

# 车载方舱手术室颗粒物质量浓度分布仿真与参数优化

宇慧平<sup>1</sup>, 蔡安文<sup>1</sup>, 皮本松<sup>1</sup>, 龙连春<sup>1</sup>, 李朝辉<sup>2</sup>

1. 北京工业大学机械工程与应用电子技术学院, 北京 100024

2. 北京新立机械有限责任公司, 北京 100039

**摘要** 为有效降低车载方舱手术室的颗粒物质量浓度, 提高室内空气洁净度, 通过对某车载方舱手术室颗粒物扩散分布规律的仿真分析, 以工作平面颗粒物质量浓度最小为目标, 以工作平面平均风速为约束条件, 建立优化模型, 采用序列响应面法对送风速度和送风角度参数进行了优化求解研究。结果表明, 手术室的回风口在长边壁面对称布置时, 能有效促进室内空气的流动, 有利于颗粒物质量浓度的降低; 在顶部送风、两长边壁面下侧回风的非单向流手术室内, 颗粒物质量浓度主要受气流的影响, 主导颗粒物扩散的方向为下风向时, 主流区的颗粒物质量浓度较小, 医护人员周边及壁面的颗粒物质量浓度较大; 优化后的送风速度和送风角度使手术室的颗粒物质量浓度降低 78.19%, 室内空气质量达到洁净标准。该优化方法可为野外环境下的洁净手术室通风系统设计提供依据。

**关键词** 响应面法; 洁净手术室; 颗粒物质量浓度; 送风速度; 送风角度; 参数优化

在自然灾害、战争及突发公共卫生事件中, 外科医疗应急救治工作非常重要。车载方舱手术室因具有快速移动、快速展开等特点, 能有效降低灾害损失、减小人员伤亡而受到人们的重视。在车载方舱手术室内实施救治的过程中, 手术舱室的空气质量直接影响到伤、病人员伤口的治疗<sup>[1-3]</sup>。因此, 在洁净手术室设计时, 除了考虑相对湿度、室内温度、送风量以及室内气流分布外, 还需考虑空气中

的颗粒物质量浓度<sup>[4]</sup>。目前, 国内外学者建立了通风参数与室内颗粒物质量浓度之间的计算模型。Monik 等<sup>[5]</sup>对高位侧送风、墙壁下侧回风的模型进行了数值模拟, 表明污染物在手术室中扩散与手术室的几何参数相关。美国供热制冷与空调工程师学会采用计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 方法, 研究了 11 种不同通风系统的手术区<sup>[6]</sup>。潘峰等<sup>[7]</sup>采用 CFD 方法对 5 种宽度的手术

收稿日期: 2018-11-10; 修回日期: 2019-08-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11272020)

作者简介: 宇慧平, 副教授, 研究方向为计算力学、多学科数值仿真与优化, 电子信箱: yuhui ping@bjut.edu.cn

引用格式: 宇慧平, 蔡安文, 皮本松, 等. 车载方舱手术室颗粒物质量浓度分布仿真与参数优化[J]. 科技导报, 2019, 37(20): 94-100; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.20.010

室分别在不同送风单元尺寸下进行数值模拟,给出了合理的送风速度。李晓红等<sup>[8-9]</sup>采用了CFD方法对洁净手术室空气流动和颗粒物分布进行模拟,表明应用CFD方法能够有效计算出洁净手术室的相关参数。这些研究均针对洁净手术室给出其通风方式对颗粒物质量浓度的影响,而对于车载方舱这样在野外环境下手术室的相关研究尚未见报道。

响应面方法广泛应用在难于用数学表达目标、约束与设计变量之间函数关系的工业生产设计领域<sup>[10-14]</sup>。蒋水华等<sup>[15]</sup>利用随机响应面方法对边坡的稳定性进行了分析。邬晓敬等<sup>[16]</sup>采用响应面方法针对翼型气动性能波动现象进行了鲁棒优化设计。隋允康等<sup>[17]</sup>采用响应面方法对薄壳结构噪声约束下附加阻尼层的最小成本进行了优化设计。手术室内的空气颗粒物质量浓度与送风速度及送风角度等参数密切相关,但不能直接表达它们之间的函数关系。本文以某车载方舱非单向流手术室为对象,通过对其室内颗粒物扩散分布规律的仿真,以工作平面颗粒物质量浓度最小为目标,以工作平面平均风速为约束条件,采用序列响应面法对其通风参数进行优化求解研究。

## 1 数值分析模型

某户外车载方舱手术室洁净等级为万级,其展开尺寸为 $5.0\text{ m}\times 3.0\text{ m}\times 1.9\text{ m}$ ,空调系统为顶部送风、双侧下回风。送风口尺寸为 $0.3\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ ,集中于手术台上方。回风口为2个,尺寸为 $4.0\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ ,风口下边缘距离地面高度为 $0.1\text{ m}$ 。手术室模型内置手术台,其周边为医护人员。手术台以台面加台柱的几何体表示,手术台的尺寸为 $2.00\text{ m}\times 0.55\text{ m}\times 0.70\text{ m}$ ,医护人员以简化的圆柱体表示,具体模型如图1所示。由于粒径大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒在空气中会自然沉降,故将颗粒物的粒径取为 $5\text{ }\mu\text{m}$ ,颗粒物的初始质量浓度为 $18.75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

数值分析采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型<sup>[18]</sup>,其中送风口为速度入口,送风速度为 $0.6\text{ m/s}$ ,回风口为压力出口。定义手术室的壁面、地面以及手术台、医护人员模型表面为静止无滑移的边界条件,与其接触

的空气没有剪应力和热传导。

对于颗粒物扩散问题,由于大气中颗粒物体积分数小于10%,采用离散相的方法(DPM模型)<sup>[19-21]</sup>能更好地模拟出颗粒物的运动特性,仿真时定义空气为连续相,手术室颗粒物为离散相。由于工作平面颗粒物质量浓度直接影响手术室的洁净程度,风速速度场又会影响颗粒物质量浓度分布,风速过大会引起人的不舒适感,因此对颗粒物质量浓度场及风速速度场进行了仿真分析。分析时假设:(1)室内气体为不可压缩的牛顿流体;(2)室内空气与颗粒物之间的热量和质量传递忽略不计,不考虑辐射换热;(3)颗粒物在室内固体表面(如墙壁、天花板和地板等)不发生二次悬浮;(4)颗粒物沉降的过程中,不考虑颗粒的凝结;(5)忽略颗粒物对室内空气湍流流动的影响。计算颗粒物力平衡时,考虑了重力、浮力、气流阻力、压力梯度力、颗粒旋转升力和Saffmen升力的作用;在连续相中,由于颗粒物还受到湍流涡旋的作用,因此还考虑了Basset力和虚假质量力。模拟中手术室内温度恒定,不考虑热泳力的作用。

针对某户外车载方舱手术室工程设计实例,考虑不利工况下,即初始工况下室内空气中颗粒物质量浓度为 $18.75\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,初始工况为垂直送风,送风速度为 $0.6\text{ m/s}$ ,模拟经过 $100\text{ s}$ 后手术室内气体流动以及颗粒物分布的过程。根据《GB50333-2002医院洁净手术部建筑技术规范》<sup>[21]</sup>,选择手术台上方 $0.3\text{ m}$ 处,也就是 $z=1\text{ m}$ 处为工作平面,研究颗粒物质量浓度场分布,并提取工作平面上距离手术台中点 $0.35\text{ m}$ 处的4个点的风速,用于研究工作平面内的平均风速,此工况为优化前的工况。通过计算,优化前工作平面颗粒物质量浓度场如图2所示。由图2可看出,经过 $100\text{ s}$ 的通风净化,手术室中空气洁净度能够达到万级,而且颗粒物在手术室内的运动主要受气流的影响。在该工况下,工作平面手术区域的平均颗粒物质量浓度为 $2.27\times 10^{-4}\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。主流区域的颗粒物质量浓度较小,医护人员附近区域的颗粒物质量浓度产生波动,受气流的影响,部分区域颗粒物质量浓度出现较大值。手术室的回风口对称布置在两长边壁面下侧时,有利于

颗粒物的扩散排除,但室内角落的颗粒物扩散不明显;手术室短边壁面没有回风口,由工作平面的风速分布(图3)和速度矢量分布(图4)可知,由于涡流的作用,气流在该区域停留时间较长,不利于颗

粒物的扩散。可以通过在短边壁面设置通风口,或者更改通风参数以增加通风量来改善气流循环方式,提高空气净化效果。

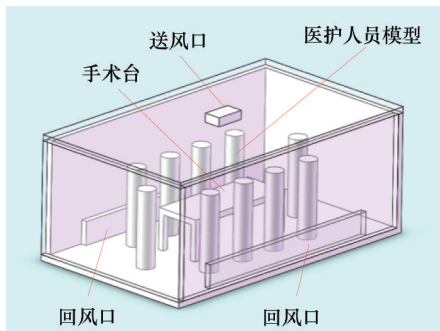


图1 手术室模型简图

Fig. 1 Model of operating room

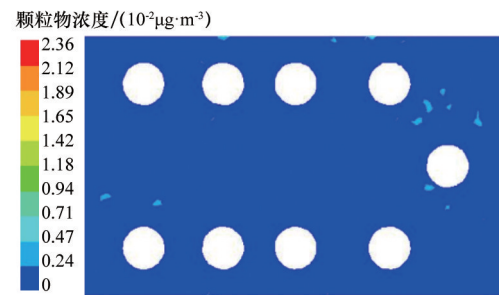


图2 100 s时工作平面颗粒物质量浓度分布图

Fig. 2 Particle concentration field of working plane at 100 s

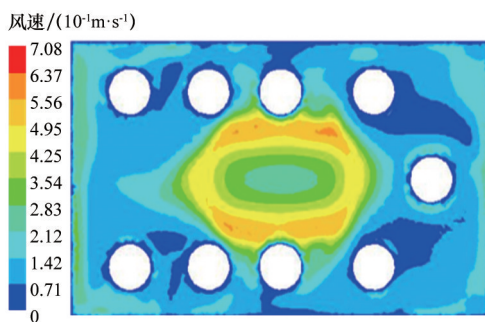


图3 100 s时工作平面上的风速分布

Fig. 3 Velocity distribution on the working plane at 100 s

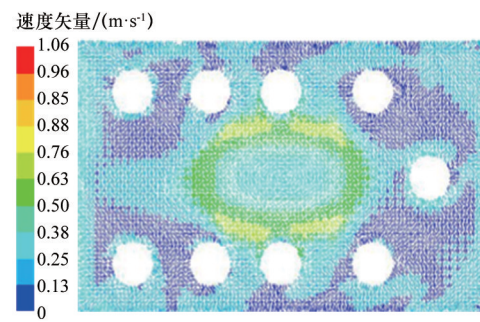


图4 100 s时工作平面上的速度矢量分布

Fig. 4 Velocity vector distribution on working plane at 100 s

## 2 优化模型与算法

### 2.1 优化模型

车载手术洁净室内颗粒物质量浓度的数值分析表明,影响室内空气洁净度主要因素是送风速度及送风角度,送风速度较大时,在一段时间后,室内空气洁净度提高,但与此同时,工作平面上的平均风速也会增大,根据《医院洁净手术部建筑技术规范》<sup>[23]</sup>,工作平面的平均风速应控制在0.25~0.3 m/s的范围内才能满足手术的要求;送风角度的变化影响了工作平面的平均风速,过大的送风角度会在洁净室内形成横向侧风,并增大涡流区的比例,这不利于及时排除空气中的颗粒物。为了保证手术过

程中整个手术室中空气洁净度保持在正常范围内,同时工作平面的平均风速也能够满足手术的要求,以通风100 s后工作平面上的颗粒物质量浓度最小为目标,工作平面的平均风速为约束条件,以送风速度和送风角度为设计变量,建立车载手术洁净室空气净化度以及气流组织优化模型如式(1)所示。

$$\begin{cases} \text{find} & \mathbf{x} = [x_1, x_2]^T \\ \text{make} & f(\mathbf{x}) \rightarrow \min \\ \text{s.t.} & g_1(\mathbf{x}) \leq g(\mathbf{x}) \leq g_2(\mathbf{x}) \\ & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{x}$ 为设计变量(向量); $x_1$ 为送风速度,m/s; $x_2$ 为送风角度,(°); $f(\mathbf{x})$ 为目标函数,手术室工作平面的颗粒物平均质量浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $g(\mathbf{x})$ 为约束函数,工作

平面的平均风速, m/s;  $x_i^L$  和  $x_i^U$  为设计变量上下限, 根据经验进行取值, 本文取值范围为  $0.4 \leq x_1 \leq 0.8$ ,  $0 \leq x_2 \leq 60$ 。

### 2.2 优化算法及结果

上述优化模型中, 优化目标与设计变量之间的关系是隐式的, 需要建立数学模型将其显式化。采用响应面法(RSM)将目标函数及约束条件表示为变量的显式函数, 从而对优化问题进行求解<sup>[7]</sup>。

设计空间中, 设计变量  $\mathbf{x}$  的响应  $\mathbf{y}$  的表达式可近似定义为

$$\tilde{\mathbf{y}}(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^L \beta_l \varphi_l(\mathbf{x}) \quad (2)$$

式中, 基函数  $\varphi_l(\mathbf{x})$  为  $n$  维向量  $\mathbf{x}$  的函数, 当响应  $\mathbf{y}$  的表达式为线性或者二次函数时,  $\varphi_l(\mathbf{x})$  分别取:  $1, x_1, x_2, \dots, x_n$  或  $1, x_1, x_2, \dots, x_n, x_1^2, x_2^2, \dots, x_n^2, x_1x_2, x_1x_3, \dots, x_1x_n, x_2x_3, \dots, x_{n-1}x_n$ ; 选择  $n$  个样本点  $x^{(i)} (i=1, 2, \dots, n)$  分析得到响应向量  $\mathbf{y} = \{y^{(1)}, y^{(2)}, \dots, y^{(n)}\}^T$ ;  $\beta_l$  为  $\varphi_l(\mathbf{x})$  的待定系数。

真实响应与拟合响应的误差平方和为

$$S(\beta) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[ y^{(i)} - \sum_{l=1}^L \beta_l \varphi_l(\mathbf{x}^{(i)}) \right]^2 \quad (3)$$

利用最小二乘法原理误差的平方和最小, 即通过  $S(\beta) \rightarrow \min$  求得乘子  $\beta$ , 即

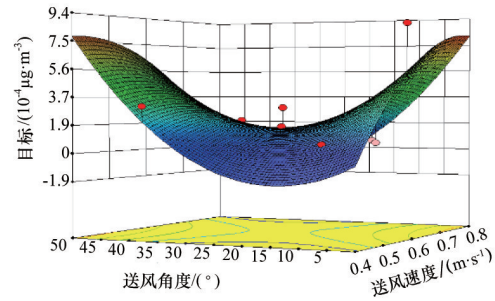
$$\beta = (\mathbf{Z}^T \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^T \mathbf{y} \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{Z}$  为基函数在  $n$  个样本点的取值所组成的矩阵, 即

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \varphi_1(x^{(1)}) & \cdots & \varphi_L(x^{(1)}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1(x^{(n)}) & \cdots & \varphi_L(x^{(n)}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

构造响应面需要选取一定数量的样本数据, 而响应面的拟合精度在很大程度上取决于样本点在设计空间的位置分布, 即通过合理布置样本点的位置, 利用少量样本点而得到较高精度的响应面。在数值分析中采用中心复合设计得到 9 个样本组合, 然后对这些样本组合进行数值模拟, 得到对应的响应值。

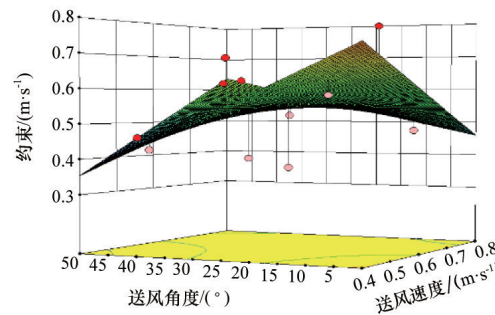
采用二次响应面拟合目标与约束, 对应的目标、约束如图 5 和图 6 所示。



目标: 工作平面的颗粒物质量浓度

图 5 目标函数的响应面

Fig. 5 Response surface of objective function



约束: 工作平面的平均风速

图 6 约束函数的响应面

Fig. 6 Response surface of constraint function

采用序列二次规划进行求解, 得到此时的优化解。对局部优化解分析验证, 若不收敛, 则继续以该优化点为初始点, 采用中心复合设计进行求解, 更新响应面模型, 循环直至收敛。优化流程如图 7 所示。

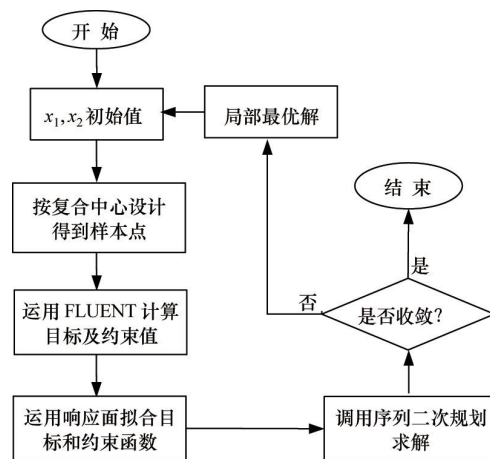


图 7 优化流程

Fig. 7 Flow chart of optimization

经过5次迭代得到最优解 $(x_1, x_2)^T = (0.73, 58.17)^T$ , 目标值(工作平面的颗粒物质量浓度)为 $4.95 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 与设计值 $2.27 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$ 相比, 目标值下降了78.19%。设计变量与目标函数的迭代曲线如图8、图9和图10所示。

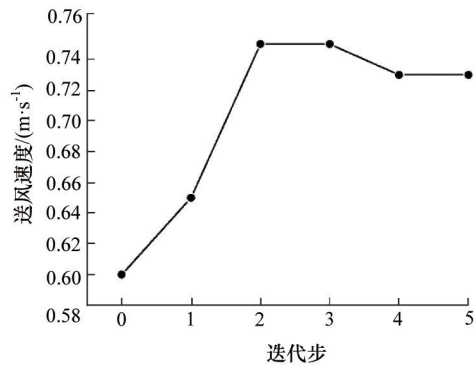


图8 送风速度迭代曲线

Fig. 8 Iteration curve of air supply velocity

优化后工作平面颗粒物质量浓度云图如图11所示, 与优化前工作平面颗粒物质量浓度云图(图2)相比较, 以及优化前后数据相比较(表1), 可以看出, 经过优化工作平面颗粒物质量浓度大幅降低。

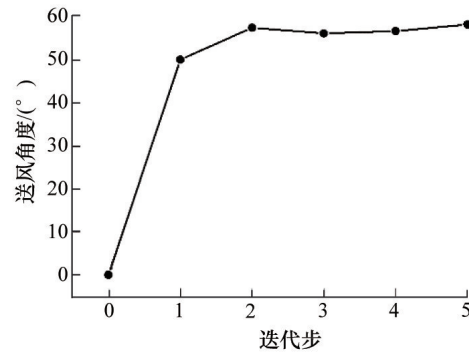


图9 送风角度迭代曲线

Fig. 9 Iteration curve of air supply angle

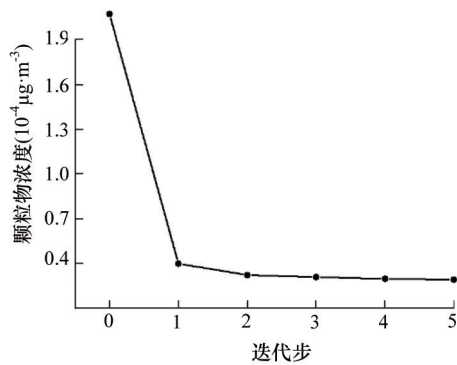


图10 工作平面颗粒物质量浓度迭代曲线

Fig. 10 Iteration curve of objective

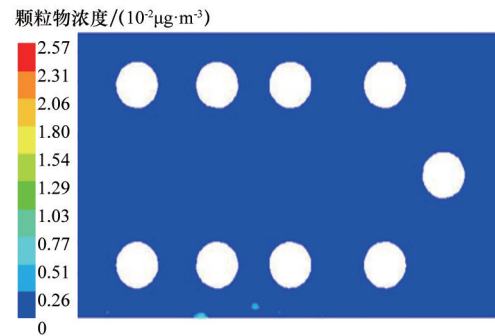


图11 优化后工作平面颗粒物质量浓度云图

Fig. 11 Particle concentration at working plane after optimization

表1 优化前后数据对比

Table 1 Comparison of the results before and after optimization

优化	送风速度 $x_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	送风角度 $x_2/(\text{°})$	工作面颗粒物浓度 $c/(10^{-5} \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	工作面平均风速 $\bar{x}_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
优化之前	0.6	0	22.70	0.19
优化之后	0.73	58.17	5.10	0.27

将优化的通风参数带入方舱手术室模型中进行验证计算, 工作平面颗粒物质量浓度为 $5.10 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 平均风速为0.27 m/s, 与采用响应面拟合近似模型得到的结果吻合较好, 从而验证了本文优化算法的有效性。

### 3 结论

通过数值模拟和响应面优化相结合的方法, 对某车载方舱手术室内气流组织参数进行了优化研究, 得出如下结论:

1) 手术室的回风口对称长边壁面布置时,有利于室内颗粒物的及时排除,但对于角落的颗粒物扩散效果不明显。

2) 在顶部送风、两长边壁面下侧回风的非单向流手术室内,颗粒物质量浓度主要受气流的影响。主导扩散方向为下风向时,主流区颗粒物质量浓度较小,医护人员周边和壁面的颗粒物质量浓度较大。

3) 经过优化,得到理想的通风参数,手术室的颗粒物质量浓度大幅降低,空气洁净度达标。该优化方法可为恶劣环境下的手术室通风参数设置提供依据。

### 参考文献(References)

- [1] 董淑芸, 涂光备, 曹荣光. 手术感染的概况及预防措施[J]. 洁净与空调技术, 2007(1): 35-39.  
Dong Shuyun, Tu Guangbei, Cao Rongguang. General situation and preventive measures of surgical infection[J]. Clean and Air Conditioning Technology, 2007(1): 35-39.
- [2] 朱明杰, 徐文华. 关于洁净手术局部压力控制的讨论[J]. 洁净与空调技术, 2007(1): 22-25.  
Zhu Mingjie, Xu Wenhua. Discussion on the control of local pressure in clean surgery[J]. Clean and Air Conditioning Technology, 2007(1): 22-25.
- [3] Catchpole K, Mishra A, Handa A, et al. Teamwork and error in the operating room: Analysis of skills and roles[J]. Annals of Surgery, 2008, 247(4): 699.
- [4] 邵建敏, 张建飞, 吴学红. 典型I级洁净手术室空调气流组织及细菌浓度分布模拟与优化[J]. 热科学与技术, 2014, 13(4): 347-351.  
Shao Jianmin, Zhang Jianfei, Wu Xuehong. Simulation and optimization of air distribution and bacterial concentration distribution in air conditioning system of typical I grade clean operation room[J]. Thermal Science and Technology, 2014, 13(4): 347-351.
- [5] Woloszyn M, Virgone J, Mélen S. Diagonal air-distribution system for operating rooms: Experiment and modeling[J]. Building and Environment, 2004, 39(10): 1171-1178.
- [6] 美国供热制冷与空调工程师学会. 医院空调设计手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 357-358.  
Institute of American heating refrigeration and air conditioning engineers. The hospital air conditioning design handbook[M]. Beijing: Science Press, 2004: 357-358.
- [7] 潘峰, 宋传学. I级洁净手术室设计送风速度优化选择[J]. 中国医院建筑与装备, 2005, 6(4): 16-19.  
Pan Feng, Song Chuanxue. Design optimization of feeding air velocity in I grade clean operation room[J]. Hospital Building and Equipment in China, 2005, 6(4): 16-19.
- [8] 李晓虹, 苏华, 甘涛. 某医院I级手术室速度场数值模拟与分析[J]. 洁净与空调技术, 2009(3): 20-22.  
Li Xiaohong, Su Hua, Gan Tao. Numerical analysis of velocity field in 1st grade clean operating room[J]. Contamination Control and Air Conditioning Technology, 2009(3): 20-22.
- [9] 李晓虹, 苏华. 某医院手术室室内空调参数CFD分析[J]. 制冷与空调, 2006, 20(4): 29-32.  
Li Xiaohong, Su Hua. CFD simulation of air conditioning parameters in hospital operating room[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2006, 20(4): 29-32.
- [10] 隋允康, 宇慧平. 响应面方法的改进及其对工程优化的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 4-19.  
Sui Yunkang, Yu Huiping. The response surface method and the improvement of engineering optimization application[M]. Beijing: Science Press, 2011: 4-19.
- [11] Mccrory D C, Coeytaux R R, Jr W S Y, et al. Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments[J]. Journal of Statistical Planning & Inference, 1997, 59(3): 284-286.
- [12] Driel W D V, Zhang G Q, Janssen J H J, et al. Response surface modeling for nonlinear packaging stresses[J]. Journal of Electronic Packaging, 2003, 125(4): 121-126.
- [13] Lin P T, Gea H C. Reliability-Based multidisciplinary design optimization using probabilistic gradient-based transformation method[J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 135(2): 021001.
- [14] Kumar S, Dhingra A K, Kumar S. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining for nickel-based superalloy inconel-800 using response surface methodology[J]. Mechanics of Advanced Materials & Modern Processes, 2017, 3(1): 7.
- [15] 蒋水华, 祁小辉, 曹子君, 等. 基于随机响应面法的边坡系统可靠度分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 809-818.  
Jiang Shuihua, Qi Xiaohui, Cao Zijun, et al. Reliability analysis of slope system based on stochastic response surface method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 809-818.
- [16] 邬晓敬, 张伟伟, 肖华, 等. 一种基于响应面的翼型鲁棒优化设计方法[J]. 工程力学, 2015, 32(2): 250-256.  
Wu Xiaowei, Zhang Weiwei, Xiao Hua, et al. A robust optimization design method for airfoil based on response surface[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(2): 250-256.
- [17] 隋允康, 易桂莲, 杜家政. 薄壳结构噪声约束下附加阻

- 尼层的最小成本设计[J]. 应用力学学报, 2011, 28(2): 123-128.
- Sui Yunkang, Yi Guilian, Du Jiazheng. Minimum cost design of shell structure with additional damping under noise constraint[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics. 2011, 28(2): 123-128.
- [18] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 120-124.
- Wang Fujun. Analysis of hydrokinetics: Theory and application of software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 120-124.
- [19] Wu C L, Nandakumar K, Berrouk A S, et al. Enforcing mass conservation in DPM-CFD models of dense particulate flows[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 174(1): 475-481.
- [20] Li L C. CFD-DPM modeling of gas-liquid flow in a stirred vessel[J]. Advanced Materials Research, 2012, 550-553, 979-983.
- [21] 李静雅, 徐力生, 徐蒙. 基于CFD-DPM耦合法新型差压密度计中水泥浆液流动特性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1308-1315.
- Li Jinya, Xu Lisheng, Xu Meng. Flow characteristic analysis of grout in new type differential pressure densimeter based on CFD-DPM coupling method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1308-1315.
- [22] Lu L, Xu J, Ge W, et al. Computer virtual experiment on fluidized beds using a coarse-grained discrete particle method EMMS-DPM[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 155(11): 314-337.
- [23] 中华人民共和国卫生部. 医院洁净手术部建筑技术规范: GB50333-2002[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- Ministry of Health of China. Technical specification for construction of hospital clean operating department: GB50333-2002[S]. Beijing: China Planning Publishing House, 2002.

## The simulation of particle mass concentration distribution in the vehicle operation room and the parameter optimization

YU Huiping<sup>1</sup>, CAI Anwen<sup>1</sup>, PI Bensong<sup>1</sup>, LONG Lianchun<sup>1</sup>, LI Zhaohui<sup>2</sup>

1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100024, China
2. Beijing Xinli Machinery Co., Ltd., Beijing 100039, China

**Abstract** In order to effectively reduce the mass concentration of the particles and improve the air cleanliness level in the operating clean room in the expandable shelter vehicle, the diffusion particles in a non-unidirectional flow clean operating room are analyzed. The minimum mass concentration of the particles in the working plane is set as the goal, and the optimization model is established with the average wind speed of the working plane, as the constraint condition. The sequential response surface method is used to optimize the velocity and the angle of supplying the air. It is shown that when the outlet of the operating room is arranged symmetrically on the long side wall, the flow of the indoor air could be well activated to reduce the mass concentration of the particle. In the non-unidirectional flow operating room, the mass concentration of the particles is mainly affected by the flow of the air. When the dominant diffusion direction of the particles is changed to the downwind, the mass concentration of the particles in the main flow area is relatively low and the mass concentration of the particles in the surrounding area, around the area of the medical staff and the wall of the operating room, may be larger. With the velocity and the angle of supplying the air optimized by the response surface method, the mass concentration of the particles could be reduced by 78.19% to make the air quality of the operating room reach the clean standard. Also, this optimized method helps the ventilation design of the vehicle operating room.

**Keywords** response surface method; clean operating room; particle mass concentration; speed of supply air; angle of supply air; parameters optimization ●



(责任编辑 韩星明)