

数据中心封闭冷通道机柜垂直方向流量 分配不均匀性的研究

郭浩博, 陶文铨

(西安交通大学西安市数据中心节能与低碳技术重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为探究不同封闭冷通道参数与机柜流动特性对数据中心机柜冷却气流分配的影响, 针对封闭冷通道场景构建了二维流动模型, 并系统研究了不同流动阻力和机柜流动特性下冷却气流在机柜中的分布趋势。二维模型位于平行于机柜入口的平面, 控制方程中采用基于机柜流动特性的负源项来描述穿过机柜的气流。对不同冷通道参数和机柜流动特性的仿真结果表明, 当冷通道内流动阻力占主导时, 气流更多地集中于机柜底部, 顶部更易形成热点; 当冷通道内流动由惯性主导时, 顶部流量更大, 热点则更易出现在底部。机柜流动特性曲线越陡峭, 越有助于提升气流在垂直方向的分布均匀性。针对一个实际机房冷通道尺寸的算例开展二维建模仿真, 发现适当提高封闭冷通道内的流动阻力可以降低流量分布不均匀性指标(FUI)的极值 R_{FUI} 到基线工况的 83.0%; 通过提高服务器内的流动阻力, 优化其流动特性曲线(使其更陡峭), 可以将 R_{FUI} 降低至基线工况的 55.4%。该研究为量化评估封闭冷通道参数与机柜流动特性对流量不均匀性的改善效果提供了参考。

关键词: 机柜冷却气流分配; 二维建模; 封闭冷通道

中图分类号: TK121 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202511008 **文章编号:** 0253-987X(2025)11-0084-11

Study on Vertical Flow Distribution Non-Uniformity in Enclosed Cold Aisle Cabinets of Data Centers

GUO Haobo, TAO Wenquan

(Laboratory of Energy-Saving and Low-Carbon Technology of Data Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the influence of different enclosed cold aisle parameters and cabinet flow characteristics on the cooling airflow distribution in data center cabinets, a two-dimensional flow model suitable for enclosed cold aisle scenarios is proposed. The model systematically examines the distribution trends of cooling airflow in cabinets under varying flow resistances and cabinet flow characteristics. The two-dimensional model is located on a plane parallel to the cabinet inlet, and a negative source term based on cabinet flow characteristics is introduced in the governing equations to describe the airflow passing through the cabinets. Simulation results for different cold aisle parameters and cabinet flow characteristics reveal that when flow resistance dominates in the cold aisle, airflow tends to concentrate at the bottom of the cabinets, increasing the risk of hotspots at the top. Conversely, when inertia dominates the flow in the cold aisle, more airflow

收稿日期: 2025-03-25。 作者简介: 郭浩博(2000—), 男, 博士生; 陶文铨(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51721004); 国家自然科学基金委员会—瑞典科研与教育国际合作基金会合作交流项目(51911530157); 能源陕西实验室科技资助项目(ESLB202408)。

网络出版时间: 2025-08-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20250828.1432.004>

is directed toward the top, leading to potential hotspots at the bottom. Steeper cabinet flow characteristic curves contribute to improved vertical airflow distribution uniformity. A two-dimensional simulation of an actual data center cold aisle configuration demonstrates that appropriately increasing the flow resistance in the enclosed cold aisle can reduce the range of the flow uniformity index (FUI) to 83.0% of the baseline scenario. Additionally, increasing the flow resistance within the servers to steepen their flow characteristic curves further reduces the FUI range to 55.4% of the baseline scenario. This study provides a quantitative reference for evaluating the impact of enclosed cold aisle parameters and cabinet flow characteristics on improving flow distribution uniformity.

Keywords: data center thermal management; two-dimensional model; cold aisle containment

随着计算与网络技术的快速发展, AI、5G、物联网、云计算等新兴技术的计算、处理、存储与共享均依赖于数据中心^[1]。数据中心作为集中布置大量计算设备的场所, 能耗巨大。2023 年中国数据总量达 32.85 ZB, 单精度算力规模达每秒 230 百亿亿次浮点运算, 居全球第二^[2]。中国作为重要经济体, 数据中心耗电量已占社会总电量的 3%^[3], 其中约 40% 用于冷却 IT 设备^[4]。因此, 冷却系统对于数据中心的高效、节能运行十分重要。

降低冷却系统能耗主要从室内侧冷却(一次冷却)^[5-8]和室外侧冷却(二次冷却)^[9-10]两方面入手。其中, 一次冷却指热量从 IT 设备到数据中心室内空气循环系统的过程, 二次冷却指冷却室内高温空气的过程^[11-12]。一次冷却涉及 IT 设备与室内空气的热交换, 是确保设备正常运行的关键。实际运行中, 冷空气与热空气不可避免地混合, 导致部分机柜进风温度升高, 局部热点加剧, 冷量利用率下降, 最终降低冷却效率^[13]。因此, 阻隔冷热空气掺混与优化热源局部冷却能力是提升一次冷却效率的核心。

采用如图 1 所示的冷通道封闭(CAC)布置的机房冷却效率更高。空调冷风通过架高地板输送至冷通道, 经机柜散热后由专用回风通道返回空调。

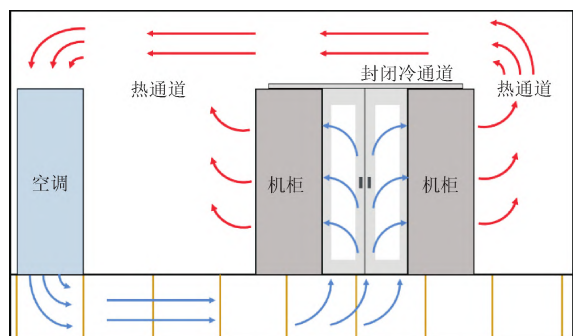


图 1 冷通道封闭机房示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a cold aisle containment server room

这一过程要求良好的气流组织以保障各机柜合理风量与温度。与开放式热/冷通道配置相比, CAC 布置可节能 22%^[14]。然而, 实际布置中仍存在不足, 冷通道内气流分布不均、冷热掺混等问题直接影响机柜冷却性能, 因此研究其气流组织对优化数据中心一次冷却效率具有重要意义。

文献[15]中综述机房气流分配的实验与数值研究, 总结通风系统配置、架高地板几何参数、流动阻塞及气流阻隔方式对气流组织的影响, 指出优化架高地板结构可提升开孔气流均匀性。Wang 等^[16]实验比较不同封闭方式与风量对机架冷却指数(RCI)、供热指数(SHI)的影响, 发现完全封闭在高风量下可能诱发 Coanda 效应(冷空气附着隔板表面, 导致隔板附近机柜底部风量偏小), 故低风量冷却效果更优, 如图 2 所示。Zhang 等^[17]采用 CFD 方法研究地板高度对流动均匀性的影响, 建议 CAC 布置时架高地板合理高度为 0.6~0.8 m。文献[18]中指出, 良好封闭不仅能改善热环境, 还能延长冷却故障时的设备运行时间, 其以机柜进风温度超 35℃作为过热判断标准。Ham 和 Jeong^[19]认为, 通过控制参数与安装水侧节能器可显著提升 CAC 冷却性能。Alkharabsheh 等^[20]研究结果表明, 冷通道泄漏率超 15% 时, 送风量与开放通道无显著差异; 泄漏率低于 20% 时, 进风温度可维持较低水平。Song 等^[21]提出用导流板改善气流组织, 模拟显示 1 700 mm 凸型导流板效果最佳, 可消除热点。Chu 等^[22]引入流量不均匀指数(FUI, 记为 U), 对单个机柜的流量不均匀性进行评价, 提出基于 Coanda 效应的导流板可显著降低 FUI 标准差(51.3%~62.2%)。Yuan 等^[23]提出可调角度挡板, 发现 75°、20 cm 挡板能将热点温度降低 1.7℃, 该研究通过机柜热点位置反映其气流不均匀性, 但未直接涉及机柜垂直方向(如高度方向)的气流分布研究。

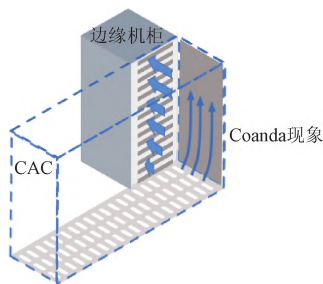


图 2 Coanda 现象对边缘机柜冷却效果的影响

Fig. 2 Schematic illustration of the Coanda effect on edge rack cooling

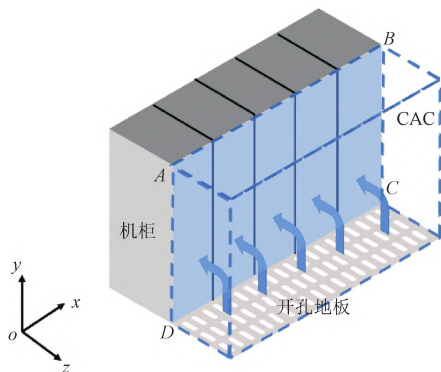
综上所述,现有研究多聚焦封闭冷通道的优势,以及地板送风不均、冷通道泄漏等因素对气流组织的影响,并通过安装导流部件、调整机房布置等方式改善机柜冷却效果。然而,现有研究缺乏对封闭冷通道内机柜垂直方向流量分配的关注。机柜垂直方向的送风量分配情况在数据中心设计与运维中均为重要评价指标,且在 CFD 模拟(尤其黑箱模型仿真)中是关键建模参数^[24]。本文旨在通过数值模拟,研究封闭冷通道内气流分布及机柜送风量,探究机柜送风量及其垂直分配与影响参数的关系。

1 数据中心封闭冷通道二维流动模型

1.1 问题描述

一个理想化的冷通道气流如图 3(a)所示,冷空气由下方送入,完全通过服务器后排至热通道,过程中无空气掺混。通道内机柜的总风量及其垂直方向分布主要取决于冷通道与热通道间的压力差的分布,其流动机制类似于汇流歧管^[25],如图 3(b)所示。

本文不探究封闭冷通道内部的具体流动细节,而是重点研究机柜进风面的压力分布和流量分布与各封闭冷通道参数之间的关系,为此建立以下二维



(a) 立体图

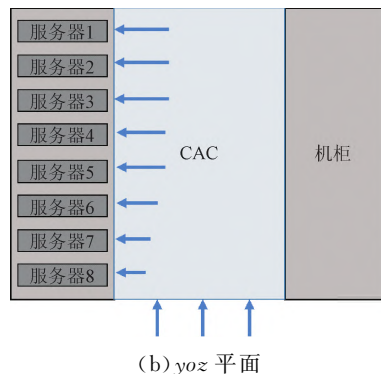
(b) yoz 平面

图 3 冷通道内流动示意图

Fig. 3 Flow illustration inside the cold aisle

模型进行研究。二维模型的计算域如图 3(a)所示的长方形 $ABCD$,其中下底边 DC 为速度入口边界(模拟冷空气从冷通道底部送入),上顶边 AB 为压力出口边界(模拟热通道顶部排风),左右两侧边 AD 、 BC 为固定壁面(无滑移边界条件),在机柜所在区域(如 AB 边与 DC 边之间的中间区域)采用多孔介质模型表示穿过机柜的气流阻力。

采用二维模型模拟上述的封闭冷通道内部流动时需要满足以下假设:

- (1) 封闭冷通道中各机柜沿高度方向布置一致,确保二维模型中源项形式统一;
- (2) 各机柜出风面压力分布均匀,该假设使冷通道内部压力差可直接通过二维模型计算;
- (3) 封闭冷通道内部不包含导流槽等三维流动干扰设施,因二维模型无法模拟此类结构;
- (4) 冷通道两列机柜间距合理,保证流动以竖直方向为主,横向流动可忽略不计;
- (5) 封闭冷通道两侧机柜对应位置的流动特性一致,避免二维对称源项失效;
- (6) 冷却空气视为不可压缩流体,控制方程忽略浮升力项;
- (7) 冷通道完全密封,无气流泄漏,冷气流仅通过机柜进入热通道。

实际数据中心机柜可较好满足假设 1、3、4、6;因热通道远大于机柜出口面,可近似认为机柜出风口压力均匀(假设 2);负载在冷通道两侧机柜中通常均匀布置(以减少局部热点),故多数数据中心满足假设 5;虽气流泄漏不可避免,但设计施工良好的数据中心可有效控制泄漏,且此现象非本研究重点,故引入假设 7。综上所述,二维模型应用在封闭冷通道内部气流分析上是可行的。

1.2 二维模型控制方程

封闭冷通道中的二维流动问题由连续性方程和

动量方程控制,为描述垂直于计算平面进入服务器的气流对平面内流动的影响,特在质量守恒方程中引入负源项。

二维连续性方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) = -\beta \rho w \quad (1)$$

式中: u 、 v 分别为 x 、 y 方向的速度; ρ 为气体密度; β 为几何参数,量纲为长度的倒数, $\beta = n/W$, n 为冷通道两侧机柜数,单侧机柜时 $n = 1$,双侧时 $n = 2$, W 为冷通道宽度; w 为垂直计算平面方向的气流速度,即实际问题中通过服务器流出封闭冷通道的气体速度,该参数通过迭代计算获得,不参与二维模型的直接求解。

动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho uu) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho uv) &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\eta \frac{\partial u}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\eta \frac{\partial u}{\partial y}\right) - \\ &\quad \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2f}{d_{h,x}}\rho u^2 - \beta \rho w u \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\eta \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\eta \frac{\partial v}{\partial y}\right) - \\ &\quad \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2f}{d_{h,y}}\rho v^2 - \beta \rho w v \end{aligned} \quad (2b)$$

式中: β 为静压; f 为封闭冷通道墙壁剪切力或冷通道内阻碍流动的结构等因素导致的流动阻力系数; $d_{h,x}$ 、 $d_{h,y}$ 分别为封闭冷通道竖直、水平截面的水力半径,两个截面如图 4 所示。流出垂直于计算平面的气流速度 w 按下式计算

$$w = f_{\text{rack}}(p_i - p_o) \quad (3)$$

式中: f_{rack} 为反应机柜某一位置上气流流速与其进出口压降关系的函数; p_i 、 p_o 分别为机柜进风面、出风面的静压。本研究将机柜视为若干服务器的竖直堆叠体,因机柜内流动主要受服务器影响,故其各高度位置的流动特性可近似为服务器的流动特性。此

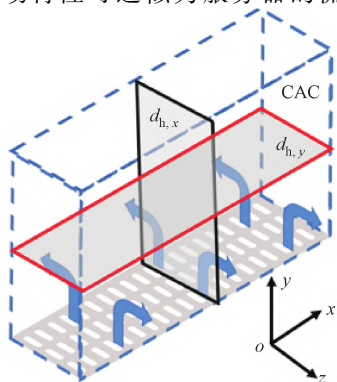


图 4 封闭冷通道流道两个截面示意图

Fig. 4 Cross-sectional schematics of the contained cold aisle

处的 f_{rack} 反映的是服务器整体流动特性,包含流动阻力与风扇驱动力。Alissa 等^[26]在进行机房仿真计算时,通过叠加流动阻力曲线与风扇压头曲线获得室内空调整体流动特性曲线,仿真开孔地板流量与实验数据的平均误差仅为 3%,表明该叠加方法对含风扇元器件的建模效果良好。

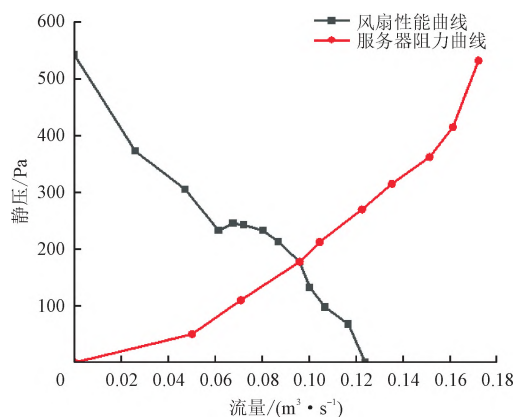
2 参数分析

本节通过模拟典型数据中心封闭冷通道内流动,分析流动阻力系数和服务器压降-流速特性对中心机柜竖直方向流量和压力分布的影响,所用参数见表 1。图 5(a)所示的标准 2U 服务器阻力-流量和风扇静压-流量曲线由 Alkharabsheh 等^[27]通过实验测得。将两条曲线相减得到考虑服务器内风扇的整体压降-流量曲线。图 5(b)将该曲线转换为流速-压降形式,便于数值计算,采用服务器进口截面积进行单位换算。图 5(a)中两曲线交点表示理论工况点,该工况下服务器前后压降为 0,流过阻力元件的压降与风扇的压升平衡。在研究不同压降曲线影响时,保持理论工况点的流速不变,通过调整系数 α 控制机柜流动特性,定义为 $f_{\text{rack}} = \alpha f_{\text{base}}$, f_{base} 为标准 2U 服务器的压降-流速特性,压降-流速特性曲线水平如图 6 所示。

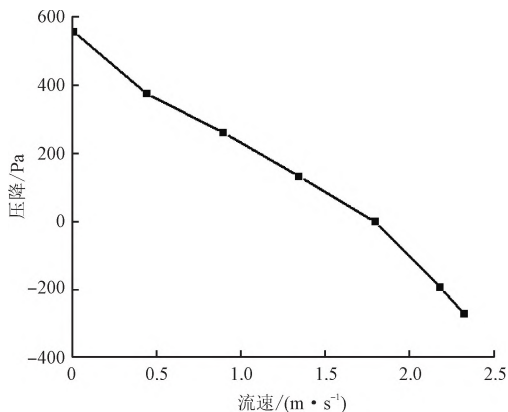
表 1 二维模型计算参数的选取

Table 1 Value selection of calculation parameters for 2D model

参数	数值
封闭冷通道宽度/m	1.22
封闭冷通道高度/m	2.00
封闭冷通道长度/m	5.49
β/m^{-1}	1.639
$d_{h,x}/\text{m}$	0.379
$d_{h,y}/\text{m}$	0.474
入口速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	6.0



(a) 阻力-流量曲线和静压-流量曲线^[27]



(b) 服务器总体压降-流速曲线

图 5 服务器和风扇的特性曲线

Fig. 5 Characteristic curves of servers and fans

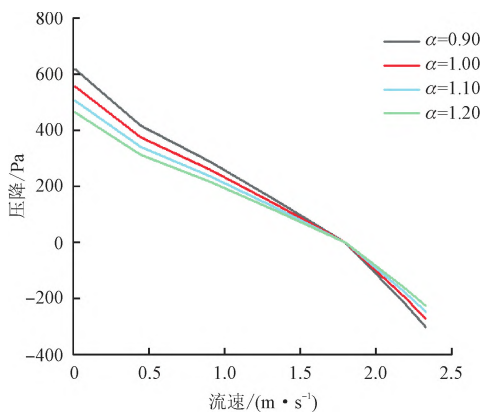


图 6 不同机柜流动特性下压降-流速特性曲线

Fig. 6 Characteristic curves of pressure drop vs. flow velocity at different levels

本节设计了两个参数(流动阻力系数 f 和服务器压降特性), 每个参数设 4 个水平, 构成正交实验, 如表 2。

表 2 封闭冷通道阻力系数和机柜流动特性的 4 个变量水平的取值

Table 2 Four-level values of the resistance coefficient of the contained cold aisle and rack flow characteristics

水平	f	压降-流速关系
1	0.05	$f_{\text{rack}} = 0.90 f_{\text{base}} (p_i - p_o)$
2	0.10	$f_{\text{rack}} = 1.00 f_{\text{base}} (p_i - p_o)$
3	0.15	$f_{\text{rack}} = 1.10 f_{\text{base}} (p_i - p_o)$
4	0.20	$f_{\text{rack}} = 1.20 f_{\text{base}} (p_i - p_o)$

以二维模型中轴线上的穿过机柜的气流速度 w 和压降分布为分析对象, 比较 16 组工况下冷通道流动阻力系数和机柜流动特性对流量分布的影响。由于满足假设 2, 机柜出风面设为统一参考点, 各工况下的压降分布可直接比较, 结果如图 7 ~ 图 11。总

体来看, 阻力系数和压降特性都会对机柜竖直方向上的流量和压力分布产生影响, 但不同的是, 阻力系数影响的是机柜流量在竖直方向上分布的趋势, 而压降特性影响的是机柜流量的分布范围。

当封闭冷通道内部的 f 较小 ($f = 0.05$) 时, 式 (2a) 和式 (2b) 中的流动阻力项 $\left(\frac{2f}{d_{h,x}} \rho u^2, \frac{2f}{d_{h,y}} \rho v^2\right)$ 对动量的影响小于由气流流出导致的动量变化率项 $(\beta w u, \beta w v)$, 流动主要由惯性主导, 如图 7 ~ 图 10 中黑色曲线所示。此时, 服务器抽送冷空气至热通道, 使冷通道内竖直速度随高度升高而减小, 压力随高度升高而增加, 故机柜顶部的流量大于底部。当 f 增加 ($f = 0.10, 0.15$), 流动阻力对压力分布的影响增强: 压力随高度上升的速度变缓甚至下降, 尤其底部服务器受影响更大。可通过竖直压力梯度判断流动的主导机理: 负梯度为阻力主导, 正梯度为惯性主导。当 $f = 0.10$ 时 (图 7 ~ 图 10 中红色曲线), 底部压力梯度接近 0, 整体压力与流量仍随高度升高, 但压力梯度减小, 分布范围收窄, 流量均匀性提升。当 $f = 0.15$ 时 (图 7 ~ 图 10 中蓝色曲线), 底部先受阻力影响, 压力与流量随高度呈先减后增趋势, 压力梯度进一步减小甚至反转, 流量与压力的分布均匀性进一步改善。当 f 较大时 ($f = 0.20$), 流动几乎完全由阻力主导, 底部压力明显高于顶部, 压力随高度下降。阻力效应增强使压力梯度减小, 反而导致压力和流量分布范围扩大, 不均匀性加剧。冷通道内阻力主要来源于机柜柜门开孔的不光滑性及其导流结构^[23]。文献[23]通过实验证明加装挡板可有效改善出风温度均匀性 (尤其底部降温明显), 因为出风温度主要受流量分布影响, 该实验结果与本节中 f 增加导致的流量变化趋势一致。

服务器的压降-流量曲线表示气流流过服务器时流量和需要克服的压降之间的关系。曲线平缓时, 相同流量下所需压降较小, 较冷通道内阻力或惯性造成的压降可忽略, 此时流量分布主要受通道内流动控制, 分布不均性较强 (图 11 中 $0.9 f_{\text{base}}$ 曲线); 随着服务器压降曲线变陡 (如图 11 中 $1.0 f_{\text{base}} \sim 1.2 f_{\text{base}}$ 曲线), 所需压降显著增加, 与冷通道内部压降相当, 流动同时受通道流动阻力和穿过服务器所需克服压降的影响。为克服该压降, 冷通道整体压力提高, 且压降曲线陡峭使得流量更接近理想工况, 流量均匀性改善。综上, 服务器压降特性曲线越陡, 封闭冷通道整体压力越高, 机柜竖直方向流量不均匀性越弱。

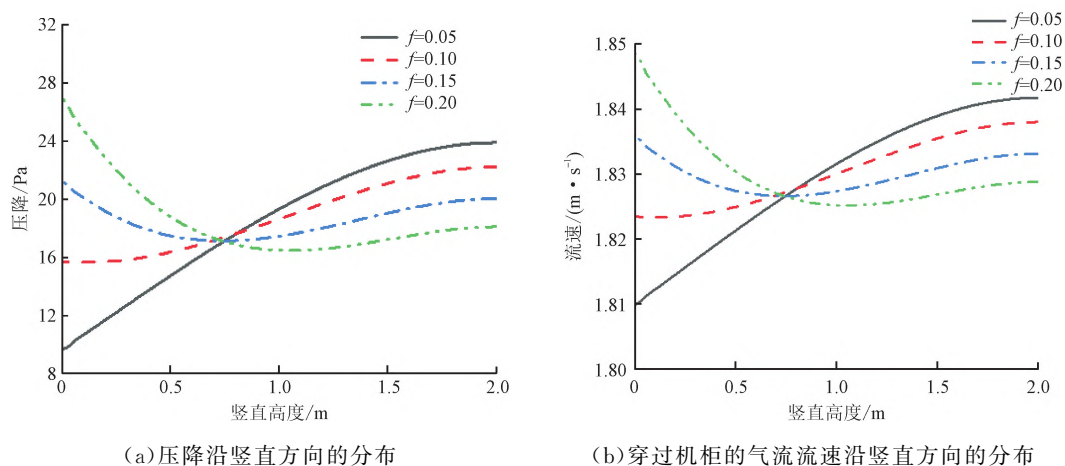


图 7 水平 1 下不同阻力系数时的压降和流速分布

Fig. 7 Distribution of pressure drop and flow velocity at different resistance coefficients under level 1

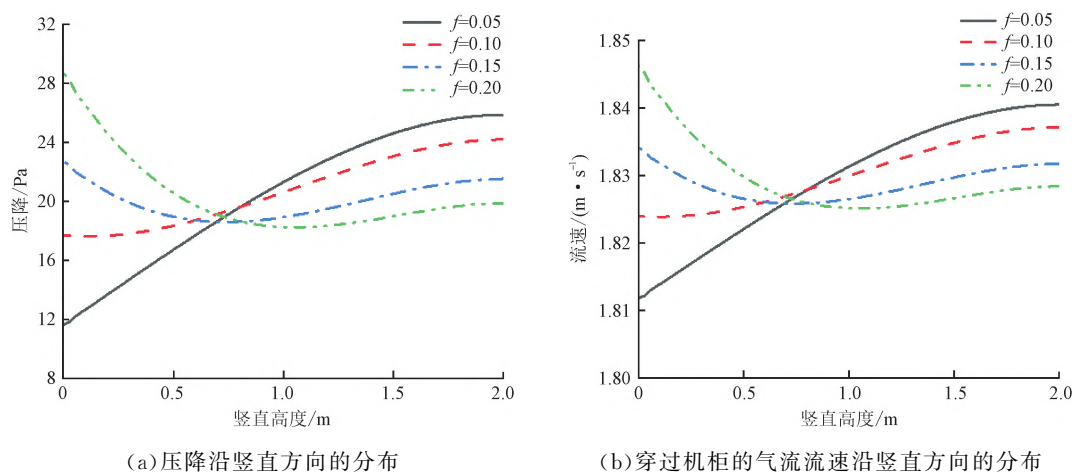


图 8 水平 2 下不同阻力系数时的压降和流速分布

Fig. 8 Distribution of pressure drop and flow velocity at different resistance coefficients under level 2

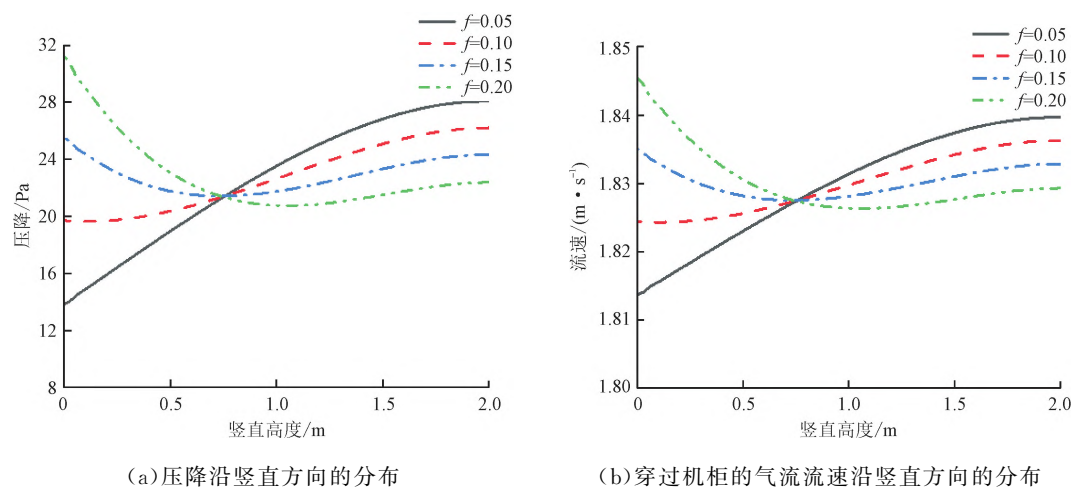


图 9 水平 3 下不同阻力系数时的压降和流速分布

Fig. 9 Distribution of pressure drop and flow velocity at different resistance coefficients under level 3

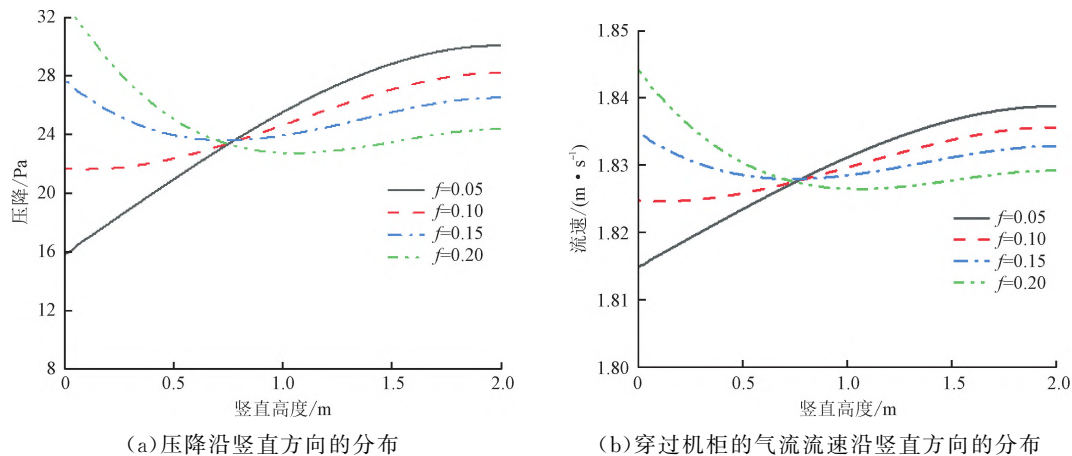


图 10 水平 4 下不同阻力系数时的压降和流速分布

Fig. 10 Distribution of pressure drop and flow velocity at different resistance coefficients under level 4

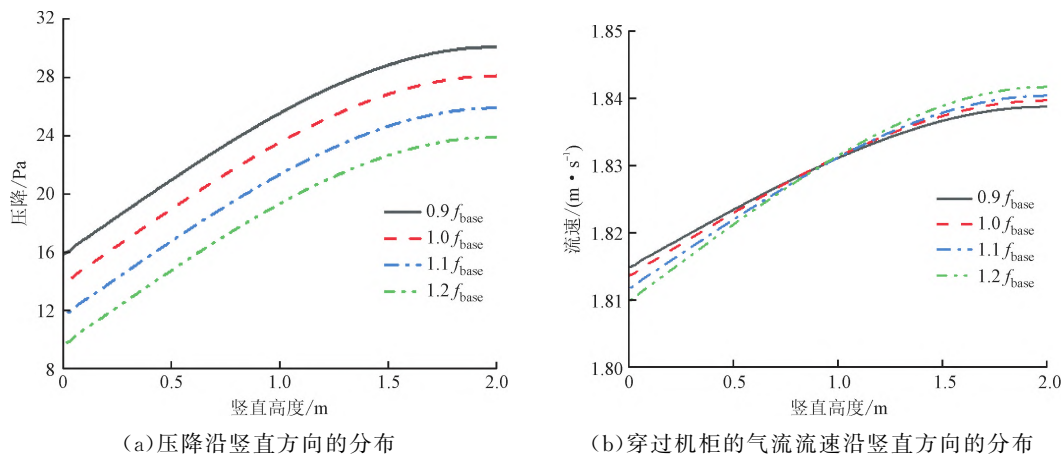


图 11 封闭冷通道内阻力系数在水平 1 下的压降和流速分布

Fig. 11 Pressure drop and velocity distributions under level 1 of the resistance coefficients in the contained cold aisle

3 针对实际数据中心冷通道的二维模型研究

本节采用二维模型对某封闭冷通道数据中心^[28]进行流量分配预测与优化。具体的冷通道尺寸为 $5.4 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 2.2 \text{ m}$ 。二维模型简化了三维模型中复杂的流动计算,便于关注机柜流量分配均匀性的研究。但是为了验证其与三维模型具有一致的流量分配结果,先对二维仿真和三维仿真结果进行对比,再采用二维模型对机房的冷通道参数进行优化改进。

3.1 二维模型与三维模型的对比

三维模型中,入口设为速度边界,出口(机柜进风面)采用自编程压力-速度耦合边界,确保出口流速与压力满足图 5(b)所示的服务器压降-流速曲线。二维与三维模型均基于有限体积法^[29]和可实

现的 $k-\epsilon$ 湍流模型^[30],求解动量方程和连续性方程。

二维模型中的参数选择如表 3 所示。使用 Swamee-Jain 近似公式^[31]计算得到阻力系数 f ,因机柜进风面的格栅较为平整,相对粗糙度取 0.000 1,计算所得阻力系数 $f=0.005$ 。机柜的压降-流速关系如图 5(b)所示。

表 3 实际冷通道计算参数

Table 3 Calculation parameters for actual cold aisle

参数	数值
f	0.005
β/m^{-1}	1.11
$d_{h,x}/\text{m}$	0.495
$d_{h,y}/\text{m}$	0.675
入口速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	4.385

以最中间机柜(如图 12 所示)各服务器流量为

对比标准,图 13 展示了二维与三维计算结果。服务器编号自机柜底部到顶部递增,两种模型均显示下部流量较小、上部较大、顶部服务器流量分布更均匀的特点。虽然二维模型与三维模型相比存在一定的误差,但是其大大减少了计算所需的网格数和计算时间,尤其是当研究重心并不在冷通道内的流动状态而是在服务器的流量和工作状态时,二维模型可以更快、直观地反映出服务器工作状态和模型参数之间的关系。因此,本文提出的二维模型可以作为一种有效的封闭冷通道内流动分析方法,为数据中心的设计提供定性指导。

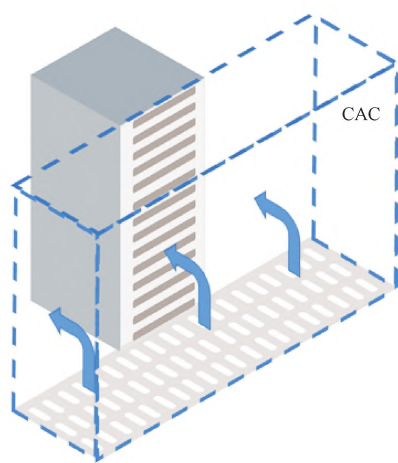


图 12 中心机柜及其内服务器示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the central rack and its internal servers

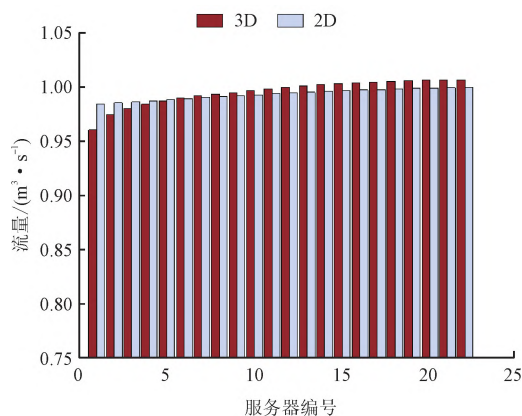


图 13 二维、三维中心机柜服务器流量对比

Fig. 13 2D vs. 3D comparison of server airflow distribution in central rack

3.2 模型应用

为评估数据中心的热性能,通常采用房级、行级和机柜级指标^[32],本研究聚焦机柜竖直方向流量不均匀性,故选用机柜级热性能指标进行分析。由

Herrlin^[33]提出的 RCI,用于衡量机柜进风温度超出推荐值的程度;由 Sharma 等^[34]提出的 SHI 和回热指数(RHI),用于衡量气流组织不良导致的焓差与机房整体送回风焓差的比值。但上述参数均侧重机柜层面散热效果,无法反映单机柜内部流动不均匀性。为此,Chu 等^[22]提出了 FUI,并用 FUI 的标准差 σ_{FUI} 来评价机柜流量不均匀性,其定义如下

$$U_i = \frac{m_i - m_{id}}{m_{id}} \quad (4)$$

$$\sigma_{FUI} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N U_i^2 \right)} \quad (5)$$

式中: m_i 为第 i 个服务器实际流量; m_{id} 为第 i 个服务器理想流量(不考虑服务器功率差异时,即冷通道流量均匀分配于所有服务器的平均值; N 为机柜内服务器数)。 σ_{FUI} 为 FUI 的标准差,可反映机柜内流量分布的不均匀性,其值越大,不均匀性越显著。但实际工程中,对机房运行影响最大的是流量偏离理想值最大的服务器,因此本研究采用 R_{FUI} (FUI 的极值)作为机柜流量不均匀性的评价指标,其定义如下

$$R_{FUI} = \max\{|U_i|\} \quad (6)$$

基于第 2 节的流动特性分析,采用两种方法优化机柜内竖直方向流量分布:提高冷通道的阻力系数 f ;调整服务器的流动特性曲线。通过统计中心机柜竖直方向上的流速分布和 R_{FUI} ,来比较不同方式对机柜不均匀性的改善效果。

图 14 为不同工况下中心机柜沿竖直方向的速度分布,可见随着 f 增加,底部服务器的流量增加,顶部服务器流量减少,整体流量均匀性增加(图 14 中虚线);随着服务器压降特性曲线变陡,机柜竖直方向流量分配更加均匀(图 14 中实线)。图 15 为不同工况下中心机柜的 R_{FUI} ,可见当封闭冷通道内流动阻力增加时 R_{FUI} 减小,机柜流量不均匀性改善。其中图 15(a)显示,当 $f=0.10$ 时改善有限,而当 f 增至 0.15 时, R_{FUI} 下降约 83.0%, f 继续增至 0.20, R_{FUI} 仅提升至 86.0%,说明进一步提高 f 的增益效果有限,且可能带来能耗增加及引发流动阻力主导等不利影响。图 15(b)展示了通过调整系数 α 控制机柜流动特性(定义为 $f_{rack} = \alpha f_{base}$)对流量不均匀性指标 R_{FUI} 的影响。当 α 从 1.00 减小至 0.90 时, R_{FUI} 与基础工况相比降低 45.4%, α 进一步减小至 0.80 时, R_{FUI} 与基础工况相比也只是减少了 55.4%。说明压降曲线变陡有助于改善流量分布,但过度陡峭将增加风扇能耗,因此也不宜无限制地加大阻力。

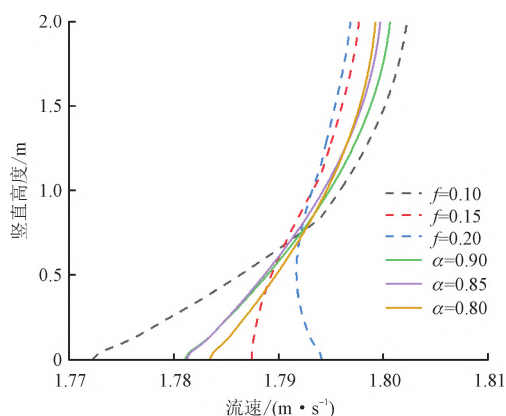
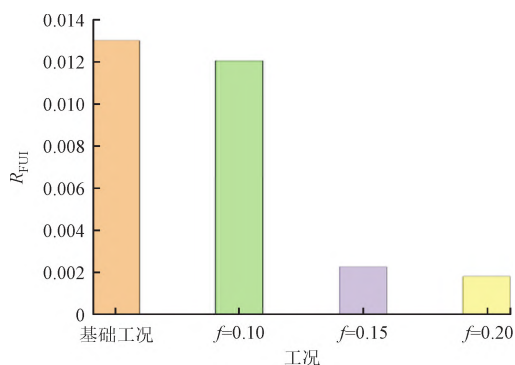
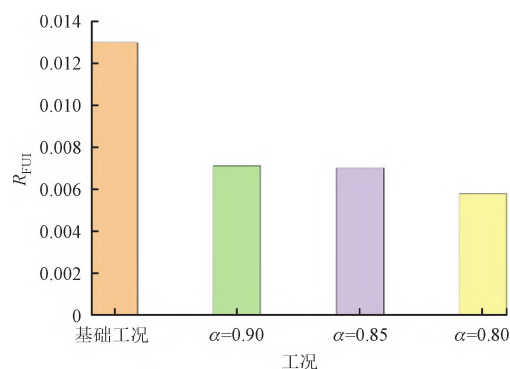


图 14 不同封闭冷通道参数与机柜流动特性下中心机柜
竖直高度与流速的关系

Fig. 14 Relationship between vertical height and flow
velocity of central rack under varying contained
cold aisle parameters and rack flow characteristics



(a) 不同阻力系数 f 下的 R_{FUI}



(b) 不同服务器流动特性下的 R_{FUI}

图 15 不同封闭冷通道参数与机柜流动特性下中心机柜
的 R_{FUI}

Fig. 15 R_{FUI} of the central rack under varying contained cold
aisle parameters and rack flow characteristics

4 结 论

本研究基于数据中心普遍适用的 7 项假设,构建封闭冷通道的二维模型,分析机柜竖直方向流量、

压力分布及其影响因素。在与三维仿真结果趋势一致的前提下,通过 16 组正交工况,探讨了冷通道流动阻力系数 f 和机柜压降特性曲线对不同高度服务器的流量和压力分布的影响。通过合理简化,所提二维模型能将三维流动转化为竖直平面内的二维问题,以面内负源项表示机柜气流抽取,显著降低了计算复杂度,便于聚焦流动参数对流量均匀性的影响,研究结论如下。

(1) 封闭冷通道内的流动阻力 f 主要影响机柜的压力、流量分布趋势,随着 f 的增加,竖直方向流量分布不均匀性先减小后增加;机柜底部的流量逐渐增大,竖直方向流量呈先降后升趋势;当 f 过大时,机柜底部的流量反而大于顶部的流量。

(2) 服务器压降特性曲线主要影响速度与压力的分布范围;曲线平缓时,速度变化范围大,流量不均匀性显著;曲线越陡峭,流量分配越均匀。

(3) 在封闭冷通道内布置活动挡板等增阻装置,可显著提高机柜竖直方向流量分配均匀性,适当提高冷通道流动阻力可以降低 R_{FUI} 到基础工况的 83.0%;通过在服务器内安装导流挡板等方式使压降特性曲线更陡峭,可以将 R_{FUI} 降低为基础工况的 55.4%。考虑到更陡峭的流动特性曲线带来的机房内空调风机的能量损耗,适中陡峭的服务器曲线也可以降低 45.4% 的 R_{FUI} 。

参考文献:

- [1] 施巍松, 孙辉, 曹杰, 等. 边缘计算:万物互联时代新型计算模型 [J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(5): 907-924.
SHI Weisong, SUN Hui, CAO Jie, et al. Edge computing-an emerging computing model for the internet of everything era [J]. Journal of Computer Research and Development, 2017, 54(5): 907-924.
- [2] 中国信息通信研究院. 中国算力发展报告(2024 年) [EB/OL]. (2024-09-27) [2025-02-04]. <https://www.sdbdra.cn/newsinfo/7842811.html>.
- [3] 王永真, 宋阔, 韩恺, 等. 算力-电力-热力协同视角下数据中心高密机柜全栈联动研究 [J]. 中国科学(技术科学), 2025, 55(2): 213-232.
WANG Yongzhen, SONG Kuo, HAN Kai, et al. Full-stack linkage of high-density cabinets in data centers considering computing-electric-thermal power synergy [J]. Scientia Sinica(Technologica), 2025, 55(2): 213-232.
- [4] ZHANG Qingxia, MENG Zihao, HONG Xianwen, et al. A survey on data center cooling systems: technology, power consumption modeling and control strategy

- optimization [J]. *Journal of Systems Architecture*, 2021, 119: 102253.
- [5] YUAN Xiaolei, XU Xinjie, LIU Jinxiang, et al. Improvement in airflow and temperature distribution with an in-rack UFAD system at a high-density data center [J]. *Building and Environment*, 2020, 168: 106495.
- [6] YUAN Xiaolei, ZHOU Xuetao, PAN Yiqun, et al. Phase change cooling in data centers: a review [J]. *Energy and Buildings*, 2021, 236: 110764.
- [7] CHO J, KIM Y. Development of modular air containment system: thermal performance optimization of row-based cooling for high-density data centers [J]. *Energy*, 2021, 231: 120838.
- [8] CHEN Meng, ZHANG Zhongbin, DENG Qingqing, et al. Optimization of underfloor air distribution systems for data centers based on orthogonal test method: a case study [J]. *Building and Environment*, 2023, 232: 110071.
- [9] CHEN Hua, PENG Yuhang, WANG Yanling. Thermodynamic analysis of hybrid cooling system integrated with waste heat reusing and peak load shifting for data center [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 183: 427-439.
- [10] DEYMI-DASHTEBAYAZ M, VALIPOUR-NAMANILO S. Thermoeconomic and environmental feasibility of waste heat recovery of a data center using air source heat pump [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 219: 117-126.
- [11] HUANG Pei, COPERTARO B, ZHANG Xingxing, et al. A review of data centers as prosumers in district energy systems: renewable energy integration and waste heat reuse for district heating [J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114109.
- [12] LAMPTEY N B, ANKA S K, LEE K H, et al. Comparative energy analysis of cooling energy performance between conventional and hybrid air source internet data center cooling system [J]. *Energy and Buildings*, 2024, 302: 113759.
- [13] JIN Chaoqiang, BAI Xuelian. The study of servers' arrangement and air distribution strategy under partial load in data centers [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 49: 101617.
- [14] MURALIDHARAN B, SHRIVASTAVA S K, IBRAHIM M, et al. Impact of cold aisle containment on thermal performance of data center [C]//ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. New York, USA: ASME, 2013: V002T09A016.
- [15] LU Hongjie, ZHANG Zhongbin, YANG Liu. A review on airflow distribution and management in data center [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 179: 264-277.
- [16] WANG Chenghao, TSUI Y Y, WANG Chichuan. On cold-aisle containment of a container datacenter [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 133-142.
- [17] ZHANG Meng, ZHANG Zhongbin, HU Yu, et al. Effect of raised floor height on different arrangement of under-floor air distribution performance in data center [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 556-564.
- [18] SHRIVASTAVA S K, IBRAHIM M. Benefit of cold aisle containment during cooling failure [C]//ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. New York, USA: ASME, 2013: V002T09A021.
- [19] HAM S W, JEONG J W. Impact of aisle containment on energy performance of a data center when using an integrated water-side economizer [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 105: 372-384.
- [20] ALKHARABSHEH S A, SAMMAKIA B G, SHRIVASTAVA S K. Experimentally validated computational fluid dynamics model for a data center with cold aisle containment [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2015, 137(2): 021010.
- [21] SONG Ping, ZHANG Zhongbin, ZHU Ying. Numerical and experimental investigation of thermal performance in data center with different deflectors for cold aisle containment [J]. *Building and Environment*, 2021, 200: 107961.
- [22] CHU Wenxiao, WANG Rui, HSU P H, et al. Assessment on rack intake flowrate uniformity of data center with cold aisle containment configuration [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 30: 101331.
- [23] YUAN Xiaolei, WANG Yu, LIU Jinxiang, et al. Experimental and numerical study of airflow distribution optimisation in high-density data centre with flexible baffles [J]. *Building and Environment*, 2018, 140: 128-139.
- [24] ZHAI J Z, HERMANSEN K A, AL-SAAD S. The development of simplified rack boundary conditions for numerical data center models [J]. *ASHRAE Transactions*, 2012, 118(Part 2): 436-447.
- [25] MANASERH Y M, TRADAT M I, BANI-HANI D, et al. Machine learning assisted development of IT equipment compact models for data centers energy planning [J]. *Applied Energy*, 2022, 305: 117846.

- [26] ALISSA H A, NEMATI K, SAMMAKIA B, et al. Innovative approaches of experimentally guided CFD modeling for data centers [C]//2015 31st Thermal Measurement, Modeling & Management Symposium (SEMI-THERM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 176-184.
- [27] ALKHARABSHEH S, SAMMAKIA B, MURRAY B, et al. Experimental characterization of pressure drop in a server rack [C]//Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 547-556.
- [28] YUAN Xiaolei, ZHOU Xuetao, LIU Jinxiang, et al. Experimental and numerical investigation of an airflow management system in data center with lower-side terminal baffles for servers [J]. Building and Environment, 2019, 155: 308-319.
- [29] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [30] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3): 227-238.
- [31] SWAMEE P K, JAIN A K. Explicit equations for pipe-flow problems [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1976, 102(5): 657-664.
- [32] GONG Xiaoming, ZHANG Zhongbin, GAN Sixuan, et al. A review on evaluation metrics of thermal performance in data centers [J]. Building and Environment, 2020, 177: 106907.
- [33] HERRLIN M K. Airflow and cooling performance of data centers; two performance metrics [J]. ASHRAE Transactions, 2008, 114(Part 2): 182-187.
- [34] SHARMA R K, BASH C E, PATEL C D. Dimensionless parameters for evaluation of thermal design and performance of large-scale data centers [C]//8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2002: AIAA 2002-3091.
- (编辑 武红江)