

文章编号: 1671-6612 (2020) 03-390-07

潜艇集控舱室气流组织仿真及舒适性研究

杨怀德¹ 李志印¹ 石旭东² 张 瑶¹

(1.中国舰船研究设计中心 武汉 430064; 2.华中科技大学 武汉 430074)

【摘要】 潜艇密闭舱室的空调通风系统受工作环境所限,无法随时与外界进行气体交换。而集控舱室由于人员密集、散热设备较多等因素的影响,空气环境更为恶劣。对潜艇舱室环境进行有效控制,为船员提供舒适的生存环境,是潜艇总体性能的一个重要指标。鉴于此,采用计算流体力学方法,根据实际的边界条件,对集控舱室夏季水下和水上两工况舱室内的气流组织进行模拟计算。将计算结果可视化处理,对典型截面内的风速、温度、CO₂浓度和PMV值等指标进行分析。分析结果表明:在本文所采用的送风方式下,水下工况集控舱内大部分区域温度25℃左右,除送风口外其余位置风速在0.3m/s左右,CO₂浓度较小,舱内整体PMV值在-1~1之间。水上工况与水下工况相比,舱室内平均温度略高,风速相同,但相关指标均满足设计要求,船员的舒适性较好。研究结果对集控舱室气流组织的设计有一定的指导意义。

【关键词】 气流组织; 模拟; 舒适性; 集控舱

中图分类号 U664.86 文献标识码 A

Simulation Research on Air Distribution and Comfortableness in Central Control Room of Ssubmarine

Yang Huaide¹ Li Zhiying¹ Shi Xundong² Zhang Yao¹

(1.China Ship Development and Design Center, Wuhan, 430064;

2.School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074)

【Abstract】 Because of submarine working environment, Air-conditioning and ventilation system couldn't exchange gas of enclosed space in submarine with outside. For the features of staff-intensive and much waste heat from equipments accumulates in the internal air, air environment becomes worse. Having a more effective control of air environment of submarine and providing a comfortable living environment for the crew is an important performance index of submarine. In view of this, computational fluid dynamics will be used in this paper to simulate calculation of air distribution in the cabin of above and below the surface. The result will be visualized, and wind speed, temperature, CO₂ concentration and PMV value of representative section will be analyzed. The analysis results indicated that, in the condition of air supply method in this paper(underwater state), temperature of most area is around 25 centigrade, the wind speed is around 0.3 m/s except air supply grille. The CO₂ concentration was at a relatively low level and PMV value was from -1 to 1. Compared with underwater state, the average temperature of cabin in waterborne state was higher, the CO₂ concentration was smaller. However, related indicators satisfied design requirements and the crew felt more comfortable. The research result may be helpful for air distribution design in the central control room.

【Keywords】 air distribution; simulation; comfortableness; central control room

0 引言

潜艇集控舱室作为潜艇运行的主要工作地点, 其内部气流温度、风速、CO₂ 浓度等指标直接影响工作人员舒适性, 长时间处于高温状态下工作人员容易产生疲倦、烦躁等不良情绪^[1]。因此, 对潜艇集控舱室气流组织及其舒适性进行研究, 对潜艇空调系统设计以及改进具有重要的意义^[2]。

目前, 计算流体力学 (CFD) 技术已成为舱室内气流组织研究的重要手段之一^[3]。本文拟针对舱室相对封闭、空间狭小、人员众多、空气污染物浓度情况, 综合考虑气流组织热舒适性及空气污染物浓度等因素, 采用 CFD 方法设计舱室高热负荷送风方案, 为解决实际工程问题提供理论依据。

1 物理模型描述

本文研究对象是某型舰艇的集控舱室, 按照 1: 1 比例对舱室进行三维建模, 舱内布有两条送风管道, 分别位于两排工作台工作人员头顶最上方^[4], 每条送风管道上布有 4 个送风口进行送风, 舱室门下部设有一个的矩形回风口。集控舱室内部的工作人员简化成倒 Z 字形分布, 在人体模型上部设 20mm×20mm 正方形小口, 模拟人体呼吸; 在不影响计算结果的前提下, 对其余相关设备进行适当简化, 简化后的模型如图 1 所示。

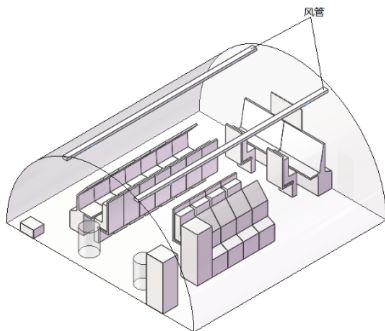


图 1 简化后集控舱室模型图

Fig.1 Simplified model of central control room

2 数值模拟模型

2.1 控制方程

计算模型采用两方程湍流模型。采用两方程湍流模型求解室内流体流动问题时, 控制方程包括质量守恒方程、动量方程、能量方程及传质方程^[5]。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

不可压缩流体可以简化为:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \bar{\tau} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

式中: p 为静压, Pa; $\bar{\tau}$ 为应力张量; $\rho \mathbf{g}$ 为重力, N; \mathbf{F} 为其他的牛顿阻力, N。

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{v}) = \nabla \cdot [(K + K_t) \nabla T] + S_h \quad (4)$$

式中: K 为层流传导系数, $K = C_p \mu / P_r$, W/(m²·K); K_t 为紊流传导系数, $K_t = C_p \mu_r / P_r$, W/(m²·K); S_h 为体积热源, W。

传质方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + S_i \quad (5)$$

式中: S_i 为第 i 种物质的散发率。

2.2 网格划分

鉴于模型内部结构多且复杂, 对简化三维模型进行非结构网格划分, 对风管以及送风口处网格进行不同程度加密, 选取第 4.1 节方案中典型截面计算结果进行网格无关性验证, 结果如表 1 所示。由表可以看出, 网格数为 400 万与网格数为 500 万时的计算结果相近。为提高计算效率, 取网格数为 400 万。最终网格划分结果如图 2 所示。

表 1 网格无关性验证结果

Table 1 The Verification result of grid independence

网格数/万	风速/(m·s ⁻¹)	温度/°C
200	0.263	23.84
300	0.292	23.83
400	0.243	25.20
500	0.242	25.28

连续性方程:

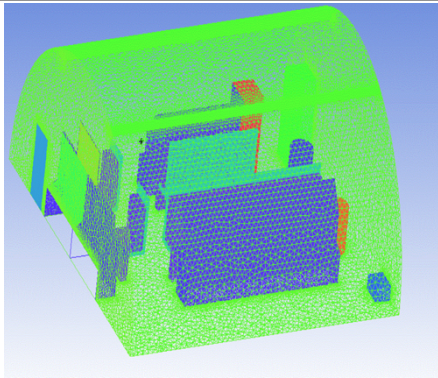


图2 舱室模型网格划分图

Fig.2 Mesh generation of model for central control room

3 计算模型假设及边界条件设置

舱室内空气的流动受强迫对流和自然对流的共同影响,且在实际舱室内会受到人员活动等因素的影响,过程复杂。为便于求解,对居住舱室内的空气流动进行如下假设:

(1) 舱室内气体为不可压缩气体,流体密度仅对浮升力产生影响;

(2) 舱室内空气为充分发展的湍流,具有高雷诺数,忽略时间项的影响;

(3) 流体与热源间换热为对流换热,无辐射换热;

(4) 风管与空气不发生换热过程;

(5) 舱室除送风和回风口外,密闭性良好;

(6) 人员保持在自己位置,不进行移动。

夏季舱顶水上、水下内表面温度如表2所示^[1]。

表2 舱顶内表面温度

Table 2 The inner surface temperature at top of room

航行状态	温度/℃
夏季水面状态	28.85
夏季水下状态(50m水深)	26.81

模拟计算模型舱顶温度按照表2中的计算数据进行设置,人体散热量按照较大脑力劳动者设置为135W/h;人体模型呼吸出口设为速度入口,忽略呼吸气体所含热量,呼气口温度设为环境温度27℃,速度设为0.3m/s,CO₂质量分数设为4%^[6];设备散热量按照实际工作状态设置,舱室散热设备热负荷如表3所示。总管送风口设置为速度入口,方向垂直向下,送风速度1.62m/s,送风温度设为18℃,送风温差为9℃;回风口设为自由出流边界条件。

表3 舱室总热负荷

Table 3 The total thermal load of room

名称	数量	热负荷 W/h
设备 a	1	500
设备 b	1	600
设备 c	11	136
设备 d	2	250
设备 e	2	300
设备 f	1	300
工作人员	13	135
总热负荷		5751W/h

工作舱室内环境舒适性的评价主要包括热舒适性及空气品质。热舒适性由室内气流组织的温度、风速、PMV 指标衡量。综合评价环境热舒适性的 PMV 指标如表4所示。

表4 PMV 指标

Table 4 PMV indices

PMV	温度感觉						
	冷	凉	微凉	适中	微暖	暖	热
	-3	-2	-1	0	1	2	3

舱室空气品质由CO₂浓度衡量^[7],根据GB/T 18883—2002标准规定室内空气中CO₂浓度小于0.10%。为满足舱室内环境舒适度的要求,表5给出了舱室设计指标。

表5 设计参数

Table 5 Design parameters

参数	取值
人体周围风速 m/s	<0.5
人员周围温度℃	<27
CO ₂ 浓度%	<0.1
PMV	±1

4 模拟结果及分析

分水上和水下2个设计工况对该模型进行数值模拟。对典型截面的速度场、温度场、CO₂分布和PMV分布进行分析。考虑的典型截面为:截面1取垂直舱室地面横切面;截面2取坐姿时人腿部截面高度0.4m处;截面4取人口呼吸高度0.95m;截面5取坐姿头部上方高度1.4m处。各截面位置如图3所示。

究

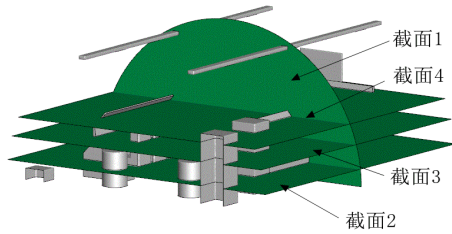
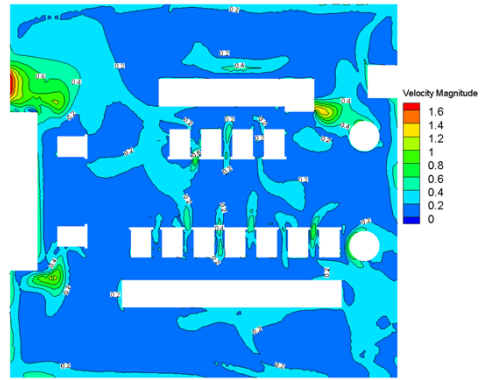


图 3 模型典型截面图分布示意图

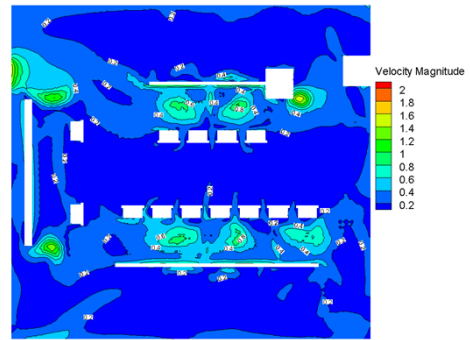
Fig.3 Typical section distribution diagram of analytical model

4.1 水上设计工况

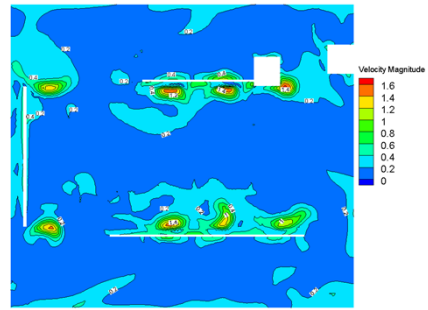
潜艇水上工况时,各截面舱室速度场分布云图分别如图 4 所示。由截面 1 分布云图可以看出,冷风垂直射出,经工作台阻挡形成弯道,由工作台和人员间缝隙流出,出风口处及垂直方向区域风速较高,舱室下部气流速度较低且分布均匀,风速在 0.1~0.2m/s 之间。由截面 2 分布云图所示,在人腿高度所在水平面上,舱室送风口下方处及出风口处风速较大,大部分区域风速较小,在 0.1~0.4m/s 左右。截面 3 分布云图表明,在人员坐姿时,口鼻呼吸所在高度处水平面上,风速较大区域集中在送风口正下方区域、出风口及工作人员和工作台中间区域,但工作人员周围风速在 0.2~0.4m/s 之间,大部分区域在 0.2m/s 以下,整个舱室风速大部分区域处于 0.2m/s 以下。截面 4 布云图表明,高度为 1.4m 处舱室大部分区域风速在 0.1~0.4m/s 之间,送风口正下方处风速较高,但处于工作人员活动范围外。



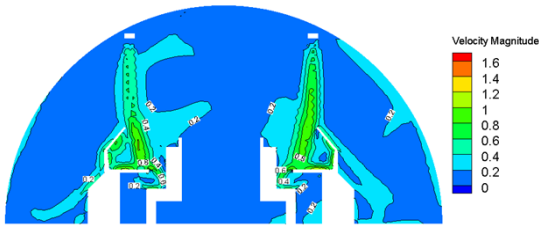
(b) 截面 2 速度场分布云图



(c) 截面 3 速度场分布云图



(d) 截面 4 速度场分布云图



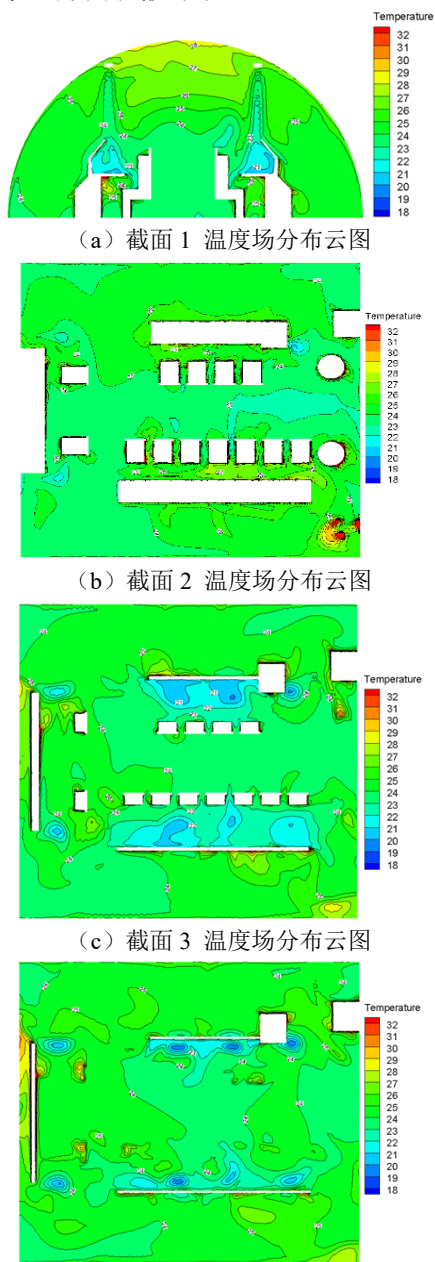
(a) 截面 1 速度场分布云图

图 4 水上工况速度场分布云图

Fig.4 The velocity distribution of cloud on surface

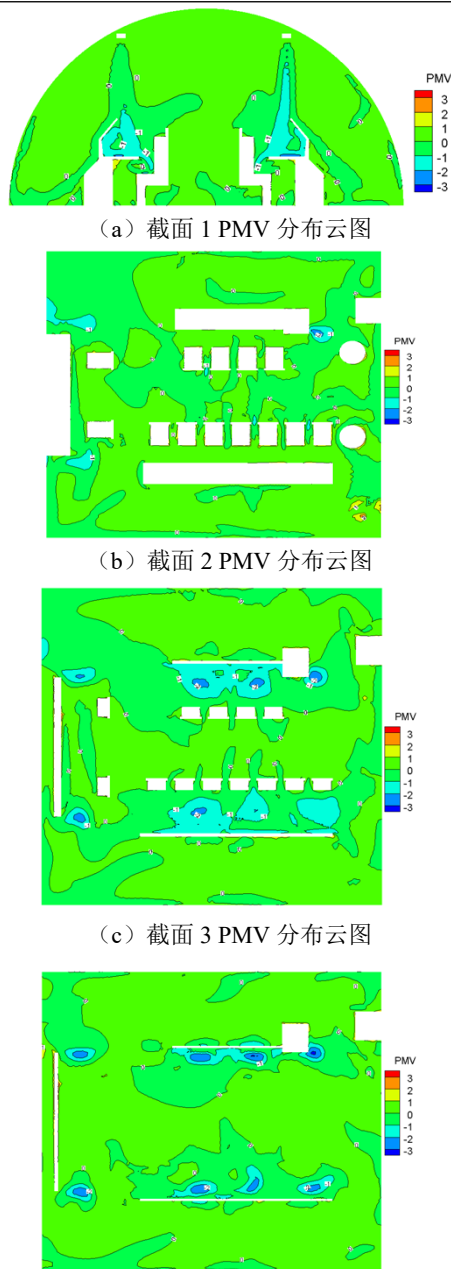
不同截面温度场分布云图如图 5 所示。截面 1 分布云图显示,送风口下方风速较大区域温度偏低,整个舱室由上至下温度逐渐降低,由舱顶温度较高导致,因工作台为发热体,工作台边角风速较低处小区域温度较高,整个舱室大部分区域温度在 25~26℃ 之间。截面 2 分布云图显示,在人腿高度处,整个舱室大部分区域温度集中在 24~26℃,温度场分布复杂,由舱室内部结构复杂导致。截面 3 分布云图显示,在人呼吸高度处,舱室大部分区域温度集中在 23~26℃ 之间,送风口正下方处温度偏

低，因送风口处低温气流无阻力射下导致，工作人员周围温度为 24~26℃ 之间。截面 4 分布云图显示，在工作人员上方区域除垂直送风口下方区域温度较低，工作台上区域温度偏高外，整个舱室温度在 24~25℃ 之间。垂直风口下方处温度较低，工作台处温度较高，由此截面距送风口距离较近气流未向水平方向扩散导致。



(a) 截面 1 温度场分布云图
(b) 截面 2 温度场分布云图
(c) 截面 3 温度场分布云图
(d) 截面 4 温度场分布云图
图 5 水上工况温度场分布云图

Fig.5 The temperature distribution of cloud on surface



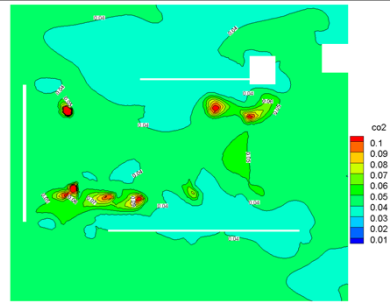
(a) 截面 1 PMV 分布云图
(b) 截面 2 PMV 分布云图
(c) 截面 3 PMV 分布云图
(d) 截面 4 PMV 分布云图
图 6 水上工况 PMV 分布云图

Fig.6 The PMV distribution of cloud on surface

不同截面 PMV 分布云图如图 6 所示。截面 1 云图显示，舱室大部分区域 PMV 值在 0 左右波动，风管下方区域 PMV 值偏低为-1，因此处风速及温度较低导致。此处未处于人员活动区域。截面 2 云图显示，在人小腿高度处，出风口垂直正下方处 PMV 值偏高。截面 3 云图显示，在人口鼻高度处，除送风口下方区域 PMV 值较低外，整个舱室 PMV 值在 0 左右波动，PMV 值较低区域为非工作人员

活动区域。截面 4 云图显示,在工作人员上方区域,除送风口正下方处 PMV 值较低,其余大部分区域 PMV 值在 0 左右。

不同截面 CO₂ 分布云图如图 7 所示。由截面 1 云图显示,除人口鼻呼吸处 CO₂ 浓度较高外,整个舱室 CO₂ 浓度在 0.04%~0.05%之间,风速较大区域 CO₂ 浓度偏低。由截面 2 云图显示,在人腿部高度处,整个舱室 CO₂ 浓度在 0.04%~0.05%之间,且分布较为均匀。由截面 3 云图显示,在人呼吸高度处,除口鼻呼吸处及相近区域处,CO₂ 浓度较高,其余区域 CO₂ 浓度在 0.04%~0.05%之间,且分布较为均匀。由截面 4 云图显示,在人员上方高度处,大部分区域在 0.04%~0.05%之间,部分区域出现环状 CO₂ 高浓度区,经多截面观察研究发现,此现象由于气流从底部向上反射及出风口位置导致出现 CO₂ 环状区域。



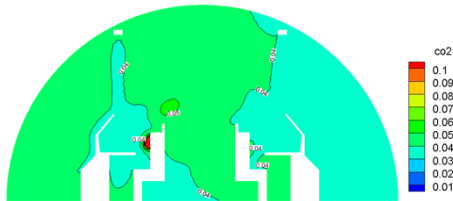
(d) 截面 4 CO₂ 分布云图

图 7 水上工况 CO₂ 分布云图

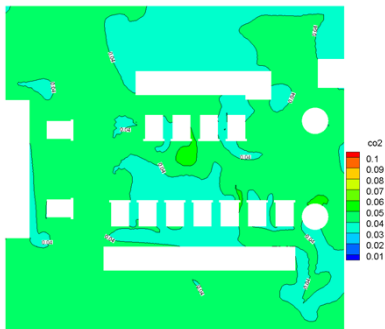
Fig.7 The CO₂ distribution of cloud on surface

4.2 水下设计工况

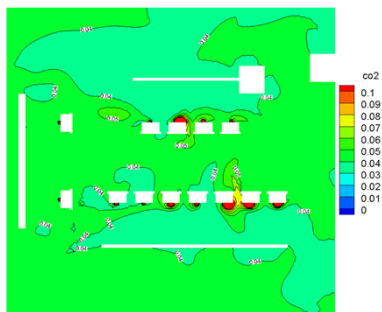
潜艇水下工况时,舱室速度场分布云图各截面分别如图 8 所示。该工况下不同典型截面舱室速度场分布与潜艇水上工况时舱室速度场分布相似。舱室大部分区域速度场分布较为均匀,速度较低,满足设计要求。送风口周围及舱室出风口处风速较高,其他大部分区域风速在 0.1~0.4m/s,且分布较为均匀。



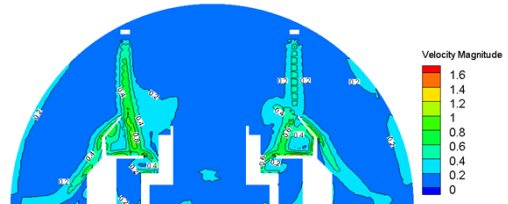
(a) 截面 1 CO₂ 分布云



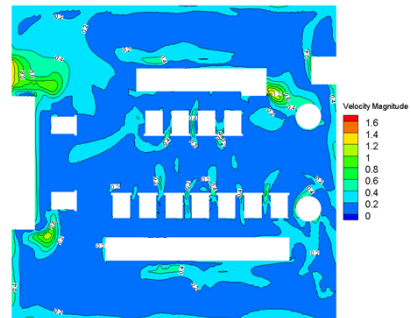
(b) 截面 2 CO₂ 分布云图



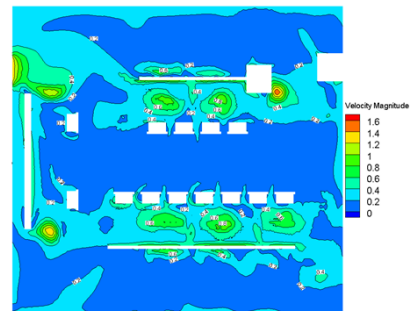
(c) 截面 3 CO₂ 分布云图



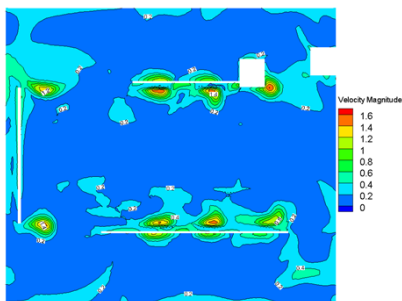
(a) 截面 1 速度场分布云图



(b) 截面 2 速度场分布云图



(c) 截面 3 速度场分布云图

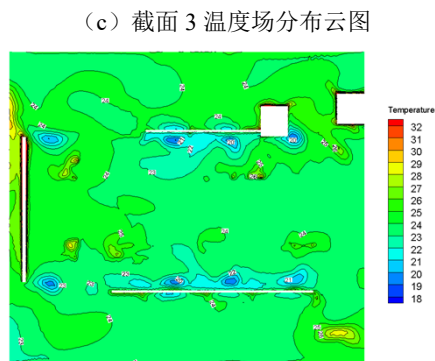


(d) 截面 4 速度场分布云图

图 8 水下工况速度场分布云图

Fig.8 The velocity distribution of cloud at underwater state

潜艇水下工况时，舱室速度场分布云图各截面分别如图 9 所示。水下工况和水上工况大致趋势相同，温度分层情况相似，相比水上工况，由于水下工况较水上工况舱顶温度低，故水下工况时舱室整体温度偏低，在舱室上层相差 2℃，在舱室下层几乎无变化，整体温度分布较为均匀且舒适。



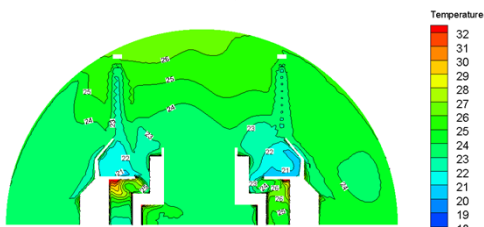
(c) 截面 3 温度场分布云图

(d) 截面 4 温度场分布云图

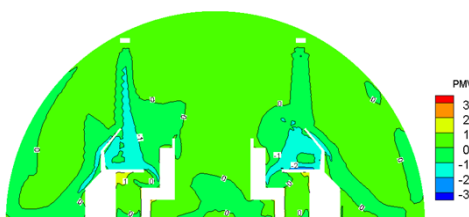
图 9 水下工况温度场分布云图

Fig.9 The temperature distribution of cloud at underwater state

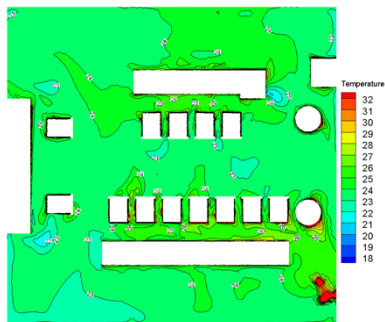
潜艇水下工况时，舱室 PMV 分布云图各截面分别如图 10 所示。水下工况和水上工况分布情况相似，除送风口和出风口附近较小区域，整个舱室 PMV 值集中在 0 左右，且分布均匀，满足舒适性要求。



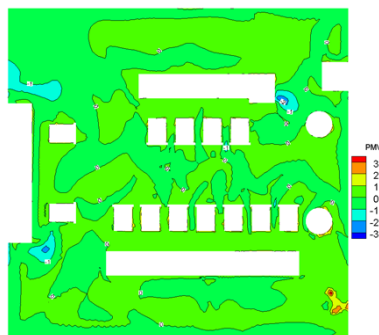
(a) 截面 1 温度场分布云图



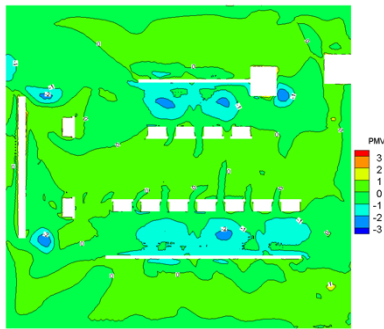
(a) 截面 1 PMV 分布云图



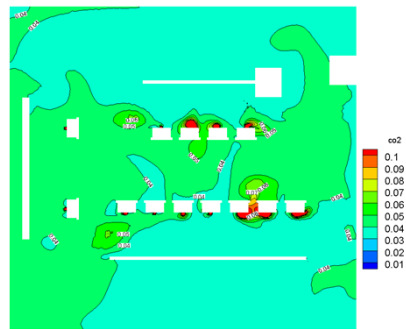
(b) 截面 2 温度场分布云图



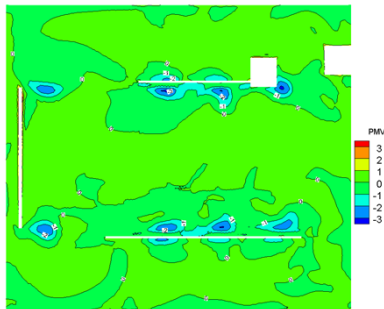
(b) 截面 2 PMV 分布云图



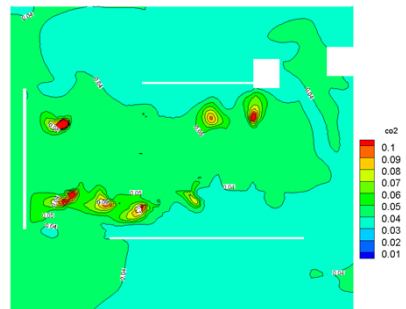
(c) 截面 3 PMV 分布云图



(c) 截面 3 CO₂ 分布云图



(d) 截面 4 PMV 分布云图



(d) 截面 4 CO₂ 分布云图

图 10 水下工况 PMV 分布云图

图 11 水下工况 CO₂ 分布云图

Fig.10 The PMV distribution of cloud at underwater state

Fig.11 The CO₂ distribution of cloud at underwater state

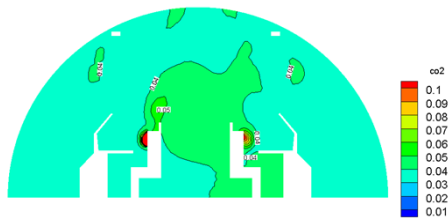
潜艇水下工况时, 舱室 CO₂ 分布云图各截面分别如图 11 所示。水下工况和水上工况分布情况相似, 除工作人员口鼻附近较小区域及人员侧上方由于反弹风引起的 CO₂ 环形区域, 整个舱室 PMV 值集中在 0.04%~0.05% 之间, 分布均匀。

5 结论

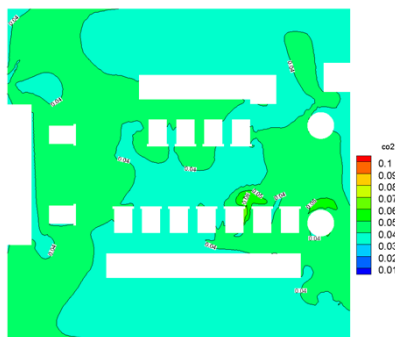
本文建立了空调送风的舰船典型工作舱室的流体域数值试验模型, 并进行数值模拟计算。通过对典型截面的速度场、温度场、PMV 指标及 CO₂ 浓度的分析, 结果表明, 无论水上还是水下设计工况, 舱内大部分区域速度场分布较为均匀, 速度较低, 小于 0.5m/s, 满足舱室设计要求。虽然出风口附近速度较高, 但位于舱内人员活动区以上或不在工作人员活动周围。在水上设计工况下, 舱室大部分区域温度场分布较为均匀, 温度约为 24~26℃; 水下设计工况和水上设计工况温度场分层情况相似, 舱室上部温度较水上设计工况低 2℃, 舱室下部区域和水上工况基本相同, 水上和水下工况大部分区域 PMV 值在 0 左右, CO₂ 浓度在 0.04%~0.05% 之间, 均分布均匀, 均满足舒适性空调标准。通过数值模拟计算, 验证了典型舱室空调系统布置的合理性。

参考文献:

[1] 赵恒, 彭文波, 周志杰. 潜艇居住舱室空调送风舒适度数值模拟评估[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(S1): 189-198.



(a) 截面 1 CO₂ 分布云图



(b) 截面 2 CO₂ 分布云图

-
- [2] 郭宝坤, 李慧子, 刘鑫, 等. 船用布风器冬季工况射流流场模拟及试验研究[J]. 制冷与空调, 2016, 16(12): 26-30.
- [3] Li YANG, Miao Ye, Bao Jiehe. CFD simulation research on residential indoor air quality[J]. Science of The Total Environment, 2014, 472: 1137-1144.
- [4] 胡国霞, 田炜. 高大空间送风口高度对气流组织影响试验研究[J]. 制冷与空调, 2014, 14(12): 73-79.
- [5] 刘翔宇. 集中防护状态下船舶关键区域的气流组织研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [6] 亓海青, 李志印, 周立华. 居住舱室空气环境舒适性数值分析[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(4): 93-98.
- [7] 周爱民, 余涛, 沈旭东. 船舶舱室污染物传播研究进展[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(1): 10-15.
- [8] ASHRAE. 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook[M]. Thermal comfort, 2001.

《制冷与空调》稿约

1 《制冷与空调》创刊于 1985 年,是由四川省制冷学会和西南交通大学联合主办的国内外公开发行的科技期刊,国内统一刊号 CN51-1622/TB,国际标准刊号 ISSN 1671-6612。主要刊登制冷与空调行业的最新科技成果、学术论文,介绍新技术、新工艺、新产品,并及时通报行业最新动态和信息。2007 年入选中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),2003 年入选“中文核心期刊(遴选)数据库期刊”、“中国期刊全文数据库全文收录期刊”及“中国学术期刊综合评价数据库统计刊源”。

2 本刊一般自收到稿件起三周内向拟刊用稿件作者发出录用通知,特殊情况下时间适当延长。在这一期限后作者如未收到录用通知或修改的函件,可对稿件另作处理。

3 作者不应一稿两投或多投。不同意将稿件转载、摘登或编入本刊已加入的各种数据库的作者,亦请在稿件上作书面声明,否则视为同意。

4 文稿撰写要求

4.1 稿件内容

稿件应包含(按顺序)题名(一般限 20 个字以内)、作者姓名、作者单位、中文摘要(300 字左右)、关键词(3~8 个)、中图分类号、文献标识码、文章编号(由编辑部填写)、英文部分(含题名、作者姓名的汉语拼音、作者单位、英文摘要及关键词)、正文、参考文献、基金说明、作者简介(包括:性别,出生年月,学历或职务,邮编,地址,联系电话,E-mail)。

4.2 排版要求

页边距:上 2.7,下 2.4,左 2.1,右 2.1。分栏:不要求。字体要求如下。题目:中文 2 号黑体,英文 5 号加黑(Times New Roman)。作者姓名:中文 4 号楷体,英文 5 号(Times New Roman)。工作单位:中文小 4 号楷体,英文小 5 号(Times New Roman)。摘要、关键词、参考文献内容:中文为小 5 号宋体和英文为小 5 号(Times New Roman)。中英文各关键词间均用分号连接。正文:5 号宋体。

4.3 章节编号

文中各级标题采用阿拉伯数字分 3 级编序,且一律左顶格排版,标题编号从 0 开始,即引言的编号为 0。一级标题为小四黑体,形如 0,1,2,3,……排序;二级标题为五号宋体,形如 1.1,1.2,……排序;三级标题为五号宋体,形如 1.1.1,1.1.2,……排序。

4.4 图表及公式

图表名:中文小 5 号黑体,英文为小 5 号加黑(Times New Roman);文中表格一律使用三线表(不画竖线,横线仅保留顶线、底线及栏目线)。图的尺寸尽可能小,以能看清楚为准;表中字体用小 5 号;公式按出现顺序编号:(1)、(2)、(3)……图表名称应中英文对照。

4.5 物理量和计量单位

文稿正文(含图、表)中的物理量和计量单位应符合国家标准或国际标准。

4.6 基金说明和第一作者简介

小 5 号宋体,置于第 1 页下方。包括:基金说明、姓名、性别、出生年月、职称及所在单位。

4.7 参考文献

参考文献按在正文中出现的先后次序列表于文后,表上以“参考文献”居中排作为标识;参考文献的序号左顶格,并用数字加方括号表示,如 [1],[2],……,与正文中的指示序号格式一致。每一参考文献条目的最后均以“.”结束。各类参考文献条目的编排格式及示例如下:

a. 连续出版物 [序号] 主要责任者. 文献题名[J]. 刊名, 出版年份, 卷号(期号): 起止页码. b. 专著 [序号] 主要责任者. 文献题名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码. c. 论文集 [序号] 主要责任者. 文献题名[C]. 主编. 论文集名. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码. d. 学位论文 [序号] 主要责任者. 文献题名[D]. 保存地: 保存单位, 年份. e. 报告 [序号] 主要责任者. 文献题名[R]. 报告地: 报告会主办单位, 年份. f. 专利文献 [序号] 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 发布日期. g. 国际、国家标准 [序号] 标准代号, 标准名称[S]. 出版地: 出版者, 出版年. h. 报纸文章 [序号] 主要责任者. 文献题名[N]. 报纸名, 出版日期(版次). i. 电子文献 [序号] 主要责任者. 电子文献题名[文献类型/载体类型]. 电子文献的出版或可获得地址, 发表或更新日期/引用日期(任选).