

【特别策划】

载人潜水器密闭舱室工业设计研究综述

陈登凯¹, 张献¹, 叶聪², 朱梦雅¹, 王憬鸾¹, 乔一丹¹

(1.西北工业大学 机电学院, 西安 710072; 2.中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082)

摘要:目的 为改进载人潜水器密闭舱室工业设计,提升设计可靠性与人机舒适性提供理论支撑。方法 文中基于 Scopus 数据库与中国知网数据库下载并整理相关文献,采用 Citespace 软件对文献作者、机构、关键词等构建可视化图谱,分析得出结论。结论 通过精读文献划分出目前载人潜水器密闭舱室工业设计的 3 个主要研究方向,包含造型结构设计、人因可靠性分析与布局优化设计;提取各研究方向中所采用的研究方法,涵盖智能算法、实验研究方法和三代人因可靠性分析方法等。对这些内容进行总结归纳,分析载人潜水器密闭舱室工业设计研究现状,为未来载人潜水器密闭舱室的工业设计提供参考和依据。

关键词:载人潜水器;工业设计;人因可靠性;布局优化;结构设计

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)12-0059-16

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.12.007

Review on Industrial Design of Manned Submersible Closed Cabins

CHEN Deng-kai¹, ZHANG Xian¹, YE Cong², ZHU Meng-ya¹, WANG Jing-luan¹, QIAO Yi-dan¹

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2.China Ship Scientific Research Center, Jiangsu Wuxi 214082, China)

ABSTRACT: To provide theoretical support for improving the industrial design of the closed cabins of manned submersible and improving the design reliability and man-machine comfort. Relevant literature is downloaded and collated based on Scopus database and CNKI database, Citespace is used to visualize the author, institution, and keywords, and then the conclusion is obtained by analysis. Through intensive reading of literature, three main research directions are divided, including modeling structure design, human reliability analysis and layout optimization design, and the research methods used in each research direction are extracted, including intelligent algorithms, experimental research methods, and three-generation human-factor reliability analysis methods. Summarizing these contents and analyzing the current research status of the industrial design of manned submersible closed cabins can provide reference and basis for the industrial design of manned submersible closed cabins in the future.

KEY WORDS: manned submersible; industrial design; human reliability; layout optimization; structural design

地球存在着丰富的海洋资源,长久以来各个国家着力聚焦于海洋科学研究。人类探索的步伐也逐渐从浅海迈向深海,深海探测技术的飞速发展推动载人深潜事业的进步。载人潜水器能够保障作业人员在水下完成任务,进行海底勘测分析与评估,以及操控机械臂完成作业等^[1]。2002 年,深海载人潜水器研制被列为国家高技术研究发展计划(863 计划)重点专项,启动“蛟龙”号载人潜水器集成研制工作,并于 2012

年创造了世界同类潜水器最大下潜深度 7 062 m;2017 年我国“深海勇士”号在南海海试成功,成功下潜 4 500 m 完成水下作业,从立项到交付仅用了 8 年时间,代表着我国潜水器自主研发技术的飞跃;2020 年我国第一艘万米级载人潜水器“奋斗者”号在马里亚纳海沟成功坐底,创造了我国载人深潜的新纪录,标志着我国潜水器设计能力与集成应用等方面已跻身于世界前列^[2]。

收稿日期: 2022-01-11

基金项目: 国家重点研发计划专项项目(2021YFC2800600)

作者简介: 陈登凯(1973—),男,博士,教授,主要研究方向为工业设计,人机工程学,产品创新设计。

通信作者: 张献(1996—),女,博士生,主要研究方向为人机工程学,可靠性设计。

目前国内外对于载人潜水器的研究文献角度较多^[3-5]，关于载人潜水器相关研究综述也有一定分布^[6-7]。载人潜水器研究的发展呈现出新特点，日本海洋开发中心机构提出未来深海载人潜水器的发展不仅要突破下潜深度，还会重视改善载人密闭舱室的居住性，以延长下潜时间^[8]，突出了提升作业人员在载人潜水器密闭舱室内生理与操作舒适性的重要度。载人潜水器耐压舱密闭环境较为黑暗，空间狭窄，作业人员进行任务作业时强度较大^[4]，通过优化载人潜水器密闭舱室工业设计来改善作业人员舒适度具有重要意义。载人潜水器的安全评估、总体布局、载人舱布局、载人舱内人因工程设计评估等是当前研究的核心关键问题^[9]。

迄今为止，诸多学者及工程技术人员对载人潜水器密闭舱室的工业设计进行了多角度分析研究，主要集中在工程技术领域和公开文献两个方面，因为工程领域多涉及国内外研究院所及企业，多与国家或企业发展战略等相关，资料获取不便。而文献领域，研究学者对研究成果进行了充分公开，进一步探索载人潜水器密闭舱室工业设计的研究方向需要对这些文献进行阅读整理。文中未涉及工程技术领域的研究成果，主要立足于公开文献数据，基于 Scopus 数据库与中国知网数据库，筛选载人潜水器密闭舱室工业设计相关中英文文献，通过进一步研读对现有的研究内容进行归类，分析研究现状，总结其采用的设计方法，并提出未来载人潜水器密闭舱室工业设计发展趋势。

1 研究方法

1.1 参考文献来源

Scopus 与 Web of Science 是当前使用范围与覆盖文献范围最广泛的文献计量分析数据库，两者相比 Scopus 的整体期刊覆盖面积更广泛^[10-11]，其涵盖了全球科学、技术、医学等多方面研究范畴^[12]，具有较高的可靠性^[13]。针对载人潜水器密闭舱室工业设计，文中通过在 Scopus 数据库中限制标题、摘要、关键词范围，检索相关词组“Manned Submersible”“Design”发现 183 篇相关内容，精简搜索范围为 Article 与 Review，初步检索到 123 篇文献。文中只研究中文与英文文献，因此将其他语言文献剔除后，共发现英文文献 82 篇，中文文献 33 篇。由于载人潜水器工业设计相关文献数量相对较少，因此将这些文献全部下载，进行深入研究并精确筛选。为保证文献收集与分析较为全面，使用了其他搜索词，例如“Closed Cabin Design”“submersible”“Layout”，将这些搜索词所筛选出的文献也进行下载分析，列出了不同检索词对应的 Scopus 文章数量分布，见表 1。由于 Scopus 收录英文文献较为全面，但中文文献有限，为保证研究国内外文献的完整与准确，对中国知网数据库相关中

文文献进行高级搜索，检索词设置为（载人潜水器+密闭舱室）*设计，共检索到相关期刊论文 362 篇，学位论文 48 篇。汇总结果见表 2。

对 Scopus 初步检索后的文献进行整理，通过阅读关键词和摘要对这些文献进行内容筛选，过滤掉与载人潜水器密闭舱室工业设计相关性较弱的文献，剩余文献共 131 篇，包含中文文献 63 篇，英文文献 68 篇。对知网的中文文献同样进行筛选过滤，共剩余期刊论文 151 篇，学位论文 28 篇。深入分析这些文献的架构内容与研究方法，对载人潜水器密闭舱室工业设计现有研究进行总结整理。

表 1 Scopus 相关文献初步检索结果
Tab.1 Preliminary search results of relevant literatures in Scopus

检索词	中文	英文	相关性筛选后文献		
			中文	英文	总数
“Manned submersible” “Design”	82	33	26	43	69
“Submersible Cabin”	5	3	5	3	8
“Submersible” “Reliability”	53	273	23	17	40
“Submersible” “Layout”	15	34	9	5	14

表 2 中国知网相关文献初步检索结果
Tab.2 Preliminary search results of relevant literatures in CNKI

检索词	学术 期刊	学位 论文	相关性筛选后文献		
			学术 期刊	学位 论文	总数
（载人潜水器 + 密闭舱室）* 设计	374	50	151	28	179

1.2 参考文献分析

对已筛选出的文献进行深入研究分析，在此借助陈超美教授开发的文献计量分析软件 CiteSpace 进行可视化图谱展示。CiteSpace 是基于 Java 语言开发的文献分析软件，能够对文献共被引情况与其作者、机构分布等有研究价值的要点进行可视化网络构建，可以识别某一研究范围内的前沿方向和研究热点^[14]，是目前最受欢迎的知识图谱绘制工具^[15]。文中通过 CiteSpace 软件对筛选出来的载人潜水器密闭舱室工业设计相关文献进行图谱构建，从整体宏观与学科微观角度进行共现分析。由于 CiteSpace 无法同时分析不同数据库导出的文献，因此文中分别对两个数据库文献进行绘图研究。在研究过程中发现，用不同词组在 Scopus 中检索出的文献有重复概率，所以在整合时使用软件将重复文献删除后再进一步分析，共筛选

出文献 97 篇，时间跨度为 1969 年至 2022 年。同时中国知网数据库中文文献不同关键词搜索结果有重合，且与 Scopus 部分中文文献也有重合，因此对知网导出的中文文献进行手动除重工作，共筛选出 134 篇期刊论文，学位论文数量不变，仍为 28 篇，共计 162 篇，时间跨度为 1995 年至 2022 年。图 1 展示了两种数据库近年来载人潜水器密闭舱室工业设计相

关文献逐年出版数量。近 10 年来，与载人潜水器密闭舱室工业设计研究相关的文献数量整体呈上升趋势，研究前景广阔。

1.2.1 宏观——学者机构共现分析

将文献导入 CiteSpace，选择文献作者进行网络构建，通过谱聚类分析结果见图 2—3。可以看到发表文献较多的作者与其合作网络图谱。

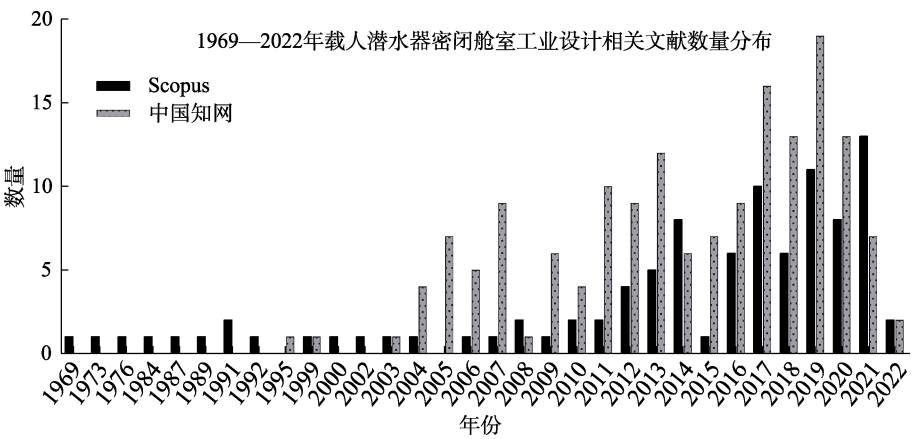


图 1 1969—2022 年发文数量趋势
Fig.1 Trend chart of the number of published articles from 1969 to 2022

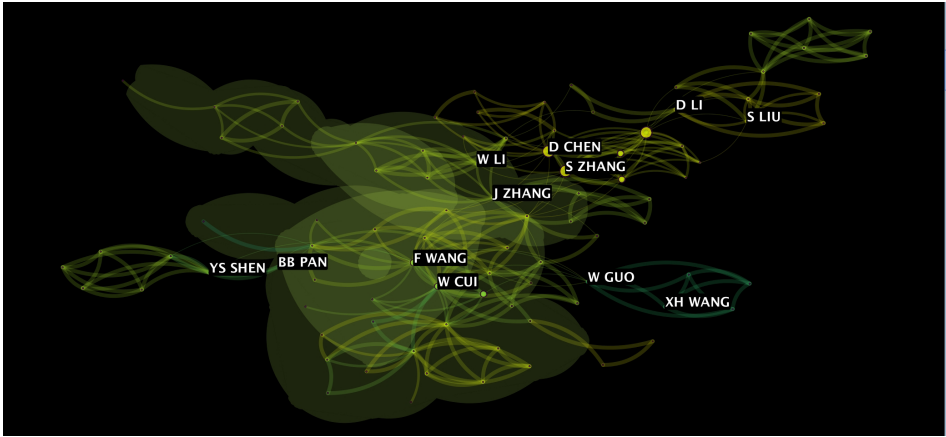


图 2 发文作者分析图谱（Scopus）
Fig.2 Author analysis map (Scopus)

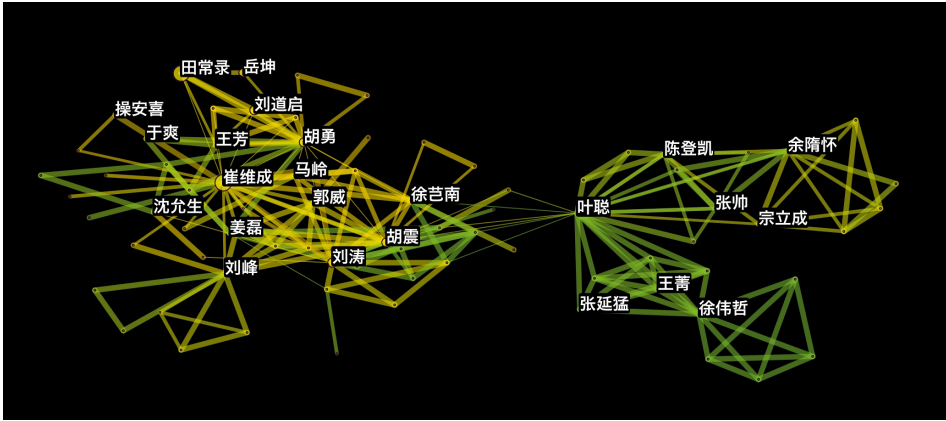


图 3 发文作者分析图谱（中国知网）
Fig.3 Author analysis map (CNKI)

综合两数据库中英文文献研究，依据发文数量，该领域排序前 5 名学者见表 3。通过谱聚类分析得知这些作者合作网络大体分为 2 个模块，崔维成与王芳等学者同属一个类别，主要研究方向为载人潜水器力

学可靠性分析，结构疲劳程度研究；陈登凯、张帅与叶聪等同属另一聚类，主要探究载人潜水器密闭舱室人机工效。这代表了这些学者在同一领域两种研究方向的主导地位。国家与研究机构共现分析结果见图 4。

表 3 领域研究学者前 5
Tab.3 Top 5 research scholars in the field

排序	频次	中心性	作者	聚类标签
1	37	40	崔维成	0
2	28	32	叶聪	1
3	20	24	陈登凯	1
4	16	16	张帅	1
5	15	20	王芳	0

表 4 发文机构频次排序前 5
Tab.4 Top 5 publishing institutions by frequency

排序	频次	机构
1	49	中国船舶科学研究中心
2	23	西北工业大学(陕西省工业设计工程实验室)
3	9	哈尔滨工程大学船舶工程学院
4	9	江苏科技大学船舶与海洋工程学院
5	3	Department of Ocean Engineering



图 4 发文机构共现分析图谱
Fig.4 Co-occurrence analysis map of issuing institutions

根据发文机构共现图谱分析可知载人潜水器密闭舱室工业设计的发文机构集中于中国与美国，同一机构发表文章时所采用名称不一，因此文中尽可能地进行归类统计。发文频次最多的机构为中国船舶科学研究中心，研究集中于海洋工程领域结构力学与振动分析等^[16-17]，陕西省工业设计重点实验室主要研究方向为载人潜水器布局优化设计与人因可靠性分析，哈尔滨工程大学船舶工程学院针对动力学、结构振动特性研究较为深入^[18]。

1.2.2 微观—学科内容共现分析

通过对文献关键词的分析，绘制时间线图，相同聚类的文献置于同一水平线处，见图 5—6 的时间线图，可以分析不用聚类文献的时间跨度与其兴衰过程，并且将各个聚类标签呈现于图片右侧。文献越多代表聚类领域越重要，聚类标签主要有贝叶斯网络、多目标优化、材料疲劳、耐压壳、疲劳预测与结构可靠性分析等。

采用 CiteSpace 所提供的 Burst detection 功能进

行关键词突现分析，关键词突现能进一步表现出一定时期内的文献研究热点。两种数据库的关键词突现见图 7—8。设置不同的 γ 值会有不同数量的关键词突现。

通过关键词突现图分析可知，从 2019 年至 2022 年载人潜水器密闭舱室工业设计研究热点方向为可靠性分析，遗传算法与多目标优化设计，表现了近年来的主要研究方向，为未来该领域发展提供研究基础。

为了保证载人潜水器密闭舱室工业设计研究方向与研究方法的全面总结整理，对两种数据库共 259 篇文献进行标题、摘要、关键词精读，确认所属类别，如遇无法确定的文献类型，必要时阅读全文进行讨论。整理总结完毕大致可以将文献分为 3 个研究方向，包括造型结构设计、人因可靠性分析与布局优化设计。将不同类型文献分配进行全文阅读，分析不同研究方向中所采用的工业设计研究方法，对其进行总结归类，不同研究方向中所采用的方法均有所差异。论文结合文献对载人潜水器密闭舱室工业设计研究方向与所采用方法进行了分析，具体分析结构，见图 9。

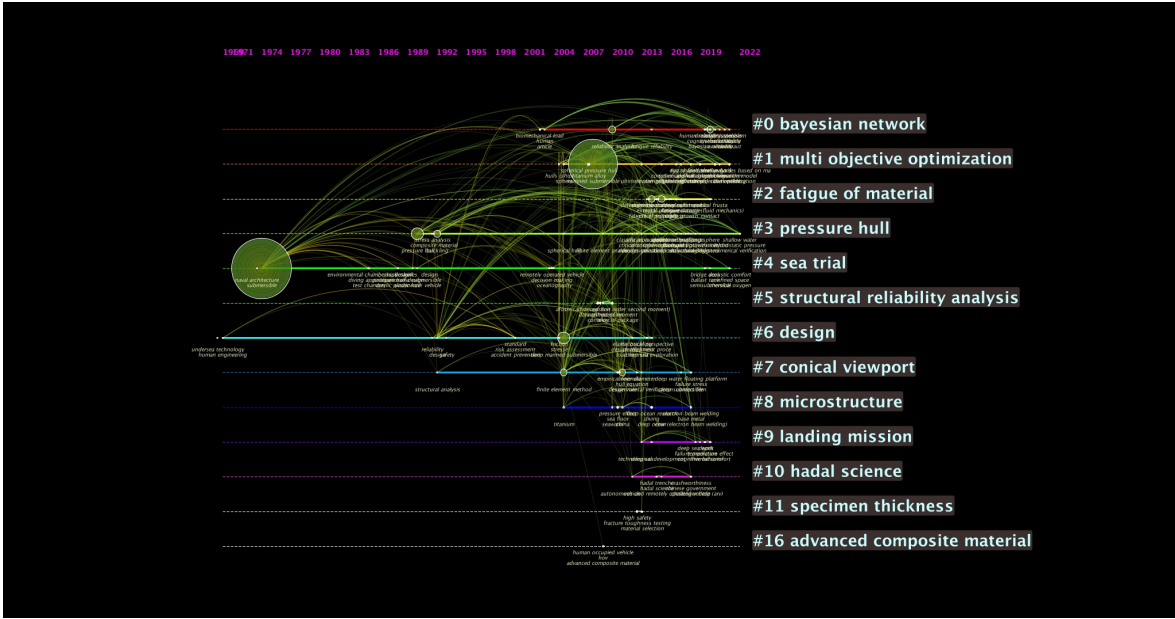


图 5 Scopus 文献关键词网络时间线
Fig.5 Scopus literature keyword network timeline diagram

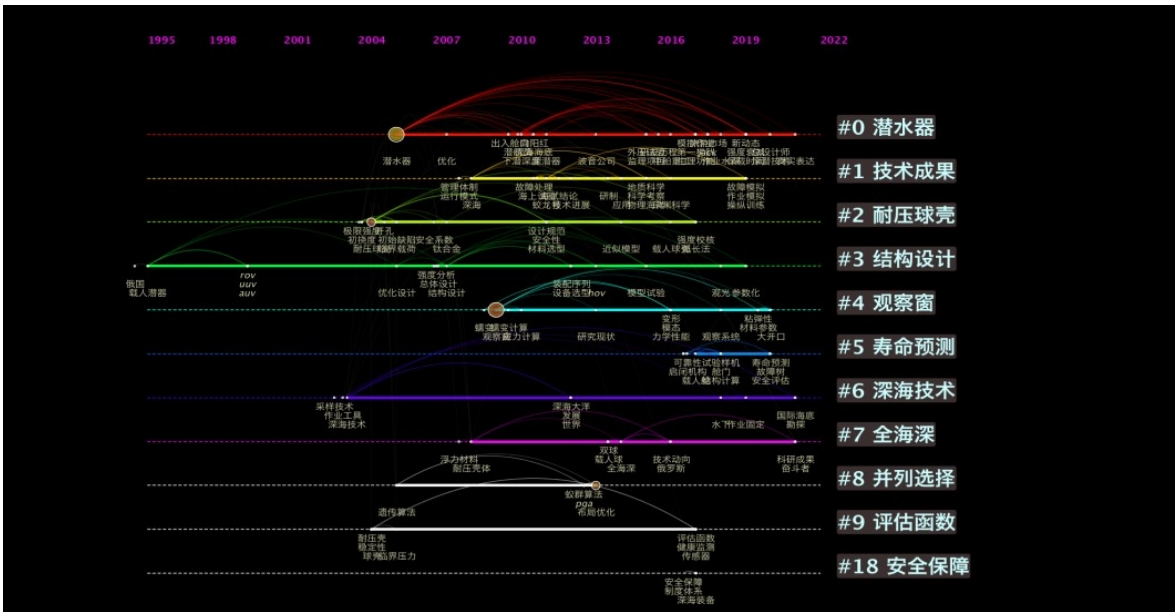


图 6 中国知网文献关键词网络时间线
Fig.6 CNKI document keyword network timeline diagram

Top 10 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	1969 — 2022
spherical pressure hull	1969	2.18	2007	2012	
deep manned submersible	1969	3.18	2010	2017	
design rule	1969	2.83	2010	2012	
fatigue of material	1969	2.93	2013	2016	
crack propagation	1969	2.16	2014	2016	
buckling	1969	2.2	2016	2018	
manned submersible	1969	5.44	2019	2022	
reliability analysis	1969	2.47	2019	2022	
genetic algorithm	1969	2.17	2020	2022	
multi objective optimization	1969	2.17	2020	2022	

图 7 Scopus 文献关键词突现
Fig.7 Keyword emergence in Scopus literature

Top 9 Keywords with the Strongest Citation Bursts

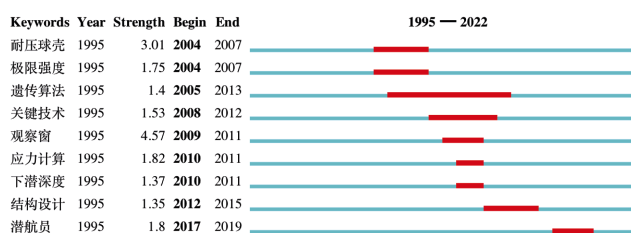


图 8 中国知网文献关键词突现

Fig.8 Keyword emergence in CNKI literature

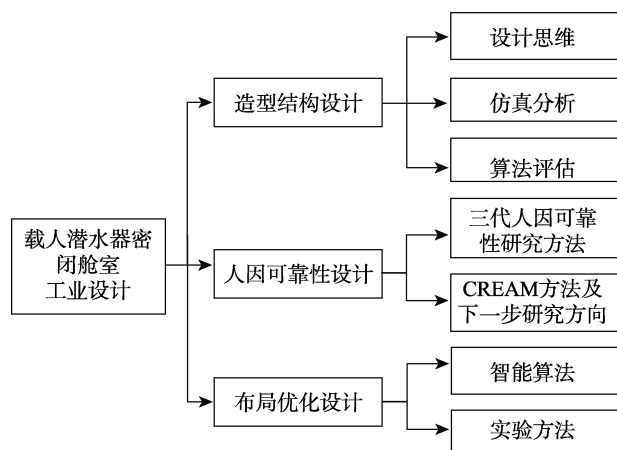


图 9 文献分析结构

Fig.9 Literature analysis structure

2 载人潜水器工业设计研究方向

2.1 载人潜水器造型结构设计

2.1.1 造型设计方向

1) 基于功能划分的载人潜水器。载人潜水器基于下潜深度可分为两类^[19], 下潜深度大于 1 000 m, 定义为重型深海载人潜水器^[20-23]; 下潜深度小于 1 000 m, 定义为轻型中浅海载人潜水器^[24-25]。重型深海载人潜水器主要用途是深海科研、调查、资源勘探和军方搜救打捞, 主要的设计机构也大多为国家性质机构。国内外研发的该类潜水器有“阿尔文”号、“奋斗者”号、“蛟龙”号、“深海 6 500”号、“和平”号等。从重型深海载人潜水器外观造型来看, 潜水器通过有限的几个观察窗与外界环境实现交互^[20]。另一种轻型中浅海载人潜水器的主要用途是近海海洋监测、生态保护、海底观光。主要的设计机构由商业公司研发与运行。潜水器结构由双体船、能源系统、动力系统、特殊玻璃材质构成的载人空间及内置操控系统、机械抓手、探测灯等部件组成。国内外研发该类潜水器的公司有美国 Triton 深潜公司、荷兰 U-boat 公司、美国 Sea Magine 公司、Ocean Gate 公司等。

2) 基于设计元素划分的载人潜水器。基于设计元素对载人潜水器造型进行型谱分类, 可分为休闲型、商务型、专业型、极限型四类。首先休闲型和商

务型的载人潜水器区分比较模糊, 具有交叉性。商务型的载人数量较大, 下潜深度要求较浅, 主要集中在 500 m 深度以内, 造型、颜色等设计元素上偏硬朗科技感, 例如 Triton 公司的 660 AVA 型号载人潜水器^[26]。休闲型载人潜水器的载人数量较少, 但是下潜深度比较宽泛, 通常在 1 000 m 深度以内, 造型设计元素更加动感, 表现大胆, 例如 Triton 公司的 Project Neptune 型号。前两种潜水器多用于海底观光等一些休闲功能。而专业型的下潜深度通常在 1 000~2 000 m, 用于科考、探测等方面的专业需求, 造型设计元素呈现出简约、重工的设计风格, 例如荷兰 U-Boat Worx 公司的 NEMO Series、Sea Magine 公司的 AURORA-4。极限型载人潜水器的下潜深度最深, 通常应用于一些特殊需求的极端作业, 因此造型设计元素偏向未来感、科技感, 例如 Triton 公司的 TRITON 13 000/2 型号运用欧翼的结构造型可使潜水器快速地深度下潜。

2.1.2 结构设计方向

1) 载人潜水器结构稳定性设计。针对载人潜水器结构稳定性的研究主要包括载体框架结构^[27]、观察窗结构^[6]、耐压壳结构^[28]3 个方向。载体框架是载人潜水器各分系统设备的安装基础, 潜水器上的载人舱、蓄电池、可弃压载、可调压载水舱、高压气罐、浮力块和轻外壳等都将固定在载体框架上, 从而形成一艘具有良好水动力性能的载人潜水器^[27]。此外, 载体框架也是深海载人潜水器布放、回收和甲板系固的主要承力结构。深潜器构架常用的有两种类型, 即加筋壳体结构和立体框架结构。载体框架的安装、拆卸和强度与刚度优化是载人潜水器结构设计的基础性研究。载人潜水器为了完成水下作业, 在耐压壳上会安装用透明材料做成的观察窗。载人潜水器观察窗研究^[29]主要集中在结构形式、安装和密封形式, 以及材料性能的理论及试验研究方面, 美国海军土木工程实验室在 20 世纪中期就开始了对于观察窗的研究, 并取得了很大进展, 而国内随着“蛟龙”号载人潜水器的成功研制也逐步开展了对于观察窗的研究, 取得了长足进展。观察窗的蠕变行为^[30]、失效行为与力学强度分析^[31-32]是该研究方向的重点。潜水器耐压壳结构^[33]是关系到潜水器能否承受深水高压和保证潜水器总体性能的首要关键技术, 是保证载人潜水器和人员安全的最重要部件, 主要用于承受深水压力, 从而为内部的电子元器件装置、仪器设备和人员提供合适的环境, 并保护内部装置、设备不会因海水压力和腐蚀而受到损害, 因此耐压壳体的强度和密封性研究是载人潜水器结构设计的重要部分。

2) 载人潜水器耐压壳材料研究。为满足深海开发要求, 世界范围内对于载人潜水器的研究越来越多, 其中的关键即在于潜水器耐压壳体的设计与建造。载人潜水器的耐压壳材料^[34]是潜水器设计中的重要研究方向之一, 深海作业环境对材料有多个特殊要

求, 包括强度高、冲击韧度好、耐腐蚀、寿命长等。目前潜水器耐压壳常用的材料可分为金属和非金属两类。其中金属包括钢、铝合金、钛合金等, 非金属包括混凝土、玻璃、有机玻璃和合成复合材料等。不同材质的耐压壳会引出不同的新研究方向, 比如材质为有机玻璃的全通透型载人潜水器是潜水器研究的新领域, 通透性质会大幅度增加作业人员的视野, 改变工作性质与工作模式, 引出一系列新的研究问题。因此, 载人潜水器的耐压壳体材料研究是潜水器领域的重要技术支撑。

2.2 载人潜水器人因可靠性分析

目前, 已有不少研究指出, 核电^[35-36]、建筑^[37-39]、海洋运输^[40-42]、铁路运输^[43]等重要领域的大多数事故都由人为失误引起, 并且人为失误可能导致灾难性的后果^[44]。由于载人潜水器在深海科考和海洋资源开发利用中具有重要作用^[45-46], 因此避免潜航员人为失误, 有效提升其作业可靠性, 显得尤为重要。已有部分学者开展了载人潜水器作业过程中, 潜航员人因可靠性的研究与分析工作。

纵观现有潜航员人因可靠性研究, 主要分为 2 类研究方向: 一是针对载人潜水器这一特殊的作业环境和典型作业任务, 结合改进或创新的人因可靠性分析方法, 识别潜航员人因可靠性关键影响因素, 形成潜航员人因可靠性的分析、预测与评估; 二是基于潜航员人因可靠性考虑, 开展载人潜水器的综合评估、优化设计等。

2.2.1 潜航员人因可靠性分析、预测与评估

不同的研究者针对载人潜水器不同的作业阶段, 开展了不同作业任务下潜航员人因可靠性分析与预测。陈登凯等^[4]结合载人潜水器作业全流程, 采用 CREAM 方法, 构建了潜航员认知可靠性模型, 形成了深海采样任务中潜航员共同绩效条件 (Common Performance Conditions, CPC) 隶属度函数, 并使用该函数获取潜航员作业过程中 4 种认知功能的权重因子, 最终结合改进的 CREAM 方法预测了深海采样任务中潜航员总体误差概率。着眼载人潜水器深海作业中舱室热环境特征, 分析潜航员任务过程的动态环境变化, 基于 CREAM 方法建立潜航员认知失误概率与工作效率的函数关系, 形成热环境舒适性评估与热环境生产力损失回归模型 (Predicted Mean Vote-Productivity, PMV-P), 明晰潜航员认知失误概率变化规律, 进而可实现动态热环境下潜航员人因可靠性的有效评估^[47]。张帅等^[48]基于载人潜水器典型人一机-环境特征, 分析了载人潜水器正浮力坐底任务和负浮力坐底任务过程及潜航员认知过程, 利用认知可靠性并串混联系统模型改进 (Cognitive Reliability and Error Analysis Method, CREAM) 方法, 预测了潜航员的作业认知失效概率。除此之外, 通过构建潜航员

下潜作业的贝叶斯网络模型, 基于 CREAM 方法计算网络模型中每个根节点误差的先验概率, 并利用贝叶斯网络的后向推理能力计算其各节点的后验概率, 进而可识别潜航员失误的重要影响因素, 这也是人因可靠性研究的相关内容^[49]。

2.2.2 潜水器人因失效度预测、评估与优化

在关于载人潜水器舱室评估的研究中, 可以结合载人潜水器作业绩效与人因失效概率预测值 (Cognitive Failure Probability, CFP), 构建数学评估模型, 进而可实现载人潜水器驾驶舱人机工效综合评价^[50], 其中载人潜水器作业绩效指数由主观评估和客观评估结果计算获得, 人因失效概率预测是在 CREAM 方法基础上, 考虑共同绩效条件获取, 同时该研究者还开发了数字化评估软件, 并实现了某型载人潜水器驾驶舱评估的实例验证。在载人潜水器交互界面的研究中, 梁睿思等^[51]以用户为中心, 研究载人潜水器交互界面设计的方法, 明确指出人因参与设计测评的重要性。正是基于此, 张亦驰等^[52]以某型深海载人潜水器的实际任务场景为例, 梳理载人潜水器航控软件界面的设计、人因和功能需求, 完成了载人潜水器的典型航行工况下航控软件界面设计, 并邀请相关领域专家对其展开评估, 最终实现了基于人因的深海载人潜水器航控界面的优化设计。

综上所述, 人因可靠性研究虽然在众多领域有着广泛应用, 但目前针对载人潜水器开展的潜航员人因可靠性研究相对较少。随着载人潜水器下潜深度的不断增加、作业时间的不断延长, 如何确保潜航员安全、准确、高效地完成作业任务, 已成为一项亟待解决的重要问题。

2.3 载人潜水器布局优化设计

载人潜水器舱室内部空间狭小、密闭, 潜航员作业任务强度大、精度高, 因此如何更科学合理地对载人潜水器布局进行优化设计是涉及人机工程学、设计学、心理学、行为学等多学科的一项工作, 也是本领域研究的重点、难点、热点问题。研究对象包括但不限于载人潜水器舱室空间三维布局设计、载人潜水器舱室主控台布局设计、载人潜水器舱内显示界面布局设计等。

李瀛等^[53]针对载人潜水器舱室布局设计, 在现有研究的基础上, 对潜水器舱内构造和设备布局进行分析, 引入了工业设计理论, 建立了载人潜水器舱室空间布局工业设计优化设计流程, 对舱内的显示器、控制器、操作器、标识系统等进行系统的设计, 并基于 JACK 系统对布局设计方案进行人机分析, 给出了一套载人潜水器舱室布局设计最优方案。王文中等^[54]以减少潜航员作业失误率为出发点, 通过建立仿真模拟器对载人潜水器舱室空间布局优化进行了系列研究。构建了基于多目标博弈下的潜航员作业姿态仿真

模型,结合虚拟舱室环境,进行多目标、多任务与潜航员关节姿态、作业舒适性、平衡性之间的博弈。在MAS合作式博弈框架模型基础上,采用梯度下降方式构建潜航员作业姿态优化博弈算法。通过多次博弈达到满足多利益的最佳均衡状态,即最优潜航员作业姿态解集,为潜水器舱内布局设计提供依据。韩端锋等^[55]针对载人潜水器舱室三维布局优化设计问题,基于人机工程学基本思想,从坐姿舒适性、观察舒适性、操作可及性等方面入手,建立载人潜水器舱室空间三维布局多目标优化数学模型,采用遗传算法求解布局最优方案。宗立成等^[56]将载人潜水器舱室布局设计过程视作基于知识的智能化过程,引入智能技术,并将全局最优思想融入载人潜水器舱室的布局设计中,建立基于智能算法进行舱室布局设计,提高了载人潜水器布局设计效率。张帅等^[57]针对现有载人潜水器舱室布局设计舒适性差的问题,提出一种空间舒适性复合评估方法。通过研究舱室的空间特征、潜航员的作业特征、舱室区域划分特征和舱室空间约束条件,构建载人潜水器舱室空间舒适性多元复合评估模型,创建三维虚拟仿真模型依托JACK软件平台进行二次开发对舱室空间舒适性进行评估,研究结果为载人潜水器舱室布局人因优化设计提供了相应的理论与技术支撑。范文等^[58]针对现有载人潜水器舱室主控制台人机布局优化过程约束多的问题,提出一种基于蚁群算法的智能人机布局求解方法,通过层次分析法对载人潜水器舱室主控制台进行人机特性的定量分析,结合蚁群算法对主控制台布局进行优化设计,采用JACK平台对所得优化设计结果进行验证,证明了所提方法的有效性及其可靠性。叶聪等^[59]采用虚拟技术对载人潜水器舱室工作台布局进行研究,通过构建虚拟设计模型求解得到最终设计方案,利用JACK虚拟人技术从舒适度、视域、可达域、力矩等方面对布局方案进行了评估,使设计方案满足工效学要求。庞永杰等^[60]采用数值模拟的方法研究潜水器螺旋桨和舵翼的布局方式,计算4种不同桨舵布局方式中螺旋桨和舵翼的性能,最终选出最优的桨舵布局设计方式。宗立成等^[61]在研究中提出载人潜水器布局优化问题就是求解组合优化问题,将多约束条件下的载人潜水器布局优化设计过程转化为需要调整设计参数的组合优化问题,即通过数学方法中的最优编排寻找离散事件的最优组合、次序,基于上述多目标优化问题的求解思路进行载人潜器舱室布局优化设计。张亦驰等^[52]针对载人潜水器舱室现有航控界面信息复杂、操作繁琐的问题,提出基于人因的载人潜水器航控界面优化设计方法。以某型号载人潜水器典型工况下的航控界面为载体,分析软件界面的输入输出,构建以功能架构、交互逻辑、视觉设计、应用开发、迭代评估为主要步骤的载人潜水器航控界面设计方法流程,实现从优化潜水器航控界面设计流程达到改善潜航员操作体验的目的。范文等^[62]针对载人潜水器舱室作业空间

狭小、作业时间长、潜航员作业舒适性差的特点,提出一种基于人体肌肉疲劳特性的潜水器舱室布局设计评估方法。利用层次分析法对载人潜水器舱内布局装置进行重要度分层赋权,采用生理多导仪进行人体肌肉疲劳实验获得人体疲劳特性值,根据人体疲劳特性值对各层级装置的潜航员疲劳特性进行评估,从而得到各个布局设计方案的评估结果,有助于设计师选择最佳布局设计方案。王文中等^[63]以提高潜航员人因可靠性、减少载人潜水器人为误操作为出发点,基于解构·重构思维对潜水器舱室进行布局优化设计。该研究试图打破传统载人潜水器舱室布局优化设计模式,引入解构·重构思维的美学视角,以开放跨学科式的文化视角对载人潜水器舱室进行布局优化设计,立足于美学角度寻求符合人机工效设计准则的潜水器舱室布局设计模型,基于多目标遗传算法验证了设计模型的可靠性。陈登凯等^[64]在研究中指出传统仅依据人体疲劳度要求进行载人潜水器舱室布局设计容易导致设备布局不合理,极易造成设备安装、维修维护上空间不足的问题,因此提出一种舱内功能与人机工效导向的载人潜水器工作舱布局设计方法,建立舱内功能约束与人机工效约束集,形成载人潜水器舱室布局设计流程,依托“蛟龙号”载人潜水器对所提方法流程进行案例可行性验证,基于JACK仿真软件平台进行了设计方案人机综合评价,证明了双向向下的载人潜水器布局设计方法合理有效。韩海辉^[65]在分析传统载人潜水器舱室布局设计方法局限性的基础上,提出了利用算法解决载人潜水器舱室空间布局优化设计问题,通过对潜水器舱室设计要求分析并结合人机工程学的基本理论与思想,构建载人潜水器舱室空间布局多目标优化模型,基于并列遗传算法对优化模型进行求解,研究结果表明该算法具有较好的收敛性,是一种有效的三维载人潜水器舱室布局优化设计求解方法。Wang等^[66]根据“蛟龙号”载人潜水器的设计要求,结合载人潜水器舱室布局人机工程学约束条件,建立“蛟龙号”载人潜水器舱室布局优化设计数学模型,从而对载人潜水器舱室进行布局优化设计,将相同类型的活动和相同类型的设备进行结合,最终利用多目标遗传算法更智能化地得到载人潜水器的布局设计方案。Zhu等^[67]在研究中指出合理的舷窗角度设计有助于减轻潜航员的操作疲劳度,提高作业效率。因此基于表面肌电图分析探讨了3不同舷窗位置对潜航员背部肌肉的影响,获取生理舒适表征数据,通过计算得出最佳的载人潜水器舱室舷窗布局角度。

3 载人潜水器工业设计研究方法

3.1 载人潜水器造型结构设计方法

3.1.1 基于设计思维的载人潜水器造型结构设计

造型结构研究方向的设计思维有多种,比如多学科优化方法、逆向设计方法、模块化设计方法等。刘

蔚等^[68]将多学科优化方法入载人潜水器设计中,针对载人潜水器优化设计中的复杂多目标问题,发展了能够得到 Pareto 解集的协同优化方法,建立载人潜水器总体多学科模型。梁耀海等^[69]依据逆向设计方法运用 3D 扫描仪获取“彩虹鱼”号潜水器的点云数据,并通过 Geomagic Design X 与 Rhinoceros5 后期处理软件对点云数据进行重建,最后基于重建模型对潜水器进行造型优化设计。马烈^[24]在设计过程中通过广义模块化的理论设定了潜水器的综合界面标准并结合设计划分出潜水器的各个模块。在此基础上反复调整载人潜水器的主尺度和各结构的尺寸大小,进行了重量重心与浮力浮心及稳性的计算,最终得出满足装配可行性和时间最短约束下的最优装配方案。张玉梅等^[70]在现代工业设计思想的指导下,分析舰船造型设计与总体设计的相关性。基于功能论和系统工程理论,在舰船总体设计的各个阶段系统地开展造型设计,通过定量结构变化法和机能面关系界定法进行造型单元的变化与组合,生成既满足功能要求又符合审美取向的造型方案。

3.1.2 基于仿真分析的载人潜水器造型结构设计

对潜水器载体框架、耐压壳、观察窗等潜水器重要部件和水动力进行仿真分析与优化设计是载人造型结构设计研究方向运用较多的设计方法。余文韬等^[32]用有限元计算分析预测大开口有机玻璃观察窗的力学行为时,通过材料参数化分析来选取符合试验环境的材料参数,并在此基础上应用 Prony 级数拟合建立材料的黏弹性模型,将传统上针对准静态加载过程的有限元静态分析转变为动力学分析,考虑了时间效应的影响,有效提升了有限元结果的准确性。曲文新^[33]用非线性屈曲分析方法来分析耐压壳体稳定性,将 CCS 规范、GL 规范和球壳稳定性计算中的经验公式计算结果与有限元分析结果进行了比较分析,结果表明有限元分析结果满足规范中屈曲计算的要求。谢云飞等^[71]研究了基于支持向量回归机的潜水器外形优化方法,包括拉丁超立方试验设计选取样本点,基于 ICEM 的潜水器参数化建模和网格自动划分,基于 Fluent 的阻力计算及 SVR 模型的构造。采用改进的粒子群算法求解潜器外形优化设计问题,得到了阻力性能优良的潜水器外形。Palaniappan 等^[72]对双球壳载人潜水器进行了初步设计,利用 ANSYS-APDL 对结构的抗弹性屈服安全性进行了研究,并使用 ANSYS CFX 研究船体的外部整流罩,以估算不同运行速度下结构上产生的阻力,从而估算潜水器的有效马力(ERP)要求。

3.1.3 基于算法评估的载人潜水器造型结构设计

算法评估是潜水器造型结构设计优化的重要研究方法。张亦驰等^[73]基于某型号深海载人潜水器的功能需求及特点分析,结合考虑水动力等性能指数,建

立并梳理出多个造型设计方向。通过运用多属性决策综合评估的加权和法,对多个设计方案进行性能分析、权重分配、造型迭代及完善,从而评价并优选出最佳方案,以形成深海载人潜水器总体造型的理论外形。张玉梅等^[70]建立舰船造型设计评价指标体系,采用层次分析法和多元模糊评价法,实现各项指标的权值计算和造型多方案评价结果的量化求解。吴俊飞等^[74]采用故障树分析法得到影响外压球壳安全因素的结构重要度,结合模糊评判理论与层次分析法确定权重,根据建立的因素集、评价集和权重集,应用加权平均法实现对外压球壳的综合安全评价,并以蛟龙号外压球壳为例进行了计算,验证了此方法的可行性。

3.2 载人潜水器人因可靠性研究方法

3.2.1 三代人因可靠性研究方法

随着学者们研究的深入,现已形成了三代人因可靠性研究方法^[75-76]。第一代人因可靠性研究中指出,人无法像机器组件一样执行任务,需要明确人员绩效影响因子,并构建人员绩效模型,才能实现有效的人因可靠性分析。着眼于核工业领域,研究者们提出了一系列第一代人因可靠性研究方法,如人为错误率预测技术(Human Error Rate Prediction, THERP)^[77]、成功可能性指数方法(Success Likelihood Index Method, SLIM)^[78]和人为错误评估和减少技术(Human Error Assessment and Reduction Technique, HEART)^[79]。由于第一代人因可靠性分析方法存在着缺乏对人因失误发生的随机性和不确定性的考虑、过于依赖专家反馈结果、对潜在失误行为观察有限等问题,第二代人因可靠性分析方法逐渐发展起来。

第二代人因可靠性分析方法的模型是建立在人员认知模型的基础上,综合考虑多种学科(认知心理学、行为科学、可靠性工程等)理论知识,强调情景环境及其对人员绩效的影响作用,其典型研究方法包括认知可靠性和错误分析方法(Cognitive Reliability And Error Analysis Method, CREAM)^[80]、人为失误分析技术(A Technique for Human Error Analysis, ATHEANA)^[81],以及标准化工厂分析风险人类可靠性分析(Standardized Plant Analysis Risk Human Reliability Analysis, SPAR-H)^[82]。其中 CREAM 方法强调了人员行为会受所在情景环境影响,而非随意的或孤立的,ATHEANA 方法则是基于信息处理理论,认为人员失误是由于迫使失误情景作用于人员失误机理而产生的,但其情景控制模型并不够翔实和具体^[83]。

随着计算机技术的发展,第三代人因可靠性研究逐渐发展起来。第三代人因可靠性研究是以虚拟仿真技术为基础,模拟真实场景和作业条件下的人员绩效,形成人因可靠性的动态建模与评估。其代表性研究方法包括:认知环境仿真模型(Cognitive Envi-

ronment Simulation, CES)^[84]、认知仿真模型(Cognitive Simulation Model, COSIMO)^[85]、人机一体化设计和分析系统(Man-Machine Integration Design and Analysis System, MIDAS)^[86]、信息、决策和行为响应模型(information, decision and action, IDA)^[87]。但由于第三代人因可靠性分析研究方法缺乏认知行为分析的普适性,以及人员认知行为的模糊性和随机性导致计算机仿真建模困难,因此第三代人因可靠性的相关研究尚不成熟^[76,4]。

3.2.2 CREAM 研究方法及下一步研究方向

由于载人潜水器作业任务具有复杂性、作业环境普遍恶劣的特点,且随着下潜深度的增加,作业时间会持续延长,潜航员生理和心理都将承受巨大考验^[4,49]。因此,在潜航员的人因可靠性分析研究中应当充分考虑载人潜水器特殊的作业情景和潜航员的心理与认知特性。由于 CREAM 方法具有翔实的情景控制模型,以及严谨科学的人因失误率量化计算模型,所以使用 CREAM 方法对潜航员人因可靠性展开研究具有一定的合理性。结合 2.2 小节提到的载人潜水器潜航员人因可靠性研究内容,可以发现目前针对潜航员人因可靠性的研究多以 CREAM 方法为基础,充分考虑载人潜水器不同的作业任务、作业流程和情景环境特点,针对性地改进 CREAM 方法,预测计算潜航员在作业任务中的总体误差概率,进而完成各种作业条件下潜航员人因可靠性分析。

CREAM 方法是第二代人因可靠性研究方法中最具代表性的方法^[88]。其核心思想是情景环境会对人员认知的控制模式产生影响,且该影响会决定可能发生认知失误的概率^[89]。CREAM 方法将情景环境划分为 9 类会对人员绩效产生影响的通用影响条件(Common performance Condition, CPC)包括:组织完备性(CPC1)、工作条件(CPC2)、人机界面与运行支持的完善程度(CPC3)、规程/计划可用性(CPC4)、同时出现的目标数量(CPC5)、可用时间(CPC6)、值班区间(CPC7)、培训和实验的充分性(CPC8)和班组成员的合作质量(CPC9)^[90]。并对这 9 类环境影响因素进行等级划分,明确各 CPC 因子的不同评价水平及其对人员绩效可靠性的影响。同时 CREAM 方法引入情景依赖认知模型(COCOM)^[91],给出了战略型、战术型、机会型和混乱型这 4 种人的控制模式^[92],提出了“观察”“解释”“计划”“执行”4 种认知功能,并将人员认知活动定义为“协调”“联络”“对比”“诊断”“评价”“执行”“识别”“保持”“监视”“观察”“计划”“记录”“调整”“扫视”“检验”15 个类别^[93]。其中不同的认知类别分别对应一个或多个认知功能。尽管 CREAM 方法具有众多优点,但其仍具有较强的主观依赖性、认知行为影响因子考虑有限、无法明确分析同一行为可能对应的认知差异等不足^[94],因此,探究潜航员人因可靠性的新型研究方

法十分必要。

参照人因可靠性在其他领域的研究发现,在下一步研究中,可以对潜航员人因可靠性和人为失误进行更加细致化的研究,考虑学习、疲劳、心理状态等潜航员个人因素对人为失误的影响机制,构建人员失误概率(Human Error Probability, HEP)动态模型,厘清载人潜水器环境、显控等系统随作业时间变化的特征规律,分析人为失误产生过程中载人潜水器环境、显控等系统与潜航员认知行为的交互作用关系,形成综合考虑载人潜水器相关因素与潜航员个人特征的人因可靠性动态分析数学模型。此外,结合第三代人因可靠性研究中的虚拟仿真方法,构建不同作业任务下潜航员认知行为仿真模型,对潜航员人因可靠性展开分析也是一种可以考虑的新方法。

3.3 布局优化设计方法

3.3.1 基于智能算法的载人潜水器布局优化设计

随着智能计算的不断发展,许多研究将智能算法引入工业设计研究中,打开新的设计研究思路。载人潜水器舱室布局设计是一项在多种设计条件约束下对多个待布物体进行规划设计的工作,尽可能寻找满足所有条件的最优布局设计方案,是一类典型的多目标优化问题(Multiple Objective Optimization Problem),常见的处理多目标优化问题的方法是采用加权和法将多目标优化问题转化为单目标优化问题,伴随着最优化领域的发展与创新,研究者们提出多种智能优化算法对此类问题进行求解,例如遗传算法、粒子群算法、鱼群算法、模拟退火算法等,解决传统方法所带来的计算结果主观性与不可控性。遗传算法是最为典型的最优化算法之一,善于处理目标函数没有确定解析形式的优化问题,还具有编码形式丰富、算法原理简洁直观等特点。韩海辉^[64]对载人潜水器舱室三维布局优化问题进行数学建模,运用并列选择策略的遗传算法对布局优化数学模型进行求解,得到载人潜水器舱室布局优化的 Pareto 解集。Wang 等^[66]进行了一系列改进,将 Pareto 最优的个体不参与个体交叉运算与变异运算直接保留至下一代子群体中,并提出可将待搜索区域作为最终获得的搜索结果,通过与未改进的遗传算法进行比对发现改进的遗传算法搜索轨迹更加有效,所建立的用来指导搜索的适应度函数也会在一定程度上提高搜索速度、稳定运行过程。韩端峰等^[55]为了在研究中避开权重的讨论,将遗传算法与并列选择策略相结合构建载人潜水器舱室布局优化设计算法,对某型载人潜水器舱室进行三维布局设计,20 次计算结果基本一致,算法较为稳定。宗立成等^[61]在传统遗传算法的基础上,提出了一种基于 Pareto 的改进遗传算法(PGA 算法),构建载人潜水器舱室空间布局优化数学模型,基于 PGA 算法对模型进行求解,获得布局优化解集。范文等^[62]提出一种

复合人机特性的蚁群算法, 在布局设计中充分考虑人机约束, 利用层次分析法对待布物与待布区域机型分级并赋予不同的权重, 将量化权重与蚁群算法相结合, 给出了新的启发函数与信息素更新策略, 以载人潜水器舱室中控台布局设计为应用载体对所提算法进行实例验证。人工鱼群算法作为一种寻优算法具有鲁棒性强、全局收敛性好等特点。宗立成等^[61]利用人工鱼群算法的上述特点, 将人工鱼群算法引入载人潜水器舱室布局设计中, 以提高潜水器舱内面积利用率以及保证潜航员操作性作为载人潜水器布局优化设计的最终目标, 确立目标函数、构建约束条件, 通过计算与评价获得最终布局方案。基于智能优化算法求解载人潜水器舱室布局优化问题通常得到不止一个 Pareto 最优解, 需要借助设计方案评价方法进一步对 Pareto 最优解集进行评价, 才能选出最终的最优方案。

3.3.2 基于实验研究的载人潜水器布局优化设计

实验方法是科学研究过程常用的研究方法, 是使设计过程更加科学可靠的重要手段。工业设计讲求“以人为中心”, 通过展开人机实验可以使设计结果更符合人的生理、心理特性。范文^[95]为减轻潜航员肌肉疲劳, 降低潜航员患肌肉骨骼疾病的风险, 对潜航员上肢与颈部整体肌肉疲劳特性进行分析。通过开展正交实验测试人体上肢及颈部多角度下的表面肌电信号 (Surface Electromyography, sEMG), 采用小波分析提取 sEMG 的平均频率 (Mean Power Frequency, MPF) 值, 结合主观测量问卷, 分析人体上肢与颈部肌肉的疲劳速度和肌肉活动角度间的关系, 构建潜航员肌肉疲劳特性模型, 支撑载人潜水器舱室控制台布局设计。Zhu 等^[67]通过搭建模拟载人潜水器舱室环境获取不同舷窗位置下的潜航员表面肌电信号, 结合主观量表获取人体疲劳主观感知, 分析肌肉疲劳特性, 为载人潜水器舱室设计提供依据。除了传统通过获取人体生理信号进行人机实验的方式, JACK 作为一款人体建模与仿真平台, 可以对设计产品进行全面的工效学仿真评估, 成本低、效率高, 也是载人潜水器舱室设计方案工效学评估常用的方法。

4 结语

文中通过对载人潜水器密闭舱室工业设计相关文献进行汇总分析, 借助 Scopus 数据库与中国知网数据库收集文献, 并使用 Citespace 软件进行可视化分析。在对大量文献的研究方向与方法进行深入分析后, 可以得出以下结论。

1) 对载人潜水器密闭舱室工业设计研究文献作者与机构分析发现, 可以划分为结构设计与人机工效分析两个角度。以崔维成为中心的载人潜水器结构设计, 研究机构主要集中于中国舰船中心、哈尔滨工程大学船舶工程学院与江苏科技大学船舶与海洋工程

学院; 针对人机工效分析角度研究学者主要以陈登凯、叶聪、张帅等为主, 研究机构主要为西北工业大学工业设计系。

2) 通过深入研究将 259 篇相关文献内容划分为 3 个方向, 造型结构设计、人因可靠性分析与布局优化设计。并分别对 3 个方向中所采用的研究方法进行归类总结。造型结构设计方法包含设计思维角度、仿真分析与算法研究; 针对人因可靠性方向总结出三代研究方法并进行详细阐述; 针对布局优化设计研究方法归纳发现主要有智能算法与实验探究方法。

3) 整理发现针对于载人潜水器工业设计研究的文献数量有限, 研究深度与广度均有待进一步提升, 在未来的设计研究中可以依据文中划分方向, 多角度深入探究, 采用不同的设计方法融合分析。旨在对载人潜水器密闭舱室的造型结构进行优化; 结合载人潜水器作业任务与潜航员作业特征, 深入分析潜航员人因可靠性, 明确其动态变化规律, 进而形成有效的潜航员可靠性提升方法; 并合理优化载人潜水器布局设计。

目前载人潜水器密闭舱室工业设计的综述研究文献主要集中于载人潜水器的发展现状与国家政策支持下的发展趋势, 文中从载人潜水器密闭舱室工业设计角度出发, 对国内外相关研究进行了完整系统的综述, 了解现有的研究方向与采取的研究方法, 为该领域进一步科学探究和设计工程实践提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 刘涛, 王璇, 王帅, 等. 深海载人潜水器发展现状及技术进展[J]. 中国造船, 2012, 53(3): 233-243.
LIU Tao, WANG Xuan, WANG Shuai, et al. The Current Status and Technical Development of Deep Sea Manned Submersible[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53(3): 233-243.
- [2] 朱心科, 金翔龙, 陶春辉, 等. 海洋探测技术与装备发展探讨[J]. 机器人, 2013, 35(3): 376-384.
ZHU Xin-ke, JIN Xiang-long, TAO Chun-hui, et al. Discussion on Development of Ocean Exploration Technologies and Equipments[J]. Robot, 2013, 35(3): 376-384.
- [3] 操安喜. 载人潜水器多学科设计优化方法及其应用研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
CAO An-xi. Multidisciplinary Design Optimization Method and Its Application in HOV Design[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [4] CHEN Deng-kai, FAN Yu, LI Wen-hua, et al. Human Reliability Prediction in Deep-Sea Sampling Process of the Manned Submersible[J]. Safety Science, 2019, 112: 1-8.
- [5] ZHANG Tong-wei, LIU Bao-hua, LIU Ye-yao, et al.

- Ultrashort Baseline Synchronous-Clock Emergency Resynchronizing Method in the Jiaolong Deep-Sea Manned Submersible[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2019, 16(1): 1-17.
- [6] 林景高, 张文明, 冯雅丽, 等. 载人潜水器观察窗研究综述[J]. *船舶工程*, 2013, 35(3): 1-5.
LIN Jing-gao, ZHANG Wen-ming, FENG Ya-li, et al. Review on Viewport Used in Human Occupied Vehicle[J]. *Ship Engineering*, 2013, 35(3): 1-5.
- [7] ZHANG Tong-wei, TANG Jia-ling, QIN Sheng-jie, et al. Review of Navigation and Positioning of Deep-Sea Manned Submersibles[J]. *Journal of Navigation*, 2019, 72(4): 1021-1034.
- [8] 刘峰. 深海载人潜水器的现状与展望[J]. *工程研究-跨学科视野中的工程*, 2016, 8(2): 172-178.
LIU Feng. Technical Status and Development Trend of the Deep-Sea Manned Submersible[J]. *Journal of Engineering Studies*, 2016, 8(2): 172-178.
- [9] 胡震, 曹俊. 载人深潜技术的发展与应用[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(6): 87-94.
HU Zhen, CAO Jun. Development and Application of Manned Deep Diving Technology[J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(6): 87-94.
- [10] SINGH V K, SINGH P, KARMAKAR M, et al. The Journal Coverage of Web of Science, Scopus and Dimensions: A Comparative Analysis[J]. *Scientometrics*, 2021, 126(6): 5113-5142.
- [11] GAVEL Y, ISELID L. Web of Science and Scopus: A Journal Title Overlap Study[J]. *Online Information Review*, 2008, 32(1): 8-21.
- [12] QU Min, YU Sui-huai, CHEN Deng-kai, et al. State-of-the-Art of Design, Evaluation, and Operation Methodologies in Product Service Systems[J]. *Computers in Industry*, 2016, 77: 1-14.
- [13] BAAS J, SCHOTTEN M, PLUME A, et al. Scopus as a Curated, High-Quality Bibliometric Data Source for Academic Research in Quantitative Science Studies[J]. *Quantitative Science Studies*, 2020, 1(1): 377-386.
- [14] 侯剑华, 胡志刚. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望[J]. *现代情报*, 2013, 33(4): 99-103.
HOU Jian-hua, HU Zhi-gang. Review on the Application of CiteSpace at Home and Abroad[J]. *Journal of Modern Information*, 2013, 33(4): 99-103.
- [15] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
CHEN Yue, CHEN Chao-mei, LIU Ze-yuan, et al. The Methodology Function of Cite Space Mapping Knowledge Domains[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2): 242-253.
- [16] 刘涛. 大深度潜水器结构分析与设计研究[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2001.
LIU Tao. Analysis and Design of Deep-Sea Submersible Structures[D]. Wuxi, China: Ship Scientific Research Center, 2001.
- [17] 陆蓓, 刘涛, 崔维成. 深海载人潜水器耐压球壳极限强度研究[J]. *船舶力学*, 2004, 8(1): 51-58.
LU Bei, LIU Tao, CUI Wei-cheng. Ultimate Strength of Pressure Spherical Hull in Deep-Sea Manned Submersibles[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2004, 8(1): 51-58.
- [18] 李良碧, 王仁华, 俞铭华, 等. 深海载人潜水器耐压球壳的非线性有限元分析[J]. *中国造船*, 2005, 46(4): 11-18.
LI Liang-bi, WANG Ren-hua, YU Ming-hua, et al. Nonlinear Finite Element Analysis of Pressurized Spherical Shell for Manned Deep Submersible[J]. *Shipbuilding of China*, 2005, 46(4): 11-18.
- [19] 任玉刚, 刘保华, 丁忠军, 等. 载人潜水器发展现状及趋势[J]. *海洋技术学报*, 2018, 37(2): 114-122.
REN Yu-gang, LIU Bao-hua, DING Zhong-jun, et al. Research on the Current Status and Development Trend of Manned Submersibles[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2018, 37(2): 114-122.
- [20] Manned Underwater Vehicle Committee, Marine Technology Society[EB/OL]. [2015-06-07][2021-11-07]. <http://www.mtsmuv.org/#mts-muv-committee.ActiveMannedSubmersibles>.
- [21] 崔维成, 胡震, 叶聪, 等. 深海载人潜水器技术的发展现状与趋势[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(2): 13-20.
CUI Wei-cheng, HU Zhen, YE Cong, et al. Current Status and Future Trends for Deep Manned Submersibles[J]. *Journal of Central South University(Natural Science Edition)*, 2011, 42(2): 13-20.
- [22] BOWEN A D, YOERGER D R, TAYLOR C, et al. The Nereus Hybrid Underwater Robotic Vehicle for Global Ocean Science Operations to 11, 000m depth[C]// *OCEANS*. Quebec: IEEE, 2008: 1-10.
- [23] TAKAGAWA S, TAKAHASHI K, SANE T, et al. 6, 500m Deep Manned Research Submersible "SHINKAI 6500" System[J]. *Proceedings OCEANS*, 1989, 3: 741-746.
- [24] 马烈. 1000 米轻作业型载人潜水器概念设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
MA Lie. Conceptual Design Of 1000-Meter Light Operating Manned Submersible[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [25] 杨剑, 卢国杰, 林梓健. 一种小型载人观光潜水器的结构设计[J]. *机械工程师*, 2018(9): 66-68.
YANG Jian, LU Guo-jie, LIN Zi-jian. Structural Design of a Small Manned Sightseeing Submersible[J]. *Mechanical Engineer*, 2018(9): 66-68.
- [26] 徐纪伟, 郑恒持, 李彬彬, 等. "Triton"系列载人潜水器型谱分析及设计思想[J]. *船舶物资与市场*, 2021, 29(11): 28-32.
XU Ji-wei, ZHENG Heng-chi, LI Bin-bin, et al. Type Spectrum Analysis and Design Idea of "Triton" Series Manned Submersible[J]. *Marine Equipment/Materials & Marketing*, 2021, 29(11): 28-32.

- [27] 黄建城, 胡勇, 冷建兴. 深海载人潜水器载体框架结构设计及强度分析[J]. 中国造船, 2007, 48(2): 51-59.
HUANG Jian-cheng, HU Yong, LENG Jian-xing. Structural Design and Strength Analysis on Framework for Deep Sea Manned Submersible[J]. Ship Building of China, 2007, 48(2): 51-59.
- [28] 俞铭华, 王自力, 李良碧, 等. 大深度载人潜水器耐压壳结构研究进展[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版), 2004, 18(4): 1-6.
YU Ming-hua, WANG Zi-li, LI Liang-bi, et al. Development of Research on the Pressure Shell Structure of Deep Manned Submersible[J]. Journal of East China Shipbuilding Institute (Natural Science Edition), 2004, 18(4): 1-6.
- [29] 李文跃, 王帅, 刘涛, 等. 大深度载人潜水器耐压壳结构研究现状及最新进展[J]. 中国造船, 2016, 57(1): 210-221.
LI Wen-yue, WANG Shuai, LIU Tao, et al. Current Status and Progress on Pressure Hull Structure of Manned Deep Submersible[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(1): 210-221.
- [30] 杜青海, 江海港, 胡晓康. 基于 ABAQUS 的载人潜水器观察窗结构蠕变行为分析[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 108-116.
DU Qing-hai, JIANG Hai-gang, HU Xiao-kang. Creep Behavior Analysis of Conical Observation Window for Human Occupied Vehicle Based on ABAQUS[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(1): 108-116.
- [31] 廉俊盛. 深海载人潜水器球壳及观察窗力学行为的有限元分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2016.
LIAN Jun-sheng. Finite Element Analysis on the Mechanical Behavior of the Spherical Shell and the Viewport of the Deep Manned Submersible[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2016.
- [32] 余文韬, 胡震. 大开口载人潜水器球扇型有机玻璃观察窗有限元分析及试验验证[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(19): 78-82.
YU Wen-tao, HU Zhen. Finite Element Analysis and Test Verification of Spherical Sector Acrylic Windows of Manned Submersible with Large Opening[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(19): 78-82.
- [33] 曲文新. 载人潜水器耐压壳结构设计与分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
QU Wen-xin. Structure Design and Analysis of Pressure Hull in Manned Submersible[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [34] 程妍雪, 庞永杰, 杨卓懿. 基于近似模型技术的复合材料耐压壳性能研究[J]. 船舶工程, 2015, 37(4): 74-78.
CHENG Yan-xue, PANG Yong-jie, YANG Zhuo-yi. Research on Composite Material Pressure Hulls Based on Approximation[J]. Ship Engineering, 2015, 37(4): 74-78.
- [35] JIANG Dan, WU Bing, CHENG Zhi-you, et al. Towards a Probabilistic Model for Estimation of Grounding Accidents in Fluctuating Backwater Zone of the Three Gorges Reservoir[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 205: 107239.
- [36] LIU Peng, LYU Xi, QIU Yong-ping, et al. Identifying Key Performance Shaping Factors in Digital Main Control Rooms of Nuclear Power Plants: A Risk-Based Approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 167(1): 264-275.
- [37] LI Jue, WANG Hong-wei, XIE Yong, et al. Human Error Identification and Analysis for Shield Machine Operation Using an Adapted TRACER Method[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2020, 146(8): 04020095-04020095.
- [38] WONG F K W, CHIANG Y H, ABIDOYE F A, et al. Interrelation between Human Factor-Related Accidents and Work Patterns in Construction Industry[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2019, 145(5): 04019021-04019021.
- [39] 郑霞忠, 王晓宇, 陈述, 等. 高处坠落事故的人因失误与干预策略研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(6): 139-144.
ZHENG Xia-zhong, WANG Xiao-yu, CHEN Shu, et al. Study on Human Error and Intervention Strategies of High Falling Accidents[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(6): 139-144.
- [40] REN J, JENKINSON I, WANG J, et al. A Methodology to Model Causal Relationships on Offshore Safety Assessment Focusing on Human and Organizational Factors[J]. Journal of Safety Research, 2008, 39(1): 87-100.
- [41] KHAN R U, YIN Jing-bo, MUSTAFA F S, et al. Risk Assessment and Decision Support for Sustainable Traffic Safety in Hong Kong Waters[J]. IEEE Access, 2020(8): 72893-72909.
- [42] 杨柏丞, 赵志奎, 陈海力. 基于模糊规则库 Fine-Kinney 方法的沿海水域碰撞事故人为失误风险分析[J]. 大连海事大学学报, 2019, 45(1): 40-46.
YANG Bai-cheng, ZHAO Zhi-lei, CHEN Hai-li. Human Error Risk Analysis of Coastal Water Collision Accidents Based on Fine-Kinney Method of Fuzzy Rule Base[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019, 45(1): 40-46.
- [43] ZHOU Jian-lan, LEI Yi. A Slim Integrated with Empirical Study and Network Analysis for Human Error Assessment in the Railway Driving Process[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 204: 107148.
- [44] PAN Xing, WU Ze-kun. Performance Shaping Factors in the Human Error Probability Modification of Human Reliability Analysis[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics: JOSE, 2020, 26(3): 538-550.
- [45] ZHU Meng-ya, CHEN Deng-kai, WANG Jing-luan, et al. Analysis of Oceanaut Operating Performance Using an Integrated Bayesian Network Aided by the Fuzzy

- Logic Theory[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2021, 83(1): 103129.
- [46] 杨波, 刘烨瑶, 廖佳伟. 载人潜水器——面向深海科考和海洋资源开发利用的“国之重器”[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 622-631.
- YANG Bo, LIU Ye-yao, LIAO Jia-wei. Manned Submersibles—Deep-Sea Scientific Research and Exploitation of Marine Resources[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(5): 622-631.
- [47] 张帅, 陈登凯, 叶聪, 等. 考虑动态热环境因素的潜航员人因可靠性评估[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(4): 1071-1080.
- ZHANG Shuai, CHEN Deng-kai, YE Cong, et al. Human Reliability Assessment of Oceanauts Considering Dynamic Thermal Environment[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(4): 1071-1080.
- [48] 张帅, 叶聪, 何卫平, 等. 载人潜水器坐底过程人因失效预测[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2): 290-296.
- ZHANG Shuai, YE Cong, HE Wei-ping, et al. Research on Method of Human Failure Prediction in the Process of Landing Manned Submersibles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2): 290-296.
- [49] CHEN Deng-kai, FAN Yu, YE Cong, et al. Human Reliability Analysis for Manned Submersible Diving Process Based on CREAM and Bayesian Network[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2019, 35(7): 2261-2277.
- [50] 陈登凯, 王雨倩, 叶聪, 等. 载人潜器驾驶舱人机工效评估方法研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(7): 105-109.
- CHEN Deng-kai, WANG Yu-qian, YE Cong, et al. Research on the Method of Ergonomics Evaluation in Manned Submersibles Cockpit[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(7): 105-109.
- [51] 梁睿思, 张凌浩. 以用户为中心的载人潜水器交互界面设计探析[J]. 包装工程, 2012, 33(18): 31-34.
- LIANG Rui-si, ZHANG Ling-hao. Research on Interface Design of Manned Submersible User-Centered[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(18): 31-34.
- [52] 张亦驰, 孙功武, 马向能, 等. 基于人因的深海载人潜水器航控界面的优化设计[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(1): 154-158.
- ZHANG Yi-chi, SUN Gong-wu, MA Xiang-neng, et al. Optimal Design of Navigation Control Interface for Deep-Sea Manned Submersible Based on Human Factors[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(1): 154-158.
- [53] 李瀛. 载人潜水器舱室空间布局设计方法与应用研究[J]. 设计, 2017(1): 14-15.
- LI Ying. The Space Layout Research of Design Method and Application on Manned Submersible[J]. Design, 2017(1): 14-15.
- [54] 王文中, 张树生, 叶聪, 等. 载人潜水器虚拟潜航员作业姿态仿真优化[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(8): 163-170.
- WANG Wen-zhong, ZHANG Shu-sheng, YE Cong, et al. Simulation and Optimization for Operating Attitudes of Virtual Submariners of Manned Submersibles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(8): 163-170.
- [55] 韩端锋, 韩海辉, 刘峰, 等. 载人潜水器驾驶舱三维布局优化研究[J]. 船舶工程, 2013, 35(1): 76-80.
- HAN Duan-feng, HAN Hai-hui, LIU Feng, et al. Research on 3D Layout Optimization of HOV Cabin[J]. Ship Engineering, 2013, 35(1): 76-80.
- [56] 宗立成, 叶聪, 余隋怀, 等. 载人潜水器舱室设备智能布局设计方法研究[J]. 中国造船, 2013, 54(3): 147-154.
- ZONG Li-cheng, YE Cong, YU Sui-huai, et al. Research and Application of Intelligent Layout Method in DSV Cabin Equipment[J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(3): 147-154.
- [57] 张帅, 何卫平, 陈登凯, 等. 载人潜水器舱室空间舒适性复合评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 83-89.
- ZHANG Shuai, HE Wei-ping, CHEN Deng-kai, et al. Compound Evaluation Method for the Space Comfort of Manned Submersible[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10): 83-89.
- [58] 范文, 余隋怀, 王文军, 等. 蚁群算法求解人机布局优化问题[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(7): 955-962.
- FAN Wen, YU Sui-huai, WANG Wen-jun, et al. Ant Colony Algorithm for Human-Machine Layout Optimization[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(7): 955-962.
- [59] 叶聪, 宗立成, 陈登凯. 虚拟设计在潜水器舱室布局设计中的研究与应用[J]. 机械设计, 2015, 32(1): 6-12.
- YE Cong, ZONG Li-cheng, CHEN Deng-kai. Research and Application on Virtual Design in Cabin Layout Design of Deep Submergence Vehicle[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(1): 6-12.
- [60] 庞永杰, 王亚兴, 高婷, 等. 潜水器螺旋桨和舵翼布局的优化[J]. 中国造船, 2014, 55(4): 11-19.
- PANG Yong-jie, WANG Ya-xing, GAO Ting, et al. Optimum Arrangement of Propeller and Rudder for an Autonomous Underwater Vehicle[J]. Shipbuilding of China, 2014, 55(4): 11-19.
- [61] 宗立成, 余隋怀, 孙晋博, 等. 基于鱼群算法的舱室布局优化问题关键技术研究[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(2): 257-262.
- ZONG Li-cheng, YU Sui-huai, SUN Jin-bo, et al. Study on Cabin Layout Optimization with Fish Algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(2): 257-262.
- [62] 范文, 余隋怀, 王军锋. 基于人体疲劳特性的载人潜水器舱室布局评估方法[J]. 机械设计, 2015, 32(9): 105-110.

- FAN Wen, YU Sui-huai, WANG Jun-feng. Evaluation Method of DSV Cabin Layout Based on Human Fatigue Characteristics[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(9): 105-110.
- [63] 王文中, 张树生, 余隋怀, 等. 基于解构·重构思维的潜水器舱室布局优化[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(7): 2045-2052.
- WANG Wen-zhong, ZHANG Shu-sheng, YU Sui-huai, et al. Optimization of Submarine Cabin Layout Based on Deconstruction and Reconstruction[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(7): 2045-2052.
- [64] 陈登凯, 范昱, 张帅, 等. 舱内功能及人机工效导向的载人潜水器工作舱布局设计方法[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(2): 41-50.
- CHEN Deng-kai, FAN Yu, ZHANG Shuai, et al. Manned Submersible Working Cabin Layout Design Method under Cabin Function System Constraints and Ergonomic Constraints[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(2): 41-50.
- [65] 韩海辉. HOV 驾驶舱布置方案评估方法研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- HAN Hai-hui. Research and Application of Evaluation Methodology for HOV Cabin Layout Plan[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [66] WANG Wen-zhong, ZHANG Shu-sheng, YE Cong, et al. A New Method for Optimizing the Cabin Layout of Manned Submersibles[J]. Complexity, 2022(1): 1-11.
- [67] ZHU Meng-ya, CHEN Deng-kai, FAN Yu, et al. A Method for Designing the Longitudinal Position of a Porthole in a Manned Submersible Based on the back Muscle Fatigue Characteristics[J]. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 2021, 34(6): 701-721.
- [68] 刘蔚. 多学科设计优化方法在 7000 米载人潜水器总体设计中的应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- LIU Wei. Application of MDO Method to 7000m HOV General Design[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [69] 梁耀海, 王寿雄, 沙很得克·斯玛胡勒, 等. 基于逆向设计方法的潜水器设计研究[J]. 科技创新与应用, 2018(9): 128-129.
- LIANG Yao-hai, WANG Shou-xiong, SMAHULE S, et al. Research on Submersible Design Based on Reverse Design Method[J]. Technology Innovation and Application, 2018(9): 128-129.
- [70] 张玉梅, 徐青, 吴凤辉. 舰船造型设计及其量化评价方法[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(5): 8-14.
- ZHANG Yu-mei, XU Qing, WU Feng-hui. The Method for Topside Designs and the Quantitative Evaluation of Naval Surface Ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(5): 8-14.
- [71] 谢云飞, 孙建飞. 基于 SVR 近似模型的潜水器外形优化[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(23): 127-130.
- XIE Yun-fei, SUN Jian-fei. Optimization of Submersible Shape Based on SVR Surrogate[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(23): 127-130.
- [72] KANNAPPA P P, SINGH Y, IDICHANDY V G. Numerical study of a twin sphere pressure hull and outer fairing for manned submersible[C]// 2015 IEEE Underwater Technology. Chennai: IEEE, 2015: 1-11.
- [73] 张亦驰, 冯康佳, 胡芳琳, 等. 深海载人潜水器造型设计及其优选方法[J]. 机械设计, 2018, 35(6): 113-119.
- ZHANG Yi-chi, FENG Kang-jia, HU Fang-lin, et al. Method of Modeling Design and Optimization of Deep-Sea Manned Submersible[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(6): 113-119.
- [74] 吴俊飞, 黄旭, 杜照远, 等. 深潜器外压球壳综合安全评价研究[J]. 机械制造, 2018, 56(1): 89-93.
- WU Jun-fei, HUANG Xu, DU Zhao-yuan, et al. Study on Comprehensive Safety Evaluation of External Pressure Spherical Shell of Deep Sea Vehicle[J]. Machinery, 2018, 56(1): 89-93.
- [75] DSOUZA N, LU Li-xuan. A Literature Review on Human Reliability Analysis Techniques Applied for Probabilistic Risk Assessment in the Nuclear Industry[M]// Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer International Publishing, 2016: 41-54.
- [76] 吴一波, 王古常. 人因可靠性认知机理研究进展[J]. 应用科技, 2013, 40(5): 66-70.
- WU Yi-bo, WANG Gu-chang. Research Progress of Cognitive Mechanism of Human Reliability[J]. Applied Science and Technology, 2013, 40(5): 66-70.
- [77] , et al. Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications[J]. Applied Ergonomics, 1985, 16(1): 68.
- [78] VESTRUCCI P. The Logistic Model for Assessing Human Error Probabilities Using the SLIM Method[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1988, 21(3): 189-196.
- [79] WILLIAMS J C. A data-based method for assessing and reducing human error to improve operational performance[C]// Conference Record for 1988 IEEE Fourth Conference on Human Factors and Power Plants. Monterey: IEEE, 1988: 436-450.
- [80] HOLLNAGEL E. Cognitive Reliability and Error Analysis Method: Cream[M]. 1st ed. Oxford: Elsevier, 1998.
- [81] COOPER S E, RAMEY-SMITH A M, WREATHALL J, et al. A Technique for Human Error Analysis (ATHE-ANA) [J]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports. 1996(10): 249298.
- [82] BARATI R, SETAYESHI S. Human Reliability Analysis of the Tehran Research Reactor Using the SPAR-H Method[J]. Nuclear Technology and Radiation Protection, 2012, 27(3): 319-332.
- [83] FORESTER J, BLEY D, COOPER S, et al. Expert

- Elicitation Approach for Performing ATHEANA Quantification[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 83(2): 207-220.
- [84] WOODS D D, ROTH E M, POPLE H J. Cognitive Environment Simulation: An Artificial Intelligence System for Human Performance Assessment: Summary and Overview: (Technical Report, may 1986June 1987)[J]. 1987(10): 487
- [85] [85] CACCIABUE P C, DECORTIS F, DROZDOWICZ B, et al. COSIMO: A Cognitive Simulation Model of Human Decision Making and Behavior in Accident Management of Complex Plants[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1992, 22(5): 1058- 1074.
- [86] TYLER S W. Man-machine Integration Design and Analysis System (MIDAS)[C]// Conference Companion on Human Factors in Computing Systems - CHI '94. New York: ACM Press, 1994: 35-36.
- [87] SMIDTS C, SHEN S H, MOSLEH A. The IDA Cognitive Model for the Analysis of Nuclear Power Plant Operator Response under Accident Conditions. Part I: Problem Solving and Decision Making Model[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1997, 55(1): 51-71.
- [88] 杨越, 张燕飞, 王建忠. 基于 CREAM 和贝叶斯网络的空管人误概率预测方法[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(3): 37-43.
- YANG Yue, ZHANG Yan-fei, WANG Jian-zhong. Prediction Method of Human Error Probability in Air Traffic Management Based on CREAM and Bayesian Network[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(3): 37-43.
- [89] 王宁, 杜修力, 张明聚, 等. 地铁盾构施工工人因可靠性分析的加权模糊 CREAM 模型[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(2): 200-210.
- WANG Ning, DU Xiu-li, ZHANG Ming-ju, et al. A Weighted Fuzzy CREAM Model for Human Reliability Analysis in Shield Tunneling[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(2): 200-210.
- [90] YAO Kai, YAN Sheng-yuan, TRAN C C. A Fuzzy CREAM Method for Human Reliability Analysis in Digital Main Control Room of Nuclear Power Plants[J]. Nuclear Technology, 2022, 208(4): 761-774.
- [91] ZHANG Ren-you, TAN H, AFZAL W. A Modified Human Reliability Analysis Method for the Estimation of Human Error Probability in the Offloading Operations at Oil Terminals[J]. Process Safety Progress, 2021, 40(3): 84-92.
- [92] UNG S T. A Weighted CREAM Model for Maritime Human Reliability Analysis[J]. Safety Science, 2015, 72: 144-152.
- [93] 刘继新, 曾道宇, 冯思旭, 等. 基于改进 CREAM 扩展法的管制人员人因可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6): 2246-2251.
- LIU Ji-xin, ZENG Xiao-yu, FENG Si-xu, et al. Human Reliability Analysis of the Air Traffic Controllers Based on the Development Method of CREAM[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(6): 2246-2251.
- [94] SUN Yan-hao, ZHANG Qi, YUAN Zhi-ming, et al. Quantitative Analysis of Human Error Probability in High-Speed Railway Dispatching Tasks[J]. IEEE Access, 8: 56253-56266.
- [95] 范文. 狭小工作舱人体疲劳特性分析及布局优化研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
- FAN Wen. Research on Fatigue Characteristics and Layout Optimization in Narrow Working Cabin[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016.

责任编辑: 陈作