

挺进深蓝:从单体仿生到群体智能

陈健瑞,王景璟,侯向往,方政儒,杜 军,任 勇

(清华大学电子工程系,北京 100084)

摘 要: 近年来,群体智能作为一项多学科融合的新技术在各领域的研究成果斐然,例如共享出行、蜂群无人机系统、水下多智能体平台等,但与水下场景结合的群体智能技术缺乏系统的归纳,有必要对水下群体智能技术的发展现状和趋势进行讨论和分析.本文对群体智能理论进行了详尽的分析,给出了群体智能的完整概念、具体算法以及应用领域.文中指出,为解决海洋复杂环境对探测、通信等造成的一系列困难,需要将群体智能技术应用于水下场景.本文就国内外水下群体智能技术的研究现状进行了总结,对水下群体智能存在的环境复杂、通信受限、信息获取困难、系统能力不足以及能量供应受限的难点进行了评述.针对这些难点,本文对结合群体智能理论的时变环境感知技术、传感网络设计、协同导航定位技术、路径规划技术、水下编队控制以及分布式自主决策技术进行了分析,并在文末给出水下群体智能技术未来在跨域通信、多平台异构、自主作业能力革新方面的发展趋势和展望.

关键词: 群体智能; 水下机器人; 智能控制; 多智能体; 自主潜航器; 粒子群算法; 分布式系统; 水下通信

中图分类号: TN929.3

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2021)12-2458-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20201448

Advance into Ocean: From Bionic Monomer to Swarm Intelligence

CHEN Jian-ru, WANG Jing-jing, HOU Xiang-wang, FANG Zheng-ru, DU Jun, REN Yong

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In recent years, swarm intelligence, as a novel multi-disciplinary technology, has made remarkable achievements in various fields, such as shared traffic, swarm unmanned aerial vehicle system, underwater multi-agent platform, and so on, but the swarm intelligence technology combined with underwater scene is lack of systematic induction. Therefore, it is necessary to discuss and analyze the development status and trend of underwater swarm intelligence technology. This review aims to study and summarize the underwater swarm intelligence technology. It makes a complete introduction to the swarm intelligence theory, and gives the complete concept, specific algorithm and application field of swarm intelligence. And swarm intelligence technology needs to be applied to underwater scenes in order to solve a series of difficulties caused by complex marine environment. This review summarizes the research status of underwater swarm intelligence technology at home and abroad, and comments on the difficulties of underwater swarm intelligence, such as complex environment, limited communication, difficult information acquisition, insufficient system capacity and limited energy supply. In addition, aiming at these difficulties, this review analyzes the time-varying environment perception technology, underwater sensor network, collaborative navigation and positioning technology, path planning technology, underwater formation control and distributed autonomous decision-making technology combined with swarm intelligence theory, and gives the future application of underwater swarm intelligence technology in cross domain communication, multi-platform heterogeneous development trend and prospect of innovation of independent operation ability.

Key words: swarm intelligence; underwater robot; intelligence control; multi-agent; autonomous underwater vehicle (AUV); particle swarm optimization; distributed system; underwater communication

1 引言

海洋因其在对国家和社会的资源探测、经济开发、军事防御等方面上的重要地位逐渐成为世界各国竞争

的主战场.海洋环境的复杂性是制约海洋探索和开发的关键因素,它使得智能体(包括无人潜航器、智能传感器、智能浮标、水下机器人等)在进行水下任务时运动受限、受控性弱、危险性强、通信困难.为了解决水下

目前面临的问题和难点,迫切需要建立一整套完备的海洋探测、水下通信、信号处理、实时监控、灵活智能的理论和技術. 群体智能技术近年来在各个领域得到广泛应用,而其具有的去中心化、智能度高、灵活性强的独特优势正是解决一些海洋探索、开发问题的关键.

群体智能技术通过群体内的个体对目标及环境进行探测、认知、自主决策并与其他个体信息交互,经过演化,使整体上能够表现出自组织性、协作性、稳定性、灵活性和对环境适应性的多学科交叉的人工智能技术. 将群体智能技术应用于自主潜航器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)协作、海洋信息网络构建、海陆信息一体化、完善海洋信息管理体系,能有效克服水下复杂环境对探测、通信等造成的一系列困难. 因此,探索群体智能技术与水下应用新的结合点,充分发挥群体智能技术在面对约束大、维度高、干扰强的复杂环境时的优势,对海洋开发和探索奠定科技基础具有极为重要的意义.

2 群体智能的发展与应用

2.1 群体智能的起源

自然界中的生物群体通过个体自主决策和简单信息交互,经过演化,使整个群体宏观上“涌现”出自组织性、协作性、稳定性以及对环境的适应性,这种特征被称为群体智能^[1]. 群体智能源于对以蚂蚁、蜜蜂等为代表的社会性昆虫的研究,自1992年意大利学者 Marco Dorigo 首次提出蚁群算法^[2](Ant Colony Optimization, ACO)开始,群体智能作为一个新理论被正式采纳,1995年 Kennedy 等学者提出粒子群优化算法^[3](Particle Swarm Optimization, PSO),此后,掀起了群体智能研究的高潮. 2020年1月,中国科学院大数据挖掘与知识管理重点实验室发布的《2019年人工智能发展白皮书》将“群体智能技术”列为了八大人工智能关键技术之一.

最初群体智能一般狭义地指群体智能算法,但随着群体智能的发展,它与诸多领域如计算机科学、机器学习、运筹学、社会学产生了各种联系与交叉. 目前群体智能研究不限于群体智能优化算法,也涵盖了多智能体系统、多机器人协同合作等多个方面,他们之间的关系如图1所示. 具体来说,算法和模型是群体智能技术的基础,包括群体智能算法以及多种集群运动模型;多智能体系统除个体拥有一定智能外通过应用这些算法/模型建立联系,协同完成任务;群体智能涵盖了上述两个方面内容,并针对具体应用给出解决方案.

2.2 群体智能优化算法及分类

群体智能优化算法源于模拟社会性动物的各种群体行为,它的核心在于利用群体中的个体进行信息交互和协同来完成寻找最优解的目的. 它的优势在于参数较少、收敛速度快,特别是在多维、复杂场景时相比

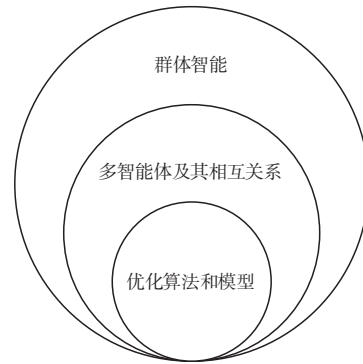


图1 群体智能

于其他优化算法更简单、效率更高. 本文对现有的群体智能算法进行了分类汇总,如图2所示. 我们将群体智能算法分为仿生算法与非仿生算法两大类,仿生算法是模仿生物系统的功能和行为提出的,它又可以分为仿生过程算法和仿生行为算法两类. 仿生过程算法反映了自然对生物种群进行选择的过程,仿生行为算法是指模仿生物种群功能和行为的一类算法.

图2所示的各种算法除了可以单一使用外,面对具体的优化问题时,它们也可以结合起来使用,提高面对高维、多模、带约束的多目标优化问题时的寻优准确率和效率.

2.3 多智能体协作系统

若干个具备简单智能并且易于控制和管理的系统通过互相协作实现较为复杂的智能,这样的分布式系统称为多智能体系统. 多智能体系统具有更好的自主性、灵活性、可拓展性和鲁棒性,其协调控制的基本问题包括一致性控制、会合控制、聚结控制和编队控制等. 多智能体系统达到协调控制首先需要模拟生物群体行为,建立群体运动模型,其次构建通信拓扑结构完成信息交互,最后通过一致性协议使得每个个体均能达到近似相同的状态,实现协同控制.

(1)运动模型:多智能体系统常见的建模手段是基于个体的微观模型,这类模型以个体为建模对象,通过个体的感知、交互、运动规律以及外部环境影响等因素进行建模. Reynolds、Vicsek、Couzin 等人是研究集群运动模型的代表人物,其中 Reynolds 等人所提出的分离(separation)、同步(alignment)、聚集(cohesion)^[4]三个基本规则奠定了集群运动模型的基础. 本文将典型的集群运动模型总结成表1.

(2)通信拓扑:多智能体系统实现信息交互需要在个体间建立物理连接,将智能体个体视为节点,各节点互连形成拓扑结构. 常用的拓扑结构有树形、总线形、星形和环形,当面对大型通信网络的构建时,一般采用网状拓扑结构. 网状拓扑结构使用路由算法得到发送数据的最佳路径. 此外,随着图论、矩阵论、非线性理论等相关理论的引入,多智能体系统通信拓扑结构的搭

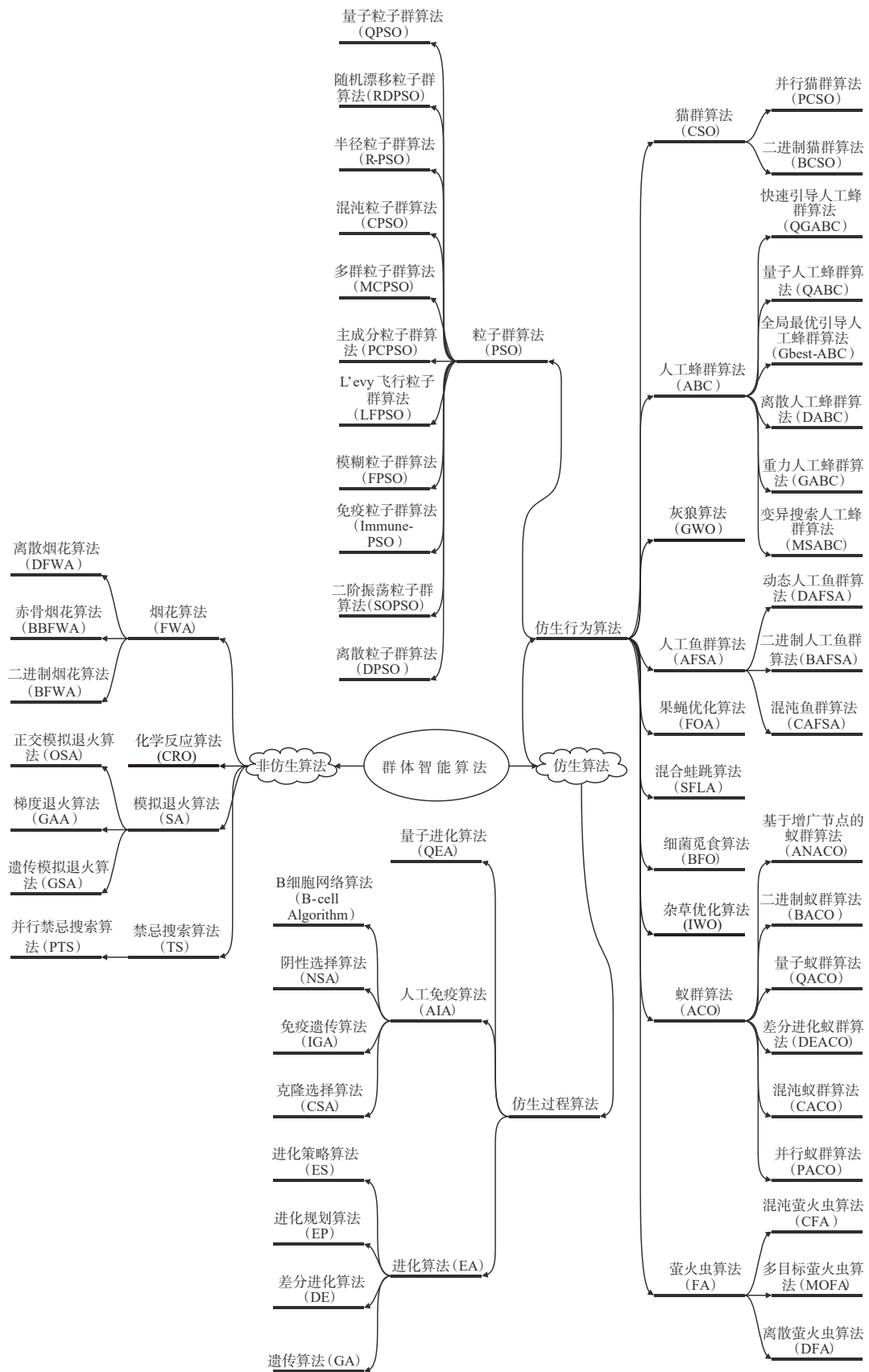


图2 群体智能算法

表 1 集群运动模型

模型	离散/连续	对象	仿真区域
Reynolds 模型	连续	同质	无界
Couzin 模型	离散	异质	无界
Vicsek 模型	离散	同质	重复边界

建变得更加高效、可靠。

(3)一致性协议:一致性协议用来维护系统中各智能体即各节点间信息和数据的一致性,来确保系统能够可靠完成任务。一致性协议可分为单主协议和多主协议:单主协议指整个集群系统中仅存在一个主节点,主要有 2PC, Paxos, Raft 协议等;多主协议指整个集群中存在多个主节点,主要有 Pow 协议以及 Gossip 协议。在多智能体协同结构中,一致性协议是使系统整体高效可靠运行的关键。

2.4 群体智能的应用

群体智能技术可以在没有中心控制且对全局环境认知不足的情况下完成很多复杂任务,这一优势使其在多个领域崭露头角。图 3 总结了目前群体智能技术的应用领域和具体场景。

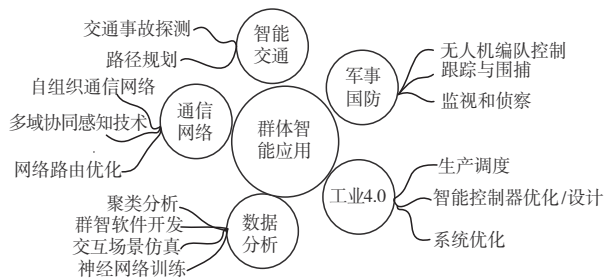


图 3 群体智能的应用

(1)工业 4.0:群体智能在工业生产领域被广泛应用于生产调度、智能控制器优化、系统优化等方面^[5]。

(2)智能交通:群体智能在交通运输领域具体可以应用于航线规划、导航避障,也可通过仿真平台进行交通事故的模拟分析^[6-8]。

(3)通信网络:群体智能在通信领域具体可应用于通过无人机或观测站构建自组织通信网络、完成通信网络的节点优化和路由优化以及未来的海、陆、空立体通信网络的构建^[9-12]。

(4)数据分析:群体智能技术在数据分析领域具体应用于聚类分析、交互场景仿真以及神经网络训练等方面^[13-15]。

(5)军事国防:军事应用是群体智能技术目前应用最为广泛的一个领域,具体可以应用于无人机编队控制、多艇协同攻击、鱼雷查打一体、水下实时监控等方面^[16,17]。

3 面向水下的群体智能

3.1 研究现状

面向水下群体智能的研究方兴未艾,但由于海洋环

境复杂多变,水下通信难度大,各种噪声干扰等原因,水下群体智能技术起步较晚,进度较慢,复杂度更高。

国外面向水下群体智能的主流研究机构有美国的伍兹霍尔海洋研究所、美国海军研究生院、麻省理工学院、剑桥海洋工程系等,例如美国的自主海洋水文采样网络项目旨在验证检测大面积滨海区域的各种前沿技术的可行性,开展提高多海洋机器人系统协同合作智能水平提高的研究,设计新的多水下机器人协调控制算法,更加智能地完成海洋探测任务。

国内相关研究单位主要有哈尔滨工程大学、西北工业大学、中科院沈阳自动化所、上海交通大学以及清华大学海洋工程研究院等研究机构。例如哈尔滨工程大学自动化学院与水声工程学院针对多水下机器人编队航行方法与通讯机制以及多水下机器人协调方法^[18]等方面开展了大量的研究工作;西北工业大学在对多水下机器人编队航行控制^[19,20]以及多水下机器人协同定位等问题开展研究。总体而言,水下群体智能技术在研究与实践上仍存在诸多困难,我国与美国及其他国外的水下群体智能研究相比,在概念探索、理论研究和系统验证方面存在一定的差距。

3.2 水下群体智能的难点

群体智能技术在水下时变复杂环境中会面临各种困难,例如水下通信效率低、海浪影响机器的正常航行、水下鱼类、洋流等噪音引起的多径干扰、海洋对材料的腐蚀性以及水下障碍的复杂多变等。以下总结了水下群体智能技术应用所面临的困难和挑战:

(1)水下环境复杂:时变、不均匀的水下物理环境对智能体的运动、通信和协作等都提出了巨大挑战。首先,水下地貌复杂多变,难以构建一个广泛适用的运动模型。其次,不规则水下湍流严重影响智能体的导航精度、能量消耗、受控性等工作性能,甚至会直接影响智能体的安全性和寿命。第三,海水温度、盐度差异会造成声速分布的不均匀,从而形成海洋中的声速梯度,使得声信号的传播速度、轨迹难以预测和计算。最后,随着压力以及海水的腐蚀性对智能体的材料选择、结构设计和机械加工设置了障碍,水下低能见度对摄像头等载荷的精度和处理能力也提出了更高要求。

(2)水下通信受限:水下通信是水下群体智能技术所面临的瓶颈,也是未来发展水下一切技术的关键因素。水下通信可分为有线通信与无线通信:近距离的水下机器人作业可以通过有线通信来实现数据传输,然而有线通信成本较高、不易重复使用且线路在水下容易发生缠绕,难以适用于大规模水下多智能体协同作业。因而无线通信成为首选方式,目前常用的水下无线通信方式主要包括电磁波通信、水下光通信和水声通信。电磁波通信在空中或陆地场景下应用广泛,但在水

下环境中电磁波衰减快,多径效应和多普勒效应严重,导致通信的传输时延高、传输距离短、可用带宽窄,难以适用于长距离、深远海环境下的水下多智能体间的信息交互。光通信是利用激光作为载波传输信息,尤其是波长在 450nm~560nm 间的蓝绿激光有着水下衰减小、传播速率高、方向性好等优势,使其得到了广泛的关注。然而,由于水下散射和吸收效应,以及背景辐射

的干扰使得激光通信在浅水域近距离通信场景中有着较大的局限性。水声通信在水下衰减小、传输距离远,是水下最成熟、使用最广泛的通信技术。但是,水声信号传播速率低,受温度、盐度影响大,多径干扰严重,并且海浪、船艇等产生的噪声使得水下声场十分混乱。本文将主流的水下无线通信方法与其特征总结如表 2 所示,将它们常用的调制方式整理为表 3。

表 2 水下通信方式

通信方式	电磁波通信	水声通信	激光通信
载体	电磁波	声波	蓝绿光
传播速度	2.25×10^8 m/s	1940 m/s	2.25×10^8 m/s
频率/波长	3Hz~300kHz	3Hz~97kHz	450nm~560nm
应用场景	浅水近距离通信	中远距离深海通信	对潜通信
优势	速率高,功耗低	距离远,衰减小	方向性好,速率高
局限	衰减小、距离近、天线大	多径效应,环境噪声,多普勒效应,速率低、时延大	散射现象,背景辐射,吸收效应,难以对准

表 3 不同通信方式的调制方法

通信方式	电磁波通信	水声通信	激光通信
调制方式	频移键控	扩频调制	腔内调制 强度调制 偏振调制 空间光调制
	相移键控	通断键控调制	
	正交频分复用	脉位调制	
	多载波调制	差分脉位调制	
	多输入多输出	脉冲间隔调制	

(3)信息获取困难:多智能体系统要完成各种水下任务,首先需要获取水下环境以及目标的各种信息^[21]。目前水下目标及环境的信息获取主要依赖可以实现较远距离探测的声学探测和可以实现大范围遥感的光学探测。但是由于多径干扰和环境噪声的影响,水声成像的分辨率低、像素信息少,对依靠声图像的目标识别仍有着较大难度。到目前为止,尚未有成熟的声学图像识别理论。而光学探测受海水吸收效应、背景辐射和摄像头畸变等影响,会导致目标信息丢失、探测准确度下降。

(4)系统能力不足:面向任务的多源探测设备之间如何进行高效协同是水下集群智能体系统中的关键问题。时变、不均匀的水下环境对群体机器人的探测、识别、学习、自组织能力提出了更高的要求:智能体需要在六自由度上有较高的控制精度,而有效表征单智能体运动控制以及多智能体群体协同模型亟待建立;同时,从系统的角度,集群系统还需要具有容错能力、信息融合能力、自诊断故障能力来应对各种水下突发状况。此外,如何在保证集群系统探测能力符合工程要求的前提下减小整体系统开销也是集群智能体系统研究的关键问题。

(5)能量供应受限:水下充换电困难,而智能体的续航能力、速度、潜航深度和载荷均受能量的制约,能量成为限制多智能体水下作业的主要因素之一。锂电池与铅酸、锌银等传统电池相比能量密度高、循环寿命长、充电性能好。但是,目前还尚未有针对锂电池内部

有机电解液易燃的解决方案。

综上所述,水下环境存在诸多难点,传统使用单水下潜航器来进行水下作业无法满足当前对海洋开发的需求。而将群体智能技术用于水下,不仅需要在物理层构建多智能体协作系统,还需要在软件、网络层采用群体智能算法^[22]。与传统群体智能技术不同,水下环境有陆地与空中所不具备的难点,因此改良传统的群体智能技术是将其应用于水下的关键。

3.3 水下群体智能关键技术

图 4 展示了近年来国内外科研工作者对水下群体智能技术与改良做出的一些贡献,水下群体智能技术距离其能够广泛服务于军民领域仍然有着许多技术难题需要攻克。以下是总结的水下群体智能未来发展所需的一些关键技术:

(1)时变环境感知:水下环境感知主要有光学探测识别和声学探测识别两种方式。光学探测和声学探测识别分别通过对光学图像和声学图像的分析 and 处理,使潜航器系统能够对外部环境进行感知,从而为系统的决策、控制提供信息。但在水下,光学图像会出现色彩对比度差等问题;而声呐图像的特征需要人为对其形状、纹理、灰度等进行设定,导致图像识别准确性差。目前可以通过群体智能优化算法以及深度学习对图像进行增强和特征提取,提高智能体水下信息采集、环境感知能力。

针对水下图像去噪问题,R. Zhang 和 J. Liu^[23]提出了一种基于灰度直方图熵最大化指标的图像阈值分割新算法;针对声呐图像配准问题,M. Wei 等人^[24]为了实现对复杂海底场景下目标的声呐图像配准,采用粒子群优化算法和互信息算法相结合的方法对图像进行初始配准,提高配准精度;针对声呐图像分割问题,P. M. Rajeshwari 等人^[25]基于粒子群优化的 Tsallis 熵方法对掩埋目标声呐图像进行分割。

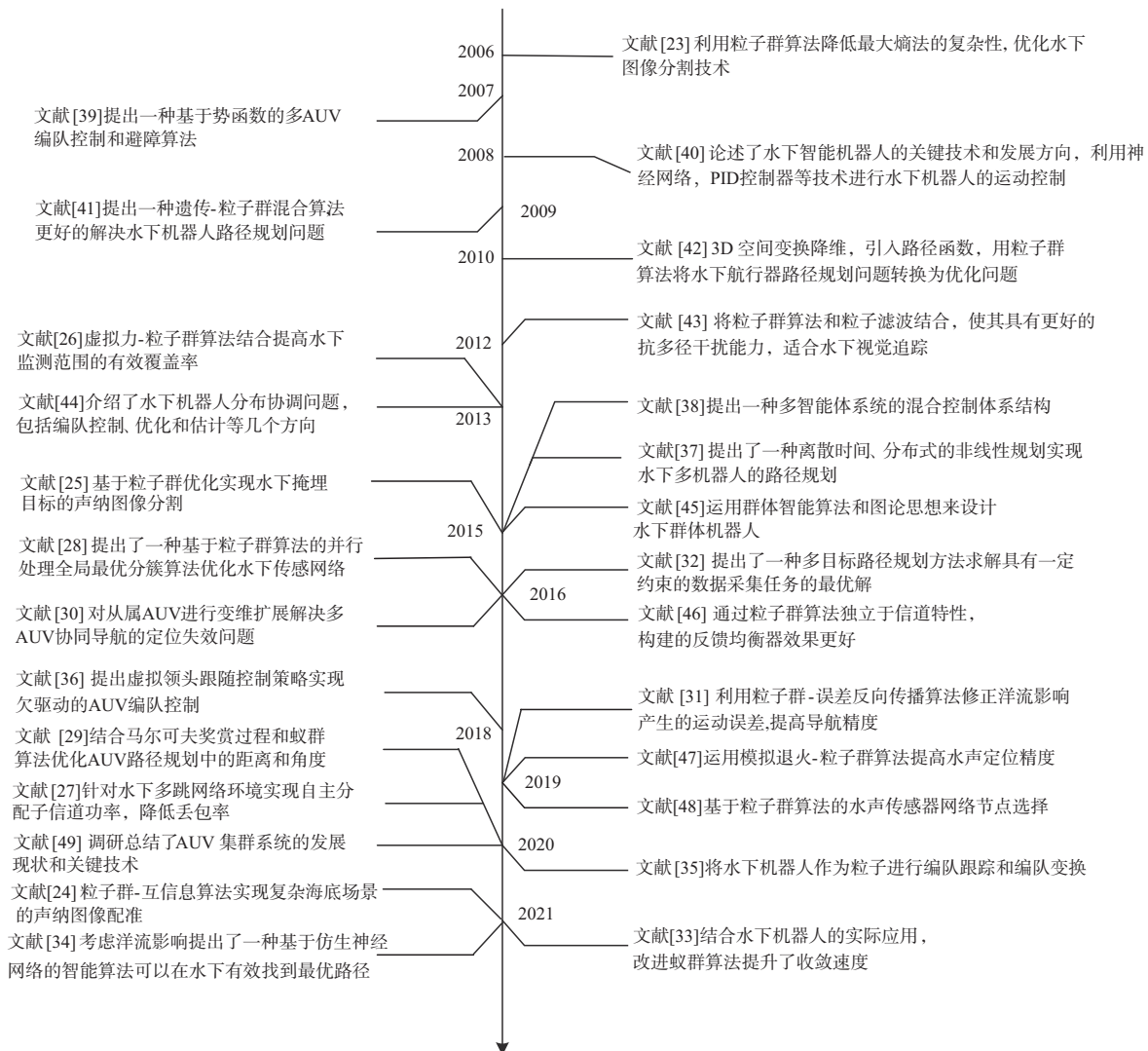


图4 水下群体智能技术发展

(2) 传感网络设计:构建水下三维传感器网络可以有效实现环境监测、海洋数据收集,并且可以作为通信中继实现海-陆-空的信息交互.与地面二维传感器网络不同,水下传感器节点一般放置在海洋的不同深度,在三维传感器网络中,合适的MAC协议设计、网络模型构建、通信信道划分至关重要.此外,由于节点和网络都是动态的,如何避免碰撞和节约能耗,如何在横纵向布置节点形成合适的拓扑结构、如何处理连接或断开网络的节点、如何提高网络吞吐量也是考虑的重点.目前优化传感器网络的主要的方法有:改变通信拓扑结构、设计更高效的通信协议、传输控制协议、改变通信模式、优化路由选择算法等.

针对传感网络覆盖问题,Y. Sun等人^[26]为了提高水下传感网络覆盖率,延长网络生存时间,提出了一种虚拟力与粒子群优化相结合的算法;针对传感网络通信协议优化问题,Y. Su等人^[27]提出了一种水下多跳网络环

境下基于正交频分多址机制的联合中继选择和功率分配MAC协议;针对传感网络能耗优化问题,H. Zhang等人^[28]针对现有水下传感器网络分簇算法存在的负载不平衡、能量利用率低等问题,提出了一种基于粒子群优化算法的低复杂度、并行处理的全局最优分簇算法;针对传感网络信息采集问题,C. Qin等人^[29]提出了一种由海洋静止传感器层和水下机器人运动层组成的水下机器人辅助分层信息采集系统,应用结合马尔可夫奖赏过程的蚁群算法来优化AUV路径规划中的距离和角度.

(3) 协同导航定位技术:多智能体协同导航定位系统可以通过在少量智能体上配备高精度导航设备,其他智能体通过接收相对定位信息来修正自身,实现多智能体系统的低成本高精度定位.此外,为了提高协同导航定位的精度还可以通过群体智能算法对导航编队结构进行优化以及对因时延、洋流等因素造成的时空误差设计补偿机制.

针对协同定位问题, Y. Qi 等人^[30]提出了一种基于推广扩展卡尔曼滤波的定位算法, 用于解决测量多自主水下机器人协同导航时间延迟导致的定位失效问题; 针对组合导航问题, H. Liu 等人^[31]针对航行时由于洋流影响产生的运动误差, 将粒子群优化算法和误差反向传播算法相结合, 提出了一种改进的无损卡尔曼滤波算法, 提高了组合导航系统的计算精度。

(4) 路径规划技术: 路径规划是指智能体在满足各种约束以及性能指标的前提下, 计算搜寻从起始位置到终止位置的最优或者次优的航行轨迹。在实际应用中, 由于非线性的水下环境很难进行精确建模, 同时水下障碍物具有未知性、时变性使得水下路径规划十分困难。随着群体智能的发展, 除了传统的人工势场法、A*算法、栅格法外, Q-learning、快速扩展随机树算法等机器学习方法以及粒子群算法、遗传算法等群体智能算法等方法也可以用于最优路径规划。

针对多目标路径规划问题, W. Zhuo 等人^[32]提出了一种基于多协作水下机器人的数据采集路径规划方法; 针对路径规划复杂度问题, S. Yan^[33]为了解决传统蚁群算法存在的局部最优解和收敛速度慢的问题, 对传统蚁群算法的初始信息素、转移概率和信息素更新策略进行了改进; 针对洋流影响下的最优路径问题, D. Zhu 和 S. Yang^[34]考虑洋流影响提出了一种基于仿生神经网络的智能算法。

(5) 水下编队控制: 编队控制是指多个智能体在某个海域完成战略任务或运输任务的集群系统。在面对不同的水域环境和障碍时, 智能体群组能实时地变换队形, 适应环境变化, 实现密切协作。目前主要的编队控制方式有虚拟结构法、人工势场法、领航者-跟随者法、基于行为的编队控制法、基于路径跟随的编队控制法五种。虚拟结构法是通过确定虚拟结构的动力学特性, 用智能体跟踪虚拟目标点实现编队控制; 人工势场法通过设置人工势场, 最小化个体的势场函数实现编队控制; 领航者-跟随者法通过指定编队成员为领航者或跟随者两种角色, 跟随者依据领航者的方位、距离信息实现编队控制; 基于行为的编队控制通过把任务分解为多个基本行为, 将多智能体行为融合实现编队控制; 基于路径跟随的编队控制将编队任务进行时空分解, 通过空间上的路径跟随和时间上的协调同步实现编队控制。

针对编队跟踪和编队变换问题, Y. Li 和 D. Zhu^[35]提出了一种新的算法, 它受粒子群优化算法的启发, 把

所有的水下机器人作为粒子, 以虚拟编队的关键点作为导航目标; 针对水下欠驱动编队问题, J. Li 和 X. Du^[36]提出了一种基于相对位移和跟随者角度的虚拟领头跟随控制策略, 用于生成和维持欠驱动 AUV 编队。

(6) 分布式自主决策: 水下鱼类、礁石以及不规则洋流会影响智能体的稳定性, 为了改善这一问题, 可以放弃使用具有中心控制的主从式结构转而使用分布式结构。这种分布式系统的优点在于: (a) 灵活性好, 可以随时更换、增减群体中的智能体; (b) 可拓展性强, 可以随时给群体中某一智能体编入程序, 来完成所需的任务; (c) 鲁棒性好, 群体中一个或几个智能体出现故障, 对整体系统的影响较小。此外, 面对具体的三维、非线性水下环境还可以应用强化学习的理论来提高机器人的自主应变能力, 例如通过神经网络、Q-Learning 以及人工势场法考虑环境信息, 提高单智能体辨识障碍、规划路线的能力, 进而改善整个集群系统的性能。

针对智能体自主避碰问题, P. Abichandani 等人^[37]在水下机器人运动学、动力学、避碰和水声通信连通性约束下提出了一种离散时间、分布式时域混合整数非线性规划的水下多机器人路径协调问题; 针对多智能体系统结构优化问题, E. Miftah 和 A. Sayouti^[38]为了满足分布式智能的需求, 提升决策、反应能力, 重点讨论了多智能体系统, 提出了一种基于多智能体系统的混合控制体系结构, 它综合了反应式和协商式体系结构的优点。

3.4 水下群体智能的应用

随着水下群体智能技术的发展, 水下群体智能技术逐渐应用于自组织无线网络、海洋移动观测网络、海洋物联网、多 AUV 自主作业系统等多个领域。表 4 给出了在复杂水下环境中实现群体智能技术的难点、技术支撑以及相关应用。

(1) 水下救援: 通过水下部署传感网络, 第一时间发现或接收险情信息, 并对当前水下环境进行评估, 远程完成检查危险品、搜救打捞沉船、海关安全检查等任务。

(2) 海洋科考: 构建多个智能观测站节点, 立体覆盖考察的海洋区域, 对海洋的水文、生物信息进行监控并定期返还信息进行整合, 既能够节约科考船出行成本还能增加数据采集频率, 提高了海洋研究能力和水平。

(3) 航线规划: 基于多智能体对海洋环境的实时探测信息, 通过群体智能算法进行模拟仿真, 实现对水下智能体的导航定位, 同时对航迹的实时路况做出反应完成避碰。

表 4 水下群体智能技术

难点	技术支撑	应用
水下通信	跳频通信, OFDM, MIMO 通信	海洋自组织网络, 集群 AUV 通信
信息获取	光学成像, 声学成像, 磁探测技术	海洋科考, 鱼群探测, 导航定位
智能决策	分布式控制, 机器学习, 神经网络	编队控制, 航线规划, 智能避障

(4)近海防御:我国近海海域可以通过集群 AUV 系统的有效部署完成对静音潜艇、水下鱼雷等军事目标的查打一体化,完成军事化协同搜索、协同打击、集群对抗任务,提升我国的近海防御能力。

(5)通信组网:海洋信息网络^[50]是人类用于认知、开发和探索海洋的关键。构建面向水下集群智能体的协同感知物联网、协同通信自组织网,完成水下多域立体协同感知系统,实现经略海洋。

4 未来发展趋势

水下群体智能技术在世界范围内的应用不断深入,如构建新型海洋信息网络、架设海空潜一体化体系,目前正处于快速发展的关键时期。可以预想,未来水下群体智能将会在以下方面有最新成果和突破。

(1)水下通信和跨域通信的技术突破

水下无线通信是实现构建信息海洋的关键技术。未来可以开发在有限频带限制下的多路复用技术,提高水声通信容量和数据传输速率;设计国际统一的水下通信标准和通信协议来兼容不同的水下系统。其次,在水下射频通信方面,可以开发微型信号发射机搭载于潜航器、浮标、船只等载体上,通过集群组织构建立体通信网络,其核心在于如何使体积较小的发射机产生强大的电磁场。另外开发如量子通信、磁感应通信等新型通信方式也是未来改进和完善水下通信,发展跨域通信的关键。

(2)发展多平台异构协同技术

异构控制在实际应用中鲁棒性强、适用范围广,跨区域跨结构跨平台的异质控制系统能够完成如跨域通信、跨平台信息融合等更复杂的任务,将水下、水面、空中的智能体群结合起来,让不同的群体在系统中最大程度地发挥功能,更加广泛地应用于各种场景。

(3)水下智能体自主作业能力革新

随着水下任务的无人化和复杂度进一步深入,提升潜航器自身的智能性成为未来海洋研究的关键。硬件计算能力的提升和软件及算法的优化为人工智能技术在水下潜航器上的应用提供了有力支撑,将机器学习、深度学习等理论与水下智能体集群控制深度融合,能够大幅提高潜航器的自主作业能力,挖掘出水下群体智能更大的潜力。

5 结论

目前,我国的水下群体智能技术主要还停留在理论研究、仿真实验阶段,与发达国家还有一定的差距,想要真正应用于实际还需要进一步的努力。未来水下群体智能技术与机器学习、深度学习等人工智能理论更深入地结合也让我们可以预见到这项技术在海洋领域将有更加广泛、深入的应用。

参考文献

- [1] Kennedy J. Swarm Intelligence[M]. Boston: Springer, 2006.
- [2] Dorigo M, Birattari M, et al. Ant colony optimization[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 1(4): 28 – 39.
- [3] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 1995. 1942 – 1948.
- [4] Reynolds C W. Flocks, birds and schools: a distributed behavioral model[J]. Computer Graphics, 1987, 21(1): 25 – 34.
- [5] Mishra A K, et al. PSO-GWO optimized fractional order PID based hybrid shunt active power filter for power quality improvements[J]. IEEE Access, 2020, 8: 74497 – 74512.
- [6] Gandomi A H, Kashani A R. Construction cost minimization of shallow foundation using recent swarm intelligence techniques[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(3): 1099 – 1106.
- [7] Lu J, Yang C, et al. Self-tuning PID Control Scheme with Swarm Intelligence Based on Support Vector Machine[A]. 2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2014. 1554 – 1558.
- [8] Jun G. On dynamic evolution of industry agglomeration based on swarm intelligence[A]. 2008 International Seminar on Future Information Technology and Management Engineering[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2008. 24 – 28.
- [9] Chan K Y, Dillon T, et al. Prediction of short-term traffic variables using intelligent swarm-based neural networks[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(1): 263 – 274.
- [10] Renfrew D, Yu X. Traffic signal control with swarm intelligence[A]. 2009 Fifth International Conference on Natural Computation[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2009. 79 – 83.
- [11] Li Q, Shanguan W, et al. Traffic flow guidance and optimization of connected vehicles based on swarm intelligence[A]. 2019 Chinese Control Conference[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2019. 2099 – 2104.
- [12] Mukherjee A, Goswami P, et al. Adaptive particle swarm optimization based energy efficient dynamic correlation behavior of secondary nodes in cognitive radio sensor networks[J]. IET Communications, 2020, 14(10): 1658 – 1665.
- [13] 孙家泽. 群体智能算法及在三维文物虚拟拼接中的应用[D]. 西安: 西北大学, 2015.
- [14] Bharne P K, et al. Data clustering algorithms based on swarm intelligence[A]. 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology[C]. Piscataway, NJ:

- IEEE, 2011. 407 – 411.
- [15] Jin P, Zhu Y, Hu K. A clustering algorithm for data mining based on swarm intelligence[A]. 2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2007. 803 – 807.
- [16] Kusyk J, et al. AI based flight control for autonomous UAV Swarms[A]. 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2018. 1155 – 1160.
- [17] Arnold R, Jablonski J, et al. Heterogeneous UAV multirole swarming behaviors for search and rescue[A]. 2020 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2020. 122 – 128.
- [18] 李建军. 基于群体智能的多AUV协同任务分配方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [19] 韩青. 基于纯角度观测信息的多机器人编队控制方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- [20] 张守旭. 半仿生机器鱼建模与编队控制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
- [21] Fang Z, Wang J, et al. Stochastic optimization aided energy-efficient information collection in internet of underwater things networks[J/OL]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, DOI:10.1109/JIOT.2021.3088279.
- [22] Fang Z, Wang J, et al. Aol inspired collaborative information collection for AUV assisted internet of underwater things[J/OL]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, DOI: 10.1109/JIOT.2021.3049239.
- [23] Zhang R, Liu J. Underwater image segmentation with maximum entropy based on particle swarm optimization (PSO)[A]. First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2006. 360 – 366.
- [24] Wei M, Bian H, et al. Mutual information re-registration of sensitive region in forward-looking sonar images combined with particle swarm optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2021, 9: 7064 – 7075.
- [25] Rajeshwari P M, Kavitha G, et al. Swarm intelligence based segmentation for buried object scanning SONAR images[A]. 2015 IEEE Underwater Technology[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2015. 1 – 4.
- [26] Sun Y, Hu Y, et al. The coverage optimization method for underwater sensor network based on VF-PSO algorithm[A]. 2020 Chinese Control And Decision Conference [C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2020. 2008 – 2013.
- [27] Su Y, Zhou Z, et al. A joint relay selection and power allocation MAC protocol for underwater acoustic sensor network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 65197 – 65210.
- [28] Zhang H, Wang S, et al. A low complexity clustering optimization algorithm for underwater sensor networks[A]. 2016 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. 1 – 6.
- [29] Qin C, Du J, et al. A hierarchical information acquisition system for AUV assisted Internet of underwater things[J]. IEEE Access, 2020, 8: 176089 – 176100.
- [30] Qi Y, Wang B, et al. Cooperative navigation for multiple autonomous underwater vehicles with time delayed measurements[A]. 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. 295 – 299.
- [31] Liu H, et al. Navigation algorithm based on PSO-BP UKF of autonomous underwater vehicle[A]. 2019 IEEE Underwater Technology[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2019. 1 – 4.
- [32] Zhuo W, Longjie J, et al. A path panning strategy for data acquisition task using multiple autonomous underwater vehicles[A]. OCEANS 2016-Shanghai[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. 1 – 5.
- [33] Yan S. Research on path planning of AUV based on improved ant colony algorithm[A]. 2021 4th International Conference on Artificial Intelligence and Big Data[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2021. 121 – 124.
- [34] Zhu D, Yang S X. Bio-inspired neural network-based optimal path planning for UUVs under the effect of ocean currents[J/OL]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2021, DOI:10.1109/TIV.2021.3082151.
- [35] Li Y, Zhu D. Formation tracking and transformation of AUVs based on the improved particle swarm optimization algorithm[A]. 2020 Chinese Control and Decision Conference[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2020. 3159 – 3162.
- [36] Li J, Du X. Underactuated multi-AUV robust formation control based on virtual leader[A]. 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2018. 1568 – 1573.
- [37] Abichandani P, Torabi S, et al. Mixed integer nonlinear programming framework for fixed path coordination of multiple underwater vehicles under acoustic communication constraints[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(4): 864 – 873.
- [38] Miftah E, Sayouti A. Multi-agent systems and their application to control vehicle underwater[A]. 2015 15th Inter-

national Conference on Intelligent Systems Design and Applications[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2015. 353 – 357.

- [39] Qiuling J, Guangwen L. Formation control and obstacle avoidance algorithm of multiple autonomous underwater vehicles(AUVs) based on potential function and behavior rules [A]. 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2007. 569 – 573.
- [40] 徐玉如, 苏玉民. 关于发展智能水下机器人技术的思考 [J]. 舰船科学技术, 2008, 030(004):17 – 21.
- [41] Gao Y, Ye J, et al. Q-learning based on particle swarm optimization for positioning system of underwater vehicles [A]. 2009 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2009. 68 – 71.
- [42] Tang X, Yu F, Chen R. Path planning of underwater vehicle based on particle swarm optimization[A]. 2010 International Conference on Intelligent Control and Information Processing[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2010. 123 – 126.
- [43] Liu L, Bian H. Underwater visual tracking method for AUV based on PSOPF[A]. 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2012. 985 – 989.
- [44] Cao Y, Yu W, et al. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 427 – 438.
- [45] Champion B T, Joordens M A. Underwater swarm robotics review[A]. 2015 10th System of Systems Engineering Conference[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2015. 111 – 116.
- [46] Mahmutoglu Y, Turk K, Tugcu E. Particle swarm optimization algorithm based decision feedback equalizer for underwater acoustic communication[A]. 2016 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2016. 153 – 156.
- [47] Li J, et al. Application of simulated annealing particle swarm optimization in underwater acoustic positioning optimization[A]. OCEANS 2019-Marseille[C]. Piscataway, NJ: IEEE, 2019. 1 – 4.
- [48] Cheng E, Wu L, et al. Node selection algorithm for underwater acoustic sensor network based on particle swarm optimization[J]. IEEE Access, 2019, 7: 164429 – 164443.
- [49] 张伟, 王乃新, 等. 水下无人潜航器集群发展现状及关键技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(02): 289 – 297.
- [50] Guan S, Wang J, et al. MagicNet: the maritime giant cel-

lular network[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(3): 117 – 123.

作者简介



陈健瑞 男, 1997年生于湖北省荆门市. 现为清华大学电子工程系硕士研究生. 主要研究方向为水下群体智能.
E-mail: cjr20@mails.tsinghua.edu.cn



王璟璟 (通信作者) 男, 1990年出生于辽宁省大连市. 现为清华大学电子工程系博士后. 主要研究领域为多智能体异构组网、集群智能算法与协同机理研究和应用.
E-mail: drwangjj@buaa.edu.cn



侯向往 男, 1995年出生于山东省泰安市. 现为清华大学电子工程系博士. 目前主要从事集群智能、边缘智能等方面的研究.
E-mail: xiangwanghou@163.com



方政儒 男, 1997年出生于广东省韶关市. 现为清华大学电子工程系硕士. 研究方向为水下群智、水下物联网信息采集问题.
E-mail: fangzr19@mails.tsinghua.edu.cn



杜 军 女, 1988年出生于河北省邢台市. 现为清华大学电子工程系博士后. 主要研究方向为空间信息网络及应用. E-mail: bigdujun@sina.cn



任 勇 男, 1963年出生于黑龙江省哈尔滨市. 现为清华大学电子工程系教授、博士生导师. 主要研究方向为通信系统、雷达、复杂网络等. E-mail: reny@tsinghua.edu.cn