

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.004

变电站设备箱体温度、湿度场及凝露的数值模拟

王流火¹, 孙 帅², 王增彬², 庞小峰², 唐 瑛²

(1. 广东电网有限责任公司, 广州 510020; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510000)

摘要: 变电站设备箱体作为变电主设备重要的组成部分,其安全稳定运行对电网的可靠性至关重要。目前运行在南方地区高温、高湿、高盐腐气候环境中的变电站设备箱体时常会因为内部元器件二次元件老化、锈蚀等问题造成主设备出现故障。而引起二次元件老化、锈蚀等问题的主要原因是变电站设备箱体内部温度、湿度超标,突出表现为箱体内部出现凝露问题。凝露现象的产生主要是因为当相对湿度较高的气体遇到物体温度相对较低的表面时,高温气体降到露点温度后在低温物体表面出现的液化现象。文中基于能量、动量、连续性以及组分守恒定律,将空气考虑为水蒸气和干燥空气的混合物,鉴于潮湿空气的流速相对较低以及压力变化相对较小,将空气视为不可压缩牛顿流体。采用计算流体动力学(CFD)技术,建立了端子箱在热传导、空气对流和水蒸气扩散作用下的湿温场模型,仿真计算温度和湿度的分布规律、露水凝结与湿度和湿度的关系。分析温度、湿度和强制通风对凝露现象的影响。数值计算结果表明,由于导体自热,在热传导和对流的条件下,室外端子箱内的空气温度逐渐升高;湿度分布结果表明,进气口的湿度最低,出口处湿度最高,温度较高时的湿度相对较低,环境湿度降低时湿度相对较低,空气流速增大时湿度相对较低。此外,根据计算,文中提出了强制通风、降低环境湿度等实用性防凝露措施。

关键词: 变电站设备箱体; 防潮; 凝露

Numerical Simulation of Temperature/Humidity Field and Condensation in Substation Equipment Cabinet

WANG Lihuo¹, SUN Shuai², WANG Zengbin², PANG Xiaofeng², TANG Ying²

(1. Guangdong Power Grid, Corporation, Guangzhou 510020, China; 2. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid, Corporation, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The substation equipment cubicle is an important part of the substation main equipment, and its safe and stable operation is critical to the reliability of the power grid. At present, in the high temperature, humidity and salt-rotten climate of the southern region, substation equipment cubicle often malfunction because of the aging and rust of secondary components of internal components. The main cause of problems such as aging and rust of secondary components is that the temperature and humidity inside the substation equipment cubicle exceed the standard, which is highlighted by the condensation problem inside the substation equipment cubicle. Dew condensation is a phenomenon in which water vapor condenses on objects of relatively low temperature when it is saturated in the air, and temperature and humidity are both the main factors causing dew condensation. Based on the conservation laws of energy, momentum, mass and species, considering air as a mixture of ideal gases composed of water vapor and dry air, taking into account that the density of air changes relatively little during the flow, treating air as an incompressible fluid, a mathematical model of the temperature and humidity field model of the substation equipment cubicle under heat conduction, air convection and water vapor diffusion are constructed by computational fluid dynamics (CFD) technology with using the species transport model in order to reveal the distribution of temperature and humidity.

收稿日期:2019-05-21; 修回日期:2019-07-18

基金项目:中国南方电网公司科技项目(GDKJXM20180123)。

Project Supported by of China Southern Power Grid(GDKJXM20180123) .

ty likewise the relationship between dew condensation with temperature and humidity. This paper analyzes the effects of temperature, humidity, forced ventilation and internal heat source on the condensation phenomenon. The numerical calculation results show that the air temperature in the outdoor terminal box gradually rises under the condition of heat conduction and heat convection due to the self-heating of the conductor; The distribution of humidity shows that the humidity at the gas outlet is at the highest state, the humidity at the gas inlet is at the lowest state, the humidity at the higher temperature is relatively lower, the humidity is relatively lower when relative humidity of the environment reduce, and the humidity is relatively lower when inlet gas speed increases. Finally, based on the numerical calculation results, it proposed that adopting a forced ventilation at the inlet, reducing the relative humidity of the environment, which can be used for anti-condensation measures.

Key words: substation equipment cubicle; moistureproof; condensation

0 引言

变电站设备箱体做为变电主设备重要的组成部分,其安全稳定运行对电网的可靠性至关重要。目前运行在南方地区高温、高湿、高盐腐气候环境中的变电站设备箱体时长会因为内部元器件二次元件老化、锈蚀等问题造成主设备出现故障。而目前对于变电站设备箱体运行状态缺乏深入的研究,以致因变电站设备箱体运行质量问题引发的缺陷得不到有效解决,对变电设备安全运行已产生严重影响。变电站设备箱体各类缺陷中箱体内部环境异常出现凝露是突出的问题之一。箱体内部的凝露往往会引发内部二次元器件工作异常,进而导致设备故障^[1-3]。凝露现象的产生主要是因为当相对湿度较高的气体遇到物体相对较低的表面时,由于达到了露点温度而产生的在低温物体表面出现液化的现象^[4-7]。文中采用有限元软件 Ansys Fluent 对变电站设备箱体内部温度场、湿度场进行数值分析,明确了变电站设备箱体的凝露特性,有助于在日常变电站运维中提升电站设备箱体的运行质量。

1 变电站设备箱体模型

1.1 物理模型

以 35 kV 变电站设备箱体中最具代表的端子箱进行仿真计算。考虑到该端子箱内部仅有部分继电器且相对于端子箱箱体较小,并且靠近箱体布置,对端子箱内部温、湿度场影响较小,所以对该端子箱进行简化处理,按照其结构将其简化为 600 mm×600 mm×1 240 mm 尺寸的柜体,所建物理模型见图 1。同时考虑到端子箱与外界空气直接接触,将端子箱外壳设置为与周围空气进行对流换热^[4]。考虑到该端子箱底部直接与地面相接触,并且底部处设有开槽,潮湿空气易汇聚于箱体底部,因此将潮湿空气入口设置为底部左侧开槽处,将空气出口设置在底部右侧开槽处。

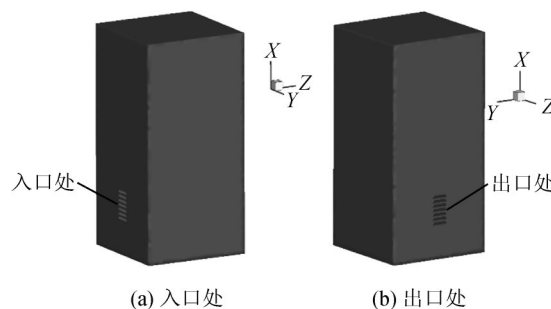


图1 端子箱计算模型

Fig. 1 Calculation model of the terminal box

端子箱温度影响因素有热传导、热对流、热辐射等因素,考虑到端子箱内部温度相对较低,所以在进行仿真计算时忽略端子箱内部热辐射作用^[5]。将潮湿空气看作干燥空气和水蒸气的理想气体共同组成的混合气体,考虑到潮湿空气的流速相对较低以及压力变化相对较小,将空气视为不可压缩牛顿流体,并且考虑到重力场对空气和水蒸气的影响。气体湍流模型选用 RANS $k-\varepsilon$ 模型^[6-12]。

1.2 数学模型

该模型物理过程中所需要遵循的连续性、能量、动量以及组分守恒定律^[13-19],其控制方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \nabla(u) = 0 \quad (1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T) + Q \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + F \quad (3)$$

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_s \nabla c_s) + u \cdot \nabla c_s = S_m \quad (4)$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (6)$$

式(1)-(6)中: ρ 为潮湿空气的密度, $\rho = \sum \alpha_i \rho_i$; α_i 为各相占空气的体积分数; ρ_i 为该相密度, kg/m³; C_p 为比热容; T 为温度; λ 为导热系数; p 为流体微元

体上的压力; F 为体积力; C_s 为水蒸气相的浓度; D_s 为水蒸气相的扩散系数; S_m 为质量源项。 k 为湍流能量; ε 为耗散率; G_k 平均速度引起的湍流能量; G_b 为浮力引起的湍流能量; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为常系数; μ_t 为湍流粘性系数, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ 。

1.3 壁面结露判据

在任意时刻端子箱壁面的绝对湿度大于壁面温度所对应的饱和绝对湿度时,即可判定壁面此时刻出现凝露;若未达到壁面温度所对应的饱和绝对湿度,则判定壁面此时刻出现未凝露^[20]。

2 仿真结果与分析

采用有限元软件 Ansys Fluent 对端子箱内部温度场、湿度场进行数值分析,环境温度和端子箱初始温度均设置为 300 K。

2.1 进气口处温度的影响

由于端子箱所处环境在一年四季中处于变化之中,其参数会发生变化,因此进口处温度时常改变,为了单独研究入口温度对通风除湿的影响,分别设置了3种不同的入口温度 293、303、313 K。在不同温度下入口空气湿度相同,均按照 303 K 时 70% 相对湿度时水蒸气设置^[21]。

在 XOZ 平面下不同进气口温度情况下端子箱内部温度场分布图见图 2。在 XOZ 平面下不同进气口温度情况下端子箱内部水蒸气含量分布图见图 3。

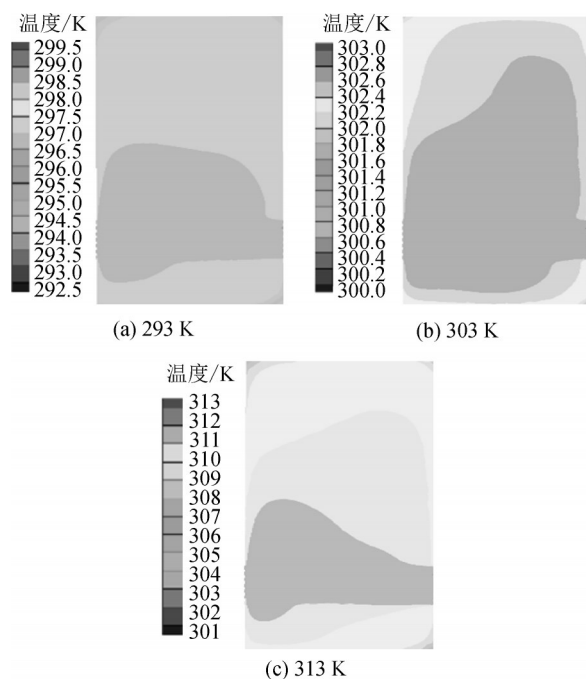


图2 端子箱内部温度分布图

Fig. 2 Temperature of the interior terminal box

在 XOZ 平面上不同环境湿度情况下端子箱内

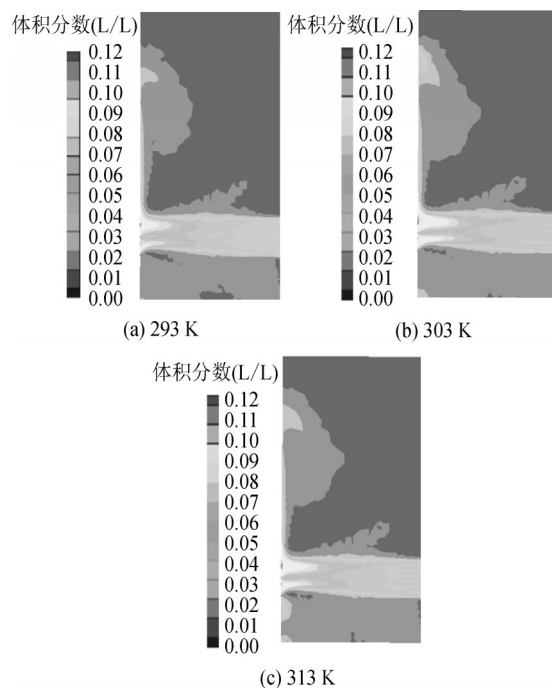


图3 端子箱内部水蒸气含量分布图

Fig. 3 Water vapor content of the interior terminal box

部蒸汽含量分布图见图 4。

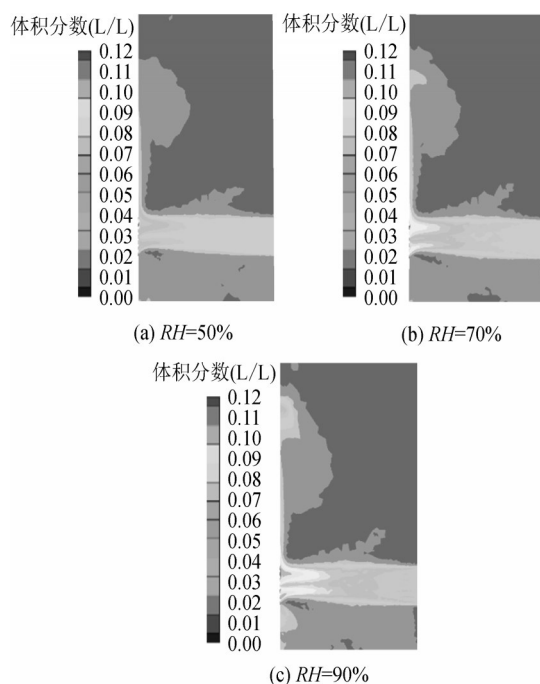


图4 端子箱内部水蒸气含量分布图

Fig. 4 Water vapor content of the interior terminal box

由图 3 可知,在 3 种不同的入口温度下,随着入口温度的升高,端子箱壁面处的水蒸气含量呈现增加趋势。在 313 K 的情况下,端子箱壁面处水蒸气含量相对更高,更容易在壁面发生凝露问题。

2.2 环境湿度的影响

由于端子箱一年四季都处于工作状态,所以箱体所处的环境湿度场会处于变化状态,为了分析不

同湿度情况下端子箱内部湿度场分布情况,分别按照环境温度为303 K时相对湿度为50%、70%、90%设置入口水蒸气含量,仿真研究入口处湿度对端子箱内部水蒸气含量分布的影响。

由图4可以看出,环境相对湿度增高时,端子箱内部水蒸气含量会随之增大。当相对湿度较小时,端子箱内部水蒸气分布相对均匀,当相对湿度增大时,端子箱内部水蒸气呈现聚集情况,并在端子箱壁面处水蒸气含量相对较高,更容易在壁面发生凝露问题。

2.3 进气口处速度的影响

对于端子箱而言,进气口处速度的改变对端子箱内部的流场影响会相对较大,因此也会对内部的湿度分布产生影响。为了研究不同入口速度下的湿度分布,设定了3种不同的入口速度分别为2、4、6 m/s,温度统一设定为303 K,相对湿度为70%。

在XOZ平面下不同进气口速度情况下端子箱内部水蒸气含量分布图见图5。在XOZ平面下不同进气口速度情况下端子箱内部气流场分布图见图6。

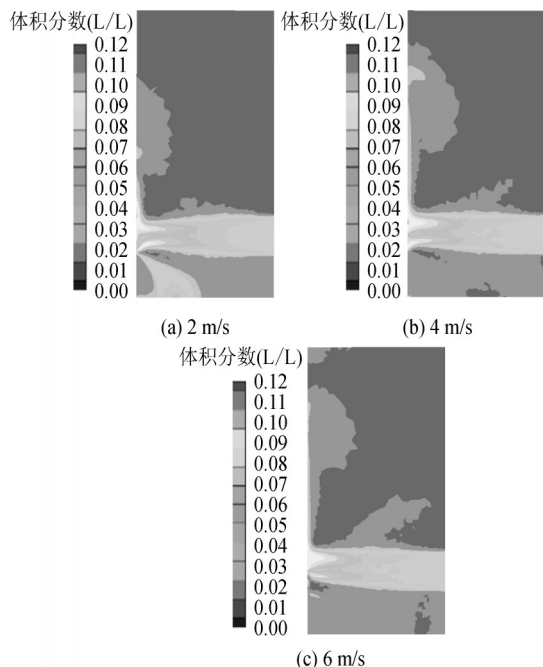


图5 端子箱内部水蒸气含量分布图

Fig. 5 Water vapor content of the interior terminal box

由图5、6可以看出,进气口速度增大时,端子箱内部水蒸气含量会随之减小。当入口处速度相对较低时,由于端子箱内部气流场出现回流现象,其内部水蒸气呈现聚集情况,并在端子箱壁面处水蒸气含量相对较高,更容易在壁面发生凝露问题。

3 结论

对于端子箱,通过建立模型并分析了进气口速

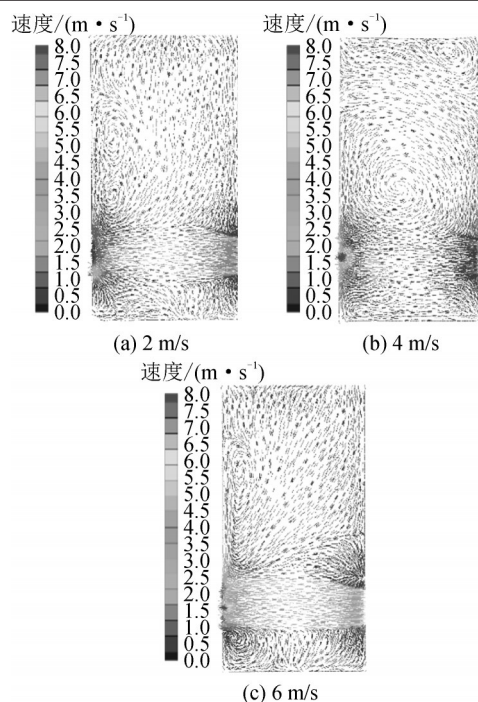


图6 端子箱内部气流场分布图

Fig. 6 Gas flow field of the interior terminal box

度、进气口温度和环境湿度不同设置方式的影响,结论如下:

1)在3种不同的入口温度下,随着入口温度的升高,端子箱壁面处的水蒸气含量呈现增加趋势。当相对湿度较小时,端子箱内部水蒸气分布相对均匀,当相对湿度增大时,端子箱内部水蒸气呈现聚集情况,并在端子箱壁面处水蒸气含量相对较高,更容易在壁面发生凝露问题。

2)进气口速度增大时,端子箱内部水蒸气含量会随之减小。当入口处速度相对较低时,由于端子箱内部气流场出现回流现象其内部水蒸气呈现聚集情况。

3)如果端子箱长时间处于高湿度状态,其内部容易发生水汽凝结,进而容易发生各种短路故障,包括单相短路、两相短路,甚至三相短路。由于水蒸气覆盖绝缘材料发生的凝露现象容易造成的局部放电现象,可能会导致电气设备绝缘击穿故障,严重影响变电站设备系统的稳定性,并降低了整个系统的供电可靠性水平。

由仿真结果可知,在实际工程中,为了降低端子箱内部凝露情况,当早晚外部环境 with 变电站设备箱体内部温差超过3℃时可采取在入口处强制通风措施,强制通风风速可根据温差大小而确定,同时也可通过降低环境湿度等方式来降低端子箱内部水蒸气含量进而降低端子箱内部凝露的可能性^[22]。

参考文献:

- [1] 陈荣,闫新,张弛,等.几种闭式开关柜防凝露方法的模拟研究[J].节能,2015,35(9):26-31.
CHEN Rong, YAN Xin, ZHANG Chi, et al. Numerical study of several anti-condensation methods for closed switch cabinet[J]. Energy Conservation, 2015, 35(9):26-31.
- [2] 郝瑞英,硅胶涂层用于金属机柜的防凝露研究[D].上海:上海交通大学,2015.
HAO Ruiying, Study on anti-condensation of cabinet based on desiccant-coated metal surface[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015.
- [3] 杨芳,潘岐泽.12 kV 高压开关柜受潮凝露防治技术研究[J].高压电器,2018,54(8):40-47.
YANG Fang, PAN Qize. Key technologies investigation of damp-proofing and anti-dewing for 12 kV high-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8):40-47.
- [4] 刘云鹏,郭沁.高压开关柜电缆室温湿度场数值计算分析[J].高压电器,2017,53(9):6-10.
LIU Yunpeng, GUO Qin. Numerical calculation of temperature and humidity fields in cable room of high-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9):6-10.
- [5] 洪峰,陈众,李静漪,等.城市箱式变电站的防凝露措施[J].浙江电力,2013,32(9):67-69.
HONG Feng, CHEN Zhong, LI Jingyi, et al. Preventive measures against condensation in packaged substations in urban areas[J]. Zhejiang Electric Power, 2013, 32(9):67-69.
- [6] 周强强,李津.变电站智能端子箱防凝露控制系统的应用[J].广东电力,2013,26(8):73-77.
ZHOU Qiangqiang, LI Jin. Study and application of anti-condensation control system of intelligent terminal box in substation[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(8):73-77.
- [7] 杨智伟.端子箱凝露的危害和防治[J].云南电力技术,2008,36(2):45.
YANG Zhiwei. Harm and prevention of condensation of terminal box[J]. Yunnan Electric Power, 2008, 36(2):45.
- [8] 孙亚芬.高压电路设备防凝露控制的研究[J].自动化技术与应用,2009,28(4):100-102.
SUN Yafen. Dew-proofing method for high-voltage electrical equipment[J]. Techniques of Automation and Applications, 2009, 28(4):100-102.
- [9] 顾博超.35 kV 电气开关柜防凝露措施的研究[D].天津:天津大学,2016.
GUO Bochao. Study on measures to prevent 35 kV switchgear dewing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [10] 张俊民,侯振华,张春朋,等.27.5 kV GIS 母线室三维温度场的数值计算[J].电工技术学报,2011,26(12):62-67.
ZHANG Junmin, HOU Zhenhua, ZHANG Chunpeng, et al. Three dimensional thermal field numerical calculation of 27.5 kV gas-insulated switchgear bus bar's cabinet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12):62-67.
- [11] 李永祥,王天正,晋涛,等.基于多种检测技术的高压开关柜内部局部放电检测与分析[J].高压电器,2017,53(1):45-50.
LI Yongxiang, WANG Tianzheng, JIN Tao, et al. Detection and analysis of high voltage switchgear internal partial discharge based on multiple detection technology[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1):45-50.
- [12] 任君鹏,王栋,杜志叶,等.强迫空气冷却高压开关柜三维气流——温升仿真分析[J].高压电器,2017,53(10):12-18.
REN Junpeng, WANG Dong, DU Zhiye, et al. Simulation analysis of 3-d airflow-temperature rise for high-voltage switchgear under forced air cooling[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10):12-18.
- [13] 陶文铨.数值传热学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [14] 杨世铭.传热学[M].北京:高等教育出版社,1998.
YANG Shiming. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.
- [15] 柯斯乐.扩散流体系统中的传质[M].北京:化学工业出版社,2002.
CUSSLER E L. Diffusion mass transfer in fluid system[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [16] 李先庭,李晓峰,彦启森,等.一种求解湿空气温度和相对湿度的 CFD 算法[J].暖通空调,2000,30(2):66-68.
LI Xianting, LI Xiaofeng, YAN Qisen, et al. CFD algorithm for wet air temperature and relative humidity calculation[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2000, 30(2):66-68.
- [17] 蒲亮,徐俊,余锋,等.电气设备环境试验室湿度场的数值模拟及优化[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007,39(5):716-720.
PU Liang, XU Jun, YU Feng, et al. Numerical simulation and optimization of the humidity field in environmental chamber of test with electric equipment[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2007, 39(5):716-720.
- [18] 邓书辉,施正香,李保明.低屋面横向通风牛舍温湿度场 CFD 模拟[J].农业工程学报,2015,31(9):209-214.
DENG Shuhui, SHI Zhengxiang, LI Baoming. CFD simulation of temperature and humidity distribution in low profile cross ventilated dairy cattle barn[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31

- (9): 209-214.
- [19] 王 威, 杨小凤, 庄春龙. 通风强度对温湿度分布和壁面结露的影响[J]. 后勤工程学院学报, 2014, 30(6): 55-59.
WANG Wei, YANG Xiaofeng, ZHUANG Chunlong. Effects of ventilation on distribution of temperature, humidity and surface condensation on walls[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2014, 30(6): 55-59.
- [20] 马晓钧. 通风空调房间温湿度和污染物分布规律及其应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
MA Xiaojun. Research on the theory and application of temperature, moisture and contaminant distribution in ventilated room[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [21] 刘 晖, 张洪涛, 肖 红. 水饱和蒸汽压的 Antoine 方程常数的比较[J]. 内蒙古石油化工, 2019(13): 32-34.
LIU Hui, ZHANG Hongtao, XIAO Hong. Comparison for antoine equation constants of water-saturated vapor pressure[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2019(13): 32-34.
- [22] 张 浩, 张博博. 热电冷凝除湿技术的应用研究[J]. 制冷与空调, 2017, 17(1): 12-15.
ZHANG Hao, ZHANG Bobo. Application research of thermoelectric cooling dehumidification[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2017, 17(1): 12-15.

王流火(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压开关类设备的相关研究。