

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-066-08

舰船特种环形舱室大气环境控制研究

段文利 龚磊 由成良

(中国舰船及海洋工程设计研究院 上海 200011)

【摘要】 为满足船用特种环形舱室内设备温度存储要求,运用数值模拟软件 CFD 建立模型,通过文献数据验证了模型的正确性,然后对特种环形舱室内温度分布进行数值模拟计算,分析特种环形舱室大气环境控制方案的结果。模拟结果表明原方案虽然考虑了高度较大所带来的气流不均的问题,采用中间送上下回的送风方式,但由于维修通道的存在阻碍了高度方向上的空气流动,在该方案下舱室上部区域温度超过 30℃,原设计方案无法满足设备存储要求。经过方案改进,将维修通道改为船用格栅后,舱内平均温度为 26℃,满足设备存储要求,相比原方案整体温度分布更加均匀,改进方案更具经济性,但存在舱外极端高温下舱内上部区域温度超标而报警的风险,后续建议通过设置扰动风机等方式进一步优化舱室大气环境控制方案。模拟结果为舰船特种环形舱室大气环境控制的设计优化提供了参考。

【关键词】 特种环形舱室; CFD; 温度场; 优化; 经济性

中图分类号 TB21 文献标志码 A

Research on the Control of Atmospheric Environment in Special Annular Cabin of Warship

Duan Wenli Gong Lei You Chengliang

(Marine Design & Research Institute of China, Shanghai, 200011)

【Abstract】 In order to meet the requirement of temperature storage in special annular cabin, the temperature distribution in special annular cabin was calculated by using CFD software, the results of air environment control scheme for special annular cabin are analyzed. The simulation results show that although the original scheme takes into account the problem of air flow unevenness caused by high altitude and adopts the air supply mode of sending up and down in the middle, the average temperature of the cabin is 29℃ under this scheme, and the overall temperature is on the high side, there is a risk that the cabin temperature will exceed the standard and alarm under the extreme high temperature outside the cabin. The original design can not meet the storage requirements of the equipment. The average temperature in the cabin is 24.25℃, which meets the storage requirements of the equipment. Compared with the original scheme, the overall temperature distribution is more uniform, and the improved scheme is more economical. The simulation results provide a reference for the design optimization of the atmospheric environment control of the ship's special annular cabin.

【Keywords】 Special annular cabin; CFD; Temperature field; Optimization; Economy

0 引言

中国除了拥有广袤的土地,同时还拥有着 32600 公里漫长的海岸线及众多岛屿,随着国际局势越发动荡,为维护我国海洋权益,维护国家主权

和领土完整,建设海洋强国成为中国 21 世纪国家发展战略种的一个重要组成部分,而舰船是国防建设、海洋开发等所需的重要技术装备。为保证海军完成多样化任务的需求,对舰船空调系统提出了较高的

要求。一方面, 需要贯彻“以人为本”的思想^[1], 保证舰舰员在相对狭小的船舱中的舒适性, 以提高舰员的工作效率; 另一方面, 根据上舰设备运行所需环境的要求, 保证舱室温、湿度值达到标准。

舰船设计是一个复杂且需要不断迭代的工作, 为了保证舰船制造能达到理想的预期效果, 船厂施工之前会根据设计院二维施工图纸进行三维放样, 虽然解决了舱内各种管道的干涉问题, 但是无法得出舱内气流环境。随着计算机计算能力提高以及数值理论的完善, 相比试验研究投入高、周期长等不足, 数值模拟计算已经成为舱内气流环境研究常用的手段, 将船舱气流环境由定性分析转变为定量分析, 对设计师的设计进行验证并优化, 从而能够经济有效达到改善舰船舱室环境的目的。

大连理工大学莫慧玲^[2]通过 CFD 数值模拟计算, 对比船舶两人住舱在四种不同送风方式下的气流组织, 得到在一定范围内, 送风条件的改变对船舶舱室的热舒适性和排污能力影响较大的结论。江苏科技大学林小龙^[3]通过 CFD 数值模拟方法, 研究了船舶单人住舱和双人住舱中辐射空调送回风对船舶舱室舒适性的影响, 异侧上送下回的送回风方式更能满足人体舒适度。陈广旭^[4]通过 Airpak 软件对船舶两人住舱的空气温度、压力、速度、空气龄及 PMV-PPD 进行模拟计算, 船舶空调舱室的设计或节能减排提供了一定的参考。谢旭晨^[5]通过模拟计算, 对邮轮客房空调风口进行了优化设计, 使得设计更加接近工程实际。模拟研究舰船住舱的气流组织及舒适性的文献较多, 而舰船上存在着一些空间较为特殊的设备舱室(例如: 特种环形舱室), 为避免舱内存在气流死角, 防止局部高温影响设备存放或运行, 需要对这些舱室气流组织及温度分布情况进行研究。本文通过数值计算的方法, 对某舰

船上一个环形高大空间特种环形舱室内气流组织进行模拟研究, 检验现设计方案能否达到设计要求, 并根据模拟结果进行方案改进, 从理论上解决舱室空气温度分布不均问题, 降低设计风险, 减少设计成本。

1 模型建立及计算

1.1 特种环形舱室概述

此特种环形舱室为一个相对密闭空间, 特种环形舱室无舷窗, 舱室中间布置特种装置, 装置外有相对平整外壳保护, 所以该特种环形舱室整体呈现环状高大空间, 空间较为特殊, 高度方向上设置 2 层维修平台, 阻碍舱内气流流动, 一定程度上增加了舱室大气环境控制难度。另外, 该装置存储温度最高不能超过 30℃, 最佳存储温度为 25±2℃, 舱室设置温度监测报警装置, 超过 30℃时会触发舱室温度报警。

1.2 物理模型的建立及简化

根据特种环形舱室实际大小和定位进行物理建模, 建立模型如图 1 所示, 模型尺寸参数如表 1 所示。

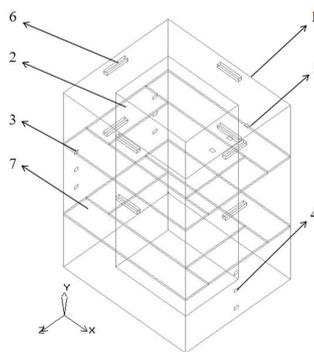


图 1 特种环形舱室物理模型

Fig.1 The physical model of special compartment

表 1 特种环形舱室模型尺寸参数表

Table 1 Dimension parameter table of special cabin model

编号	项目	模型	尺寸
1	特种环形舱室	ROOM	7m×6m×10m
2	特种装置	BLOCK	4m×3m×10m
3	送风口 (S)	OPENING	0.22m×0.15m
4	回风口 (H)	VENT	0.22m×0.15m
5	排风口 (P)	FAN	0.22m×0.15m
6	灯	BLOCK	1.2m×0.15m×0.2m
7	维修平台	BLOCK	7m×1.3m×0.1m/3.4m×1.3m×0.1m

物理模型的建立基于实际舱室的空间尺寸和舱内设备布置,综合考虑模拟精度和建模工作量,所以在建模中对实际舱室进行了一定合理的简化,并做出如下假设^[4,8,9]:

- (1) 舱室内气体的流动符合气体状态方程;
- (2) 舱室内的气体是低速、不可压缩流体;
- (3) 舱室内气体的流动符合 Boussinesq 假设;
- (4) 舱室内气体的流动是稳态湍流流动。

1.3 基本控制方程组

数值模拟是对流动和传热中的质量守恒、动量守恒和能量守恒的物理过程在计算机上进行求解的过程,求解中通常用控制容积法对控制方程进行离散处理以将其转换成代数方程,用 SIMPLE 法对离散方程在划分网格上进行求解,利用收敛原则判断解的收敛性,若不收敛,则将各节点方程的解不断地迭代计算,直到达到收敛标准获得收敛的解。

流体动力学基本控制方程组是对流体流动守恒定律的数学描述,主要内容:

- (1) 流体流动的质量守恒;
- (2) 流体流动的动量变化率与作用在流体质点上的外力之和相等;
- (3) 流体流动的能量变化率与施加在流体质点上的总传热量对其作用的功率相等。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

由于已经假设舱室内空气为低速、不可压缩流体,所以密度 ρ 为常数,不随时间的变化而变化。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_j + F_i \quad (2)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \quad (3)$$

式中, F_i 为由热源、污染源等引起的源项; τ_{ij} 为应力张量。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \text{div}(\rho UT) = \text{div} \left(\frac{k}{\rho c_p} \text{grad} T \right) + S_h + \Phi \quad (4)$$

式中, k 为流体的导热系数; S_h 为流体的内热源。

1.4 湍流模型选取

自然界中的流动大多以湍流的形式存在。由于湍流运动在物理上具有不规则性和无序性,在数学理论中具有非线性。使得无论是理论推导还是模拟研究,都很难得到精确的解。为了解决湍流基本方程组的不封闭问题,湍流模型的引入是非常有必要的。常用的湍流模型有:零方程模型^[6]、Spalart-Allmaras(S-A)模型(一方程模型)、标准 $k-\epsilon$ 模型(两方程模型)以及 RNG $k-\epsilon$ 模型^[7],模型由简到繁,求解由易变难,针对不同的求解问题选择合适的模型。

零方程湍流模型的特点是在脉动量和时均量之间建立相关代数关系,从而省去再通过微分方程去建立脉动量的步骤,在计算过程中,零方程湍流模型没有附加微分方程求解涡粘性系数,从而有效地减少了未知数的个数,只需求解关于三个速度分量、压力、焓(温度)等共 5 个微分方程,所以相对于其他方程,零方程湍流模型求解时间是最短的。Spalart-Allmaras 模型常用于航空领域,主要解决墙壁束缚(wall-bounded)流动问题,只求解湍流粘性的输运方程,不求解当地剪切层厚度的长度尺度,所以该模型适用于一些流动尺度变换较小的流动问题。标准 $k-\epsilon$ 模型属于半经验模型,该模型假设了整个空间内气流流动为湍流状态,并忽略了分子运动间的粘性力,该模型常用于湍流状态的气流组织研究。RNG $k-\epsilon$ 模型根据重正化群的统计方法推导而出,并针对标准 $k-\epsilon$ 模型进行了改进,给出了湍流普朗特数的具体解析式,该模型最大的特点是考虑了湍流中地涡旋效应,所以更多地应用于高应变率及流线性弯曲程度较大的流动。通过分析湍流模型特点,针对本文所研究的内容,可以选取零方程模型或者标准 $k-\epsilon$ 模型,其中零方程模型的计算量最小,对于计算机要求较低。标准 $k-\epsilon$ 模型相比零方程模型对于湍流的描述更合理,更完善,但是对于计算机要求更高。所以,本文模拟采用的湍流模型需要通过模型验证才能确定。

1.5 模拟边界条件设置

表 2 特种环形舱室建模边界条件设置参数表

Table 2 Parameter table of boundary condition setting for special cabin modeling

边界	边界条件	参数值
特种环形舱室四周舱壁	第三类边界条件	环境温度 35℃, 传热系数 1.5W/m ² ·K
特种环形舱室顶部舱壁	第三类边界条件	环境温度 35℃, 传热系数 2.5W/m ² ·K
特种环形舱室底部舱壁	第三类边界条件	环境温度 32℃, 传热系数 1.5W/m ² ·K
送风口 (S)	——	送风温度 16℃, 速度 3m/s
回风口 (H)	自由出口	——
排风口 (P)	——	排风量 0.099m ³ /s
维修平台	绝热	——
特种装置	定热流	4000W
灯具	定热流	50W

1.6 网格划分及收敛判断

(1) 网格划分: 采用六面体网格进行划分, 网格单元最大尺寸为 0.05m×0.05m×0.05m, 对于风口处等梯度较大的地方进行加密, 网格质量接近 1, 网格数量约 250 万。

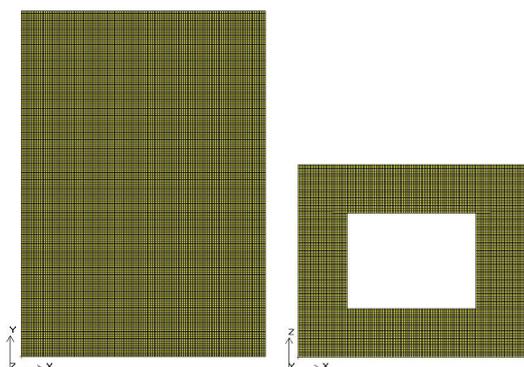


图 2 特种环形舱室模型网格划分

Fig.2 Meshing of special compartment model

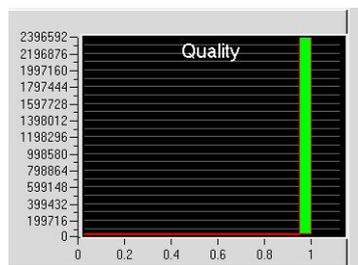


图 3 网格质量

Fig.3 Quality of grid division

(2) 对偏微分方程可采用不同的离散方法, 如有限差分法、有限元法、涡方法等, 本文采用有限体积法。

(3) 收敛标准为能量方程残差小于 10⁻⁶, 其余方程的残差小于 10⁻⁴, 认为计算结果达到要求。

2 模型验证

采用上述模型对舱内的气流组织进行模拟分析, 为了验证模型的有效性、准确性, 利用所建立的模型对曹兆洋^[8]实验及模拟进行数值计算, 并将模拟得到的结果与文献中数据进行对比。文献中模型及测点布置如图 4、图 5 所示。工况如表 3 所示, 对比结果如图 5 所示。

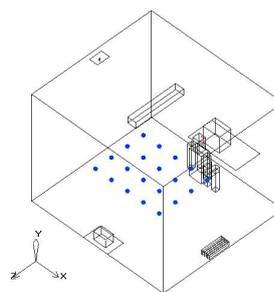


图 4 验证模型

Fig.4 The model being validated

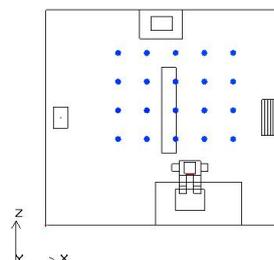


图 5 模型测点布置

Fig.5 Test points placement in the model

表 3 曹兆洋室验设置参数表

Table 3 Experiment setting parameter table about Zhaoyang Cao

名称	尺寸/m	模型类型	边界条件	参数值
实验室	3.3×3×2.7	Room	第三类边界条件	环境温度 32℃, 墙体传热系数 1.95W/m ² ·K
电脑	0.4×0.3×0.4	Blocks	定热流量	120W
仪器	0.3×0.2×0.2	Blocks	定热流量	90W
日光灯	0.2×1.2×0.15	Blocks	定热流量	35W
人员	1.73×0.3×0.2	Persons	定热密度	1met
桌子	1.2×0.6	Partitions	绝热	---
隔板	0.6×0.4	Partitions	绝热	---
送风口	0.3×0.2	Openings	---	20℃, 4m/s
回风口	0.5×0.2	Vents	自由出流	---

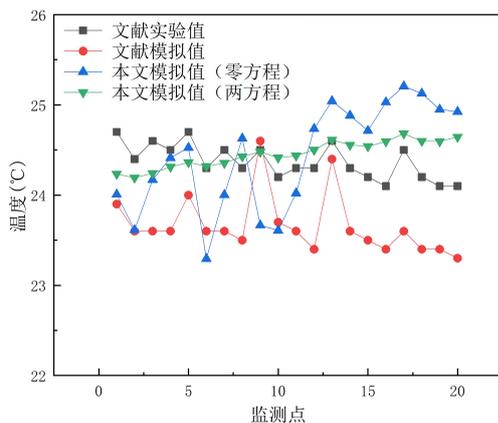


图 6 测点温度对比

Fig.6 Temperature contrast of test points

如图 6 所示,对比分析文献中关于温度的数值模拟结果、实验结果,文献温度数值模拟的结果整体与文献的实验结果的变化趋势基本相似,文献数值模拟结果温度平均值为 23.665℃,文献实验实测的平均值为 24.37℃,两者平均值相差 0.705℃,误差 3.0%;最大温差点为检测点 3,实验值比模拟值大 1.0℃,最大误差为 4.1%。本文分别采取零方程模型、标准 k-ε模型两种湍流模型进行模拟,对比分析本文数值模拟结果与文献的实验结果,以确定后续研究采用的湍流模型。整体上本文模拟结果与实验结果变化趋势一致,采用标准 k-ε模型相比零方程模型波动更小。采用零方程模型,检测点的平均值为 24.43℃,与文献实测值相差为 0.059℃,误差为 0.24%;误差最大的点为测点 13,本文模拟值

比实验值大 0.9℃,最大误差为 3.67%。采用标准 k-ε模型,检测点的平均值为 24.45℃,与文献实测值相差为 0.079℃,误差为 0.32%;误差最大的点为测点 20,本文模拟值比实验值大 0.544℃,最大误差为 2.26%。可以看出,采用标准 k-ε模型模拟更能反应实际结果,验证了本文数值模拟方法可靠,后续采用标准 k-ε模型计算本文所研究的问题。

3 结果与分析

3.1 方案分析

图 7~图 10 显示了现有设计方案下特种环形舱室的温度分布云图。现方案设计是考虑到舱室高度较高,上送或下送方式难以满足要求,所以采用中间送两侧回的送风方式,但由于特种室空间较大且呈环形特点,所以在高度方向上的温度分布更能反应降温效果的好坏。对于现方案设计,在特种环形舱室的一侧中部有六个送风口,在另一侧舱顶有三个排风口,舱底有三个回风口,在高度方向上 3m、7m 处采用花纹钢板设置维修通道。所以要截取特征截面,分别在 X=1m 截面、X=2m 截面、X=6m 截面、Z=2.5m 截面来分析温度分布。另外,为定量分析高度方向上温度变化情况,如图 11 所示,分别在 X=3.5m、Z=0.5m、高度方向上每隔 0.5m 设置一个测点,共 19 个温度测点;在 X=0.5m、Z=3.0m、高度方向上每隔 0.5m 设置一个测点,共 19 个温度测点。

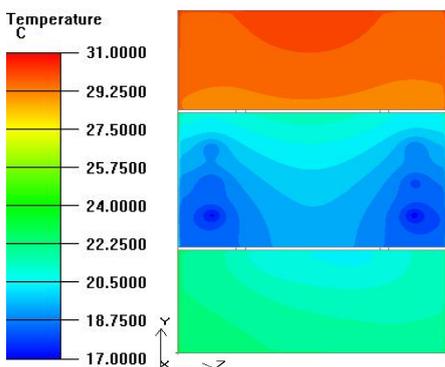


图 7 X=1m 截面温度分布

Fig.7 The temperature distribution at the cross section

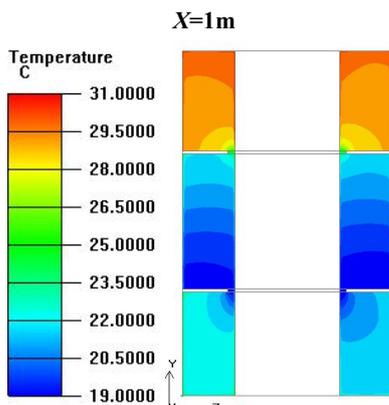


图 8 X=2m 截面温度分布

Fig.8 The temperature distribution at the cross section

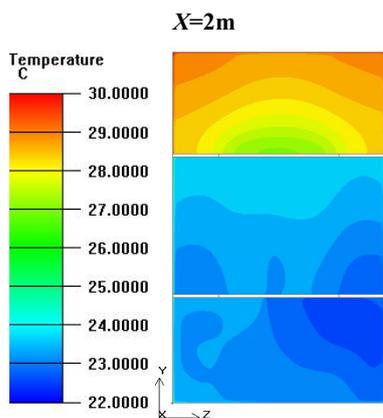


图 9 X=6m 截面温度分布

Fig.9 The temperature distribution at the cross section

X=6m

根据图 7~图 9 发现, 现有设计方案下特种环形舱室的温度整体分布范围较广, 在 17℃~31℃之间, 最大温差 10℃以上。在高度方向上, 由于花钢板维修通道阻挡了舱内空气流动, 舱室高度方向上温度分层较为明显。如图 10 所示, 在 Z=2.5m 处温度云图, 显示距离靠近送风侧温度分层较回风侧

更明显, 反应出除了高度方向上的温度分布不均, 在送回风口方向上温度也存在较大温差。如图 12 所示, 由于采用中间送两侧回的送风方式, 且靠近送风口的舱室中部区域温度最低, 温度范围在 21℃~23℃之间; 下部区域温度次之, 温度范围在 22℃~24℃之间; 上部区域温度最高, 温度范围在 28℃~31℃之间。整体来看, 现有方案无法满足设备存储所需不大于 30℃的温度存储要求。

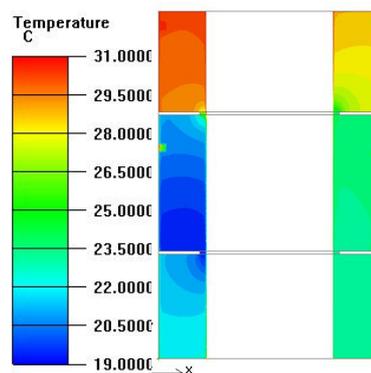


图 10 Z=2.5m 截面温度分布

Fig.10 The temperature distribution at the cross section

Z=2.5m

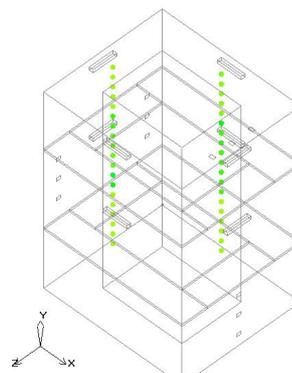


图 11 模型测点布置

Fig.11 Points placement in the model

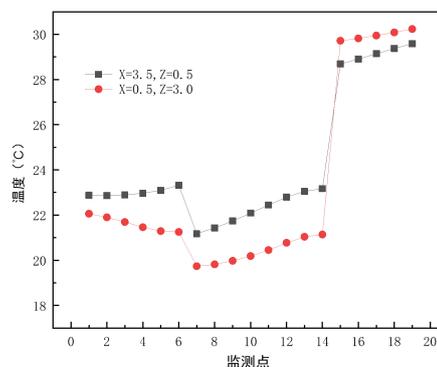


图 12 测点温度

Fig.12 Temperature of test points

3.2 方案改进

为解决原方案舱室温度达不到设备存储温度需求的问题，一般可考虑增加制冷量，降低空调送风温度或者加装空调设备，但该改进方案经济性较差。根据现方案的模拟结果，导致舱室上部温度偏高，高度方向上温度分布不均的原因，是维修通道与设备之间所留有的空气流动通道太小，导致舱内空气流动受阻而产生。原方案舱室中下部温度在 21℃~24℃ 之间，可考虑将舱室中下部靠近送风口冷空气送到舱室上部，增加舱室内部空气流动性，优化舱室气流组织以解决舱室无法达到设备存储温度的问题。

针对高度方向上气流组织不佳问题，将维修通道所采用的花纹钢板改为船用格栅，增加舱室高度方向上空气的流动性。如图 13 所示，其他条件不变，将原方案维修通道采用的花纹钢板改为船用格栅后重新建模，船用格栅中空气流道之间的尺寸为 10mm，模拟研究在采用格栅后舱室温度分布情况。

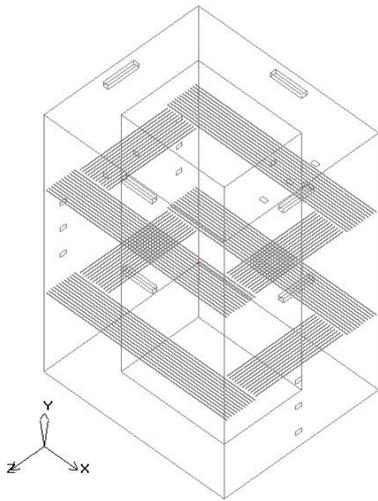


图 13 模型改进后物理模型

Fig.13 The improved physical model

如图 14，改进后特种环形舱室高度方向温度基本维持在 24℃~28℃ 温度范围，舱室中下部温度范围在 24℃~27℃ 之间，舱室上部温度范围在 27℃~28℃ 之间，整体上满足设备存储所需不大于 30℃ 的基本要求。如图 15~18 所示，相比原方案整体温度分布更加均匀。说明采用格栅维修通道可以解决舱室温度分布不均问题，从经济性上来看，减少为解决舱室温度过高增加制冷量所带来的成本。改进方案虽然解决了舱室温度分布不均，且满足舱室温

度不超过 30℃ 的问题，但舱室上部最高温度达 28℃，舱外若出现极端温度环境，超过 35℃ 时候，舱室上部区域温度极可能超过舱室温度报警值 30℃。

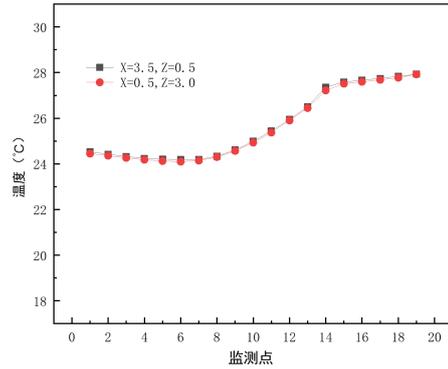


图 14 模型改进后测点温度

Fig.14 The temperature of measured point after model improvement

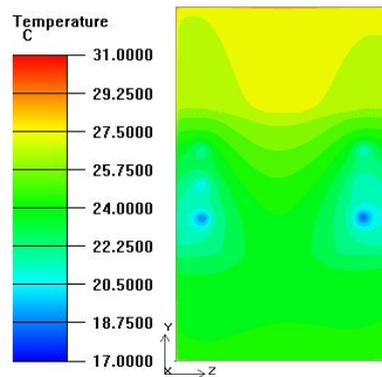


图 15 模型改进后 X=1m 截面温度分布

Fig.15 The temperature distribution at the cross section X=1m after model improvement

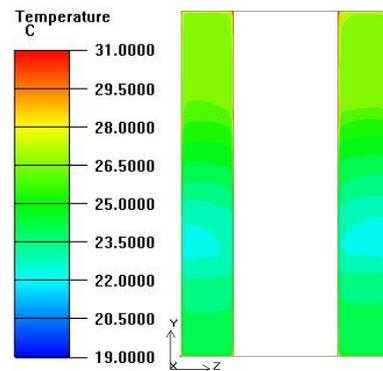
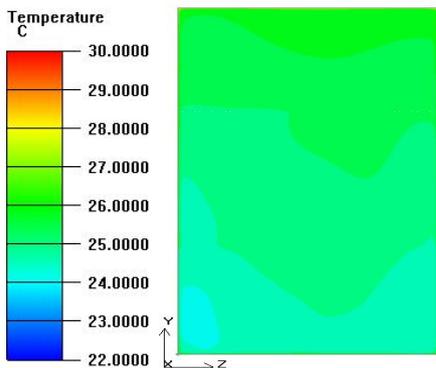
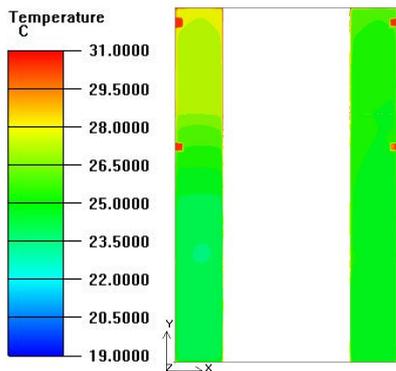


图 16 模型改进后 X=2m 截面温度分布

Fig.16 The temperature distribution at the cross section X=2m after model improvement

图 17 模型改进后 $X=6\text{m}$ 截面温度分布Fig.17 The temperature distribution at the cross section $X=6\text{m}$ after model improvement图 18 模型改进后 $Z=2.5\text{m}$ 截面温度分布Fig.18 The temperature distribution at the cross section $Z=2.5\text{m}$ after model improvement

4 结论及展望

(1) 本文所研究的特种环形舱室整体呈现环状高大空间, 空间较为特殊, 一定程度上增加了舱室大气环境控制难度。为实现舱室内设备储存环境要求, 原方案虽然考虑了高度较大所带来的气流不均的问题, 采用中间送上下回的送风方式, 但该方案下舱室上部温度超过 30°C , 原设计方案无法满足设备存储要求。

(2) 在工程应用中, 为了使得舱室温度达到要求, 一般会通过新增空调设备、增大送风量、降低送风温度等方式来增加舱室制冷量。但是, 以上方法一方面会增加设备的投入费用, 另一方面单纯

地增加制冷量并不一定能满足要求, 且会因为送风温度降低导致舱室凝水等新问题出现。本文通过分析原方案问题的本质, 从改善舱室气流组织入手, 将维修通道改为船用格栅, 增加舱内空气流动, 舱内平均温度为 26°C , 相比原方案整体温度分布更加均匀, 说明改进方案可到达设备存储要求且更具经济性。本文改进思路对舰船特种环形舱室大气环境控制的设计优化具有一定参考价值。

(3) 本文通过模拟研究证明了改进方案的可行性, 后续可通过增加试验对改进方案进一步验证。改进方案在极端高温下舱室上部区域有超标报警的风险, 改进方案上下部温差达 4°C , 设备存储环境有进一步优化空间, 建议在特种环形舱室设置扰动风机, 进一步增强空气流动, 使舱室温度更加均匀, 接近舱室最佳存在温度。

参考文献:

- [1] 张祥瑞. “以人为本”理念在大型舰船设计中的应用[J]. 船舶, 2004(6):5-9.
- [2] 莫慧玲. 船舶舱室舒适度数值模拟研究[D]. 大连理工大学, 2020.
- [3] 林小龙. 辐射空调送回风对船舶舱室舒适性影响的研究[D]. 江苏科技大学, 2022.
- [4] 陈广旭, 臧建彬. 基于 Airpak 的船舶空调舱室热环境数值模拟[J]. 节能, 2023, 42(10):49-52.
- [5] 谢旭晨, 刘岩. 基于热舒适性的邮轮客房空调风口优化设计[J]. 船海工程, 2023, 52(03):17-21.
- [6] Chen Q, Xu W. A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation[J]. Energy & Buildings, 1998, 28(2):137-144.
- [7] Liu Z, Chen Y, Wu Y, et al. Simulation of exchange flow between open water and floating vegetation using a modified RNG k- ϵ turbulence model[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2017:1-18.
- [8] 曹兆洋. 不同送风工况下空调房间舒适度模拟与分析[D]. 上海海洋大学, 2018.
- [9] 袁东升, 田慧玲, 高建成. 气流组织对空调房间空气环境影响的数值模拟[J]. 建筑节能, 2008, 36(9):9-13.