

原创研究型文章

导流板对数据中心气流组织优化及节能的模拟与实验研究

马博洋¹, 刘海勇¹, 杜亚慧², 杨晓晨^{2,*}, 周志华², 路洁¹, 谌莹¹¹ 中移园区建设发展有限公司, 北京市 102206, 中国² 建筑环境与能源应用天津重点实验室, 环境科学与工程学院, 天津大学, 天津市 300072, 中国* 通讯作者: 杨晓晨, xiaochen.yang@tju.edu.cn

引用格式

马博洋, 刘海勇, 杜亚慧, 等. 导流板对数据中心气流组织优化及节能的模拟与实验研究. 清洁能源科学与技术. 2024; 2(1): 97.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i1.97>

Ma B, Liu H, Du Y, et al. Simulation and experimental research on the optimization of airflow organization and energy saving in data centers using air deflectors (Chinese).

Journal of Clean Energy Science and Technology. 2024; 2(1): 97.

<https://doi.org/10.18686/cncest.v2i1.97>

文章信息

收稿日期: 2023-12-11

录用日期: 2024-01-19

发表日期: 2024-03-05

版权信息



版权 © 2024 作者。

《清洁能源科学与技术》由

Universe Scientific Publishing 出

版。本作品采用知识共享署名 (CC BY) 许可协议进行许可。

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

English edition of this article is available online at <https://cae.usp-pl.com/index.php/cest/article/view/141>

1

摘要: 数据中心气流组织直接影响数据机房的室温控制及供冷设备的能效。鉴于数据机房底层服务器由于距离开孔地板过近、气流的水平速度分量小, 导致下层服务器风量不足、冷却效果较差问题, 本文通过安装导流板的方式提升机柜级别垂直方向的气流均匀性, 从而改善机房内整体气流组织效果。基于多工况实验和数值模拟相结合的方法优化数据中心的导流板结构尺寸及布置形式。研究结果表明, 对于单侧机柜送风, 建议在开孔地板下方安装宽度为100 mm、角度为45°的导流板; 对于两侧机柜送风, 导流板宽度为100 mm且与开孔地板呈30°角度安装可以获得最佳的气流组织效果, 机柜底层服务器的进风量明显增加, 降低了发生局部热点的风险。最后, 基于最优的导流板布置形式对某真实数据中心机房的气流组织开展ANSYS模拟仿真, 对比实际未安装导流板的情况, 导流板的优化布置使机柜的进风量增加16.98%, 提升机房空调能效达1.98%。

关键词: 数据中心; 气流组织; ANSYS模拟; 导流板; 能效提升

1. 引言

根据中国产业信息网《2018年全球数据中心建设行业发展趋势及市场规模预测》[1], 全球数据总量将从2016年的16.1 ZB增长到2025年的163 ZB (约合180亿GB)。十年数据量将产生10倍的增长, 复合增长率为26%。随着对算力需求的持续增长, 数据中心的安全稳定运行及节能减排是当前学术界及工业界的热点问题。

数据中心属于高能耗建筑, 据统计, 数据中心行业的能源消耗已经占全球总能源消耗的2% [2], 其平均消耗的电力约是标准办公室的30倍左右 [3]。随着数据中心数量的进一步增加, 其能耗正以每五年翻一倍的速度上升 [4-6], 到2015年, 全球数据中心的总能耗占全球总能耗的比例达到4.5%, 预计到2030年将达到8% [7]。除了建设体量不断增加, 造成数据中心高能耗的原因还包括其整体能效较低。PUE是衡量数据中心能源利用效率的常用指标, 其意义为数据中心设备总电力消耗量与IT设备电力消耗量的比值, 数值越接近于1能效越高 [8]。数据中心的用电包括IT设备、制冷系统、照明系统、电力供应系统等, 其中制冷系统与IT供电系统能耗最为显著。在PUE值为1.8和3.0时, 制冷系统用电分别占比35%和55% [9], 降低制冷系统能耗将直接减小PUE值。

数据中心内部冷却环境是保证设备正常工作的必要条件，其气流组织的合理性对能耗水平影响较大。有研究表明，数据机房不合理的布局会导致机房内气流组织混乱，产生近 60%的冷量浪费 [10]。因此，合理的规划气流组织设计，减少局部热点，成为数据中心节能工作的重要举措。数据中心的冷却气流组织方式依据其路径的长短可分为长距离冷却和短距离冷却。对于长距离冷却，可采用架空地板或吊顶送风的方式将机房空调（computer room air conditioner, CRAC）或计算机房空气处理设备（computer room air handler, CRAH）产生的冷却空气流经孔板地板或天花板送入机房冷通道，最终与远处的计算机机柜进行热交换，而换热后的热空气聚集在热通道，相应地循环回到 CRAC（或 CRAH）。对于短距离冷却，CRAC（或 CRAH）设备与机柜距离较近（如列间空调等），冷却气流可循环距离大大缩短，有效减少/消除热空气再循环，冷却效率较高。

架空地板送风是目前数据中心机房最常用的冷却送风方式 [11]。由于冷却空气输送距离较长，流体的速度与压力受到多种因素的影响，此种形式的机房制冷方式通常会面临气流组织不均匀的问题，不仅造成制冷系统能耗高、能效低，而且容易造成局部服务器过热 [12]（被称为“局部热点”），CPU 温度过高。据平均统计，CPU 温度达到安全温度后每上升 2℃，可靠性降低 10%，直至损坏 [13]。因此，优化数据中心机房的气流组织对保证服务器性能、避免宕机具有重要意义 [14]。

数据中心的不良气流组织主要包括三方面：1) 气流分布不均匀；2) 气流损失；3) 气流供需不平衡。气流分布不均体现为温度分布不均，通常伴随着风压分布的不均。CRAC 与机柜行的位置、地板静压箱的高度以及穿孔地板的开孔率是其主要的影响因素。通过优化送风静压箱的体型参数 [15–18]、开孔地板的开孔率 [19–26]等方式可提升送风的均匀性。提高静压箱深度可以降低送风气流的压力梯度，从而提升送风的均匀性，但最大深度存在极限，通常推荐的数据中心送风静压箱深度在 600 mm 到 1080 mm 之间。送风气流的压力损失与孔板地板的开孔率成反比，25%的开孔率可有效提升孔板地板送风的均匀性 [27]，此外还可通过加装风扇的方式改善穿孔地板透过气流的均匀性 [28]。针对气流损失的问题，可采用通道封闭、缝隙封堵等方法，数据机房的制冷功耗因此降低 8.8%–47% [29,30]。造成数据中心机房气流供需不平衡的原因主要是由于实际进入机柜的风量和机柜的总需求风量之间的不平衡导致。当供给风量大于需求风量，多余的冷风直接回到 CRAC 形成气流短路 [31]，且由于开孔地板处的气流以较高的垂直速度流出，最下层服务器气流速度的水平分量较小，气流直接掠过最下方服务器，导致最下方服务器风量不足，服务器不能有效冷却。当供给风量小于需求风量，热空气反流 [32]，且机柜上部服务器由于冷空气动力过小无法抽吸需求风量，也会造成冷却效果差的现象 [33]。

在实际运维中，大多数机房的服务器布置于机柜的中下部，极易出现由于冷却气流供需不匹配而使温度升高的现象。Alkharabsheh 的研究指出，服务器风量减少 6.8%会导致服务器内部某些部位产生 10℃的升温 [34]，严重影响服务器的高效运行和计算功能。而目前关于数据中心机房热管理的研究大多为房

间尺度，对于机柜级别的气流优化分配方法需要进一步研究。为解决上述问题，本文研究一种基于导流板的机柜尺度气流组织优化方法，通过在开孔地板下方安装导流板，有针对性的控制开孔地板的出风方向，将部分风量引流到最下方服务器。结合数值模拟和实验验证，本文获得了不同工况下导流板的最佳设计参数及布置形式，并结合对某实际机房的应用效果建模仿真，分析了安装导流板对机柜尺度冷却气流速度场与温度场的影响，评估了机房空调制冷系统能效的提升。本文的相关结论可为数据中心机柜气流组织的改善提供指导和建议。

2. 实验平台与多工况风量实验

2.1. 实验平台与设备

为实现实验环境的可控性及可重复性，采用人工环境舱为机房气流组织实验营造精确的工况环境。环境舱位于天津大学环境学院建环实验室，如图 1 所示。环境舱的尺寸为 4100 mm（长）× 4000 mm（宽）× 4000 mm（高），吊顶高度为 3.25 m。环境舱的地面采用聚氨酯泡沫，表面是铝板，外围护结构具有良好的保温隔热性能。环境舱内设有精密空调，可准确实现温度、湿度及风量控制。



图 1. 人工环境舱。

Figure 1. Artificial environment cabin.

为准确还原数据机房静压箱送风的现场送风情况，在环境舱的内部搭建一个封闭仓，用以模拟实际机房。该封闭仓的平面图如图 2 所示。封闭仓中搭建了用于输送冷却气流的静压箱，其高度为 700 mm。实验用服务器机柜选用 600 mm（长）× 800 mm（宽）× 2000 mm（高）标准的 42U 形式，机柜距离南墙 600 mm，距离西墙 450 mm，空调产生的冷却气流由风机送入静压箱中，在风道末端通过孔板地板流出并于服务器换热。机房实验室的实际布置如图 3 所示。

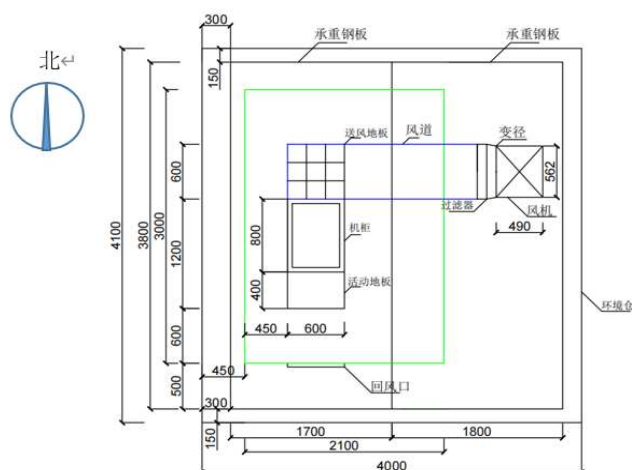


图 2. 机柜气流组织实验台平面图。

Figure 2. Floor plan for airflow organization experiment.



图 3. 机柜实验室布置图。

Figure 3. Laboratory layout of cabinet.

2.2. 风量分布实验研究

为揭示服务器在机柜中的不同布局方式对风量分布的影响规律，本文对同一机柜中不同位置服务器使用叶轮风速仪对进风速度进行测试并结合服务器的进风面积对服务器的风量进行数据采集，分为 A) 集中于机柜下部、B) 集中于机柜中部、C) 集中于机柜上部、D) 以及分散布置四种形式，如图 4 所示。测试结果如表 1 所示，其中 A-③服务器、C-①、D-①服务器所获得的冷却风量最小，分别为 182.77 m³/h、192.26 m³/h、189.89 m³/h。因此，说明机柜最上方和最下方的服务器容易出现冷却风量不足的情况。其中，机柜最上方的服务器的冷却风量不足是由于气流向上速度衰减造成的，可以通过提升通过开孔地板的风量解决。机柜下方服务器由于地板出风的垂直速度分量，水平速度分量小，导致进入底层服务器的风量不足。如果此时增大风量，虽然会一定程度增加机柜上层服务器的进风量，但同时将进一步增大冷却气流的垂直速度，导致底部服务器风量不足的问题更加显著。综合考虑机柜有效冷却气流的供需平衡，对于整个机柜气流组织的优化需要优先解决下层服务器风量不足的问题。

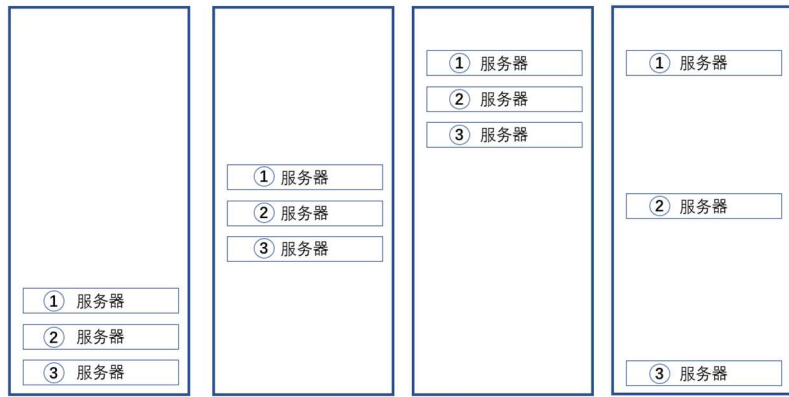


图 4. 机柜内不同服务器布局形式。

Figure 4. Different server layouts in the cabinet.

表 1. 不同服务器布局下服务器风量。

Table 1. Server airflow rates under different server layouts.

	集中机柜下部	集中机柜中间	集中机柜上部	上中下布置
服务器①风量 m^3/h	208.88	198.20	192.26	189.89
服务器②风量 m^3/h	213.63	205.32	194.64	199.38
服务器③风量 m^3/h	182.77	207.69	195.82	197.01
总风量 m^3/h	605.28	611.21	582.72	586.28

导流板是一种引导气流的被动措施，旨在将冷却空气从风量过剩的地方转移到风量不足的地方，起到引流的作用，以达成更经济合理的散热效果。导流板包括机柜级导流板和通道级导流板，其中机柜级导流板根据放置位置不同，包括机柜前门导流板及服务器后导流板。导流板的安装角度于尺寸是影响气流疏导效果的关键因素。因此，为了确定不同导流板宽度和角度对机柜上中下服务器风量分配的影响程度，本文分别采取导流板宽度为 100 mm，200 mm，300 mm，与开孔地板夹角为 30°，45°和 60°的不同组合方案，开展参数敏感性实验分析，不同的导流板安装布局如图 5 所示。

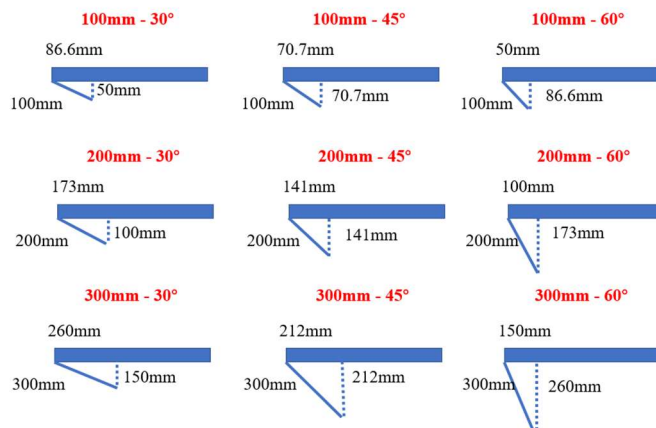


图 5. 导流板布局形式。

Figure 5. Deflector layouts.

将三个同型号的服务器在同个机柜中以上中下的位置布置，对应的服务器编号为上-①、中-②、下-③，使用叶轮风速仪测试进风速度结合服务器的进风面积对三个服务器的风量进行测试，将测试的结果整理如表 2 所示。采用同个机柜中各服务器的送风量标准差评价服务器送风量的均匀性。在没有设置导流板装置的情况下，各服务器风量分配的标准差为 10.28，且由于经过下方服务器③的气流水平速度过小，导致其风量分配远小于各服务器风量的平均值，冷却效果不佳，易形成局部热点。通过添加不同形式的导流板，最下层服务器的风量均得到不同程度的改善。根据表 2 可知，导流板宽度 100 mm，与开孔地板夹角为 45°时，各服务器风量分配的标准差最小，气流最为均匀。因此，基于增大最下层服务器风量以及提高机柜风量分配均匀性的考虑，对单侧机柜送风推荐使用宽度 100 mm，与开孔地板夹角为 45°的导流板。

表 2. 不同导流板形式下，服务器风量分配实验结果。

Table 2. Experimental result of server airflow rate distribution under different deflector layouts.

风量 m ³ /h	无导流板	100 mm 30°	100 mm 45°	100 mm 60°	200 mm 30°	200 mm 45°	200 mm 60°	300 mm 30°	300 mm 45°	300 mm 60°
服务器①	208.88	187.52	199.38	193.45	194.64	195.82	194.64	199.38	198.20	193.45
服务器②	208.88	195.82	197.01	201.75	201.76	202.94	199.38	207.69	208.88	199.38
服务器③	191.08	195.82	204.13	198.20	192.26	197.01	202.95	189.89	193.45	187.52
标准差	10.28	4.80	3.63	4.17	4.94	3.82	4.17	8.91	7.90	5.93

3. 实验室仿真研究

为进一步研究导流装置在更多不同场景下对于机柜气流组织的改善效果，本文建立了 ANSYS 动态仿真模型，开展了多工况仿真模拟。基于实验验证的 ANSYS 气流组织模型，本章将原有的单侧机柜送风的实验方案拓展为双侧多机柜送风的模拟工况，并通过多层次的仿真结果研究开孔地板下导流板布局形式的优化方法。

3.1. 气流组织动态仿真模型建立及验证

利用 ANSYS 软件搭建的实验室平台模型如图 6 所示。基于流体流经关键设备时的状态及流体动力学理论，ANSYS 中可进行相应的边界条件设置，本文所建立的模型选取的具体边界条件如表 3 所示。利用软件模拟四种不同的服务器布局下各服务器的进风量，并将其与表 1 中的实验数据进行对比。

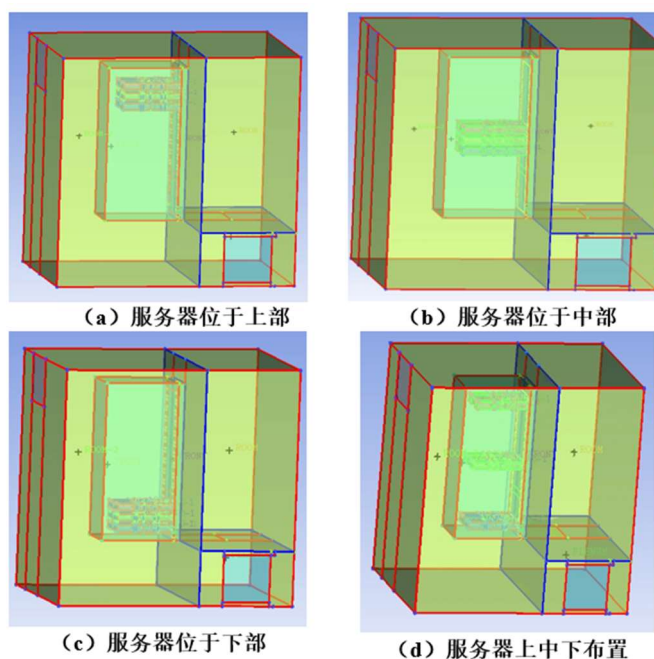


图 6. 实验室仿真模型。

Figure 6. Laboratory simulation model.

表 3. 实验室仿真模型边界条件设置。

Table 3. Laboratory simulation model's boundary condition settings.

名称	边界条件
进风口	速度进口
出风口	自由出流
开孔地板	多孔阶跃
服务器风扇	风扇
机柜前门	内部面
机柜后门	内部面

图 7 展示了模拟结果与实验结果的相对误差。可以看出，仿真和实验的误差大多小于 5%，只有两个工况下达到-7.12%和 10.59%，造成误差大的原因一方面是仪器误差，叶轮风速仪的精度为 0.1，因此，由于仪器精度，风速的测试有一定的误差；另一方面是操作误差，由于测试过程中叶轮风速仪与冷却气流来流方向呈微小角度等人为因素造成的误差，但是可以看出模拟结果和实验结果的相对误差仍在工程误差允许的范围之内 (<15%) [35]。因此，采用 ANSYS 方法建立的仿真模型是准确的，本章之后的小节中将采用所建立的 ANSYS 模型开展多工况模拟，剖析导流装置对机柜气流组织的影响。

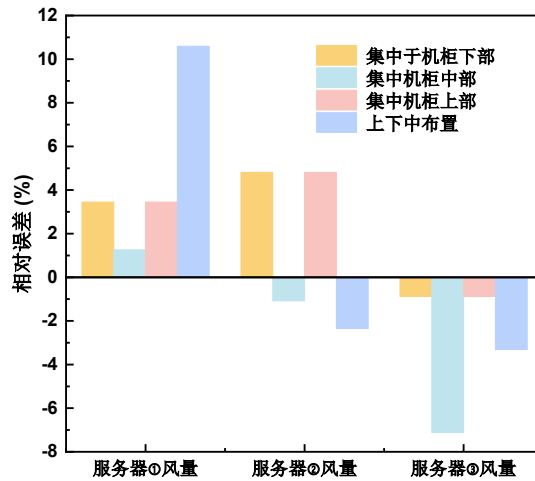


图 7. 仿真、实验结果误差对比。

Figure 7. Error comparison between simulation and experimental results.

3.2. 单机柜满布的仿真模型

在已验证的仿真模型基础上，本文将实验室的机柜模型拓展成服务器满布的形式，模拟了单机柜在不同导流板形式下的风量分配情况，导流板的尺寸及安装方式与第二章相同。将仿真的结果整理如图 8 所示，可以发现，采用宽度为 100 mm，与开孔地板角度成 45°布置的导流板，机柜内气流分布最为均匀，仿真结果与服务器非满置的实验结果一致。同样的导流板角度下，导流板宽度越大，机柜气流的不均匀性增加。此外，在送风量整体较小的情况下，由于气流衰减，上层服务器分配的风量过小，会易于造成局部热点的产生。但是仿真中未出现实验过程中底层服务器风量不足的情况，可能是由于送风速度相对较小，没有引起底部的射流直接掠过底层服务器。

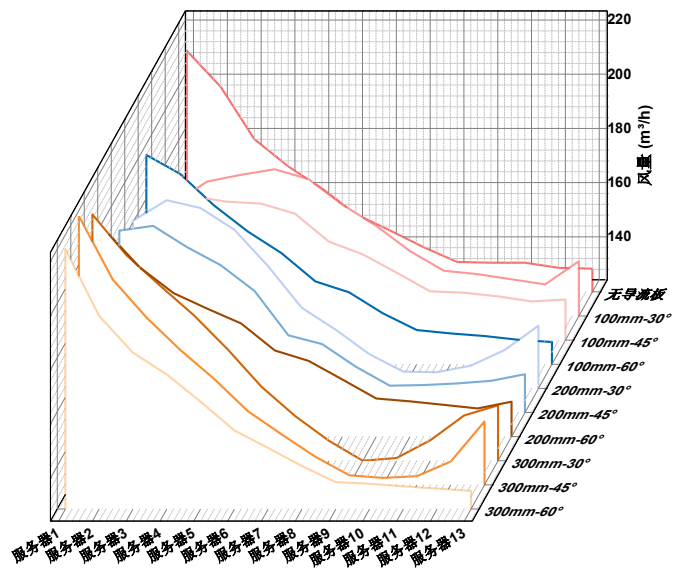


图 8. 不同导流板形式下，单个机柜服务器风量分配仿真结果。

Figure 8. Simulation result of airflow rate distribution in a single cabinet full of servers under different deflector layouts.

3.3. 双机柜满布的仿真模型

单侧机柜送风一般应用于小型机房，或后续计划扩建的机房。对于大型机房，向两侧机柜送风的形式更为常见。因此，在单机柜仿真模型的基础上，本文构建了为双侧机柜送风的模型，送风通道位于机柜中间，如图 9 所示。针对双侧送风的系统结构，本小节设计了 9 种不同的导流板形式，考虑到机柜及服务器布置的对称性，同个工况下，开孔地板两侧导流板角度一致，具体导流板设置形式如图 10 所示。

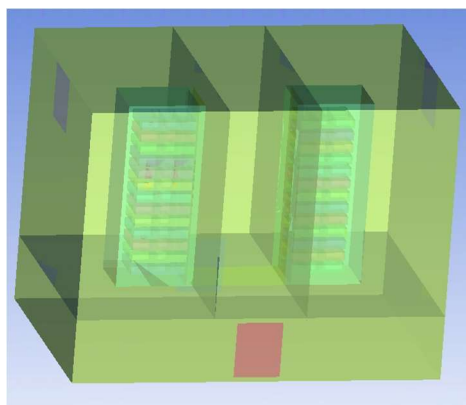


图 9. 双机柜仿真模型。

Figure 9. Dual-cabinet simulation model.

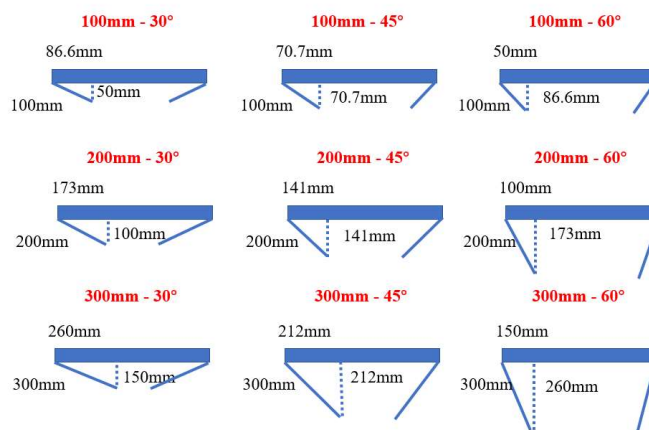


图 10. 双机柜开孔地板下导流板布局形式。

Figure 10. Layouts of deflector under the floor for dual cabinet.

基于 ANSYS 模型，本文模拟了两机柜在不同导流板布局形式下机柜的风量分配情况。模拟的结果如图 11 所示。可以看出，对于两侧机柜送风的形式，宽度 100 mm，与开孔地板夹角成 30°的导流板对气流组织的效果更好，能够极大的改善下层服务器风量不足的问题，并且能够保证较好的气流均匀性。

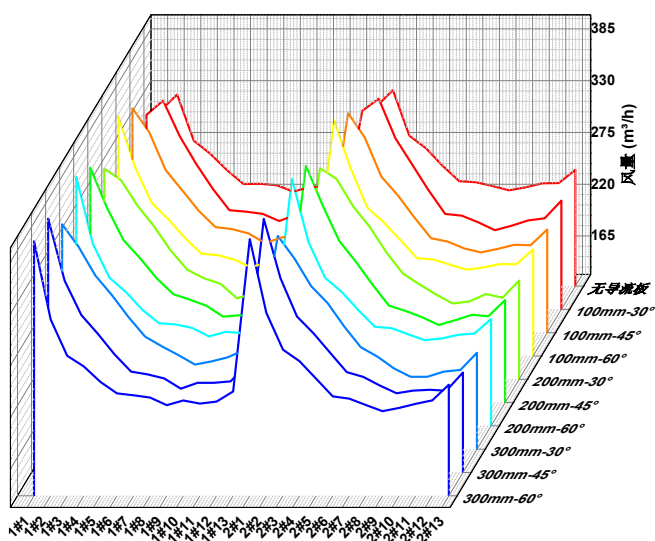


图 11. 不同导流板形式下，两个机柜服务器风量分配仿真结果。

Figure 11. Simulation result of airflow rate distribution of dual cabinets full of servers under different deflector layouts.

4. 机房实际效果仿真验证

通过以上的实验和仿真模拟，获取了不同送风方式下最佳的导流板形式。为了验证获得的结论，本文对一个实际的数据中心进行建模并采用上述研究得出的最佳导流板形式进行气流组织优化，验证其效果。

4.1. 实际机房简介及仿真模型建立

该数据机房占地面积为 355.98 m²（长 34.9 m，宽 10.2 m），高度为 5.1 m。机房共有 14 列，150 个机柜。每个机柜的大小略有不同，最常用的机柜尺寸为 600 mm（宽）× 1000 mm（长）× 2200 mm（高）。各机柜中服务器的布置差别较大。机房采用下送上回的气流组织形式，送风由 20 个精密空调控制，其中 2 台为冗余机组。机房的两侧分别安置 8 台精密空调进行对吹，流经静压箱后，通过开孔地板向机房送风。精密空调选用艾默生品牌，型号为 P2100GC2MS1R，额定制冷量为 100 kW。静压箱的高度为 700 mm。采用尺寸为 600 mm × 600 mm，开孔率为 45% 的开孔地板。机柜采用前进后出送风形式。该机房的仿真模型如图 12 所示。

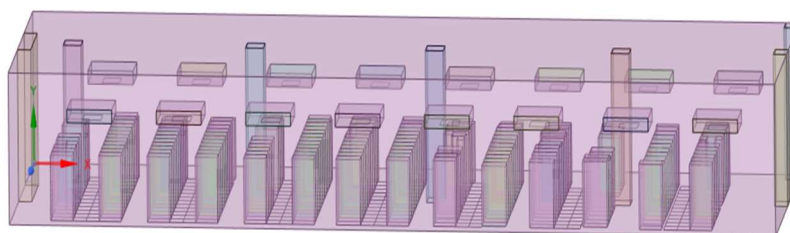


图 12. 实际机房的仿真模型。

Figure 12. Simulation model of data center.

4.2. 实际机房模型验证

为验证 ANSYS 模型的准确性，在机房中距地 1.5 m 布置了 24 个环境温度测点，其具体位置如图 13 所示。以机房 24 个环境测点监测的温度作为准确性检验的标准，对比测试和仿真数据结果，如图 14 所示。

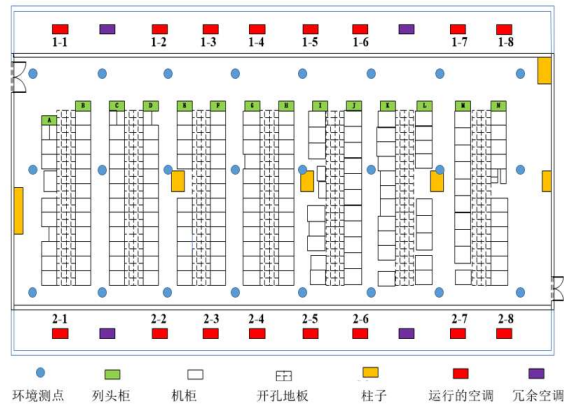


图 13. 机房环境温度测点布置图。

Figure 13. Layout of ambient temperature measurement points in computer room.

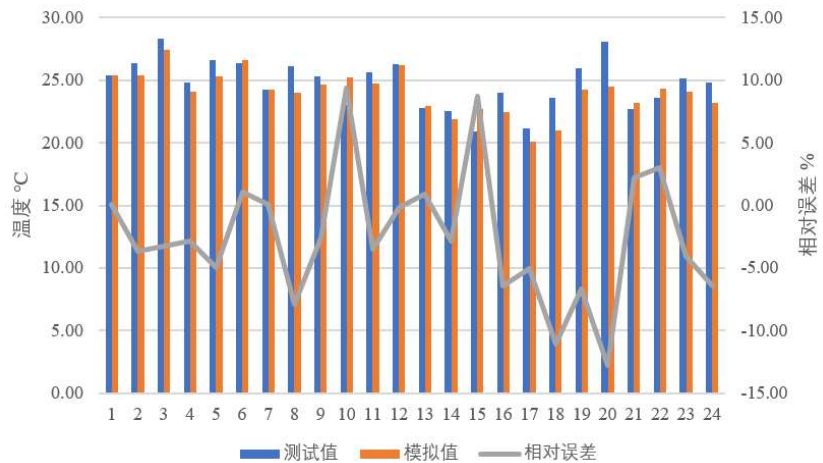


图 14. 模型验证结果。

Figure 14. Comparison of results for model verification.

可以看出每个测点的相对误差均小于 13%。采用 ASHRAE 14-2014 标准中常用的归一化平均偏差误差 (normalized mean bias error, NMBE) 和均方误差变异系数 (coefficient of variation of mean square error, CVRMSE) 评估模型误差，计算方法见公式 (1) 和公式 (2)。

$$NMBE = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (E_{si} - E_{mi})}{(n - p) \times \bar{E}_m} \quad (1)$$

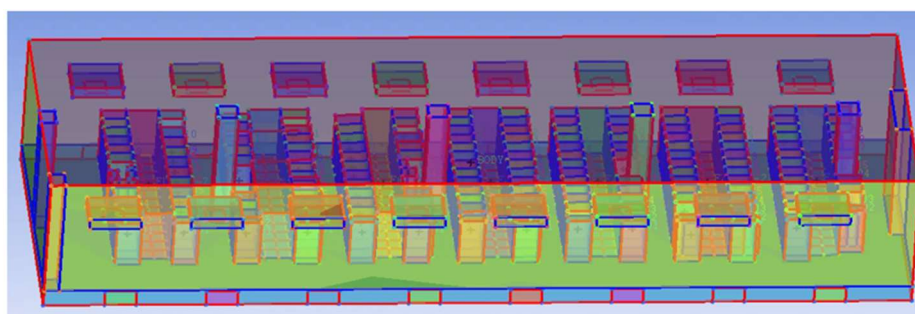
$$CVRMSE = 100 \times \frac{\left[\sum (E_{si} - E_{mi})^2 / (n - p) \right]^{1/2}}{\bar{E}_m} \quad (2)$$

其中， E_{si} 是实测数据， E_{mi} 是仿真模拟数据， N 是数据数量， \bar{E}_m 是实测数据的平均值， $p = 1$ 。

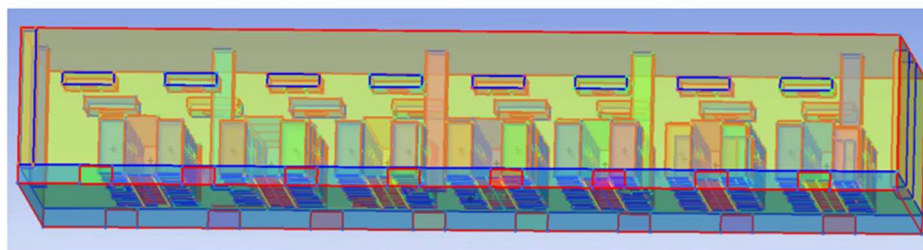
经过计算，24 个测点的 NMBE 为-2.74% (<5%)，CVRMSE 为 5.87% (<15%)，远远低于 ASHRAE 中相应的限定值。说明建立的 ANSYS 模型是可以接受的，并能够应用于案例的优化研究。

4.3. 导流板优化

该机房服务器大多分布于机柜的中下部，且机房中均为向两个机柜送风的形式，基于上一章的模型优化结果，设置导流板宽度为 100 mm，与地板夹角为 30°的导流板进行安装。将上述导流板布置到整个机房中进行优化前后效果对比，具体模型如图 15 所示。



(a) 机房无导流板模型



(b) 安装导流板的机房模型

图 15. 实际机房导流板模型。

Figure 15. Models of data center with and without deflectors.

经过仿真得到温度场和机柜风量的结果对比，分别如图 16 和表 4 所示。可以看出，采用导流板之后，进入机柜的风量增加了 16.98%，更多的冷却气流参与直接对服务器的冷却降温。机房温度场如图 17，可以看出，安装导流板后机房整体环境的平均温度变化不明显，但是温度均匀性略有提升，机房的气流组织得到了一定的改善。机房速度场的分布如图 18 所示，设置导流板后服务器入口处风速明显增大，且机柜不同位置处的气流速度更加均匀。对比无导流板的机房速度场，安装导流板可减少机房中局部区域过大的风量或低速涡流，冷却气流可以更加有效的与服务器换热，从而起到良好的降温效果。此外，从图 19 中机柜的进风面速度分布可以看出采用导流板后机柜顶部和底部服务器的进风量均得到提升，有效缓解机柜下方服务器由于送风射流速度过大，水平分速度过小引起的风量不足问题。

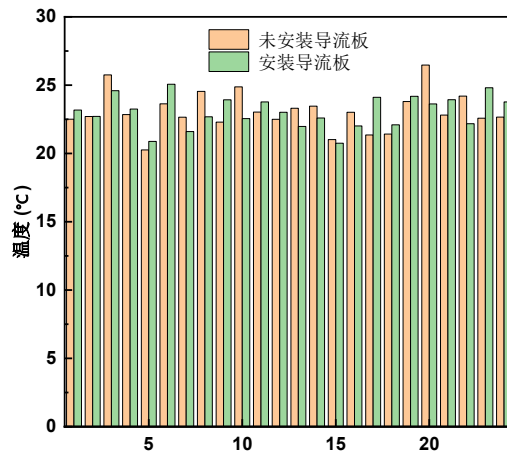


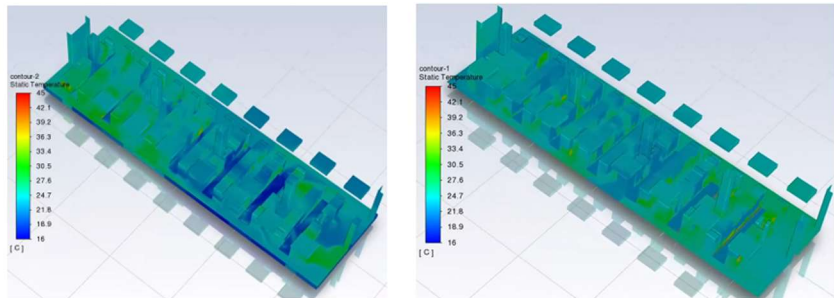
图 16. 安装导流板前后对机房温度测点的影响。

Figure 16. Impact on temperature in data center before and after installing deflectors.

表 4. 安装导流板前后机柜的质量流量。

Table 4. Mass flow rate of air in cabinets before and after deflectors were installed.

风量	未安装导流板	安装导流板
质量流量 (kg/s)	63.427	74.200

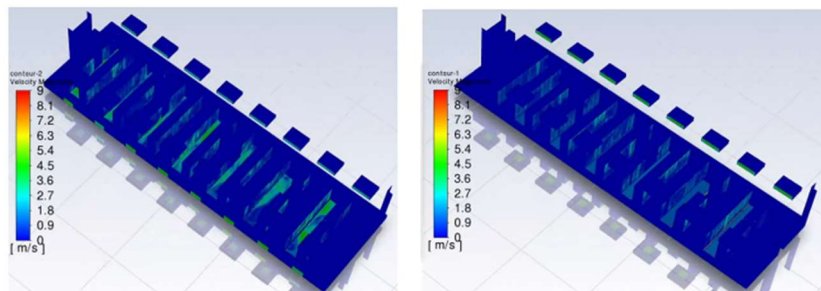


(a) 未安装导流板

(b) 安装导流板

图 17. 实际数据中心机房安装导流板前后温度场。

Figure 17. Temperature fields before and after installation of deflectors in data center.



(a) 未安装导流板

(b) 安装导流板

图 18. 实际数据中心机房安装导流板前后速度场。

Figure 18. Air inlet surface velocity field in cabinets.

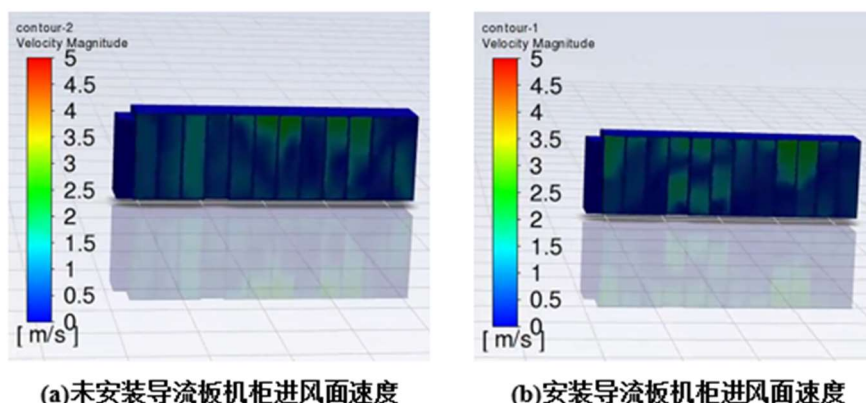


图 19. 实际数据中心机房机柜进风面速度场。

Figure 19. Air inlet surface velocity field in data center computer room's cabinets.

安装导流板后，实际参与冷却服务器的其流量增加，因此，在相同的服务器出风温度下，精密空调的制冷温度可有所提升，从而节约能耗。根据安装导流板前后的风量模拟结果差异，假设服务器的出风温度为 45 °C [12]，由计算公式 (3) 可知在相同的出风温度下，安装导流板后的服务器送风温度可以比未安装导流板的送风温度高 0.46 °C。基于相关研究 [36]，送风温度每升高 1 °C，数据中心精密空调能耗可节能 4.3%，安装导流板可提升空调系统能效 1.98%。

$$t_2 - t_1 = \frac{Q}{cm} \quad (3)$$

其中， Q ，服务器功率，kw； t_2 ，服务器回风温度，°C； t_1 ，服务器送风温度，°C； c ，空气比热容，kJ/kg.K； m ，空气质量流量，kg/s。

5. 结论

针对数据中心由于气流组织不佳而导致的 PUE 较高问题，本文提出了一种基于导流板的简单经济的解决方法。结合现场实验与模拟仿真，分析了多种工况下，机柜垂直方向气流分布现状。面向单侧送风与双侧送风的不同场景，优化了导流板的尺寸与设置角度。结合实际案例，分析了导流板对机房气流组织及能效的提升效果。本文的具体结论如下：

- 1) 采用导流板布局形式对机柜气流组织改善具有积极的作用。
- 2) 对于单侧机柜送风，建议采用导流板宽度 100 mm，与开孔地板夹角为 45° 的布局形式。在增大下层服务器风量的同时，提高了机柜内风量分配的均匀性。
- 3) 对于双侧机柜送风，建议采用导流板宽度 100 mm，与开孔地板夹角为 30° 的布局形式，可增强机柜中气流分配的均匀性。
- 4) 基于对某实际数据中心机房的模拟，优化布置导流板，可有效提升机房内气流组织速度场与温度场的均匀性，提升空调系统能效达 1.98%。

作者贡献: 概念化, 周志华和杨晓晨; 方法学, 杜亚慧; 软件, 杜亚慧; 验证, 马博洋、刘海勇和路洁; 形式分析, 刘海勇; 调查, 湛莹; 资源, 刘海勇; 数据整理, 马博洋; 写作—原稿准备, 杜亚慧和马博洋; 写作—审阅和编辑, 杨晓晨; 可视化, 周志华; 监督, 马博洋; 项目管理, 刘海勇; 经费获取, 刘海勇。所有作者均已阅读并同意手稿的出版版本。

利益冲突: 作者声明没有潜在的利益冲突。

参考文献

1. 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告, 2019. 中国建筑工业出版社; 2020. China Refrigeration Society Data Center Cooling Working Group. China Data Center Cooling Technology Annual Development Research Report 2019 (Chinese). China Architecture & Building Press; 2020.
2. Ajayi O, Heymann R. Data centre day-ahead energy demand prediction and energy dispatch with solar PV integration. *Energy Reports*. 2021; 7: 3760–3774. doi: 10.1016/j.egyr.2021.06.062
3. Du Y, Zhou Z, Yang X, et al. Dynamic thermal environment management technologies for data center: A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2023; 187: 113761. doi: 10.1016/j.rser.2023.113761
4. Ristic B, Madani K, Makuch Z. The water footprint of data centers. *Sustain*. 2015; 7: 11260–11284. doi: 10.3390/su70811260
5. Shehabi A, Horvath A, Nazaroff W, et al. Energy implications of economizer use in California data centers. In: Proceedings of the 2008 ACEEE Conference, Asilomar Conference Center; 17–22 August 2008; Pacific Grove, CA, USA. pp. 319–30.
6. Ni J, Jin B, Zhang B, Wang X. Simulation of thermal distribution and airflow for efficient energy consumption in a small data centers. *Sustain*. 2017; 9: 1–16. doi: 10.3390/su9040664
7. 王永真, 赵伟, 张靖. 能源互联网下的数据中心能源供应. *能源*. 2020, (5): 61–65. Wang Y, Zhao W, Zhang J. Data center energy supply under the Energy Internet (Chinese). *Energy*. 2020, (5): 61–65.
8. Green Grid. PUE: A comprehensive examination of the metric. *GreenGrid*. 2012; 2012: 1–83.
9. Dai J, Ohadi MM, Das D, et al. *Optimum Cooling of Data Centers*. Springer New York; 2014. doi: 10.1007/978-1-4614-5602-5
10. 张广明. 数据中心能耗现状与节能技术. 中国电源学会2011年现代数据中心基础设施建设技术年会论文集. 2011, 99–120. Zhang G. Current status of data center energy consumption and energy-saving technologies (Chinese). Proceedings of the 2011 Modern Data Center Infrastructure Construction Technology Annual Conference of China Power Supply Society. 2011, 99–120.
11. Gözcü O, Özada B, Carfi MU, Erden HS. Worldwide energy analysis of major free cooling methods for data centers. In: Proceedings of the 2017 16th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm); 30 May–02 Jun 2017; Orlando, FL, USA. pp. 968–976.
12. Zhao R, Du Y, Yang X, et al. A critical review on the thermal management of data center for local hotspot elimination. *Energy and Buildings*. 2023, 297: 113486. doi: 10.1016/j.enbuild.2023.113486
13. Cho J, Yang J, Park W. Evaluation of air distribution system's airflow performance for cooling energy savings in high-density data centers. *Energy and Buildings*. 2014, 68: 270–279. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.09.013
14. Nadjahi C, Louahlia H, Lemasson S. A review of thermal management and innovative cooling strategies for data center. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2018, 19: 14–28. doi: 10.1016/j.suscom.2018.05.002
15. Karki KC, Patankar SV. Airflow distribution through perforated tiles in raised-floor data centers. *Building and Environment*. 2006, 41(6): 734–744. doi: 10.1016/j.buildenv.2005.03.005
16. Bhopte S, Agonafer D, Schmidt R, et al. Optimization of data center room layout to minimize rack inlet air temperature. *Journal of Electronic Packaging*. 2006, 128(4): 380–387. doi: 10.1115/1.2356866
17. Nada SA, Said MA. Comprehensive study on the effects of plenum depths on air flow and thermal managements in data centers. *International Journal of Thermal Sciences*. 2017, 122: 302–312. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.001

18. Nagarathinam S, Fakhim B, Behnia M, et al. A comparison of parametric and multivariable optimization techniques in a raised-floor data center. *Journal of Electronic Packaging*. 2013, 135(3). doi: 10.1115/1.4023214
19. Patankar SV, Karki KC. Distribution of cooling airflow in a raised-floor data center. *ASHRAE Trans*. 2004; 110: 629–634.
20. Sorell V. The Oft-forgotten component of air flow management in data center applications. *ASHRAE Trans*. 2011; 117: 427–432.
21. Rambo J, Nelson G, Joshi Y. Airflow distribution through perforated tiles in close proximity to computer room air-conditioning units. *ASHRAE Trans*. 2007; 113(PART 2): 124–135.
22. VanGilder JW, Pardey ZM, Healey CM. Measurement of perforated tile airflow in data centers. *ASHRAE Conf*. 2016; 122: 88–98.
23. VanGilder JW, Sheffer ZR, Zhang X, Healey CM. Potential flow model for predicting perforated tile airflow in data centers. *ASHRAE Trans*. 2011; 117: 771–786.
24. Nada SA, Elfeky KE, Attia AMA, et al. Experimental parametric study of servers cooling management in data centers buildings. *Heat and Mass Transfer*. 2017, 53(6): 2083-2097. doi: 10.1007/s00231-017-1966-y
25. Kang S, Schmidt RR, Kelkar KM, et al. A methodology for the design of perforated tiles in raised floor data centers using computational flow analysis. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. 2001, 24(2): 177-183. doi: 10.1109/6144.926380
26. Karki KC, Radmehr A, Patankar SV. Use of computational fluid dynamics for calculating flow rates through perforated tiles in raised-floor data centers. *HVAC&R Research*. 2003; 9(2): 153-166. doi: 10.1080/10789669.2003.10391062
27. Nada SA, Said MA, Rady MA. Numerical investigation and parametric study for thermal and energy management enhancements in data centers' buildings. *Applied Thermal Engineering*. 2016; 98: 110-128. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.020
28. Arghode VK, Sundaralingam V, Joshi Y. Airflow management in a contained cold aisle using active fan tiles for energy efficient data-center operation. *Heat Transfer Engineering*. 2015; 37(3-4): 246-256. doi: 10.1080/01457632.2015.1051386
29. Makwana YU, Calder AR, Shrivastava SK. Benefits of properly sealing a cold aisle containment system. In: *Proceedings of the Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*; 27–30 May 2014; Orlando, FL, USA. pp. 793–797. doi: 10.1109/itherm.2014.6892362
30. Tatchell-Evans M, Kapur N, Summers J, et al. An experimental and theoretical investigation of the extent of bypass air within data centres employing aisle containment, and its impact on power consumption. *Applied Energy*. 2017; 186: 457-469. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.076
31. Manoch Lukáš, Novotný Jan, Nováková Ludmila. Investigation of flow in data rack. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2012; 6(12). doi: 10.17265/1934-7359/2012.12.012
32. Phan, L, Hu, B, Lin, C. Air flow velocity field validation and turbulence studies on a single rack model in data centers. In: *Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Volume 8A: Heat Transfer and Thermal Engineering; 9–15 November 2018; Pittsburgh, Pennsylvania, USA. doi: 10.1115/IMECE2018-86575
33. Wang CH, Tsui YY, Wang CC. Airflow management on the efficiency index of a container data center having overhead air supply. *J Electron Packag Trans ASME*. 2017; 139: 1–10. doi: 10.1115/1.4038114
34. Alkharabsheh S, Sammakia B, Murray B, et al. Experimental characterization of pressure drop in a server rack. In: *Proceedings of the Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*; 27–30 May 2014; Orlando, FL, USA. pp. 547–556. doi: 10.1109/itherm.2014.6892329
35. Jin C, Bai X, Yang C. Effects of airflow on the thermal environment and energy efficiency in raised-floor data centers: A review. *Science of The Total Environment*. 2019, 695: 133801. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133801
36. Wang N, Zhang J, Xia X. Energy consumption of air conditioners at different temperature set points. *Energy and Buildings*. 2013, 65: 412-418. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.06.011

Article

Simulation and experimental research on the optimization of airflow organization and energy saving in data centers using air deflectors

Boyang Ma¹, Haiyong Liu¹, Yahui Du², Xiaochen Yang^{2,*}, Zhihua Zhou², Jie Lu¹, Ying Chen¹

¹ China Mobile Park Construction and Development Co., Ltd., Beijing 102206, China

² Tianjin Key Laboratory of Built Environment and Energy Applications, School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

* **Corresponding author:** Xiaochen Yang, xiaochen.yang@tju.edu.cn

Abstract: The airflow organization of the data center directly affects the temperature control performance and the energy efficiency of the cooling equipment. The servers at the bottom of the rack usually suffer from insufficient airflow rate and poor cooling effect due to the limited distance from the perforated floor and the corresponding small horizontal velocity of the supply airflow. This study aims to improve the uniformity of the cooling airflow in the vertical direction of the rack by the air deflectors, thereby further improving the overall airflow organization in the data center. The size and installation of the deflectors in the data center were optimized according to both the experiment and numerical simulation results concerning various working situations. From the results, it is recommended to install the deflector with a width of 100 mm at an angle of 45° under the perforated floor for the rack with the single-side airflow supply. For the rack with the double-side airflow supply, the width of the deflector should be 100 mm and installed at an angle of 30° to the perforated floor to achieve the best airflow distribution. Consequently, the intake airflow rate for the bottom servers significantly increased, and the occurrence of the local hot spots was effectively reduced. The numerical simulation of the airflow organization with and without the deflector was conducted by ANSYS. By comparing the performances of the two scenarios, the installation of the deflectors increased the inlet airflow rate for the rack by 16.98% and improved the energy efficiency of the computer room air conditioners by 1.98%.

Keywords: data center; airflow organization; ANSYS simulation; deflector; energy efficiency improvement