)或增加动力学系统的认识(仿真),而且也反映出相关学科的发展与需求。例如,社会系统、生物系统和其他高精工程系统的需求是系统辨识理论得以发展的动力,泛函分析、代数理论、微

分几何、优化理论等数学的引入给系统辨识理论注入新的内涵,而现代计算机硬件与软件的发展使系统辨识理论应用发生急剧变化成为可能。

1.3.1 系统辨识 / 参数估计

等价性经常是用一个判据,即一个误差函数或损失函数来定义的。这个判据是系统输出 y 和模型输出 y_m 的一个泛函,即

$$e = e(y, y_m) \quad (1.1)$$

用统计方法来处理判据式(1.1)的参数估计方法称之为传统方法,有别于鲁棒辨识方法。

经常用的辨识算法有最小二乘、马尔科夫、极大似然和贝叶斯算法。这些算法所要用的过程原始知识依次增加。对最小二乘算法,不需要系统噪声的任何假定。而马尔科夫算法需要噪声的协方差矩阵知识。对于极大似然算法,需要知道噪声随机过程采样值的概率密度函数。而贝叶斯算法需要未知参数的先验概率密度函数的知识以及误差所付出的代价知识。因此从贝叶斯算法出发,如果实际可利用的先验知识较少,其他估计算法可作为其特殊情况推导出来。

一种参数估计算法,本身也可以看成是一种过程。无论从数学还是从控制论的观点来看,对它的基本要求是:

稳定:算法必须是稳定的,必要的话,对某些先验知识应是鲁棒的。

精确:所得到的结果,必须满足研究的目的。

收敛:算法必须是收敛的,并有一个满意的收敛速度。

除此之外,一个可以被工程实践所接受的参数估计算法最好还能满足下列要求:

- (1) 数学上易于处理;
- (2) 技术上易于实现;

- (3) 可以被广泛地应用;
- (4) 能够给出一个最优估计值;
- (5) 花费的代价是可以接受的。

因此可以看出,一个辨识算法的选择受许多考虑所支配。同样,评价一个辨识算法的好坏,除以上定性的条件外,辨识工程师更乐意使用以下指标作定量的分析:

- (1) 无偏性;
- (2) 均方误差;
- (3) 有效性;
- (4) 一致性;
- (5) 充分性。

1.3.2 辨识的内容与技术的实现

鉴于系统辨识在众多学科领域中应用的广泛性和多样性,对于辨识算法的技术实现不可能给出一般的规划。但对大多数的应用来说,系统辨识的内容主要包括四个方面:

- (1) 实验设计:获得能充分包括系统信息的输入输出数据。
- (2) 模型结构辨识:根据物理知识,选择模型的结构。
- (3) 参数估计:根据准则,使参数与能得到的数据相适配。
- (4) 模型验证:检验辨识模型是否描述了系统的主要特征。

值得建模工程师和领域工程师注意的是:以上过程并非开环进行的,而是根据实际需要反复进行的。首先关键的问题是模型结构的选取,主要是根据系统的先验知识和应用模型的目的来选择的。建模者应认识这个问题的重要性和困难性,因为有时即使在一个很窄的应用领域里,要找寻一个合适的模型结构也可能是一件非常困难的事,而其重要性正是因为这个选择对估计方案的最终成败是决定性的因素。

假定过程模型的结构已知,参数估计就被定义为支配其动态

特性和 / 或非线性行为的参数值的实验确定。对于初级建模者, 常常认为参数估计带有对于系统毫无所知、白手起家的含义, 或在着手进行参数估计时优选对先验知识要求最少的估计方案。而一个建模老手则喜欢将更多的系统先验知识加入估计方案, 以降低建模花费的代价, 提高建模的精度。

模型的检验与核实是和估计密切相关的。在紧接着估计步骤之后, 应该调查这个模型实际上的“解释”系统行为到了什么样的程度。但遗憾的是, 模型的验证和校验是一个重要而又未很好解决的问题。目前常用的方法有:

(1) 比较实际系统与模型的输出之间的残差。

(2) 将任一组数据拟合的模型, 在其他各组数据上进行检验, 选出在这种交叉检验中适应性较好的模型。

理论计算、缩尺模型实验和实物实验(物理仿真)各有其局限性, 不可偏信任一方, 只有这三大手段较为一致的综合分析结果才是可信的结果。

1.4 系统辨识的应用

几十年的应用表明: 系统辨识和参数估计的用途已经越出控制工程的范围。P. Eykhoff 列出的如图 1.2 所示的辨识理论与应用指出了与系统辨识有关联的一些理论, 也指出其某些应用领域。在每种应用中估计的目的都是必须事先明确的, 因为这个目的决定所需要的精度和可允许的尝试。

系统辨识技术为科学和工程中的问题提供了有利的研究工具, 它的价值已为各种领域中多方面的应用所证实。即使某领域的技术已相当成熟, 但对建模技术的要求不是偏低反而是越来越高。控制技术中的自适应控制和鲁棒控制是最典型的例子。

当然, 能成功地应用系统辨识技术关键是获得可靠的数据和