

精密加工环境温度均匀性控制数值模拟

刘 壹, 矫梦蝶, 张其聪

上海理工大学, 机械工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月22日; 录用日期: 2023年3月24日; 发布日期: 2023年3月31日

摘 要

精度较高的车床以及其他加工设备大多会对加工环境的温度场均匀性有所要求, 空调送风速度以及位置等参数设置则是控制温度场均匀度的关键。研究空调参数对温度场均匀性的影响, 通过物理建模以及数据仿真的方式模拟出加工环境内温度场以及速度场, 得出了随着送风速度增加, 温度场均匀度增加, 加工区域峰值温度减小, 随着空调器位置参数增大, 加工区域温度上升的结论。研究工作为精密加工环境温度控制提供了一种技术方案。

关键词

小型空调, 送风速度, 数值模拟, 温度均匀性, 空调器位置

Numerical Simulation of Precision Machining Ambient Temperature Uniformity Control

Yi Liu, Mengdie Jiao, Qicong Zhang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 22nd, 2023; accepted: Mar. 24th, 2023; published: Mar. 31st, 2023

Abstract

Most of the lathes and other processing equipment with high precision will have requirements for the uniformity of the temperature field in the processing environment, and parameter settings such as air conditioning air supply speed and position are the key to controlling the uniformity of the temperature field. The influence of air conditioning parameters on the uniformity of the temperature field was studied, and the temperature field and speed field in the processing environment were simulated by physical modeling and data simulation, and it was concluded that with the increase of air supply speed, the uniformity of the temperature field increased, the peak tem-

perature of the processing area decreased, and the temperature of the processing area increased with the increase of the position parameters of the air conditioner. The research work provides a technical scheme for the temperature control of precision machining environment.

Keywords

Small Air Conditioner, Air Supply Speed, Numerical Simulation, Temperature Uniformity, Air Conditioner Location

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

高精度设备对加工区域温度控制要求日益升高,针对不同精度的加工环境的温度控制研究日益发展。大多数该类型研究使用的空调设备基本是分体式空调,比起分体式空调,移动式空调器将蒸发器、冷凝器、压缩机以及其节流元件整合为一个单元,其安装便捷及便于移动特点逐渐显著,热舒适性及其余指标也有显著提升[1]。

针对精密加工环境温度控制调节研究,有傅允准等人设计了恒温空调系统,研究了不同气流组织以及不同扰量作用下的恒温室动态响应[2],朱楚柯等研究了恒温空调送风速度大小对精密加工环节中微纳米磨床温度均匀性的影响[3]。王江标等人借助 CFD 工具预测高精度恒温试验室气流分布情况,通过改变内扰以及其余参数分析优化室内气流分布以及温度场均匀性[4]。对于单一设备的温度控制, Lu 等提出了一种超精密温度控制的循环水回路结构,使生产温度稳定度高达毫开尔文水平[5]。利用挂壁式空调或者分体式空调进行温度控制调节的研究大多为家用环境, M. Bojic 等人研究了挂壁空调摆放位置对于室内温度的影响[6]。Zhou 等人采用数值模拟方法研究了厨房环境内部的流场以及温度场[7]。乔哲明研究了空调器安装位置对室内气流组织的影响[8]。

本文通过建立物理模型并且进行数值模拟研究不同空调参数设置对加工环境温度均匀性的影响,研究工作也为精密加工环境温度控制提供了一种技术方案。

2. 数学物理模型

本文采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型[9]来对加工环境内的气流组织进行仿真模拟,加工环境内部的空气流通方程可写成如下所示:

1) 连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

其中, u_i 为速度矢量,单位为 m/s。

2) 能量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i} \right] + S_h \quad (2)$$

其中, μ_t 为湍流黏度,单位为 Pa.s, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; Pr 为湍流普朗特系数; S_h 为体积热源。

3) 湍流动能 k 方程式

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \varepsilon \quad (3)$$

4) 湍流动能耗散率方程如式(4)所示:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon}}{k} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中, ρ 为密度, kg/m^3 ; u_i 为速度, m/s ; μ 为动力黏度, $\text{N}\cdot\text{s}$; k 为湍流动能; ε 为耗散率; 对于标 k - ε 准模型来说, 有 $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=0.99$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

3. 物理建模与网格划分

3.1. 物理模型建立

图 1(a)为精密加工环境三维建模图, 图 1(b)为工研精机的简化建模图。其中工研精机的发热磨头为整个加工环境的主要热源。机床距地 6 cm, 总高 183 cm, 位于加工环境正中间。三台空调设备距地 6 cm, 与加工环境的保温薄膜距离均为 15 cm。

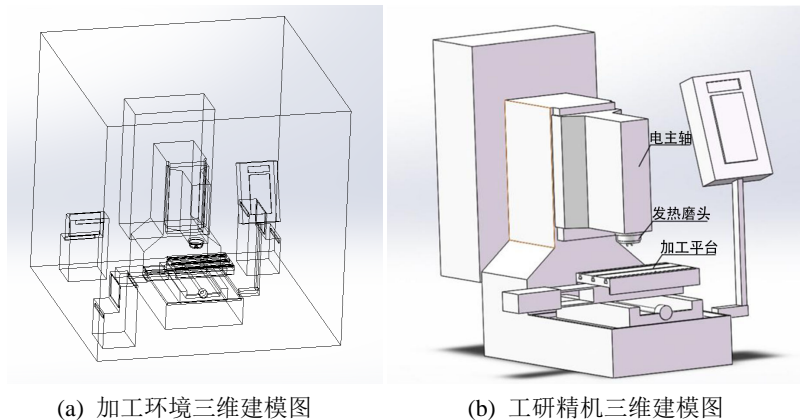


Figure 1. 3D modeling diagram
图 1. 三维建模

本文的空调送风口以及回风口采用了简单开口类风口模型简化, 将风口看作是一个简单开口[10]。空调设备简化送风口尺寸为 $35 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 位于正面顶部, 背面回风口上下部位各有两处, 尺寸分别为 $38 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$ 和 $37 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。

3.2. 网格划分

本文使用 Hypermesh 对物理模型进行了前处理, 定义了进出口以及热源。使用 Fluent meshing 进行网格划分。对热源以及空调送风口和回风口部分进行了网格加密处理。

4. 边界条件

本文的加工环境采用的围护结构为伸缩罩外套保温薄膜的形式。伸缩罩材质为铝合金, 保证牢固度的同时整体重量较轻。保温薄膜材质为涂塑(pvc)帆布, 有着保温防水的功能。假设围护结构材质为帆布材质, 且无漏风。忽略其中铝合金近伸缩罩对环境内温度的影响。将送风口定义为速度入口, 回风口为自由出流, 发热磨头为恒热流密度壁面, 机床为导热壁面。

5. 仿真分析

5.1. 送风速度对于温度均匀性影响

本节将会分析当送风温度为 18°C ，空调位置参数 $Z = 60\text{ mm}$ ，磨头热流密度为 300 w/m^2 时，不同送风速度对加工环境以及加工区域内温度速度场均匀性影响。

5.1.1. 温度场分析

根据温度场仿真模拟结果可以看出，当送风速度为 0.85 m/s 时，由图 2(a)~(c)可以看出三个空调送风口截面处的顶部以及边界部分温度都过大，外界环境温度未能被有效降低。由图 2(d)可知加工区域磨头下方部分温度过高，超过了设置的环境温度。该工况下加工环境内各截面处的气流混合最差最不均匀，由于送风速度较低，加工环境内各处的热量都未能被有效带走，空调送风口截面和加工区域温度都有过高的地方，不能满足加工环境内基本温差要求。

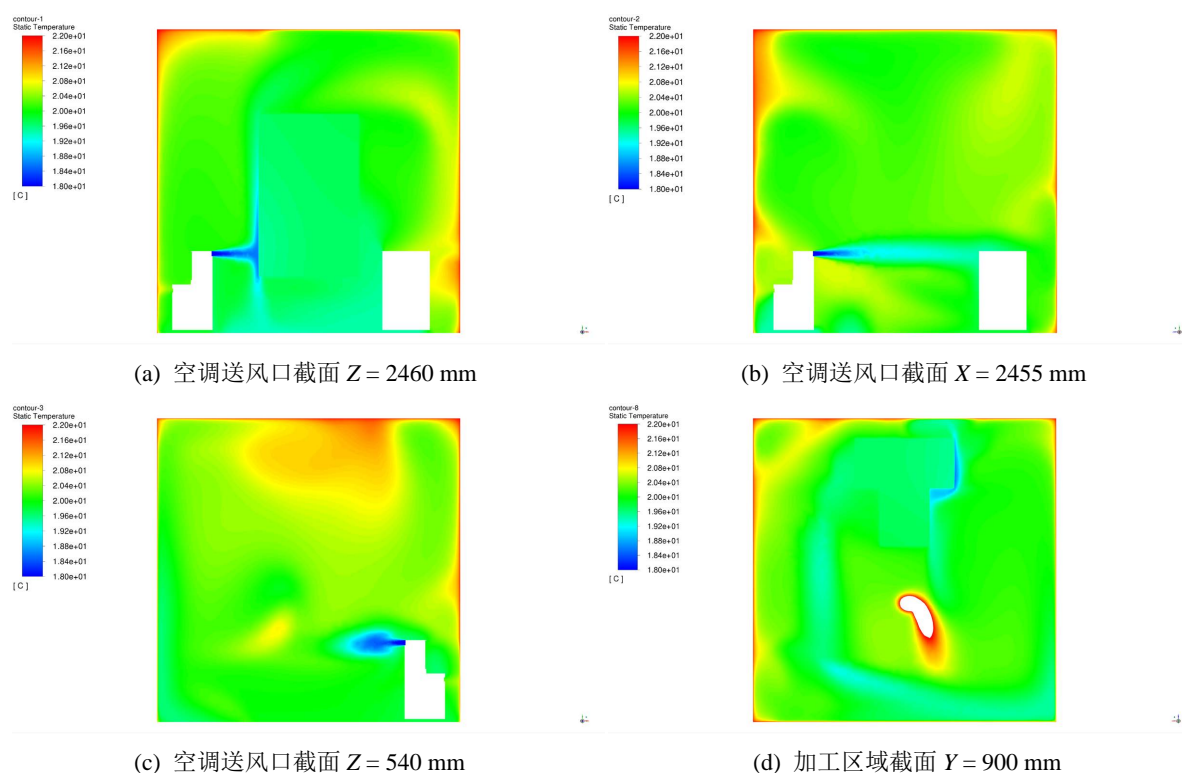


Figure 2. The air supply speed is $v = 0.85\text{ m/s}$

图 2. 送风速度 $v = 0.85\text{ m/s}$

由图 3 和图 4 可知送风速度为 1.58 m/s 和 2.08 m/s 时，加工环境各截面处温度较为均匀。由于此时的送风速度增大且空调送风口高度与加工区域高度相差不大，能直接对加工区域平面进行送风，使得加工环境以及加工区域磨头下方的热量都能被有效消除，送风速度为 2.08 m/s 的降温效果更好，磨头下方热量被消除了更多。图 2(c)、图 3(c)和图 4(c)显示尽管送风速度逐渐增大，但位于该位置的空调送风射流效果均较差，未能很好的送风射流至加工环境底部，图 2(b)、图 3(b)、图 4(b)显示的送风射流效果较好，基本能射流至加工环境底部。这可能是射流底部是否设置有回风口的原因。由于回风口具有回风的性质，在射流底部有设置回风口的空调射流效果较好，反之较差。

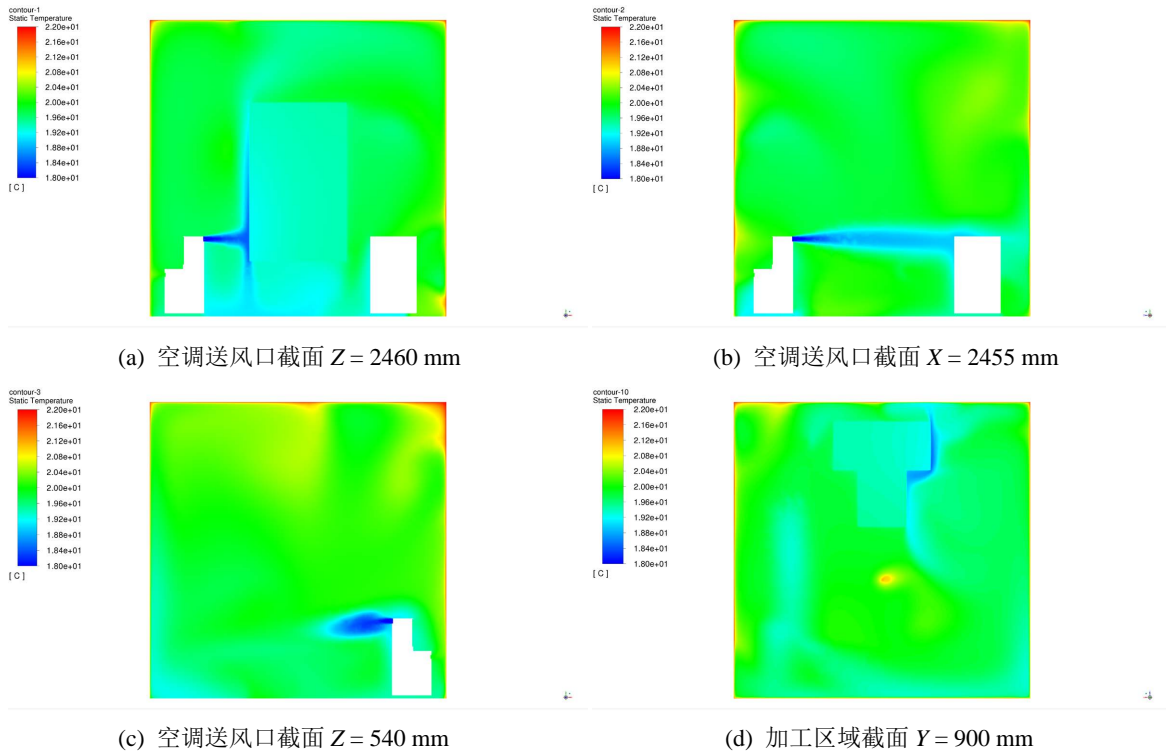


Figure 3. The air supply speed is $v = 1.58$ m/s
图 3. 送风速度 $v = 1.58$ m/s

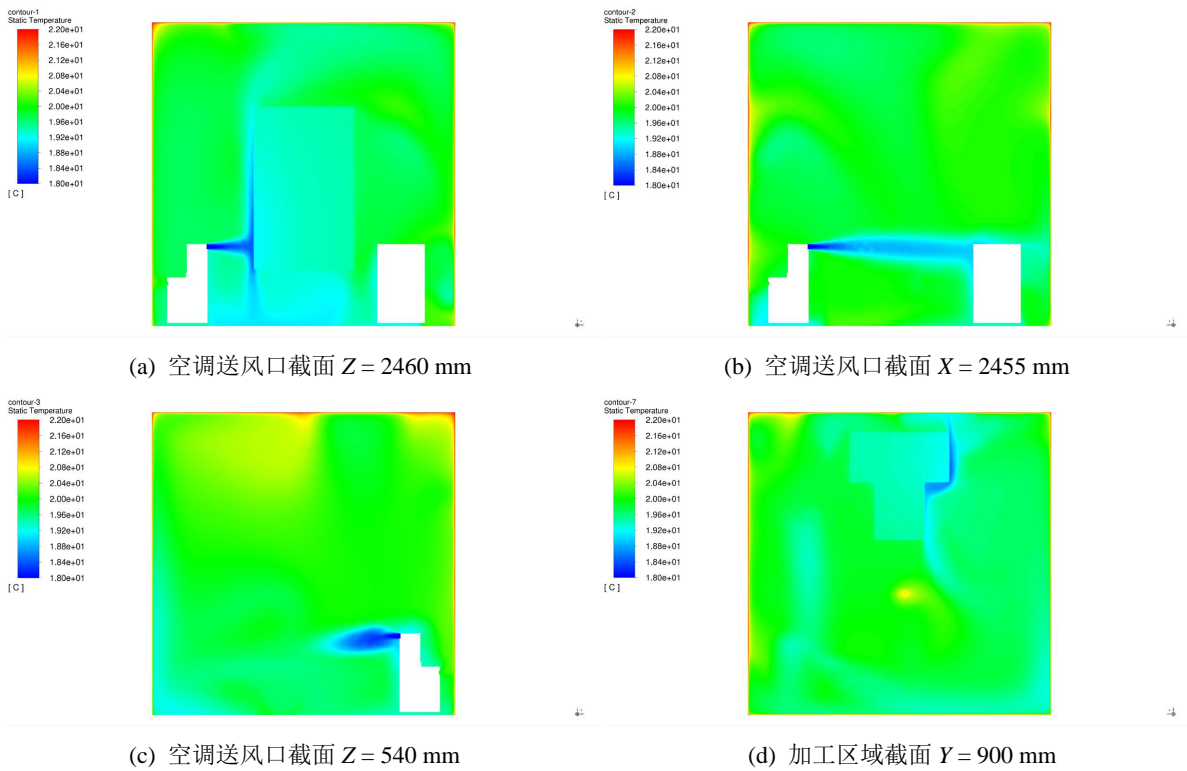
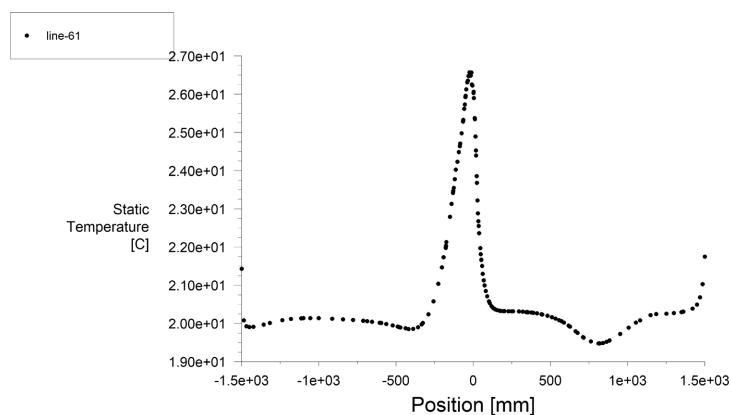


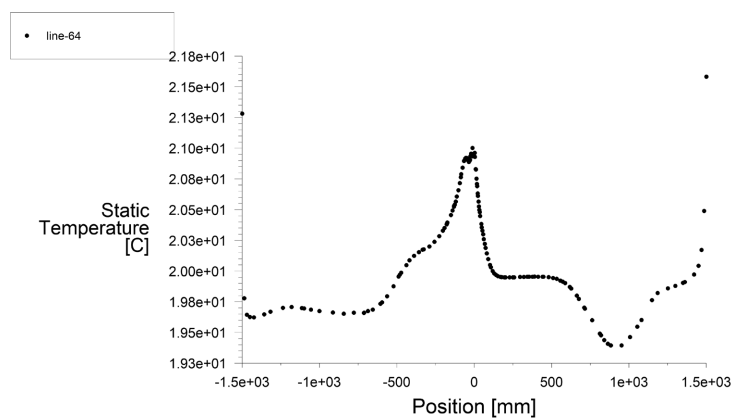
Figure 4. The air supply speed is $v = 2.08$ m/s
图 4. 送风速度 $v = 2.08$ m/s

5.1.2. 散点图分析

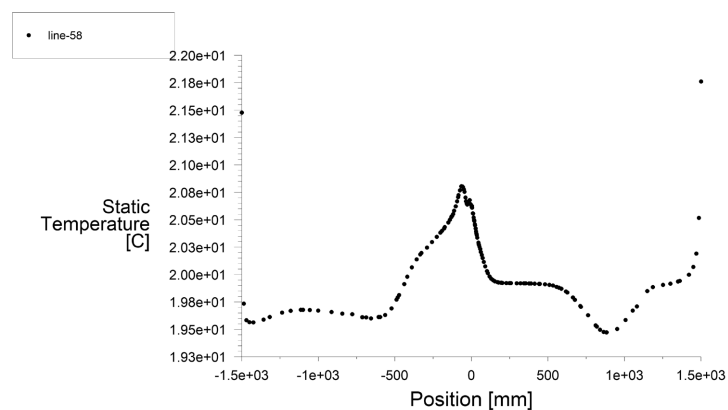
图 5(a)~(c)显示了三种送风速度下，磨头下方加工区域平面从加工环境一边到另一边的温度散点图。根据散点图可知加工环境温度走势大致相同。送风速度为 0.85 m/s 时，加工环境整体温度在 20℃ 左右，加工区域温度过高，峰值温度超过了 27℃，降温效果最差，不能满足基本温差要求。这是因为该工况下送风速度较低的原因，磨头散发的热量未能被有效消除。



(a) 送风速度 $v = 0.85$ m/s



(b) 送风速度 $v = 1.58$ m/s



(c) 送风速度 $v = 2.08$ m/s

Figure 5. Linear temperature distribution above the machining area
图 5. 加工区域上方直线温度分布图

送风速度为 1.58 m/s 和 2.08 m/s 时, 加工环境整体温度在 19.5℃ 左右, 加工区域降温明显。1.58 m/s 时峰值温度为 21℃, 加工区域温差基本控制在 0.7℃ 内。2.08 m/s 时加工区域峰值温度略低于 21℃, 此时在加工区域内散点图曲线较为平稳, 加工区域温差基本能控制在 0.5℃ 左右。这是因为此时送风速度增大, 加工环境内以及加工区域处热量能被有效消除, 所以整体环境温度以及加工区域峰值温度会下降明显。

5.1.3. 速度矢量图分析

根据速度仿真模拟分析, 可以发现加工环境内各个截面处速度矢量均匀度和走向大致相同。由图 6 可以看出送风速度为 0.85 m/s 时加工环境内各截面处以及加工区域风速相差均较小, 由于送风速度此时较低, 整体风速基本在 0.5 m/s 以下。

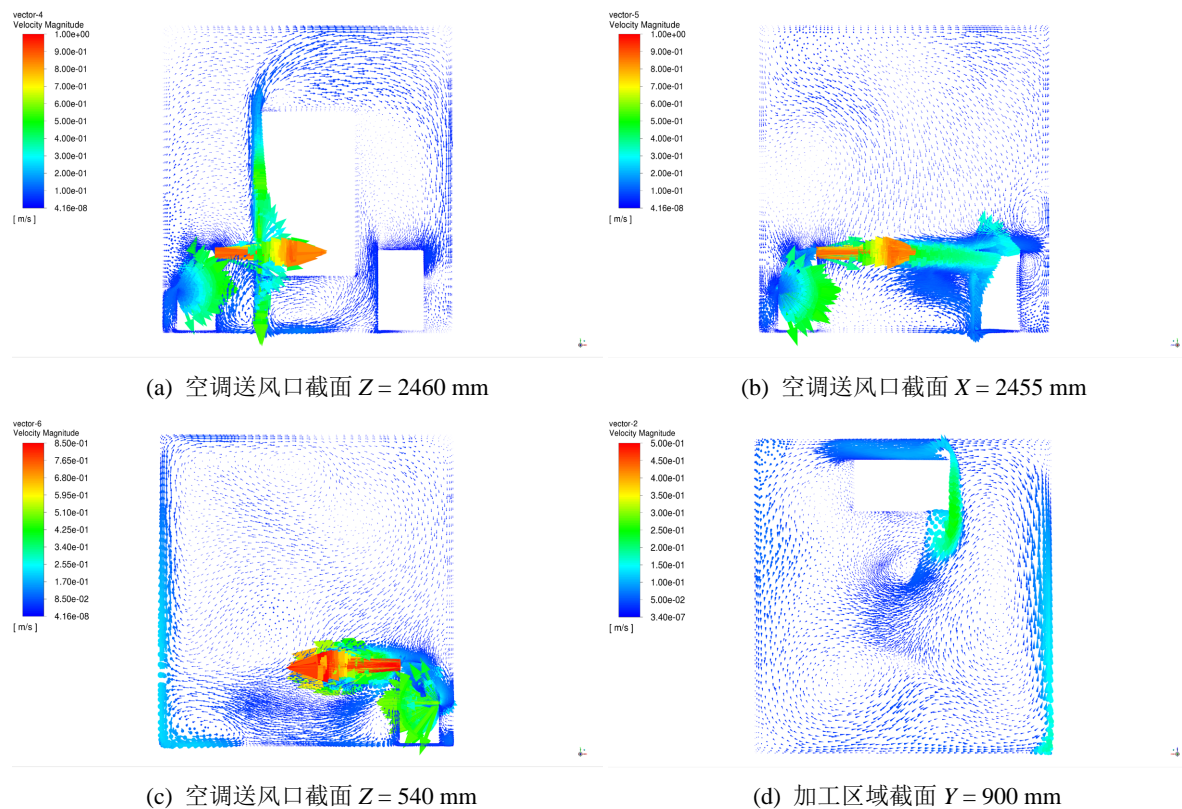


Figure 6. The air supply speed is $v = 0.85$ m/s
图 6. 送风速度 $v = 0.85$ m/s

由图 7 和图 8 可以看出送风速度为 1.58 m/s 和 2.08 m/s 时, 两者速度矢量图相差不大。送风口截面处风速较大, 加工区域平面由于正好位于风口高度位置, 导致风口处的速度偏大, 加工环境中间区域风速较为均匀。在射流下方以及空调上方会出现气流死区, 风速偏低。这是因为此时空调设备位置参数较小, 空调送风基本都在加工环境下方区域进行气流混合, 很难到达加工环境上方区域, 导致该区域风速较低, 出现气流死区。

通过仿真图分析可以看出随着送风速度的增加, 加工环境温度越低, 加工环境温度均匀性越高, 磨头下方加工区域降温效果越好, 但由于空调送风口此时正处于加工区域高度, 风速过大可能会使该区域人员吹风感明显。位置参数较小时加工环境上方会出现气流死区, 混合不均匀。

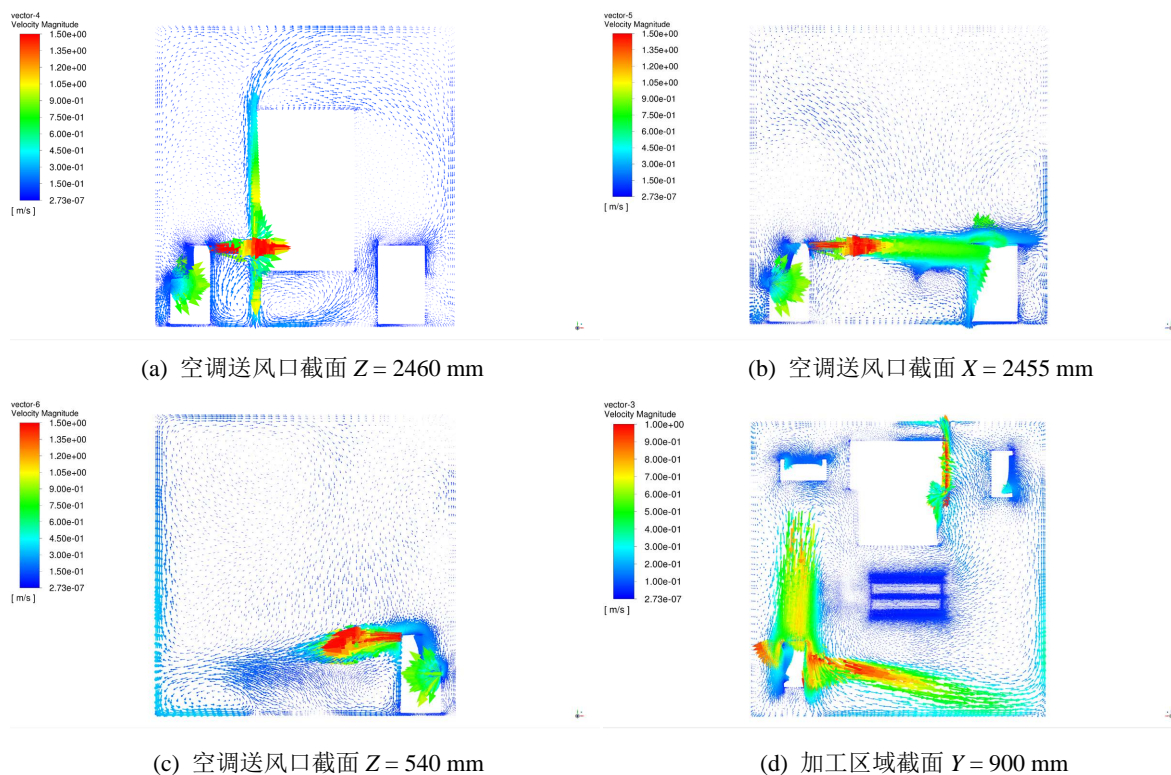


Figure 7. The air supply speed is $v = 1.58$ m/s
图 7. 送风速度 $v = 1.58$ m/s

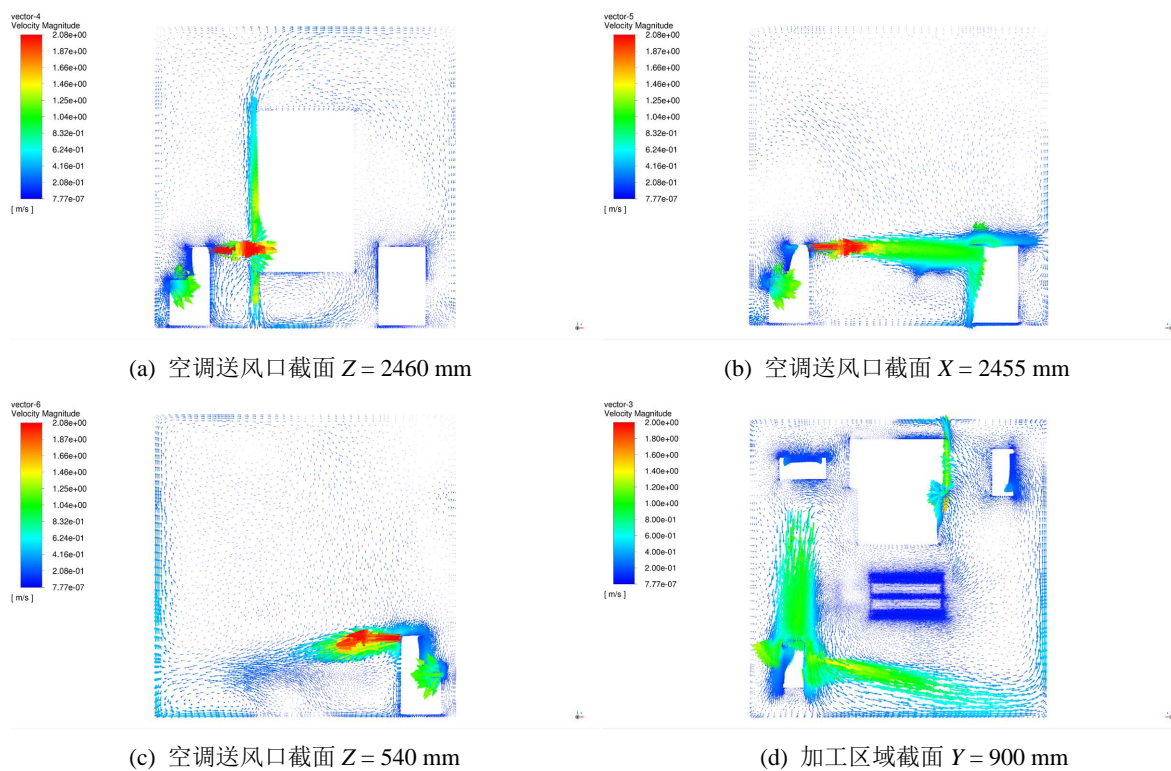


Figure 8. The air supply speed is $v = 2.08$ m/s
图 8. 送风速度 $v = 2.08$ m/s

5.2. 空调位置参数对温度场均匀性影响

由于送风速度为 2.08 m/s 和 1.58 m/s 时对发热磨头降温效果以及对加工环境温度均匀性影响相差不大, 送风速度 2.08 m/s 会导致加工区域附近风速过大, 人员处于该区域操作机床设备时可能会有明显吹风感, 综合考虑下本小节将会分析送风速度为 1.58 m/s, 送风温度以及磨头热流密度不变, 改变空调位置参数为 $Z = 1000$ mm, 分析空调位置参数对于加工环境温度均匀性的影响。

5.2.1. 温度场分析

由图 9 可以看出加工环境各个截面处温度分布较为均匀。由图 9(c)可以看出空调射流情况比起位置参数 $Z = 60$ mm 时有所提升, 随着空调位置参数增大, 射流底部没有回风口的情况下射流效果也能有所提升。这可能是因为随着位置参数的增大, 冷空气可下沉的空间也增大, 使得空调射流效果增强。加工区域平面的磨头热量也能够被消除但比起空调位置参数为 $Z = 60$ mm 时热量消除效果有所下降。这可能是由于此时位置参数增大, 空调送风口高于加工区域, 使未能直接对加工区域平面进行送风。

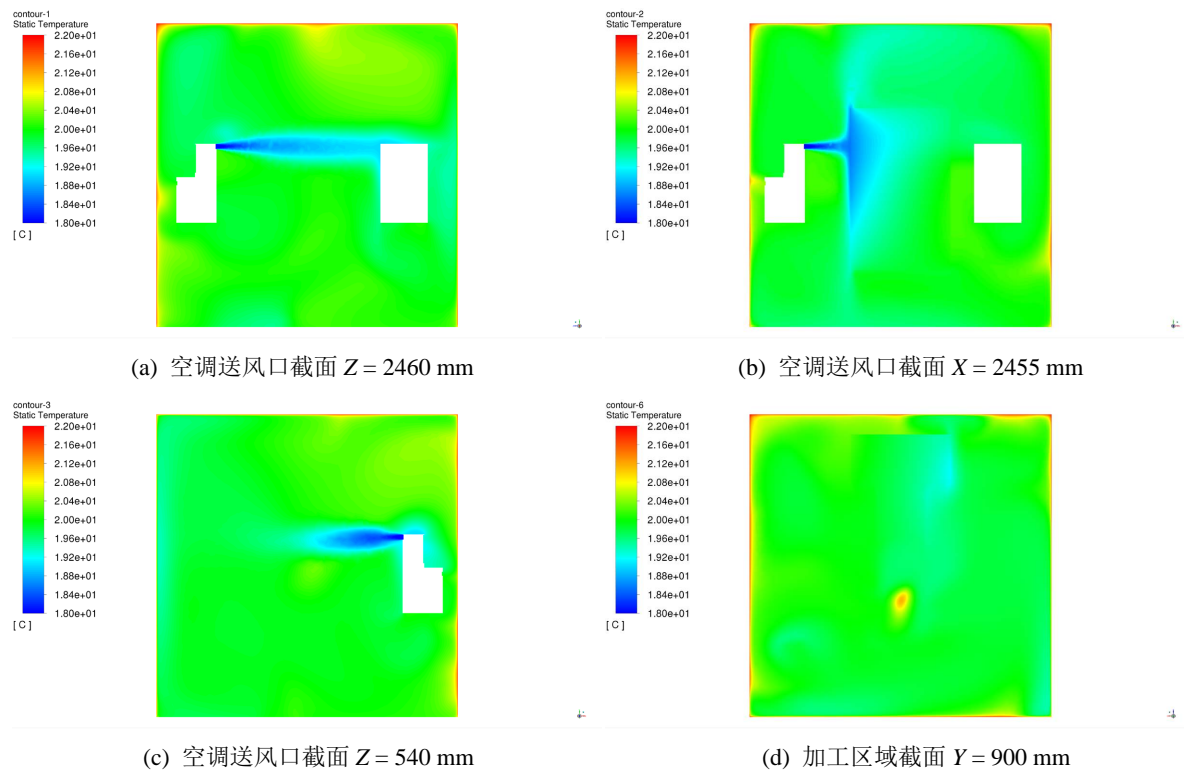


Figure 9. The air supply speed is $v = 1.58$ m/s, Position parameter $Z = 1000$ mm

图 9. 送风速度 $v = 1.58$ m/s, 位置参数 $Z = 1000$ mm

5.2.2. 散点图分析

图 10 为加工台平面磨头下方从加工环境一边到另一边的温度散点图。比起空调位置参数 $Z = 60$ mm 时, 加工环境左侧温度要低于右侧温度, 整体维持在 20°C 左右。加工区域磨头下方峰值温度为 21.8°C , 加工区域温差基本在 1°C 内, 热量消除效果比起空调位置参数 $Z = 60$ mm 时有所下降, 加工区域温差增大。可以看出随着位置参数增大, 加工环境整体温度以及加工区域峰值温度都有所上升。由于位置参数的上升, 空调送风口位置也随之上升, 导致未能直接对加工区域进行送风射流, 所以降温效果变差。

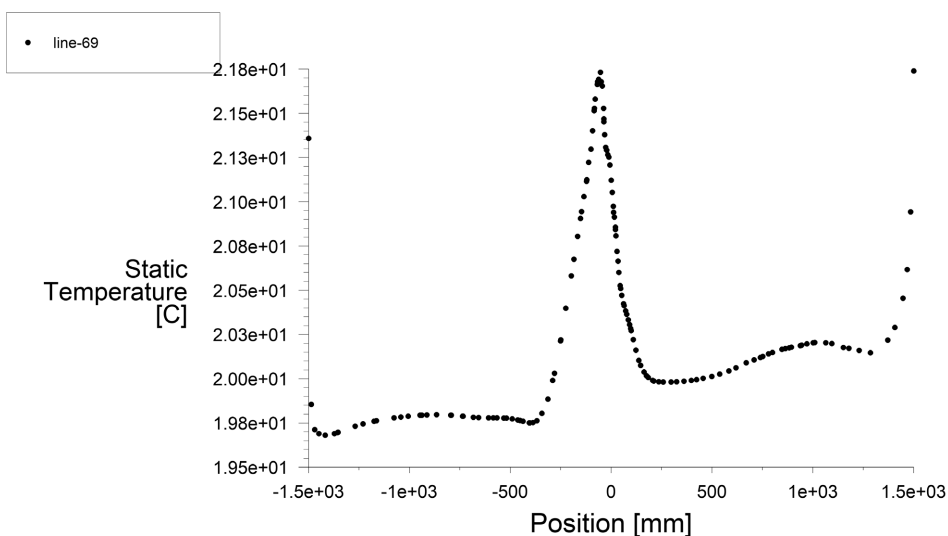
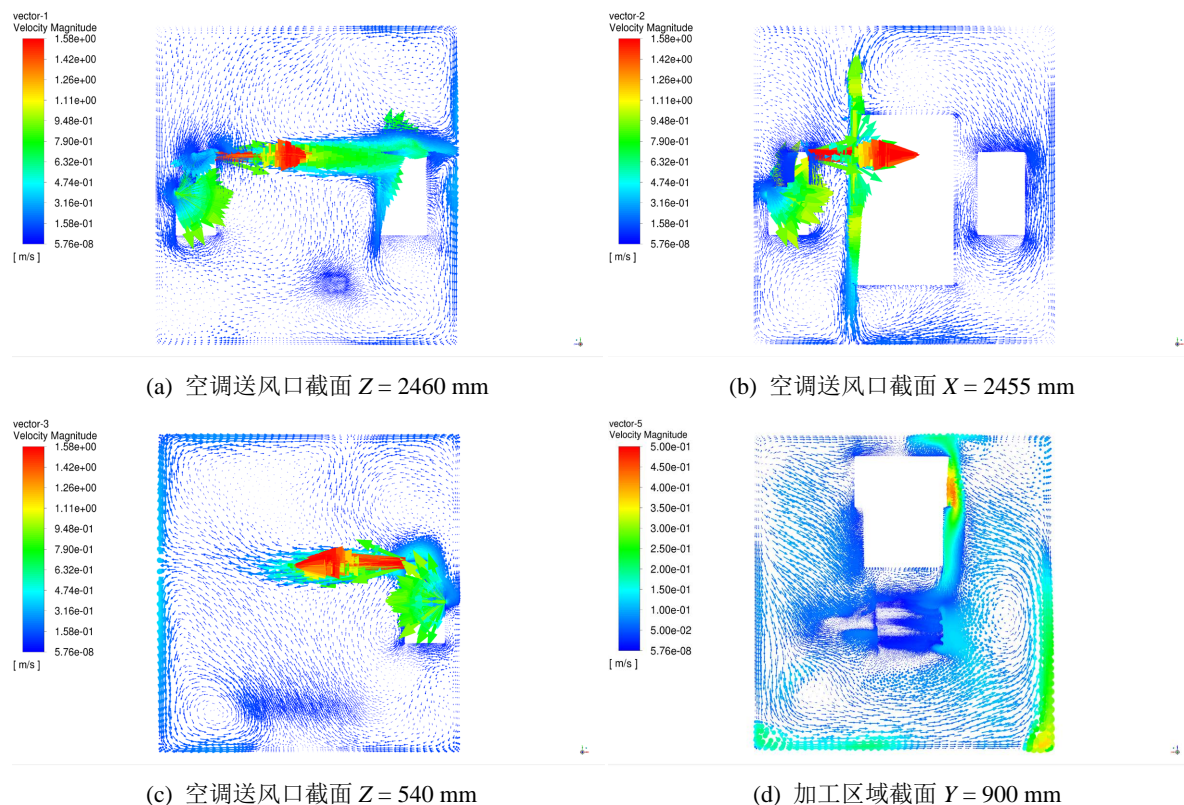


Figure 10. Linear temperature distribution above the machining area
图 10. 加工区域上方直线温度分布图

5.2.3. 速度矢量图分析

由图 11 可以看出空调送风口送风基本能射流至加工环境底部, 与环境内空气均匀混合。由图 11(a)~(c) 可以看出加工环境顶部区域仍有气流死区, 由于位置参数增大, 送风射流下沉空间增大, 比起位置参数 $Z = 60 \text{ mm}$ 时气流死区减少, 气流混合更加均匀。加工区域截面处风速也较为均匀, 基本维持在 0.5 m/s 以下。由于空调位置参数增大, 加工环境顶部部分区域风速偏高, 超过了 1 m/s 。



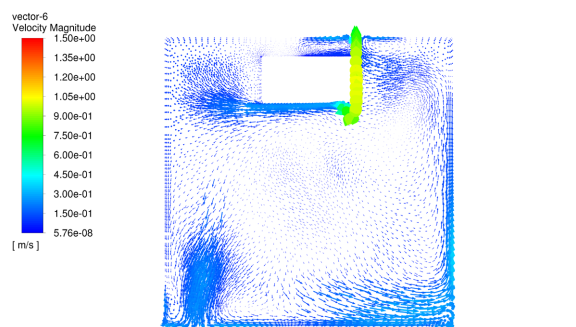
(e) 加工环境顶部截面 $Y = 1700 \text{ mm}$

Figure 11. The air supply speed is $v = 1.58 \text{ m/s}$, Position parameter $Z = 1000 \text{ mm}$

图 11. 送风速度 $v = 1.58 \text{ m/s}$, 位置参数 $Z = 1000 \text{ mm}$

当空调位置参数为 $Z = 1000 \text{ mm}$ 时, 加工环境整体基准温度比起位置参数 $Z = 60 \text{ mm}$ 时增大, 对磨头下方加工区域热量消除效果下降。加工环境内气流混合较为均匀加工区域风速较低, 处于 0.5 m/s 以下, 比起空调位置参数 $Z = 60 \text{ mm}$ 时人员舒适性增加。

6. 结论

1) 当送风温度为 18°C , 热流密度为 300 w/m^2 时, 可以得出随着送风速度的增大, 加工区域峰值温度降低, 加工区域温差范围降低, 加工环境温差减小的结论。这可能是因为随着送风速度的增大, 空调设备送风量也会随之增大, 相对应的加工区域被带走的热量也会增大, 所以加工区域温度会随着送风速度增大而减小。

2) 小型空调单独射流很难射流至加工环境底部, 若在加工环境底部有设置回风口对空调送风射流有较大提升, 能实现射流至底部。这可能是因为由于空调回风口具有回风的性质, 使得正对于回风口的送风能更好的射流至底部。当增大空调位置参数的时候, 即使加工环境底部没有回风口设置送风射流效果也有所提升。这可能是因为冷空气下沉的特性, 位置参数增大时相对应的下沉空间增大, 使送风射流效果更好。

3) 空调位置参数为 $Z = 60 \text{ mm}$ 时风口处于加工区域平面对加工区域降温效果最明显, 但风速会偏大, 处于该区域附近的人员可能会有吹风感。空调位置参数 $Z = 1000 \text{ mm}$ 时降温效果比起前者较差但加工区域平面风速较低, 加工环境顶部会有些位置风速偏大。随着位置参数增大降温效果降低, 加工区域风速降低。上述得出的结论能够为后续实验以及仿真中不同空调参数设置提供一些建议。

参考文献

- [1] 王美霞, 赖旭东, 胡敏志, 李伟宁, 刘丹华, 谭裕锋. 移动空调室内热舒适性实验研究[C]//2021 年中国家用电器技术大会. 2021 年中国家用电器技术大会论文集: 2021 年卷. 合肥: 《电器》杂志社, 2021.
- [2] 傅允准, 张旭. 某高精度恒温室合理气流组织的模拟研究[J]. 建筑科学, 2006(6): 146-149.
- [3] 朱楚珂, 刘刚, 甘长德. 送风速度对高精度微纳磨床温度均匀度影响的模拟探究[J]. 应用能源技术, 2018(9): 5-6.
- [4] 王江标, 肖红梅, 秦学礼. 高精度恒温实验室气流模拟分析[J]. 洁净与空调技术, 2013(4): 14-17.
- [5] Lu, Y.S., Cui, J.N. and Zhao, Y. (2019) Ultra-Precision Temperature Control of Circulating Cooling Water Based on Fuzzy-PID Algorithm. *International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation*, Kunming, 7 March 2019. <https://doi.org/10.1117/12.2512443>
- [6] Bojic, M., Yik, F. and Lo, T.Y. (2002) Locating Air-Conditioners and Furniture inside Residential Flats to Obtain Good Thermal Comfort. *Energy & Buildings*, **34**, 745-751. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00143-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00143-8)
- [7] Tai, K.J., Zhou, J.Q. and Kim, C.N. (2011) Numerical Investigation of Indoor CO_2 Concentration Distribution in an Apartment. *Indoor and Built Environment*, **20**, No. 1. <https://doi.org/10.1177/1420326X10390670>

-
- [8] 乔哲明. 空调器位置对室内气流组织的影响分析[J]. 低碳世界, 2022, 12(6): 85-87.
- [9] Jones, P.J. and Whittle, G.E. (1992) Computational Fluid Dynamics for Building Air Flow Prediction—Current Status and Capabilities. *Building and Environment*, **27**, 321-338. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(92\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0360-1323(92)90033-1)
- [10] 谭良才, 陈沛霖. 高大空间恒温空调气流组织设计方法研究[J]. 暖通空调, 2002, 32(2): 1-4.