

高端科技专著丛书



临近海面空间内

多智能体协同任务优化

崔亚妮 任佳 杜文才 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

临近海面空间内多智能体 协同任务优化

崔亚妮 任 佳 杜文才 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

相对于“空-天-海-地”大尺度空间,海平面以上 3000 米至海平面以下 200 米的贴海区域被称作临近海面空间。目前,世界各海洋军事强国都在积极开展临近海面空间内的多类型智能体协同技术研究,期望形成多类型智能体协同指挥、协同控制、协同侦察和协同打击的新型海洋无人作战体系。根据这一发展趋势,本书对临近海面空间内多智能体的编队编成方法、组网优化方法和协同任务规划方法进行介绍,根据应用场景详细阐述多智能体编队编成算法、网络拓扑优化控制算法和集中式/分布式动态任务规划算法,并给出上述算法的应用实例。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

临近海面空间内多智能体协同任务优化/崔亚妮,任佳,杜文才编著. —北京:电子工业出版社, 2017.11

(高端科技专著丛书)

ISBN 978-7-121-32992-0

I. ①临… II. ①崔… ②任… ③杜… III. ①海面—智能通信网—研究 IV. ①TN915.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 264348 号

策划编辑:牛平月

责任编辑:赵丽松

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16 印张:10.25 字数:192 千字

版 次:2017 年 11 月第 1 版

印 次:2017 年 11 月第 1 次印刷

定 价:48.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254454, niupy@phei.com.cn。

前言

《《《《 PREFACE

形成海洋区域信息化、精细化、立体化管理，提高我国海洋安全保障、应急处置、环境监测和海上智能化作业能力，是实现海上丝绸之路经济繁荣稳定的重要保障，是我国建设成为海洋强国，提升负责任大国形象的强大助力。

海洋新技术、新装备的应用与突破，是建设海洋强国的重要途径和组成部分。为此，我国在 2014 年、2015 年国家 863 计划中连续部署了“深远海海洋动力环境监测关键技术与系统集成”和“未来一体化网络关键技术和示范”重大专项。2016 年发布了“海洋环境安全保障”国家重点研发计划。从上述研究计划布局可以看出，我国正在逐步建设以星基通信/观测为基础、空中平台为延伸、水面和水下自主航行器为触手的立体化海洋信息系统。

相对于“空—天—海—地”大尺度空间，海平面以上 3000 米至海平面以下 200 米的贴海区域是人类在海洋发生社会活动、经济行为和军事斗争的主要区域，可称该区域为临近海面空间。目前，世界各海洋军事强国都在积极开展临近海面空间内的多类型智能体协同技术研究，期望形成多类型智能体协同指挥、协同控制、协同侦察和协同打击的新型海洋无人作战体系。根据这一发展趋势，本书将围绕临近海面空间内多智能体的编队编成、组网优化和协同任务规划等应用背景，构建多智能体编队编成算法、网络拓扑优化控制算法和集中式/分布式动态任务规划算法，并在无人机与无人船的协同作战任务背景下进行应用。

本书内容共分三个部分。

第一部分主要是全书相关内容的背景介绍，包括第 1 章和第 2 章。第 1 章主要介绍了国内外相关领域的研究动态和发展趋势，回顾了多智能体协同任务规划和多智能体通信组网优化领域涉及的主要研究方法，围绕临近海面空间阐述了多智能体的编队编成、组网优化和协同任务规划的任务背景及关键科学问题，并以此为基础引申出本书其他相关内容。第 2 章主要介绍一种新兴海洋智能装备——无人水面艇技术的演进过程及发展现状，并重点对其在各领域的应用前景进行阐述与分析。

第二部分主要介绍临近海面空间内多智能体通信组网优化方法，包括第 3 章和第 4 章。第 3 章围绕海上多智能体的编队编成问题，介绍了一种基于改进二进制粒子群优化的编队编成算法，并以南海无人岛礁防卫为任务背景，阐述了海上多智能

体的编队编成问题，以及 BPSO 算法在该问题中的应用。第 4 章针对海上多智能体通信网络拓扑优化与控制问题，结合海上无线电波的传播环境，构建了海上无线电波传播模型，并将该海上无线电波传播模型与 DPSO 算法结合，在海上智能体网络拓扑优化控制中进行应用。

第三部分主要介绍临近海面空间内多智能体协同任务规划方法，包括第 5 章和第 6 章。第 5 章介绍了海上多智能体协同打击时敏目标集中式任务规划方法。针对海上任务持续时间的不确定问题，介绍了一种基于时间窗口机制的集中式动态任务规划算法。该方法主要用于保证智能体在有效的窗口内到达打击点，完成全部时敏目标的打击任务，并均衡地分配打击任务，发挥多智能体协同作战能力。第 6 章介绍海上多智能体协同目标跟踪分布式任务规划方法。对分布式控制方式下的多智能体协同跟踪多个移动目标的过程进行了详细描述，将其分解为通信决策、任务分配和路径规划三个子问题，给出了相应的解决方案和仿真实例。

全书由崔亚妮、任佳、杜文才共同撰写，并由任佳和崔亚妮负责统稿。具体分工为：崔亚妮主要撰写第 3 章、第 4 章、第 5 章，合计版面字数约为 10 万字；任佳主要撰写第 1 章、第 2 章、第 6 章，合计版面字数约为 9.2 万字；由杜文才进行资料整理。同时，在本书撰写过程中得到交通运输部规划研究院王福斋，俄罗斯莫斯科动力学院 Vladimir Shikhin，海南大学张育、陈褒丹、刘文进、沈荻帆、刘琨、张胜男和戴晶帼的支持与帮助。

本书是编著者在多年从事多智能体协同控制和海洋通信技术研究基础上整理而成的。其撰写和出版得到国家国际科技合作专项（2015DFR10510）和国家自然科学基金项目（61440048）（61562018）的资助。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和错误之处，敬请读者不吝指正。

编著者

2017 年 8 月

目录

CONTENTS

| | |
|-----------------------------------|------|
| 第 1 章 临近海面空间多智能体协同技术 | (1) |
| 1.1 海洋智能装备应用前景..... | (1) |
| 1.2 多智能体协同技术研究进展..... | (4) |
| 1.2.1 海洋智能装备..... | (4) |
| 1.2.2 多智能体协同任务规划..... | (8) |
| 1.2.3 多智能体通信组网优化..... | (16) |
| 1.3 临近海面空间内多智能体协同关键问题..... | (17) |
| 1.4 本书主要内容..... | (20) |
| 1.4.1 海上多智能体编队编成..... | (21) |
| 1.4.2 海上多智能体通信网络拓扑优化控制..... | (21) |
| 1.4.3 基于时间窗口机制的集中式任务规划..... | (22) |
| 1.4.4 基于任务一致性的分布式任务规划..... | (22) |
| 1.5 本书组织结构..... | (23) |
| 第 2 章 无人水面艇技术 | (26) |
| 2.1 引言..... | (26) |
| 2.2 早期 USV 的应用..... | (26) |
| 2.3 现代 USV 的原型——猫头鹰系列..... | (29) |
| 2.4 现代 USV 技术发展..... | (32) |
| 2.4.1 军用 USV 技术发展..... | (32) |
| 2.4.2 民用 USV 技术发展..... | (46) |
| 2.5 本章小结..... | (52) |
| 第 3 章 海上多智能体编队编成 | (53) |
| 3.1 引言..... | (53) |
| 3.2 编队编成问题描述..... | (53) |
| 3.2.1 编队编成基本原则..... | (54) |
| 3.2.2 编队编成问题描述..... | (55) |
| 3.3 海上多智能体编队编成模型..... | (55) |

| | | |
|--------------|-------------------------------------|-------------|
| 3.3.1 | 编队任务执行效能 | (55) |
| 3.3.2 | 编队编成模型 | (58) |
| 3.4 | 基于 DNBPSO 的海上多智能体编队编成算法 | (59) |
| 3.4.1 | 粒子群优化算法描述 | (59) |
| 3.4.2 | DNBPSO 算法描述 | (63) |
| 3.4.3 | 基于 DNBPSO 的海上多智能体编队编成算法描述 | (65) |
| 3.4.4 | 基于 DNBPSO 的海上多智能体编队编成算法实现 | (67) |
| 3.5 | 仿真实验与分析 | (69) |
| 3.5.1 | 实验环境与条件假设 | (69) |
| 3.5.2 | 仿真实验与结果分析 | (71) |
| 3.6 | 本章小结 | (73) |
| 第 4 章 | 海上多智能体通信网络拓扑优化控制 | (74) |
| 4.1 | 引言 | (74) |
| 4.2 | 海上无线电波传播模型 | (75) |
| 4.2.1 | 海上无线电波传播环境 | (75) |
| 4.2.2 | 海上无线电波传播损耗预测模型 | (76) |
| 4.3 | 网络拓扑优化控制模型 | (79) |
| 4.3.1 | 链路通信质量模型 | (79) |
| 4.3.2 | 网络连接收益模型 | (80) |
| 4.3.3 | 网络连接成本模型 | (81) |
| 4.4 | 基于 DPSO 的海上多智能体通信网络拓扑优化控制算法 | (82) |
| 4.4.1 | 基于 DPSO 的海上多智能体通信网络拓扑优化控制算法描述 | (82) |
| 4.4.2 | 基于 DPSO 的海上多智能体通信网络拓扑优化控制算法实现 | (84) |
| 4.5 | 基于 EM-DPSO 的海上多智能体通信网络拓扑优化控制算法 | (86) |
| 4.5.1 | 基于 EM-DPSO 的海上多智能体通信网络拓扑优化控制算法描述 | (86) |
| 4.5.2 | 基于 EM-DPSO 的海上多智能体通信网络拓扑优化控制算法实现 | (88) |
| 4.5.3 | 基于 EM-DPSO 的海上多智能体通信网络拓扑优化控制算法复杂度分析 | (90) |
| 4.6 | 仿真实验与分析 | (92) |
| 4.6.1 | 实验环境与条件假设 | (92) |
| 4.6.2 | 仿真实验与结果分析 | (93) |
| 4.7 | 本章小结 | (96) |
| 第 5 章 | 海上多智能体协同打击时敏目标集中式任务规划 | (98) |
| 5.1 | 引言 | (98) |
| 5.2 | 协同打击时敏目标问题描述 | (99) |
| 5.3 | 协同打击时敏目标集中式任务规划算法 | (100) |

| | | |
|--------------|----------------------------|--------------|
| 5.3.1 | 集中式任务分配 | (100) |
| 5.3.2 | 在线路径规划 | (104) |
| 5.3.3 | 集中式任务规划算法实现 | (107) |
| 5.4 | 仿真实验与分析 | (109) |
| 5.4.1 | 实验环境与条件假设 | (110) |
| 5.4.2 | 仿真与分析 | (111) |
| 5.5 | 本章小结 | (117) |
| 第 6 章 | 海上多智能体协同目标跟踪分布式任务规划 | (118) |
| 6.1 | 引言 | (118) |
| 6.2 | 协同目标跟踪问题描述 | (120) |
| 6.2.1 | 通信决策 | (120) |
| 6.2.2 | 动态任务分配 | (120) |
| 6.2.3 | 跟踪路径规划 | (121) |
| 6.3 | 通信决策机制 | (121) |
| 6.4 | 协同目标跟踪分布式任务规划算法 | (122) |
| 6.4.1 | 分布式动态任务分配 | (122) |
| 6.4.2 | 跟踪路径在线规划 | (125) |
| 6.4.3 | 分布式任务规划算法实现 | (126) |
| 6.5 | 仿真实验与分析 | (128) |
| 6.5.1 | 实验环境与条件假设 | (128) |
| 6.5.2 | 仿真与分析 | (129) |
| 6.6 | 本章小结 | (137) |
| 附录 A | 图目录 | (138) |
| 附录 B | 表目录 | (141) |
| | 参考文献 | (142) |

第1章

临近海面空间多智能体协同技术

1.1 海洋智能装备应用前景

我国 90%的进出口贸易，80%的渔业资源，50%的能源输入来自海洋。“海兴则国强民富，海衰则国弱民穷”。要保持我国经济稳步增长，实现中华民族的伟大复兴，建设海洋强国是必由之路^[1]。

我国南海管辖海域面积为 210 多万平方千米，该地区不仅是我国能源、水资源、渔业资源的重要储备区域，拥有极高的经济和航运价值，也是我国维权执法、领海/领空保护的重点区域。目前，西方某些国家利用无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）、无人水面艇（Unmanned Surface Vehicle, USV）和水下潜航器（Unmanned Undersea Vehicle, UUV）对我国南海海域进行非法测绘，对我国领海安全造成了重大威胁。在这种紧迫的安全形式下，我国在继续加大新型海洋智能装备研发力度的同时，需要研究海洋任务环境下智能装备协同组网、协同指挥、协同控制的有效技术手段，探索出一条围绕多类型海洋智能装备协同化应用的可实施路径，为我国南海权益保护和捍卫领土完整提供强大助力。

海洋新技术、新装备的应用与突破是建设海洋强国的重要途径和组成部分。为此，我国在 2014 年、2015 年国家 863 计划中连续部署了“深远海海洋动



力环境监测关键技术与系统集成”和“未来一体化网络关键技术和示范”重大专项。2016年发布了“海洋环境安全保障”国家重点研发计划。从上述研究计划布局可以看出，我国正在逐步建设以星基通信/观测为基础，空中平台为延伸，水面和水下自主航行器为触手的立体化海洋信息系统。

作为海洋信息系统的重要环节，UAV、USV、UUV、海上观测/通信浮漂（Maritime Observation/Communication Float, MOCF）等新型海洋智能装备已成为各海洋科技强国争相研究的对象。

我国从“十五”期间开始逐步加大对海洋相关领域的投资力度，研制出了多种类型、性能先进的海洋智能装备，如：中国航天科技集团公司十一院研制的“蓝色海鸥”彩虹—4型长航时海洋环境监测 UAV；中国科学院电子学研究所研制的船舶自主起降 UAV；天津大学研制的波浪能为主驱动力的海洋观测波浪滑翔器；哈尔滨工程大学研制的远程复合动力快速 USV；中国科学院沈阳自动化研究所研制的 UUV 组网观测系统等。与此同时，2015年我国在 11 个沿海省市部署了 UAV 侦测基地，通过空中侦测手段弥补卫星侦测的不足，加强我国管辖海域的海洋生态环境和领土安全的监管力度。

相较于我国海洋智能装备的技术水平，以美国、以色列、英国为代表的西方海洋强国，无论是海洋智能装备的工艺，还是海洋智能装备的任务执行能力，都处于领先水平。例如：美国目前已研制了四种类型 USV，分别用于海域搜索、反潜/反水雷、火力支援、水下传感器投放/回收等任务；研制的 Wave Glider 无动力波浪艇开始在“阿利·伯克”级驱逐舰上进行部署，国家以提升水面舰艇的水下作战能力；国家研制的“MQ-4C”UAV 可实现宽广海域侦察和信息采集；以色列研制的 Heron 海上长航时 UAV 与“KATANA”USV 实现了中远海侦察与打击一体化。

根据美国近期发布的无人系统发展路线图，以及正在开展的海洋智能装备测试工作，无人系统技术发展方向已从以人员控制为中心的单智能体作业模式转向以网络为中心的多智能体协同模式^[2]。在此技术演进路线下，美国 TEXTRON 公司于 2012 年开展了 USV 协同控制技术研发，并利用 USV 平台搭载 UUV 实现水面—水下协同反水雷作战测试。2016 年 10 月，美国海军在切萨皮克海湾进行了为期一个月的海上 USV 测试，在无人干预的情况下，利用 4 艘 USV 协同完成了巡逻、目标识别、目标跟踪等任务。以色列近期开展了

“Heron” UAV、“KATANA” USV、有人舰艇间的协同作战演练，通过反恐、反潜、海面火力支援等一系列测试，逐步形成了海洋智能装备协同作战体系。在该发展趋势下，各海洋强国在继续提升海洋智能装备自主控制能力的同时，正在逐步加强海洋智能装备的协同任务执行能力，期望形成多类型智能体协同指挥、协同控制、协同侦察和协同打击的海洋无人作战体系。

通过查阅国内外现有海洋智能装备的技术参数，发现相关装备在海平面以上 3000m 至海平面以下 200m 的贴海区域。该区域也是人类经济活动和军事斗争最为频繁的区域。为了更加清晰地描述海洋智能装备组网优化与协同任务规划在该区域内面临的关键科学问题，相对于“空—天—海—地”大尺度空间，本书将该区域命名为临近海面空间，如图 1-1 所示。

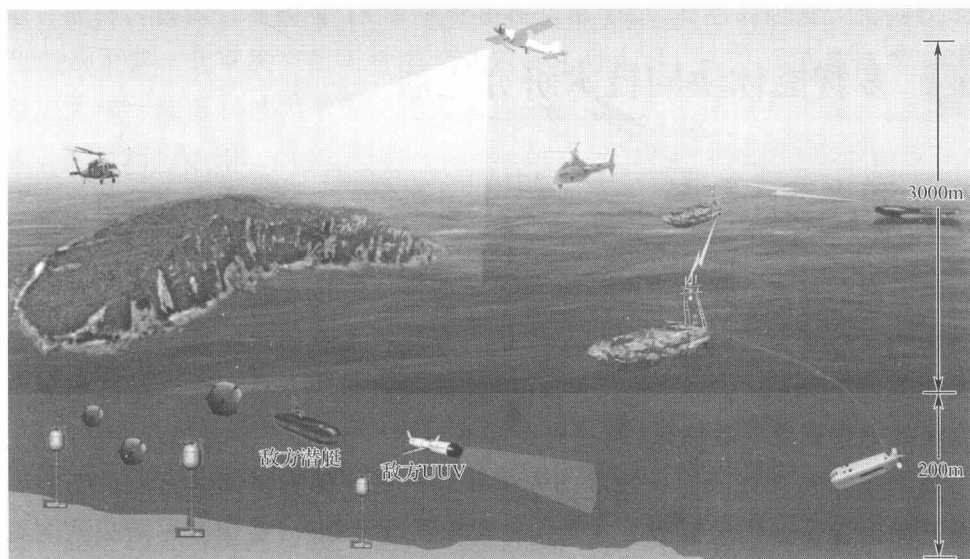


图 1-1 临近海面空间

相较于现有的陆地或空中多智能体协同技术，海洋智能装备在临近海面空间内的组网优化与协同任务规划具有以下特点：

- (1) 任务场景主要为贴近海面区域，无线电波传播特性与陆地有较大差异；
- (2) 任务环境缺少通信保障基础设施，智能体之间需要通过动态组网实现



信息传递；

(3) 任务环境海况气象条件复杂多变，智能体之间通信链路维持难以保障，需要提高智能体之间的通信效率；

(4) 任务类型具有海洋自身特点，且海上任务特征存在显著的时变特性，海洋智能装备的任务执行效能需要得到充分保证。

针对上述特点，本书围绕临近海面空间内多智能体组网优化与任务规划涉及的关键问题，开展了多智能体编队编成、网络拓扑优化控制、集中式/分布式动态任务规划等理论方法研究，并从南海维权、领海/领空保护的实际需求出发，在海上协同任务背景下对介绍的方法进行验证。在此基础上形成的多智能体协同理论方法和应用技术，将为我国海洋智能装备技术研究与应用提供方法借鉴与技术储备。

1.2 多智能体协同技术研究进展

1.2.1 海洋智能装备

随着通信技术、作战平台技术和远程指挥控制技术的快速发展，海洋智能装备应用涵盖了海洋战场环境信息收集、海面及水下侦察监视、作战打击、后勤支援等诸多领域。可想而知，海洋智能装备将在未来海洋军事对抗和空海一体化作战中占据重要地位。

美国作为海洋智能装备技术的先进代表，在该国国防部《无人系统发展路线图》的指导下，先后制定了《无人地面车联合计划》（美国海军陆战队同美国陆军共同完成）、《无人机计划》、《无人潜航器计划》、《无人水面艇计划》等发展蓝图，对作战领域内的多类型无人智能装备技术演进提供指导意见。下面对临近海面空间内部署实施的 USV 和 UAV 技术发展现状进行介绍。

1. USV 技术

USV 是指依靠远程操控或自主航行的无人化、智能化船舶，可通过飞机或大型舰艇携带，到达预定地点后进行施放，也可直接在近岸使用，以满足不同

的任务要求^[3]。根据资料显示,截至2016年6月,美国、以色列、英国、法国、德国等十几个国家研制了多种型号、多种用途的USV,如“斯巴达侦察兵”、“海上猫头鹰”、“海狐狸”、“天龙星”、“反潜战持续跟踪水面无人艇—ACTUV”、“大拖力水面无人艇”、“幽灵卫士”、“港翼X系列”、“哨兵”、“水虎鱼”等。上述USV在军事领域已形成较完善的应用体系,能够支持常规打击、介入作战、水雷/声呐/潜标布设、反潜等进攻任务;以及防空、防御性反潜、反水雷等防御任务。

相对于西方海洋科技强国,我国USV技术起步较晚,技术水平相对落后。目前,我国研制的USV主要包括:中国航天科工集团公司和中国气象局大气探测技术中心共同研制的“天象一号”USV;四方公司研制的“双M”型隐身船;上海大学、中船重工和上海海事海测大队三方联合研制的“精海”无人测量艇。此外,国内目前约有15家单位正在从事USV产品的研发,主要代表有西北工业大学、北京航空航天大学、哈尔滨工程大学、海军大连舰艇学院、武汉理工大学、江苏科技大学等,相关单位研制的USV都处于湖面或近海试验阶段。

根据目前各国USV的研发进展情况,按照USV的功能可将USV分为以下4类。

(1) X级USV,是一种小型、非标准化的USV,此类USV主要承担特种部队作战任务和海上拦截行动。X级USV平台主要通过对有人驾驶水面设备进行无人化改造,为使用者提供了价格低廉的智能、监管、侦察服务。

(2) 港口级USV,由海军标准钢性充气冲锋艇改装而成,具有较高的智能、监视、侦察能力,并且通过搭载杀伤性和非杀伤性武器,以承担航海安全任务。由于西方各国港口级USV都以标准的7M冲锋艇改装而成,因此该型USV可支撑大多数舰队的快速换装。

(3) 浮潜级USV,采用全钢制全封闭设计,可承担反水雷搜索、反潜/海上防御及高隐秘性任务。该类型USV水下最高速度达25节(kn)。在相同尺寸和推力下,半潜USV任务载荷搭载能力是水面USV的1.5倍。

(4) 舰艇级USV,是根据载荷工作要求而设计的一类USV。该类型的USV可利用船载声呐等传感器完成水雷扫描、航道保护、反潜侦察/打击等任务。

通过对USV技术资料的分析,总结出USV技术的主要发展趋势如下:



(1) 减少信息交互，主要通过自主控制技术减少 USV 的数据指令发送，利用先进的自主目标识别、态势评估、任务决策技术减少 USV 的数据请求；

(2) 增强协同作战能力，利用协同指控系统（指挥、控制、通信、计算机）实现四种类型 USV 的协同作战；

(3) 平台模块化，方便海上舰艇搭载和控制，能够形成海上常规作战任务的功能模块，完成危险事件的监测与信息实时反馈，实现水面舰艇人员对 USV 的操控；

(4) 降低人员干预，USV 应从最初的“人参与”控制链路回路，逐渐演进为半自动化，直至完全自主控制。

2. UAV 技术

相较于 USV 的工作区域，UAV 是在距海平面一定高度下进行作业的智能体。目前，在临近海面空间内使用的 UAV 技术成熟度较高，机载设备覆盖海域面积广，搜索范围大，能够利用无线链路将获得的侦察信息及时传递给 USV 和有人舰艇，提高了海洋战场环境的感知能力，延长了 USV 和有人舰艇海面作战预警时间。此外，UAV 可利用其机载通信设备执行通信中继、武器制导和任务规划/评估等任务^[4]。如果 UAV 加载攻击性武器，还可以对海面目标和岛屿目标实施远距离精确打击。

目前，可在临近海面空间内使用的 UAV 主要包括三种类型：从陆地和航母起飞的长航时察/打一体化 UAV，舰载 UAV 和潜射 UAV。由于从陆地和航母起飞的长航时察/打一体化 UAV 对起降场地依赖性较大，且对深远海战场突发任务支援的时效性较差，美国国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）从持久性空中情报的获取、海区监视/侦察、待机精确打击等方面考虑，提出“必须发展以舰船，而不是以航母或岸基为依托的 UAV 持久性空中支援技术”。

DARPA 通过计算发现，全球约 97% 的陆地区域位于距离海岸线不超过 1700km 的范围内，全球年平均海况在 5 级以下的海域约占全球海洋面积的 73%。因此，以常规舰船为基础平台，通过搭载 UAV，可形成一个持久性海区空中侦察、情报获取和打击的巡逻圈。为此，美国在 2013 年启动了“TERN UAV”项目，目的是为海军 200 多艘各种类型的舰船上配备能够实现起飞、操

作和回收功能的 UAV，并要求该型 UAV 的作战能力要与陆基“捕食者”UAV 相当。2016年1月，DARPA 和诺斯洛普·格鲁门公司（Northrop Grumman）官方网站先后宣布了“TERN UAV”合同授予事宜，公布了该机的概念图，计划在2017财年完成新一代美军舰载 UAV 加油机 MQ-25“黄貂鱼”（Stingray）的竞标工作。与此同时，DARPA 决定将近年引起广泛关注的 X-47B 型 UAV 研发项目下马。

在“TERN UAV”项目立项的同时，DARPA 为进一步提升海军水下作战能力，正式与洛克希德·马丁和通用动力电船公司合作，开展“潜射与回收多功能 UAV”的研发工作。经过几年的研发和测试，洛克希德·马丁公司正式推出“鸬鹚（Cormorant）”潜射 UAV。在此技术的基础上，美国海军对“俄亥俄”级战略导弹核潜艇群中的一部分进行改装，利用“鸬鹚”潜射 UAV 提高潜艇的战役战术执行能力。

相对我国陆基 UAV 技术发展水平，我国海军舰载 UAV 发展较为滞后。2011年，中国海军两种舰载无人机陆续曝光，主要平台为奥地利产 S-100 和瑞典赛博公司的 APID-60 舰载 UAV。此外，中国海军还装备了 ASN-206UAV、Z-5 无人直升机等。2011年7月，我国首次在官方媒体公开了有关我国海军部队开始运用 UAV 进行战场远程通信支援演练的报道。该报道称，该型 UAV 就是由“ASN-206/209”平台改装而成，可完成海面反电子侦察、空中中继、大量情报传递、特情处置等任务，能够在海面构建起一张覆盖数百千米的战场通信网络。

UAV 技术发展非常迅速，各军事大国在 UAV 自主控制技术的基础上，都在争相研究执行复杂任务的多机协同控制与通信组网技术，主要发展趋势如下所述：

（1）多 UAV 协同编队控制与协同航迹规划。UAV 编队应根据战场环境与态势进行队列变化与保持，从而进一步使交战区域内的 UAV 编队可根据多约束条件（空间约束、时间约束、环境约束、任务约束等），规划 UAV 编队中的每架 UAV 飞行轨迹，使 UAV 编队飞行性能最优。

（2）战场环境中多 UAV 协同任务决策。海洋战场环境中的不确定因素较多，根据交战状况，UAV 编队预规划任务也将随着交战态势发生变化，尤其在各种突发情况下（目标状态剧烈变化、突发威胁产生、敌方交战策略变化等）



编队意图无法实现时，UAV 编队需要根据作战环境变化情况迅速协调各架 UAV，达到作战效能的最大化。

(3) 网络化条件下多 UAV 协同控制。UAV 编队作为海洋战场环境中的一个作战单元，除了需要完成编队内部信息的收发，还要能够与作战指控中心、其他海上作战智能体构建成一个综合性的通信网络，以满足海洋战场多类型智能体协同作战的要求。然而，构建的通信网络可能在敌方电磁干扰、海洋环境干扰下出现通信带宽受限、传输损耗、传输信息丢失等情况。因此，需要对多智能体网络优化技术进行研究。

根据 USV 和 UAV 技术发展趋势，有效地形成多智能体协同任务执行能力已成为无人系统未来发展的重要方向。多智能体协同思想最早由美国 DARPA 提出，其初衷是实现较少操作人员对大规模智能体编队的控制。近年来，随着应用于海洋环境的 UAV、USV 和 UUV 等智能体的“测—控—通信”能力不断提高，智能体协同作业、集群作战等内容成为研究热点。根据公开资料和文献可知，多智能体协同技术研究内容可归为两类：基于控制理论，研究多智能体协同任务决策^{[5][6]}；基于通信理论，研究多智能体通信组网优化^{[7][8]}。下面对多智能体协同任务决策和通信组网优化的国内外发展现状进行介绍和分析。

1.2.2 多智能体协同任务规划

多智能体协同任务规划是指智能体编队根据任务安排、战场态势、目标状态和编队内各智能体属性特征，做出的合理性任务分配及运动轨迹制定，以确保编队任务执行效能的最大化。因此，多智能体协同任务规划可以分解为两部分，即多智能体协同任务分配和多智能体协同路径规划。

1. 多智能体协同任务分配

多智能体协同任务分配是指，基于特定的环境信息和任务需求，在智能体自身性能的约束下，为多智能体编队中的智能体分配一个或多个有序的任务，避免资源的冲突和浪费，保证各智能体以最小的代价执行任务，确保编队任务执行效能的最大化。

多智能体协同任务分配问题是一个典型的多约束组合优化问题^[9-11]。其过程

可以分为建模和解算两个部分，即在多智能体协同任务分配过程中，首先根据环境信息和任务需求等信息，对多智能体协同任务分配问题进行合理抽象，明确其优化目标和约束条件，建立合理的任务分配模型；然后，利用合理的优化方法对构建的任务分配模型进行动态解算。多智能体协同任务分配处理流程图如图 1-2 所示。

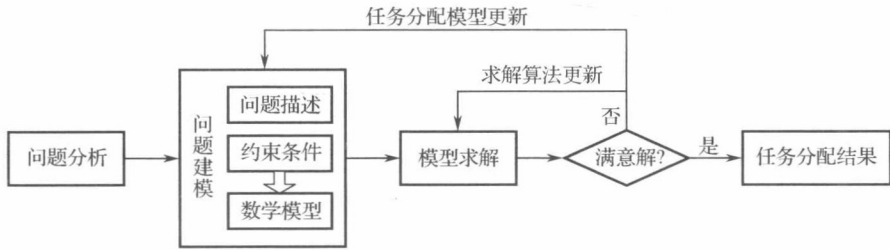


图 1-2 多智能体协同任务分配处理流程图

下面将从协同任务分配模型构建和协同任务分配模型解算两个方面阐述国内外研究现状。

1) 协同任务分配模型

早期研究人员一般采用经典数学优化模型对多智能体协同任务分配问题进行建模，主要包括多旅行商问题（Multiple Travelling Salesman Problem, MTSP）模型^[12-14]、车辆路径问题（Vehicle Routing Problem, VRP）模型^[15-17]、网络流优化（Network Flow Optimization, NFO）模型^{[18][19]}、混合整数线性规划（Mixed Integer Linear Programming, MILP）模型^[20-23]、资源福利问题（Resource Welfare Problem, RWP）模型^{[24][25]}等。其中，MTSP 模型和 VRP 模型适合单一类型任务分配模型的构建，而对于多类型任务（如多智能体执行侦察/打击/评估一体化任务）分配模型的构建并不适用。RWP 模型来源于经济学中的社会福利分配问题，主要对多智能体联盟问题中的任务分配问题进行抽象表征。

MILP 模型是目前较为流行的多智能体协同任务分配模型，该模型将多智能体协同任务分配问题转换为整数规划问题，并且在构建任务分配模型的过程中可引入多种约束条件。文献[21]在时间窗口、任务时序、任务类型能力和最大航程等约束条件下，基于 MILP 模型构建了协同任务分配模型。文献[22][23]针对多智能体协同执行侦察/打击/评估一体化任务，在任务时序、任务时间窗口等约