

基于 FTA 的长江下游港口水域引航安全评价研究

侯华波

(威海港引航站, 山东 威海 264200)

摘 要: 随着内河运输业的迅猛发展, 船舶智能化、大型化发展迅速, 内河航运船舶交通流增加, 港口交通密度不断增大, 引航安全已成为内河航运界的热门研究课题。为了改善和提高内河航运船舶引航作业安全, 本文在分析长江下游港口水域船舶引航作业影响因素的基础上, 结合张家港水域引航作业实际情况和特点, 利用事故树分析法 (FTA) 对常见的事故进行定性分析, 对船舶在长江下游港口水域中的引航安全进行科学有效的评估, 并提出对策与建议。

关键词: 长江下游港口水域; 引航安全; 事故树分析法 (FTA); 最小割集; 安全评价

中图分类号: U698 **文献标识码:** A

0 引言

港口水域是指港界线以内的水域, 主要包括港池、航道和锚地^[1]。港口水域交通流密集, 危险性较大、事故频率偏高。随着经济持续快速增长, 港口生产任务日益繁重, 安全生产压力也越来越大, 引航安全越发引起业界关注。长江航线为国内主要内河航运地区, 素有“黄金水道”之称。长江下游港口水域引航范围较广、航线较长、水文条件复杂、水上交通密集, 对此水域船舶引航工作安全状况进行评价具有重要意义。

目前, 一些学者以港口水域的安全为目标, 使用数学方法分析和评估港口作业的风险^[2-4], 事故树分析 (FTA) 法就是其中较典型的方法之一。事故树分析 (FTA) 于 1962 年由 A.B. 代表贝尔电话实验室首次提出。中国从 1976 年开始使用这种方法, 并广泛应用于航空航天、机械、造船、化工等领域^[5-8]。使用事故树分析 (FTA) 可以有效评估船舶航行的实际安全状态, 并澄清引航作业中的潜在安全风险, 对支持航运业实现经济效益和社会效益最大化的目标发挥了积极作用。

本文以长江下游南岸水域的张家港为例, 利

用 FTA 分析法对船舶引航过程中遇到的风险进行安全评估, 找出引发风险的原因, 利用最小割集法求出较大影响因素, 并提出对策与建议, 对长江下游港口水域引航安全具有重要意义。

1 长江下游港口水域引航安全评估系统的建立

对长江下游港口交通密集水域引航作业中的风险进行评估, 首先围绕“人”“船”“环境”“管理”四项因素建立引航安全管理系统, 系统结构组成如图 1 所示。在该系统中, 引航员是主体, 其余部分是客体。客体部分主要包括: 被引船舶、被引船舶的船员、拖轮条件、他船条件、交通条件、码头条件、航道条件、水文气象条件、VTS 管理和引航管理等部分。经分析, 在引航安全系统中处于核心地位的是引航员, 引航员的操作对引航安全起关键性作用。

人员因素风险包括: 由于进出港口水域船舶数量逐年增加, 而引航员数量有限, 容易导致引航员超时、疲劳工作, 从而造成危险局面或发生引航事故; 此外自引船舶数量近年来也呈现上升趋势, 有些自引船舶船长对港口的环境、规则及操纵不熟悉, 容易造成不必要的风险局面^[9]。船舶因素风险包括: 船舶机电设备故障在引航过程中时有发生, 从而导致主辅机失控, 或无法对外

联系等风险；拖轮在突发恶劣天气下，存在马力不足或失控现象。环境因素风险包括：港口水域航行环境复杂，分支较多，交通流密度大，容易出现碰撞等风险事故；突发的恶劣天气，引起船舶偏航，在复杂航道容易导致引航风险。管理因素风险包括：VTS 监管力度不够，执法行为和调度不合理；引航部门管理不严格、规章制度不健全等对通航安全都产生一定的影响。

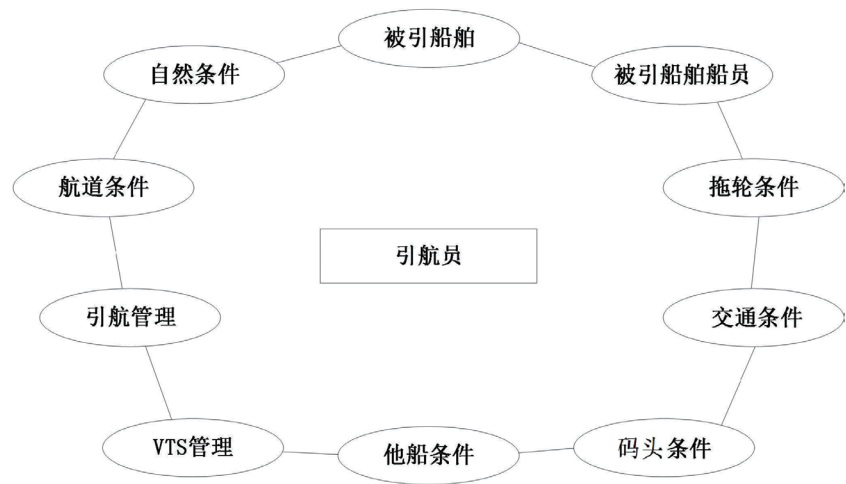


图 1 引航安全评估系统的各部分组成

2 事故树分析（FTA）安全评估

事故树分析(Fault Tree Analysis, 简称FTA)^[10]是一种系统安全计算分析方法，能够清楚地表达各方面不同因素之间的逻辑关系。表 1 给出了常见的树符号类型的表达方式。

表 1 常见事故树符号及表达方式

事件符号	分析符号	表示含义
矩形符号		顶上事件和中间事件
圆形符号		不能继续进行分析的基本原因事件
菱形符号		非本系统的基本原因事件
尖顶符号（或门）		说明下层中的任一事件发生上层事件就会发生
圆顶符号（与门）		说明下层事件同时发生上层事件才会发生
椭圆组合符号（条件门）		必须在满足规定条件下，上层事件才会发生

本文选用事故树分析法作为定性分析方法，其步骤如图 2 所示：

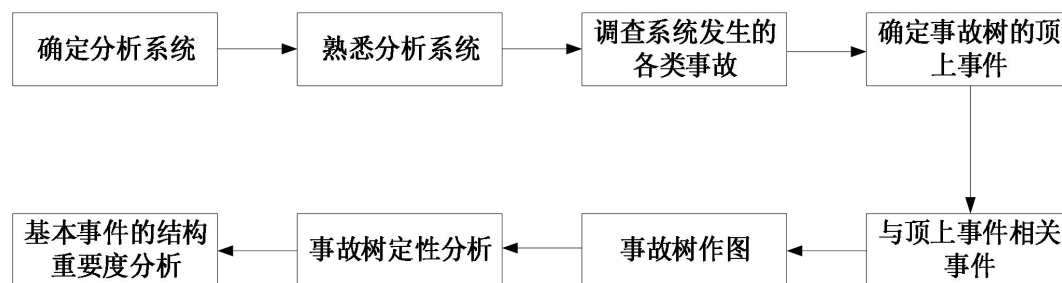


图2 事故树的简要分析方法

作为一种风险因素分析方法，事故树方法不仅可以定性分析驾驶风险的原因，而且可以定量预测驾驶事故的可能性^[11]，从而在理论分析的基础上，探讨有效预防引航事故、确保引航安全的对策。

1) 顶上事件。一般是指所要分析的目标。在选择上层事件时，研究人员需要了解事故的全过程、事故的可能性（概率）和严重程度，探讨引发事故的风险因素。然后依据引发事故风险点程度，确定具体发生的事件类型。

2) 顶上事件的产生原因。在完成第一步确定顶部事件后，要尽可能详细地发现可能导致事故的几个直接原因。在确定顶部事件原因的过程中，可以进行现场调查或问卷调查。

3) 绘制事故树。在确定顶部事件并分析事故原因后，借助与事故树相关的逻辑语言和符号，将它们按照一定的逻辑顺序串联起来，随后进行多次迭代，直到获得最基本的原因，以完成事故树的设计。在设计过程中，上层和下层之间有两种逻辑语言：a) “与门”表示上层事件只能在次要原因同时存在时发生。（b）“或门”是指当存在较小的原因时，将发生较高的事件。在编制事故树的过程中，应合理使用相关的逻辑语言，准确分析事件过程中的风险原因。

4) 仔细筛选绘制完成的事故树。审定事故树是事故树分析方法的最后一步，也是决定事故树准确性的关键一步。一方面要确定层级顺序下结果的准确性及密切性；另一方面，要反复推敲事故树内在关系，分析造成顶上事件的原因是否符合工作实际，最后完成事故树分析。

3 长江下游港口水域引航安全事故树分析

本文采用事故树方法对长江下游港口水域引航工作进行安全评估，已达到安全引航的目的。

以2010—2019年长江下游张家港水上交通引航安全事故为例，分析导致事故发生的原因，防止二次事故的发生。从表1可以看出，撞击事故和搁浅事故分别占事故总数的38%和21%，是引航过程中主要事故发生类型。长江下游港口水域附近渔船的比例较大，这对引航员来说是一个潜在的风险。一方面，渔船驾驶员容易忽略航行规则和光学声学标志，船舶操作失误容易导致撞击事故的发生；另一方面，引航员无法准确把控他船的航行轨迹等过失，也极易导致撞击事故的发生。对于搁浅事故，主要原因在于长江下游港口水域复杂的交通流，航道复杂，特别是枯水期，航道狭窄。

表1 2010—2019年长江下游张家港水上交通引航安全事故种类和比例

撞击	搁浅	设备损坏	风浪流	触礁	火灾	自沉	其他
38%	21%	10%	7%	1%	9%	5%	9%

针对上述事故，对长江下游港口水域引航风险进行预先分析，建立长江下游港口水域通航环境安全系统事故树，如图3所示。

该事故树以引航安全事故T为顶事件；由于撞击和搁浅所占总事故数的比例最大，以造成撞击和搁浅的直接原因船舶操作过失A1、引航员过失A2、复杂交通流A3为一层事件。

采用风险识别方法对一层事件直接原因追溯风险源，以本船原因B1、他船原因B2、拖轮原因B3、引航行为不足B4、合作关系不足B5、环境条件恶劣B6、航道码头问题B7为二层事件。

采用风险识别方法对二层事件直接原因追溯风险源，以航道条件不足C1、航道密度大C2为三层事件。

最后采用风险识别方法对三层事件直接原因向下追溯风险源，得到多个基本事件，分别为船员过失X1、船舶故障X2、他船失误X3、他船违

章 X4、拖轮操作失误 X5、拖轮违章 X6、引航经验不足 X7、避让行为过失 X8、应急处理过失 X9、通信与合作过失 X10、瞭望疏忽 X11、航道

宽度不足 X12、航道水深不足 X13、通航条件不足 X14、风浪流 X15、能见度低 X16、航道弯度复杂 X17。

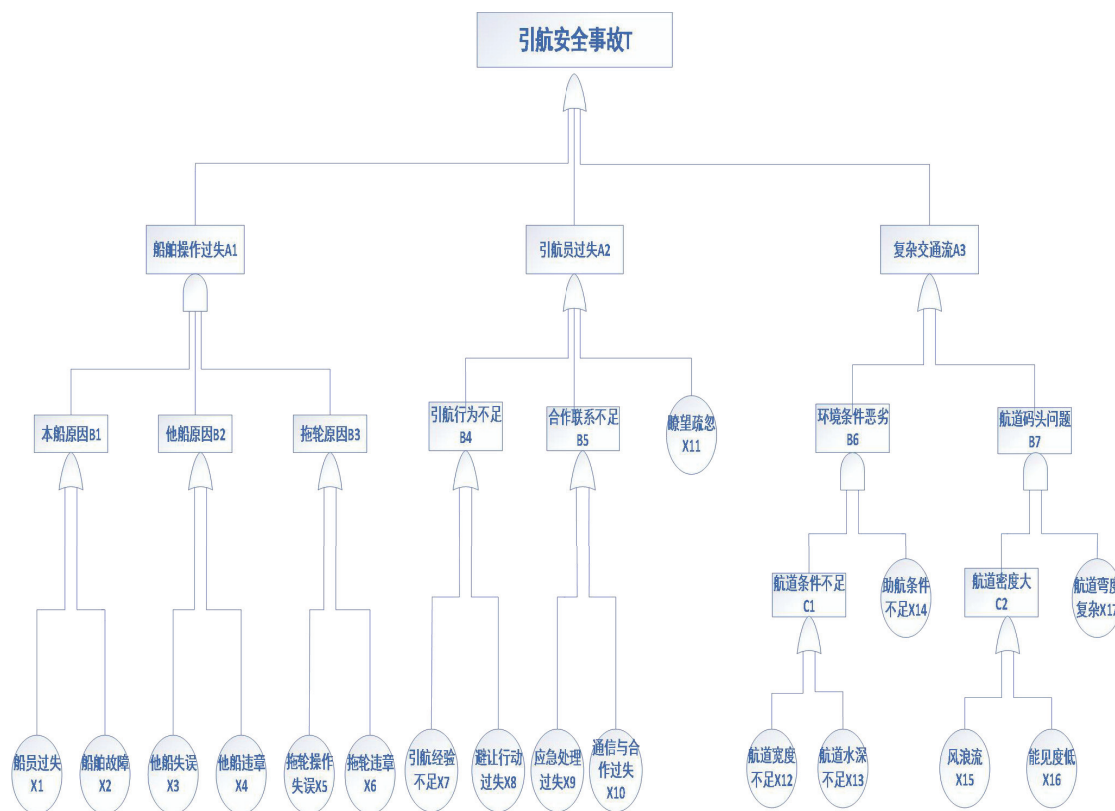


图3 引航风险事故树

4 最小割集的求解

对长江下游港口水域引航作业风险进行定性分析，旨在寻找引发长江下游港口水域引航操作风险原因事件的组合，这些信息有助于海事部门发现长江下游港口水域引航工作过程中的潜在风险和薄弱环节，提前采取预防和改进措施。长

江下游港口水域引航作业风险评估通过求解最小割集的方式进行研究。寻找最小割集的算法有很多种，一般常见的是 Semanderes 算法和 Fussell-Vesely 算法。本文根据港口风险的特点，采用 Semanderes 算法求解最小割集。

$$\begin{aligned}
 T &= A1 + A2 + A3 \\
 &= B1B2B3 + B4 + B5 + X11 + B6 + B7 \\
 &= (X1 + X2)(X3 + X4)(X5 + X6) + X7 + X8 + X9 + X10 + X11 \\
 &\quad + C1X14 + C2X17 \\
 &= X1X3X5 + X1X3X6 + X1X4X5 + X1X4X6 + X2X3X6 + X2X4X5 \\
 &\quad + X2X4X6 + X7 + X8 + X9 + X10 + X11 + (X12 + X13)X14 \\
 &\quad + (X15 + X16)X17 \\
 &= X1X3X5 + X1X3X6 + X1X4X5 + X1X4X6 + X2X3X6 + X2X4X5 \\
 &\quad + X2X4X6 + X7 + X8 + X9 + X10 + X11 + X12X14 + X13X14 \\
 &\quad + X15X17 + X16X17
 \end{aligned}$$

对数据进行层级迭代，运用集合运算规则进行简化，简化结果为：

{X7},{X8},{X9},{X10},{X11},{X12,X14},{X13,X14},{X15,X17},{X16,X17}

经分析,造成引航风险的主要因素有:引航经验不足 X7、避让行为过失 X8、应急处理过失 X9、通信与合作过失 X10、瞭望疏忽 X11、航道宽度不足 X12、航道水深不足 X13、通航条件不足 X14、风浪流 X15、能见度低 X16、航道弯度复杂 X17。在不存在单事件最小割集的情况下,通航条件不足 X14、航道弯度复杂 X17 在不同的最小割集中出现的次数最多。

5 长江下游港口水域引航风险分析

基于以上分析,本文应用事故树方法对长江下游港口水域引航工作存在风险进行研究,利用最小割集求解,得出通航条件和航道弯度复杂是引航安全最大影响因素:

5.1 航道宽度的风险分析

根据相关统计结果,当航道宽度增加一倍时,船舶碰撞概率将减少到原来的一半。航道宽度受限是船只偏航的主要客观原因。因此,我们可以使用“航道最窄部分的最大长度(m)/宽度(m)”的指标值来表示该因素对长江下游港口水域水道船舶交通安全的影响。根据评价标准,航道长宽比值 20 以下为低风险,20-50 为较低风险,50-100 为一般风险,100-150 为较高风险,150 以上为高风险。长江下游港口水域代表船队通航所需的直线航段不低于 400 米,实行分边通航所需的直线段航道尺度应不低于 200 米,航道长宽比在 60-70 之间,航道宽度的风险程度为“一般”。

5.2 航道水深的风险分析

若航道水深较浅,船舶航行会受到限制,隐藏风险点突出,容易引发上岸事故,可能使航道安全暴露于危险之中。我们可以使用“航道水深值”来表示该因素对长江下游港口水域引航安全的影响。根据评价标准,航道水深差在 2 米以下为低风险,在 2-3 米为较低风险,在 3-4 米为一般风险,4-5 米为较高风险,5 米以上为高风险。长江下游港口水域航道水深跨度比较大。最浅处 4 米,最深处 10 米以上,差异明显,在多山丘矾头控制的河道,洪水期常产生回流、旋涡及花水,通航环境复杂。航道水深对通航安全的风险程度为“高”。

5.3 航道弯曲度的风险程度

一般来说,弯道航行的风险大于直道航行的风险。船舶通过不平整航线时,方向角是主要的

潜在风险因素。根据评价标准,转向角在 5° 以下为低风险, $5-10^{\circ}$ 为较低风险, $10-15^{\circ}$ 为一般风险, $15-30^{\circ}$ 为较高风险, 30° 以上为高风险。长江下游港口水域转向角在 $15-30^{\circ}$ 之间,最大转向 30° 。航道弯曲方向角属于“较高”风险水平。

5.4 航道交叉状况的风险分析

航道交叉也是潜在风险因素之一。我们使用“主航道和次航道之间最大交叉角”来描述该因素对长江下游港口水域引航安全的影响。根据评价标准,交叉角在 $20^{\circ}-30^{\circ}$ 为低风险,在 $30^{\circ}-45^{\circ}$ 为较低风险,在 $45^{\circ}-60^{\circ}$ 为一般风险,在 $60^{\circ}-70^{\circ}$ 为较高风险, 70° 以上为高风险。长江下游港口水域主流向与长江主流向成角约为 70° 以上,港口交汇水域船舶种类复杂,船舶流量增加且交叉穿梭频繁,事故险情多发生在港口交汇水域,交叉状况的风险程度为“高”。

5.5 交通密集水域流量的风险分析

港口船舶交通流量越大,船舶交叉会遇率越高。因此,我们可以使用“单位时间(天)进出港船舶数量”指数来表示该因素对长江下游港口水域引航安全的影响。从长江下游的地理位置可以看出,港口附近水域习惯航路较为密集,船舶交通流量大,日均交通流量约为 30.0 艘次,主要以货船和渔船为主。港口养殖区较多,渔船进出港口较为频繁,并且渔船机动性大、活动无规律,风险性较大。交通流量的风险程度为“较高”。

5.6 障碍物状况的风险分析

障碍物会对航行安全产生影响,障碍物的种类多少以及各航道之间的距离与航行安全相关程度较大。依据评价标准,存在 1 种碍航物为低风险,1-2 种为一般风险,2-3 种为较高风险,存在碍航物 3 种以上为高风险。长江下游港口附近水域江面宽,水流缓,易形成许多洲滩;在港口附近水域的放宽段、过渡段,在枯水期常易形成碍航浅滩。礁石、太子矾、搁排矾是主要的碍航物,对船舶进出港威胁较大。障碍物状况的风险程度为“较高”。

6 长江下游港口水域降低引航风险措施

近些年来,长江下游港口水域事故频发。导致港口作业风险的因素很多,并且各因素之间的关系复杂,相互影响,相互制约,长江下游港口水域引航作业中的潜在风险也变得尤为突出。本

文采用基于事故树分析的方法构建了长江下游港口水域引航安全风险分析模型,找出可能导致引航风险的原因,并进一步利用最小割集法进行求解,对该水域航道宽度、航道水深、航道弯曲度、航道交叉状况、交通密集水域流量、障碍物状况等进行风险分析。根据分析结果,提出如下降低风险措施:

1) 在长江下游水域港口航道狭窄水域,航行环境复杂多变,应完善驾引人员培训体系,提高驾引人员的应变能力,以应对各种突发状况,全面掌握航行环境信息,提高自我防范意识,确保在复杂航道中的安全操作。

2) 长江下游港口水域有着明显的差异,水深跨度大,驾引人员应对实际可利用的航道水深进行合理评估,准确计算深、浅水航道。必要时适当减载,调整吃水通过浅水区。

3) 驾引人员应对长江下游港口水域所有弯曲航道进行分析和研究,在弯曲航段应适当减速,尽量航行在弯曲航道水流动力轴线附近,并及时警示他船注意,降低事故风险。

4) 在长江下游港口附近水域航道交叉处,驾引人员要密切注意过往船舶的航行动态,积极主动与过往船舶联系,沟通协调避让方案。主管机关应加强长江下游港口水域船舶安全管理,制定完善港口船舶安全航行规定,加大对违规船舶的处罚力度。

5) 主管机关应建立有效的协调调度机制,进行有效的船舶交通流组织,实时监控港口附近的交通流情况、通航状况等信息。例如通航尺寸、水流条件、天气条件、边界条件、通航设备、通航条件等。降低进出港口船舶的相互影响,保障引航安全。

6) 驾引人员应时刻注意水深变化,与水域附近碍航物保持一定距离,以免船舶搁浅、触损等事故的发生。

参考文献:

- [1] 郑雯君. 沿海港口水域污染及其治理对策 [J]. 上海环境科学, 1994,(4):1-3.
- [2] 李波. 港口安全生产预警管理研究 [D]. 武汉理工大学, 2003: 41-51.
- [3] 马春杰. 港口企业生产安全评价体系及预警研究 [D]. 河北农业大学, 2006: 11-14.
- [4] 张吉广, 蒙培奇. 港口安全评价的 AHP-模糊综合评判方法 [J]. 港口装卸, 2002, (5): 24-27.
- [5] 张德海, 刘德文. 物流服务供应链的事故树分析及优化 [J]. 企业管理, 2009, (14): 175-177.
- [6] 杨太华, 郑庆华. 基于事故树方法的项目安全风险分析 [J]. 系统管理学报, 2009, (10): 511-515.
- [7] Center for Chemical Process Safety. American Institute of Chemical Engineers. Chemical process quantitative risk analysis[M]. New York.1989.
- [8] 王振庭, 林少芬, 郑青榕, 等. 基于模糊事故树法的船舶气体运输储罐可靠性分析 [J]. 中国水运, 2009, (1): 9-10.
- [9] 刘前祥. 长江江苏段引航风险应对措施研究 [J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(05): 24-25.
- [10] 高等院校安全工程专业教学指导委员会编. 安全系统工程 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
- [11] 马飞. 综合安全评估在船舶引航安全评估中的应用 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008.

Research on Pilotage Safety Evaluation of Port Waters in the Lower Reaches of the Yangtze River based on FTA

HOU Hua—bo

(Weihai Port Pilot Station, Weihai264200, China)

Abstract: With the rapid development of the inland waterway transportation industry, the flow of ship traffic has increased. With the development of intelligent ships, ships are developing towards large-scale, and the traffic density of inland ports is increasing. Pilotage safety has become a hot research topic in the shipping industry. In order to improve and enhance the safety of ship pilotage operations, this paper analyzes the factors that affect the pilotage operations of ships in the port waters of the lower reaches of the Yangtze River, and deeply analyzes the causes of pilotage accidents. Qualitative analysis of common accidents using FTA. Under the framework of fault tree analysis (FTA), the minimum cut set is obtained, the navigation safety of ships piloting in the port waters of the lower reaches of the Yangtze River is scientifically and effectively evaluated, and countermeasures and suggestions are put forward. This is of great significance for reducing ship accidents and promoting the efficiency of pilotage in port waters in the lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: port waters in the lower reaches of the Yangtze River; pilotage safety; fault tree analysis (FTA); minimum cut set; safety evaluation

(上接第 11 页)

4 结束语

大型油船靠泊日照港实华油 7 泊位前,应根据当时的潮流、通航环境、VLCC 的操纵性能,制定完整的引航计划,并将所有的风险因素考虑在内。引航员和船方、交管、拖轮、港调等要密切合作,确保大型油轮安全、平稳靠泊。

参考文献:

- [1] 房希旺. 船舶操纵 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2019.9.
- [2] 张波, 徐建豪. 大型油船引航安全探析 [J]. 中国水运, 2019, (06): 30-31.
- [3] 张照斌. 实华二期码头引领 VLCC 的几点体会 [J]. 中国水运, 2015, (02): 64-65.
- [4] 刘凤文, 杨洪海. 大型油船安全靠泊东营港中海油二号泊位操纵 [J]. 航海技术, 2015, (04): 22-24.
- [5] 陈利忠. 重载 VLCC 进靠大榭实华码头的操作 [J]. 中国水运, 2011, (03): 36-37.
- [6] 张静. VLCC 靠泊大榭实华码头 3# 泊位操纵探索 [J]. 中国水运 (下半月), 2016, 16(02): 3-5.

VLCC Pilotage Operation at Shihua-No7 Berth in Rizhao Port

XU Guang—hong, TENG Hao, JIN Yong—fa

(Rizhao Pilot Station, Rizhao 276826, China)

Abstract: The VLCC pilotage is a high-risk operation, especially in the Lanshan port area, where the tide is fast, the navigation density is high, and sometimes the fishing boats are seriously obstructing the navigation, which makes the VLCC pilotage operation from the anchorage to the berth full of risks. In this paper, combined with the maneuvering characteristics of VLCC and the tidal characteristics of Lanshan port area, taking the berthing of M.T "EAGLE VERONA" as an example, it will discuss the pilotage operation of VLCC berthing at Shihua No. 7 berth.

Keywords: VLCC, Shihua No. 7 berth, pilotage operation