

上海港水域船舶避让决策知识库的构建

董邢睿¹, 陆悦铭², 李丽娜¹, 葛海梁², 单乐涵², 李国定¹, 郭健¹

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 上海港引航站, 上海 200082)

[摘要] 为了使机器决策能有效模拟有经验驾引人员的避让操船决策, 针对上海港航行水域船舶密度大且船舶类型复杂等特点, 采用专家咨询、问卷调查与理论分析相结合的方法, 通过问卷收集上海港水域引航人员在典型会遇态势下的常用避让决策, 利用几何分析从理论上论证更为合理及有效的避让方法, 综合考虑上海港引航站引航文化“立足自我, 主动避让”、上海港水域地方管理办法和《国际海上避碰规则》构建上海港水域船舶避让决策知识库。该研究为后续上海港水域船舶航行避碰智能预警和辅助决策系统的设计提供基础, 也为构建更加有序、安全的上海港水域船舶航行环境提供新的解决办法。

[关键词] 典型会遇态势; 避让决策; 几何分析; 知识库; 上海港水域

[中图分类号] U 675.96

The Construction of the Knowledge Base of Ship Collision Avoidance Decision-Making in Shanghai Harbor Waters

DONG Xingrui¹, LU Yueming², LI Lina¹, GE Hailiang², SHAN Lehan², LI Guoding¹, GUO Jian¹

(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Shanghai Pilot Station, Shanghai 200082, China)

Abstract: In view of the characteristics of high traffic density and complex ship types in Shanghai Port navigational waters, this study takes the method of combining expert consultation, questionnaire survey and theoretical analysis to enable machine decision-making to effectively simulate the decision-making of experienced pilots and deck officers to avoid ship collision. The first step is to collect the common avoidance decisions made by experienced pilots and deck officers in typical encounter situations in Shanghai Harbor waters, and then more rational and efficient methods in theory are demonstrated through geometric analysis. Taking into account the pilotage culture of ‘Self-Reliance, Proactive Avoidance’ in Shanghai Harbor, the local management methods of Shanghai Harbor waters and the *International Maritime Collision Avoidance Rules*, a knowledge base of ship collision avoidance decision-making in Shanghai Harbor waters is constructed. This study provides a reliable knowledge basis for the design of the intelligent early warning and auxiliary decision-making system for ship collision avoidance in Shanghai Harbor waters, and creates a new solution for constructing a more orderly and safe navigation environment for ships in Shanghai Harbor waters.

Keywords: typical encounter situation; avoidance strategy; geometric analysis; knowledge base; Shanghai Harbor waters

[收稿日期] 2020-09-05

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51879119); 工业和信息化部基金项目(MC-201920-X01)

[作者简介] 董邢睿(1995—), 男, 硕士生, 从事交通信息工程及控制研究。通信作者: 李丽娜(1962—), 女, 教授, 从事交通信息工程及控制研究。E-mail: ll668@163.com

0 引言

随着上海港国际航运中心的建成、长江三角洲区域一体化建设,以及船舶向大型化趋势发展,上海港船舶密度越来越大。密集的交通流,加之船舶类型多样,导致船舶会遇态势复杂,不可预知因素增多,上海港发生船舶碰撞、搁浅的几率倍增。一直以来,国内外都有将专家系统融入到船舶避碰决策之中的研究。文献[1-2]研究的是一种咨询式避碰专家系统,归纳总结出了两船会遇的6种会遇局面和14种可能采取的避碰行动;“汐路丸”号轮的模拟避碰决策系统是一种全自动的专家系统^[3],它能给出避碰决策,并通过该系统自动控制船舶的车、舵等装置进行避碰操纵。但以上专家系统知识库的构建都采用离线方式,缺少适应各种航行情况的能力。随着对开阔水域的船舶避让方法的研究日趋成熟,大量研究将方向转到受限水域,并开始将地方规则和船员的优良船艺融入专家系统的构建^[4]。Hatqing等^[5]从考虑船舶操纵特性的角度出发,提出基于深度Q学习与专家知识相结合的多船避让智能算法,该算法融入了《国际海上避碰规则》和地方规则,能较好解决开阔水域和受限水域船舶避碰问题,但未将速度因素考虑在内。

目前专家系统发展到了第三代具有机器在线学习功能的专家系统。李丽娜等^[5-9]从模拟经验丰富的避碰专家避让操船方法入手,利用第三代专家系统思路构建了开阔水域、部分受限水域避让知识库,将其作为船舶避碰预警和避碰辅助决策系统的知识基础。基于上海港独特的国际地位以及复杂的通航环境,本文采用构建专家系统知识库的方法构建上海港水域船舶避让决策知识库,以期上海港水域船舶拟人智能避碰避险决策算法的危险预警和初始决策提供参考依据。

1 上海港水域交通流划分方法

1.1 上海港水域划分

本文的研究对象为大型船舶,所以按照大型船舶常用航行水域,将上海港水域划分为航道和警戒区。航道水域分为主航道和辅助航道,主航道包括北槽航道、外高桥航道、宝山航道、宝山北航道和宝山南航道;辅助航道包括南槽航道上段和南槽航道下段。警戒区包括圆圆沙警戒区、吴淞口警戒区、九段沙警戒区、宝山警戒区和浏河口警戒区。

1.2 交通流划分

交通流表示上海港水域中大型船舶进出港口的航行轨迹,通过调查主要交通流,获取船舶避让方法和避让幅度,作为上海港各水域船舶避碰预警依据和辅助决策参考。以下列举了圆圆沙警戒区、吴淞口警戒区中主要交通流。

圆圆沙警戒区的交通流主要分为4股,如图1所示。分别为:1) I→III 北槽航道→延伸段;2) II→IV 南槽航道→警戒区北侧水域;3) III→I 延伸段→北槽航道;4) IV→II 延伸段→南槽航道。吴淞口警戒区的交通流主要分为6股,如图2所示。分别为:1) III→V 延伸段→宝山航道;2) III→VI 延伸段→黄浦江口;3) VI→III 黄浦江口→延伸段;4) VI→V 黄浦江口→宝山航道;5) V→VI 宝山航道→黄浦江口;6) V→III 宝山航道→延伸段。

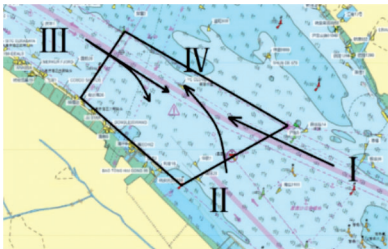


图1 圆圆沙警戒区
Fig.1 Yuanyuansha guard zone

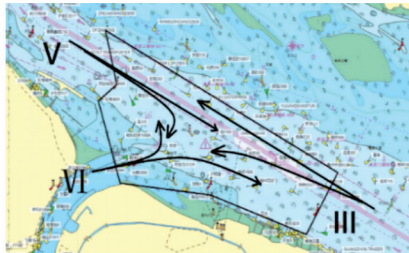


图2 吴淞口警戒区
Fig.2 Wusongkou guard zone

2 避让方法的问卷设计及其知识库的构建

2.1 调查问卷的设计

问卷将部分船舶避让影响因素理想化，默认所有会遇态势皆考虑在白天互见天气良好状态下，本船和目标船为 200 m 左右散货船，且船舶处于半载状况，两船在避让时未考虑协调情况，不考虑目标船是否有引航员及其所属公司等，而环境及其他影响因素将在知识库使用过程中根据实际环境条件给予。当本船为让路船时，目标船默认严格按照规则保向、保速行驶；当本船作为直航船，假定多目标船均未严格按照规则执行。

问卷调查设计分为两个阶段（以下简称问卷 1 和问卷 2）。问卷 1 用于小范围内确定常用避让方法、避让幅度，其内容主要包含：沿交通流方向的常用航行速度、边界线距离和会遇局面（包括右舷对遇、右小角度交叉、右正横附近大角度交叉、右舷被追越、左舷被追越、左正横附近大角度交叉、左小角度交叉和左舷对遇）。

典型会遇态势下危险等级几何图解如图 3 所示。其中： \overrightarrow{AB} 表示本船速度 V_0 矢量线； \overrightarrow{BC} 表示目标船速度 V_t 矢量线； $\overrightarrow{A'B}$ 表示减速避让后的速度矢量； $\overrightarrow{A''B}$ 表示右转减速避让后的速度矢量； $NRML_n$ （ n 代表第几种避让方案）表示与之对应的相对运动线； $NRML_n'$ 表示本船避让过后的相对运动线与不同安全会遇距离的切线；点 1、2、3、4 分别表示避让过后的相对运动线 $NRML_n'$ 与原相对运动线 RML 的交点； $TL1$ （1）表示使用常用避让方法（减速）能够在最大安全会遇距离外通过的最佳避让措施实施点； $TL2$ （1）表示采用大幅度避让方法（减速右转）能够在最大安全会遇距离外通过的最晚避让措施实施点； $TL2$ （2）表示采用大幅度避让方法能够在最大安全会遇距离内边界外通过的最晚避让措施实施点； $TL2$ （3）表示采用大幅度避让方法能够在最小安全会遇距离外通过的最晚避让措施实施点； $T\text{-alarm}$ 表示使用人员希望的一般碰撞危险预警提前量。一般碰撞危险指当本船改向前的预警提前量 $T\text{-alarm}$ 所确定的目标船位置点 A_{alarm} 到 $TL2$ （1）之间两船所处危险等级。紧迫局面是指当本船改向点处在 $TL2$ （1）到 $TL2$ （3）之间两船所处危险等级，图 3 中安全会遇距离内边界（又称临界安全会遇距离）作为危险评判阈值。

问卷 1 调查的航道包括：北槽航道，外高桥航道和南槽航道上段。依据为：北槽航道边界线以外可航水域较小，除航道左右两边各有 100 m 的边坡水域外，大部分为导堤，避让条件受限；外高桥航道为双向双通的复式通航航道，类型与宝山航道，宝山北航道类似，另外，外高桥航道北侧有一排连续的从外高桥一直延伸到吴淞口警戒区的锚地，时常会有进出锚地的船舶穿越外高桥航道，使该水域船舶会遇态势较宝山航道、宝山北航道更为复杂，故研究外高桥航道的避让方法将可以扩展应用到宝山航道和宝山北航道；南槽航道为辅助航道，涨潮时可用作避让的水域范围会更大。

针对警戒区，将圆圆沙警戒区和吴淞口警戒区设置为研究对象。“警戒区”是指由一个区域构成的一种定线措施，在该区域的规定界限内，可能有推荐的交通流方向。圆圆沙警戒区位于上海港南港水道南北槽的交汇处，是往来于上海港船舶必经的咽喉要道。吴淞口警戒区是上海港船舶通航密度最高的水域，从进出警戒区的船舶类型来看，既有大型散杂货船、集装箱船、危险品船和超大型国际邮轮，又有各种中小型船只。船舶乘潮而行的特点明显，造成该水域在中浚高潮前 2 h 至中浚高潮后

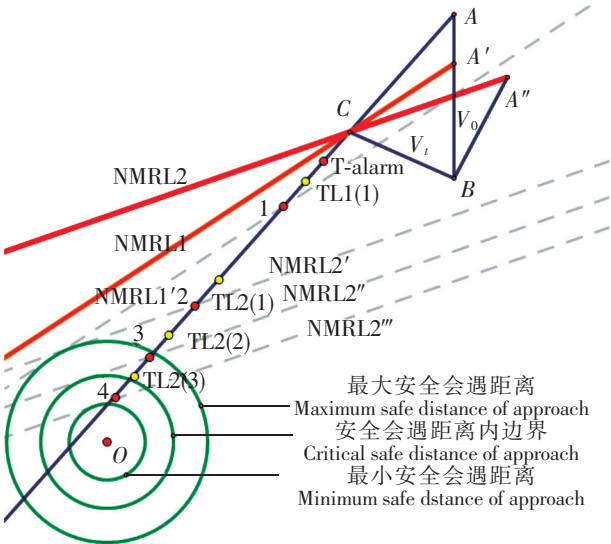


图 3 危险等级示意图
Fig.3 Danger level diagrammatic graphics

2 h的时间段内,船舶会遇态势复杂。

基于以上原因,选用圆圆沙警戒区与吴淞口警戒区作为专家咨询、问卷调查的对象,其避让方法经过细微调整后可以扩展应用到九段沙警戒区、宝山警戒区以及浏河口警戒区。

问卷2是在问卷1的基础之上,将问卷1中所获得的常用避让方法设置为问卷2的选项,通过在线问卷的方式开展大范围的调查,并通过专家交流、论证,最终确定较为合理的船舶避让方法。对个别会遇态势下,出现避让方法分布较为分散、比例均衡,或者存在更为有效的避让方法等情况,通过几何分析,确定其中更为合理、更为经济的避让操船方法,进而构建上海港水域船舶避让决策知识库。

2.2 上海港水域避让方法知识库

专家知识库作为专家系统知识来源的重要组成部分,其主要优点有:启发式思维,能运用专家的知识与经验进行推理、判断和决策;较强的透明性,在使用过程中能够与专家进行交互;较强的灵活性,可以通过对专家知识库的不断结构化更新,使系统适用于不同的使用环境。

以船舶在外高桥航道航行遭遇一般危险为例,通过问卷调查,专家咨询和几何论证,剔除问卷结果中不合理避让方法(避让幅度过大、复合避让效果抵消等),构建知识库,如表1所示。该知识库通过综合分析,得出大多数引航员在此水域的操纵习惯,将其用于上海港船舶碰撞预警初始判断依据,而最终的避让方法将根据当前船舶航行环境(能见度,风洋流)对初始决策进行优化。表1中变速避让1/4为当前速度下的1/4,加速若超出当前水域限定速度,则适当增加改向幅度。

表1 外高桥航道船舶避让决策知识库(一般危险)

Tab.1 Ship avoidance decision-making knowledge base of Waigaoqiao channel(general danger)

对遇 Head-on		右小角度交叉 Cross on the small angles of the right side				左小角度交叉 Cross on the small angles of the left side				右正横大角度交叉 Cross on the large angles of the right side									
右舷 Right side	左舷 Left side	Stem	Stern		Stem		Stern		Stem	Stern									
			$V_0 < 9\text{ kn}$	$V_0 > 9\text{ kn}$	$180^\circ < C_r < 270^\circ$	$270^\circ < C_r < 360^\circ$	$V_0 < 9\text{ kn}$	$V_0 > 9\text{ kn}$		$V_0 < 9\text{ kn}$	$V_0 > 9\text{ kn}$								
5°L	5°R	$-V_0/3$	$+V_0/4$	$-V_0/3$	$-V_0/3$	$-V_0/3$	$+V_0/4$	$-V_0/3$	$-V_0/3$	$+V_0/4$	$-V_0/3$								
		$-V_0/4,$	$+V_0/4,$	$-V_0/4,$	$-V_0/4,$	$-V_0/4,$	$+V_0/4,$	$-V_0/4,$	$-V_0/4,$	$+V_0/4,$	$-V_0/4,$								
		5°R	5°L	5°R	10°R	10°L	10°L	10°R	5°L	5°R	5°L								
左正横大角度交叉 Cross on the large angles of the left side												左舷被追越 Overtaken on the port side				右舷被追越 Overtaken on the starboard side			
Stem		Stern		Stem		Stern		Stem		Stern									
$180 < C_r < 270^\circ$	$270^\circ < C_r < 360^\circ$	$V_0 < 9\text{ kn}$	$V_0 > 9\text{ kn}$	$V_0 < 9\text{ kn}$	$V_0 > 9\text{ kn}$	$V_0 < 9\text{ kn}$	$V_0 > 9\text{ kn}$	$V_0 < 9\text{ kn}$	$V_0 > 9\text{ kn}$	$V_0 < 9\text{ kn}$	$V_0 > 9\text{ kn}$								
$-V_0/3$	$-V_0/3$	$+V_0/4$	$-V_0/3$	$-V_0/3$	$+V_0/4$	$-V_0/3$	$-V_0/3$	$-V_0/3$	$+V_0/4$	$-V_0/3$	$-V_0/3$								
$-V_0/4, 10^\circ\text{L}$	$-V_0/4, 10^\circ\text{R}$	$+V_0/4,$	$-V_0/4,$	$-V_0/4,$	$+V_0/4,$	$-V_0/4,$	$-V_0/4,$	$-V_0/4,$	$+V_0/4,$	$-V_0/4,$	$-V_0/4,$								
		10°R	10°L	10°R	10°R	10°R	10°R	10°L	10°L	10°L	10°L								

注:“-”为减速;“+”为加速;“L”为左转;“R”为右转;“Stem”为过船首;“Stern”为过船尾; C_r 为避让前相对运动方向。

Notes: “-” means speed up; “+” means slow down; “L” means turn left; “R” means turn right; “Stem” means over the stem of the own ship; “Stern” means over the stern of the own ship; C_r means RML.

算法基于AIS和雷达等提供的相关数据,计算目标船相对方位、会遇态势等,将信息作为知识库产生规则,如“if A then B”,判断条件A,而B表示与之对应的避让方法。例如:if (ES[i] = 1) {right = 1;}。ES[i] = 1(左舷对遇左对左),right = 1(右转),表示当前会遇特征若为左对左对遇,那么本船采用右转的避让方法。

类似会遇特征(ES)的表示总共有24种,涵盖了左、右对遇;左、右小角度交叉;左、右大角

度交叉；左、右追越；左、右被追越以及包括了过目标船船首、船尾等。同时设置的还有不同危险度下的避让方法。

表 1 为通过问卷调查、专家咨询和几何论证初步构建的避让决策专家知识库，表中提供的避让措施主要用于关联避让行为的船舶，不同等级下碰撞危险度阈值计算以及辅助避碰初始决策，避碰决策算法将根据当前能见度信息、潮汐潮流、船舶类型、水域条件等对初始决策进行优化处理，并给出较为合理、经济的辅助避让决策。

3 上海港水域避让方法的理论验证及结果分析

问卷 1 共 10 份问卷，高级引航员 2 份，一级引航员 8 份；问卷 2 共 43 份问卷，高级引航员 22 份，一级引航员 15 份，二级引航员 3 份，三级引航员 3 份，问卷 2 有效问卷数如图 4 所示。表 1 由问卷 1 和问卷 2 综合分析得出。为了验证问卷调查和专家咨询所获取的避让方法的合理性和有效性，下面对外高桥航道获得的避让操船方法进行相对运动几何分析。

3.1 右舷对遇会遇态势下的避让操船方法

虽然在上海港水域采用分道通航制，但存在特殊船（挖泥船，拖船等）与本船形成右舷对遇的会遇态势，问卷结果如图 5 所示。《国际海上避碰规则》（以下简称《规则》）第二章第十四条，对遇局面中描述，当两艘机动船在相反的或接近相反的航向上相遇构成碰撞危险时，各自应向右转向，从而各自从他船的左舷驶过。对比图 5 中一般危险、紧迫局面两种危险等级下避让方法统计结果，可以看到，在实际航行中，减速，左转和减速左转是常用的几种避让方法。对于遵守《规则》的右转避让较少有人提到，一方面是由于水域受限，另一方面则是更多考虑了分道通航制要求。

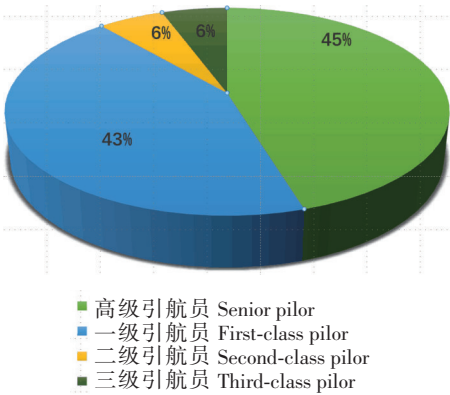


图 4 有效问卷数

Fig.4 The number of valid questionnaires

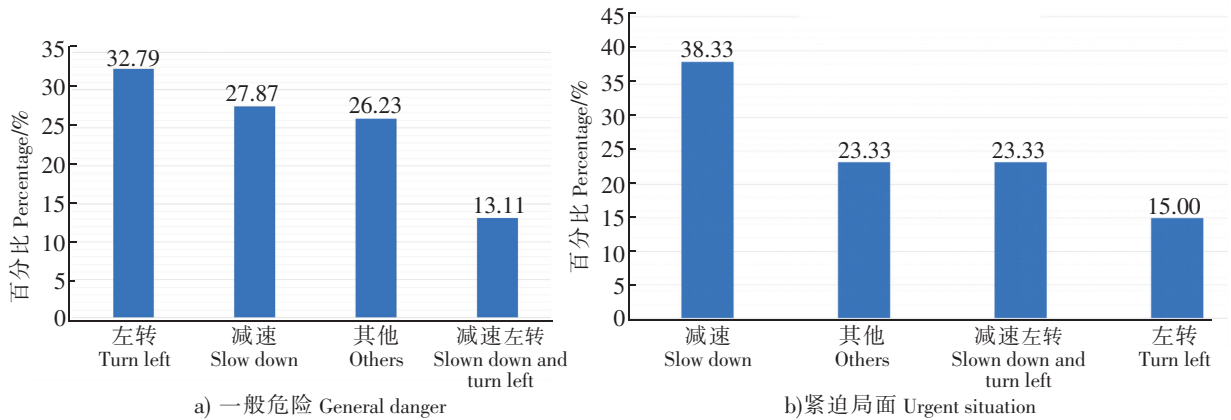


图 5 右舷对遇问卷结果

Fig.5 The results of the questionnaire of the right-hand side of the head-on situation

当遇到右舷对遇情况时，多数选择小角度左改向与目标船左转会绿灯或减速观望协调，如图 6 所示。其中： O 点表示本船所在位置，以此为圆心的圆半径表示安全会遇距离（SDA）；RML 表示初始相对运动线； \overrightarrow{AB} 表示本船速度矢量； \overrightarrow{BC} 表示目标船速度矢量， $\overrightarrow{A'B'}$ 表示本船单纯左改向避让后的速度矢量；NRML1 为与之相对应的相对运动线； $\overrightarrow{A''B''}$ 表示本船减速左转组合避让后的速度矢量；NRML2 为与之相对应的相对运动线。可以看出，小角度改向能取得显著避让效果。而当变化幅度较小时，减速改向组合避让所达到的效果与单纯改向效果相差不大。

由于外高桥航道右舷对遇目标船一般为特殊船,其航行一般是紧靠右侧边界线,如果本船按照《规则》大角度右转避让特殊船将会驶出航道外,因此在一般情况下采取与目标船会绿灯的避让方法。通常机器决策采取快速解除危险的避让方法,而减速避让实质上不能使会遇距离增大,因此不作考虑。按照问卷调查结果和几何分析结果,在一般危险下知识库检索小角度左改向,在紧迫局面下检索大角度左改向,避让方法及避让幅度如表1所示。

3.2 右正横附近大角度交叉会遇态势下的避让操船方法

《长江上海段船舶定线制规定》第五章第三十八条中描述道:穿越、驶进或驶出航道的船舶应当避让在航道内正常航行的船舶。

一般危险和紧迫局面两种危险等级下的避让方法统计结果如图7所示。从图7可以看到,在实际航行中,减速和减速右改向组合是常用的避让方法。在“其他”选项中大多数也是减速,甚至停车、倒车避让。可以总结出:在外高桥航道,当遇到右正横附近大角度交叉情况时,大多数人会选择主动避让驶过目标船尾的方式。这种避让方法虽然没有严格遵守《长江上海段船舶定线制规定》中所属条例,但在水域情况较为复杂和船舶智能化系统较为缺少的情况下是更为谨慎和安全的做法。

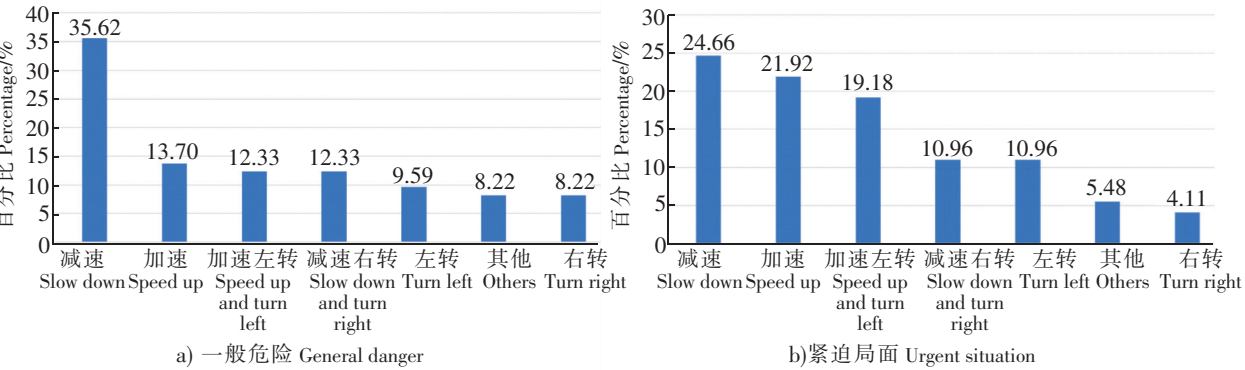


图7 右正横大角度交叉问卷结果

Fig.7 The results of the questionnaire of the large angle cross of the starboard beam

在几何分析中,将右正横附近大角度交叉会遇态势分为过本船首和本船尾来分析,如图8~图11所示。以过本船首为例,图3~图11中:圆心为“O”的圆表示安全会遇距离(SDA);RML表示初始相对运动线; C_r 表示初始相对运动航向; \vec{AB} 表示本船的速度矢量; \vec{BC} 表示目标船的速度矢量; $\vec{A'B}$ 表示本船单纯减速避让后的速度矢量; $\vec{A''B}$ 表示本船减速左转组合避让后的速度矢量; $\vec{A'''B}$ 为本船减速右转组合避让后的速度矢量; $\vec{A''''B}$ 为本船单纯加速避让后的速度矢量; $\vec{A'''''B}$ 为本船单纯左转避让后的速度矢量;NMRLn(n表示第几种避让方法)为与之相对应的相对运动线;NMRLn'避让过后的相对运动线与安全会遇距离的切线;点1表示避让过后相对运动线与原相对运动线交点;TL1(1)表示避让过后能够在最大安全会遇距离外通过的最佳避让措施实施点; C_m 表示避让过后相对运动航向。

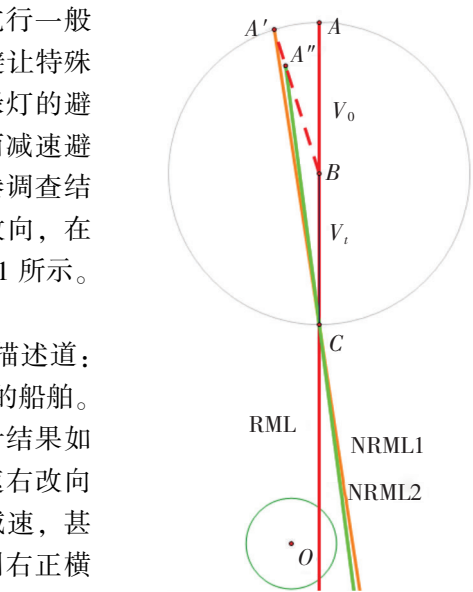


图6 右舷对遇图解

Fig.6 The illustration of the right-hand side of the head-on situation

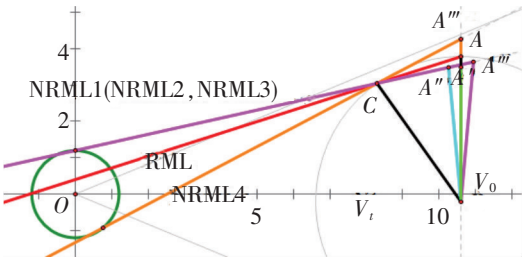


图8 右正横大角度交叉(180°<C_m<270°)

Fig.8 the large angle cross of the starboard beam (180°<C_m<270°)

1) 当本船速度 $V_0 \geq$ 目标船速度 V_t , 目标船相对航向 $180^\circ < C_r$ (RML) $< 270^\circ$ 过本船船首时, 如图 8 所示。避让过后的 $180^\circ < C_r$ (NRML1, NRML2, NRML3) $< 270^\circ$, 同样改向角下, 选择减速右转避让为好, 相较于减速左转避让减速幅度更小。

2) 当本船速度 $V_0 \geq$ 目标船速度 V_t , 目标船相对航向 $180^\circ < C_m$ (RML) $< 270^\circ$ 过本船船首时, 如图 9 所示。当避让过后 $270^\circ < C_r$ (NRML1, NRML2, NRML3) $< 360^\circ$, 同样改向角下, 选择减速左转避让为好, 相较于减速右转避让减速幅度更小。

3) 当本船速度 $V_0 <$ 目标船速度 V_t , 目标船相对航向 $270^\circ < C_r$ (RML) $< 360^\circ$ 过本船船首时, 如图 10 所示。改向过后的 $270^\circ < C_r$ (NRML1, NRML2, NRML3) $< 360^\circ$, 同样改向角下, 选择减速左转避让为好, 相较于减速右转避让减速幅度更小。

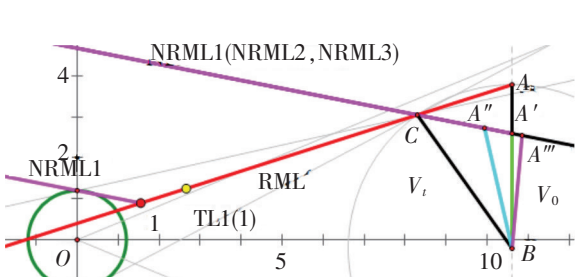


图 9 右正横大角度交叉 ($270^\circ < C_m < 360^\circ$)

Fig.9 the large angle cross of the starboard beam ($270^\circ < C_m < 360^\circ$)

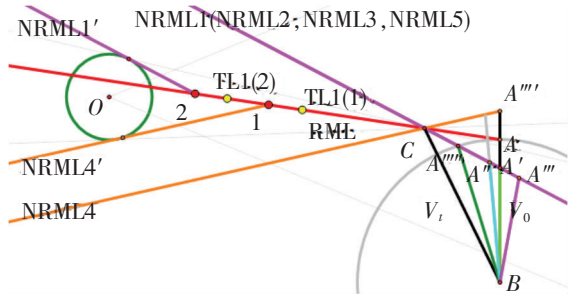
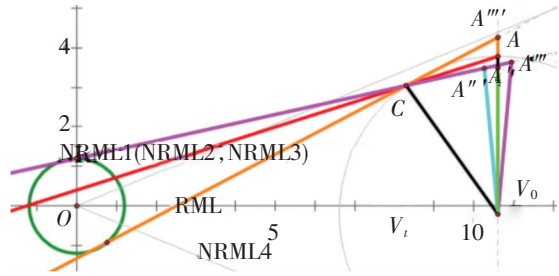


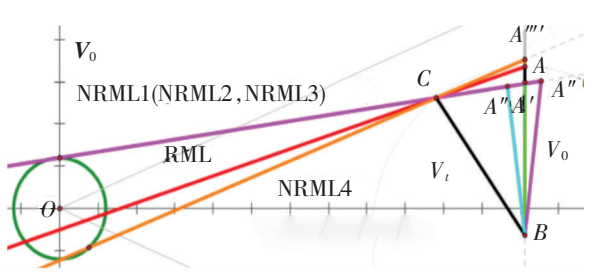
图 10 右正横大角度交叉 ($270^\circ < C_r < 360^\circ$)

Fig.10 the large angle cross of the starboard beam ($270^\circ < C_r < 360^\circ$)

由于篇幅有限, 仅对当本船速度 $V_0 \geq$ 目标船速度 V_t , 目标船相对航向 $180^\circ < C_r$ (RML) $< 270^\circ$ 时过本船首和过本船尾做几何分析, 如图 11 所示。



a) 过本船首 Over the stem of the own ship



b) 过本船尾 Over the stern of the own ship

图 11 右正横大角度交叉图解

Fig.11 The illustration of the large angle cross of the starboard beam

可以看出, 当前目标船相对运动线欲从本船首通过时, 减速、减速右转组合能够实现较小幅度变化就达到快速增加两者会遇距离的效果; 当前目标船相对运动线欲从本船尾通过时, 加速、加速左转组合能够实现较小幅度变化就达到快速增加两者会遇距离的效果。但考虑到在上海港水域行驶有速度上限要求, 所以在知识库中, 当本船初始速度较小时, 才会采取含有加速的避让方法。在机器决策中, 算法能够较为准确地判断目标船相对运动线, 并依据当前相对运动线准确给出预警以及辅助决策。

船舶在海上航行时, 一般不改变船速, 但在港内航行时需要频繁变换船速^[12], 变速避让生效时间较长, 因此, 在知识库构建中, 相对运动线过本船首时, 知识库将依次检索减速避让、减速右转组合避让; 相对运动线过本船尾时, 若初始速度较小, 知识库将依次检索加速避让、加速左转组合避让; 当初始速度较大时, 先检索减速避让, 后检索减速右转组合的方法。

除此之外, 几何分析发现同为右正横附近大角度交叉, 但当目标船相对方位处在右正横附近交叉与右舷被追越的模糊边界时 (即两船的相对夹角大于 270° 时), 其避让方法与右舷被追越避让方法相

同,该算法基于 AIS 和雷达提供的目标船信息,得到目标船属性、会遇态势和相对方位等数据。在相应条件下,每条目标船相对本船当前会遇态势皆只会检索到一条避让措施,当第一种方法的避让时机错过,且利用优化方案无法解决时,才检索避让时机靠后的第二种避让策略,而当第二种避让策略优化失败,则转入紧迫危险模块。由于篇幅有限,在此仅对以上会遇态势做几何解析。分析问卷统计结果可以发现,虽然有《国际海上避碰规则》以及《长江上海段船舶定线制规定》等存在,但在实际船舶航行以及避让过程中,驾引人员更多还是从实用性和更有利安全的角度出发,采取谨慎稳妥、主动协调的避让方法。按照《规则》,行驶在航道中的船本应为直航船,但在上海港引航员中,存在“立足自我,主动避让”的引航文化,出于安全性和实用性考虑,较为常用的做法为“直航船”主动避让“让路船”。知识库充分考虑以上因素,将调查分析得到的引航员常用避让方法运用到一般危险的一级危险预警计算,此方式既可避免对方对于会遇态势认定的不确定性,同时也可避免协调失败使两船陷入紧迫局面甚至紧迫危险的情况,在一定程度也是一种优良船艺的体现,提高了上海港水域的安全性。因此,当船舶在上海港水域实际航行时,应当优先考虑“立足自我,主动避让”原则,其次考虑上海港地方管理办法,最后《国际海上避碰规则》对以上没有涉及到的部分辅以补充。

4 结语

本文从实用角度出发,通过问卷调查收集上海港引航员常用避让方法,运用相对运动几何分析方法构建上海港水域船舶避让决策知识库。该知识库将上海港引航站引航文化“立足自我,主动避让”融入其中。针对在航道中行驶的船舶按照《规则》为直航船,应当在紧迫局面下进行避让,但从合理性和实用性角度出发,将在不构成新危险局面的约束条件下实现早、大、宽地避开危险,知识库在一般危险下即给出预警决策。研究结果为复杂条件下多船会遇危险度评估及避碰辅助决策研究提供了初始避让方法和理论依据,关于知识库的仿真实验验证,有待后续进一步研究。

[参考文献]

- [1] COENEN F P, SMEATON G P, BOLE A G. Knowledge-based collision avoidance [J]. The Journal of Navigation, 1989(42): 107-117.
- [2] 朱军(译). 避碰知识库 [J]. 国外航海科技, 1990(3): 27-33.
- [3] 鹤田三郎. 船舶航行专家系统的基础研究——避碰专家系统 [J]. 国外航海科技, 1988(5): 55-58.
- [4] 湛敏剑. 深圳西部港区交叉相遇时的船舶避让 [J]. 航海技术, 2017(5): 26-28.
- [5] SHEN H Q, HASHIMOTO H, MATSUDA A, et al. Automatic collision avoidance of multiple ships based on deep Q-learning [J]. Ocean Research, 2019, 86: 268-288.
- [6] 李丽娜, 陈国权, 邵哲平, 等. 船舶拟人智能避碰决策方法及其评价标准的构建 [J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(4): 1-6.
- [7] LINA L, GUOQUAN C, GUODING L. Study on auto decision-making and its simulation control for vessel collision avoidance [C] //2015 年中国智能自动化学术会议论文集(第三分册). 武汉: 中国自动化学会智能自动化专业委员会, 2015: 11.
- [8] 高建杰. 镇扬汽渡水域船舶碰撞危险智能预警模型研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2018.
- [9] 王鹏鲲. 港口水域船舶避碰避险决策机理研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2016.
- [10] 牛亮亮. 港口水域船舶紧迫危险避碰避险决策及应用研究 [D]. 厦门: 集美大学, 2016.
- [11] 苏鹏. 港口水域船舶碰撞危险预警模型及应用 [D]. 厦门: 集美大学, 2015.
- [12] 洪碧光. 船舶操纵 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2008: 22-40.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)