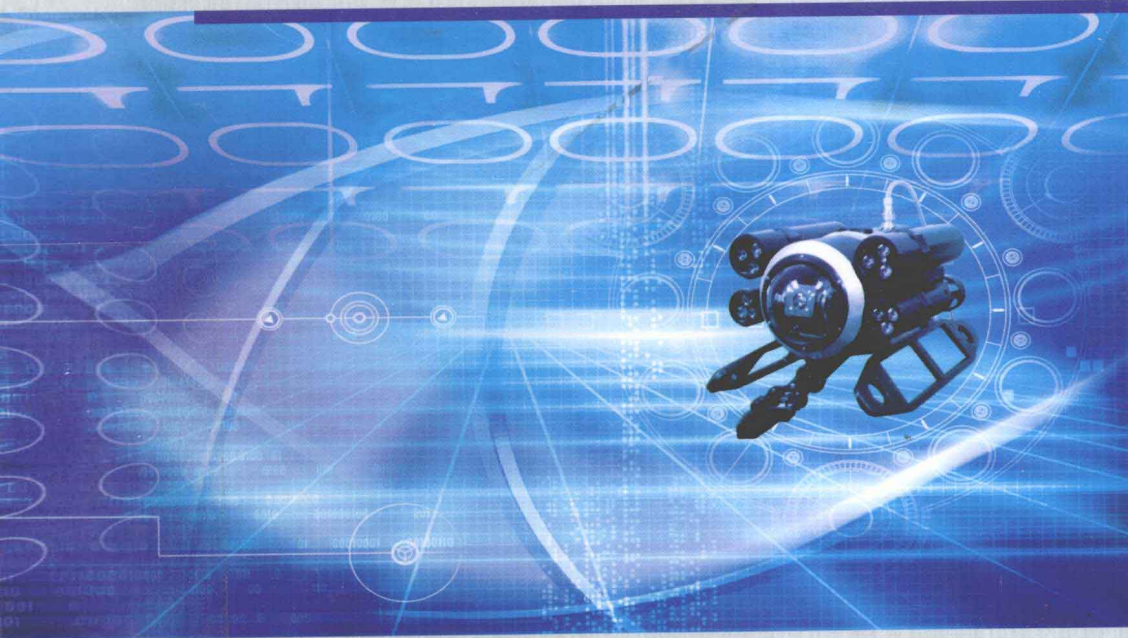


# 水下机器人 故障诊断与容错控制技术

■ 朱大奇 胡震 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 水下机器人故障诊断与 容错控制技术

朱大奇 胡震 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

水下机器人故障诊断与容错控制技术/朱大奇,胡震著. —北京:国防工业出版社,2012.2

ISBN 978-7-118-07939-5

I. ①水... II. ①朱...②胡... III. ①水下作业机器人-故障诊断②水下作业机器人-容错技术  
IV. ①TP242.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第026658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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 880 × 1230 1/32 印张 7½ 字数 210 千字

2012年2月第1版第1次印刷 印数1—2200册 定价42.00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

# 序 言

由于海洋深处工作环境的复杂性、不可预测性,水下机器人一旦出现故障,不仅无法完成水下作业任务,而且机器人本身有时也无法回收,损失巨大,因此水下机器人可靠性控制技术与设计显得十分关键。

作为一门新兴的交叉学科,水下机器人可靠性控制技术主要研究水下机器人控制系统的故障诊断与容错技术,包括水下机器人传感器系统故障诊断与容错控制、水下机器人推进器系统故障诊断与容错控制及水下机器人关键设备的故障监测与容错处理等。

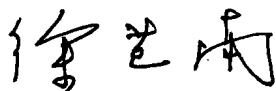
本书在综述近年来水下机器人故障诊断与容错控制技术研究进展的基础上,重点阐述水下机器人传感器系统故障诊断与容错控制、水下机器人推进器系统故障诊断与容错控制理论及其仿真研究和应用开发。最后以实际水下机器人为研究对象,以深水实验池为平台,研究传感器故障诊断与容错控制、推进器故障辨识与容错控制水池实验和诊断系统,逐个阐述其诊断原理,分析实验数据,力图给出一个系统实用化的水下机器人故障诊断与容错控制方法。

本书作为国内外第一部水下机器人可靠性控制方面专著,主要创新之处在于:提出基于有限脉冲响应滤波器(FIR)的水下机器人传感器故障监测与信号替代容错控制算法,水下机器人传感器故障的神经网络递推容错算法;应用水下机器人推进器故障辨识的多维信息融合方法,解决推进器连续时变故障的在线辨识问题;将遗传优化方法引入

水下机器人控制律重构之中,提出水下机器人推进器故障控制律重构的遗传优化方法。

本书既有故障诊断与容错控制算法的计算机仿真,也有基于具体水下机器人系统的故障诊断与容错控制技术的实验研究和实际系统的开发,是一本系统化的水下机器人控制系统可靠性技术专著。

中国船舶科学研究中心“蛟龙”号深潜器总设计师

Handwritten signature in black ink, consisting of three characters: 徐, 巴, 利.

# 前 言

海洋是人类发展的四大战略空间(陆、海、空、天)中继陆地之后的第二大空间,是生物资源、能源、水资源和金属资源的战略性开发基地,是最有发展潜力的空间,对国家经济与社会发展产生着直接、巨大的支撑作用。作为人类探索和开发海洋的助手,水下机器人将在这一领域发挥重要作用。

目前,水下机器人研究已得到广泛关注,有不少研究成果和产品问世,但有关水下机器人的专著还较少。中国科学院沈阳自动化研究所蒋新松院士、封锡盛院士等著述的《水下机器人》(辽宁科学技术出版社,2000.11)是一本系统化的水下机器人研究专著,主要阐述水下机器人的整体设计与控制技术,对水下机器人关键问题之一的“控制系统可靠性技术”只作了一些初步的介绍。

在国际上,水下机器人控制权威意大利 Gianluca Antonelli 教授,在2006年再版其专著 *Underwater Robots Motion and Force Control* 时,新增增加了一章水下机器人故障诊断与容错控制内容,但未有系统地论述。目前,国内外还未见到专门研究水下机器人故障诊断与容错控制方面的专著。

本书以国家“863计划”项目“自治水下机器人故障诊断与容错控制关键技术研究”(2006AA09Z210),国家自然科学基金项目“水下机器人可靠性控制关键技术研究”(50775136)、“自治水下机器人路径规划与安全避障技术研究”(51075257),交通运输部基础研究计划“自治水下机器人水下搜救与路径规划技术”(2011-329-810-440),上海市科委创新行动计划“新型 ARV 研制与水下安全航行技术”

(10550502700), 长三角联合攻关项目“具有冗余推进系统的水下机器人故障诊断与容错控制技术”(10595812700), 上海市优秀学术(科)带头人计划“自治水下机器人可靠性控制技术研究与应用”(11XD1402500), 上海市自然科学基金项目“AUV 推进系统故障诊断技术”(07ZR14045), 以及高校博士点基金项目“数据驱动的自治水下机器人传感器故障诊断技术”(20093121110001)的研究成果为基础, 在综述近年来水下机器人故障诊断与容错控制技术研究进展的基础上, 重点阐述水下机器人传感器系统故障诊断与容错控制、水下机器人推进器系统故障诊断与容错控制理论及其仿真研究和应用开发成果。

本书在内容阐述上有以下特点:

- 通俗易懂, 条理清晰, 便于学习。注重物理概念内涵的阐述, 尽量避免繁琐的数学推导。
- 注重理论联系实际, 加强故障诊断与容错控制实验的介绍。
- 注重内容的层次性和系统性。首先介绍相关基础理论, 从水下机器人基本结构、水下机器人控制技术, 到水下机器人故障诊断与容错控制综述; 接着从传感器故障诊断与容错控制、推进器故障辨识与容错控制, 到水下机器人故障诊断与容错控制仿真研究与开发, 逐个阐述其诊断原理, 分析试验数据, 力图给出一个系统化的水下机器人故障诊断与容错控制理论。

本书由上海海事大学水下机器人与智能系统实验室朱大奇教授和中国船舶科学研究中心(中国船舶重工集团公司第七〇二研究所)水下工程研究室胡震研究员共同撰写。

由于作者水平所限, 时间仓促, 本书难免存在不足和错误之处, 敬请广大读者和专家批评指正。

作 者

2011年9月于上海临港新城

## 致 谢

本书由中国工程院院士、哈尔滨工程大学徐玉如教授主审。徐院士在百忙之中审阅了全部书稿,从书稿整体架构的设计到相关名词的阐述与翻译都给出了具体指导,既对书稿进行了充分肯定,也提出了许多宝贵意见和建议。徐院士毕生从事潜水器研究,其真知灼见使作者受益匪浅,在此深表感谢!

清华大学博士生导师、“长江学者”周东华教授,华中科技大学博士生导师徐国华教授也审阅了部分书稿,提出了许多宝贵建议,使作者颇有收获!

书中引用了一些学者的论著和研究成果,部分内容来自作者的博士生刘乾、颜明重、袁芳、孙兵、康与涛、邓志刚的研究课题,没有这些研究成果的加入,本书难成体系。为此向他们表示深深的谢意!

朱大奇、胡震



# 目 录

第 1 章 水下机器人概述	1
1.1 水下机器人的相关概念	1
1.2 水下机器人研究概况	3
1.2.1 缆控水下机器人(ROV)研究概况	4
1.2.2 自治水下机器人(AUV)研究概况	7
1.2.3 国内水下机器人研究概况	12
1.3 水下机器人的组成	13
1.3.1 水下机器人的硬件系统	13
1.3.2 水下机器人的导航与通信系统	20
1.3.3 水下机器人的控制系统	22
1.4 水下机器人技术研究展望	24
1.4.1 水下机器人的可靠性技术	25
1.4.2 水下机器人的能源动力技术	26
1.4.3 水下机器人的水下目标探测与识别技术	27
1.4.4 水下机器人的导航定位与水下通信技术	28
1.4.5 自治水下机器人的水下路径规划与安全 避障技术	29
1.4.6 水下机器人的运动控制技术	31
1.4.7 水下机器人的其他技术	32
参考文献	33

<b>第2章 水下机器人控制技术</b> .....	36
2.1 水下机器人的运动学基础 .....	36
2.1.1 坐标系及坐标变换 .....	36
2.1.2 水下机器人空间运动数学模型 .....	40
2.2 水下机器人的动力学基础 .....	44
2.2.1 水动力和力矩 .....	45
2.2.2 推进器的推力和推力矩 .....	48
2.2.3 浮力、重力和浮力矩、重力矩 .....	49
2.2.4 外部扰动力 .....	49
2.2.5 水下机器人空间动力学运动方程 .....	49
2.3 水下机器人的推进器布置 .....	52
2.3.1 推进器的数量与布置要求 .....	52
2.3.2 几种常见推进器的布置及推力计算 .....	53
2.4 水下机器人的基本控制回路 .....	58
2.4.1 自动定深回路和自动定高回路 .....	58
2.4.2 自动定向控制回路 .....	59
2.4.3 航行速度与定位控制回路 .....	60
2.5 水下机器人的闭环控制算法 .....	61
2.5.1 数字PID控制算法 .....	61
2.5.2 自适应控制算法 .....	64
2.5.3 滑模控制算法 .....	65
2.5.4 模糊控制及神经网络控制算法 .....	69
参考文献 .....	73
<b>第3章 故障诊断与容错控制技术</b> .....	75
3.1 故障诊断与容错控制的目的与意义 .....	75
3.2 故障诊断方法 .....	77

3.2.1	故障诊断方法分类	77
3.2.2	基于知识的故障诊断方法	78
3.3	容错控制技术	86
3.3.1	容错控制的基本概念	86
3.3.2	容错控制的方法	86
3.4	水下机器人故障诊断与容错控制	87
3.4.1	水下机器人故障诊断方法	88
3.4.2	水下机器人容错控制技术	91
3.4.3	水下机器人故障诊断与容错控制技术展望	94
	参考文献	95
<b>第4章</b>	<b>水下机器人传感器故障诊断</b>	<b>102</b>
4.1	水下机器人的主要传感器及其故障	102
4.1.1	导航与定位系统传感器	102
4.1.2	姿态与位置传感器	103
4.1.3	附属装置传感器	103
4.2	有限脉冲响应滤波器故障检测算法	103
4.2.1	水下机器人的有限脉冲响应滤波器模型	103
4.2.2	水下机器人的传感器故障检测算法	105
4.3	OUTLAND1000 水下机器人实验系统	107
4.3.1	OUTLAND1000 传感器与推进器	107
4.3.2	OUTLAND1000 通信系统与水面支持系统	107
4.4	基于 FIR 的传感器故障诊断算法与水池实验	109
4.4.1	OUTLAND1000 方向传感器(罗经)故障 设定及实验	110
4.4.2	OUTLAND1000 方向传感器故障检测及 实验分析	114
4.4.3	传感器时变性故障诊断的实验及结果	119

参考文献 .....	123
<b>第 5 章 水下机器人传感器故障容错控制</b> .....	<b>125</b>
5.1 基于 FIR 的阈值故障检测与容错控制 .....	125
5.1.1 OUTLAND1000 状态阈值故障检测与 容错控制设计 .....	127
5.1.2 OUTLAND1000 阈值故障检测与 FIR 替换容错实验结果分析 .....	127
5.2 基于 FIR 信噪比的故障检测与神经网络信号 逆推容错控制 .....	131
5.2.1 OUTLAND1000FIR 信噪比故障检测与 容错控制设计 .....	131
5.2.2 OUTLAND1000FIR 信噪比故障检测与 容错实验结果分析 .....	134
5.3 传感器时变故障的神经网络信号逆推容错控制 .....	137
参考文献 .....	138
<b>第 6 章 水下机器人推进器故障诊断与容错控制</b> .....	<b>140</b>
6.1 神经网络故障辨识模型 .....	141
6.1.1 SOM 自组织特征映射神经网络 .....	141
6.1.2 BP 神经网络 .....	143
6.1.3 CMAC 神经网络 .....	144
6.2 水下机器人推进器故障在线辨识信息融合算法 .....	150
6.2.1 OUTLAND1000 推进器布置 .....	150
6.2.2 OUTLAND1000 推进器故障诊断信息 融合模型 .....	151
6.3 推进器故障在线辨识实验结果分析 .....	156
6.3.1 神经网络在线辨识实时性分析 .....	157

6.3.2	神经网络在线辨识准确性分析 .....	159
6.4	推进器拥堵故障的容错控制及水池实验 .....	161
6.4.1	单参数容错 .....	162
6.4.2	双参数控制容错 .....	163
6.4.3	容错控制实验结果分析 .....	163
	参考文献 .....	165
<b>第7章</b>	<b>水下机器人故障诊断与容错控制仿真 .....</b>	<b>167</b>
7.1	FALCON 推进器的配置 .....	167
7.1.1	推进器推力分配 .....	169
7.1.2	推进器故障与优先权矩阵 .....	171
7.2	推进器故障诊断与容错控制模型 .....	172
7.3	推进器单故障诊断与容错控制仿真 .....	173
7.3.1	仿真算例 .....	173
7.3.2	推进器故障与容错控制结果分析 .....	175
7.4	推进器多故障诊断与容错控制仿真 .....	180
7.4.1	URIS 水下机器人推进器配置与控制方程 .....	180
7.4.2	双故障仿真算例 .....	182
7.5	基于遗传算法的推进器故障的容错控制律重构 仿真研究 .....	186
7.5.1	推进器控制律伪逆重构算法 .....	186
7.5.2	控制矩阵重构的遗传算法优化 .....	188
7.5.3	控制律重构结果分析比较 .....	190
	参考文献 .....	200
<b>第8章</b>	<b>水下机器人故障诊断与容错装置开发 .....</b>	<b>202</b>
8.1	基于 DSP 的水下机器人故障诊断与容错控制器 .....	202
8.1.1	DSP 硬件电路设计 .....	202

8.1.2 DSP 故障检测控制仪软件 .....	208
8.1.3 DSP 故障检测控制仪研制中的难点 .....	214
8.2 基于单片机的水下机器人故障诊断与容错控制器.....	215
8.2.1 系统硬件电路设计 .....	215
8.2.2 系统软件设计 .....	220
参考文献 .....	224

# 第1章 水下机器人概述

海洋占地球表面积的71%，拥有14亿 $\text{km}^3$ 的体积。在海洋中蕴藏着极其丰富的矿产资源及生物资源。大洋底部还沉积着极为丰富的多金属结核，尤以铜、锰、镍、钴含量最高，据估计储量为1.7万亿t。海底锰的储藏量是陆地的68倍；铜的储藏量是陆地的22倍；镍的储藏量是陆地的274倍；用于制造核弹的铀的储藏量高达40亿t，是陆地的2000倍。海洋不仅矿产资源丰富，还是一个无比巨大的能源库，天然气水合物总量相当于陆地燃料资源总量的2倍以上，海底储藏着1350亿t石油，近140万亿 $\text{m}^3$ 的天然气。在6000m以下的大洋底部仍有生命存在，这种在极端条件下的生命，格外受到生物学家的重视。因此，洋底探测和太空探测类似，同样具有极强的吸引力，同时也具有极强的挑战性。

1991年，中国被联合国批准为第5个深海采矿先驱投资者，承担30万 $\text{km}^2$ 洋底的探测任务，并最终拥有对矿产资源最丰富的7.5万 $\text{km}^2$ 海域的优先开采权。中国政府已把海洋开发作为21世纪国民经济与社会发展战略重点之一。

作为人类探索、开发海洋助手的水下机器人是多种现代高技术及其系统集成的产物，对于我国海洋产业、海洋开发和海洋高科技具有特殊的意义。发展水下机器人，并将其作为海洋战略制高点，对提升我国海洋重大装备水平，为海洋支柱产业和新兴产业提供成套技术与先进装备，为国家海洋战略创造有利条件与国际竞争能力，将发挥直接、巨大的支撑作用。

## 1.1 水下机器人的相关概念

水下机器人是一种能在水下浮游或在海底行走，具有观察能力和使用机械手或其他工具进行水下作业的装置。从机器人学的角度看，

水下机器人属于特种机器人范畴,在海洋工程界,水下机器人通常也称为水下潜器(Underwater Vehicle, UV)<sup>[1-2]</sup>。按有无载人情况,水下潜器可以分为无人潜水器和载人潜水器两大类。

按水下机器人在水下运动方式不同,可将其分为浮游式水下机器人、拖曳式水下机器人、爬行式水下机器人和附着式水下机器人;按机器人与母船之间有无电缆连接,水下机器人又分为有缆遥控水下机器人(Remotely Operated Vehicle, ROV)(也称缆控水下机器人)和无缆自治水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)。图1-1为水下机器人分类关系图。图1-2为缆控水下机器人(ROV)系统组成图。图1-3为无缆自治水下机器人(AUV)基本组成。

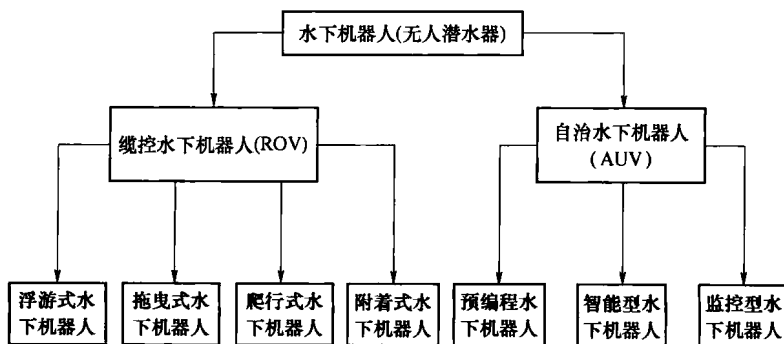


图 1-1 水下机器人分类

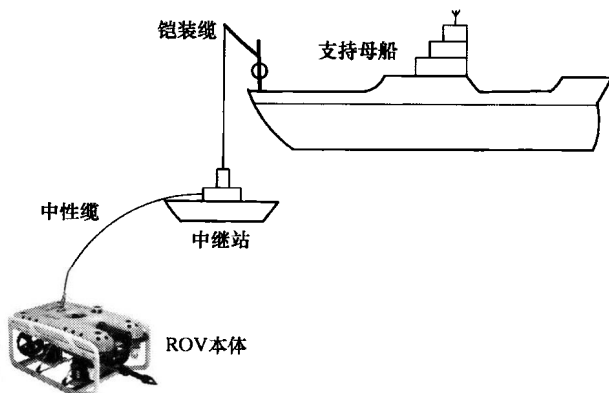


图 1-2 ROV 系统组成



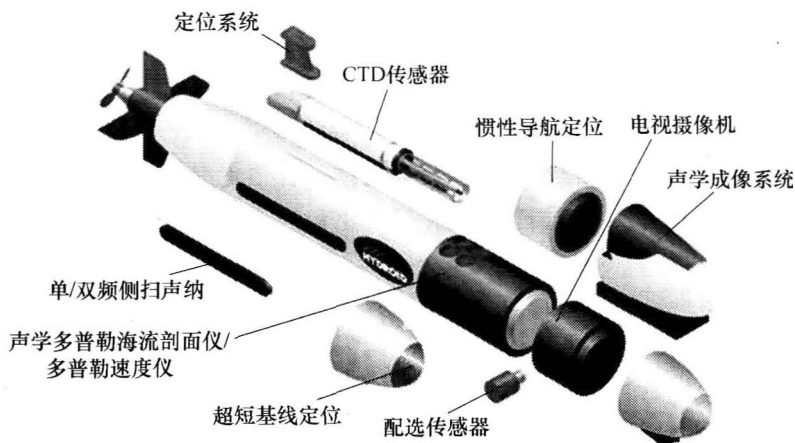


图 1-3 AUV 基本组成

## 1.2 水下机器人研究概况

620 年前,荷兰物理学家德雷尔发明了世界上第一艘原始潜水器。它在水下 5m 深处连续航行几海里,在当时是一件很了不起的事。这艘“潜艇”使用优质木材做艇体,并在外表覆盖了一层牛油皮,“潜艇”的两边各有 6 名划手,用力向后划水而使艇前进。当“潜艇”要下潜时,将海水灌进羊皮囊;而上浮时,则将水挤出羊皮囊。该“潜艇”没有安置任何观察设备,也没有装备武器。

被誉为“潜艇之父”的美国人约翰·霍兰先后建造了 6 艘性能不断完善的潜艇,特别是他设计的“霍兰”6 号具备了许多现代潜艇的特征:潜艇长约 15m,装有 45 马力(1 马力 $\approx$ 735.5W)的汽油发电机和蓄电池,航行平稳,配置有先进的鱼雷、炸药等武器。19 世纪末,美国的西蒙·莱克受科幻小说《海底两万里》的启发,建造了世界上第一艘具有双层壳体的潜艇,率先找到了潜艇快速下潜和上浮的方法。到第二次世界大战时,潜艇已应用于战争。

早期潜艇技术的发展与积累,为深海潜水器的发展提供了技术支撑<sup>[21]</sup>。1934 年,美国潜水器潜入 914m 深度,开始了人类第一次在深