

中文引用格式:王秋惠,云婷. 基于CTA的海上应急伤员处置舱作业安全设计[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10): 198-204.

英文引用格式:WANG Qiuhui, YUN Ting. Safety design for maritime emergency casualty disposal cabin based on CTA [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10): 198-204.

基于CTA的海上应急伤员处置舱作业 安全设计*

王秋惠 教授, 云婷

(天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387)

中图分类号:X941

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1197

基金项目:教育部人文社会科学研究规划基金资助(19YJAZH093)。

【摘要】 为提高海上突发事件救援效率,最大限度减少人员伤亡,提出一种海上伤员处置舱的系统化安全设计策略。首先,运用认知任务分析法(CTA)深入分析救援人员在执行任务中的认知过程,识别关键任务及其对应的核心用户需求;其次,采用亲和图法(KJ)归纳总结用户需求,并通过层次分析法(AHP)明确各需求项的重要度和优先级;然后,运用质量功能展开(QFD)理论将用户需求转化为具体的设计要素;最后,借助公理化设计(AD)方法完成功能需求向设计参数(DPs)的映射。结果表明:通过CTA法与QFD-AD集成法构建的功能需求(FRs)与DPs的映射关系,可有效识别海上伤员处置舱功能需求及安全设计要素。处理好舱内医疗设备人机尺寸、作业姿势与设备尺寸关系、作业空间布局、以及舱体色彩+材料+工艺(CMF)、环境界面(光照、噪声、振动)、工具性界面、信息型界面,有助于提升海上伤员处置舱整体人机工效,保证救援作业的安全性。

【关键词】 认知任务分析法(CTA); 海上应急救援; 伤员处置舱; 安全设计; 质量功能展开-公理化设计(QFD-AD)集成

Safety design for maritime emergency casualty disposal cabin based on CTA

WANG Qiuhui, YUN Ting

(School of Mechanical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: In order to enhance maritime emergency rescue efficiency and reduce casualties, a systematic safety design strategy for maritime casualty disposal cabins was proposed. CTA was first used to identify rescue personnel's core needs during critical tasks. The Kawakita Jiro Method method and Analytic Hierarchy Process (AHP) were then used to prioritize these needs. Quality Function Deployment (QFD) was used to translate them into design elements, and Axiomatic Design (AD) was used to map functional requirements to design parameters. Results show that the integrated CTA-QFD-AD approach effectively identifies functional requirements and safety design elements. Optimizing key factors, such as ergonomic dimensions, spatial layout, Color-Material-Finish (CMF), environmental interfaces (lighting, noise, vibration), and tool/information interfaces, can significantly improve human-machine efficiency and ensures rescue safety.

Keywords: cognitive task analysis (CTA); maritime emergency rescue; casualty disposal cabin; safety design; integrated quality function deployment-axiomatic design axiomatic design (QFD-AD)

0 引言

随着海洋强国和 21 世纪海上丝绸之路等重大国家战略的深入推进,我国海洋经济活动日益频繁,海上交通事故、自然灾害等突发事件风险同步攀升。据国际海事组织统计,高海况下伤员因转运颠簸导致的二次损伤率高达 34%,而医疗处置延误导致的死亡率比陆地环境高 2.3 倍^[1]。我国管辖海域年均发生海上险情事故超过 500 起,其中,人员伤亡事件占比达 27.6%^[2]。海上救援环境具有高动态性、强不确定性和多干扰性特征^[3],尽管无人化、智能化技术逐步应用于海上救援^[4],但传统救援装备在应对复杂海况时暴露出响应滞后,伤员处置环节仍存在人-机-环境系统失配的瓶颈问题,亟需构建海上救援安全设计体系^[5]。

目前,有关领域研究成果主要集中于作业安全管理、船舱人机工效和医疗作业人机工效设计等方面。在作业安全管理方面,佟瑞鹏等^[6]通过比较本质安全、行为安全、过程安全与功能安全管理范式,强调了人的因素在机械装备与环境安全管理中的核心地位。在船舱人机工效方面,CHEN Dengkai 等^[7]提出基于人体操作性能驱动的载人密闭舱体设计方法,构建了相应的人机工效设计指标;BRAM^[8]则针对船舶内部空间设备配置及安全组织规划提出了优化策略;张贤^[9]与李梦霞^[10]等基于人机工程理论,建立了船舶驾驶室人机交互及界面布局优化模型。在医疗作业人机工效设计方面,ANDERSEN 等^[11]建立了医院工作系统人机工效设计参数(Design Parameters, DPs)体系;李晓英等^[12]开发了针对外科医生手术站姿的“人-产品-环境”虚拟仿真系统。综上所述,尽管学界已取得丰硕的理论成果,但针对海上伤员处置舱安全设计研究明显不足。

鉴于此,笔者拟基于人机工程学理论视角,提出海上伤员处置舱作业安全设计策略及 DPs(人机尺寸、空间布局、作业姿势环境控制、工具界面、信息界面),以期为海上应急救援设备创新设计提供理论依据。

1 CTA 法及集成应用

1.1 CTA 法

认知任务分析法(Cognitive Task Analysis, CTA)^[13]用于分析复杂场景中的人类认知活动以及理解人类之间的合作行为,捕获用户执行复杂任务

时的认知行为、决策过程等关键认知要素。目前,CTA 法广泛应用于复杂动态环境中的认知决策研究,如核电、国防以及海上应急救援等领域。

1.2 CTA 法选择及集成

为研究救援人员的认知与决策过程,采用观察法、半结构访谈和任务访谈法收集数据,结合关键决策法与模拟访谈法分析关键事件、场景认知及潜在错误。针对海上救援活动,从遇险者角度出发,深入剖析遇险者的生理特点、心理特点、生存需求,构建需求层次模型,以此获得海上应急救援设备初始功能需求(Functional Requirements, FR_s),见表 1。

表 1 初始 FRS

Table 1 Initial functionality requirements	
类别	需求
伤员急救	伤情辅助判断、伤员分类、伤员监测、通信设备、数据记录、救援辅助安排
伤员安置	伤员情况监测、伤员心理舒适需求、伤员生理舒适需求、伤员后送
设备可用性	医疗设备、定位功能、物资补给、人机尺寸、基础设施、技术支持
设备安全性	定期检修提醒、设备环境清洁、设备抗干扰性、人员安全培训

2 基于 CTA 的用户分析

2.1 基于 CTA 的海上救援流程分析

在任务开始阶段,需掌握海上应急救援相关知识、救援人员认知活动,并确定研究对象特点。据此选定海上救援人员与海上医疗人员各 5 名,共 10 人作为被试。通过半结构访谈大纲进行观察访谈,梳理主任务。随后让被试进行出声思考并记录结果,随后构建救援任务流程(图 1)。

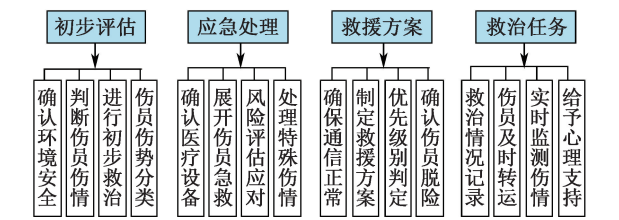


图 1 海上应急救援任务流程

Fig. 1 Marine emergency rescue mission diagram

2.2 用户需求分析

通过目标人员 CTA 试验研究,分析救援人员认知过程、技术决策、认知判断等要素。聚焦于救援人员的实际需求与内在动机,通过模拟访谈构建任务场景和关键事件,并绘制用户体验过程图(图 2)。

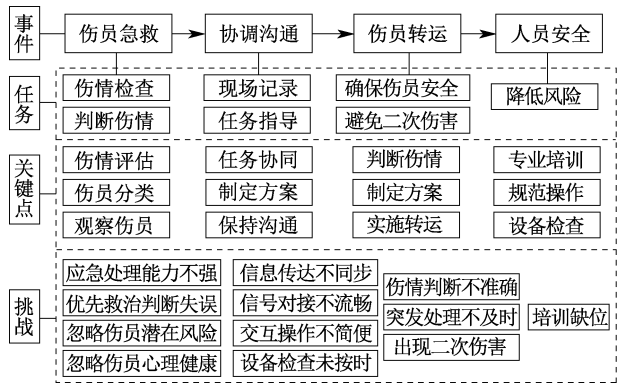


图2 用户体验过程

Fig. 2 User experience process

2.3 用户需求层级构建

采用川喜田二郎提出的亲和图法 (Kawakita Jiro Method, KJ) 分析、归类、整合与优化设计前期收集到的用户需求信息,形成精准需求清单及其层次结构,快速建立设计共识。针对海上伤员处置舱的不同需求角度,基于 AHP 法构建需求层次模型 (图 3)。

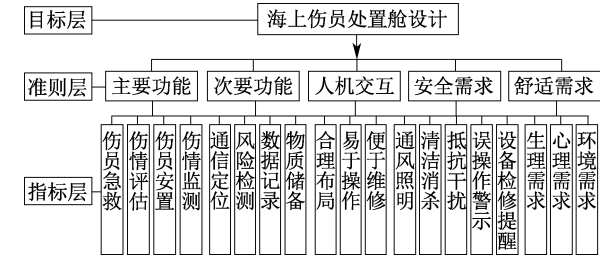


图3 用户需求层次结构

Fig. 3 User demand hierarchy diagram

2.4 基于 AHP 的用户需求权重界定

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是一种结合定性与定量分析的评价与决策方法,通过层次化分解决策问题有关因素并评判指标要素,为决策提供依据。

邀请 5 名专家参与海上应急救援,量化评分各层级指标要素。运用 AHP 法构建判断矩阵,采用几何平均法计算指标权重并进行一致性检验,以减少决策偏差。计算结果见表 2,所有判断矩阵的一致性比率 (Consistency Ratio, CR) 均小于 0.1,满足一致性要求。各层次需求总排序的 CR 值为 0.016 5 (<0.1),亦通过检验,表明结果合理有效。准则层各要素权重排序依次为:主要功能 (0.329 6)、次要功能 (0.223 3)、人机交互 (0.208 6)、安全需求 (0.146 5)、舒适需求 (0.092 0)。据此明确设计目

标的优先级。

表 2 各层次需求权重及一致性检验

Table 2 Requirement weight and consistency test

准则层	指标层	单排序权重	综合权重	排序
主要功能 0.329 6	伤员急救	0.362 0	0.119 3	1
	伤情评估	0.193 9	0.063 9	5
	伤员安置	0.209 2	0.069 0	4
	伤情监测	0.234 9	0.077 4	3
次要功能 0.208 6	通信定位	0.473 7	0.098 8	2
	风险检测	0.300 3	0.032 6	15
	数据记录	0.076 6	0.016 0	18
	物资储备	0.149 5	0.031 1	17
人机交互 0.146 5	合理布局	0.346 6	0.050 8	8
	易于操作	0.322 5	0.047 2	10
	便于维修	0.330 9	0.048 5	9
安全需求 0.223 3	通风照明	0.139 8	0.031 2	16
	清洁消杀	0.174 9	0.039 1	13
	抵抗干扰	0.176 0	0.039 3	12
	误操作警示	0.274 4	0.061 3	6
舒适需求 0.092 0	设备检修提醒	0.234 8	0.052 4	7
	生理需求	0.386 7	0.035 6	14
	心理需求	0.454 7	0.041 8	11
	环境需求	0.158 6	0.014 6	19

3 海上伤员处置舱创新设计特征转化

3.1 基于 QFD-AD 的方法集成模型

质量功能展开 (Quality Function Deployment, QFD) 理论^[14]由日本学者于 1978 年提出,后来逐渐形成完整的 QFD 理论体系,其思想源自丰田的生产管理系统,可将用户需求转化为产品设计特性与工程要求。公理化设计 (Axiomatic Design, AD) 理论^[15]于 1990 年首次被提出,旨在通过结构化域间映射 (如从功能域到物理域) 将用户需求转化为具体 DPs。

笔者采用 QFD 与 AD 集成法,研究功能域与物理域的映射过程。首先,利用 QFD 转化产生的设计要素 (通常为设计需求或技术特性) 定义 AD 的功能域;然后,基于 FRS 确定 DPs,形成 AD 的物理域;最后,通过 AD 判定获得合理结构解。需求研究流程如图 4 所示。

首先,运用 KJ 法优化用户需求指标并建立层级结构;然后,通过 AHP 法计算指标权重;最后,利用 QFD 将用户需求转化为设计需求,进而借助 AD 将 FRS 转化为明确的 DPs。

3.2 基于 QFD 的设计要素分析

为确保设计的实用客观性,邀请 3 名专业人员

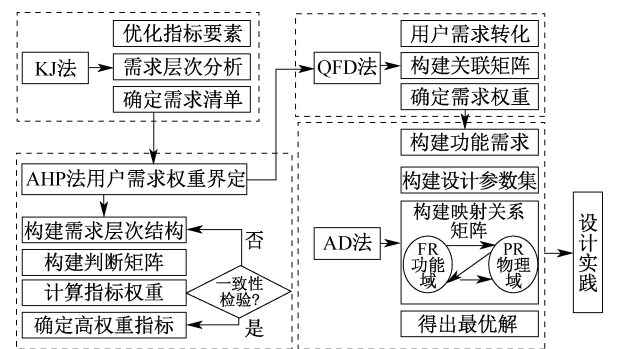


图 4 用户需求研究流程框架

Fig. 4 Research process framework

进行设计评价,形成设计需求共 10 项,见表 3。

表 3 设计需求汇总

Table 3 Summary of design requirements			
编号	设计需求	编号	设计需求
1	生命维持与急救	6	空气净化消杀
2	伤员安置与监测	7	定位感知功能
3	信息采集录入	8	高安全性
4	智慧交互屏	9	照明功能
5	空间结构分割合理	10	人员舒适性

根据用户需求权重及设计需求,构建 QFD 质量屋,建立关系矩阵。采用 0、1、3、5 的形式来表示两者之间的相关程度,分值分别表示两者之间不相关、弱相关、中相关、强相关。计算各项设计需求的绝对权重与相对权重,见下式:

$$w_j = \sum_{i=1}^n w_i \times P_{ij} \tag{1}$$

$$r_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \tag{2}$$

式中: w_j 为设计需求的绝对权重; P_{ij} 为用户需求与设计需求之间的相关关系值; i 为用户需求; j 为设计需求; r_j 为设计需求的相对权重。

根据 QFD 关系矩阵分析结果,生命维持与急救功能被确定为海上伤员处置舱创新设计的核心需求。其他关键设计需求按优先级依次为:伤员安置与监测、智慧交互屏、高安全性、定位感知功能、人员舒适性、空间结构分割合理。

3.3 基于 AD 的 DPs 分析

基于 QFD 权重对设计需求排序,定义 AD 功能域的 FRS,明确 DPs 并构建物理域。通过 Z 字映射关联 FRS 与 DPs,分解设计问题,形成表 4 的映射关系。

表 4 FRS 与 DPs 映射

Table 4 Mapping table of functional requirements and design parameters

FR _s	DP _s
生命维持与急救功能	呼吸机、除颤器、便携式气道管理系统等智能医疗设备
伤员安置与监测功能	担架座椅、监护仪、心电图监护仪等
智慧交互	人工智能、大数据技术、远程医疗、多点触控、语音交互
高安全性	稳定抗扰材质、报警提示装置、安全性色彩设计、装备人员防摔落性能、救生保障系统等
定位感知功能	测距与感知距离、GPS 定位系统、海上阻尼器
人员舒适性	人机尺寸设计、人机情感设计、人机安全设计
空间结构分割合理	设备存放空间、药品储存空间、人员安置空间、人员活动空间
信息采集录入功能	医学信号采集装置、声音影像录入装置
空气净化消杀功能	紫外线灯、臭氧发生器、高效过滤系统
照明功能	照明灯、手术灯、氛围灯

基于 AD 的独立性公理原则,FR_s 与 DP_s 之间的映射关系表示为:

$$\text{FR}_s = \boldsymbol{G} \times \text{DP}_s \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{G}$ 为海上伤员处置舱设计矩阵。通常情况下, $\boldsymbol{G}$ 有以下 3 种表达形式:

对角矩阵: $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$

三角矩阵: $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix};$

一般矩阵: $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$

其中,1、0 分别表示为 FR_s 与 DP_s 之间有关联、无关联。当构建的设计矩阵为对角矩阵或三角矩阵时,则满足独立性公理(非耦合设计原则)。通过 FR_s 集与 DP_s 集建立海上伤员处置舱设计矩阵。该矩阵因其非耦合特征,确保 DP_s 具有可用性,最终满足以下核心功能:生命急救及监测医疗设备、智能交互系统、定位系统、报警提示装置、紫外线灯、自救互救保障等功能要求。

4 海上伤员处置舱作业安全设计策略

4.1 人机尺寸设计

人机尺寸是作业安全设计的重要因素,参照《中国成年人人体尺寸》(GB/T 10000—2023),以18~70岁成年人静态人体尺寸为依据。处置舱内部担架尺寸根据国家现行医药行业标准《病人搬运设备:救护车担架》(YY/T 1638.1—2019)设定,展开长度为1 900~2 000 mm,宽度530~600 mm,担架具有调节功能,背靠部分长度不超过600 mm,且抬起角度不宜小于75°,放置腿部支撑长度不宜超过900 mm,抬起角度不宜小于15°;担架整体展开高度应不大于750 mm,担架尺寸如图5所示。

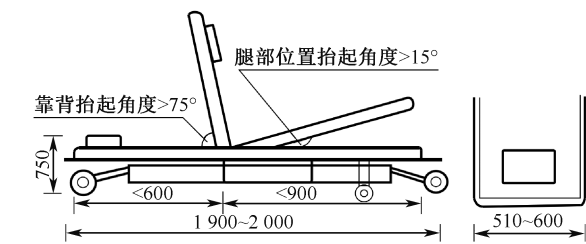


图5 担架尺寸

Fig.5 Schematic diagram of stretcher size

担架最佳水平作业面应控制在半径394 mm内,最大作业面不超过半径508 mm,以确保救援人员的操作舒适性、手臂运动符合自然规律。

参考男性平均肘高,综合考虑作业负荷,确定处置舱水平作业面高度为970 mm。依据用户群体身高,设定顶部储物空间高度为1 860 mm。救援人员站姿近身作业空间,以第5百分位男性人体尺寸为基准,确保站姿时可轻松触及身体前侧半径460 mm范围,最大可及半径为540 mm。通过合理设定救援人员、工作台、操作屏三者之间的空间关系,确保应急救援作业安全。

舱内座椅应依据救援人员身体尺寸设计,坐面高度参照小腿加足高尺寸,可调高度为397~496 mm;颈部支撑点以坐姿颈椎点高为基准,设置高度为627~772 mm;坐面深度419 mm、坐面宽度401 mm。此外,座椅设计兼顾站立时作业安全需求,坐面可向上折叠,支持半径1 000 mm的活动范围,可左右平移,考虑手臂的可达性。

4.2 作业姿势安全设计

为避免救援人员因长期固定工作姿势引发疲劳,作业台面高度的确定参考Ⅱ类作业下立姿岗位工作高度的第5百分位女性尺寸和第95百分位男

性尺寸,结合尺寸修正量,获得台面高度范围为656~826 mm,并采用可调式,以此减少救援人员静态肌肉压力,主要作业姿势如图6所示。

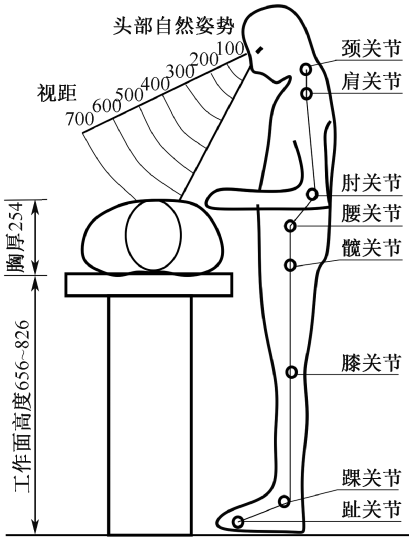


图6 主要作业姿势示意

Fig.6 Schematic diagram of work posture

4.3 人机布局分析与设计

海上伤员处置舱要合理布局,以提高空间使用效率并保障救援人员作业安全。处置舱提供合理舒适的工作、休息区域,通过优化环境减少不良因素影响。为确保救援人员自由通行,伤员救治观察区两边通道宽度分别设计为840、845 mm。

4.4 人机界面安全分析与设计

4.4.1 CMF安全分析与设计

伤员处置舱通过颜色-材料-表面处理工艺(Color-Material-Finishing, CMF)设计,为舱内人员提供安全保障。

1) 色彩安全设计。科学的色彩设计可显著提升作业安全性^[16]。处置舱宜采用低饱和度主色调(白色)减轻紧张情绪,辅以高对比度色彩标识关键区域,确保识别清晰并避免视觉刺激。

2) 材料安全设计。海上复杂环境,舱体材料需具备高强度、抗冲击性及良好耐腐蚀性,以抵御海浪冲击与海水侵蚀^[17]。

3) 表面处理工艺安全设计。舱内设备采用圆润造型,避免尖锐棱角,保障人员心理舒适,并运用喷砂、化学处理等工艺增强舱体密封性,有效防止海水渗入和侵蚀,确保整体安全性。

4.4.2 环境界面安全分析与设计

基于人-机-环境系统理论优化光照、噪声、振动以提升作业安全:

1) 光照设计。①安全原则。舱内灯光需根据不同功能设定合理的照度,选用防尘、防爆、防水性能良好的灯具,突发故障时会自动停止工作,避免产生危害因素,便于维护检修,以确保其良好的工作状态;此外,舱内配应急照明与预警系统。②功能原则。舱内照明应充足柔和,避免光源直射;手术灯照度应控制在 40~160 klx 之间,色温接近自然光;智能调光适配不同场景。③舒适原则。舱内灯光需考虑伤员心理需求,确保光线无压迫感,伤员区域照度应 ≥ 300 lx,周围区域照度 ≥ 150 lx,同时避免光源直射。

2) 噪声控制。将舱内噪声强度控制在 65 dB 以下,墙壁和地板采用丁基胶隔音墙+铝箔隔音棉地板,降低报警信息掩蔽风险。

3) 振动与消杀。舱内配备人工软骨抗振材料,降低对医疗设备的干扰。同时紫外线消杀和实时气体监测,确保环境卫生。

4.4.3 工具性界面安全分析与设计

1) 设备安全设计。舱内配备符合国家、国际相关标准的便携式小型医疗设备、舱内转运设备和应急设备,保障紧急事故下的人员安全。

2) 安全警示设计。舱内设备均配有使用教程及安全说明,若出现误操作,可自动发出提醒或自动停止设备运行,同时,建立故障预警和应急预案,以确保救援工作的连续性和安全性。

4.4.4 信息性界面安全分析与设计

海上伤员处置舱内部设备交互设计应遵循简洁

明了、方便快捷、安全舒适的原则,以确保不同救援人员能够快速上手操作。设备应具有良好的人机交互性能,包含适配听觉系统的语音提示、易察觉的指示灯提示以及界面简洁的触摸屏幕,确保操作的安全性和便捷性。同时,通过建立信息集成系统实时显示伤员生命体征、海况变化等必要信息,为舱内救援人员提供切实可行的生命体征监测与决策辅助。

5 结 论

1) 基于用户需求层次模型的设计方法能够精准定位海上伤员处置舱的关键功能需求,为后续设计转化提供可靠依据。

2) QFD-AD 集成方法可有效解决海上救援环境下的人-机-环境系统匹配问题,确保 DP_s 的准确性,最终形成非耦合的优化设计方案。

3) 海上伤员处置舱安全设计关键参数包括:人机尺寸、作业姿势与空间布局、人机界面、环境控制。合理设计担架、作业面高度以及近身作业空间尺寸,可确保操作的舒适性;合理作业姿势、可调式台面与动态调整座椅设计,提升长时间作业的安全性;结合 CMF(色彩-材料-工艺)优化舱内视觉环境,采用抗干扰材料与隔音技术降低噪声影响,并通过智能化交互界面优化设计,可提升操作效率;光照、振动及消杀系统的综合设计,显著提升舱内环境的稳定性与安全性。

参 考 文 献

[1] International Maritime Organization. Annual overview of marine casualties and incidents 2023 [R], 2024.

[2] 中华人民共和国交通运输部. 2024 年 12 月份中国海上搜救情况[EB/OL]. (2025-01-03). <https://zizhan.mot.gov.cn/sj2019/soujiuwx/shujutj>.

[3] 彭荣琦,孔得朋,庞文楦,等. 救援海洋平台遇险落水人员的船舶调度优化方法[J]. 中国安全科学学报,2022,32(11):208-215.

PENG Rongqi,KONG Depeng,PANG Wendi, et al. Optimization method of ship scheduling for rescuing people in distress on offshore platforms [J]. China Safety Science Journal,2022,32(11):208-215.

[4] 杨继星,房玉东,边路,等. 应急救援数字化战场体系研究与应用探索[J]. 中国安全科学学报,2023,33(10):240-246.

YANG Jixing,FANG Yudong,BIAN Lu, et al. Research and application of digital battlefield system for emergency rescue [J]. China Safety Science Journal,2023,33(10):240-246.

[5] 何天浪,李世锋,李昀哲,等. 船舶智能救援救助技术发展现状与展望[J]. 船舶工程,2025,47(2):9-20.

HE Tianlang, LI Shifeng, LI Yunzhe. Development status and prospects of ship intelligent rescue and salvage technology[J]. Ship Engineering,2025,47(2):9-20.

[6] 佟瑞鹏,王露露,许素睿,等. 本质安全、行为安全、过程安全与功能安全的比较研究:基于安全管理范式转换[J].

中国安全科学学报,2025,35(1):7-15.

TONG Ruipeng, WANG Lulu, XU Surui, et al. Comparative study of inherent safety, behavior-based safety, process safety and functional safety based on safety management paradigm shift[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1): 7-15.

- [7] CHEN Dengkai, ZHU Mengya, QIAO Yidan. An ergonomic design method of manned cabin driven by human operation performance[J]. Advanced Design Research, 2023, 1(1): 12-20.
- [8] BRAM S, BURGEN J, DEDERICH S A, et al. No one left behind: a universal design analysis of ship evacuation[J]. Applied Ergonomics, 2025: DOI:10.1016/j.apergo.2024.104406.
- [9] 张贤, 陈波. 船舶智能驾驶舱人机交互设计研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(22): 186-189.
ZHANG Xian, CHEN Bo. Research on human computer interaction design of ship intelligent cockpit [J]. Ship Science And Technology, 2024, 46(22): 186-189.
- [10] 李梦霞, 徐图远, 邹天悦, 等. 船舶远程驾控人机交互界面优化设计研究[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(3): 304-316.
LI Mengxia, XU Tuyuan, ZOU Tianyue, et al. Research on optimal design of human-machine interaction interface of remote navigation and control ships[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(3): 304-316.
- [11] ANDERSEN S N, BROBERG O. Participatory simulation in hospital work system design[J]. Applied Ergonomics, 2015, 51(11): 331-342.
- [12] 李晓英, 万乐, 陈巧慧. 外科医生手术站姿辅助机器人机工程设计[J]. 机械设计, 2022, 39(5): 142-148.
LI Xiaoying, WAN Le, CHEN Qiaohui. Ergonomic design of surgical stance aid for surgeons[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(5): 142-148.
- [13] GALLAGHER J P. Cognitive/information processing psychology and instruction: reviewing recent theory and practice[J]. Instructional Science, 1979, 8: 393-414.
- [14] AKAO Y. Quality function deployment: integrating customer requirements into product design [M]. Cambridge: Productivity Press, 1990: 13-47.
- [15] SUH N P. The principles of design[M]. New York: Oxford University Press, 1990: 35-53.
- [16] ZHAO Jingwei, DAI Yuting, LIU Qi. Effects of color in lighting on aesthetic preference and perceived safety during the evening[J]. Environmental Engineering and Management Journal, 2022, 21(8): 1427-1437.
- [17] JIN Huichao, WANG Jianfu, TIAN Limei, et al. Recent advances in emerging integrated antifouling and anticorrosion coatings[J]. Materials & Design, 2022, 213(1): DOI:10.1016/j.matdes.2021.110307.

作者简介: 王秋惠 (1969—), 女, 山东潍坊人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事安全人因学、人机交互、应急智能装备设计等方面的研究。E-mail: wangqiuhi@126.com。

