

# 考虑不同服装热阻的层式通风供暖运行优化研究

白 燕<sup>1,2</sup>, 汪庭祥<sup>1</sup>, 申一凡<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710055;

2. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

**摘要:** 为满足室内人员在不同着装时的热舒适需求, 以某层式通风供暖办公室为研究对象, 在考虑不同服装热阻的前提下, 通过改进 TOPSIS 法优化了送风参数 (即送风角度、送风速度和送风温度); 在优化过程中, 将 PMV/PPD、垂直温差、空气龄和能量利用效率作为通风性能评价指标, 以送风温度、送风速度、送风角度和服装热阻为设计变量, 通过 CFD 模拟分析, 采用中心复合设计响应面法得到通风性能与设计变量间的函数关系, 然后用于改进 TOPSIS 法评估所有可能方案的通风性能以达到提高计算效率的目的; 结果表明: 基于改进 TOPSIS 法优化层式通风供暖送风参数可以显著改善通风性能, PPD、空气龄和垂直温差分别平均降低了 37.08%、22.46% 和 48.17%, 能量利用效率平均提高了 20.42%。

**关键词:** 层式通风; 供暖; 服装热阻; 响应面法; 改进 TOPSIS 法; 优化

## Study on Optimization for Stratum Ventilation and Heating Operation of Considering Different Clothing Insulations

BAI Yan<sup>1,2</sup>, WANG Tingxiang<sup>1</sup>, SHEN Yifan<sup>1</sup>

(1. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to satisfy the thermal comfort requirements of indoor personnel in different clothes, taking a floor ventilation and heating office as the research object, and the ventilation parameters (i. e., supply vane angle, supply air velocity, and supply air temperature) are optimized by an improved technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) method under the different clothing insulations. To reduce costs of computational, the predicted mean vote predicted percentage dissatisfied (PMV/PPD), vertical air temperature difference between head and ankle levels, mean age of air, and energy utilization coefficient are taken as ventilation performance evaluation criteria during the optimization, and supply vane angle, supply air velocity, supply air temperature, and clothing insulation are the parameters of the design. The computational fluid dynamics (CFD) simulation analysis is performed by means of the central composite design response surface method to obtain the functional relationship between the ventilation performances and the design parameters, which is used to evaluate the ventilation performance of all possible operations and improve the computing efficiency by the improved TOPSIS method. The results demonstrate that optimization on the ventilation parameters via the improved TOPSIS method can significantly improve the ventilation performance. The vertical air temperature difference between head and ankle levels, the mean age of air, and the PPD are decreased by 48.17%, 22.46%, and 37.08% on average respectively, and an average increase in the energy utilization coefficient reaches 20.42%.

**Keywords:** stratum ventilation; heating; clothing insulation; response surface method; improved TOPSIS; optimization

## 0 引言

如今, 人们 80%~90% 的时间在室内度过, 近 65% 的时间在办公楼里度过<sup>[1]</sup>, 室内人员的工作效率很大程度上取决于他们对室内环境的满意度<sup>[2]</sup>。一直以来, 气流组织对营造舒适健康的室内环境起着至关重要的作用。合理的气流组织不仅可以为室内人员提供舒适的热环境, 还可以降低空调系统的能耗以及改善室内空气质量<sup>[3]</sup>。因此, 在

过去的几十年中, 许多研究学者致力于一系列关于新型气流组织形式的研究, 例如个性化通风<sup>[4]</sup>、碰撞射流通风<sup>[5]</sup>和竖壁贴附通风<sup>[6]</sup>等。

层式通风是一种适用于中小房间的新型气流组织形式, 其最初提出是为了适应供冷工况中较高的室内空气温度<sup>[7]</sup>, 因此以往关于层式通风的研究主要集中在夏季供冷工况。有研究表明, 对于供冷工况, 与混合通风和置换通风相比, 层式通风能够以较低的能耗营造令人满意的室内

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-05-17。

基金项目: 陕西省建设厅科技发展计划项目(2019-K34); 陕西省教育科学规划课题(SGH18H111)。

作者简介: 白 燕(1979-), 女, 陕西西安人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事空调系统优化与节能控制方向的研究。

引用格式: 白 燕, 汪庭祥, 申一凡. 考虑不同服装热阻的层式通风供暖运行优化研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 180-188.

热环境<sup>[8]</sup>。近年来, 层式通风用于冬季供暖已被证实具有一定的潜力。由于受到热浮力的影响, 层式通风供暖工况下的气流流动显得更为复杂<sup>[9]</sup>。因此, 合理的控制供暖送风参数对于营造舒适的室内热环境和降低能耗至关重要。Zhang 等采用数值模拟分析不同送风参数对层式通风供暖的通风性能的影响, 发现送风温度对热舒适性的影响最显著, 送风角度对能量利用效率的影响程度最显著, 送风速度对空气质量的影响最显著<sup>[9]</sup>。程勇等采用数值模拟研究分析不同送风角度对层式通风供暖效果的影响, 发现水平向下 30° 送风角度可获得较好的室内热舒适和较高的能量利用效率<sup>[10]</sup>。

在以往对于气流组织形式的研究中, 常使用静态服装模型(即将服装保温设置为固定值)来评估操作参数对通风性能的影响<sup>[9,11]</sup>。该值参考了美国<sup>[12]</sup>, 欧洲<sup>[13]</sup> 和国际<sup>[14]</sup> 热舒适性标准, 即供冷季节和供暖季节的服装热阻分别为 0.5 clo 和 1 clo。根据标准 ASHRAE 55-2013, 服装隔热是影响居住者热舒适度的重要因素之一(其他因素包括: 空气温度, 空气速度, 相对湿度, 平均辐射温度和代谢活动)<sup>[12]</sup>。基于人体热平衡, 较低的室内温度会导致人体消耗更多的热量, 这让人感觉到寒冷从而选择添加衣服来维持自身的热平衡。有研究表明, 在冬季时, 中国的室内温度低于欧美国家, 中国人的室内服装热阻高于欧美人群, 且范围最广<sup>[15]</sup>。因此, 若服装热阻设为固定值而不考虑室内人员的实际服装热阻, 则很有可能导致送风参数设置不合理。

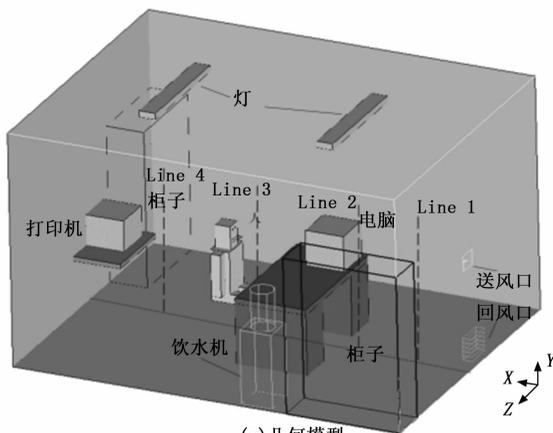
本研究基于实验数据验证的 CFD 数值模拟, 以 PMV、垂直温差、空气龄以及能量利用效率为优化目标, 在考虑不同服装热阻的前提下, 通过改进逼近理想解排序(TOP-SIS)法对送风参数进行优化。在优化过程中, 本研究采用中心复合设计响应面法得到通风性能与设计参数间的函数关系并用于送风方案评估, 显著地降低数值模拟的计算成本, 同时可为层式通风供暖工程设计提供指导。

## 1 数值模拟

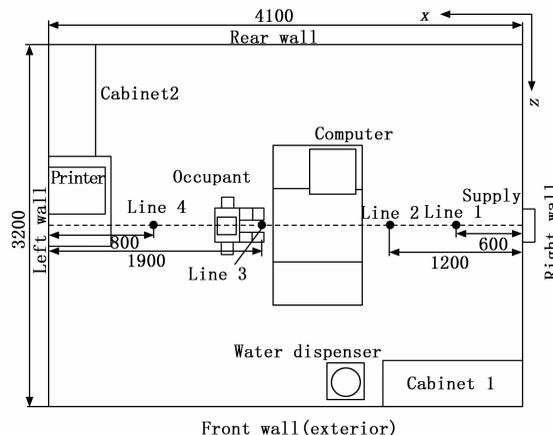
### 1.1 物理模型

本研究是以西安地区某一典型的办公室为基础物理模型, 房间尺寸为长 4.1 m (X) × 宽 3.2 m (Z) × 高 2.7 m (Y), 如图 1 所示。

房间的前墙为外墙, 其余的墙面、地面和屋面均为内墙, 在数值模拟过程中内墙可以设置为绝热壁面<sup>[9-10]</sup>。为简化计算模型和提高计算网格质量, 使用接近人体实际形状的矩形节段模型来代替复杂的人体<sup>[16]</sup>。一个百叶送风口安装在右墙上, 距离地面高约 1.3 m, 尺寸为: 长 0.25 m × 高 0.25 m, 送风角度可以通过改变百叶的角度进行调节。回风口位于送风口正下方, 距离地面约 0.2 m, 其尺寸为: 长 0.3 m × 高 0.3 m。经过加热的暖风通过送风口直接输送至工作区, 待其与室内较冷空气混合后, 再经过回风口排出。房间共布置 4 条测量线 (Line 1~Line 4) 用于数据采集, 分别在水平方向上距离送风口中心位置 0.6 m、1.2 m、



(a) 几何模型



(b) 平面布置图

注: 图中尺寸单位为 mm

图 1 实验环境几何模型和平面布置图

2.2 m 和 3.3 m。

### 1.2 CFD 模型

为了简化模型方便计算, 本研究做以下基本假设:

- 1) 室内空气为不可压缩、稳定的湍流气流且满足 Boussinesq 假设;
- 2) 房间为密闭空间, 无其他气流的渗透;
- 3) 房间外墙温度为常壁温。

除此之外, 采用 Discrete Ordinates (DO) 辐射模型来计算不同表面(外墙、人体表面、灯、电脑、打印机等)之间的热传递。文献 [11] 表明标准 k-ε 两方程湍流模型能够更好的预测通风空调房间的空气流动。因此, 本研究采用标准 k-ε 两方程湍流模型。本研究使用 Airpak 3.0.16 建立层式通风空调房间的几何模型, 如图 1 (a) 所示。为了保证数值模拟预测结果的精度, 本研究采用六面体结构化网格对模型进行网格划分, 并对送风口、排风口、人体、电脑等处进行局部网格加密处理。使用有限体积法线性化微分方程组, 其中, 标准压力项、动量项、湍流能项、湍流耗散项均为二阶格式。采用 SIMPLE-C 算法耦合速度和压力。能量和空气龄收敛残差设置为  $10^{-6}$ , 其余参数收敛

残差均设置为  $10^{-4}$ 。

### 1.3 初始条件和边界条件

在 CFD 数值模拟中，边界条件设置详情如表 1 所示。

表 1 数值模拟边界条件设置

序号	名称	条件设置
1	送风口	均匀速度入口(inlet velocity)
2	回风口	自由出入(outflow)
3	外墙	定壁温, 1 °C
4	其他壁面	绝热
5	人	定热流边界, 1.1 Met
6	电脑	定热流边界, 180 W
7	灯	定热流边界, 72 W
8	饮水机	定热流边界, 40 W(保温)
9	打印机	定热流边界, 70 W
10	桌子	绝热
11	柜子	绝热

### 1.4 网格独立性检验

为了确定 CFD 仿真模型的网格数量，本研究对网格数量为 354 756 (网格 1)、567 998 (网格 2) 和 956 712 (网格 3) 的 3 种网格进行网格独立性检验。对以上 3 种网格进行数值模拟，在 Line 1 ( $X=0.6\text{ m}$ ,  $Z=1.6\text{ m}$ ) 的空气速度和温度的数值模拟预测值如图 2 所示。通过比较可以看出，网格 2 的空气速度和温度的数值模拟预测值与网格 3 非常接近，而网格 1 的空气温度预测值和网格 3 的温度预测值存在较大偏差。一般来说，网格划分越精细，网格密度就越大，数值仿真结果与流场的实际情况越接近。然而网格密度过

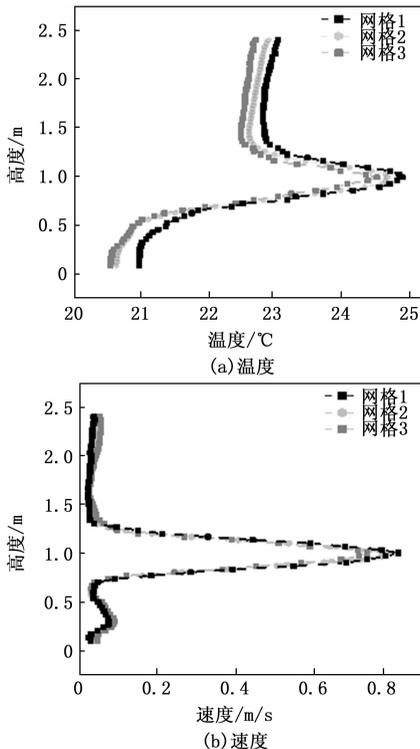


图 2 网格独立性检验

大会造成数值计算的迭代次数的快速增加，从而导致数值模拟的时间成本大大增加<sup>[17]</sup>。考虑到数值模拟的预测精度和时间成本，本研究选择采用网格 2。

### 1.5 数值模拟的验证

为了确保数值模拟方法的可靠性，本研究对 CFD 模型进行实验对比验证。在房间设置了一面内墙，并在该墙上安装层式通风的送风口和回风口，且风口的位置、尺寸与 CFD 模型保持一致，如图 3 所示。

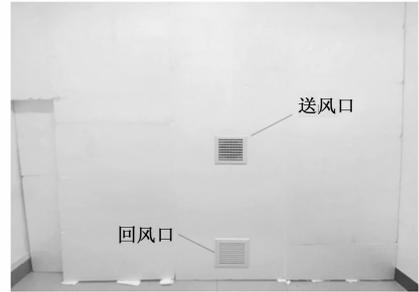


图 3 通风系统的风口设置

本研究在 4 条测量线上距离地面 0.3 m、0.5 m、0.7 m、0.9 m、1.1 m、1.3 m、1.5 m、1.7 m 和 2.1 m 高度处设置测点。在采集实验数据时，采用风速仪测量各个测点处的空气速度，采用温湿度变送器测量各个测点处的空气温度，采用 K 型热电偶测量围护结构的表面温度，仪器及参数详情如表 2 所示。每个测点的数据采集时长为 5 min，间隔 10 min 逐一完成每个测量线上所有测点的空气温度和速度的数据采集。为防止实验仪器的测量结果出现系统误差，在实验测量开始前，采用参数对比的方法对仪器进行检查，若仪器出现误差，则对其进行参数校准。

表 2 实验仪器具体参数

仪器	风速仪	温湿度变送器	K 型热电偶
型号	KV-621	Sike HT-10	WRNK-191
精度	$\pm 0.06\text{ m/s} \pm 2\%$ 读取值	$\pm 0.3\text{ °C} \pm 0.1\%$ 读取值 $\pm 3\% \text{ RH} \pm 0.1\%$ 读取值	$\pm 0.7\text{ °C} \pm 5\%$ 读取值
量程	0~5 m/s	-40~60 °C 0~100% RH	-40~350 °C
仪器实物			

图 4 为实验测量结果与模拟预测结果的对比，由图可知数值模拟预测值与实验测量值的大小相近、变化规律基本一致。为评估数值模拟的准确性，本研究采用平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 对所有测点处的数值模拟值与实验测量值进行误差分析。经计算，所有测点的空气温度数值模拟值与实验测量值之间的 MAE 与 RSME

分别为 0.21 °C 和 0.22 °C, 空气速度的数值模拟值与实验测量值之间的 MAE 与 RSME 分别为 0.03 m/s 和 0.04 m/s, 表明数值模拟预测结果具有一定的准确性。因此, 该 CFD 数值模拟可以较好地模拟层式通风供暖工况。

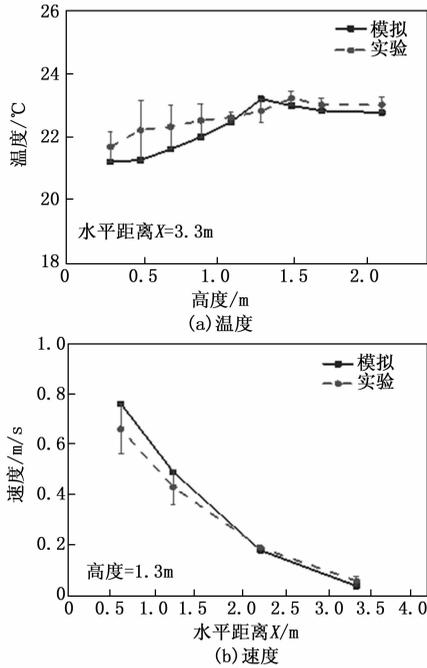


图 4 比较实验测量与数值模拟的空气温度和速度

## 2 研究方法

### 2.1 通风性能评价指标

本研究采用以下评价指标对层式通风的能量利用效率、空气质量和热舒适进行评价。

- 1) 能量利用效率 (EUC);
- 2) 空气龄 (MAA);
- 3) 垂直温差 ( $\Delta T$ );
- 4) 预测平均热感觉投票/预测不满意百分比 (PMV/PPD)。

能量利用效率 (EUC) 用来评估层式通风输送至房间的暖风热量的利用效率<sup>[18]</sup>。由于本模型中的人体为坐姿, 因此工作区主要包括距离地面 1.3 m 高度以下的区域<sup>[11]</sup>。EUC 数值越大, 则说明送往室内工作区的暖风得到充分利用。其计算公式为<sup>[18]</sup>:

$$EUC = \frac{T_s - T_e}{T_s - T_n} \quad (1)$$

式中, EUC 代表能量利用效率,  $T_e$  为排风温度 (°C),  $T_s$  为送风温度 (°C),  $T_n$  为工作区空气平均温度 (°C)。

空气龄 (MAA) 为室内空气质量的评价指标, 其定义为室内保留一定数量的新鲜空气的时间长度<sup>[19]</sup>。本研究的 MAA 值在人员呼吸高度 (距离地面以上 1.1 m) 取得<sup>[20]</sup>。预测平均热感觉投票/预测不满意百分比 (PMV/PPD) 为全身热舒适的评价指标。由于相对湿度的变化对热感的影响很小, 因此可以忽略不计<sup>[21]</sup>。在计算 PMV/PPD 时, 将

相对湿度设置为 50%, 活动水平设置为 1.1 Met<sup>[11]</sup>。垂直温差 ( $\Delta T$ ) 为局部热舒适的评价指标, 其值为室内人员的头部 (距离地面以上 1.1 m) 和脚踝部 (距离地面以上 0.1 m) 两处的空气温度之差。

### 2.2 改进 TOPSIS 法

本研究采用的通风性能评价指标涉及热舒适、空气品质和能量利用效率 3 个方面, 彼此之间可能存在矛盾, 即某个送风方案会使得一项评价指标变好, 却使得另一项指标变差。因此, 改善多个通风性能评价指标可看作为多目标决策问题。TOPSIS 法是解决该问题的一种常用的方法, 其原理是根据现有的方案与理想目标的接近程度按照优劣进行统一的排序<sup>[22]</sup>, 评估现有方案并筛选出最佳方案。然而, TOPSIS 法存在不可忽视的不足之处: 与正理想解的欧式距离接近的方案很有可能也与负理想解的欧式距离接近<sup>[23]</sup>。为了解决这一问题, 本研究使用集对分析中的联系向量距离对 TOPSIS 法进行改进。由于考虑对立集合的存在, 因此在计算方案与理想解的联系度时, 将会在一定程度上克服 TOPSIS 法的不足之处, 从而具有了“与正理想解的联系向量距离更近, 与负理想解的联系向量距离更远的方案”的性质<sup>[24]</sup>。

假设方案  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  由  $m$  个方案组成, 评价指标  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$  由  $n$  个指标组成,  $x_{ij}$  为方案  $A_i$  在指标  $C_j$  下的指标值 ( $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ ), 则改进 TOPSIS 方法的计算过程如下:

- 1) 构造初始数据矩阵  $X$ 。

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \cdots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \cdots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $x_{ij}$  为方案  $A_i$  在指标  $C_j$  下的指标值。

- 2) 初始数据矩阵正向化。

对于区间型 (在某个区间内最优) 指标:

$$\bar{x}_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{a - x_{ij}}{M}, & x_{ij} < a \\ 1, & a < x_{ij} < b \\ 1 - \frac{x_{ij} - b}{M}, & x_{ij} > b \end{cases} \quad (3)$$

$$M = \max\{a - \min\{x_i\}, \max\{x_i\} - b\}$$

对于极小型 (数值越小越优) 指标:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} \quad (4)$$

对于中间型 (越接近某个值越优) 指标:

$$\bar{x}_{ij} = 1 - \frac{|x_{ij} - x_{\text{best}}|}{M} \quad (5)$$

式中,  $\bar{x}_{ij}$  为  $x_{ij}$  正向化后的指标值;  $x_{\text{best}}$  为评价指标中最优值 (中间型指标);  $a$  为区间的下界,  $b$  为区间的上界 (区间型指标)。

3) 正向化矩阵归一化。

$$y_{ij} = \bar{x}_{ij} \cdot \left( \sum_{i=1}^m \bar{x}_{ij} \right)^{-1}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

式中,  $y_{ij}$  为方案  $A_i$  在指标  $C_j$  下规范化后的评价指标值。

4) 构建权重矩阵。

$$M_j = -r \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}, r = (\ln m)^{-1}, 0 \leq M_j \leq 1$$

$$f_j = 1 - M_j$$

$$\lambda_j = f_j \cdot \left( \sum_{k=1}^n f_k \right)^{-1} \quad (7)$$

式中,  $M_j$  为指标  $C_j$  的信息熵;  $f_j$  为指标  $C_j$  的信息离散度;  $\lambda_j$  为指标  $C_j$  的权重。

5) 构建加权归一化矩阵。

$$z_{ij} = \lambda_j y_{ij}, i = 1, 2, 3, \dots, m; j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

式中,  $z_{ij}$  为方案  $A_i$  在指标  $C_j$  下的指标值加权后的归一化数据。

6) 确定正理想解  $Z^+$  和负理想解  $Z^-$ 。

正(负)理想解是由加权归一化矩阵中每一列的最优(劣)值组成:

$$Z^+ = \{z_{i1\max}, z_{i2\max}, z_{i3\max}, \dots, z_{in\max}\} \quad (9)$$

$$Z^- = \{z_{i1\min}, z_{i2\min}, z_{i3\min}, \dots, z_{in\min}\} \quad (10)$$

7) 计算方案  $A_i$  与正理想解  $Z^+$  和负理想解  $Z^-$  的联系度。

由方案  $A_i$  与正理想解  $Z^+$  组成集对  $H^+ = (A_i, Z^+)$ , 则其联系度  $\mu_i^+$  为:

$$\mu_i^+ = a_i^+ + b_i^+ p + c_i^+ q =$$

$$\lambda_1 \mu_{i1}^+ + \lambda_2 \mu_{i2}^+ + \dots + \lambda_n \mu_{in}^+ = \sum_{j=1}^n \lambda_j \mu_{ij}^+$$

$$\mu_{ij}^+ = a_{ij}^+ + b_{ij}^+ p + c_{ij}^+ q, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

由方案  $A_i$  与负理想解  $Z^-$  组成集对  $H^- = (A_i, Z^-)$ , 则其联系度  $\mu_i^-$  为:

$$\mu_i^- = a_i^- + b_i^- p + c_i^- q = \lambda_1 \mu_{i1}^- + \lambda_2 \mu_{i2}^- + \dots + \lambda_n \mu_{in}^- = \sum_{j=1}^n \lambda_j \mu_{ij}^-$$

$$\mu_{ij}^- = a_{ij}^- + b_{ij}^- p + c_{ij}^- q, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式中,  $a_i, b_i$  和  $c_i$  依次分别为方案  $A_i$  和理想解  $Z$  的同一度、差异度和对立度<sup>[24]</sup>,  $a_i + b_i + c_i = 1$ ;  $p$  是差异相应系数, 在  $[-1, 1]$  区间视不同情况取值;  $q$  是对立相应系数, 其取值为  $-1$ <sup>[24]</sup>;  $\mu_{ij}$  为方案  $A_i$  的指标  $C_j$  与理想解  $Z$  的联系度。

8) 计算方案  $A_i$  与正理想解和负理想解的联系向量距离  $d_i^+$  和  $d_i^-$ 。

$$d_i^+ = \sqrt{(1 - a_i^+)^2 + (b_i^+)^2 + (c_i^+)^2} \quad (13)$$

$$d_i^- = \sqrt{(1 - a_i^-)^2 + (b_i^-)^2 + (c_i^-)^2} \quad (14)$$

9) 计算方案  $A_i$  与理想解的相对贴近度。

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+}, i = 1, 2, 3, \dots, m, C_i \in [0, 1] \quad (15)$$

相对贴近度  $C_i$  越大, 则说明方案  $A_i$  就越接近于理想解。因此, 本研究通过计算各送风方案的相对贴近度并根据大小

进行优劣排序, 其中, 最接近 1 的方案就是最佳方案。

### 2.3 响应面法试验设计

一般来说, 现有的送风方案数量越多, 基于改进 TOPSIS 法就越可能选出更加合理的最佳送风参数。然而送风方案数量的增加势必导致 CFD 数值模拟的时间成本增加<sup>[11]</sup>, 因此有必要建立通风性能的近似数学模型来代替 CFD 数值模拟, 用于通风性能评价指标的分析与预测。响应面法 (RSM, response surface methodology) 作为一种常用的数学建模方法, 其采用二次回归方程, 通过最小二乘回归法确定设计变量与输出响应之间的映射关系<sup>[25]</sup>, 具有计算精度高、预测性能好的优点<sup>[26]</sup>。为构建通风性能响应面模型, 首先要选择合适的试验设计方法, 进行试验设计与模型检验, 从而构建出通风性能响应面模型。响应面试验设计方法有很多种, 如 Box-Behnken 试验设计、中心复合试验设计 (CCD, central composite design) 和 Hybrid 试验设计等<sup>[27]</sup>。由于 CCD 试验设计具有合适的轴点坐标, 能够保证试验设计的可旋转性和序贯性, 并且能够在等距点上预测恒定方差和改善预测精度<sup>[28]</sup>, 因此本研究采用 CCD 试验设计。

本研究选取送风角度 ( $A$ )、送风速度 ( $B$ )、送风温度 ( $C$ ) 以及服装热阻 ( $D$ ) 作为 CCD 试验的设计变量。其中送风角度、送风速度和送风温度的参数范围分别为  $0 \sim 60^\circ$ 、 $0.6 \sim 1.2 \text{ m/s}$  和  $22 \sim 28^\circ\text{C}$ , 服装热阻的参数范围为  $0.8 \sim 1.4 \text{ clo}$ , 以表示室内人员在冬季供暖时的不同的着装。为保证 CCD 试验设计的可旋转性和序贯性, 本研究的轴向点极值 ( $\alpha$ ) 的取值需遵循  $\alpha = 2^{t/4}$  ( $t$  为变量数目), 在每个变量的参数范围内选择 5 个不同值进行试验, 变量实际值与水平编码值对应情况如表 3 所示。

表 3 CCD 试验变量、水平及实际值

设计变量	水平				
	$-\alpha$	1	0	1	$\alpha$
A 送风角度/ $^\circ$	0	15	30	45	60
B 送风速/ $(\text{m/s})$	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20
C 送风温度/ $^\circ\text{C}$	22.0	23.5	25.0	26.5	28.0
D 服装热阻/ $\text{clo}$	0.80	0.95	1.10	1.25	1.40

基于表 3 中不同设计变量与水平, 根据 CCD 试验设计形成 30 组试验工况, 以  $PMV$ 、 $\Delta T$ 、 $MAA$  和  $EUC$  为输出响应, 按照不同试验工况分别进行数值模拟, 结果如表 4 所示。

## 3 结果与分析

### 3.1 通风性能的响应面模型

考虑到所有线性项、平方项和设计变量间的交互作用<sup>[28]</sup>, 本研究采用二阶多项式模型构建通风性能与设计变量之间的函数关系。二阶多项式模型的数学表达式如式 (16) 所示:

$$y = c_0 + \sum_{r=1}^n c_r x_r + \sum_{r=1}^n c_{rr} x_r^2 + \sum_{r=1}^n \sum_{s>r}^n c_{rs} x_r x_s \quad (16)$$

式中,  $n$  为设计变量的数量;  $y$  为预测的响应值;  $c_0, c_r, c_{rr}$  分别为偏移项、线性项和平方项系数;  $c_{rs}$  为交互作用系数。

表 4 试验工况及模拟结果

工况	A	B	C	D	PMV(-)	$\Delta T/^\circ\text{C}$	MAA/s	EUC(-)
1	0	-2	0	0	0.285	1.53	1 296	0.84
2	2	0	0	0	0.169	0.79	1 524	0.67
3	-1	-1	-1	-1	-0.156	1.79	768	1.25
4	1	-1	1	1	0.560	1.69	1 285	0.72
5	-1	1	-1	1	0.345	1.81	468	1.47
6	-1	-1	-1	1	0.332	1.79	792	1.25
7	-1	1	1	1	0.761	3.06	387	1.12
8	0	0	0	-2	-0.253	1.75	652	1.18
9	-1	-1	1	1	0.753	2.23	880	0.89
10	1	-1	-1	-1	-0.308	1.52	1 097	0.96
11	0	0	2	0	0.655	2.72	709	0.86
12	1	1	1	-1	0.273	1.34	837	0.82
13	0	0	0	0	0.281	1.75	652	1.18
14	1	-1	1	-1	0.147	1.69	1 265	0.77
15	0	0	-2	0	-0.216	1.05	558	1.43
16	0	0	0	0	0.281	1.75	652	1.18
17	1	-1	-1	1	0.213	1.52	1 086	1.03
18	0	0	0	0	0.281	1.75	652	1.18
19	-1	1	-1	-1	-0.101	1.81	468	1.47
20	1	1	-1	1	0.255	-0.16	896	0.98
21	1	1	1	1	0.605	1.25	837	0.76
22	-2	0	0	0	0.433	3.14	787	1.17
23	0	0	0	0	0.281	1.75	652	1.18
24	1	1	-1	-1	-0.278	-0.16	896	0.97
25	0	0	0	2	0.725	1.75	652	1.18
26	0	0	0	0	0.281	1.75	652	1.18
27	-1	1	1	-1	0.352	3.06	387	1.14
28	0	0	0	0	0.281	1.75	652	1.18
29	-1	-1	1	-1	0.256	2.23	880	0.89
30	0	2	0	0	0.345	1.03	511	1.16

为确定设计变量与输出响应的映射关系, 本研究在构建响应面模型过程中, 采用二次多项式逐步回归一后退法, 剔除显著性较小的项, 以提高模型的稳定性与准确性。根据表 4 的 30 组数值模拟结果, 利用 Design-Expert 12 软件<sup>[30]</sup>对进行回归拟合, 通过式 (16) 获得 PMV、 $\Delta T$ 、MAA 和 EUC 的响应面模型, 如式 (17) ~ (20) 所示:

$$PMV = -13.723 - 4.453 \times 10^{-3}A + 0.149B + 0.673C + 5.371D - 9.361 \times 10^{-2}CD - 8.545 \times 10^{-3}C^2 - 0.671D^2 \quad (17)$$

$$\Delta T = 15.986 + 9.293 \times 10^{-2}A - 17.726B - 0.813C - 0.157AB + 1.217BC - 1.8 \times 10^{-4}A^2 - 4.979B^2 \quad (18)$$

$$MAA = -893.28 - 43.741A - 662.29B + 210.53C + 9.53AB + 0.586AC - 235.278BC + 0.557A^2 + 2768.403B^2 \quad (19)$$

$$EUC = -1.82 - 6.194 \times 10^{-3}A + 5.122B + 0.153C - 2.417 \times 10^{-2}AB + 1.472 \times 10^{-3}AC - 3.08 \times 10^{-4}A^2 - 2.194B^2 - 5.833 \times 10^{-3}C^2 \quad (20)$$

式中, A 为送风角度 ( $^\circ$ ); B 为送风速度 (m/s); C 为送风温度 ( $^\circ\text{C}$ ); D 为服装热阻 (clo)。

图 5 为 CFD 数值模拟值与响应面 (RSM) 模型预测值

的分布, 横轴为 CFD 数值模拟值, 纵轴为 RSM 模型预测值。由图可以看出, 响应面 (RSM) 模型预测值与 CFD 数值模拟值基本一致, 绝大部分数据点都分布在直线  $y=x$  上。说明了建立的通风性能响应面模型较为精确有效。

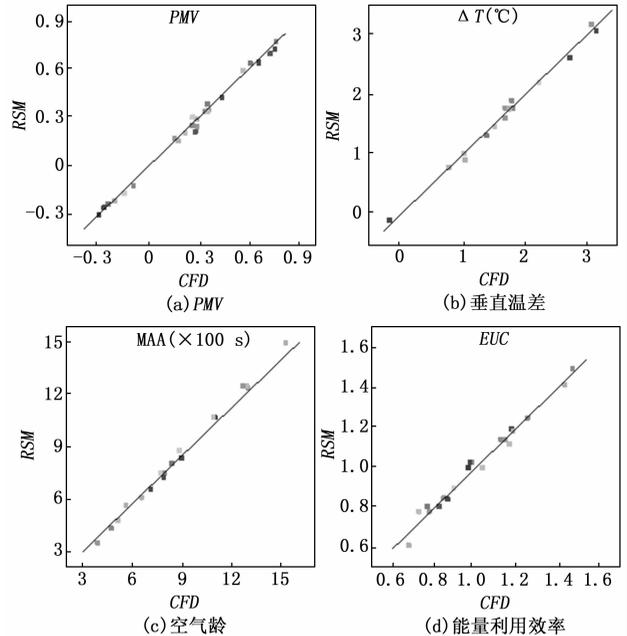


图 5 RSM 模型预测值与 CFD 数值模拟值分布图

对以上通风性能响应面模型进行方差分析, 以确认模型能否有效地反映输出响应与设计变量的映射关系。如表 5 所示, 4 个模型的  $p$  值均小于 0.000 1, 表明模型在统计学上具有重要意义。

表 5 模型方差分析

模型	平方和	均方值	F	P
PMV	2.25	0.364 2	512.5	< 0.000 1
$\Delta T$	16.17	2.31	371.5	< 0.000 1
MAA	2 305 526	288 190	799.7	< 0.000 1
EUC	1.34	0.167 6	172.7	< 0.000 1

为检验模型的拟合程度, 本研究采用决定系数  $R^2$  以及校正决定系数  $R^2_{pre}$  可对响应面模型的拟合程度进行评价, 预测决定系数  $R^2_{pre}$  和校正决定系数  $R^2_{pre}$  越接近, 且两者越接近 1, 则说明响应面模型拟合度和预测精度越高<sup>[31]</sup>。如表 6 所示, 4 个响应面模型的决定系数均接近 1, 预测决定系数  $R^2_{pre}$  和校正决定系数  $R^2_{pre}$  接近, 表明所建立的响应面模型具有较高的拟合度, 可代替 CFD 数值模拟用于通风性能指标的分析与预测。

表 6 模型决定系数分析

模型	$R^2$	$R^2_{pre}$	$R^2_{pre}$
PMV	0.993 6	0.991 2	0.986 4
$\Delta T$	0.990 6	0.987 2	0.978 9
MAA	0.996 7	0.994 3	0.990 1
EUC	0.985 0	0.978 4	0.949 8

基于构建的通风性能响应面模型，通过改变 4 个变量中的 1 个变量的编码值，得到各通风性能评价指标与变量水平编码值的对应关系，结果如图 6 所示。图中各变量的斜率陡峭程度可反映出该变量对输出响应的影响程度，斜率越陡则表明影响程度越大。

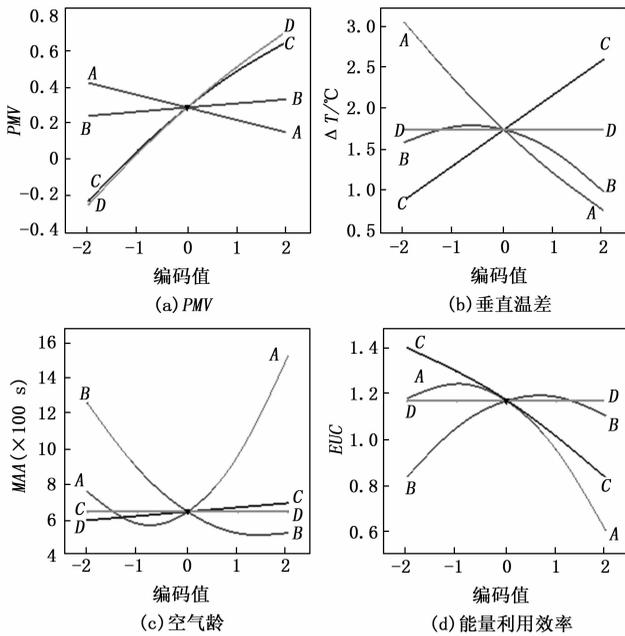


图 6 通风性能与变量编码值关系

由图 6 (a) 可知，在 4 个变量中，服装热阻 (D) 斜率最陡，然后是送风温度 (C)、送风角度 (A) 和送风速度 (B)，说明对 PMV 的影响程度从大到小为：服装热阻、送风温度、送风角度和送风速度，因此有必要针对室内人员在不同着装的情况下进行送风参数优化。同理，由图 6 (b) 可知，4 个变量对  $\Delta T$  的影响程度从大到小为：送风角度、送风温度、送风速度和服装热阻；由图 6 (c) 可知，4 个变量对 MAA 的影响程度从大到小为：送风角度、送风速度、送风温度和服装热阻；由图 6 (d) 可知，4 个变量对 EUC 的影响程度从大到小为：送风角度、送风温度、送风速度和服装热阻。此外，由图 6 可以看出，各项通风性能指标随着设计变量并非呈现单调一致性变化。因此，在对层式通风供暖进行优化时，需要考虑各变量对通风性能的综合

影响，使层式通风供暖的综合性能达到最佳状态。

### 3.2 基于改进 TOPSIS 的通风性能多目标优化

本研究总共考虑了 6 859 种送风方案，由 19 种送风温度、19 种送风速度和 19 种送风角度组成，分别在相应的参数设计范围内等间隔设置。同时，在参数的设计范围内等间隔地设置 13 种服装热阻，用以研究室内人员着装情况对送风参数优化的影响。每个送风方案的通风性能评价指标可由式 (17) ~ (20) 计算得到。若没有响应面模型，则需要进行 6 859 次 CFD 数值模拟，意味着需要花费大量的时间来完成这项工作，而本研究仅进行 30 组实验方案的 CFD 数值模拟，因此通风性能响应面模型的建立，可以在节约计算成本的同时，较为精准预测各送风方案的通风性能。

在优化过程中，根据式 (7) 可计算出各项通风性能评价指标的权重，经计算 PMV、 $\Delta T$ 、MAA 和 EUC 的平均权重分别为 0.392、0.235、0.207 和 0.166，表明室内热舒适是进行送风参数优化时最重要的指标。基于建立的通风性能响应面模型，采用改进的 TOPSIS 法可得到针对不同服装热阻的最佳送风参数。以服装热阻为 0.8 clo 为例，利用改进 TOPSIS 法可得到每种送风方案与正负理想解的联系向量距离和理想解的相对贴进度，如表 7 所示。其中，相对贴进度最接近 1 的方案，即为室内人员服装热阻为 0.8 clo 时的最佳送风方案。

表 7 联系向量距离和相对贴进度

送风方案	联系向量距离 $d_i^+$	联系向量距离 $d_i^-$	相对贴进度 $C_i$
1	0.008 0	0.010 8	0.574 1
2	0.005 4	0.013 9	0.720 6
3	0.004 2	0.013 6	0.762 2
4	0.003 7	0.015 0	0.803 6
...	...	...	...
6 859	0.005 9	0.011 9	0.669 6

本研究通过 Design-Expert 12 的 Numerical Optimization 模块和传统 TOPSIS 法也分别获得针对不同服装热阻的最佳送风参数，将 3 种方法所得最佳送风参数进行比较，如图 7 所示。

由图 7 可以看出：1) 改进 TOPSIS 法与传统 TOPSIS 法优化的送风参数的大小和变化趋势基本一致；2) Numerical

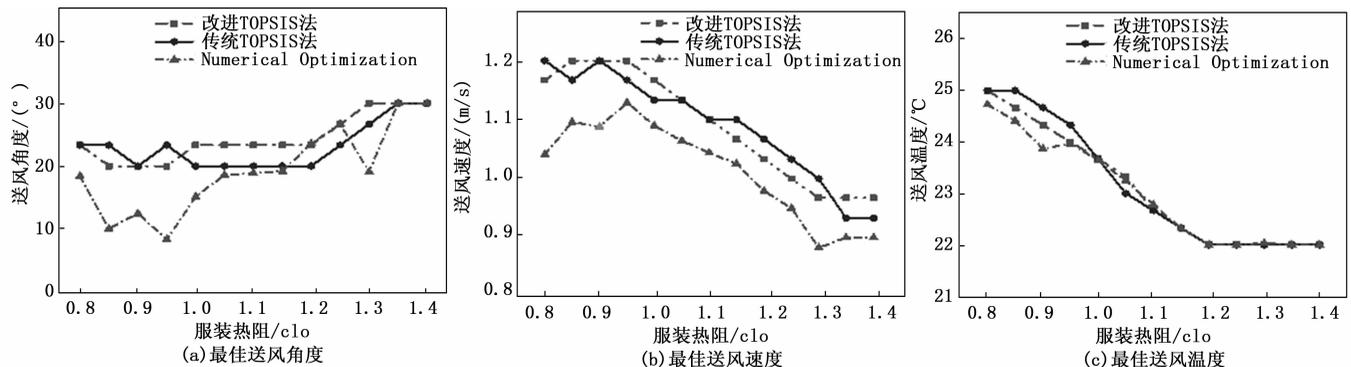


图 7 不同服装热阻下的最佳送风参数

Optimization 模块所获得的最佳送风温度与前两者相近, 最佳送风角度和速度却差别较大; 3) 随着服装热阻的增大, 最佳送风角度总体呈增大趋势, 而最佳送风温度和速度呈下降趋势; 4) 当服装热阻大于 1.3 clo 时, 最佳送风参数趋于稳定, 基于改进 TOPSIS 法优化的最佳送风温度为 22 °C, 最佳送风速度为 0.97 m/s, 最佳送风角度为 30°。

为了量化优化效果, 本研究设置了一个基准方案作为优化前的送风方案, 即在变量设计范围内取中间值, 文献 [11] 证实了该量化方法的可行性。因此本研究中基准方案为: 送风角度为 30°, 送风速度为 0.9 m/s, 送风温度为 25 °C。为了衡量 PMV 的改善效果, 本研究使用 PPD 代替 PMV<sup>[11]</sup>。由图 8 可以看出, 通风性能各项指标的优化效果显著, 其中的舒适性指标 PPD 和垂直温差  $\Delta T$  均达到 ISO 7730 的舒适性要求<sup>[14]</sup>。基于改进 TOPSIS 法与传统 TOPSIS 法优化后的通风性能最接近, 而基于 Numerical Optimization 模块优化后的  $\Delta T$  与前两者有较大差别, 其值在部分供暖工况中出现大于优化前的  $\Delta T$ , 这是因为较大的 EUC 往往会导致室内出现较大的温度梯度。

表 8 为各项通风性能评价指标的平均优化效果。通过比较 3 种方法的平均优化效果可知, 基于改进的 TOPSIS 法的优化效果最佳, PPD、 $\Delta T$  和 MAA 分别平均降低了 37.08%、48.17% 和 22.46%, EUC 平均提高了 20.42%。改进 TOPSIS 法的优化效果与传统 TOPSIS 法略有差别, 这是因为在计算送风方案与理想解的联系度时考虑了对立集合的存在, 在一定程度上克服了传统 TOPSIS 法的不足之

处, 从而使得计算结果更加可信。

表 8 通风性能评价指标的平均优化效果

评价指标	方法	优化量/%
PPD/%	改进 TOPSIS 法	-37.08
	传统 TOPSIS 法	-36.90
	Numerical Optimization	-36.25
MAA/s	改进 TOPSIS 法	-22.46
	传统 TOPSIS 法	-21.01
	Numerical Optimization	-21.35
$\Delta T$ /°C	改进 TOPSIS 法	-48.17
	传统 TOPSIS 法	-42.10
	Numerical Optimization	-20.42
EUC	改进 TOPSIS 法	20.42
	传统 TOPSIS 法	19.29
	Numerical Optimization	24.46

#### 4 结束语

为了满足室内人员在不同着装时对室内热环境的热舒适需求, 同时改善空气质量、提高能量利用效率, 本研究基于实验数据验证的 CFD 数值模拟, 采用改进 TOPSIS 法对送风参数进行优化。详细结论如下:

1) 各设计变量对通风性能各项指标的影响程度不一致, 对 PMV 的影响程度从大到小为: 服装热阻、送风温度、送风角度和送风速度; 对  $\Delta T$  的影响程度从大到小为: 送风角度、送风温度、送风速度和服装热阻; 对 MAA 的影响程度从大到小为: 送风角度、送风速度、送风温度和服装热阻; 对 EUC 的影响程度从大到小为: 送风角度、送风温度、送风速度和服装热阻。

2) 随着服装热阻的增大, 最佳送风角度总体呈增大趋势, 而最佳送风温度和速度呈下降趋势。此外, 当服装热阻大于 1.3 clo 时, 最佳送风温度为 22 °C, 最佳送风速度为 0.97 m/s, 最佳送风角度为 30°。

3) 基于改进 TOPSIS 法的送风参数优化显著地改善了层式通风供暖的通风性能, PPD、 $\Delta T$  及 MAA 分别平均降低了 37.08%、48.17% 和 22.46%, EUC 平均提高了 20.42%。其中的舒适性指标 PPD 和垂直温差  $\Delta T$  均达到 ISO 7730 的舒适性要求。

4) 建立通风性能评价指标与设计参数之间的函数关系可以在节约计算成本的同时, 较为精准预测各送风方案的通风性能, 还可以用于指导层式通风供暖工程设计。

5) 基于改进 TOPSIS 法与传统 TOPSIS 法优化的送风参数的大小和变

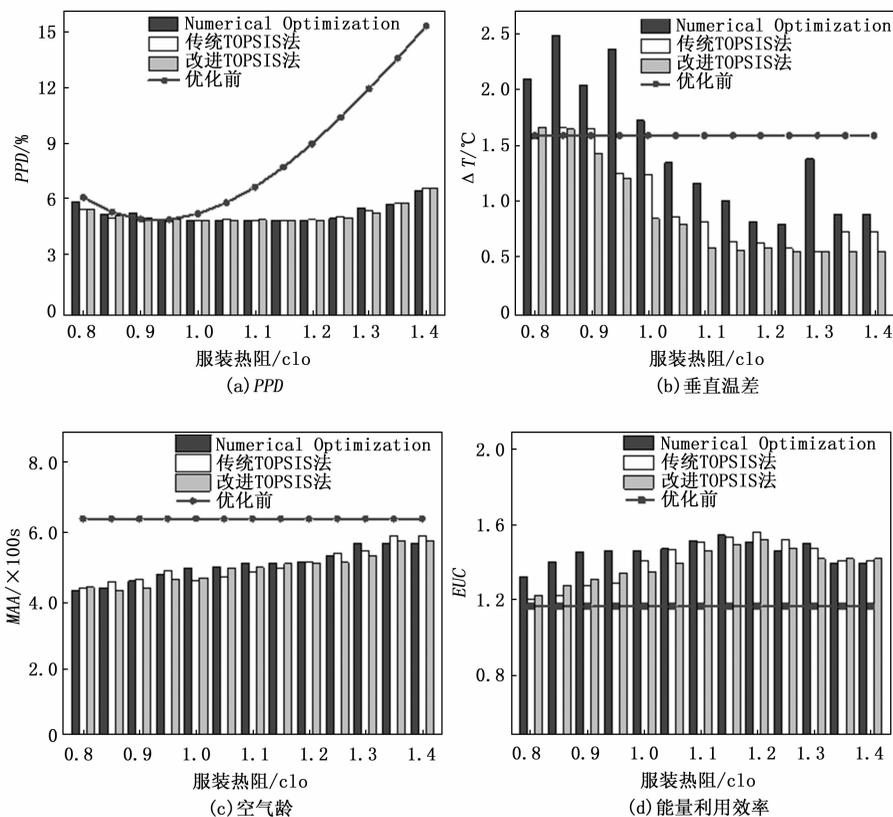


图 8 优化前后的通风性能对比

化趋势基本一致,说明了改进 TOPSIS 法具有可信性。

#### 参考文献:

- [1] STAVECKIS A, BORODINECS A. Impact of impinging jet ventilation on thermal comfort and indoor air quality in office buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 235: 110738.
- [2] WU J L, HOU Z J, SHEN J Y, et al. A method for the determination of optimal indoor environmental parameters range considering work performance [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 35: 101976.
- [3] YE X, KANG Y M, YANG F, et al. Comparison study of contaminant distribution and indoor air quality in large-height spaces between impinging jet and mixing ventilation systems in heating mode [J]. *Building and Environment*, 2019, 106: 106159.
- [4] ALSAAD H, VOELKER C. Performance assessment of a ductless personalized ventilation system using a validated CFD model [J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2018, 11: 689-704.
- [5] HAGHSHENASKASHANI S, SAJADI B, CEHLIN M. Multi-objective optimization of impinging jet ventilation systems; Taguchi-based CFD method [J]. *Building Simulation*, 2018, 11: 1207-1214.
- [6] 韩腾, 邓红娜, 李安桂, 等. 竖壁贴附通风与混合通风供热方式室内热环境及通风性能实测比较 [J]. *暖通空调*, 2021, 51 (10): 138-144.
- [7] LIN Z, CHOW T T, TSANG C F, et al. Stratum ventilation - A potential to elevated indoor temperatures [J]. *Building and Environment*, 2009, 44: 2256-2269.
- [8] FONG M L, LIN Z, FONG K F, et al. Evaluation of thermal comfort conditions in a classroom with three ventilation methods [J]. *Indoor Air*, 2011, 21: 231-239.
- [9] ZHANG S, LIN Z, AI Z T, et al. Effects of operation parameters on performances of stratum ventilation for heating mode [J]. *Building and Environment*, 2019, 148: 55-66.
- [10] 程勇, 李博铮, 方赵嵩. 送风角度对送回风口同侧布置的层式通风冬季供暖效果的影响 [J]. *建筑科学*, 2017, 33 (10): 120-127.
- [11] ZHANG S, LIN Z, AI Z T, et al. Multi-criteria performance optimization for operation of stratum ventilation under heating mode [J]. *Applied Energy*, 2019, 239: 969-980.
- [12] ASHRAE. ANSI/ASHRAE standard 55-2013 thermal environmental conditions for human occupancy [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc. 2013.
- [13] CEN. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics; EN15251: 2007 [S]. Brussels; CEN, 2007: 27-29.
- [14] International Standard Organization. UNE-EN ISO 7730-2006 Ergonomics of the thermal environment-analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria [S]. Brussels Belgium; International Standard Organization, 2006: 1-25.
- [15] ZHANG N, CAO B, WANG Z, et al. A comparison of winter indoor thermal environment and thermal comfort between regions in Europe, North America, and Asia [J]. *Building and Environment*, 2017, 117: 208-217.
- [16] BAI Y, WAN T C. The SPA-TOPSIS-based evaluating approach on thermal sensation model at different vane angles in UFAD-DV system [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46: 1787-1802.
- [17] 万陶成. 室内热环境动态送风模式的个性化推荐方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [18] ZHANG S, CHENG Y, FANG Z, et al. Dynamic control of room air temperature for stratum ventilation based on heat removal efficiency: method and experimental validations [J]. *Building and Environment*, 2018, 140: 107-118.
- [19] ASHRAE. ASHRAE Handbook-Fundamentals [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2017: 141-163.
- [20] HUAN C, WANG F H, LIN Z, et al. An experimental investigation into stratum ventilation for the cooling of an office with asymmetrically distributed heat gains [J]. *Building and Environment*, 2016, 110: 76-88.
- [21] FANG Z, LIU H, LI B, et al. Experimental investigation on thermal comfort model between local thermal sensation and overall thermal sensation [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 1286-1295.
- [22] 朱东济, 蔡红维, 欧阳霄, 等. 基于 AHP、灰色关联法和 TOPSIS 的航天测控装备评估模型研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (11): 240-244, 255.
- [23] 李美娟, 袁宁, 陈磊. 基于投影法和夹角度量法的改进 TOPSIS [J]. *系统科学与数学*, 2020, 40 (9): 1614-1627.
- [24] 李艳梅, 陈增. 基于联系度优化 TOPSIS 法的区域电能替代潜力评估研究 [J]. *电网技术*, 2019, 43 (2): 687-695.
- [25] 孙启国, 孙奥, 李照威. 基于响应面法的油气润滑 ECT 传感器优化设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (11): 250-255.
- [26] 邢雷, 李金煜, 赵立新, 等. 基于响应面法的井下旋流分离器结构优化 [J]. *中国机械工程*, 2021, 32 (15): 1818-1826.
- [27] 郁云鸥, 高志. 新型八工位高效内圆切片机的设计与优化 [J]. *机床与液压*, 2019, 47 (15): 179-183.
- [28] 邵明旺, 王建, 乔晓林, 等. 基于响应面中心复合设计的固体推进剂摩擦感度理论 [J]. *含能材料*, 2019, 27 (6): 509-515.
- [29] 刘成颖, 谭锋, 王立平. 面向机床整机动态性能的液压机身结构优化设计研究 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52 (3): 161-168.
- [30] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- [31] 李莉, 张赛, 何强, 等. 响应面法在试验设计与优化中的应用 [J]. *实验室研究与探索*, 2015, 34 (8): 41-45.