

船舶领域理论：发展现状及其 MASS 时代机遇

周健¹, 李徽¹, 郭帅超¹, 王晨旭^{2*}

1. 中国船舶集团有限公司第七一六研究所, 连云港 222061

2. 天津大学海洋科学与技术学院, 天津 300072

摘要 船舶领域理论近 10 年来得到了长足的发展, 广泛应用于船舶避碰、航行安全决策和海上交通工程等领域的研究。随着 MASS (Maritime Autonomous Surface Ships) 概念和相关法规的提出, 船舶智能化、自主化的进程将会加快, 而船舶领域理论也将在这一趋势下朝着新的方向发展。综述了当前船舶领域的发展现状, 包括现有的定义和建模方法, 并讨论了船舶领域模型的实际应用场景; 总结了 MASS 发展现状及其在未来革新过程中可能面临的挑战; 针对 MASS 时代的需求, 提出了未来船舶领域理论的发展和应用方向。

关键词 船舶领域; MASS; 船舶避碰; 航行决策; 自主性

航运是全球经济的蓝色命脉, 也是全球一体化的重要纽带; 进入 21 世纪以来, 航运业迎来了飞速发展。在过去的 20 年间, 虽然船舶的操纵性、综合安全性、自动化程度都在提高, 然而船舶碰撞、搁浅、火灾等事故还是不断发生, 对航运和船员安全带来了非常负面的影响。欧洲海事安全局 (European Maritime Safety Agency) 在 2018 年发布了一份海上人员伤亡和事故报告, 指出 2011—2017 年仅在欧洲范围内就发生了超过 2 万起海上事故, 造成

了超过 680 人死亡, 6800 人受伤^[1]。《2020 年海上伤亡和事故年度概览》报告称在 2014—2020 年, 欧洲海上事故信息平台 (European Marine Casualty Information Platform) 平均每年记录了 3173 起海上伤亡或事故^[2], 事故数量及事故等级信息如图 1 所示。2018 年, 中国范围内报告了 176 起水上交通事故, 造成了 237 人丧生或失踪以及 83 艘船舶灭失^[3]。

海上事故发生后, 人们开始不断总结造成事故的原因并尝试找出事故发生的规律。美国海案

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-10-31

作者简介: 周健, 工程师, 研究方向为航海安全保障, 电子信箱: cssc716_zj@outlook.com; 王晨旭 (通信作者), 讲师, 研究方向为海洋工程、海洋数据分析, 电子信箱: chenxu.wang@tju.edu.cn

引用格式: 周健, 李徽, 郭帅超, 等. 船舶领域理论: 发展现状及其 MASS 时代机遇[J]. 科技导报, 2023, 41(5): 78-90; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.05.008

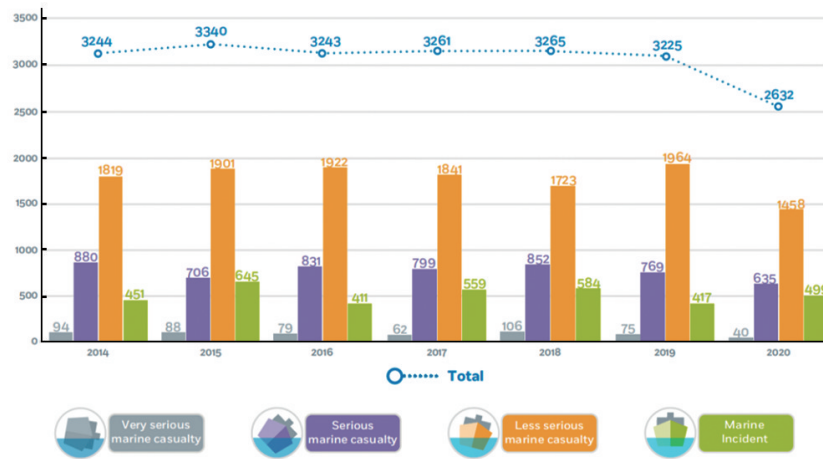


图1 2014—2020年欧盟范围内海上事故数量及事故等级

警卫队 (United States Coast Guard, USCG) 早在 1993 年就提出人为失误造成了接近 80% 的海上事故或危险驶过^[4]。目前业内普遍认为人的不安全行为占海上事故成因的 75%~96%^[5], 所谓人的不安全行为主要是指瞭望不当、疲劳驾驶、超速等行为。这一数据也得到了实际验证, 韩国统计信息系统对 2013—2017 年发生在韩国水域的事故进行统计分析, 在 1522 起水上事故中有 1202 起由于人为航行失误造成, 人为因素占比 79%^[6]。在所有的海上事故中, 由于操作不当或船舶失控造成的船舶间的碰撞或船舶与助航设施间的触碰占据相当大的比例^[7]。据此, 学者研究了多样化的算法、设备及系统来辅助船员进行航行决策, 试图降低人为失误的概率, 提高避碰行动的效率和安全性。

船舶领域理论就是众多方法之一, 该理论的研究至今已有 50 年之久。最初, 船舶领域理论主要应用于港口、航道船舶通行能力或最大饱和度的计算^[8]。经过不断发展, 船舶领域中的“安全空间”开始作为避碰算法中临界距离的参考值, 并逐步应用于航行风险评估、航线优化、海上交通流仿真等方面的研究^[9-11]。然而随着研究的深入, 人们发现船舶领域理论对船舶航行安全的保障效果是有限的^[8]。因为在实际航海中, 驾驶员大多凭借自身经验进行操船。船舶领域既不能实际参与到船舶航行和避碰的过程, 通常也不能改变驾驶员凭借经验对实时态势做出的判断, 因此这一理论的实用性开始受到质疑, 这通过图 2 对船舶领域相关论文发表

数量的统计数据就可以看出^[12]: 在 2010 年之前发表量相对较少, 也说明了人们对这一理论的关注度不高。然而这一现象在近年来似乎发生了变化, 随着人工智能和大数据技术的发展, 无人车、无人机等装备相继问世, 人们开始思考能否将相应技术应用到船上从而将人从船上解放出来。2017 年, 在 MSC (Maritime Safety Committee) 第 98 届会议中提出了 MASS 的表述; 同年经 IMO 成员国提议, MSC 同意将自主船舶列入其议程^[13]。无人船的探索由之前各国各自为政, 转变为全行业共同的任务。船舶领域理论的作用因此得到了重新审视: 因为无论是智能船还是无人船, 皆为自主船发展过程的中间形态和不同阶段, 而自主的意义在于船舶能够根据实时态势自主决策并采取行动, 不再需要人为参与。

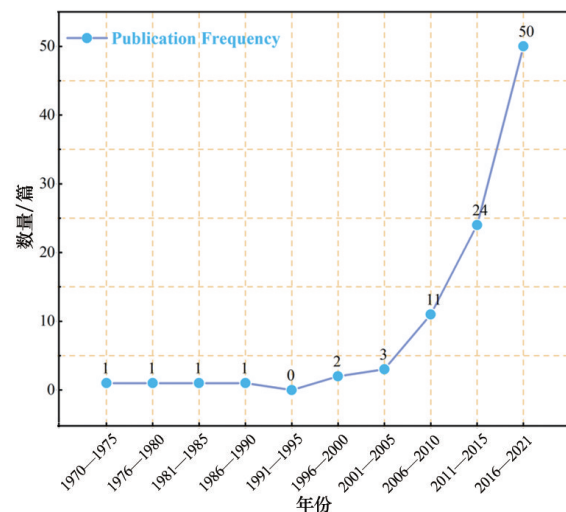


图2 船舶领域相关论文发表频率统计

从避碰的角度看,这就要求无人船的自主决策系统能够准确判断风险的存在。在目前无人船航行大数据系统尚未建立的情况下,利用人工智能训练出完备的决策系统还需要很长的时间。因此以船舶领域理论为基础的智能船决策算法开始进入人们的视野^[14]。由图2可知,自2011年之后船舶领域相关论文发表数量迎来爆炸式增长趋势,说明行业内对该研究领域的关注度逐步提高。同时传统的船舶领域模型大多考虑了人为因素的影响,显然不能直接应用到无人船领域。因此未来船舶领域理论势必会有全新的发展方向和应用场景,这也是本文主要探讨的内容。

1 船舶领域的定义及应用

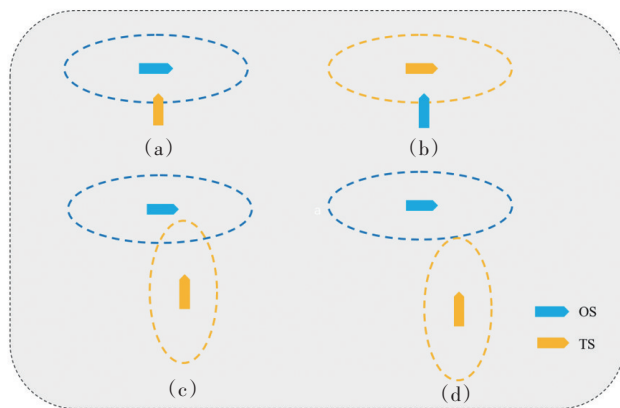
纵观船舶领域的发展成果,不同模型的尺度、形状以及对“领域侵犯”和“危险存在”的界定各不相同。这主要是源于学者对其提出的模型的定义和使用场景存在不同。目前,模型间的差异化还会有更加深入的趋势。本节将对船舶领域的发展历程进行回顾,总结船舶领域的定义、对风险的判断方法以及应用场景等。

1.1 船舶领域定义方法及风险判断标准

船舶领域这一概念首次由日本学者 Fujii 和 Tanaka 提出,定义为“a two-dimensional area surrounding a ship which other ships must avoid”,意为周围船舶需要避开的区域。由于该模型是用于航道交通流的测算,因此该模型的尺度为本船到周围船舶交通流局部密度最大值处的距离^[15]。Goodwin^[16]和 Coldwell^[17]也相继给出了类似的定义,将船舶领域定义为驾驶员在本船周围保持的一个与他船或障碍物相对独立的有效区域(effective area)。上述几种定义方式都是基于早期对雷达影像的观测。随着船舶自动识别系统(AIS)的广泛应用,航海人员有了更加直观的可视化方法描述航行中本船周围的交通状况,对船舶领域也就有了新的定义。Zhang 等^[18]提出了概率船舶领域的概念,船舶领域的边界不再是准确值,而是以概率表示的模糊值。船舶领域的范围也不再局限于单层,出现了双

层或多层边界的船舶领域模型^[14,19]。此外船舶领域的定义创新性地从二维平面转向三维空间,即本船与周围船舶及水下障碍物/架空桥梁等保持安全的空间^[20]。

对于传统的单层船舶领域模型,主要是通过领域边界是否被侵犯来判断碰撞风险的存在。如果分别以本船和目标船作为研究主体,存在4种情况,如图3所示。可以看出,图3(a)和图3(b)所示的2种情况是非常接近的,当他船(本船)进入本船(他船)安全领域时,视为船舶领域被侵犯。这2种定义带来的影响是在船舶正横方向保持的安全空间较小,在交叉相遇(特别是垂直交叉相遇)情况下留给让路船采取避碰行动的空间不足^[21]。图3(c)所示的情况与前面两种相似,但是在横向上提供的安全空间更大也更加合理。图3(d)表示两船的安全领域互不重叠,也就是说一旦领域边界发生重叠即视为领域侵犯。这种标准提供的安全空间是本船与目标船安全领域大小之和,通常情况下这样是偏大的,也会造成误报警率的上升。



(a) 本船领域被侵犯;(b) 他船领域被侵犯;
(c) 两船安全领域互不侵犯;(d) 两船安全领域互不重叠
图3 船舶领域相互侵犯的4种定义

对于多层边界的船舶领域模型,其判断危险的标准各不相同。Im 等^[19]将本船周围的区域分为4部分,分别为 Safety Zone、Cautious Zone、Dangerous Zone 和 Very Dangerous Zone,如图4(a)所示。这4个区域也分别代表着航海中安全、碰撞危险、紧迫局面、紧迫危险4种危险紧迫程度。当某一个区域

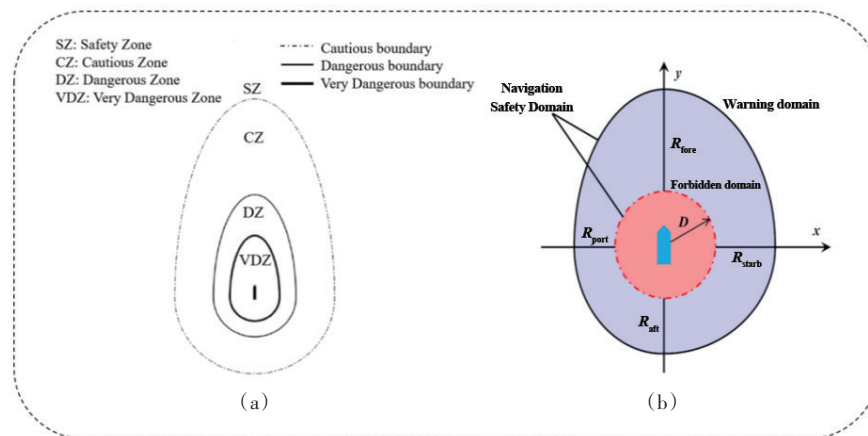


图4 多层船舶领域模型示意

的边界被侵犯时,本船可按照国际海上避碰规则(Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, COLREGs)的规定采取相应措施。Zhou等^[14]在本船周围划定 Warning Domain(警戒域)和 Forbidden Domain(禁止域),如图4(b)所示。当警戒域的边界被侵犯时,本船可采取适当的避碰措施;当禁止域边界被侵犯时,说明已经达到了碰撞事故几乎不可避免的程度,本船应立即减速停船以降低碰撞带来的损害。

1.2 船舶领域建模方法

近年来,许多学者专门对船舶领域的建模方法进行了深入的综述和探讨^[18,21-22],本节在前人研究的基础上进行延展,并对部分最新成果进行补充。

1.2.1 基于经验的船舶领域

基于经验的船舶领域是指通过雷达、船舶自动识别系统或人工观测等方法获取到的船舶位置、轨迹等数据,凭借人为经验或意识判断船舶会遇时安全通过所需的空间。最早的经验船舶领域可追溯至20世纪70年代,也就是由Fujii等^[15]提出的模型。那个时期获取船舶信息的主要手段是雷达图像或现场观测,这种方法实施起来较为方便,但通常带有较强的主观性和不规范性。随着AIS设备的普及,人们可以获取海量的船舶航行数据,对船舶行驶轨迹有了更好的可视化方法,因此能够更好地总结船舶航行中的行为规律。

比较经典的有Hansen等^[23]利用丹麦水域(Great Belt bridge、Fehmarn Belt和Drogden)的AIS

数据进行建模并最终确定适宜的船舶领域尺度为纵向8倍船长、横向3.2倍船长,这一结果与Fujii得出的结论相近似。Zhang等^[18]利用一周之内的12.5786万条AIS数据,对新加坡海峡范围内的3个航段进行船舶会遇过程中经验船舶领域的研究,并在此基础上提出了风险水平的概念。进一步地将其成果与Fujii模型和Goodwin模型进行了仿真对比,获得了更好的效果。可以看出,基于经验法的船舶领域模型通常不具有普适性。原因是建模过程中大多依靠某一特定水域中的船舶航行数据,反映了该水域特殊的交通流特性。

1.2.2 基于数学建模分析的船舶领域

基于数学建模分析的航行安全领域确定方法是利用数学公式和变量的方式研究船舶运动规律,对船舶领域进行建模。通过实船数据、环境参数、会遇参数等变量的输入来得到船舶领域大小、形状等参数的输出^[22]。

基于数学建模分析的船舶领域最早可以追溯到1993年Zhao等^[24]对船舶领域的研究。此后Wang^[25]提出了著名的Quaternion Ship Domain,通过船舶的进距、旋回初径等操纵性参数来计算船舶领域的尺度。在此基础上,Zhou等^[9]进一步考虑了会遇态势对船舶领域尺度的影响,建立了适用于无人船艇的航行安全领域模型。Liu等^[26]利用停船视距理论对天津港水域航行安全领域进行建模,并基于此预测了交通流量的发展趋势。Rawson等^[27]以船型和航速作为函数,建立了伦敦泰晤士河船舶领

域模型。之后, Rawson 等^[28]又基于船舶领域建模的方法建立了美国沿岸的空间碰撞风险评估方法。此类方法相对来说比较客观, 通常针对特定水域, 但建模过程和计算过程往往较为繁琐。

1.2.3 基于规则的船舶领域

针对数学建模分析中难以完全依靠准确计算解决的问题, 有学者引入了模糊化、概率解的概念, 通过制定的特定规则完成船舶领域模型的建立。基于规则的航行安全领域确定方法主要是根据专家的经验、知识来设计专家系统, 从而确定船舶领域的相关参数。目前文献中采用的主要方法包括模糊逻辑法、粗糙集理论、德尔菲法^[9,25,29]。这类方法是海项目评估中应用较多的, 得益于操作简单、对数据的要求较低。但是由于专家的经验通常具有指向性和主观性, 使得此类方法得到结果的准确性和客观性一直被学界讨论。

随着大数据、深度强化学习等技术的发展, 基于规则的船舶安全领域确定方法中存在的问题也有望得到解决。神经网络一般需要多个输入变量, 可将船舶操纵性、会遇态势和环境因素充分考虑, 有效解决了数学建模方法中模型复杂的问题。将模糊算法与神经网络相结合, 通过模型训练得到模糊规则和隶属度函数, 可有效规避人为评价过程存在主观性的问题。Namgung 等^[30]以船舶领域重叠作为碰撞阶段的判断依据, 开发了自适应神经模糊推理系统用于实现无人船的避碰以及航行风险评估, 该系统框架如图 5 所示。系统中包括输入输出层、模糊化层、解模糊化层、规则层和正则化层。通过模糊化, 使输入转化为网络能够读懂的变量。经过规则层和正则化层的对比, 将连接调整到适当的

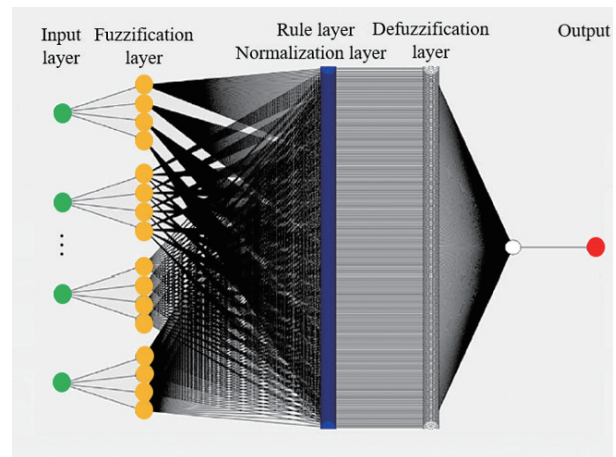


图5 基于自适应神经网络的模糊推理系统

权重。经过去模糊处理后, 得到需要的输出结果。Fiskin 等^[31]设计了相应的隶属度函数和决策变量, 提出了模糊船舶领域模型, 并将该模型与遗传算法相结合用于船舶避碰控制。

基于神经网络的船舶领域和避碰系统有良好的发展前景, 但是还需要很长的发展时间。原因是一个完备的智能系统需要海量的训练数据与测试数据, 这些都是当前无法大量获取的。但不可否认的是, 新技术的发展总是在推动航运业的进步与船舶航行安全水平的提升。

上述3种方法各自存在优点和不足, 因此在实际问题中综合应用、取长补短是当前的发展趋势。此外, 人们对所提出模型的验证不再局限于简单的计算机仿真, 而是倾向于通过实际发生的碰撞事故、水域内船舶交通流数据等对模型的作用进行检验, 这也加深了不同方法间的融合。表1中总结了部分典型船舶领域模型的信息, 包括构建方法、领域形状、领域尺度等。

表1 典型船舶领域模型信息

模型来源	构建方法	领域形状	领域主体	领域状态	船舶领域尺度			
					R_{fore}	R_{aft}	R_{starb}	R_{port}
Fujii and Tanaka ^[15]	经验法	椭圆	他船	静态	3.0 L	3.0 L	0.8 L	0.8 L
Coldwell(Head-on) ^[17]	经验法	椭圆	本船	静态	6.1 L	0 L	3.25 L	1.75 L
Coldwell(Overtaking) ^[17]	经验法	椭圆	本船	静态	6.0 L	6.0 L	1.75 L	1.75 L
Goodwin ^[16]	经验法	扇形	本船	静态	0.85 nm	0.45 nm	0.85 nm	0.70 nm
Kijima(Blocking area) ^[32]	数模法	椭圆	本船	静态	5.6 L	3.3 L	3.4 L	2.6 L

表1 典型船舶领域模型信息(续)

模型来源	构建方法	领域形状	领域主体	领域状态	船舶领域尺度			
					R_{fore}	R_{aft}	R_{starb}	R_{port}
Pietrzykowski ^[33]	规则法	不规则形状	本船	动态	与航行安全水平系数有关			
Wang ^[25]	规则法 数模法	椭圆或 四边形	本船	动态	与外界环境参数有关			
Hansen, Jenson, Lehn-Schiøler ^[23]	经验法	椭圆	本船	静态	4.5 L	3.5 L	1.58 L	1.58 L
Wang and Chin ^[34]	经验法	多边形	本船、他船	动态	4.06 L	2.82 L	1.48 L	1.44 L
Dinh and Im ^[35]	数模法 经验法	四边形及 圆形	他船	静态	通过数据拟合得到数学解析式			
Wielgosz(min model) ^[36]	数模法	椭圆	本船	静态	3.31 L	3.31 L	1.69 L	1.69 L
Im Namkyun and Luong ^[19]	数模法	椭圆	本船、他船	动态	2.8 L	1.34 L	1.34 L	1.34 L
Zhang and Meng ^[18] (Forbidden boundary)	经验法 数模法	不规则形 状	本船	静态	—	1.46 L	2.0 L	1.95 L
Zhou, Wang, Zhang (DNSD) ^[9]	数模法 规则法	椭圆	本船	动态	与外界环境参数有关			
Fiskin, Nasiboglu, Yardimci ^[22]	规则法	多边形	本船	动态	与外界环境参数有关			

1.3 船舶领域模型的应用场景

可航水域的范围会影响船舶领域模型的大小和形状^[36],本文从可航水域范围,即应用场景的角度对船舶领域进行综述。按照应用场景,将船舶领域分为受限水域模型和开阔水域模型。广义上的受限水域是指可供航行的水道狭窄或宽度足够但水深较浅等而使船舶的操纵能力受到一定限制的通航水域。由于环境特殊、交通密度较大,船舶在受限水域中航行的碰撞、搁浅风险要高于开阔水域。Pietrzykowski^[33]分析了船舶领域的定义和确定方法,提出了基于驾驶员经验的模糊船舶领域,并可用于受限水域中的航行风险评估。Wang等^[34]提出以经验为依据的free-form ship domain,该模型能够随着船速的增加而动态扩展,在新加坡海峡和港口的应用效果良好。Liu等^[26]提出了一种用于狭水道交通能力评价的动态船舶领域模型,并给出了沿航道航行、横穿航道、汇流和旋回时模型尺度与交通流的计算方法。Im等^[19]认为前人提出的船舶领域大多无法获得船舶周围任意一点对船舶的危险程度,结合高斯核函数和避碰几何提出了“poten-

tial risk ship domain”,分别给出了在开阔水域和受限水域中领域尺度的计算方法。Bakdi等^[7]利用动态AIS信息并结合船舶的操纵性能,提出了自适应船舶安全领域,该模型能够对船舶操纵受限区域的碰撞和搁浅风险进行实时识别。

对于开阔水域,其水深、可航宽度通常不受限制,船舶的航速也相对较高。在已有的研究中,部分学者明确提出其研究内容是针对开阔水域,如Pietrzykowski等^[37]将其提出的模糊船舶领域应用于开阔水域,并认为该模型可作为评估航道状况的通用标准。Wielgosz^[36]提出了一种“Anti-collision”模型,包括小、中、大3个子模型。将其分别应用于受限水域和开阔水域,并用ECDIS(electronic chart display and information system)系统仿真其应用效果。为了研究船舶自动避碰过程中对COLREGs和良好船艺要求的符合情况,He等^[38]提出了一种适用于开阔水域的定量分析系统。该系统中包括会遇态势判别模块、阶段判别模块和避碰行动决策模块,其中阶段判别模块就是利用会遇船舶各自船舶安全领域的受侵犯程度来完成。还有一些研究将

开阔水域作为默认情况,认为将开阔水域中的模型进行适当改动就能够得到适用于受限水域的模型,如Wang提出的四元船舶领域模型^[25]。

除了理论研究外,船舶领域理论还被应用于实际的工程设计。例如IMO海上安全委员会在西波罗的海域的分道通航制(Traffic Separation Scheme, TSS)就是以船舶领域作为基础理论建立的,船舶领域还被用于危险驶过数量的预测^[39]。中国天津海事局VTS指南中要求复式航道中的船舶进出港时与前船保持不少于6倍船长的距离,这一数值实际上就是船舶领域中纵向尺度的大小。

2 MASS的发展现状及存在的挑战

随着无人船研究如火如荼地开展,也有望给船

舶领域这一研究方向带来新的机遇和发展方向。船舶领域理论在自主船时代能起到什么样的作用,能否有助于解决无人船发展过程中存在的问题是其未来能否得到持续研究和关注的关键。在此之前,本节将分析当前MASS的发展现状以及今后发展所面临的挑战。

2.1 全球MASS发展概览

MASS的兴起不仅是诸多方面技术的进步之一,更将是一项颠覆传统航运业和整个海上运输系统范式转变的创新。为了在这种变化下引导航运业未来朝着理想的方向发展,国际社会开启了漫长的探索之路,包括围绕MASS展开的海上安全、环境保护等(表2)。总体上,各国对无人船自主程度的界定大同小异,基本按照“人为决策—辅助决策—远程控制/监督下的自主决策—无人自主”的划分方式。

表2 MASS自主等级划分

自主化等级	英国LR船级社	挪威DNV船级社	法国BV船级社	中国CCS船级社
1	AL0:纯手动,无自主功能,船员控制船舶所有行动。	M:手动操作功能	0:人工操作,人工制定所有决策和控制所有功能。	信息汇总展示
2	AL1:船端决策,控制人员在船执行操作,决策支持系统提供辅助。	DS:系统决策支持功能。	1:人工决策,系统提供决策支持,人工制定决策并采取行动。	辅助决策支持
3	AL2:船端或岸基决策支持,控制人员在船执行操作,数据由船上或岸上提供。			实时决策支持
4	AL3:人在回路,船上的决策和行动在控制人员的监督下自主进行。	DSE:具有条件系统执行能力的系统决策支持功能(人在回路中,执行前需要人的确认)。	2:人工授权,系统决策但需要人工授权执行。	—
5	AL4:人在回路,决策行动是在人的监督下自主进行的。	SC:自控功能,系统将执行操作,但控制人员可以更改该操作。	3:人工监督,系统无需等待人工授权即可决策并执行。人员会被告知系统的决策和行动。	—
6	AL5:完全自主(较少监督),系统制定的决策和采取的行动无需监督或很少受到监督。			人在回路,较少干预系统决策
7	AL6:完全自主,系统制定的决策和采取的行动无需监督。	A:自主功能,系统自我管理,通常不需要人为干涉的水平。	4:完全自主,系统无需通知控制人员即可进行决策并执行,仅在紧急情况下通知人员。	完全自主,智能船舶间高级互联

自2006年国际海事组织提出e-Navigation的概念后,智能船舶、智能航运的概念接踵而至。在e-Navigation战略的框架下进行船岸信息的集成与

显示,实现船与船、船与岸之间的信息交互为无人船的发展奠定了技术基础^[40]。以欧美、日本为首的发达国家引领无人船发展的潮流,其中挪威、芬兰

和丹麦等北欧国家在无人船技术商用方面较为突出。早在2012年,欧盟启动了MUNIN(Maritime Unmanned Navigation through Intelligence Networks)项目,从技术、经济和法律3个层面开展无人商船的可行性分析,并首次实现了大型船舶由引航点到引航点间的无人驾驶^[41]。2017年,挪威Yara公司和Kongsberg公司宣布合作建造全球首艘全电动自主集装箱船“Yara Birkeland”号以实现二氧化碳零排放,该船已于2020年展开实验测试。2018年,Wärtsilä公司在Folgefonn号渡轮上完成了港到港测试,在完全无人干涉的情况下,在需要停靠的3个港口之间实现了完全不间断的自主航行。

中国自主船舶的研究自2017年后迎来了快速发展期,里程碑事件为中国自主研发的全球首艘经过CCS船级社和LR船级社认证的“大智”号散货船交付使用,该船能够达到AL2的自主水平^[40]。2019年5月,中国首艘无人驾驶自主航行试验船“智腾”号完成测试,具备自主避碰、航线规划和自主靠离泊功能,基本能够达到AL3—AL4的自主水平。2022年,中国自主研发的首艘自主航行300标箱集装箱船“智飞”号交付运营。该船能够实现航行环境智能感知认知、航线自主规划、自动靠离泊等智能航行功能。

2018年底,工业和信息化部、交通部和国防科技工业局联合印发《智能船舶发展行动计划(2019—2021年)》,提出要建立智能船舶规范标准体系。中国船级社分别于2018年和2020年发布了《无人水面艇检验指南》和《智能船舶规范(2020版)》,对无人船/艇的检验、航行控制、能效管理等作出了详细规定^[42]。

2.2 MASS发展中存在的问题

2.2.1 航行决策和避碰

从时空角度看,碰撞指两船在同一时刻出现在了同一地点。由此在航海实践中出现DCPA(Distance to the Closest Point of Approach)和TCPA(Time to the Closest Point of Approach)2个关键指标。对于有人船而言,驾驶员可以通过“海员的常规操作”,即判断DCPA/TCPA的值和一系列操船行为,使本船周围时刻保持一个清爽的空间,这样碰

撞就不会发生。判断现场态势并制定航行策略的过程称为决策过程,而为了保持本船周围清爽而采取的操船行动称为避碰行动。对于一个成熟的船舶驾驶员,每天可能要经历上百次的船舶会遇,能够迅速且准确地完成航行决策和避碰行动。但对于目前绝大多数的无人船,这个过程难以完全自主实现。虽然人工智能的兴起为无人船的完全自主化带来了希望,然而目前无人船航行大数据系统尚未建立,可用于训练测试的无人船航迹数据也没有达到海量的程度。将一位三副培养为高级船长可能需要10年的时间,这还是在人具有最高级智能的条件下。通过人工智能训练出完备的无人船决策系统想必需要更长的时间^[43]。此外,航行决策和避碰通常还要考虑当地的航行规则、交通流状况等众多因素,这更增加了这一过程的难度。

2.2.2 MASS与COLREGs的关系

无人船是否应该像载人船一样遵守国际海上避碰规则,或者无人船应该遵循什么样的规则,仍然是一个正在被广泛讨论的问题^[43-44]。无人船舶的大小、结构和速度可能会影响COLREGs对其的适用性。对此有些学者认为,只有当无人船的吨位、长度或速度达到一定等级时,才有必要遵守避碰规则。但从规则适用性的角度来看,由于满足了COLREGs第三条的“可浮性”和“可作为水上运输工具”2个指标,无人艇在任何海上活动中都应该像有人船舶一样遵守该规则,即“无人”不影响COLREGs对无人船的适用性^[45-46]。从实际应用的角度看,在无人船和有人船并存的情况下,需要进行人机之间或机器之间的避碰交流。这将导致避碰协调不确定性程度的增加,特别是在人(驾驶员)和机器(无人船)之间的交流中^[6]。

解决这一问题的根本途径就是不同的主体之间需要一种相通的语义规则,为海上所有的船舶所了解和遵守。显然将COLREGs输入到无人船的智能决策系统中要比制定一套新的规则和改变传统“海员的常规操作”容易得多^[43]。虽然未来可能需要修改COLREGs的部分内容以适应无人船的发展,但目前来看无人船应该遵守避碰规则。以此为前提,引出了另外一个问题。COLREGs中的规

定往往是以一种宽泛的、仅定性的方式表达,同样的条款在不同场景下可能会有不同的解释,甚至在特定情况下可以违反规则操船。如何将这样一套灵活的知识传授给无人船还是亟待解决的问题。

3 自主船时代船舶领域理论的发展方向

近10年来,船舶领域理论迎来了发展的高潮期,无论是发表成果的数量还是参与研究的国家都达到了一个新的高度。随着自主船时代的到来,船舶领域理论能够解决哪些实际问题将决定其发展趋势。第2节论述了当前MASS发展过程中遇到的一些问题,针对上述存在的部分问题,基于船舶领域理论的研究有望提供解决措施。

3.1 基于船舶领域的避碰决策方法

船舶领域目前主要存在以下2种应用方式:一是作为避碰的策略工具,需要明确最小的领域值,以便智能航行系统在与其它船只相遇时可以寻求保持这样的通过距离;二是作为碰撞风险评估的策

略工具,领域交互的频率被用作碰撞风险的替代度量标准。这使得能够对碰撞风险进行量化分析,从而支持积极主动的风险管理方法^[28]。总的来说,基于船舶领域的避碰算法属于局部避碰的范畴,即当目标船侵犯本船领域边界后采取的策略。当障碍物在较远距离时,可采用碰撞风险指数或DCPA/TCPA理论等,达到对目标跟踪的效果。

在无人船应用场景中,上述的应用方式势必还要延续。但应用于无人船的船舶领域模型需要进行“去人为因素”的转变,原因是当前的船舶领域模型大多掺杂人为因素的影响,不符合无人船的应用场景。对此,已经有部分学者展开了相关的研究^[9,14]。此外针对MASS在避碰中与COLREGs关系的问题,基于船舶领域的决策方法可以提供解决的思路。通过表3中船舶领域模型建模中参考COLREGs的情况可以看出,船舶领域模型提供的安全空间考虑了避碰规则的影响。换言之,在不同的会遇态势下,基于船舶安全领域的避碰决策算法提供的空间是足够无人船遵守COLREGs条款采取避碰措施的。

表3 船舶领域模型对COLREGs的参考

船舶领域	Rule 7 “碰撞风险”		会遇态势	安全标准	
	雷达标绘	罗经方位 改变	Rule 13— Rule 15	Rule 16 “让路船的行动”	Rule 17 “直航的行动”
Coldwell ^[17]	—	—	—	√	—
Kijima 等 ^[32]	—	—	√	√	—
Piertzykowski ^[33]	—	—	—	√	—
Im 等 ^[19]	√	—	√	√	√
Bakdi 等 ^[7]	—	—	—	√	√
Zhou 等 ^[47]	—	√	√	√	√
Zhou 等 ^[9]	—	—	√	√	√

注:“√”代表考虑了相应的指标;“—”代表没有考虑或不涉及。

3.2 基于动态水深的三维船舶领域

除碰撞事故外,船舶触礁/搁浅事故同样造成了巨大的经济损失和严重的环境损害。当船舶通过浅点时,实时水深小于船舶吃水就会造成搁浅事故。为了保证通航安全,通常还会增加一个富余水深(under-keel clearance, UKC)。当实时水深大于船舶吃水和富余水深之和时,港口才会允许船舶进

港。可即便如此,船舶搁浅事故还是时有发生。原因是在上述3个变量中,水深是时刻变化的,与潮汐、实时海况等都有联系。由于船舶航行中姿态的变化,船舶吃水也是一个动态值。富余水深通常为一个经验数值,与船体下沉量、水位误差、航速等因素有关。

船舶领域理论对于无人船舶避碰的作用是正

面的,那么是否可以将船舶领域模型由二维平面拓展到三维空间从而进行防止搁浅船舶的研究,对此已经有部分学者提出设想,探讨船舶领域在防止船舶搁浅算法中能起到的作用^[7,20,48],但当前成果的数量和深度还不足以支撑其在工程中实际应用。相较于传统的船舶领域模型,三维船舶领域增加了纵向平面上的一个维度。鉴于上述分析,船舶领域纵向维度的尺寸为船舶动态吃水与UKC之和。因此,获取船舶的动态吃水就成了建立三维船舶领域的关键。传统的船舶吃水量测方法是靠船员人工读取水尺读数,不满足动态要求。未来在自主船时代,有望依靠精密的传感器实现动态吃水的获取。

图6中展示了三维船舶领域的示意图及纵轴尺度 R_{deep} 与大地水准面、参考椭球面以及动态海面之间的关系^[49]。

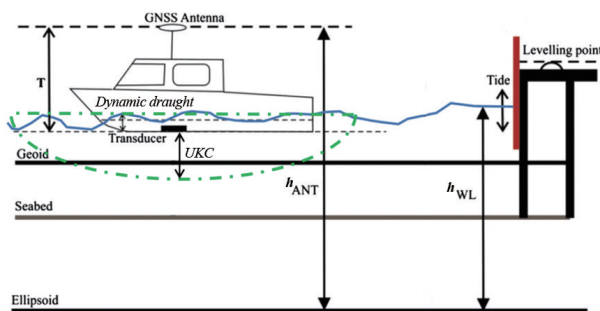


图6 三维船舶领域及其与各参考面间的关系

可表示为

$$R_{\text{deep}} = \text{Dynamic draught} + \text{UKC} = T - [h_{\text{ANT}} - h_{\text{WL}}] + \text{UKC} \quad (1)$$

式中, T 为无人船GNSS天线与本船底部换能器间的距离; h_{ANT} 为GNSS天线与参考椭球面间的距离; h_{WL} 为动态海面到参考椭球面间的距离。

式(1)中最难准确获取的变量为 h_{WL} ,原因是受潮汐的影响,海面高度是一个时刻变化的参数。不过随着全球海洋模型模式预报水平的不断提高,已经能够以较高的精度获取任意时刻的潮高,并基于此开展通航时间窗口的研究^[50]。对于未来大吨位或载运危险货物的无人船舶,防止碰撞和防止搁浅触礁具有同等的重要性。基于动态水深的三维船

舶领域模型能够以一种动态的方式监测无人船航行过程中的交通态势与周围水域水深,同时实现避碰和防止搁浅的目的。

3.3 基于船舶领域思维的无人船护航

通过上述分析,相信在即将到来的自主船时代,船舶领域理论在船舶避碰、防搁浅等方面的研究中依然可以发挥作用。但船舶领域理论的用途是否仅局限于此,能否将船舶安全领域中“安全”的定义从无碰撞、无搁浅扩展到船舶安全、船员安全?船舶领域也不再局限于某一种数学模型,而是上升到一种思维。在无人船广泛应用后,海盗劫持船舶的事件可能会大幅增加^[6]。对此,可以考虑无人船编队航行及武装无人船/艇护航的方式。此时船舶领域边界会从传统的避碰临界距离转变为临界攻击距离,当海盗船进入本船领域边界时发起驱逐或攻击行动。当然单纯依靠该模型无法完成护航的任务,除此之外还需要态势识别、环境感知等多方面的技术支持,但是船舶领域中“临界距离”和“风险判断”的思维在这里是适用的。事实上,以无人船艇为主体的海上护航很早之前已经在英美各国就展开了研究。例如,美国海军进行的一次无人艇编队“蜂群”作战演示中,13艘无人艇参与协同护航作战任务。无人艇群在收到来自直升机提供的威胁报警后,依托雷达和红外传感器探测目标,以集群作战模式实施了对“可疑船只”的包围和拦截,保护本方船只安全撤离。英国海军组织的“无人战士”演习中,演示了50多个无人艇、水下航行器等各类海上自主系统的防御和攻击能力,并且用4艘传感器密集型自主远程艇组成的持久机动探测网络发现、报告和跟踪了真实柴电潜艇和水下潜器。

上述无人艇编队对可疑船只的识别和探测,离不开“距离”这一指标。当往来船只靠近商船距离小于阈值时,将其定义为可疑目标,事实上这就是船舶领域理论中对存在碰撞危险的目标船的判断思维。如此分析,船舶领域理论在自主船时代将被赋予更加丰富的内涵,应用场景也将传统的交通流分析、船舶避碰转向船舶护航、风险判定等多种场景。

4 结论

总结了船舶领域理论几十年来的发展情况,展望了未来自主船时代船舶领域理论何去何从的问题。基于不同的研究背景,船舶领域发展形成了不同的定义方式、建模方法、风险判断标准和应用场景,但各种改进都是为了满足船舶避碰、海上交通流分析等研究工作中的需求。通过分析发现,无人船发展面临的主要挑战包括自主性和安全性两方面,船舶领域理论在保持传统用途的同时还应该契合未来自主船时代的发展需求。基于最新的发展趋势,提出了自主船时代船舶领域可能的发展方向。基于船舶领域的避碰决策模型有助于提高无人船的自主性,而三维船舶领域模型和基于船舶领域思维的无人船护航方法的提出则是致力于保障无人船的安全。

参考文献(References)

- [1] EMSA. Annual overview of marine casualties and incidents 2018[R]. Lisbon: European Maritime Safety Agency, 2018.
- [2] EMSA. Preliminary annual overview of marine casualties and incidents 2014—2020[R]. Lisbon: European Maritime Safety Agency, 2021.
- [3] 交通运输部. 2018年交通运输业发展统计公报[R]. 北京: 交通运输部, 2019.
- [4] Fan S, Blanco-Davis E, Yang Z, et al. Incorporation of human factors into maritime accident analysis using a data driven Bayesian network[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2020, 203: 107070.
- [5] Fan S, Zhang J, Blanco-Davis E, et al. Effects of seafarers' emotion on human performance using bridge simulation[J]. Ocean Engineering, 2018, 170: 111-119.
- [6] IMO. Regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS)[R]. London: Maritime Safety Committee, 2018.
- [7] Bakdi A, Glad I K, Vanem E, et al. AIS-Based multiple vessel collision and grounding risk identification based on adaptive safety domain[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 8(1): 5.
- [8] Montewka J, Gil M, Wrobel K. Discussion on the article by Zhang & Meng entitled "Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment"[J]. Ocean Engineering, 2020, 209: 107527.
- [9] Zhou J, Wang C, Zhang A. A COLREGs-based dynamic navigation safety domain for unmanned surface vehicles: A case study of Dolphin-I[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8: 264.
- [10] Szlapczynski R, Szlapczynska J. An analysis of domain-based ship collision risk parameters[J]. Ocean Engineering, 2016, 126: 47-56.
- [11] Szlapczynski R, Niksa-Rynkiewicz T. A framework of a ship domain-based near-miss detection method using mamdani neuro-fuzzy classification[J]. Polish Maritime Research, 2018, 25: 14-21.
- [12] Baran A, Fiskin R, Kisi H. A research on concept of ship safety domain[J]. TRANSSNAV the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2018, 12(1): 43-47.
- [13] 周翔宇. 面向自主船舶的危险分析方法[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
- [14] Zhou J, Ding F, Yang J X, et al. Navigation safety domain and collision risk index for decision support of collision avoidance of USVs[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2021, 13: 340-350.
- [15] Fujii Y, Tanaka K. Traffic capacity[J]. Journal of Navigation, 1971, 24(4): 543-552.
- [16] Goodwin E M. A statistical study of ship domains[J]. Journal of Navigation, 1975, 28(3): 328-344.
- [17] Coldwell T G. Marine traffic behavior in restricted waters [J]. Journal of Navigation, 1983, 36(3): 430-444.
- [18] Zhang L Y, Meng Q. Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment[J]. Ocean Engineering, 2019, 186: 106130.
- [19] Im N, Luong T N. Potential risk ship domain as a danger criterion for real-time ship collision risk evaluation [J]. Ocean Engineering, 2019, 194: 106610.
- [20] Cheng Z X, Xu X Z, Zeng X M, et al. A dynamic three-dimensional ship domain model for vessels in ports waters[C]//2nd International Conference on Energy, Power and Electrical Engineering(EPEE 2017). Shanghai: DESTech, 2017: 257-265.
- [21] Szlapczynski R, Szlapczynska J. Review of ship safety domains: Models and applications[J]. Ocean Engineering, 2017, 145: 277-289.
- [22] Fiskin R, Nasiboglu E, Yardimci M O. A knowledge-based framework for two-dimensional(2D) asymmetrical

- polygonal ship domain[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 202: 107187.
- [23] Hansen M G, Jenson T K, Lehn-Schiøler T, et al. Empirical ship domain based on AIS data[J]. *Journal of Navigation*, 2013, 66(6): 931-940.
- [24] Zhao J S, Wu Z L, Wang F C. Comments on ship domains[J]. *Journal of Navigation*, 1993, 46(3): 422-436.
- [25] Wang N. A novel analytical framework for dynamic quaternion ship domains[J]. *Journal of Navigation*, 2013, 66(2): 265-281.
- [26] Liu J X, Zhou F, Li Z Z, et al. Dynamic ship domain models for capacity analysis of restricted water channels [J]. *Journal of Navigation*, 2016, 69(3): 481-503.
- [27] Rawson A, Rogers E, Foster D, et al. Practical application of domain analysis: Port of London case study[J]. *Journal of Navigation*, 2014, 67(2): 193-209.
- [28] Rawson A, Brito M. A critique of the use of domain analysis for spatial collision risk assessment[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 219: 108259.
- [29] Szłapczyński R, Niksa-Rynkiewicz T. A framework of a ship domain-based near-miss detection method using mamdani neuro-fuzzy classification[J]. *Polish Maritime Research*, 2018, 25(Suppl 1): 14-21.
- [30] Namgung H, Kim J S. Collision risk inference system for maritime autonomous surface ships using COLREGs rules compliant collision avoidance[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 7823-7835.
- [31] Fiskin R, Atik O, Kisi H, et al. Fuzzy domain and meta-heuristic algorithm-based collision avoidance control for ships: Experimental validation in virtual and real environment[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108502.
- [32] Kijima K, Furukawa Y. Automatic collision avoidance system using the concept of blocking area[C]//International Federation of Automatic Control(IFAC) Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft 2003. Schlossplatz: IFAC, 2003: 223-228.
- [33] Pietrzykowski Z. Ship's fuzzy domain-A criterion for navigational safety in narrow fairways[J]. *Journal of Navigation*, 2008, 61(3): 499-514.
- [34] Wang Y Y, Chin H C. An empirically-calibrated ship domain as a safety criterion for navigation in confined waters[J]. *Journal of Navigation*, 2016, 69(2): 257-276.
- [35] Dinh G H, Im N K. The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area [J]. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 2016, 4: 97-108.
- [36] Wielgosz M. Ship domain in open sea areas and restricted waters: An analysis of influence of the available maneuvering area[J]. *TRANSNAV the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2017, 11: 99-104.
- [37] Pietrzykowski Z, Uriasz J. The ship domain-A criterion of navigational safety assessment in an open sea area[J]. *Journal of Navigation*, 2009, 62(1): 93-108.
- [38] He Y X, Jin Y, Huang L W, et al. Quantitative analysis of COLREG rules and seamanship for autonomous collision avoidance at open sea[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 140: 281-291.
- [39] Jensen T K, Hansen M G, Lehn-Schiøler T, et al. Free flow-efficiency of a one-way traffic lane between two pylons[J]. *Journal of Navigation*, 2013, 66(6): 941-951.
- [40] 李永杰, 张瑞, 魏慕恒, 等. 船舶自主航行关键技术研究现状与展望[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 32-44.
- [41] Burmeister H C, Bruhn W, Rodseth O J, et al. Autonomous unmanned merchant vessel and its contribution towards the e-Navigation implementation: The MUNIN Perspective[J]. *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, 2014, 1: 1-13.
- [42] 周翔宇, 吴兆麟, 王凤武, 等. 自主船的定义及其自主水平的界定[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(6): 149-162.
- [43] Porathe T. Maritime autonomous surface ships (MASS) and the COLREGs: Do we need quantified rules or is "the ordinary practice of seamen" specific enough?[J]. *TRANSNAV the International Journal on Maritime Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2019, 13(3): 511-517.
- [44] Felski A, Zwolak K. The ocean-going autonomous ship—challenges and threats[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(1): 41.
- [45] 李瑞. 无人船的法律地位研究[J]. *中华海洋法学评论*, 2019(4): 149-190.
- [46] Chang Y C, Zhang G, Wang N N. The international legal status of the unmanned maritime vehicles[J]. *Marine Policy*, 2020, 113: 103830.
- [47] Zhou D, Zheng Z Y. Dynamic fuzzy ship domain considering the factors of own ship and other ships[J]. *Journal of Navigation*, 2019, 72(2): 467-482.
- [48] 徐周华, 牟军敏, 季永清. 内河水域船舶领域三维模型的研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2004, 28(3): 380-383.

[49] Aykut N O, Akpınar B. Determining the dynamic draught for precise hydrographic surveying[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 62: 38–44.

[50] Ding F, Zhou J, Zhang J L, et al. Continuous depth da-

tum-based dynamic bathymetric model: Construction and application[J]. *Journal of Coastal Research*, 2020, 111(Suppl 1): 156–161.

Ship domain theory: An overview of current development and opportunities in the coming MASS era

ZHOU Jian¹, LI Hui¹, GUO Shuaichao¹, WANG Chenxu^{2*}

1. 716th Research Institute, China State Shipbuilding Corporation, Lianyungang 222061, China
2. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract For the past decade the study of the ship domain theory has made great progress and been widely used in the research of ship collision avoidance, navigation decision-making and marine traffic engineering. With the rising of the concept of MASS (maritime autonomous surface ship) and relevant laws/regulations, the process of ship intelligence and autonomy will be accelerated, and the ship domain theory will develop in a new direction under this trend. The main motivation of this paper is to explore the role of ship domain in the development of autonomous vessels. Firstly, the development status of the ship domain is summarized including existing definitions and modeling methods, and the practical application scenarios of the ship domain models are discussed. Subsequently, the development of MASS and the challenges it may face in the future innovation process are discussed. Finally, according to the needs of the MASS era, the future development direction and application of the ship domain theory are put forward.

Keywords ship domain; MASS; collision avoidance; navigation decision-making; autonomous ●



(责任编辑 卫夏雯)