

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201712133

载人潜水器深海作业舱室热舒适性分析

张 帅¹,余隋怀¹,陈登凯¹,叶 聪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 710068; 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热环境舒适性,采用 PMV-PPD(predicted mean vote-predicted percentage of dissatisfied)热舒适性模型,分析了载人潜水器任务过程中舱室热环境与舒适性变化特征.以载人潜水器低纬度海域 7 000 m 海试任务环境数据为基础,分析了海试下潜过程中 8 个典型任务阶段的舱室热环境动态变化特征,并获取关键人因数据与环境数据,利用 Matlab 计算获得任务过程中舱室平均热感觉指数 PMV 与预计不满意者的百分数 PPD,通过对比 PMV-PPD 线型,研究了过程舱室热舒适性动态特征和分布特征,针对风速和服装热阻两个可控因素进行热舒适性优化分析.研究表明:载人潜水器水下任务过程中,舱室 PMV 值在 $[-2, +2]$ 之间持续变化;任务前期热舒适性特征为偏热,任务中后期热舒适性热证为偏冷;其中 84% 任务阶段舱室热舒适性较差,其中 79.69% 的任务阶段偏冷,16% 任务阶段偏热;风速 v 和服装热阻 I_{cl} 为密闭舱室调节热舒适性重要影响因素.针对缺少空调系统的载人潜水器,控制热环境阶段保持 0.5 m/s 左右风速,冷环境阶段提升 0.93 ~ 1.48 服装热阻可有效改善舱室热舒适性.

关键词: 载人潜水器;深海作业;热舒适性;预计平均热感觉指数 PMV;动态环境;人的因素

中图分类号: U664. 86

文献标志码: A

文章编号: 0367 - 6234(2019)04 - 0033 - 07

Thermal comfort analysis of deep-sea operating cabin of manned submersible

ZHANG Shuai¹, YU Suihui¹, CHEN Dengkai¹, YE Cong², FAN Hao¹

(1. Shaanxi Engineering Laboratory for Industrial Design (Northwestern Polytechnical University), Xi'an 710068, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: To improve the thermal environment comfort of the manned submersible chamber, the thermal environment characteristics of cabin thermal environment were analyzed by the thermal comfort model of predicted mean vote-predicted percentage of dissatisfied (PMV-PPD). Based on the cabin environment data of 7000-meter task, the dynamic environment characteristics of the typical task stage were analyzed, and the key data about human and environment were obtained. By calculation of PMV-PPD by Matlab and further comparison of the index, the thermal comfort dynamic characteristics and distribution characteristics were investigated. In addition, optimization analysis of cabin thermal comfort was carried out regarding two controllable factors, wind speed and clothing thermal resistance. Results show that the PMV value was constantly changing between $[-2, +2]$, and the thermal comfort of the pre-mission was characterized by the heat. Among them, 84% of the mission stage cabin thermal comfort was poor, of which 79.69% was cold and 16% was hot. Wind speed v and clothing thermal resistance I_{cl} were important influencing factors for the regulation of thermal comfort in airtight cabin. For the manned submersible system lack of air conditioning, when the wind speed maintained 0.5 m/s in the control thermal environment stage and clothing thermal resistance increased by 0.93 ~ 1.48 at the cooling environment stage, clothing thermal resistance could effectively improve cabin thermal comfort.

Keywords: manned submersible; deep-sea operation; thermal comfort; PMV; dynamic environment; human factor

载人潜水器是深海科学研究和资源勘探的便捷工具^[1]. 美、日等国载人深潜技术发展较早,相关成果保持领先^[2],但早期技术条件相对滞后,近年来也在加速相关技术的研究.虽然中国载人深潜项目发展较晚,但起点高,具有后发优势,近年来发展迅

速,成果显著^[3].

载人潜水器舱室空间狭小,能源分配紧张,限制常规的空调系统的应用,舱室内热环境变化复杂且舒适性差^[4]. 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. 封闭环境舒适性对人健康、工作效率的影响是国内外学者研究和探讨的热点话题. 美国供暖制冷空调工程师学会标准 ASHRAE Standard 定义:“热舒适性”是人指对热环境表示满意的意识状态^[5]. 1970 年丹麦学者 Fanger 提出了预计平均热感觉指

收稿日期: 2017 - 12 - 21

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;

余隋怀(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者: 陈登凯,chengdengkai@nwpu.edu.cn

数于不满意模型 (the predicted mean vote- predicted percentage of dissatisfied, PMV-PPD), 作为热环境对生产力影响的评估工具被广泛的应用. Jang 等^[6]采用 PMV-PPD 指数进行韩国海上巡逻船舱 PMV/PPD 的热舒适设计; 张炳力等^[7]采用 PMV-PPD 模型结合空气龄针对轿车舱内热舒适性进行分析; 石小容等^[8]采用 PMV-PPD 指标分析了高速列车车厢热舒适性; 莫志姣等^[9]研究了驾驶室热舒适性的可视化仿真技术; 孙智等^[10]开展了基于改进 PMV 指标的飞机驾驶舱热舒适性分析; 金雅婷等^[11]深入讨论了船舶舱室动态环境热舒适性问题.

本文通过对载人潜水器作业过程热舒适性特征的分析, 获得典型任务阶段热舒适性特征以及优化条件, 为舱室舒适型设计、安全控制、节能设计、任务分配等工作提供理论支撑.

1 热舒适性评价指标

PMV-PPD 目前已经成为许多国家和国际标准组织评估热舒适的官方评价方法. 例如: 国际标准化组织 ISO standard 7730^[12], 美国采暖、制冷与空调工程师学会 ASHRAE Standard 55^[13], 欧洲标准化委员会 CEN15251^[14], 以及 GB/T 18049 — 2017《热环境的人类工效学 通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释》^[15]等.

1.1 人体的热平衡方程

人体热平衡 (the human body heat balance)^[16]方程是人体热舒适性研究的基础. 人体的热舒适性主要取决于人体新陈代谢的产热量与人向周围环境的散热率之间的平衡关系. 人体热平衡方程为

$$M - W = C + R + E + S.$$

式中: M 为人体能量代谢率; W 为人体所做的机械功; C 为体表与外环境的对流热交换; R 为体表与外环境的辐射热交换; E 为皮肤汗液蒸发、呼出水蒸气与环境的热交换; S 为人体的蓄热率.

1.2 预计平均热感觉指数 (PMV)

PMV 指标对人体热舒适性进行全面评价, 当人体处于稳态的热环境下, 人体的热负荷越大, 热体偏离热舒适的状态就越远^[17]. 根据 GB/T 18049 — 2017《热环境的人类工效学 通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释》规定, PMV-PPD 模型通过 6 项指标计算进行热环境舒适度量化评估, 服装热阻 I_{cl} 、代谢率 M 、空气温度 t_a 、平均辐射温度、风速 v 、空气相对湿度. PMV 表明预计暴露在统一环境下的群体对下述 7 级热感觉 (−3 ~ +3) 投票的平均值见表 1.

表 1 7 级 PMV 指数^[17]
Tab. 1 Seven-point thermal sensation scale^[17]

热感觉	冷	凉	较凉	适中	较温暖	温暖	热
PMV	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3

PMV 指数是根据人体热平衡方程进行计算的, GB/T 18049 — 2017《热环境的人类工效学 通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释》规定了 PMV-PPD 的计算^[12]为:

$$\begin{aligned} PMV = & [0.303 \times \exp(-0.036M) + 0.028] \times \\ & (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5\,733 - 6.99(M - W) - P_a] - \\ & 0.42 \times [(M - W) - 58.15] - 1.7 \times 10^{-5} \times M \times (5\,867 - P_a) - \\ & 0.001\,4 \times M \times (34 - t_a) - 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times \\ & [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35.7 - 0.028 \times (M - W) - I_{cl} \times \\ & \{ 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - \\ & (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \}, \end{aligned} \quad (2)$$
$$h_c = \begin{cases} 2.38 \times |t_{cl} - t_a|^{0.25}, & \text{for } 2.38 \times |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \times \sqrt{v_{ar}}; \\ 12.1 \times \sqrt{v_{ar}}, & \text{for } 2.38 \times |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \times \sqrt{v_{ar}}, \end{cases} \quad (3)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \times I_{cl}, & \text{for } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2\text{K/W}; \\ 1.05 + 0.645 \times I_{cl} & \text{for } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2\text{K/W}, \end{cases} \quad (4)$$

$$P_a = \varphi_a \times P_s = \varphi_a \times 610.6 \times \exp\left(\frac{17.260 \times t_a}{273.3 + t_a}\right). \quad (5)$$

式中: PMV 为预计平均热感觉指数; M 为代谢率, 根据潜航员主要任务活动获取代谢率; W 为外部做功消耗的热量; I_{cl} 为服装热阻; f_{cl} 为人的体表面积与裸露时人的体表面积之比; t_a 为空气温度; $\bar{t}_r$ 为平均热辐射温度; v 为空气流速; p_a 为水蒸气分压; h_c 为对流换热系数; t_{cl} 为服装表面温度; HR 为空气相对湿度.

1.3 预计不满意者的百分数 (PPD)

PPD 指数可对于热不满意的人数给出定量的预计值^[12]. 对应 7 级热感觉投票指标, PPD 可预计群体中感觉过暖或过凉人的百分数, 如图 1 所示给出了 PMV 与 PPD 函数关系. 根据 PMV 指数, 可由下式计算出对应的 PPD.

$$\begin{aligned} PPD = & 100 - 95 \times \exp(-0.003\,353 \times PMV^4 - \\ & 0.217\,9 \times PMV^2). \end{aligned} \quad (6)$$

2 载人潜水器任务分析与数据获取

2.1 动态任务过程

载人潜水器作业任务时间长、作业空间小、任务

难度和强度大、作业环境恶劣^[18]. 图2为“蛟龙号”低纬度海域某次海试数据, 下潜深度为7 000 m, 全过程任务时间为12 h, 根据任务阶段特征, 将完整的任务过程划分为8阶段 St. A-St. H 见表2.

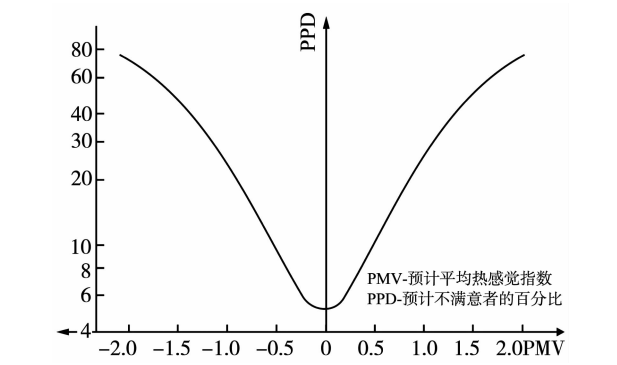


图1 PPD与PMV的函数关系^[12,17]

Fig. 1 PPD as function of PMV^[12,17]

表2 7 000 m 海试任务分段

Tab. 2 Task segmentation of 7 000 m deep-sea mission				
阶段	任务	时间	持续时间/min	数据编号
A	布放	6:30-6:50	20	01-03
B	海面下潜准备	6:50-7:20	30	04-06
C	下潜	7:20-9:00	100	07-16
D	巡航	9:00-10:30	90	17-25
E	海底作业	10:30-14:30	240	26-38
F	上浮	14:30-18:00	210	39-67
G	海面回收准备	18:00-18:20	20	68-72
H	回收	18:20-18:50	30	73-75

2.2 温度与湿度动态特征

海水的温度随着下潜深度的增加逐渐降低, 7 000 m时海水温度约为1℃~2℃. 海水温度的变化特征直接影响载人舱内的温度和湿度. 图2为任务过程中温度和湿度变化曲线. 下潜过程中载人舱温度逐渐降低, 最终将维持在一个较低的水平.

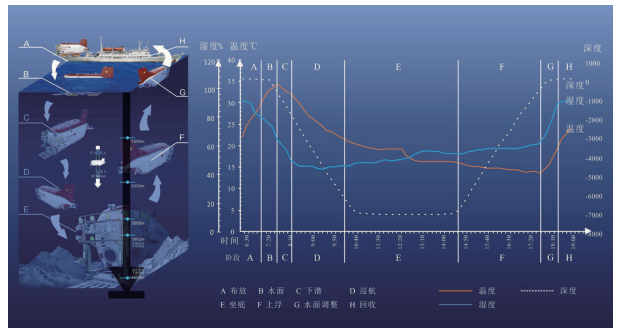


图2 “蛟龙号”7 000 m 海试任务分段数据及温度 & 湿度变化曲线

Fig. 2 7 000 m mission data and temperature & humidity change curve of the “Jiaolong” manned submersible

光直射载人潜水器, 舱室温度呈上升趋势; 第2阶段 St. C-F, 潜水器开始下潜, 舱内温度明显降低, 随着下潜深度的增加, 温度下降的趋势开始趋于平缓, 至完成水下作业任务, 潜水器上浮过程中舱内温度逐渐达到最低13℃; 第3阶段 St. G-H, 潜水器浮出水面, 舱室温度逐渐回升. 舱内温度变化与湿度变化呈正比. 图3显示载人舱内温度最高为34℃、最低为13℃, 相对湿度最高为92%, 最低为40%.

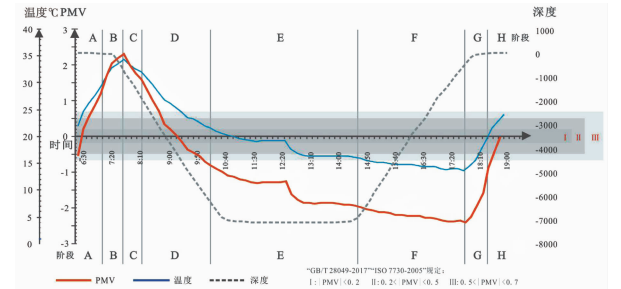


图3 任务过程PMV变化曲线

Fig. 3 Task process PMV curves

选取下潜过程中6:30-18:50之间75组温度和湿度数据, 数据间隔10 min, 即温度 $t_a = \{t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}, \dots, t_{a75}\}$ 、湿度 $RH = \{RH_1, RH_2, RH_3, \dots, RH_{75}\}$.

2.3 关键人因数据获取

关键人因数据包括: M 代谢率和 I_{cl} 服装热阻两项指标, 分别根据潜航员任务活动情况及着装要求获得.

2.3.1 潜航员代谢率 M

载人潜水器8个任务阶段的任务活动主要为坐姿状态下的轻度活动状态, 获得典型作业状态下潜航员代谢率, $M = 70 \text{ W/m}^2 = 1.2 \text{ Met}$.

2.3.2 潜航员服装热阻 I_{cl}

服装热阻 I_{cl} 中潜航员着装标准要求着装主要包括内裤、短袖、标准长裤、工作夹克、袜子和薄底鞋见表3, 对应潜航员着装组合计算服装热阻为 $I_{cl} = \text{sum}(I_{cli}) = 0.127 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, $\text{clo} = 1.07$. 由于服装热阻 $I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 根据用式(4)计算人体表面积与裸露时认定体表面积之比 $f_{cl} = 1.1645$.

表3 (I_{cl}) 服装热阻

Tab. 3 Thermal insulation for garments of oceanauts		
服装	热阻 I_{cli}	
	clo	$\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
内裤	0.03	0.005
短袖	0.15	0.023
标准长裤	0.25	0.039
夹克(工作服)	0.60	0.054
袜子	0.02	0.003
鞋(薄底)	0.02	0.003

注: 1 clo = 0.155 $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$

温度变化分为3个阶段: 第1阶段 At. A-B, 阳

2.4 关键环境数据获取

根据蛟龙号某次低纬度海域 7 000 m 海试数据分析获得环境关键数据.

1) 空气温度. 根据海试数据获得 75 组温度数据, $t_a = \{t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}, \cdots, t_{a75}\}$.

2) 平均热辐射温度. 本文研究的重点在于分析人环境的变化特征, 假设平均辐射温度等同于空气温度, 即 $t_r = t_a = \{t_{a1}, t_{a2}, t_{a3}, \cdots, t_{a75}\}$.

3) 空气流速. 载人潜水器舱室内部安装两台小型空气循环风扇, 舱室内空气基本接近于静止, 因此根据 ASHRAE 标准规定 $v \leq 0.15$ m/s 为静止空气, 本文计算假设空气流速 $v = 0.15$ m/s.

4) 相对湿度. 根据数据获得 75 组相对湿度数据 $RH = \{RH_1, RH_2, RH_3, \cdots, RH_{75}\}$, 可根据温度和湿度数据由式(4)计算获得舱室任务阶段水蒸气分压, 由于动态环境中 有 75 组温度和湿度数据, 如图 2 所示, 因此计算获得 75 组水蒸气分压数据, $p_a = \{p_{a1}, p_{a2}, p_{a3}, \cdots, p_{a75}\}$.

5) 外部做工消耗热量. 根据 GB/T 18049 — 2017《热环境的人类工效学 通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释》规定^[12,17] 大多数活动外部做工消耗热量可忽略不计, 因此计算中假设潜航员舱内活动外部做功消耗的热量为 0, 即 $W = 0$.

3 PMV-PPD 计算及曲线特征分析

3.1 基于 Matlab 的 PMV-PPD 数据计算及曲线绘制

本文基于 Matlab 平台进行载人潜水作业过程中热舒适性变化的计算, 根据 PMV-PPD 模型式(1)~(5)编写代码见表 4, 计算获得 75 组 PMV 数据和 PPD 数据并根据对应时间和深度数据绘制变化曲线. 图 3 为任务过程中 PMV 热舒适性指数变化曲线, 在全过程中舱室 PMV 指数在 $-2.3 \sim 2.3$ 之间变化. 图 4 为 PPD 热不满意度指数在任务过程的变化曲线, 全程不满意度指数浮动较大, 极端情况下不满意度指数达到 90% 以上.

表 4 PMV-PPD 计算代码(Matlab)
Tab. 4 PMV-PPD calculation code (Matlab)

定义变量与初步计算	过程量计算	PMV/PPD 计算
<pre>% Variable definition M=70;clo=1.07; ta=(ta); tr=(tr); v=0.15; pa=(pa);W=0; % Calculate fcl Value fcl=1.05+0.107*clo; if(Icl<0.5) fcl=1.0+0.215*clo; End % Calculate tcl Value %% First guess for surface temperature taa=ta+273; tra=tr+273; tcla=taa+(35.3-ta)/(3.5*(Icl+0.1)); XN=tcla/100; XF=XN; %% Compute Surface Temperature of Clothing by Successive Substitution Iterations fclc=Icl*0.155*fcl; p1=fclc*taa; p2=fclc*3.96; p3=fclc*100; p4=308.7-0.028*RMW+p2*(tma/100).^4; nIterations=0; XF=XN; while((nIterations<150)) XF=(XF+XN)/2;</pre>	<pre>%% HC Calculation HCF=12.1*(v).^0.5; HCN=2.38*abs(100*XF-taa).^0.25; if(HCF>HCN) HC=HCF; % Convective Heat Transfer Coefficient else HC=HCN; end XN=(p4+p1.*HC-p2.*XF.^4)/ (100+p3.*HC); nIterations=nIterations+1; if((nIterations>1)& (abs(XN-XF)<Tolerance)) break; end end if(nIterations<150) TCL=100*XN-273; % Surface Temperature of Clothing</pre>	<pre>% Compute the Predicted Mean Vote (PMV)——计算 PMV PM1=3.96*fcl*(XN.^4-(tma/100).^4); PM2=fcl*HC*(tcl-ta); PM3=0.303*exp(-0.036*M)+0.028; PM4=0.0; if(RMW>58.15) PM4=0.42*(RMW-58.15); end BMV=RMW-3.05*0.001*(5733- 6.99*RMW-pa); CMV=-PM4-1.7*0.00001*M* (5867-pa)-0.0014*M*(34-ta)- PM1-PM2; PMV1=PM3*(BMV+CMV); % Calculate the Predicted Percentage Dissatisfied (PPD) PPD=100-95*exp(-0.03353* PMV1.^4-0.2179*PMV1.^2); else PMV1=999; PPD=100; end disp(PMV1); disp(PPD);</pre>

3.2 PMV-PPD 线型分析

对比图 3、4 任务过程中各阶段 PMV 和 PPD 变化曲线进行热舒适性线型分析.

1) St. A-B, 载人潜水器开始下潜之前, 温度持续上升, 热感觉指数由 PMV 舒适区间 $[-0.5, 0.5]$ 快速升至较热区间 $[2, 3]$, PPD 不满意度指数由满意

区间 $[0, 10\%]$ 区间上升至不满意区间 $[80\%, 90\%]$ 。

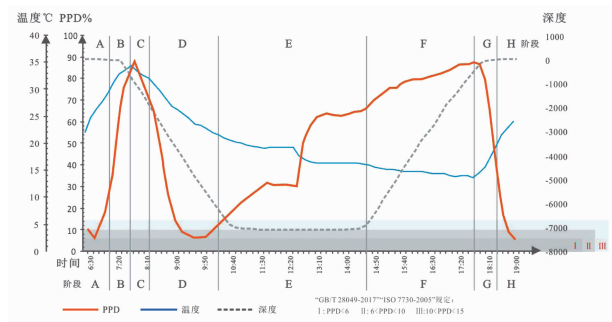


图4 任务过程 PPD 变化曲线

Fig. 4 Task process PPD curves

2) St. C-D, 载人潜水器开始下潜, 热舒适性由较热区间逐步回落, $[-4\ 000, -5\ 000]$ 区间舱室 PMV 值在 $[-0.5, 0.5]$ 最舒适区间内, 随着深度下降温度继续下降, 到达 $-7\ 000\text{ m}$ 时舱室热舒适性 PMV 值开始低于 -1 并持续下降, 潜航员热舒适性开始转为凉, PPD 不满意指数也由不满意区间 $[80\%, 90\%]$ 下降至满意区间 $[0, 10\%]$ 。

3) St. E, 当载人潜水器到达 $-7\ 000\text{ m}$ 后, 深度不再变化, 此时 PMV 指数持续下降, 直至 St. E 海底作业阶段结束, 热舒适性 PMV 指数接近 -2 , PPD 不满意指数逐渐上升至较不满意区间 $[60\%, 70\%]$ 。

4) 任务阶段 St. F, 海底任务结束, 载人潜水器开始上浮, 温度持续热舒适性继续下降, 直至接近海面热舒适性降到最冷区间 $[-3, -2]$, PPD 不满意指数上升至不满意区间 $[80\%, 90\%]$ 。

5) 任务阶段 St. G-St H, 浮出海面后热舒适性逐渐上升回归至舒适性区间 $[-0.5, 0.5]$, PPD 不满意指数逐渐回落至满意区间 $[0, 10\%]$ 。

3.3 任务过程热舒适性分布

3.3.1 PMV 分布

根据 GB/T 18049 — 2017《热环境的人类工效学 通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释》规定^[17], 热环境舒适性可分为偏冷、适中、偏热 3 种类型, 由冷到热 7 个区间, 见表 5, 偏冷类型占整个过程的 79.69%, 适中类型占整个过程的 10.67%, 偏热类型占过程的 16.00%。因此载人潜水器海试任务过程主要的热舒适性类型为偏冷。

3.3.2 PPD 分布

根据 GB/T 18049 — 2017《热环境的人类工效学 通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释》规定^[17], 可分为 4 个等级 A-D, 其中 A、B、C 分别为可接受舒适度区间, D 为待改进舒适度区间。由表 6 可知任务过程中占 84% 的任务阶段处于待优化区间。

表 5 任务过程 PMV 分布区间

Tab. 5 Task process PMV distribution interval

热环境舒适性类型	偏冷 79.67%			适中 10.67%	偏热 16.00%		
	冷	凉	较凉		较暖	暖	热
PMV 区间	$[-3.0, -2.5]$	$[-2.5, -1.5]$	$[-1.5, -0.5]$	$[-0.5, 0.5]$	$[0.5 - 1.5]$	$[1.5 - 2.5]$	$[2.5, 3.0]$
任务比例	26.67%	30.67%	16.00%	10.67%	6.67%	9.33%	0

表 6 任务过程 PPD 分布区间

Tab. 6 Task process PPD distribution interval

等级	全身热状态		任务过程	
	PPD/%	PMV	所属阶段	比例/%
A	PPD < 6	$-0.2 < \text{PMV} < +0.2$	St. A、St. D、St. H	6.67
B	6 < PPD < 10	$-0.5 < \text{PMV} < -0.2; 0.2 < \text{PMV} < +0.5$	St. A、St. D、St. H	4.00
C	10 < PPD < 15	$-0.7 < \text{PMV} < -0.5; 0.5 < \text{PMV} < +0.7$	St. A、St. D、St. H	5.33
D	15 < PPD	$-3.0 < \text{PMV} < -0.7; 0.7 < \text{PMV} < +3.0$	St. B、St. C、St. E、St. F、St. G	84.00

4 热舒适性优化分析

由于载人潜水器舱室内部空间有限, 缺少空调降温系统, 仅有 2 套小型空气循环风机^[4], 无法直接控制舱室温度进行舒适性优化。本文针对偏热和偏冷类型的任务过程进行专项分析, 偏热过程主要模

拟控制风速优化舒适性, 偏冷过程主要模拟添加衣物改变服装热阻优化舒适性。

4.1 偏热类型任务过程风速优化

偏热阶段热环境受到温度和湿度的共同影响。通过调控风速进行舒适性优化, 通过模拟不同风速条件, 对风速影响进行仿真。如图 5 所示, 研究选取

热舒适性为偏热类型的任务过程进行仿真,风速选取 0.15 ~ 5.00 m/s 间变化,间隔为 0.50 m/s,获取 11 组风速数据。

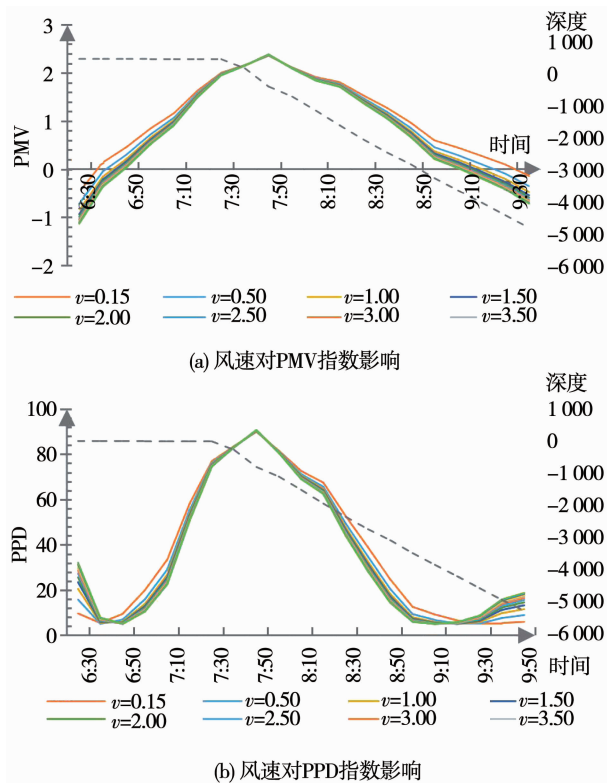


图 5 偏热类型任务过程风速影响对比

Fig. 5 Comparison of the influence of wind speed in the process of thermal type task

风速对载人潜水器舱室偏热环境的热舒适性影响不大,当初始 PMV 值在 $[1.5, 3.0]$ 之间时,风速变化对 PMV 指数基本没有影响,初始 PMV 值在 $[0.5, 1.5]$ 之间风速对热舒适性有改善作用,PMV 指数越小,风速影响越大,且风速的影响率呈递减趋势,风速为 0.50 m/s 左右时能耗与影响效果比最优。根据图 7, PPD 不满意指数变化可知在 6:50 ~ 7:20, 8:20 ~ 9:20 期间,及 St B、St C 后半段、St D 前段调整风速对热舒适性有一定影响。

4.2 偏冷类型任务过程服装热阻优化分析

根据标准潜航员着装要求计算获得潜航员服装热阻 $I_{cl} = 1.07$,以添加保暖衣物为条件对偏冷类型任务过程进行服装热阻优化,分析提升服装热阻对热舒适性的影响。以标准服装热阻 $I_{cl} = 1.07$ 为初始值,风速为理论静止风速 $v = 0.15$ m/s,根据 GB/T 18049 — 2017《热环境的人类工效学 通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释》^[17]规定的典型工作服组合热阻为变化值进行计算,获取 6 组数据,及 $clo = [1.07, 1.20, 1.40, 2.00, 2.20, 2.55]$ 。

图 6 表明,偏冷型作业过程优化服装热阻对热

舒适性影响显著,在水下 5 000 m 左右深度舱室热环境开始转为较冷状态,提升服装热阻及添加衣物或覆盖物能较好改善热舒适性。由对比图 6 可知,此时 I_{cl} 提升至 2.00 ~ 2.55 区间能够,将 PMV 值稳定在舒适区间,即 $-0.7 < PMV < 0.7$,热舒适性等级提升至 A-B 级,即 $PPD < 15$,获得最优热环境。根据初始 I_{cl} 值 1.07,需要提升 $[0.93, 1.48]$ 。

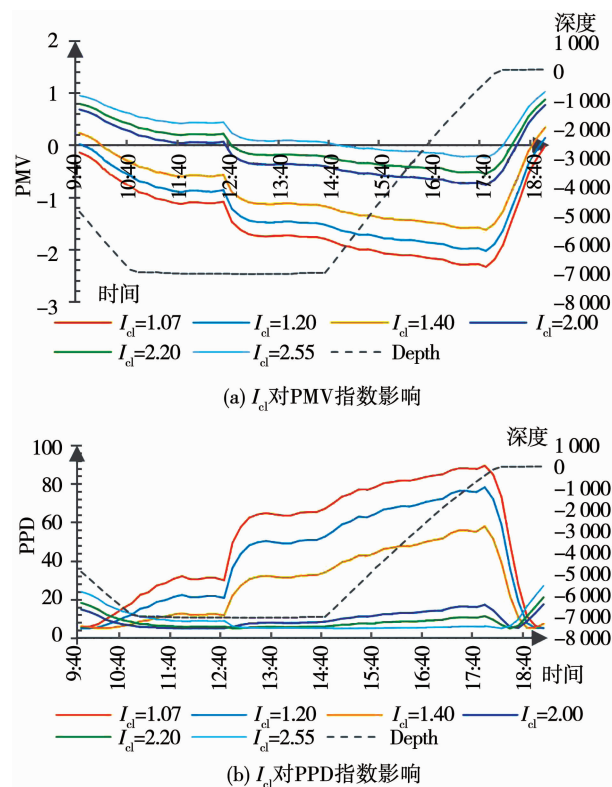


图 6 偏冷类型任务过程 I_{cl} 影响对比

Fig. 6 Comparison of I_{cl} effects in the cold type task process

5 结 论

1) 载人潜水器海试过程由于温度和湿度的影响热舒适性全程处于动态变化,PMV 值在 $[-2, +2]$ 之间持续变化,84.00% 任务阶段 PPD 指标处于待优化区间热舒适性较差。

2) PMV-PPD 动态曲线分析能够准确反映海试过程各任务阶段舱室热舒适性情况,海试主要过程处于较冷的作业环境,其中 84.00% 任务阶段舱室热舒适性较差,其中 79.69% 的任务阶段偏冷,16.00% 任务阶段偏热,任务 StA-StC 阶段期热舒适性特征为偏热,StC-StF 阶段热舒适性热证为偏冷。分析结果能够为舱室优化设计,任务分配,可靠性预测提供理论支撑。

3) 热舒适性优化分析确定在强约束条件下热舒适性可控影响因素的作用程度,针对缺少空调系统的载人潜水器,控制热环境阶段保持 0.5 m/s 左

右风速,冷环境阶段提升 0.93 ~ 1.48 服装热阻可有效改善舱室热舒适性. 其结果能够在能源优化分配、心理感知优化等方面提供支撑.

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] XUE Tao, ZHAO Yang, CUI Shengguo, et al. Design and implementation of Manned Submersible semi physical simulation system[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Qingdao, China: IEEE, 2016: 155. DOI:10.1109/ROBIO.2016.7866314

[3] LI Hao, LI Zhiwei, CUI Weicheng. A preliminary study of the resistance performance of the three manned submersibles with full ocean depth[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(12): 1411. DOI:10.3969/j.issn.1007-7294.2013.12.006

[4] 姜磊, 金凤来, 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

[5] WORLD EBOOK LIBRARY. American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers [J]. International Journal of Refrigeration, 1979, 2(1): 56. DOI:10.1016/0140-7007(79)90114-2

[6] JANG M S, KOH C D, MOON I S. Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels[J]. Building and Environment, 2007, 42(1): 55. DOI:10.1016/j.buildenv.2005.07.025

[7] 张炳力, 薛铁龙, 胡忠文. 基于 PMV-PPD 与空气龄的轿车乘员舱内热舒适性分析与改进[J]. 汽车工程, 2015, 37(8): 951

ZHANG Bingli, XUE Tielong, HU Zhongwen. Analysis and improvement of the thermal comfort in the passenger compartment of a car based on PMV/PPD and air age[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(8): 951. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2015.08.016

[8] 石小容, 伍川辉. 热舒适性 PMV-PPD 指标在高速列车上的应用[J]. 制冷与空调, 2013, 27(3): 249

SHI Xiaorong, WU Chuanhui. The application of PMV-PPD in high-speed train[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2013, 27(3): 249. DOI:10.3969/j.issn.1671-6612.2013.03.009

[9] 莫志姣, 唐江明, 谷正气, 等. 基于 PMV-PPD 可视化车室热舒适性仿真研究[J]. 计算机仿真, 2016, 33(9): 163

MO Zhijiao, TANG Jiangming, Gu Zhengqi, et al. A study on numerical simulation of cabin thermal comfort based on visual PMV-PPD index[J]. Computer Simulation, 2016, 33(9): 163. DOI:10.3969/j.issn.1006-9348.2016.09.035

[10] 孙智, 孙建红, 赵明, 等. 基于改进 PMV 指标的飞机驾驶舱热舒适性分析[J]. 航空学报, 2015, 30(3): 819

SUN Zhi, SUN Jianhong, ZHAO Ming, et al. Analysis of thermal comfort in aircraft cockpit based on the modified PMV index[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 30(3): 819. DOI:10.7527/S2000-6893.2014.0135

[11] 金雅婷, 阚安康, 夏平, 等. 船舶舱室环境下的动态热舒适研究[J]. 船舶与海洋工程, 2012(2): 37

JIN Yating, KAN Ankang, XIA Ping, et al. Research on the dynamic thermal comfort of ship cabin environment[J]. Naval Architecture and Ocean Engineering, 2012(2): 37. DOI:10.3969/j.issn.1005-9962.2012.02.010

[12] ISO 7730: 2005. Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria; DIN EN ISO 7730 (2006-05) [S]. Geneva, Switzerland: ISO, 2005

[13] ANSI/ASHRAE 55: 2013. Thermal environmental conditions for human occupancy; ASHRAE 55-2013/ERTA-2016 [S]. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2013

[14] BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics [M]. [S. l.]: European Committee for Standardization, 2007

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T 50785-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012

[16] 李先庭, 石文星. 人工环境学 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017

LI Xianting, Shi Wenxing. Built Environment Science [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 热环境的人类工效学 通过计算 PMV 和 PPD 指数与局部热舒适准则对热舒适进行分析测定与解释: GB/T 18049-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria: GB/T 18049-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017

[18] 张帅, 叶聪, 何卫平, 等. 载人潜水器坐底过程人因失效预测研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(2): 290

ZHANG Shuai, YE Cong, HE Weiping, et al. Research on the method of human failure prediction in the process of landing manned submersibles[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(2): 290-296. DOI:10.11990/jheu.201609053

(编辑 张 红)