

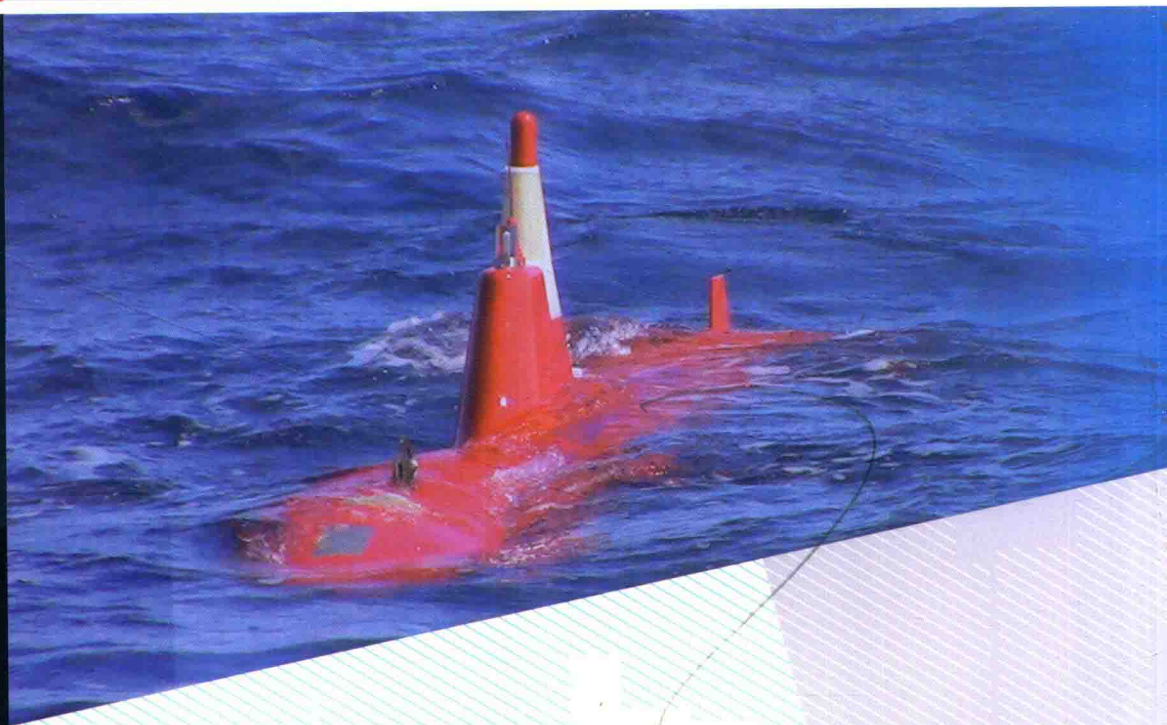


智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

水下机器人导航技术

张强 张雯 著



科学出版社



智能

科/学/技/术/著/作/丛/书

头脑风暴优化算法理论及应用

吴亚丽 等

人工智能集对分析

蒋云良 等

基于进化优化的多目标批量流水线调度

韩玉艳 等

鱼类行为语义模型与水质预警

肖刚 等

基于人工智能的行人流模拟与仿真

李军

Flexible Job Shop Scheduling Problem
and Its Optimization Algorithms

李俊青 等

网络约束迭代学习控制理论

卜旭辉 等

多目标学习算法及其应用

赵佳琦

物联网：RFID多标签识别技术

贾小林

»»» 水下机器人导航技术

张强 等

www.sciencep.com

ISBN 978-7-03-061260-1



9 787030 612601 >

定价：90.00 元



科学出版社互联网入口

电话：010-64000249

E-mail: zhanghaina@mail.sciencep.com

销售分类建议：机器人

2019

智能科学技术著作丛书

水下机器人导航技术

张强 张雯 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书面向海洋工程领域的技术研发需求,简要总结了水下机器人及其常用水下导航相关技术的国内外研究现状,重点研究了水下机器人导航系统典型技术,包括:水下机器人导航传感器数据处理方法、水下机器人推位导航技术、大潜深 AUV 惯导系统纯距离误差修正算法、AUV 水下同步定位与制图算法、基于单领航者相对距离测量的多 AUV 协同导航定位算法等,突出了理论性和实用性。

本书可供机器人导航相关专业的研究生参考,也可作为普通高等学校理工科学生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水下机器人导航技术 / 张强, 张雯著. —北京: 科学出版社, 2019.6

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-061260-1

I. ①水… II. ①张… ②张… III. ①水下作业机器人-导航系统
IV. ①TP242.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第094700号

责任编辑: 张海娜 赵微微 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

天津文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年6月第一次印刷 印张: 10

字数: 190 000

定价: 90.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 何新贵 李德毅 蔡自兴 孙增圻
谭 民 韩力群 黄河燕

秘 书 长：黄河燕

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

蔡庆生(中国科学技术大学)

蔡自兴(中南大学)

杜军平(北京邮电大学)

韩力群(北京工商大学)

何华灿(西北工业大学)

何 清(中国科学院计算技术研究所)

何新贵(北京大学)

黄河燕(北京理工大学)

黄心汉(华中科技大学)

焦李成(西安电子科技大学)

李德毅(中央军委联合参谋部第六十一研究所)

李祖枢(重庆大学)

刘 宏(北京大学)

刘 清(南昌大学)

秦世引(北京航空航天大学)

邱玉辉(西南大学)

阮秋琦(北京交通大学)

史忠植(中国科学院计算技术研究所)

孙增圻(清华大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

谭铁牛(中国科学院自动化研究所)

涂序彦(北京科技大学)

王国胤(重庆邮电学院)

王家钦(清华大学)

王万森(首都师范大学)

吴文俊(中国科学院数学与系统科学研究院)

杨义先(北京邮电大学)

于洪珍(中国矿业大学)

张琴珠(华东师范大学)

赵沁平(北京航空航天大学)

钟义信(北京邮电大学)

庄越挺(浙江大学)

《智能科学技术著作丛书》序

“智能”是“信息”的精彩结晶，“智能科学技术”是“信息科学技术”的辉煌篇章，“智能化”是“信息化”发展的新动向、新阶段。

“智能科学技术”(intelligence science & technology, IST)是关于“广义智能”的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域，其研究对象包括：

- “自然智能”(natural intelligence, NI), 包括“人的智能”(human intelligence, HI) 及其他“生物智能”(biological intelligence, BI)。

- “人工智能”(artificial intelligence, AI), 包括“机器智能”(machine intelligence, MI) 与“智能机器”(intelligent machine, IM)。

- “集成智能”(integrated intelligence, II), 即“人的智能”与“机器智能”人机互补的集成智能。

- “协同智能”(cooperative intelligence, CI), 指“个体智能”相互协调共生的群体协同智能。

- “分布智能”(distributed intelligence, DI), 如广域信息网、分散大系统的分布式智能。

“人工智能”学科自 1956 年诞生以来，在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展，从狭义人工智能走向广义人工智能，从个体人工智能到群体人工智能，从集中式人工智能到分布式人工智能，在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说当年“人工智能”学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合，那么可以认为，现在“智能科学技术”领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981 年，中国人工智能学会(Chinese Association for Artificial Intelligence, CAAI)正式成立，25 年来，从艰苦创业到成长壮大，从学习跟踪到自主研发，团结我国广大学者，在“人工智能”的研究开发及应用方面取得了显著的进展，促进了“智能科学技术”的发展。在华夏文化与东方哲学影响下，我国智能科学技术的研究、开发及应用，在学术思想与科学方法上，具有综合性、整体性、协调性的特色，在理论方法研究与应用技术开发方面，取得了具有创新性、开拓性的成果。“智能化”已成为当前新技术、新产品的发展方向 and 显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及应用成果，中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛

书》。需要强调的是，这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信，有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版，特赋贺诗一首：

**智能科技领域广
人机集成智能强
群体智能协同好
智能创新更辉煌**

涂序彦

中国人工智能学会荣誉理事长

2005年12月18日

前 言

水下机器人的潜航定位是水下机器人可靠、准确地执行水下任务的信息保障和技术前提,是研究开发水下机器人的难点和热点问题之一,也是人工智能和智能控制领域的国际前沿研究课题。由于水体的法拉第笼效应,水下机器人通常无法借助无线电导航系统实现水下远距离、大范围的精确定位,只能通过其他传感器感知自身状态和环境信息,因此水下机器人的导航系统更强调自持性和完备性。受艇体体积和搭载能力限制,水下机器人导航系统往往选用小体积、低功耗的惯性单元,这导致水下机器人导航系统通常存在定位精度低、定位误差累积迅速等问题,需要尽可能地借助水声设备为水下机器人导航系统提供误差标校或辅助导航信息。由于水声设备的丰富性和多样性,往往需要根据作业环境、任务需求和传感器类型灵活配置水下机器人的导航方式、系统结构及核心算法,因此针对水下机器人导航系统的研究尚有许多关键理论和技术问题亟待解决和完善。

本书主要研究水下机器人导航定位和多水下机器人协同定位,重点介绍水下机器人导航定位相关技术的研究进展。本书共 6 章。第 1 章介绍水下机器人的种类、定义以及常用的导航系统和应用实例,并对水下机器人导航系统几种典型技术的发展现状进行综述;第 2 章首先对航姿参考系统(attitude and heading reference system, AHRS)中微惯性测量单元(micro inertial measurement unit, MIMU)进行标定,应用递推 Allan 方差算法辨识微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)惯性器件的各种误差分量,应用时间序列分析法构建水声多普勒测速仪(Doppler velocity log, DVL)中噪声信号模型,基于 S 面控制理论设计自适应 Kalman 滤波器用于 DVL 信号滤波;第 3 章提出具有磁偏角估计与修正能力的小型自主式水下航行器(autonomous underwater vehicle, AUV)组合导航系统的数据融合架构,基于微型航姿参考系统工作原理,提出磁偏角辨识算法,最后提出一种具有磁偏角自适应补偿能力的小型 AUV 组合导航系统数据融合算法;第 4 章基于强跟踪均方根无损 Kalman 滤波(unscented Kalman filter, UKF)算法,提出基于纯距离观测信息的惯导系统误差修正算法,不但能够准确跟踪惯导系统的位置误差,而且能够对惯导系统的速度误差进行辨识,从而实现对惯导系统位置误差和速度误差的全面补偿;第 5 章基于 Sage-Husa 自适应 UKF 算法,提出一种水下机器人在结构化港口环境中的同步定位与建图算法;第 6 章针对单领航者相对距离测量的多 AUV 协同导航定位算法展开研究,建立基于定位误差的单领航者协同导航定位系统的数学模型,并基于鲁棒 UKF 算法实现单领航者协同导航系统的

数据融合策略。

本书主要从水下机器人的实际应用中总结水下导航系统原理、技术特点及研究进展，书中涵盖不同水声信息辅助的水下导航系统原理及信息融合方法，着重阐述水下机器人导航的模型构建和算法实现，使读者可以尽快了解、掌握不同应用背景下水下机器人导航系统的理论推导、方案设计和技术实现。

本书的相关研究得到了国家重点研发计划(2018YFC0309403)和国家自然科学基金(51309066, 61603110)的资助。感谢哈尔滨工程大学的李晔教授、庞永杰教授、苏玉民教授、万磊研究员、秦洪德教授的关心和支持，同时感谢课题组成员牛伯城、范彦福、马腾、王汝鹏、丛正等对本书提供的帮助。

水下机器人导航技术正在飞速发展中，由于作者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2019年4月

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 水下机器人与导航系统	1
1.1.1 水下机器人简介	1
1.1.2 UUV 常用水下导航系统	7
1.1.3 AUV 导航系统实例	11
1.2 AUV 自主导航关键技术	22
1.2.1 水下组合导航数据融合技术	22
1.2.2 水下同步定位与建图技术	23
1.2.3 水下协同导航技术	26
参考文献	27
第 2 章 水下机器人导航传感器数据处理方法	32
2.1 水下机器人导航系统与传感器	32
2.2 坐标系及欧拉角定义	33
2.2.1 坐标系定义	33
2.2.2 基于欧拉角的姿态描述	35
2.3 微惯性测量单元标定	36
2.3.1 惯性器件确定性误差模型	36
2.3.2 标定实验	36
2.4 MEMS 惯性器件随机误差辨识	38
2.4.1 Allan 方差及其频域等价形式	38
2.4.2 递推 Allan 方差	43
2.4.3 随机误差辨识	43
2.5 多普勒测速仪滤波	57
2.5.1 随机误差分析	58
2.5.2 自适应 Kalman 滤波器	60
2.5.3 算法性能检验	63
参考文献	65

第 3 章 水下机器人推位导航技术	67
3.1 小型 AUV 推位导航系统的集成结构.....	68
3.2 MAHRS 的工作原理与磁偏角分析.....	69
3.2.1 MAHRS 工作原理.....	69
3.2.2 磁偏角分析.....	70
3.3 UKF 数据融合算法.....	72
3.3.1 无味变换.....	72
3.3.2 经典 UKF 算法.....	74
3.4 基于 Kalman 滤波算法的磁偏角辨识模型.....	76
3.5 基于模糊逻辑的自适应 UKF 推位导航算法.....	77
3.6 小型 AUV 推位导航系统湖上试验.....	78
3.6.1 磁偏角辨识试验.....	80
3.6.2 自适应 UKF 推位导航试验.....	82
参考文献.....	85
第 4 章 大潜深 AUV 惯导系统纯距离误差修正算法	86
4.1 纯距离惯导系统误差修正算法模型.....	87
4.1.1 系统模型.....	87
4.1.2 滤波模型能观性分析.....	88
4.1.3 纯距离观测下滤波模型能观性分析.....	89
4.1.4 深度测量值辅助的滤波模型能观性分析.....	90
4.2 纯距离误差修正算法框架.....	92
4.2.1 强跟踪 UKF 算法.....	93
4.2.2 强跟踪平方根 UKF 算法.....	95
4.2.3 渐消因子算法优化.....	100
4.3 纯距离误差修正仿真试验.....	101
参考文献.....	104
第 5 章 AUV 水下同步定位与制图算法	106
5.1 Sage-Husa 自适应 UKF 算法.....	107
5.2 AUV 水下 SLAM 算法滤波模型.....	109
5.2.1 运动学模型与特征模型.....	109
5.2.2 观测模型.....	110
5.3 前视声呐线特征提取算法.....	111
5.3.1 前视图像声呐工作方式.....	111
5.3.2 声呐数据处理.....	112
5.3.3 声呐数据坐标处理.....	114

5.3.4 线特征提取	116
5.4 仿真试验分析	122
5.4.1 坐标系与子地图	124
5.4.2 仿真试验与分析	125
参考文献	127
第 6 章 基于单领航者相对距离测量的多 AUV 协同导航定位算法	128
6.1 系统网络与定位原理	128
6.2 滤波模型定义与性能分析	130
6.2.1 基于位置误差的滤波模型	130
6.2.2 协同导航系统定位误差的上界	131
6.3 鲁棒 UKF 算法	134
6.3.1 H_{∞} 滤波问题的表达	135
6.3.2 次优 H_{∞} 滤波问题的解	136
6.3.3 基于 UT 的 H_{∞} 滤波	137
6.4 协同导航仿真试验	140
参考文献	143

第1章 绪 论

1.1 水下机器人与导航系统

1.1.1 水下机器人简介

人工智能、机电、计算机、自动化、传感器等技术的迅速发展,使人类发明、研制先进的海洋高科技装备成为可能。水下机器人作为人类探索、开发水下世界的有力工具,正在水下工程、大洋科学考察等领域发挥着不可替代的作用^[1-4]。水下机器人一词源于机器人学。狭义上讲,水下机器人是一种利用水下动力推进技术在水下运动,具有视觉和感知系统,能够基于声呐、水下摄像机、机械臂等任务载荷,通过遥控操纵或者自主方式辅助甚至代替人类去完成水下勘察、搜索、跟踪等任务的潜水装置。在自动化领域,水下机器人被看成是机器人的一类,是机器人相关技术在水下的特殊应用,属于特种机器人范畴。在海洋工程领域,也可将水下机器人称为无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)、无人水下运载器、无人潜水器、无人潜航器或者无人潜器等^[5]。水下机器人分类如图 1.1 所示。

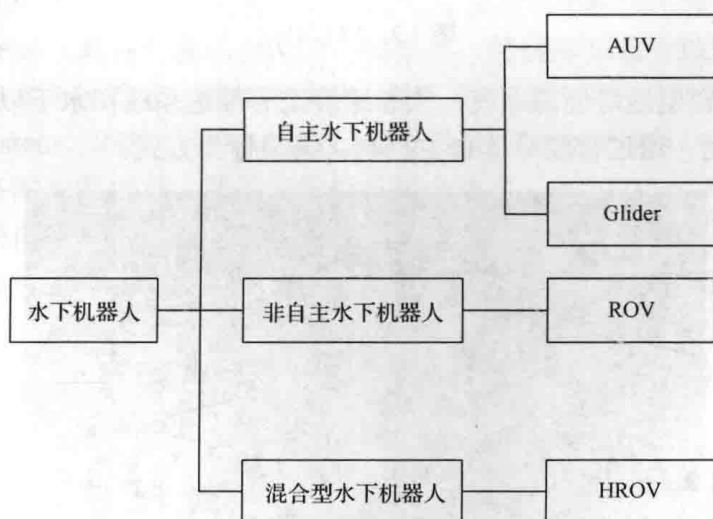


图 1.1 水下机器人分类

图 1.1 从自主性角度将水下机器人分为自主水下机器人、非自主水下机器人和混合型水下机器人三类。自主水下机器人包括在水下采用走航模式航行的自主

式水下航行器 (autonomous underwater vehicle, AUV) 和在水下采用滑翔模式航行的水下滑翔机 (Glider)。非自主水下机器人是无人有缆的遥控式水下机器人 (remote operated vehicle, ROV)。混合型水下机器人在深海与深渊探测领域产生, 即一种兼具自主和非自主两种模式的混合型遥控式水下机器人 (hybrid remotely operated vehicle, HROV)。

1. AUV

1957 年, 美国华盛顿大学应用物理实验室研制成功了世界上第一个 AUV——SPURV (self-propelled underwater research vehicle), 如图 1.2 所示, 拉开了 AUV 蓬勃发展的序幕。



图 1.2 SPURV

AUV 搭载锂电池等能源系统, 依靠螺旋桨等推进系统在水下以如图 1.3 所示的走航模式运动, 通过智能系统自主控制、决策行为方式。

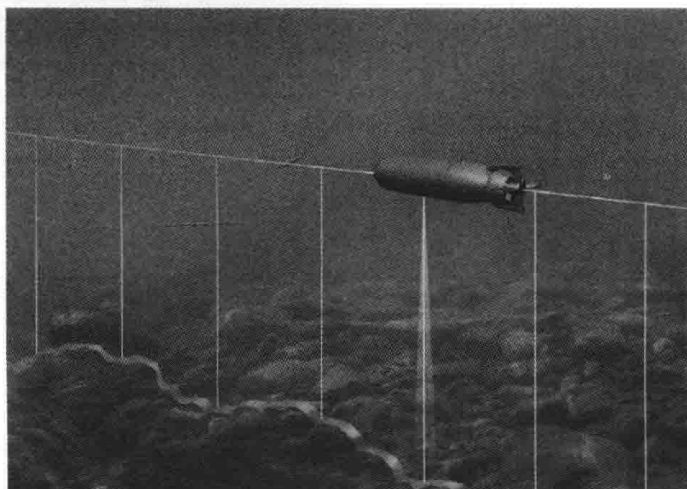


图 1.3 AUV 的走航式水平航迹

如图 1.4 所示, AUV 通常采用类似鱼雷或小型潜艇的回转体外形, 这种形状的设计已经过大量的研究和试验测试, 证明其水动力特性较好, 而且比较容易设计和制造。此外还可根据实际应用的需要, 采用仿生、扁圆、长方形、立扁体、水滴等外形设计 AUV, 广泛应用于海洋地球物理信息采集、水文情报收集、水下目标跟踪、水下搜探等方面, 具有自主性高、活动范围大、灵活方便等特点。但 AUV 执行任务的时限受自身携带能源约束, 且通常驱动能力有限, 无法执行大载荷水下作业或施工任务。

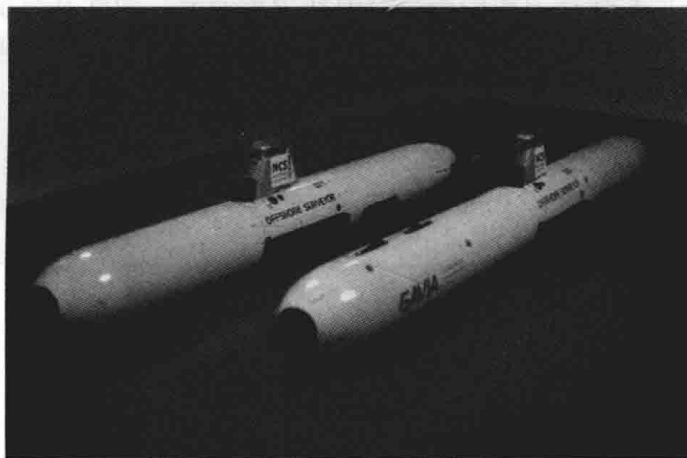


图 1.4 鱼雷形 AUV

由于 AUV 需要长时间在水下以走航模式自主水平航行, 因此其上搭载的导航与定位设备必须具备较高的自持力与完整性, 即能够尽量少地依赖甚至摆脱卫星导航定位、水声导航定位等外部系统, 仅依靠自身搭载的惯性导航系统 (inertial navigation system, INS)、罗经、DVL 等导航设备融合视觉声呐、水下摄像机等环境感知设备的观测信息, 基于多源信息融合技术, 使 AUV 在不上浮的条件下, 获取位置、航向、速度等完整、准确的导航信息。这样就可降低由于亟须卫星导航系统定位修正而被迫上浮, 抑或水声导航定位系统定位信息覆盖范围有限造成的 AUV 水下作业时间和作业空间的损耗和限制。

高精度水下导航定位系统不仅是 AUV 执行潜航作业的先决条件, 而且是 AUV 在水下航行安全的根本技术保障。导航定位技术作为关键技术, 通常被看成是衡量 AUV 发展成熟度、工程实用化水平的标志之一。由于水下无线电信息传输的局限性, 很多情况下 AUV 无法直接使用高精度的卫星导航定位信息, 非卫星水下导航定位技术成为多年来 AUV 导航领域的研究热点, 应用于 AUV 的水下导航定位技术最为丰富、最具代表性, 因此本书主要针对 AUV 水下导航相关技术进行介绍和论述。

2. Glider

1989 年, Glider 的概念由美国物理海洋学家 Henry Stommel 正式提出^[6], Glider 是一种新型水下机器人。与 AUV 类似, Glider 同样需要自身携带能源, 并基于自主控制方式航行。但与 AUV 运动模式不同, Glider 通过内部机械结构的精巧设计, 可自动调整净浮力和重心位置, 通过改变自身姿态角, 借助水平翼获得推进力, 以如图 1.5 所示的滑翔模式在作业纵剖面内波浪式上下起伏前进。由于水下 Glider 只在调整净浮力和姿态角时消耗少量能源, 因此具有能耗低、续航力持久(可达上千公里)等优点, 能在水下剖面内完成长时序、大范围、远距离的运动。

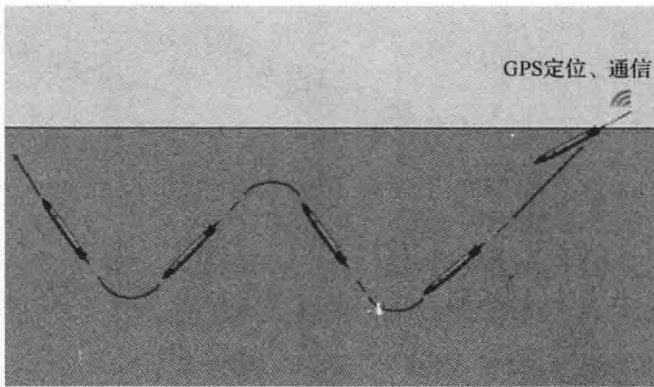


图 1.5 Glider 运动轨迹

如图 1.6 所示, 典型的 Glider 多采用鱼雷体加水平翼的外形设计, 显然这种设计易于生产制造, 但水动力特性不够理想, 因此产生了扁平仿生鱼形设计、翼身融合型浮体式外形设计, 甚至蝶形设计以期提高 Glider 的机动能力, 扩展 Glider



图 1.6 鱼雷体加水平翼设计的 Glider

的航行模式。由于 Glider 采用波浪式滑翔运动方式, 耗能低、续航力强, 可以通过搭载不同传感器, 长时间执行大范围水体的海洋环境监测或调查任务。

与 AUV 不同, 波浪式的滑翔运动方式允许 Glider 周期性地上浮至水面, 保证其可以利用全球定位系统(global positioning system, GPS)等卫星导航定位系统获取自身位置信息, 而且 Glider 通常无法定深或定高航行, 不能使用 DVL 等走航式导航设备, 而只需搭载罗经等能够感知航姿信息的导航设备即可满足控制系统对 Glider 自身运动状态信息的反馈需求, 可见 Glider 导航系统相对简单, 成本较低。

3. ROV

世界上第一部 ROV 是法国人 Dimitri Rebikoff 在 1953 年发明的。与自主水下机器人不同, ROV 通过脐带电缆或细缆与水面母船或岸基系统连接进行信息交互, 其中细缆遥控式 ROV 自带动力, 细缆仅用于 ROV 与母船或基站间的信息与遥控指令交互, 受能源限制, 细缆遥控式 ROV 一般只能应用于水下观测作业、样本采集等轻型作业任务。而电缆遥控式 ROV 无须自备能源, 由水面母船或岸基系统通过电缆为 ROV 提供电力支持的同时也能进行信息交互, 因此驱动能力较强, 通过搭载液压机械手、液压驱动电机等大载荷电力设备, 能够胜任水下重型作业任务。与其他类型水下机器人比较而言, 目前 ROV 技术最为成熟且应用范围最为广泛, 人的参与使得 ROV 能完成复杂的水下作业任务。

如图 1.7 所示, 目前 ROV 多采用开架式结构, 在水平方向和垂直方向上配备多台推进器, 能够实现前进、后退、原地回转等运动, 机动性较高, 可实现水下定位。由于工作场景和任务灵活多变, ROV 的导航设备往往根据实际情况进行灵活配置。但与自主水下机器人不同, ROV 水下作业范围有限, 而且一般配备母船支持, 因此如超短基线(ultra short baseline, USBL)定位声呐等水声导航定位系统特别适用于 ROV 在水下定位。此外, ROV 通常还需搭载光纤罗经等导航设备确定自身航姿信息。

4. HROV

HROV 是细缆 ROV 的进一步发展和创新。如图 1.8 所示, “海神”号是世界上第一款 HROV, 由美国伍兹霍尔海洋研究所于 2008 年设计并完成建造, 用以探索世界各地 6000~11000m 的超深渊。与细缆 ROV 类似, HROV 同样需要搭载锂电池为自身提供能源, 并通过一根微细光缆同母船连接, 用以遥控、信息交换和安全保障支持。与细缆 ROV 不同的是, HROV 具备自主控制模式, 必要时可以切断微细光缆, 摆脱母船控制, 实现水下自主航行。可见 HROV 实现了远程遥控和自主控制混合的两种操作模式, 因此其可以通过不具备动力定位能力的小型船舶布放。