

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201810148

载人潜水器舱室空间舒适性复合评估方法

张 帅¹,何卫平¹,陈登凯¹,叶 聪²,徐伟哲²,樊 皓¹

(1. 陕西省工业设计工程实验室(西北工业大学),西安 710072; 2. 中国船舶科学研究中心,江苏 无锡 214082)

摘要:为改善载人潜水器舱室空间舒适性,针对深海载人潜水器强约束条件下舱室空间舒适性特征,提出基于虚拟仿真技术的舱室可视化空间舒适性多源复合评估方法。该方法以虚拟仿真技术为基础,将载人潜水器舱室空间三维数字化数据与宇航员人体数据相结合,构建数字化虚拟仿真模型;以快速相应与评估为标准,将人体舒适性进行分区,并对载人潜水器空间与功能特征进行系统的分析,依托人体生理学特征获取人体舒适性区域特征及空间约束映射,建立7项评估指标;结合6项人因评估工具构建舒适性多源复合评估模型,采用虚拟仿真技术开发空间舒适性可视化评估系统,并通过某型载人潜水器舱室空间优化设计,对舒适性多源复合评估方法和可视化评估原型系统进行可行性验证。研究表明,不同的任务作业姿态严重影响人体舒适性评估的准确性,狭小的舱室空间及舱内设备的布局进一步增大了作业姿态评估的难度。采用空间舒适性复合评估方法能够准确的描述多种姿态下空间舒适性程度,同时多源和可视化的技术特点在一定程度上提升了空间设计方案评估效率以及评估结果的可读性。

关键词:载人潜水器;舱室设计;空间舒适性;人机工效;虚拟仿真

中图分类号: TB18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)10-0083-07

Compound evaluation method for the space comfort of manned submersible

ZHANG Shuai¹, HE Weiping¹, CHEN Dengkai¹, YE Cong², XU Weizhe², FAN Hao¹

(1. Shaanxi Engineering Laboratory of Industrial Design (Northwestern Polytechnical University), Xi'an 710072, China;
2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: To improve the space comfort of manned submersible compartment, a multi-source composite evaluation method based on virtual simulation technology was proposed to evaluate the space comfort of deep-sea manned submersible compartment under strong constraints. Based on virtual simulation technology, the method combines three-dimensional digital data of manned submersible compartment space with human data of submersible to construct a digital virtual simulation model. By regarding rapid correspondence and evaluation as criterion, human comfort was divided into zones, and the space and function characteristics of manned submersible were systematically analyzed. Through acquiring human comfort zone characteristics and space constraint mapping based on human physiological characteristics, seven evaluation indicators were established. Six human factors assessment tools were combined to build a multi-source composite comfort evaluation model. The visual evaluation system of space comfort was developed by virtual simulation technology, and the feasibility of the multi-source composite evaluation method and the visual evaluation prototype system was validated by optimizing the space design of a manned submersible cabin. The research shows that different task postures seriously affected the accuracy of human comfort assessment. The narrow cabin space and the layout of equipment in cabin further increased the difficulty of job posture assessment. The composite evaluation method of spatial comfort could accurately describe the degree of spatial comfort under various postures. At the same time, the technical characteristics of multi-source and visualization improved the efficiency of evaluation of spatial design schemes and the readability of evaluation results to a certain extent.

Keywords: manned submersible; cabin design; space comfort; ergonomics; virtual simulation

走向深海远洋是中国拓展国家资源储备和国家战略空间的需求,是可持续发展的必然要求,也是实现建设海洋强国的必经之路^[1]。载人潜水器是深海

科学研究和资源勘探的关键技术装备^[2]。目前,美、日、法国正加速相关装备技术的研究^[3],近年来中国在深海勘探装备与技术研究方面成果显著^[4],目前已经完成“蛟龙”号和“深海勇士”号两型载人潜水器的研发工作,并投入实际应用^[5]。

由于受到深海压力的限制,潜水器载人舱一般设计为直径2 m左右的球形舱室。根据深海任务要

收稿日期: 2018-10-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0300600)

作者简介: 张 帅(1987—),男,博士研究生;

何卫平(1965—),男,教授,博士生导师

通信作者: 陈登凯, chendengkai@nwpu.edu.cn

求,除搭载 3 名潜航员外,载人舱还装备了大量的实验设备,进一步限制了潜航员的活动空间,导致舱室空间环境复杂且舒适性差^[6]. 潜航员在长时间的深海任务中必须承受空间狭小和密闭的双重压力,对潜航员生理和心理都是极大的挑战,影响潜航员作业的效率和安全. 密闭狭小环境舒适性对人健康、工作效率的影响一直都是国内外学者研究和探讨的热点话题^[7].

在载人潜水器舱室设计与应用过程中,如何通过改善舱室舒适性提升人因可靠性和提高作业效率的是一个亟待解决的关键问题^[8-9]. 舒适性指标的量化是衡量舱室空间人机工效水平的重要指标,国内外学者对驾驶舱舒适性量化进行了大量的研究^[10-12],但普遍存在操作复杂、判断指标单一、缺少快速响应等缺点.

本文在多项载人潜水器舱室设计的基础上,通过研究舱室空间特征、潜航员作业特征、舱室空间约束条件以及舱室区域划分特征,构建舱室空间舒适性多源复合模型,开发可视化评估系统,为舱室人因优化设计提供理论支撑.

1 舱室空间舒适性复合评估流程

载人潜水器舱室复合评估方法主要包括创建三维虚拟仿真模型、舒适性多元负荷评估以及优化方案的可视化评估 3 个基本环节,如图 1 所示.

1.1 创建三维虚拟仿真模型

三维数字化仿真模型包括虚拟环境(及虚拟舱室)和虚拟人(及虚拟潜航员). 依托载人潜水器舱室工程数据通过工程软件(Soldworks, Pro-E, CATIA 等)或造型软件(Rhino, 3Dmax 等)创建等尺寸原始三维模型,通过 JACK 人因工程仿真平台创建虚拟环境. 根据潜航员人体数据标准确定虚拟人体数据^[13]. JACK 是西门子工业软件公司旗下的集三维仿真、数字人体建模、人因工效分析等功能于一体的高级人机工程仿真软件^[14]. 由 JACK 创建虚拟人模型,一般选择中国人人体数据库第 5、50、95 百分位数据作为虚拟人^[15].

1.2 舒适性多源复合评估方法

舒适性多源复合评估方法是将 JACK 人因工程仿真平台多种工具人因仿真分析结果,通过建立评估指标映射和隶属度函数,对结果进行均一化处理. 可针对虚拟人整体和局部舒适性、姿态舒适性、可达性及可视性进行仿真.

1.3 优化方案的可视化评估

依托 JACK 平台进行可视化二次开发. 采用扁平化原则,构建二级界面,一级界面以雷达图的形式

直观展现人体舒适性分区评估结果;二级界面包含舒适性数据的数据源,可根据具体评估优化指标查询具体评估数据. 根据舱室舒适度复合评估模型创建程序菜单,构建程序框架,并依据各项评估指标建立交互式评估界面. 该系统具有快速评估、结果追溯、交互式数据源的特点.

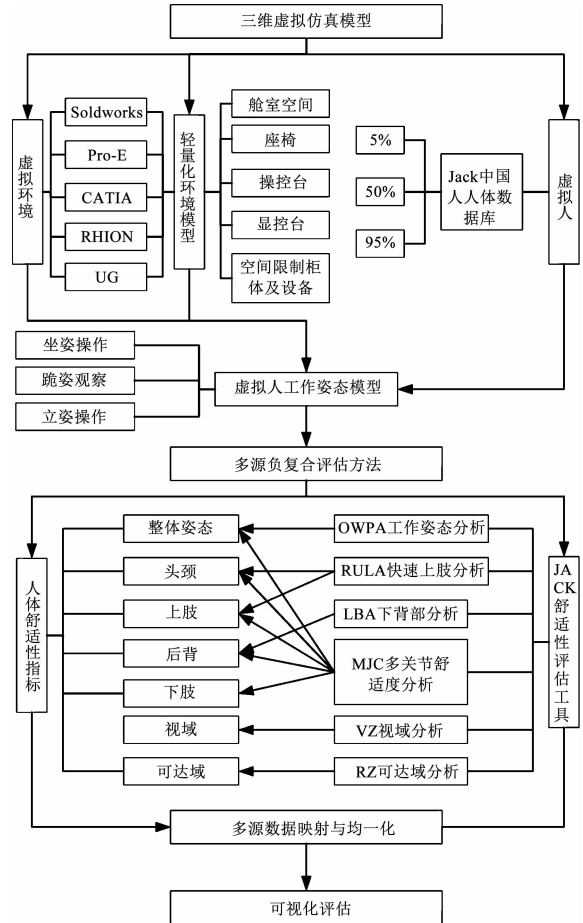


图 1 多源复合评估流程

Fig. 1 Multi-source compound evaluation process

2 载人潜水器空间舒适性分析

2.1 载人潜水器舱室空间特征

载人潜水器是指具有水下观察和作业能力的潜水装置. 主要用来执行水下考察、海底勘探、海底开发和打捞、救生等任务^[16]. 当前大潜深载人潜水器舱室载人球壳主要采用钛合金制成^[17]. 由于受到深海水压制约,载人潜水器舱室一般为直径 2 m 左右的球型舱室,内部空间极其紧张,除搭载必要的显控设备、生保设备、实验设备外,还需搭载 3 名成员(1 名潜航员、2 名科学家),如图 2 所示.

根据水下任务要求,将直径内径 2 m 的载人舱室划分为多个功能区域. 主要功能立面分区包括:舱口出入区、试验设备安放区、显控系统、显示器、操作台、主/侧舷窗、潜航员活动区、生命保护系统区;主

要功能平面分区包括:显示区、副显示区、观察区、潜航员活动区、观察员活动区、生命保护系统区,如图 3 所示。

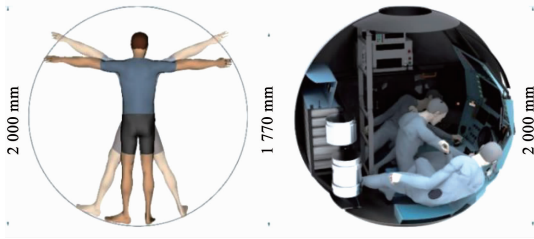


图 2 载人潜水器舱室空间特征
Fig. 2 Space characteristics of cabin

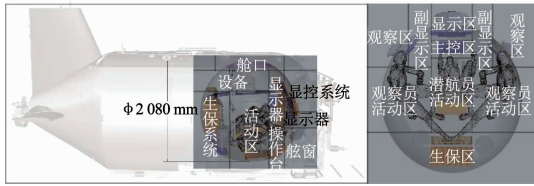


图 3 空间功能分区
Fig. 3 Spatial function partition

2.2 潜航员人体舒适性分区

潜航员作业姿态舒适性受到狭小活动空间的影响。潜航员典型作业姿态主要包括坐姿状态下操作、跪姿观察等。根据解剖学人体分区原则以及典型姿态舒适性特征,将潜航员人体划分为肢体舒适性与活动区域舒适性两大部分,如图 4 所示。

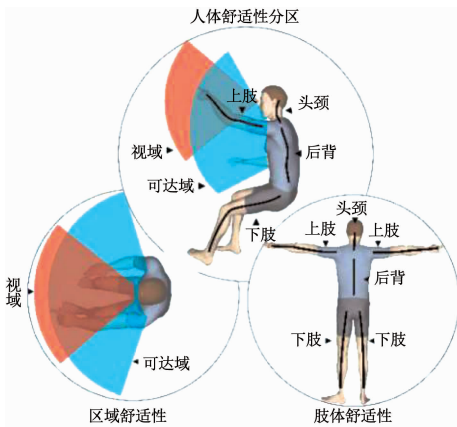


图 4 人体舒适性分区
Fig. 4 Zoning of body comfort

2.2.1 肢体舒适性(Z)

肢体舒适性(Z)主要为影响人体舒适性的肢体区域。肢体舒适性主要归纳为 5 个方面指标:Z1 整体姿态、Z2 头颈、Z3 上肢、Z4 后背、Z5 下肢。根据解剖学人体分区以及人体舒适性特征,肢体舒适性分区各方面主要针对人体对应部位进行舒适性描述,如图 5 所示。

2.2.2 活动区域(H)

活动区域舒适性(H)为潜航员执行任务操作时

人体的主要活动区域,根据潜航员舱室操作行为与任务目标,将活动域舒适性分为 H1 视域和 H2 可达域,如图 3 所示。

载人潜水器作业过程中,显示器、仪表、操作按钮等需要潜航员具有较好的可视性来保证操作的完成。潜航员可视域分析是舱室空间舒适性重点考虑的因素,如图 6 所示,根据人机工程学原理,人眼与显示屏的视角关系,可知人眼到显示屏的最佳距离

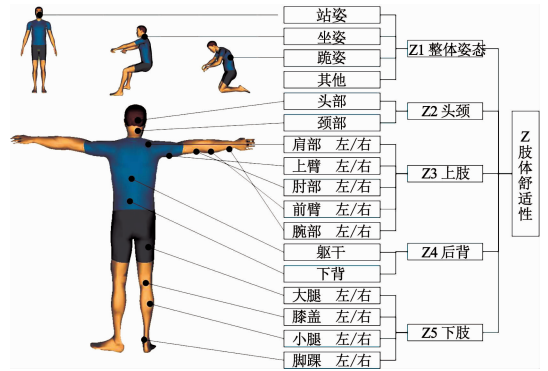


图 5 肢体舒适性指标
Fig. 5 Body comfort index

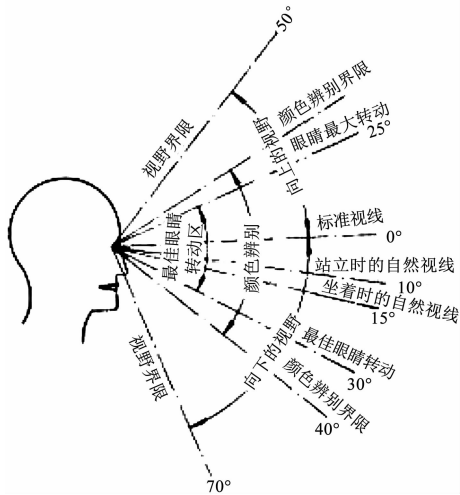
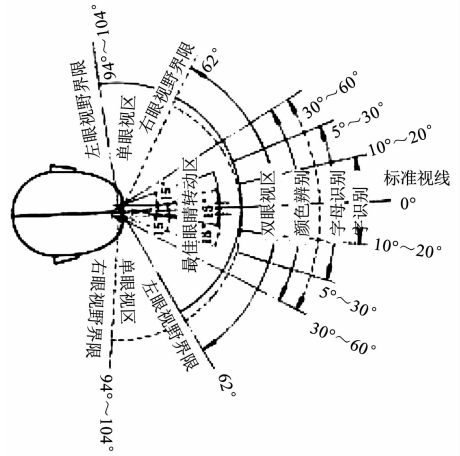


图 6 人体视觉特征
Fig. 6 Visual feature index

是 710 mm, 上视角 < 10°, 下视角 < 45°, 显示屏和垂直面角度应小于 30°, 人眼中心点与屏幕角度为 90° ± 10°. JACK 提供了可视化的视域分析, 能够有效评估舱室设计的视域舒适性.

可达域是指潜航员在典型的工作姿态下的最大可触及范围, 在分析过程中以潜航员典型工作姿态为基础, 一般选择中指指尖作为最大可达域的分析基准, 判断按键、仪表盘、设备面板等需要操作的仪器处于可达域范围内, 表明了该工作姿势下工效学设计的合理性, 如图 7 所示.

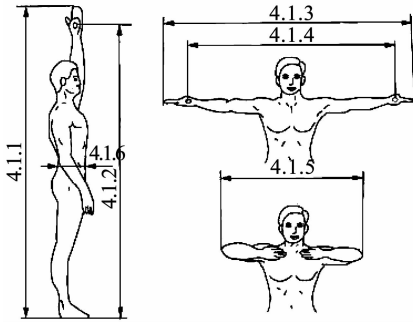


图 7 人体区域舒适性特征

Fig. 7 Comfort characteristics of body regions

3 舒适性多源复合评估模型

本文基于 JACK 人因工效仿真平台, 构建潜航员舒适性虚拟仿真模型.

3.1 舒适性评估指标映射

在虚拟的舱室环境下, 对空间舒适性评估的主要原则包括以下 4 个方面: 1) 考虑任务过程中潜航员整体姿态的舒适性, 包括任务过程中典型姿态的舒适性以及姿态之间转化的舒适性; 2) 坐姿操作状态下, 身体姿态对颈椎、躯干、背部等舒适性影响; 3) 在舱室空间中对相关设备操作时的舒适性, 包括操作时某关节的舒适性, 操作对腰部产生的不适, 手臂、腿部、躯干等操作行为引起的的工作姿态舒适性分析; 4) 任务过程中的典型操作行为是否在最佳操作范围之内, 如显示器、仪表是否在最佳视域, 按键、手柄、面板等是否在最佳可达域内.

载人潜水器舱室不同于一般设备舱室, 其具备空间狭小、操作任务多样、人员活动区重叠、球形的视觉与行为空间等特点, 基于上述原则对载人潜水器舱室空间环境中潜航员舒适性进行评估时, 需要采用多种人因评估工具才能展开有效的舒适性评估, 需要对 JACK 提供的人因分析工具进行分类与整合, 构建复合评估模型. 主要采用 6 项人因分析工具: OWPA (ovako working posture analysis) 工作姿态分析 (J1)、RULA (rapid upper limb assessment) 快速上肢分析 (J2)、LBA (lower back analysis) 下背部分

析 (J3)、MJC (multi-joint comfort) 多关节舒适度 (J4)、VZ (vision zones) 视域分析 (J5)、RZ (reach zones) 可达域 (J6), 如图 8 所示.

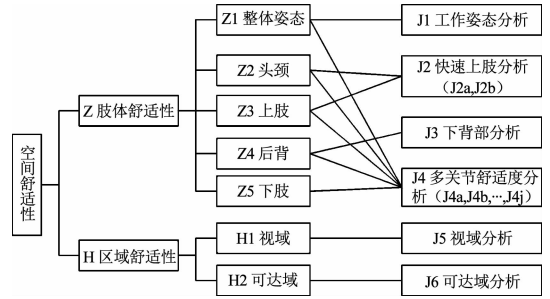


图 8 人体舒适性分区

Fig. 8 Zoning of body comfort

3.2 评估指标隶属度函数

根据每种工具分析出数据的模糊分布不同, 构造隶属度函数为 (见表 1)

$$F(x, m) = \begin{cases} 1, x \leq a; \\ \frac{b-x}{b-a}, a < x < b; m = 1 (J1, J2, J3, J4) \\ 0, b \leq x. \\ 0, \bar{x} \leq 6; \\ 1 - \exp\left(-\left(\frac{\bar{x}-6}{2\sigma}\right)^2\right), \bar{x} > 6. \end{cases} \quad m = 2 (H1, H2)$$

式中: $m = 1$ 描述为舒适性分析结果包含最大值和最小值, 分析结果越小舒适性越优, 适用于 J1, J2, J3, J4, 其中 a 为最小值, b 为最大值; $m = 2$ 描述为专家评分获取指标, 适用于 J5, J6, 其中总分为 10; σ 为标准差, 为 n 位专家打分的平均值.

表 1 舒适性范围

Tab. 1 Comfort range

分析工具	J1	J2	J3	J4
最小值 a	0	1	3 400	0
最大值 b	4	8	6 400	80

3.2.1 OWAS 工作姿态分析 (J1)

OWAS 根据背部、手臂和腿部负载快速评估工作姿态舒适性. OWAS 评分为 4 级指标: 1) 正常姿态, 不需要矫正; 2) 姿势有一定不良影响, 根据约束条件酌情调整; 3) 姿势有不良影响, 应尽快纠正; 4) 姿势非常有害, 必须尽快纠正.

根据评分构建 OWAS 隶属度函数为

$$F(J1, 1) = \begin{cases} 1, x \leq 1; \\ \frac{4-x}{3}, 1 < x < 4; m = 1 \\ 0, 4 \leq x. \end{cases}$$

3.2.2 RULA 快速上肢分析(J2)

RULA 能够根据人体姿势、肌肉的使用、负荷的质量、任务的持续时间和频率来评价上肢动作的危险性. RULA 最后评分(1~8分)划分4个等级:1)1~2分为该姿态可维持较长时间;2)3~4分为长时间需要改变姿态;3)5~6分为短时间内必须改变姿态;4)7分以上必须立刻调整姿态.

根据评分构建 RULA 隶属度函数为

$$F(J2,1) = \begin{cases} 1, x \leq 2; \\ \frac{7-x}{5}, 2 < x < 7; m=1 \\ 0, 7 \leq x. \end{cases}$$

3.2.3 LBA 下背部分析(J3)

LBA 利用生理学下背部模型,计算 L4/L5 脊椎处的压力值,并与 NIOSH 推荐的压力及极限压力进行比较. NIOSH 标准中 3 400 N 是背部压力的推荐值,6 400 N 为背部的极限压力,超出后面面临受伤风险. 根据 NIOSH 推荐压力范围构建 LBA 隶属度函数为

$$F(J3,1) = \begin{cases} 1, x \leq 3\ 400; \\ \frac{6\ 400-x}{3\ 000}, 3\ 400 < x < 6\ 400; m=1 \\ 0, 6\ 400 \leq x. \end{cases}$$

3.2.4 MJC 多关节舒适度(J4)

MJC 评估涉及颈部、减半、背部、臀部、左右臂、左右腿. 身体的舒适度不仅与一、两个关节有关,而是和全身的关节都有关. MJC 给出 0~80 的舒适度评分,分值越大舒适度越低.

$$F(J4,1) = \begin{cases} 1, x \leq 0; \\ \frac{80-x}{80}, 0 < x < 80; m=1 \\ 0, 80 \leq x. \end{cases}$$

3.2.5 VZ 视域与 RZ 可达域

JACK 提供了动态可视化的虚拟仿真环境与评估,为 VZ 视域与 RZ 可达域专家打分评估提供参考依据. 专家打分为 10 分制,分值越高越优,构建 VZ 和 RZ 隶属度函数为

$$F(H1/H2,2) = \begin{cases} 0, \bar{x} \leq 6; \\ 1 - \exp\left(-\left(\frac{\bar{x}-6}{2\sigma}\right)^2\right), \bar{x} > 6. \end{cases} m=2$$

3.3 多源数据均一化处理

结合复合 7 项评估指标和隶属度函数对空间舒适性进行复合评估. 根据绘制舒适性雷达评估图.

根据人因分析工具中分项指标的指向性,明确各项舒适性评估指标. 人因分析工具中 J1、J3、J5、J6 提供一组数据,分别指向 Z1、Z4、H1、H2. J2 针对头

颈、上肢分析提供 a、b 两组数据,即 J2a、J2b 分别指向 Z2、Z3. J4 选取提供 8 组数据,包括 a (neck)、b (shoulder)、c (back)、d (right arm)、e (left arm)、f (right leg)、g (left leg)、h (comfort) 见表 2.

表 2 舒适性评估指标与数据

Tab.2 Comfort evaluation index and data

舒适性评估指标	评估数据来源
Z1	J1、J4h
Z2	J2a、J4a、J4b
Z3	J2b、J4d、J4e
Z4	J3、J4c
Z5	J4f、J4h
H1	J5
H2	J6

将不同来源数据根据其来源性质带入对应隶属度函数进行计算,结果取均值,获得对应舒适性评估指标计算公式如下:

$$R(Z1) = [F(J1,1) + F(J4h,1)]/2,$$

$$R(Z2) = [F(J2a,1) + F(J4a,1) + F(J4b,1)]/3,$$

$$R(Z3) = [F(J2b,1) + F(J4d,1) + F(J4e,1)]/3,$$

$$R(Z4) = [F(J3,1) + F(J4c,1)]/2,$$

$$R(Z5) = [F(J4f,1) + F(J4h,1)]/2,$$

$$R(H1) = F(J5,2),$$

$$R(H2) = F(J6,2).$$

式中:Z 为肢体舒适性评价指标,其中 Z1 为整体姿态、Z2 为头颈、Z3 为上肢、Z4 为后背、Z5 为下肢;H 为区域舒适性评价指标,其中 H1 为视域、H2 为可达域;J 为人因分析工具,其中 J1 为工作姿态分析、J2 为快速上肢分析(包括两组数据 J2a、J2b)、J3 为下背部分析、J4 为多关节舒适度分析(包括 8 组数据 J4a~J4h)、J5 为可达域分析、J6 为视域分析.

4 空间舒适性可视化评估系统开发与应用

4.1 基于 JACK 平台的二次开发工具

本文拟在舒适性多源复合评估模型的基础上,依托 JACK 平台进行可视化二次开发,如图 9 所示. 舱室可视化舒适度复合评估系统是在 JACK 平台上,基于 C 语言的二次开发,采用 Tcl/Tk 脚本语言编写界面和操作平台,借助 JACK 提供 JavaScript 脚本语言(在 Python 语言的基础上编写的)对模型的运动和运动分析进行控制.

4.2 舒适性可视化评估原型系统指标与界面

根据舱室舒适度复合评估模型创建程序菜单,构建程序框架,并依据各项评估指标建立交互式评

估对话框. 舱室舒适度复合评估系统包括两功能模块及总体舒适度分析, 舒适度数据模块. 舒适性指标得分为 0 ~ 1.0, 指标得分划分为 4 个等级: 0.9 ~ 1.0 分, 为高水平舒适度, 无需优化; 0.7 ~ 0.9 分, 为中等水平舒适度, 可根据要求适度优化; 0.5 ~ 0.7 分, 为低等水平舒适度, 需进行优化; 低于 0.5 分, 为极低等水平舒适度, 需进行深度优化, 如图 10 所示.

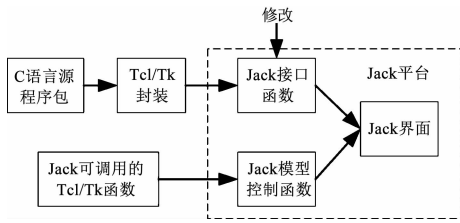


图 9 JACK 二次开发过程

Fig. 9 Add-on functions development on JACK

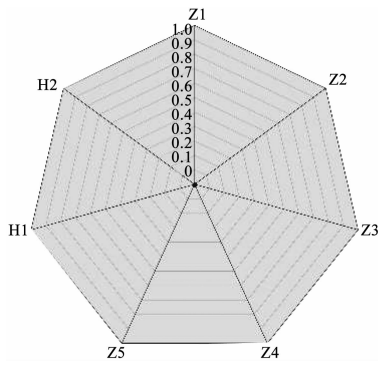


图 10 总体舒适度评估等级

Fig. 10 Overall comfort assessment grade

功能界面采用交互式对话框设计, 可根据虚拟人姿态调整更新显示数据, 方便快速获取总体舒适度评估指标; 界面提供数据接口, 以子窗口显示数据来源以及各部位详细舒适度数据, 方便虚拟人姿态调整以及方案优化, 如图 11 所示.

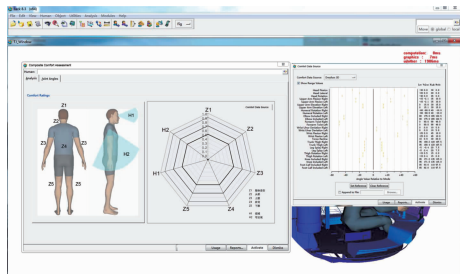


图 11 可视化原型系统界面

Fig. 11 System interface of visualized prototype

4.3 某型载人潜水器舱室空间舒适性评估

本文以某型载人潜水器舱室空间舒适性评估为例, 对本文提出方法加以应用与验证.

改型载人潜水器舱室为内径 1.8 m 的球形舱室, 根据工程约束及设备型号限制, 舱室立面拟采用双层设计, 一层为潜航员主要活动与操作区域层高

约为 1.4 m, 二层为设备安放区, 一层平面采用 3 段设计, 前显控台、中活动区、后安保区设计, 中部地板留出潜航员腿部空间. 研究目标为分析和评估该型舱室空间布局舒适度、空间乘坐舒适度、操作舒适度状况, 寻求舱室空间舒适度优化与改进措施如图 12 所示.

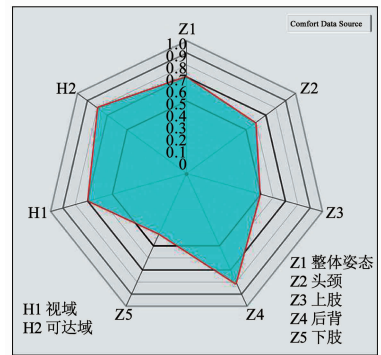
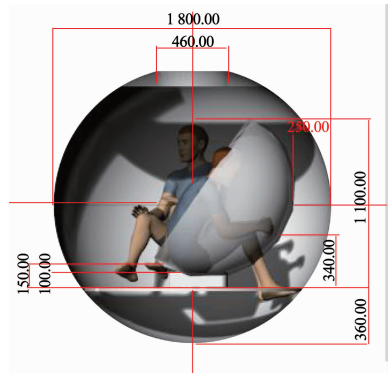


图 12 某型载人潜水器舱室与舒适性评估

Fig. 12 A certain type of submersible cabin can its comfort evaluation

对潜航员坐姿操作状态下空间舒适性进行评估, 依据初步方案模型以及环境、尺度、功能约束条件确定空间数字模型, 虚拟人选取中国人人体数据库第 50 百分位人体数据, 以坐姿操作为待评估姿态. 根据典型坐姿操作特征将空间数字模型与 3 名虚拟人模型进行匹配. 如图 13 所示, 根据可视化界面可直观获得当前潜航员坐姿状态下空间舒适性特征, 当前状态整体舒适性尚可, 腿部空间舒适性明显不足. 评估结果见表 3.

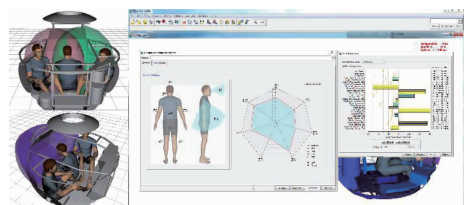


图 13 可视化系统评估结果

Fig. 13 Visualized system evaluation results

表 3 某型舱室空间舒适性评估结果

Tab.3 Space comfort evaluation result of a certain type of cabin

舒适性指标	评估值	等级	分析
整体姿态 Z1	0.7	二	舒适性较好,可以满足工作需要.
头颈 Z2	0.6	三	姿态颈部肌肉紧张,舒适性较差,不易长时间保持姿态.
上肢 Z3	0.5	三	正常操作状态,上臂肌肉紧张,舒适性一般、不易长时间保持,需要有辅助物撑.
背部 Z4	0.8	二	躯干状态及肌肉舒适性较好,
下肢 Z5	0.4	四	腿部空间舒适性差,大腿肌肉过于紧张,膝盖与脚踝扭转压力大,需延伸小腿前驱空间或抬高坐面降低腿部肌肉压力.
视域 H1	0.7	二	可观察视域较好,主要面板与操作按钮均在视域范围内且远近适中.
可达域 H2	0.8	二	可达域较好,上肢空能与操作面板位置均能满足任务要求.

评估结果显示该方案下肢与上肢舒适性较差,需要进行重点优化.根据评估结果提出优化方案:

- 1)地板提升 40 mm 以增加腿部空间,减少小腿疲劳与脚踝压力;
- 2)增大操控台面积提升对上肢操作的支撑,缓解操作疲劳;
- 3)通过调整操控台高度调整坐姿操作时头颈部姿态,改善颈部舒适性.

如图 14 所示,优化后方案各项指标均衡,均达到舒适性允许范围内.

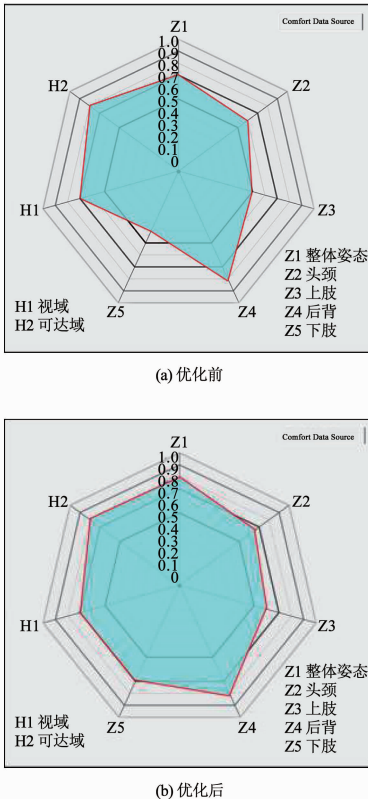


图 14 优化前后评估结果

Fig. 14 Evaluation results before and after optimization

5 结 论

1) 本文在系统分析载人潜水器舱室空间环境特征的基础上,对潜航员空间舒适性分析与分析方法进行了讨论,归纳整理了 7 项舒适性评估指标,增强评估结果的指向性,从整体的角度为方案优化提供参考.

2) 提出了基于 JACK 人因分析平台的复合评估方法,通过 6 项舒适性评估工具获得多舒适性源数据,多源复合评估采用多种评估工具数据源进行综合评估,提升评估结果的准确性;

3) 开发空间舒适性可视化评估系统.最终以某型载人潜水舱室为例,实例验证了舒适性可视化系统的可行性.优化设计过程中采用舒适性多源复合评估方法,能够快速直接获得评估结果,避免了冗长繁杂的评估报告带来的信息负担.

参考文献

[1] GAO Xiang, DING Kang, REN Yugang, et al. Target deployment and retrieval using JIAOLONG manned submersible in the depth of 6 600 m in Mariana Trench[J]. China Ocean Engineering, 2017, 31(5): 618. DOI: 10.1007/s13344-017-0071-9

[2] CUI Weicheng. Development of the Jiaolong deep manned submersible[J]. Marine Technology Society Journal, 2013, 47(3): 37. DOI: 10.4031/MTSJ.47.3.2

[3] HARDY K, CAMERON J, HERBST L, et al. Hadal landers: The deepsea challenge ocean trench free vehicles[C]// OCEANS. San Diego, CA: IEEE, 2013: 1-10. DOI:10.23919/OCEANS.2013.6741368

[4] 徐伟哲, 张庆勇. 全海深潜水器的技术现状和发展综述[J]. 中国造船, 2016, 57(2): 206
XU Weizhe, ZHANG Qingyong. A summary of technical status and development of all-sea deep submersible[J]. Shipbuilding of China, 2016, 57(2): 206. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2016.02.023

[5] 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
LIU Feng. Present situation and prospect of deep-sea manned submersible[J]. Journal of Engineering Studies, 2016, 8(2): 172. DOI: 10.3724/SP.J.1224.2016.00172

[6] 姜磊, 金风来, 侯德永, 等. 大气环境控制技术在“蛟龙”号载人潜水器上的应用[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(8): 127
JIANG Lei, JIN Fenglai, HOU Deyong, et al. The application of the atmosphere control technology for the manned submersible Jiaolong [J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(8): 127. DOI:10.3404/j.issn.1672-7649.2014.08.025

[7] LUO Maohui, DE DEAR R, JI Wenjie, et al. The dynamics of thermal comfort expectations: The problem, challenge and impication [J]. Building and Environment, 2016, 95: 322. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.07.015