

9-2-2020

Overview of Development and Current Progress in Maritime Simulation Research

Xinping Yan

1. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China;;3. Engineering Research Center for Transportation Safety (Ministry of Education), Wuhan 430063, China;

Wu Bing

1. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China;;3. Engineering Research Center for Transportation Safety (Ministry of Education), Wuhan 430063, China;

Wang Yang

1. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China;;3. Engineering Research Center for Transportation Safety (Ministry of Education), Wuhan 430063, China;

Xiaoyang Wei

1. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;;2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China;;3. Engineering Research Center for Transportation Safety (Ministry of Education), Wuhan 430063, 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 Development and Current Progress in Maritime Simulation Research

Abstract

Abstract: Maritime simulation plays an essential role in security of ship navigation, the innovation of the administration and the improvement of management ability. *The traditional maritime simulation was surveyed, and the scope of maritime simulation was specified.* Moreover, the research related to maritime simulation was overviewed under the proposed scope of maritime simulation. To gain a deeper insight into the research domain, *maritime simulation was scrutinized in two dimensions.* From the perspective of the simulation scale, modeling characters, and user requirements, maritime simulation was divided into macro, medium and micro scales; whereas in the viewpoint of comprehensive safety administration, another maritime simulation was defined. In addition to the introduction of an emergency response decision support simulation system, *ten key technologies for simulation system were discussed.* The development trend and future research of maritime simulation were summarized and proposed.

Keywords

maritime simulation, administration mode, emergency response and decision-making, multi person coordination, key technology

Recommended Citation

Yan Xinping, Wu Bing, Wang Yang, Wei Xiaoyang. Overview of Development and Current Progress in Maritime Simulation Research[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(1): 13-28.

海事仿真研究现状与发展综述

严新平^{1,2,3}, 吴兵^{1,2,3}, 汪洋^{1,2,3}, 魏晓阳^{1,2,3}

(1. 武汉理工大学智能交通系统研究中心, 武汉 430063; 2. 国家水运安全工程技术研究中心, 武汉 430063;
3. 水路公路交通安全控制与装备教育部工程技术研究中心, 武汉 430063)

摘要: 海事仿真在保障船舶通航安全、创新监管模式和提高业务人员水平等方面具有重要意义。对传统海事仿真做了介绍, 明确了海事仿真的研究范畴, 并在此范畴下对国内外海事研究现状进行了综述。提出了从两个维度界定海事仿真的内涵及其研究内容, 一方面从仿真尺度、建模特点和用户需求的角度提出了宏观、中观和微观的海事仿真维度, 另一方面从船舶通航安全管理和业务的角度定义了另一个分类方法。在此基础上, 总结了开发海事仿真系统的 10 种关键技术, 并介绍了一种自主研发的海事应急处置决策支持仿真系统, 对海事仿真的发展进行了总结和展望。

关键词: 海事仿真; 监管模式; 应急处置与决策; 多人协同; 关键技术

中图分类号: U694

文献标识码: B

文章编号: 1004-731X (2015) 01-0013-17

Overview of Development and Current Progress in Maritime Simulation Research

Yan Xinping^{1,2,3}, Wu Bing^{1,2,3}, Wang Yang^{1,2,3}, Wei Xiaoyang^{1,2,3}

(1. Intelligent Transportation System Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China;
3. Engineering Research Center for Transportation Safety (Ministry of Education), Wuhan 430063, China)

Abstract: Maritime simulation plays an essential role in security of ship navigation, the innovation of the administration and the improvement of management ability. *The traditional maritime simulation was surveyed, and the scope of maritime simulation was specified.* Moreover, the research related to maritime simulation was overviewed under the proposed scope of maritime simulation. To gain a deeper insight into the research domain, *maritime simulation was scrutinized in two dimensions.* From the perspective of the simulation scale, modeling characters, and user requirements, maritime simulation was divided into macro, medium and micro scales; whereas in the viewpoint of comprehensive safety administration, another maritime simulation was defined. In addition to the introduction of an emergency response decision support simulation system, *ten key technologies for simulation system were discussed.* The development trend and future research of maritime simulation were summarized and proposed.

Keywords: maritime simulation; administration mode; emergency response and decision-making; multi person coordination; key technology

引言

仿真科学与技术是以相似理论、模型理论、系



作者简介: 严新平(1959-), 男, 江西人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为智能交通系统; 吴兵(1986-), 男, 江西人, 博士生, 研究方向为海事仿真。
收稿日期: 2014-02-11 修回日期: 2014-06-04
基金项目: 交通运输部科技项目(2011328201110); 高等学校博士学科点专项科研基金(新教师类)(20130143120014)。

统论、信息技术和图形理论为基础, 以计算机系统和仿真器为工具, 根据被仿真对象的结构、原理、流程和特点, 对真实的环境或过程进行模拟和再现的一门综合性技术。所开发的软硬件产品可以实现对目标系统进行设计、分析、评估和决策支持等功能, 尤其是对运行环境具有偶然性、危险性、破坏性的系统, 仿真技术能以较小的成本来获取目标系

统在不利条件下的运行状况。交通系统仿真是仿真技术在交通运输工程领域的具体应用,近年来取得了长足的发展,为智能运输系统的发展发挥了巨大的作用,一些商用仿真系统已经在教学科研中显示了良好的应用前景,如汽车驾驶模拟器、船舶轮机和驾驶模拟器、高铁列车模拟驾驶器以及航空仿真器等,它们已经形成了较为成熟的产品并得到本行业的认可。根据仿真对象不同的特点和功能需求,国外厂商已开发出较丰富的仿真软件用于研究或设计,如邹智军^[1]介绍的英国 Quastone 公司开发的 Paramics 模型,德国 PTV 公司开发的 VISSIM,以及邹铁方^[2]介绍的 Pc-Crash 软件等。

与道路交通仿真相比,水路运输仿真领域的发展相对滞后。这种现状和水路运输系统的复杂性有较大的关系。船舶航行过程中与外部通航环境的耦合作用非常突出,以已有的技术水平,在开展水路运输仿真研究时,仅能从某些特定的用途出发开展研究。目前比较有代表性的仿真产品包括面向船舶驾驶员的船舶操纵模拟器、面向船舶动力装置操控的轮机模拟器等。近年来,国内外学者尝试将仿真技术应用于水路运输中的风险评估、

水工论证、事故再现等领域^[3-5],从而逐渐拓宽了水路运输中仿真技术应用的覆盖面。随着仿真技术在水上交通应用的不断深入和广泛,海事仿真作为一个新的研究领域已逐渐成形,而它的进一步发展则需要更为完善的知识理论体系,同时也需要有更为清晰的研究框架。

传统的海事仿真可以理解为:在采集水上交通运输活动状态信息的基础上,对这些状态数据信息进行分析和处理,掌握水上交通运输系统之间的作用规律,并利用数学模型来描述和再现这些内在机理,借助计算机仿真技术对这些行为进行重构,从而实现对不同航道规划方案、船舶交通组织和通航安全监管方式进行评价和优化,达到保障船舶通航安全、减少船舶事故损失、提升船舶运输效率的目的。

海事仿真侧重对各种要素间彼此作用的过程进行还原或重构,而其中海事事故,以及事故过程中各种要素的制约和依赖关系成为海事仿真中最重要的数据驱动,也就是被仿真对象在满足各种机制约束下,根据合理的假定而得到的数据初始条件和边界条件,如图 1 所示。

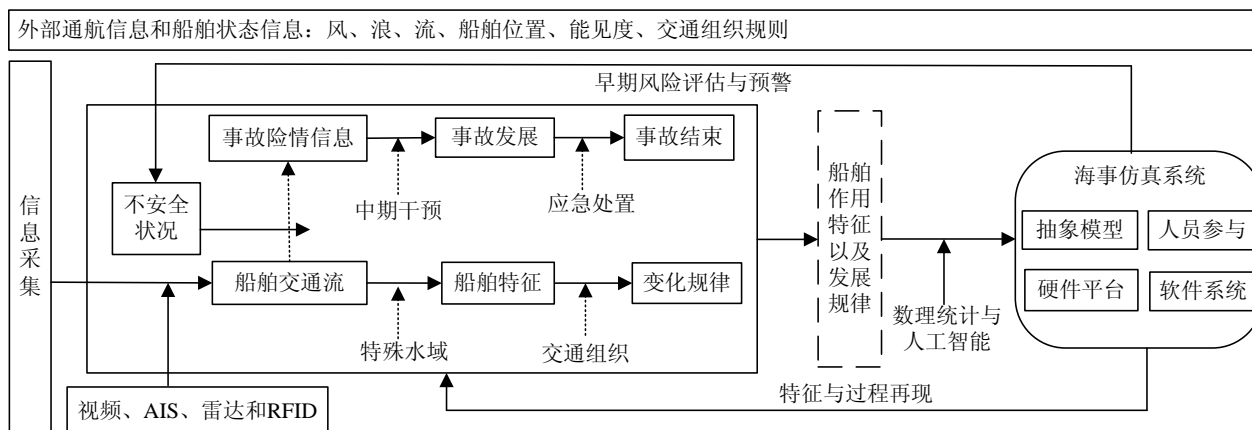


图 1 以海事监管数据为驱动的海事仿真

本文分析了海事仿真的作用,比较了海事仿真与其它相关仿真的区别和联系,并对国内外海事仿真研究的现状进行了综述,指出了国内外海事仿真在研究应用和知识框架体系方面的不足,继而从 2 个维度对海事仿真进行了界定,并对海事仿真系统

开发的关键技术进行了介绍。随后,以海事应急处置决策支持仿真系统为例介绍了一种中观的海事仿真系统,最后对海事仿真学科的研究进行了总结和展望。

1 海事仿真作用

作为一本较为系统的介绍海事管理的教材, 郝勇在海事管理学^[6]一书中对国际海事组织关于海事管理的定义进行了总结, 认为海事管理是指海事管理机关为保障水上交通安全、防止船舶造成水域污染依法进行的水上交通安全监管、环境监督、通航安全保障、行政执法等行政活动的总称。在这个意义上, 可以认为海事仿真开展的是与船舶通航安全和保障活动相关的所有仿真活动的总称。

图 2 显示了海事仿真与其它相关仿真的关系。从中可以看出, 海事仿真区别于其他仿真的显著特点在于它关注于水路运输系统中船舶的通航安全

活动, 即人-船-环境-管理 4 个要素之间的相互耦合作用, 以及整个过程中水上交通安全态势和演化趋势。虽然海事仿真的研究边界与其他仿真有一定重叠之处, 但是研究的侧重点仍然有明显差异。例如, 与航道仿真相比, 航道仿真更多关注于河床演变、泥沙运动对航道的影响, 而海事仿真更关注与船舶通航安全密切相关的航道尺度仿真; 与水利仿真相比, 水利研究中的水流仿真主要关注于水流演变规律及其对堤岸、防洪的影响, 而海事仿真仅关注于水文变化对航路的影响; 与船舶设计与制造仿真相比, 船舶仿真关注于船舶的型线设计、水动力系数获取等, 而海事仿真则更关注于船舶交通流形态与外部环境的耦合作用。

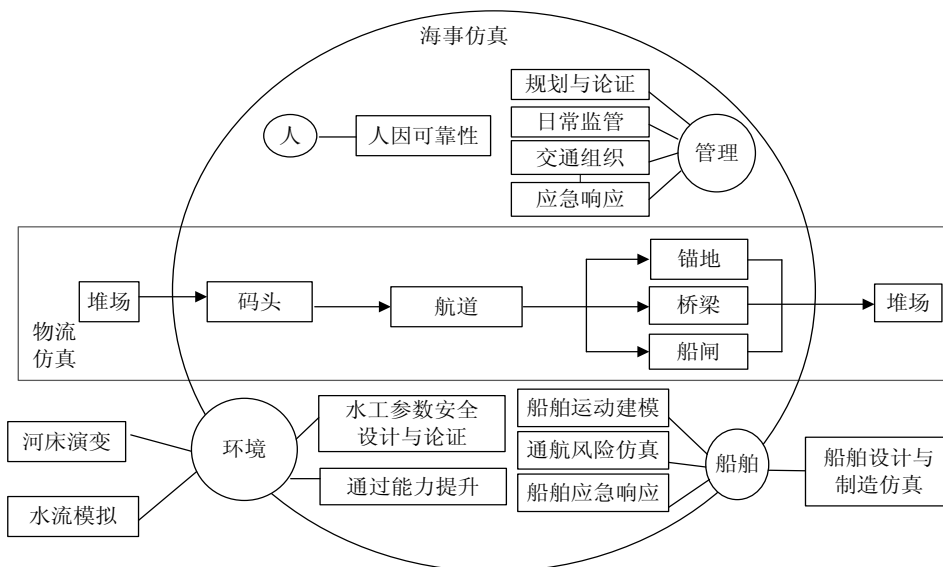


图 2 海事仿真与其它相关仿真的关系

2 海事仿真研究范畴

2.1 水工参数安全设计

目前国内外对于港口、航道、锚地的设计均有相关的标准和规范, 这些标准和规范大部分均是考虑最不利工况的设计方法。由于港口岸线资源的紧缺, 以及浅水航道、狭窄航道、人工运河等水域的开发和利用, 考虑船舶高效和安全的设计理念逐渐被广泛接受。荷兰代尔伏特理工大学的 Quy^[7-9]提出了基于风险接受准则的不同外部工况条件下的航道宽度设计, 他与波兰 Gucma^[10]合著

有系列论文, 其研究的主要方法是通过建立随机吃水模块、水位模块、水深模块、下座模块和富裕水深模块, 利用蒙特卡罗方法随机仿真船舶在风浪中的富裕水深, 从而获得基于可接受搁浅概率的航道水深设计, 并将这个模型应用到了多个港口^[11]。蒙特卡罗模拟可以随机产生大量数据, 其实验数据借鉴了更为精确的船舶操纵仿真实验结果。在国内, 基于可接受准则的桥梁设计^[12]、航道尺度设计^[13-14]等研究也已经开展。随着仿真技术的进一步发展, 对于码头、大型桥梁工程、航道

工程的尺度设计也将逐步由极端工况仿真转向蒙特卡罗仿真。尽管国内外在参数设计和安全论证仿真研究方面取得了较好的成果,但在港口、航道规划层面开展相应的仿真研究仍需提高。

2.2 通航安全监管仿真

在工程设计的基础上,水域的船舶通航安全管理也可以通过仿真实验进行优化。自山东成山头水域实施船舶定线制以来,我国已经在大部分水域开展了定线制管理,并成功将定线制引入到长江。对于船舶的通航安全管理,目前还有不少问题有待解决。例如对于船舶安全航速的选择问题,一方面航速过快容易诱发水上交通事故,而另一方面航速过低则会影响通航效率,同样不利于交通安全。另外对于下行船舶顺流急速“淌航”也还缺少有效的监管措施。徐言民^[15]与上海交通大学合作开展了安全航速仿真实验,从交通流、航道尺度和富裕水深等 3 个角度给出了渤海海域超大型船舶安全航速限定标准。港口船舶作业标准方面,目前不管沿海或内河港口均采用统一的作业标准,而实际上对于一些特殊的船舶还需要进行更为严格的规范^[16],另外对于船舶航路的选址规划等均可通过仿真的手段来实现,同时对于警戒区、通航分道的设计和管理也可以采用仿真的手段进行先期评估^[17]。随着长江 12.5 m 深水航道的建设和开通,船舶尺度增大、船舶流量增加造成的通航风险需要配备更为合理的监管资源,开展海巡艇、锚地、应急资源配置和优化选址的研究^[18]则显得尤为必要。中上游不同水位期造成的航道变迁对海事监管需求也不尽相同^[19],开展仿真研究可以对实现不同的监管方案的选择,从而优化海事安全监管措施。

2.3 面向通航风险的仿真

船舶通航安全风险评估的研究主要集中在历史事故数据分析、抽象模型和理论模型 3 个方面。船舶历史事故数据分析时采用客观数据,对于发现事故原因、提高水上交通安全水平具有重

要的意义^[20],Kujala^[21]、张笛^[22]和牟军敏^[23]利用历史数据分别对国内外的主要水域通航风险进行了仿真。但由于历史事故数据相对有限,为了更为精确地描述船舶通航风险,国内外部分学者考虑利用抽象模型来开展研究,Kujala^[21]在事故分析的基础上,进一步引入了船舶航路交叉和会遇的模型对船舶通航风险进行验证,该模型目前在国际上应用广泛,且对该模型进行了较深入的研究^[24-26]。在实际应用过程中,对于船舶领域^[27]、船舶航行规则^[28-29]等也开展了相关研究,另外还有学者对于海洋结构建筑物的通航安全开展了相应的研究^[30]。理论模型方面,部分学者从专家知识的角度出发,利用主观的风险评价模型对船舶通航风险水平进行评估,这既包括单船的船舶通航风险评估^[31-32],也包括对整个水上运输系统的宏观风险评估^[33-35]。在船舶通航安全评估的基础上,国内外很多学者开展了水上交通安全预警的研究,徐海祥^[36]和徐言民^[37]通过集合船舶操纵知识,分别提出了桥梁预警和预控系统。如果能将现有的船舶通航风险评估模型应用于船舶通航安全动态预警,进一步研究船舶通航安全规律,及时纠正船舶的违规横越行为、加强密集水域船舶安全监管和诱导、及早发现桥区水域船舶异常行为、规范船舶安全靠离泊作业标准,有助于进一步提升海事监管水平。

2.4 船舶行为与交通组织

船舶通航风险与航道通过能力密切相关,因此通过能力对于提升海事监管水平具有重要意义。陈卓欧^[38]通过综述国内外航道通过能力和船舶通航风险的文献,认为航道的通过能力与航行风险之间存在某种对立的关系,从而如何在保障船舶通航安全的前提下提升航道服务水平是未来海事仿真研究的重点问题。关于航道通过能力的研究,目前主要的研究集中在航道通过能力和水工建筑物通过能力。朱俊^[39]通过定义船舶之间的间距、速度规则,利用跟驰理论的模型计算了不同等级航道的通过能力,郭子坚^[40]则分析了不同船舶安全间距对通过能力的影响,在此基础上,郭子坚^[41]又研究了不同通航规则的影响,但实际上航道之

间还存在汇流、穿越等情况, 文元桥^[42]在船舶交通流特征和船舶行为特征的基础上, 提出了港口公共航道船舶通过能力的计算模型。从国内外研究来看, 泊位、锚地和桥梁等作为航道中的一个服务对象会影响到整个交通运输系统的通航效率, 通过再现交通流的活动规律和特点, 并建立整体运输系统的交通组织调度规则和策略, 可以提高港口作业效率, 进一步提高船舶通航安全等级。

2.5 海事事故应急处置决策

水上交通事故应急决策的研究主要集中在利用专家知识来进行决策^[43], 通过对比已知案例的相似度, 推荐类似案例的决策方法; 或者根据专家意见对特定案例进行应急决策, 如张欣^[44]以个体决策偏好理论中经典的随机效用理论为依托, 建立了船舶溢油先期决策应急处置决策模型, 王立坤^[45]建立了船舶溢油应急处置群体选择偏好模型。而目前的水上交通事故应急处置研究, 一般均只考虑单个部门的应急处置, 且主要利用专家知识进行决策, 而实际上对于过往船舶的交通组织、事故船舶应急处置的不同决策方案, 通过对历史数据进行分析^[46]和再现^[5], 可以通过仿真的方法来评价不同应急处置方案的成本、可行性、效果。此外, 水上交通事故的应急处置决策具有动态性(事故的发展是一个动态的过程, 需要根据

局势的发展不断调整对策)、多目标性(对于应急决策有多个评价标准, 是基于多行为准则的决策过程)、协同性(各应急部门之间需要相互协调)等特点。仿真系统研究方面, 葡萄牙里斯本大学开展了面向船员的应急决策仿真系统的研究^[47]。

3 海事仿真研究分类

张浩^[48]在海上交通仿真综述中对目前国内外的仿真热点研究方向进行了较全面归纳, 并主要从人-船-环境-管理的角度进行综述。从系统安全工程的角度, 这种人-船-环境-管理的角度是被广泛接受的。对于海事仿真而言, 根据其需求不同, 其仿真的精度和尺度会不同。譬如, 对于研究船员的靠离泊能力, 需要建立人-船舶-环境的精确耦合模型, 但是对于船舶交通组织而言, 则并不特别注重人对船舶的操作行为。根据国内外的已有研究成果, 如图 3 所示, 本文提出从 2 个维度来对现有的海事仿真研究进行界定: 一方面根据仿真对象的粒度、范围和时空尺度的不同, 将海事仿真分为宏观、中观和微观仿真; 另一方面根据海事管理所涉及的业务分工, 按照事务活动的类型进行领域划分。基于这两种视角对海事仿真研究进行“纵横式”的分类, 有助于人们更深入地理解海事仿真所针对的对象和目标, 如表 1 所示。

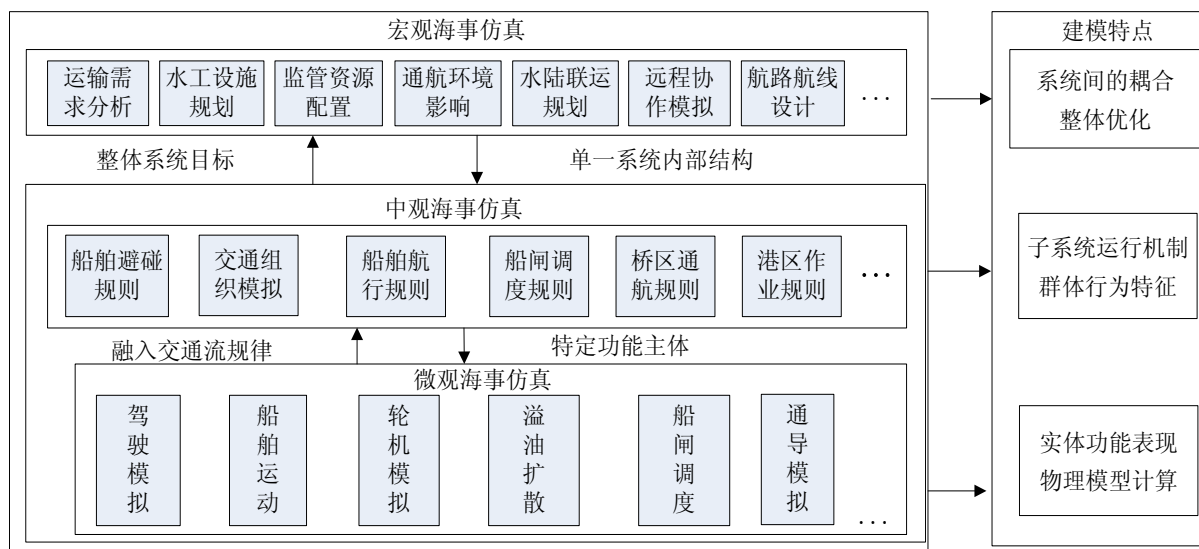


图 3 不同尺度海事仿真特点和相互关系

<http://www.china-simulation.com>

表 1 海事仿真研究内容

系统分类	规划与论证	日常监管	交通组织与调度	事故应急决策与处置
宏观海事 仿真	港区、航道等规划；系统可靠性、敏感性、复杂性；航线规划	监管资源配置、航路选址规划	大范围交通组织调度问题	灾害处置与应急联动
中观海事 仿真	基于蒙特卡罗模拟的水工参数仿真；	区域水上交通安全形势及监管；船舶通航动态风险评价	船闸调度仿真；港区通航秩序	海事人员的应急演练与组织；
微观海事 仿真	极端气象、海况下的通航参数论证	特种船舶靠离泊、过桥、航行安全；VTS/AIS 仿真	-	面向船员/船舶的事故应急处置；GMDSS 仿真

在交通工程的应用中, 现有的计算技术虽然达到了较高的水平, 但仍远没有能力开展目的分散、事无巨细的仿真计算。因此, 限定仿真的范围、目标和层次, 是进行仿真的必要前提。

宏观海事仿真将水路运输所涉及的通航环境、水工设施、交通需求等聚合的对象实体作为整体对待, 研究某一个系统的变化对其它系统产生的影响, 从而实现对整体系统的可靠性和协同性研究。宏观大尺度仿真系统建模时主要从宏观规律进行把握, 建立几个子系统之间的动态关系, 从而实现复杂交通系统之间的最优组合方式。例如, 文元桥提出了一些港口、航道船舶航行的抽象模型, 但目前还主要集中在通过能力研究^[42,49]。

中观海事仿真主要在考虑船舶交通流规律的基础上对某一个子系统特征开展研究, 此类仿真主要研究单个系统的特征参数、服务能力以及船舶通航安全水平。中观尺度仿真系统建模时需要考虑交通流的动态特征, 应用蒙特卡罗模拟的方法, 实现船舶通航安全的模拟^[50-52]。中观仿真还可以作为一种人员在环系统开展人因可靠性研究, 实现水上交通事故应急处置或应急演练。

微观海事仿真主要针对海事活动中某种特定功能、行为或运动的实体进行模型化的表现, 常见的如模拟训练设施、性能试验评估、污染扩散等软硬件系统。这类仿真系统在进行建模时需要建立系统内部复杂且精确的模型, 根据功能需求目前已经开展很多相关的研究, 如船用 GMDSS (Global Maritime Distress and Safety System) 仿真系统^[53], 水面溢油仿真^[54]和基于有限元的船舶碰撞仿真^[55]等。

从海事监管的角度, 海事仿真是面向海事管

理人员的用于保障水上交通安全、防止船舶造成水域污染的系统仿真。和海事系统中面向每个工作岗位的操作人员的训练仿真不同(如面向船舶驾驶员的船舶操纵仿真, 面向轮机员的船舶轮机模拟器, 面向危险品操作的原油洗舱系统), 海事仿真是针对船舶通航安全的各个环节进行监管, 包括规划与论证、日常监管、交通组织与调度、事故应急决策与处置等方面的内容, 即对海事安全监管对象在不同阶段的通航安全进行全方位的管理。因此海事仿真是一种用于提升海事管理水平和指挥决策能力的多元耦合、人机交互、场景复杂、时空关联的系统仿真。

规划与论证是指在港口、航道、锚地等的规划和论证阶段就充分考虑其对通航安全的影响。具体包括研究港区、航道、锚地的规划对其它各个子系统的影响, 以及是否需要改善相应的子系统设施; 研究各子系统的通航参数能否满足船舶的通航要求; 研究各子系统的通航作业条件。

日常监管是指对船舶的通航安全进行合理的监督, 避免海事事故的发生。具体包括研究船舶在各子系统中的通航安全, 实现船舶的通航风险预警和预控。

交通组织与调度是指在改变船舶通航规则或采取了特殊的交通组织模式时对船舶通航安全的影响。具体包括研究不同交通组织模式及策略对船舶通航安全的影响。

事故应急决策与处置方面是指事故发生后针对不同水域、不同事故采取的不同应急处置方案及流程控制等方面的研究。具体包括再现海事事故过程, 开展事故致因分析; 研究不同类型海事

事故应急处置方案; 开展多人事故应急响应训练; 事故应急处置流程优化。

4 海事仿真关键技术研究

4.1 三维环境建模与可视化技术

三维环境建模与可视化技术是随着虚拟现实技术、视景仿真技术而发展起来的, 通过创建虚拟世界的仿真系统, 利用计算机生成一种模拟环境, 并让用户沉浸到该环境中, 是一种多源信息融合的交互式的三维动态视景和实体行为的系统仿真, 具有沉浸性、交互性、构想性的 3 大特征^[56]。目前已经广泛应用于军事演练、城市规划仿真、大型工程漫游、名胜古迹虚拟旅游、模拟训练以及交互式娱乐仿真等。

在交通运输领域, 三维环境建模与可视化技术较为成熟, 且目前已经开发有面向业务人员培训演练的仿真模拟器, 如船舶操纵模拟器^[57]、船舶应急决策仿真系统^[47]、道路交通的驾驶员培训模拟器^[1]、航空的无人驾驶飞机仿真训练系统^[58]、港口集装箱的码头装卸仿真器等^[59], 这些仿真系统均很好的体现了培训人员参与到虚拟环境的特点。业务人员通过与虚拟环境中进行交互, 可以熟练掌握业务流程及业务内容, 而通过加入相关的事务作用机理模型, 并使业务人员参与到逼真的虚拟环境中, 还可以实现对现实世界的判断和估计。

4.2 支持场景实时变化的图形技术

场景实时变化的图形技术能够使仿真系统实时和动态地显示仿真场景。对于静态场景信息, 通过一些现有算法能够较好的实现变化场景的显示, 但是对于人机交互的动态场景, 还需要进一步研究实时渲染技术。该技术是指系统在一个确定的时间内完成场景中各个物体的位置和姿态的计算与图像的绘制, 并随着用户视点改变快速刷新画面, 其刷新的速度要求达到人眼觉察不到的闪烁, 同时要求系统对用户的外部输入立即做出响应, 并同步更新相应的场景及事件, 实现用户与系统的实时交互^[60]。要实现实时场景的渲染, 需

要研究人员根据不同场景的需求建立合适的场景复杂度模型, 目前国内外对于地形的实时渲染技术主要包括基于地形数据分块、层次细节模型 (Levels of Details)、视锥裁剪和实时优化适应性网络 (Real-time Optimal Adaptive Meshes) 等, 如施松新提出的分块大规模地形实时渲染算法^[61]以及李慧提出的超大规模实时地形渲染算法^[62]等。

人机交互的海事仿真, 特别是多通道的实时仿真系统, 需要系统能较好地处理好实时场景渲染。与海战场态势实时三维仿真系统类似^[63], 除上文提到的沿海港口水域的地形实时渲染外, 还需要解决好大范围的海浪模拟^[64], 以及运动船舶和通航建筑物等不同类型场景的实时渲染, 这就需要设计人员从模型、地形、数据格式存储等多方面进行优化。

4.3 基于 GIS 和 LBS 的仿真技术

地理信息系统 (GIS) 是集计算机科学、地理学、空间科学、信息科学和管理科学为一体的新兴边缘学科, GIS 的核心是使用地学空间数据组成的地理空间数据模型。目前 GIS 已经应用于 AIS 和 VTS 仿真软件的开发中。基于位置的服务 (LBS) 是通过电信运营商的无线电通讯网络或外部定位方式获取移动终端用户的位置信息。GIS 是 LBS 的位置定位、导航及地图表达的基础技术支撑。

GIS 的 LBS 技术是未来智能交通系统的一个重要研究手段, 吴升^[65]提出了 LBS 在智能交通系统中的应用及构架, 并认为通过 LBS 可以把 GIS 功能延伸到最终用户的桌面、PDA 和移动电话中, 从而将更多的信息量交到移动用户的手中。贾扬洋^[66]提出了基于 LBS 的实时交通信息系统的设计, 并实现了基于位置的实时交通路况信息服务。在水上交通研究中, 目前船舶获取水上交通安全态势信息的手段比较单一, 有学者提出应用 AIS 构建水上交通智能网络, 但是 AIS 较小的数据传输带宽使得这种信息服务功能相对有限。随着仿真手段的发展, 通过模拟基于 LBS 的水上交通服务的优势, 为船舶提供预警、交通密度、港口泊

位、锚地等信息服务，对推进水上智能交通发展是非常有意义的。

4.4 多 Agent 系统与 AI 技术

多 Agent 系统是分布式人工智能(DAI)的一个发展和应用，是复杂系统的有效建模方法，在进行多 Agent 建模时，需要实现对各种 Agent 结构、关系、行为、交互、通讯的定义^[67]。多 Agent 系统中各 Agent 均具有自主性、交互性、反应性和主动性的特点，在多 Agent 系统中各个对象均具有自主交互和决策的功能，因此多 Agent 系统可以很好的描述个体之间相互作用的系统演化过程，广泛应用于交通仿真领域，如张钧翔^[68]在提出航班 Agent、管制员 Agent 和机场管制区 Agent 的基础上，建立了多机场终端区空中交通智能仿真系统，类似的，多 Agent 系统还被应用于铁路运营仿真系统^[69]、无人机协同仿真系统^[70]等。

水路仿真领域，船舶在进行避碰和决策时均可以看成是一个 Agent 系统，杨神化^[71]在其博士论文中就提出了基于多 Agent 的船舶避碰决策支持系统，这对于推动多 Agent 系统在海事仿真的应用具有重要的意义，但是这只是从船舶的避碰行为角度开展了研究，而实际上船舶行为还包括追越、跟驰等行为，另一方面在不同交通组织模式下的多 Agent 交互行为研究也亟待开展。从海事仿真系统的角度，杨神化^[72]通过将航路、船舶、码头等均定义为 Agent，并设定相应的港口调度算法和船舶进出口自动航行算法获得了交通流的规律。而在未来多 Agent 应更多应用到宏观海事仿真，获取整个运输系统的特性，同时考虑到事故发生时可能会存在船舶的群体行为、船员的群体行为，这些人员的行为活动也是多 Agent 的应用方向。

4.5 支持事件和过程的形式化描述

支持事件和过程的形式化描述可以为事务组织提供形象的表示方法。工作流技术(Workflow)是目前事务组织中常用的方法，就是将现实世界

或仿真系统中的业务过程抽象出来，并用一种形式化的、计算机可处理的方式来表示，这种形式化结果称为工作流模型。工作流模型包含了工作流执行所需要的各种信息，如活动、控制流、数据流、角色和执行者。工作流模型可以很好地解决进行事务组织时人员难以完成指定的任务的问题，由于 Petri 网能够形象的利用图形化工具描述整个过程，因此应用非常广泛^[73]，最基本的 Petri 网可用四元组来表示，即库所(Place)、变迁(Transition)、有向弧(Flow)、标识(Marking)、和令牌(Token)，但是基本的 Petri 网只有流程控制而没有事件控制，因此又有学者提出了层次 Petri 网和高级 Petri 网^[74]。

海事仿真中也存在着较多的事务组织问题，特别是在进行事故应急响应时需要应急人员能够很好的执行搜救行动。和传统的工业界工作流建模时只需按照既定程序执行不同，应急事务组织更为复杂，如需要工作流模型有很好的柔性、直观性和错误修复性，因此 Wang^[75]提出了一种直观综合的(Workflows Intuitive Formal Approach)工作流建模方法，在此基础上，他还开展了资源限制工作流^[76]和时间限制工作流^[77]的研究，但实际上水上应急还受到外部环境、人员胜任、多人协同等因素的影响，因此在进行海事仿真时还需要完善支持事件和过程的描述过程和方法，而通过与多部门、多阶段和多方案决策模型相结合^[95]，还可以建立基于动态应急决策的工作流模型，优化工作流程和时间，减少事故损失。

4.6 基于情景设定和情景应对的仿真环境构建

情景分析是分析事件演化过程并对其未来发展趋势进行预测，目前主要应用于事故情景应对中，通过分析事故在不同情景下的演化趋势，研究事故的应急决策方法和资源组织调配方法。舒其林^[78]认为非常规突发事件的发生与演变具有极强的不确定性和独特性，因此难以用传统的预测-应对方法，并提出了情景-应对的决策范式，特别

的, 他还提出用致灾要素、情景状态、情景响应、情景演化路径等 4 个要素来描述非常规突发事件的情景演化过程。而这种按照事件情景演变的时间规律, 将非常规突发事件的情景概分为初始情景、发展情景、演化情景和消失情景的方法也得到了其它学者的认可, 在此基础上, 袁晓芳^[79]还提出了利用贝叶斯网络理论构建非常规突发事件的情景演变分析模型, 从而实现了定性方法向定量方法的转变。

对于海事仿真来说, 由于船舶受到外部环境的影响很大, 不同的自然环境、过往交通流信息、应急资源配备条件下其事故处置方法均存在着较大的差异, Arsham^[80]在对船舶通航风险评价的基础上, 提出了应根据事故演化趋势采取不同的应急处置方案。而对于海事仿真来说, 如果能够对不同通航环境条件、不同船舶类型和不同事故类型进行情景设定, 可以提高应急演练人员在不同情景事故下的应对能力, 并作为平时海事救援和救灾的训练内容, 可以大大提高仿真的准确性与效率。除此之外, 情景分析法还可以应用于不同水上交通态势及通航风险下的水上交通安全监管策略的演练。

4.7 面向人因与人类功效的仿真设计

基于人因功效的设计可以改善由于设计的缺陷而额外施加于作业者身体和心理上的压力, 充分体现产品设计和制造中的“以人为本”的原则。随着虚拟现实技术的发展, 在仿真环境下通过模拟操纵人员对仿真产品的操作, 可以发现产品设计的问题, 并对这些问题进行改善。而对仿真产品自身来说, 如果能够充分考虑到人因功效学的因素进行设计, 也可以提高操作人员的舒适度。目前在交通领域基于人因功效的设计已经非常流行, 如文献[81]就总结了基于人机工程学的铁路仿真系统, 并在改善旅客和司机安全和舒适性方面起着重要的作用, 唐刚^[82]也提出了基于人因功效学的港口起重机驾驶室内部件布置方法。

水上交通研究中, 人因的重要性更显突出。研究表明, 80% 以上的水上交通事故由人因引起。在船舶领域, 人因功效主要体现在船舶的设计与制造仿真中, 如邱世广^[83]提出的虚拟人实时驱动模块。另外, 不合理的驾驶台布置^[84]会直接影响到驾驶员的瞭望能力和疲劳程度, 特别是在应急情况下的各助航仪器的布置、海图室的分布等均会严重影响到人员的快速反应能力。将人类工效学原理运用于海事作业人员的测评与培训, 如面向船员、监管人员、海上搜救人员的仿真设计, 可以有效提高人员的可靠性。

4.8 基于复杂物理模型的高性能计算

物理模型通常指仿真对象所遵循的物理(力学)关系、作用或约束, 一般以特定的方程形式来表示。复杂物理模型的计算速度和精度直接决定着仿真效果的逼真度, 复杂物理模型的微分方程均具有高维度、非线性、强耦合的特点, 通常只能通过数值计算方法来进行计算, 但是这些算法的精确度和实时性受计算能力的制约很大。对于这类问题, 可以尝试并行计算的方法来解决这类问题, 但是这种高速运算对于硬件资源消耗很大。姚益平^[85]提出应用面向大规模体系仿真的高性能仿真计算机系统来解决这类问题, 并特别针对复杂物理模型的运算进行了总结。

船舶运动模型计算需要考虑包括船体、舵机、螺旋桨和外部环境耦合的复杂物理模型, 船舶运动实时求解的方法包括分离型(MMG)和整体型建模方法^[86], 如陆灏铭^[87]以 MMG 模型为基础建立了船舶运动数学模型并加以实现, 从海事仿真的实际来看, 根据仿真尺度的不同, 对于船舶运动的仿真要求是存在差异的。此外, 由于船舶通航环境是一个由大气、海浪、水流、建筑物等因素耦合的复杂系统, 区域大气-海浪-海洋耦合模式参数的修正是一个复杂的物理模型^[88]。张进峰^[89]在其博士论文中对这种耦合模式在航海仿真中的应用开展了研究; 类似地, 船舶溢油模拟仿

真也需要建立复杂的海域地形、洋流精确物理模型^[90]和油污扩散模型, 陈智君^[91]通过将实时环境动力数据引入验证模型, 大大的提高了预报准确率, 而实现精确模拟的基础正是复杂的物理模型。

4.9 安全管理和应急决策模型

水上交通安全受不确定性因素的影响很大, 近年来国内外对于安全管理越来越重视, 随着国际海事组织 (IMO) 关于综合安全评估 (FSA) 风险管理框架的颁布, 我国船级社也将 FSA 框架引用到安全管理中, 如前文所述, 国内外在海事风险评价领域已经取得了很好的成果, 并引入了多种不确定性的风险评价方法。但是根据 FSA 框架的要求, 风险管理包括危险识别、风险评估、风险控制方案、风险与效益分析和提供决策和建议等 5 个部分, 而目前主要的研究成果集中在风险评价方面, Lars Harms-Ringdahl^[92]就特别指出了风险评价和安全管理之间的区别, 根据该文的定义, 安全管理的范围更为宽泛。特别地, 在海事仿真中, 如果能从安全管理的角度实现全面的风险评估及应对策略, 实现船舶风险全过程控制有助于进一步提高海事监管水平。

海事仿真的另一个不确定性问题是应急决策, 应急事故处置过程中, 常用的决策方法为多方案准则决策^[93], 但是实际海事事故应急处置决策过程中, 更多的需要考虑群决策的决策方法, 特别是由于各决策人员对于同一状况的认识会存在较大的差异, 需要合理地协调好群决策问题^[94]; 另一方面事故的发展过程具有动态性、多阶段性、多部门性的特点^[95], 应用仿真的手段可以实现对应急决策方案进行选择 and 评价, 及时有效地处理事故发展过程中存在的问题, 从而减少事故带来的损失。

4.10 软硬件与人员在环测试

硬件在环仿真是指将嵌入式控制单元及执行器等硬件连接到系统回路中进行仿真, 由于商业仿真系统中对于复杂的控制逻辑是难以描述的, 因此需要将控制逻辑从仿真系统中剥离, 并通过

合理的接口将仿真系统与外部控制机模块连接进行集成仿真。硬件在环仿真中其控制机模块为实体的控制机, 而软件在环的控制机则为确定控制逻辑的软件模块。人员在环测试是指一种人机交互系统及其为使用人员提供的人机接口, 使得人员能够作为系统的一部分参与整个系统的运行。人员在环测试关注人因对系统的影响和作用, 试图根据不同用户所表现出的不同行为来观察系统的输出, 从而实现对人员的操作或决策的效果进行评估。

硬件在环可以弥补纯数字仿真中存在的一些缺陷, 提高整个仿真系统的置信度, 减轻编程的工作量, 因此硬件在环系统被广泛应用于交通运输领域^[96], 而且在船舶仿真领域也已经应用广泛, 如沈智鹏^[97]设计并实现一套包括船舶运动 DSP 控制器、船舶运动仿真系统、控制与监测系统等的船舶运动控制硬件在环仿真系统, 马枫^[98]设计了船舶自动识别系统性能半实物仿真, 李精明^[99]开发了船舶舵机硬件在环仿真系统, 已经达到了很好的教学效果。相对来说, 由于目前海事仿真还没有形成较为完善的商业软件, 软件在环仿真应用较少。人员在环仿真的应用则非常广泛, 特别是针对人员培训的仿真系统, 如前文提到的 GMDSS 模拟器^[53]等。

5 海事仿真技术的发展趋势

作为一种面向行业应用的系统仿真技术, 海事仿真的研究和开发也经历了从零星到系统、从分散到聚合的发展历程。同时, 由于海事仿真涵盖了多个领域中的关键技术, 因此它的发展也受到相关学科整体水平的推动或制约。分析半个世纪以来海事仿真研究的演进和发展, 可以发现如下显著特点:

(1) 对数学或物理模型的依赖性在增强。仿真对象的数学模型和物理模型决定了仿真所能达到与真实系统的逼近程度, 海事仿真系统也遵循这个规律。例如, 早期对船舶交通流的仿真多使

用基于 Poisson 流的离散事件来模拟, 而随着多 Agent、自组织理论等的提出和发展, 当前对船舶交通流的建模倾向于模拟船舶的个体行为或群体行为。

(2) 海事仿真系统对可视化的要求在提高。可视化的水平决定了仿真结果的表现能力, 同时也决定了用户对仿真结果的感知程度。最初的海事仿真常用图、表等来显示结果。随着计算机图形学的快速发展, 二维动态呈现、3D 图形渲染等可视化技术现在已经在海事仿真中得到大量应用。

(3) 仿真系统更加重视人-机交互。海事仿真从单纯对现象的重现或预测发展到对人员或软件的在环测试。由于大量海事活动中都涉及管理方面的行为, 因此海事仿真已经不再是对单纯的物理系统进行模拟, 它更需要考虑如何对系统中人的行为进行刻画, 进一步借助虚拟现实技术为用户提供一种沉浸似环境, 从而测试用户在不同场景压力下的智力负荷、心理负荷和合作行为的有效性。因此, 更紧密的人-机交互将是未来海事仿真的重要方向。

(4) 仿真系统将呈现更强的聚合性, 跨尺度的混合仿真系统将更为常见。本文第三节曾对海事仿真进行了宏观、中观和微观的分类, 但是随着海事仿真在行业中的应用不断深入, 跨尺度的混合仿真系统将逐渐出现。例如, 仿真水上交通中的船舶溢油事故时, 需要使用油污的扩散模型进行计算, 这种计算属于微观仿真; 另外仿真系统还需要进一步展现溢油事故发生后对涉事区域中船舶交通流的影响, 而这种层次的仿真则属于中观仿真。通过跨尺度的仿真, 能够更丰富、多层次地实现复杂仿真对象。

基于上述分析, 如下简要介绍几种未来海事仿真研究开发中的需要重点关注的技术走势, 和前述的仿真关键技术不同, 这几种仿真技术目前在交通仿真领域应用相对缺乏, 是未来交通仿真领域的重要研究方向。

5.1 多人、多任务、多角色协同仿真

多人多任务多角色的协同仿真是通过概括多人在不同任务下的协同模式, 指导协同工作的开展, 它的主要目标是提高多角色人员在协同工作时的协同配合。在协同过程中, 多角色人员承担不同的角色任务, 各角色人员之间互相交互从而实现多人的协调, 而对于同一任务各角色人员的理解也会存在差异, 同时各角色人员需要协调完成好各任务的步骤, 确保协同任务的开展。对于海事仿真来说, 人员参与是其重要的一个特点, 如前所述^[20], 80% 以上的水上交通事故均是由于人员失误造成的, 船舶的控制和驾驶台资源的管理就是多人协调工作的典型例子。不仅如此, 海事日常监管中监管人员之间也存在着多人协调问题, 如事故险情发生后船舶人员的应急反应和海事监管人员的应急反应均具有多人多任务多角色协同的特征, 通过开展该类仿真, 抽象出多人协同工作下的协作模型, 提高人员在协调工作下的可靠性, 可以有效地减少水上交通事故风险, 这也是未来海事仿真的研究热点问题。

5.2 大规模、多尺度融合仿真

水上交通系统所涵盖的要素众多, 内容庞杂。大规模仿真将是未来水上交通研究的重要方向, 也就是对数量较多、时空跨度较大、范畴各异的对象群体开展关联的仿真。而大规模仿真将面对大规模的数据处理问题, 因此如何对海量的对象与数据进行管理和规划将直接决定仿真模型的效率与可行性。

与大规模仿真相伴的另一个问题是多尺度的仿真融合。多尺度是指仿真在对象、逻辑、属性等方面有不同的精细度。微观层面上, 仿真的对象包括船舶运动模型、人的行为情绪、通航环境要素等, 这些因素与人息息相关, 是人直接接触或参与的环境; 中观层面上, 仿真对象包括航道条件、港口事务、航路规划、交通流密度、应急处置流程等, 展现这些对象的工作状态或属性;

宏观层面上, 仿真对象包括跨辖区的船舶交通需求、气候地质变化对水运的影响、与其他交通方式的联动等。多尺度融合的目标在于, 平滑地为用户展现各种尺度级别仿真的结果, 同时允许与多用户之间的互动。

5.3 增强现实技术

增强现实技术(Augmented Reality Technique, 简称 AR), 是在虚拟现实基础上发展起来的新技术, 是一种通过计算机系统提供信息来增加用户对现实世界感知的技术。它能够把计算机生成的虚拟物体、场景或系统提示等信息叠加到真实场景中, 从而实现对现实世界的“增强”^[100]。由于其与真实世界的联系并未被切断, 因此交互方式也就显得更加真实、自然。增强现实具有虚实结合、信息增强、完全沉浸、全域交互等特点。目前增强现实技术已经在现场直播、仿真模拟等领域得到了应用。相比较于传统的虚拟现实仿真系统, 增强现实技术应用到海事仿真时能够让演练人员更加沉浸于海事仿真场景中, 如提供更为“真实”的事故现场, 船舶布置等场景, 而且增强现实可以为演练人员提供其它仿真无法提供的复杂场景, 另外通过将虚拟世界与现实场景相结合, 整个演练过程安全、经济、环保、可控、无风险或低风险。

6 海事仿真案例简介

本节将介绍一种面向海事管理人员的、针对船舶事故发生后的多人协同应急处置决策的中观海事仿真系统。

该系统针对目前海事事故应急演练中实战演练和桌面推演存在的不足, 建立了一种具有直观性能好、测试成本低、组织难度小、训练效果好的海事应急仿真系统。该系统通过模拟水路交通安全事件及应急互动处置和演练过程, 提高相关人员在复杂现场确定救援策略的能力, 强化整体救援的技能, 提升在搜救过程中的指挥水平和心理适应能力。该系统搭建了一个事故应急处置的

硬件和软件相结合的仿真场景, 一方面该系统搭建了具有目前海事应急搜救指挥中心类似的硬件平台, 包括其通信系统; 另一方面该系统还能够模拟 VTS, AIS 等二维系统及其船舶交通流形态。在此基础上, 利用三维视景仿真技术搭建了三维通航环境场景、事故场景以及巡航支队的海巡艇救助等, 为参与人员提供逼真的事故场景。

本仿真系统三维场景采用 OGRE 开发环境, 在事故演练过程中, 定义有多重人员角色, 分别是事故场景设定的管理人员角色; 事故发现人员的报警角色; 巡航支队海巡艇操艇救助人员角色和位于指挥中心的指挥角色。图 4 为多人协同协作演练过程。各演练人员在事故的发现、报警、接收、确认、处置和终止等过程中根据事故的发展完成事故的演练。图 5 为事故应急处置决策信息显示, 分别为二维的 AIS 和 VTS 信息, 巡航艇救助信息以及预案执行终端和三维显示终端等。



图 4 多人协同演练效果



图 5 事故应急处置决策信息显示

7 结论与展望

本文对国内外海事仿真相关研究进行了较深

入地分析, 主要围绕海事仿真所研究的对象与关联、关键技术与功能、尺度与边界方面论述了海事仿真的研究动态和发展趋势。海事仿真是一个多学科交叉、面向特定交通领域的应用基础型研究方向。传统的观点认为, 海事仿真主要是针对交通现象的描述或预测。随着人工智能、图形技术、人机工程技术的迅猛发展, 海事仿真也必然超越这些传统的认识, 展现出新的形态和愿景, 这些变化值得研究同行的共同关注, 主要包括如下几点:

(1) 海事仿真将更多地考虑人员行为的因素。海事活动中人的行为仍然是占主导的动因, 包括组织、监管、协调等。对于大量涉及人类行为的海事仿真, 经典的统计或随机过程模型以及基于这些理论的离散事件模型受到严峻的挑战, 这些传统模型用来描述自然、物理现象很成熟也被得到普遍认可, 但用于刻画有人参与的活动则显得力不从心。以 Multi-agent 为代表的人工智能技术将是一个重要的发展方向, 但是在海事仿真中的尝试和应用仍是一个艰巨的探索过程。

(2) 面向培训演练的海事仿真将不断出现。传统的海事仿真以研制、设计物理系统为主要目标, 譬如仿真桥梁、码头对通过能力的影响, 从而能够优化设计方案。近年来, 以作业和训练为目标的仿真, 如船舶驾驶仿真、轮机操纵仿真得到了成功的应用。未来海事仿真在作训方面将继续发展, 如对指挥事务流程、组织协同、应急预案评价和优化等, Transas 的反海盗演练、葡萄牙 Soares 团队研制的船舶遇险环境下决策支持系统等^[47]。

(3) 独立的决策向协同决策转换。面向海事事故的决策支持系统是海事仿真的一个重要内容, 其中对海事监管人员决策指挥的能力进行仿真、或者提供一种能用于决策的环境, 将是一个有较大挑战性的课题。传统的决策行为一般都转化为优化或者博弈问题来解决。但是群体的决策, 需要在场景的压力下如何将多个个体的差异

化理解融合为整体的知识和判断, 这方面依赖于搭建综合集成协同的仿真环境。类似“研讨厅系统”、“决策剧场”的系统, 此方面的研究在海事仿真中也有较大的研究空间。

(4) 伴随新兴技术的不断涌现, 未来的海事仿真将从这些新兴技术中获取新的推动力。例如, 随着云计算的发展, 将有效解决未来水上交通仿真面临的海量数据存储问题, 借助云计算平台, 水上交通的仿真可以将大数据的获取、处理、计算等工作交给云计算基础设施来完成, 从而能将主要资源用于仿真中数学模型、物理模型的构造、仿真事务流程的逻辑等个性化的工作; 大数据技术的发展, 可以将仿真系统各种通航参数进行整合和分析, 为不同需求的监管人员提供所需要的船舶交通信息服务, 并在此基础上进行可视化的显示; 随着安全工程研究的不断深入, 特别是大系统中柔性工程的发展, 开展事前的风险分析、事中的事故干预和事后的应急处置研究并应用到海事仿真领域, 需要深入挖掘不同海事事故的致因机理, 并搭建相应的仿真环境来验证不同阶段安全措施的有效性。

(5) 海事仿真系统的研制和开发也必然遵循校核、验证与确认(VVA)这套通用系统有效性的评价体系。新的技术不断应用于海事仿真研发后, 也对 VVA 过程提出了新的挑战。未来海事仿真需要重点解决的 2 个问题包括: ①如何评估不同受试人员在海事仿真系统中的表现, 以及通过受试人员反应来反向对仿真系统进行改善; ②如何测算海事仿真过程中的人机混合行为与真实历史数据之间的一致性 or 相似性。面向物理系统的仿真技术, 其 VVA 已经日臻成熟; 但是侧重于对管理活动、人员行为的海事仿真系统, 需要有更完善的理论体系对仿真自身进行测试和评估。

参考文献:

- [1] 邹智军. 新一代交通仿真技术综述 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(9): 2037-2042.
- [2] 邹铁方, 余志, 蔡铭. 基于 Pc-Crash 软件的人-车碰撞

- 事故仿真规律研究 [J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(2): 54-58+177.
- [3] 张秀凤, 洪碧光, 金一丞. 船舶操纵模拟器在船舶通航安全评估中的应用 [J]. 中国航海, 2003, 56(3): 24-31.
- [4] 彭国均, 翁跃宗, 熊振南, 等. 基于船舶操纵模拟器的船舶通航安全评估 [J]. 船舶工程, 2008, 30(6): 67-69.
- [5] 唐风文, 肖英杰, 周伟, 等. 仿真技术在船舶碰撞事故再现中的应用 [J]. 水运工程, 2011, 459(10): 42-45.
- [6] 郝勇. 海事管理学 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007.
- [7] Quy N M, Vrijling J K van Gelder, P H A J M Groenveld R. On the assessment of ship grounding risk in restricted channels [C]// The English International Conference on Marine Sciences and Technologies. Varna, Bulgaria, 2006: 1-6.
- [8] Quy N M, Vrijling J K van Gelder, P H A J M Groenveld R. Modeling risk and simulation-based optimization of channel depths at CAM PHA coal port [C]// Proceeding of LASTED Asian Conference Modeling and Simulation. Beijing, China, 2007: 192-198.
- [9] Quy N M, Vrijling J K van Gelder, P H A J M Groenveld R. Modeling of ship motion responses and its application to risk-based design and operation of entrance channels [J]. Journal of Maritime Research (S1697-4840), 2007, 4(2): 47-62.
- [10] Quy N M, Vrijling J K van Gelder, P H A J M Groenveld R, Guema L. On the statistical analysis and probabilistic modeling of ship maneuvering results for waterway design [C]// Proceeding of Maritime Transport. Barcelona, Spain, 2006: 189-198.
- [11] Guema L, Schoeneich M. Probabilistic Model of Under keel Clearance in Decision Making Process of Port Captain [J]. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2008, 2(2): 167-171.
- [12] 杨君兰, 文元桥. 基于风险可接受程度的桥梁通航净宽尺度设计 [J]. 船海工程, 2012, 41(1): 129-131.
- [13] 陈伟. 大型集装箱船进出港航道宽度模拟实验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [14] 郭威治. 大型 LNG 船舶节约型航道宽度研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [15] 徐言民, 晏林, 许鹏, 等. 渤海海域超大型船舶安全航速限定标准研究 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(1): 95-100.
- [16] 王琳, 谢跃荣, 唐敏, 等. 船舶运动量在确定某 LNG 泊位装卸作业条件中的应用 [J]. 水运工程, 2011, 458(9): 22-26.
- [17] 谭箭, 王继洪, 周彩云, 等. 西江干线实行船舶定线制的探讨 [J]. 中国航海, 2012, 35(2): 72-75.
- [18] 王致维, 张培林. 长江危险品船舶交通事故应急资源优化配置研究 [J]. 水运工程, 2011, 459(10): 54-57.
- [19] 黄明, 吴行行, 严新平. 基于计算机仿真的水位变动对三峡库区航道变化影响分析 [J]. 交通信息与安全, 2010, 28(6): 21-29.
- [20] 毛喆, 严新平, 陈辉, 等. 水上交通事故分析研究进展 [J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(12): 86-92.
- [21] Kujala P, Hänninen M, Arola T, Ylitalo J. Analysis of the marine traffic safety in the Gulf of Finland [J]. Reliability Engineering and System Safety (S0951-8320), 2009, 94(8): 1349-1357.
- [22] Jun Min Mou, CeesvanderTak, Han Ligteringen. Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data [J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2010, 37(5-6): 483-490.
- [23] Zhang D, Yan X P, Yang Z L, Wall A, Wang J. Incorporation of formal safety assessment and Bayesian network in navigational risk estimation of the Yangtze River [J]. Reliability Engineering and System Safety (S0951-8320), 2013, 118: 93-105.
- [24] Terndrup Pedersen P. Review and application of ship collision and grounding analysis procedures [J]. Marine Structures (S0951-8339), 2010, 23(3): 241-162.
- [25] Jakub Montewka, Floris Goerlandt, Pentti Kujala. Determination of collision criteria and causation factors appropriate to a model for estimating the probability of maritime accidents [J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2012, 40: 50-61.
- [26] Floris Goerlandt, Pentti Kujala. Traffic simulation based ship collision probability modeling [J]. Reliability Engineering and System Safety (S0951-8320), 2011, 96(1): 91-107.
- [27] Xiaobo Qu, Qiang Meng, Li Suyi. Ship collision risk assessment for the Singapore Straits [J]. Accident Analysis and Prevention (S0001-4575), 2011, 43(6): 2030-2036.
- [28] Xiaobo Qu, Qiang Meng. Development and applications of a simulation model for vessels in the Singapore Straits [J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2012, 39(9): 8430-8438.
- [29] Jinfen Zhang, Xiping Yan, Xianqiao Chen, Lingzhi Sang, Di Zhang. A novel approach for assistance with anti-collision decision making based on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea [J]. Part M:

- Journal of Engineering for the Maritime Environment (S1475-0902), 2012, 226(3): 250-259.
- [30] Pedersen P T. Collision risk for fixed offshore structures close to high-density shipping lanes [J]. Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment (S1475-0902), 2012, 216(1): 29-44.
- [31] Jean-François Balmat, Frédéric Lafont, Robert Maifret, Nathalie Pessel. MARitime RiSk Assessment (MARISA), a fuzzy approach to define an individual ship risk factor [J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2009, 36(15-16): 1278-1286.
- [32] Wang, J, Foinikis P. Formal safety assessment of containerships [J]. Marine Policy, 2001, 25(2): 143-157.
- [33] Hong Sing Sii, Tom Ruxton, Jin Wang. A fuzzy-logic-based approach to qualitative safety modeling for marine systems [J]. Reliability Engineering and System Safety (S0951-8320), 2001, 73(1): 19-34.
- [34] Guedes Soares C, Teixeira A P. Risk assessment in maritime transportation [J]. Reliability Engineering and System Safety (S0951-8320), 2001, 74(3): 299-309.
- [35] Rajesh S Prabhu Gaonkar, Min Xie, Kien Ming Ng, Mohamed Salahuddin Habibullah. Subjective operational reliability assessment of maritime transportation system [J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2011, 38(11): 13835-13846.
- [36] 徐海祥, 吴卫国, 余晋刚, 等. 船-桥避碰监测预警系统研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(7): 151-156.
- [37] 徐言民. 基于操纵模拟的桥区水域船舶通航安全预控研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [38] 陈卓欧, 郭国平, 张金奋, 等. 水路交通中风险评估与通过能力研究进展 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2013, 37(2): 430-434.
- [39] 朱俊, 张玮. 基于跟驰理论的内河航道通过能力计算模型 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5): 83-87.
- [40] 郭子坚, 陈琦, 唐国磊, 等. 船舶进出港安全时距对沿海散货港区航道通过能力的影响 [J]. 水运工程, 2011, 455(7): 136-140.
- [41] 宋向群, 刘佳, 唐国磊. 船舶进出港规则对沿海进口散货港区航道通过能力的影响 [J]. 水运工程, 2012, 470(9): 122-131.
- [42] 文元桥, 刘敬贤. 港口公共航道船舶通过能力的计算模型研究 [J]. 中国航海, 2010, 33(2): 33-39.
- [43] 刘升友. 海上救助专家知识库建立及推理机的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [44] 张欣. 溢油事故船舶先期处置决策偏好研究 [J]. 中国航海, 2010, 33(2): 74-76.
- [45] 王立坤. 船舶溢油应急处置群体选择偏好 [J]. 上海海事大学学报, 2010, 31(1): 12-20.
- [46] 郑中义, 闫化然, 赵宁. 基于粗糙集的船舶碰撞受损分析 [J]. 大连海事大学学报, 2012, 38(4): 1-4.
- [47] Jos é M Varela, C Guedes Soares. A Virtual Environment for Decision Support in Ship Damage Control [J]. IEEE Computer Society, 2007, 27(4): 58-69.
- [48] 张浩, 肖英杰, 白响恩, 等. 海上交通仿真综述 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(11): 2283-2290.
- [49] 刘敬贤, 文元桥. 基于船舶行为特征的港口航道通过能力仿真 [J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(2): 31-33.
- [50] 蔡学龙, 刘克中, 杨星, 等. 内河航道交汇水域交通流仿真 [J]. 大连海事大学学报, 2012, 38(2): 19-21.
- [51] 杨君兰, 文元桥, 黄立文. 交汇水域船舶冲突概率计算模型研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(2): 78-82.
- [52] 郑剑, 肖英杰, 周溪召. 复线布置桥梁桥区水域船舶通航效率研究 [J]. 水运工程, 2012, 467(6): 135-139.
- [53] 余谦, 黄立文. 基于网络的 GMDSS 模拟软件设计与实现 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 34(1): 167-170.
- [54] 杨红, 刘成秀, 李曰嵩, 等. 基于 GNOME 的长江口锚地溢油模拟 [J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(3): 384-390.
- [55] 刘超, 李范春. 有限元仿真在船舶碰撞研究中的运用 [J]. 大连海事大学学报, 2013, 39(1): 15-18.
- [56] 邹湘军, 孙健, 何汉武, 等. 虚拟现实技术的演变发展与展望 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1905-1909.
- [57] 屠海洋, 袁章新. 船舶操纵模拟中视景仿真的研究 [J]. 中国航海, 2009, 32(1): 106-110.
- [58] 张雄, 叶榛, 朱纪洪, 等. 基于虚拟现实的无人驾驶飞机仿真训练系统 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(8): 1022-1025.
- [59] 吴镇, 朱金生, 张新艳. 虚拟现实技术在港口集装箱码头装卸仿真系统中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2001, 13(S2): 336-340.
- [60] 付杰. 大规模场景实时渲染技术研究 [D]. 西安: 西北大学, 2009.
- [61] 施松新, 叶修梓, 张三元, 等. 基于分块的大规模地形实时渲染方法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(12): 2002-2016.
- [62] 李惠, 翟磊, 林诚凯, 等. 一种超大规模地形的实时渲染方法 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 736-739.
- [63] 刘玉亮, 夏学知, 沈迎春. 海战场态势实时三维显示系统研究与实现 [J]. 计算机应用, 2006, 26(1): 177-179.
- [64] 王纲, 季振洲, 张泽旭. 大范围动态海浪实时渲染 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(3): 59-63.
- [65] 吴升, 王钦敏, 肖桂荣, 励惠国. LBS 在智能交通系

- 统中的应用及构架研究 [J]. 测绘科学技术学报, 23(1): 11-14.
- [66] 贾扬洋. 基于 LBS 的实时交通信息系统的设计和实现 [D]. 开封: 河南大学, 2009.
- [67] 曹军海, 张和明, 熊光楞. 多 Agent 仿真中 Agent 行为的形式化描述方法 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(11): 2398-2400.
- [68] 张钧翔, 胡明华. 基于多 Agent 的多机场终端区空中交通智能仿真系统设计 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 2(7): 90-98.
- [69] 杜彦华, 叶阳东. 基于多 Agent 的分布式铁路运营仿真系统的分析 [J]. 计算机应用, 2002, 22(12): 55-58.
- [70] 周昊, 覃征, 邢剑宽. 基于多 Agent 的多无人机协同决策算法仿真平台设计 [J]. 系统仿真学报, 2012, 24(3): 587-593.
- [71] 杨神化. 基于 Multi-agent 的船舶避碰决策支持系统 [M]. 上海: 上海海事大学, 2008.
- [72] 杨神化, 施朝健, 关克平, 等. 基于 MAS 和 SHS 智能港口交通流模拟系统的开发与应用 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(2): 289-299.
- [73] Ping Sun, Changjun Jiang. Analysis of workflow dynamic changes based on Petri net [J]. Information and Software Technology (S0950-5849), 2009, 51(2): 284-292.
- [74] Seungchul Ha, Hyo-Won Suh. A timed colored Petri nets modeling for dynamic workflow in product development process [J]. Computers in Industry (S0166-3615), 2008, 59(2-3): 193-209.
- [75] Jiacun Wang, Daniela Rosca, William Tepfenhart, Allen Milewski, Michael Stoute. Dynamic Workflow Modeling and Analysis in Incident Command Systems [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans (S1083-4427), 2008, 38(5): 1041-1055.
- [76] Jiacun Wang, William Tepfenhart, Daniela Rosca. Emergency Response Workflow Resource Requirements Modeling and Analysis [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews (S1094-6977), 2009, 39(3): 270-283.
- [77] Jiacun Wang. Emergency Healthcare Workflow Modeling and Timeliness Analysis [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans (S1083-4427), 2012, 42(6): 1323-1331.
- [78] 舒其林. 非常规突发事件的情景演变及“情景-应对”决策方案生成 [J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(11): 936-941.
- [79] 袁晓芳, 田水承, 王莉. 基于 PSR 与贝叶斯网络的非常规突发事件情景分析 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(1): 169-176.
- [80] Arsham Mazaheri, Jakub Montewka, Pentti Kujala. Modeling the risk of ship grounding-a literature review from a risk management perspective [J]. WMU Journal of Maritime Affairs (S1654-1642), 2013, 12: 1-29.
- [81] Hiroaki Suzuki. 人类仿真技术在铁路系统中的应用 [J]. 国外铁道车辆, 2013, 50(6): 7-11.
- [82] 唐刚, 石娟, 王得宇, 等. 基于人机工程学的港口起重机驾驶室优化 [J]. 东华大学学报(自然科学版), 2013, 39(4): 440-454.
- [83] 邱世广, 武殿梁, 范秀敏, 等. 基于船舶人机工程的虚拟人操作驱动建模仿真技术 [J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(9): 1366-1370.
- [84] 商蕾. 基于视景仿真的船舶驾驶舱人机工程设计评价研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2011, 35(4): 840-844.
- [85] 姚益平, 刘刚. 面向大规模体系仿真的高性能仿真计算机系统 [J]. 系统仿真学报, 2011, 23(8): 1617-1623.
- [86] 贾欣乐, 杨益生. 船舶运动数学模型 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 1999.
- [87] 陆灏铭, 陈玮. 船舶运动可视化仿真平台的设计与实现 [J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 277-281.
- [88] Zhang Jinfen, Huang Liwen, Wen Yuanqiao, Deng Jian. A distributed coupled atmosphere-wave-ocean model for typhoon wave numeral simulation [J]. International Journal of Computer Mathematics (S0020-7160), 2009, 86(12): 2095-2103.
- [89] 张进峰. 区域海-气-浪耦合模式改进及航海仿真应用实验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
- [90] 王金华, 沈永明. 适用于复杂地形海域的溢油模拟系统 [J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(11): 1367-1377.
- [91] 陈智君, 肖金赫, 陈蜀喆, 等. 基于实时环境动力验证的溢油三维应急决策系统研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(7): 115-119.
- [92] Lars Harms-Ringdahl. Relationships between accident investigations, risk analysis, and safety management [J]. Journal of Hazardous Materials (S0304-3894), 2004, 111(1-3): 13-19.
- [93] Tuncay Özcan, Numan Çelebi, Akir Esnaf. Comparative analysis of multi-criteria decision making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem [J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2011, 38(8): 9773-9779.
- [94] 戚筱雯, 梁昌勇, 黄永青, 等. 基于混合型评价矩阵的多属性决策方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(2): 473-481.