

文章编号: 1671-6612 (2022) 04-592-06

疫情防控常态化背景下诊室内气流组织研究

王智华 毕海权 王宏林 李孟柯

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 诊室作为医护人员长期停留的空间, 如若没有采用有效的空调通风方案, 将存在较大的交叉感染风险。借助数值模拟获得了诊室在不同的空调通风方案下房间内的速度场、温度场、压力场、污染物浓度场, 通过对比分析, 以满足污染物排放为主要指标, 满足舒适性要求为次要指标对方案的有效性进行了评判, 并提出了有效的优化方案。研究表明诊室采用多联机和分体空调方案均能满足舒适性需求, 但由于诊室内部空间较小故而采用多联机方案时室内气流较为紊乱, 因此多联机方案的污染物控制效果差于分体空调方案。此外, 研究发现将排风口放置于污染源附近能提升空调通风系统污染物排放效果, 借助此方法分体空调方案下诊室内污染物浓度从 0.012 % 减小为 0.005%。

【关键词】 防疫; 诊室; 空调通风方案; 气流组织; 数值模拟
中图分类号 TU24 文献标识码 A

Study on Indoor Air Distribution of Consultation Room under the Background of Epidemic Prevention

Wang Zhihua Bi Haiquan Wang Honglin Li Mengke

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The consultation room is a place where medical staff stay for a long time, if there are no effective air conditioning and ventilation schemes adopted, there will be a great risk of cross-infection. In this paper, based on numerical simulation, the velocity field, temperature field, pressure field, and pollutant concentration field in the emergency hospital consulting room under different air conditioning and ventilation schemes are obtained. Through comparative analysis, taking meeting the pollutant emission as the main index and meeting the comfort requirements as the secondary index, the effectiveness of the schemes is evaluated, and effective optimization scheme is put forward. The research shows that the multi-split air-conditioner and split type air-conditioner schemes used in the consultation room can meet the comfort requirements. However, due to the small internal space of the consultation room, the air distribution is more disordered and the pollutant control effect is poor when the multi-split air-conditioner scheme is adopted. In addition, it is found that setting the exhaust outlet near the pollution source can effectively improve the pollutant emission efficiency of the air conditioning and ventilation system, in this way, the indoor pollutant concentration is reduced from 0.012 % to 0.005 % when the split type air-conditioner scheme is adopted.

【Keywords】 Epidemic prevention; Consultation room; Air conditioning and ventilation scheme; Air distribution; numerical simulation

作者简介: 王智华 (1996.05-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: winliverah@163.com

通讯作者: 毕海权 (1974.12-), 男, 博士, 教授, E-mail: bhquan@163.com

收稿日期: 2022-03-08

0 引言

2020年新冠疫情的袭来使全世界经济文化发

展遭遇了重大损失。国家卫健委在试行第七版的诊疗方案指出: 经呼吸道飞沫和密切接触传播是新冠

病毒的主要传播途径,且在相对封闭的环境中长时间暴露于高浓度气溶胶情况下存在经气溶胶传播的可能^[1]。在疫情防控常态化的当今,诊室作为抗疫主战场,在做好人员救治的同时也要防范交叉感染的风险。室内气流组织对污染物能否有效排放有着较大影响^[2],因此诊室的空调通风方案需要专门进行设计。

现有针对室内环境的研究方法主要分为实验和数值模拟两种,并且均多以示踪气体为研究对象来研究污染物的传播。Rydock^[3]和凌继红等^[4]以六氟化硫为示踪气体,实验研究了气流组织对病房排污效率的影响。李勇^[5]使用二氧化碳气体作为示踪气体,以数值模拟的方法对 ICU 病房空调通风系统方案进行了研究。此外,嵇赟喆等^[6]结合数值模拟和实验验证的方法,检验了在负压病房中使用二氧化碳气体替代呼吸道疾病病人带菌飞沫来研究污染物传播及分布的可行性与可靠性。因此,本文以二氧化碳气体为示踪气体,研究不同空调通风方案下诊室内污染物的传播及分布。

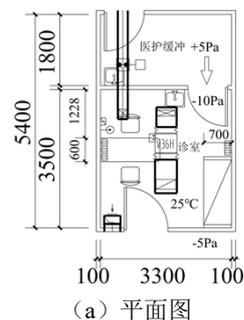
1 数值计算方法

本文采用 ANSYS-FLUENT 研究诊室在不同空调通风方案下的速度场、温度场、压力场以及污染物浓度场,以选择合适的空调通风方案并对已有方案进行优化。房间内的空气流动为三维稳态湍流粘性流动,满足质量守恒、动量守恒及能量守恒定律^[7]。为防止诊室内污染物由门缝扩散至外界,诊室内为负压环境,因此在数值模拟中需要考虑气体压缩性,将诊室内空气设置为理想气体。同时,由于污染物的扩散过程产生了组分运输,因此需要应用组分运输模型。此外,因 RNG $k-\varepsilon$ 模型较标准的 $k-\varepsilon$ 模型在室内空调通风模拟中有着更高的准确度^[8],本文数值模拟中采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。

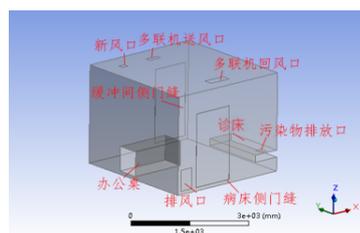
2 数值模型及边界条件

本文研究对象为多联机方案和分体空调方案两种,其中多联机方案采用多联机和新风机组联合送风的方式来进行室内环境控制,分体空调方案采用分体空调和新风机组联合送风的方式来进行室内环境控制。多联机方案和分体空调方案的系统平

面图和三维模型图分别如图 1 和图 2 所示。诊室内设计压力为 -10Pa ,设计温度为 25°C ,两方案下除送风口和回风口风速不同外其余边界条件一致,各边界具体参数如表 1 所示。



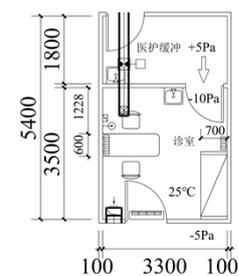
(a) 平面图



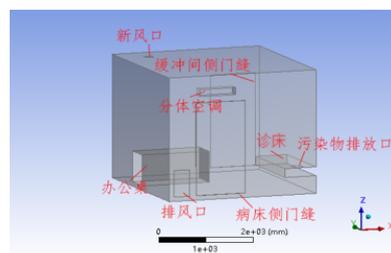
(b) 三维模型图

图1 多联机方案的系统平面图和三维模型图

Fig.1 Layout plan and three-dimensional model of multi-split air-conditioner scheme



(a) 平面图



(b) 三维模型图

图2 分体空调方案的系统平面图和三维模型图

Fig.2 Layout plan and three-dimensional model of split type air-conditioner scheme

表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

| 风口种类 | 边界条件 | 具体参数 |
|-----------|------|---|
| 送风口 | 速度入口 | 多联机方案 风速: 2.94m/s 分体空调方案 风速: 1.128m/s 送风温度: 22.4℃ |
| 新风口 | 速度入口 | 风速: 2.287m/s; 送风温度: 20.78℃ |
| 回风口 | 速度入口 | 多联机方案 风速: -1m/s 分体空调方案 风速: -0.903m/s |
| 排风口 | 速度入口 | 风速: -0.93386 m/s |
| 诊室与医护缓冲门缝 | 压力入口 | 压力: -5Pa; 温度: 26℃ |
| 诊室与走道门缝 | 压力入口 | 压力: -5Pa; 温度: 26℃ |
| 污染物排放口 | 质量入口 | 质量流量: 3.5×10^{-5} kg/s |

房间总散热量: 575W

3 结果与讨论

为判断各方案下诊室内气流组织优劣, 截取 1.6m 高度 (呼吸区域高) 处房间内的速度分布、温度分布、压力分布和污染物浓度分布进行对比分析。此外, 为了更全面地判断各方案下房间内污染物的分布情况, 截取两方案下诊床床头和办公桌附近 (0.75m 高度) 污染物浓度分布进行对比分析。室内热舒适性评级参照 GB 50736-2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》进行, 具体评判标准如表 2 所示^[9]。

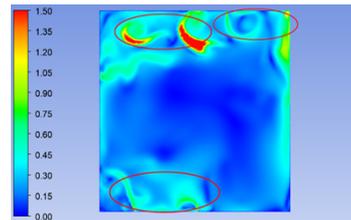
表 2 热舒适度等级评判标准

Table 2 Evaluation standard of thermal comfort level

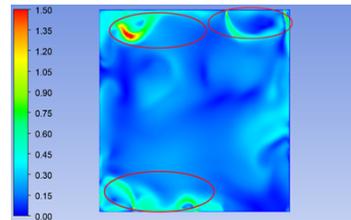
| 热舒适度等级 | 温度 (℃) | 风速 (m/s) |
|--------|--------|----------|
| I 级 | 24~26 | ≤0.25 |
| II 级 | 26~28 | ≤0.30 |

3.1 速度场

两方案下 1.6m 高度截面速度分布如图 3 所示, 可以观察到在多联机方案下室内产生了更大范围的高风速区。多联机方案下此截面内的平均风速为 0.26m/s, 满足热舒适风速 II 级要求; 分体空调方案下此截面的平均风速为 0.22m/s, 满足热舒适风速 I 级要求。此外, 还可观察到, 两方案下在房间的门缝附近与送风口正下方均存在较大范围的局部高流速区, 局部高流速区的风速主要在 0.6m/s~1m/s 之间。这主要是受送风风速以及门缝渗透风的影响。由以上分析可知, 在速度场方面, 分体空调方案优于多联机方案。



(a) 多联机方案

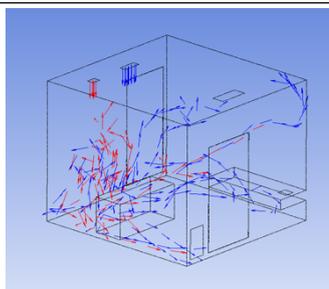


(b) 分体空调方案

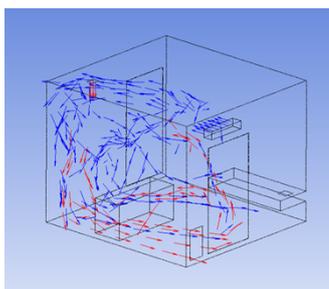
图 3 速度云图 (m/s)

Fig.3 Velocity contours(m/s)

为对两方案下诊室内流场进行进一步分析, 绘制两工况下多联机 (分体空调) 送风口及新风口流出气流的流线于图 4 中。由图 4 (a) 可知, 多联机垂直向下送风且有较高的速度, 因此气流撞击地面时将产生较大的反向速度, 并且以较高的速度向四周散开, 这使得室内形成了以多联机送风为主导的较为紊乱的流场。由图 4 (b) 可知, 分体空调水平送风风速较小, 因此气流向下流动过程中易受新风引导, 从而在室内形成了以新风送风为主导的较为稳定的流场。



(a) 多联机方案



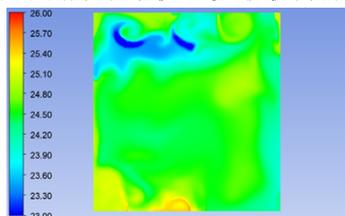
(b) 分体空调方案

图 4 流线图

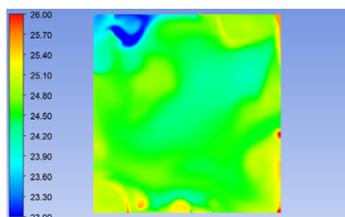
Fig.4 Streamlines

3.2 温度场

两方案下 1.6m 高度截面温度分布如图 5 所示, 由图中可知, 两方案下诊室内温度分布都较为均匀, 但多联机方案下诊室内低温区范围更大, 这是多联机的竖直高速送风导致的。多联机方案下室内平均温度为 24.5℃, 分体空调方案下室内平均温度为 24.6℃, 两方案下室内温度值均与设计值相近且均满足 I 级热舒适要求。由以上分析可知, 在温度场方面, 分体空调方案略优于多联机方案。



(a) 多联机方案



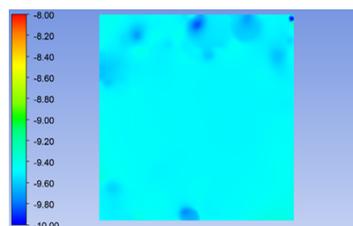
(b) 分体空调方案

图 5 温度云图 (°C)

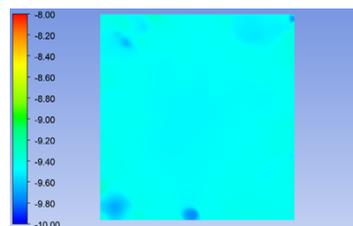
Fig.5 Temperature contours (°C)

3.3 压力场

两方案下 1.6m 高度截面压力分布如图 6 所示。从图中可以看出, 两方案下诊室内压力大部分维持在 -9.4Pa 左右, 与设计值 -10Pa 基本一致。同时还可以看到, 压力变化的位置与送回风口、排风口以及门缝位置相吻合, 说明当流场内部风速出现较大变化时, 该区域的压力也会产生相应变化。结合图 3 和图 5 分析可知, 由于多联机方案下室内流场较为紊乱, 因此多联机方案下压力分布更为不均匀。由以上分析可知, 在压力场方面, 分体空调方案略优于多联机方案。



(a) 多联机方案



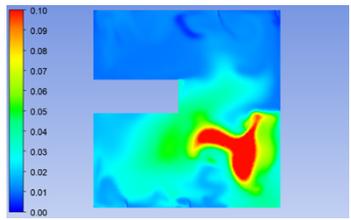
(b) 分体空调方案

图 6 压力云图 (Pa)

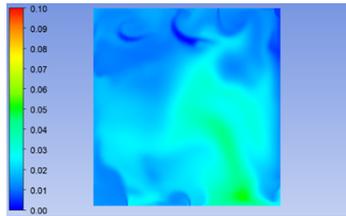
Fig.6 Pressure contours(Pa)

3.4 污染物浓度场

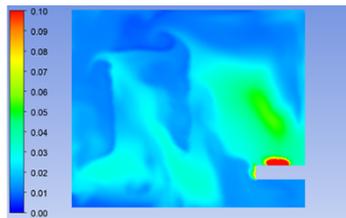
两方案下诊室内污染物浓度分布如图 7 所示, 由图可知: 多联机方案下诊室内污染物扩散范围较广, 高污染物浓度区覆盖诊床和办公桌病人侧大部分区域, 且办公桌医生侧也存在较高的污染物浓度。分体空调方案下诊室内污染物扩散范围较小, 高污染物浓度区主要为诊床附近区域。多联机方案下诊室内污染物浓度为 0.021%, 分体空调方案下诊室内污染物浓度为 0.012%。结合图 4 和图 7 分析可知, 多联机竖直向下高速送风使得诊室内气流较为紊乱, 撞击到地面向四周散开的气流在经过高污染物浓度区域时增强了污染物的扩散, 从而使得多联机工况下诊室内污染物浓度较高且扩散范围更广。由以上分析可知, 分体空调方案污染物控制效果优于多联机方案。



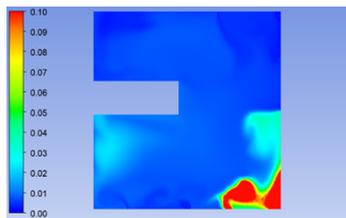
(a) 多联机方案 0.75m 高度截面



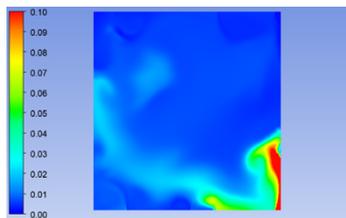
(b) 多联机方案 1.6m 高度截面



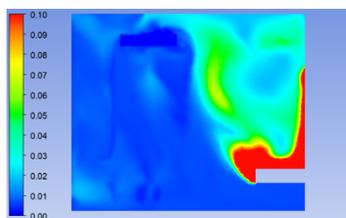
(c) 多联机方案床头竖向截面



(d) 分体空调方案 0.75 m 高度截面



(e) 分体空调方案 1.6m 高度截面



(f) 分体空调方案床头竖向截面

图 7 污染物浓度云图 (%)

Fig.7 Pollutant concentration contours(%)

3.5 优化方案

虽然多联机和分体空调方案下诊室内均满足舒适性要求,但是两方案下诊室内污染物控制效果均不理想,因此,针对污染物控制效果较好的分体空调方案进行优化。由图 7 可知病床附近污染物浓度较高,故而将排风口设置于病床附近进行分体空调方案的优化。

图 8 为分体空调优化方案下诊室内流线图。结合图 4 对比可知,优化方案下气流受排风口引导流经病床附近而后通过排风口排出。

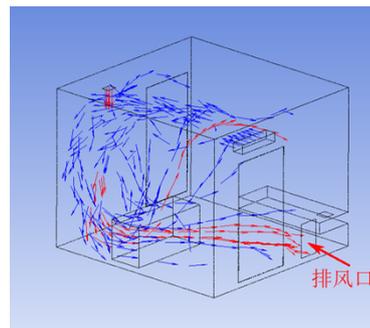
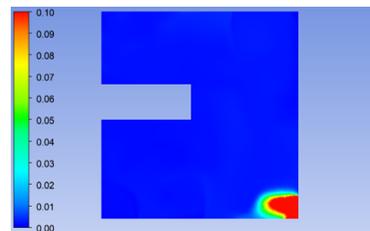


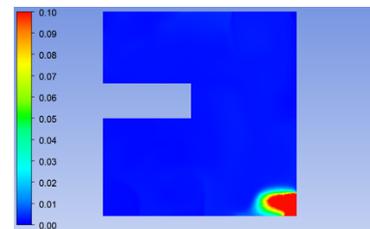
图 8 分体空调优化方案下的流线图

Fig.8 Streamlines of optimized split type air-conditioner scheme

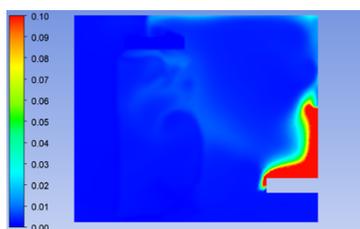
分体空调优化方案下诊室内污染物浓度分布如图 9 所示。优化方案下诊室内污染物浓度为 0.005%。对比图 9 和图 7 可知,优化方案下诊室内污染物的扩散范围与浓度都得到了显著的改善。结合图 8 分析可知,排风口设置于病床附近可引导气流流经高污染物浓度区域并及时排出从而增强了空调通风系统的污染物排放能力。



(a) 0.75m 高度截面



(b) 1.6m 高度截面



(c) 床头截面

图 9 分体空调优化方案下的污染物浓度云图 (%)

Fig.9 Pollutant concentration contours of optimized split type air-conditioner scheme(%)

4 结论

本文采用数值计算研究了不同空调通风方案下诊室内气流组织, 主要研究结论如下:

(1) 在速度场和污染物浓度场方面分体空调方案显著优于多联机方案, 在温度场和压力场方面分体空调方案略优于多联机方案, 因此诊室应选择分体空调方案。

(2) 诊室内部空间较小, 多联机方案下室内气流较紊乱, 污染物的扩散被增强且污染物不易被排出, 因此相较于分体空调方案, 在多联机方案下诊室内污染物的扩散范围更广并且浓度更高。

(3) 将排风口设置在诊床附近可有效提升空调通风方案污染物控制效果, 采用此方法分体空调方案下污染物浓度从 0.012%减小为 0.005%。

参考文献:

- [1] 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第七版)[J]. 中国医药,2020,15(6):801-805.
- [2] 刘华斌,王羽珊,张银安,等. 新型冠状病毒肺炎临时医院负压隔离病房环境控制[J]. 暖通空调,2020,50(6):75-80.
- [3] RYDOCK J P. A simple method for tracer containment testing of hospital isolation rooms[J]. Applied occupational and environmental hygiene, 2002,17(7):486.
- [4] 凌继红,于会洋,李猛,等. 气流组织对负压隔离病房排污效率的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2014,47(2):174-179.
- [5] 李勇.ICU 病房空调通风系统数值模拟[D]. 武汉:华中科技大学,2006.
- [6] 嵇赞喆,王晓杰,李晓静,等. 呼吸道传染性疾病的负压隔离病房带菌飞沫和 CO₂ 分布特性的模拟比较研究[J]. 护理学杂志,2011,26(21):1-5.
- [7] 李人宪.有限体积法基础(第2版)[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [8] 谢勇.基于 CFD 的大空间建筑自然通风优化设计[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [9] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.