

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.04.026

覆冰实验均匀风场形成方法研究

孙利朋¹, 蒋正龙², 赵 纯², 胡建平², 吴 伟², 王博闻²

(1. 国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007; 2. 国网湖南省电力公司防灾减灾中心,
国网输变电设备防冰减灾技术实验室, 长沙 410000)

摘要: 风对雨雪冰冻气候下输变电设备表面覆冰有重要的影响,是研究设备覆冰机理、导线融冰的重要参数之一,但在人工环境下获得均匀稳定风的难度很大。文中介绍了具有均匀风功能的人工覆冰气候室的基本情况,基于自由射流理论,通过仿真计算、冰风洞缩比试验和人工覆冰气候室实际测试,试验表明:采用吹风方式比吹—吸风方式和吸风方式在风机功率和风的均匀性方面更有优势;通过优化设计风洞结构,可以在人工覆冰气候室内实现稳定的均匀风;均匀风对人工气候室内温度分布影响较小。该研究可以为研究风对输变电设备表面覆冰的影响及覆冰增长规律提供技术支持。

关键词: 风洞; 均匀风; 人工气候室; 自由射流理论; 覆冰

Study on Uniform Wind Field Formation Method in Icing Experiments

SUN Lipeng¹, JIANG Zhenglong², ZHAO Chun², HU Jianping², WU Wei², WANG Bowen²

(1. Hunan Electric Power Corporation Research Institute of State Grid, Changsha 410007, China; 2. Hunan Electric Power Corporation Disaster Prevention and Reduction Center, State Grid Key Laboratory of Power Transmission and Distribution Equipment Anti-icing & Reducing-disaster Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: Wind has an important influence on surface icing of power transmission equipment under the freezing rain and snow weather, and which is one of the important parameters for researching icing mechanism of equipment and ice-melting of conductors, but it is very difficult to obtain uniform and stable wind in the artificial environment. This paper introduces the basic situation of artificial icing climate chamber with uniform wind. Based on the theory of free jet, it is proved through simulation calculation, wind tunnel scaling test and actual test in the artificial icing climate chamber that: Blowing mode is better than blowing-absorbing mode and absorbing mode in fan power and uniformity of wind. Also, uniform and stability wind can be achieved in the artificial icing climate chamber through the optimization design of tunnel structure. Uniform wind has little effect on the temperature distribution in the artificial climate chamber. This research can provide technical support for the effects of wind on the surface of transmission equipment icing and ice accretion rules.

Key words: wind tunnel; uniform wind; artificial climate chamber; free jet theory; ice accretion

0 引言

输变电设备覆冰是输电工程中十分严重的自然灾害之一,覆冰事故极大地危害着电网安全运行^[1-7]。为研究覆冰灾害,目前部分国家建立了输变电设备

气候人工模拟室,并进行了大量试验、获得了大量的人工覆冰数据^[7-10],加快了覆冰研究的进程,为覆冰灾害研究和电网防冰减灾提供了技术支持。自然雨雪冰冻环境条件下输变电设备表面覆冰与环境风速有关^[11-13],国内外的部分实验室在建设时曾

收稿日期:2018-08-11; 修回日期:2018-10-15

基金项目:国家电网公司科技部项目SGKJ[2007]871)。

Project Supported by Science and Technology Department of SGCC (SGKJ[2007]871).

考虑过安装模拟风试验装置,但在气候人工模拟室内的被试设备表面形成均匀风需要设计并建设风洞,气候人工模拟室的体积会大幅增加,考虑到成本和建设难度问题,目前国内外的类似实验室均没有建设风洞^[9,14],因此,目前的人工覆冰是在无风的条件下进行的,形成的覆冰形态与自然覆冰有一定的差异^[15~22],这也是人工覆冰和自然覆冰之间的主要区别之一,同时风对覆冰增长机理的研究还处在理论研究阶段,没有进行有效的试验验证和量化研究。

文中基于自由射流理论,结合气候人工模拟室建立了冰风洞仿真模型,仿真分析了吹风、吸风和吹一吸风3种模式下的试验区风速分布情况,通过缩比搭建了气候人工模拟室缩比风洞并进行模拟测试,对仿真结果的吹风方式进行了的实试验证,同时通过风机参数选择和风管内部结构设计方式进行了研究和试验论证,根据研究成果建成了带冰风洞的气候人工模拟室,对室内试验区风速和温度的大小、均匀性和稳定性进行了实测,性能满足人工覆冰试验要求,具备开展风对覆冰、融冰研究的能力。

1 具有冰风洞的气候人工模拟室结构设计

根据目前对自然覆冰的研究来看,自然覆冰的风速一般不会很大^[10~19],覆冰易增长的主要风速分布区间为3~7 m/s,过小的风速影响极小,过大的风

速反而不易引起设备表面覆冰,因此在气候人工模拟室内建立低速冰风洞,其风速主要区间应是3~7 m/s。

国家电网输变电设备防冰减灾技术实验室设计的具有低速冰风洞气候人工模拟室净空尺寸为17.5 m(长)×9.5 m(宽)×8.6 m(高),见图1。墙面为钢筋混凝土结构,采用内保温方式,六面保温层厚度均为15 mm,在室内由试验区、冰风洞两部分组成,风在冰风洞内循环流动,循环方式为:风从风机吹出,经风管中的导流板和阻尼网转向并均匀处理后,进入设备试验区,再经回风口转向后回到冰风洞的热交换区,通过热交换区再回到风机,实现风的循环。制冷设备的热交换器安置在冰风洞内进行热量交换,风机运行中产生的热能、风循环时冰风洞内风阻产生的热量通过热交换器带走,保持室内温度均匀稳定。其中设备试验区的净空尺寸是4.5 m(长)×4.5 m(宽)×6.5 m(高),设备试验区上部设置1.5 m高静压层,并在该层内安装满足3 t重物悬挂的电动悬挂装置,可以满足220 kV及以下电压等级及更高电压等级短样被试品的试验需求,最大风速超过10 m/s。实现了在悬式绝缘子的试验区(离地高度3.5 m,以试验区中心轴为中心的1.5 m(长)×1.5 m(宽)×2.5 m(高)区域的柱体)形成在3~7 m/s内可自由调节,且稳定度为±0.5 m/s,均匀度为±0.5 m/s的均匀风速场,风口距离绝缘子悬挂点不小于1.5 m。

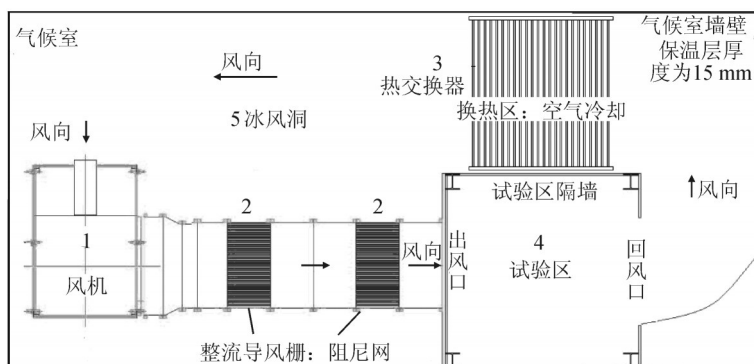


图1 带冰风洞气候人工模拟室平面布置图

Fig. 1 Plane distribution of artificial icing climate laboratory with icing wind tunnel

2 冰风洞的数值仿真计算

2.1 模型的原理

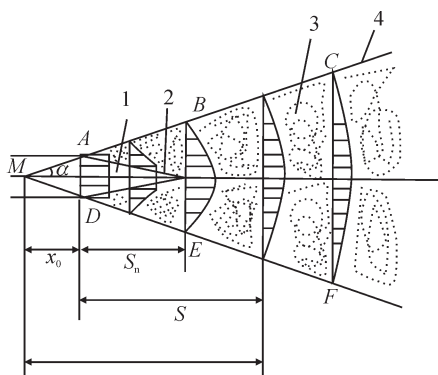
根据自由射流理论,空气从喷口处射流出后,会形成射流核心区和混合区,核心区内流体流动速度与出口速度基本一致,但随着射流距离的增大,核心区逐渐收缩,直至完全消失,而混合区则是收到包围在核心区外面的一部分流体与外界流体作用,导致速度降低,而形成的一个区域,该区域随射流距离的增大而呈扩大趋势,且速度呈递减趋势,

直至与外界空气速度基本相等。因此为保证试验区的风速均匀稳定,必须使试验区处于自由射流的核心区。射流分布方式见图2。

2.2 模型建立

2.2.1 模型的建立方法

该风洞设计的最大风速是10 m/s,模型的计算按最大风速来核实。为了获得有效、经济的实验方案,分别针对吹风、吸风以及吹风—吸风3种典型的方案进行数值模拟,考察其中心试验区的风速大小和均匀性。与图1中的吹风方式相比,吸风方式去



1—核心区; 2—射流边界层; 3—边界层内边界; 4—边界层外边界。

图2 射流结构分布图

Fig. 2 Jet structure distribution

掉了吹风机和风管,而在回风口处增加了一台吸风机;吹一吸风方式在回风口处增加了一台吸风机。

在模型计算中,作如下假设:

1)由于空气经过风机、阻尼网、风管后以均匀的风速进行送风,因此在数值模拟的边界条件选取时,直接将风管出风口作为速度入口,不考虑空气进入出风口前的风速变化过程,其中出风口为2.0 m(宽)×3.0 m(高)的长方形。

2)回风出口为3.5 m(宽)×6.0 m(高)的长方形,外部导流板对试验区的风速影响不大,因此在计算过程中未考虑。

2.2.2 模型的控制方程

为减少计算量,文中采用二维直角坐标进行计算。

连续性方程为

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

运动方程为

$$\begin{cases} \rho \frac{Du}{Dt} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{Dv}{Dt} = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ \rho \frac{Dw}{Dt} = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \frac{\mu}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) \end{cases} \quad (2)$$

状态方程为

$$P = \rho RT \quad (3)$$

由于模型中的风速风量较大,采用 k - ε 湍流模型。

湍动能 k 方程为

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

耗散率 ε 方程为

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k + C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (5)$$

其中

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (6)$$

式(4)-(6)中: P_k 为粘性和浮力的影响; μ_i 为湍流粘性系数, $\mu_i = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$ 。 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 和 C_{μ} 为常数^[22], $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_{\mu} = 0.09$;湍动能 k 与耗散率 ε 的湍流普朗特数分别为 $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_{\varepsilon} = 1.3$ 。

边界条件:将送风口按速度界面处理,其他边界设置为墙。

2.3 仿真计算结果及分析

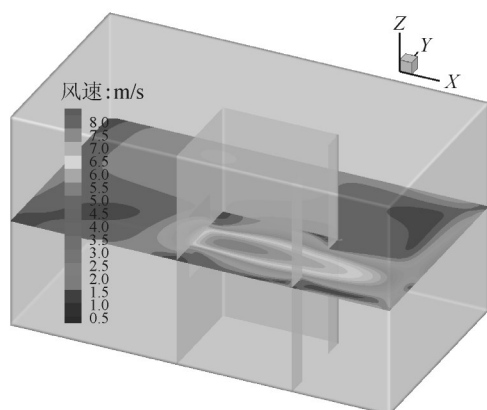
3种工况下的仿真计算结果见图3。根据仿真计算结果,在吸风方式下,中间试验区的风速很低,如果要在试验区达到设计风速要求,则要求吸风机提供很大的风速,相应的功率和能耗大,给制冷系

统和室内温度均匀性带来不良影响,很不经济,因此吸风方式是较差的一种实现方式。

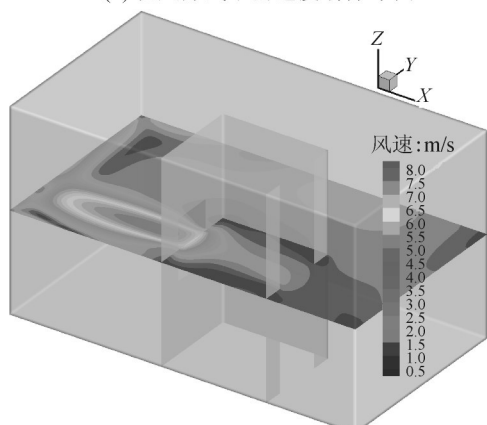
吹风和吹一吸风方式下的风速等值线见图4。吹风方式和吹一吸风方式在试验区内均能达到设计风速的要求,且在试验区内吹风方式与吹一吸风形式的风速分布基本相近,其中,吹一吸风形式对于流场的均匀性相比吹风形式是有一定程度的改善,但是改善的并不是中心区域的流场而是中心区域外的流场,对试验区风速的改善效果并不明显,其经济性相对较差。因此,综合仿真计算的结果来看,应采用吹风的方式。

3 风速均匀性缩比试验验证

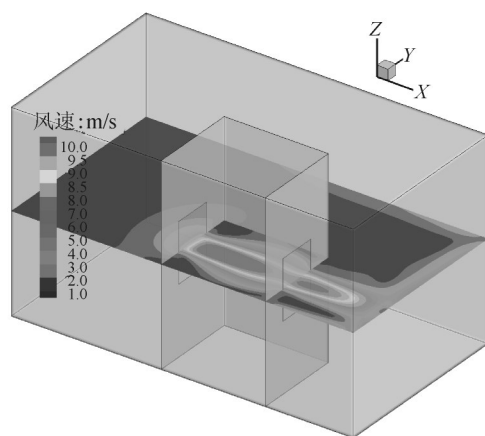
通过仿真计算来看,吹风方式下的风速均匀性较好,经济实用,为进一步验证吹风方式的可行性,并对风机选型和风洞内部结构设计进行试验验证,搭建了风洞的缩比试验平台,在风洞的高度和宽度进行了1:3的缩比,长度保持不变,布置图见图5。选用型号为RDK8.3A的离心风机,风量为30 000 m³/h,全压为978.6 Pa,功率为15 kW。风速测量采用了型号为WD4110的皮托管式风速传感器,量程为0~30 m/s,测量精度为0.2%。在风洞中设置单层和双层阻尼网进行对比试验。



(a) 吹风方式下的速度场分布图



(b) 吸风方式下的速度场分布图

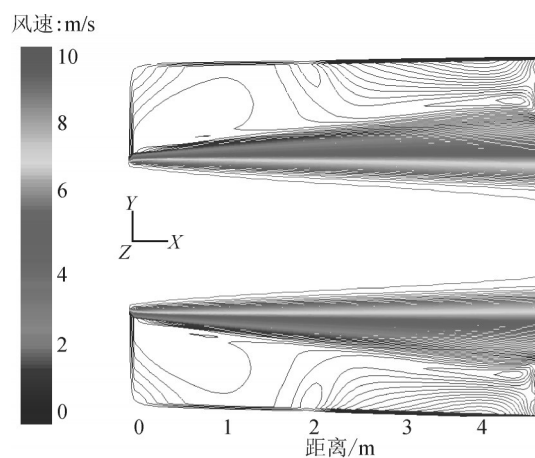


(c) 吹—吸风方式下的速度场分布图

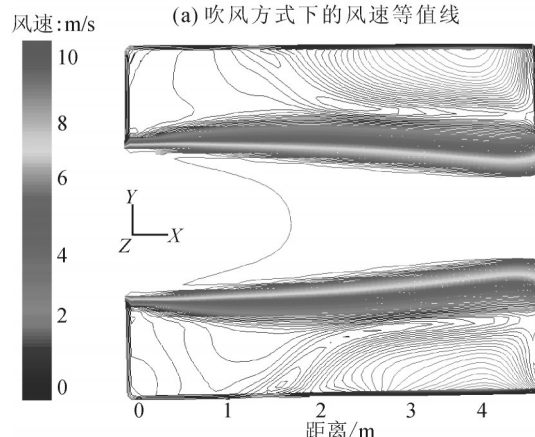
图3 各种工况下的速度场分布图
Fig. 3 Velocity field distribution diagram under different modes

在设备试验区的出风口处,距出风口0、1、2、3 m的中心轴线处分别安装了4个风速传感器,每间隔30 s采集一次数据,在3m/s基准风速下单层阻尼网和双层阻尼网各测量点的风速见图6-9。

对比图6-9可知:①在同一测量点,双层阻尼网与单层阻尼网的平均风速差异小,但双层阻尼网的稳定性好;②7 min后试验区风速区域稳定,双层阻尼网风速波动幅度小于0.4 m/s;③在同一时间点,距离风口不同距离点的风速差异小,试验区风向方向风速衰减减小,对直径不大于0.5 m的绝缘子,可以



(a) 吹风方式下的风速等值线



(b) 吹—吸风方式下的速度等值线

图4 两种方式下的风速等值线

Fig. 4 The speed isolines under two modes

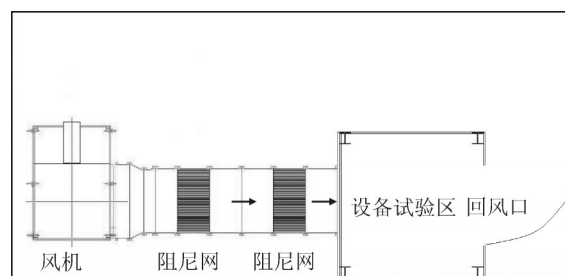


图5 缩比试验的设备布置图

Fig. 5 Wind tunnel distribution of scaling test

认为处在风向风速一致的风场中。缩比试验实测结果与仿真结果基本是一致,可以满足人工覆冰试验区内风速均匀性的要求。

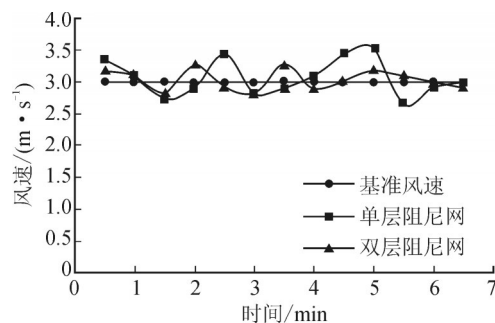


图6 出风口处风速测量

Fig. 6 Outlet wind speed test

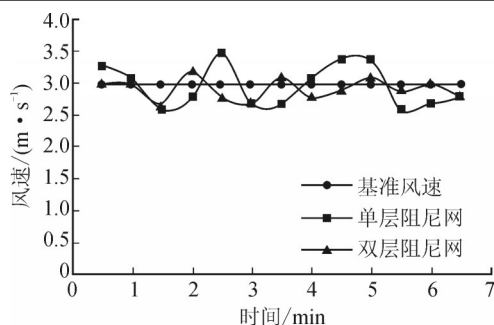


图7 距出风口1 m处风速测量

Fig. 7 Wind speed test away from outlet 1 m

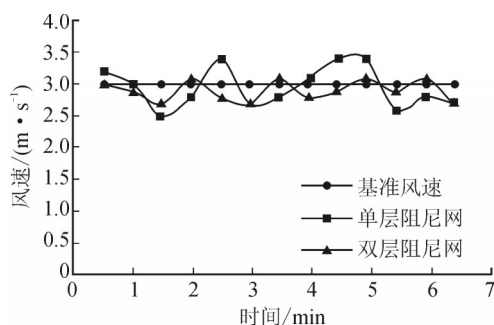


图8 距离出风口2 m处风速测量

Fig. 8 Wind speed test away from outlet 2 m

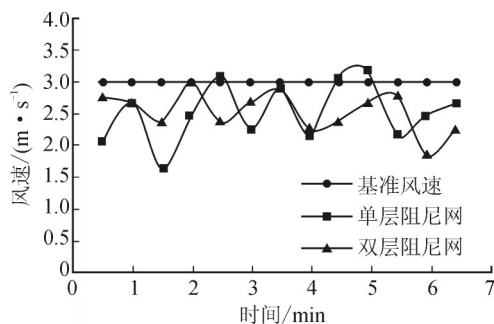


图9 距出风口3 m处风速测量

Fig. 9 Wind speed test away from outlet 3 m

4 气候人工模拟室风速测试及分析

根据仿真和缩比试验建设了带冰风洞的气候人工模拟室,其布置图如图1所示,实测了试验区的风速均匀性,选取风速为7 m/s时实测风速变化情况,见图10-13。试验区风向方向风速变化小,当风速基本稳定后,对直径为0.5 m的被试品,风向方向误差小于0.5 m/s。

在绝缘子悬挂处前(离风口2.0 m处),与风向垂直截面绝缘子悬挂上下、左右选取5个点安装风速测试仪,见图14。启动风机输出风速到一个定值,3、6 min时各测点分速数据见表1。

在试品同一风向截面的不同位置,风速差异小,6 min后风速标准差仅为0.10 m/s。

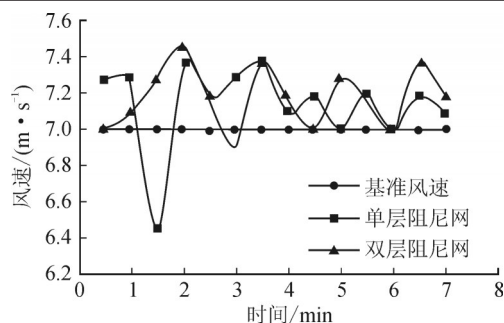


图10 出风口处风速测量

Fig. 10 Outlet wind speed test

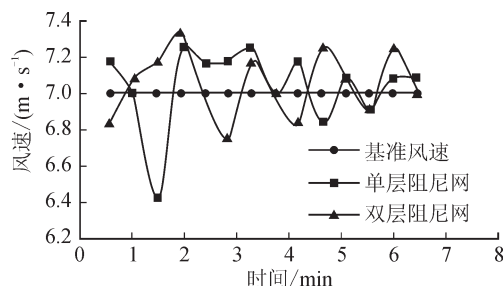


图11 距出风口1 m处风速测量

Fig. 11 Wind speed test away from outlet 1 m

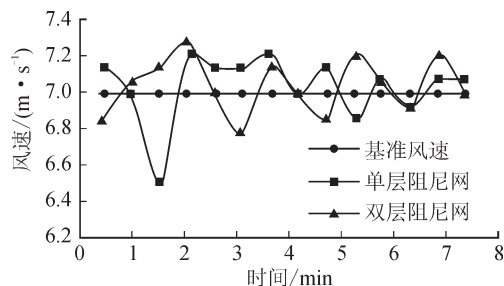


图12 距离出风口2 m处风速测量

Fig. 12 Wind speed test away from outlet 2 m

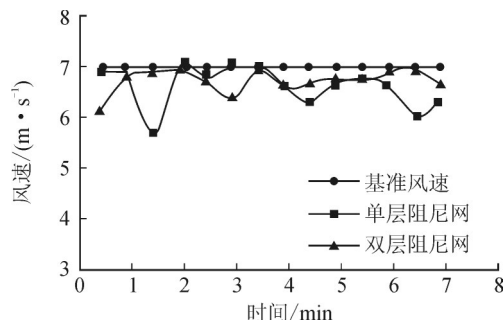


图13 距出风口3 m处风速测量

Fig. 13 Wind speed test away from outlet 3 m

5 试验区温度变化

在无均匀风覆冰试验时,为保证试验区内的温度分布更加均匀,降温制冷方式采用上送下回的方式,在试验区顶部设置风阀,试验时,将风阀打开,制冷风机产生的冷风从顶部注入试验区,从下部回风口汇入热交换区冷却。采用Fluent对试验区温度进行了仿真计算,仿真模型见图15。设

表1 绝缘子悬挂处截面风速测试数据

Table 1 Wind speed test data at the cross section of

insulator suspension		$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
测点	3 min时	6 min时
1	4.18	3.96
2	4.34	4.02
3	3.39	3.77
4	3.95	3.93
5	3.61	4.03
平均值	3.89	3.94
标准差	0.35	0.10

定边界条件为:外部环境温度为35℃,从上到下运动的冷风速度为1.0 m/s。其他设备参数设置如下:悬式绝缘子长2.2 m、伞径300 mm;施加电压为130 kV;绝缘子表面均匀发热,热源估算为440 W;冰风洞内用于热交换设备为3台HLD-150/1140型制冷风机,单台制冷功率为150 kW,均安装在试验区外部。当制冷机组将室内温度降低到-15℃时,仿真结果见图16。室内温度稳定均匀,绝缘子表面温度略高。

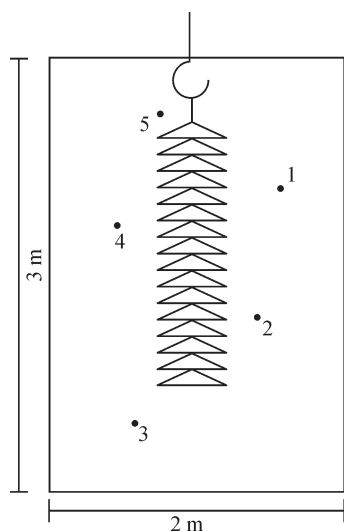


图14 测点位置分布图

Fig. 14 Distribution of wind speed test

在有均匀风覆冰试验时,将试验区顶部风阀关闭,制冷风机产生的冷风不是直接进入试验区内,而是直接进入冰风洞内的离心风机,依靠离心风机来实现气流的循环,从而使制冷风机的风不会对试验区内风的均匀性和稳定性造成干扰。

为进一步分析有风和无风条件下试验区内温度的分布情况,文中对无风和3 m/s风速下的温度分布情况进行了实测,数据见表2,有风比无风条件下的温度分布情况略好。

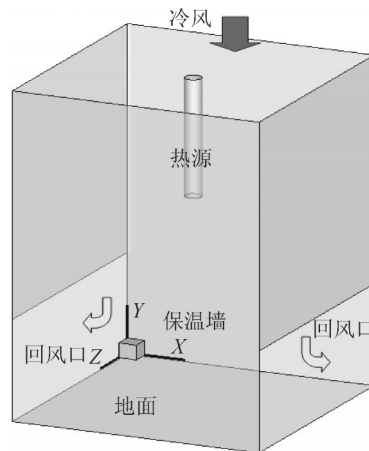


图15 试验区温度分布仿真模型

Fig. 15 The simulation model of temperature distribution in the test area

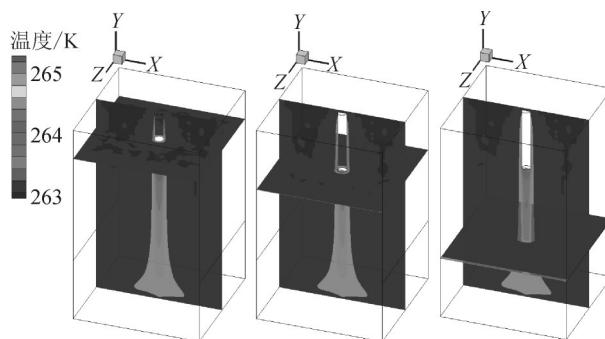


图16 试验区温度分布图

Fig. 16 Temperature field distribution of the test area

表2 试验区温度稳定性测试数据

Table 2 Temperature stability test data of the test area

设定温度/℃	时间/min	无风时温度/℃	有风时温度/℃
-2	0	-1.85	-1.90
	30	-1.93	-1.94
	60	-2.10	-2.10
	90	-1.88	-1.92
-10	0	-9.92	-9.95
	30	-10.15	-10.10
	60	-9.88	-9.90
	90	-10.05	-10.0
-15	0	-14.85	-14.88
	30	-15.15	-15.12
	60	-15.03	-15.04
	90	-14.92	-14.93
-20	0	-19.95	-19.95
	30	-20.00	-20.02
	60	-19.87	-19.90
	90	-20.20	-20.11

6 风对悬式绝缘子覆冰的影响

对 220 kV 复合绝缘子串有风状态下覆雨淞见图 17。风速为 3 m/s, 气候室内温度为 $-2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 覆冰时间为 4 h, 形态为雨淞, 迎风面和背风面伞裙均桥接, 绝缘子迎风面上平均冰厚为 75 mm, 背风面为 15 mm, 迎风面上冰厚远大于背风面, 4 h 覆冰厚度相差 5 倍, 与处在小沙江自然覆冰场试验数据中绝缘子覆冰状况相似^[23]。

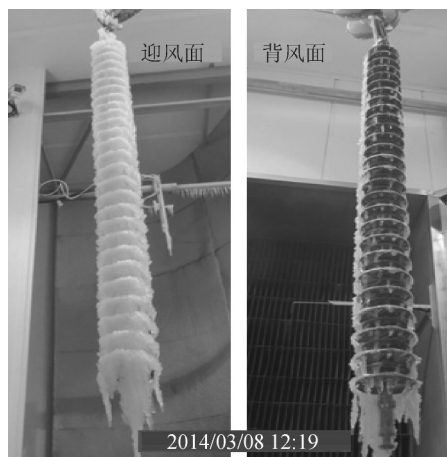


图 17 迎风面和背风面覆冰差异

Fig. 17 Insulator icing differences between windward and leeward surface

7 结论

1) 吹风方式比吹—吸风方式和吸风方式在风机功率和风的均匀性方面更有优势。

2) 通过优化设计风洞结构, 在风洞中增加阻尼网数量, 可以提高风速的稳定性, 且采用双层阻尼网, 可以满足试验区内的风速均匀性和稳定性的要求。

3) 均匀风对人工气候室内温度分布影响较小。

4) 在具有均匀风的人工覆冰气候室内进行覆冰试验, 可以获得与自然界中形态相近的覆冰。

参考文献:

- [1] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
JIANG Xingliang, SU Lichun, SUN Caixin. Pollution and ice-coated insulation in power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [2] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
JIANG Xingliang, YI Hui. Ice coating and protection of transmission lines[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

- [3] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
SUN Caixin, SIMA Wenxia, SU Lichun. Atmospheric environment and electrical external insulation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [4] 蒋正龙, 陆佳政, 雷红才, 等. 湖南 2008 年冰灾引起的倒塔原因分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2468-2474.
JIANG Zhenglong, LU Jiazheng, LEI Hongcai, et al. Analysis of the causes of tower collapses in hunan during the 2008 ice storm[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2468-2474.
- [5] 陆佳政, 蒋正龙, 雷红才, 等. 湖南电网 2008 年冰灾事故分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(11): 16-19.
LU Jiazheng, JIANG Zhenglong, LEI Hongcai, et al. Analysis of Hunan power grid ice disaster accident in 2008[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 16-19.
- [6] 张文亮, 于永清, 宿志一, 等. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调查分析[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 1-5.
ZHANG Wenliang, YU Yonhqing, SU Zhiyi, et al. Investigation and analysis of icing and snowing disaster happened in Hunan power grid in 2008[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 1-5.
- [7] MEGHNEFI F, VOLAT C, FARZANECH M. Temporal and frequency analysis of the leakage current of a station post insulator during ice accretion[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1381-1389.
- [8] BERLIJN S M, GUTMAN I, HALSAN K A, et al. Laboratory tests and web based surveillance to determine the ice and snow performance of insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1373-1380.
- [9] HU J L, SUN C X, JIANG X L, et al. Flashover performance of pre-contaminated and ice-covered composite insulators to be used in 1 000 kV UHV AC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1347-1356.
- [10] 孙才新, 舒立春, 蒋兴良, 等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 115-120.
SUN Caixin, SHU Lichun, JIANG Xingliang, et al. AC/DC flashover performance and its voltage correction of UHV insulators in high altitude and icing and pollution environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 115-120.
- [11] 黄新波, 欧阳丽莎. 输电线路覆冰关键影响因素分析[J]. 高电压技术, 2007, 37(7): 1677-1682.
HUANG Xinbo, OUYANG Lisha. Analysis on key influence factor of transmission line icing[J]. High Voltage Engineering, 2007, 37(7): 1677-1682.
- [12] 黄新波, 张冠军. 线路覆冰与局部气象因素的关系[J]. 高

- 压电器, 2008, 44(4): 289-294.
- HUANG Xinbo, ZHANG Guanjin. Relation of transmission line icing and local meteorology[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 289-294.
- [13] 张志劲, 蒋兴良, 胡建林, 等. 环境参数对绝缘子表面覆冰增长的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2418-2423.
- ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, HU Jianlin, et al. Influence of environment parameters on icing accretion on the surface of insulator[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2418-2423.
- [14] 姚涛, 胡毅, 邬雄, 等. 超特高压输变电设备的覆冰试验技术[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 574-578.
- YAO Tao, HU Yi, WU Xiong, et al. Icing test techniques of EHV and UHV transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 574-578.
- [15] FARZANEH M, ZHANG J, SAKAKIBARA T, et al. Effects of high altitude and atmospheric icing on the performance of outdoor insulators[C]//Transmission & Distribution Conference and Exposition. [S.l.]: IEEE/PES, 2006: 1-6.
- [16] FIKKE S. Modern meteorology and atmospheric icing[C]//11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures(IWAIS 2005). Montreal, Canada: [s.n.], 2005: 101-110.
- [17] ZHANG Z J, JIANG X L, HUANG H Z. The method and implementation of icing and de-icing at Xuefeng mountain natural icing station[C]//17th IWAIS. Chongqing, China: Chongqing University, 2011: 666-675.
- [18] IDE R F. Comparison of liquid water content measurement techniques in an icing wind tunnel[J]. NAsA/TM, 1999-209643, 1999(ARL-TR-2134): 1-25.
- [19] DRAGE M A, HAUGE G. Atmospheric icing in a coastal mountainous terrain Measurements and numerical simulations, a case study[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(2): 150-161.
- [20] 王少华. 基于 Fluent 的覆冰导线气动特性分析[J]. 高压电器, 2012, 48(1): 64-69.
- WANG Shaohua. Analysis of aerodynamic characteristics of iced conductor based on fluent[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(1): 64-69.
- [21] 蒋兴良, 杜珍, 王浩宇. 重庆地区输电线路导线覆冰特性[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3065-3069.
- JIANG Xingliang, DU Zhen, WANG Haoyu. Icing features of wire in Chongqing region[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3065-3069.
- [22] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟, 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 23-28.
- HUANG Xinbo, LIU Jiabing, CAI Wei, et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in China and foreign countries[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 23-28.
- [23] 陆佳政, 胡建平, 方针, 等. 雪峰山脉小沙江自然灾害试验场覆冰与融冰试验[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 388-394.
- LU Jiazheng, HU Jianping, FANG Zhen, et al. Icing accretion and ice-melting test at Xiaoshajiang natural disasters test site in Xuefeng mountain[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 388-394.

孙利朋(1982—), 男, 高工, 主要从事高电压绝缘技术研究与生产工作。

蒋正龙(1968—), 男, 高工, 主要从事高电压技术及输变电设备防冰减灾技术的研究和生产工作。