

文章编号: 1671-6612 (2022) 06-819-09

直接蒸发冷却空调机组 制冷的数据中心气流组织模拟优化

陈梦¹ 黄翔¹ 马钢¹ 史东旭¹ 沈天磊¹ 苏林² 颜利波² 陶昌军³

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710600;

2. 广东美的暖通设备有限公司 佛山 528000;

3. 西藏宁算科技集团有限公司 拉萨 510000)

【摘要】 针对直接蒸发冷却空调机组制冷的数据中心气流组织存在局部热点、送风不均等问题, 采用 Fluent 仿真软件对其进行模拟分析, 对其风口尺寸、位置进行优化: 最终选取机房 A 送风口最佳尺寸为 1400mm×2300mm, 机房 B 送风口最佳尺寸为 1600mm×2300mm, 回风口尺寸为 2300mm×1800mm; 对其机柜布局进行优化, 发现机房 A、B 的几种布局方案都存在一些局部热点, 因此综合考虑在未来数据中心机房建设布局时, 可以在存在局部热点的位置放置列头柜或功率较小的设备。同时综合考虑气流组织及造价等多方面因素, 确定方案③为样本数据中心直接蒸发冷却空调机组叠放进排风方案, 方案③也可以广泛应用于各种形式数据中心空调机组的叠放, 而其他几种方案也可以结合实际对造价、气流组织的要求, 适用于不同形式的数据中心, 优化气流组织也是未来数据中心降低空调系统能耗的重要研究方向。

【关键词】 数据中心; 直接蒸发冷却空调机组; 气流组织; 模拟优化

中图分类号 TU831 文献标识码 A

Simulation Optimization of Airflow Distributions in Data Centers Cooled by Direct Evaporative Cooling Air Conditioning Units

Chen Meng¹ Huang Xiang¹ Ma Gang¹

Shi Dongxu¹ Shen Tianlei¹ Su Lin² Yan Libo² Tao Changjun³

(1. School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710600;

2. Guangdong Midea HVAC Equipment Co., Ltd, Foshan, 528000;

3. Tibet Ningsuan Technology Group Co., Ltd, Lhasa, 510000)

【Abstract】 In view of the problems of local hot spots and uneven air supply in the airflow organization of data centers cooled by direct evaporative cooling air-conditioning units, Fluent simulation software was used to simulate and analysis the air outlet size and location for optimization: the best size of air outlet for Server Room A was finally selected as 1400mm×2300mm, the best size of air outlet for Server Room B was 1600mm×2300mm, and the size of return air outlet was 2300mm×1800mm; The layout of the

基金项目: 2022 年度西安工程大学研究生创新基金项目 (编号: chx2022031)

作者简介: 陈梦 (1998-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 1348313387@qq.com

通讯作者: 黄翔 (1962-), 男, 教授, E-mail: huangx@xpu.edu.cn

收稿日期: 2022-04-29

cabinets was optimized and it was found that there were some local hot spots in several layout solutions of Server Room A and B. Therefore, when considering the layout of the future data center server room construction, column head cabinets or less powerful equipment can be placed in the locations where there are local hot spots. At the same time, considering various factors such as airflow distribution and cost, scheme ③ is identified as the sample data center direct evaporative cooling air conditioning unit stacked into and out of the air scheme, and scheme ③ can also be widely used in various forms of data center air conditioning unit stacking, while several other schemes can also be combined with the actual requirements on cost and airflow distribution and applied to different forms of data centers. The optimization of airflow distribution is also an important research direction for reducing the energy consumption of air conditioning systems in data centers in the future.

【Keywords】 Data center; direct evaporative cooling air conditioning units; airflow distribution; simulation optimization

0 引言

蒸发冷却是一种利用干空气能制冷,绿色、环保、高效、经济的冷却方式,被广泛应用于居住建筑和公共建筑中以满足舒适性冷却,近年来也逐步被应用于数据中心领域^[1],应运而生的直接蒸发冷却空调机组通过空气和水直接接触发生热湿交换,水蒸发带走热量进而冷却空气,空气被冷却的极限温度为室外空气的湿球温度^[2]。直接蒸发冷却空调机组结构较为简单,主要由过滤段、直接蒸发冷却段、风机段组成,其中的直接蒸发冷却段主要分为填料式、喷雾式两种形式^[3]。

近年来,随着“新基建”政策的指引,数据中心逐步走进我们的视野,数据中心的建设规模和数量呈现快速增长的趋势,但数据中心能耗巨大,一般是写字楼耗电量的 50 倍,其中制冷能耗约占数据中心总能耗的 40%,是数据中心能耗的主要组成部分^[4]。而国内外专家学者针对数据中心气流组织优化设计进行研究,李婷婷^[5]指出数据中心由于气流组织设计不合理损失的空调冷量为 60%,即就是说,空调损失的大部分冷量都是因为气流组织设计不合理导致的。彭殿贞^[6]发现,数据中心空调节能的核心不仅是空调系统,机房气流组织也是非常重要的。要尽可能避免各种不同温度的气流掺混,合理组织气流,才能提高空调系统效率,降低空调系统能耗。

目前计算流体力学的软件例如主要用于化工领域常用的 Fluent、用于固体传热和应力应变分析的 ansys 及主要用于气流组织模拟的 airpak^[7],闻发凡^[8]采用 Fluent 和 Ansys 仿真软件对某中心空调房间温度场分布的数据分析,从而为该中心配备空

调的选型和安装提供理论依据。杨超^[9]对数据中心机房优化气流组织的方式进行了研究发现对于架空地板的送风方式,可调整地板格栅的开孔大小和位置,使冷气流的出风均匀。肖新文^[10]对间接蒸发冷却空调箱机组运用于数据中心的三种常用的送回风方式进行了气流组织模拟,综合不同运行模式下温度场及流场的模拟结果,高架地板下送顶回的气流组织最佳。

因此本文亦采用 Fluent 仿真软件进行气流组织分析,针对采用直接蒸发冷却空调机组制冷的数据中心,通过对其风口尺寸、位置,机柜布局进行模拟优化以解决数据中心气流组织存在局部热点、送风不均等问题,同时对机房蒸发冷却空调机组叠放进排风方案进行了分析。

1 CFD 模拟

1.1 样本数据中心物理模型

该数据中心建设地点为拉萨市,最大冷负荷为 7854kW,空调系统采用了热回收型直接蒸发冷却方案。在拉萨地区高海拔、低温、低湿的气候下,因地制宜地利用当地蕴藏丰富的“干空气能”可再生能源,通过回收利用数据中心机房余热,为设施农业、设施养殖业供暖,实现清洁能源的再利用。

数据中心由两种机房单元组成,具体参数如表 1 所示。机房 A 布置 120 个机柜,机房 B 布置 160 个机柜,单机柜功率 5kW。机房 A 每列布置 10 个机柜,南北方向(数据中心宽度)上布置两列机柜,两列之间预留 2.9m。机房 B 服务器,每列布置 10 个机柜,南北方向(数据中心宽度)上布置两列机柜,两列之间预留 2.9m。

表 1 数据中心机房具体参数
Table 1 Data center server room specific parameters

机房	机房 A	机房 B
海拔 (m)	3650	
气压 (Pa)	65230	
送风方式	底侧送风顶部回风	
机房尺寸 (长×宽×高) (mm×mm×mm)	17800×19830×6350	27000×19830×6350
总功率 (kW)	600	800
机柜尺寸 (mm×mm×mm)	600×1200×2200	600×1200×2200
空调机组送风口个数	4	5
空调机组回风口个数	4	5
吊顶距地面高度 (mm)	3200	3200
总风量 (m³/h)	195000	260000

依据 GB 50174-2017《数据中心设计规范》A 级机房要求, 机房 A、机房 B 设计送风温度 22℃, 回风温度为 37℃。该数据中心采用底侧送风顶部回风的气流组织方式, 将 9 台空调箱机组放置在数据中心机房的一侧, 机房 A 按照 3+1 配置、机房 B 按照 4+1 配置; 每台机组额定制冷量为 210kW, 额定风量为 65000m³/h。空调机组送风口采用立式风口设计, 送风口尽可能与冷通道保持正对, 避免气流受机柜阻挡产生涡流, 数据中心平面及空调机组布置如图 1 所示。

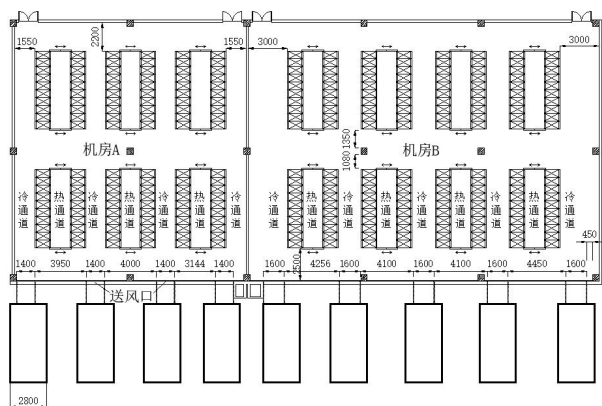


图 1 数据中心平面及机组布置图

Fig.1 Data center floor plan and unit layout

1.2 机房模型建立及网格划分

机房建模和网格划分结果如图 2 所示, 网格划分过程中分别计算了 5×10⁵ 网格、12×10⁵ 网格和 25×10⁵ 网格, 以此对网格的独立性进行了验证, 随着网格数量增多, 相关参数变化不大, 为减少计算量, 综合考虑计算资源以及准确性的要求, 模型采用了 5×10⁵ 的网格。

表 2 网格独立性验证

Table 2 Grid independence verification

网格数量	5×10 ⁵	12×10 ⁵	25×10 ⁵
送风温度 (°C)	22.0	22.1	22.0
送风风速 (m/s)	5.6	5.6	5.5

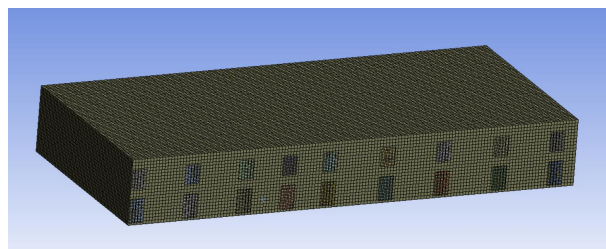


图 2 网格划分结果效果图

Fig.2 Results of the grid division

1.3 边界条件及数学模型

机房送风口、回风口均设为速度入口, 速度和温度数值按照机房要求得到, 机组的新风口设为压力入口, 机组的排风口设为压力出口, 围护结构的温度取环境温度。采用 Fluent 软件进行计算, 湍流模型为标准 $k-\epsilon$ 模型, 壁面采用标准壁面函数法处理 (standard wall function), 采用 SIMPLEC 算法, 对流项差分格式采用二阶迎风格式, 扩散项采用二阶中心差分格式, 同时求解时设置控制残差, 并保证 CFD 求解残差为 1。

2 风口尺寸、位置优化

2.1 方案设计

为了对机房风口尺寸、位置进行优化, 共设计了 5 种尺寸的送风口进行仿真模拟对比, 为使空气

流场在垂直方向更为均匀,应尽可能让送风口下边沿距机房地面高度设置为 200mm,具体送风沿与机柜底部同高,在 5 种方案中,选择送风口下

表 3 机房送风口尺寸

Table 3 Machine room air outlet size

机房	方案	送风口宽×高 (mm×mm)
机房 A	方案①	1400×2000
	方案②	1800×2000
	方案③	1400×2300
机房 B	方案④	1400×2300
	方案⑤	1600×2300

2.2 仿真模拟结果

为了准确了解机房温度分布情况,保持数据中

心总循环风量及制冷量不变,对不同方案的温度场

进行模拟,具体模拟结果如表 4、表 5 所示。

表 4 机房 A 不同送风口尺寸模拟结果

Table 4 Simulation results for different air supply opening sizes in plant room A

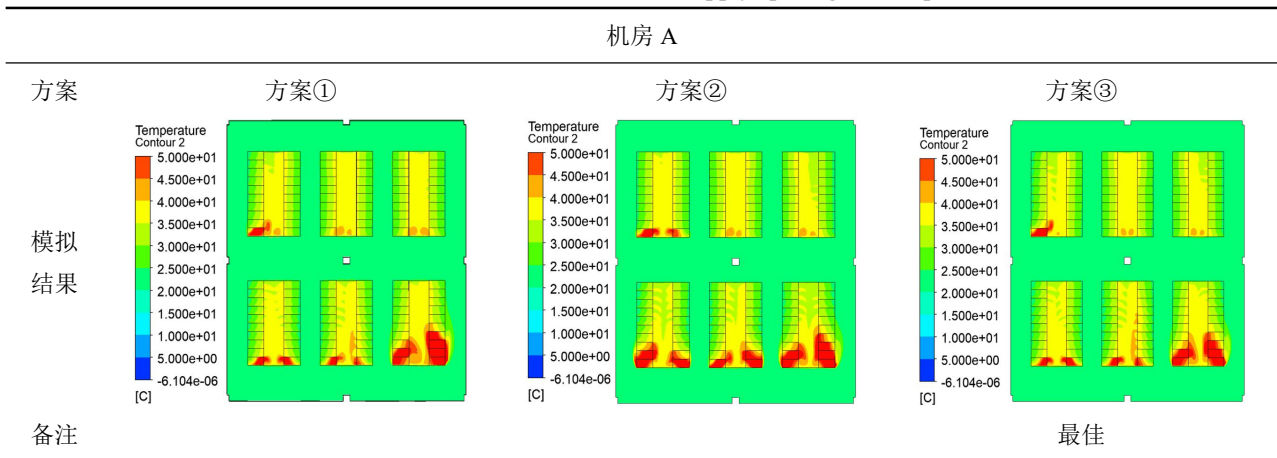
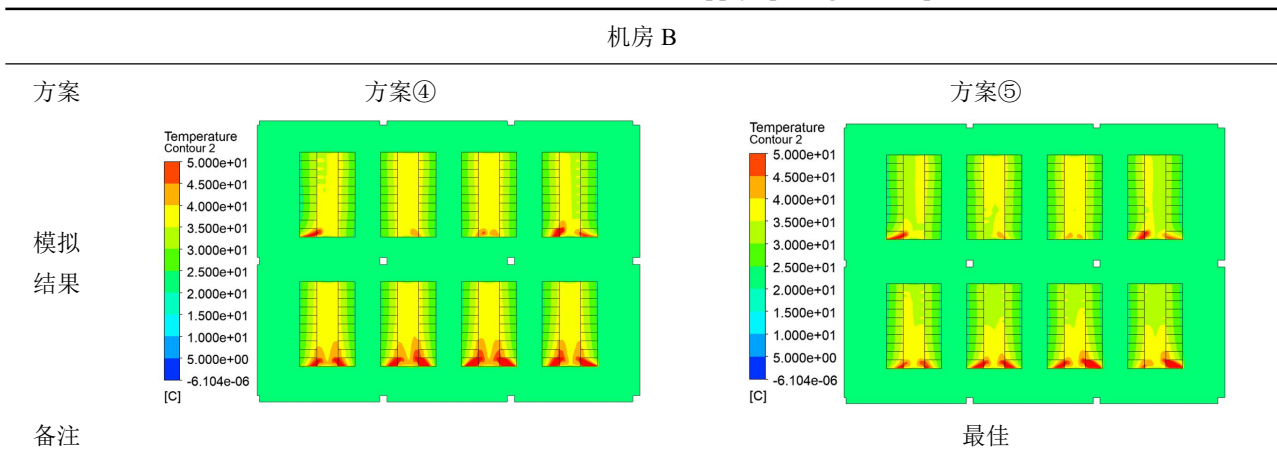


表 5 机房 B 不同送风口尺寸模拟结果

Table 5 Simulation results for different air supply opening sizes in plant room B



从温度分布可以看出:无论采用哪种方案,由于靠近送风口位置动压较高,靠近送风口的机柜的风量偏小,散热效果较差,都存在局部热点,但是

机房 A 的方案③相对于方案①和方案②而言,局部热点的范围均有所减小;机房 B 的方案⑤相对于方案④而言,局部热点的范围均有所减小。

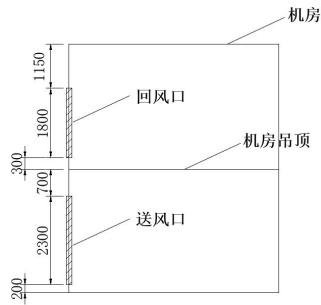


图 3 风口立面图

Fig.3 Elevation of air outlet

因此选取机房 A 送风口最佳尺寸为 1400mm × 2300mm, 机房 B 送风口最佳尺寸为 1600mm ×

2300mm; 回风口尺寸对机房气流组织影响较小, 本着尽可能降低整体流阻的原则, 取较大的回风口尺寸为 2300mm × 1800mm。最终选取空调机组送风口下边沿距离地面高度 200mm, 吊顶距离地面高度 3200mm, 回风口下边沿距离吊顶高度 300mm, 风口立面如图 3 所示。

3 机柜布局优化

3.1 方案设计

为了对机柜布局进行优化, 共设计了 4 种机柜布局方案、选取不同的冷热通道尺寸进行仿真模拟对比, 具体方案如表 6 所示。

表 6 机柜布局方案

Table 6 Cabinet layout solutions

机房	机房 A			机房 B
方案	方案①	方案②	方案③	冷通道宽度 1.8m
具体形式	冷通道宽度 1.5m 热通道宽度 1.5m	冷通道宽度 1.5m 热通道宽度 1.2m	用于没有电缆井的机房	热通道宽度 1.5m

3.2 仿真模拟结果

为了准确了解机柜不同高度的进风温度分布情况, 分别在不同水平高度、竖直高度截取平面温

度场, 截面示意图如图 4 所示, 模拟中保持数据中心总循环风量及制冷量不变对不同方案进行模拟。

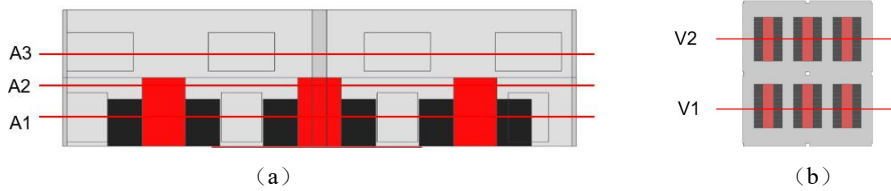


图 4 (a) 机柜水平截面示意图和 (b) 竖直截面示意图

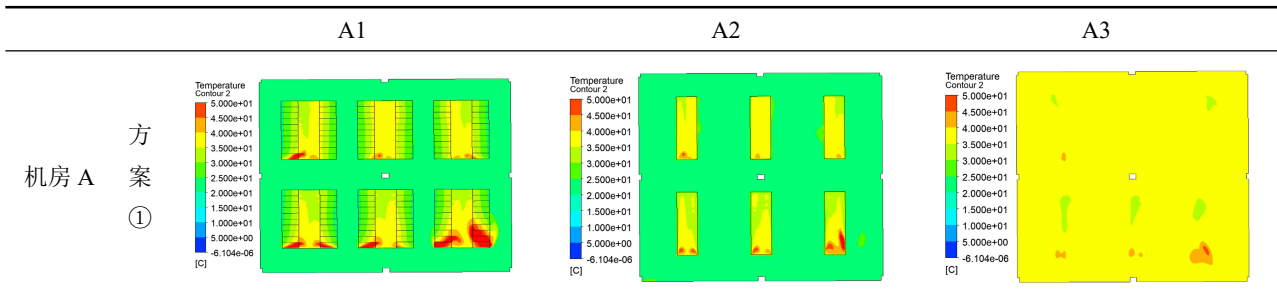
Fig.4 (a) Schematic diagram of the horizontal section of the cabinet (b) Schematic diagram of vertical section

机组全开情况, 几种方案下机房不同水平截面、竖直截面温度分布云图分别如表 7、表 8 所示、

A1 平面流线分布图如表 9 所示。

表 7 机房不同水平截面温度分布云图

Table 7 Cloud map of temperature distribution in different horizontal sections of the server room



续表 7 机房不同水平截面温度分布云图

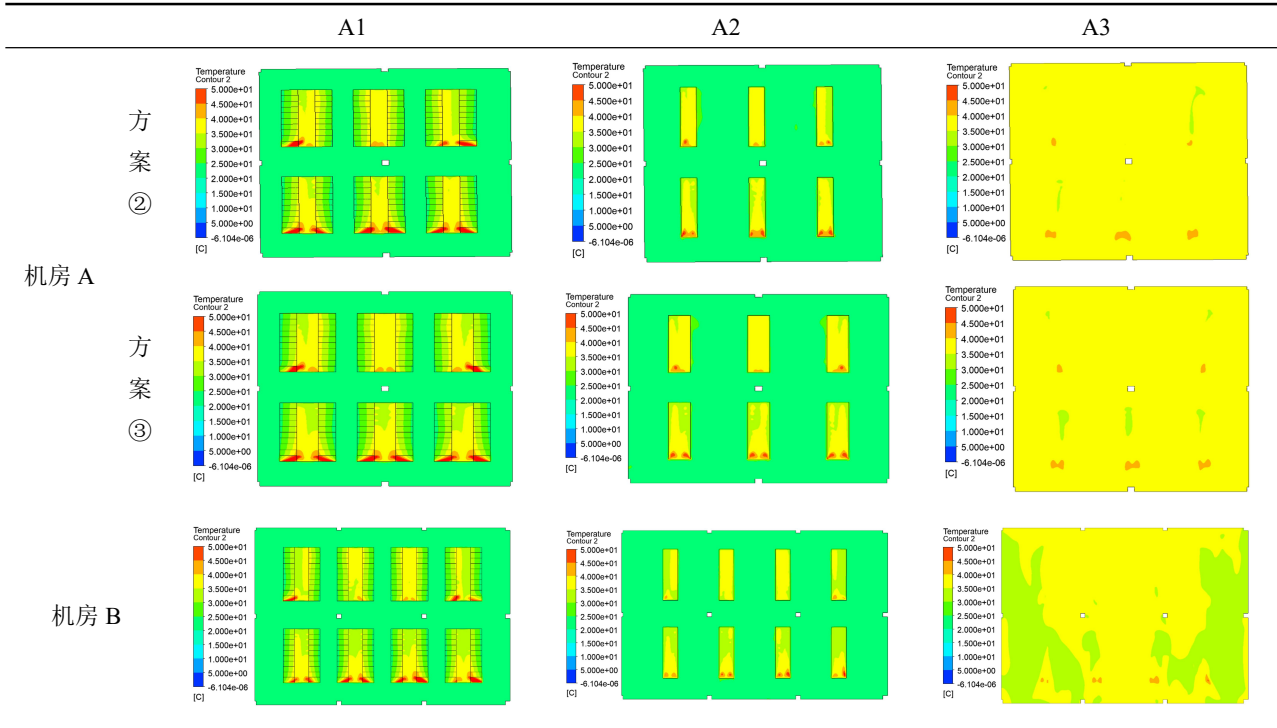


表 8 机房不同竖直截面温度分布云图

Table 8 Cloud map of temperature distribution in different vertical sections of the machine room

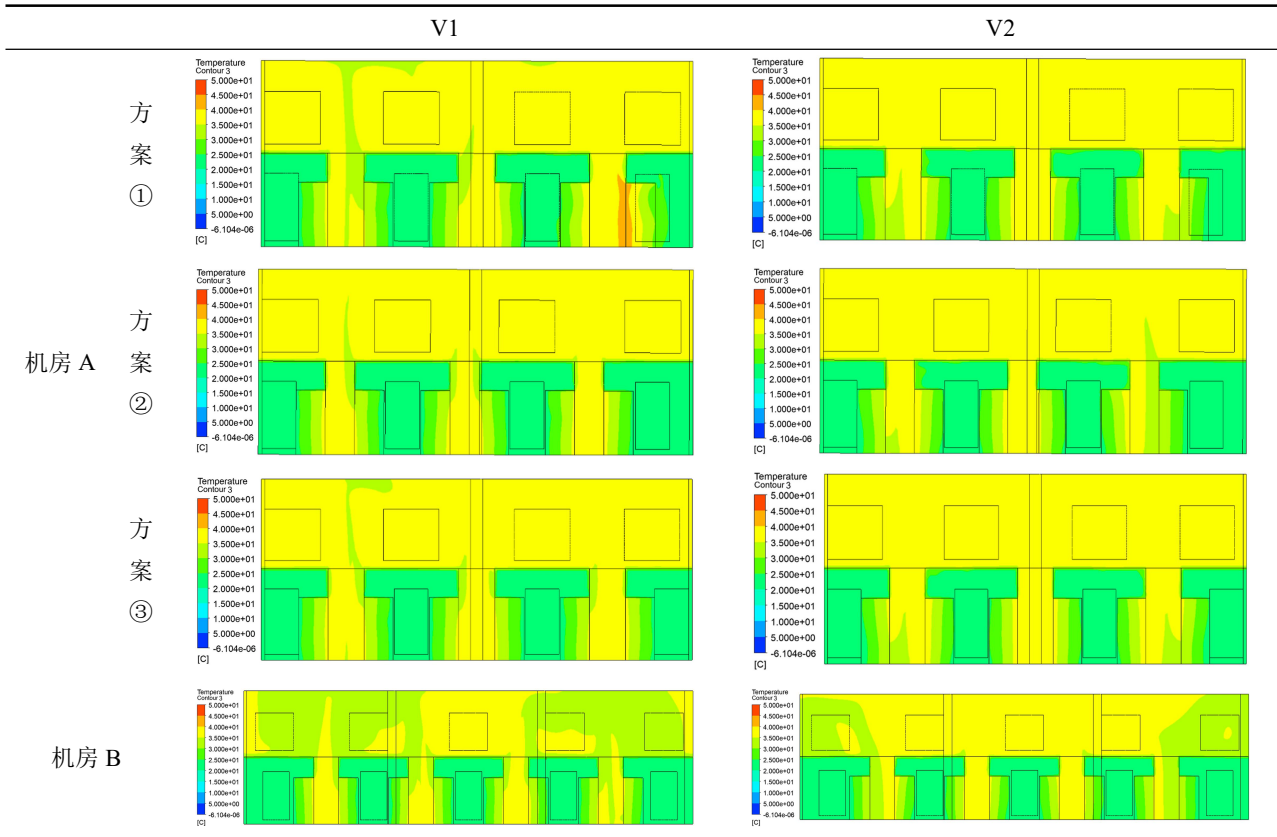
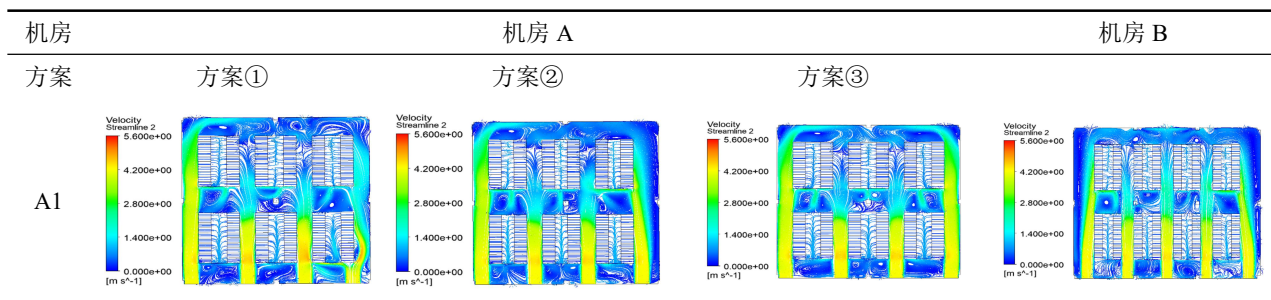


表 9 机房 A1 平面流线分布图

Table 9 Planar flow distribution of server room A1



从空间截面温度分布和速度分布可以明显看出: 尽管几种布局方案机柜都存在一些局部热点, 但是机房 A 的方案②和方案③相对于方案①而言, 局部热点的范围均有所减小; 而机房 B 由于空间相对较大, 可以明显看出其局部热点的范围略小于机房 A。因此我们实际可以在存在局部热点的位置放置列头柜或功率较小的设备。

4 直接蒸发冷却空调机组叠放进排风方案

4.1 方案设计

直接蒸发冷却空调机组放置在数据中心机房的一侧, 采用叠放的形式, 机组新风口、排风口位于一侧, 因此为了保证送排风两股气流具有合理的气流组织, 设计了 3 种方案进行对比, 具体方案如表 10 所示。

表 10 机组叠放进排风方案及示意图

Table 10 Stacked air intake and exhaust scheme and diagram of the unit

方案	具体形式	示意图
方案①	机组新风口、排风口位于端面 机组新风: 分别通过新风口进入 机组排风: 通过和排风口相连的排风管集中向上排放	
方案②	机组新风口位于端面、新风口位于左右两侧 机组新风: 分别通过新风口进入 机组排风: 分别通过排风口排出	
方案③	机组新风口、排风口位于端面 排风口设置防雨百叶, 倾角20°、通风面积>80% 机组新风: 分别通过新风口进入 机组排风: 分别通过排风口排出	

分析发现方案①新风进风气流较均匀,且机房排风通过风管集中向上排放,不存在热气流回流短路;但存在排风风管较长,成本略高、排风阻力略大的问题。

方案②由于新风直接从侧面新风口进入、排风直接从排风口排出,因此风管短,成本低,易施工;但存在极少量排风气流回流至新风口的现象,同时由于新风口位于左右两侧,机组断面风速均匀度较差,难以满足 GB/T14294“断面风速均匀度”的要求,还需要将新风阀和过滤网维护的检修门需调整至机组端面。

方案③新风进风气流较均匀,由于新风直接从侧面新风口进入、排风直接从排风口排出,风管较短,成本较低,易施工;但其一层机组排风口和二层机组新风口位置较近,可能存在少量一层机组排风气流回流至二层机组新风口的问题。若要采用方案③,则需要对其进排风侧立两股气流是否发生短路、如果发生短路是否会对机房冷却效果产生影响等问题进行研究。

4.2 方案③若干问题分析

4.2.1 新风进风侧

当流体从四周各个方向某汇合点集中,这种运动称为汇流。因此在新风口室外新风通过新风口汇集成一股气流进入机组,此时气体运动规律满足汇流运动学规律,对于位于原点的汇,其流速分量分别如下^[11]:

$$\begin{cases} u_r = -\frac{Q}{4\pi r^2} \\ u_\theta = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_r 为径向流速; u_θ 为轴向流速; Q 为流量; r 为距离。

通过式(1)可以看出,径向流速的数值和距离的二次方成反比,速度衰减较快。

4.2.2 排风侧

在机组排风口侧,理论情况下机房排风通过排风口形成一股气流排入大气,此时在空间形成的一股气流一般被称为射流。其主体段断面射流的速度 v 、沿射程 s (或 x) 的变化规律如下^[12]:

$$(1) \text{ 轴心速度 } v_m$$

$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{0.965}{\frac{\alpha s}{r_0} + 0.294} = \frac{0.48}{\frac{\alpha s}{d_0} + 0.147} = \frac{0.96}{\alpha \bar{x}} \quad (2)$$

式中: v_0 为出口速度; α 为紊流系数,由实验决定,是表示射流流动结构的特征系数; s 为自出口断面的距离; r_0 为断面半径; d_0 为断面直径; \bar{x} 为无因次距离。

(2) 断面平均流速 v_1

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{0.19}{\frac{\alpha s}{r_0} + 0.294} = \frac{0.095}{\frac{\alpha s}{d_0} + 0.147} = \frac{0.19}{\alpha \bar{x}} \quad (3)$$

(3) 质量平均流速 v_2

断面平均流速 v_1 表示射流断面上的算术平方根,通过比较式(2)、(3),可得 $v_1 \approx 0.2v_m$,说明断面平均流速仅为轴心速度的 20%,通风、空调工程上通常使用的是轴心速度附近较高的速度区,因此 v_1 不能恰当的反映被使用区的速度,为了更合适的表达使用区的流速,引入质量平均流速 v_2 。

$$\frac{v_2}{v_0} = \frac{0.4545}{\frac{\alpha s}{r_0} + 0.294} = \frac{0.23}{\frac{\alpha s}{d_0} + 0.147} = \frac{0.45}{\alpha \bar{x}} \quad (4)$$

通过式(2)、(3)、(4)可以看出,轴心速度、断面平均流速、质量平均流速其无因次数值均和无因次距离的一次方成反比。

通过对机组新风进风侧、排风侧两股气流的速度分布规律可以看出,在机组新风进风侧流速和距离的二次方成反比,速度衰减较快,机组排风侧流速和距离的一次方成反比,速度增长较慢,因此可以初步判定进排风侧两股气流基本不会发生掺混短路现象。

4.3 方案③若干问题仿真模拟结果

如果进排风侧立两股气流发生短路现象,一层空调机组的排风则会影响到二层空调机组新风的进风情况,因此二层空调机组新风口的温度能够反映气流短路情况,因为热气流回流会造成二层机组新风口温度上升;由于排风气流处于紊流状态,其对二层机组新风口的影响是随时间动态变化的,对其温度场进行仿真模拟。方案③机组叠放主视图、右视图分别如图 5(a)、(b)所示,对二层空调机组的 A-A 位置、B-B 位置的温度分布变化情况进行分析,其中 A-A 位置为二层空调机组新风口平面的中间位置、B-B 位置为二层空调机组新风口平面的四周位置,如图 5(c)所示,通过仿真模拟得到 A-A 位置、B-B 位置平均温度随时间的变化规律。

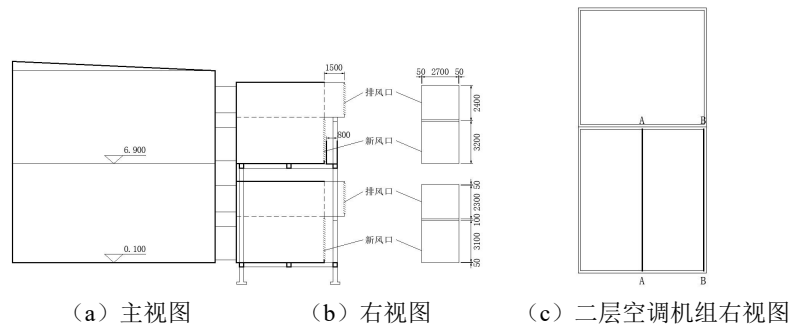


图 5 方案③机组叠放进排风形式

Fig.5 Option ③ unit stacked into the form of exhaust air

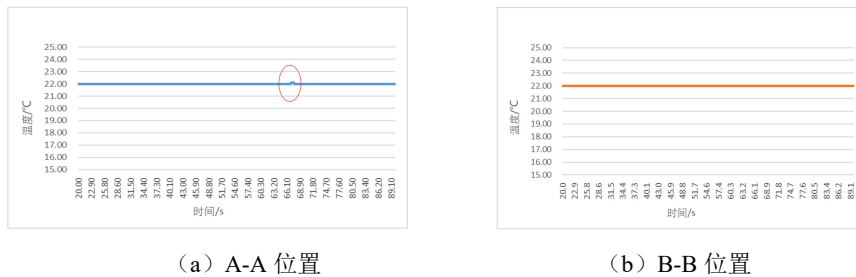


图 6 平均温度随时间变化规律

Fig.6 Average temperature variation pattern with time

图 6 (a)、(b) 分别显示了二层空调机组 A-A 位置、B-B 位置平均温度随时间的变化规律, 可以看出二层机组新风口的 A-A 位置平均温度在绝大多数时间维持在 22°C (=大气温度), 少数时间出现了高于 22°C 的情况, 但最高温度也仅有 22.1°C, 对机房冷却效果的影响微乎其微; B-B 位置平均温度在动态变化全过程始终维持 22°C。

通过对方案③的理论、仿真模拟分析, 可以确定其排风侧两股气流基本不可能发生短路, 若发生短路, 对机房冷却效果的影响也是微乎其微, 针对直接蒸发冷却空调机组叠放进排风的三种方案: 方案①新风进风均匀, 但成本略高、排风阻力, 方案②成本低、易施工, 但存在极少量排风气流回流至新风口的现象、机组断面风速均匀度较差。综合考虑气流组织及造价等多方面因素, 确定方案③为样本数据中心直接蒸发冷却空调机组叠放进排风的方案。

5 结论

(1) 通过对数据中心风口尺寸、位置进行优化, 最终选取机房 A 送风口最佳尺寸为 1400mm×2300mm, 机房 B 送风口最佳尺寸为 1600mm×2300mm; 本着尽可能降低整体流阻的原则, 取较

大的回风口尺寸 2300mm×1800mm。选取空调机组送风口下边沿距离地面高度 200mm, 回风口下边沿距离吊顶高度 300mm。

(2) 通过对数据中心机柜布局进行优化, 发现机房 A、B 的几种布局方案都存在一些局部热点, 因此综合考虑在未来数据中心机房建设布局时, 可以在存在局部热点的位置放置列头柜或功率较小的设备。

(3) 综合考虑气流组织及造价等多方面因素, 确定方案③为样本数据中心直接蒸发冷却空调机组叠放进排风方案, 同时方案③可以广泛应用于各种形式数据中心机房空调机组的叠放, 而其他几种方案也可以结合实际对造价、气流组织的要求, 适用于不同形式的数据中心。

参考文献:

[1] 申永波.直接蒸发冷却对室内空气品质影响的实验研究[D].西安:西安工程大学,2019.
 [2] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
 [3] 黄翔.绿色数据中心高效适用制冷技术及应用[M].北京:机械工业出版社,2021.