



# 液体散货码头在泊安全作业智能管控技术

刘国田<sup>1</sup>, 费华平<sup>2</sup>, 高云宝<sup>1</sup>, 孙庆峰<sup>1</sup>, 冒睿雯<sup>3</sup>, 史宏达<sup>2,4</sup>

(1. 烟台港集团有限公司, 山东 烟台 264000; 2. 中国海洋大学 工程学院, 山东 青岛 266100;

3. 海博泰科技(青岛)有限公司, 山东 青岛 266101; 4. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 目前国内液体散货码头的泊位安全管控仍依靠人工经验, 难以达到全程化、一体化、无人化要求, 船舶靠离和在泊作业环节存在诸多风险。随着液体码头专业化、大型化的发展, 安全作业管控需要在新概念上采取更为有效的措施。基于波浪的精细化预报, 提出一套液体散货码头的智能安全管控技术, 对船舶运动进行预测, 从而主动避险。提出船舶作业就绪度的概念, 并以此对在泊作业各影响因素进行指标赋权, 构建其安全评价模型, 得到在泊安全判据。结果表明, 该技术的应用为船舶安全作业窗口期的决策提供有力的科学依据。

**关键词:** 液体散货码头; 安全管控; 船舶运动预测; 船舶作业就绪度

中图分类号: U698.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0196-06

## Intelligent management and control technology of berthing safety operation in liquid bulk terminals

LIU Guotian<sup>1</sup>, FEI Huaping<sup>2</sup>, GAO Yunbao<sup>1</sup>, SUN Qingfeng<sup>1</sup>, MAO Ruiwen<sup>3</sup>, SHI Hongda<sup>2,4</sup>

(1. Yantai Port Group Co., Ltd., Yantai 264000, China;

2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

3. Hi-port-tech(Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266101, China;

4. Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Engineering, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** At present, the berth safety control of domestic liquid bulk cargo terminals still relies on manual experience, which is difficult to meet the requirements of full process, integration and unmanned, and there are many risks in ship berthing and unberthing operations. With the development of specialized and large-scale liquid terminals, safe operation control needs to take more effective measures on the new concept. Based on the refined prediction of waves, this paper proposes a set of intelligent safety management and control technology for liquid bulk cargo terminals to predict the ship motion, and avoids the risk actively. The paper puts forward the concept of ship operational readiness, assigns the index weight to the influencing factors of berthing operation, and builds its safety evaluation model to obtain the criterion of safety at berth. The results show that the application of this technology provides a powerful scientific basis for the decision-making of ship safety operation window period.

**Keywords:** liquid bulk cargo terminal; safety management and control; ship motion prediction; ship operation readiness

目前, 国内液体散货码头的安全生产管理多依靠传统的人工经验, 船舶靠离泊及装卸过程中仍存在较多不确定性, 现有风险管控手段存在反映不敏捷、数据不完备以及场景不明确等问题,

无法有效保障液体散货码头的生产安全。

一些学者针对相关问题进行了研究, 如孙国庆<sup>[1]</sup>通过分析港口安全行政管理、管理机制、法规制度和管理人员等方面的主要问题, 建议制定

收稿日期: 2023-05-25

作者简介: 刘国田(1968—), 男, 高级经济师, 从事港口运营与管理。

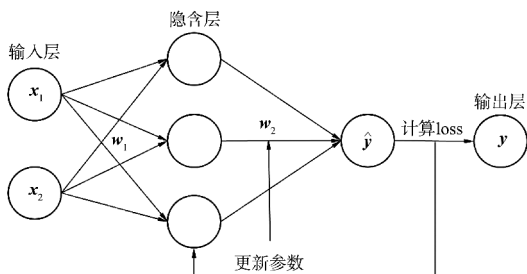
港口安全管理的长远目标和长效机制; 李晶<sup>[2]</sup>基于安全风险管理学原理对港口货物装卸作业进行全面的危险源辨识, 形成安全管控数据库; 陈刚<sup>[3]</sup>以海外某码头为例分析健康-安全-环境(HSE)管理中的安全风险, 通过风险识别、控制、评价等手段, 建立码头项目安全管理体系。在人员管理培训方面, 刘昌盛等<sup>[4]</sup>深入分析某液体散货公司安全培训调研数据, 提出更加高效、合理的培训机制, 降低人员环节的管控风险。

本文以烟台港某液体散货码头工程为例, 进行智能化安全生产管控技术的应用研究, 通过构建常靠船舶运动预测模型、作业就绪度评价模型, 给出靠泊船舶作业安全窗口期及调度决策建议, 实现液体散货码头的装卸全链条智能化安全管控, 为在泊作业调度决策提供有力的数据支撑。

## 1 技术原理

### 1.1 基于船舶运动预测的主动避险技术

全连接神经网络模型是一种简单高效的神经网络, 每一层都与后一层的所有神经元连接, 包括前向传播和反向传播两部分<sup>[5]</sup>。本文将波浪、系缆力、船型吨级等影响船舶运动的主要因素作为输入条件, 通过数值模拟与物理模型试验建立船舶运动响应数据集, 按照 7:2:1 的比例分别划分为训练集、验证集和测试集<sup>[6]</sup>, 采用随机梯度下降法(SGD)更新网络参数, 损失函数(loss)采用均方法, 即将预测值与真实值的均方误差作为损失值, 使模型向着损失值小的方向优化权重, 其原理见图 1。



注:  $x_1$ 、 $x_2$  为输入向量,  $w_1$ 、 $w_2$  为权值向量,  $\hat{y}$  为计算值,  $y$  为实际值。

图 1 全连接神经网络的原理

### 1.2 船舶作业就绪度评价

就绪度描述某项事物发展阶段, 用来反映其开展某项活动的各项条件和环境的成熟程度<sup>[7]</sup>。本文提出“船舶作业就绪度”的概念, 用于评价船载设施的就绪程度, 根据权重及设备工作限值得到船舶设备就绪度指标。本文选用 FCE 模糊综合评价法建立船舶作业就绪度模型, 步骤见图 2。

- 1) 确定评价指标, 选择能够反映油轮就绪度的各项指标, 构建因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 。
- 2) 通过专家访谈、问卷调查等方法, 确定各指标的权重  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。
- 3) 将用模糊数  $F_{uzz}(x)$  表示各指标的评价结果, 即将每个指标的评价结果从“完全不就绪”到“完全就绪”之间划分为多个等级并用隶属函数表示成隶属度值, 构成模糊综合评价矩阵。
- 4) 建立模糊综合评价模型, 确定单因素评判矩阵  $R$  和因素权向量  $W$ , 得出油轮就绪度的综合评价值。
- 5) 对结果进行解释和分析, 根据综合评价值对船舶作业就绪度进行判断, 提出调度策略。

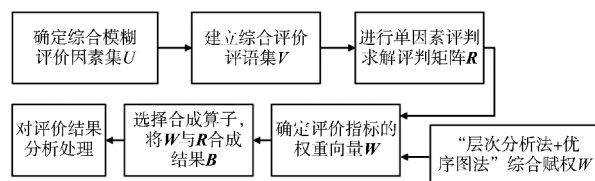


图 2 基于 FCE 模糊综合评价法构建船舶作业就绪度评价模型步骤

## 2 技术体系

### 2.1 技术路线

本文研究的技术路线见图 3。以船舶运动预测模型和作业就绪度评价模型为核心, 构建船舶运动模型和常靠船型运动响应数据库, 输入不同的海况、船型、系缆方式、缆绳张力等因素, 预测船舶未来运动姿态; 通过将船载设施、拖轮、管道、船员进行就绪度数值化, 建立船舶就绪度评价模型对船舶在泊作业的准备程度进行评价和预测, 最终给出船舶作业窗口期及安全管控辅助决策。

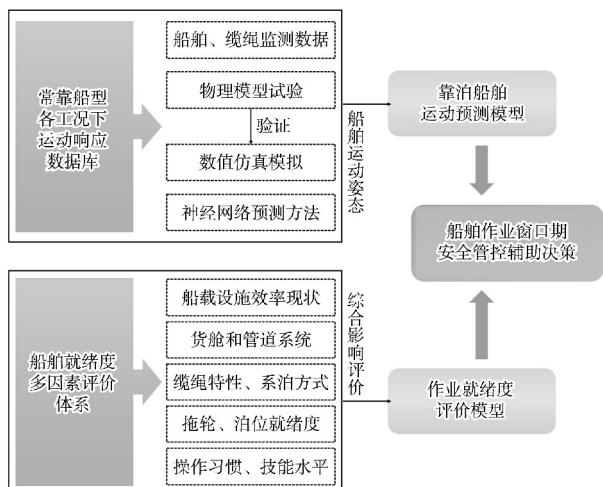


图3 液体散货码头智能化管控技术路线

## 2.2 靠泊船舶运动预测模型

进行数值模拟与物理模型试验生成数据集，充分考虑系泊船在实际波浪场中的运动响应及非线性多向不规则波的影响，得出纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇、艏摇数值。然后建立基于全连接神经网络的船舶运动预测模型。本文神经网络结构由输入层、输出层以及4层隐含层构成。其中输入层的参数为海况、船型、系泊方式、缆绳张力等主要影响因素。隐含层通过对输入层数据进行特征提取以及非线性变换，提高神经网络的泛化能力和学习能力。最后输出层将预测的结果输出，实现基于神经网络的船舶运动监测。神经网络结构见图4。

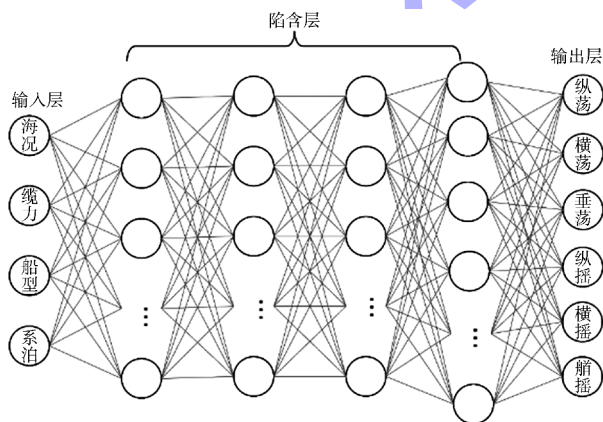


图4 神经网络结构

## 2.3 船舶作业就绪度评价模型

将油轮在泊作业过程中涉及的船泵、阀门、缆绳等设备、设施进行就绪度数值化。充分考虑

其使用年限、时间、损伤和效率现状，以及操作水平、决策习惯、精力集中度等人为因素的影响，结合货种性质、装卸方式，采用数值同化方法对整体设备就绪度进行加权评价。根据权重及设备工作限值得到船舶设备就绪度指标，准确预测船舶的在泊作业时间。

### 2.3.1 建立评价指标集

影响船舶作业效率的4个主要因素：等待时间、船舶状态、货种属性和船员因素，建立其因素集见图5。

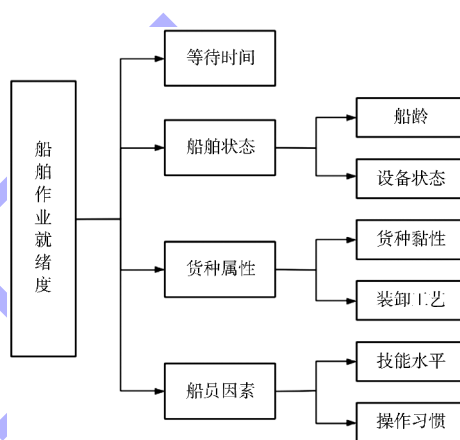


图5 影响船舶作业就绪度的因素集

基于以上影响因素建立如下评价指标集。其中一级评价指标集  $U$  表示船舶作业就绪度的评价指标集合，下设  $u_1$  表示船舶的等待时间； $u_2$  代表船舶，反映船舶的效率状况； $u_3$  代表货种，即油轮所运输的货物种类，不同货种装卸效率不同； $u_4$  代表船员，即船员的综合水平，反映船员的操作习惯和技能水平。二级评价指标集  $U_2$  表示船舶效率的评价指标集合， $u_{21}$  代表船龄， $u_{22}$  代表设备；二级评价指标集  $U_3$  表示货种的评价指标集合， $u_{31}$  代表货种黏性， $u_{32}$  代表装卸工艺；二级评价指标集  $U_4$  表示船员水平的评价指标集合， $u_{41}$  代表船员国籍， $u_{42}$  代表船员工龄。

### 2.3.2 确定各指标权重

通过现场调研和专家访谈确定一级评价指标  $U_1$  等待时间、 $U_2$  船舶、 $U_3$  货种、 $U_4$  船员的权重分别为  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ ；二级评价指标  $u_{21}$  表示船龄、 $u_{22}$  表示设备、 $u_{31}$  表示货种黏性、 $u_{32}$  表示装



卸工艺、 $u_{41}$  表示技能水平、 $u_{42}$  表示工龄和操作习惯,权重分别为  $a_{21}$ 、 $a_{22}$ 、 $a_{31}$ 、 $a_{32}$ 、 $a_{41}$ 、 $a_{42}$ 。

分别构造权重矩阵  $A = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4)$ 、 $A_2 = (a_{21} \ a_{22})$ 、 $A_3 = (a_{31} \ a_{32})$ 、 $A_4 = (a_{41} \ a_{42})$ , 其中权重矩阵  $A_2$  用于船舶状态的一级评判, 权重矩阵  $A_3$  用于货种属性的一级评判, 权重矩阵  $A_4$  用于船员的一级评判, 权重矩阵  $A$  用于船舶作业就绪度的综合评判。

### 2.3.3 建立模糊综合评价模型

首先建立一级模糊综合评判矩阵, 船舶备择集  $V' = \{1, 2, 3, \dots, n\}$  为参与评判的  $n$  艘船集合。影响船舶状态的各因素的单因素评价矩阵为  $R_2 = (r_{ij})_{2 \times n}$ , 则船舶状态的一级评判为  $B_2 = A_2 \cdot R_2 = (b_{21} \ b_{22} \ \dots \ b_{2n})$ ,  $B_2$  表示船舶状态对船舶备择集  $V$  的隶属度。同理求得货种属性  $B_3$ 、船员因素  $B_4$  对船舶备择集  $V'$  的隶属度。

然后建立二级模糊综合评判矩阵, 等待时间的一级评判为  $B_1 = (b_{11} \ b_{12} \ \dots \ b_{1n})$ , 其中  $b_{1j}$  表示第  $j$  艘船的等待时间评价,  $j \in (1, n)$ 。分别将等待时间的一级评判  $B_1$ 、船舶的一级评判  $B_2$ 、货种的一级评判  $B_3$  以及船员的一级评判  $B_4$  作为行, 组成二级评判的单因素评判矩阵:

$$R = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

综合评判结果为  $B = AR = (b_1 \ b_2 \ \dots \ b_j \ \dots \ b_n)$ , 其中  $b_j$  表示第  $j$  艘船的综合评定得分值,  $j \in (1, n)$ , 按综合评定得分值最大原则确定作业就绪度最高的船舶。

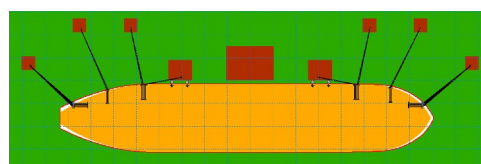
## 3 模型验证

### 3.1 模型设计

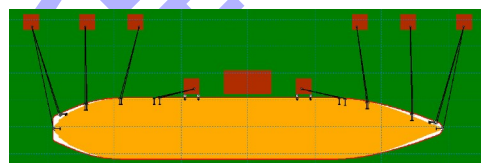
针对烟台港某液体散货码头到港船型和相应的船型和系缆方式, 根据需要开展系泊船舶运动的物理模型试验和数值模型, 见图 6。



a) 试验船舶模型



b) 30万吨级油轮数值模型



c) 15万吨级油轮数值模型

图6 常靠船舶物理模型与数值模型

通过物理模型试验分析不同装载量的船舶在各种水深和波浪条件下船舶运动量、缆绳拉力和船舶撞击力, 直接反映了各种因素影响下的船舶运动规律。针对不同方向、不同入射波高和周期波浪作用下系泊船舶运动进行系统的数值模拟分析, 得到更详细的运动响应数据并利用物理模型试验结果进行验证和修正, 取得较好的模拟效果建立码头常靠船舶模型和运动响应数据库, 基于码头局部精细化水文气象预报结果, 利用优化神经网络算法实现船舶运动量的有效预测, 并实时评估作业就绪状态。超前预测作业风险, 实现烟台港某液体散货码头船舶靠离泊及在泊作业的智能安全管控。

### 3.2 船舶运动预测效果验证

取某一船型的 9 组工况下运动自由度的试验值与预测值对比, 进行船舶运动姿态预测模型验证, 验证数据从纵荡、横荡、垂荡、纵摇、横摇、艏摇 6 个自由度分别进行验证, 分析结果见图 7。

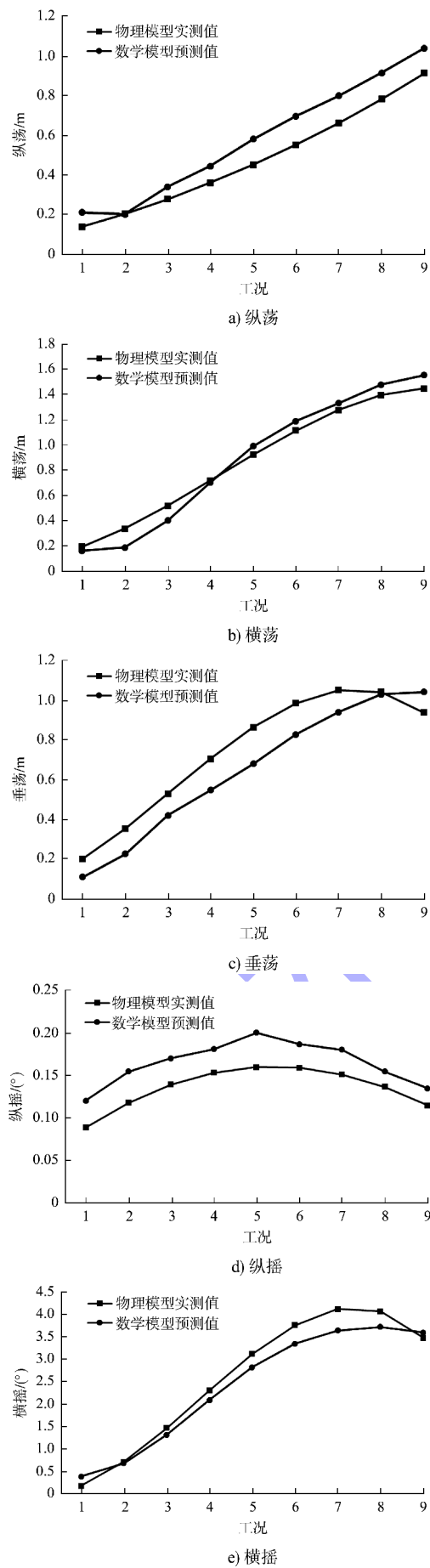


图 7 船舶运动姿态预测与实测数据对比

由图 7 可知，船舶运动姿态模型 6 个自由度预测数值均与实际值较为相近，运动趋势拟合较好，整体预测效果较为准确；结合码头安全生产管控人员的反馈，模型给出的预测数据可为船舶靠离泊和在泊作业提供量化的决策支撑。

3.3 船舶作业就绪评价

通过对码头前沿工作人员发放调查问卷、文献分析、专家咨询等方式，对各评价指标的权重进行赋值，并将权重值进行归一化处理，得出烟台港某液体散货码头就绪度指标的权重，结果见表 1。

表 1 船舶作业就绪度指标赋权结果

一级指标	一级权重	二级指标	二级权重
等待时间	0.4	-	-
船舶状态	0.3	船龄	0.72
		设备状态	0.28
货种属性	0.1	货种黏性	0.58
		装卸工艺	0.42
船员因素	0.2	技能水平	0.75
		操作习惯	0.25

由赋权结果可以看出，船舶作业就绪度一级指标就绪度各有差异，其中等待时间就绪度指标最高，表明船舶等待时间是主要影响因素，同时也是智能排产需要重点关注的领域。除此之外，船舶、货种、船员对船舶作业准备就绪程度均产生一定影响。通过分析各二级指标可知，船龄对于船舶作业效率有很大影响，主要体现在船上设备的使用保养情况，尤其是船泵的情况。同时，由于船舶维护、船员更换以及操作习惯等原因，

船载设备设施的状态也是考虑船舶作业就绪情况的重要因素。

根据该液体散货码头的船舶作业就绪度指标体系及测算方法,选取具有代表性的 11 艘船舶进行作业就绪度分析,见表 2,以此挖掘船舶作业管控的关键影响环节,为船舶作业窗口的决策提供依据。

表 2 不同船舶作业就绪度综合得分及各一级指标得分

船舶名称	综合得分		一级指标得分			
	得分	排名	等待时间	船舶状态	货种属性	船员因素
奥利斯	98.189	1	34.872	24.061	6.243	33.014
里奥	81.058	2	18.828	22.343	9.866	30.021
大庆 453	73.017	3	11.278	21.845	4.263	35.631
艾登	66.303	4	11.588	20.113	6.121	28.482
麦丽娜	65.015	5	14.704	19.487	6.161	24.663
埃斯比约	62.552	6	25.338	19.519	2.421	15.274
北海远望	61.962	7	10.584	13.461	7.291	30.626
永耀轮	56.373	8	20.158	18.833	4.277	13.105
欧力	40.778	9	6.628	12.887	2.613	18.650
瑞昇	38.443	10	11.441	13.811	2.379	10.811
新龙洋	37.653	11	8.202	11.856	2.379	15.215

分析表 2 数据可知,奥利斯在船舶作业就绪度综合得分最高,表明奥利斯号油轮的在泊作业准备程度领先于其他船次,奥利斯号油轮到港时间较早,待泊时间较长,在同等条件下应优先安排靠泊作业。一级指标得分中瑞昇号油轮的船员因素得分较低,仅为 10.811 分,原因是其船员所属国籍较多且技能水平参差不齐,一定程度上影响了船舶作业准备程度。

综上,船舶作业就绪度模型较为全面地考虑了影响船舶作业效率和在泊时间的各项因素,大幅减少了在泊作业时间,一定程度上提高了液体散货码头船舶作业的管控水平。

#### 4 结语

1) 水文预报准确性可为船舶运动预测提供精准的输入条件;运动预测模型可有效保障船舶作业安全,为在泊作业决策提供数据支持。

2) 本文提出“船舶作业就绪度”并建立对应的评价模型,确定影响船舶作业的因素及其权重,对待泊船舶靠离泊及接卸作业相关环节就绪情况进行分析并综合排序。评价结果为船舶泊位选择及靠离泊计划制定提供有效参考,为船舶作业窗口的选择提供了合理依据。

3) 基于船舶运动预测与船舶作业就绪度评价的液体散货码头安全管控技术应用成效显著,有效解决了船舶靠离与在泊作业的安全生产管控问题,提高了船舶作业效率。研究成果普适性强,对液体散货码头的管控技术应用具有借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 孙国庆. 港口安全管理现状分析及对策研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(7): 40-43, 1.
- [2] 李晶. 港口货物装卸作业安全风险管控研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2019.
- [3] 陈刚. 海外水运工程项目实施阶段的安全风险管理[J]. 水运工程, 2014(2): 11-14.
- [4] 刘昌盛, 周艳. 液体散货码头公司安全培训存在的问题及对策分析[J]. 价值工程, 2016(35): 55-57.
- [5] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A. Deep learning[M]. Cambridge: The MIT Press, 2016.
- [6] 王心, 姜琦, 魏东洋, 等. 水专项技术的分类及其就绪度评价[J]. 科技管理研究, 2017, 37(1): 69-74.
- [7] 孙月凤. 长江经济带城市数字经济发展的就绪度评价指标体系研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2020.

(本文编辑 王璁)