

# 小型计算中心制冷系统的仿真模拟\*

白航, 徐诺, 姚清河

(中山大学应用力学与工程系, 广东 广州 510275)

**摘要:** 制冷系统是计算机中心优化管理的重要内容, 制冷效率的高低对内部设备的正常稳定运行产生直接的影响。采用PT100温度热敏电阻测量了制冷系统工作时某小型计算中心内部的温度变化, 并利用计算流体动力学(CFD)方法对其内部的流场和温度场进行了数值模拟。仿真结果与实测值的最大相对误差为0.22%, 吻合情况良好。计算结果显示, 计算中心内部的涡会减小其所在区域的降温速率, 降低率约25%; 与邻近区域相比, 涡存在区域的温度高。

**关键词:** 制冷; 优化; 气流组织; 涡

**中图分类号:** TU98 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2018)02-0108-08

## Numerical study of the cooling system in a small computer center

BAI Hang, XU Nuo, YAO Qinghe

(Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-Sen University,  
Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** The design of the refrigeration system is an important part of the optimization management of the computer center, which also has a direct impact on the stable operation of the internal equipment. In this paper indoor temperature was measured with the traditional measurement method, and the fluid field and temperature field were simulated by computational dynamics fluid (CFD) method. The numerical results are in agreement with the experimental results to within the relative error of 0.22%, which ensures the reliability and lays a foundation for the further analysis of the air distribution. The results indicate that the vortex has important influence on the temperature distribution; and cooling rate in the vortex region is lower about 25% compared with the adjacent.

**Key words:** cooling; optimization; air distribution; vortex

随着电子计算机产品集成化程度和运行速度的提高, 机房的热负荷问题变得不可忽视, 这对机房或数据中心的冷却系统提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。空调系统的成功设计, 依赖于对内部气流分布机制的理解和研究<sup>[3]</sup>。在温室效应以及相关问题越来越突出的今天, 针对7×24小时工作地制冷系统的优

化显得尤为重要。

国内外的学者采用计算流体动力学(CFD)技术, 对计算中心室内气流组织进行了大量研究, 并取得了良好的辅助设计效果。叶如刚<sup>[4]</sup>对一数据中心机房进行了仿真模拟研究, 并将模拟结果与实验影像进行对比, 验证了仿真模拟的可靠性。孙建

\* 收稿日期: 2017-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(11572356); NSFC-广东联合基金(NSFC2015-582)

作者简介: 白航(1992年生), 男; 研究方向: 流体力学; E-mail: hang\_bai@163.com

通信作者: 姚清河(1980年生), 男; 研究方向: 流体力学; E-mail: yaoqhe@mail.sysu.edu.cn

梅和刘云昭<sup>[5]</sup>采用 Airpak 软件,以某办公建筑空调房间为研究对象,对“上送上回”和“下送上回”两种送风方向进行了研究,得出了“下送上回”的方式更为合适该房间的结论。孙建丽和刘秀云使用 FLUENT 软件研究了空调送风角度对房间舒适性及能耗的影响<sup>[6]</sup>。刘敏等应用 Monte Carlo 法对空调办公室热环境进行了模拟研究<sup>[7]</sup>。黄海深等运用 CFD 软件对酒店房间内部空调的 2 种空气处理方案进行了对比研究,得出了“新风直送”方案更值得选用的结论<sup>[8]</sup>。Zong C 和 Zhang G 基于 CFD 技术对牲畜农舍漏缝地板系统的氨和废气浓度问题进行了模拟研究,发展并验证了一种更适合该类问题研究的多孔介质模型<sup>[9]</sup>。翟大海等<sup>[10]</sup>使用 CFD 方法研究了空调房内部空气流场的分布。Ascione 等研究了博物馆内小气候参数的空间均匀性,验证了暖通空调系统的必要性<sup>[11]</sup>。旷金玉等运用湍流模型和风口动量模型对某办公室的室内温度场和速度场进行了模拟研究<sup>[12]</sup>。和丽虎等利用 CFD 软件对混合通风与置换通风两种气流组织进行了数值模拟,得到了置换通风优于混合通风的结论<sup>[13]</sup>。董智超和娄君采用 Airpak 软件对某办公室夏季的空调环境进行了数值模拟<sup>[14]</sup>。沈向阳等对数据中心内部热区的气流组织进行了模拟和实测,得出了内部热区内的最佳空调送风风速和 SUN4900 服务器的最佳放置位置<sup>[15]</sup>。Steven J 采用大涡模拟的方法对一个自然通风的商业大厦内热空气流动进行了模拟研究,并就 ANSI / ASHRAE 标准 62.2 - 2010,即低层住宅建筑的通风和可接受的室内空气质量标准进行了讨论<sup>[16]</sup>。邝小磊<sup>[17]</sup>采用制冷量和主机功率两种计算模型对中央空调制冷量和能耗两个整体性能指标进行了研究和优化。

近年来,自用型机房即对社会经济和公共秩序影响较小、主要为单位或个人用于研究的等用途的 C 级及以下的小型计算中心迅猛发展,早已在高校、研究所以及公司研究部门等机构中普及。但是,伴随而来的就是其能耗的全面上涨<sup>[18-19]</sup>。目前,对于小型计算中心的制冷效率和空调系统气流组织的专门研究较少。本文对中山大学某已建成的小型计算中心进行了数值模拟和实验测量,研究了其内部气流组织特性、涡流产生机理及其对温度场的影响。

## 1 控制方程及计算方法

本研究中空调的平均出风速度为 3.25 m/s。为简化计算,本文作如下假设<sup>[20-21]</sup>:

- 1) 室内气体为不可压缩流体,且考虑 Boussinesq 假设,即认为流体密度变化仅对浮升力产生影响;
- 2) 室内气体属于牛顿质流体,流动为稳态湍流;
- 3) 假设流体的紊流粘性具有各向同性;
- 4) 忽略能量方程中由于粘性作用引起的能量耗散;
- 5) 不考虑渗透风的影响,即认为模拟房间内气密性良好;
- 6) 中心内人员停留时间短,照明设备只有在有人时才使用,二者的热量忽略不计;
- 7) 周围壁面做绝热处理且满足无滑移边界条件,不考虑墙壁和室内物体表面热辐射。

根据上述假设,计算模型的控制方程表述如下<sup>[22]</sup>:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \rho \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + \rho \bar{f}_i \quad (2)$$

式中, $\rho$ 为流体密度; $\mu$ 为运动粘性系数; $p$ 为压强; $f_i$ 为质量力强度; $\bar{u}_i$ 为雷诺平均速度; $u'$ 为脉动速度; $-\rho \partial \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。

上述方程组不封闭,引入湍流模式封闭方程组,本文采用标准  $\kappa - \varepsilon$  两方模型组<sup>[22-24]</sup>。

$\kappa$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

$\varepsilon$  方程为:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( u + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\tau \quad (4)$$

模型中  $\varepsilon$  的定义为:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \frac{(\partial u_i / \partial x_k)(\partial u_i / \partial x_k)}{\partial x_k} \quad (5)$$

湍动粘度  $\mu_t$  可表示成湍动能  $k$  和  $\varepsilon$  的函数:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

式中, $G_k$ 为湍流动能生成量; $G_b$ 为浮升力引起的湍流动能; $Y_M$ 为可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的

影响;  $C_1, C_2, C_3$  为经验常数。

## 2 模型建立及网格划分

### 2.1 研究对象

本文以中山大学某小型计算中心为模拟计算的工程实例,中心内部采用双空调平行送风系统。该建筑尺寸为  $7.20\text{ m} \times 6.70\text{ m} \times 2.75\text{ m}$ , 房间内部布置有  $1.50\text{ m} \times 0.75\text{ m} \times 0.85\text{ m}$  的三连桌子; 贴墙储物柜为  $1.80\text{ m} \times 0.45\text{ m} \times 1.80\text{ m}$ ; 房间中间偏左位置由下到上依次放置服务器及其关联设备。服务器尺寸为  $0.60\text{ m} \times 0.96\text{ m} \times 1.98\text{ m}$ , 关联设备尺寸分别为  $0.94\text{ m} \times 0.78\text{ m} \times 1.20\text{ m}$  和  $0.25\text{ m} \times 0.51\text{ m} \times 0.57\text{ m}$ ; 两台同型号独立工作的柜式空调贴墙放置, 与墙的夹角约为  $30^\circ$ , 尺寸为  $0.60\text{ m} \times 0.35\text{ m} \times 1.86\text{ m}$ 。

### 2.2 物理模型与网格划分

使用 ICFM CFD 建立计算模型并对模型进行网格划分, 对特殊边界进行加密后, 对网格进行光滑处理, 提高网格质量。考虑到计算精度、计算时间、存储容量和经济性等因素, 经过网格独立性测试之后, 最终选用的网格总数为 9 090 502, 总节点数为 1 556 117, 如图 1 所示。

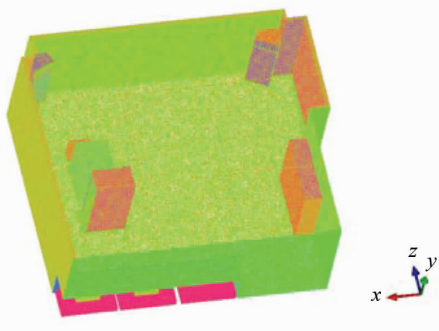


图 1 小型计算中心网格

Fig. 1 The mesh of small computer center model

## 3 测量实验

本文的测量实验主要分为两个部分, 包括相关模拟计算参数的采集和对计算中心内部温度的测量。

### 3.1 计算参数的采集及计算设定

使用 PT100 温度热敏电阻、数据处理器 (基于标准 Modbus 通讯协议)、德国 Testo405 - V1 热线风速仪 (精度 0.01) 等设备对空调风的温度、速度、以及室内温度等参数进行测量。在空调送风口均匀分布 9 个 PT100 温度热敏电阻进行实时测

量, 得出温度随时间变化曲线, 并拟合给出平均温度曲线函数:

$$f(t) = C_1 t^5 + C_2 t^4 + C_3 t^3 + C_4 t^2 + C_5 t + C_6 \quad (7)$$

其中:  $f(t)$  为空调送风口温度,  $t$  为空调工作时间,  $C_1 = 7.354 \times 10^{-8}$ ,  $C_2 = -1.242 \times 10^{-5}$ ,  $C_3 = 8.055 \times 10^{-4}$ ,  $C_4 = -2.197 \times 10^{-2}$ ,  $C_5 = -1.868 \times 10^{-2}$ ,  $C_6 = 305.200$ 。在空调出风口均匀布置测点, 如图 2 所示。使用 Testo 405 - V1 高精度热线风速仪, 测得空调出风口平均风速为  $3.25\text{ m/s}$ 。

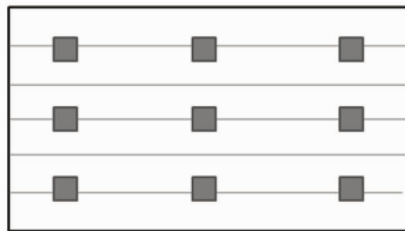


图 2 空调出风口测点分布示意图

Fig. 2 The inlet measurement points distribution

服务器背面有 18 个  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  的出风口, 如图 3 所示。出风温度会随空调降温而变化, 但变化幅度很小, 所以对实验测得的正常工作时服务器出风温度取平均值, 得到平均出风温度为  $30.5\text{ }^\circ\text{C}$ 。服务器背面同样有 18 个出风口, 用 Testo 405 - V1 风速仪测得每个风口中心的风速, 求得平均风速为  $6.8\text{ m/s}$ ; 出风口总面积为  $0.18\text{ m}^2$ , 服务器背面面积为  $0.81\text{ m}^2$ , 计算得到服务器背面的平均出风速度为  $1.51\text{ m/s}$ 。服务器进风口平均进风速度与背面平均出风速度一致。

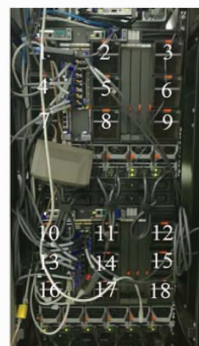


图 3 服务器背面出风口分布示意图

Fig. 3 The small outlets distribution of the server

两台空调送风面和服务器出风面设为速度入口, 空调下方回风口设定为 opening 边界, 外界温

度定义为 298 K。服务器进风面设为压力入口，压强为标准大气压；其他边界设为无滑移墙。空调开始工作时室内温度为 303.65 K。

### 3.2 测点布置及温度测量

选取工作区  $H = 1.72$  m 处布置 8 个控制点，测点 1-8 由后到前依次排列，如图 4 所示。首先，服务器正常工况下测量空调开始工作 1 min 后各控制点温度；考虑服务器工作状态对内部环境的影响，关闭空调使服务器处于正常工作状态，人员撤离让服务器维持工作状态 5 h，然后对内部室温和服务器出风温度进行测量。最后，验证室外温度变化对室内环境的影响。

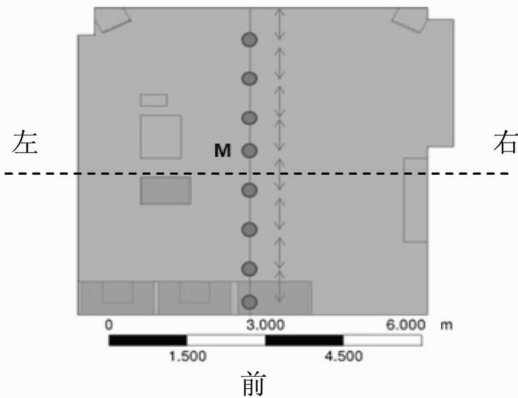


图4 测点分布图

Fig. 4 Measuring point distribution

## 4 计算结果分析

### 4.1 模拟值的有效性分析

图 5 为实际测量温度与模拟温度的变化曲线。其中，8 个测点的实测值与模拟值各不相同，误差在 0.045 ~ 0.669 K 之间，但各点的变化趋势基本一致。测点 2 误差值最大，其相对误差为 0.22%。总的来说，模拟值与实测值相吻合，误差均在合理区间。因此，本文中采用的模拟方法和模型可以有效模拟和预测中心内部内流场和温度场分布情况，模拟结果可靠。

### 4.2 结果与讨论

不同时刻，高  $H = 1.72$  m 处的内流场和温度场如图 6 所示。根据实验数据，在 0.5 h 内内部的温度呈现出持续下降的趋势，但没有降低到一个稳定值。在强速冷模式下，取降温效果最为明显的降温初始时段（1 min 内）进行模拟。

图 4 中的测点将整个内部分为前后 2 个半区，靠桌一端为前半区，前后半区均包含 4 个测点。从

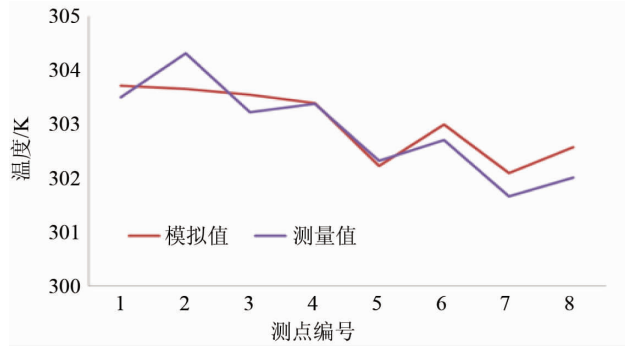


图5 温度模拟值与实测值的比较

Fig. 5 Comparison between simulated and measured values of temperature

图 6 中可以看出，两空调送出的强制冷风会在前半区交汇，形成左右两个较稳定的回旋气流，促使整个工作区域的空气流动降温。然而，由于送风角度问题，在后半区空调的后侧出现了送风盲区，接收不到空调送出的冷风，该区域的降温主要依靠与低温区域的热量交换来进行。结合图 5-6 可以看出，前半区较之后半区温度低，降温速度快，降温时间短；而后半区在降温过程中存在一定的滞后性<sup>[25]</sup>。前半区中，气流与围护结构相作用的区域和气流交汇区容易产生涡流，这些涡旋区域的产生不利于室内空气的热量交换与排除。

由于冷风无法送达，后半区的温度、流场受周围区域空气温度的影响，流场较为复杂、涡旋的产生和消散变化很快。如图 6 (e) 所示，只有当后半区周边区域的温度降低到一定程度时，后半区与附近区域的热交换作用才开始减少。所以，周边区域特别是前半区的温度对后半区流场和温度场的影响较大。另外，可以观察到，因为空调送风和墙壁的限制，在后半区突出区域会形成涡流，且涡流持续时间较长，同样不利于热量的排出。

随时间发展，整个工作区域呈现温度逐渐下降的趋势并且局部区域还会伴随短暂升温的情况。取测点 4（即图 4 中 M 点），进行具体分析。如图 7 所示，M 点温度符合总体变化规律：其温度随时间下降，但伴有短暂连续的波动升温时段。

$t = 21, 35, 40, 47$  s 时，M 点中心界面上的温度云图，如图 8 所示。从图 8 中可以看出，测点 4（红色十字显示）附近区域的温度变化受到其周围流场影响，呈现出一定的周期性规律。开始降温时，工作区被许多杂乱分布的涡分隔成若干部分，没有覆盖整个工作区域的大范围涡旋。靠近空调强制送风区域的局部区域的温度开始时持续降低。然

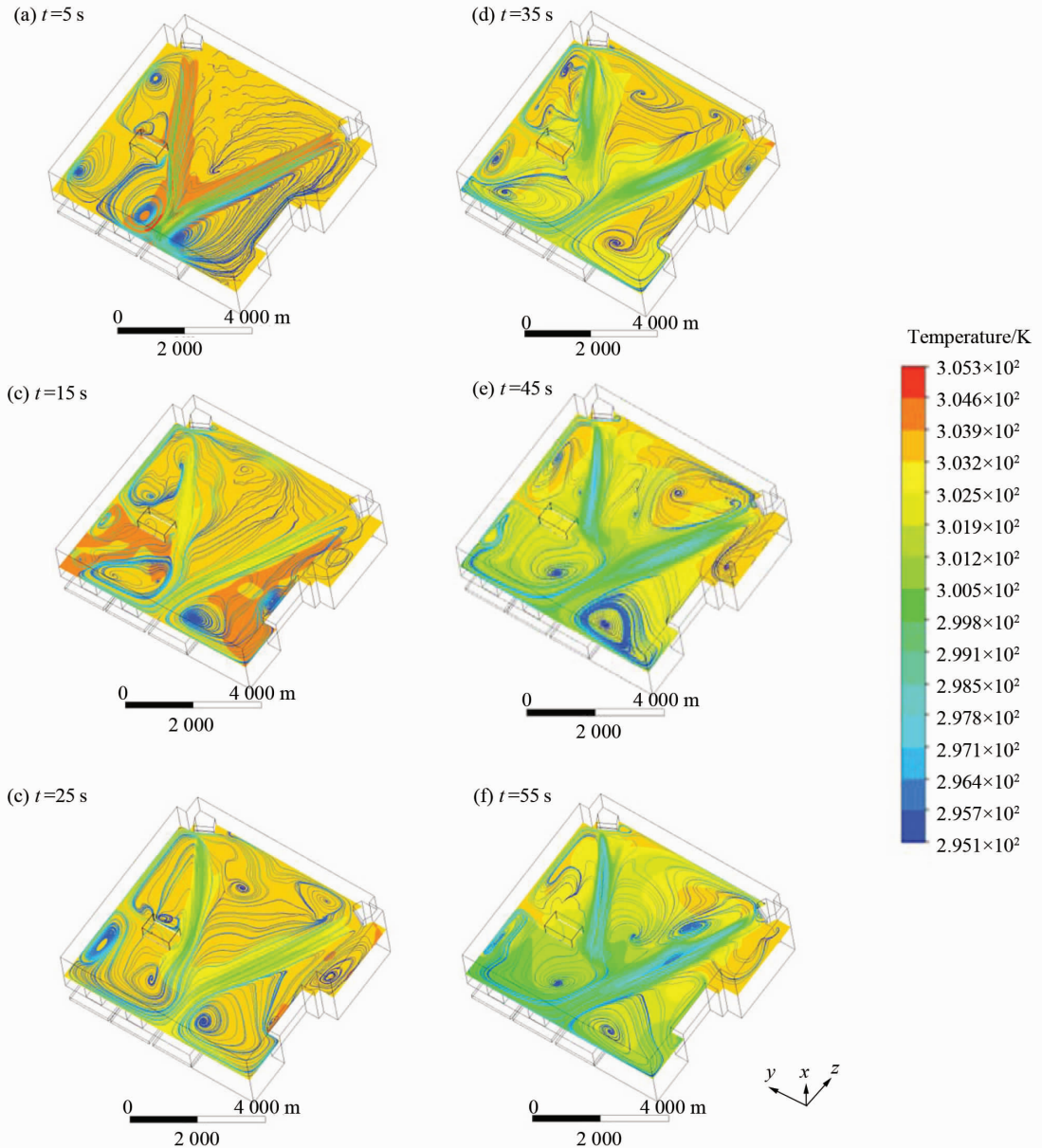


图 6 内部温度云图

Fig. 6 Temperature contour

后,工作区中各个局部区域的涡开始消散,并形成绕整个工作区的大范围涡流,降温减慢且出现波动和短暂升温的现象,这是由于大范围的涡流将整个区域纳入降温范围并且温度分布不均造成的。接着,涡分割工作区、局部降温和大范围回旋气流控制整体区域降温的现象交替出现。此外,局部区域降温时,局部小涡范围区域的温度比整体平均温度要低,这种温度的不均造成了温度下降过程中的升温现象。且,大范围回旋气流的存在也不利于室内热量以及污浊气体的快速排出。

图 7 中,依斜率的不同整个降温曲线划分为 4 个降温段。4 个降温段所对应的时间为第 20 - 25

s、第 26 - 34 s、第 39 - 46 s 和第 50 - 56 s。在  $t = 22, 28, 40$  和  $52$  s 四个典型时刻  $M$  点的温度云图,如图 9 所示。

图 7 中,第 4 个时段(第 50 - 56 s)的降温速率最大,第 3 个时段(第 39 - 46 s)次之,第 2 个时段(第 26 - 34 s)最小。通过图 9 可知,第 4 个时段测点 4 附近没有涡,第 3 个时段测点 4 附近有涡而距离较远,第 2 个时段测点 4 距离涡比较近。因此,在降温过程中涡流对其所在区域的降温速率有着较大影响。在涡流存在的区域,不利于热量以及污浊气体的快速排出,其温度降低速率也较邻近区域慢<sup>[2, 21]</sup>。这与之前的分析和判断相吻合。

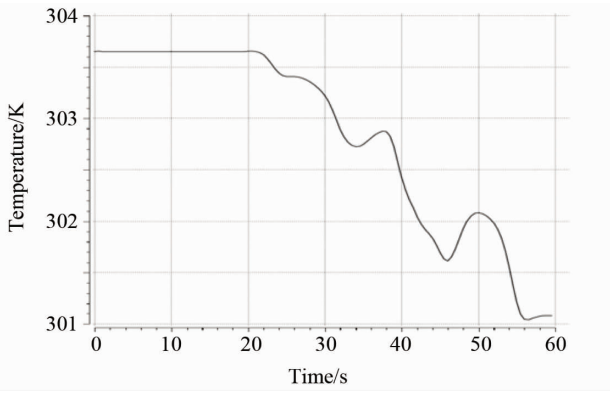


图 7 测点 4 温度随时间变化图

Fig. 7 Temperature profile at point 4

## 5 结 论

本文采用 CFD 技术对小型计算中心内部的气体流动进行了仿真模拟研究，主要结论有：

1) 内部气流组织受到围护结构的限制作用和气流之间的相互碰撞易产生散乱的涡流和贴壁制冷盲区。随时间发展，气流组织以绕工作区的大范围涡流和多个局部小涡的形式交替出现；涡旋对工作区的温度场发展造成了较大影响，局部温度分布不均会造成了短暂升温的现象。

2) 从温度分布图中可以观察到：后部外凸区域温度较高，降温较慢。这是由于这里有涡产生，空气滞留时间较长、难以参与外界流动、不能及时更新造成的。此外，在降温过程中，涡对其所在区

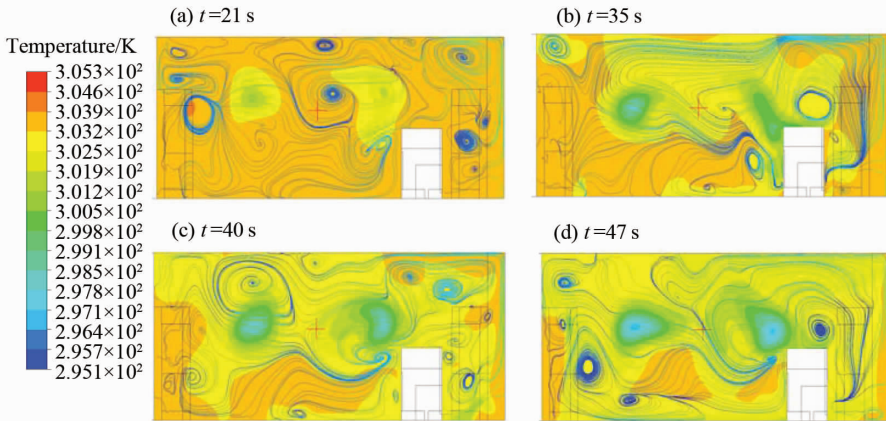


图 8 温度变化转折时刻的温度云图

Fig. 8 Temperature contour of turning point

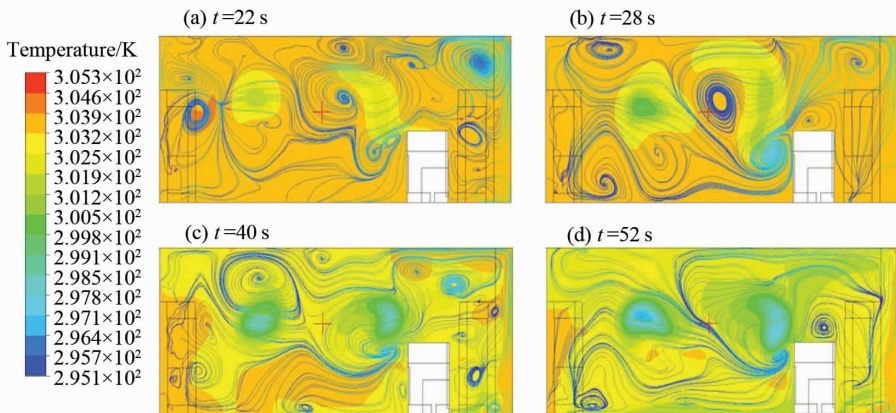


图 9 测点 4 截面的温度云图

Fig. 9 Temperature contour of cross section of the measuring point 4

域的降温速率影响很大;在涡流存在的区域,其内部降温速率相比邻近区域慢,这些区域温度也往往比邻近区域温度高。

3) 为了提高内部制冷效率,计算中心应尽量减少狭小区域和不规则区域的存在,以免在角落区域产生回旋涡流,造成空气滞留、产生局部过热。空调的布置也要充分避免出现接收不到空调冷风的内部盲区,减缓降温速率。

## 参考文献:

- [1] 潘登. 小型数据中心空调系统节能优化研究 [J]. 智能建筑, 2016, 11(195): 57-60.  
PAN Deng. Study on energy-saving optimization of air-conditioning system in small data center [J]. Intelligent Building, 2016, 11(195): 57-60.
- [2] 顿喆, 秦赞, 关欣. 基于 Fluentairpak 的数据中心机房的气流组织模拟优化 [J]. 建筑节能, 2015, 42(5): 27-33.  
DUN Zhe, QIN Bin, GUAN Xin. Simulation optimization and evaluation analysis of the data center airflow distribution [J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(3): 27-33.
- [3] KARKI K C, PATANKAR S V. Airflow distribution through perforated tiles in raised-floor data centers [J]. Building & Environment, 2006, 41(6): 734-744.
- [4] 叶如刚. CFD 仿真建模技术在数据中心机房节能中的应用 [J]. 工程建设标准化, 2015(5): 244-254.  
YE Rugang. Application of CFD simulation modeling in energy saving of data center computer room [J]. Standardization of Engineering Construction, 2015(5): 244-254.
- [5] 孙建梅, 刘云昭. 送风方式对某办公建筑室内舒适度的影响 [J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(4): 15-19.  
SUN Jianmei, LIU Yunzhao. Impact of air supply on indoor comfort of an office building [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(4): 15-19.
- [6] 孙建丽, 刘秀玉. 基于 FLUENT 的空调送风角度对房间舒适性及能耗的影响 [J]. 建筑节能, 2015, 43(4): 21-28.  
SUN Jianli, LIU Xiuyu. Effect of air supply air supply angle on room comfort and energy consumption based on FLUENT [J]. Building Energy Efficiency, 2015, 43(4): 21-28.
- [7] 刘敏, 李明海, 卢明, 等. 空调办公室热环境数值模拟研究 [J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(s1): 28-31.  
LIU Min, LI Minghai, LU Ming, et al. Study on numerical simulation of thermal environment in air conditioning office [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(s1): 28-31.
- [8] 黄海深, 吴国珊, 陈洪杰, 等. 酒店房间空调 2 种送新风方式的数值模拟及舒适性分析 [J]. 流体机械, 2015, 43(1): 77-81.  
HUANG Haishen, WU Guoshan, CHEN Hongjie, et al. Two kinds of fresh air supply in the hotel room air conditioning simulation and comfort analysis [J]. Fluid Machinery, 2015, 43(1): 77-81.
- [9] ZONG C, ZHANG G. Numerical modelling of airflow and gas dispersion in the pit headspace via slatted floor: comparison of two modelling approaches [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2014(109): 200-211.
- [10] 翟大海, 赵金辉, 张力隽. 空调房间空气流场分布的数值模拟 [J]. 节能技术, 2013, 31(5): 420-425.  
ZHAI Dahai, ZHAO Jinhui, ZHANG Lijun. Numerical simulation of air flow field distribution in air-conditioned room [J]. Energy Conservation Technology, 2013, 31(5): 420-425.
- [11] ASCIONE F, BELLIA L, CAPOZZOLI A. A coupled numerical approach on museum air conditioning: energy and fluid-dynamic analysis [J]. Applied Energy, 2013, 103(1): 416-427.
- [12] 旷金玉, 罗卓英, 周猛, 等. 百叶风口空调房间室内热环境的数值模拟研究 [J]. 科学技术与工程, 2012, 12(2): 353-357.  
KUANG Jinyu, LUO Zhuoying, ZHOU Meng, et al. Numerical simulation of indoor thermal environment in air-conditioned room with blinds [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(2): 353-357.
- [13] 和丽虎, 罗卓英, 旷金玉, 等. 会议室空调气流组织形式的数值模拟研究 [J]. 节能技术, 2012, 30(2): 111-115.  
HE Lihu, LUO Zhuoying, KUANG Jinyu, et al. Research on numerical simulation of airflow organization in conference room [J]. Energy Conservation Technology, 2012, 30(2): 111-115.
- [14] 董智超, 娄君. 某办公室热环境 CFD 模拟研究 [J]. 制冷与空调(四川), 2011, 25(1): 102-106.  
DONG Zhichao, LOU Jun. Research on thermal environment CFD simulation in an office [J]. Refrigeration & Air Conditioning (Sichuan), 2011, 25(1): 102-106.
- [15] 沈向阳, 陈嘉澍, 吕金虎, 等. 数据机房热区内气流组织的数值模拟及优化 [J]. 节能技术, 2011, 29(3): 233-237.  
SHEN Xiangyang, CHEN Jiashu, LUE Jinhu, et al. Numerical simulation and optimization of air flow in hot

- area of data room [J]. *Energy Conservation Technology*, 2011, 29(3): 233 - 237.
- [16] EMMERICH S J. Standard 62.2 update [J]. *Ashrae Journal*, 2011, 53(1): 62 - 65.
- [17] 邝小磊. 一种新型空调系统优化指标的计算模型 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(s1): 25 - 28  
KUANG Xiaolei. A new computation model for air conditioning system optimization index [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(S1): 25 - 28.
- [18] 黄群骥. 对《电子信息系统机房设计规范》GB50174-2008 中几个重要参数的理解 [J]. *机房技术与管理*, 2010(5): 6 - 9.  
HUANG Qunji. Understanding of some important parameters in GB50174 - 2008 "Code for Design of Electronic Information System Room" [J]. *Room Technology and Management*, 2010(5): 6 - 9.
- [19] 中华人民共和国电子工业部. 电子计算机机房设计规范 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 5  
Ministry of Electronics Industry of the PRC. Code for design of electronic information system room [M]. Beijing: China Planning Press, 2008: 5.
- [20] 魏蕤, 简弃非, 杨苹. 空调布局对数据机房内热环境影响的试验与仿真研究 [J]. *暖通空调*, 2010, 40(7): 91 - 94.  
WEI Rui, JIAO Qifei, YANG Ping. Experimental and simulation study on the effect of air-conditioning layout on thermal environment in data room [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2010, 40(7): 91 - 94.
- [21] YANG L, YE M, HE B J. CFD simulation research on residential indoor air quality [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472(8): 1137 - 1144.
- [22] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 272.  
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis-principles and applications of CFD software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 272.
- [23] 任志安, 郝点, 谢红杰. 几种湍流模型及其在 FLUENT 中的应用 [J]. *化工装备技术*, 2009, 30(2): 38 - 40.  
REN Zhian, HAO Dian, XIE Hongjie. Several turbulence models and their applications in FLUENT [J]. *Chemical Equipment Technology*, 2009, 30(2): 38 - 40.
- [24] 李文华, 苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用 [J]. *水泵技术*, 2006(4): 39 - 40.  
LI Wenhua, SU Mingjun. Commonly used turbulence model and its application in FLUENT software [J]. *Pump Technology*, 2006(4): 39 - 40.
- [25] CHO J, KIM B S. Evaluation of air management system's thermal performance for superior cooling efficiency in high-density data centers [J]. *Energy & Buildings*, 2011, 43(9): 2145 - 2155.