Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 11 Article 3

1-4-2019

Overview of Multi-agents Modeling and Simulation for Underwater Unmanned Combat Systems

Hongtao Liang
1. School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, X'an 710119, China; ;

Fengju Kang
2. School of Marine Science and technology, Northwestern Polytechnical University, X'an 710072, China; ;

Yanfang Fu
3. School of Computer Science & Engineering, X'an Technological University, X'an 710032, China;;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Overview of Multi-agents Modeling and Simulation for Underwater Unmanned Combat Systems

Abstract

Abstract: Military UUV is developing toward the direction of intellectualization and coordination of multi-UUV system. It is composed of complex underwater unmanned system (UUS) with changeable underwater environment and complex combat mission. Multi-agents (MAS) modeling technology has become the mainstream method to study this kind of complex system. *The development and characteristics of UUS are briefly and comprehensively reviewed. The latest developments of MAS theory are systematically summarized, and MAS modeling and simulation technology for multi-UUV cooperative combat system (MUCCS) are analyzed. A novel MAS theory method, that is immune agent interactive network (IAIN), is proposed, which combines the modeling advantages of MAS and biological immune mechanism to solve the bottlenecks of intelligence and collaborative modeling for MUCCS*. The proposed IAIN not only enriches and develops MAS theory, but also provides a new perspective for modeling study of heterogeneous unmanned combat systems in different fields.

Keywords

underwater unmanned system, multi-agents, biological immune mechanism

Recommended Citation

Liang Hongtao, Kang Fengju, Fu Yanfang. Overview of Multi-agents Modeling and Simulation for Underwater Unmanned Combat Systems[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(11): 4053-4066.

This paper is available in Journal of System Simulation: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss11/3

第 30 卷第 11 期 系统仿真学报© Vol. 30 No. 11
2018 年 11 月 Journal of System Simulation Nov., 2018

面向水下无人作战系统的 MAS 建模与仿真研究综述

梁洪涛[1]，康凤举[2]，傅妍芳[3]
（1. 陕西师范大学 物理学与信息技术学院，西安 710119；2. 西北工业大学 航海学院，西安 710072；
3. 西安工业大学 计算机科学与工程学院，西安 710032)

摘要： *多 UUV 系统与多变的水下环境和繁杂的作战使命等作战要素构成复杂的水下无人系统，而多智能体建模技术成为研究该类复杂系统的主流方法。介绍了 UUS 发展过程及其特点，分析了多 UUV 系统协同作战建模核心内容；概述了 MAS 建模理论与方法研究现状，总结了基于 MAS 建模与仿真技术的多 UUV 协同作战系统研究成果及其不足。结合 MAS 和生物免疫机理建模优势，构建了免疫智能体交互网络建模理论方法，围绕 MUCCS 的智能性、协同性建模与仿真问题展开研究。*该方法不仅能丰富和发展 MAS 理论方法体系，可为研究不同领域的异构无人作战系统建模研究提供新的视角。

关键词： 水下无人系统；多智能体建模与仿真；生物免疫机理
中图分类号：TP391.9 文献标识码：B 文章编号：1004-731X (2018) 11-4053-14
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811003

Overview of Multi-agents Modeling and Simulation for Underwater Unmanned Combat Systems

Liang Hongtao[1], *Kang Fengju*[2], *Fu Yanfang*[3]
(1. School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;
2. School of Marine Science and technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. School of Computer Science & Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Military UUV is developing toward the direction of intellectualization and coordination of multi-UUV system. It is composed of complex underwater unmanned system (UUS) with changeable underwater environment and complex combat mission. Multi-agents (MAS) modeling technology has become the mainstream method to study this kind of complex system. *The development and characteristics of UUS are briefly and comprehensively reviewed. The latest developments of MAS theory are systematically summarized, and MAS modeling and simulation technology for multi-UUV cooperative combat system (MUCCS) are analyzed. A novel MAS theory method, that is immune agent interactive network (IAIN), is proposed, which combines the modeling advantages of MAS and biological immune mechanism to solve the bottlenecks of intelligence and collaborative modeling for MUCCS.* The proposed IAIN not only enriches and develops MAS theory, but also provides a new perspective for modeling study of heterogeneous unmanned combat systems in different fields.

Keywords: underwater unmanned system; multi-agents; biological immune mechanism

引言

海洋作为人类生存的战略空间蕴藏着丰富的资源，已成为世界各国发展海洋经济、创新海洋装备、维护海洋权益和开展国际合作的重要场所。水下无人系统(Unmanned underwater system，UUS)作为认识、探索、开发和利用海洋的重要手段，已成功应用于民用和军用领域，特别是水下无人作战系统(Unmanned underwater combat system, UUCS)，推动水下作战向着智能化、协同化等方向发展[1-4]。

收稿日期：2018-05-19 修回日期：2018-06-15；
基金项目：陕西省 2017 年重点研发计划(2017 GY-085)；
作者简介：梁洪涛(1988-)，男，陕西汉中，博士，讲师，研究方向为水下无人系统建模与仿真；康凤举(1947-)，男，江苏南通，教授，研究方向为系统建模与仿真、先进控制技术。

Published by Journal of System Simulation, 2018

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 11, Art. 3

UUCS 是指具备环境感知、自主导航、行为控制和能源适配等能力，担负搜索侦查、远程攻击、潜艇防御及组网探测等水下作战任务的各类无人水下航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)、水下无人作战平台及其所必要的控制设备、信息网络和辅助人员的综合系统[2]，与水下有人系统相比，其具备机动性强、隐蔽性好、风险性低、智能化高以及可回收等特点。为了适应海军信息化技术浪潮引起武器装备、战争形态和战场环境等发生的深刻变革以及对战场低伤亡率的不断追求，各类 UUCS 在作战中承担的使命和发挥的作用日益显著，被视为现代海军的“力量倍增器”[2,4]。

多 UUV 协同作战系统(Multi-UUV cooperative combat system，MUCCS)作为一种武器系统、水下环境和作战任务相互耦合、相互影响的典型 UUCS，是由多个同构或异构 UUV 组成空间、时间、事件和功能分布的复杂系统，具有分布性、动态性、适应性、智能化、协同化、通用化和层次化等特点，除此之外其还具有自身独特的作战环境和作战任务复杂的特点。总的来说，MUCCS 是由多个分布的，具有自主交互通信能力的智能无人子系统组成的典型复杂系统，总体呈现出非线性、自组织、自适应、演化和涌现等复杂特征，这些特征对其建模和仿真(Modeling and Simulation，M&S)研究提出了更高的要求[5]。

M&S 技术被认为是继理论研究、科学实验之后第三种认识世界的手段，成为研究复杂 MUCCS 的重要方法。其不但可以支撑 UUV 武器系统的全寿命周期，还可以实现 MUCCS 信息融合、目标跟踪、任务分配等复杂行为复现，从而为协同作战体系分析、装备关键技术革新、作战效果评估和战略辅助决策等提供的依据和建议。传统的复杂系统建模方法如物理建模、数学建模和图论模型主要建立在以确定性和随机统计为基础的还原论和整体论之上，不能适应 MUCCS 建模需求，因为这些方法难以描述和刻画协同作战智能化和协同化的复杂性。因此，构建合理和有效的 M&S 方法对于掌握其作战规律关系无疑具有重要的意义。

多智能体(Multi-agents，MAS)作为分布式人工智能领域的前沿技术，为复杂系统的 M&S 实现提供了一个崭新的途径。MAS 是对复杂系统中基本元素以及之间的交互进行建模与仿真，通过自顶向下分析和自底向上综合的方式可将复杂系统的微观行为和宏观涌现现象有机地结合在一起，实现对系统立体式描述和刻画。生物免疫系统(Biological immune system，BIS)由广泛分布在全身的免疫器官、免疫细胞和免疫分子组成，通过这些器官、细胞和分子时间和空间上形成的分布式网络结构来并行实现各种免疫功能，是一个高度复杂的智能协调自适应系统[6-10]。MAS 和 BIS 从结构和功能上呈现出高度的相似性，都是由许多单元组成，通过各单元相互耦合，保持自身结构稳定。因此，将两种理论有关特性进行相互变异、形成相辅相成之效果，提出免疫智能体交互网络(Immune-agent interaction network)建模理论方法，其成为创新 MAS 和研究 MUCCS 建模与仿真的新方法。

1 水下无人作战系统发展现状

UUV 作为水下运载工具已成为一种水下武器系统，能够自主控制、决策、规划和完成复杂海洋环境中的任务使命，其主要分为遥控水下航行器(Remote operated vehicle，ROV)和自主式水下航行器(Autonomous underwater vehicle，AUV)两类。得益于材料、动力、导航和计算机技术的快速发展，20 世纪末 UUV 开始进入快速发展阶段[1-5,11]。

MUCCS 由多种同构或异构 UUV 组成空间、时间、事件和功能分布的复杂 UUCS，形成一个具有探测、通信、作战等功能的水下网络。相比较于单 UUV，其具有 3 个明显的优势：(1)分布性，多 UUV 通过在水下空间、时间、资源和功能上分布性，实现 UUV 在更深、更广的环境条件下执行各类作业任务；(2)集群性，通过协同化信息共享，实现控制、通讯、信号采集等过程的无缝协作，UUV 能发挥“狼群”式协同作业，提高 MUCCS

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss11/3
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811003

的作战效能；(3)容错性，多 UUV 系统中的单个 UUV 出现故障或失效时，利用多 UUV 系统内部的协作与协调，从而保证整个系统的可靠性与鲁棒性。

美国作为世界第一海军军事强国，在 MUCCS 研究领域长期保持引领作用。2002 年美国海军在《21 世纪海上力量构想》中明确指出，UUV 是未来海军的战力倍增器、减少伤亡和承担风险的“替身”；2016 年美国国防科学委员会发布了《下一代水下无人系统》报告，就下一个十年及以后美国海军如何保持水下作战优势提出了重要的建设性意见。另外，美国国防部发布自 2000 年以来先后有 6 份无人系统路线图，不断强调空中、水下、陆地无人系统的协同发展，特别是 2013 年发布了迄今为止最新的《2013-2038 年无人系统综合路线图》，为水下无人系统的发展提供了清晰的路线指导，明确了 UUV 作为美军无人系统重要组成部分，将在未来 25 年美军无人化系统作战中扮演重要角色。

为实现美国 UUS 的战略目标，美国海军、大学和工业部门从多个层面对 MUCCS 开展技术研究和实践应用，攻克包括自主控制、精确导航、能源推进、水声通信和环境感知在内的多项关键技术，并且在长航时、大深度、智能化、模块化、体系化、协同化方向不断发展[11]。除美国以外，英国、俄罗斯等研制的 UUV 同样在军用领域得到应用。当前，西方国家得益于较高的科研水平和制造水平，代表了 MUCCS 研究的国际先进水平。

我国 UUV 技术研究开始于 20 世纪末。沈阳自动化研究所在 863 计划的支持下开展了“探索号”研制，为我国 UUV 的研制做出了非凡的探索性贡献。710 所研发的“小型无人水下航行器”主要围绕无人控制、模型试验及总体集成等关键技术，在工程化无人水下航行器方面取得重大成功。哈尔滨工程大学依托智能水下机器人技术重点实验室，相继研制多型“智水号”UUV，具备自主识别水下目标、自主规划路径、自主清除目标等多项能力。2016 年西北工业大学在国家海洋技术领域重大项目“深海潜水器技术与装备”资助下研发成功便携式“50 公斤级水下无人自主航行器”，具有安全可靠、便于操作、易于维护、可扩展等优点。天津大学成功研制了“海燕”号水下滑翔机，采用变浮力滑翔、螺旋桨推进的混合运动模式，创造了我国水下滑翔机研制零的突破。

由于我国 UUV 技术研究发展缓慢，国内从事多 UUV 协同系统研究的单位较少。沈阳自动化研究所在多 UUV 水下通讯和任务协作方面展开研究；哈尔滨工程大学在多 UUV 系统路径规划、体系结构和控制策略方面进行理论研究；西北工业大学在多 UUV 协同导航、编队控制、任务分配方面开展了一系列的相关理论研究，此外针对工程实际应用中的水声通信受限问题也进行了通信受限下的协同定位和编队控制研究，为多 UUV 的水下试验做了前期准备和理论支持。

我国围绕 UUV 总体设计、智能控制、通讯导航、探测识别和动力能源等关键技术，特别是面向智能化、协同化等军事应用方向与发达国家相比还有一定差距，虽然开展了一些前期理论和工程研究，但大多数 UUCS 项目都处于理论与仿真阶段，距离实际应用还有很长一段路程要走。随着 UUCS 军事需求不断增强，对 UUV 智能性、多 UUV 协同性的建模与仿真研究提出了更高要求。

对于 MUCCS 来说，任务分配、路径规划、规避障碍、协同搜索等所有群体决策的实现都是建立在强大的执行能力和高效的协同能力基础上的，这样才能有效实现 MUCCS 的智能化和协同化。M&S 技术成为研究该类系统智能化和协同化的重要工具，目前面向 MUCCS 的 M&S 涉及的共性关键技术包括个体建模、体系结构和协调机制等方面。

1.1 个体建模

MUCCS 由多种同构或异构 UUV 组成空间、时间、事件和功能分布的复杂 UUCS，形成一个具有探测、通信、作战等功能的水下网络。UUV 个体作为水下网络的最小单元，需要根据作战使命，

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 11, Art. 3

通过能量自主、导航自主和决策自主实现 UUV 水下自主航行，而且随着深远海战略的提出对这种能力的智能化程度追求更加强烈，因此对其智能性进行建模与仿真就显得尤为重要。

UUV 智能性建模主要是借助人工智能领域内成熟的建模理论、方法和工具，设计灵活的个体结构、高效的决策方法和快速的动作策略，实现复杂的行为控制。概括地讲，智能性建模主要研究 UUV 个体结构和行为学习。个体结构建模目前主要采用信息标准化、程序模块化的设计思路来完成 UUV 各种功能的封装，并借助混合控制的思想来研究其运动控制。行为学习是 UUV 智能化最直观的体现，它能使 UUV 在复杂的水下环境和繁杂的作战任务中学习并记录态势信息，通过自主决策来动态适应环境。具体的行为学习建模方法主要有机器学习、神经网络、增强学习以及动态规划等，通过这些方法进一步提升 UUV 自主能力。

1.2. 系统结构

系统结构是指 UUV 之间控制与通信的顶层架构，决定了 UUV 群体的整体框架，是协同系统有效运行的基石。其主要分为集中式和分散式，而分散式结构又可以分为分层式和分布式，分布式结构中所有个体的地位相对于系统是平等的，分层式结构则是在局部层次上存在集中式结构。

在集中式、分布式和分层式结构的基础上，很多体系结构方案相继被提出用来解决多 UUV 协同作业研究。文献[12]提出一种基于交互式马尔可夫链模型的 Multi-AUV 合作系统，通过“行为转移”实现系统结构变化，并且能够确保系统的可靠性；文献[13]讨论了一种基于“市场”框架的多 UUV 分布式控制方法，给出了基本的假设、概念和优化过程，并从理论上对该框架的收敛性以及计算复杂度等基本特性进行了分析和证明；文献[14]针对异构多 UUV 协作任务，提出基于 MAS 的分层式体系结构(MAHA)，在个体层面将 UUV 智能体的思维状态分为社会心智和个体心智两个层次分别实现，在群体层面设计面向对象的 Petri 网建立系统的协作模型，并通过实验表明 MAHA 能够保证异构 UUV 之间进行有效的协作。在此基础上，针对系统结构的特殊性，协调性、自主性、反应性、容错性和通信负载等特性被提出对这些体系结构进行分析，如表 1 所示。可见，分散式结构相比于集中式结构具有更高的柔性、可靠性和鲁棒性。

表 1 多 UUV 协同系统体系结构性能对比[14]
Tab. 1 Comparison of architecture performance of MUCCS[14]

类型	协调性	自主性	反应性	容错性	通信负载
集中式	好	差	差	差	差
分布式	差	好	好	好	差
分层式	好	好	好	好	好

1.3 协作机制

协作机制体现了协同系统运行方式，主要解决任务分配、资源冲突及优化系统行为等问题。在 MUCCS 中，以作战任务为导向，往往需要追求以最小的代价换取最大的作战效能，并且兼顾 UUV 个体能力和多 UUV 群体能力平衡，避免资源浪费和冗余。因此，如何通过有效的协作使作战系统完成复杂水下任务，直接影响作战效率和效能。

协作机制与系统结构密切联系，因为协作机制依赖于不同的系统结构，同时系统结构也限制着协作机制的选择。因此面对不同的任务需求时，协同系统采用不同的系统结构直接导致了协作机制的差异。依据系统结构，协作机制分为两类：集中式和分布式。

1.3.1 集中式协作机制

集中式协作机制必须通过协调中心根据任务目标进行统一的规划，采用自上而下的建模方式。如果信息完备和保证协调中心计算能力，通过中心的全局优化处理可以得到系统的最优规划结果。集中式协作机制主要可分为整数规划、智能优化和基于图论的算法三类：(1) 整数规划方法主要应用数学理论和运筹学，通过设定任务目标函数，建立整数线性规划模型；(2) 智能优化包括群智能算法和进化算法。群智能算法有粒子群优化算法、人工蜂

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss11/3
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811003

群算法和蚁群优化算法等；而进化算法比较有代表性的是遗传算法和模拟退火算法，这些算法优化性能高，但易陷入局部最优，为此在解决实际问题时往往将多种算法结合形成优化性能更高的新算法；(3) 基于图论的算法是通过图论算法求解任务分配问题，如文献[15]提出了偶图匹配模型和网络流模型的任务分配方法，该方法有表达清楚直观的特点，但只适用于少量个体成员和简单任务的情况。

1.3.2 分布式协作机制

针对集中式协作机制严重影响 MUCCS 协作质量与效率的问题，国内外学者从集中式协作机制的相反方向来设计，采用从下而上的分布式协作机制，保证协作过程系统整体消耗代价最小，同时满足多约束条件。分布式协作机制主要有：基于行为、自组织理论和市场理论的方法。

(1) 基于行为的方法适用于个体成员具有较高智能性和自治性的集群系统任务协调与分配，典型代表有 Alliance 和 BLE，它们都是通过在行为层实现任务分配；文献[16]提出了一种新的基于行为的任务分配 IQ-ASyMTRe，其将环境和信息感知映射到行为模式来获取信息流，实现多机器人的协作。这方法在实践中已经表现出强大的实时性和容错性，但是无法实现全局最优，协同效果难以保证。

(2) 自组织理论。由于分布式协调合作与自组织神经网络结构和原理相似性，国内外学者将自组织映射(Self-organizing Map，SOM)应用到多 UUV 领域。如文献[17]将速度合成算法和 SOM 算法相结合，研究多 AUV 系统在三维时变海流环境中的任务分配与路径规划问题，实现了任务量的均衡优化，但是该算法是建立在水下环境和 AUV 动态运动的理想条件之上，对实际应用来说降低了算法的实用性。

(3) 市场理论起源于经济学，通过模拟市场流通属性，完成多机器人之间的协商来决定个体动作，实现群体作业目标，主要有拍卖算法(Auction Algorithm，AA)和合同网协议(Contract Net Protocol，CNP)。AA 本质属于搜索树算法，如文献[18]提出基于拍卖的分布式协作框架，实现任务分配和重分配，并且能适应复杂多变的水下环境，已经在水雷作战的执行过程中得到良好实践。CNP 是按照市场中的招标-投标-中标机制来完成各节点间的协商，如文献[19]提出了一种自适应的 CNP 模型，在考虑 UUV 水下运动约束条件下实现了作业任务的快速协调。同时，一些改进方法，如基于熟人网的扩展 CNP 模型，被提出应用到多机器人协同作业。

另外，在多机器人分布式协调与规划研究中，国内外学者也提出了一些新颖的方法，例如，基于空闲链、基于情感招募的分布式协调机制，被应用到具体研究对象中，并取得了比较丰富的成果，但是其还没有被应用到多 UUV 协同系统中，还需要进行深入地应用研究。

2 MAS 建模理论与方法研究现状

MAS 建模理论方法涵盖 Agent 技术、MAS 技术、MAS 建模与仿真等方向，涉及 Agent 模型结构、Agent 行为学习、MAS 协调与合作等关键技术。

2.1 MAS 理论发展概述

1986 年 Agent 在《Society of Mind》中被 Minsky 提出后，Agent 理论、技术，特别是 MAS 理论和技术，得到前所未有的飞速发展，为分布式系统的设计、实现与分析提供了一个崭新的途径。MAS 采用自下而上方法，由多个相互交互的 Agent 构成一个松散耦合的网络，适应复杂、动态、开放的环境，用以追求特定目标或任务，具有自主性、分布性、协作性、并发性等特点。目前，MAS 已成分布式人工智能研究领域的热点，吸引了众多学者的目光并不断拓展 MAS 理论的深入研究。

International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems 作为一个非营利学术组织，截止 2017 年已经成功在美国和中国台北

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 11, Art. 3

等地连续举办了 16 届国际学术会议，研究人工智能、自治智能体、MAS 系统在数据挖掘、网络安全、自主机器人、城市交通系统等领域的研究，促进了 MAS 理论和技术研究的深入。美国专门成立实验室 Multi-Agent Systems Lab，在 MAS 理论、技术与应用等方面取得了斐然的成绩。英国伦敦帝国理工学院 Jennings 编著了《Intelligent Agent》和《Multi-Agent systems for Manufacturing Control》等多部著作，详细讨论了 MAS 理论原理与工程应用。

国内研究 Agent、MAS 理论与方法虽然起步较晚，但中国仿真学会、计算机学会、人工智能学会等学术组织围绕 MAS 一致性、MAS 建模范式与语言、MAS 协调与合作、复杂系统 Agent 建模、Agent 强化学习、MAS 形式化描述等方向展开深入研究。国内学者也相继出版多部研究著作，如《分布式多智能体网络一致性协调控制理论》、《群体智能与多 Agent 系统交叉结合：理论、方法与应用》和《多智能体机器人系统信息融合与协调》等，从不同角度和应用领域推动 MAS 理论的向前发展。

2.2 MAS 建模与仿真关键技术

2.2.1 Agent 建模、结构及其形式化描述

Agent 是 MAS 的基本组成单元，也是 MAS 研究的基础。目前，研究 Agent 建模的方法主要有基于符号逻辑(Symbolic-logic-Based，SLB)、基于对策(Game-Theory-Based，GTB)和基于行为主义(Behaviorism-Based，BB)三大方向。(1) SLB 借助人类思维角度，通过引入模态算子以多模态逻辑为工具来研究 Agent 的各种信念、意图、承诺等高级认知结构和理性行为，主要模型是 BDI 模型。(2) GTB 将研究人类社会交互的对策论作为数学研究工具，涵盖各类最优化技术和智能计算方法。这些方法以目标、约束等表达式给 Agent 固定可行区域为条件，利用数学建模刻画 Agent 的系统结构和自主行为。但是该方法在具体应用过程中难以直接刻画信念、意图等高级认知结构，在实际过程中限制了其应用。(3) BB 以 MIT 教授 Brooks 提出的基于行为的系统分析与设计为基础，通过感知与行动实现 Agent 在现实世界中的各种功能。该类设计方法虽然结构简单，但是在实际应用中非常高效，甚至解决了一些传统符号方法难以解决的问题。上述方法各有优势，将其中两个或三者进行结构与功能融合，克服彼此缺陷，是它们未来发展的方向之一。在上述建模方法的基础，许多学者针对各自不同的应用实践提出了不同的 Agent 结构，并试图从不同的角度实现 Agent 元模型(Agent-Meta，AM)的构建。目前，主要的 AM 模型分为慎思型智能体、反应型智能体和混合型智能体[5]。

Agent 形式化描述以图论、时态逻辑、自动机和进程代数等数学理论为基础，建立描述系统结构、性质以及实体之间交互关系的形式化模型，并利用形式化验证对模型或系统的相关特性和逻辑进行分析。文献[20]提出目标描述逻辑 GDL 形式化方法，并基于 GDL 提出了一种 Agent 概念模型；文献[21]提出一种基于本体(ontology)的表达方法，XML Pointer Language，实现对 Agent 内部知识的表达和传递；文献[22]提出一个用于描述基于 Agent 动态分布式合作系统的形式化语言 DCoS-XML，并通过图形化工具显示设计模式；文献[23]设计了一套用于 Agent 交互链的符号规则体系，并对交互链图形表达式进行了深入的研究。

2.2.2 Agent 行为学习

Agent 智能性是实现多 MAS 建模的本质特征之一，而 Agent 学习能力成了实现这种特征的重要体现。在 MAS 中，由于外界复杂环境的动态变化，如果 Agent 没有学习能力，将无法适应环境；如果多 Agent 群体没有相互学习的能力，将无法完成共同的任务。在 Agent 的行为学习过程中最为核心的问题是如何使 Agent 在未知或者变化的环境中自主、动态地组织它的行为。目前，Agent 行为学习主要分为随机搜索和强化学习两大类。

随机搜索是一类直接策略搜索理论的学习行

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss11/3
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811003

为机制，它们都是利用自然现象与优化过程的某些相似性而逐步发展起来的随机搜索技术；强化学习是一种通过奖赏和惩罚引导，以反馈为输入的自适应学习方法，不需要精确的环境模型和完备的专家知识，通过与环境交互来学习决策能力和行为能力，增强学习是解决智能体策略寻优问题的有效工具，在多机器人合作、多目标观测、搜索与覆盖等各个领域获得了广泛的应用。

此外，在 Agent 行为学习机制研究过程中还出现了假设回合、贝叶斯学习、博弈论学习等方法。

2.2.3 MAS 协调与合作机制

MAS 协调与合作是 MAS 建模研究的核心问题，产生于 Agent 信息、资源、环境的分布特性以及它们之间交互关系，主要研究多 Agent 之间及 Agent 与环境之间如何协商与合作，以实现整体效能最优。其研究已成为分布式人工智能领域研究的焦点，相继出现了以黑板模型、合同网、基于对策论的协商和通用部分全局规划为典型代表的模型。

(1) 黑板模型是一种并行分布式协调计算模型，其将求解问题的知识离散化为不同粒度和结构松散的信息源，利用这些信息实现问题求解。这种机制非常利于 MAS 实现智能化与协作化，其优势是集中控制、数据共享和效率较高，但是集中控制的调度算法往往成为制约系统协调计算的瓶颈。

(2) 合同网(Contract Net Protocol，CNP)基本原理是模拟市场竞争机制，通过对标值的调整得到任务分配的全局最优解，目前已经在卫星系统、无人机编队、火力分配等方面得到广泛应用。该方法能够动态协调 Agent 与资源之间的任务分配与负载平衡，但也存在通信消耗量大和协调结果优化差等缺点。因此，许多新的 CNP 模型被提出来解决这些问题，如文献[24]将 BP 神经网络引入 CNP 中，进行投标价格的评定，文献[25]提出一种将心智模型与 CNP 结合的半自治任务协调方法。

(3) 基于对策论的协商方法核心思想是兼顾个体利益与集体利益两个方面，通过 Agent 之间一对一直接协商，或通过直接指派活动在 Agent 间构建协作关系。协商的形式主要分为：对称协作、对称折中、非对称折中和冲突停止。该方法可以在 Agent 数量较少的情况下实现协调，但是随着数量的增加，通信量增加，实时性会大幅度降低。

(4) 通用部分全局规划 GPGP 是在部分全局规划基础上提出的一种根据任务与环境之间适应关系构建协调模型的方法，通过不断更新和演化 Agent 心智状态的有用信息和任务环境的总体结构，实现任务之间的协调。Decker 等在 GPGP 基础上创建了一个通用化框架 TAEMS，实现 GPGP 的可计算性、领域无关性和可扩展性，但在 TAEMS 框架下 Agent 仅考虑全局利益，不会考虑个体利益，因此在实际的协调规划应用中受到限制。为此，引入角色关系和激励/惩罚机制对 GPGP 进行改进，能够处理智能群体合作的协调、规划与控制[26]。

2.3 基于 MAS 建模与仿真技术的应用分析

基于 MAS 建模与仿真技术作为一种有效集成计算机技术、分布式人工智能、系统建模与仿真等多种学科最新成果的方法，已成为研究复杂系统的强大工具。其利用 Agent 进行元模型、元-元模型的构建，对交互、并发、自治实体构成的系统进行自然描述，通过自下而上的形式对元模型微观行为进行聚合实现整个宏观系统的涌现建模。相比与传统复杂系统建模方法，该方法在建模的灵活性、层次性和直观性方面具有明显的优势。目前，MAS 建模与仿真技术不断向军事作战建模领域渗透。

2.3.1 军事作战建模与仿真

美国军方运用 MAS 已经开发了多个建模仿真系统应用于美军各个军种的作战仿真和模拟训练，如美国海军作战发展司令部基于研发 ISAAC 试验系统，主要探索战争的非线性和复杂性等特点对陆军作战战术行动的影响，为了实现对作战过程的可视化，在此的基础上提出了 EINSTein，其成为目前 Agent 技术研究战争复杂性应用比较成熟的一

个系统；为了适应未来美军作战对仿真的需求，ONE-SAF Object System 作为一个集需求论证、军事演习、开发采办三类用户需求为一体的综合仿真服务系统被美国国防部提出建设，用于构建更复杂的作战行为模型。同时，文献[27]以网络为中心设计分布式的多 Agent 数据融合系统，应用于恐怖主义活动的局部监测；文献[28]构建了基于 Agent 的计算机生成力(computer generation force，CGF)动态脚本，实现了空军编队对抗作战。此外，其他国家也大力发展 MAS 技术并积极应用于军事领域。

我国围绕基于 MAS 建模技术在军事领域展开了不同角度的研究，文献[29]针对作战模拟对模型逼真度的要求, 运用 MAS 分析和描述了真实作战组织的网络特性，并提出了适用于作战模拟的动态网络组织算法。文献[30]构建了基于复杂适应系统理论和 MAS 方法的两栖作战对抗系统，可为两栖装甲装备研制、作战使用和战法研究提供参考。文献[31]对网络化条件下任务进行多分辨率建模，提出了基于 MAS 联盟的多平台多目标攻击任务分配模型。文献[32]提出一种分布式的 MAS 作战模拟仿真系统，给出 Agent 行为模型描述及其进程调度机制。文献[33]提出集中与分布相结合的 MAS 协作规划方法，实验表明该方法可以保证舰艇编队在满足资源约束条件下实现预期战术目标。

2.3.2 基于 MAS 建模与仿真技术的 MUCCS 研究

国内外在基于 MAS 在 MUCCS 建模领域进行了一些探索研究。美国麻省理工学院 Paull 等运用 MAS 协商和通信机制实现多 AUV 系统的协同定位估计，并且解决了水下通信网络的时间延迟和丢包率高的问题[34]。美国佛罗里达大西洋大学 Deng 等为了解决复杂约束条件下多 UUV 系统的任务分配和路径规划问题，提出一种基于定位辅助的 MAS 任务分配框架，并通过基于网格的多目标最优规划实现通信量最小[35]。意大利热那亚大学 Bruzzone 等致力于构建一种基于 Agent 驱动的异构仿真环境，该环境包括 UUV、水下潜艇平台、水面无人船和 GPS 卫星等仿真作战实体，实现对系统结构、管理过程和人为因素的综合分析[36]。英国赫利特-瓦特大学 Frost 等将 Agent 增强学习机制应用基于行为结构的 AUV 路径规划设计中，利用相对应的惩罚/奖励规则，通过状态-行为对实现路径规划[37]。日本东海大学 Watanabe 等设计一个通用化的 MAS 仿真支撑环境以及半实物仿真平台，可满足 UUV 系统的水声传感器、推进器、能源以及 CCD 相机测试工作[38]。印度 REVA 大学 Manvi 等提出面向 Agent 聚类的事件驱动的节能水声传感器网络，用于监控领域海洋环境和探测敌方目标(移动或静态对象)的仿真研究[39]。

我国沈阳自动化研究所许真珍等针对 AUV 设计不支持协同设计的缺陷，构建基于 B/S 模型的 AUV 设计平台，利用 XML 实现复杂结构设计流程的信息存储，并提出基于移动 Aglet 平台的 Agent 任务调度方案[40]；另外，针对异构多 UUV 协作任务，提出了基于 MAS 的分层体系结构 MAHA，其在个体层面将 UUV 智能体的思维分为社会心智和个体心智，在群体层面提出了 UUV 群体结构的评价标准，在此过程中，为了有效降低系统建模的复杂性还设计了 Petri 网结构的协作模型[14]。

哈尔滨工程大学严浙平等针对水下无人航行器的海洋勘测任务，提出了一种基于 MAS 的自主控制技术，并采用离散事件驱动的 Petri 网完成使命控制过程[41]，另外还提出了混合式智能体模型(UCAS)来构建多水下机器人的结构体系，以及多智能体 Q-learning 算法实现多 AUV 的协调。哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院刘海波和顾国昌等在 BDI-Agent 模型的基础上，借鉴神经生理结构模型，提出了包含感知区、反射区和慎思区的 AUV 心智模型，并通过多 AUV 编队穿越未知雷区的仿真试验验证了心智模型的有效性[42]。

西北工业大学康凤举等针对多 UUV 集团攻击的水下网络战的建模需求，提出了智能仿真的概念，并初步构建了一种基于 MAS 的 UUV 编队作战仿真系统，为军用 UUV 智能仿真及其作战效能

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss11/3
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811003

评估提供了技术支撑；针对 UUV 编队航行的实际背景和限制条件，提出了一种基于 MAS 技术的多 UUV 编队智能控制方法，利用 Agent 之间高效灵活的交互作用对多 UUV 进行协同优化；针对 UUV 协同系统的任务分配问题，提出了一种面向多智能体 UUV 协同系统的 CNP 任务分配模型，实现通信规模在招标、投标和中标各个阶段递阶式减少，并对该过程进行了三维可视化仿真研究[43]。

总而言之，MUCCS 是一个涉及实体、系统、任务和环境等相互耦合、相互影响的复杂系统，传统建模与仿真方法已经不能适应复杂作战系统的研究，而且已有 MAS 方法虽然在 MUCCS 中得到应用，并获得一定理论研究成果，但是围绕 MAS 建模理论和 MUCCS 智能性与协同性建模仿真研究，仍然存在以下不足：

(1) 国内的 MAS 理论方法研究大部分侧重于理论研究、概念分析和框架设计等简单模型和方法，与国外已经能达到实际工程应用的步伐相比还需要不断进行理论创新。

(2) 已有 MUCCS 的基于 MAS 建模过程中没有很好刻画出 UUV 的智能性和多 UUV 协同性及其复杂性，致使建模仿真精度较低，并且建模描述方法欠完善。

(3) 缺乏基于 MAS 建模的 MUCCS 分布式仿真系统研究，已有仿真系统被零散的提出来实现具体应用，相对简单，没有综合地对 MUCCS 智能化与协同化建模进行仿真验证，而且很少研究 MUCCS 三维可视化仿真及其逼真度评估技术。

3 免疫智能体交互网络(IAIN)

针对基于 MAS 建模与仿真技术的 MUCCS 智能性与协同性建模过程中出现的问题，融合 MAS 与 BIS 建模性能在理论与实践方面优势，提出免疫智能体交互网络建模理论方法。该方法不仅可以丰富和发展 MAS 理论方法体系，而且可为研究不同领域的异构无人作战系统建模研究提供新的视角。

3.1 生物免疫学理论

生命现象的奇妙和生物的智能行为一直是科学家创新的灵感源泉和模拟对象，BIS 主要实现免疫细胞对“自体”与“非自体”的识别、学习、记忆和特征提取，并通过抗体消灭抗原，维持机体结构和功能稳定。从计算角度来看，BIS 是一个具有并行、分布、适应和自组织等隐喻机制的信息处理与计算系统。借鉴 BIS 的运行规律及其隐喻机制，形成生物免疫机制(Biological Immune Mechanism，BIM)，开发出面向工程实际问题的模型和算法，为现实世界复杂问题的解决提供新思路[44]。BIM 归纳有免疫应答、免疫选择、免疫网络、并行分布和动态自适应机制等 5 类[6-10]，如图 1 所示。

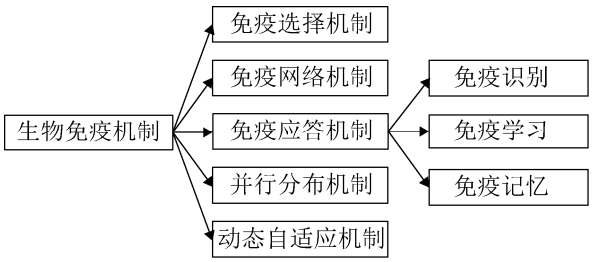

图 1 生物免疫机制概略图

Fig. 1 Overview of the biological immune mechanism

3.2 生物免疫系统特点

为了正确理解 BIS 的基本内容，有必要从免疫学角度对 BIS 中相关特点进行归纳：

(1) 分布性。BIS 是一个由广泛分布的免疫器官、细胞和分子在空间上组成的分布式无中央控制网络结构，通过该网络完成各类免疫功能。

(2) 并行性。大量免疫器官、细胞和分子组成单元能够根据抗原的特性，利用多层防御体系产生免疫响应消灭抗原，增强免疫系统的健壮性。

(3) 动态性。抗原引发免疫应答后，免疫系统通过免疫细胞的活化、增值和分化，产生抗体，根据抗原与抗体的亲和力选择合适的抗体消灭抗原，从而不断适应外界环境的变化。

(4) 稳定性。BIS 遇到抗原入侵时，其内部各免疫细胞、抗原、抗体相互之间会形成一个激励与

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 11, Art. 3

抑制关系的动态平衡网络，维持系统结构稳定。

(5) 识别性。免疫识别的本质是区分“自体”和“非自体”，对于“非自体”的外部入侵抗原，启动免疫应答来消灭异己，而对“自体”的内部组织细胞，则启动免疫耐受，维持内部环境稳定。

(6) 学习性。免疫学习体现在两个方面：a 初次应答阶段，BIS 首次遇到新的入侵抗原，由于免疫识别和特征提取，其应答过程时间较长；b 再次应答阶段，当 BIS 遇到相同或相似的入侵抗原时，由于免疫记忆作用，免疫应答速度会大大提高。

(7) 记忆性。免疫细胞经过增值、分化为效应细胞和记忆细胞分别完成对抗原的清除和记忆，其中对抗原信息的记忆是通过生命周期比较长的记忆细胞来完成。BIS 初次遇到一种新的入侵抗原，淋巴细胞花费较长时间来识别抗原，继而以最优形式存储对抗原的记忆信息；当再次遇到相同或相似的抗原时，记忆细胞将快速分化、增值为效应细胞，执行高效而持久的免疫功能。

(8) 多样性。BIS 含有多种类型的蛋白质，识别在体外潜在的抗原或者待识别的模式种类，并且能够不断学习以实现抗体的产生和更新。

(9) 鲁棒性。免疫系统形成多层次的网络防御结构，使系统具有更强大的健壮性和容错性，不会因为局部网络的损伤而造成整体功能的缺失。

以上这些特性使 BIS 成为一个复杂、高效的自适应信息处理系统，为信息技术、工程技术和智能技术的发展提供源源不断的创新思维。

3.3 MAS 与 BIS 理论与实践的对比分析

基于以上对 MAS 和 BIS 内容及特点分析，表 2 将两者从组成单元、系统结构、通信方式、总体目标和性能特点等方面进行对比，两者在总体结构和功能上呈现出高度的相似性[8]。在结构上，两者都是由分布的大量单元组成，并且在系统内部产生交互。在功能上，两者都是通过单元之间的交互与通信，适应动态环境并维持系统稳定。

表 2 MAS 和 BIS 的结构、功能和特点对比
Tab. 2 Comparison of structure, function and characteristics of MAS and BIS

项目	MAS	BIS
组成单元	Agent 节点	抗体、抗原、B-cell 等
系统结构	集中或分布式	无中央控制的分布式系统
通信方式	交互行为与通信动作	激励、抑制、消灭等
总体目标	完成目标或任务	消灭抗体、维持机体稳定
性能特点	自主性、分布性、协作性、适应性等	识别性、学习性、记忆性、自组织、动态性、多样性等

虽然两者在结构和功能上呈现相似性，但是在建模理论和实践方面具有不同优势，如表 3 所示。

表 3 MAS 和 BIS 建模性能在理论与实践方面的对比分析
Tab. 3 Comparative analysis of MAS and BIS in theory and practice

性能	BIS	MAS
识别	YES (实践)	NO
学习	YES (实践)	YES (理论)
记忆	YES (实践)	NO
选择	YES (实践)	NO
自组织	YES (实践)	NO
自忍耐	YES (理论)	NO
协调	YES (理论)	YES (实践)
通信	YES (理论)	YES (实践)
分布式	YES (理论)	YES (实践)

从表 2 看出，BIS 抽出的免疫隐喻机制，如识别、学习、记忆、选择、协调、通信、自组织、分布式、自忍耐等特性，其中识别、学习、记忆、选择和自组织等机制已经在实践中得到应用，而协调、通信、分布式、自忍耐等特性虽然在理论方面取得了重大理论成果，但是缺乏实践应用，而 MAS 建模理论正好在协调、通信、分布式等方面具备强大的问题求解能力。可见，两种理论可以相互变异、形成优势互补，例如在相对成熟的 MAS 协调与通信方案设计中，融合 BIS 的自组织、协调或者通信的先进理论，设计新颖的 MAS 通信与协调方式，将会在实际问题求解过程中达到事半功倍的效果。这种思考方式正是本文创新 MAS 建模方法和研究 MUCCS 建模与仿真的思想源泉。

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss11/3
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811003

3.4 IAIN 定义及其理论方法

IAIN 核心思想是融合 MAS 与 BIS 在建模理论与实践应用方面各自的优势，设计具有免疫计算机制和功能的 Agent 模型，利用受免疫网络启发的拓扑结构和协调机制实现 MAS 的交互和通信。为更好理解 IAIN 理论方法，给出相关定义：

定义 1: 免疫智能体(Immune-Agent，IA)是一种由多种单元组成的具用 Agent 模型结构和生物免疫机理的计算模型，具有智能性、适应性、记忆性、学习性和进化性等特征[8,45]。

定义 2: 免疫智能体交互网络(Immune-agent interaction network，IAIN)是由多个 IA 模型通过拓扑结构组成网络化结构，利用基本行为和通信动作的交互实现目标任务的求解。

定义 3: IAIN 建模方法作为一种新的 MAS 方法，通过网络结构形象地刻画 IA 静态结构和多 IA 之间的动态机制，实现对现实模型-概念模型-计算模型-仿真模型一体化、数据可视化和模型修正化过程的建模，如图 2 所示。

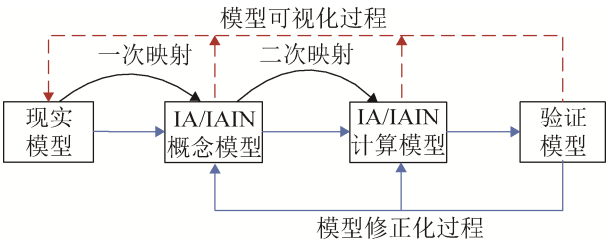

图 2 IAIN 建模过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of IAIN modeling process

定义 4: 静态结构(Static Structure，SS)描述 IAIN 的网络静态节点免疫智能体，通过结构和行为建模实现 IA 功能。

定义 5: 动态机制(Dynamic Mechanism，DM)描述 IAIN 的动态协作与通信机制，通过免疫网络的拓扑结构和动力学模型实现 IAIN 的协商通信。

相对于传统 MAS 建模与仿真方法，IAIN 建模方法是一种新的 MAS 建模方法。其研究对象归纳为静态结构与动态机制，静态结构建模有 Agent 模型结构和行为学习；动态机制建模有拓扑结构、交互协议和信息融合等。研究重点是精确描述和刻画构成 IAIN 的个体模型、拓扑结构和协商模型。

3.5 MUCCS, MAS 与 IAIN 的映射关系

MUCCS 建模与仿真重点包括 UUV 微观个体的智能性建模与多 UUV 群体的协同性建模及分布式仿真系统。而 IAIN 作为一种新的 MAS 理论方法，其研究对象与 MUCCS 建模重点相吻合。具体地，MUCCS 和 IAIN 系统在结构上，两个系统都是由具有分布性、智能性、适应性等特征的个体或模块组成(UUV 与 IA)，在一定环境条件下通过相互之间以及与环境的交互达到一定目的；在功能上，个体或模块具有智能性和适应性，促使整个系统在开放和动态的环境中通过一定的拓扑结构和运行机制实现整体结构稳定。为此，以 MUCCS 建模问题为导向，借鉴 MAS 建模理论，创新 IAIN 理论方法，建立三者之间映射关系如图 3 所示。

图 3 中，横向坐标主要分为问题、借鉴和方法创新，其中问题选项主要包括 UUV 个体智能性建模(Part)、多 UUV 协同系统建模和多 UUV 协同系统仿真实现与分析等关键问题；借鉴选项中主要利用 MAS 建模理论的成熟概念、方法和原理，从结构、组织和运行角度对多 UUV 系统进行分析；方法创新选项则主要结合 MAS 和 BIS 两者优势，提出 IAIN 来解决对应的智能性、协同性和复杂性建模问题。概括地说，横轴方向实现了 MUCCS-MAS-IAIN 之间的“三网合一”。

同样，从纵向坐标来看也有三个选项：Part A、Part B 和 Part C，其中 Part A 注重从 UUV 个体结构和行为两个方面进行研究，主要借鉴 IA 轴方向上建模理论；Part B 注重从 MUCCS 的拓扑结构和协商通信以及信息融合等方面进行研究，主要利用 IAIN 轴方向上协同建模的优势；而 Part C 注重分布交互仿真系统设计与实现。通过 MUCCS 与 IAIN 映射关系的二维坐标图可以清晰展现出两者从个体到整体的结构和功能一致性。

Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 11, Art. 3

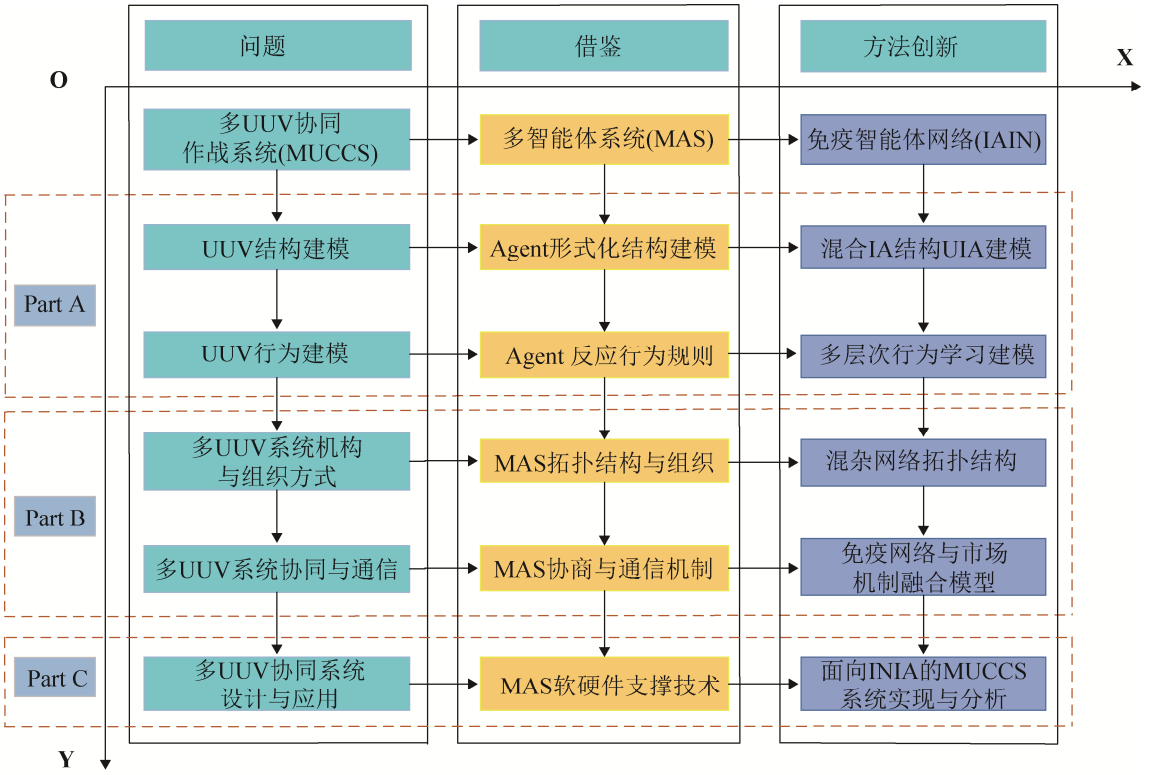

图 3 MUCCS、MAS 与 IAIN 系统的映射关系

Fig. 3 Mapping relationship among MUCCS, MAS and IAIN system

4 结论

本文概述了 UUS 和 MAS 发展现状、建模特点和关键技术，分析了基于 MAS 建模与仿真技术的 MUCCS 研究成果及其不足；介绍了生物免疫学理论和 BIM，从分布性、动态性和记忆性等十个方面归纳了 BIS 特点，并从 BIS 和 MAS 结构和功能相似性的角度，对比分析了两者建模性能在理论与实践方面的区别。基于上述研究，融合 MAS 和 BIM 建模优势，构建了免疫智能体交互网络建模理论方法，围绕 MUCCS 的智能性、协同性建模与仿真展开研究。该方法不仅可以丰富和发展了 MAS 理论方法体系，而且可为研究不同领域的异构无人作战系统建模研究提供新的视角。下一步研究将集中在 Part A 和 Part B，为 Part C 构建分布式 MUCCS 仿真系统奠定基础。

参考文献：

[1] Tao Z Q, Li C S, Zhang H W, et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering(S2095-9184), 2017, 18(1): 68-85.

[2] 潘光, 宋保维, 黄桥高, 等. 水下无人系统发展现状及其关键技术[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(1): 44-51.
Pan G, Song B W, Huang Q G, et al. Development and Key Techniques of Unmanned Undersea System[J]. Journal of Unmaned Undersea System, 2017, 25(1): 44-51.

[3] 李经. 水下无人作战系统装备现状及发展趋势[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(1): 1-5, 36.
Li J. Existence and development trend of navy autonomous underwater combat system[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(1): 1-5, 36.

[4] 司广宇, 苗艳, 李关防. 水下立体攻防体系构建技术[J]. 指挥控制与仿真, 2018, 40(1): 1-8.
Si G Y, Miao Y, Li G F. Underwater Tridimensional Attack-Defense System Technology[J]. Command Control & Simulation, 2018, 40(1): 1-8.

[5] 康凤举, 谢攀. 智能仿真在军用 UUV 装备体系研究中的应用[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(2): 151-155.
Kang F J, Xie P. Application of Intelligence Simulation in Military UUV Equipment System Research[J]. Torpedo Technology, 2011, 19(2): 151-155.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss11/3
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811003

[6] Liang H T, Kang F J, Li H H. UUV formation system modeling and simulation research based on multi-agent interaction chain[J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing(S1793-9615), 2015, 6(2): 1-23.

[7] 郑士芹. 基于免疫系统优化算法、模型及其应用研究[M]. 北京: 知识产权出版社, 2012.
Zheng S Q. Research on immune system optimization algorithm, model and application[M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2012.

[8] Liang H T, Kang F J. Artificial Immune Intelligent Modeling for UUV Underwater Navigation System Using Immune Multi-Agents Network [J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control (S1349-4198), 2015, 11(5): 1525-1537.

[9] 杨海东, 郭建华, 邓飞其. 人工免疫系统集成与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Yang H D, Guo J H, Deng F Q. Integration and application of artificial immune system[M]. Beijing, China: Science Press, 2010.

[10] Raza A, Fernandez B R. Immuno-inspired robotic applications: A review[J]. Applied Soft Computing Journal (S1568-4946), 2015, 37(12): 490-505.

[11] Meahmed A, Duan W Y. Overview on the Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUVs)[J]. Journal of Ship Mechanics(S1007-7294), 2016, 20(6): 768-787.

[12] Liang Q W, Sun T Y, Shi L. Reliability analysis for mutative topology structure multi-AUV cooperative system based on interactive Markov chains model[J]. Robotica(S0263-5747), 2017, 35(8): 1761-1772.

[13] 肖坤, 由光鑫, 姜大鹏, 等. 多 AUVS 协作分布式控制[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(5): 491-495.
Xiao K, You G X, Jiang D P, et al. Distributed cooperation control for a multiple AUVS[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(5): 491-495.

[14] 许真珍, 李一平, 封锡盛. 一个面向异构多 UUV 协作任务的分层式控制系统[J]. 机器人, 2008, 30(2): 155-159.
Xu Z Z, Li Y P, Feng X S. A Hierarchical Control System for Heterogeneous Multiple UUV Cooperation Task[J]. Robot, 2008, 30(2): 155-159.

[15] Kwok Y K, Ahmad I. Static scheduling algorithms of allocating directed task graphs to multiprocessors [J]. ACM Computing Surveys(S0360-0300), 1999, 31(4): 78-96.

[16] Zhang Y, Parker L E. IQ-ASyMTRe: Forming Executable Coalitions for Tightly Coupled Multirobot Tasks[J]. IEEE Transactions on Robotics(S1552-3098), 2013, 29(2): 400-416.

[17] Zhu D Q, Huan H, Yang S X. Dynamic task assignment and path planning of Multi-AUV system based on an improved self-organizing map and velocity synthesis method in three-dimensional underwater workspace[J]. IEEE Tran saction on Cybernetics(S2168-2267), 2013, 43(2): 504-514.

[18] 姜丽梅. 弱通信条件下多 AUV 编队控制及协作机制研究[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
Jiang L M. Study on multi - AUV formation control and cooperative mechanism under weak communication[M]. Harbin, China: Harbin Engineering University, 2012.

[19] Liang H T, Kang F J. Distributed task allocation modeling based on agent topology and protocol for collaborative system[J]. Optik (S0030-4026), 2016, 127(19): 7776-7781.

[20] Wu X G, Zeng G Z. Goals description and application in migrating workflow system[J]. Expert Systems with Applications(S0957-4174), 2010, 37(12): 8027-8035.

[21] Lumb L I, Freemantle J R, Lederman J I, et al. Annotation modeling with formal ontologies: Implications for informal ontologies [J]. Computers and Geosciences (S0098-3004), 2009, 35(4): 855-861.

[22] Osterloh J P, Bracker H, Muller H, et al. DCoS-XML: A modelling language for dynamic distributed cooperative systems[C]//2013 IEEE International Conference on Industrial Informatics, USA: IEEE, 2013: 774-779.

[23] 李雄. 基于 Meta-Agent 交互链的作战系统建模研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2009.
Li X. Research on operational system modeling based on Meta-Agent interaction chain[D]. Beijing, China: Armored Force Engineering Institute, 2009.

[24] Yuan Q D, Guan Y, Hong B R, et al. Multi-robot task allocation using CNP combines with neural network[J]. Neural Computing and Applications(S0941-0643), 2013, 23(7): 1909-1914.

[25] 王茜竹, 赵春江, 汪霞, 等. 基于心智与扩展合同网的半自治多智能体任务分配[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(11): 2885-2892.
Wang Q Z, Zhao C J, Wang X, et al. Semi-autonomous multi-Agent task allocation method based on extended contract net and mental model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(11): 2885-2892.

[26] 张方于, 陈学广, 迟嘉昱. 一种改进的 GPGP 协调机制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004, 32(7): 34-36.
Zhang F Y, Chen X G, Chi J Y. An improved mechanism of GPGP coordination[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science), 2004, 32(7): 34-36.

[27] Das S, Ascano R. Distributed Belief Propagation in Multi-agent Environment [C]. Proceedings of 13th ICPAAMASS, 2015: 53-65.

[28] Toubman A, Roessingh J J, Spronck P, et al. Dynamic Scripting with Team Coordination in Air Combat Simulation[C]. Proceedings of 27th International Conference on IEOAAIS, 2014: 440-449.

[29] 冯磊, 查亚兵, 胡记文, 等. 基于复杂网络的作战模拟组织建模研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(4): 882-886.
Feng L, Zha Y B, Hu J W, et al. Research of Combat Simulation Organization Modeling Based on Complex Networks[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(4): 882-886.

[30] 张杰, 王宁, 朱江. 基于仿真技术的两栖装甲装备作战效能评估方法[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(1): 74-77.
Zhang J, Wang N, Zhu J. Evaluation of Operational Effectiveness of Amphibious Armored Equipment Based on Simulation Technology[J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(1): 74-77.

[31] 刁兴华, 方洋旺, 肖冰松, 等. 基于多智能体联盟的多机协同空战任务分配[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(9):1268-1275.
Diao X H, Fang Y W, Xiao B S, et al. Task allocation in cooperative air combat based on multi-agent coalition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(9):1268-1275.

[32] 王辉, 王坤福, 刘淑芬. 多 Agent 的作战模拟体仿真体系结构[J]. 吉林大学学报(理学版), 2015, 53(1): 101-106.
Wang H, Wang K F, Liu S F. Multi-Agent System Structure of Combat Simulation[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2015, 53(1): 101-106.

[33] 杨飞, 王青, 吴振东. 资源约束条件下舰艇编队多智能体协作规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 210-215.
Yang F, Wang Q, Wu Z D. Formation cooperative planning method based on multi-agent with resource constraints[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(2): 210-215.

[34] Paull L, Seto M, Leonard J J. Decentralized cooperative trajectory estimation for autonomous underwater vehicles[C]. 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014: 184-191.

[35] Deng Y U, Beaujean P P, Edgar A, et al. Task allocation and path planning for collaborative AUVs operating through an underwater acoustic network [C]. MTS/IEEE Seattle, OCEANS, 2010.

[36] Bruzzone A G, Merani D, Massei M, et al. Modeling cyber warfare in heterogeneous networks for protection of infrastructures and operations[C]. 2013 European Modeling and Simulation Symposium, 2013: 685-694.

[37] Frost G, Maurelli F, Lane D M. Reinforcement learning in a behaviour-based control architecture for marine archaeology[C]. MTS/IEEE OCEANS, 2015.

[38] Watanabe K. Design and fabrication of a small test-bed aimed for basin experiment of underwater multi-agent system. International Symposium on Underwater Technology[C]. International Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies 2007: 574-580.

[39] Bharamagoudra M R, Manvi S S, Gonen B. Event driven energy depth and channel aware routing for underwater acoustic sensor networks: Agent oriented clustering based approach[J]. Computers and Electrical Engineering (S0045-7906), 2017, 58: 1-19.

[40] 许真珍, 闫志斌, 胡志强, 等. 基于B/S模式的AUV协同设计平台设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(10): 26-29.
Xu Z Z, Yan Z B, Hu Z Q, et al. Design and Realisation of B/S Mode-based Cooperative Design Platform For AUV[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(10): 26-29.

[41] 严浙平, 赵玉飞, 陈涛. 海洋勘测水下无人航行器的自主控制技术研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(9): 1152-1158.
Yan Z P, Zhao Y F, Chen T. Research on autonomous control of unmanned underwater vehicle for oceanographic survey[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(9): 1152-1158.

[42] Liu H B, Gu G C, Shen J, et al. AUV fuzzy neural BDI[J]. Journal of Marine Science & Application(S1671-9433), 2005, 4(3): 37-41.

[43] 梁洪涛, 康凤举. 面向多智能体 UUV 协同系统的任务分配建模[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(9): 2075-2082.
Liang H T, Kang F J. Task Allocation Modeling for Agent-oriented UUV Collaborative System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2075-2082.

[44] 杨海东, 郭建华, 邓飞其. 人工免疫系统集成与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Yang H D, Guo J H, Deng F Q. Integration and application of artificial immune system[M]. Beijing: Science Press, 2010.

[45] 马笑潇, 黄席樾, 柴毅, 等. 一种新的领域智能体: 免疫智能体[J]. 高技术通讯, 2003, 13(1): 72-75.
Ma X X, Huang X Y, Chai Y, et al. A New Domain Agen:Immune Agent[J]. High Technology Letters, 2003, 13(1): 72-75.

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss11/3
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201811003