

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-827-06

# 不同通风系统下病房中污染物排放的效果研究

黄兵

(右江民族医学院附属医院 百色 533000)

**【摘要】** 随着传染性疾病的频发, 医疗场所的室内空气质量问题备受关注。现有研究表明, 通风系统对室内污染物的去除和减少交叉感染风险至关重要。然而, 关于置换通风系统在医疗场景中的具体效果尚未完全明确。通过CFD模拟的方法研究了置换通风系统的室内环境特性。研究了不同换气次数、通风方式、辐射墙壁位置情况下, 污染物的去除情况。同时, 还提出了医护人员吸入指数( $IF$ )的概念, 用来评价局部地区医护人员的暴露风险。模拟结果表明, 置换通风系统污染物去除指数在0.65~2.0之间,  $IF$ 值主要在0~12之间, 根据研究发现随着换气次数的增加,  $IF$ 值随之减小, 用 $IF$ 值评估局部地区污染物浓度感染风险更加合适。置换通风系统虽然有较高的换气效率和污染物去除效率, 但不能有效避免医护人员与病患之间交叉感染, 因此置换通风系统在预防交叉感染方面并没有显著优势。

**【关键词】** 置换通风系统; CFD; 污染物去除指数; 污染物吸入指数  
中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

## Research on the Effects of Different Ventilation Systems on Pollutant Emission in Wards

Huang Bing

(Affiliated Hospital of YouJiang Medical University for Nationalities, Baise, 533000)

**【Abstract】** With the frequent occurrence of infectious diseases, the issue of indoor air quality in healthcare settings attracted considerable attention. Existing research indicated that ventilation systems were critical for removing indoor pollutants and reducing the risk of cross-infection. However, the specific effects of displacement ventilation systems in medical settings had not been fully clarified. This study investigated the indoor environmental characteristics of displacement ventilation systems using CFD simulations. The study explored pollutant removal under different air change rates, ventilation modes, and positions of radiant walls. Additionally, the concept of the Inhalation Factor ( $IF$ ) for healthcare workers was introduced to evaluate their exposure risk in local areas. Simulation results showed that the pollutant removal index of the displacement ventilation system ranged from 0.65 to 2.0, while the  $IF$  values ranged mainly from 0 to 12. The study found that as the air change rate increased, the  $IF$  value decreased, making  $IF$  a more suitable indicator for assessing the infection risk due to pollutant concentrations in local areas. Although the displacement ventilation system demonstrated high air change efficiency and pollutant removal efficiency, it could not effectively prevent cross-infection between healthcare workers and patients. Therefore, displacement ventilation systems did not show a significant advantage in preventing cross-infection.

**【Keywords】** Displacement ventilation; CFD; Intake fraction index; Pollutant removal index

## 0 引言

医院病房内, 病患有携带传染病毒的可能, 医

护人员与病患的接触最多, 是最容易暴露传染病毒之中的。通常传染病可分为两类: 一类是呼吸道传

染病,这类传染病容易通过空气进行传播,其通风的目标是控制气流流向和稀释污染物浓度。采用合理的气流组织形式,使得清洁空气从清洁区流向污染区,从健康人群(医护人员)流向传染病患者;通过送入室外无污染的新鲜空气、排出室内污染物浓度较高的空气,置换稀释,降低室内病菌浓度。因此呼吸道传染病通风设计的要求是设计合理的气流组织设计,严格控制各房间的压差。另一类非呼吸道传染病是指通过手接触后沾染病菌并接触易感染部位(眼、鼻、口、创口等),导致病菌侵入人体。在非呼吸道传染病区,对传染病的控制主要是依赖物理隔离与洗消,通风对传染病控制的作用较小<sup>[1]</sup>。

置换通风与传统的混合通风方式相比以其具有的节能性和高空气品质优势引起人们的关注,并得到长足发展,至90年代,北欧新建的办公建筑中约有50%~70%采用这种通风方式<sup>[2]</sup>。研究表明,通风系统的设计以及室内的气流分布对于降低室内交叉感染的作用远比仅仅提高室内换气次数来的显著。而室内通风系统产生的室内流场是可控的,针对这方面已经有了很多的相关研究<sup>[3-5]</sup>。

Khan等<sup>[5]</sup>通过CFD模拟研究了置换通风系统几种不同送、排风口位置,研究发现,在低流速下,污染物的相对密度对浓度分布有一定的影响,而在高流速下(8h<sup>-1</sup>或更高),这种影响可以忽略不计。Bjorn等<sup>[6]</sup>在两个带有呼吸人体模型的置换通风室中进行了实验,研究运动和呼吸对污染物垂直分布和居住者个人暴露的影响。用示踪气体设备测量房间内和两个人体模型吸入时的浓度。示踪气体被添加到坐着的人体模型上方的热羽流中,或者通过鼻子或嘴巴呼气。另一个人体模型在一辆推车上以不同的速度来回移动。上述实验条件对污染物分布和个人暴露有显著影响。Chen等<sup>[7]</sup>比较了在相同热舒适和污染物水平下混合通风、工厂现有通风以及置换通风的能耗,结果显示,置换通风的总能耗比现有通风系统低20.3%,比混合通风系统低17.5%。付旺等<sup>[8]</sup>通过CFD模拟针对有无冷却顶板的不同情况,得出室内温度场、速度场、TVOC浓度场的分布特性并进行了对比研究。研究结果表明冷却顶板可以降低置换通风系统的室内温度梯度,但也同时降低了置换通风系统的排污能力。

目前对置换通风系统的研究表明置换通风系

统有较好的污染物去除效果,且相对其他通风形式更加节能,然而也有研究表明,在某些情况下,使用置换通风系统也会增加人员暴露于污染物的风险<sup>[9,10]</sup>。但是尚未有文献明确说明置换通风系统用在医院中对室内污染物浓度的影响。本文通过改变换气次数大小、排风口位置、辐射墙壁位置来研究病房内污染物的排除情况以及医护人员与病患之间的交叉感染情况。

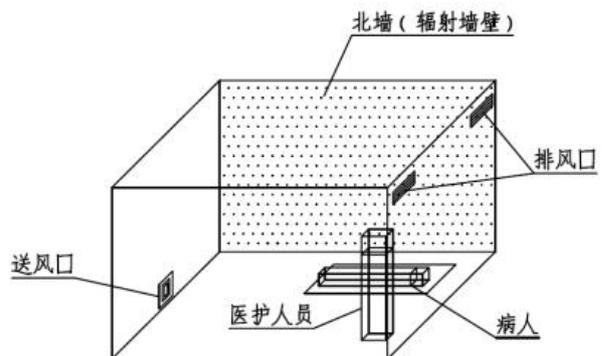
## 1 研究方法

### 1.1 病房物理模型的建立及简化

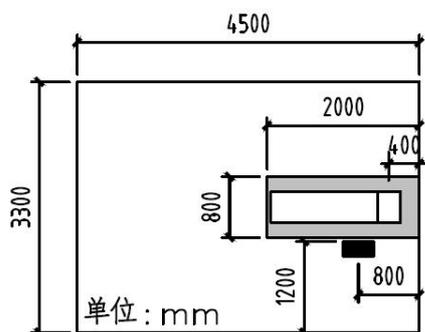
如图1所示,病房物理模型尺寸为4.5m(长)×3.3m(宽)×2.8m(高)。房间的地板和天花板做绝热处理,除了北墙,其他几面外墙也做绝热处理,北墙的散热量按500W计算。由于病房家具设置简单且无热量、污染物的产生和扩散,所以房间内简化模型仅保留医护人员和病人。模型中人体简化成六面体,人体尺寸为1.7m(长)×0.4m(宽)×0.2m(高),医护人员的散热量设定为80W,病人的散热量设定为70W。



(a) 实验室实景



(b) 实验室物理模型



(c) 物理模型俯视图

图1 实验室实景及物理模型示意图

Fig.1 Laboratory scenery and physical model schematic diagram

## 1.2 评价指标

### 1.2.1 污染物去除指数

污染物去除指数表征了室内污染物的去除效果,是指污染物在排风口处的污染物浓度与室内平均污染物浓度之比。表达式如式(1)所示<sup>[1]</sup>。

$$\zeta = \frac{C_p - C_s}{C_g - C_s} \quad (1)$$

式中:  $\zeta$ 为稳态时污染物去除指数;  $C_g$ 、 $C_p$ 、 $C_s$ 分别为稳态时室内、排风口、送风口的污染物浓度,  $\text{m}^3/\text{Nm}^3$ 。

### 1.2.2 换气效率

换气效率是指室内空气滞留时间的实际值和理论最小值的比值,表征了通风空调的换气能力,但是根据此参数无法判断空调系统排除污染物的效果。这两种指标是对空调通风换气的效果评价,污染物去除指数的表达式如式(2)所示<sup>[2]</sup>。

$$\varepsilon = \frac{\tau_n}{\tau_r} = \frac{\tau_n}{2\tau} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon$ 为换气效率;  $\tau_n$ 为名义换气时间,其为常数, min;  $\tau_r$ 为名义换气时间,也为常数, min;  $\tau$ 为室内空气的平均空气龄, min。取值范围在0~1之间。

### 1.2.3 污染物吸入指数

污染物吸入指数用来评估医护人员吸入污染物与患者呼出污染物的比值<sup>[13]</sup>。为了评估交叉感染的风险,吸入指数被定义为在同一时间段内,医护人员累计吸入污染物的质量与患者呼出污染物的质量之比,如式(3)所示。

$$IF = \frac{\int Q_{\text{医}} Y_{\text{医}} dt}{\int Q_{\text{患}} Y_{\text{患}} dt} \quad (3)$$

式中:  $Q_{\text{医}}$ 和 $Q_{\text{患}}$ 为医护人员和患者的瞬时呼吸流速;  $Y_{\text{医}}$ 为医护人员吸入空气中的 $\text{N}_2\text{O}$ 的瞬时质量浓度;  $Y_{\text{患}}$ 为患者呼入空气中的 $\text{N}_2\text{O}$ 的瞬时质量浓度。

根据式(3)提出的吸入指数公式,在具有理想混合通风条件和稳态条件的房间中,吸入指数 $IF_{\text{混合}}$ 将是均匀的。

$$IF_{\text{混合}} = \frac{Y_{\text{混合}} Q_{\text{医}}}{Y_{\text{患}} Q_{\text{患}}} \quad (4)$$

如果两个人体模型的呼气量相等,即 $Q_{\text{医}}=Q_{\text{患}}$ ,则:

$$IF_{\text{混合}} = \frac{Y_{\text{混合}}}{Y_{\text{患}}} \quad (5)$$

## 1.3 CFD模拟设置

目前,CFD数值模拟软件广泛运用于研究流体运动,相比实验法,CFD模拟具有低成本、操作简单、运算快速等优点。本文选用ANSYS Fluent 19.0进行模拟计算,室内气流的模拟采用RNG  $k-\varepsilon$ 模型。本文将室内模型都简化成六面体,主要使用六面体网格进行离散,对送风口、排风口、假人头进行网格加密。采用控制容积离散方法将微分方程离散成代数方程,求解采用SIMPLE算法。

本文模拟人员呼、吸污染物浓度情况及与置换通风系统的关系。病人的呼吸频次为20次/min,则12s内可以进行4次完整呼吸;医护人员的呼吸频次为15次/min,12s内可以进行3次完整呼吸。设置人员呼出气体温度为34℃,呼出气流为匀速。病人呼出 $\text{N}_2\text{O}$ 的质量浓度为20ppm<sup>[6]</sup>。

为了对比不同通风方式对结果的影响,模拟工况设置了置换通风和混合通风。置换通风系统的送风口位于西墙下部,如图1(b)中所示。送风口大小为400mm(长)×400mm(宽);天花板下方设置两个排风口,排风口尺寸为500mm(长)×200mm(宽),排风口设置为压力出口便捷条件。气流从房间下部进入房间,再从上部排出,形成下送上回的气流组织形式。使用混合通风系统时交换送风口和回风口的位置,使得在房间上部送风,房间下部回风。

模拟工况分别设置房间换气次数为6次/h、

9次/h、12次/h, 为了保证送风口气流流速相等, 在换气次数为9次/h时, 送风口遮挡上部四分之一; 换气次数为6次/h时, 送风口遮挡一半。北墙为辐射墙壁, 墙壁尺寸为4500mm(长)×2800mm(宽), 设置墙壁热流密度为39.7W/m<sup>2</sup>。

考虑到同样的房间, 换气次数越大时, 房间温

度会越低, 为了保证不同换气次数时, 室内温度相等, 换气次数为12h<sup>-1</sup>时, 送风温度为21.8℃, 当换气次数为9h<sup>-1</sup>时, 我们调整了送风温度为20.6℃, 当换气次数为6h<sup>-1</sup>时, 调整送风温度为18.2℃。具体模拟工况如表1所示。其中A-1、B-1、C-1三组实验进行了实验验证。

表1 模拟工况设置

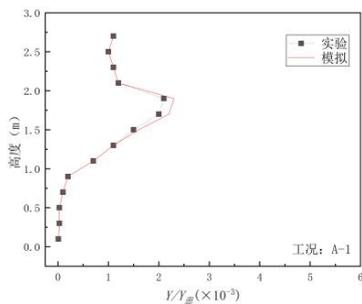
Table 1 The boundary conditions

工况编号	排风口位置	通风方式	辐射墙壁	换气次数/h <sup>-1</sup>	送风量/(m <sup>3</sup> /s)	送风温度/℃
A-1*	东墙	置换通风	北墙	12	0.16	21.8
A-2	东墙	置换通风	南墙	12	0.16	21.8
A-3	西墙	混合通风	北墙	12	0.16	21.8
A-4	西墙	混合通风	南墙	12	0.16	21.8
B-1*	东墙	置换通风	北墙	9	0.12	20.6
B-2	东墙	置换通风	南墙	9	0.12	20.6
B-3	西墙	混合通风	北墙	9	0.12	20.6
B-4	西墙	混合通风	南墙	9	0.12	20.6
C-1*	东墙	置换通风	北墙	6	0.08	18.2
C-2	东墙	置换通风	南墙	6	0.08	18.2
C-3	西墙	混合通风	北墙	6	0.08	18.2
C-4	西墙	混合通风	南墙	6	0.08	18.2

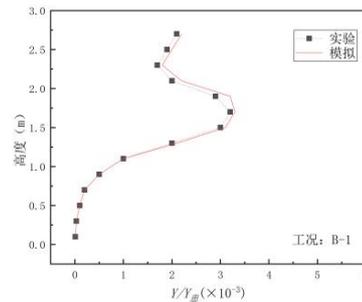
注：“\*”表示既进行CFD模拟计算也进行实验验证。

1.4 模拟结果验证

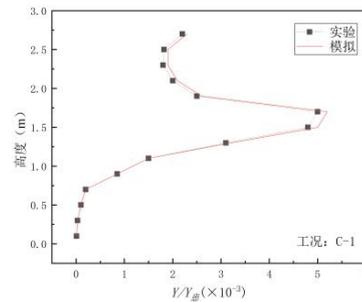
A-1、B-1、C-1三种工况下模拟结果与实验结果的对比如图2所示。室内垂直高度被划分为0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.1、1.3、1.5、1.7、1.9、2.1、2.3、2.5、2.7m等14个高度, 我们通过实验测试了不同垂直高度上的平均污染物浓度。从模拟结果可以看到, 三种不同换气次数工况下不同垂直高度上N<sub>2</sub>O的平均质量浓度实验结果与模拟结果由相同的变化趋势, 且数值接近。且在Z=1.5m的截面上, 换气次数越小, N<sub>2</sub>O污染物的浓度越大。这说明增大换气次数可以有效减小室内污染物的浓度。



(a) A-1



(b) B-1



(c) C-1

图2 A-1、B-1、C-1 三组工况垂直高度方向上污染物浓度模拟结果与实验结果对比

Fig.2 Comparison between simulation and experimental results of A-1、B-1、C-1

## 2 结果分析

### 2.1 污染物去除指数

图3显示了不同工况的污染物去除指数，污染物去除指数基本集中在0.6~2.1之间。在理想的置换通风房间中，污染物分布均匀的情况下，污染物在排风口处的浓度应该等于室内的平均浓度，此时污染物去除指数为1。图3中，C-3和C-4两组工况的 $\zeta$ 值小于1，即排风口与送风口同侧，且换气次数为 $12\text{h}^{-1}$ 时，污染物去除指数小于1。但是参考A、B-3和A、B-4，没有特别的规律，可以得到排风口的位置对污染物去除指数没有特别影响。同样的，辐射面不同时，污染物去除指数也没有特别的规律，因此，我们认为通风方式、辐射墙壁的位置、换气效率等对污染物去除指数没有特别影响。

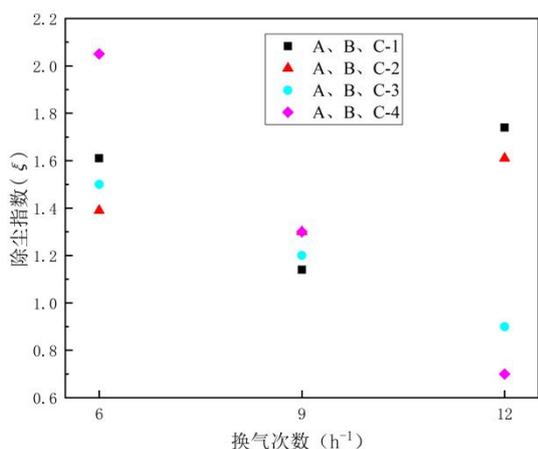


图3 不同工况的污染物去除指数

Fig.3 Pollutants removal index under different conditions

### 2.2 医护人员暴露风险

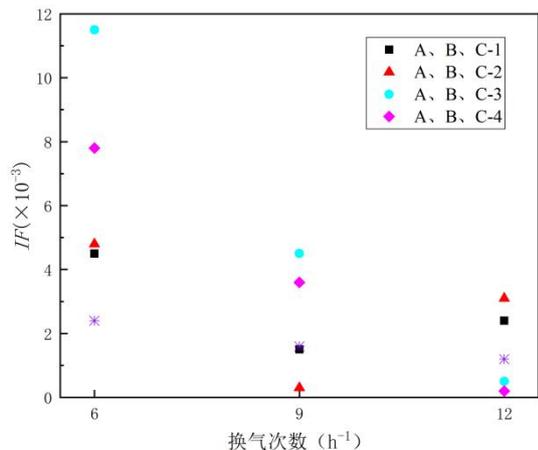


图4 不同工况的吸入指数(\*为 $IF_{\text{混合通风}}$ 值)

Fig.4 Intake fraction index of different conditions(\*:  $IF_{\text{mixing ventilation}}$ )

图4显示了各工况的 $IF$ 值，从图中可以看出随着换气次数的增加， $IF$ 值随之减小。对比12组工况，A-1、A-2、B-1、B-2、C-1、C-2这几个工况中排风口位置在东墙，A-3、A-4、B-3、B-4、C-3、C-4排风口位置在西墙，图中排风口的位置改变时 $IF$ 值没有明显的规律。图4中，\*表示 $IF_{\text{混合}}$ 值，在12组工况中，有8组工况的 $IF$ 值明显高于 $IF_{\text{混合}}$ ，由于不同工况中患者呼出污染物的量相等，由式(3)和式(4)可知，置换通风系统中医护人员感染的风险明显高于相应的理想混合通风。这就说明在病房中置换通风系统并不是最佳的通风方式。

### 2.3 各评价指标之间比较

污染物去除指数 $\zeta$ 和污染物吸入指数 $\epsilon$ 为综合指标，在不考虑换气次数的情况下，为量化整个房间的通风效果提供了有效支撑。然而，污染物浓度和空间分布是随着时间不断变化的而不是均匀的。用 $IF$ 值评估局部地区污染物浓度感染风险更加合适，然而 $IF$ 的缺点是受换气次数影响较大。本文研究目的是为了比较不同换气次数的工况，因此需将 $IF$ 统一为不受换气次数影响的指标，即 $IF/IF_{\text{混合}}$ ，结果如表2所示。

表2中显示了污染物去除效率和吸入指数之间也没有明确的关联。排风口位置对 $\zeta$ 的影响大于对 $\epsilon$ 的影响，而改变排风口位置对 $\epsilon$ 的影响大于对 $\zeta$ 的影响。表中12组工况的数据显示A-2、A-4、B-1、B-3这四组工况的 $IF/IF_{\text{混合}}$ 值低于1。因此，虽然置换通风的污染物去除指数 $\zeta$ 和换气效率 $\epsilon$ 值都较高，但在预防交叉感染方面并没有显著优势。

在表2中，置换通风系统的送风口位于西墙底部，排风口位于东墙顶部，这种配置使得气流从下向上流动，形成明显的垂直分层效果。 $\zeta$ 系数在这种通风方式下表现较高，尤其在A-1、B-1等工况中，说明置换通风有利于热空气和污染物的分层排出。然而，当辐射墙位于南墙时，如A-2、B-2， $\zeta$ 值有所下降，表明辐射墙位置可能影响气流的有效组织，削弱分层效果。

相较之下，混合通风系统通过将送风口设置在东墙顶部、排风口设置在西墙底部，使气流更趋向均匀混合，空气和污染物分布更加均匀。 $\epsilon$ 系数在混合通风的工况下普遍较高，如A-3、B-3、A-4等工况中，表明混合通风通过自上而下的气流组织

提升了空气和温度的均匀性。尤其在南墙有辐射的 A-4 工况中,  $\epsilon$  系数达到最大, 显示了混合通风在温度均衡控制方面的优势。

$IF/IF_{混合}$  指数进一步展示了混合通风系统在污染物排放和扩散上的有效性。在混合通风工况下,  $IF/IF_{混合}$  在 A-4、B-3 等工况中显著降低, 说明混合通风系统能够更好地将污染物扩散并及时排放。而在置换通风工况中, 虽然分层效果明显, 但  $IF/IF_{混合}$  值较高, 尤其在 A-1、C-1 等工况中, 显示了污染物可能在特定区域积聚, 排放效率相对较低。

综上所述, 置换通风在气流分层和污染物去除方面表现较好, 而混合通风则在气流均匀性和污染物稀释上表现更为优越。置换通风系统虽然有较高的污染物去除效率, 但不能有效避免医护人员与病患之间交叉感染, 因此置换通风系统在预防交叉感染方面并没有显著优势。

表2 不同工况对应的评价指标

Table 2 Evaluation indexes corresponding to different conditions

工况	$\zeta$	$\epsilon$	$IF/IF_{混合}$
A-1	1.74	0.56	2.24
A-2	0.73	0.53	0.35
A-3	1.65	0.70	2.52
A-4	0.89	0.70	0.16
B-1	1.14	0.59	0.72
B-2	1.23	0.56	2.70
B-3	1.29	0.71	0.14
B-4	1.17	0.67	2.25
C-1	1.61	0.56	1.89
C-2	2.07	0.56	4.88
C-3	1.43	0.68	2.00
C-4	1.47	0.62	3.67

### 3 结论

本文对置换通风系统对病房中污染物排放的效果进行了研究, 通过CFD模拟研究了不同换气次数、风口位置、辐射墙壁位置情况下, 污染物的排除情况。模拟结果表明:

(1) 置换通风系统污染物去除指数在0.65~2.0之间, 受换气次数、排风口位置、辐射墙壁位置影响不明显。

(2) 在本文中, 我们提出了污染物吸入指数

$IF$ 的概念, 用来表征室内医护人员吸入污染物与患者呼出污染物的比值。 $IF$ 值主要在0~12之间, 根据研究发现随着换气次数的增加,  $IF$ 值随之减小, 用 $IF$ 值评估局部地区污染物浓度感染风险更加合适。

(3) 置换通风在气流分层和垂直排放方面表现较好, 而混合通风则在空气均匀性和污染物分散上表现更为优越。置换通风系统虽然有较高的污染物去除效率, 但不能有效避免医护人员与病患之间交叉感染, 因此置换通风系统在预防交叉感染方面并没有显著优势。

本文的研究并未考虑一些动态因素, 例如人员移动和开关门的影响。另外, 研究外墙辐射只考虑了定热流边界条件, 并未考虑壁面热流变化的情况。这些影响因素可能会改变室内污染物分布, 破坏室内污染物自锁现象。这将会是接下来的研究重点。

### 参考文献:

- [1] 黄忠.医院通风空调设计指南(第一版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [2] Xia Yan, Q L R G. American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers [R]. New York, 1998.
- [3] Mendez C. Optimization of a hospital room by means of CFD for more efficient ventilation [J]. Energy and Buildings, 2008,40(5):849-854.
- [4] Villafruela JM. Comparison of air change efficiency, contaminant removal effectiveness and infection risk as IAQ indices in isolation rooms [J]. Energy and buildings, 2013,57(2):210-219.
- [5] Khan JA. Effects of inlet and exhaust locations and emitted gas density on indoor air contaminant concentrations [J]. Building and Environment, 2006, 41(7):851-863.
- [6] Bjorn E. Displacement Ventilation: effects of movement and exhalation [R]. Dept. of Building Technology and Structural Engineering. Indoor Environmental Technology, 1997,R9728:70.
- [7] Chen C, D Lai, Q Chen, Energy Analysis of Three Ventilation Systems for a Large Machining Plant [J]. Energy and Buildings, 2020,224(10):272-283.

(下转第 838 页)

障诊断和预防性维护提供有力支持。应用本文方法准确辨识低频故障参数,可以及时发现潜在问题,预测压缩机的运行状况,从而避免故障的发生或减轻故障对系统的影响。这不仅能够保障制冷系统的稳定运行,提高制冷效率,还能降低维修成本,延长压缩机的使用寿命。但本文的研究重点主要集中于辨识准确性上,应用麻雀算法可能会延长辨识时间。因此未来研究将进一步缩减辨识时间,提升辨识的实时性能。

### 参考文献:

- [1] 袁镇华,茅大钧,李玉珍.基于注意力机制与 XBOA-Bi-LSTM 的离心式压缩机故障预警方法[J].机电工程,2024,41(3):400-408.
- [2] 李颖,吴仕虎,杨鑫杰,等.基于 GLCM-HOG 和 WOA-ELM 的往复压缩机气阀故障诊断方法[J].电子测量技术,2023,46(20):156-163.
- [3] Mochammad S, Kang Y J, Noh Y, et al. Stable hybrid feature selection method for compressor fault diagnosis[J]. IEEE Access, 2021,9:97415-97429.
- [4] 王海峰,王则林.基于 VMD-SDP 融合图像和 CNN 的往复压缩机故障诊断[J].噪声与振动控制,2023,43(4):116-121.
- [5] 刘岩,康丽,苏庆勇,等.OVMD 与三维奇异谱特征融合的往复压缩机气阀故障识别方法[J].机床与液压,2023,51(9):226-232.
- [6] 黄文霞,刘军峰.DW-15/6 往复式压缩机轴瓦故障原因及解决对策[J].化工设备与管道,2023,60(5):55-58.
- [7] 李占锋,张军昌.IMRPE 和 AO-SVM 在往复压缩机故障识别中的应用[J].机电工程,2023,40(12):1983-1990.
- [8] 刘嘉辉,董强.基于梯度傅里叶级数的四量子比特计算机验证[J].牡丹江师范学院学报:自然科学版,2023,(2):22-27.
- [9] 孙彪,滕召胜,唐思豪,等.联合时变低通与改进形态学滤波的智能在线称量方法研究[J].仪器仪表学报,2021,42(6):29-36.
- [10] 陈涛,褚志刚,李沛然,等.基于伪频响函数矩阵法的运行模态分析方法[J].机械工程学报,2021,57(20):266-276.
- [11] 宋美萍,王金东,赵海洋,等.基于改进的 CEEMDAN 和 CHDE 的往复压缩机气阀故障诊断[J].机床与液压,2023,51(1):202-207.
- [12] 张小波,张芳,龚高.磁悬浮离心压缩机支承特性参数辨识及低频故障[J].船舶工程,2019,(6):48-53.
- [13] 回立川,陈雪莲,孟嗣博.多策略混合的改进麻雀搜索算法[J].计算机工程与应用,2022,58(16):71-83.
- [14] 左亚辉,谢源,邹定江,等.基于混沌麻雀搜索算法的 PMSM 直接转矩控制[J].组合机床与自动化加工技术,2023,3(2):174-177.
- [15] 闫丽梅,洪益民,王登银,等.基于佳点集-t 分布变异的麻雀算法 VSG 控制策略研究[J].微特电机,2024,52(3):70-77.

### (上接第 832 页)

- [8] 付旺,孙丽颖.置换通风条件下污染物分布特性的模拟研究[J].流体机械,2010,38(2):67-72
- [9] Brohus H, PV Nielsen. Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms [J]. Indoor Air, 2010,12(3):147-164.
- [10] Li Y. Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong [J]. Indoor Air, 2005,15(2):83-95.
- [11] 王汉青.通风工程(第二版)[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [12] 朱颖心.建筑环境学(第三版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] Tao-Sheng J, FU Li-Xin. Intake Fraction: an Evaluation of Vehicle Emission Health Effects [J]. Journal of Environment and Health, 2006,8(4):54-60.