

乌鲁木齐某数据中心热环境分析及气流组织优化研究

黄翔, 李婷婷, 刘凯磊, 折建利, 杨立然, 耿志超

(西安工程大学 城市规划与市政工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:以乌鲁木齐一个实测的典型数据中心为研究对象,利用 6SigmaRoom 软件对机房的气流组织和热工环境进行模拟.分析机房内不同高度平面的温度分布、空调送回风气流流线分布和气流分布.针对机房气流混乱、冷热分布不均和局部热点问题提出三个气流组织优化措施,并进行模拟对比分析.结果表明,优化后的机房热环境得到明显改善,空调冷量可以被充分利用,有效避免了局部热点问题.

关键词:数据中心;热环境;气流组织;数值模拟

中图分类号: TU831.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0104-05

Thermal environment analysis and air distribution optimization for a Data Room in Urumqi

HUANG Xiang, LI Tingting, LIU Kailei, SHE Jianli, YANG Liran, GENG Zhichao

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Taking a typical data center in Urumqi as the research object, the 6SigmaRoom software was used to simulate the airflow organization and thermal environment of the data center. Temperature distribution of different height planes in the data center, the airflow return airflow streamline distribution and the airflow distribution are analysed. Three airflow organization optimization measures were proposed for the airflow chaos in the data center the uneven distribution of hot and cold and local hot spots. The simulation comparison analysis was carried out. Results show that the optimized thermal environment of the data center is significantly improved, and the air conditioning cooling capacity can be fully utilized, to effectively avoid local hot spots.

Key words: data center; thermal environment; air distribution; simulation

节能减排是我国一项重要的长期战略任务.随着我国信息事业的快速发展,数据中心越来越多,能源消耗也在与日俱增.有关资料显示,数据中心空调系统的能耗约占总能耗的 40%,而在空调系统的能耗中,由于气流组织设计不合理损失的能耗相当严重.^[1]大量工程实践表明,致使机房 PUE 较大的原因在于无形的气流组织部分.机房不合理的气流组织,会造成冷风无法有效送到服务器进风口,热风无法有效回到空调回风口,从而造成空调效率下降,机房能耗增高.因此,优化有机房的气流组织,对于提高机房空调的冷却效率以及实现机房的节能减排具有十分重要的意义.

本文以乌鲁木齐某数据中心为研究对象,利用数据中心专用 CFD (Computational Fluid Dynamics) 模拟软件 6SigmaRoom, 以实测数据为依

据建立机房的仿真模型.^[2]对原机房气流组织存在的问题进行优化研究,以保证服务器安全稳定的连续运行,有效提高空调系统冷量利用率.通过本文的研究为今后实际工程设计和改建提供参考.

1 机房介绍

本文以乌鲁木齐某现有数据中心为研究对象,对该数据中心气流组织进行模拟优化分析.该机房为传输机房,位于 24 层,机房总面积 295.05 m²,层高 4 m,单机柜功耗 3 kW,机柜总数 100 个,总功耗 300 kW.机房空调形式为集中式,机房内配置 4 台机房专用空调.建设标准为国 A 级,机房设计温度为 23±2℃,相对湿度为 50±5%.考虑到数据中心的气流组织设计,机柜采用面对面、背靠背的布置方式.机柜间形成冷、热通道,其中冷通道间距为 1 200 mm,热通道间距为 1 800 mm.

收稿日期: 2017-12-29

修改稿日期: 2019-01-15

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目课题(2016YFC0700404); 西安工程大学研究生创新基金资助项目(chx201869)

第一作者: 黄翔(1962—), 男, 教授, 主要研究蒸发冷却技术的理论与应用. E-mail: huangx@xpu.edu.cn

通信作者: 李婷婷(1992—), 女, 硕士生, 主要研究蒸发冷却技术的理论与应用. E-mail: 1346695576@qq.com

气流组织形式为静电地板下送风上回风,架空地板高度为 300 mm.

2 机房测试和热环境模拟分析

2.1 机房测试

对机房的热环境进行现场测试,将其结果用于验证 CFD 仿真结果的可靠性.测试采用的是温湿度记录仪测试机房的温湿度,测试中以机房地板为测试单元.依次记录机房在高度方向上不同位置的温湿度值,完成整个机房内部空间空气温湿度的测量.因为冷通道出风口气流温度比较接近空调的送风温度,因此将冷通道出风口的温度作为机房的送风温度.根据机房的实际情况和测试条件,此次研究测试了机房分别在 0.1 m、0.8 m、1.5 m、2.2 m 四个位置处的温湿度,同时对机房热点机柜出口处的气流也进行了测试.^[3-5]机房内的测点布置如图 2 所示,整个机房内均匀布置 4 个测点,从右至左依次为测点 1、测点 2、测点 3 和测点 4.

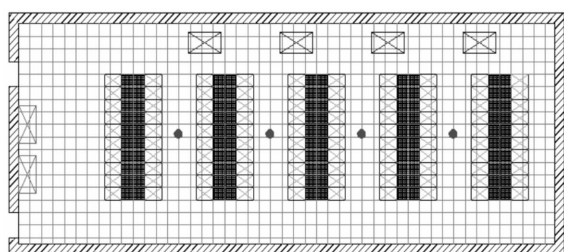


图 1 数据中心布局及测点布置图

Fig. 1 A data center layout and measurement point layout

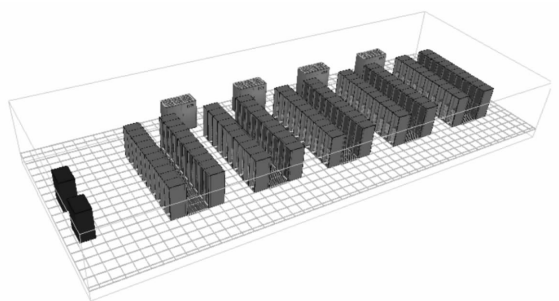


图 2 数据中心设备布局三维视图

Fig. 2 3D view of data center layout

2.2 模型建立

本文采用 6SigmaRoom 建立数据中心的数值模型,对机房的热工特性进行模拟分析.通过机房的温湿度分布、送回风气流流线、送风量分布以及热点情况来分析机房的气流组织情况.

根据以下工程实际概况,建立机房模型如图 2 所示:

(1)建模尺寸按照机房实际面积 295.05 m²

(28.1 m×10.5 m),机房高度 4 m.

机柜为 600 m(宽)×900 m(深)×2 050 m(高)的 2U 机柜,机柜内放置服务器.

(2)设定空调出风温度为 14 ℃.

(3)气流组织方式为静压地板下送风上回风,冷通道宽度为 1.2 m,热通道宽度为 1.8 m,架空地板高度为 0.3 m,地板厚度为 0.04 m,网格尺寸为 0.6 m.

(4)创建 1.8 m(长)×0.48 m(宽)的高架地板开孔,同时考虑空调后部和墙壁之间的缝隙.

(5)机房外环境温度默认为 20 ℃.

2.3 求解控制

模拟中采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型.^[6-8]利用残差来控制求解方程的收敛精度,同时保证求解的计算残差值都趋于稳定并收敛于 1.通过求解可知,当求解残差收敛于 1 时,其中 2 台空调送风温度稳定在 14 ℃,另两台空调送风温度稳定在 11 ℃,空调回风温度最低 21.9 ℃,最高 25.2 ℃.基本满足机房设定的温度 23±2 ℃要求.

2.4 流线分析

该数据中心采用机房专用空调供冷,气流组织为静电地板下送风上回风,并设置冷热通道.从图 3 空调送回风气流流线图可以看出,空调的送回风流线混乱,冷热空气的流向不清晰,且存在空调送风气流短路现象,即空调送出的冷风未经过服务器而是直接回到了空调回风口,没能有效地利用这部分冷量,机房内热空气和冷空气掺混现象严重,大大损失了空调的送风和制冷效果.

地板的出风情况直接影响机房的热环境.从图 4 冷通道地板出风冷量图上可以看出,不同位置处的地板出风量很不均匀.机房空调远端的气流量明显多于空调近端的气流量,且越靠近空调侧,地板的出风量就越少.

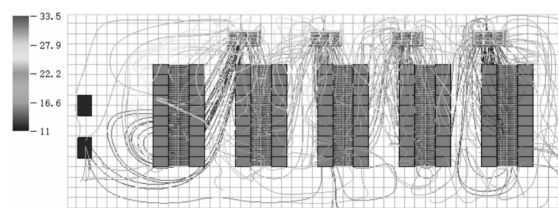


图 3 空调送回风流线图

Fig. 3 Line diagram of the wind returned from air conditioner

2.5 温度场分析

风量是冷量的载体,风量、风速对气流的作用都会反映到机房的温度分布上,而机房的温度分布又是服务器安全稳定运行的关键,所以对机

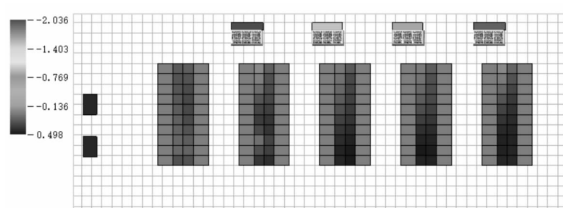


图4 冷通道地板出风量示意图

Fig. 4 Cold aisle floor air volume diagram

房的温度场进行分析能有效指导改善机房气流组织.[9-10]分别截取与实测相对应的机房在地板高度方向上0.1 m、0.8 m、1.5 m、2.2 m处,这四个典型截面上的温度分布和机柜进出风口界面温度分布,并将模拟结果与测试结果进行比较,图5~图8是机房不同高度处的温度分布模拟结果.从图中可以看出,冷通道的温度总体都低于热通道.冷气流从送风地板进入机房后,呈现上升到顶棚空间的流动迹象,机房底部冷空气较少,顶部热空气集中,位于机架底部和顶部的服务器处于不利位置,致使这两个位置的冷量损失较为严重,而且在距离空调机组近端的机柜处温度偏高,这也说明地板静压箱出风不够均匀,这一现象可以在图4冷通道地板气流量分布图上明显看出,因此距离空调远端的机架冷却效果好于近端.

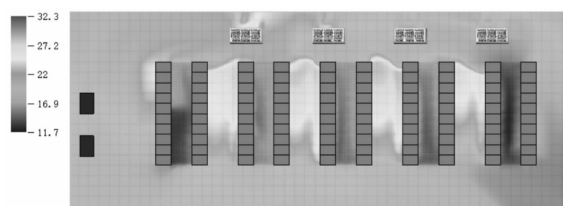


图5 地板上0.1 m高处机房温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of the room at a height of 0.1 m

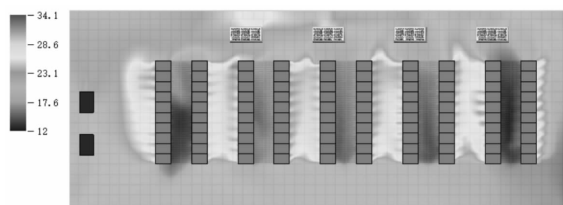


图6 地板上0.8 m高处机房温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of the room at a height of 0.8 m

在图9机柜进出风界面温度分布中选取最大值和最小值后,我们发现从左至右,第4列第1个机柜出风口处的温度最高,已达32.5℃,超出机房温度上限32℃的设计要求,是机房的热点机柜.为研究局部热点产生的原因,对其气流场进行分析,其模拟结果如图10所示.从机房空调出来后

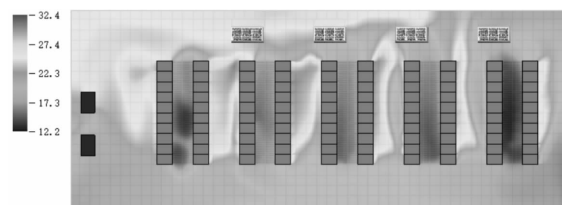


图7 地板上1.5 m高处机房温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of the room at a height of 1.5 m

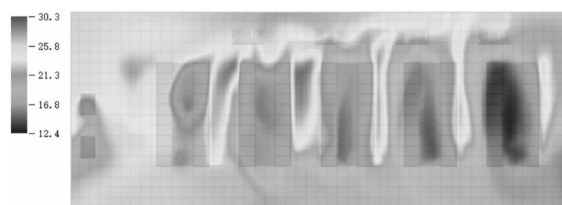


图8 地板上2.2 m高处机房温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of the room at a height of 2.2 m

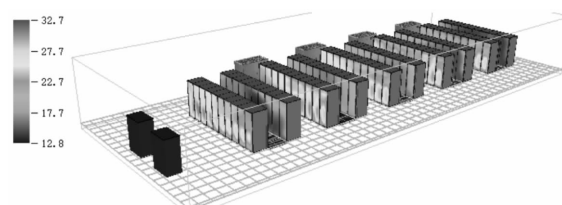


图9 机柜进出风口界面处的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution at the inlet and outlet of the cabinet

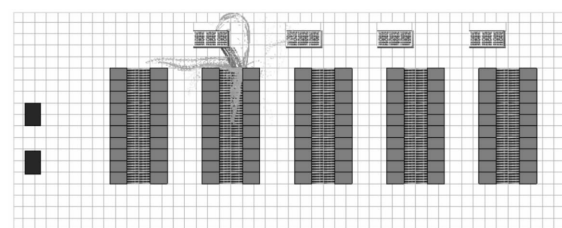


图10 热点机柜流线图

Fig. 10 Hotspot cabinet streamline diagram

的冷风一部分进入旁边的冷通道,另一部分进入该机柜所在的冷通道后直接向远端流去,没有进入该机柜,导致该机柜进风量减少,出风口处温度升高,产生局部热点.

由图11可得,机房温度在不同高度模拟与实测结果的误差范围在0.4%~11.3%,是可以接受的误差范围.鉴于两组数据的变化呈现基本一致的趋势,可认为建立的数值模型以及相应的模拟结果是可靠的.

3 气流组织优化及分析

针对机房存在的问题,提出适于该机房的以

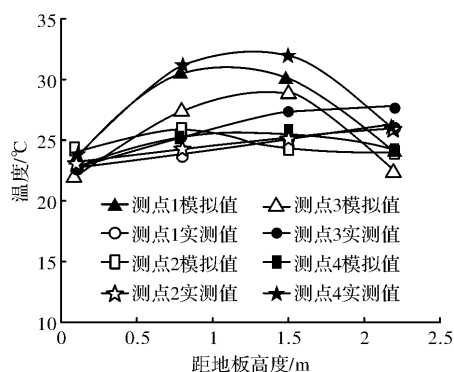


图11 机房不同位置处的温度模拟结果与实测结果

Fig. 11 Temperature simulation and measured results at different locations in the room

下优化方案:^[11-14]

(1)将机房的架空地板高度由原来的300 mm提高至600 mm.

(2)改变机房空调机组原来的位置,将其设置在每列热通道的端头.

(3)冷通道完全封闭的方式可以使冷气流在封闭的空间内被迫经过散热设备,冷气流短路和热回流可同时得以避免,使冷风更多的进入服务器带走热量,减少冷量损耗,防止产生局部热点.因此,将机房内原来未封闭的冷通道完全封闭.

3.1 流线分析

针对该数据中心气流混乱、出风不均、存在局部热点等问题,采用上述的三个措施对其气流组织进行优化.优化后的空调送回风气流模拟效果和地板出风气流模拟效果如图12和图13所示.

从图12可以看出,优化后空调送回风气流流向清晰,说明冷通道完全封闭后,有效的防止了冷热空气的掺混.从图13可以看出,优化后地板出风趋于均匀,冷量得到充分利用,减少了通道两侧以及通道上部的冷量损失.冷通道封闭,气流只能流经服务器到达相邻的热通道,因此,服务器内部的扰动增强,使得热气流被及时带走,避免了局部热点.优化后原热点机柜的气流流线如图14所示.

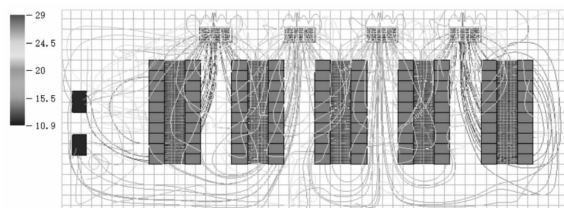


图12 优化后空调送回风气流模拟流线图

Fig. 12 Air conditioning return to the wind line diagram

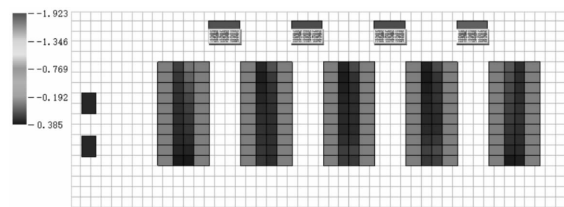


图13 优化后地板出风气流示意图

Fig. 13 Cold aisle floor air volume diagram

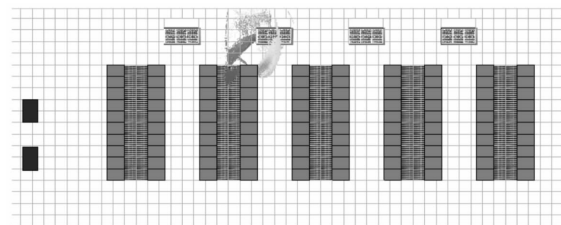


图14 优化后热点机柜流线图

Fig. 14 Streamline diagram of the hotspot cabinet after optimization

3.2 温度场分析

为分析对比优化后机房内整体的温度分布,同样分别截取了地板高度方向上0.1 m、0.8 m、1.5 m、2.2 m四个典型截面上的温度分布.其结果如图15~18所示.

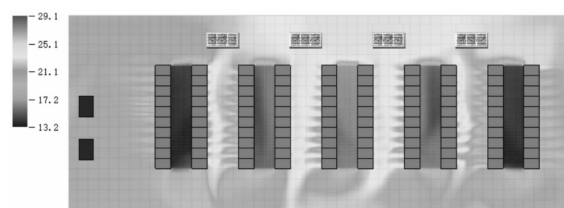


图15 优化后地板上0.1 m高处机房温度分布图

Fig. 15 Temperature distribution of the room at a height of 0.1 m after optimization

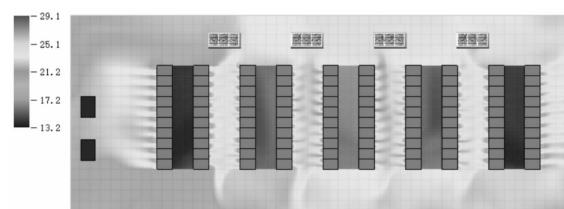


图16 优化后地板上0.8 m高处机房温度分布图

Fig. 16 Temperature distribution of the room at a height of 0.1 m after optimization

从优化后的模拟结果可以看出,提高架空地板高度、调整空调机组放置位置以及封闭冷通道后,可以很好改善机房的送回风气流.使优化后的机房温度场更加均匀,消除了原机房的局部热点.各高度截面的温度分布较原来也更为均匀,机柜得到了足够的冷量,排风温度相对之前有所降低,同时空调回风温度也有所升高,这在一定

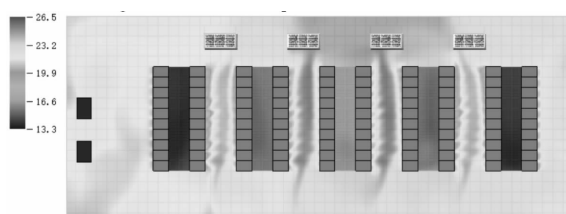


图 17 优化后地板上 1.5 m 高处机房温度分布图

Fig. 17 Temperature distribution of the room at a height of 1.5 m after optimization

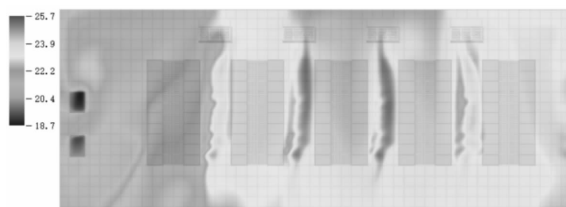


图 18 优化后地板上 2.2 m 高处机房温度分布图

Fig. 18 Temperature distribution of the room at a height of 2.2 m after optimization

程度上提高了空调的制冷效率,且由于冷量集中在通道内,空调的无效送风量大大减少,有利于减少机房的空调能耗。

4 结论

通过对乌鲁木齐某实测数据中心的模拟分析,针对该数据中心流场混乱、冷热掺混严重、气流分布不均以及局部热点问题提出将原来 300 mm 的架空地板高度提高到 600 mm、改变空调的布置形式和冷通道完全封闭三个优化措施,并对优化后机房的空调流线和温度分布进行对比分析,结果发现:

(1)提高架空地板高度后,地板的出风量变得均匀,满足了机房不同位置处的机柜风量要求,冷量得到充分利用。但在实际工程设计中,架空地板的高度要结合各个机房的实际情况,因为机房的负载不同,空调系统的送风量就不同,实现均匀送风的动静压就不同。对于改造项目,应该考虑改造的经济效益。

(2)改变空调位置后,空调的送风范围增大,气流场变得更加清晰,热回风可以及时回到空调。

(3)封闭冷通道可以保证低送风温度和高回风温度,避免了冷空气断路、热空气回流和冷热气流掺混,提高了空调机组的制冷效率,避免了局部热点。

参考文献 References

- [1] 李红霞. 通信机房空调节能气流优化措施[J]. 邮电设计技术, 2011, 9(3): 6-8.
LI Hongxia. Measures on air conditioners energy conservation airstream optimization of telecom equipment

- rooms[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2011, 9(3): 6-8.
- [2] 杨超. 数据中心设计与管理解决方案-6SigmaDC[J]. 电气应用, 2014, 33(15): 18-19.
YANG Chao. Data center design and management solutions-6SigmaDC [J]. Electrotechnical Application, 2014, 33 (15): 18-19.
- [3] 严瀚. 气流组织对数据中心空调系统能耗影响的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
YAN Han. Study on energy saving effect in air conditioning system for data center air flow organization [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [4] 折建利. 冷却塔供冷系统在数据中心的应用研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2017.
SHE Jianli. Study on application of tower cooling system in data center [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2017.
- [5] 谢孟晓, 刘金祥, 牛晓峰, 等. 数据中心机架式服务器选型对其热环境的影响及优化分析[J]. 暖通空调, 2016, 44(8): 74-78.
XIE Mengxiao, LIU Jinxiang, NIU Xiaofeng, et al. Effect and optimization of rack servers selection in data center on the thermal environment [J]. HV&AC, 2016, 44(8): 74-78.
- [6] 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.
LIU Fang, WANG Zhigang. Simulation of indoor air distribution in a large data center [J]. Building Saving, 2016, 44(10): 11-17.
- [7] 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, 43(3): 27-33.
DUN Zhe, QIN Yun, GUAN Xin. Simulation optimization and evaluation analysis of the data center airflow distribution [J]. Building Saving, 2015, 43(3): 27-33.
- [8] 傅烈虎, 丁麒麟. 封闭通道后数据中心的 PUE 分析[J]. 智能建筑与城市信息, 2010, 165(8): 21-24.
FU Liehu, DING Qilin. PUE analysis of data center after closed aisle [J]. Intelligent Building & City Information, 2010, 165(8): 21-24.
- [9] 陈杰. 数据机房冷通道封闭技术应用及模拟分析[J]. 暖通空调, 2015, 45(6): 37-40.
CHEN Jie. Application of closed cold aisle technology to data center room and simulation analysis [J]. HV & AC, 2015, 45(6): 37-40.
- [10] 田浩, 李震, 刘晓华, 等. 数据中心热环境评价指标研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(5): 5-9.
TIAN hao, LI Zhen, LIU Xiaohua et al. Study on thermal environment evaluation in data centers [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(5): 5-9.
- [11] 原世杰, 鹿世化. 基于热环境评价指标的数据中心气流组织模拟研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(1): 66-72.
YUAN Shijie, LU Shihua. Simulation of air distribution in data center based on thermal environment evaluation indexes [J]. HV&AC, 2016, 46(1): 66-72.
- [12] 原世杰, 鹿世化. 送风温度变化对数据中心热环境影响的模拟研究[J]. 制冷技术, 2015, 43(10): 55-61.
YUAN Shijie, LU Shihua. Simulation research on air-flow in data center under various supply air temperature [J]. Refrigeration, 2015, 43(10): 55-61.
- [13] KWOW Wu. A comparative study of various high density data center cooling technologies [D]. New York: Stony Brook University, 2008.
- [14] ABDELMAKSOU W A, DANG T Q, KHLIFA H E, et al. Perforated tile models for improving data center CFD simulation [C]//13th Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (Therm)-2012, New York: IEEE, 2012: 60-67.

(编辑 桂智刚)