

引用格式: 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.
LI Y J, ZHANG R, WEI M H, et al. State-of-the-art research and prospects of key technologies for ship autonomous navigation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 32-44.

船舶自主航行关键技术研究 现状与展望



扫码阅读全文

李永杰*, 张瑞, 魏慕恒, 张羽
震兑工业智能科技有限公司, 北京 100094

摘要: 船舶自主航行作为智能船舶的显著特征, 日益受到工业与海事企业的关注。为把握船舶自主航行现状和发展方向, 开展相关关键技术研究调研与综述。分析近三年国内外船舶自主航行技术的发展现状, 针对航行态势感知、认知计算、避碰决策、航行控制、赛博安全等关键技术, 剖析其技术内涵、研究现状与应用情况。针对智能航行关键技术现状与技术需求, 从态势感知、认知与决策、控制与安全3个方面对船舶自主航行的未来发展进行了展望。

关键词: 自主航行; 航行态势感知; 认知计算; 避碰决策; 智能船舶

中图分类号: U664.82

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01958

State-of-the-art research and prospects of key technologies for ship autonomous navigation

LI Yongjie*, ZHANG Rui, WEI Muheng, ZHANG Yu

Zhendui Industry Artificial Intelligence Co., Ltd., Beijing 100094, China

Abstract: As a salient feature of smart ships, autonomous navigation has attracted the increasing attention of industrial and maritime enterprises. To grasp the status and development direction of autonomous navigation, this paper carries out an investigation and review of the relevant key technology by analyzing domestic and foreign state-of-the-art research into autonomous navigation technology over the past three years. Aiming at key technologies such as situational awareness of navigation, cognitive computing, collision avoidance decision-making, navigation control and cyber security, the technical connotations, research status and application situations are analyzed. Considering the current status and technical requirements of key technologies for intelligent navigation, this paper provides the future outlook of situational awareness, cognition, decision-making, control and security for the autonomous navigation of ships.

Key words: autonomous navigation; situational awareness of navigation; cognitive computing; collision avoidance decision-making; intelligent ships

0 引言

航运作为一种运量大、成本低的运输方式, 在全球贸易货物运输中发挥着十分重要的作用。随着船舶数量的增加和船舶大型化发展, 航运业面临着环境污染严重、人力成本增加、安全性不足等诸多挑战^[1]。近年来, 为应对上述挑战而设

计的智能船舶受到船舶与航运行业的欢迎。智能船舶利用先进的感知、认知、决策、控制技术, 相比传统船舶, 在经济性、安全性、可靠性、环保性、高效性等方面具有显著优势。

作为智能船舶最显著的功能, 智能航行的发展一直备受关注。近年来, 国际海事组织和各大船级社相继提出了关于智能航行的等级划分, 总

收稿日期: 2020-05-10

修回日期: 2020-07-28

网络首发时间: 2021-01-20 10:01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61633001)

作者简介: 李永杰, 男, 1990年生, 硕士, 工程师。

张瑞, 女, 1987年生, 博士, 工程师。

魏慕恒, 女, 1986年生, 博士, 高级工程师。

张羽, 男, 1986年生, 工程师。

*通信作者: 李永杰

体来看大致可分为5个等级,依次为无自主、辅助决策、授权控制、监督控制和完全自主航行。2020年3月1日,中国船级社发布了《智能船舶规范(2020年版)》,相比于2015年版,新版本增加了远程控制操作(R)和自主操作(A)功能。

2006年,国际海事组织提出了“电子航海”(e-Navigation)概念,这是智能航行概念的雏形,其利用船舶内、外部通信网络,实现船岸信息的采集、集成和显示,实现船与船、船与岸、岸与岸之间的信息交互,以提升船舶的经济性、安全性和环保性^[1]。此后,韩国、日本、欧洲和我国相继开展智能航行研发,取得了积极进展。

表1 智能航行等级划分比较

Table 1 Comparison of autonomous navigation levels

等级	劳氏船级社	中国船级社	法国船级社	国际海事组织
AL0	手动网络介入	信息汇总展示	人操作(人参与全部决策与控制)	—
AL1	远程或自主监测网络介入	辅助决策支持	人指导(系统建议,人决策与执行)	具有自动化流程与决策支持的船舶
AL2	远程或自主监测与控制网络介入(需要船基确认)	即时决策支持	人授权(系统调用功能,人在某些时候可拒绝采用系统决策)	有船员值守远程控制
AL3	远程或自主监测与控制网络介入(允许船基指令覆盖)	人在回路,较少干预	人监督(系统调用功能,不需要等待人的反应)	无船员值守远程控制
AL4	远程或自主监测与控制网络介入(不允许船基指令覆盖)	完全自主,智能船间高级互联	完全自主(系统调用功能,不需要通知人)	完全自主船舶(船舶操作系统能够自主决策与执行)

2017年12月,由我国自主研发的全球第一艘经过中国船级社和英国劳氏船级社双认证的“大智”号智能散货船在上海正式交付,该船安装有智能航行系统,具有航行辅助决策功能。

2018年11月,我国智能船舶1.0专项首艘大型矿砂船示范船“明远”号交付,该船分别获得中国船级社和挪威船级社认证,具有辅助自主航行功能。

2019年5月,国内首艘无人驾驶自主航行系统小型试验船“智腾”号完成航行测试,初步具备自主避碰、自主航行水下避碰、自主靠离泊、自主循迹和自主航行控制功能。

2019年6月,我国智能船舶1.0研发专项首艘超大型油轮示范船“凯征”号交付,该船安装有光电跟踪系统和辅助避碰系统,具有辅助自主航行功能。

国外方面,欧洲、日本和韩国等国家(地区)在船舶自主航行领域也进行了较多的探索,尤其是欧洲的罗尔斯·罗伊斯、瓦锡兰、ABB等公司在自主航行领域走在世界的前列^[2]。

2017年6月,罗尔斯·罗伊斯公司与全球拖船运营商 Svitser 合作,在丹麦哥本哈根港对全球首艘遥控拖船进行了航行试验。该船利用动力定位系统和感知系统,完成了停靠、解锁、360°旋转等操控,具备远程遥控功能。

1 国内外研究现状

1.1 工程应用现状

我国智能船舶的发展遵循系统布局、创新驱动、梯次推进、重点突破的原则,按照“辅助决策-远程控制-无人自主”的研发路径有序开展,与表1所示智能航行等级划分基本一致。依托国家重大科研项目和“产学研用”专业化协作团队,经过几年的研究与探索,我国在智能船舶和船舶自主航行领域取得了较好的成果。

2018年12月,罗尔斯·罗伊斯公司与芬兰 Finferries 公司合作,对全球首艘无人驾驶渡轮 Falco 号进行了航行试验。该船采用态势感知技术和人工智能技术实现自主避碰、自动靠泊等功能,可以实现远程遥控和自主航行。

2018年12月,瓦锡兰公司在 Folgefonn 号渡轮上完成了港到港(dock-to-dock)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。

2019年1月,Suomenlinna II号冰级客渡轮,在控制中心远程操控状态下,成功穿越了赫尔辛基港附近的测试区域,通过了远程海试。

2019年7月,日本三井造船等单位,利用在开阔水域建立的虚拟码头,完成了 Shioji Maru 号训练船自动靠泊和离泊安全性能的示范试验。

此外,韩国政府计划投资5848亿韩元(约合人民币34.4亿元)用于打造智能自航船舶及航运港口应用服务。项目已于2019年正式启动,将持续6年。项目包括智能自航船舶开发、智能自航船舶试航中心开发、智能自航船舶-试航连接系统开发、自航船舶-港口连接系统开发、港界内自航船舶远程航行控制中心开发、自航船舶应用服务及制度建设。

总体来看,目前船舶自主航行仍处于起步阶

段,远程遥控和自主航行仅在小型渡轮、拖轮、试验船、训练船上开展了应用探索与功能测试,而

大型商船仍处于辅助决策阶段。国内外船舶自主航行的对比如表2所示。

表2 国内外船舶自主航行比较

Table 2 Comparison of ship autonomous navigation

国家(地区)	研究对象	所处阶段	参与单位	技术优势
欧洲	渡轮、拖船等小型船舶	远程控制、自主航行	船舶与航运企业为主	在态势感知、远程控制等技术领域处于领先
日韩	运输船	辅助决策	政府主导, 船企、高校参与	在智能船舶标准制定方面走在前列
中国	大型运输船	辅助决策	政府主导, 船舶产业链企业、研究所、高校参与	在人工智能、大数据、5G等新一代信息技术领域处于领先

1.2 理论研究现状

我国船舶自主航行理论研究以高校、船舶行业研究院所为主力军,提出了基于信息物理系统(cyber-physical systems, CPS)、物联网、工业互联网的船舶自主航行设计^[3]。严新平等^[4]提出了由感知空间、认知空间和决策执行空间等功能空间组成的“航行脑”系统概念设计。“航行脑”系统的设计参考了人脑的工作机理,将系统分为相互关联的工作模块(空间),模块之间相互协作,共同完成复杂任务。感知空间主要用于在航环境和船舶状态信息的获取;认知空间从获取的信息中抽取、加工与航行相关的要素,利用航行态势分析、驾驶行为学习等技术形成知识;决策执行空间利用航行决策与航行控制算法实现船舶航行状态的控制。乔大雷等^[5]提出了基于物联网技术的航行控制系统设计,系统由船舶本体、蜂窝窄带物联网(NB-IoT)基站、岸基支持中心组成。系统硬件设计包括3大模块,即动力与转型控制模块,船舶自动识别、差分GPS、风速风向仪、激光雷达和船舶姿态传感器模块,NB-IoT通信网络模块。系统软件设计包括无人船控制软件运动建模、航迹控制律设计和航迹控制软件实现,其中航迹控制采用基于响应式禁忌搜索的PID参数自适应整定航迹控制算法。通过真实环境试验验证了系统设计的可行性和航迹控制算法的有效性。Qiu等^[6]提出了以CPS为核心的“两端+两云”智能船舶体系架构。“两端”即感知与控制端、管理端,“两云”即基于私有云和公有云的混合云架构。感知与控制端利用船基传感设备与系统获取船舶与环境数据,并负责决策控制指令的执行。管理端面向岸基管理人员提供航行态势分析、航线优化、航行保障等服务。在混合云中构建计算环境、数据中心、认知中心和决策中心,以支撑智能船舶智能航行系统、能效系统、运维系统等智能应用。

国外方面,韩国、欧洲等国家(地区)提出了

基于信息通信^[7]、避碰^[8]、导航与控制^[9]、决策^[10]、远程监督^[11]等技术的自主航行理论体系。Im等^[7]设计了一种智能自主船舶架构,包括智能自主船舶和岸基数据中心两部分,采用智能信息技术(即物联网、云计算、大数据平台、移动网络、网络安全、弱人工智能)和无人驾驶船舶操作与管理实现船舶自主航行。Perera等^[9]提出了一种面向自主水面舰艇的导航与控制平台,硬件部分包括命令与监视单元、通信与控制单元;软件部分采用去中心化控制方式,由舵控制子系统和速度控制子系统组成。Lager等^[11]设计了一种在有限带宽通信条件下的小型无人自主船远程监督系统,其采用3D建模与虚拟现实技术向用户提供周围环境态势感知、碰撞检测功能,降低了用户的认知负荷。Pedersen等^[12]针对实船测试次数十分有限的现状,指出态势感知系统与自主航行系统的研发与测试,需要大规模开展基于系统仿真的测试,以满足自主航行系统安装部署的安全性与可靠性要求。其设计思路为:采用数字孪生作为仿真测试的关键工具,即构建包括所有传感器和执行器在内的船舶及其设备的数据模型;构建完善的运行环境,即包括风、浪、流以及地理位置和目标船舶等;测试管理系统包括场景管理和测试管理两部分,前者负责测试环境条件、船舶、位置、通航等参数的配置,后者则负责测试评估;测试接口负责仿真环境与测试管理系统之间的交互,采用支持功能模型接口(FMI)的开放式仿真平台。

2 自主航行关键技术

船舶具有体型巨大、设备众多且种类繁杂、航行环境复杂多变等特点,因此,船舶的自主航行面临着诸多挑战。作为智能船舶的高级阶段,船舶自主航行需要完备的技术体系作为支撑。船舶自主航行系统具有像人一样独立进行感知、思考、决策、控制的能力,其技术体系可分为航行态

势感知、认知计算、避碰决策、航行控制和赛博安全等 5 类技术, 如图 1 所示。

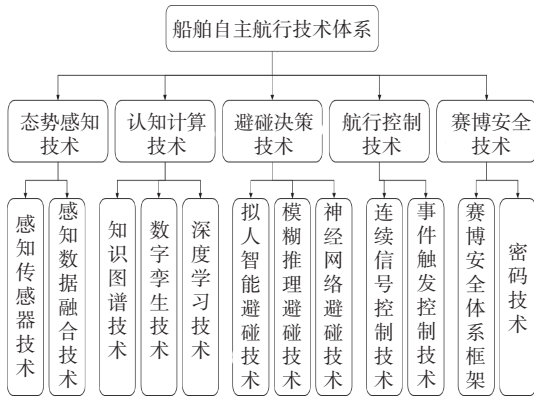


图 1 船舶自主航行技术体系

Fig. 1 Ship autonomous navigation technology system

2.1 航行态势感知技术

航行态势感知是船舶自主航行的基础。如果将智能船舶比作人, 船舶自主航行比作人的行走, 那么航行态势感知相当于综合利用人的眼睛、耳朵和鼻子等感官对周围环境进行感知。航行态势感知技术包括态势感知传感器、态势感知数据融合等技术。

船舶导航系统一般配备有船舶自动识别系统 (AIS)、GPS、船用雷达 (S 波段和 X 波段)、电子海图等系统, 在此基础上, 船舶航行态势感知系统还需要配备激光雷达、全景视觉、全景红外等传感器, 以提高感知精度、减少感知盲区等。

表 3 对各类船用态势感知传感器进行了比较, 可供选择航行态势感知传感器时参考。

表 3 船用态势感知传感器比较

Table 3 Comparison of marine situational awareness sensors

比较项目	激光雷达	全景视觉	全景红外	S波段雷达	X波段雷达
空间分辨率	高	高	较高	低	较低
感知范围	较大	较大	较小	大	较小
测量距离	远	较近	较近	远	远
目标识别率	较高	高	较高	低	低
昼夜和天气适应性	较好/不确定	差	较好	好	好
分析计算负荷	低	低	较低	高	高
海事鲁棒性	不确定	高	高	高	高
价格	低	较高	较低	高	高

1) 激光雷达。

激光雷达是雷达技术与激光技术的结合。激光雷达以激光作为载波, 由于激光本身具有单色性好、亮度高、分辨率高、灵敏度高等特点, 激光雷达具有空间分辨率高、速度分辨率高、抗干扰

能力强、不受无线电波干扰等优势^[13]。

目前, 激光雷达在汽车自动驾驶领域使用较为广泛, 而在船舶领域应用较少, 且其研究主要集中在内河船舶上^[14-15]。这主要是因为船舶在海上航行的环境复杂多变, 而激光雷达工作时受气象条件影响大。王贵槐等^[14]利用激光雷达感知内河无人船近距离障碍物, 对激光数据进行预处理与机器学习, 在水池试验环境下, 对障碍物的识别率可达 85% 以上, 具有较好的感知效果。李梓龙^[15]研究了激光雷达对于船舶、桥墩和航标等水池模拟障碍物的感知过程, 提出了基于支持向量机的障碍物分类器, 为内河无人船自主航行提供了参考。李小毛等^[16]基于“精海 5 号”无人艇, 以 3D 激光点云数据为基础, 利用关联多帧激光数据, 实现了海上目标的动态跟踪。

2) 全景视觉。

全景视觉系统是由全景视觉光学成像系统、图像传感器、图像处理系统和输出图像显示等组成的视觉感知系统, 在环境感知、目标监控、虚拟游览等民用或军用领域已有较多应用。全景视觉系统主要包括旋转式、鱼镜头式、多相机拼接式、反射式、折反式等类型。其中, 旋转式全景视觉系统具有组成简单、图像真实度高、成本低等优点, 但是需要配有精确的旋转装置, 图像数据量大、拼接难度较大^[17]。近年来, 随着算力性能的提升和算法的优化, 全景视觉系统趋向于更高的图像分辨率、更高的灵敏度、更好的实时性, 以旋转式、多相机拼接式为代表的高精度全景视觉系统有望在船舶航行态势感知领域得到应用^[18]。

尹义松^[19]、周娜^[20]和燕妹^[21]利用全景视觉系统对海上远景目标、小目标、弱小目标检测方法进行了研究。利用全景视觉系统构建海上全景图像, 然后对全景图像进行去雾处理、锐化处理、海天线提取和远景弱小目标检测, 具有一定的实用性。

3) 全景红外。

全景红外系统兼有红外成像和全景成像两方面的优势, 红外成像因其波长特性, 可以应用在一切实具有热红外辐射的环境中, 有效应对特殊复杂场景 (如夜间航行场景、烟雾环境等) 对光学成像仪器工作环境的挑战。全景红外系统是在全景视觉系统的基础上发展而来的, 主要应用于军事领域及特殊民用领域^[22]。红外成像存在噪声大、对比度低、非均匀性大、空间分辨率低等缺点, 一般从红外探测器材料、制造工艺、成像电子学组件等角度对红外成像系统进行优化。随着计算机视觉技术的发展, 从图像处理算法角度进行红外成像的优化已成为重要的发展趋势^[23]。

船舶航行态势感知数据往往有多个数据源,为了充分发挥多源数据价值,确保态势信息的正确性和全局性,需要对多源态势感知数据进行融合处理。数据融合方法包含贝叶斯网络、D-S 证据理论、粗糙集理论、神经网络、隐马尔可夫模型等^[24]。数据融合处理的多源信息可能处于不同的信息层次,包括数据层(像素级)、特征层和决策层,相应的数据融合也包括数据级、特征级和决策级融合3种方式^[25]。

在船舶领域,国内外对于雷达、AIS、GPS 数据融合的研究较多,融合方法包括:贝叶斯网络^[26]、D-S 证据理论^[27]、模糊理论^[28]、灰色理论^[29]、神经网络^[30]等,但对于激光雷达、全景视觉等新型态势感知系统的研究较少。

1) 基于贝叶斯网络的数据融合。

贝叶斯网络是一种有向无环图模型,其基本思想源于概率和图论,是一个赋值的复杂因果关系网络图。苏芳等^[31]将基于贝叶斯网络的数据融合理论用于合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像分类,利用贝叶斯网络模型,对多通道 SAR 图像进行像素级的数据融合,相比单通道分类,可以更加充分地利用像素级数据的有效信息,从而保留各通道的有用信息,获得更好的结果。毛伟等^[32]对不同传感器采集到的目标数据首先进行特征提取,再利用专家测评法对不同数据特征量的分类结果分别赋予不同的权重,然后利用贝叶斯网络模型进行决策级融合,从而得到比较准确合理的结果。

2) 基于 D-S 证据理论的数据融合。

D-S 证据理论允许每个传感器提供可用于目标检测、目标分类和识别的信息,其核心是使用概率分布值来定义不确定性区间,并使用不确定性区间来表示命题的支持度和似然度。D-S 理论的主要特点是满足比贝叶斯概率理论更弱的条件,具有直接表达“不确定”和“不知道”的能力^[33]。王力^[34]基于国内外学者的研究成果,对基于 D-S 证据理论的多传感器数据融合算法进行了两种方法的改进:一种是对数据模型的改进,通过引入模拟理论贴近度的概念,分别计算各个证据对于不同目标的贴近度,从而得到新的证据信息,再利用 D-S 证据理论分析处理,这种方法具有收敛速度快、融合结果好等优点;另一种是对合成法则的改进,按照冲突程度对证据冲突进行重新分配,充分考虑不同证据对同一目标的一致性描述以及冲突性信息,这种方法具有操作简单、收敛速度快、可靠性高等优点。

3) 基于深度学习的数据融合。

近年来,随着深度学习技术的发展,基于深度学习的数据融合方法逐渐受到人们的关注。深度学习的显著特征是可以自动从数据中提取目标特征,所提取的高层特征具有表征性强、语义性好的特点。因此,基于深度学习的数据融合是一种特征级数据融合。孙康^[35]利用卷积神经网络与支持向量机混合模型,对数据进行特征融合,取得了较好的目标检测效果。惠国保^[36]利用深度学习网络对3种影像数据(光学、SAR、红外)分别进行数据级、特征级和决策级融合,为构建多源数据融合的深度学习方法提供了思路。这种方法在船舶航行态势感知数据融合领域有较好的应用前景。

2.2 认知计算技术

认知是人类特有的一种复杂行为过程,是人类在过去的经验及对有关线索进行分析的基础上形成的对信息的理解、分类、归纳、演绎和计算,人类的认知活动包括思维、语言、定向和意识。认知计算是利用计算机对人脑进行模拟的技术。相对于传统的计算技术,认知计算更加注重对生物系统中不确定、不精确和部分真实问题的研究,以实现利用计算机模拟人类的感知、分析、思维、决策等过程^[37]。

理想的认知计算系统需要具备以下特性:一是辅助功能,即提供人们所需要的信息与知识,为人们的判断与分析提供支撑;二是理解能力,即能够对信息进行加工、处理与理解,帮助人们发现信息之间的关联关系;三是决策能力,即能够利用信息与知识做出决策的能力,帮助人们定量地分析各类因素对于决策的影响,确保决策的精准性;四是洞察与发现,即可以从纷繁复杂的信息中总结、归纳、发现对人们有用的内容和知识^[37]。

近年来,以知识图谱、数字孪生和深度学习为代表的认知计算技术受到越来越多专家学者的关注,并取得了较好的效果。在船舶领域,认知计算技术在船舶碰撞事故分析^[38]、航运智能化^[39]、海洋航行环境气象预测^[40]等方面得到了应用。

1) 知识图谱。

知识图谱采用结构化的形式来描述现实世界中的概念、实体及其关系,采用与人类认知世界相似的形式来表示信息,能够更好地组织、管理和理解现实世界中大量的信息。知识图谱技术是指知识图谱建立和应用的技术,其融合了认知计算、知识表示与推理、信息检索与抽取、自然语

言处理、数据挖掘与机器学习等方向的交叉研究,在知识融合、语义搜索和推荐、问答和对话系统、大数据分析决策等领域有着重要应用价值^[41]。

知识图谱技术可以分为3个部分:构建技术、查询和推理技术、应用技术。知识图谱构建包括知识表示与建模、知识表示学习、实体识别与链接、实体关系学习、事件知识学习等内容;知识图谱查询和推理包括知识存储和查询、知识推理(基于符号的推理和基于统计的推理);知识图谱应用包括通用和领域知识图谱、语义集成、语义搜索、基于知识的问答等^[42]。

2) 数字孪生。

数字孪生一般是指利用数字技术在赛博空间中对物理实体进行描述、建模与同步的过程与方法。与传统的仿真不同,数字孪生模型是与物理实体实时双向交互的,即基于物理实体的属性、特性和数据,在赛博空间中构建起数字孪生模型,模型实时仿真、推演、预测、决策,并将结果实时反馈至物理实体,构成一个闭环的数据流动过程。数字孪生是对物理实体对象的特征、行为、形成过程和性能等进行描述和建模的过程和方法。其对未知世界的预测能力,为传统制造业的创新和转型升级提供了新的理念和工具^[43]。

陶飞等^[44]提出了数字孪生的五维模型,即包括物理实体、虚拟实体、孪生数据、服务和连接。其中的服务,即是将各类数据、模型、算法封装为组件、中间件、模块引擎等形式,用以支撑数字孪生各类功能的实现,并可应用于应用软件和移动端应用。在船舶自主航行领域,李凯等^[45]基于数字孪生的基本理论,提出数字化舰船的总体框架,探索了基于数字孪生舰船作业任务全流程全要素辅助决策等问题。黄永军等^[39]针对水路运输问题,提出了一种以数字孪生为核心的“云上港航”解决方案,其基本框架包括港口节点、岸基传感器、数字孪生工具、数字孪生模型、人工智能服务和定制化应用,能够为船舶产业链用户和航运企业提供精细化服务。Coraddu等^[46]利用船上传感器收集的大量数据构建了数据驱动的船舶数字孪生,并用于估算由于船舶污损而造成的速度损失,基于这种方法,可以减少由于结垢而引起的燃油消耗。

3) 深度学习。

近年来,得益于算力性能的提升和分布式计算、云计算技术的发展,深度学习已成为大数据时代认知计算的研究热点^[47]。深度学习的基本思想是构建多层神经网络模型,利用大量数据训练所构建的模型,并且自动提取和选择数据特征,

来提高识别、回归、分类、预测等问题的准确性^[48]。深度学习认知计算过程主要包括3个方面:数据表示、认知模型、并行计算。深度学习数据表示包括基于多模态的数据表示、基于张量的数据表示,深度学习认知模型包括深度学习网络、卷积神经网络、栈式自编码器、递归神经网络、基于张量的深度学习模型以及深度学习模型优化,深度学习并行计算包括GPU加速、数据与模型并行、深度学习计算集群及其并行应用^[49]。

权波等^[50]针对船舶航迹多维度特点及其预测精度和实时性的要求,将深度学习的方法应用到航迹预测,以AIS系统中的经度、纬度、航向、航速、时间间隔等作为RNN-LSTM模型的训练数据特征,利用实船数据对模型进行训练,实现对未来船舶航行轨迹进行预测,预测精度比传统方法高。王胜正等^[40]针对预测海洋气象条件对航速影响的问题,在稀疏自编码(SAE)网络模型的基础上提出交替稀疏自编码(ASAE)网络模型,其核心思想是对每一个隐藏层进行无监督学习和有监督学习的交替学习,使模型对底层参数更有效地学习。利用实船航行数据和气象数据进行训练与验证,对比支持向量回归(SVR)、反向传播神经网络(BP)、深度信念网络(DBN)、SAE网络模型的预测结果,证实ASAE网络模型的预测结果更符合实际海况,可以为基于海洋气象条件的航线规划、航速推荐等提供指导。

2.3 避碰决策技术

近年来,船舶正朝着大型化、快速化和专业化方向发展,海上交通环境日益复杂,船舶碰撞、搁浅触礁事故时有发生。据统计,全世界每年失事的船舶约200艘,总吨位数为120万t,相当于每15天失事1艘5万t的船舶。船舶碰撞事故调查结果显示,80%以上的碰撞事故是由于人为因素造成的^[51]。近年来,国内外专家学者在船舶避碰决策方面,提出了模糊推理方法、神经网络方法、遗传算法方法、专家智能方法和多种智能方法的组合方法。在求解船舶避碰这种复杂问题时,可以利用智能方法和传统方法的差异性和互补性,将两类方法混合使用,使得智能避碰决策系统具有更强的知识表达能力和推理能力、更高的运行效率和求解能力^[52]。

1) 拟人智能避碰决策。

李丽娜等^[53-54]提出了船舶拟人智能避碰决策(PIDVCA)理论,如图2所示。PIDVCA理论的内涵是自动根据避碰目标与本船的会遇关系,模仿经验丰富的船长对周围环境和会遇危险局势的分

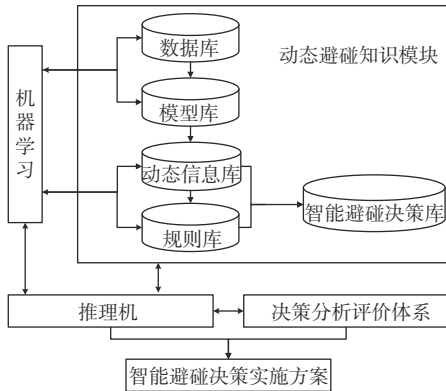


图2 船舶拟人智能避碰决策理论框架

Fig. 2 Theoretical framework of PIDVCA

析判断和在避碰决策中的思维方式,自动生成安全性和经济性不高于避碰专家的避碰策略,必要时模拟两船避碰的协商过程,与周围船舶互通操纵意图。PIDVCA 理论体系包括通过物标认知过程、目标态势分析、目标危险判断、避碰决策生成、决策方案优化与校验以及决策协商与通报的一系列学习、推理和优化的自动化方法,模拟人工避碰决策的全过程,最终实现“船舶拟人智能避碰决策”的自动生成与优化。

PIDVCA 是将数理分析、机器学习、专家系统、模糊数学和航海知识有效融合形成的智能集成避碰方法^[55]。其模型框架包括动态避碰知识库、机器学习模块、推理机、决策分析评价体系、智能避碰决策实施方案等。其中,动态避碰知识库是整个模型框架的核心,包括数据库、模型库、动态信息库、规则库、智能避碰决策库等,并与机器学习模块和推理机交互作用,从历史数据、实时数据和信息中学习发现新的避碰模型和避碰知识,实现避碰知识库的动态更新。大量仿真结果表明,PIDVCA 集成避碰方法能够构建动态避碰知识库,在解决复杂多变避碰问题时具有优势。

2) 模糊推理避碰决策。

模糊推理是在模糊几何理论的基础上创立和发展而来的,在实际工程问题中发挥着重要的作用。遗传算法的思想源于对生物进化机制的模拟,是一类自组织、自适应的过程搜索最优解算法。模糊推理与遗传算法可以单独使用,也可以相互结合形成遗传模糊方法。遗传模糊方法的核心思想是在模糊推理的基础上加上遗传算法这种自组织、自适应优化算法,在保留模糊推理系统可解释性、强鲁棒性等优势的基础上,降低了系统构建的难度、提高了推理的可靠性。

Perera 等^[56]针对远洋船舶提出了一种基于模糊逻辑的智能避碰决策系统,在仿真条件下能够实现船舶的自动避碰决策。Lee 等^[57]提出了一种

基于国际海上避碰规则的模糊逻辑自主导航方法,具有处理静态障碍物和动态障碍物的能力。Tsou 等^[58]提出了一种基于遗传模糊算法的船舶避碰决策支持系统,将船舶安全域、避碰规则与本船及障碍物相关参数融入遗传模糊算法,能够提供最佳的安全避让转弯角度、复航时间和复航角度等决策支持。

3) 神经网络避碰决策。

神经网络是模拟人形象思维的方法,其利用功能简单的神经元组成复杂的神经网络,在优化、模式识别、智能控制、故障诊断等领域有着广泛的应用前景。基于神经网络的避碰决策系统利用神经网络记忆经过大量数据训练后的样本形成的经验和模型,并在避碰过程中使用这些经验和模型。在船舶避碰决策系统中,神经网络常与模糊推理、专家系统、遗传算法等方法结合使用。

陈雪娟^[59]提出了一种基于 BP 神经网络的船舶避碰理论和方法,利用神经网络的自学习、自适应、自组织性以及处理非线性问题的独特功能,设计或优化避碰系统,以最近会遇距离(distance to closest point of approach, DCPA)、最近会遇时间(time to closest point of approach, TCPA)等会遇参数为输入,利用 BP 神经网络,得到碰撞危险度等级,为船舶避碰提供了有力支撑。唐穗欣^[60]提出了一种基于改进 BP 神经网络和模糊理论相结合的船舶避碰方法,将动量-自适应学习速率算法融入 BP 神经网络避碰模型,并将模糊推理与神经网络相结合,构建船舶碰撞危险度评判模型,发挥神经网络和模糊理论各自的优势,为船舶避碰提供了新的思路。杨国宾^[61]针对 BP 神经网络收敛速度较慢、易陷入局部极值点等缺点,提出了用遗传算法优化神经网络的 GA-BP 算法。由遗传算法优化确定 BP 神经网络的初始权值和阈值,确定一个较好的搜索空间,搜索出最优解或者近似最优解。将此算法用于确定船舶碰撞危险度,计算精度、收敛速度均有较大的提升。

2.4 航行控制技术

船舶运动自动控制可分为 3 种情况:一是开阔水域航行自动导航问题,包括航向控制、航迹控制、航速控制等;二是拥挤水道航行或开阔水域航行时的自动避碰问题,包括两船会遇、多船会遇、危险度评估、多目标决策等;三是进出港航行和自动靠离泊问题,涉及岸壁效应、浅水效应以及风、浪、流的影响,操纵和控制更加困难^[62]。航向与航迹控制是船舶自主航行的重要环节。为了保证船舶航行的经济性与安全性,船员必须时

刻掌握船舶的准确位置和航向,根据船舶当前的位置、航向和给定的计划航线,计算航向和航迹误差,并据此换算出舵角指令,使船舶沿预定的计划航线航行。本质上讲,避碰和靠离泊也是对船舶航向与航迹的控制。

在船舶航迹控制过程中最重要的工作是设计出性能良好的航迹自动舵。航迹自动舵是以自动舵为基础发展而来的航行控制系统。它以计算机为核心,融入综合导航系统(AIS及GPS、计程仪、罗经等)数据、航路数据、位置偏移数据,通过计算机软件进行计算、分析与处理,并将结果输出至控制系统,在预定的转向点自动完成转向,从而实现船舶航行的自动控制^[62]。

1) 基于连续信号的控制策略。

航迹控制大多采用基于连续信号的控制策略,一般采用状态反馈法、输出反馈法等方法,实现实时的航向与航迹控制。状态反馈法将期望航向角表示为航迹偏差的函数,使得航向角的指数收敛;输出反馈法利用反馈线性化和反步法,实现全局指数跟踪轨迹控制^[63]。

随着智能技术的发展,基于神经网络、模糊逻辑等智能技术及其组合技术的控制方法也取得了较好的控制效果^[64]。段海庆等^[65]提出了一种将自适应神经网络和反步法相结合的船舶稳速轨迹跟踪控制算法。利用神经网络的函数逼近特性实现了控制器非线性部分的在线估计,具有较强的鲁棒性和跟踪精度。

2) 基于事件触发的控制策略。

王薇等^[66]针对基于连续信号的控制策略存在的控制信号复杂、执行机构执行难度大、执行效率低等缺点,提出了基于事件触发的航向控制策略。充分考虑系统具有未知常数参数,从执行机构实际出发构造触发事件并基于反步法设计控制器输入信号,提出了基于事件触发的自适应控制器设计方法,系统输出对指令信号具有良好、快速的跟踪效果,提高了执行机构的执行效率。汤佳奇^[67]利用领航船-跟踪船思想,提出一种基于事件触发的多动力定位船控制策略,包括全局式事件触发控制和局部式事件触发控制两种控制模式,实现了多艘动力定位船舶的同步控制。

2.5 赛博安全技术

赛博安全(cyber security)^[68]既包含实体物理空间的安全,也包含虚拟数字空间的安全,其内涵包括通信安全、网络安全、信息安全等。

赛博安全是船舶自主航行不可忽视的重要组成部分。随着船舶智能化的发展,船舶的通信导

航信息系统、控制系统及船用设备越来越多地通过网络实现互通,船舶与外界连接交互也日益频繁,而船舶信息网络与工控网络的安全等级相对较低,综合船桥和电子海图系统、配载仪和船舶维修保养系统、主机遥控和能效系统、保安限制区域闭路电视系统、船岸网络通信系统、计算机操作系统及常见软件均为易受攻击的系统^[69],这给船舶及船员生命财产安全带来了巨大挑战。近年来,随着赛博安全体系框架的深入研究和密码技术的进步,赛博安全问题有望得以解决。

1) 赛博安全体系框架。

美国国家标准技术研究所(NIST)发布的赛博安全框架包括5个核心功能,即识别、防护、检测、响应、恢复,如图3所示^[70-71]。

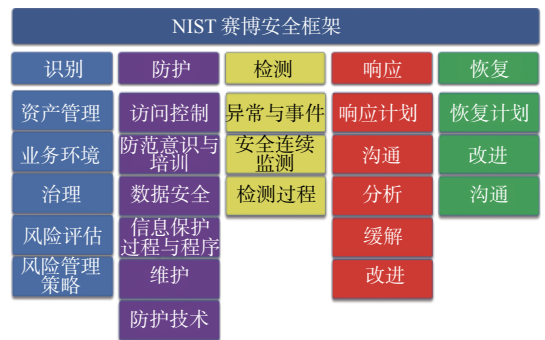


图3 NIST 赛博安全框架

Fig. 3 NIST cyber security framework

识别功能是有有效使用赛博安全框架的基础。其内涵是指了解业务背景、支持关键功能的资源以及相关的赛博安全风险,使组织能够集中精力并优先考虑其工作,使其与风险管理策略和业务需求保持一致。

防护功能是指限制或控制潜在在赛博安全事件影响的能力。

检测功能是指及时发现赛博安全事件的能力。

响应功能是指制定并实施适当的活动,控制潜在在赛博安全事件影响的能力。

恢复是指制定并实施适当的活动,恢复因赛博安全事件而受损的功能或服务,以减少赛博安全事件的影响。

2) 密码技术。

密码技术中应用最广泛的算法包括对称、非对称和哈希密码算法。对称算法中应用较多的包括DES, 3DES, AES等;非对称算法中应用较多的包括RSA, DSA, DH, ECC等^[72]。哈希算法是将任意长的输入消息串转换成固定长度的输出串,主要用于完整性校验和提高数字签名的有效性。我国密码标准中,SM1, SM4, SM7密码属于对称算法,SM2, SM9属于非对称算法,SM3属于哈希算法。

3 问题分析与展望

目前,船舶自主航行在工程应用和技术研究方面虽取得了不少突破,但仍处于起步阶段,依然存在很多问题。主要包括:

1) 一些核心关键技术尚未突破。

作为模拟人类的感知、分析、思维、决策等过程的核心技术,认知计算与真正的人类认知还相去甚远。以深度学习为代表的认知计算技术,在图像识别、文本理解等方面取得了积极进展,但是必须以海量的图片、文本等数据为基础;以知识图谱为代表的认知计算技术,在知识表示与推理等方面具有优势,但是需要事先获取大量的知识。对于船舶而言,船舶种类多样、所处航行环境复杂多变,难以获取全部航行场景所需的海量数据;而船舶自身设备与系统众多、结构复杂,想要获得所有设备与系统的机理知识几乎不可能。

2) 工程应用与理论研究存在差距。

由于船舶建造与运营成本昂贵,船舶的自主航行技术大多难以在实船上得到试验验证。以船舶避碰决策技术为例,考虑到船舶避碰试验的危险性,高校和研究院所大多采用仿真或模型试验的方式开展技术研究,研究成果的实用价值难以衡量。出于安全性考虑,实际工程应用中往往采用简单可靠而又通过试验验证的技术,这在一定程度上也限制了船舶自主航行技术的发展。

3) 公约、规范等法规限制。

船舶作为全球80%以上货物贸易运输的载体,在国民经济发展中起到重要作用。船舶及所载货物价值昂贵,一旦发生事故将造成巨大经济损失。目前,国际海事组织正在研究制定与海上水面自主船舶相关的公约、规范,但其实施还很遥远。如果自主航行船舶擅自出海,一旦与其他船舶发生碰撞等事故,可能会产生严重的纠纷。

船舶自主航行的发展首先要解决数据的互联互通和系统整合,即实现传感器和通信系统的发展;然后是在岸基控制中心实现船舶远程操控;在此基础上,进一步提升船舶自主性,方可实现无人自主航行。因此,基于技术现状和研究任务,对船舶自主航行技术的未来发展做如下展望:

1) 态势感知。

为了保证船舶航行安全,需要对船舶在航环境和航行状态实施全面的感知和掌控。对于未来的远程控制与无人自主航行阶段,需要对更多数量和种类的传感器进行感知,以覆盖船舶全部盲区,同时,需通过船岸一体化通信系统,为船舶自主航行提供更多的信息来源。借助不同传感器的

组合和先进的通信系统,实现信息采集的多样化和立体化,将带来多源异构数据融合、交互工作量的增加,需要处理和传输更大的数据量。因此,要发展适用于海量数据处理的硬件算力,同时提升数据处理的效率,实现感知体系的优化,更好地为智能认知和决策环节提供服务。

2) 认知与决策。

船舶自主航行的智能认知环节是在感知环节获取的环境信息、自身状态监控信息的基础上进行分析识别,通过智能认知系统将相关航路设计优化与航行避碰的知识以数字化形式沉淀在船舶智能系统中,通过反复迭代优化形成可靠的智能航行系统认知空间,支持自身状态及目标船舶态势辨识以及航路环境的认知,基于历史航行记录、驾驶行为和大数据机器学习建立船舶智能航行的认知过程,形成船舶行为和航行态势的认知。未来,智能化算法、模型的可解释性是其能否被采信并应用于智能航行自主控制和决策的关键。因此,以统计模型为基础的深度学习技术与符号化知识图谱技术及数字孪生技术相结合的模式将成为未来船舶自主航行的实现途径。

3) 控制与安全。

随着智能化程度不断提高、决策能力不断提升,船舶驾驶中人类的工作将逐步被取代。智能船舶将沿着降低人员工作负荷的辅助驾驶、少量减员的船端人船协同、大量减员的岸端人船协同、无人化的远程控制、无人自主航行的路径逐步发展。在这一过程中,需要重点研究的问题包括自生长的知识库构建和运用,稳定、可靠、高效的船岸通信技术,以及船岸一体的赛博安全技术等。

4 结 语

本文分析了国内外船舶智能航行技术的工程应用与理论研究现状,针对航行态势感知、认知计算、避碰决策、航行控制、赛博安全等船舶智能航行关键技术,进行了技术内涵剖析和研究现状分析。在关键技术分析的基础上,提出了当前船舶自主航行面临的问题,并针对这些问题进行了未来发展展望。当前,船舶自主航行仍处于起步阶段,关键技术研究依然面临不少挑战,关键技术的集成应用还有很长的路要走,船舶自主航行研究任重道远。

参考文献:

[1] 严新平. 智能船舶的研究现状与发展趋势[J]. 交通与航海, 2016, 3(1): 25-28.

- telligent ships[J]. *Communication and Shipping*, 2016, 3(1): 25–28 (in Chinese).
- [2] 孙旭, 蔡玉良. 自主航行船舶的技术路径 [J]. *中国船检*, 2019(10): 29–31.
SUN X, CAI Y L. Technical route of autonomous navigation ships[J]. *China Ship Survey*, 2019(10): 29–31 (in Chinese).
- [3] 陈琳, 杨龙霞. 世界主要造船国家智能船舶发展现状 [J]. *船舶标准化工程师*, 2019, 52(4): 10–14.
CHEN L, YANG L X. The status of intelligent ship development in main shipbuilding countries in the world[J]. *Ship Standardization Engineer*, 2019, 52(4): 10–14 (in Chinese).
- [4] 严新平, 吴超, 马枫. 面向智能航行的货船“航行脑”概念设计 [J]. *中国航海*, 2017, 40(4): 95–98, 136.
YAN X P, WU C, MA F. Conceptual design of navigation brain system for intelligent cargo ship[J]. *Navigation of China*, 2017, 40(4): 95–98, 136 (in Chinese).
- [5] 乔大雷, 侯娇, 薛锋. 基于物联网技术的无人船智能航行控制系统设计与实现 [J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(12): 149–152.
QIAO D L, HOU J, XUE F. Design and realization of unmanned surface ship intelligent navigation control system based on internet of things[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(12): 149–152 (in Chinese).
- [6] QIU B H, ZHANG Y, WEI M H, et al. Hybrid cloud based cyber-enabled ship control and management system[C]//2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). Seattle, WA, USA: IEEE, 2018: 1-6.
- [7] IM I, SHIN D, JEONG J. Components for smart autonomous ship architecture based on intelligent information technology[J]. *Procedia Computer Science*, 2018, 134: 91–98.
- [8] HUANG Y M, CHEN L Y, CHEN P F, et al. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art[J]. *Safety Science*, 2020, 121: 451–473.
- [9] PERERA L P, MOREIRA L, SANTOS F P, et al. A navigation and control platform for real-time manoeuvring of autonomous ship models[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2012, 45(27): 465–470.
- [10] XUE J, WU C Z, CHEN Z J, et al. Modeling human-like decision-making for inbound smart ships based on fuzzy decision trees[J]. *Expert Systems with Applications*, 2019, 115: 172–188.
- [11] LAGER M, TOPP E A. Remote supervision of an autonomous surface vehicle using virtual reality[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52(8): 387–392.
- [12] PEDERSEN T A, GLOMSRUD J A, RUUD E L, et al. Towards simulation-based verification of autonomous navigation systems[J]. *Safety Science*, 2020, 129: 104799.
- [13] 李鑫慧, 郭蓬, 臧晨, 等. 激光雷达技术研究现状及其应用 [J]. *汽车电器*, 2019(5): 4–6.
LI X H, GUO P, ZANG C, et al. Research status and application of lidar technology[J]. *Auto Electric Parts*, 2019(5): 4–6 (in Chinese).
- [14] 王贵槐, 谢朔, 柳晨光, 等. 基于激光雷达的内河无人船障碍物识别方法 [J]. *光学技术*, 2018, 44(5): 602–608.
WANG G H, XIE S, LIU C G, et al. Obstacle identification method based on laser radar for inland unmanned vessel[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(5): 602–608 (in Chinese).
- [15] 李梓龙. 基于激光雷达的无人测量船环境感知系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
LI Z L. Research on LIDAR-based environment perception system for unmanned surface vehicles[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [16] 李小毛, 张鑫, 王文涛, 等. 基于 3D 激光雷达的无人水面艇海上目标检测 [J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2017, 23(1): 27–36.
LI X M, ZHANG X, WANG W T, et al. 3D Lidar-based marine object detection for USV[J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2017, 23(1): 27–36 (in Chinese).
- [17] 王健, 张振海, 李科杰, 等. 全景视觉系统研究综述 [C]//全国敏感元件与传感器学术会议. 太原: 中国仪器仪表学会, 2014.
WANG J, ZHANG Z H, LI K J, et al. Development and application of panoramic vision system[C]//Sensors and Transducers Conference of China. Taiyuan: China Instrument and Control Society, 2014 (in Chinese).
- [18] DASGUPTA S, BANERJEE A. A real-time panoramic vision system for autonomous navigation[C]//Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. Washington, DC, USA: IEEE, 2004.
- [19] 尹义松. 基于全景视觉的海上弱小目标检测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
YIN Y S. Research on weak small target detection on the sea based on panoramic vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014 (in Chinese).
- [20] 周娜. 基于全景视觉的舰船小目标检测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
ZHOU N. Small target detection of ship based on omnidirectional vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014 (in Chinese).
- [21] 燕妹. 基于全景视觉的海上远景目标检测算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
YAN M. Research on detection algorithm of long-range target at sea based on panoramic vision[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014 (in Chinese).
- [22] 段其强. 红外全景成像系统设计 [D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
DUAN Q Q. Infrared panoramic imaging system

- design[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010 (in Chinese).
- [23] 陈钱. 红外图像处理技术现状及发展趋势 [J]. 红外技术, 2013, 35(6): 311–318.
CHEN Q. The status and development trend of infrared image processing technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(6): 311–318 (in Chinese).
- [24] 盖伟麟, 辛丹, 王璐, 等. 态势感知中的数据融合和决策方法综述 [J]. *计算机工程*, 2014, 40(5): 21–25, 30.
GAI W L, XIN D, WANG L, et al. Review of data fusion and decision-making methods in situation awareness[J]. *Computer Engineering*, 2014, 40(5): 21–25, 30 (in Chinese).
- [25] 黄漫国, 樊尚春, 郑德智, 等. 多传感器数据融合技术研究进展 [J]. *传感器与微系统*, 2010, 29(3): 5–8, 12.
HUANG M G, FAN S C, ZHENG D Z, et al. Research progress of multi-sensor data fusion technology[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(3): 5–8, 12 (in Chinese).
- [26] GUERRIERO M, WILLETT P, CORALUPPI S, et al. Radar/AIS data fusion and SAR tasking for maritime surveillance[C]//2008 11th International Conference on Information Fusion. Cologne, Germany: IEEE, 2008.
- [27] JUAN Y, ZHANG B Y, YU J Z. Research on target attributes fusion in netted-radar based on D-S evidence theory[C]//IET International Radar Conference 2015. Hangzhou, China: IEEE, 2015.
- [28] 欧阳萍. AIS与雷达目标信息模糊融合方法研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2010.
OUYANG P. Study on the fuzzy fusion arithmetic of the target information from AIS and radar[D]. Xiamen: Jimei University, 2010 (in Chinese).
- [29] 王兵玲. 基于灰色理论的AIS与雷达信息融合的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
WANG B L. The research of AIS and radar information fusion based on the grey theory[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010 (in Chinese).
- [30] 郭雷杰. 基于模糊理论与神经网络的雷达与AIS信息融合研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
GUO L J. Study on radar and AIS information fusion based on fuzzy theory and neural network[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016 (in Chinese).
- [31] 苏芳, 洪文, 毛士艺. 贝叶斯融合在SAR图像分类中的应用 [J]. *电子学报*, 2003, 31(7): 1107–1110, 1091.
SU F, HONG W, MAO S Z. Application of the Bayesian fusion in SAR image classification[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(7): 1107–1110, 1091 (in Chinese).
- [32] 毛伟, 宋扬东, 汪大鹏, 等. 基于带权重的贝叶斯网络数据融合研究 [J]. *导弹与航天运载技术*, 2014(5): 52–55, 59.
MAO W, SONG Y D, WANG D P, et al. Research on data fusion based on Bayesian network with weight[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2014(5): 52–55, 59 (in Chinese).
- [33] 徐从富, 耿卫东, 潘云鹤. 面向数据融合的DS方法综述 [J]. *电子学报*, 2001, 29(3): 393–396.
XU C F, GENG W D, PAN Y H. Review of Dempster-Shafer method for data fusion[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2001, 29(3): 393–396 (in Chinese).
- [34] 王力. 基于DS证据理论的多传感器数据融合算法研究与应用 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
WANG L. Research and application of multi-sensor fusion algorithm base on DS evidence theory[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [35] 孙康. 基于深度学习的数据特征融合分类技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
SUN K. Research on data feature fusion classification technology based on deep learning[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018 (in Chinese).
- [36] 惠国保. 一种基于深度学习的多源异构数据融合方法 [J]. *现代导航*, 2017, 8(3): 218–223.
HUI G B. Method of multi-source heterogeneous data fusion based on deep learning[J]. *Modern Navigation*, 2017, 8(3): 218–223 (in Chinese).
- [37] 董超, 毕晓君. 认知计算的发展综述 [J]. *电子世界*, 2014(15): 200.
DONG C, BI X J. The overview of cognitive computing development[J]. *Electronics World*, 2014(15): 200 (in Chinese).
- [38] 李杰, 康与涛, 陈伟炯, 等. 国内船舶碰撞事故科研产出及主题趋势挖掘 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(11): 181–187.
LI J, KANG Y T, CHEN W J, et al. Scientific research output and topics trends mining of ship collision accidents in China[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(11): 181–187 (in Chinese).
- [39] 黄永军, 王闰成, 马枫. “云上港航”数字孪生系统助航解决方案 [J]. *信息技术与信息化*, 2018(12): 67–70.
HUANG Y J, WANG R C, MA F. “Port navigation on Cloud” digital twin system navigation aid solution[J]. *Information Technology and Informatization*, 2018(12): 67–70 (in Chinese).
- [40] 王胜正, 申心泉, 赵建森, 等. 基于ASAE深度学习预测海洋气象对船舶航速的影响 [J]. *交通运输工程学报*, 2018, 18(2): 139–147.
WANG S Z, SHEN X Q, ZHAO J S, et al. Prediction of marine meteorological effect on ship speed based on ASAE deep learning[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018, 18(2): 139–147 (in Chinese).
- [41] 中国电子技术标准化研究院. 知识图谱标准化白皮书 (2019)[R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2019.

- China Electronics Standardization Institute. White paper on knowledge graph standardization (2019)[R]. Beijing: China Electronics Standardization Institute, 2019 (in Chinese).
- [42] 中国中文信息学会. 知识图谱发展报告(2018)[R]. 北京: 中国中文信息学会, 2018.
Chinese Information Processing Society of China. Knowledge graph development report (2018)[R]. Beijing: Chinese Information Processing Society of China, 2018 (in Chinese).
- [43] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753–768.
ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753–768 (in Chinese).
- [44] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(1): 1–18.
TAO F, LIU W R, ZHANG M, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(1): 1–18 (in Chinese).
- [45] 李凯, 钱浩, 龚梦瑶, 等. 基于数字孪生技术的数字化舰船及其应用探索[J]. 船舶, 2018, 29(6): 101–108.
LI K, QIAN H, GONG M Y, et al. Digital warship and its application exploration based on digital twin technology[J]. Ship & Boat, 2018, 29(6): 101–108 (in Chinese).
- [46] CORADDU A, ONETO L, BALDI F, et al. Data-driven ship digital twin for estimating the speed loss caused by the marine fouling[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106063.
- [47] 余凯, 贾磊, 陈雨强, 等. 深度学习的昨天、今天和明天[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(9): 1799–1804.
YU K, JIA L, CHEN Y Q, et al. Deep learning: yesterday, today, and tomorrow[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(9): 1799–1804 (in Chinese).
- [48] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 436–444.
- [49] 陈伟宏, 安吉尧, 李仁发, 等. 深度学习认知计算综述[J]. *自动化学报*, 2017, 43(11): 1886–1897.
CHEN W H, AN J Y, LI R F, et al. Review on deep-learning-based cognitive computing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(11): 1886–1897 (in Chinese).
- [50] 权波, 杨博辰, 胡可奇, 等. 基于 LSTM 的船舶航迹预测模型[J]. *计算机科学*, 2018, 45(增刊 2): 126–131.
QUAN B, YANG B C, HU K Q, et al. Prediction model of ship trajectory based on LSTM[J]. *Computer Science*, 2018, 45(Supp 2): 126–131 (in Chinese).
- [51] 李丽娜, 杨神化, 曹宝根, 等. 船舶避碰智能决策自动化研究[J]. *集美大学学报(自然科学版)*, 2006, 11(2): 188–192.
LI L N, YANG S H, CAO B G, et al. A summary of studies on the automation of ship collision avoidance intelligence[J]. *Journal of Jimei University (Natural Science)*, 2006, 11(2): 188–192 (in Chinese).
- [52] 吕红光, 尹勇, 尹建川. 混合智能系统在船舶自动避碰决策中的应用[J]. *大连海事大学学报*, 2015, 41(4): 29–36.
LYU H G, YIN Y, YIN J C. Application of hybrid intelligent systems in automatic collision avoidance decision-making for ships[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2015, 41(4): 29–36 (in Chinese).
- [53] 李丽娜, 杨神化, 熊振南, 等. 船舶拟人智能避碰决策理论框架的研究[J]. *中国航海*, 2009, 32(2): 30–34.
LI L N, YANG S H, XIONG Z N, et al. A study of theoretical framework of personifying intelligent decision-making for vessel collision avoidance[J]. *Navigation of China*, 2009, 32(2): 30–34 (in Chinese).
- [54] 李丽娜, 邵哲平. 船舶拟人智能避碰决策理论介绍[J]. *中国海事*, 2011(7): 24–27.
LI L N, SHAO Z P. Introduction of the personified intelligence decision-making theory for ship collision avoidance[J]. *China Maritime Safety*, 2011(7): 24–27 (in Chinese).
- [55] 李丽娜, 王俊玲, 陈国权. 船舶拟人智能避碰决策理论的集成机器学习策略[J]. *信息与控制*, 2011, 40(3): 359–368.
LI L N, WANG J L, CHEN G Q. Integrated machine learning strategy of PIDVCA theory[J]. *Information and Control*, 2011, 40(3): 359–368 (in Chinese).
- [56] PERERA L P, CARVALHO J P, SOARES C G. Fuzzy logic based decision making system for collision avoidance of ocean navigation under critical collision conditions[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2011, 16(1): 84–99.
- [57] LEE S M, KWON K Y, JOH J. A fuzzy logic for autonomous navigation of marine vehicle satisfying COLREG guidelines[J]. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 2004, 2(2): 171–181.
- [58] TSOU M C, KAO S L, SU C M. Decision support from genetic algorithms for ship collision avoidance route planning and alerts[J]. *Journal of Navigation*, 2010, 63(1): 167–182.
- [59] 陈雪娟. 基于模糊 BP 神经网络船舶避碰理论与方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
CHEN X J. The research on theory and method of vessel collision avoidance based on the fuzzy BP neural network[D]. Changsha: Hunan University, 2005 (in Chinese).
- [60] 唐穗欣. 模糊神经网络在海上避碰中的应用[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.

- TANG S X. The application of fuzzy-neural system on avoidance of ship collision[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006 (in Chinese).
- [61] 杨国宾. 基于遗传算法的神经网络用于确定船舶碰撞危险度的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2006.
- YANG G B. The Research of computing the vessels' collision risk index based on neural network with genetic algorithm[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2006 (in Chinese).
- [62] 张仁丹. 船舶航迹控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2010.
- ZHANG R D. Research on the track control technology of the ship[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2010 (in Chinese).
- [63] 戚爱春, 庄肖波. 船舶航迹控制研究综述[J]. 电子世界, 2013(10): 104–105.
- QIA A C, ZHUANG X B. A review of ship track control research[J]. Electronics World, 2013(10): 104–105 (in Chinese).
- [64] 黄勇亮. 船舶航向的混合智能控制技术研究[J]. 航海工程, 2010, 39(2): 173–176.
- HUANG Y L. Study on the ship course control based on hybrid intelligent controller[J]. Ship & Ocean Engineering, 2010, 39(2): 173–176 (in Chinese).
- [65] 段海庆, 朱齐丹. 基于反步自适应神经网络的船舶航迹控制[J]. 智能系统学报, 2012, 7(3): 259–264.
- DUAN H Q, ZHU Q D. Trajectory tracking control of ships based on an adaptive backstepping neural network[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2012, 7(3): 259–264 (in Chinese).
- [66] 王薇, 罗云霞, 蔡建平. 基于事件触发的船舶航向自适应控制研究[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(9): 159–161, 168.
- WANG W, LUO Y X, CAI J P. Adaptive event-triggered control for ship motion[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(9): 159–161, 168 (in Chinese).
- [67] 汤佳奇. 基于事件触发的多动力定位船协调同步控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- TANG J Q. Research on coordinated and synchronization control of multiple DP ship based on event trigger[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016 (in Chinese).
- [68] 谢宗晓. 信息安全、网络安全及赛博安全相关词汇辨析[J]. 中国标准导报, 2015(12): 30–32.
- XIE Z X. Discrimination of information security, network security, cyber security and so on[J]. China Standards Review, 2015(12): 30–32 (in Chinese).
- [69] 孙辉. 船岸网络信息安全管理[J]. 水运管理, 2019, 41(3): 5–7.
- SUN H. Ship-shore network information security management[J]. Shipping Management, 2019, 41(3): 5–7 (in Chinese).
- [70] NIST. Framework for improving critical infrastructure cybersecurity[EB/OL]. (2018-04-16)[2020-05-01]. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.04162018.pdf>.
- [71] 赵艳玲. 浅谈美国《提升关键基础设施网络安全框架》[J]. 信息安全与通信保密, 2015(5): 16–21.
- ZHAO Y L. A brief talk on "Framework for improving critical infrastructure cybersecurity"[J]. Information Security and Communications Privacy, 2015(5): 16–21 (in Chinese).
- [72] 李诗骋, 牛志华. 智能安全巡更系统设计[J]. 信息安全与技术, 2015, 6(6): 71–73.
- LI S C, NIU Z H. Intelligent security patrolling system design[J]. Information Security and Technology, 2015, 6(6): 71–73.