

AUV Simulation Model
and Its Credibility Evaluation

自主潜航器仿真模型 及其可信度评估

郭晓俊◎主编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

自主潜航器仿真模型 及其可信度评估

主编 郭晓俊
编著 苏绍璟 黄芝平 刘纯武 张羿猛
赵德鑫 刘 晔

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

自主潜航器在海洋科学探索、军事工程等领域有着广泛应用。由于试验条件的限制,仿真是现场试验的重要辅助手段,仿真模型的可信度水平衡量着仿真试验数据的可用程度。本书是一部专门研究自主潜航器仿真模型及其可信度评估理论、方法与技术的著作。作者在全面阐述自主潜航器仿真模型基本理论及常用建模方法的基础上,重点研究面向仿真应用的非高斯混响、匹配场等自主潜航器建模及仿真的新方法及技术,并深入探讨其仿真模型的可信度评估方法及应用。

本书适用于从事航天、航空、航海、能源、工业等方面研究、仿真及试验分析的科学技术工作者、工程技术人员和高等院校教师参考,亦可作为高等院校高年级本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

自主潜航器仿真模型及其可信度评估/郭晓俊主编.

—北京:国防工业出版社,2017.6

ISBN 978-7-118-11331-0

I. ①自… II. ①郭… III. ①可潜器—仿真模型
②可潜器—技术评估 IV. ①U674.941

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 156129 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16½ 字数 378 千字

2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

随着计算机技术的发展,建模与仿真技术在社会、军事领域的应用愈加深入与广泛,计算机仿真成为继科学理论与科学实验之后第三种认知客观世界和改造客观世界的重要手段。随着对海洋科学领域的深入探索和研究,自主潜航器日益成为人们的得力助手。自主潜航器不同于其他领域(空中、地面)的航行器,其运动、通信、目标检测等都涉及较复杂的水文和气候条件,对于用于军事领域的鱼雷等航行器更是如此。由于试验条件的限制,自主潜航器在对模型进行测评或在现场试验中,都不可能实现试验样本的中大样本量(几百甚至上千上万),因此仿真成为其重要的辅助手段,仿真模型的可信度水平衡量着仿真实验数据的可用程度。

遵循钱学森等老一辈科学家的系统科学研究思路,在进行复杂系统研究尤其是复杂巨系统研究时,必须要从系统科学思想出发,采取6个相结合的复杂系统综合研究方法,即定性判断与定量计算相结合、微观分析与宏观综合相结合、本体还原论与整体论相结合、确定性描述与不确定性描述相结合、科学推理与哲学思想相结合及计算机模拟与专家智能相结合。目前,国内对于自主潜航器相关声学模型的建模及仿真研究、自主潜航器仿真模型及试验分析研究的著作还比较缺乏。作者所在研究团队,在自主潜航器建模与仿真领域潜心攻关多年,在相关声学模型建模及仿真模型的可信度评估方面积累了大量的研究成果。结合国家、军队的重大发展研究计划及自然科学基金面上项目的课题研究,本书为自主潜航器相关声学(混响、声呐)模型仿真建模及仿真模型的可信度评估提供了良好的理论及实践参考。

本书共7章,从内容与结构上可以分为四个部分,具体内容如下:

第一部分(第1章):本书的研究背景,论述目前国内外自主潜航器建模与仿真、仿真模型可信度评估的研究现状,以及介绍本书的主要研究内容及组织结构。

第二部分(第2~3章):通过统计模型结合物理现象的方法,以海底混响为建模对象,以 $S\alpha S$ 分布为基本模型,对浅海海底混响的幅值及包络分别进行建模;并研究基于 $S\alpha S$ 模型的混响预白化技术,为非高斯混响噪声背景下的信号检测提供有效方法;从阵列信号出发,以冲击混响为研究对象,对浅海混响背景下的阵列信号探测及信号参数检测进行研究,提出适合冲击混响噪声的高分辨率阵列信号检测算法。

第三部分(第4~5章):基于常用的匹配场处理方法和声场建模方法,将匹配场处理方法应用于静止的水平短线列阵,并研究在二维海洋环境中基于静止水平短线列阵的匹配场定位性能;针对自主潜航器的定位问题,提出了一种基于小波变换的灰粒子滤波算法,并通过对比分析验证该算法的有效性;提出一种基于自主潜航器舷侧阵的浅海远程目标三维被动定位方法,并对该方法在不同信噪比下的定位性能进行评估。

第四部分(第6~7章):基于测试精度的需求给出试验子样容量等级的定义,从静态

模型可信度的测试评估出发,探讨两种最常用两类分布的性能参数——最大航程和命中概率的小子样试验数据测试评估方案,并为两类常用分布的序贯检验试验样本量提供试验样本需求量参考表;总结自主潜航器控制系统模型的不确定性特性,探讨含语义评判的混合动态多属性决策问题决策准则的普适化实现;系统研究灰箱系统辨识理论框架及方法技术,对自主潜航器非线性基本运动模型进行灰箱系统辨识,通过基于一定先验的灰箱辨识将动态模型的可信度测试与评估转化为静态参数的一致性检验。

本书在编写过程中参考了大量的国内外文献和研究成果(列举在参考文献中),在此对这些学者和研究人员表示真诚的感谢。本书的出版得到了国家自然科学基金(面上项目:基于不确定性的 AUV 仿真模型验证及小子样试验分析研究,项目编号:61374008)和国防科学技术大学机电工程与自动化学院仪器科学与技术学科一流课程体系建设项目的大力支持,在此表示诚挚的感谢!本书的出版还得到了国防工业出版社辛俊颖编辑的大力支持,在此表示衷心的感谢。

自主潜航器建模与仿真及其仿真模型的可信度评估技术还在不断的深入发展中,许多研究工作还需要不断的创新与完善。尽管作者在编写过程中做了很多努力,但由于水平有限,不妥和纰漏之处在所难免,敬请广大读者和专家批评指正。

编 者

2016 年 9 月

于国防科学技术大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 AUV 仿真概述	1
1.1.1 自主潜航器	1
1.1.2 自主潜航器仿真技术	2
1.2 国内外研究现状及发展趋势	4
1.2.1 AUV 相关模型研究	4
1.2.2 仿真模型可信度评估研究	7
1.3 本书的组织结构	11
第 2 章 基于 $S\alpha S$ 分布的非高斯混响建模及混响预白化技术	13
2.1 基于 $S\alpha S$ 分布的浅海海底混响建模	13
2.1.1 建模基本假设	13
2.1.2 基于 $S\alpha S$ 分布的混响幅值分布建模	15
2.1.3 基于 $S\alpha S$ 分布的混响包络分布建模	16
2.1.4 $S\alpha S$ 和高斯混合模型的参数估计	16
2.1.5 实验与仿真	19
2.2 基于混响匹配包络的分布建模	26
2.2.1 基于 $S\alpha S$ 分布的混响匹配包络建模	26
2.2.2 实验与仿真	26
2.3 基于混合 $S\alpha S$ 分布的混响混合序列建模	27
2.3.1 贝叶斯理论和马尔可夫链蒙特卡罗方法	28
2.3.2 MCMC 抽样算法	29
2.3.3 混合 $S\alpha S$ 分布混响混合序列建模	30
2.3.4 实验与仿真	34
2.4 高斯 AR 预白化技术	39
2.4.1 目标探测模型	40
2.4.2 平稳化处理	40
2.4.3 自回归模型估计	41
2.4.4 分段白化实现	44
2.5 基于 $S\alpha S$ 分布的预白化技术	45
2.5.1 分数低阶统计量	45
2.5.2 $S\alpha S$ 过程的 AR 模型	46
2.5.3 广义 Levinson - Durbin 算法	47

2.5.4	S α S 过程的白化实现	49
2.5.5	接收检测器	49
2.6	实验与仿真	50
2.7	本章小结	63
第3章	非高斯时空二维阵列信号检测	65
3.1	基于 S α S 分布的阵列信号算法	65
3.1.1	传统 DOA 估计算法	65
3.1.2	基于 S α S 分布的子空间算法	66
3.2	基于 FLOM - MUSIC 的高分辨率二维阵列信号处理算法	67
3.2.1	基于 MUSIC 的二维阵列信号参数估计算法	67
3.2.2	2D - EX - FLOM - MUSIC 算法	68
3.2.3	实验与仿真	69
3.3	基于 FLOM - ESPRIT 的增强型二维阵列信号处理算法	74
3.3.1	基于 ESPRIT 的二维阵列信号参数估计算法	74
3.3.2	2D - FLOM - ESPRIT 算法	74
3.3.3	实验与仿真	77
3.4	本章小结	80
第4章	基于水平短线列阵的匹配场定位性技术	81
4.1	常用的匹配场处理器	81
4.1.1	线性匹配场处理器	82
4.1.2	最小方差无畸变响应匹配场处理器	83
4.1.3	白噪声抑制最小方差无畸变响应匹配场处理器	83
4.1.4	宽带匹配场处理器	84
4.2	声场建模方法	87
4.2.1	波动方程和 Helmholtz 方程	89
4.2.2	射线理论模型	92
4.2.3	简正波模型	93
4.2.4	波数积分模型	95
4.2.5	抛物线方程模型	97
4.2.6	三维声场建模	98
4.3	基于静止水平短线列阵的匹配场定位	99
4.3.1	测试环境和方案	102
4.3.2	测试结果及分析	105
4.4	运动水平短线列阵数据模型	109
4.5	采样位置处理	111
4.5.1	采样位置间的非相干处理	111
4.5.2	采样位置间的相干处理	113
4.6	本章小结	117
第5章	基于 AUV 舷侧阵的目标定位技术	118

5.1	AUV 的定位问题分析	118
5.2	粒子滤波	120
5.2.1	状态空间模型与递推贝叶斯估计	121
5.2.2	序贯蒙特卡罗方法	122
5.2.3	粒子滤波算法	122
5.2.4	粒子滤波算法中的粒子贫化问题	124
5.3	基于小波变换的灰粒子滤波算法	125
5.3.1	AUV 的系统建模	125
5.3.2	灰预测算法	126
5.3.3	基于小波变换的观测噪声统计特性估计	128
5.3.4	WG-PF 算法的执行步骤	129
5.4	基于多模型的粒子滤波算法	130
5.5	自适应扩展卡尔曼滤波算法	132
5.5.1	标准的 EKF 算法	132
5.5.2	系统观测噪声的自适应	133
5.5.3	系统过程噪声的自适应	133
5.6	试验描述与结果分析	133
5.6.1	试验描述	133
5.6.2	试验结果及分析	134
5.7	定位测试	142
5.7.1	定位方法描述	142
5.7.2	二维被动定位	144
5.7.3	三维被动定位	148
5.8	本章小结	155
第 6 章	小子样静态模型可信度测试评估方法	156
6.1	经典频率统计、贝叶斯统计及小子样方法	157
6.1.1	经典频率统计方法及与贝叶斯统计的区别与联系	157
6.1.2	试验子样容量等级界定	158
6.2	模型测试评估中的贝叶斯统计基础	160
6.2.1	贝叶斯统计基础	160
6.2.2	先验信息的量化	162
6.2.3	验后分布的推断	168
6.3	小子样试验设计与静态模型统计推断	170
6.3.1	小子样试验设计	171
6.3.2	小子样试验参数统计推断及序贯检验	171
6.3.3	试验样本容量分析预测	179
6.4	贝叶斯与 Bootstrap 再抽样统计方法	192
6.4.1	无先验信息下的参数 Bootstrap 与马尔可夫链蒙特卡罗	192
6.4.2	确定先验信息下的验后分布	195

6.5 本章小结	197
第7章 基于不确定信息及先验信息的动态模型可信度测试评估方法	198
7.1 AUV 仿真模型的不确定特性	199
7.1.1 不确定信息理论基础	199
7.1.2 AUV 控制系统模型	200
7.2 动态模型基本可信度测试与评估	202
7.2.1 基本可信度评估方法	202
7.2.2 模型可信度测试评估中的关联度解耦——权重分配	205
7.2.3 AUV 控制系统横滚控制模型验证实例	210
7.3 模型综合可信度评估中的混合动态多属性决策问题	216
7.3.1 模型综合可信度评估中的混合动态决策问题描述	216
7.3.2 语义评判的 MADM 解决方案	219
7.3.3 混合动态 MADM 决策体系	221
7.4 基于灰箱系统辨识的 AUV 控制系统动态模型验证	226
7.4.1 基本非线性模型 NARX	226
7.4.2 灰箱系统辨识理论框架	230
7.4.3 灰箱系统辨识在 AUV 控制系统模型验证中的应用	238
7.5 本章小结	243
参考文献	244

第1章 绪 论

1.1 AUV 仿真概述

1.1.1 自主潜航器

无人潜航器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)作为高技术的水下无人作战平台,近年来已在情报、监视与侦察、军事防御以及海洋科学试验和工业等领域发挥了重要作用,因此备受各国海军关注^[1-4]。无人潜航器主要分为遥控式潜航器(Remotely Operated Vehicle, ROV)和自主式潜航器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)两大类,本书主要针对自主式潜航器展开研究。早在19世纪80年代,很多有远见的学者和工程师们就提出要设计建造出一种无人的水下航行器,它不仅要能够以较低的成本代替完成很多有人舰船和潜水器所承担的任务,而且更重要的是要具备到恶劣或者危险地区工作的能力。如今,AUV技术的迅速发展,已将这个梦想逐渐变成了现实^[5-11]:电池技术的成熟使得装备了高性能导航系统的AUV具备长时间巡航的能力;电动力驱动系统的发展使得AUV在航行过程中噪声低而且振动小,这些特点都是在水声测量中所期望的;靠泊系统赋予了AUV不需要被回收回到水面上而仍能持续工作的能力;声呐技术的进步使得当前的AUV已经能够进行复杂的声信号处理,可以使用其主动声呐探测周围环境和可疑目标,或使用被动声呐执行反潜任务。

2009年,美国发布针对中国的《“空海一体战”——战役构想的起点》研究报告,指出AUV是传统反潜平台之外最重要的反潜装备之一,并明确提出了继续研发并装备远程/高续航能力无人水下运载器用于反潜跟踪的建议^[2-4]。目前,美国海军的AUV分为以下四大类:

(1) 便携式AUV,重量为11.3~45.4kg,续航力可达10~20h,潜航器外形各异,没有特别明显的共性特征,如图1.1所示^[12,13]。

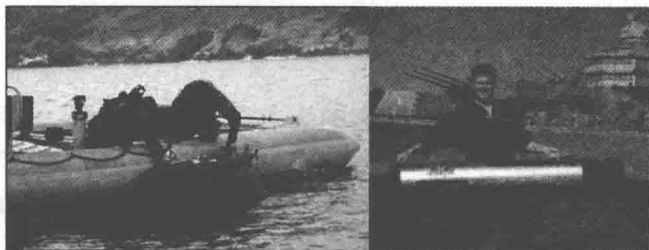


图 1.1 美国海军便携式 AUV

(2) 轻型 AUV, 直径为 0.32m, 重量约为 266.8kg, 有效载荷运载能力比便携式 AUV 大 6~12 倍, 续航力是便携式的 2 倍。

(3) 重型 AUV, 直径为 0.53m, 重量约为 1360.8kg, 各种能力均比轻型 AUV 高 2 倍以上, 一般装有与潜艇兼容的装置, 可通过潜艇布放和回收。

(4) 大型 AUV, 重量约为 10t, 既可以使用水面舰艇(如濒海战斗舰)为母舰, 也可以使用潜艇(如攻击型核潜艇和巡航导弹核潜艇)为母舰。

其中, 重型和大型 AUV 是具有反潜战潜力的类型。2004 年, 美国海军制定的《无人潜航器主计划》中, 将 AUV 反潜战任务归结为以下 3 种作战概念^[2]: 风险控制——监控所有出港或经过关键通道的潜艇; 海上保护——为航母打击群或远征打击群清理出一个安全的作战区域; 安全通道——为航母打击群或远征打击群清理出一条安全航线, 如图 1.2 所示。

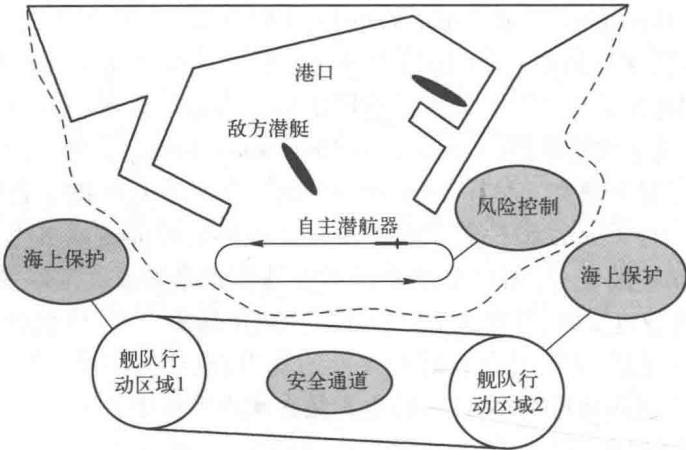


图 1.2 AUV 的反潜作战任务示意图

根据美国海军的《情报、监视与侦察路线图》以及其研究办公室公布的资料, 美军计划在 2014 年建成大排水量 AUV, 从 2017 年起服役, 到 2020 年左右形成一支 AUV 部队。设想中的大排水量 AUV 将完全自主控制、续航时间长、可以从岸上发射、具备浅海活动能力, 而且通过配置不同的装备, 能够长时间执行情报、监视和侦察、长航程的海洋测量、爆炸物处理、反水雷战、反潜战等任务^[12-15]。AUV 的灵活性和隐蔽性特点使它更适合在敏感和存在争议的海区执行水下军事任务, 在未来的海战场, AUV 在反潜战中的作用及表现将成为一个新的关注点。

1.1.2 自主潜航器仿真技术

科学实验是人们改造自然和认识社会的基本活动与主要手段。科学实验有两种途径: 一是在实际系统进行试验, 称为实物试验或物理试验; 二是利用模型完成试验, 即模型研究或系统仿真。一个有效模型必须能够较好地反映原型的主要表征、特性及功能, 并具有如下基本性质: 普遍性(或等效性)、相对精确性、可信性、异构性及通过性^[16]。

(1) 普遍性是指一个模型可能与多个系统具有相似性, 即一种模型通常可以描述多个相似系统。

(2) 相对精确性是指模型的近似度和精度都不可超出应有限度和许可条件。

(3) 可信性是指模型必须通过可信度测试与评估,使之具有满意的可信度。

(4) 异构性是指对于同一系统,模型可以具有不同的形式和结构,即模型不是唯一的。

(5) 通过性,即模型可视为“黑箱”,通常能够利用输入/输出实验数据辨识出它的结构和参数。

仿真试验,即利用仿真模型,研究由于成本、试验周期、环境等因素制约而难以大量进行或无法进行现场(物理)试验的过程,仿真试验大量应用于武器性能评估领域^[17-21]。仿真试验所用模型的可信度水平成为衡量仿真试验被用户接受及对现场试验的辅助程度的重要因素。

由于各种新技术的不断涌现和性能指标突破、武器更迭速度加快,在 AUV 相关武器采办、论证、研发、作战效能评估各阶段所能支配的时间大大缩短。特别是在具有高复杂度、高成本特点的相关武器领域,现场试验的次数及试验覆盖率受到较大限制。仿真试验技术应运而生,成为现场试验的主要辅助手段。具有较高可信度的仿真模型,可以产生用户需要的较大数量的试验数据,对现场试验的试验结果分布提供一定的先验认知,仿真模型的可信度水平是仿真试验数据可使用程度的衡量标准。

仿真试验与仿真验证技术,已被越来越多地应用在国内外军工产品研制中,它通过各个阶段的建模与仿真和仿真试验获得充分可信的武器装备性能的相关信息,减少了武器装备采购过程中的盲目性和不确定因素,增强了决策的合理性和科学性^[16]。仿真试验是相对于真实产品的物理试验而言的。是在长期积累的大量有关数据、有关的动力学模型以及各类三维模型的基础上,利用高性能计算机、网络环境、传感器或各种虚拟现实设备,建立能方便地进行人机交互的虚拟环境或虚实结合的环境,在此环境中对实体、物理样机或虚拟样机进行试验,用可视化的方法观察被视物体的性能及其相互间的关系,并对试验结果进行分析与研究^[17]。军工领域的仿真试验是指在虚拟环境条件下,利用计算机建模与仿真技术、通信技术和计算机网络技术,对武器装备性能进行的试验,主要考核武器装备功能和性能是否达到设计要求。它为武器装备的性能测试、试验、战术技术指标考核、综合性能评估和开发提供了一种新的途径,是国防科技工业领域中的一项关键技术及军工产品的一项重要试验手段^[18]。

仿真试验技术属于可控制的、无破坏性的、耗费小并允许多次重复的测试手段。在复杂产品的研制过程中,仿真试验可以在一定程度上替代传统的物理试验,减少物理样机制造、测试次数,使测试不受场地、时间和次数的限制,并实现对测试过程的记录、重复与再现,实现设计者、产品用户在设计阶段信息的互反馈,使设计者尽早发现并解决设计过程中存在的潜在问题,从而达到缩短新产品测试周期、降低测试费用、提高产品质量的目的^[17]。与传统试验相比,仿真试验能够缩短研制周期,降低研制费用和 risk,形式更加保密,并且能够实现某些传统试验中无法实现的试验重现。

早在 20 世纪 60 年代,美国的海军实验站和日本的三菱重工业公司就已经将仿真应用到 AUV 的研制中了,建成了自导 AUV 制导全系统的半实物仿真系统^[22]。此后,用于 AUV 半实物仿真和全数字仿真的 AUV 仿真软件得到迅速发展。英国的 Marconi 水下系统在“鲷鱼”和“矛鱼”的研制及验证中起着重要作用。美国罗德岛的美军海军水下站中

心(National Undersea Warfare Center, NUWC)战术集成综合环境(SETI)是其仿真试验成功应用的实例之一,它可将高置信度的仿真 AUV 与舰队中一定深度和速度下作战的潜艇集成在一起,利用水下跟踪系统、水声遥测系统和广域网技术,它还可将仿真武器与战术声呐系统和潜艇火控设备集成在一起^[23]。我国在 20 世纪 50 年代也开始军事仿真有关理论及软硬件的研究,航天一院和国防科技大学联合研制的 CZ2E 运载火箭姿控系统半实物仿真试验系统、国防科技大学构建的基于仿真的采办(Simulation - Based Acquisition, SBA)协同环境体系结构为 SBA 提供了基于网络的框架支持。但因为缺乏统一的标准(国家标准或军事标准),在研制过程中并不能很好地实现跨系统的集成或联合作战演练等。国内开展 AUV 有关模型仿真研究始于 20 世纪 50 ~ 60 年代,研究的主要方向也由模拟机为平台的控制回路数学仿真转变为数字机、工作站为平台的各类 AUV 仿真软件技术设计^[22,24-26]。据统计,仿真试验技术可缩短导弹武器研制周期 20% ~ 40%,减少 AUV 实航次数 50% ~ 80%,仿真试验技术已在各类导弹(含 AUV、运载火箭)、卫星、舰船等的研制中发挥举足轻重的效用。

1.2 国内外研究现状及发展趋势

1.2.1 AUV 相关模型研究

1. 声学相关模型

当代人类对海洋的认知需求是多方面、多层次的,大到社会生活和军事安全,小到各个具体的部门行业,利用声呐探测和认识海洋已和人类社会的进步发展息息相关。例如,海洋环境探测中,需要借助声呐了解海洋的结构分布、海底的材质组成、水流的变化特性、内涡湍流的成因等;资源勘探中,需要利用自然资源对声呐声波的反射、散射性质与海底环境不同的特性发现和估计埋藏于海底的自然资源的位置及分布;生物探索中,需要利用声呐了解处于海洋深处的生物的生态特性和活动规律;海运护航中,需要利用声呐探测发现前方及周围的障碍和危险,并提前进行规避;军事上对声呐的依赖性更加强烈,声呐可以及时发现并跟踪隐藏于海洋中的危险目标,以防御和阻止敌对势力的入侵,此外如潜艇和水下航行器等水下航行工具还需借助声呐进行必要的水下通信。

其实早在 20 世纪人们就已经发现,声波是水媒质中唯一能够远距离传输信息的载体^[27-31],因此声呐技术的发展和应用一直被重视和强调。第二次世界大战结束至今的七十多年是声呐技术突飞猛进的发展时期,电子技术特别是微电子技术的发展、人们对海洋中声传播规律的掌握,以及导弹武器和核潜艇的出现等,是推动声呐技术发展的主要因素^[32]。进入 21 世纪,各国之间在海洋领域的竞争空前激烈,从军事侦测到资源勘探,从国土安全到社会生活,声呐在军事、环境、资源、生物等众多领域中都具有非常广阔的应用前景和很高的应用价值。例如在军事领域,美国海军“洛杉矶”级核潜艇上一直装备有最先进的 TB-23/BQ 声呐设备,使其具备快速精准的搜索和攻击能力。2010 年 3 月韩国“天安”号事件的发生,再次引发了各国海军对潜艇等水下目标的探测能力的强烈关注,美国海军决定研发新技术来提高声呐设备的反潜能力。

由此可见声呐技术的重要性非同一般。人们根据运用目的和范围的不同将声呐设计

成满足不同指标的探测设备,但其工作的基本原理都是相同的,即依靠接收和分析在水中传播的具有某些特性的声波实现对目标的探测和定位。声呐按照工作方式的不同主要分为两种基本类型:一种是被动式声呐,其设备本身不发射声波,而是通过水听传感器接收来自指定方向范围内的声波信号,并通过信号处理从噪声信号中提取目标信息;另一种是主动式声呐,其通过自身的发射器向指定方向发射被设计成具有某种特性和规律的声波,并通过接收和处理回波提取目标信息。近年来,由于潜艇的消声静音技术发展迅速,依靠被动声呐的探测性能很难发现潜艇的行踪,这无疑给各国的海域带来了巨大的安全隐患,反潜技术面临新的挑战。2012年10月发生的美巡洋舰与核潜艇的相撞事故就能从侧面反映出探测声呐的现状处境。美国海军负责潜艇战的一位高级官员在向美国国防部提交的一份报告中指出,很多国家的静音潜艇经常在沿海高噪声的浅水水域活动,以往用于探测舰船发出噪声的被动声呐目前已经无法发现处于攻击位置的低噪声柴电潜艇,而唯一能够发现其行踪的装备就是主动声呐,因此主动声呐的地位和作用被再一次强调。近海浅水一直是噪声来源多、干扰强的水域,人类频繁的海上活动、各种船只进出港口、浅海生物的活动、潮汐改变引起的海况变化,都会生成各种不同频段的噪声,对目标噪声产生干扰甚至淹没目标噪声,这将严重阻碍被动声呐的正常工作。因此世界各国现役的各类潜艇和舰船上,大部分均装有用于发现目标和攻击目标的主动攻击声呐,以加强舰船在危险形式下的生存能力与作战性能。除了军事运用,在海底自然资源勘探、海运障碍规避等诸多领域,都必须借助主动声呐来完成任务。采用主动声呐可以直接在声波照射范围内进行目标探测,理论上即使目标噪声很小也无法逃避声呐的搜索。然而大量研究和试验^[33-40]表明,浅海环境下主动声呐的探测性能也受到强烈的干扰。分析主要原因:浅海海水深度较浅,发射的声信号在水中进行中远距离传播时会经历海面及海底的多次反射,引起强烈的多径效应,影响目标检测的精度;此外,由于声呐距海底的距离较小,海底对声波的散射作用会产生强烈的混响干扰,更加不利于目标信号的检测。下面具体分析浅海下混响的形成及其对声呐的影响。

对于主动声呐,混响是其工作时特有的一项背景干扰。声在海洋中传播时,由于介质的各种非均匀性及其界面的不平整性,将产生部分散射^[41]。混响就是由海洋中大量无规则散射体对主动声呐信号进行反向散射后在接收端叠加形成的随机噪声^[42,43]。与环境噪声相比,混响与发射信号的特性更为相似,从频谱上几乎无法区分两者,这严重干扰了声呐对真实目标信号的检测能力,降低了主动声呐的工作性能。混响的形成起源于散射体的散射作用,通过对散射体来源的不同可以把混响划分为海面混响、体积混响以及海底混响。海面的散射作用^[44,45]起源于海洋表面,由海风、引力、人类及海洋生物的活动引起海洋表面的不平整界面,以及海水翻动形成的气泡层,都能对声波产生散射作用,这类散射引起的混响归类为海面混响。体积混响^[46,47]的散射来源较为复杂,包括海洋中广泛分布的鱼类、海洋生物和微生物、杂质以及海水温度、盐度等的变化引起海水介质密度的非均匀性等,均可引起不同程度的散射。海底的散射^[48-51]来源于海底界面的不平整性。海底介质的非均匀性以及分布于海底表面的各种杂质均可引起不同程度的散射,这类散射引起的混响归类为海底混响。此外,根据产生混响的散射体与声源、接收水听器的距离远近不同可以将混响分为近程混响和远程混响。

浅海区域是个复杂的混响生成环境。浅海是人类活动最频繁的海域,各种海湾港口

是海运船只出入的密集场所,加上潮汐和海风等外界因素的作用,加剧了海面介面的不平整性,也加强了海面的散射作用。但事实上,由海底散射形成的混响产生的影响往往更加强烈。从地形结构上讲,浅海区域是大陆架延伸的地带海水深度较浅,海底距声源的距离较深海更近,因此海底对声波的散射作用更加强烈;此外浅海区域的海底表面介质成分复杂,介质散射性强,进一步加强了海底散射作用的强度。

可以说浅海海底混响是主动声呐工作时的主要干扰,其对声呐探测产生诸多方面的影响。从浅海环境来讲,首先海底混响的强度等级较强,在主动声呐工作时,其真正感兴趣的目标信号可能淹没于高强度的混响噪声中,加之目标信号与混响噪声存在诸多的相似性,加大了信号检测的难度;其次,海底混响的强度等级受环境和散射体分布影响,连续的混响波动将影响系统检测阈值的大小和分级强度^[52],增加了系统检测的虚警概率,造成检测过程的不稳定。海底混响已成为水声领域广泛关注和研究的对象^[53-59]。此外,主动声呐的硬件配置同样影响混响的分布形成。被探测目标的自身特性是决定目标信号强度的重要方面,但如尺寸材质、反射系数等目标特性通常不由声呐决定,因此声呐只能通过发射具有一定特性规律的声波对目标进行照射并接收带有目标特征信息的回波进行判断。声波在激励目标的同时也引起了有效声传播区内散射体的声散射,因此散射形成的混响对声呐的影响是不可避免的。具有不同波束宽度(窄指向性)的声呐能引起其照射范围内散射体分布特性的改变,从而改变混响的统计特性。

散射体的随机分布决定了混响的形成是一种随机过程现象,通过统计模型建立与现象的联系是一种有效的分析方法,基于建模方式分析混响的手段已受到业内的一致认可。而散射体分布变化的多样性导致混响统计特性的不同,使得建模的多样化发展趋势成为必然。根据海底混响建模目的的不同可以大致分为两种情况:一种是通过建模实现不同海底环境中的混响噪声合成,为声呐仿真和性能估计提供可靠和准确的模拟噪声源^[60-63];另一种是通过建模找到能高度拟合混响实验数据的模型^[64-69],为提高后期信号处理能力做准备。纵观数十年混响建模的发展历程可以发现,混响模型的好坏直接影响到对混响统计特性的认识及基于模型的抗混响研究技术的发展,原因有两点:一是模型的适用性建立在与混响现象相联系的基础之上,当统计模型可以合理解释特定环境下混响形成的自然过程时,模型的统计分布特性往往可以有效反映混响的统计特性,从而提高模型的可靠程度;二是模型的准确性往往反映在与混响分布的拟合程度上,具有更高拟合度的模型能保证基于此模型的算法具有更小的误差及更高的精度。因此在建模时需要综合考虑两方面因素,使模型与实际现象相结合。

经典的高斯模型在散射体分布满足中心极限定理(Central Limit Theorem, CLT)条件下能较好地解释混响过程,但在声波发射条件改变或是特殊的海洋环境下,散射体分布不能满足 CLT 时,混响幅值分布将偏离高斯分布。在复杂易变的浅海环境下,产生的混响会严重干扰主动声呐的目标探测过程,增加系统的信号处理误差,降低声呐定位的准确度。特别是海底混响,其强度由介面的近距离散射效应以及介质的强散射系数决定,介面的不平整性能引起声波入射时的掠射角的变化,部分强烈的散射作用导致混响幅值具有一定的冲击特性,加剧了混响包络起伏的波动性。高斯模型在建模浅海海底混响上已不具备普适性,寻找和选择一个更具代表性的非高斯模型将更加有利于我们认识和了解浅海海底混响。非高斯混响建模在国外水声研究领域中有较为丰富的理论成果,但在国

内还处于探索与起步阶段,本书的相关研究内容在此严峻的背景形势下应运而生,研究非高斯混响建模的理论意义和实用价值十分巨大。

2. AUV 控制系统模型

AUV 控制系统的作用是:操纵 AUV 沿着预定的弹道航行,当 AUV 在航行过程中受到干扰偏离预定弹道时,控制系统能操纵 AUV 回到预定的轨迹,使 AUV 能按预定弹道航行。AUV 的控制系统有一百二十多年的历史,自 AUV 发展初期至现代有了很大的发展。

AUV 空间一般运动有 6 个自由度,其中包括重心空间运动的 3 个自由度和 AUV 绕重心转动的 3 个自由度。6 个自由度的运动可归纳为纵向运动和侧向运动。纵向运动包括前进运动、爬潜运动和俯仰运动。侧向运动包括侧移运动、偏航运动和横滚运动。描述 AUV 空间运动的独立变量,称为 AUV 的运动参数。

AUV 控制系统的主要作用就是对这些运动参数的部分或全部进行自动控制,使 AUV 按战术要求的战术基准弹道航行。按照所控制的参数不同,分为航向控制系统、深度控制系统、纵倾控制系统、横滚控制系统等。现代 AUV 航行深度范围大,航程远,航速高,变速制,AUV 的特征参数在很大范围内变化,并要求实现各种战术弹道,如垂直命中末弹道等,对控制精度要求特别高,传统的控制技术已不能满足要求,需要采用最优控制、最优估计、系统辨识、自适应控制、鲁棒控制、容错控制、智能控制等现代控制理论与技术。高速度、大容量微型计算机在 AUV 上的在线运行,为应用现代控制理论分析、综合、设计复杂的 AUV 导航与控制系统提供了可能,有利于促进 AUV 导航与控制大系统向信息化、综合化、智能化、高精度方向发展。

AUV 控制装置(自动驾驶仪)和 AUV 按照闭环负反馈原理组成 AUV 导航与控制系统。其工作原理是:敏感元件测量 AUV 的实际运动参数,并输出相应的信号同运动参数的设定值进行比较,当 AUV 偏离轨道限定的战术基准弹道时,即产生偏差信号,经信息处理装置综合放大后成为符合控制规律的信号,操纵伺服机构(称为舵机),使舵面产生相应的偏转。由于 AUV 自控系统采用负反馈原理连接,其结果是 AUV 运动趋向按战术基准弹道航行。当 AUV 达到战术要求的航行姿态时,控制信号为 0,舵面回到平衡状态,AUV 按所要求的弹道航行。

对 AUV 控制系统的研究大多集中在 AUV 流体动力方程、运动方程及控制率的研究上,仿真技术在 AUV 控制系统的研究中发挥了重要作用^[70],相关数学模型(全数字仿真)及半实物模型(半实物仿真)广泛应用在 AUV 应用研究的各个阶段。对 AUV 控制系统仿真模型的研究,旨在通过仿真试验测试其模型结构或者特征参数的性能表现,节约实航试验成本。

1.2.2 仿真模型可信度评估研究

1. VV&A 与可信度测试评估理论体系

在仿真模型开始应用的 20 世纪 50 年代,人们已经开始对模型的准确性及对于应用的可信度进行研究^[71]了。在 20 世纪的 80 年代左右,校核、验证与确认(Verification, Validation and Accreditation, VV&A)开始作为一个整体概念出现在各种资料及文献中,到 90 年代, VV&A 理论不断得到充实和丰富,以美国国防部建模与仿真办公室(DMSO)为代表的各国军方都为本国的 VV&A 标准化和规范化工作制定了基本纲领^[72-75]。这些标准基

本上涵盖了贯穿于全生命周期的 VV&A 工作的具体步骤、遵循原则、所有步骤的 V&V 评估方法、数据有效性、文档管理等方面,大大促进了 VV&A 技术在各个领域仿真系统的可信度评估工作。尤其是其中的 IEEE1278.4 标准和 IEEE1516.3 标准分别为 DIS 和 HLA 仿真用户和开发者提供了 VV&A 指导。几乎与 VV&A 理论研究同步,测试与评估(Test and Evaluation, T&E)的理论体系及相关应用领域内的实现也在同时进行,国际测试评估协会(International Test and Evaluation Association, ITEA)尤其是军方有关测试评估部门如美军测试评估部(U. S. Army Test and Evaluation Command, ATEC)等,尤其重视建模与仿真(Modeling and Simulation, M&S)在军事性能测试评估(Operational Test and Evaluation, OT&E)中的应用,并提出有必要将 M&S 的可信度测试评估工作纳入到现场试验的规划中,以便更好地为仿真试验模型的验证提供匹配的现场试验数据^[76-79]。

国内对 VV&A 理论的研究起步相对较晚,在 20 世纪 90 年代以前,国内期刊或者学术会议上发表的有关 VV&A 的文章很少,自 90 年代起,以国防科技大学、哈尔滨工业大学、北京航空航天大学、西北工业大学、空军工程大学等为代表的多家单位均较系统地开展了 VV&A 理论研究工作^[24,80-84]。国内一些单位在实际仿真系统的测试、验证方面以及仿真系统可信性问题方面进行了一些研究工作,如国防科技大学开发了战略导弹六自由度实时仿真系统^[80],北京航空航天大学对飞机防滑控制系统进行了分布式实时仿真,另外西北工业大学和哈尔滨工业大学等单位也进行了相关的研究,基本上对国外 VV&A 理论研究进行了较好地跟踪和发展。目前国内还未颁布有关 VV&A 工作的标准及规范,基本上上述的研究都是参考欧美的相关标准进行的。刘丽等^[85]在 M&S 全生命周期中有效地进行 VV&A 过程和测试与评估(Test and Evaluation, T&E)过程,探讨了 M&S、VV&A、T&E 三者的关系。曹星平等^[86]分五种应用背景讨论了 VV&A 与 T&E 的区别与联系,并探讨了将两者集成实施的方法。张伟等^[87]提出了基于模型测试的作战仿真模型可信度分析方法,指出应该将测试过程、测试分析贯穿于作战仿真模型的建模过程中,以提高作战仿真模型可信度。

2. 小子样统计推断理论及应用

从 20 世纪 80 年代起,美国等国就开始采用贝叶斯小子样理论对导弹的精度和可靠性进行评估应用^[88-90]，“天空闪光”因其很强的技术继承性,仅 6 次试验就满足了作战鉴定的需求,是小子样方法成功应用于武器系统的典型。俄罗斯针对武器系统的 M&S 及其 VV&A,较深入地研究了小子样方法,其“白杨”-M 及后续系列继承和发展了其着眼于全生命周期、多源信息的试验评估理念^[91]。贝叶斯方法的引入在减少专家(Subject Matter Expert, SME)主观干扰、减少现场试验次数、充分利用已有信息等方面表现优越^[92]。

小子样静态模型可信度评估主要体现在小子样情况下两个总体或多个总体的分布相容性检验,其内容包含贝叶斯点估计、区间估计及贝叶斯序贯检验等几个主要部分^[93],其旨在实现:同等精度水平下,实现统计推断所需的数据量较少;在同等数据量情况下,实现更高精度的统计推断。贝叶斯小子样理论是充分利用多源信息(总体信息、样本信息、先验信息)实现小样本高精度的数据统计推断方法。贝叶斯方法要求先验分布已知或可推断,近年来贝叶斯理论的研究热点也多集中在先验分布的求解方法上,针对各种应用背景下的多种先验分布下的共轭先验分布也已经得到推导^[94,95]。虽然共轭先验分布提供了相当大的便利,但合理的先验分布的选取则是第一重要的,不合理的先验分布可能会影响