



专栏：能源互联网

基于 CFD 的变电站机房空调气流组织优化研究

陈灿, 刘洋, 李黎, 贾平, 高小芳, 张书林

(国家电网有限公司信息通信分公司, 北京 100761)

摘要: 随着变电站机房设备的更新换代和业务的快速发展, 在国网某变电站机房里的设备密集度越来越高, 耗电量和发热量也越来越大。机房内原配置的恒温恒湿精密空调, 尽管理论供冷量充足, 但采用传统的“先冷环境, 再冷设备”的弥漫送风方式, 机房内多个区域机柜由于负载的不均衡布置, 已出现多个难以解决的局部过热问题, 当前的气流组织循环已完全不适应高功耗设备的散热需求。介绍了基于计算流体力学 (CFD) 技术的国网某变电站机房气流组织优化改造实践, 为机房节能降耗提供借鉴。

关键词: 机房; 节能降耗; 气流组织; 优化

中图分类号: TU831

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024028

Research on optimization of air flow organization in substation room air conditioning based on CFD

CHEN Can, LIU Yang, LI Li, JIA Ping, GAO Xiaofang, ZHANG Shulin

State Grid Corporation of China Information and Telecommunication Branch, Beijing 100761, China

Abstract: Due to the continuous improvement of the computer network communication level and the acceleration of data transmission speed, the hardware configuration of the digital signal processing room on the second floor of this unit has become more intensive, and the power consumption and heat generation have also increased. Although the constant temperature and humidity precision air conditioning system has sufficient theoretical cooling capacity, it uses the conventional diffusion air supply mode of cooling the surroundings first and then cooling the device. In a computer system, there are many local over temperature faults due to the uneven distribution of computer load in many areas, which is very difficult to deal with. The existing air distribution cycle has been unable to meet the cooling requirements of equipment with high energy consumption. The examples of the application of optimization and transformation of airflow organization based on CFD in State Grid's substation computer room was introduced, it has a certain reference significance for energy saving and consumption reduction in computer rooms design.

Key words: computer room, energy conservation and consumption reduction, air flow organization, optimization

0 引言

目前,变电站机房精确空调的能量消耗已经达到了约 40%~60%,因此,如何降低变电所机房的能量消耗成为亟待解决的问题。变电所的房间是一个被遮蔽的空间,受到其本身一些特性的限制,所以较大的改动是不可行的。在确保通信和服务器设备安全运转的基础上,试图借鉴“关闭冷通道,直接对设备进行冷却”的冷热隔离的改造方法,并以变电站设备的冷量需求为依据,对风量进行合理的配置,以期达到精准送风、解决机房局部过热、提高空调使用效率,从而减少变电站机房总体能源消耗的目的。随着全球能源危机与环境问题日趋严峻,可再生能源的开发与应用具有重要意义^[1-2]。对有“热岛”现象的变电所机房进行收集和总结,对其部分超温的成因进行剖析,并提出相应的对策加以改进;对改造后的结果进行检验,并对已建计算机室的“热岛”问题提出全面的对策。同时,也可以为变电站机房空调系统的设计施工提供参考,以达到在设计早期就避免出现问题的目的。

针对变电站机房热环境问题,提出了一种基于变电站机房热环境参数化建模和实验模拟的新思路。基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)原理,对机房、设备乃至机房内各部分进行模块化的模拟。与实验模型相比,CFD 方法在建立气流、温度模型时具有方便、相对精确等优点,并且它具有更大的灵活性。文献[3]将变电站机房作为一个总体的研究目标,在 6SigmaDC 中,以室湍流理论为基础,构建了一个 CFD 模拟模型,并对该变电站机房在真实条件下的热值环境进行了分析,通过试验验证了该方法的正确性。文献[4]通过 CFD 仿真和实际测试的方式,对某数据中心机房中影响数据机房温度场及速度场的因素进行了研究,对送风气流组织特征进行了分析,为机房的工程建设提供了热环境控

制依据。文献[5]基于湍流模型和 CFD 方法,对机房的温度场、气流组织和机柜的过载进行了分析,并与实际测量结果进行了比较,得出了较优的机房建设模拟。文献[6]构建了一个数据中心机房的 CFD 模型,并创造性地将 CFD 在线计算和机柜温度监控与空调送风反馈控制相结合,构建了一种实时的模型计算和控制优化方法。本文通过采用 CFD 技术对一座变电站机房内空气流动结构进行改进,以期对变电站机房的节能工作有一定的参考价值。

1 CFD 理论基础

根据 CFD 原理,对变电站机房内的温度场和流速场进行建模,为变电站机房的计算机模拟奠定了基础。首先,在保证变电站室密闭性能的基础上,提出了变电站室内气流流量的计算式;其次,假设变电站的环境符合特定的条件,通过将变电站室内的环境模拟问题设置为湍流模型问题,创建仿真^[7-8]。

1.1 基本控制方程

机房内气体的流动应该满足连续性方程和动量守恒定理,同时,机房内气体的热交换过程应该满足能量守恒定理,固定控制体存在通用守恒方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{MV} (\rho\phi) dV \right) = \int_V \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\phi) \right] dV \quad (1)$$

其中, ρ 表示控制体密度; ϕ 表示控制体; $\mathbf{v}$ 表示控制体运动速度; $\rho\mathbf{v}\phi$ 表示流场输运,其微分形式可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{v}\phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\phi \nabla \phi) + Q^\phi \quad (2)$$

其中, Γ^ϕ 表示 ϕ 的扩散系数, Q^ϕ 为控制体内单位体积的源项。式(2)从左到右分别表示非稳态项、对流项、扩散项以及源项^[9]。可以得到各控制方程如下。

连续性方程:



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3)$$

三维坐标系下的动量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho f_x + (\nabla \cdot \mathbf{P})_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho f_y + (\nabla \cdot \mathbf{P})_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = \rho f_z + (\nabla \cdot \mathbf{P})_z \quad (6)$$

其中， u 、 v 、 w 表示速度矢量 $\mathbf{v}$ 在 x 、 y 、 z 方向的分量， $(\nabla \cdot \mathbf{P})$ 表示应力张量。

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla T \right) + S_T \quad (7)$$

其中， S_T 表示机械能转换为热能部分， c_p 为压力影响的比热容， k 为传热系数。

1.2 湍流模型

在某些假定（如 Boussinesq 假定）下，变电站机房数据中心内的气流问题被视为湍流问题。湍流机制比较复杂，流动中有不同大小的漩涡，湍流模型因使用了时域和网格域的均值等，与层流模型不同，它不具备封闭性，CFD 通过对不确定因素的假定，将湍流模型的方程定义为封闭的^[10]。在实际应用中，通常采用雷诺平均 N-S 方程表示紊流，而 N-S 方程则通常采用涡黏性封闭模式表示。在此条件下，雷诺应力和平均速率之间存在一个大致线性关系：

$$\overline{u_i u_j} = -\nu_T (\overline{U_{i,j}} + \overline{U_{j,i}}) + \frac{2}{3} \overline{U_{k,k}} \delta_{i,j} + \frac{2}{3} k \delta_{i,j} \quad (8)$$

其中，当 $\delta_{i,j}$ 为确定值后，其他参数也为常量，则雷诺应力由黏度系数 ν_T 决定。引入附加的湍流量对式（8）进行模化，用湍流量描述黏度系数，即得到了湍流计算模型标准 $k-\varepsilon$ 模型^[11]，表达式如下。

k 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_{\text{eff}}}{\delta_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) G + G_b \quad (9)$$

ε 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_{\text{eff}}}{\delta_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) G \quad (10)$$

其中， μ 表示动力黏度。

常规 $k-\varepsilon$ 模型通常用于常规的工程场合，其优势在于其计算量小，可获得大量的实验资料，但其在高压条件下的数值模拟精度不高^[12]。本文拟采用 RNG (re-normalization group) $k-\varepsilon$ 方法，利用 RNG $k-\varepsilon$ 方法重建 N-S 方程，并可模拟不同尺度下的紊流分布，拓展了该方法的适用领域。相对于规范模式，本文提出了如下几点改进：RNG $k-\varepsilon$ 模式增加了新的表达式，从而提高了计算的准确度；引入湍流漩涡，进一步改进计算结果；RNG $k-\varepsilon$ 方法给出了一种适用于标准模式的紊流普兰德特数计算的解析表达式，用以代替使用者在常规模式下所指定的紊流普兰德特数；给出了具有较小雷诺数时的流体黏滞特性的一个分析表达式。RNG $k-\varepsilon$ 模型如下。

k 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_{\text{eff}}}{\delta_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (11)$$

ε 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \mu_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u_{\text{eff}}}{\delta_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{2\varepsilon} G_b) - C_{3\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (12)$$

其中， G_k 为层流速度梯度对应的湍流脉动动能， G_b 为浮力对应的湍流脉动动能， Y_m 为可压缩流动

中的扩散波动, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数, a_k 、 a_ε 为湍流 Prandtl 数, S_k 、 S_ε 为自定义源项, R_ε 为 ε 修正项。本文将采用 RNG k - ε 对变电站机房湍流模型进行模拟。

2 计算基于 CFD 理论的机房热环境仿真及实验

2.1 建模条件

基于以上的变电站设备能耗数据 (包括单机柜能耗数据)、热负荷数据, 以及屏蔽机房的物理属性、空调的实际送风量及额定冷量输出, 控制送风温度或回风温度等, 进行针对性建模, 保证模拟的准确性。

建立的变电站机房三维建模示意图如图 1 所示, 包括以下内容。

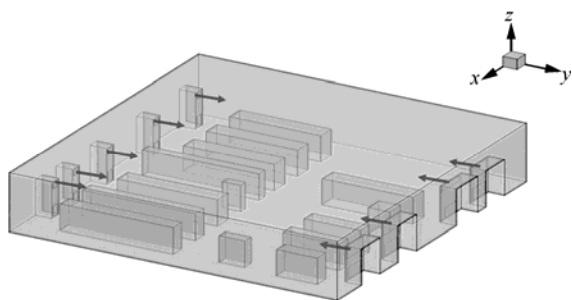


图 1 变电站机房三维建模示意图

(1) 机房描述和编辑功能: 主要是确定机房和内部设备的尺寸、绘制直墙、设备形状等; 编辑功能则是对当前图形设定参数进行编辑, 如改变楼层和设备、风口高度等。设备和风口通过建

立的构件库进行调用选取。

(2) 系统描述功能: 用于描述通风空调系统的相关信息, 如风口送风速度 (流量)、送风温度等, 变电站机房设备散热量设计见表 1。

(3) 显示功能: 控制当前图形的显示状况, 包括视窗配置、视图缩放、机房空间不同部件的着色、消隐等^[13]。

2.2 精确送风建模结果

假设围护结构壁面是绝热的, 只有两个侧面的放热区是程序控制的, 其他部位则不被考虑。该实验室的主要技术指标为: 25℃、50% 相对湿度的环境条件。在这里, 本文只是针对变电站机房的稳定状态进行了仿真, 在仿真过程中, 增加了一个能量的数值, 使用一个常规的数值模式, 在近壁区使用了一个带有浮力的数值模式。在一个不连续的选项里, 按照下面的方式选择一个不连续的方式。

气压 P 选择了软件中的默认形式 Body-force-weighted, 这种形式可以很好地处理高雷诺数下的自然对流问题, 符合变电站机房内空气流动较大的特点。利用 SIMPLE 方法对流场进行了数值模拟。湍动能和湍动能耗散率、能量和动量选用一阶迎风格式, 具有计算简单、精度高、稳定性好、计算精度高、经济性好等特点^[14]。收敛性判据为各流动项残差在 10^{-3} 以内, 而能量项残差在 10^{-6} 以内, 变电站机房 CFD 仿真模型如图 2 所示, 其中 Z 为设备间的壁面间隙。

表 1 变电站机房设备散热量设计

设备编号	设备左侧壁面/(W·m ⁻²)	设备右侧壁面/(W·m ⁻²)	设备编号	设备左侧壁面/(W·m ⁻²)	设备右侧壁面/(W·m ⁻²)
A	627.33	627.33	H	834.74	834.74
B	627.33	627.33	I	421.07	421.07
C	627.33	627.33	J	598.11	598.11
D	2 613.85	2 613.85	K	1 558.19	15 58.19
*E	1 164.36	0	L	358.028 1	926.32
*F	1 164.36	0	*M	0	1 154.17
*G	0	608.18	*N	0	635.29

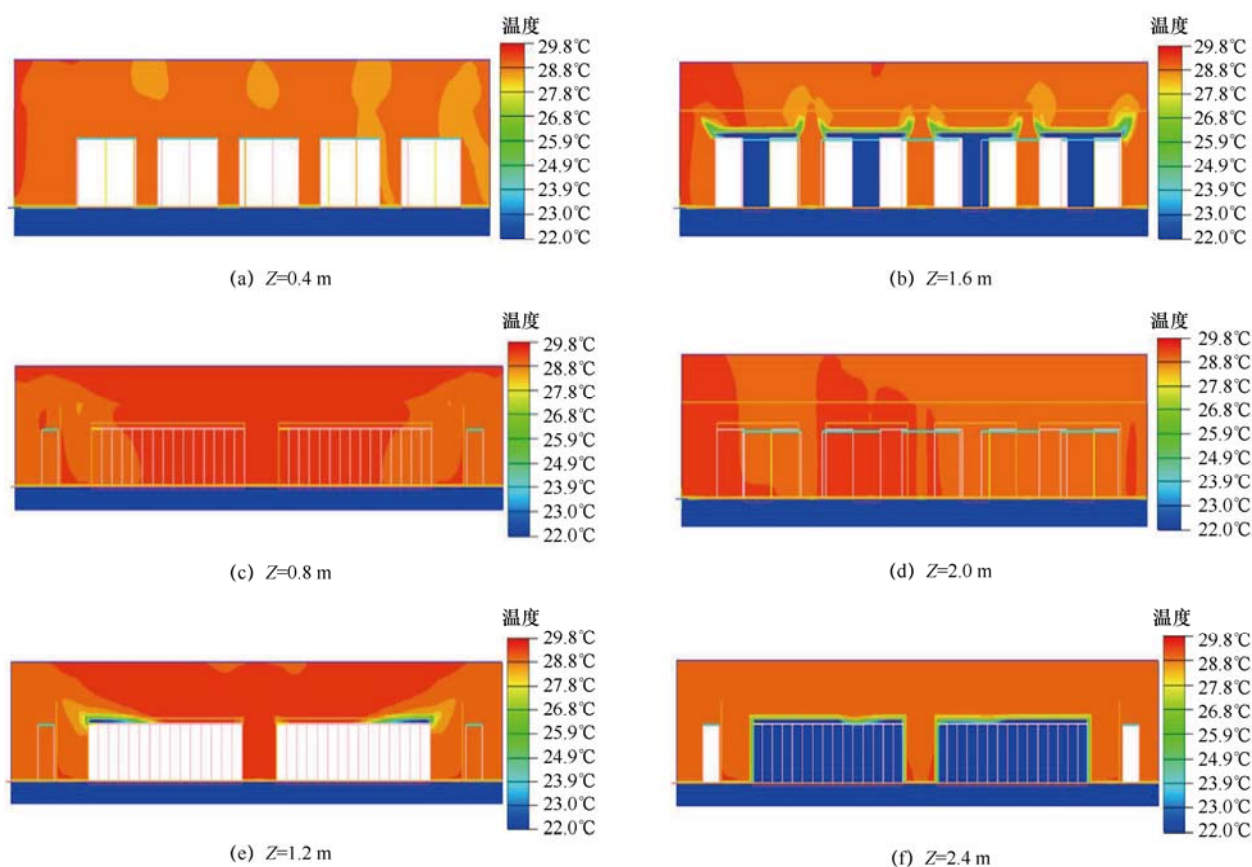


图2 变电站机房 CFD 仿真模型

侧送风所需的送风量太大（换气次数为85.6次），空调对空气调节作用不大。经过多次改变送风速度和送风温度相结合发现，单独改变送风温度，调节范围相当有限，必须将改变风速与送风温度相结合才能达到变电站机房内各个设备壁面最高温度值满足设备安全运行的目的^[15]。变电站机房整体仿真如图3所示。

基于此前引入的精确送风理论，并对相应的送风风管、送风仓进行了计算，在原来的机房仿真图例中添加了送风总成的模型，从理论上对优化改造的可行性进行了进一步的检验。从图3可以很明显地看到，在送风路由被关闭之后，机柜前面的空气温度都低于20℃，这非常符合变电站机房设备的工作需要。因为被关闭之后的空气温度比较好，所以在高负荷的地方，空气中的回风温度都超过了30℃（一些机柜达到了44.8℃），这

就意味着，在增加了冷热差别的情况下，空调的冷却效率也会得到提升^[16]。

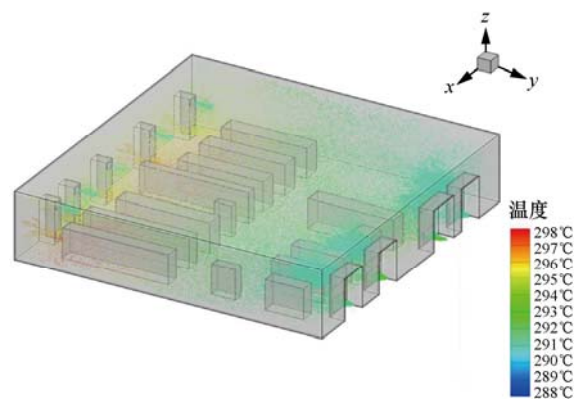


图3 变电站机房整体仿真

3 整改后机房相关数据的采集

3.1 变电站机房设备用能数据采集

变电站机房设备用能数据的采集仍然是通过

现场抄录机柜内电源分配单元 (power distribution unit, PDU) 电流, 并与机房动力环境监控系统进行实时在线统计的方式进行。根据动环的历史数据, 在这段时间里, 变电站机房设备的负荷并没有太大的增加, 但网络流量的消耗却比以前少了 5%, 能耗大概在 161.5 kW 以上。

3.2 空调数据的采集

本机型的空调系统由 1 套压缩机制冷总成和 2 台内部风扇和相应的单独的外部风扇组成。在利用静压箱将 3 套空调系统的冷量进行闭合后, 再人工将 2 套空调机组的压缩制冷系统关掉, 但仍保持内部风扇循环系统。从图 3 可以明显看出, 在机房中, 每个服务器机柜前的送风温度依然能够达到 20~24℃ 的工作范围。同样, 根据电力室 4 日历日空调配电柜电量统计表 (整点值) 进行算术平均值计算得到, 空调机组的瞬时功耗约为 61.42 kW。在对精准的送风系统进行了改造之后, 不仅可以实现冷通道的完全封闭, 从而解决了冷热气流的短路问题, 还可以让服务器机柜前方的送风温度基本达到了变电站机房设备的使用要求, 彻底地消除了热点机柜。最关键的是, 这台计算机的空调和制冷的能量消耗都有了相当大幅度的下降。

3.3 改造后 PUE 计算

3.3.1 具体计算说明

根据 4 日实地收集的数据, 做出以下理论推测瞬时数据中心总能耗/计算机电源使用效率 (power usage effectiveness, PUE)。

(1) 变电站机房的电力消耗情况: 从列头柜变电站机房现场采集的设备功耗表, 可以得到变电站机房的电力消耗情况是 161.5 kW。

(2) 变电站机房中一共安装了 50 盏节能灯, 每一个节能灯的能量消耗是 16 W, 如果再加上一个能量效率超过 85% 的电子镇流器, 那么整个机房的能量消耗是 0.56 kW。

(3) 变电站机房的空气调节部分: 空气调节

系统由空气调节装置、出风装置、消毒设备组成。另外, 从供电车间 4 个日历天的空调配电箱的用电量统计得知, 空调器的瞬间能量消耗为 61.42 kW。

(4) 不间断电源 (uninterruptible power supply, UPS) 装置: 变电站机房使用的 UPS 装置是一台工作频率装置, 其功率不超过 90%, 根据装置的负荷率和使用时间, 计算其本身能量损耗为 15%。以计算机装置的功率为 161.5 kW, 可以计算出 UPS 的总功耗为 $161.5 \text{ kW} / 85\% (\text{输出效率}) \times 15\% (\text{损耗率}) = 28.5 \text{ kW}$ 。

3.3.2 当前 PUE 计算结果

$$\text{PUE} = \text{IT 系统耗电量} + \text{机房照明系统耗电量} + \text{空调系统耗电量} + \text{UPS 自身损耗} / \text{计算机系统耗电}$$
$$= (161.5 + 0.56 + 61.42 + 28.5) / 161.5 \approx 1.56$$

4 结束语

在流体基本控制方程及湍流流动理论基础上, 引入 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 代替常用的标准湍流模型, 用于机房热环境仿真, 获得了更准确的模拟结果。通过实验数据, 表明在监测点对应的仿真结果中, 有 95% 以上的机房仿真数据误差在 1.5℃ 以内, 能够较好地模拟现实工况下机房的热环境, 为机房整体模拟、通风优化及温度预测提供了良好的手段。

新建变电站机房或变电站机房扩容改造设计流程中, CFD 热仿真模拟评估将成为必要的环节, 对于高热密度变电站机房, 合理规划变电站机房内的气流组织是解决机房热死点的关键, CFD 热仿真模拟技术的应用对于明确每个解决方案的优劣、预测方案实施后机房的运行效果提供了科学的依据; 为合理选择高热密度机房解决方案提供了切实有效的方法。建立 CFD 评估档案, 在后续的扩容和改造时, 仅需要在原 CFD 档案中增加扩容设备, 即可进行运算, 得出新的运行效果, 为今后改造和扩容提供科学依据。



参考文献：

- [1] 王文谦. 北京地区某数据中心机房气流组织优化研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- WANG W Q. Optimization of airflow organization in a data centre room in Beijing[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.
- [2] 徐坚强. 数据中心列间空调送风的气流组织优化和失效研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- XU J Q. Research on air distribution optimization and failure of air conditioning supply between columns in data center[D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [3] 李宁, 饶冬生. UPS 机房空调气流组织模拟优化[J]. 节能, 2022, 41(7): 49-51.
- LI N, RAO D S. Simulation and optimization of air-conditioning airflow organization in UPS room[J]. Energy Conservation, 2022, 41(7): 49-51.
- [4] 殷唐. 基于数据中心散热优化的需求响应互动研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- YIN T. Research on demand response interaction based on data center cooling optimization[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [5] 刘莹. 采用列间/背板空调的高密度机房气流组织研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- LIU Y. A study on air flow organization in high density computer rooms with column/backplane air conditioning[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [6] 农毅杰. 电子计算机机房空调系统气流组织优化设计[J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(3): 168-170.
- NONG Y J. Optimal design of air distribution in air conditioning system of computer room[J]. Electronic Components and Information Technology, 2022, 6(3): 168-170.
- [7] 王志刚, 黄丹. 不同气流组织形式对行级数据中心热环境的影响研究[J]. 暖通空调, 2021, 51(S1): 170-175.
- WANG Z G, HUANG D. Study on the influence of different air distribution forms on the thermal environment of row-level data center[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(S1): 170-175.
- [8] 徐志立. 基于 CFD 仿真的上送风数据中心气流组织优化与节能潜力分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- XU Z L. Airflow organization optimization and energy-saving potential analysis of upper air supply data center based on CFD simulation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [9] 郑亮, 陈以乐. 现代绿色数据中心机房冷通道封闭的应用及优化设计[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(1): 76-80.
- ZHENG L, CHEN Y L. Application and optimization design of cold aisle closure for computer room in modern green data center[J]. Intelligent Building & Smart City, 2021(1): 76-80.
- [10] 李瑞. 基于 CFD 仿真的数据中心气流组织优化[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- LI R. CFD simulation-based optimization of airflow distribution in a datacenter[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [11] 迟媛, 朱国栋, 吴飞, 等. 浅谈数据机房空调系统节能优化[J]. 中国设备工程, 2019(17): 71-72.
- CHI Y, ZHU G D, WU F, et al. Discussion on energy-saving optimization of air conditioning system in data room[J]. China Plant Engineering, 2019(17): 71-72.
- [12] 董刚, 薛皓宝. 基于 CFD 技术的某数据机房气流组织优化改造实践[J]. 电子元器件与信息技术, 2019, 3(7): 52-55.
- DONG G, XUE H B. Optimization and transformation practice of air distribution in a data computer room based on CFD technology[J]. Electronic Components and Information Technology, 2019, 3(7): 52-55.
- [13] 彭巍. 上海某 UPS 机房空调气流组织优化分析[J]. 能源研究与利用, 2019(3): 49-52.
- PENG W. Optimization analysis of air conditioning airflow organization in a UPS room in Shanghai[J]. Energy Research & Utilization, 2019(3): 49-52.
- [14] 谢静. 过渡期传统通信机房气流组织优化研究[J]. 邮电设计技术, 2019(3): 88-92.
- XIE J. Research on optimization of airflow organization in traditional communication room in transition period[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2019(3): 88-92.
- [15] 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.
- HUANG X, LI T T, LIU K L, et al. Thermal environment analysis and air distribution optimization for a data room in Urumqi[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(1): 104-108.
- [16] 张立浩. 关于通信机房气流组织优化的探讨[J]. 数字通信世界, 2019(2): 281.
- ZHANG L H. Discussion on optimization of air distribution in communication room[J]. Digital Communication World, 2019(2): 281.

[作者简介]



陈灿（1987- ），女，国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师，主要研究方向为电力通信。



刘洋（1981- ），女，国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师，主要研究方向为电力通信。



李黎（1985- ），男，国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师，主要研究方向为电力通信。

贾平（1988- ），男，国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师，主要研究方向为电力通信。

高小芳（1993- ），女，国家电网有限公司信息通信分公司工程师，主要研究方向为电力通信。

张书林（1968- ），男，国家电网有限公司信息通信分公司高级工程师，主要研究方向为电力通信。