

Fault Diagnosis Theory and Technique
for Underwater Vehicle

水下机器人故障诊断 理论与技术

张铭钧 王玉甲 朱大奇 赵文德 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

Fault Diagnosis Theory and Technique
for Underwater Vehicle

水下机器人故障诊断 理论与技术

张铭钧 王玉甲 朱大奇 赵文德 著

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书以作者在自主式水下机器人(AUV)方面的研究成果为基础,在综述近年来 AUV 故障诊断技术研究进展的基础上,重点阐述了基于定性仿真、支持向量机、神经网络以及复合方法的 AUV 故障诊断理论及相关实验研究成果,探讨了 AUV 容错控制方法,力图给出一个系统化、实用化的 AUV 故障诊断系统框架。本书结构合理,内容系统、重点突出,且紧密结合科研实际。

本书可供从事自主式水下机器人的科研人员阅读,也可以供从事海洋工程、自动控制、信号处理、机器人等有关专业的工程技术人员和高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水下机器人故障诊断理论与技术/张铭钧等著. --
哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2016.11
ISBN 978-7-5661-1406-8

I. ①水… II. ①张… III. ①水下作业机器人-故障
诊断 IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 285289 号

选题策划 刘凯元
责任编辑 刘凯元 周一瞳
封面设计 恒润设计

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16
印 张 23.75
字 数 608 千字
版 次 2016 年 11 月第 1 版
印 次 2016 年 11 月第 1 次印刷
定 价 78.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

海洋作为人类生存和发展的重要战略空间之一,蕴藏着丰富的能源、金属资源和生物资源。随着陆地不可再生资源的日益枯竭,对海洋空间的开发和利用已经成为各国关注的焦点。水下机器人作为目前唯一能够在深海环境下工作的装备,在海洋资源开发中发挥着不可替代的作用。

现有的水下机器人主要分为四类:载人水下机器人(Human Occupied Vehicle, HOV)、自主式水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)、遥控式水下机器人(Remotely Operated Vehicle, ROV)以及自治/遥控复合型水下机器人(Autonomous & Remotely Operated Vehicle, ARV)。其中,AUV具有相对安全(无人)、活动范围广(不受电缆约束)、机动性强等优点,已广泛应用于海洋科学考察、深海搜寻等任务。

AUV无人无缆,自主工作在海洋环境中,安全性是其研究和实用化过程中的重要问题之一。2005年,曾为南极冰架下海洋环境与资源探测做出巨大贡献的英国“Autosub 2”AUV在南极Fimbulisen冰架下作业时,因电源硬件或连接器故障导致系统电源失效,进而使得主控系统错误地下达了抛载上浮的命令,最终导致AUV陷入200 m厚的冰层下而无法浮出水面。2010年,曾在海底科学考察中取得多项重要成果的美国6 000 m级“ABE”AUV,在执行水下探测任务时失事。2014年,美国“Bluefin-21”AUV在南印度洋海域执行失事民航客机MH370的深海搜寻任务时,因意外原因超出了4 500 m的最大下潜深度,所幸其及时终止了原计划16 h的深海搜寻工作并且启动自身配备的安全设备,最终使得该AUV在6 h后浮出水面。

AUV故障时有发生,其安全性问题一直受到该领域研究者的高度关注。状态监测与故障诊断是保障AUV安全性的基础和关键技术,研究AUV故障诊断技术对提高AUV安全性、加快其实用化进程具有重要的理论研究意义和实际应用价值。

海洋环境中存在海流等随机外部干扰和较强的量测噪声,AUV自身又是一个非线性系统,使得AUV故障诊断的理论和方法与陆地及航天机器人有较大差异。本书以“国家自然科学基金”项目“外部干扰下自主式水下机器人推进器与导航传感器故障诊断方法研究”(51279040)以及“高等学校博士学科点专项基金”项目“自主式水下机器人推进器故障辨识与容错控制技术研究”(20112304110024)及其他相关科研项目研究成果为基础,在综述

近年来 AUV 故障诊断技术研究进展的基础上,重点阐述基于定性仿真、支持向量机、神经网络以及复合方法的故障诊断理论及其实验研究,阐述其诊断原理,分析实验数据,最后探讨了与故障诊断密不可分的容错控制方法,力求给出一个系统化、实用化的 AUV 故障诊断系统框架。

感谢哈尔滨工程大学水下运载器智能控制技术实验室毕业的博士研究生和硕士研究生对本书的贡献。

由于作者水平所限,时间仓促,本书难免存在不足或错误,敬请读者和专家批评指正。

著 者
2016 年 9 月

目 录

第 1 章 水下机器人故障诊断方法概述	1
1.1 故障诊断技术概述	1
1.2 水下机器人故障诊断技术概述	4
参考文献	20
第 2 章 基于定性仿真的水下机器人故障诊断技术	25
2.1 AUV 正常模式故障模糊定性建模方法	26
2.2 AUV 故障模式故障模糊定性建模方法	43
2.3 AUV 故障定性诊断方法研究	57
参考文献	84
第 3 章 基于支持向量机的 AUV 故障诊断技术	85
3.1 基于支持向量回归的推进器故障诊断方法	85
3.2 基于支持向量域描述的推进器故障辨识方法	118
3.3 基于模糊支持向量域描述的 AUV 多故障模式分类方法	146
参考文献	175
第 4 章 基于神经网络的 AUV 故障诊断技术	177
4.1 基于神经网络的传感器故障诊断以及信号恢复方法	177
4.2 基于神经网络的推进器性能模型建立方法	194
4.3 基于神经网络的 AUV 运动状态模型建立方法	202
参考文献	214
第 5 章 基于复合方法的水下机器人故障诊断技术	216
5.1 基于随机共振的水下机器人特征增强方法	216
5.2 基于主元分析的传感器故障诊断与数据重构	229
5.3 传感器的故障诊断及数据重构	257
5.4 基于复合方法的推进器与传感器故障的隔离与定位	270
参考文献	292
第 6 章 基于滑模观测器的水下机器人故障诊断技术	295
6.1 基于滑模观测器的推进器故障检测、分离与重构	295
6.2 基于 Terminal 滑模观测器的推进器故障诊断	310
参考文献	323

第7章 水下机器人容错控制技术	325
7.1 舵桨联控式 AUV 推力分配方法	325
7.2 推进器主动容错控制方法	343
7.3 基于自适应反演滑模的推进器容错控制方法	356
参考文献	371

第1章 水下机器人故障诊断方法概述

人类社会的发展,离不开对自然资源的开发和利用。随着陆地不可再生自然资源的日益减少,人们把目光投向了占地表面积70%以上的海洋^[1]。在海洋底部,除了锰结核、深海石油、热液矿床外,还有目前炙手可热的天然气水合物。天然气水合物中的有机碳总含量超过陆地资源中人类已使用过的和尚未开发的石油、煤炭、天然气总和的2倍^[2]。2016年5月1日起实施的《中华人民共和国深海海底区域资源勘探开发法》标志着我国深海海底资源的勘探和开发进入了新的历史阶段^[3]。

开发深海资源,离不开先进的技术和装备。水下机器人是目前唯一能够在深海环境下工作的载体,在海洋开发中发挥着不可替代的作用^[4]。根据水下机器人与水面母船之间有无缆绳连接,可将水下机器人分为有缆水下机器人(Remotely Operated Vehicle, ROV)和无缆自主式水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)两种^[5]。

AUV无人无缆,工作在复杂多变的海洋环境中,安全性是AUV的重要特征^[6],状态监测与故障诊断是保障AUV安全性的基础和关键技术^[7,8]。

水下机器人领域的领军“人物”——日本“海沟”(KAIKO)号AUV在2003年海试时失事沉入太平洋底,至今尚未找到^[9];颇负盛名的英国“AutoSUB2”号AUV在2005年进行南极冰架下探测作业时失事^[10]。在军事方面,日本海上自卫队在2013年丢失了一个用于收集潜艇性能及噪声数据等相关情报的AUV^[11];2015年,媒体报道称我国在南海发现一个不明国籍、发生故障而失事的AUV,受到多方关注^[12]。AUV“灾难性事故”时有发生,其安全性问题一直受到该领域研究者的高度关注^[13,14]。

AUV由多个部件构成。其中,推进器是其关键部件也是负荷最重的部件^[15],研究推进器故障诊断技术对于提高AUV安全性具有重要意义^[16]。海洋环境中,存在海流等外部随机干扰和较强的量测噪声,AUV自身是一个具有大惯性、大时滞特性的强非线性系统^[17],使得推进器故障诊断的理论和方法与陆地及航天机器人有较大差异。

对于推进器故障诊断技术而言,在线运行时实际获取到的传感器信号信噪比低、故障特征弱。同时,AUV闭环控制器的补偿作用会削弱推进器故障特征。研究AUV推进器弱故障诊断的理论和技術,对于提高AUV安全性、加快其实用化进程具有重要的理论研究意义和实际应用前景。

1.1 故障诊断技术概述

现代控制系统和设备的复杂性不断增加,规模不断扩大,一旦其中某一部件或多个部件发生故障,引发的连锁反应会造成巨大的生命财产损失^[22]。2000年,我国长江三峡工程工地塔带机的皮带机发生焊缝断裂事故,造成人员和设备的重大损伤;2003年,美国“哥伦

比亚”号航天飞机在升空过程中解体坠毁,7名宇航员全部遇难;2007年,美国一架F15C战机在本土训练时空中解体,并导致该型战机全球停飞。控制系统和设备的技术过程故障导致的“灾难性事故”时有发生,如何提高装备的安全性与可靠性是技术过程故障诊断与安全性领域急需研究解决的重要问题^[23]。

起源于20世纪60年代的技术过程故障诊断技术是提高系统运行可靠性、降低系统运行风险的重要方法^[24],其通过信号获取与处理、故障征兆提取与判别等方式对系统运行状态进行检测,判断是否有故障发生,同时,确定故障发生的时间、位置、程度、种类、发展趋势等情况,即实现故障检测、故障分离、故障辨识、故障预测等目的^[25]。

国内外一直将技术过程故障诊断与安全性作为重要的科学研究方向。美国国家航天局(National Aeronautics and Space, NASA)长期致力于研究航天材料的疲劳、演化和失效,并制定了一系列航天试验安全系数以提高航天器的安全性;我国发布的国家中长期规划(2006—2020年)和国家自然科学基金委发布的《机械工程学科发展战略报告(2011—2020年)》中,均将故障诊断技术列为未来重要的研究方向^[26,27]。

故障诊断技术一般包含三个基本过程,即建立故障模型、获取过程测量值和处理故障信号^[29]。这三个基本过程采用的方法不同,可以得到不同的故障诊断方法^[28]。1990年,德国杜伊斯堡大学的P. M. Frank教授将故障诊断方法分为基于系统解析模型的方法、基于信号处理的方法和基于知识的方法三种类型^[29]。2003年,随着故障诊断技术的不断发展和进步,美国普渡大学的V. Venkatasubramanian教授在总结前人工作的基础上,结合新的故障诊断成果,将故障诊断方法分为基于定量模型的方法、基于定性模型的方法和基于过程历史数据的方法三种类型^[30-32]。2013年,清华大学的周东华教授总结了故障诊断的发展趋势,将故障诊断方法分为基于定量分析的方法和基于定性分析的方法两大类^[33],具体分类如图1.1所示。



图 1.1 故障诊断方法分类

图 1.1 中,故障诊断方法被分为定量诊断方法和定性诊断方法两大类。其中,根据要素获取和处理方法不同,又可以将定量诊断方法分为基于解析模型的方法和基于数据驱动的方法。下面,对定量诊断方法和定性诊断方法进行简要阐述。

1.1.1 定量诊断方法

定量诊断方法主要分为基于解析模型的方法和基于数据驱动的方法^[33],以下分别阐述。

1. 基于解析模型的方法

基于解析模型的定量诊断方法,通过重构系统过程状态获得残差序列,基于残差序列进行故障诊断。典型的基于解析模型的方法有参数估计法^[34]、观测器法^[35]等。该类方法的优势在于^[36]:充分利用了系统的动力学特性和深层知识,在无外部干扰或外部干扰相对故障的程度较小时,诊断效果良好。但由于现代控制系统和设备的复杂性不断增加、规模不断扩大,其解析模型也越来越复杂,并且受未知的外部干扰影响,其解析模型的不确定性也越来越强。研究者采用各种近似手段逼近系统解析模型,通过该解析模型虽然也能达到诊断故障征兆较为明显的强故障的目的,但当外部干扰与故障相比相对较强或故障征兆不明显时,基于解析模型的方法的故障诊断效果往往并不理想^[37]。

2. 基于数据驱动的方法

基于数据驱动的定量诊断方法并不需要系统的解析模型,而是通过对运行过程中累积的大量过程历史数据进行分解和变换等处理实现故障诊断^[38]。典型的基于数据驱动的方法有小波分解^[39]、经验模态分解^[40]等。基于数据驱动方法的优势在于^[41]:无须建立系统解析模型,仅需要被控对象的控制量、状态量等易测量得到的信息,对这些信息进行数据挖掘,辨识系统本质属性的变化,更适合用于难以建立精确解析模型的复杂设备故障诊断。但是,由于未应用系统的动力学特性和深层知识,基于数据驱动的方法难以对故障的产生和发展给出合理的解释^[42]。

1.1.2 定性诊断方法

定性故障诊断方法,通过分析系统运行机理、故障特征、故障行为与故障原因之间的因果关系等先验知识,采用逻辑推理的方式诊断故障^[22]。典型的定性故障诊断方法有故障树^[43]、有向图^[44]等。定性故障诊断方法的优势在于^[45]:无须建立系统解析模型,只关注部件与故障之间的相关性和因果性,并根据这种相关性和因果性进行推理,得到故障产生、发展的定性描述语言,基于定性描述语言进行逻辑推理即可实现故障诊断。定性故障诊断方法对于部件相对较少、故障原因相对较为单一的技术过程来说效果良好,但对于部件众多、故障原因复杂的复杂技术过程来说,部件数量和故障原因的增加会使得定性推理过程中产生的因果性和相关性组合呈几何倍数增长,严重时会导致故障诊断难以得出有效的推理结论。并且,定性故障诊断方法需要基于预先建立的定性知识库进行诊断,导致无法有效诊断未知类型的故障^[46]。

整体归纳总结上述故障诊断方法的发展趋势如下。

现代控制系统和设备及其所在环境构成了一个复杂的非线性动态系统,故障原因与故障特征之间往往存在非单一的映射关系,使得较难获取定性推理中所需的奇异行为分支过滤规则。目前,与其他故障诊断方法相比,定性故障诊断方法的应用相对较少^[33]。定量分析方法中的解析模型方法和数据驱动方法,基于技术过程中积累的过程历史数据挖掘系统本质属性的变化,代表了机械故障诊断的发展趋势^[21]。

1.2 水下机器人故障诊断技术概述

AUV 无人无缆工作在复杂海洋环境中,其自身及环境是一个复杂的动态系统,具有强非线性、大时滞的特点^[47],并且与陆地机器人或航天机器人不同。AUV 受海流等外部干扰影响较大,外部干扰与故障耦合在一起难以剥离,为 AUV 故障诊断带来较大的难度。本节基于 1.1 节所述的清华大学周东华教授提出的故障诊断分类方法^[33],将目前的 AUV 故障诊断技术分为定量诊断方法和定性诊断方法两大类,并按此分类对 AUV 故障诊断技术的国内外研究现状和发展趋势进行阐述。

1.2.1 水下机器人故障诊断技术国内外研究现状和发展趋势

1. 定量诊断方法

定量诊断方法主要分为基于解析模型的方法和基于数据驱动的方法^[33],以下分别进行阐述。

(1) 基于解析模型的方法

基于解析模型的方法通过重构系统过程状态获得残差序列进行 AUV 故障诊断,目前该类方法的研究成果大都集中在征兆较为明显的强故障诊断中^[20]。

2015 年,上海海事大学朱大奇教授提出了一种基于终端滑模观测器的水下机器人推进器故障重构方法:利用终端滑模在有限时间内收敛的特性,通过构造滑模观测器保证具有有限时间收敛特性的可直接测量的位置状态以及具有渐进收敛特性的不可直接测量的速度或加速度状态。这些状态均能在有限时间内收敛于零点,并利用等效输出误差进行推进器故障重构,进行了仿真实验验证^[48]。

2014 年,西北工业大学徐德民院士提出了一种具有低依赖性和高普适性的水下航行器故障诊断方法。该方法将故障诊断分为检测、隔离和辨识 3 个阶段:首先,根据不同的故障类型设计相应的故障观测器,在满足收敛性的前提下检测故障;然后,基于故障估计与其收敛性,建立故障函数并以方差最小为条件来隔离故障;最后,联立控制输入方程和故障估计辨识故障,通过水下航行器推进器和舵发生故障后的自主回坞仿真实验对所提方法进行了验证^[49]。

2014 年,丹麦科技大学(Technical University of Denmark) M. Blanke 教授提出了一种基于粒子滤波器的 AUV 执行器故障诊断方法:对有限样本点进行求和运算来获得状态最小方差估计,通过对 AUV 系统参数和运动状态的联合估计诊断推进器故障,在如图 1.2 所示的“MINERVA”水下机器人上进行了实验验证^[50]。

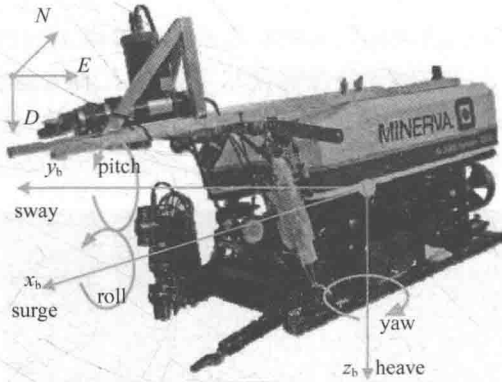


图 1.2 “MINERVA”水下机器人

2013年,哈尔滨工程大学万磊研究员提出了一种基于改进高斯粒子滤波器的水下机器人执行器故障诊断方法:根据6自由度空间运动方程建立执行器的故障模型,与典型高斯粒子滤波采用重要性密度函数作为先验概率密度函数不同,采用无损卡尔曼滤波计算单个粒子的预测更新值,并通过改进的高斯粒子滤波器对水下机器人的参数和运动状态进行联合估计,通过修正贝叶斯算法检测故障,采用滑动窗口法估计故障的幅值,在如图1.3所示的“智水”水下机器人上进行了实验验证^[18]。

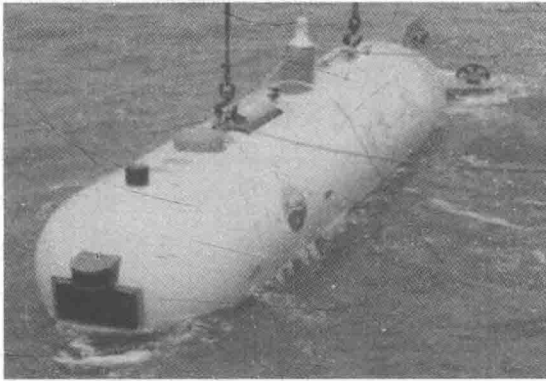


图 1.3 “智水”水下机器人

2011年,上海海事大学朱大奇教授提出了一种基于降阶卡尔曼滤波器的水下机器人故障估计和滑模容错控制方法:将水下机器人分解为与故障解耦的子系统 and 受故障影响且状态可测的子系统两部分,采用降阶卡尔曼滤波器估计与故障解耦的子系统的状态,并与受故障影响且状态可测的子系统的状态进行对比,估计水下机器人执行器故障,将状态估计值、状态测量值以及参考输入值作为滑模容错控制器的输入量进行主动容错控制,采用“Phoenix” AUV的转艏控制子系统进行了仿真实验验证^[51]。

2011年,哈尔滨工程大学万磊研究员提出了一种基于改进递归神经网络的水下机器人推进器故障诊断方法:通过实验数据构建3层BP神经网络,学习水下机器人的动力学模型,将动力学模型的估计输出与AUV传感器的实际测量值之间的残差作为检测逻辑单元的输入量,检测逻辑单元的输出量即为推进器故障诊断结果,在如图1.3所示的“智水”水下

机器人上进行了实验验证^[52]。

2011年,中国科学院沈阳自动化研究所封锡盛院士提出了一种基于无色卡尔曼滤波器的水下机器人执行器故障检测方法:首先建立水下机器人的运动学和动力学模型,采用无色卡尔曼滤波器对水下机器人执行器的健康因子进行联合估计,基于健康因子的变化来检测故障,在如图 1.4 所示的“潜龙一号”水下机器人上进行了实验验证^[53]。

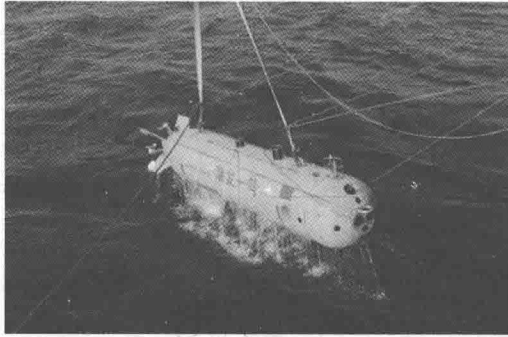


图 1.4 “潜龙一号”水下机器人

2011年,意大利卡梅里诺大学(University of Camerino) Corradini 教授通过滑模观测器状态估计的方法研究水下机器人推进器故障诊断问题,通过将位置变量向已知变量转换构建残差函数,通过残差的变化判断是否发生故障,进行了仿真实验验证^[54]。

2010年,俄罗斯科学院远东分院海洋技术问题研究所(Institute for Marine Technology Problems, Far Eastern Branch of RAS) Alexey Shumsky 教授提出了一种基于敏感理论的 AUV 推进器故障诊断方法:首先构建水下机器人状态观测器,与真实测量状态值相比较得到残差向量;然后将状态观测器转化为灵敏度方程,得到灵敏度向量;最后基于残差向量与灵敏度向量的融合结果来检测推进器故障,在如图 1.5 所示的“CR-01”水下机器人上进行了实验验证^[55]。



图 1.5 “CR-01”水下机器人

2010年,西北工业大学徐德民院士提出了一种基于模型跟随法的 AUV 舵面故障直接自修复方法:当故障发生后,通过将 AUV 状态变量、控制信号、修复偏差和输入偏差分解为纵向分量与侧向分量的组合设计控制率,采用故障发生后与故障无关的信息对控制律进行直接自修复,无须辨识故障的具体位置和程度即可实现 AUV 舵的完全自我修复,通过仿真

实验进行了验证^[56]。

2010年,日本东京海洋大学(Tokyo University of Marine Science and Technology)近藤逸人(Hayato Kondo)副教授基于AUV上推进器的安装位置建立了推进器结构矩阵,基于该结构矩阵构造了作用AUV上的推进器推力矩阵,通过比较推进器结构矩阵的秩与推进器推力矩阵维数之间的关系对推进器进行故障诊断,在如图1.6所示的“Hovering”水下机器人上进行了实验验证^[57]。



图 1.6 “Hovering”水下机器人

2009年,美国夏威夷大学(University of Hawaii) Song K. Choi 教授基于AUV推进器推力与电流、电压之间的关系,建立推进器电流—推力和转速—推力两个独立模型,采用上述两个独立模型估计推进器推力值,基于推力估计值与实际测量值之间的残差对推进器进行故障诊断,在如图1.7所示的“SAUVIM”水下机器人上进行了实验验证^[58]。



图 1.7 “SAUVIM”水下机器人

2005年,哈尔滨工程大学徐玉如院士提出了一种基于滑模观测器的水下机器人故障诊断方法:基于水下机器人空间运动方程构造其非线性滑模观测器,通过观测器输出与实测信号构造残差,从残差中提取故障信息进行故障诊断,采用模糊残差评估器计算各种故障模式的隶属度函数,通过隶属度函数和相关残差的正负判断是否发生故障和故障发生的时间,采用从静止到匀速航行的水下机器人直航过程仿真实验验证^[59]。

2003年,意大利国家研究委员会(Natl Res Council Italy) A. Alessandri 教授提出了一种基于神经网络的AUV故障诊断方法:采用整个网络中无反馈的前馈神经网络学习AUV动

力学模型建立故障观测器,通过故障观测器输出与实际测量值的比较残差诊断故障,进行了仿真实验验证^[60]。

2003年,美国弗吉尼亚理工大学(Virginia Polytechnic Institute and State University) Chris R. Fuller 教授提出了一种 AUV 执行器和传感器分级故障检测与辨识方法:将故障诊断算法分为监控级和识别级,在监控级基于有限脉冲响应 FIR 滤波器检测故障是否发生,在识别级基于单故障和双故障卡尔曼滤波器识别故障,在如图 1.8 所示的“NPS”水下机器人上进行了实验验证^[61]。



图 1.8 “NPS”水下机器人

1999年,美国夏威夷大学(University of Hawaii) Song K. Choi 教授提出了一种基于推进器解析模型的 AUV 故障诊断与容错控制方法:根据推进器电压与推力之间的关系建立了推进器的电压推力模型,基于该模型获得推进器理论电压值,进行推进器故障诊断时,如果推进器理论电压值与实测电压值的差值大于预设的阈值,则认为推进器发生了故障;如果推进器理论电压值与实测电压值的差值小于预设的阈值,则认为推进器处于正常工作状态,在如图 1.9 所示的“ODIN”水下机器人上进行了实验验证^[62]。

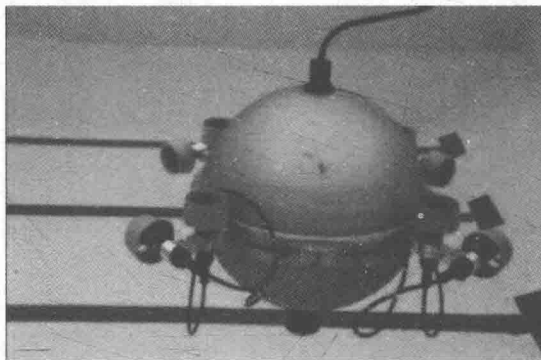


图 1.9 “ODIN”水下机器人

1999年,日本东京大学(The University of Tokyo)浦环(Tamaki Ura)教授提出了一种基于局部回归神经网络的故障诊断方法:将神经网络当前时刻的输入与历史时刻的输出一起作为当前时刻的输入,从而将描述静态系统的前馈神经网络改进为能够描述具有复杂因果关系的 AUV 非线性时变系统,采用所构造的局部回归神经网络学习 AUV 动力学模型,根据

神经网络模型输出与传感器实际测量值的残差确定 AUV 故障类型,在如图 1.10 所示的“Twin-Burger2”水下机器人上进行了实验验证^[63]。

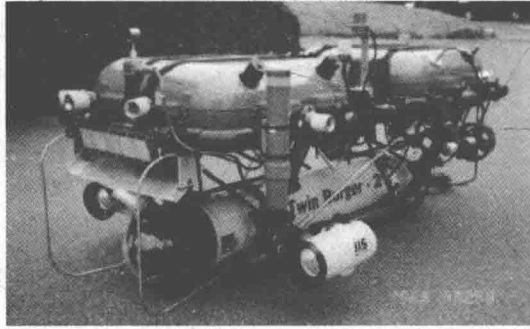


图 1.10 “Twin-Burger2”水下机器人

分析归纳以上基于解析模型的 AUV 故障诊断方法。上述方法中,无论是基于观测器、滤波器,还是直接采用 AUV 动力学模型,这些基于解析模型的方法,其诊断结果的准确性大多依赖于 AUV 解析模型的精度。而由于在建立 AUV 解析模型的过程中大都采用近似或忽略海流等外部干扰的策略^[64],使得所建立的解析模型的精度难以保证。因此,在诊断过程中大都需要预设一个故障阈值预防外部干扰引起的误诊断,预设的故障阈值大小往往难以确定。当推进器故障程度较大时,这个预设的故障阈值对故障诊断结果的影响较小,此时基于解析模型的 AUV 故障诊断方法效果较好;当推进器故障程度较小时,由于推进器弱故障特征与干扰特征相差较小,采用近似或忽略干扰的策略所建立的 AUV 解析模型对推进器弱故障不敏感,使得预设的故障阈值对故障诊断结果的影响较大,容易将弱故障视为外部干扰而漏诊或将外部干扰视为弱故障而误诊,此时若故障阈值设置过大会导致漏诊,若故障阈值设置过小会导致误诊,预设的故障阈值直接影响到能否辨识出推进器弱故障和辨识准确性。因此,基于解析模型的 AUV 故障诊断方法难以直接应用于 AUV 推进器弱故障诊断。

(2) 基于数据驱动的方法

基于数据驱动的方法是指通过对运行中积累的大量过程历史数据进行信号处理,基于信号处理的结果进行故障诊断,诊断过程中不需要精确的 AUV 动力学模型^[38]。

2015 年,英国普利茅斯大学(University of Plymouth) Sharma 副教授提出了一种基于神经网络的推进器故障诊断方法:采用正交模糊邻域判别方法对多维耦合故障信息进行特征降维,对降维后的故障信息进行离散小波分解提取故障特征,将所提取的故障特征作为具有时延特性的神经网络的输入量,神经网络的输入即为推进器故障辨识结果,对四种典型故障模式的推进器故障进行了仿真实验验证^[65]。

2015 年,哈尔滨工程大学张铭钧教授提出了一种推进器故障特征提取与融合方法,对 AUV 速度信号进行小波分解和重构得到其小波近似分量,对控制信号求导得到其变化率,采用修正贝叶斯算法从上述小波近似分量和变化率中分别提取故障特征,基于证据理论对提取的故障特征进行融合和归一化处理来诊断推进器故障,在如图 1.11 所示的“Beaver II”水下机器人上进行了实验验证^[66]。

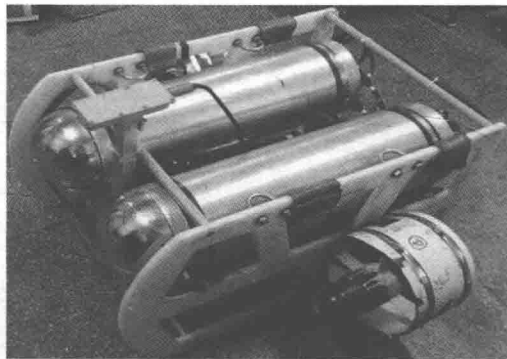


图 1.11 “Beaver II”水下机器人

2014年,哈尔滨工程大学张铭钧教授提出了一种基于模糊支持向量数据描述的AUV并发故障诊断方法,通过在故障分类器的训练过程中引入负类样本,同时为每个样本引入局部疏密度和类别权值的方式提高多故障模式分类的准确性,在故障分类器的超球体建模过程中为每个超球体增加故障包含检测面,提高故障分类器的训练速度和诊断的准确率,采用相对距离判定法对处于超球体区域外或不完全属于任何超球体的模糊样本点进行类归属判定,实现了对未知故障的检测和辨识,在如图1.12所示的“Beaver”水下机器人上进行了实验验证^[67]。



图 1.12 “Beaver”水下机器人

2013年,上海海事大学朱大奇教授提出了一种基于模糊小脑神经网络的水下机器人推进器故障诊断方法:采用局部逼近的小脑神经网络模型与模糊控制相结合的方法构造故障诊断模型,将水下机器人控制信号与艏向速度的融合信息作为神经网络的输入信号,神经网络的输出信号即为相应的推进器故障程度,在如图1.13所示的“Outland 1000”水下机器人上进行了实验验证^[68]。



图 1.13 “Outland 1000”水下机器人