

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-082-06

# 负压隔离病房气流组织数值模拟研究及对比分析

刘字峻<sup>1,2</sup> 池燕燕<sup>3</sup> 林劲松<sup>1,2</sup> 侯忠诚<sup>4</sup>

(1. 中国建筑第七工程局有限公司 郑州 450004;

2. 中建中原建筑设计院有限公司 郑州 450004;

3. 河南东森市政工程有限公司 郑州 450004;

4. 西安西热锅炉环保工程有限公司 西安 710054)

**【摘要】** 合理的气流组织, 在保持通风量不变的前提下, 对于提高负压隔离病房通风效率, 减少医护人员感染风险具有重要意义。在总结文献资料的基础上, 归纳出八种典型风口布置形式, 对其进行气流组织模拟研究。通过对比这八种风口布置形式的气流流动轨迹、污染物质量分布、污染物浓度, 得出顶侧送风, 下侧排风的风口组合方式较其他气流组织形式, 在负压隔离病房的防护通风中, 具有更好的稀释作用和气流流动轨迹。

**【关键词】** 负压隔离病房; 风口布置; 气流流动轨迹; 污染物质量分布; 污染物浓度  
中图分类号 TU246 文献标识码 A

## Numerical Simulation and Comparative Analysis of Air Distribution in Negative Pressure Isolation Wards

Liu Zijun<sup>1,2</sup> Chi Yanyan<sup>3</sup> Lin Jinsong<sup>1,2</sup> Hou Zhongcheng<sup>4</sup>

(1. China Construction Seventh Engineering Division Co., Ltd, Zhengzhou 450004;

2. CSCEC Zhongyuan Architectural Design Institute Co.Ltd, Zhengzhou, 450004;

3. Henan Dongsun Municipal Engineering Co.Ltd, Zhengzhou, 450004;

4. Xi'an xire boiler environmental protection engineering Co., Ltd, Xi'an, 710054)

**【Abstract】** Under the premise of keeping the ventilation volume unchanged, reasonable air distribution is of great significance to improve the ventilation efficiency of negative pressure isolation ward and reduce the infection risk of medical staff. On the basis of literature review, this paper sums up eight typical tuyere layouts and studies their air distribution. By comparing the air flow trajectory, pollutant mass distribution and pollutant concentration of the eight types of tuyere arrangement, this paper concludes that the combination of top side air supply and bottom side air exhaust has better dilution effect and airflow flow trajectory in the protective ventilation of negative pressure isolation ward than other air flow organization forms.

**【Keywords】** negative pressure wards; tuyere layout; air flow trajectory; pollutant mass distribution; pollutant concentration

## 0 引言

负压隔离作为气流隔离的一种形式, 与物理屏障隔离一起, 被广泛应用于相邻房间有压力梯度和定向气流流向要求的负压隔离病房及其配套用房。

负压隔离病房防护通风设置的目的主要有三个:

(1) 保护医护人员以及患者之外的其他人员不受感染; (2) 减少患者之间交叉感染风险; (3) 保护室外环境不受污染。

基金项目: 中建七局基金项目—“平疫结合”建筑项目的设计关键技术研究(项目编号: CSCEC7b-2022-Z-26)

作者(通讯作者)简介: 刘字峻(1981-), 男, 硕士研究生, E-mail: 449323957@qq.com

收稿日期: 2022-09-22

自 2020 年初新冠肺炎爆发以来, 负压隔离病房防护通风的气流组织形式开始受到众多专家学者的关注, 并对负压隔离病房的气流组织进行了大量模拟或实验研究<sup>[1-6]</sup>。这些研究的最终目的都是在一定的换气次数下, 通过气流组织形式的对比分析, 最终得出最优的气流组织形式, 从而实现带菌气体的定向排除, 尽可能的提高稀释效率, 有效的降低污染物浓度, 减少医护人员感染风险。

由表 1 的研究结果可知, 虽然采用近似甚至相同的送、排风口组合模式, 不同专家研究结果得出的最优气流组织形式也存在较大差异, 如参考文献 [2] 和参考文献 [3] 的研究对象; 甚至某些最优气流组织明显存在违背规范的情况。

本文研究的目的: 一方面汇总文献的研究成果, 在筛除一些违背规范的气流组织形式的基础上, 对文献成果列出的气流组织形式进行复盘验证; 另一方面结合工程项目的可实施性, 通过气流

组织模拟研究, 得出相对合理的气流组织形式。

## 1 现有研究结果对比分析

### 1.1 研究结果整理汇总

各专家学者论文中气流组织模拟对应的风口布置形式如图 1 所示, 论文的研究结果汇总如表 1 所示。

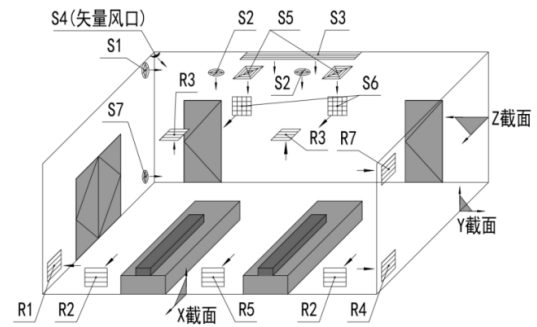


图 1 风口布置形式

Fig.1 Collocation type of air conditioning outlets

表 1 风口组合形式及研究结果

Table 1 Tyre combination forms and research results

编号	组合模式	编号	组合模式	最优模式	参考文献
1	S1 (上侧送) R1 (下侧排)	2	S2 (顶送) R1 (下侧排)	1	[2]
3	S2 (顶送) R2 (下侧排)	4	S2 (顶送) R3 (顶排)		
1	S1 (上侧送) R1 (下侧排)	5	S2 (顶送) R4 (下侧排)	5	[3]
3	S2 (顶送) R2 (下侧排)	6	S2 (顶送) R5 (下侧排)		
7	S1 (上侧送) R4 (下侧排)	8	S1 (上侧送) R2 (下侧排)	10	[4]
9	S2 (顶送) R4 (下侧排)	10	S4 (上侧送) R4 (下侧排)		
11	S5 (顶送) R2 (下侧排)	12	S3 (顶送) R2 (下侧排)	13	[5]
13	S3 (配导流板) R2 (下侧排)	1	S1 (上侧送) R1 (下侧排)		
7	S1 (上侧送) R4 (下侧排)	14	S7 (下侧送) R7 (上侧排)	14	[6]
14	S7 (下侧送) R7 (上侧排)	15	S5 (顶送) R2 (下侧排)		
11	S5 (顶送) R2 (下侧排)	15	S6 (侧送) R2 (下侧排)	15	[1]

注: 表中填充部分为文献结论中的最优方案。

### 1.2 研究结果对比分析

表 1 中各种送、排风组合方式共计 15 种 (组合方式相同的不再重复统计), 由表 1 可知, 不同文献研究结论的差异性较大。作者希望在气流组织模拟之前, 对上述 15 种组合方式进行初步归纳整理及对比分析, 以减少模型数量, 初步分析结果如

下。

(1) 下侧送, 上侧排 (编号 14) 模式、顶送、顶排 (编号 4) 气流组织形式。虽然有模拟结果认为编号 14 的组合模式具有优良表现, 但是污染源位于房间下部, 污染物会随气溶胶沉积, 下侧送风模式极易造成污染物随送风扩散至整个房间, 对应

的上侧排风，更加剧了污染物的传播。编号 4 的组合模式，容易造成送、排风短路从而降低排风效率。这两种模式与《传染病医院建筑设计规范》<sup>[7]</sup>要求相矛盾，实际工程中不建议采用。

(2) 顶送，下侧排（编号 2、3、5、6、9、11、12）气流组织形式。编号 2、3、5、6、9、11、12 的区别之一是送风口形式不同，图 2 中顶送风的风口共有散流器、圆形单层可调百叶和条缝风口三种形式，研究结果普遍认为散流器的构造形式会导致送风形成贴壁气流从而不能有效保护医护人员，且会引起空气卷吸形成二次污染；区别之二是排风口设置位置及数量，排风口附近风速衰减很快，因此当排风口风速确定后，其数量对室内气流组织影响有限，但其设置位置对气流流线及是否形成涡流有一定的影响，从而进一步影响气流组织效果。

(3) 上部侧送风，下部侧排风（编号 1、7、8、10）气流组织形式。编号 1、7、8、10 的区别是排风口的设置有异侧和同侧两种方式。由表 2 可知，有研究表明同侧上部送风，下部排风具有良好的气流组织和稀释效果，但也有学者认为其流线过长，缺乏动力，未形成主导气流。

(4) 侧送风、侧排风（编号 13、15）气流组织形式。编号 13、15 的区别是实现方式不同，编号 13 送风口形式仍是顶送，通过附加导流板的形式改变气流方向以达到 15 相同的效果。从已有研究表明，侧送、侧排的通风的形式，从理论上的确能够缩短送风与排风之间气流流线，但实际情况是医护人员巡视或者工作时大多位于床尾位置且背对送风口，医护人员的位置极易造成送风气流被遮挡后形成紊乱气流。

## 2 气流组织模型建立及边界条件确定

在上文分析的基础上，共筛选出编号 1、2、3、7、8、12、15 共计 7 种模型组合，同时在编号 3 对应气流组织基础上，衍生出顶送（送风角度可调）、下侧排风（编号 3'）共 8 种风口组合模式，通过数值模拟研究，以期通过数值模拟研究，结合实际情况，得出实际应用时的最好送、排风方式组合。

### 2.1 物理模型

负压隔离病房的气流组织模型基于统一的房

间尺寸及换气次数，即送、排风口风速确定的前提下，通过不同的送、排风口位置及风口形式的变化，找到最优的气流组织形式，以实现防护通风的最终目的。

#### (1) 负压隔离病房物理模型

负压隔离病房的房间模型如图 2 所示，病房为双人间，房间尺寸为 2.8m×5.8m×2.8m（h）。各区域的压力梯度以《医院负压隔离病房环境控制要求》为准<sup>[8]</sup>。

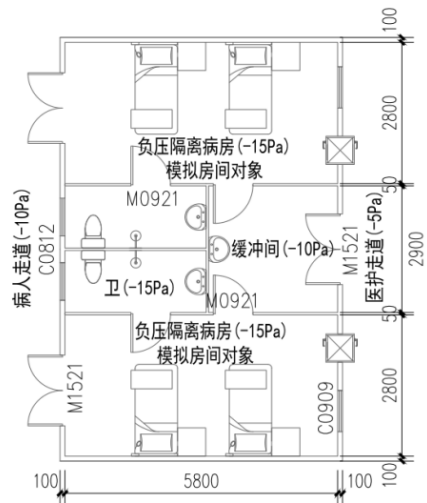


图 2 负压隔离病房模型

Fig.2 Negative pressure ward model

#### (2) 负压隔离病房风量计算及风口尺寸的确定

房间风量平衡计算公式：全面排风量+局部排风量+∑渗出风量=送风量+∑渗入风量

渗透风量计算公式：

$$Q_{漏} = 3600 \times 0.827 \times 1.25 A \sqrt{\Delta P} \quad (\text{压差法}) \quad [9]$$

(1)

式中， $Q$  为渗透风量， $m^3/h$ ； $A$  为门窗或缝隙面积， $m^2$ ； $\Delta P$  为室内外压力梯度， $Pa$ 。

经计算可得负压隔离病房的渗透风量如表 2 所示。根据《传染病医院建筑设计规范》要求，负压隔离病房送风量按 12 次/h 换气次数计算，则：

$$\text{房间送风量} = \text{房间体积} \times \text{换气次数} = 3 \times 6 \times 2.8 \times 12 = 604 \quad (m^3/h)$$

$$\text{房间排风量} = \text{送风量} + \sum \text{渗入风量} - (\text{局部排风量} + \sum \text{渗出风量}) = 604 + 701 - 0 - 193 = 1112 \quad (m^3/h)$$

表 2 负压隔离病房渗透风量计算

Table 2 Calculation of infiltration air volume in negative pressure ward

门窗位置	门窗缝隙面积 m <sup>2</sup>	与相邻房间压差 Pa	渗入计算风量 m <sup>3</sup> /h	渗出计算风量 m <sup>3</sup> /h
与缓冲间之间门	0.0232	-5	193	—
与医护走道普通窗	0.0144	-10	169	—
与医护走道传递窗	0.0048	-10	40	—
与病人走道门	0.036	-5	299	—
与卫生间门	0.0232	5	—	193
累加风量	—	—	701	193

根据送、排风量计算结果, 可得送排风口形式、数量、风口尺寸及风速等边界条件, 如表 3 所示。

表 3 负压隔离病房风口参数及入口风速

Table 3 Tuiere parameters and velocity boundary conditions in negative pressure ward

编号	风口形式	规格 (mm)	风量 (m <sup>3</sup> /h)	风速 (m/s)	数量 (个)
1	单层百叶排风口 (自带高效过滤)	600×500	1112	1.0	1
2	单层百叶排风口 (自带高效过滤)	400×400	1112	1.0	2
3	圆形单层可调百叶风口 (侧送)	Φ280	604	2.68	1
4	圆形单层可调百叶风口 (顶送)	Φ200	604	2.62	2
5	单层可调百叶风口 (顶送)	800×100	604	2.62	1
6	方形单层可调百叶风口 (侧送)	200×200	604	2.62	2

注: 风速计算原则: (1) 风口有效面积系数取 0.8; (2) 排风口根据规范要求于风口处设高效过滤器, 面风速控制 1m/s 左右; 为了对比送风效果, 送风风速统一控制在 2.6m/s 左右。

### 2.2 数学模型及边界条件

本文利用 Airpak 软件进行模拟研究, 采用标准  $\kappa-\epsilon$  模型进行模拟计算<sup>[10]</sup>, 并使用增强壁面函数处理近壁面的流动情况。计算域内的稳态流动状况可以用如下控制方程进行描述:

$$\text{div}(\rho\mu\varphi - \Gamma_\varphi \text{grad}\varphi) = S_\varphi \quad (2)$$

式中:  $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $u$  为速度矢量;  $\varphi$  为因变量, 表示速度矢量分量、温度等流体参数;  $\Gamma_\varphi$  为对应  $\varphi$  的扩散系数;  $S_\varphi$  为源项。

送风口为入口边界, 采用速度入口边界条件、送风温度为 25℃; 排风口为压力出口, 出口压力为 0; 房间内壁面为绝热边界; 给定人体固定发热量, 为 70W/人。文中采用二氧化碳作为模拟污染物的示踪气体, 每位患者产生的 CO<sub>2</sub> 质量流量为 3.5×10<sup>-5</sup>kg/s, 人体呼气口尺寸为 0.01m×0.01m。

为验证网格无关性, 选择送回风方式 1 进行试

算。在人体表面、送回风口位置采用不同的网格尺寸进行加密, 得到了网格单元数分别为 3.2 万、21.9 万、55.9 万的三组的网格, 图 3 所示为送风口网格加密示意图。

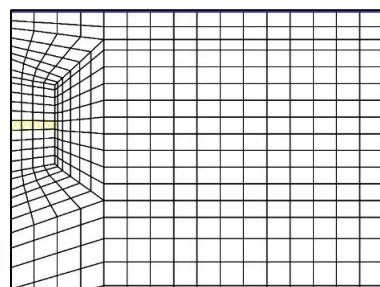


图 3 送风口网格加密示意图

Fig.3 Schematic diagram for grid densification of air supply outlet

通过模拟计算得到不同网格单元数下 Z=1.5m 截面污染气体平均质量分数分别为 0.304%、0.516%、0.562%。可以看到当网格单元数达到 21.9

万时计算结果已经趋于稳定。因此在保证计算准确性的前提下，选择该网格进行后续的计算。

### 3 模拟结果与分析

数值模拟的展现形式有很多种，本文从气流动

迹、换气效率、污染物质量分布、污染物浓度四个方面对不同数值模拟结果进行对比分析。

#### 3.1 气流流动轨迹对比分析

本文共对 8 种方案进行了数值模拟，8 种模型的流动轨迹数值模拟结果如图 4 所示。

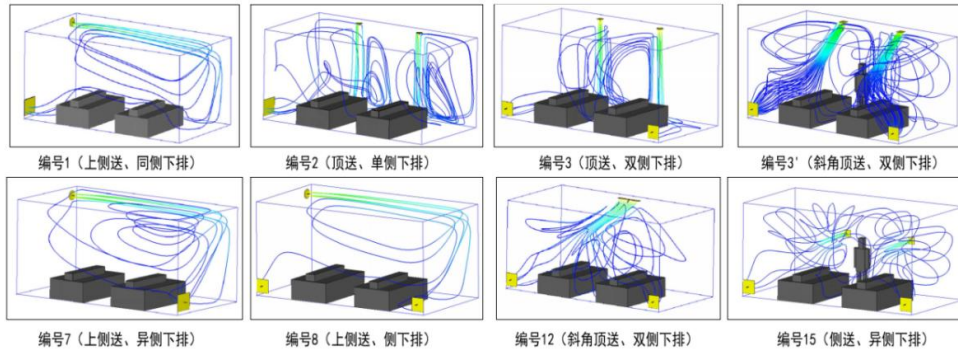


图 4 不同方案的气流流动轨迹

Fig.4 Air flow trajectory under different schemes

从图中可以得出以下结论：

(1) 编号 1、7、8 的气流在房间的循环最为充分，但极易形成涡流，且流线过长，缺乏动力，未形成主导气流，与前面分析结论相同；且气流流经卫生间、缓冲间门，病房与医护走道之间窗户（见图 1、2），由于门内外压差的原因，这种气流流型极易受缝隙渗透风的扰动影响。三者相比而言，编号 1 气流方式，污染物更容易被带走。

(2) 编号 2、3、12、15 的气流流线相对较短，能够形成主导气流，但在患者床尾位置易形成涡流，造成二次污染；编号 2、3 对比可知，分别于床头设置两个排风口比一个排风口更有利于污染物排除；编号 3、12 对比可知，采用带角度的百叶风口，污染物更容易被排风口带走。

(3) 编号 3' 的气流流线相对较短，能够形成主导气流，且风口角度的设置，有利于新鲜空气送入医护人员头部，经患者呼吸区排至排风口，气流流型相对较好。

#### 3.2 换气效率对比分析

基于负压隔离病房建立的数值模型，采用示踪气体法得到的房间空气龄，继而利用公式 (3) 可得房间换气效率，房间空气龄及换气效率结果如表 4 所示。

$$\varepsilon = \tau_n / \tau_{exc} = \tau_n / 2\bar{\tau} \quad (3)$$

式中， $\varepsilon$  为换气效率，%； $\tau_n$  为理论最短换气时间，s； $\tau_{exc}$  为实际换气时间，s； $\bar{\tau}$  为室内平均空气龄，s。

表 4 室内平均空气龄及换气效率

Table 4 Average indoor air age and ventilation efficiency

送排风形式	1	2	3	3'	7	8	12	15
平均空气龄 (s)	277.3	260.7	254.1	247.3	289.7	267.1	255.2	270.9
换气效率 (%)	52.4	55.7	57.1	58.7	50.1	54.4	56.9	53.6

由表 4 各送排风组合方式相比较而知，相对于其他气流组织形式，顶送（送风角度可调）、下侧排风（编号 3'）的送排风风口组合方式有更为理想的表现，因此负压隔离病房采用 3' 的方式，对于提高通风效率，降低污染物传播更为有利。

#### 3.3 污染物质量分布对比分析

为了更加准确的对比分析 8 种气流组织方案，本文选取 X、Y 两个典型截面（位置详见图 2），模拟了 8 种气流组织方案的质量分布云图，模拟结果如图 5、6 所示。

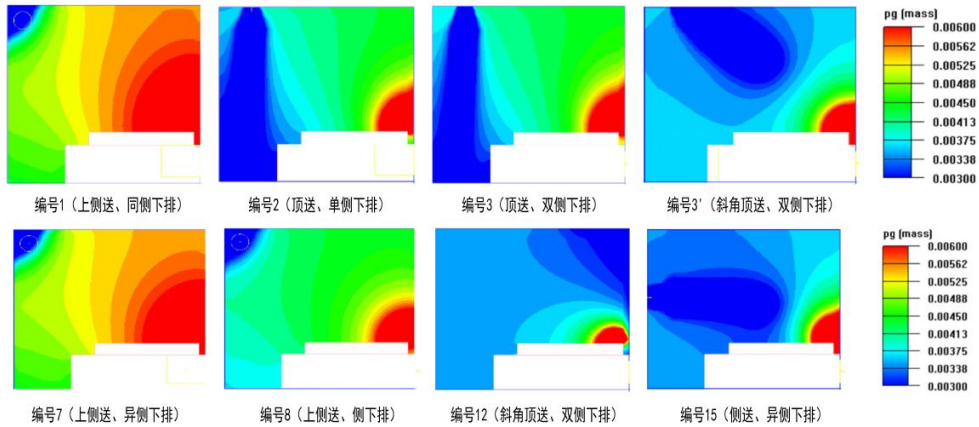


图 5 不同方案 X 截面污染物质量分布

Fig.5 Mass distribution of pollutants in X-section of different schemes

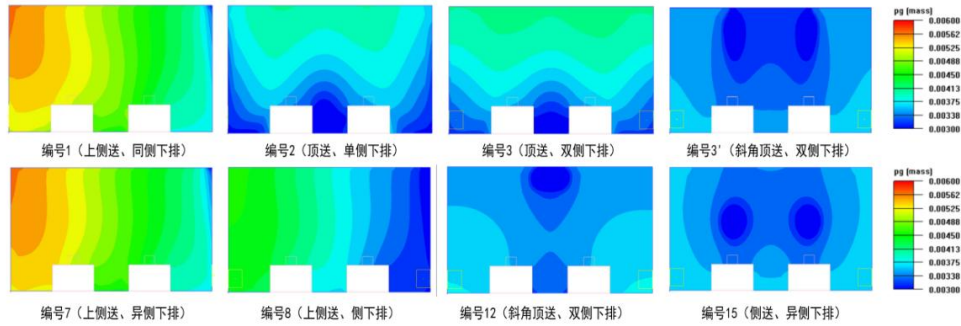


图 6 不同方案 Y 截面污染物质量分布

Fig.6 Mass distribution of pollutants in Y section of different schemes

由图 5 和图 6 可以直观地看出,相对于其他方案,编号 3' 以及编号 15 的对应的两种风口布置模式,医生站位污染物浓度相对较低,患者位置相对浓度较高,污染气体可以随气流有效扩散至排风口位置。

### 3.4 污染物浓度对比分析



图 7 不同方案 Z 截面污染物平均质量分数

Fig.7 Average mass fraction of pollutants in Z-section of different schemes

本文选取 1.5m 高度的 Z 截面(位置详见图 2, 高度 1.5m 为医生呼吸区)作为考察对象,对应 8 种气流组织方案的平均污染物质量分数柱状图如图 7 所示。

典型截面的污染物浓度对比分析(见图 7)与污染物质量分布对比分析(见图 5、6)结论类似,相对于其他方案,编号 3' 以及编号 15 的对应的两种风口布置模式,医生活动区污染物浓度相对较低,对于保护医护人员生命安全更有利。

## 4 结论

本文在大量专家学者对负压隔离病房进行气流组织的模拟或实验研究的基础上,结合实际,选取 8 种典型气流组织模型进行模拟研究。通过气流流动轨迹对比分析、污染物质量分布对比分析、污染物浓度对比分析三种形式,最终得出在送、排风风量和风速等参数保持一致的前提下,采用可调节角度的百叶风口顶送,侧下排风口(下转第 114 页)