



# 基于桶式防波堤结构改造的 港区应急池可行性研究

许百强, 裴洪伟, 宋鑫

(连云港港口集团, 江苏连云港 222000)

**摘要:** 伴随沿海液体化工港区和石化产业基地的快速发展, 港区安全及环境风险防控要求日益严格。为充分利用既有基础设施, 做好港区溢油应急保障, 以连云港港徐圩港区东防波堤桶式结构基础为例, 通过解析桶体的空间特性与承载能力, 对既有东防波堤桶式基础上筒体结构进行部分功能改造, 将其改造为港区应急池, 构建港区内分区应急池系统, 用于紧急情况下收集储存港区公共管廊沿线可能泄漏的油料及各类废水, 减少对海洋环境的污染和生态破坏, 实现环评要求的事故废水截留能力。相比新建应急池, 可节约建设投资 78.5%, 缩短建设周期 66.7%, 节约用海面积 100%, 从建设投资、建设周期、安全环保、维护成本、快速响应等方面考虑, 具备可行性。该方法探索了港区基础设施“平急两用”运营管理模式, 为类似沿海工业港区安全及环境风险应急防控提供可借鉴的创新解决路径。

**关键词:** 桶式防波堤; 港区应急池; 平急两用; 桶式结构

中图分类号: U656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0097-08

## Feasibility study on emergency pool in port area based on renovation of bucket-type breakwater structure

XU Baiqiang, PEI Hongwei, SONG Xin

(Lianyungang Port Group, Lianyungang 222000, China)

**Abstract:** As the coastal liquid chemical port areas and petrochemical industrial bases develop rapidly, the requirements for safety and environmental risk prevention in port zones are increasing. To make full use of existing infrastructure and ensure emergency oil spill response in the port area, taking the bucket-type structure foundation of the east breakwater in Xuwei port area of Lianyungang Port as an example, the spatial characteristics and load-bearing capacity of the buckets are analyzed. Partial functional modifications are made to the existing bucket-type structure, transforming it into an emergency pool within the port area. This forms a zonal emergency pool system within the port, which is used to collect and store oil and various wastewater that may leak along the public utility corridor in emergencies. This helps reduce pollution and ecological damage to the marine environment, and meets the accident wastewater interception capacity requirements stipulated in the environmental assessment. Compared with building new emergency pools, this approach can save 78.5% of construction investment, shorten the construction period by 66.7%, and save 100% of sea area usage. Considering factors such as construction investment, construction period, safety and environmental protection, maintenance costs, and rapid response, this solution is feasible. It explores an operational management model for port infrastructure that serves both routine and emergency needs, providing an innovative solution for similar coastal industrial port areas to address safety and environmental risk emergency prevention and control.

**Keywords:** bucket-type breakwater; emergency pool in port area; both routine and emergency needs; bucket-type structure

收稿日期: 2025-04-26 录用日期: 2025-05-12

作者简介: 许百强(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为港口与航道工程、水环境与生态保护。

石化港区和化工园区经济的快速发展,在带来巨大的社会、经济效益的同时,会发生物料泄漏、火灾以及爆炸等事故,并引发次生灾害、污染,产生一些环境、安全等方面的问题,众多学者对此进行了相关研究。汪卫国等<sup>[1]</sup>建议化工园区事故应急基础设施建设从安全环保、园企、建用一体化和智能化角度进行考虑;韩伟等<sup>[2]</sup>进行了三级水环境风险防控体系建设探究;于达等<sup>[3]</sup>进行了输油气管道智能化事故应急体系建设等相关研究;林斯源<sup>[4]</sup>通过对原油码头海上溢油原因进行分析,提供可行的事故处理方法;宋鹏斐<sup>[5]</sup>通过对海上突发溢油事故应急处置案例的研究,总结事故应急处理过程中存在的问题和发生的原因,提出改善基层海上突发水污染事件应急处置方法的相关对策和建议;陈军海<sup>[6]</sup>通过分析各建设规范之间的不同点,明确了事故应急池容积计算方式和确定原则,列明了相关的法律法规条款,并提出了具体的环境监管措施;张超等<sup>[7]</sup>通过对化工产业现状与安全问题的分析,针对化工安全事故提出了具体应急措施;曹国华等<sup>[8]</sup>根据贵州某地设置桥面径流收集系统及事故应急池的设计方案预防处理水污染问题的分析,总结出高速公路通过饮用水源地时设置事故应急池能有效解决水污染问题的结论;Mohamed等<sup>[9]</sup>提出一种基于深度神经网络(deep neural networks, DNN)的结构健康监测(structural health monitoring, SHM)系统,用于实时监测油气管道,以解决与管道故障相关的挑战;Aromoye等<sup>[10]</sup>回顾延长无人机飞行续航能力的方法,探讨无人机在管道检查中的潜在应用;Wang等<sup>[11]</sup>提出了一种基于梯度惩罚的Wasserstein距离辅助的递归泛化自注意力生成对抗网络(recurrent attention generative adversarial networks, RAGAN),将伪样本扩展到小样本数据集可以有效提高故障诊断的性能;Li等<sup>[12]</sup>回顾了近十年来国内外管道机器人定位技术发展,分析了部分定位技术的基本原理和优缺点,指出存在的局限性和解决方案;Kubba等<sup>[13]</sup>研究在油气管

道网络泄漏检测中,利用无线传感器网络,构建一个高效的油管泄漏检测和实时监控系统;Liu等<sup>[14]</sup>分析了油气储运管道的风险因素和事故模式,研究超压载荷与可燃气体云半径的关系,提出安全风险防控措施,为油气储运管道的日常管理和风险防控提供技术支撑;Guo等<sup>[15]</sup>提出利用本体理论,对重大突发事件应急救援知识构建本体模型,建立决策规则库,为重大突发事件下的智能决策提供了重要的技术支撑。

以上研究在风险原因、智能化手段、应急措施、防控体系等方面进行了相关研究,但考虑利用既有水工构筑物、构建港口基础设施“平急两用”运营管理模式的研究较少。本文以连云港港徐圩港区东防波堤桶式基础结构为载体,利用既有的东防波堤桶式基础上筒体结构,通过部分设施功能改造为多功能应急储备池,用于紧急情况下收集储存港区原油码头、公共管廊沿线可能泄漏的油料及各类废水,探索此类基础设施“平急两用”运营管理模式的应用可行性。

## 1 工程概况与应急需求

### 1.1 东防波堤桶式基础结构特征

连云港港徐圩港区直立式结构东防波堤工程采用桶式基础结构,该结构由1个单桶多隔仓的基础桶体和2个上部筒体组成<sup>[16]</sup>。基础下桶体呈椭圆形,长轴30 m,短轴20 m,桶内通过隔板划分9个隔仓,外桶壁厚0.4 m,中间隔板厚0.3 m,隔仓顶部沿短轴方向设4道2 m高肋梁,梁宽0.4 m,桶式基础底端需进入淤泥层下黏土层1.5~2.0 m,根据地质资料确定,下桶高度为9.5~11.0 m。东防波堤桶式基础结构见图1。

上筒体坐落在基础桶顶板上,顶板厚0.45 m,采用预制安装及现浇叠合板结构,上筒外侧底部设1.5 m宽趾板与顶板连接,上筒体为圆形,直径8.9 m,筒壁厚0.4 m,两筒沿短轴方向排列,间距10 m,部分上筒及基础桶一起陆上预制,单桶预制质量约3 200 t<sup>[17]</sup>。根据施工水位及施工船

机设备的能力, 确定上筒预制锯齿状拼缝中心顶高程 3.5 m, 上筒其余筒体待下桶沉放就位后水上现浇施工, 上筒沿堤轴线方向外侧设挡浪板, 挡浪板厚 0.4~0.6 m。上筒顶海侧设弧形挡浪墙,

挡浪墙由海侧部分筒体升高而成, 挡浪墙顶设计高程 10.5 m, 后期预留沉降量 0.3 m, 施工期控制挡浪墙顶高程 10.8 m。

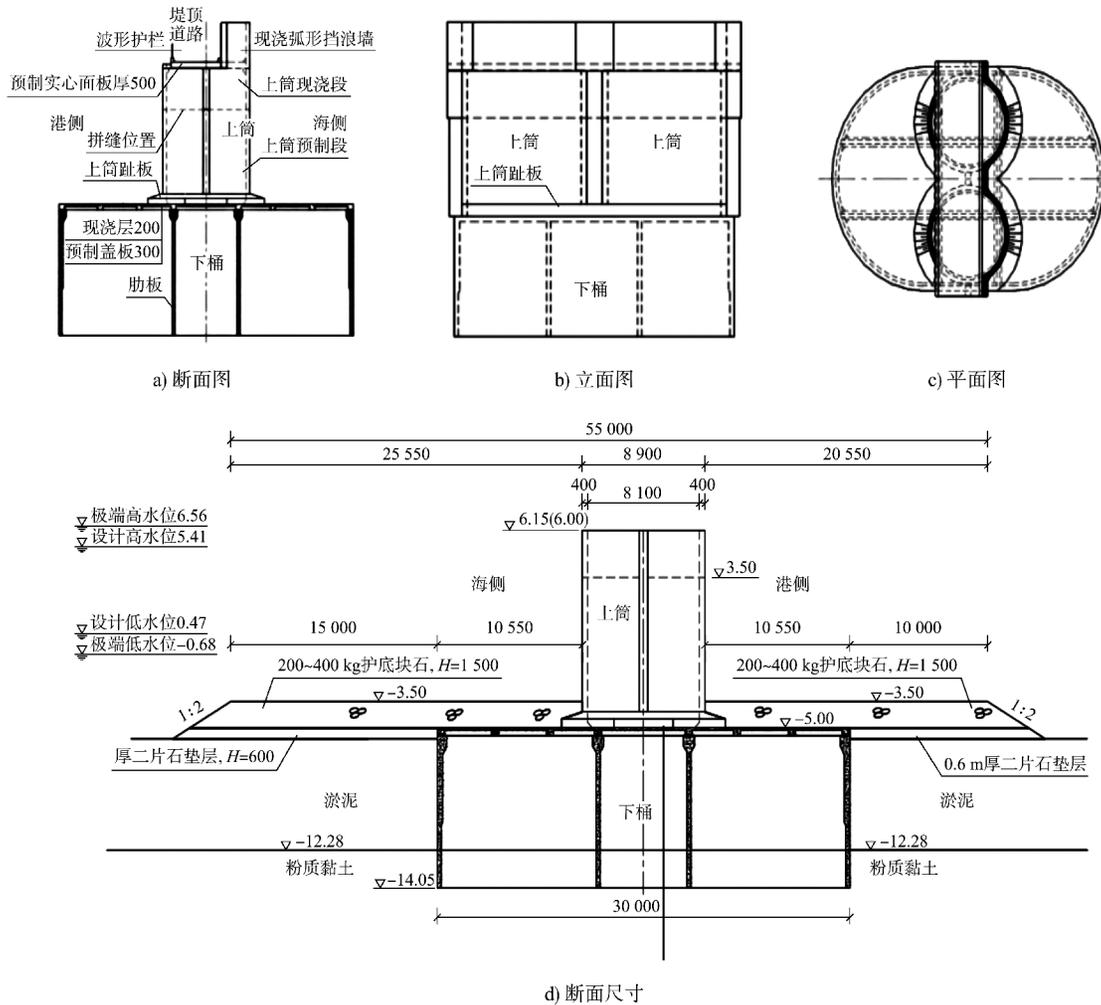


图 1 东防波堤桶式结构断面(高程:m;尺寸:mm)

Fig. 1 Cross section of bucket structure of east breakwater (elevation:m;dimension:mm)

### 1.2 安全环境风险防控需求

徐圩港区六港池现有两个 30 万吨级原油码头, 从码头到后方石化基地沿线十多千米铺设 4 根 DN1 100 mm 的原油管线, 属于长距离管廊输油管线。港区公共管廊沿港区东防波堤内侧建设, 包含主管廊 11.4 km、支管廊段 1.9 km、管廊二期 5.3 km, 管架钢结构防波堤段均为 5 层, 主管廊水域和支管廊钢结构 2~5 层, 同时包含 4 个变电所、2 个消防泵房(单个蓄水能力 300 m<sup>3</sup>)、3 根公共管道(给水、污水、消防)、两侧巡检通道及防撞防护坎, 配套供电、照明、通信、消防等公

共配套设施。目前, 港区公共管廊已经铺设各类化工物料管道 60 余根, 港区部分设施见图 2。



a) 防波堤



b) 码头和管廊

图2 徐圩港区防波堤、码头和管廊

Fig.2 Breakwater, wharf, and pipe gallery in Xuwei port area

根据生态环境部环审〔2022〕159号《关于连云港港徐圩港区30万吨级原油码头工程环境影响报告书的批复》要求，在工程和安全可行条件下，建设总容积不低于3.5万m<sup>3</sup>的3处分区事故应急池。工程依托的连云港原油商业储备基地应同步建成1座容积不低于10万m<sup>3</sup>的事故应急池，确保事故状态下有效拦截和收集各类污(废)水。

根据环评批复要求，结合徐圩港区配套设施区规划建设、港区公共管廊及直立式东防波堤现场实际情况，为加强海上溢油应急能力建设，满足突发环境事件发生后应急响应要求，确保有效控制海域溢油影响，同时充分利用港区已有基础设施资源，节约建设投资成本，提出利用已有东防波堤桶式基础上圆筒结构改造为应急储备池的初步方案。

## 2 应急池系统设计

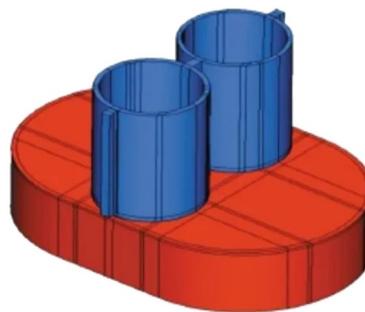
### 2.1 应急池系统设计方案概述

连云港港徐圩港区直立式东防波堤桶式基础采用钢筋混凝土预制结构，具有良好的稳定性和承载能力。上筒体形状为圆筒状，顶部大多数被道路密封，少部分敞口裸露，筒体底部实体密封具备防渗漏功能，满足紧急情况下临时收集储存各类污水油料的功能和条件。方案旨在利用连云港港徐圩港区直立式东防波堤桶式基础上圆筒结构作为泄漏油料废水的应急储备池，用于紧急情况下收集港区可能泄漏的油料及各类废水，以应对原油物料泄漏事故，减少对周边海域环境的污

染和生态破坏。

### 2.2 桶体稳定性分析

对桶体的稳定性进行分析评估时，需要综合考虑外部环境因素如风浪、地震，以及桶体的形状、材料和加固措施等因素等对桶体的影响，同时需要考虑当上筒体临时收集废水油料时，油料质量对桶体承载能力的影响。根据新型桶式结构相关设计技术规定，桶式结构的上筒，在防波堤设计时不进行回填，在岸壁结构设计时筒内可回填，也可不进行回填。说明桶体自身结构稳定性非常好，根据桶式防波堤现场实际情况，上筒体是半敞开式结构，在夏季雨期或者海域风浪较大期间，上筒体内贮存有大量收集的雨水或海水，自身具有承受大质量荷载的能力。东防波堤桶式基础上圆筒见图3。由于原油密度(0.9g/cm<sup>3</sup>)小于海水密度(1.05g/cm<sup>3</sup>)，因此上筒体作为事故应急池临时存储收集废水油料时，自重小于日常状态下自重，能够确保桶体在临时应急储存废水油料时保持稳定。为增加安全稳定性系数，可以减少单桶储存量、增加储备桶数量。



a) 模型



b) 实物

图3 徐圩港区东防波堤大圆筒

Fig.3 Large cylinder of the east breakwater in Xuwei port area

## 2.3 容量配置与空间布局

### 2.3.1 容量空间计算

基于质量守恒原理, 应急池容积公式为:

$$V = \sum (V_i \eta) \quad (1)$$

$$\text{其中: } V = \pi r^2 h \quad (2)$$

式中:  $V_i$  为单筒几何容积;  $\eta$  为有效容积系数, 扣除肋梁占容, 取 0.8;  $r$  为上圆筒半径;  $h$  为上筒体高度。

上圆筒单筒体积  $V_i = 489.29 \text{ m}^3$ 。东防波堤共有

398 个圆筒, 东防波堤段大圆筒体积约为  $20 \text{ 万 m}^3$ , 按有效容积 0.8 计算, 则  $V_{\text{有效}} = 15.58 \text{ 万 m}^3$ 。此外, 还有四区围堤大圆筒, 四区围堤连接公共管廊斜坡堤段、支管廊、四港池、六港池, 完全满足环评批复中在港区建设总容积不低于  $3.5 \text{ 万 m}^3$  的 3 处分区事故应急池要求。即使仅从圆筒体积容量方面考虑, 作为环评批复里石化基地应同步建成 1 座容积不低于  $10 \text{ 万 m}^3$  的事故应急池, 也已具备可行性。桶式基础港区分布见图 4。



图4 徐圩港区直立式东防波堤和四区围堤位置

Fig. 4 Location of the upright east breakwater and the four district embankments in Xuwei port area

### 2.3.2 分区应急布设方案

在徐圩港区公共管廊沿线和东防波堤沿线布置加压泵和集污管道, 用于将港区原油码头、公共管廊沿线可能泄漏的原油、废水收集到事故应急池中。通过沿线合理布置加压泵、集污及消防管道等油污收集系统, 实现自动、电动或手动操作, 确保发生事故时泄漏油料废水能够被及时收集, 防止流入海水中, 以减少对海洋环境的污染和生态破坏。

按照环评批复中港区建设总容积不低于  $3.5 \text{ 万 m}^3$

的 3 处分区事故应急池要求, 对沿线进行集污泵和管道初步设计布置。按照单筒有效收集容积约 80% 计算, 每筒约  $400 \text{ m}^3$ , 每处分区应急池容积约  $1.2 \text{ 万 m}^3$ , 每处按 29 个大圆筒作为 1 个分区应急池单位, 在每个分区应急池单元内沿线布设加压集污泵和污水管道连接原油码头、管廊和应急池。当发生原油泄漏事故时, 后方厂区和前方码头紧急切断阀均会启动, 当切断阀关闭后, 中间的物料管道压力会大大减小直至无压力, 由于管廊架设置有垂直的  $\pi$  形补偿架, 当两个补偿高跨

之间的高差压力相等后, 将不再泄漏。因此在每两个高跨之间布置 1 个集污泵, 用于发生事故时将泄漏点的泄漏油料污水抽至应急池临时收集。

应急池加压泵可结合公共管廊集污池和水泵的位置配合调整设计, 分区应急池位置见图 5。布设位置: 1) 第 1 处布设在公共管廊 4<sup>#</sup>引桥区域, 在管廊架 GJ-Y144 附近, 沿 4<sup>#</sup>引桥布设连接管廊和应急池的管道; 2) 第 2 处布设在公共管廊 6<sup>#</sup>引桥区域, 在管廊架 GJ-Y246 附近, 沿着 6<sup>#</sup>引桥布设连接管廊和应急池的管道; 3) 第 3 处布设在公共管廊水陆交接位置, 管廊架 GJ-Y415, 即直立式东防波堤起始位置, 沿水陆交接位置连接管廊和应急池的管道。

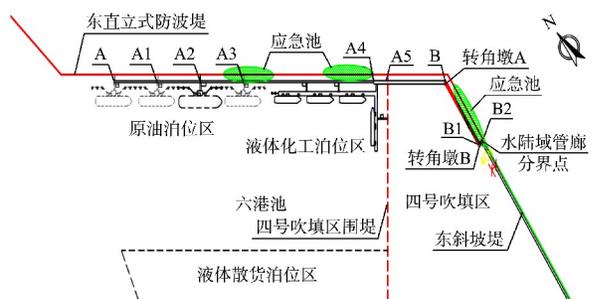


图 5 分区应急池布设位置

Fig. 5 Location of the zonal emergency pools layout

### 3 结构安全适应性改造方案

为满足应急池功能要求, 方案中应考虑泄漏监测、感应报警、沉降位移监测、紧急处理等安全措施, 需要对部分连接缝隙等结构部位进行改造调整, 包括但不限于防渗体系优化、设置泄漏报警系统、安装泄漏监测设备、加强临时收集期间的监测、制定应急预案等, 确保在发生泄漏事件时能够及时采取措施进行处理, 最大限度减少对环境和人员的影响。在关键位置设置泄漏监测设备, 如油料泄漏传感器和流量计等, 以便及时发现泄漏情况并采取相应的措施。

#### 3.1 防渗体系优化

将东防波堤桶式基础上筒体结构改造为应急池, 为满足应急池功能要求, 上筒体内部要保持干净、无积水、无泥沙, 在对上筒体内部做防渗

处理前对筒体内部进行清理, 防渗涂层处理完毕后, 对部分裸露顶部进行密封处理, 防止雨水、海水、灰尘等进入应急池内, 并对应急池进行定期清理。

防渗漏处理措施: 东防波堤桶式基础上筒体采用钢筋混凝土预制结构, 上筒体底部实体密封具备防渗漏功能, 仅需要对基础结构拼缝、连接位置等部位进行防渗处理, 采用高压旋喷桩(水灰比 0.8, 压力 25 MPa)对预制接缝补强, 渗透系数  $\leq 1 \times 10^{-7}$  cm/s。同时, 对圆筒内壁和接缝位置进行防渗漏涂层处理, 增强防渗保护功能。

顶部密封: 对分区应急池进行顶部密封, 安装可拆卸式不锈钢盖板(厚 6 mm), 配置三元乙丙(EPDM)橡胶密封条(压缩率 30%), 耐压等级 5 kPa。

#### 3.2 智能收集系统

管廊联动: 沿  $\pi$  形补偿架敷设 DN300 mm 集污管, 配置气动快关阀(响应时间  $< 30$  s)与超声波流量计。

泵站配置: 每个应急分区设置不少于 3 台集污泵(流量  $Q = 500$  m<sup>3</sup>/h, 扬程  $H = 20$  m), 备用电源保障 8 h 连续运行。

视频监控: 配置 8 台防爆摄像头(覆盖半径 50 m), 支持 AI 溢油识别报警功能。

在线传感: 安装 pH、COD、油分浓度等在线传感器, 数据刷新率 1 次/min。

#### 3.3 其他安全措施

1) 设置泄漏自动报警、压力传感器、温度传感器等智能化设备, 及时监测管道系统状态, 定期检查和维修, 确保管道系统的正常运行。

2) 加强运营期间的沉降位移监测, 设置自动沉降监测设备, 增加监测措施, 加强监测频率, 及时发现并处理沉降位移问题。

3) 制定应急预案, 明确泄漏事件的处理流程、责任分工和疏散工作等。加强港区人员安全培训和应急演练, 提高他们对泄漏事件的识别能力和应急处理能力。

## 4 效益评估

### 4.1 经济效益

从技术、经济、施工、环保等方面进行综合比较,选择技术可靠、经济合理、安全适用、节能环保、施工方便的方案。新建事故应急池建设投资高,需要增加新的用海、用地面积,施工建设工期长,新建设施设备多,后期维护成本高;而利用既有桶式基础上筒体结构进行应急池改造,在这几方面具有明显优势,指标对比见表1。

表1 新建应急池与改造方案指标对比

Tab.1 Index comparison between the newly constructed emergency pool and the renovation scheme

方案类别	建设成本/ 万元	工期/ 月	运维成本/ (万元·a <sup>-1</sup> )	用海及 用地/亩
新建应急池	38 000	18	260	42
改造方案	8 200	6	80	0
节约率/%	78.5	66.7	69.2	100

### 4.2 生态环境效益

风险防控:在港区设置分区事故应急池,能够及时收集港区内泄露的油料废水,可使海域溢油污染面积减少76%,生物毒性暴露时间缩短58%,可减少海域污染风险,有效保护海洋生态环境。

资源循环:事故泄漏的原油经过收集、分离等处理后可进行部分回收利用,事故废水经处理后回用率 $\geq 60\%$ ,年节约淡水消耗4.2万m<sup>3</sup>。

## 5 结论

1) 将既有东防波堤桶式基础上筒体结构改造为港区应急池,相比新建应急池,可大大节省建设投资,缩短项目建设周期,节约用海面积,减少后期运维成本,具备可实施性。

2) 利用既有东防波堤桶式基础上筒体结构,通过部分功能改造,将港区基础设施功能提升,用于“平急两用”,可为沿海石化港区安全环境风险应急防控提供可借鉴的创新解决路径。

3) 后续可通过研发纳米涂层防渗材料、明确应急池改造技术标准、多相流体分层存储等技术措施,进一步研究利用更多既有基础设施应用于

“平急两用”运营管理模式。

### 参考文献:

- [1] 汪卫国, 窦华泰, 张洋杰, 等. 化工园区事故应急设施(池)建设的思考[J]. 劳动保护, 2023(8): 51-53.  
WANG W G, DOU H T, ZHANG Y J, et al. Thoughts on the construction of accident emergency facilities (pools) in chemical industry park [J]. Labour protection, 2023(8): 51-53.
- [2] 韩伟, 金鑫荣, 王瑜. 石化企业突发水环境事故防控体系建设探讨[J]. 环境与发展, 2014, 26(3): 91-93.  
HAN W, JIN X R, WANG Y. Establishment of the defense system for wastewater environmental risk in petrochemical industry [J]. Environment and development, 2014, 26(3): 91-93.
- [3] 于达, 熊毅, 朱婷婷, 等. 输油管道智能化事故应急体系建设[J]. 油气储运, 2015, 34(10): 1038-1041.  
YU D, XIONG Y, ZHU TT, et al. An intelligent emergency response system for failure of oil and gas pipeline [J]. Oil & gas storage and transportation, 2015, 34(10): 1038-1041.
- [4] 林斯源. 原油码头海上溢油原因分析及处理[J]. 石化技术, 2022, 29(4): 217-219.  
LIN S Y. Cause analysis and treatment of oil spill at sea in crude oil terminal [J]. Petrochemical industry technology, 2022, 29(4): 217-219.
- [5] 宋鹏斐. 海上突发溢油事故应急处置案例研究[J]. 三峡生态环境监测, 2022, 7(2): 67-74.  
SONG P F. Emergency management of marine oil spill incidents [J]. Ecology and environmental monitoring of three gorges, 2022, 7(2): 67-74.
- [6] 陈军海, 徐红霞, 刘海亚. 环境事故应急池管理研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(2): 1-4.  
CHEN J H, XU H X, LIU H Y. Study on environmental management of emergency pool [J]. Environmental science and management, 2015, 40(2): 1-4.
- [7] 张超, 赵瑞军, 高艳, 等. 新环境下化工安全生产管理及事故应急策略[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(5): 87-89.  
ZHANG C, ZHAO R J, GAO Y, et al. Chemical industry safety production management and emergency response strategy under the new environment [J]. China petroleum

and chemical standard and quality, 2024, 44(5): 87-89.

[8] 曹国华, 黄明乾, 朱江. 事故应急池在高速公路中的应用[C]//2022 年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册). 北京: 中国建筑工业出版社, 2022: 211-212.  
CAO G H, HUANG M Q, ZHU J. Application of accident emergency pool in expressway[C]// Collection of the 2022 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Conference (volume 2). Beijing: China Architecture & Building Press, 2022: 211-212.

[9] MOHAMED A, AHMAD J A M, MOHAMMED A M, et al. Deep neural network-based intelligent health monitoring system for oil and gas pipelines[J]. Applied soft computing, 2025, 171: 112827.

[10] AROMOYE I A, LO H H, SEBASTIAN P, et al. Significant advancements in UAV technology for reliable oil and gas pipeline monitoring [J]. Computer modeling in engineering & sciences, 2025, 142 (2): 1155-1197.

[11] WANG D M, SUN Y, LU J Y. Pipeline leak detection based on generative adversarial networks under small samples [J]. Flow measurement and instrumentation, 2025, 101: 102745.

[12] LI Y J, HUANG X. Oil and gas pipeline robot localization techniques: a review[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, part C: journal of mechanical engineering science, 2024, 238 (23): 11049-11067.

[13] KUBBA A, TRABELSI H, DERBEL F. Enhanced long-range network performance of an oil pipeline monitoring system using a hybrid deep extreme learning machine model[J]. Future internet, 2024, 16(11): 425.

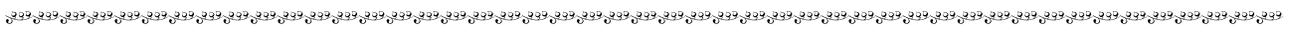
[14] LIU Y, CHEN L, WANG X T, et al. Study on overpressure explosion of oil and gas pipelines and risk prevention & control measures [J]. Journal of physics: conference series, 2023, 2520(1): 012028.

[15] GUO S Q, XIAO C S, HUANG H X, et al. A semantic reasoning-based emergency rescue assistant decision method for maritime accidents involving chemicals[J]. Ocean engineering, 2024, 306: 118077.

[16] 沈雪松, 祁小辉, 丁大志. 连云港港徐圩港区防波堤工程[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(3): 1-5.  
SHEN X S, QI X H, DING D Z. Breakwater project of Xuwei District in Lianyungang Port [J]. China harbour engineering, 2016, 36(3): 1-5.

[17] 高志伟, 李亚, 高树飞, 等. 徐圩防波堤工程桶式基础结构设计[J]. 水运工程, 2015(2): 224-229.  
GAO Z W, LI Y, GAO S F, et al. Bucket foundation structure design of Xuwei breakwater [J]. Port & waterway engineering, 2015(2): 224-229.

( 本文编辑 王传瑜 )



( 上接第 77 页 )

[11] DING Y P, XIAO C, SUN S Q, et al. Research on engineering characteristics of cement mixing piles strengthening steel sheet pile structure wharf[J]. Journal of physics: conference series, 2024, 2679(1): 223-243.

[12] ZHANG H, ZHU H X, ZHANG D F, et al. Influence of barrier effect on barrier sheet pile wharf [J]. Journal of measurements in engineering, 2022, 10(4): 215-237.

[13] 李沛, 李东军. 在役码头结构检测评估现状与展望[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(8): 71-75.  
LI P, LI D J. Present situation and prospect of detection and evaluation for structure of in-service wharfs [J]. China harbour engineering, 2019, 39 (8): 71-75.

[14] 吴锋, 卓杨, 刘旭, 等. 高桩码头全寿命周期的健康监测技术[J]. 水运工程, 2023(2): 44-48, 53.

WU F, ZHUO Y, LIU X, et al. Health monitoring technique of high piled wharf based on life cycle theory [J]. Port & waterway engineering, 2023 (2): 44-48, 53.

[15] BI J Q, WANG P R, ZHANG W J, et al. Research on the construction of a digital twin system for the long-term service monitoring of port terminals[J]. Journal of marine science and engineering, 2024, 12(7): 1215-1230.

[16] 板桩码头设计与施工规范: JTS 167-3—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.  
Code for design and construction for quay wall of sheet pile: JTS 167-3-2009[S]. Beijing: China Communications Press, 2009.

( 本文编辑 王璁 )