

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0015-07

微压舱二氧化碳流场分析与布局优化

吴庆章¹, 卢剑锋¹, 周浩¹, 张富贵¹, 刘卫军²

(1. 贵州大学机械工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要:针对换气系统是高海拔居住微压舱正常使用的核心保障, 现有方案存在换气效率不足、能耗偏高的问题, 为提高微压舱换气效率、实现节能目标, 聚焦进排气口位置与传感器布局两大影响二氧化碳排出的关键因素, 采用数值模拟与实验验证相结合的方法, 通过 FLUENT 软件建立微压舱三维模型与有限元流场分析模型, 模拟舱内气流组织及二氧化碳扩散规律, 根据正交实验设计 16 种进排气口与传感器布局对比优化方案并完成流场分析。搭建高海拔模拟实验平台, 完成仿真结果的验证实验。结果表明, 优化后的进排气口对角布局 and 四点分布式传感器布置, 提升二氧化碳排出效率, 降低了能耗。研究结果为高海拔居住微压舱的设计改进与工程应用提供了参考。

关键词:高海拔居住微压舱; 流场仿真; 二氧化碳; 正交实验; 布局优化

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0015-07

Analysis of carbon dioxide flow field and optimization design of sensor layout in micro-pressure cabins

WU Qingzhang¹, LU Jianfeng¹, ZHOU Hao¹, ZHANG Fugui¹, LIU Weijun²

(1. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China;

2. China Construction Three Bureau Group Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract: The ventilation system is a crucial guarantee for the normal operation of high-altitude residential micro-pressure capsules. Existing solutions suffer from insufficient ventilation efficiency and high energy consumption. To improve the ventilation performance of micro-pressure capsules and achieve energy-saving objectives, this study focuses on two key factors affecting carbon dioxide discharge: the positions of air inlets/outlets and the layout of sensors. A combined approach of numerical simulation and experimental validation was adopted. A three-dimensional model and a finite element flow field analysis model of the micro-pressure capsule are established using FLUENT software to simulate the airflow organization and carbon dioxide diffusion inside the capsule. Based on orthogonal experimental design, 16 comparative optimization schemes for inlet/outlet and sensor layouts are developed and subjected to flow field analysis. A high-altitude simulation experimental platform is constructed to validate the simulation results. The findings indicate that the optimized diagonal layout of air inlets/outlets and the four-point distributed sensor arrangement enhance carbon dioxide discharge efficiency and reduce energy consumption. This research provides a reference for the design improvement and engineering application of high-altitude residential micro-pressure capsules.

Keywords: high altitude residential micro cabin; flow field simulation; Carbon dioxide; orthogonal experiment; layout optimization

高海拔居住微压舱是一款可以较好满足高原地区居民、旅游者、官兵等人员的日常居住需求的微压舱, 该舱内具有的等效于低海拔地区的氧分压可使得居住人员有效改善高原反应和提高睡眠质量, 极大降低高原病等高原性疾病对人体的影响^[1-4]。高海拔居住微压舱是一个人造的密闭舱体, 在密闭环境中, 由于人自身的活动, 舱内二氧化碳浓度迅速升高, 并且会迅速超过《GB/T 18883—2002 室内空气质量标准》规定的室内二氧化碳浓度标准值 $\leq 1\ 000\ \text{ppm}$ ^[5], 舱内过高的二氧化碳浓度成为威胁舱内

居住人员健康安全的最主要因素, 因此在二氧化碳浓度达到 1 000 ppm 时需要通过进排气口换气降低二氧化碳浓度, 高原微压舱与飞机座舱模拟环境相似, 针对密闭空间的污染物的分布情况, Mazumdar 等建立一维分析模型, 模拟了舱内污染物传播情况^[6], 波音公司建立飞机座舱二维模型, 模拟计算舱内气流组织情况^[7], 但这些研究均不是三维模型, 代炳荣建立简化座舱的三维模型, 研究不同送风方式对舱内流场的影响^[8], 黄彦祺等利用改造的室内环境模拟程序, 研究不同送风方案对气流组织的影响^[9]。

收稿日期: 2024-07-15; 录用日期: 2024-08-30

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合中引地[2023]010)

作者简介: 吴庆章(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 自动控制, 过程控制。

通信作者: 卢剑锋(1976—), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 复杂系统自动控制, 工业控制。

引用本文: 吴庆章, 卢剑锋, 周浩, 等. 微压舱二氧化碳流场分析与布局优化[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(3): 15-21. (WU Qingzhang, LU Jianfeng, ZHOU Hao, et al. Analysis of carbon dioxide flow field and optimization design of sensor layout in micro-pressure cabins[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(3): 15-21.)

本文研究了舱内进排气口位置布局方案和舱内传感器的布局位置对于舱内流场环境的影响,并提出优化方案,实现提升舱内二氧化碳系统的排放效率和节约换气时所消耗能源的目的。高海拔居住微压舱如图1所示。



图1 微压舱实物照片

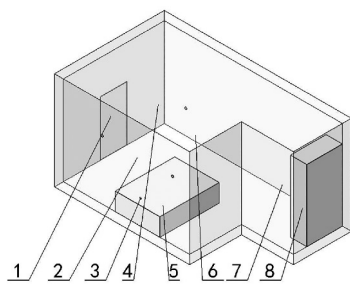
Fig. 1 Physical image of the micro-ballast

1 微压舱建模与流场分析

1.1 高海拔居住微压舱模型建立

海拔居住微压舱按功能分为设备舱,过渡舱,生活舱三大种类。因为主要居住在生活舱,所以该舱体产生的二氧化碳最多,并且换气也主要在生活舱中进行。所以本文对生活舱单独进行了研究与分析。为了精确地建模,将舱内重要部件的位置标出,并且简化模型,以方便后续计算,将舱内的二氧化碳传感器和人的位置简化为某一点的位置。

因建立精确完整的舱体模型会使仿真计算量增大,所以对不影响舱内二氧化碳流体分析的结构模型进行了简化处理。生活舱的卫生间为单独的密闭空间且有单独换气装置,所以对生活舱进行三维建模时,省去了卫生间的建模。简化后的生活舱三维模型,如图2所示。



1—舱门;2—舱体排气口;3—二氧化碳发散源;
4—二氧化碳传感器;5—床;6,7—舱体进气口;8—衣柜

图2 生活舱三维模型

Fig. 2 3D model of living quarters

1.2 舱内二氧化碳浓度模型

在仿真舱内的二氧化碳浓度流场过程中,认为该舱内流场只存在空气和二氧化碳两种气体介质,因此,选择了组分运输模型模拟舱内的二氧化碳浓度流场。该仿真还利用能量方程和 $k-e$ RNG 湍流方程对舱内的二氧化碳浓度流场进行了数值模拟计算。因从二氧化碳发散源发出的二氧化碳在空气中的扩散过程中质量和动量是守恒的,

其基本运动方程如下。

连续性方程为

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

动量守恒方程为

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + u \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

能量守恒方程为

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + u_i \frac{\partial U}{\partial x_j} = 2 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \rho \quad (3)$$

二氧化碳输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} (u_x c) + \frac{\partial}{\partial y} (u_y c) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z c) = \Gamma \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + S(x, y, z) \quad (4)$$

在式(4)中, u_x, u_y, u_z 为舱内任意一点的 x, y, z 3个方向的速度分量,为舱内任意一点的二氧化碳扩散系数, Γ 该系数包括舱内分子扩散和湍流系数,简略计算,认为这3个方向上的扩散系数是相同的,否则在舱内的 x, y, z 3个方向上的二氧化碳扩散系数分别用 $\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_z$ 表示。 $S(x, y, z)$ 为舱内任意一点的二氧化碳释放强度。

1.3 边界条件

本文利用了 ANSYS 软件中的 Fluent 流体模块对舱内的二氧化碳浓度流场进行仿真计算。

1) 根据舱体换气的初始方案实验情况设置舱体进气口为速度入口边界,舱体的排气口为压力出口。因换气时间较长,进气口的速度根据初始方案实验取 $v = 1.59 \text{ m/s}$ 。

2) 本文将舱内换气的二氧化碳浓度初始值设定为《GB/T 18883—2002 室内空气质量标准》规定的室内二氧化碳浓度指标限值 $1\ 000 \text{ ppm}$ (即二氧化碳质量分数 $0.151\ 9\%$)。

3) 舱内人体边界设定为质量流量入口,其人体模型简化为一个 $0.03 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ 的面,模拟人体二氧化碳的呼出口,即舱内的二氧化碳发散源。人体不同活动模式下的平均二氧化碳代谢量,如表1所示^[10-12]。

表1 人体不同活动模式下的平均二氧化碳代谢量
Tab. 1 Average under different human activity modes carbon dioxide metabolic rate

活动强度	二氧化碳代谢量/($\text{L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{人}^{-1}$)
平躺	0.24
静坐	0.26
极轻劳动	0.28
轻等劳动	0.38
中等劳动	0.68
重等劳动	1.25

根据舱的实际使用情况,舱被使用于人夜间休息的时间较长,所以选取1人在平躺状态下的活动强度即二氧化碳的代谢量为 0.24 L/min 。

2 仿真分析和布局优化

2.1 舱内流场分析

根据模拟条件,换气方案采取进出气同时进行的方式,采取下进上排的换气方案。图为3舱内二氧化碳浓度曲线,可以看出,换气时间增加,舱内二氧化碳浓度逐渐降低,降低速率随着浓度的降低而减小。浓度值最终趋于稳定。该方案下传感器检测到目标值0.10633%(700ppm)时,换气时间为5099s。

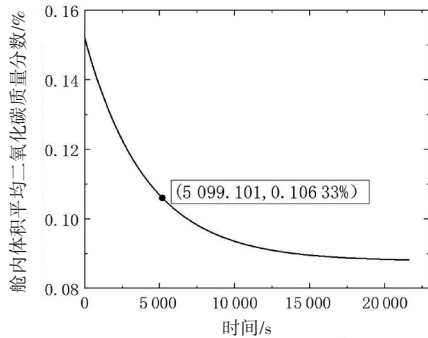


图3 舱内体积平均二氧化碳质量分数

Fig. 3 Average carbon dioxide mass fraction in the cabin volume

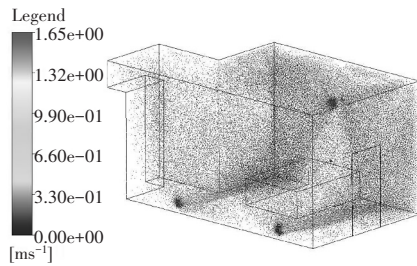


图4 速度场体积云图

Fig. 4 Velocity field volume cloud map

图4、5为舱内速度场体积云图和浓度分布体积云图,舱内二氧化碳浓度分布较均匀,根据扩散原理,气体集中在模拟人体口鼻的呼出口位置,同时二氧化碳密度大于空气密度,气体向舱体低水平高度区域分布,气态污染物在混合通风较大情况下,分布主要受流场的影响,该换气方案中排气口的水平高度较高,该流场不利于舱内二氧化碳的排出,导致换气效率低,增加了换气时所需的能耗。

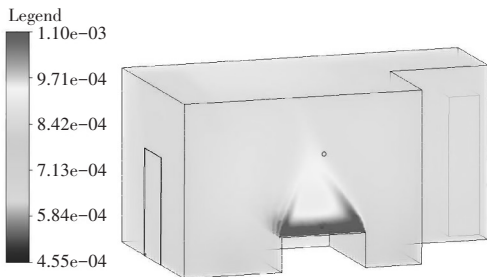


图5 浓度分布体积云图

Fig. 5 Concentration distribution volume cloud map

2.2 舱体进排气口位置方案优化

在相同条件下,通过优化生活舱的进排气口位置,从而找到合适的换气方案,让舱体内二氧化碳到达快速下降的

目的。因为舱体的实际布置情况,舱体的进排气口只能在舱门两侧墙体的墙面上进行优化。这里把舱门两侧面命名为A面和B面。为提高效率采用两个进气孔和两个排气孔的换气方式。优化后的生活舱三维模型,如图6所示。

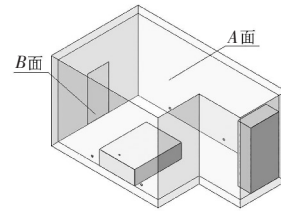


图6 改进后生活舱三维模型

Fig. 6 Improved 3D model of living quarters

根据流场分布情况,换气效率受进排气口位置分布影响,确定进排气口位置由5个因素影响,分别是A面孔距地面高度,A面孔距床宽度,B面孔距地面高度,B面孔距床宽度,进气位置。根据实际情况确定出各因素的水平数。其中A面孔位置,如图7所示。B面孔位置,如图8所示。

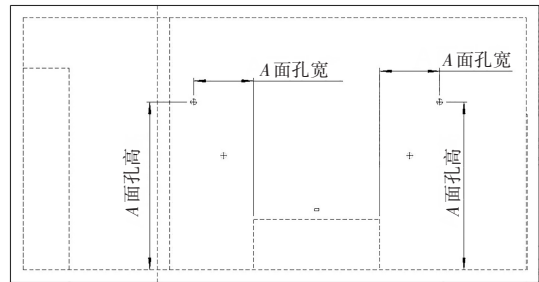


图7 A面孔位置

Fig. 7 A face position

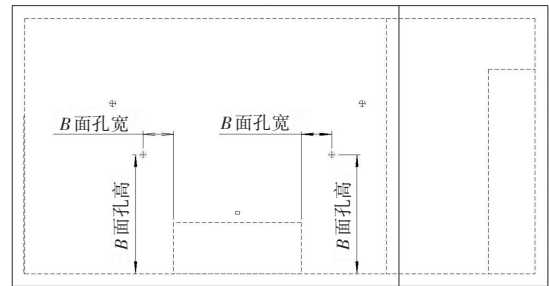


图8 B面孔位置

Fig. 8 B face position

根据舱内实际位置情况,按等差关系对进排气孔的位置进行选取,最后选定出5个因素的水平数。得到换气因素及其水平表,如表2所示。从表2中可以知道方案组合以后总共有 $4 \times 4 \times 4 \times 4 \times 2 = 512$ 种方案。

表2 换气因素及其水平表

Tab. 2 Ventilation factors and their levels table

序号	孔高/mm		孔宽/mm		进气位置
	A面	B面	A面	B面	
1	200	200	400	300	A面
2	800	800	717	433	B面
3	1 400	1 400	1 034	566	—
4	2 000	2 000	1 351	700	—

因受方案组合数量限制,采用正交设计实验法选出合理的实验方案^[13]。从而选出合理的组合。从进出口方案可以得出为 Ln(44×21)型(四因素四水平和一因素两水平)正交表,该正交表为混合水平正交表,所以决定将等水平正交表 L16(45)型(五因素四水平)进行修改得出正交设计表,如表 3 所示。

表 3 正交设计表

Tab. 3 Orthogonal design table

方案	A 面孔高	B 面孔高	A 面孔宽	B 面孔宽	进气位置
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	1	3	3	3	1
4	1	4	4	4	2
5	2	1	2	3	2
6	2	2	1	4	1
7	2	3	4	1	2
8	2	4	3	2	1
9	3	1	3	4	2
10	3	2	4	3	1
11	3	3	1	2	2
12	3	4	2	1	1
13	4	1	4	2	1
14	4	2	3	1	2
15	4	3	2	4	1
16	4	4	1	3	2

2.3 舱体进排气口位置仿真分析

如图9所示,展示了各方案的体积平均二氧化碳质量分数随换气时间逐步降低的情况。从图中可以看出,各方案的舱内体积平均二氧化碳质量分数都从初始值 0.151 9% 逐步下降,最终趋近于约 0.088 2% 左右。虽然另外 15 组方案的效果差异不大,但方案 13 在 16 个方案中最先达到目标值,表现最优。

逐步下降,最终趋近于约 0.088 2% 左右。虽然另外 15 组方案的效果差异不大,但方案 13 在 16 个方案中最先达到目标值,表现最优。

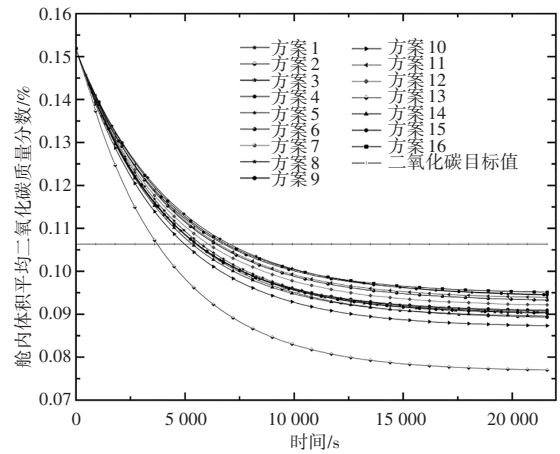


图 9 各方案的体积平均二氧化碳质量分数下降图

Fig. 9 Volume average carbon dioxide mass of each scheme score decrease chart

根据表 4 所示的各方案下达到二氧化碳质量分数目标值 0.106 33% 所需的时间,得到换气效率最优的前 3 个方案分别为方案 13,方案 10 和方案 14,所用时间分别为 3 721 s,4 979 s,5 322 s,方案 13 为最优方案,其中最优化方案 13 相对于未优化方案的 5 099 s 减少了换气时间 1 378 s,提高了换气效率。

为探究不同方案二氧化碳流场分布情况,分别得到了方案 14、方案 10、方案 13 的速度体积云图和二氧化碳浓度体积云图,如图 10~15 所示。

表 4 各方案下降到二氧化碳质量分数的目标值的时间表

Tab. 4 Timetable for each plan to reach the target value of carbon dioxide mass fraction

方案	A 面孔高/mm	B 面孔高/mm	A 面孔宽/mm	B 面孔宽/mm	进气位置	舱内 CO ₂ 质量分数下降到 0.106 33% 时间/s
1	200	200	400	300	A 面	7 036
2	200	800	717	433	B 面	5 491
3	200	1 400	1 034	566	A 面	5 518
4	200	2 000	1 351	700	B 面	5 519
5	800	200	717	566	B 面	5 725
6	800	800	400	700	A 面	6 419
7	800	1 400	1 351	300	B 面	5 541
8	800	2 000	1 034	433	A 面	5 543
9	1 400	200	1 034	700	B 面	5 546
10	1 400	800	1 351	566	A 面	4 979
11	1 400	1 400	400	433	B 面	6 525
12	1 400	2 000	717	300	A 面	6 060
13	2 000	200	1 351	433	A 面	3 721
14	2 000	800	1 034	300	B 面	5 322
15	2 000	1 400	717	700	A 面	6 776
16	2 000	2 000	400	566	B 面	6 891

图 10、图 11 分别为方案 14 的速度体积云图和二氧化碳浓度体积云图。图 11 显示,舱内二氧化碳分布均匀,但是由于方案 14 采用下方进气、上方排气的换气方式,而排气口的水平位置较高,不利于二氧化碳的排出。这导致舱内体积平均二氧化碳质量分数偏高。图 12、13 分别为方案 10 的二氧化碳浓度体积云图和速度体积云图。采用上方进气,下方排气的换气方式。从图 13 可知舱内二氧化碳分布较均匀,而且排气口水平位置较低也有利于二氧化碳的排出,舱内的体积平均二氧化碳质量分数偏低。图 14、15 分别为方案 13 的二氧化碳浓度体积云图和速度体积云图。采用上方进气,下方排气的换气方式,且进气口与排气口垂直和水平方向的距离相差较大。从图 15 可知舱内二氧化碳分布较均匀,而且排气口垂直位置低,更加有利于二氧化碳的排出,舱内的体积平均二氧化碳质量分数更低。经过分析后,从降低舱内二氧化碳浓度的效率看,可以得出方案 10 的换气方式要优于初始方案 14,而方案 13 的换气方式要优于方案 10。

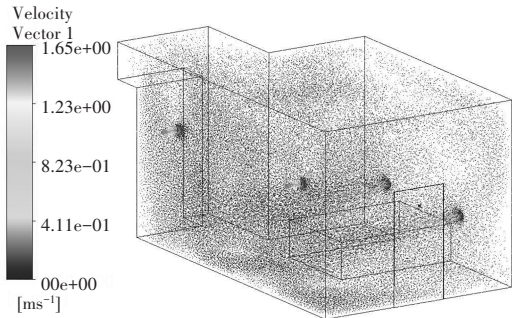


图 10 方案 14 速度场体积云图

Fig. 10 Scheme 14 velocity field volume cloud map

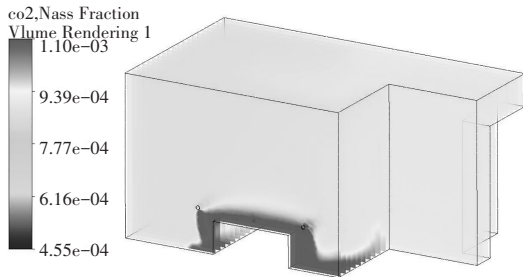


图 11 方案 14 浓度体积云图

Fig. 11 Scheme 14 concentration volume cloud map

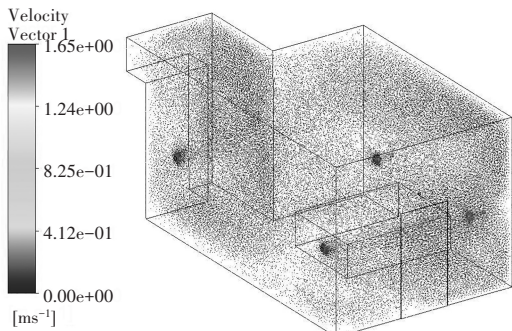


图 12 方案 10 速度场体积云图

Fig. 12 Scheme 10 velocity field volume cloud map

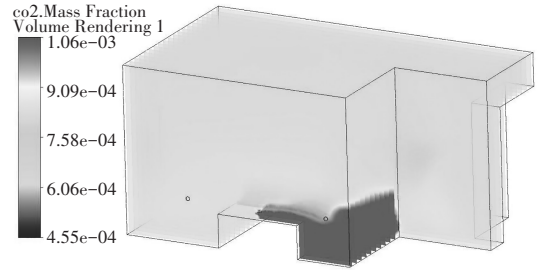


图 13 方案 10 浓度体积云图

Fig. 13 Scheme 10 concentration volume cloud map

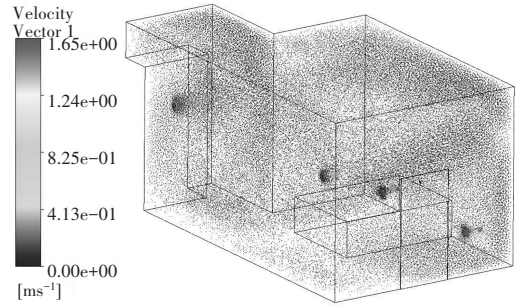


图 14 方案 13 速度场体积云图

Fig. 14 Scheme 13 velocity field volume cloud map

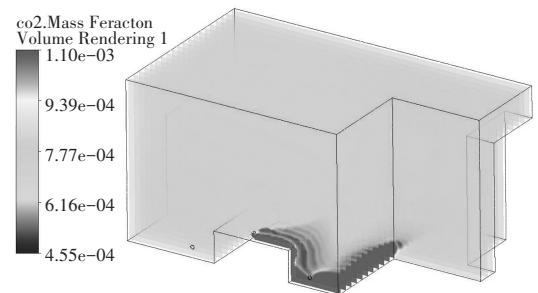


图 15 方案 13 浓度体积云图

Fig. 15 Solution 13 concentration volume cloud map

根据以上,可以得出以下规律。为了更好地满足人体对新风的需求,进气口的位置应优先考虑接近舱顶的位置;而排气口则应优先考虑设置在距离舱底较近的位置,并且排气口的位置应尽可能接近二氧化碳发散源,从而更好地排出二氧化碳。此外,进气口和排气口的水平距离也应尽可能远离,以达到更好的换气效果。遵循这些规律,可以在满足舱内换气要求的同时,实现最低的能源消耗,降低二氧化碳浓度。

2.4 二氧化碳传感器布局优化

采取最优方案 13 为二氧化碳传感器布局优化设计方案模型,方案 13 各高度二氧化碳的俯视切面云图,如图 16~18 所示。随着高度的上升,二氧化碳的浓度逐渐变小。0.8 m 时舱内二氧化碳浓度已经满足室内标准二氧化碳浓度需求 $\leq 1\ 000\ \text{ppm}$ 。

结合图 16~18 的分析规律。随着高度的升高,二氧化碳的浓度逐渐减小。再结合舱内水平高度 800 mm 时舱内二氧化碳浓度已经满足室内标准二氧化碳浓度需求 $\leq 1\ 000\ \text{ppm}$ 。所以选取方案 13 的水平面 600 mm,作为仿

真时布置二氧化碳传感器的水平面。为了使舱内二氧化碳传感器能够真实反映舱内的二氧化碳浓度,将同一水平面的二氧化碳传感器仿真检测位置,如图 19 所示布置。尺寸的统一单位为 mm。

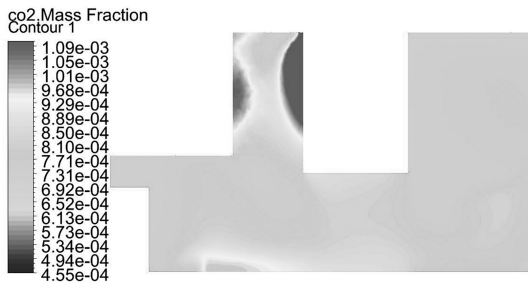


图 16 400 mm 切面云图

Fig. 16 400 mm sectional cloud map

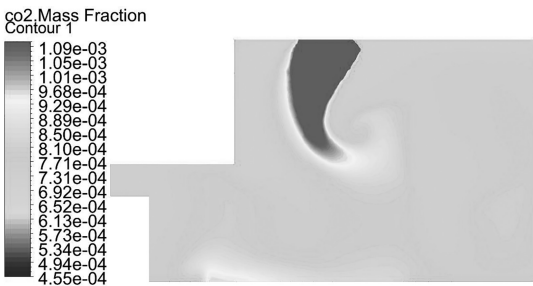


图 17 600 mm 切面云图

Fig. 17 600 mm sectional cloud map

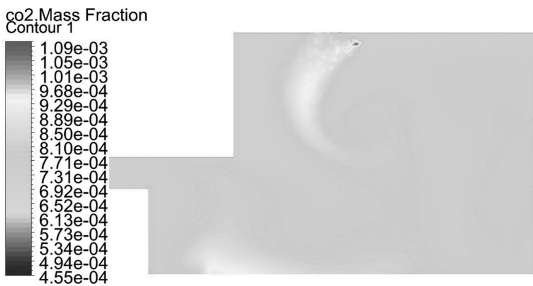


图 18 800 mm 切面云图

Fig. 18 800mm sectional cloud map

图 19 为二氧化碳传感器监测点的位置布置。根据实验仿真结果,得到 16 个监测点,各监测点下降到二氧化碳质量分数的目标值 0.106 33% 的时间表,如表 5 所示。

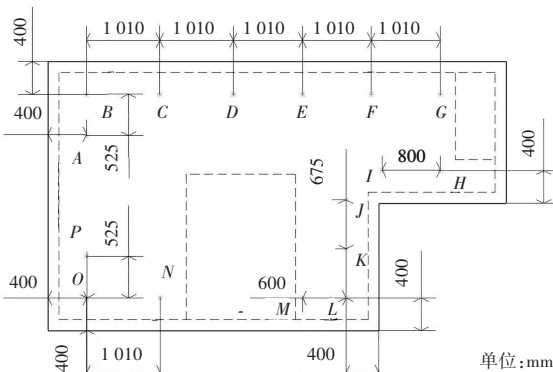


图 19 同一水平面的二氧化碳传感器检测位置

Fig. 19 Carbon dioxide at the same horizontal plane sensor detection position

表 5 各监测点下降到二氧化碳质量分数的目标值 0.106 33% 的时间表

Tab. 5 Schedule for each monitoring point to drop to the target value of carbon dioxide mass fraction of 0.106 33%

监测点	时间/s	监测点	时间/s
A	4 359	I	3 618
B	4 075	J	3 309
C	3 897	K	3 374
D	4 837	L	3 294
E	4 424	M	8 567
F	5 495	N	3 511
G	3 842	O	3 399
H	3 325	P	3 999

从表 5 中可以得出各检测点达到二氧化碳质量分数的目标值 0.106 33% 的时间关系由大到小的顺序为 M、F、D、E、A、B、P、C、G、I、N、O、K、H、J、L。为了合适地反映舱内二氧化碳浓度情况,去除 16 个点中的最大值 M 点和最小值 L 点,最终选择 A、F、K、P 为实际二氧化碳传感器布置点。A、F、K、P 这 4 个检测点的下降到二氧化碳质量分数的目标值平均时间为 4 306. 75 s,该换气时间大于方案 13 舱内平均二氧化碳到达目标值的换气时间,相差 585. 75 s 左右,说明模拟二氧化碳传感器检测点的二氧化碳质量分数值到达目标值时,舱内整体实际二氧化碳的质量分数已经达到目标值,满足舱内换气的要求。

2.5 实验验证

生活舱群中使用西门子 S7-1200PLC 的控制器,西门子的 WINCC 7. 4SP 软件和威纶通触摸屏的 Easy Builder Pro 软件为该控制系统的上位机组态软件。利用 PLC 控制器与居住舱体内的各种传感器相结合的方式^[14-16],实时采集舱内二氧化碳浓度,舱内氧气浓度,舱内温湿度等环境参数。

根据表 4 结果,选取换气效率高的前 4 组方案进行换气实验,在舱内设置四个环境检测仪表,其位置与方案 13 仿真中模拟监测点 A、F、K、P 一致,其数值取 4 个监测点的平均值,图 20 为舱内传感器布置图。



图 20 舱内传感器布置图

Fig. 20 Layout of sensors inside the cabin

图 21 为方案 13 实验值与仿真值对比曲线图,可以观察到,实验值与仿真值曲线基本重合。

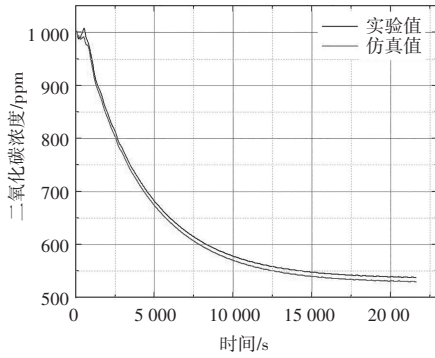


图 21 仿真值与实验值对比曲线

Fig. 21 Comparison curve between simulated and experimental values

表 6 为 4 组方案实验值与仿真值对比数据,实验值与仿真值最大相差 218 s,最小相差 131 s,综合考虑实验环境导致的误差,误差在可接受范围之内。4 组实验数据中,其中方案 13 的换气效率最高,有效从实验层面验证了仿真数据的可行性。

表 6 实验值与仿真值对比表

Tab. 6 Comparison table of experimental and simulated values

方案	仿真值/s	实验值/s
13	4 306	4 524
10	5 479	5 654
14	5 782	5 913
2	5 971	6 152

在实验条件不变的情况下,进行未优化方案的换气实验,得到优化前后的两组对比曲线,如图 22 所示。优化方案 13 到达目标值的时间为 10:15:25,总用时 75.4 min,未优化方案到达目标值的时间为 10:21:05,总用时 81.1 min,可见,优化方案较未优化方案在时间上减少 5.7 min。从实验上验证优化后的方案可实现提升舱内的换气效率的目标。

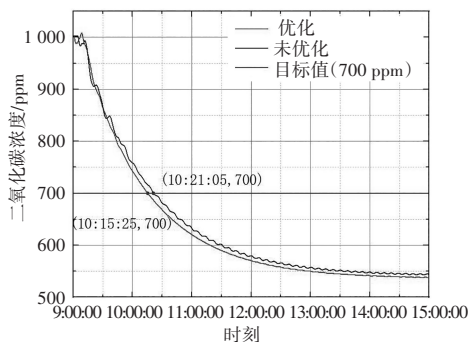


图 22 两种方案的舱内实验二氧化碳浓度对比曲线

Fig. 22 Two schemes of in cabin experiments on carbon dioxide concentration comparison curve

3 结论

经过对微压舱内二氧化碳的流场分布仿真与实验验证得出以下结论:

1) 舱内气体分布主要受流场的影响,二氧化碳主要集中在发散源处,并在舱内水平高度较低区域分布。

2) 进排口位置对换气效率有影响,优化后的方案采用上方进气、下方排气的换气方式,并且进排口垂直和水平方向的距离相差较大,同时排气口设置在低位,有利于二氧化碳的排出,从而提升了换气效率。

3) 舱内二氧化碳传感器布置位置对换气效率有影响,二氧化碳浓度随水平高度的增加而降低,在距离水平面 0.6 m 的 4 个角落设置 4 个检测点可反映舱内二氧化碳浓度值。

参考文献

- [1]路其中. 高原微压舱群方案[J]. 医用气体工程, 2018, 3(4):34-35.
- [2]张奕. 高压氧, 治疗失眠新方法[J]. 江苏卫生保健, 2021(5):23.
- [3]秦毅. 青藏高原主要疾病影响因素分析及人体健康风险评估[D]. 兰州:西北师范大学, 2020.
- [4]马舒, 孔繁一, 符丽艳, 等. 高原睡眠障碍患者脑血流变化的临床观察[J]. 高原医学杂志, 2020, 30(3):59.
- [5]卫生部. 室内空气质量标准:GB/T 18883—2002[S]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- [6]MAZUMDAR S, CHEN Q. A one-dimensional analytical model for airborne contaminant transport in airliner cabins[J]. Indoor Air, 2009, 19(1):3.
- [7]ABOOSAIDI F, WARFIELD M, CHOUDHURY D. Numerical analysis of airflow in aircraft cabins[J]. SAE Transactions, 1991, 35(8):1294-1304.
- [8]代炳荣, 刘义国, 余刚, 等. 飞机座舱空气质量数值模拟研究[J], 交通运输工程学报, 2016, 16(3):108-115, 141.
- [9]黄彦祺. 飞机座舱内流场的数值模拟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [10]吴迪. 基于数值模拟的室内自然通风污染物浓度变化过程研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2017.
- [11]NIKAS K S, NIKOLOPOULOS N, NIKOLOPOULOS A. Numerical study of a naturally cross-ventilated building[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(4):422-434.
- [12]YI Qianying. Numerical investigation on the effects of building configuration on discharge coefficient for a cross-ventilated dairy building model[J]. Biosystems Engineering, 2019 (182):107-122.
- [13]王瑞, 石明全, 肖建军. 基于正交实验的铝瓶盖冲压成型参数优化[J]. 机械设计与制造, 2016(9):210-213.
- [14]王晓喻, 杨志超. 基于 S7-1200 PLC 与物联网的自动化仓库系统设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(4):25-28.
- [15]王晓喻. 基于 PROFIBUS-DP 总线技术的主从站变频调速控制系统设计与实现[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11):37-39.
- [16]程伟田, 覃江英, 黄家宝. PLC 通信技术下远程智能电表信息采集系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(9):119-123.