

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.027

基于流场分析的户内变电站百叶窗优化设计研究

史亚鑫¹, 李雨菲², 陈磊², 刘志坚¹, 吴迪¹, 靳光亚¹, 曾遥远¹

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071000; 2. 国网扬州供电公司, 江苏 扬州 225001)

摘要: 户内变电站中电气设备安全稳定运行受运行环境温度影响, 针对“机械排风+百叶窗进风”通风散热方式中百叶窗进风口开展优化, 旨在改善气流组织分布, 提高通风散热效果和设备运行效率。首先, 以电容器室为研究对象, 建立电容器室相关设备及室内环境的仿真模型, 使用网格收敛指数(GCI)验证网格模型独立性, 通过实测与仿真数据拟合验证仿真结果准确性。然后, 通过控制变量法对电容器室的百叶窗宽高比(0.4、0.8、1.6)和百叶倾斜角度($\pm 60^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 0^\circ$)进行方案配置和数值模拟。最后, 以电气设备运行区域内温度最低为目标, 对百叶窗进风口设计参数进行优化分析。研究结果表明, 最佳方案为百叶窗宽高比0.8且百叶倾斜角度 -45° 的配置方案, 电气设备运行区域内平均温度为 34.9°C , 平均流速为 0.47 m/s , 与原方案相比平均温度降低23.8%, 平均流速提高5.4倍。百叶窗宽高比和百叶倾斜角度与电气设备外型尺寸匹配使气流组织分布得到改善, 经过优化后能够有效降低电容器室内温度, 同时为户内变电站通风散热系统优化设计提供了参考。

关键词: 户内变电站; 运行环境; 实测与数值模拟; 百叶窗; 优化设计

Optimized Design of Louvers for Indoor Substations Based on Flow Field Analysis

SHI Yaxin¹, LI Yufei², CHEN Lei², LIU Zhijian¹, WU Di¹, JIN Guangya¹, ZENG Yaoyuan¹

(1. North China Electric Power University, Hebei Baoding 071000, China; 2. State Grid Yangzhou Power Supply Company, Jiangsu Yangzhou 225001, China)

Abstract: The safe and stable operation of electrical equipment in indoor substation is affected by the operating environment temperature. Optimization is carried out on the louver air inlet in the “mechanical exhaust+louver air intake” ventilation and the heat dissipation mode, aiming to improve the airflow organization distribution, enhance ventilation and heat dissipation efficiency, as well as equipment operational efficiency. First, with the capacitor compartment as the research object, the simulation model of the related equipment of the capacitor compartment and the indoor environment is set up, the grid convergence index (GCI) is used to verify the independence of the grid model, and the accuracy of the simulation results is verified by fitting the measured and simulation data. Then, the scheme configuration and numerical simulation of the louvers aspect ratio (0.4, 0.8, 1.6) and the louvers tilt angle ($\pm 60^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 30^\circ$, $\pm 0^\circ$) of the capacitor compartment are performed by the control variable method. Finally, with the lowest temperature in the operating area of electrical equipment as the target, the louvers intake design parameters is optimized and analyzed. The research results show that the best scheme is the configuration scheme of louvers width ratio 0.8 and louvers tilt angle -45° . The average temperature in the operating area of electrical equip-

收稿日期: 2025-12-02; 修回日期: 2026-02-10

基金项目: 河北省重点研发计划(22374501D); 国家住房和城乡建设部研究开发项目(K20220997); 中央高校基本科研业务费专项资金(2022YQ001)。

Project Supported by Key R & D Program of Hebei Province(22374501D), Research Project of the Ministry of Housing and Urban-rural Development of China(K20220997), Fundamental Research Funds for the Central Universities(2022YQ001).

ment is 34.9 °C, the average flow rate is 0.47 m/s, and the average temperature decreases by 23.8% and the average flow rate increases by 5.4 times compared to the original scheme. The airflow distribution is improved by matching the louver aspect ratio and tilt angle with the external dimensions of the electrical equipment. The optimization effectively reduces the temperature inside the capacitor compartment and provides a reference for the optimized design of ventilation and heat dissipation system for indoor substation.

Key words: indoor substation; operating environment; measurement and numerical simulation; louvers; optimized design

0 引言

户内变电站具有模块化、智能化、安全性高、资源节约、绿色低碳的优势和特点,被广泛应用于现代电力建设生产中^[1-2]。然而,由于户内变电站室内空间有限、环境封闭,容易造成电气设备运行环境温度过高,使电气设备在运行过程中产生的热量无法有效散出,进而造成电气设备内部温升、绝缘介质热老化和设备使用寿命缩短等问题^[3-5]。甚至会造成绝缘击穿、电气元件烧毁、爆炸等事故,严重威胁电网的安全稳定运行^[6]。因此,对户内变电站电气设备运行环境开展通风散热系统优化设计具有十分重要的意义。

目前针对户内变电站通风散热系统优化设计已有广泛的研究。现有研究通常对进风口尺寸、方位、流速进行组合方案设计,通过数值模拟对比分析不同通风方案温度场、流速场分布情况,获得最佳设计方案^[7-9]。此外,有研究进一步对风机个数及布置位置、风机开启工况及加装导流片的方式开展仿真分析,有效改善了变电站通风换热效果^[10-12]。然而,以上研究均未将户内变电站百叶窗的宽高比与百叶倾斜角度考虑在内。与居住建筑舒适性通风不同,变电站作为具有强内热源的工业建筑,采用“机械排风+百叶窗进风”作为主要通风散热方式,其中百叶窗是该通风散热方式的一个重要组成部分。百叶窗作为进风口不仅面积大小与位置关系会影响室内气流组织分布,其宽高比和倾斜角度与电气设备的相对关系也是影响气流分布的重要因素。因此,文中基于电气设备运行环境,采用实测调研与数值模拟结合的方法对“机械排风+百叶窗进风”通风散热方案中百叶窗进风口宽高比和百叶倾斜角度的设计参数进行优化分析。

综上所述,文中首先根据电气设备运行环境真实情况建立仿真模型,并对室内温度、流速进行实际测试,通过实测与仿真数据拟合验证仿真结果准确性;其次,通过控制变量法对百叶窗宽高比和倾斜角度进行优化方案配置。然后,利用仿真模型对

不同百叶窗优化方案进行数值模拟。最后,以变电站室内温度最低为目标,结合室内流场分布情况,对百叶窗进风口设计参数进行优化分析,得出最佳百叶窗宽高比与百叶倾斜角度设计参数范围。有效提高“机械排风+百叶窗进风”形式的通风散热效率,改善户内变电站电气设备运行环境,为户内变电站通风散热系统优化设计提供参考。

1 数值模型构建

1.1 户内变电站结构

文中针对110-A2-6设计方案(国网江苏省电力有限公司输变电工程标准化设计图集:110 kV变电站模块化建设)指导建设的全户内变电站,以电容器室作为对象开展研究(见图1)。电容器室尺寸为长6 m、宽5 m、高4 m;室内对称安装有2套电容器成套装置(每套由并联电容器组、串联电抗器组、隔离开关和避雷器等组成),设备整体外部尺寸为长3.76 m、宽1.3 m、高1.9 m,距百叶窗0.78 m,距侧墙0.2 m。电容器室通风散热系统见图1,采用“机械排风+百叶窗进风”的通风散热方式,与室内空间布置对应,轴流风机、风管、百叶窗的布置呈对称布置,轴流风机开孔0.49 m×0.49 m,中心高度3.1 m,轴流风机型号参数为风量3 400 m³/h、静压80 Pa、电机功率0.18 kW;风管安装中心高度为3.1 m,长度为5.8 m;百叶窗尺寸参数为宽度0.6 m、高度1.5 m,宽高比为0.4,百叶窗叶片数量为11片,其倾斜角度为+60°。电容器设备在运行过程中由于自身损耗产生大量热量,设备产生的热量一部分通过辐射散热的方式散出,另一部分以对流的方式散出。当启用“机械排风+百叶窗进风”通风系统,通过百叶窗进入室内的冷空气与设备表面充分接触,通过强制对流的方式带走设备产生的热量,升温后的空气在轴流排风机抽吸作用下,经过风管排出到室外。对于“机械排风+百叶窗进风”通风系统,优化百叶窗宽高比和百叶倾斜角度,使通过百叶窗进入室内的冷空气充分扩散且更高效地流过设备表面,快速置换设备附近热空气,是在不增加风机功率能耗前提下提高通

风散热效率重要方法。因此,文中对进风口百叶窗设计参数宽高比和百叶倾斜角度进行优化研究。

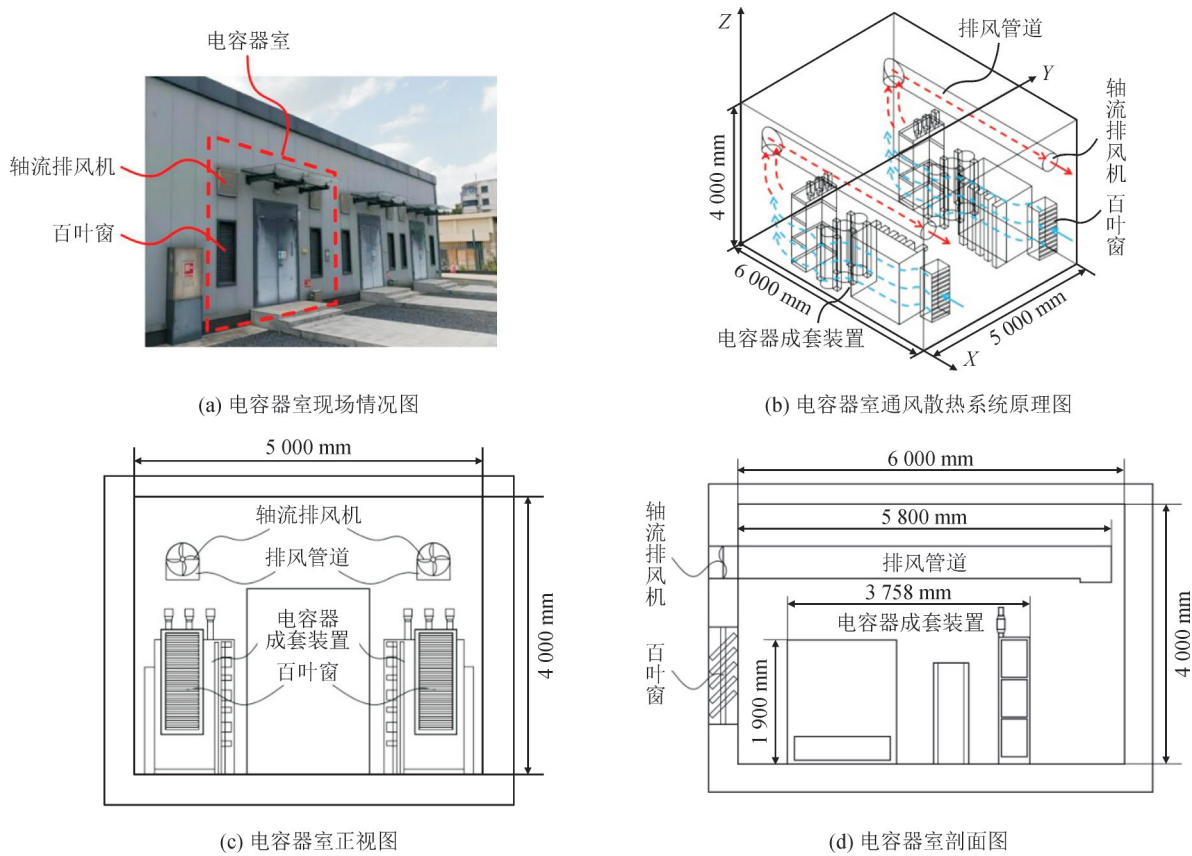


图1 电容器室布置构造及通风散热系统

Fig. 1 Layout structure of capacitor room and ventilation and heat dissipation system

1.2 网格划分及边界条件设置

使用ICEM CFD软件构建的电容器室三维模型,将电容器内电气设备与围护结构之间的流体区域作为温度场和流速场计算区域。对建好的几何模型通过Mesh软件划分四面体网格,根据边界特点,将围护结构、电气设备、风管、进出风口网格尺寸分别设置为80、40、40、20 mm,检查网格质量,通过光顺全局网格调整网格质量在0.3以上。将网格模型载入Fluent软件中进行稳态数值模拟,采用压力求解器Pressure-Based,根据电气设备运行环境中的热量传递规律,采用对流与辐射的混合换热形式,开启能量方程,考虑电气设备的辐射散热和采用机械通风方式强制对流散热,采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型和DO辐射模型,空气为不可压缩的理想气体,轴流风机排风口为速度出口,风机额定风速为5.01 m/s,百叶窗进风口为压力入口,压强为0 Pa;根据室内外温度监测数据,当室外环境温度达到33.0℃时室内温度出现拐点并持续升高,所以设定边界温度条件为33℃;根据10-A2-6设计方案及施工设计图纸^[13],模块化变电站内墙、外墙和屋顶等围护结构的热工参数见表1。当前变电站运行负载率36.6%,电容器成

套装置为户内框架式(4 Mvar/5%),并联电容器组发热量为98.1 W/m²,串联电抗器发热量为281.7 W/m²。针对稳态计算采用Coupled求解算法,空间离散化压力项采用PRESTO预压交错格式,其他离散项采用二阶迎风格式,求解控制参数及计算收敛标准均为默认值^[14]。

表1 模块化变电站围护结构热工参数

Table 1 Thermal engineering parameters of the modular substation enclosure structure

位置	传热系数[W·(m ² ·K) ⁻¹]
内墙	0.179
外墙	0.129
屋顶	0.123

1.3 数学模型建立

文中基于CFD算法对变电站室内温度场和流速场进行模拟仿真,其通过流体力学基本守恒定律及相关控制方程计算得到各节点上相关物理参数^[15]。室内空气以稳态湍流形式流动,空气假设为不可压缩流体,忽略室内空气泄露问题,同时室内热源仅为电气设备损耗发热。因此,气流流动满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律^[16]。

1)质量守恒定律

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式(1)中: ρ 为气体密度, Kg/m^3 ; t 为时间, s ; μ 、 v 、 ω 分别为速度矢量 $\mathbf{v}_0$ 在 X 、 Y 、 Z 轴上的分量, m/s 。

2)动量守恒定律

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho \mu)}{\partial t} + \text{div}(\rho \mu \mathbf{v}_0) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{v}_0) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega \mathbf{v}_0) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: ρ 为气体密度, Kg/m^3 ; P 为流体微元体压力, Pa ; F_n 为流体微元体上所受的力, N ; τ_{mn} 为流体微元体上的粘性应力, N/m^2 。

3)能量守恒定律

$$\partial(\rho T)/\partial t + \text{div}(\rho \mathbf{v}_0 T) = \text{div}(\lambda C_p \text{grad } T) + S_T \quad (3)$$

式(3)中: C_p 为比热容, $\text{J/(Kg} \cdot \text{K)}$; $\mathbf{v}_0$ 为速度矢量,

m/s ; T 为温度, K ; λ 为导热系数, $\text{W/(m} \cdot \text{K)}$; S_T 为体积热源项或粘性耗散项, W/m^3 。

1.4 网格独立性验证与误差分析

根据数值模拟的原理,网格模型划分越细致,其计算结果的精度就越高,但是随着网格数量的增加会导致计算资源及时间成本随之增大。因此,通过网格独立性验证与误差分析,确定合适的网格划分方法和网格数量来提高计算效率,实现计算精度与计算时间的平衡,用较低的计算成本获得理想的数值模拟结果^[17]。文中通过逐步细化网格模型,在保持其他条件不变的情况下,成比例增大网格数量,设置3组网格数量分别为 $A=1\,765\,050$ 、 $B=5\,722\,848$ 、 $C=8\,779\,585$ 。同时根据电容器室内电气设备实际安装情况及安全操作要求,依据图2测试点位示意图,对室内温度、流速等参数进行现场测试(测试仪器详细参数见表2)。对3组网格模型设置相同的边界条件,将关键变量温度和速度无量纲化作为对比参数,对比分析实测数据与3组网格模型的仿真计算结果。

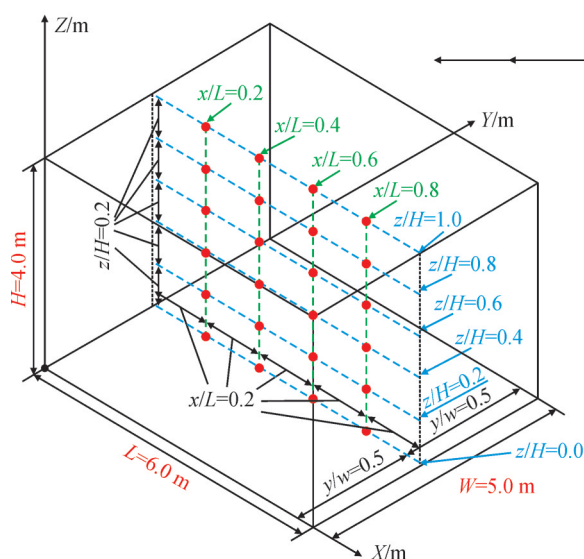


图2 电容器室温度、流速实测点位示意图及现场实测照片

Fig. 2 Schematic diagram of measured temperature and flow rate of capacitor chamber and measured field photos

表2 测试仪器参数信息表

Table 2 Test instrument parameter information table

设备名称	测试参数	测试范围	采样间隔
NB-Lot 无线温、湿度	温度	-20~+90 °C	15 min
自记仪	湿度	0~99%RH	
TSI-9565 热线风	风速	0~30 m/s	1 s
速仪	湿度	0~95%RH	

监测点参数的无量纲化方法为

$$T = (T_i - T_s) / (T_p - T_s) \quad (4)$$

$$v_0 = (v_i - v_p) / (v_s - v_p) \quad (5)$$

$$Z = z/H \quad (6)$$

式(4)-(6)中: T 、 v_0 和 Z 分别为无量纲温度、速度和垂直高度; T_i 为测点位置处环境温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为送风温度, $^{\circ}\text{C}$; T_p 为排风温度, $^{\circ}\text{C}$; v_i 为测点位置速度, m/s ; v_s 为送风速度, m/s ; v_p 为排风速度, m/s ; z 是测点高度, m ; H 为房间高度, m 。

3组网格模型数值模拟结果与实测数据在 $x/L=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 位置, 垂直高度上无量纲化温度和气流速度分布的对比见图3、4。文中根据网格收敛指数 GCI 法进行网格独立性验证。计算网格收敛指

数GCI方法如下。

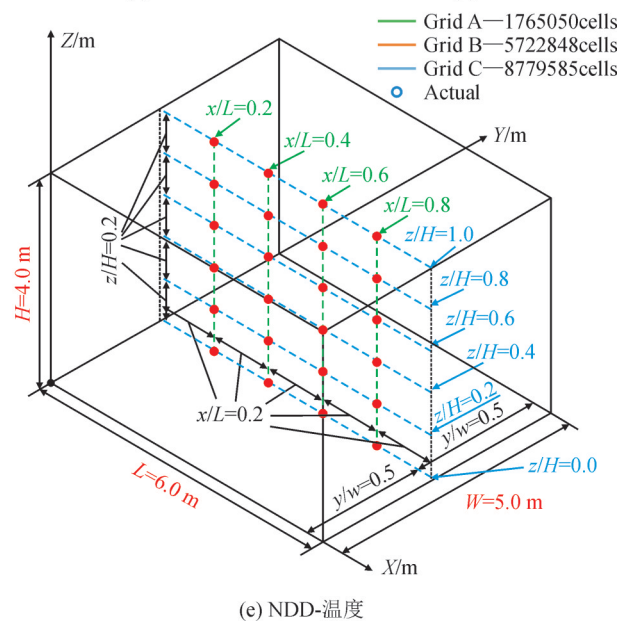
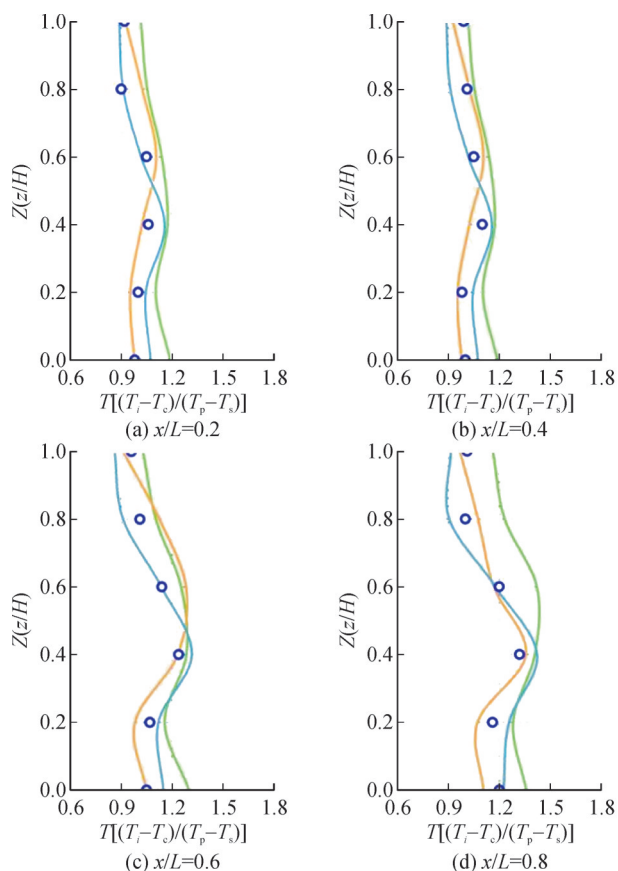


图3 无量纲化垂直温度分布的3组网格模型数值模拟结果与实测数据对比

Fig. 3 Comparison of the numerical simulation results of three sets of grid models with a dimensional vertical temperature distribution with the measured data

1) 关键变量的相对误差

$$\varepsilon_{\theta, i}^{BA} = \left| \frac{\varphi_{i, A} - \varphi_{i, B}}{\varphi_{i, B}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中: $\varphi_{i, A}$ 和 $\varphi_{i, B}$ 分别为 A 和 B 网格模型

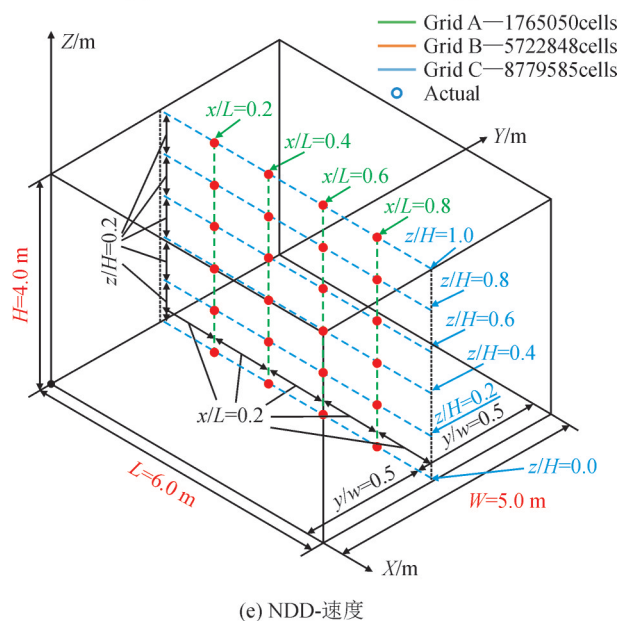
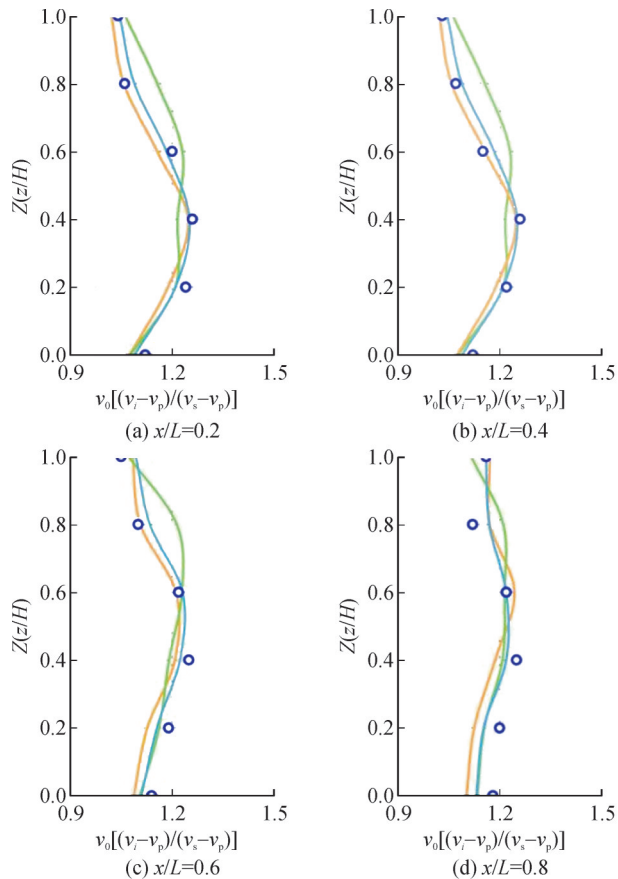


图4 无量纲化垂直速度分布的3组网格模型数值模拟结果与实测数据对比

Fig. 4 Comparison of the numerical simulation results of three sets of grid models with a dimensional vertical velocity distribution with the measured data

在第 i 个监测点上的关键变量值, 根据式(1)、(2)关键变量 φ 分别为无量纲温度和速度; $\varepsilon_{\theta, i}^{BA}$ 为 B 网格模型相对 A 网格模型在第 i 个监测点上的关键变量相对误差。

2) n 个监测点相对误差的均方根

$$\varepsilon_{\theta, n}^{\text{BA}} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{\theta, i}^{\text{BA}})^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

式(8)中: n 为网格模型中监测点个数; $\varepsilon_{\theta, n}^{\text{BA}}$ 是 B 网格模型相对 A 网格模型在 n 个采样点位置上关键变量相对误差的均方根。 $\varepsilon_{\theta, n}^{\text{CB}}$ 计算方法相同。

3) 网格收敛指数 GCI

$$GCI^{\text{BA}} = F \frac{\varepsilon_{\text{rms}}^{\text{BA}}}{r^p - 1} \quad (9)$$

式(9)中: F 为安全系数, 取值 1.25; p 为离散化方法的阶数, 文中采用二阶迎风格式离散, 取值 2; r 为网格优化因子, 取值 1.3, 网格收敛标准为 $\varepsilon_{\theta, n}^{\text{BA}} \leq 1.00\%$, $GCI \leq 1.81\%$ [18]。

对 $y/W=0.5$ 所在室内空间中截面, 设置 x/L (0.2、0.4、0.6、0.8) 4 条监测线, 并对其每条监测线上选取 z/H (0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0) 6 个监测点位, 图 3、4 分别显示了实测和数值模拟温度和速度分布情况, 不同网格模型的数值模拟结果与实测数值变化趋势大致相同, 其中, 网格 A 模型数值模拟结果与实测数据偏差较大, 最大误差为 18.6%; 网格 B 与网格 C 模型的数值模拟结果与实测数据偏差较小, 最大误差均小于 13.8%, 因此网格 B 模型模拟结果与实测数据变化趋势拟合性较好 [19]。同时, 网格 A 的 GCI 值为 0.292%, 网格 B 的 GCI 值为 0.183%, 因此网格 B 模型网格收敛性较好。综上所述, 网格 B 模型收敛性较好且与实测数据吻合良好, 可在保证计算结果准确性的前提下节省计算资源与计算时间, 适用于模拟电容器室内温度和气流组织分布模拟, 所以选择网格 B 作为本研究的参考网格。

2 百叶窗进风口优化方案

2.1 百叶窗宽高比

电容器室建筑外墙宽 5 m、高 4 m, 百叶窗在外墙面布局见图 5, 呈对称分布百叶窗中心位置距墙边 0.75 m、距地面 1.45 m, 百叶窗面积为 0.9 m^2 , 原始方案中百叶窗尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ ($W \times H$), 宽高比为 0.4 (W/H); 轴流排风机位于百叶窗正上方, 与百叶窗中心对应呈对称分队, 中心高度距地面 3.1 m。由于, 百叶窗宽高比决定进风入射轮廓, 入射轮廓与被降温设备的外形关系影响对流换热接触面积与散热效率 [20]。因此, 文中在百叶窗面积 (0.9 m^2) 不变的情况下, 设置 3 种不同的百叶窗宽高比 (W/H): 0.4、0.8、1.6。

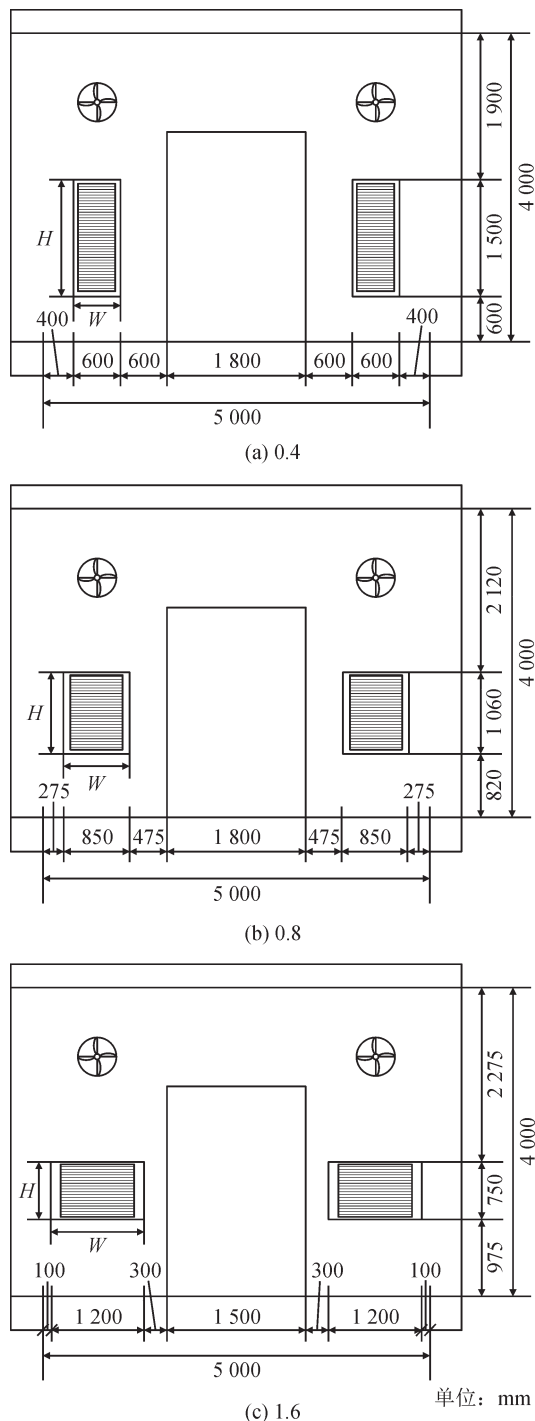


图5 百叶窗宽高比

Fig. 5 Shutter aspect ratio

2.2 百叶倾斜角度

百叶倾斜角度是影响室内气流组织分布的重要因素, 百叶窗通过百叶倾斜角度可以实现对室内气流入射方向控制, 改善入射方向提高冷空气与被降温设备接触面积将增强通风散热效率。因此, 保持百叶宽度、叶片间距等其他参数不变的情况下, 见图 6, 文中考虑了百叶倾斜角度 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 0^\circ$ 等 7 种情况。综上所述, 文中通过对百叶窗宽高比和百叶倾斜角度的参数配置, 共设置 21 个数值模拟方案, 见表 3。

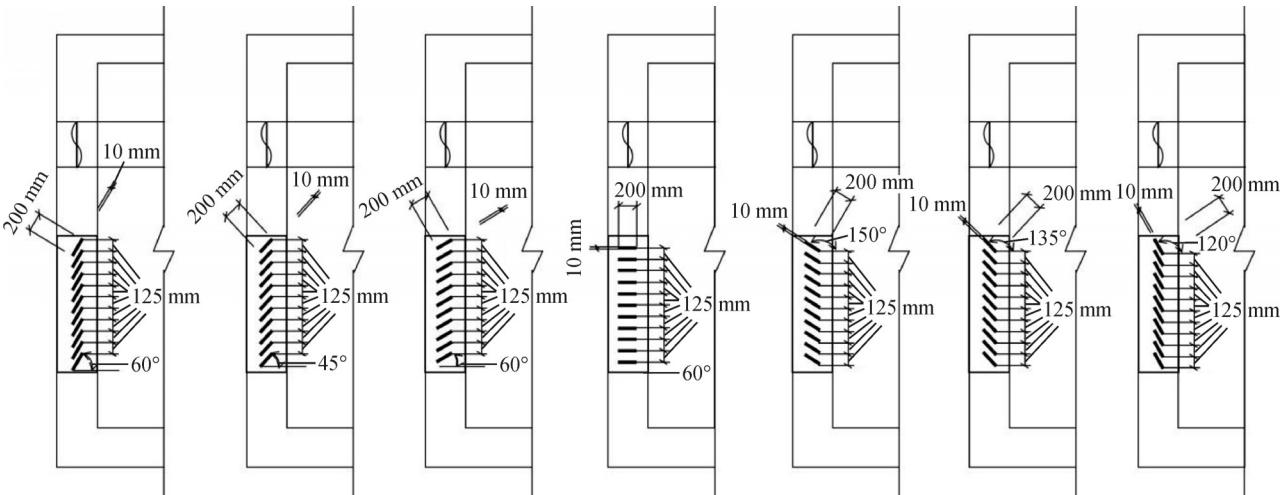


图6 百叶倾斜角度 $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 0^\circ$

Fig. 6 Louver tilt angles $\pm 60^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 0^\circ$

表3 电容器室百叶窗进风口数值模拟方案

Table 3 Numerical simulation scheme of shutter air inlet of capacitor room

方案	百叶窗宽高比	百叶倾斜角度/($^\circ$)
1	0.4 (W=0.6 m/H=1.5 m)	+60
2		+45
3		+30
4		0
5		-30
6		-45
7		-60
8	0.8 (W=0.85 m/H=1.06 m)	+60
9		+45
10		+30
11		0
12		-30
13		-45
14		-60
15	1.6 (W=1.2m/H=0.75m)	+60
16		+45
17		+30
18		0
19		-30
20		-45
21		-60

3 模拟结果分析

针对电容器室百叶窗进风口不同方案的数值模拟,在开展数值模拟结果分析时,应首先确定典型结果分析域,结合电容室围护结构及通风散热系统对称布置的特点,以及发热量、通风量等边界条件的对称性,进而使室内温度场和气流组织分布具有对称性分布的特点,见图7,针对一套电容器设备及周围空间,考虑电容器、电抗器及开关架等不同

设备发热量差别,对应各组成电气设备中心位置,在平面中选取a、b、c、d、e、f、g、h共8个分析点位;根据垂直高度上的温度分层及气流组织分布现象,在垂直高度上共设置5个温度和气流组织分层间隔0.6 m。综上所述,文中模拟结果分析域涵盖电气设备核心工作空间,同时下文温度和气流组织云图以a-b-c-d截面为基准。

3.1 温度场分析

温度场分布云图以图7中a-b-c-d截面为基准,同时包括各设备表面温度分布情况,从图8中可以看出,温度分布云图具有明显的核心区域积热高温特点,在百叶窗宽高比为0.4、百叶倾斜角度+60°时设备运行核心区域平均温度为45.8℃。随着百叶窗宽高比增加,电气设备核心工作区域平均温度先降低后增加;随着百叶倾斜角度由+60°向-45°过渡,电气设备核心工作区域平均温度持续降低,在百叶倾斜角度为-60°温度出现上升现象,且造成室内上部空间温度升高。同时可以看出电气设备表面温度分布变化明显,其变化趋势与设备工作区域温度变化一致,是由于百叶窗宽高比和百叶倾斜角度优化后使得设备工作区域温度较低,增大温差对流散热效果,改善了设备散热情况。造成图中温度分布变化的原因,是由于百叶倾斜角度正向过大时,通过百叶窗进入室内的冷空气向房间上部发展,未接触发热设备表面,不能有效降低设备核心工作区域温度;当百叶窗宽高比过小或大时,存在冷空气进风口超高或者超宽,导致与电气设备表面及积热区域有效降温面积较少。因此,百叶窗宽高比为0.8、百叶倾斜角度-45°时,其运行核心区域平均温度为34.9℃,与原方案相比温度降低10.9℃,电气设备表面及设备运行核心区域积热高温状况明显改善。

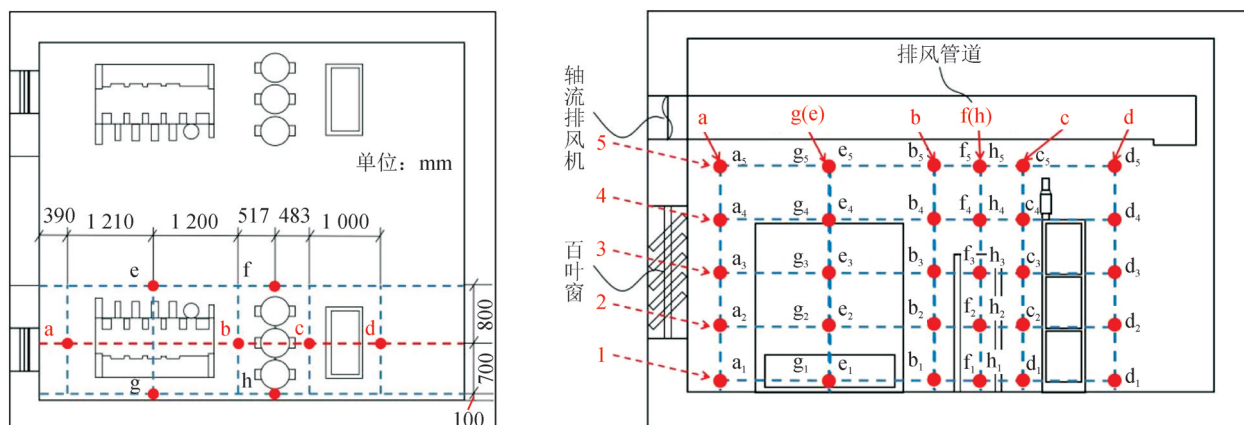


图7 电容器室温度、气流组织分布数值模拟结果分析域示意图

Fig. 7 Schematic diagram of analysis domain of numerical simulation results of temperature and airflow tissue distribution of capacitor chamber

b_2 监测点位处于电容器和电抗器之间,是明显的高温积热区域,选择该点作为各方案模拟数据分析对象,可以显著观察不同配置方案的降温效果。如图9所示,百叶窗宽高比值为0.8时温度结果均低于另外两组宽高比数据,降温幅度在0.79%~5.12%之间;3组百叶窗宽高比中在百叶倾斜角度大于 0° 时,温度均高于 42.0°C ,百叶倾斜角度为 0° 是温度变化的突变点,该倾斜角度下各方案温度明显降低,温度均低于 38.0°C ,降温幅度在15.8%~19.0%之间。百叶倾斜角度为 -45° 是温度变化的转折点,百叶窗宽高比0.8百叶倾斜角度 -45° 方案下温度最低,与原方案相比温度降低23.8%。

3.2 气流组织分析

气流组织分布云图与温度场分布云图截面一致,同时包括各排风管道内部流场及速度分布情况,从图10中可以看出,速度分布与气流组织发展情况吻合,结合速度云图和流线分布可以看出,在原方案百叶窗宽高比为0.4、百叶倾斜角度 $+60^\circ$ 时设备运行核心区域平均流速为 0.07 m/s ,设备周围存在明显的气流组织死区。随着百叶窗宽高比增加,电气设备核心工作区域平均速度先增加后降低;百叶倾斜角度影响气流组织发展路径,通过调整百叶角度可以消除气流组织死区,随着百叶倾斜角度由 $+60^\circ$ 向 -45° 过渡,电气设备核心工作区域平均速度持续增大;然而,当百叶倾斜角度为 -60° 时气流与地面发生碰撞产生涡旋,阻碍气流组织发展,导致电气设备核心区域平均速度出现下降现象。在对流换热中流速与温度呈反比关系,流速增大有利于带走更多热量提高换热效率,进而降低设备运行空间及设备本体温度。由此可以看出气流组织分布是影响温度场分布的重要因素,文中研究方案中

百叶窗宽高比为0.8、百叶倾斜角度 -45° 时气流组织发展最优,其运行核心区域平均流速为 0.47 m/s ,与原方案相比流速提高 0.4 m/s ,电气设备运行区域气流组织死区问题明显改善。

电容器室内空间狭窄,电容器和电抗器等设备构造复杂布置紧凑,由于电气设备的阻挡在 b_2 监测点处存在气流组织死区,且与高温积热区域重合,选择该点作为流场模拟数据分析对象,对于分析不同配置方案的流场变化情况具有代表性。如图11所示,百叶窗宽高比值为0.8时流速数值结果高于另外两组宽高比数据,速度提高幅度在0.37%~61.7%之间;3组百叶窗宽高比中,百叶倾斜角度为 -45° 时是速度变化的转折点,其他百叶倾斜角度下速度均低于 0.41 m/s ,百叶窗宽高比0.8百叶倾斜角度 -45° 方案与原方案相比速度提高84.4%。

4 结论

文中采用现场实测与数值模拟方法研究了不同百叶窗宽高比和百叶倾斜角度对110 kV全户变电站中电容器室通风散热效果的影响。通过对各优化方案的温度场和气流场分布开展分析,得出以下结论。

1)同一百叶倾斜角度下随着百叶窗宽高比的增加,电气设备核心工作区域平均温度先降低后增加,电气设备核心工作区域平均速度先增加后降低;百叶窗宽高比值为0.8时流速数值模拟结果高于另外两组宽高比数值,流速提高幅度在0.37%~61.7%之间;温度数值模拟结果低于另外两组宽高比数值,降温幅度在0.79%~5.12%之间。百叶窗宽高0.8与电容器外形宽高比相近,所以百叶窗宽高

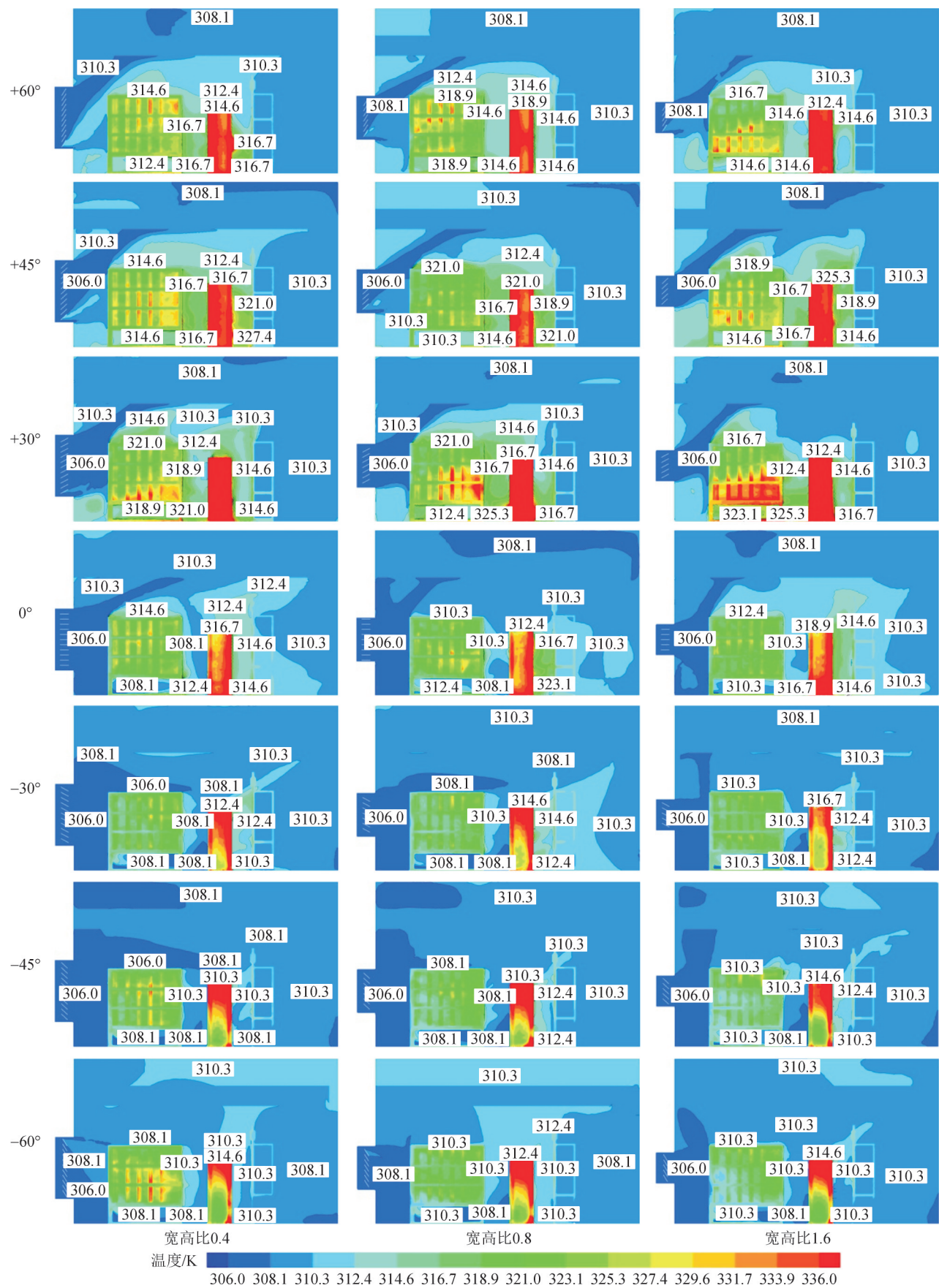


图8 电容器室百叶窗宽高比与百叶倾斜角度组合方案温度场分布云图

Fig. 8 Cloud map of the temperature field distribution of the shutter aspect ratio and louver tilt angle combination scheme of the capacitor chamber

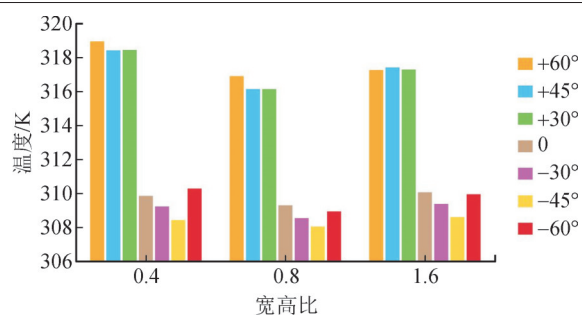


图9 b_2 监测点上不同百叶窗宽高比和百叶倾斜角度配置方案温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of different shutter aspect ratios and shutter tilt angles at the monitoring points b_2

比确定时考虑电气设备外型尺寸,可以为电气设备运行带来更好的降温效果。

2)同一百叶窗宽高比下随着百叶窗倾斜角度减小,电气设备核心工作区域平均温度先降低后增加,电气设备核心工作区域平均温度先增加后降低,百叶倾斜角度为 0° 是温度变化的突变点,该倾斜角度下各方案温度明显降低,温度均低于 38.0°C ,降温幅度在 $15.8\%\sim 19.0\%$ 之间,百叶倾斜角度为 -45° 是温度和流速变化的转折点,此百叶倾斜角度下降温效果最好。因此,通过百叶角度改变气流组织方向,使气流以 -45° 的角度吹向电气设备底部,

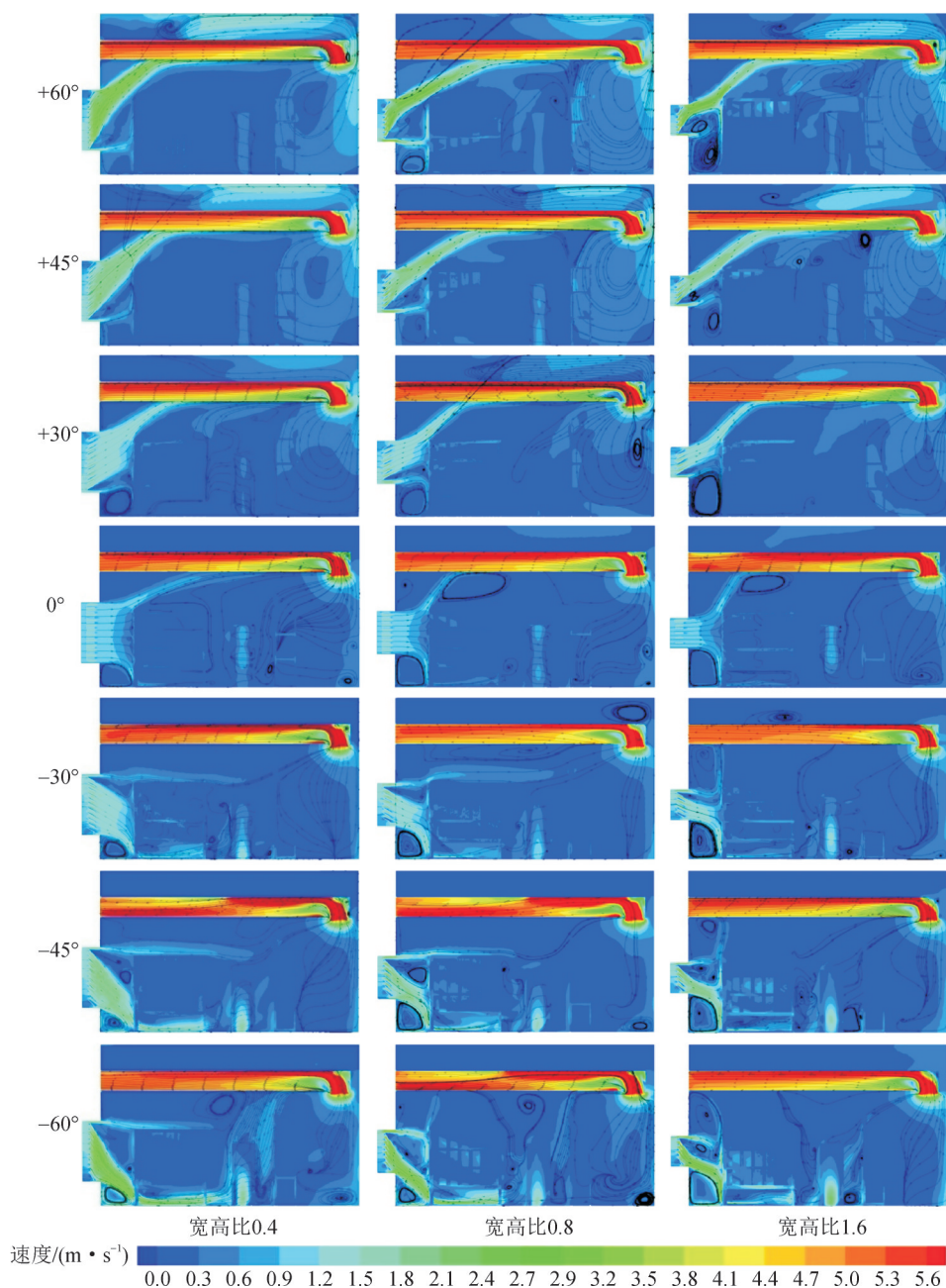


图10 电容器室百叶窗宽高比与百叶倾斜角度组合方案气流组织分布云图

Fig. 10 Cloud map of the airflow organization distribution of the shutter aspect ratio and shutter tilt angle combination scheme of the capacitor chamber

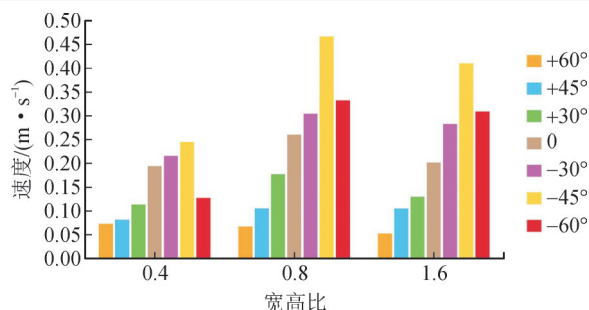


图 11 b₂监测点上不同百叶窗宽高比和百叶倾斜角度配置方案速度分布

Fig. 11 Speed distribution of different shutter aspect ratio and shutter tilt angle at monitoring point b₂

可以优化整体气流组织路径,强化对流换热效果。

3)百叶窗宽高比和百叶倾斜角度改变对电容器室内通风散热效果影响显著。由于其对室内温度场和气流组织分布影响具有规律性,经过云图及数据拟合分析,得到最佳方案为百叶窗宽高比0.8和倾斜角度-45°的配置方案,该方案下电气设备运行区域内平均温度为34.9℃,平均流速为0.47 m/s,与原方案相比运行区域内平均温度降低23.8%,平均流速提高84.4%,使其运行环境温度在标准阈值内。

参考文献:

- [1] 秦建新. 建设环保型变电站是城市电网发展的必然趋势[J]. 华北电力技术, 2005(7): 36-39.
QIN Jianxin. Environmental protection substation-inevitable trend of city power network development[J]. North China Electric Power, 2005(7): 36-39.
- [2] 夏 泉, 杨然静. 城市户内变电站设计建设与发展趋势[J]. 电力勘测设计, 2018, 117(s2): 24-28.
XIA Quan, YANG Ranjing. Urban indoor substation design, construction and development trend[J]. Electric Power Survey and Design, 2018, 117(s2): 24-28.
- [3] 秦文慧. 110 kV 户内变电站通风散热的数值模拟及优化研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
QIN Wenhui. Numerical simulation and optimization study of ventilation and heat dissipation in 110 kV indoor substation[D]. Nanjing: Southeastern University, 2019.
- [4] LIU Yun, YE Wenjie, LI Yonghua, et al. Ventilation optimization for reduction of indoor air temperature of main transformer room in urban indoor substation by the variational method[J]. Journal of Thermal Science, 2019, 28(5): 1089-1101.
- [5] YANG Huijuan, YU Tingfang, XU Rui, et al. Numerical simulation of ventilation for main transformer room of indoor substations[J]. The Open Automation and Control Systems Journal, 2015, 7(1): 1597514.
- [6] 王流火, 孙 帅, 王增彬, 等. 变电站设备箱体温度、湿度场及凝露的数值模拟[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 24-29.
WANG Lihuo, SUN Shuai, WANG Zengbin, et al. Numerical simulation of temperature/humidity field and condensation in

- substation equipment cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 24-29.
- [7] 郭 盛, 黄 伟, 薛 林, 等. 基于综合环境控制的室内变电站通风方式[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(3): 19-26.
GUO Sheng, HUANG Wei, XUE Lin, et al. Ventilation mode of indoor substation based on integrated environmental control technology[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(3): 19-26.
- [8] KANAAN M, CHAHINE K. CFD study of ventilation for indoor multi-zone transformer substation[J]. International Journal of Heat and Technology, 2018, 36(1): 88-94.
- [9] HU Sheng, CHEN Shaoyi, LI Tienan. Study on ventilation and noise reduction in the main transformer room in indoor substation [J]. MATEC Web of Conferences, 2016(44): 02058.
- [10] 舒力帆, 胡文斌, 陈明兰, 等. 室内变电站混合通风模式研究及探讨[J]. 建筑科学, 2012, 28(2): 84-87.
SHU Lifan, HU Wenbin, CHEN Minglan, et al. Research on hybrid ventilation mode of indoor substation[J]. Building Science, 2012, 28(2): 84-87.
- [11] TAI V C, KAI-SEUN J W, MATHEW P R, et al. Investigation of varying louver angles and positions on cross ventilation in a generic isolated building using CFD simulation[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2022(229): 105172.
- [12] 罗 薇, 殷颖迪, 郝 晟, 等. 基于自然通风分析的百叶窗优化设计研究[J]. 建筑节能, 2022, 50(4): 99-103.
LUO Wei, YIN Yingdi, HAO Sheng, et al. Optimum design of sunshade window based on natural ventilation analysis[J]. Building Energy Efficiency, 2022, 50(4): 99-103.
- [13] 国网江苏省电力有限公司. 国网江苏省电力有限公司输变电工程标准化设计图集: 110 kV 变电站模块化建设(110-A2-6 方案产品化施工图及典型做法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2019.
State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Atlas of transmission and transformation engineering of state grid Jiangsu electric power Co., Ltd.: 110 kV substation(110-A2-6 scheme product construction drawing and typical practice 2019 edition)[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2019.
- [14] 赵兴旺. 利用改进的基于CFD的伴随方法进行室内环境逆向设计[D]. 天津: 天津大学, 2020.
ZHAO Xingwang. Using the modified CFD-based accompanying method to design the reverse indoor environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [15] 秦文慧, 黄亚继, 夏志鹏, 等. 110 kV 户内变电站主变室通风降温实测及模拟研究[J]. 能源研究与利用, 2018(1): 31-34.
QIN Wenhui, HUANG Yaji, XIA Zhipeng, et al. Measured and simulation study of ventilation and cooling in the main transformer room of 110 kV indoor substation[J]. Energy Research & Utilization, 2018(1): 31-34.
- [16] 杨 欢. 户内变电站通风换热仿真研究与实现[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
YANG Huan. Research and implementation of ventilation and heat transfer simulation of indoor substation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.

(下转第 236 页)

- University, 2021.
- [16] 袁洪涛, 徐潇源, 严正, 等. 电动汽车集中充换电设施规划和优化运行研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 157-174.
YUAN Hongtao, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Review of centralized EV charging and battery swapping facility planning and optimal scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 157-174.
- [17] 葛乐, 陆颖, 王明深, 等. 考虑用户决策更新的电动汽车充换电负荷预测[J]. 浙江电力, 2025, 44(10): 152-164.
GE Le, LU Ying, WANG Mingshen, et al. EV charging and battery swapping load forecasting considering user decision updating[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(10): 152-164.
- [18] 张帝, 姜久春, 张维戈, 等. 基于遗传算法的电动汽车换电站经济运行[J]. 电网技术, 2013(8): 2101-2107.
ZHANG Di, JIANG Jiuchun, ZHANG Weige, et al. Economic operation of electric vehicle battery swapping station based on genetic algorithms[J]. Power System Technology, 2013(8): 2101-2107.
- [19] 黄敏丽, 于艾清. 基于改进布谷鸟算法的电动汽车换电站有序充电策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1075-1083.
HUANG Minli, YU Aiqing. Study on coordinated charging strategy for battery swapping station based on improved cuckoo search algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1075-1083.
- [20] 张文昕, 栗然, 臧向迪, 等. 基于强化学习的电动汽车换电站实时调度策略优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 134-141.
ZHANG Wenxin, LI Ran, ZANG Xiangdi, et al. Real-time scheduling strategy optimization for electric vehicle battery swapping station based on reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 134-141.
- [21] 闫湖, 胡静, 王哲. 退役动力电池剩余电量状态估计方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2021(10): 33-41.
YAN Hu, HU Jing, WANG Zhe. Research on discharge state estimation method of retired power battery[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(10): 33-41.
- [22] 赵丽萍, 张书伟, 张雪岩, 等. 基于随机机会约束规划的面向能源互联网的主动配电网选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 121-129.
ZHAO Liping, ZHANG Shuwei, ZHANG Xueyan, et al. Locating and sizing method for energy interconnection oriented active distribution networks based on stochastic chance constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 121-129.
- [23] 董运昌, 刘世民, 曲朝阳, 等. 计及用户响应电价关联与多主体共赢的电动汽车充放电定价优化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 134-142.
DONG Yunchang, LIU Shimin, QU Chaoyang, et al. Charging and discharging pricing optimization of electric vehicles considering correlation of user response to electricity price and win-win results of multi-stakeholder[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 134-142.
- [24] 汪天允, 张浩. 基于人工鱼群算法的电动汽车优化充电策略[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 33-38.
WANG Tianyun, ZHANG Hao. Optimal charging strategy of electric vehicles based on artificial fish swarm algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 33-38.
- 尹翔(1986—), 男, 硕士研究生, 副高级工程师, 主要研究方向为电网规划设计、储能及新型电力系统研究(通信作者)(E-mail: yinxiang524@sina.com)。
- 余丹(1980—), 女, 硕士研究生, 副高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划设计(E-mail: dyu@eppei.com)。
- 张效俊(1978—), 男, 本科, 副高级工程师, 主要研究方向为电网规划(E-mail: 13639913661@163.com)。
- 崔福海(1978—), 男, 本科, 副高级工程师, 主要研究方向为电网规划(E-mail: 406618668@qq.com)。
- 何蕾(1988—), 女, 本科, 副高级工程师, 主要研究方向为电网建设、经营管理(E-mail: 251005807@qq.com)。
- 夏远德(1988—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电网规划(E-mail: 418176565@qq.com)。
- 王哲(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为退役电池利用(E-mail: 794775011@qq.com)。

(上接第227页)

- [17] 胡俊. 碰撞射流供冷房间热分层模型及性能优化研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
HU Jun. The delstratification model and performance optimization [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [18] 陈佳, 王梦林. 不同网格类型对建筑风环境仿真结果的影响[J]. 土木建筑工程信息技术, 2021, 13(3): 154-159.
CHEN Jia, WANG Menglin. The impact of different mesh types on the outdoor wind environment of buildings[J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2021, 13(3): 154-159.
- [19] 丁俊伟. 基于CFD仿真的传感器部署方法研究: 面向室内环境智能化控制[D]. 广州: 广州大学, 2022.
DING Junwei. Research on sensor deployment method based on CFD simulation: Intelligent control for indoor environment[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2022.
- [20] 张宝斌. 基于CFD分析的散热器百叶窗应用模型研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
ZHANG Baobin. Study on the application model of the radiator shutter based on CFD analysis[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- 史亚鑫(1997—), 男, 博士研究生, 研究方向为变电站室内热湿环境控制、建筑柔性负荷预测与虚拟电厂调控(E-mail: 15230251947@163.com)。
- 刘志坚(1984—), 男, 博士, 教授, 研究方向为建筑环境生物气溶胶、综合能源系统(通信作者)(E-mail: zhijianliu@ncepu.edu.cn)。