

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.03.020

# 不同环境因素下 GIL 温度场分布特性研究

乔宇娇, 唐泽华, 高鹏, 梁睿, 宋超然

(中国矿业大学电气与动力工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**目前针对气体绝缘输电线路(GIL)温度场分布的研究缺少对影响因素,尤其是管廊敷设时的通风速度、露天布置的太阳辐射温度场分布及其热特性影响的定量分析,因此文中采用多场耦合分析方法,基于 COMSOL 仿真开展 GIL 温度场分布及其影响因素研究。建立多物理场耦合计算模型,进而分析不同运行环境对 GIL 热特性的影响。结果表明:在泵风速度和日照的影响下,GIL 温度场轴对称分布特点被破坏且壳体温度极值大小和位置发生改变,不同运行环境下的 GIL 热特性存在差异。随着泵风时间与速度的增加,入口处与出口处温度差异逐渐增大,最终壳体与导体的温度趋于稳定值;GIL 壳体温度极值点随日照方向和强度的改变而改变;GIL 管廊中三相垂直布置情况下,当壳体间留有合适的散热距离时,壳体之间的温度影响甚微。

**关键词:**气体绝缘输电线路(GIL);温度场;泵风速度;太阳辐射;相间温度影响;COMSOL

**中图分类号:**TM75

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)03-0136-08

## 0 引言

中国能源体系在“四个革命、一个合作”的指引下,朝着清洁低碳、安全高效的方向前进,气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)越来越受到重视,相关技术也有长足进步<sup>[1]</sup>。国外电气设备制造商在成套电器设备的电磁场和温度场方面做了很多仿真研究,其产品性能达到较为理想的状态<sup>[2-5]</sup>。Koch 等学者考虑邻近效应建立管道焦耳热损耗与对流换热的热平衡关系,基于数值积分方法对 GIL 温度进行迭代计算,但不能反映整体温度分布,适合初步计算<sup>[6]</sup>;Benato 等用磁热耦合分析求解温度分布,但其将辐射和对流均等效为热传导,传热系数与实际偏差较大,准确性较低<sup>[7]</sup>。

国内对 GIL 温度场分布及环境因素的影响也已展开相关研究。西安交通大学提出基于能量守恒的节点解析法,能够准确快捷地预测 GIL 温度,但未考虑泵风强度及太阳辐射的影响<sup>[8]</sup>;李彦彰等提出考虑负载电流、环境因素的稳态热场计算方法,模型为用户内型三相共箱式气体绝缘母线,对环境因素所致影响的考虑较为简单,且 GIL 结构多为分相形式,该方法的适应性有待分析验证<sup>[9]</sup>;吴晓文等通过有限元方法建立耦合模型,并将温度场仿真结果与实验数据进行误差分析,但在模型的温度分析上未提及温度场具有三维分布特征<sup>[10]</sup>。

GIL 导体焦耳热损耗所产生的热量会使导体温

度升高<sup>[11]</sup>,同时通过热交换使绝缘气体升温,加上 GIL 壳体感应电流热损耗与涡流热损耗,最终引起导体、壳体和内部绝缘气体温度的大幅上升,因此 GIL 设备温度是判断 GIL 是否正常运行的重要技术指标。目前针对 GIL 过热故障机理与检测的研究还不成熟,亟需通过多物理场耦合仿真研究 GIL 温度场分布规律,分析环境因素等对 GIL 温度场的影响,以及三相垂直分布时温度场的分布情况。

文中采用多场耦合分析方法,基于有限元软件开展 GIL 温度场分布、热特性及其影响因素研究。以 550 kV GIL 为研究对象,基于 COMSOL 软件建立 GIL 三维几何模型,计及气体对流散热对 GIL 温度场的影响,给出求解域内相应的假设条件与边界条件,加载外部空气域建立耦合温度场模型,研究不同运行环境对 GIL 热特性的影响以及管廊中三相垂直布置情况下的相间温度影响。

## 1 GIL 模型建立

### 1.1 GIL 仿真原型介绍

文中仿真所用参数均来自某 550 kV GIL 试验段,由直线段、直拐角段、斜拐角段、竖直段、隔离单元、补偿单元、缺陷单元等构成 GIL 一次部分,直线段如图 1 所示,内部结构布置方式与苏通 GIL 跨江隧道一致,采用内置式绝缘子及三柱式绝缘支撑,壳体滑动支撑和固定支撑按需布置。

GIL 试验段采用分箱结构,使用 SF<sub>6</sub> 气体绝缘,参数如表 1 所示,壳体内径 500 mm,壁厚 8 mm,采用螺旋焊接管加工,导体外径 140 mm,壁厚 15 mm,截面积约为 12 487 mm<sup>2</sup>。

收稿日期:2019-11-27;修回日期:2019-12-19

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804400);江苏省自然科学基金资助项目(BK20161185);江苏省“六大人才高峰”项目(XNY-046)

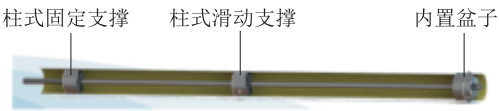


图1 GIL 直线段示意

Fig.1 Straight line segment of GIL

表1 550 kV GIL 参数表

Table 1 Data of 550 kV GIL

参数名称	参数数值
额定电压/kV	550
额定电流/A	5 000
雷电冲击耐受电压/kV	1 675
操作冲击耐受电压/kV	1 300
额定短时耐受电流/kA	50
额定峰值耐受电流/kA	161
标准直线单元母线长度/m	15
壳体外径/mm	516
法兰外径/mm	680
壳体连接方式	法兰连接

## 1.2 GIL 几何模型

在 COMSOL 中建立 GIL 直线段三维简化几何模型,有限元模型主要分为:外部空气、壳体、绝缘气体和导体,简化模型如图 2 所示。关于参数设置,因空气层厚度对计算精度有较大影响,空气层太薄计算误差较大,空气层太厚时,GIL 导体、外壳的温升对空气层边缘的温度影响基本可以忽略,并且使模型计算量与求解时间增加。为确定最优空气层厚度,文中尝试多种尺寸进行对比,最终确定空气层厚度为一倍母线直径。同时,文中主要研究外部影响因素对 GIL 温升的影响,测量内部导体与金属外壳的温度,模型长度对最终温升影响不大,为减少计算量,模型长度选为 1 m。

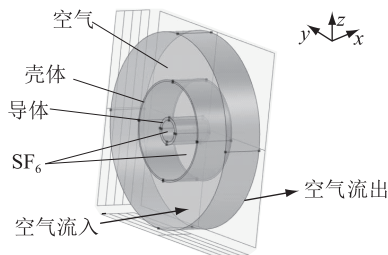


图2 含空气域的 GIL 简化模型

Fig.2 Simplified model of GIL with external air

在三维模型中, $x$ 轴为直线段长度,文中取 1 m; $z$ 轴为地理位置的上下, $z$ 大于零时为 GIL 上部分, $xy$ 平面为水平截面。

温度场三维模型中采用用户控制网格方式划分网格,先用自由三角形网格剖分面,再由面单元

扫描生成体单元,针对导体和壳体进行网格加密处理,如图 3 所示。20 °C 温度场模型的材料热学参数如表 2 所示。

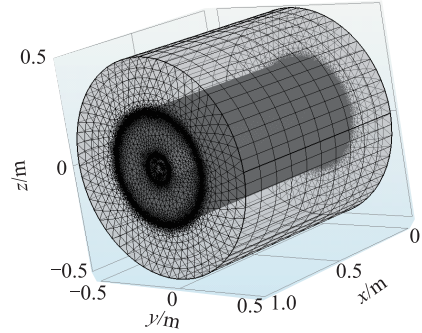


图3 网格划分图

Fig.3 Division of COMSOL meshing

表2 GIL 温度场模型基本参数(20 °C)

Table 2 The basic parameters of the model(20 °C)

参数	壳体	导体	SF <sub>6</sub>	空气
气压/MPa			0.4	0.1
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 680	2 719	25.7	1.275 8
动力黏度/(Pa·s)			1.42×10 <sup>-5</sup>	1.73×10 <sup>-5</sup>
比热率			1.09	1.4
恒压热容/[J·(kg·k) <sup>-1</sup> ]	942	780	665	1 003
导热系数/[W·(m·k) <sup>-1</sup> ]	156	177	0.013 6	0.024
表面发射率	0.8	0.8		

## 2 GIL 热交换与流热耦合机理

### 2.1 GIL 热交换过程

GIL 内部热量主要以对流换热与热辐射 2 种方式传递到外部环境中达到热平衡<sup>[12]</sup>,也存在热传导,热交换主要路径如下:(1) GIL 导体内部产生的热量以导热形式传导至外表面;(2) 导体周围 SF<sub>6</sub> 气体通过对流换热方式带走导体表面热量,同时导体外表面与外壳内表面之间以热辐射形式进行传热;(3) SF<sub>6</sub> 气体将热量传递到外壳内表面;(4) GIL 外壳内表面的热量以导热形式传导至外表面;(5) 外壳外表面与周围空气之间,以自然对流或强制对流与辐射换热方式进行热传递。GIL 二维横截面热交换过程如图 4 所示。

产生的热量与交换出去的热量相同时,只需要考虑对流换热与热辐射,此时存在 2 层热平衡关系,即 GIL 热损耗与外壳和空气之间的热辐射和对流换热量的平衡,导体热损耗与导体和 SF<sub>6</sub> 气体间对流换热热量以及导体外壳间辐射换热量的平衡。具体公式为:

$$P_d + P_k = Q_{kf} + Q_{kd} \quad (1)$$

$$P_d = Q_{df} + Q_{dd} \quad (2)$$

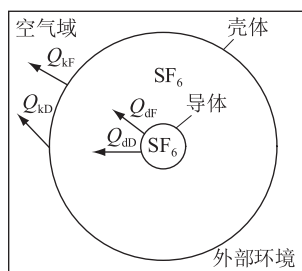


图4 GIL 二维横截面热交换过程  
Fig.4 Process of heat exchange on two-dimensional cross-section

式中： $P_d$  为导体电阻热损耗，W/m； $P_k$  为壳体涡流热损耗，W/m； $Q_{kf}$  为壳体热辐射散热量； $Q_{kd}$  为壳体空间自然对流散热量； $Q_{dr}$  为导体热辐射散热量； $Q_{dd}$  为导体自然对流散热量。

### 2.2 GIL 流热耦合流程

GIL 流热耦合首先对电磁热损耗进行准确求解，关键是求解过程中要保持壳体和导体所用铝合金电阻的实时更新。由于材料电阻与温度相关，需要进行电磁-温度双向耦合数据传递，来增加模型的准确性，在计算有限元单元时进行热损耗与温度之间的数据交换。电磁-温度双向耦合数据传递如图 5 所示。

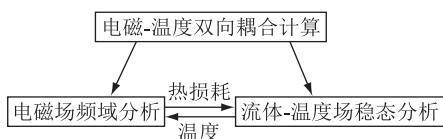


图5 电磁-温度双向耦合数据传递  
Fig.5 Diagram of bidirectional coupled data transfer

关于流体物性参数的非线性问题，现场试验只能得出部分 GIL 的运行情况，因此使用 COMSOL 有限元软件实时更新流体的物性参数，模拟流体在不同运行环境中的状态<sup>[13]</sup>。在模型中将空气与 SF<sub>6</sub> 气体视为流体计算，考虑对流及热辐射的热交换过程，减小常规模拟中施加固定换热系数造成的误差。流热耦合示意如图 6 所示。

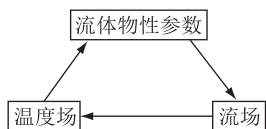


图6 流热耦合示意  
Fig.6 Diagram of flow thermal coupling

## 3 流场-温度场有限元模型

### 3.1 模型假设条件

为了简化计算，文中模型做以下假设：

(1) SF<sub>6</sub>与空气作为不可压缩粘性流体处理，忽略气体的辐射换热；

(2) 气体热物性参数取值受温度影响，与温度相关，是温度的函数；

(3) 不考虑强制通风环境，风速为零时，SF<sub>6</sub>气体为自然对流状态，即因温差存在致使气体存在密度差异而发生流动；

(4) 空气域外边界温度为环境温度，不受 GIL 内部发热影响，默认空气对流换热方式为自然对流，强制通风时为强制对流；

(5) 导体及外壳材质各向同性，热损耗在其内部均匀分布。

### 3.2 控制方程与边界条件

#### 3.2.1 气体热物性参数

气体密度与温度的关系可表示为：

$$\rho(T) = \frac{\rho_{20} T_{20}}{T} \quad (3)$$

气体导热系数与温度的关系可表示为：

$$\lambda(T) = \lambda_{20} \frac{T_{20}}{T} \times 1.5 \frac{T_{20} + S}{T + S} \quad (4)$$

气体动力黏度与温度的关系可表示为：

$$\eta(T) = \eta_{20} \frac{T_{20}}{T} \times 1.5 \frac{T_{20} + S}{T + S} \quad (5)$$

式中： $\rho_{20}$ ， $\lambda_{20}$ ， $\eta_{20}$  分别为环境温度下气体密度、导热系数与动力黏度； $T$  为实际温度，K； $T_{20}$  为环境温度，值为 293.15 K； $S$  为苏士兰 (Sutherland) 常数，K。

#### 3.2.2 热传导

热传导控制方程主要用来表示壳体和导体内部的热量传递，其微分形式如下：

$$\rho_T C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_T \nabla^2 T + Q \quad (6)$$

式中： $\rho_T$  为温度为  $T$  时的材料密度，kg/m<sup>3</sup>； $C_p$  为定压热容； $\lambda_T$  为温度为  $T$  时的导热系数，W/(m·K)； $T$  为实际温度，K； $Q$  为热损耗，J。

#### 3.2.3 对流换热

气体对流换热控制方程微分形式如下<sup>[14-15]</sup>：

(1) 质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \rho_T \nabla \cdot v = 0 \quad (7)$$

(2) 动量守恒方程：

$$\rho_T \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = \eta_T \nabla^2 v + E \quad (8)$$

(3) 能量守恒方程：

$$\rho_T C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = \lambda_T \nabla^2 T \quad (9)$$



式中:  $\rho_T$  为气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $v$  为气体流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\eta_T$  为气体动力黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  $E$  为广义源项。

绝缘气体与空气均处于自然对流状态, 选用层流模型。绝缘气体域设置对称边界, 空气域设置开口边界。为了保证管廊内空气的流通, 采用风机强制通风时, 外部空气处于强制对流情况, 设置  $k-\varepsilon$  湍流模型, 添加速度入口与压力出口边界, 空气流速按需设置。

### 3.2.4 辐射换热

辐射换热控制方程<sup>[16]</sup>:

$$Q_f = S_f \varepsilon \delta (T_d^4 - T_k^4) \quad (10)$$

式中:  $Q_f$  为辐射换热量,  $\text{W}$ ;  $\varepsilon$  为表面发射系数;  $S_f$  为辐射接触面积,  $\text{m}^2$ ;  $\delta$  为常数, 数值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_d$  为导体温度,  $\text{K}$ ;  $T_k$  为壳体温度,  $\text{K}$ 。

考虑太阳辐射的作用, 壳体接收太阳辐射的能量  $Q_s$  可用式(11)表示。

$$Q_s = E_{fs} \eta F \quad (11)$$

式中:  $E_{fs}$  为太阳辐射量;  $\eta$  为壳体表面吸收率;  $F$  为壳体水平投影面积。

辐射换热对应的边界条件为: (1) 导体和壳体表面发射率为 0.8, 环境温度  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ; (2) 在壳体与导体边界施加辐射换热边界条件; (3) 在壳体外表面施加大空间辐射换热边界条件。

## 4 GIL 温度场影响因素分析

研究泵风速度对温度场的影响时, 环境温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 默认泵风入口处通入的风初始温度与环境温度保持一致; 研究太阳辐射方向和强度对温度场的影响时, 同样设置环境温度为  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , 仿真中默认日照不会对初始环境温度产生影响。

### 4.1 泵风速度

在前述仿真中, 文中默认外部空气与绝缘气体为自然对流状态, 但管廊敷设的 GIL 工程中, 需要采用通风设备对管廊进行通风散热<sup>[17]</sup>, 此时外部空气为强制对流状态。因此物理场模型中增加湍流模块, 外部空气域设置湍流模型选择  $k-\varepsilon$  模型, 设置左侧为空气入口, 右侧为出口, 风速为  $5\text{ m}/\text{s}$ 。图 7 和图 8 为  $5\text{ m}/\text{s}$  的泵风速度下 GIL 导体和壳体温度分布图。

由图 7 可知, 导体在横轴上温度分布虽有差异但温差仅为  $0.05\text{ }^\circ\text{C}$ , 因此通风对导体轴向温度分布的影响可以忽略, 在竖轴上温度差异仅为  $0.02\text{ }^\circ\text{C}$ , 结合前文研究, 导体在考虑通风与不考虑通风的情况下均可视为等温体。

在忽略风速及日照的额定工况下, 温度场计算

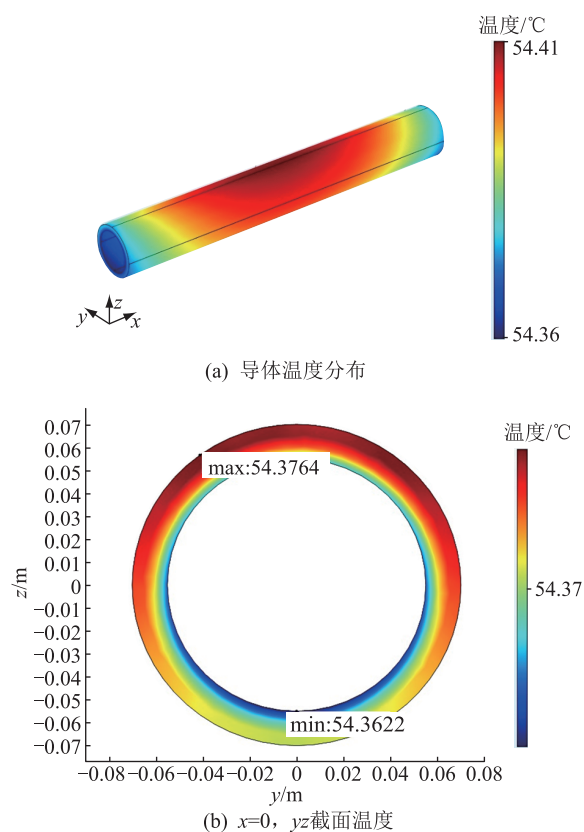


图 7 强制通风情况下 GIL 导体温度分布

Fig.7 Distribution of temperature under forced ventilation

结果为壳体  $36.2\text{ }^\circ\text{C}$ , 导体  $58.6\text{ }^\circ\text{C}$ ; 泵风速度  $5\text{ m}/\text{s}$  时, GIL 壳体最高温约为  $28.9\text{ }^\circ\text{C}$ , 导体最高温约为  $54.4\text{ }^\circ\text{C}$ 。可以得出, 壳体温度降低  $7.3\text{ }^\circ\text{C}$ , 导体温度降低  $4.2\text{ }^\circ\text{C}$ , 说明泵风有利于 GIL 散热。由于在管廊内进行泵风, 空气在流过 GIL 壳体时进行热交换被逐渐加热, 空气温度升高后其对 GIL 壳体的换热效果变差, 因此在轴向上 GIL 壳体温度从入口处向出口处增大。

由图 8(a) 和 (b) 可知仿真模型长度为  $1\text{ m}$  的壳体轴向温差约为  $2.8\text{ }^\circ\text{C}$ 。空气入口侧换热效果好, 出口侧换热效果较差, 热交换能力逐渐降低。可知, 导体和壳体在内部绝缘气体自然对流与空气的强制对流下, 具有明显的三维温度场分布特征, 在横轴上不可简化为二维, 这也是文中研究温度场采用三维模型的主要原因。由图 8(c) 和 (d) 可见, 在风速的影响下, GIL 壳体上下部存在温度差异受到影响, 在入口处壳体上下温差仅为  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ , 几乎可以忽略不计, 且温度极值的位置也发生了改变, 在出口处壳体上下温差为  $0.3\text{ }^\circ\text{C}$ 。由此可知, 不考虑通风与考虑通风的温度场分布存在较为明显的差异, 不能一概而论。

在外部风速的影响下, 绝缘气体内部流速在横

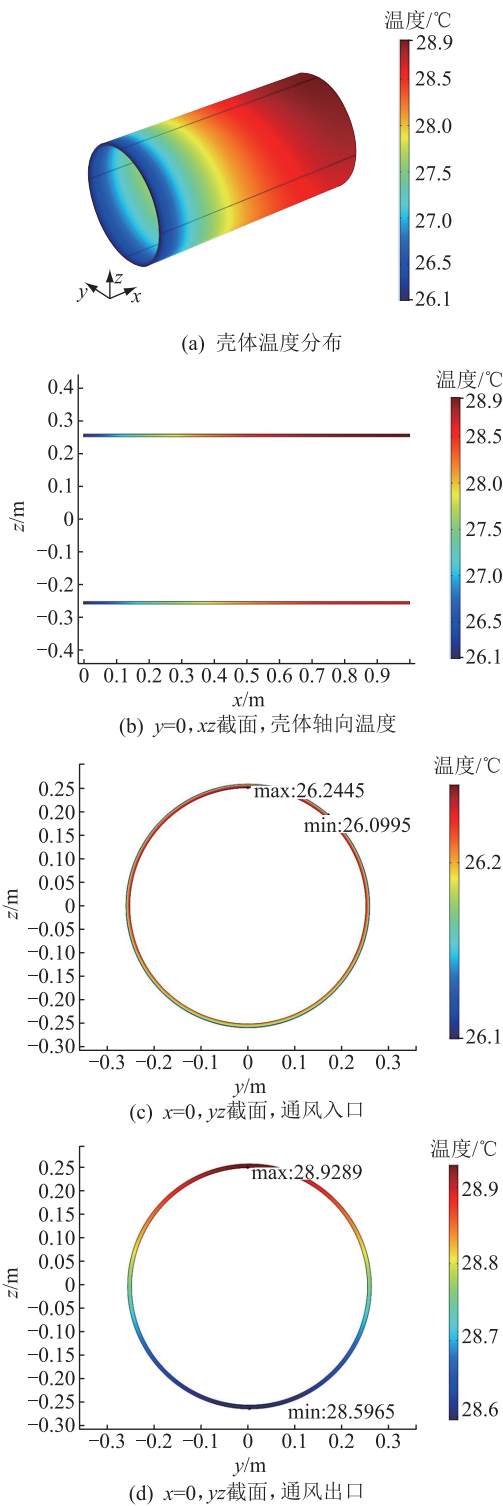


图8 强制通风情况下 GIL 壳体温度分布  
Fig.8 Temperature distribution of GIL shell under forced ventilation

轴方向上不再保持一致,具有三维分布特征。在轴向上,左侧为空气入口,右侧为空气出口,空气入口因换热效果好,气体流速整体上高于空气出口,绝缘气体流速由通风入口至出口逐渐降低,对应壳体温度在轴向上由空气入口到空气出口逐渐升高, $xz$ 截面流速分布如图9所示。

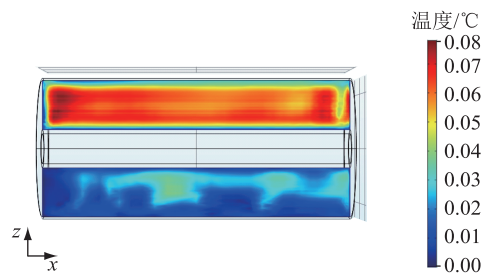


图9 通风情况下  $y=0$ ,  $xz$  截面绝缘气体流速分布  
Fig.9 Distribution of flow rate in  $xz$  section under forced ventilation when  $y=0$

保持其他参数不变,改变空气域的入口风速,不同泵风速度下 GIL 壳体与导体温度极大值变化曲线如图10所示。

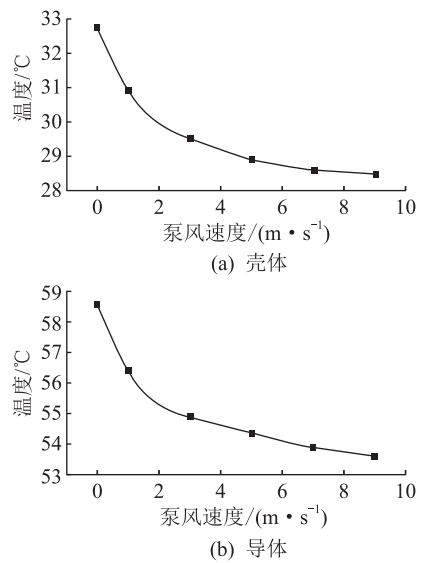


图10 泵风速度对 GIL 温度的影响  
Fig.10 Influence of air flow rate on the temperature of GIL

由图10可以看出,GIL整体温度与泵风速度呈现非线性关系,随着风速增大,GIL导体温度和壳体温度都出现明显下降,且两者变化趋势基本一致。因此对GIL管廊工程中进行适当通风,具有较好的散热效果,温度下降明显,但当风速超过5 m/s时,继续增加泵风速度对GIL的降温作用并不大。根据以上结果,文中建议在实际工程中对GIL管廊通风,并在直线段处将风速控制在4~5 m/s,可获得最佳散热效果。

#### 4.2 太阳辐射方向和强度

露天布置的GIL工程除环境温度外,日照也是其需考虑的重要外部环境因素之一<sup>[18-22]</sup>。为了研究太阳辐射方向与强度对GIL热特性的影响,本节基于三维流热耦合模型进行仿真计算。查阅相关气象资料可知,太阳辐射强度主要在0~800 W/m<sup>2</sup>之间。考虑日照的GIL温度场分布如图11所示,给

出日照方向不同时太阳辐射强度分别为  $200 \text{ W/m}^2$ ,  $400 \text{ W/m}^2$ ,  $600 \text{ W/m}^2$  的壳体温度场分布。

由图 11 可以看出,当太阳辐射强度和角度的不同时,对 GIL 温度场所造成的影响主要体现在温度的幅值和分布上。GIL 的温度场不再呈左右对称分布,有日照一侧的壳体温度明显高于无日照一侧,

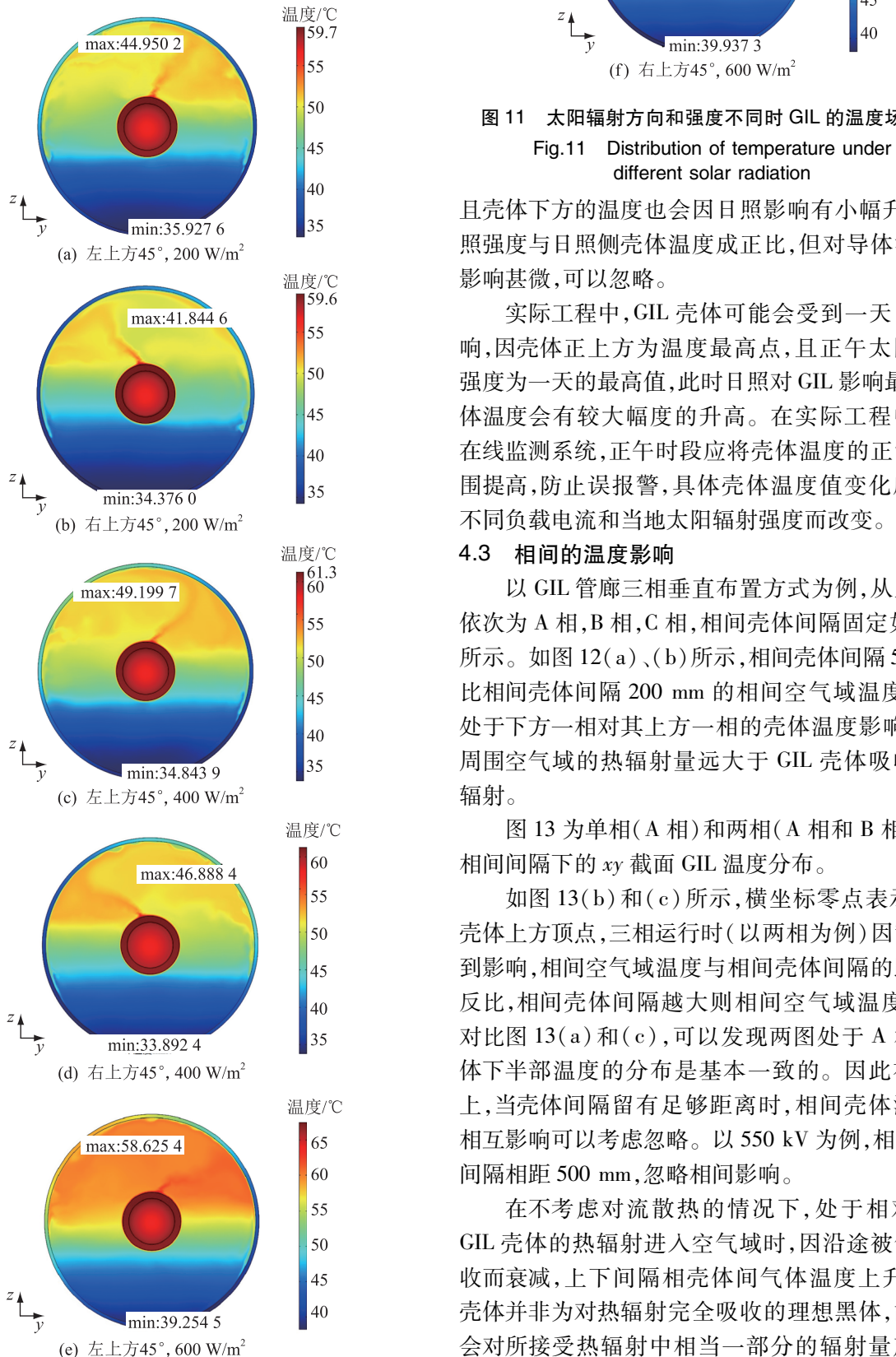


图 11 太阳辐射方向和强度不同时 GIL 的温度场分布

Fig.11 Distribution of temperature under different solar radiation

且壳体下方的温度也会因日照影响有小幅升高;日照强度与日照侧壳体温度成正比,但对导体温度的影响甚微,可以忽略。

实际工程中,GIL 壳体可能会受到一天日照影响,因壳体正上方为温度最高点,且正午太阳辐射强度为一天的最高值,此时日照对 GIL 影响最大,壳体温度会有较大幅度的升高。在实际工程中若有在线监测系统,正午时段应将壳体温度的正常值范围提高,防止误报警,具体壳体温度值变化应依据不同负载电流和当地太阳辐射强度而改变。

#### 4.3 相间的温度影响

以 GIL 管廊三相垂直布置方式为例,从上至下依次为 A 相,B 相,C 相,相间壳体间隔固定如图 12 所示。如图 12(a)、(b)所示,相间壳体间隔  $500 \text{ mm}$  比相间壳体间隔  $200 \text{ mm}$  的相间空气域温度低,但处于下方一相对其上方一相的壳体温度影响不大,周围空气域的热辐射量远大于 GIL 壳体吸收的热辐射。

图 13 为单相(A 相)和两相(A 相和 B 相)不同相间间隔下的  $xy$  截面 GIL 温度分布。

如图 13(b)和(c)所示,横坐标零点表示 A 相壳体上方顶点,三相运行时(以两相为例)因散热受到影响,相间空气域温度与相间壳体间隔的距离呈反比,相间壳体间隔越大则相间空气域温度越低。对比图 13(a)和(c),可以发现两图处于 A 相的壳体下半部温度的分布是基本一致的。因此在工程上,当壳体间隔留有足够距离时,相间壳体温度的相互影响可以考虑忽略。以  $550 \text{ kV}$  为例,相间壳体间隔相距  $500 \text{ mm}$ ,忽略相间影响。

在不考虑对流散热的情况下,处于相对下方 GIL 壳体的热辐射进入空气域时,因沿途被气体吸收而衰减,上下间隔相壳体间气体温度上升。GIL 壳体并非为对热辐射完全吸收的理想黑体,故同时会对所接受热辐射中相当一部分的辐射量产生反

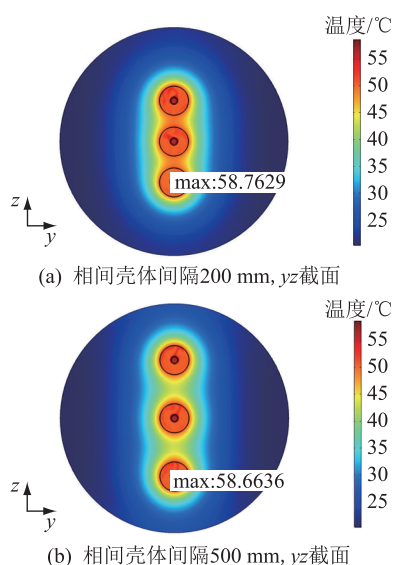


图 12 2 种工程上常见的相间间隔下的 GIL 温度场分布

Fig.12 GIL temperature field distribution at two phase intervals common in engineering

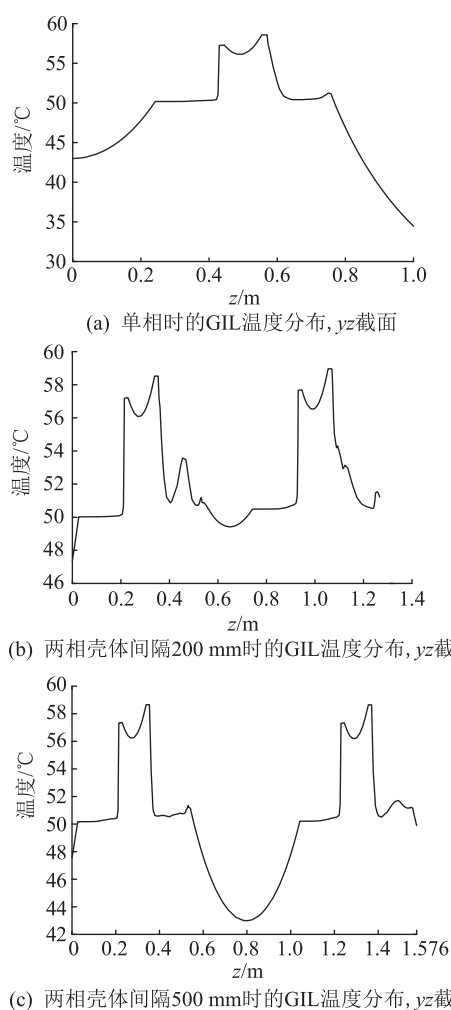


图 13 单相和两相不同相间间隔下的 GIL 温度分布

Fig.13 GIL temperature field distribution at single-phase and two-phase different intervals

射,最终使得处于相对上方 GIL 壳体吸收的热辐射,

实际上远远小于其自身对周围空气域的热辐射量。

## 5 结论

文中基于多物理场耦合方法,通过有限元仿真,对 GIL 温度场、热特性及其影响因素展开研究,同时分析三相垂直分布 GIL 的相间温度场变化,所得结论对工程有实际指导意义。

(1) 风速与 GIL 温度极值呈现非线性关系,由于风速作用,入口处温度大于出口处温度,壳体温度极大值向出口侧偏移;随风速增加,外壳温度下降的速度越来越小,最终趋于稳定值,外壳温度逐渐接近于环境温度。

(2) 在日照的影响下,GIL 内部温度场不再保持轴对称分布,GIL 壳体温度极大值向温度直射点偏移,且日照强度越大升温与偏移越大。

(3) GIL 管廊中三相垂直布置情况下,当壳体间隔留有合适的散热距离时,壳体之间的温度影响甚微,在工程上可以考虑忽略。

(4) 文中方法可准确分析不同泵风速度、太阳辐射方向与强度对 GIL 温度场分布与热特性的影响,所得结论可为 GIL 温度在线监测提供可靠的理论依据。

### 参考文献:

[1] 齐波,张贵新,李成榕,等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.

QI Bo,ZHANG Guixin,LI Chengrong,et al. Research status and application prospects of gas-insulated metal-enclosed transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.

[2] MICHAEL TENZER H K D I. Underground transmission lines for high power AC and DC transmission[C]//2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D). Dallas,TX,USA,2016:1-4.

[3] KOCH H,GOLL F,MAGIER T,et al. Technical aspects of gas insulated transmission lines and application of new insulating gases[M]. 2018:1448-1453.

[4] MAGIER T,DEHLER A,KOCH H. AC compact high power gas-insulated transmission lines[C]//IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition. IEEE,2018.

[5] KOCH H,GOLL F,MAGIER T,et al. Technical aspects of gas insulated transmission lines and application of new insulating gases[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(4):1448-1453.

[6] KOCH H,CHAKIR A. Thermal calculations for buried gas-insulated transmission lines (GIL) and XLPE-cable[M]. 2001.

[7] BENATO R,DUGHIERO F. Solution of coupled electromagnetic and thermal problems in gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2003,39(3):1741-1744.



- [8] 徐亮,龙艳,张高爽,等. 节点解析法研究特高压廊管气体绝缘输电线路的热特性[J]. 西安交通大学学报,2018,52(5):125-132.  
XU Liang, LONG Yan, ZHANG Gaoshuang, et al. Thermal analysis of gas insulated transmission lines for UHV ducts by node analysis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(5): 125-132.
- [9] 李彦彰,舒乃秋,刘亚男,等. 基于外壳热分布的气体绝缘母线温度计算模型[J]. 电测与仪表,2017,54(18):111-117.  
LI Yanzhang, SHU Naiqiu, LIU Yanan, et al. Calculation model of gas insulated busbar temperature based on heat distribution of outer casing[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54(18): 111-117.
- [10] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(33):141-147.  
WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Numerical calculation and analysis of temperature field of gas insulated busbar based on fluid multi-component transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 141-147.
- [11] 孙国霞,关向雨,舒乃秋,等. 基于光纤光栅的 GIS 导体温度巡检方法与装置[J]. 电工技术学报,2015,30(8):316-321.  
SUN Guoxia, GUAN Xiangyu, SHU Naiqiu, et al. GIS conductor temperature inspection method and device based on fiber grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 316-321.
- [12] 周利军,张讯培,王朋成,等. 环境因素影响下 GIL 温升特性的仿真计算分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):211-218.  
ZHOU Lijun, ZHANG Jipei, WANG Pengcheng, et al. Simulation and analysis of GIL temperature rise characteristics under the influence of environmental factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 211-218.
- [13] KIM J K, HAHN S C, PARK K Y, et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magnetothermal finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1636-1639.
- [14] 李伟力,李勇,杨雪峰,等. 大型空冷汽轮发电机定子端部温度场与流体场的计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(36):80-87.  
LI Weili, LI Yong, YANG Xuefeng, et al. Calculation and analysis of temperature field and fluid field at stator end of large air-cooled steam turbine generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 80-87.
- [15] ZHANG Y, RUAN J, HUANG T, et al. Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through 3-D coupled electromagnetic fluid-dynamical and thermal finite-element analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 1047-1050.
- [16] 范镇南,张德威,陈显坡,等. GIS 母线损耗发热状况的电磁场与流场计算分析[J]. 中国电机工程学报,2009,29(S1):241-244.  
FAN Zhennan, ZHANG Dewei, CHEN Xianpo, et al. Calculation and analysis of electromagnetic field and flow field in GIS bus loss heat generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 241-244.
- [17] 张晓平,杨信美,钱玉华,等. 苏通 GIL 综合管廊工程大直径、长距离盾构施工隧道通风方案研究[C]//2018 年全国工程地质学术年会论文集. 中国陕西西安,2018:7.  
ZHANG Xiaoping, YANG Xinmei, QIAN Yuhua, et al. Study on ventilation scheme for large diameter and long distance shield tunnel construction in sutong GIL integrated pipe gallery project[C]//Proceedings of the 2018 National Engineering Geology Annual Conference. Xi'an, Shaanxi, China, 2018.
- [18] MINAGUCHI D, GINNO M, ITAKA K, et al. Heat transfer characteristics of gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(1): 1-9.
- [19] 王永升. 基于多元特性的交联聚乙烯电缆绝缘老化研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2017.  
WANG Yongsheng. Study on insulation ageing of XLPE cable based on multivariate characteristics[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [20] 潘珍,张炜. 基于 ArcGIS 的电网冰区分布图自动绘制方法研究[J]. 电力信息与通信技术,2018,16(10):44-48.  
PAN Zhen, ZHANG Wei. Research on the automatic drawing method of the distribution map of ice area in power grid based on ArcGIS[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2018, 16(10): 44-48.
- [21] 丁斌,徐耀良,杨宁,等. 大电流封闭母线磁-流-热场耦合有限元分析[J]. 高压电器,2010,46(8):31-34.  
DING Bin, XU Yaoliang, YANG Ning, et al. Finite element analysis of magneto-current-thermal field coupling of high current enclosed busbar[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 31-34.
- [22] 陈强,李庆民,丛浩熹,等. 引入多重边界条件的 GIS 母线温度分布多场耦合计算及影响因素分析[J]. 电工技术学报,2016,31(17):187-195.  
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Multi-field coupling calculation of GIS busbar temperature distribution with multiple boundary conditions and analysis of influencing factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 187-195.

---

作者简介:



乔宇娇

乔宇娇(1995),女,硕士在读,研究方向为电力系统状态检测及 GIL 温度场(E-mail: 1042234895@qq.com);

唐泽华(1996),男,硕士在读,研究方向为电力系统状态检测及 GIL 温度场;

高鹏(1996),男,硕士在读,研究方向为电力系统状态检测。



## Electric field characteristics of polluted insulator space under typical surface state

HUANG Xiaoning<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>1</sup>, YANG Chengshun<sup>1</sup>, BI Xiaotian<sup>2</sup>, GAO Song<sup>2</sup>, ZHANG Dongdong<sup>1,3</sup>

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. State Grid

Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. State Key Laboratory of Power

Transmission Equipment and System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

**Abstract:** At present, it usually relies on monitoring the surface leakage current of the insulator to realize the flashover warning. As a contact online monitoring method, it still has much room for improvement in terms of reliability and convenience. However, studies have indicated that it can be effectively monitored in a non-contact manner. Therefore, the electric field distribution characteristics of insulator space under typical surface conditions are studied. Firstly, the electrostatic field simulation model of common post insulators is established by using finite element simulation software. The magnitude of the electric field around the insulator under dry, wet and discharge conditions and the law of change are compared and analyzed. Finally, the artificial contamination test is used to verify the simulation results. The results show that the magnitude of the amplitude reflected by the insulator space in different surface states is obvious. Under the condition of surface wetting and arc creepage, the vertical component of the spatial electric field increases by nearly 50% and 20%, respectively. The research results can provide new ideas for condition monitoring of transmission and distribution external insulation.

**Keywords:** insulator; pollution flash; finite element; space electric field; operating state

(编辑 方晶)

(上接第 143 页)

## Distribution characteristics of GIL temperature field under different environmental factors

QIAO Yujiao, TANG Zehua, GAO Peng, LIANG Rui, SONG Chaoran

(School of Electrical and Power Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** At present, the research for gas-insulated transmission line (GIL) lacks quantitative analysis of the influencing factors, especially the ventilation speed when pipe gallery is laid, the solar radiation temperature field distribution and the thermal characteristics of open-air arrangement. Therefore, the multi-field coupling analysis method is used to carry out the GIL temperature field distribution based on COMSOL. Its influencing factors are studied. The multi-physics coupling calculation model of electromagnetic field thermal field is established, and the influence of different operating environments on the thermal characteristics of GIL is analyzed. The results show that under the influence of pumping speed and solar radiation, the axisymmetric distribution of GIL temperature field is destroyed and the magnitude and position of shell temperature extremes change. The thermal properties of GIL in different operating environments are different. With the increase of pumping time and pumping speed, the difference between inlet temperature and outlet temperature gradually increases, and finally tends to a stable value; the GIL shell temperature extreme point changes with the change of sunshine direction and intensity. The influence of field distribution can not be ignored. In the case of three-phase vertical arrangement in the GIL pipe gallery, the temperature between the casings has little effect when the casing spacing is left with a suitable heat dissipation distance.

**Keywords:** gas-insulated transmission line (GIL); temperature field; pump speed; solar radiation; interphase temperature effect; COMSOL simulation

(编辑 方晶)