

# Calculation of Temperature Rise of Outdoor Gas Insulated Buses Considering the Influence of Sunshine and Wind Speed

Lei Lu<sup>1</sup>, Bo Jin<sup>1</sup>, Yuanchao Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Grid Hubei Power Transmission and Distribution Engineering Co. Ltd., Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Maintenance Company of State Grid Hubei Electric Power Co. Ltd., Wuhan Hubei

Email: 1535297936@qq.com

Received: Sep. 9<sup>th</sup>, 2019; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2019; published: Sep. 29<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The running state of outdoor gas insulated buses is greatly affected by environmental factors, so the calculation model used for indoor equipment cannot be well applied. In this paper, a three-dimensional eddy current field analysis model is established for outdoor gas insulated buses to calculate the power loss of each part of the bus, and it is taken as a finite element analysis model for thermal load input fluid field and temperature field, and solar radiation model and wind speed model are added to calculate the temperature field distribution of the bus. The results show that sunshine and wind speed affect the temperature field distribution of the shell, which should be taken into account when analyzing the temperature field of the bus. The solar radiation model and wind speed model used in this paper have practical significance to calculate the temperature rise of outdoor equipment.

## Keywords

Gas Insulated Buses, Calculation of Temperature Rise, Solar Radiation, Wind Speed

---

# 计及日照与风速影响的户外气体绝缘母线温升计算

陆磊<sup>1</sup>, 金博<sup>1</sup>, 刘远超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>国家电网湖北送变电工程有限公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>国家电网湖北省电力有限公司检修公司, 湖北 武汉

Email: 1535297936@qq.com

## 摘要

户外安装的气体绝缘母线运行状态因受环境因素的影响较大，已有的户内设备计算模型并不能较好地适用于它。本文针对户外气体绝缘母线，建立气体绝缘母线三维涡流场分析模型计算母线各部分原件的功率损耗，并将其作为热载荷输入流体场以及温度场有限元分析模型，并加入太阳辐射模型和风速模型，计算出了母线温度场分布。结果表明，日照和风速影响着外壳的温度场分布，在进行母线温度场分析时应予以考虑。本文运用的太阳辐射模型和风速模型对于户外设备温升计算具有实际意义。

## 关键词

气体绝缘母线，温升计算，太阳辐射，风速

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

气体绝缘母线(GIB, Gas Insulated Bus)是气体绝缘变电站(GIS, Gas Insulated Substation)的重要组成部分，GIS 因其可靠性高、占地面积小、维护工作量小等优点得到了广泛应用[1]。运行经验表明，在 GIS 各部件中，气体绝缘母线发生故障的概率约 15%，其中又以过热性故障为多[2]。对气体绝缘母线进行温升计算，进而可以分析母线是否存在过热性故障，对生产实际中及早发现故障隐患具有重要意义。

目前相关学者针对气体绝缘母线的温升计算进行了大量的研究工作。学者邹明翰、缪芸[3]比较了流体单组分有限元法、流体多组分有限元法、传热学解析公式法三种方法的计算结果，指出多组分有限元法计算的精度最高。学者谢海峰、潘纪良等[4]对 126 kv 三相共箱式气体绝缘母线进行了涡流场分析。学者孙国霞等[5]在考虑了接触电阻以及气体热物性参数随温度变化特性的基础上，运用多组分有限元法建立了多物理场耦合计算模型。学者李洪涛[6]用三维涡流-流体-热场数值计算模型对母线过热故障机理进行了研究。上述研究为气体绝缘母线的温升计算提供了实用的方法，但是对于户外型气体绝缘母线而言，并未考虑太阳辐射及风速等因素的影响。

本文在气体绝缘母线三维涡流-流体-温度场计算模型的基础上，运用太阳辐射模型和速度入口边界条件来模拟日照和风速对户外气体绝缘母线内外换热过程的影响，对户外气体绝缘母线进行了温升计算。

## 2. 户外气体绝缘母线物理模型

本论文研究的户外三相共箱式气体绝缘母线主要由三相导体、接头、绝缘盆子以及外壳等部分组成，气体绝缘母线结构示意图如图 1、图 2 所示，母线的内部使用 SF<sub>6</sub> 作为绝缘气体，本文采用串联在导体之间的电阻来等效母线接头。用于三维涡流场分析的户外气体绝缘母线基本几何参数如表 1 所示。

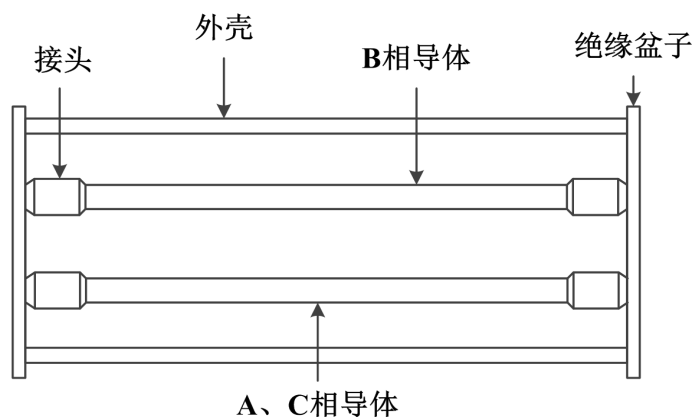


Figure 1. Schematic diagram of gas insulated bus

图 1. 气体绝缘母线结构示意图

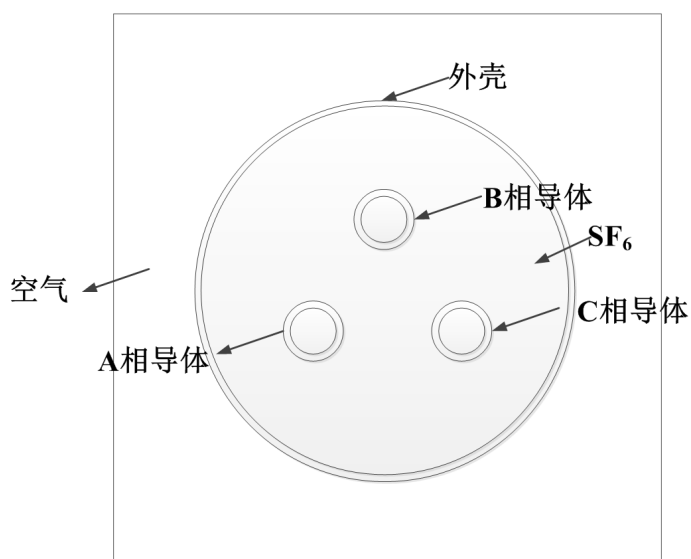


Figure 2. Section diagram of gas insulated bus

图 2. 气体绝缘母线截面图

Table 1. Basic geometric parameters of gas insulated bus

表 1. 气体绝缘母线基本几何参数

参数	导电杆	外壳	接头	绝缘盆子
长度/(mm)	1350	1500	80	—
内径/(mm)	65	492	41	—
外径/(mm)	85	508	88.4	625
厚度/(mm)	—	—	4	50

对户外气体绝缘母线三维正弦涡流场计算时进行如下假设，即：

- 1) 母线内部电磁场属于似稳场，进行计算时不考虑位移电流的影响；
- 2) 母线三相导体内部电流为工频正弦电流，相位依次滞后  $120^\circ$ ，频率为 50 Hz；
- 3) 模型中三相导体、接头、外壳的相对磁导率为常数；
- 4) 导体、接头以及外壳电导率均随温度的变化而变化。

### 3. 三维涡流-流体-温度场建模

#### 3.1. 涡流场控制方程与边界条件

本课题研究的对象属于工频似稳交变磁场，满足似稳条件，与传导电流相比，位移电流可以忽略不计。气体绝缘母线三维涡流场控制方程[7] [8] [9]可描述如下：

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

其中， $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量， $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量， $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量， $\mathbf{D}$ 为电位移矢量， $\mathbf{J}$ 为传导电流密度， $\rho$ 为电荷体密度， $\varepsilon$ 是介电常数， $\mu$ 是磁导率， $\sigma$ 是电导率。

对于稳态电磁场分析，为了使矢量磁位 $\mathbf{A}$ 与磁感应强度 $\mathbf{B}$ 之间的对应关系成立，令：

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (9)$$

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (10)$$

户外气体绝缘母线三维涡流场求解区域 $\Omega$ 可分为涡流区 $\Omega_1$ (包括导体与外壳)与非涡流区 $\Omega_2$ (包括空气与 $\text{SF}_6$ 气体)，如图3所示。

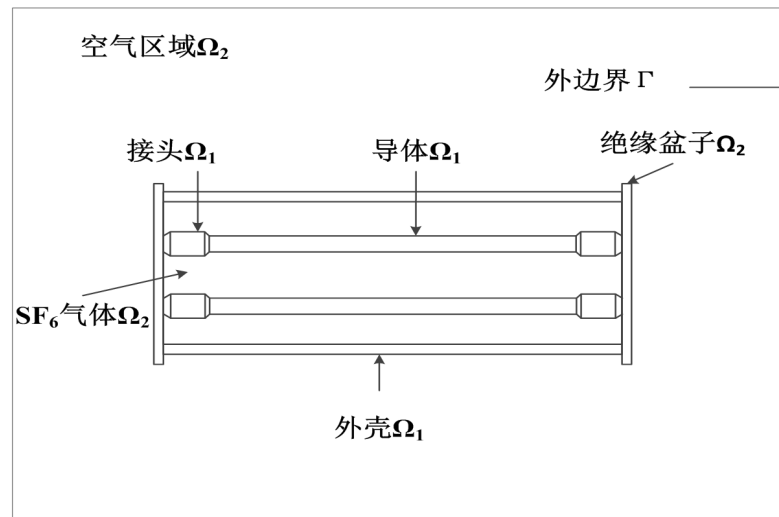


Figure 3. Schematic diagram of solution domain of three-dimensional eddy current field for gas insulated bus

图3. 气体绝缘母线三维涡流场求解域示意图

边界条件：

$$A|_{\Gamma} = 0 \quad (11)$$

### 3.2. 三维流体-温度场耦合分析

#### 3.2.1. 流体场控制方程

假设所研究的流体为不可压缩牛顿流体，有如下控制方程[10] [11] [12]:  
连续性方程(质量守恒方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} V_x) = \nabla \cdot (\mu \nabla V_x) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x \quad (13)$$

$$\frac{\partial(\rho V_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} V_y) = \nabla \cdot (\mu \nabla V_y) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y \quad (14)$$

$$\frac{\partial(\rho V_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} V_z) = \nabla \cdot (\mu \nabla V_z) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z \quad (15)$$

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x C_p T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y C_p T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z C_p T) \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v \end{aligned} \quad (16)$$

式中,  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  分别为速度矢量  $\mathbf{V}$  在  $x$  轴、 $y$  轴以及  $z$  轴上的分量,  $\mu$  为动力粘性系数,  $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$  分别为体积力在  $x$  轴、 $y$  轴以及  $z$  轴上的分量,  $C_p$  为比热容,  $\lambda$  为热导率。

#### 3.2.2. 温度场控制方程

当不同物体之间或单一物体内部存在温差时, 热量以热传导、对流以及辐射三种形式从高温部分转移至低温部分[13]。

热传导形式:

$$q + \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (17)$$

对流换热形式:

$$q = h(T_w - T_f) \quad (18)$$

辐射换热形式:

$$q = \sigma \varepsilon F_{ij} (T_i^4 - T_j^4) \quad (19)$$

式中,  $q$  为热流密度,  $h$  为对流换热系数,  $T_w$  为固体表面温度,  $T_f$  为流体的特征温度,  $\sigma$  表示斯忒藩-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)常数, 通常取为  $5.67 \times 10^{-8}$ ;  $\varepsilon$  为表面发射率, 即通常所说的黑度;  $T_i$  与  $T_j$  分别辐射面  $i$  与  $j$  的温度;  $F_{ij}$  为面  $i$  到面  $j$  的形状系数, 由其表面形状决定。

户外气体绝缘母线换热过程分如下几个阶段, 即:

- 1) 母线导体内部焦耳热损耗以热传导方式传递至导体表面;
- 2) 热量由导体表面通过自然对流的方式传递至  $\text{SF}_6$  气体;

- 3) 热量分别由 SF<sub>6</sub> 气体与导体表面以自然对流与有限空间面-面辐射的方式进入母线外壳内表面;
- 4) 母线整体发热量由外壳内表面通过热传导传递至外壳外表面, 与此同时太阳辐射热量通过日照的方式传递至外壳外表面;
- 5) 最后, 外壳外表面全部热量以由于风速引起的强制对流与大空间辐射的方式耗散至周围空气中。

## 4. 太阳辐射模型与风速模型

### 4.1. 太阳辐射模型

处于户外的气体绝缘母线受到日照的影响, 而日照产生的太阳辐射主要包括太阳直接辐射、太阳散射辐射和地面反射辐射三个部分[14], 计算如下:

$$I_{Di} = I_{DN} \cos i = I_0 P^m \cos i \quad (20)$$

$$I_{D\theta} = I_{DH} \frac{1 + \cos \theta}{2} = 0.5 I_0 \sinh \frac{1 - P^m}{1 - 1.4 \ln P} \cos^2 \frac{\theta}{2} \quad (21)$$

$$I_{R\theta} = R_e (I_{DN} \sinh + I_{D\theta}) \sin^2 \frac{\theta}{2} \quad (22)$$

式中  $i$  为太阳入射角,  $\theta$  为墙壁面和水平线地面之间的夹角,  $h$  为太阳高度角,  $R_e$  为地面短波反射率, 通常取为 0.2。

计算出的总辐射为:

$$I = I_{Di} + I_{D\theta} + I_{R\theta} \quad (23)$$

户外气体绝缘母线外壳表面吸收太阳辐射的多少与其表面短波辐射吸收率  $\alpha_s$  有关, 即:

$$I = \alpha_s I_s \quad (24)$$

### 4.2. 风速模型

0~12 级风力对应的风速如表 2 所示[15]。

Table 2. Wind grade  
表 2. 风力等级

风力等级	名称	对应风速(m/s)
0	无风	0.0~0.2
1	软风	0.3~1.5
2	轻风	1.6~3.3
3	微风	3.4~5.4
4	和风	5.5~7.9
5	清风	8.0~10.7
6	强风	10.8~12.8
7	劲风	13.9~17.1
8	大风	17.2~20.7
9	烈风	20.8~24.4
10	狂风	24.5~28.4
11	暴风	28.5~32.6
12	台风	≥32.6

在进行数值计算时，不能直接采用风力的概念，而应该具体细化为风速。风速会影响流体场以及对流换热系数，另外，风向也会影响气体绝缘母线的温度分布，用角度定义不同风向，如图4所示。

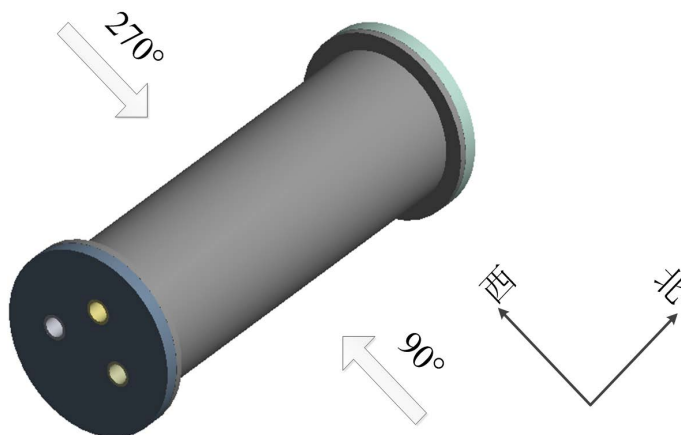


Figure 4. Wind Direction Diagram  
图4. 风向示意图

### 4.3. 边界条件

考虑太阳辐射和风速影响后的流体-温度场耦合分析边界条件如下，即：

- 1) 在母线内外流固耦合交界面指定无滑移边界条件，即流体的相对速度为0，即：

$$v_x = v_y = v_z = 0 \quad (25)$$

- 2) 在求解域外边界指定环境温度值，即第一类边界条件，该温度  $f_i(t)$  可随时间  $t$  以及位置变化以模拟实际运行母线中环境温度变化为：

$$T = f_i(t) \quad (26)$$

- 3) 在  $\text{SF}_6$  气体与三相导体、外壳交界面施加面-面辐射换热的边界条件[16]为：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon_e \sigma_s F_{ij} (T_c^4 - T_i^4) \quad (27)$$

式中， $F_{ij}$  为角系数； $T_c$  与  $T_i$  分别为导体与外壳的温度； $\sigma_s$  为斯忒藩-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)常数，取为  $5.67 \times 10^{-8}$ ， $\varepsilon_e$  为表面发射率。

- 4) 户外气体绝缘母线外壳表面受到太阳直射，因此外壳表面传热边界条件可以表述为：

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_s \quad (28)$$

- 5) 户外气体绝缘母线考虑风速影响，在求解域外边界施加风速入口边界条件，即：

$$v = v_0 \quad (29)$$

### 4.4. 计算流程

先设定母线导体及外壳的初始温度，并确定材料的物性参数，计算出涡流损耗，将其作为载荷输入到温度场中，之后再行流体-温度场直接耦合分析，得出母线各个部位的计算温度值。

母线的温升为：

$$\Delta T_1 = q_A + q_B + q_C + q_T + q_S - Q_{tc} - Q_{tr} \quad (30)$$

三相导体的温升为:

$$\Delta T_2 = q_A + q_B + q_C - Q_{cc} - Q_{cr} \quad (31)$$

式中  $q_A$ 、 $q_B$ 、 $q_C$ 、 $q_T$  分别表示 A、B、C 三相导体的功率损耗及外壳的涡流损耗;  $q_S$  为太阳辐射换热量;  $Q_{cc}$  和  $Q_{cr}$  分别表示外壳的对流换热量和辐射换热量;  $Q_{cc}$  和  $Q_{cr}$  分别表示导体的对流换热量和辐射换热量。若

$$\begin{cases} \Delta T_1/T_{01} < 3\% \\ \Delta T_2/T_{02} < 3\% \end{cases} \quad (32)$$

则终止计算, 认为此时达到热平衡, 初始温度设定值即为所求, 否则, 重新设置初始温度, 重复上述计算, 直至满足式(32)。

## 5. 计算结果与分析

### 5.1. 日照对温度场的影响

假定户外气体绝缘母线环境温度为 300 K、风向为 90° 风速为 2 m/s、接触电阻为 10  $\mu\Omega$  且负荷电流为 1980 A 的情况下, 改变太阳辐射角度, 即日照时间分别为 10 点、12 点、14 点、16 点时, 对户外气体绝缘母线温度场分布进行仿真计算, 分析母线外壳与三相导体的温度场变化情况。以 10 时、14 时为例, 得到外壳的温度场分布分别如图 5 所示。

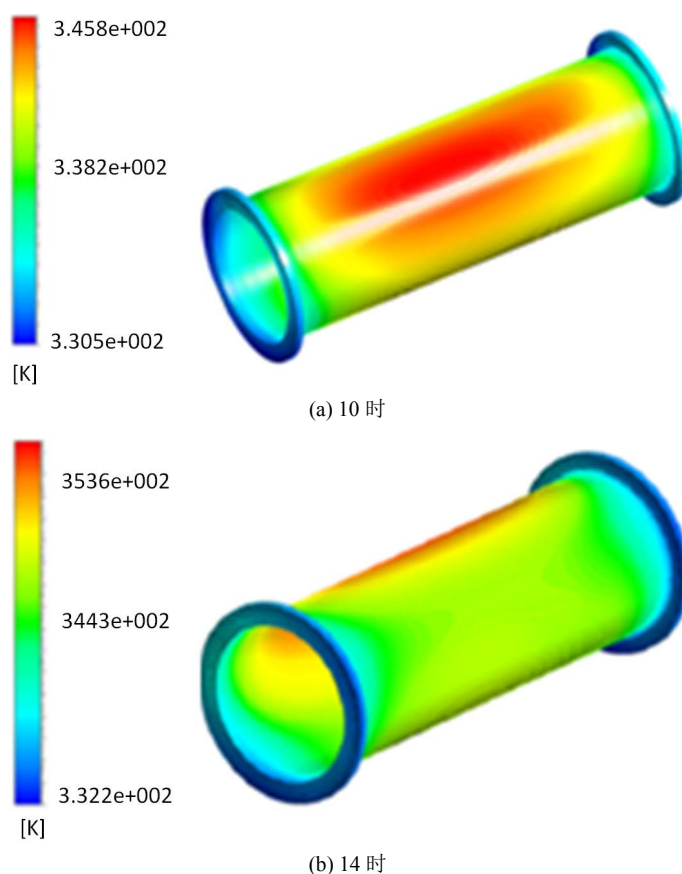


Figure 5. Distribution of shell temperature field distribution at different time  
图 5. 不同时刻外壳温度场分布

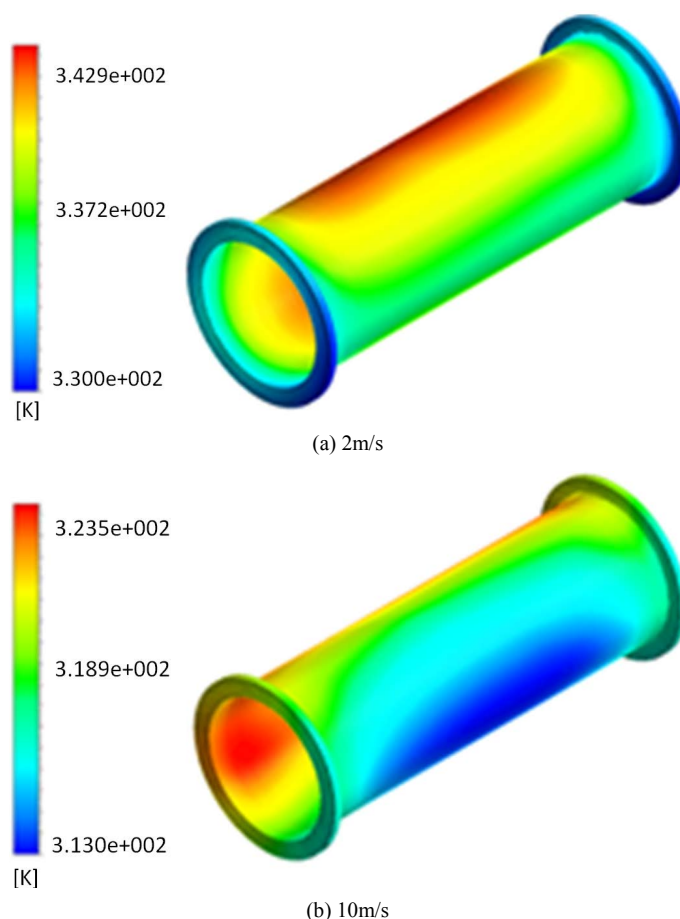


由于不同时刻太阳直射气体绝缘母线的位置不同,由式(28),不同时刻外壳表面传热边界条件不同,相应地,外壳的最热点出现在不同的位置。从图5可以看出,热点位置与太阳辐射角度变化情况一致,从10点开始,到下午14时,外壳热点位置随着太阳辐射位置逐渐向内侧移动。

不同时刻太阳高度角也不同,由式(20~23),太阳总辐射随时间而变。因此,户外气体绝缘母线各部件的温升也是有差异的。由仿真计算结果,从上午十点到下午十六点,外壳温升最小值约为45 K,最大值约为55 K,分别出现在10点和14点。这是由于传热过程需要时间,因此最大温升并未出现在正午十二点时刻,而是稍微滞后至下午十四点左右。到下午十六时以后,太阳辐射强度逐渐降低,户外气体绝缘母线温升受太阳辐射的影响也逐渐降低,直至太阳辐射强度降低为零。

## 5.2. 风速对温度场的影响

假定户外气体绝缘母线环境温度为300 K、三相导体通过负荷电流1980 A、接触电阻为 $10\ \mu\Omega$ 且太阳辐射角度为正午十二时,保持风向为 $90^\circ$ ,改变风速大小,即风速分别为2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s以及10 m/s(分别对应2级、3级、4级、5级、6级风力)时,对户外气体绝缘母线温度场进行仿真计算,以风速为2 m/s、10 m/s为例,得到母线外壳温度分布情况如图6所示。



**Figure 6.** Distribution of shell temperature field distribution with different wind speed

**图6.** 不同风速外壳温度场分布

随着风速的不断增大,式(18)中的对流换热系数也会增大,外壳表面的对流换热得到明显增强,使得

外壳的整体温度越来越低。从图6可以看出,当风速为2 m/s时,外壳温升最大值约为45 K,当风速为10 m/s时,外壳温升最大值降低为23 K。可以看出由于外壳直接受到风速影响,其温升的下降幅度随风速增加变化较大。

不同风速也使气体绝缘母线外壳的温度场分布发生了变化,由式(12~16)及式(29),风速大小影响流体的流速,进而影响着温度场分布。无风时,由于正午十二点太阳直射,热点温度出现在外壳正上方,而随着风速的增加,热点温度逐渐向背风侧移动,而且热点温度分布区域面积越来越大,根据仿真结果,当风速达到8 m/s及以上时,热点区域几乎铺满整个外壳表面,即风速越大外壳表面对流换热越强,热量传输速度越快,热点分布越分散。

## 6. 结论

本文基于有限元方法建立了气体绝缘母线三维涡流-流体-温度场分析模型,通过加入太阳辐射模型和风速模型,对户外气体绝缘母线的温升进行了研究。仿真结果表明:绝缘母线的温升分布受日照和风速影响,母线外壳热点位置与太阳辐射角度变化情况一致,外壳与三相导体整体温度与光照强度呈正相关;随风速增大,外壳整体温度降低,外壳热点区域向背风侧移动且分布越加分散。所用的修正后的计算模型为户外气体绝缘母线的温升计算提供了参考。

## 参考文献

- [1] 张施令. 220kV SF<sub>6</sub> 气体绝缘 GIS 真型试验平台设计与研制[J]. 水电能源科学, 2018, 36(5): 171-174+196.
- [2] 吴晓文. 气体绝缘母线温升计算及监测方法的研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [3] 邹明翰, 缪芸. 三相共箱式气体绝缘母线热计算方法分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(7): 169-172+177.
- [4] 谢海峰, 潘纪良, 陈湘波, 吴晓文, 王鹏. 气体绝缘母线三维涡流场有限元分析研究[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 12-16.
- [5] 孙国霞, 舒乃秋, 吴晓文, 谢志杨, 金向朝, 彭辉. 基于多物理场耦合的气体绝缘母线触头接触温升有限元计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(S2): 408-413.
- [6] 李洪涛. 气体绝缘母线接头过热性故障机理的研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- [7] Hernandez, L., Baladrón, C., Aguiar, J., et al. (2013) Short-Term Load Forecasting for Microgrids Based on Artificial Neural Networks. *Energies*, **6**, 1385-1408. <https://doi.org/10.3390/en6031385>
- [8] 贺兴容, 刘强, 刘守豹, 彭东. 基于三维涡流场计算的换流站 PLC 避雷器发热分析[J]. 电瓷避雷器, 2017(6): 156-160.
- [9] Vachirasricirikul, S. and Ngamroo, I. (2011) Robust Controller Design of Heat Pump and Plug-In Hybrid Electric Vehicle for Frequency Control in a Smart Microgrid Based on Specified-Structure Mixed H<sub>2</sub>/H<sub>∞</sub> Control Technique. *Applied Energy*, **88**, 3860-3868. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.055>
- [10] 舒圣浪. 基于有限公式法的永磁电机温度场与流体场计算研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- [11] Berg, S. and Van Wunnik, J. (2017) Shear Rate Determination from Pore-Scale Flow Fields. *Transport in Porous Media*, **117**, 229-246. <https://doi.org/10.1007/s11242-017-0830-3>
- [12] Sidorov, O.Y. and Aristova, N.A. (2017) Gas Combustion in the Heating Channel of a Coke Oven. *Coke and Chemistry*, **60**, 316-321. <https://doi.org/10.3103/S1068364X17080063>
- [13] 黄张伟. 基于流固耦合理论的涡轮增压器涡轮箱有限元分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [14] 许红军, 曹晏飞, 李彦荣, 高杰, 蒋卫杰, 邹志荣. 日光温室太阳辐射模型构建及应用[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 160-169.
- [15] 闫国臣, 李先立, 李小荷. 风力等级、风速与风压的对应关系研究[J]. 门窗, 2014(8): 56-57.
- [16] 付丽荣. 对流-辐射耦合传热模拟及其在柴油机缸内过程应用研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.