

大型船舶靠离泊知识库构建与实现

方昊¹, 王海翔², 柯冉绚¹

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 南通港沿海港区引航站, 江苏 南通 226000)

[摘要] 为了减轻船舶驾引人员的工作压力, 同时提高大型船舶靠离泊作业效率, 收集、汇总大型船舶靠离泊知识, 结合大型船舶靠离泊特点和影响因素, 以靠泊过程为重点, 参考知识库相关理论, 使用 Visual Prolog 初步构建大型船舶靠离泊知识库。以引航员和拖轮配置知识子库和环境知识子库为例进行初步演示, 结果表明该知识库可为大型船舶靠离泊安全提供保障。

[关键词] 知识库; 构建; 大型船舶; 靠离泊; 辅助决策演示; 安全保障

[中图分类号] U 69

Construction and Implementation of a Knowledge Base for Berthing and Unberthing of Large Vessels

FANG Hao¹, WANG Haixiang², KE Ranxuan¹

(1. Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Nantong Port Coastal Harbour Pilotage Station, Nantong 226000, China)

Abstract: To ease the workload of ship's offices and pilots, and to enhance the efficiency of berthing and unberthing of large vessels, this study aims to consolidate scattered knowledge into a specialized repository. By emphasizing the berthing process, considering the distinct attributes and influential factors of berthing and unberthing large vessels, and drawing upon relevant theories on knowledge base, Visual Prolog is utilized to construct a specialized knowledge base. Initial simulations are carried out using sublibrary for the configuration of pilot and tugboat as well as for environment, the results indicate that the knowledge base is able to provide safety assurance to the berthing and unberthing of large vessels.

Keywords: knowledge base; construction; large vessel; berthing and unberthing; decision-making support; safety assurance

0 引言

海上运输是全球经济的命脉, 占全球运输的 80% 以上^[1]。海上运输作业涉及许多操作, 如航行、锚泊、靠离泊、装卸货和港口操作等^[1]。研究表明, 超过三分之一的集装箱船事故发生在港口附近^[2]。在船舶操纵中, 对于船舶驾引人员来说, 靠离泊操纵是最具挑战性和压力的环节之一, 靠离泊过程中不仅受气象水文的影响而且还受港口水域、船舶性能、船舶操纵等的影响^[3]。因此, 建立一个有效的靠离泊知识库可以辅助船舶驾引人员决策, 从而保障靠离泊安全和提高靠离泊效率。

[收稿日期] 2023-10-24

[基金项目] 国家重点研发课题 (2021YFB3901505)

[作者简介] 第一作者: 方昊, 主要从事交通运输规划与管理方向。通信作者: 柯冉绚, 教授, 从事交通运输工程、创新工程方向研究。

知识库是存储、组织和处理知识, 以及提供知识服务的重要知识集合, 是知识库系统、专家系统、决策支持系统等一系列人工智能系统的关键和核心^[4]。目前, 已有学者对知识库在航运业中的应用进行了研究, 并取得了相关成果。如有: 李丽娜等^[5]针对上海港航行水域船舶密度大且船舶类型复杂等特点, 构建上海港水域船舶避让决策知识库; Zhang 等^[6]用船舶 AIS 数据, 结合良好的航海技术和海员的日常实践做出防撞决策, 建立行为知识库, 构建场景相似性模型, 根据船舶位置、运动趋势和碰撞风险对相似场景进行测量和匹配, 形成避碰路径; 郭健等^[7]建立了内河渡船碰撞危险预警等级量化几何模型, 结合专家避让操纵知识库, 运用船舶拟人智能避碰决策的基础模型, 设计渡船预警和避碰决策算法流程; Zheng 等^[8]提出了一套适用于多目标船舶优化的设计知识提取方法, 对不同工况下船型线的优化进行了研究。

Visual Prolog 指可视化逻辑程序设计, 是基于 Prolog 语言的可视化集成开发环境的^[9], 旨在将其与面向对象编程 (OOP) 和图形用户界面 (GUI) 开发相结合。Visual Prolog 在专家系统、人工智能、自然语言处理、知识表示和知识库管理等领域得到广泛应用, 常用于开发具有复杂逻辑和规则的应用程序, 如医疗诊断系统、专家咨询系统等。

关于在航运业的知识库研究, 国内学者大多集中在船舶避碰和船舶设计领域。然而, 作为航次过程中最危险的靠离泊过程, 其知识库的构建能辅助船舶驾引人员决策, 而关于靠离泊知识库, 国内暂时未见。因此, 本文拟用 Visual Prolog 开发软件构建大型船舶靠离泊知识库。

1 大型船舶靠离泊问题描述

1.1 大型船舶操纵特点

由于大型船舶的方形系数较大、长宽比较小及吃水深等因素, 大型船舶的靠离泊操纵特点与一般船舶明显不同。大型船舶的惯性大, 在停止后重新启动需要较长的时间, 一旦开始运动又难以迅速停止。大型船舶靠泊时速度一般较低, 空载时受风的影响较大, 重载时受水流的影响较大, 同时还受浅水效应和窄水的影响, 受力情况比较复杂^[10]。此外, 大型船舶的航向稳定性和应舵性相对较差, 因此很难操纵。余速、靠拢角和横距的控制是决定靠泊能否成功的关键因素, 一旦操作不当, 便可能引发事故, 从而造成严重的生命和财产损失。正因如此, 大型船舶在靠离泊操纵时, 必须格外谨慎小心, 要采取周密的计划和严谨的操作, 以确保船舶安全平稳地停在泊位上。

1.2 大型船舶靠离泊过程分析

从船舶操纵特点来看, 大型船舶靠泊可分为两个阶段: 第一阶段是指船舶从离开航道开始至抵达泊位前沿水域的运动过程, 该阶段是船舶抵达泊位的过程, 故简称为“抵泊过程”; 第二阶段是指船舶从泊位前沿水域向码头靠拢的运动过程, 该阶段是船舶靠岸的过程, 故简称为“靠岸过程”^[11]。由此, 本文定义大型船舶抵达泊位前沿水域距离泊位 1~2 n mile 称为“抵泊过程”, 距离泊位 1~2 n mile 到完成靠泊称为“靠岸过程”。

根据引航员和船长经验, 距离泊位 2 n mile 时, 余速应控制在 4 kn 以下; 距离泊位 1 n mile 时, 余速应控制在 2 kn 以下; 距离泊位一个船长时, 余速应控制在 1 kn 以下^[12]。LNG 船舶要求更高, 一般要求法向靠泊速度低于 5 cm/s, 靠泊角度小于 5°^[13]。对于大型船舶而言, 在靠岸过程中, 由于船速较低, 船舶基本失去舵效, 余速、靠拢角和横距都需要拖轮配合控制。

此外, 船舶驾引人员还应充分考虑自然条件是否满足靠泊要求, 若此时不满足靠泊条件, 应停止靠泊, 前往附近锚地等待。当满足靠泊要求时, 船舶驾引人员应当根据泊位位置、船舶位置和环境条件选择靠泊方式。顶流靠泊风险系数相对较小, 船舶也易于操纵, 是通常条件下的常规靠泊方式^[14]。船舶需要掉头时, 应在回旋水域有拖轮配合下进行掉头操作。完成掉头后再在拖轮的配合下完成靠泊, 最后完成系泊。大型船舶离泊操纵比靠泊操纵更容易, 多采用掉头离泊, 即先利用首尾拖轮将船拉开一定的横距, 然后减小船首拖轮的拖力控制船头外扬, 在确保船头安全的情况下, 指挥船尾拖轮

加大拖力，使船尾尽快远离码头。大型船舶靠泊和离泊流程分别如图 1 和图 2 所示。

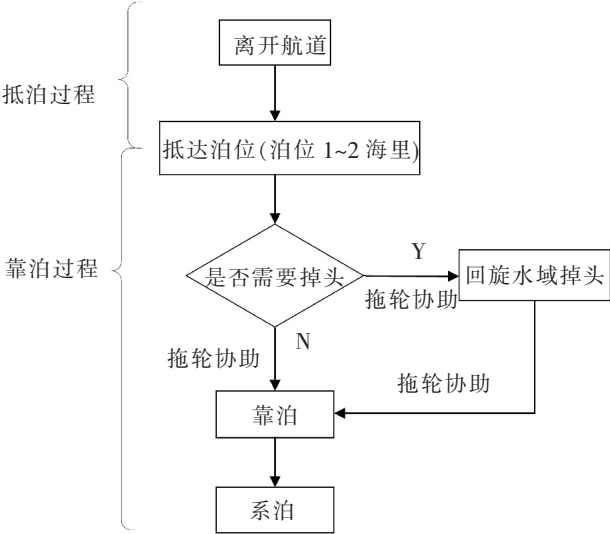


图 1 大型船舶靠泊流程

Fig.1 Large ship berthing process

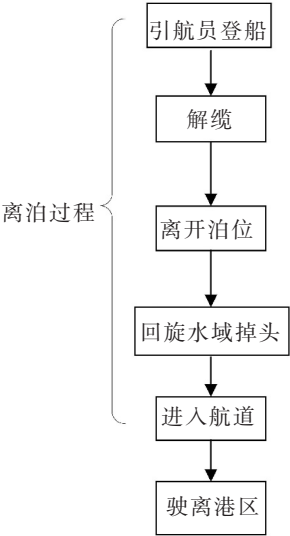


图 2 大型船舶离泊流程

Fig.2 Large ship unberthing process

2 知识库理论研究

2.1 知识获取

知识的获取通常要经历五个阶段，即确定问题阶段、概念化阶段、形式化阶段、实现阶段、测试阶段^[15]。这几个阶段密切相关，其相互关系如图 3 所示。

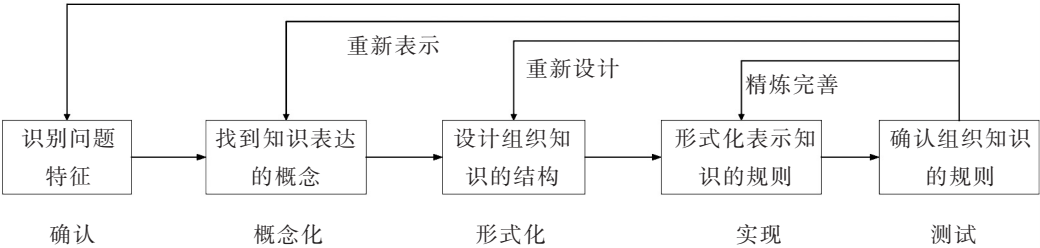


图 3 知识获取过程

Fig.3 Knowledge acquisition process

按照获取知识的自动化程度不同，知识获取可以分为自动获取和非自动获取两种方式^[16]。非自动获取知识则是指通过人工手段获取知识，主要依赖于人类的观察、研究、学习和传授等手段获得，然后将获得的知识通过知识工程师用计算机语言表达出来。自动获取知识通常指通过计算机软件、机器学习算法等从大规模数据源中获取信息，这种方式主要依赖于计算机和网络技术，自动地从互联网、数据库、文档等数据源中提取、整理和归纳信息。

2.2 知识表示

知识表达就是知识符号化和形式化的过程。知识表示方法主要研究各种数据结构的设计，通过数据结构把问题领域的各种知识结合到计算机系统的程序设计过程，从而实现自动处理，并存储到领域知识数据库中，以便长期使用^[17]。适当的知识表示方法可以支持专家系统进行逻辑推理、模糊推理、概率推理等。它使系统能够根据已有的知识和规则进行推理，得出新的结论和决策。知识表示主要研究表达能力强而又方便处理的知识表示模式。适合于解决某一问题的知识表示方法，必须具有模块化、可理解性和便于推理等特性。

目前常见的表示法主要有谓词逻辑表示法、框架表示法、产生式规则表示法、语义网络表示法等。逻辑谓词表示法是一种基于谓词逻辑 (predicate logic) 的知识表示方法, 它是应用时间最长、最经典的知识表示方式。谓词逻辑是一种形式语言, 它具有丰富的表达能力, 因而可以表示大量的知识。框架表示法是一种基于槽位和值的知识表示方法, 它使用“框架”来描述领域中的实体和属性, 框架包含槽位和对应的值, 槽位表示实体的属性或特征, 值表示槽位的取值。产生式规则表示法是专家系统中最常用的知识表示方法之一, 它通过一系列“如果-那么”规则来描述知识, 每条规则包含一个条件部分和一个结论部分, 当条件满足时, 就可以根据规则得出相应的结论。语义网络表示法使用图形结构来表示知识, 用节点表示概念或实体, 用边表示它们之间的关系, 通过节点和边的组合, 可以描述知识之间的关联和层次结构。语义网络可以用于表示分类、关联和属性等知识。四种知识表示方法的优缺点如表 1 所示。

表 1 不同知识表示方法比较
Tab. 1 Comparison of different knowledge representation methods

优缺点	逻辑谓词	框架	产生式规则	语义网络
优点	自然性、准确性、模块性	统一性、自然性、模块性	自然性、一致性、完备性	自然醒、完备性、完全性
缺点	效率低下、难于管理	非清晰性、 一致性不能保证	效率低、解释能力局限性	非有效性、复杂性、 推理效率低

3 大型船舶靠离泊知识库构建

3.1 大型船舶靠离泊知识库结构模式

文献 [18] 调查了 1960—2018 年发生的 348 起危险货船靠泊事故, 使用有序 Logit 回归模型分析, 结果表明, 一些人为因素的特征, 如引航员的错误和其他违规行为, 以及天气、能见度、拖船数量、港口安全和应急机制, 对事故后果的严重程度有显著影响。因此, 大型船舶靠离泊知识库应包括自然条件 (潮汐、风、流、浪、能见度)、进出港航道条件、靠泊操作决策的判断、引航员和拖轮的配置、靠泊方式和靠泊时机选择、靠泊速度和靠拢角控制等。

根据大型船舶的靠离泊特点、港区航行流程和靠离泊流程, 可将大型船舶靠离泊知识库中的知识分为一系列子知识库, 如环境知识子库、引航员和拖轮配置知识子库、靠泊操作知识子库、系泊知识子库。每一个子知识库又可以根据包含的对象不同进一步划分, 形成若干相对独立的下一级知识库。靠离泊知识库根据不同的条件调用不同的知识子库从而做出相关决策推荐。大型船舶靠离泊知识库结构模式如图 4 所示。

3.2 大型船舶靠离泊知识获取

3.2.1 大型船舶靠离泊知识来源

大型船舶靠离泊知识主要来源 3 个方面: ①相关规范、标准、学术研究, 如《液化天然气码头设计规范》《海港总体设计规范》《船舶引航管理规定》等; ②经验知识, 如引航员、船长、港口管理人员的咨询和问卷调查等; ③实例知识, 如大型船舶靠离泊实例。

3.2.2 大型船舶靠离泊知识获取方法

大型船舶靠离泊是一个复杂的操作过程, 涉及多个因素。为了确保安全和合规性, 需要依据权威和可靠的信息源来获取相关知识。大型船舶靠离泊知识具有专业性和复杂性, 知识内容多, 覆盖范围广, 每个码头环境具有独特性, 自动知识获取方法并不适合靠离泊知识的获取。所以本文采用非自动知识获取方法, 通过人工方式从各个渠道抽取所需知识, 将其形式化和符号化, 形成大型船舶靠离泊知识的事实和规则库。

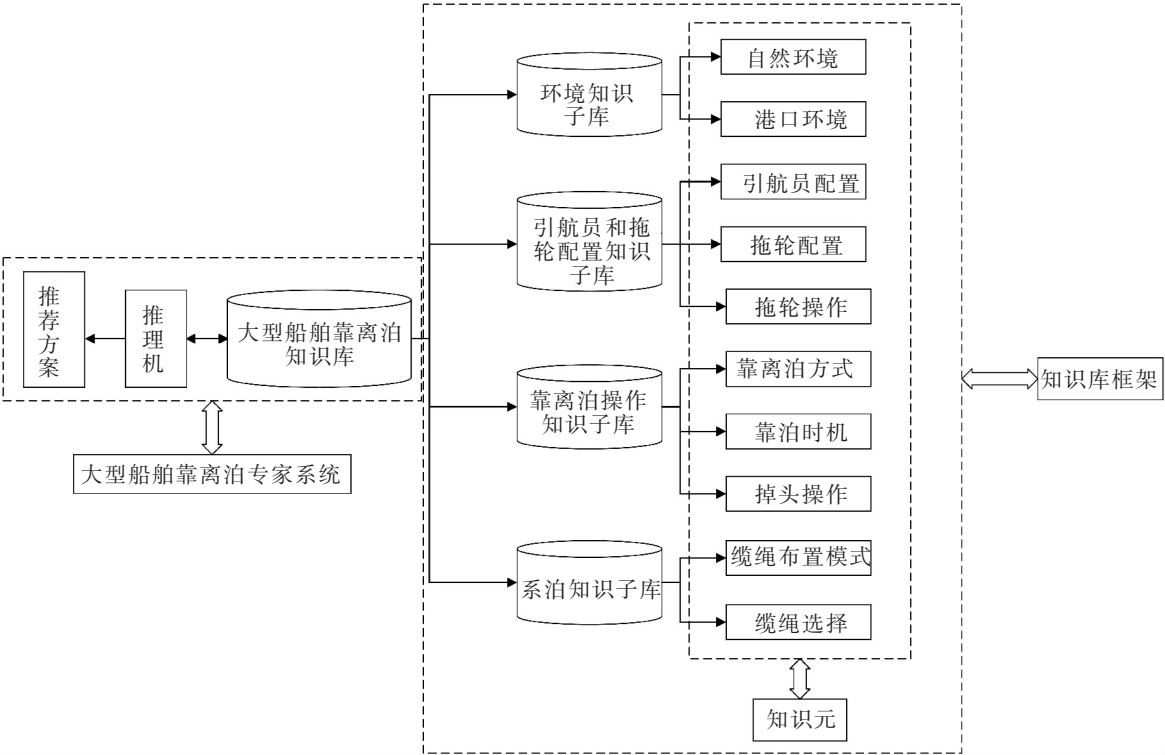


图 4 大型船舶靠离泊知识库结构模式

Fig.4 Structural model of knowledge base for large ships berthing and unberthing

3.3 大型船舶靠离泊知识表示

3.3.1 知识分类

本研究将大型船舶靠离泊知识分为规则性知识和经验性知识。规则性知识是指在港口或码头进行船舶的靠泊和离泊操作时应当遵循的一系列规则和程序。这些规范旨在确保船舶安全靠离泊，以及港口和船舶之间顺畅合作，具有强制性。经验性知识是根据领域专家过去经验的总结和汇总，没有强制性，但参考性强。

3.3.2 知识表示

LNG 船舶在作业的各个阶段应满足行业标准《液化天然气码头设计规范》（JTS165 - 5—2021）^[19]，即表 2 中的 LNG 作业条件标准。以靠泊作业阶段为例，基于 Prolog 语言的一阶谓词可以表达为：

berthing_ conditions (WindSpeed,
WaveHeight, Swell, Visibility, Cross-
Current, AlongCurrent): -
WindSpeed < 15,
WaveHeight < 1.2,
Swell < 1.5,
Visibility > 1000,
CrossCurrent < 0.5,
AlongCurrent < 1.0.

表 2 LNG 船舶作业条件标准
Tab.2 Standard for operating conditions of LNG vessels

作业阶段	允许风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	允许波高/m		能见度 /m	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
		横浪 $H_{4\%}$	顺浪 $H_{4\%}$		横流	顺流
进出港航行	≤ 20	≤ 2.0	≤ 3.0	≥ 2000	< 1.5	≤ 2.5
靠泊操纵	≤ 15	≤ 1.2	≤ 1.5	≥ 1000	< 0.5	< 1.0
系泊	≤ 20	≤ 1.5	≤ 1.5	-	≤ 1.0	< 2.0

拖轮对 LNG 的靠离泊至关重要，拖轮的配置和应用也必须遵守相关标准，如深圳港东部港区对 LNG 船舶靠离泊有严格要求（见表 3）。文献 [20] 给出的 LNG 船舶尺度分类，如 Q-Flex 船型长度为 315 m，小于 315 m 按照小于 Q-flex 级别，大于等于 315 m 按照大于等于 Q-flex 级别。基于 Prolog 语言表达 LNG 船舶拖轮配置规则如下所示：


```
ship_ type ( _ LNG).
: - discontinuous tugboat_ requirements/6.
tugboat_ requirements ( _ LNG, berth, 0, 315, 4, 4000).
tugboat_ requirements ( _ LNG, berth, 315, max_ length, 5,
4000).
tugboat_ requirements ( _ LNG, unberth, 0, 315, 3, 4000).
tugboat_ requirements ( _ LNG, unberth, 315, max _
length, 3, 5000)).
```

表 3 深圳港东部港区 LNG 码头拖轮配置标准
Tab.3 Tugboat configuration standards for LNG terminals in the eastern port area of Shenzhen Port

船舶类型	靠泊	离泊	功率
< Q-flex 级别	4	3	≥4000 HP
≥Q-flex 级别	4	3	≥5000 HP

注:1 HP =2.5 kW。

4 大型船舶靠离泊知识库实现

Visual Prolog 的程序结构包括谓词段、目标段、子句段和论域段这 4 个主要部分。
谓词段 (Predicate Section): 在谓词段中, 可以定义谓词 (类似于函数) 及其他一些全局的声明。
目标段 (Goal Section): 在目标段中, 可以定义主目标, 即在运行程序时将被执行的目标 (查询或其他操作)。

子句段 (Clause Section): 子句段包含谓词的具体实现, 也就是每个谓词的规则和逻辑。

论域段 (Domain Section): 在论域段中, 可以定义数据类型和领域特定的逻辑。这些逻辑在 Visual Prolog 程序中起着不同的作用, 帮助开发者组织和表示程序的逻辑关系和推理规则。

以图 4 大型船舶靠离泊知识库结构模式为例, 可以构建一个简易的知识库用户界面 (如图 5 所示)。

以引航员和拖轮配置知识子库和环境知识子库为例, 在完成了程序所需的所有 GUI 功能后, 需要插入代码。在拖轮配置代码中, 谓词段定义了谓词, 也就是它们的输入和输出参数, 如在拖轮配置中, 定义了两个谓词: “ship_ type” 和 “tugboat_ requirements”。子句段包含了谓词的实际实现, 也就是规则和事实, 如在拖轮配置中, 定义了船舶类型的事实和拖轮配置要求的规则。目标段包含了程序的入口点, 也就是要执行的主目标, 如在拖轮配置中, 定义了 “query_ tugboat_ requirements” 作为主目标。论域段定义了数据类型和领域, 如在拖轮配置中, 定义了 “ship_ type” 的数据类型为 “symbol”。该子库核心代码见图 6。

在完成图形用户界面设计和代码插入后, 用 Visual Prolog 语言实现引航员和拖轮配置知识子库的查询功能 (见图 7)。当用户在界面输入船舶类型、船舶长度、吃水、风力、水流和作业环节信息后, 会根据知识库中的知识进行匹配。例如, 用户输入船舶类型为 “LNG、长度 345、吃水 10.6、风力 13 m/s、水流 1.5 m/s”, 系统会将这些条件与知识库中已有的规则进行匹配, 最后给出的方案为 4-5000 的拖轮和高级引航员, 并给出拖轮的相关建议。其中 4-5000 表示为 4 条功率不低于 5000 HP (1 HP =2.5 kW) 的拖轮, 并会提醒用户该方案是满足相关标准下最低配置方案, 还可根据现场具体情况在此方案上进行调整。

按照同样的方法构建环境知识子库。环境知识子库主要功能是根据当前船舶自然环境给出是否满足作业条件的判断, 引航员可以通过交互界面选择作业阶段和输入当前环境条件, 系统即给出操纵的结论或建议。环境知识子库交互界面如图 8 所示。

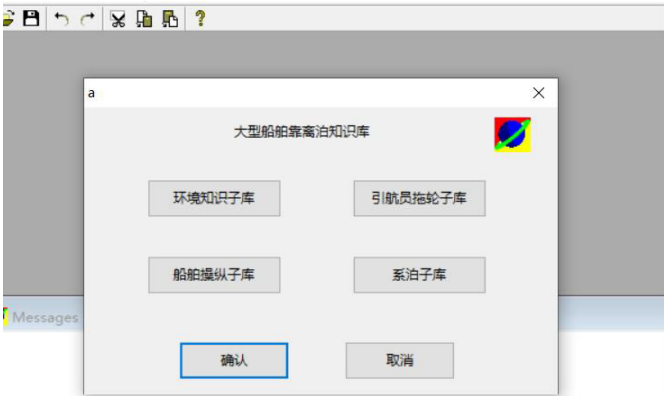


图 5 简易知识库用户界面
Fig.5 Simple knowledge base user interface

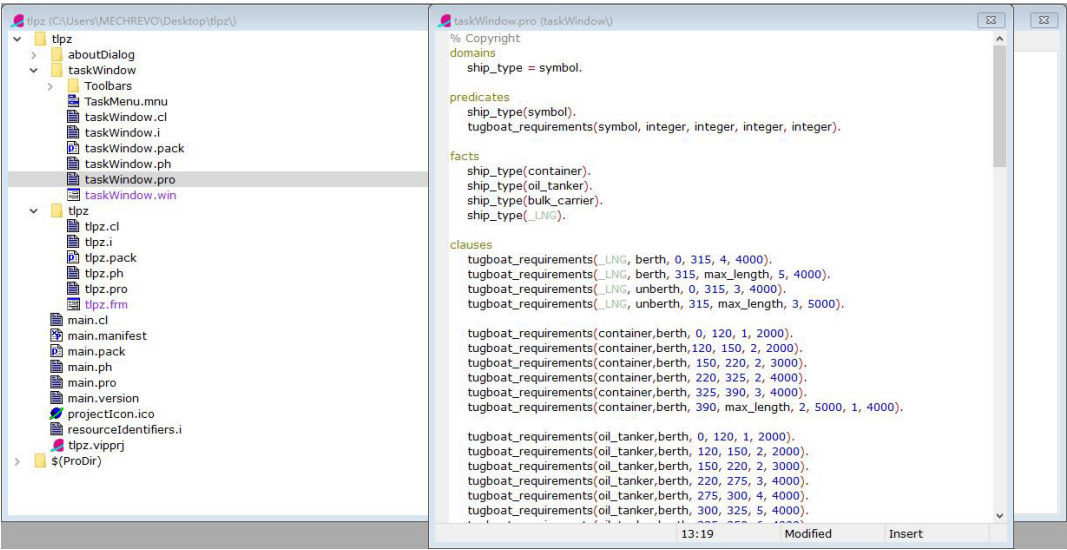


图 6 引航员和拖轮配置知识库部分核心代码

Fig.6 Part of the core code of the pilot and tugboat configuration sublibrary

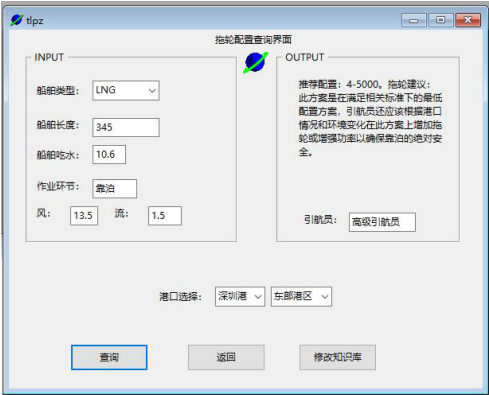


图 7 引航员和拖轮用户查询界面

Fig.7 Pilot and tugboat user query interface

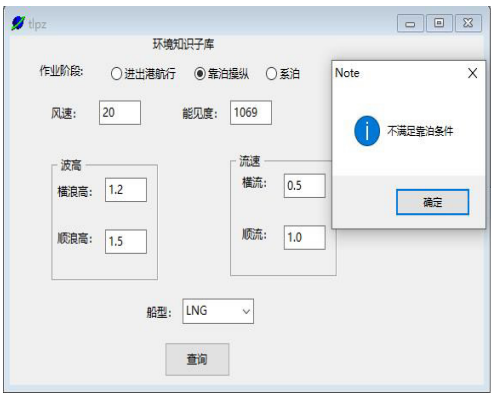


图 8 环境知识库交互界面查询

Fig.8 Environment sublibrary interactive interface query

5 结论

本文以保障大型船舶靠离泊安全和提高靠离泊决策效率为目的，以距离泊位 1 ~2 n mile 的靠岸过程为重点，对大型船舶靠离泊过程和影响因素进行分析，构建了一个高效的大型船舶靠离泊知识库框架体系。采用 Prolog 谓词逻辑表示法，利用 Visual Prolog 软件初步实现大型船舶靠离泊知识库的构建并实现知识库的可视化。在理论意义上，本文首次将知识库与船舶靠离泊相结合，构造高效的靠离泊知识库的框架体系。在实践意义上，开发大型船舶靠离泊知识库有利于保障靠离泊安全和辅助靠离泊决策。不同港口对拖轮配置标准不尽相同，本研究以深圳港东部港区 LNG 靠离泊的引航员和拖轮配置知识库和环境知识库为例，初步实现了知识库中的知识查询并给出相关方案，为后续研究大型船舶靠离泊安全保障和降低靠泊风险，开发大型船舶辅助靠离泊规划专家系统提供了一种可参考的研究思路。

[参考文献]

[1] KAPTAN M. Risk assessment of ship anchorage handling operations using the fuzzy bow-tie method[J]. Ocean Engineering, 2021, 236(1) :109500.
[2] GRUENEFELD U, STRATMANN T C, BRUECK Y, et al. Investigations on container ship berthing from the pilot's perspec-

- tive;accident analysis,ethnographic study,and online survey[J]. Trans Nav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation,2018,12(3):493-498.
- [3]SUYAMA R,MIYAUCHI Y,MAKI A. Ship trajectory planning method for reproducing human operation at ports[J]. Ocean Engineering,2022,266:112763.
- [4]张斌,魏扣,郝琦. 国内外知识库研究现状述评与比较[J]. 图书情报知识,2016(3):11.
- [5]董邢睿,陆悦铭,李丽娜,等. 上海港水域船舶避让决策知识库的构建[J]. 集美大学学报(自然科学版),2022,27(2):138-145.
- [6]ZHANG J,LIU J,HIRDARIS S,et al. An interpretable knowledge-based decision support method for ship collision avoidance using AIS data[J]. Reliability Engineering & System Safety,2023,230:108919.
- [7]郭健,李丽娜,高建杰,等. 内河渡船危险预警及避碰决策[J]. 中国航海,2020,43(3):7.
- [8]ZHENG Q,CHANG H C,LIU Z Y,et al. Design knowledge extraction framework and its application in multi-objective ship optimization[J]. Ocean Engineering,2023,280:114782.
- [9]雷英杰,邢清华,孙金萍,等. Visual Prolog 智能集成开发环境评述[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2002,3(5):39-43.
- [10]黄泽洋,邵哲平,潘家财,等. 基于 AIS 的大型船舶靠泊航速分布规律[J]. 中国航海,2016,39(2):55-58.
- [11]LU X,LI Y,XIE M. Preliminary study for motion pose of inshore ships based on point cloud:estimation of ship berthing angle[J]. Measurement,2023,214:112836.
- [12]倪巧光. 谈船舶靠泊中的速度和角度[J]. 航海技术,2005(2):1.
- [13]付海泉. LNG 船舶安全作业探讨[J]. 油气田地面工程,2020,39(4):5.
- [14]尤庆华,陈杰,胡甚平,等. 集装箱船舶顺流靠泊风险评估与操作要领[J]. 中国航海,2013,36(4):143-146.
- [15]武波,马玉祥. 专家系统[M]. 2 版. 北京:北京理工大学出版社,2001.
- [16]LEU G,ABBASS H. A multi-disciplinary review of knowledge acquisition methods:from human to autonomous eliciting agents[J]. Knowledge-Based Systems,2016,105:1-22.
- [17]NETZER M,ALEXANDER P,SCHLAGENHAUF T,et al. A domain knowledge-based approach for fault diagnosis[J]. Procedia CIRP,2023,118:163-168.
- [18]KHAN R U,YIN J,MUSTAFA F S,et al. Factor assessment of hazardous cargo ship berthing accidents using an ordered logit regression model[J]. Ocean Engineering,2023,284:115211.
- [19]中华人民共和国交通部. 液化天然气码头设计规范:JTS 165-5—2021[S]. 北京:人民交通出版社,2021.
- [20]高翔. 乘潮 LNG 船舶对航道通过能力的影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2021.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)