

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2021.01.015

数据中心列间空调气流组织分析与优化

邱玉英¹, 邱琳祯^{2,3}

(1.福建船政交通职业学院,福建 福州 350007;2.福建省建筑科学研究院有限责任公司,福建 福州 350108;
3.福建省绿色建筑技术重点实验室,福建 福州 350108)

摘要:以小型数据服务机房为研究对象,对机房使用列间空调后的气流组织进行了分析。利用 CFD (流体动力学) 软件对房间内的气体流动情况进行模拟,绘制温度、矢量风速计算云图,对比了冷通道封闭前后房间温度场、风场的变化,分析封闭前后室内换热情况。研究发现,冷通道封闭后离地 0.5、1.5 m 处平均温度较封闭前平均温度下降 2℃ 左右,机柜顶面下降 1℃ 左右。封闭冷通道能够优化气流组织,有效避免气流短路,机房内局部热点消失,无效换热减少。

关键词: 列间空调;气流组织;冷通道;数据机房

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)01-0084-05

Analysis and optimization of airflow distribution in the data center

QIU Yuying¹, QIU Linzhen^{2,3}

(1.Fujian Chuanzheng Communications College, Fuzhou 350007, China;

2.Fujian Academy of Architectural Sciences Co., Ltd, Fuzhou 350108, China;

3.Fujian Key Lab of Green Building Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: With the small data service room as the research object, the airflow distribution of the room after using in-row air conditioning was analyzed. By using CFD (hydrodynamics) software, the airflow in the room was simulated, the temperature and vector wind speed calculation clouds were drawn. The temperature field and flow field before and after the cold channel closure were compared, and the indoor heat transfer was analyzed. Results show that after closing the cold channel the average temperature at 0.5 m and 1.5 m above the ground is about 2 °C lower than before, and the top of the cabinet is about 1 °C lower. Closing the channel can optimize the airflow distribution and avoid the short circuit of airflow effectively. Meanwhile, the local hot spots disappear, and invalid heat transfer is reduced.

Keywords: in-row air conditioning; air distribution; cold channel; data room

随着物联网的发展和 5G 技术的到来,数据机房的数量与日俱增,机房能耗高的问题也随之凸显,据统计空调设备在数据中心总耗能中占到了 40.2%^[1],如何有效解决制冷节能问题成为了中心供电系统重点解决的问题^[2]。列间空调由于可靠性高、灵活性强的特点,目前在高热密度数据中心广泛使用。与传统的上送下回空调制冷方式相比,列间空调采用水平送风,送回风口距离

缩短,减少沿程损耗,具有高效节能的特点^[3-4]。

为了使设备达到高效率冷却、不产生局部过热现象,冷空气必须有组织地进入设备的内部进行热交换,因此合理的气流组织是节能的关键^[5]。不少学者开展了相关研究,文献[6]利用了 Fluent 对某数据中心机房的具体情况模拟,提出建立冷热通道和改进冷热通道两种气流组织优化;文献[7]针对机房服务器散热量大的

收稿日期: 2021-02-10

第一作者简介: 邱玉英(1967—),女,福建莆田人,副教授,研究方向:建筑智能化。

特点及传统封闭冷通道存在的问题,提出适合该机房的气流方案,通过模拟分析得出封闭热通道形式效果更佳;文献[8]通过 CFD 模拟软件 6SigmaRoom 对列间空调系统前送后回的气流组织形式以及室内热工环境进行模拟,根据模拟流线、速度分布、温度分布来检验室内是否存在局部热点问题;文献[9]以一个实测的典型数据中心为对象,针对机房气流混乱、冷热分布不均和局部热点问题提出 3 个气流组织优化措施,并进行模拟对比分析;文献[10]则提出,冷通道封闭技术可以优化机房气流组织,结果表明封闭后可以将空调送风温度由 18℃ 提高至 22℃,每年可节约约 10⁵ kWh。

本课题以福州某数据中心服务机房为研究对象,结合列间空调的特点,利用 PHOENICS 软件对机房内的气流组织进行模拟计算,通过对比不同平面上的温度、风速计算结果,分析封闭冷通道前后机房内流场变化。RNG KE model 是计算流体力学(CFD)中常用的经典数学模型,根据大量工程经验得知该模型较适用于计算室内气流组织。本文采用的 PHOENICS 软件是一款常用于模拟风场的 CFD 软件,本次应用该软件模拟的结果都是以 RNG KE model 作为基础模型。

1 研究对象

选取福州某公司小型数据服务机房为研究对象,该机房面积 65.6 m²,层高 3 m,共 22 个机柜,配备 4 台列间空调,单台送风量为 6 500 m³/h,制冷量为 41.3 kW。机柜分两排布置,每排 11 个。列间空调放置于机柜之间,采用水平送风的送风方式向机柜间通道送风,前送后回,从而形成冷通道。由于机柜风扇和冷热压差的影响,气流向机柜与墙通道流入,形成热通道后汇入空调回风口。

2 模型建立

2.1 物理模型建立

将机房简化为 11.7 m×7.05 m×3.0 m 的方形空间,机柜根据实际尺寸简化为 605 mm(宽)×1 250 mm(深)×2 150 mm(高)长方体,列间空调根据实际尺寸简化为 600 mm(宽)×1 100 mm(深)×2 000 mm(高)长方体。机柜分两排布置,每排 11 个。列间空调共 4 台,分插在机柜中间。空调送风口向里,将冷空气送至两排机柜间通道,通道长 7.855 m,两排机柜间隔 1.2 m。简化后机

房物理模型示意图如图 1 所示。

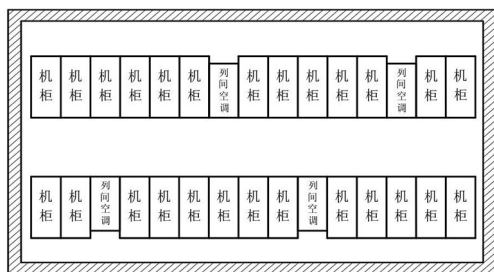


图 1 机房布置示意图

Fig.1 Layout scheme of the data room

2.2 数学模型建立

机柜的热交换主要为对流换热,为了简化研究,忽略热辐射对温度场的影响。采用 RNG KE-model 模型进行计算。RNG KE model 是标准 KE model 的改造形式。机房气流的流动形式为湍流,湍流的瞬时值满足连续性方程。

为了简化计算,对流体做出假设如下:

- (1) 假设流动空气为不可压缩流体
 - (2) 假定流体稳态定常流动
 - (3) 流动空气为牛顿流体,并且忽略耗散项
- 因此,流体计算的主要方程可简化为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程组:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v u) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w u) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (2)$$

能量守恒方程:

模型中 κ 代表湍流脉动动能, ε 指的是湍流脉动动能耗散率。

湍动能 κ 方程:

$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \\ &C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \end{aligned} \quad (4)$$

2.3 边界条件设置

为了简化计算,将室外温度设定为 35 ℃,维护结构传热系数为 0.5 W/(m² · K)。机柜空调采用水平送风,送风口风速设定为 2 m/s,送风温度为 16.8 ℃。机房内主要发热源为数据机柜,单个数据机柜散热量为 1.75 kW。

3 气流组织模拟与分析

列间空调是采用前送后回的方式进行送风,将冷风吹至冷通道内,由冷热通道间的压差及机柜内风扇迫使气流流经机柜内部至热通道,通过对流的方式带走机柜发热量。目前,绝大部分数据服务机房内都实现了冷、热通道隔离,但有部分机房内未对通道进行有效封闭。为了研究封闭通道对气流组织的影响,现对机房内两种布置方式进行对比分析:第一种布置方案中,两排列间空调面对面布置,空调采用水平送风方式,将冷风送至两列机柜间形成冷通道,通道敞开无封闭措施;第二种方案中,两排列间空调面对面布置,空调采用水平送风方式,冷风送至两列机柜间形成冷通道,冷通道上部及两端封闭。

利用 PHOENICS 软件对机房的两种布置方式进行气流组织模拟,着重分析离地面 0.5、1.5 m 及机柜顶面处的温度与风速。

3.1 温度场分析

从两个方案的温度场计算云图可见,冷通道未封闭前,离地 0.5、1.5 m 处,机房整体平均温度为 26.3 ℃、26.1 ℃,房间西南角出现了局部温度过高的问题,部分区域温度高达 29.5 ℃。东北角机柜与墙的通道中的部分区域平均温度仅为 19.5 ℃左右,说明空调吹出的冷气没有充分带走机柜的发热量。对冷通道的上部和两端增加隔板进行封闭后,离地 0.5 m 及 1.5 m 处的温度场云图如图 2、图 3,可以发现,封闭后冷通道整体温度明显下降,其余通道温度上升,形成明显的“冷热隔离”。两处的机房整体平均温度为 24.1 ℃、24.5 ℃,较封闭前略有降低,空调的制冷效果有所提升。并且封闭后温度整体呈规律性分布,未出现局部温度过高或过低的情况。图 4 是封闭后机柜顶面高度处的温度场云图,未封闭前该高度处平均温度约为 25.5 ℃,封闭后约为 26.2 ℃。由于冷通道顶部被封闭,冷气流必须绕过机柜才能流至外侧,与机柜表面进行了充分的换热。而敞开通道有部分

冷气会直接越过机柜到外侧通道,使得该截面的平均温度低于封闭后,也说明敞开通道使得冷气换热不够充分。

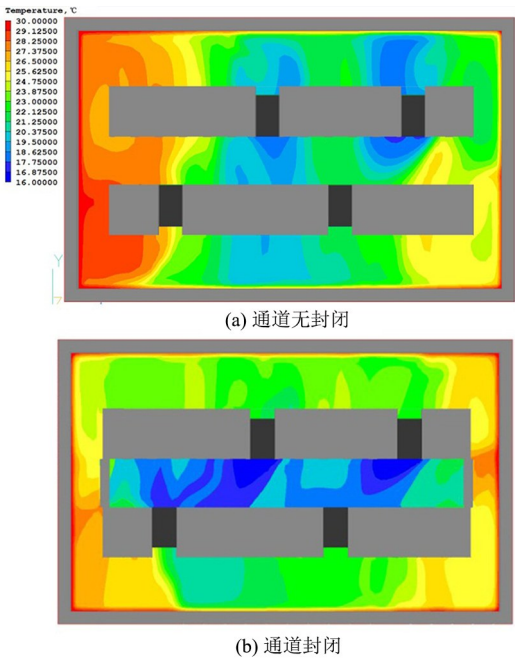


图 2 离地 0.5 m 处温度场云图
Fig.2 Cloud map of temperature field at 0.5 m above the ground

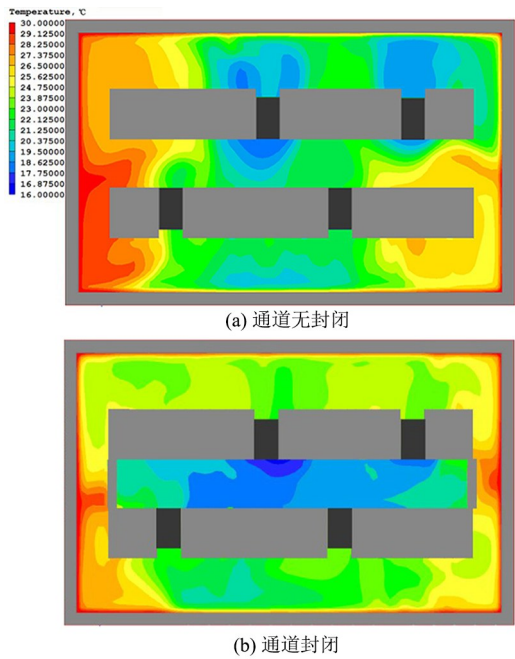


图 3 离地 1.5 m 处温度场云图
Fig.3 Cloud map of temperature field at 1.5 m above the ground

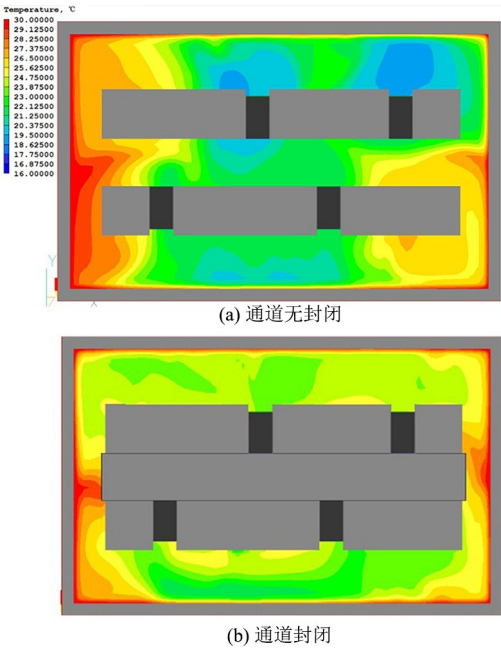


图 4 机柜顶部温度场云图

Fig.4 Cloud map of temperature field on top of the cabinet

3.2 风场分析

从两个方案的气流速度矢量计算云图可以看出,封闭前气流整体流向紊乱,尤其在西南角出现了明显的涡旋流以及冷风短路的问题,导致该处热量集聚,形成局部热点。机柜顶部气流流速大,有涡旋流存在,流线混乱,不利于机柜的有效换

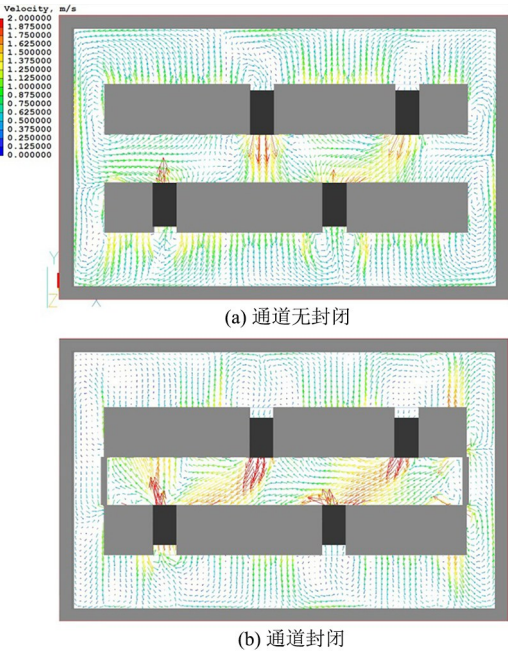


图 5 离地 0.5 m 处风速场云图

Fig.5 Cloud map of wind speed field at 0.5 m above the ground

热。封闭后离地 0.5、1.5 m 处及机柜顶面的风速场云图如图 5-图 7,气体流向明显规律化,从空调送风口吹出后经过机柜处,经过充分换热后回到空调回风口。整体没有出现明显的涡旋区,没有出现局部温度过高的现象。

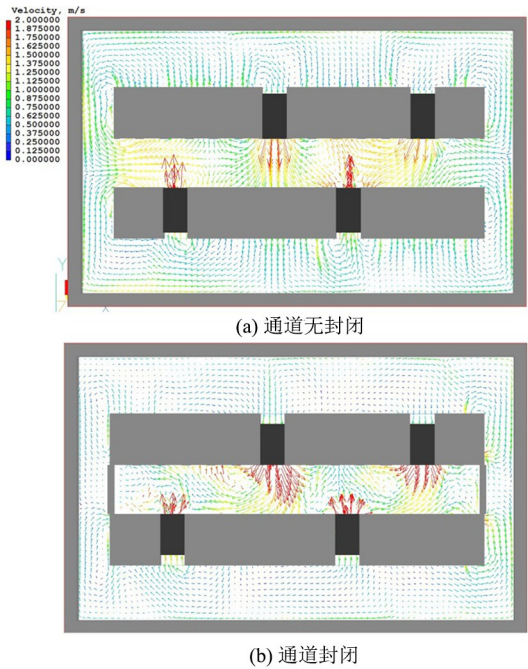


图 6 离地 1.5 m 处风速场云图

Fig.6 Cloud map of wind speed field at 1.5 m above the ground

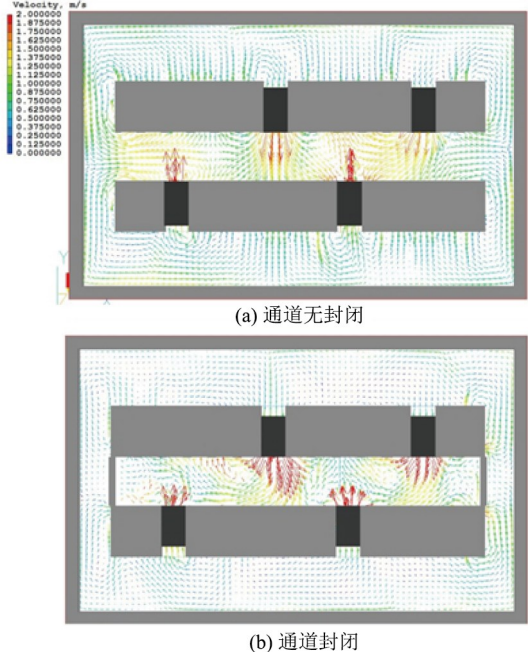


图 7 机柜顶部风速场云图

Fig.7 Cloud map of temperature field on top of the cabinet

4 结论

本课题以数据服务机房为对象,对封闭冷通道前后的气流组织进行了计算分析,对比了 3 个不同高度处的温度场与风速场,发现:

1)通道封闭前房间内气流组织混乱,冷风与机柜换热不充分,热通道中冷热气流掺混,并出现

局部热点。

2)冷通道封闭后机房内整体温度下降 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,封闭后冷通道内整体温度下降,冷热通道温差明显,局部热点消失。

3)冷通道封闭后气流组织得到明显的优化,避免了气流短路,涡旋流消失,无效制冷减少。

参考文献:

- [1] 周海珠, 吕天文, 张慧鑫. 数据中心节能技术及发展方向分析[J]. 建设科技, 2020(14):27-30, 33.
- [2] 于江涛. 数据中心制冷节能技术应用分析[J]. 节能, 2019, 38(7):64-65.
- [3] 易伶俐. 不同空调送风方式在数据中心的应用[J]. 制冷与空调, 2016, 16(3):8-9, 7.
- [4] 原世杰. 数据中心用列间空调的优化布局方案研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2017, 30(5):82-86.
- [5] 高彩凤, 于震, 吴剑林. 典型数据机房热环境分析及气流组织优化[J]. 暖通空调, 2013, 43(9):101-106.
- [6] 顿喆, 秦赟, 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, 43(3):27-33.
- [7] 李鹏魁, 傅允准. 机房列间空调气流组织数值模拟分析[J]. 上海工程技术大学学报, 2018, 32(3):244-249.
- [8] 刘芳, 王志刚. 某数据中心室内空调气流组织的模拟研究[J]. 建筑节能, 2016, 44(10):11-17.
- [9] 黄翔, 李婷婷, 刘凯磊, 等. 乌鲁木齐某数据中心热环境分析及气流组织优化研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(1):104-108.
- [10] 高月芬, 高亭亭. 数据中心冷通道封闭对室内热环境影响的模拟研究[J]. 制冷与空调, 2019, 19(3):21-23, 28.

(责任编辑:方素华)

(上接第 83 页)

注记 1.1 的证明:

由于条件 (V_2) 比条件 (V_1') 更弱,仿照定理

1.1 的证明,容易得到该注记的证明。

注记 1.2 的证明:

由于条件 (V_2) 比条件 (V_1) 更弱,仿照定理

1.1 的证明,也同样容易得到该注记的证明。

参考文献:

- [1] GILBARG D, TRUDINGER N S. Elliptic partial differential equations of second order[M]. Heidelberg: Springer, 1998.
- [2] ADAMS R, FOURNIER J. Sobolev space[M]. 2nd ed. Singapore: Elsevier, 2009.
- [3] LIU C, ZHENG Y. Existence of nontrivial solutions for p-Laplacian equations in \mathbf{R}^N [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2011, 380: 669-679.
- [4] LIU Z, WANG Z. On the Ambrosetti-Rabinowitz superlinear condition[J]. Advanced Nonlinear Studies, 2004, 4(4): 563-574.
- [5] 郭玉霞, 唐仲伟, 汪路顺. 带深井位势双调和方程的解[J]. 中国科学(数学), 2019, 49(1): 21-38.
- [6] ZOU W, SCHECHTER M. Critical point theory and its applications[M]. New York: Springer, 2006.
- [7] BARTSCH T, WANG Z. Existence and multiplicity results for some superlinear elliptic problems on \mathbf{R}^N [J]. Communications in Partial Differential Equations, 1995, 20(9/10): 1725-1741.
- [8] BARTSCH T, PANKOV A, WANG Z. Nonlinear schrödinger equations with steep potential well[J]. Communications in Contemporary Mathematics, 2001, 3(4): 549-569.
- [9] AUTUORI G, PUCCI P. Existence of entire solutions for a class of quasilinear elliptic equations[J]. Nonlinear Differential Equations and Applications, 2013, 20(3): 977-1009.

(责任编辑:陈雯)