

# 环境因素影响下 GIL 温升特性的仿真计算分析

周利军,张汎培,王朋成,仇祺沛,何健,刘栋财

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:**为研究不同环境因素对架空敷设式气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)温升特性的影响,建立电磁场-热场-流场多物理场耦合计算模型,进而分析了不同环境因素影响下 GIL 外壳和导体温度变化特征、外壳外表面的对流换热系数变化及不同负载 GIL 温升受环境因素影响的差异性。结果表明:风速与 GIL 温降的关系是非线性的,风速在 0~3 m/s 时,外壳和导体的温度下降较快,当风速高于 3 m/s 时,外壳和导体温度随风速增加下降速度越来越小,最终导体温度趋于稳定值,外壳温度逐渐接近于环境温度,当风速相同时,GIL 负荷电流越大,导体和外壳温降速度越大;太阳辐射强度对 GIL 温升的影响基本呈线性关系,且太阳辐射强度对外壳温升的影响更明显,太阳辐射强度相同时,导体和外壳的温升差随负载电流的增加而减小;导体和外壳温度与环境温度基本呈等斜率线性关系。

**关键词:**GIL;耦合;损耗;温升;环境因素

**中图分类号:**TM 75

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.01.031

## 0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路 GIL(Gas-Insulated metal enclosed transmission Line)具有输电容量大、电磁干扰小、可靠性高等优点<sup>[1-4]</sup>,在国内外电力系统中得到了广泛的应用。在实际应用中,由于距离长、跨度大,使架空敷设式 GIL 所处的地理环境较为复杂,因此无论是前期设计安装或后期的运行维护检修,均有必要对 GIL 散热及温升特性进行全面的

研究。GIL 与气体绝缘金属封闭电器(GIS)母线结构较为相似。针对 GIS 母线内部温度场的研究主要分为传统方法和有限元法;传统方法主要通过建立等效热路模型、热学公式及热平衡方程相结合的数值计算<sup>[5-6]</sup>得到导体和外壳温度;相关学者采用有限元法对 GIS 母线中导体和外壳中电流密度分布、温度场分布特征、温升与电力负荷之间的关系进行了研究<sup>[7-11]</sup>,但 GIL 与 GIS 母线相比,其整条线路上的地理环境因素并不单一且不容忽视。GIL 主要安装方式包括直埋式和架空敷设式,2 种安装方式下,GIL 温度受环境影响具有差异性。文献[12]研究了 GIL 温升与负荷电流和环境温度之间的关系,文献[13]通过建立多场耦合的三维有限元模型研究了负荷电流、土壤类型、直埋深度等对直埋式 GIL 温升的影响;文献[14]对架空敷设式 GIL 在不同环境因素下的温度进行了气体绝缘金属封闭,指出风速、光照等外部环境因素对 GIL 温度具有较大影响,但缺乏详细的计算分析与有效的模型构建。

本文针对不同环境因素对架空敷设式 GIL 线路温升的影响进行了研究:首先建立了架空敷设式 GIL 线路温升的电磁场-热场-流场多场耦合计算模

型,通过与文献[14]中的实验数据进行对比,验证了仿真模型的有效性,进而分析了不同环境因素影响下 GIL 外壳和导体温度变化特征、外壳外表面的对流换热系数变化及环境因素对不同负载电流 GIL 温升影响的差异性,为 GIL 前期的尺寸设计及后期的运行维护检修提供理论依据。

## 1 损耗计算模型

### 1.1 基本参数

GIL 主要是由内导体和外壳组成的同轴结构,本文以文献[14]中运行电流为 7 300 A 的 GIL 为研究对象,建立二维 GIL 的仿真物理模型如图 1 所示,其尺寸及物性参数如表 1 所示。

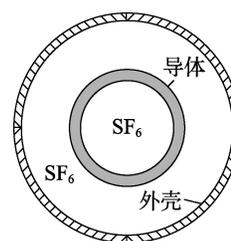


图 1 GIL 仿真物理二维截面示意图

Fig.1 Two-dimensional section of GIL physical simulation model

表 1 GIL 仿真物理模型的基本参数

Table 1 Basic parameters of GIL physical simulation model

参数	数值	参数	数值
额定电压/kV	550	导体内径/mm	140
额定电流/A	7 300	壳体外径/mm	512
壳体内径/mm	480	导体外径/mm	180

GIL 仿真物理模型中各部分的物性参数根据实际材料数据进行设定,具体如表 2 所示。

### 1.2 损耗求解模型

GIL 在正常运行过程中,导体本身会产生电阻损耗,同时导体中的交流电经过磁场的作用在外壳

表 2 GIL 仿真物理模型中的材料参数(环境温度为 0 °C)

Table 2 Material parameters of GIL physical simulation model(environment temperature is 0 °C)

参数	SF <sub>6</sub>	空气	导体	外壳
电阻率/(Ω·m)	—	—	2.95×10 <sup>-8</sup>	2.95×10 <sup>-8</sup>
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	26.08	1.293	2 730	2 730
导热系数/ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	1.206×10 <sup>-2</sup>	2.44×10 <sup>-2</sup>	2.2	2.2
粘度/(Pa·s)	1.42×10 <sup>-5</sup>	1.72×10 <sup>-5</sup>	—	—
比热容/ [J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	665	1 005	880	880

中出现感应电流而产生涡流损耗,在计算过程中对整个 GIL 二维横截面进行有限元划分,其中将外壳(导体)区域共分为  $N$  个单元以计算求解损耗,求解域内涡流场的损耗求解<sup>[15-17]</sup>可分为以下几部分。

导电区域内单个剖分单元的电流密度及电流的控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( v_y \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( v_x \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_{sz} + j\omega\sigma A_z \quad (1)$$

$$J_z = J_{sz} - j\omega\sigma A_z \quad (2)$$

$$I_{rmsi} = \iint_{S_i} J_z ds \quad (3)$$

其中,  $v_x$  和  $v_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的磁阻率;  $A_z$  为  $z$  方向的磁位矢量;  $J_{sz}$  为源电流密度;  $J_z$  为  $z$  方向的总电流密度;  $\sigma$  为电导率;  $I_{rmsi}$  为第  $i$  个单元的电流有效值;  $S_i$  为第  $i$  个单元的面积。

由式(3)可得整个导电区域的损耗为:

$$p = \sum_{i=1}^N p_i = \sum_{i=1}^N \frac{I_{rmsi}^2}{\sigma_i(T) S_i} \quad (4)$$

$$\sigma_i(T) = \frac{\sigma_{20}}{1+0.004(T-293)} \quad (5)$$

其中,  $p_i$  为第  $i$  个单元的损耗值;  $p$  为总损耗值;  $\sigma_i(T)$  为第  $i$  个单元在温度  $T$  下的电导率,  $T$  为绝对温度;  $\sigma_{20}$  为单元  $i$  在 20 °C 时的电导率。

根据式(4)可得导体和外壳区域的损耗值,将其作为温度场计算的热源。

## 2 温度场模型

### 2.1 物性参数

对于模型中所涉及流体的热物性参数均是关于温度的函数,对计算温度场的换热过程的影响不容忽视,其中密度、导热系数和运动粘度与温度的关系<sup>[12]</sup>可表示为:

$$\rho = \rho_0 \frac{P}{K_1} \frac{K_2}{T} \quad (6)$$

$$\lambda = \lambda_0 \left( \frac{T}{K_1} \right)^{1.5} \frac{K_1 + K_2}{T + K_2} \quad (7)$$

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{K_1} \right)^{1.5} \frac{K_1 + K_2}{T + K_2} \quad (8)$$

其中,  $\rho_0$ 、 $\lambda_0$  与  $\mu_0$  分别为室温条件下 SF<sub>6</sub> 或空气的密度、导热系数与动力粘度;  $P$  为气体压强;  $K_1$  和  $K_2$  为定值,由室温条件下气体的物性参数决定。

### 2.2 传热控制方程

GIL 内部的传热过程存在着能量守恒、动量守恒和质量守恒等复杂的数量关系,但是对于所需求解的主要变量(速度和温度等),通用控制方程<sup>[18]</sup>为:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{U}\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (9)$$

其中,  $\rho$  为流体密度;  $\phi$  可表示  $x$  和  $y$  方向上的速度分量、温度;  $\mathbf{U}$  为流体的速度矢量;  $\Gamma_\phi$  为扩散系数;  $S_\phi$  为广义源项,包括动量源项、焦耳热和辐射对流交换热量。

### 2.3 换热平衡方程

GIL 中的热源即导体和外壳中产生的损耗,导体中的热量通过其外表面的辐射和 SF<sub>6</sub> 气体的自然对流作用传递给外壳,外壳通过其与外界空气接触进行热量的对流交换和辐射作用将消散自身热量,最后达到 GIL 产生的热量与传递给环境空气的热量相等的动态平衡,即 GIL 的稳态温度场,其过程见图 2。

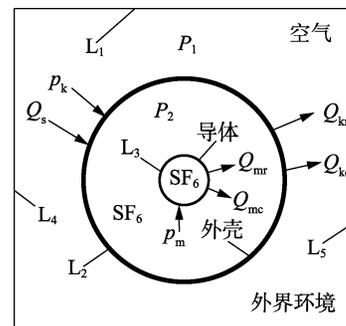


图 2 二维横截面传热示意图

Fig.2 Schematic diagram of two-dimensional cross section heat transfer

整个 GIL 的换热过程包括对流换热和辐射换热 2 种方式,下面以导体换热为例进行说明。

对流换热指导体热量通过 SF<sub>6</sub> 流动传递给外壳的过程,辐射换热是指热量通过导体外表面向外部辐射的过程,其中对流换热<sup>[14]</sup>可表述为:

$$Q_{mc} = h_1 D_m^{0.75} (T_m - T_k)^{1.25} \quad (10)$$

其中,  $Q_{mc}$  为导体对流换热量;  $h_1$  为自然对流换热系数;  $D_m$  为导体直径;  $T_m$  和  $T_k$  分别为导体和外壳温度。

导体的辐射换热<sup>[7]</sup>可表述为:

$$Q_{mr} = A_m \varepsilon \delta (T_m^4 - T_k^4) \quad (11)$$

其中,  $Q_{mr}$  为辐射换热量;  $\varepsilon$  为导体表面辐射系数;  $A_m$  为导体接触面积;  $\delta$  为 Stefan-Boltzmann 常数,取值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

在稳态温度场情况下,导体产热和散热达到动态平衡,满足关系式:

$$p_m = Q_{mc} + Q_{mr} \quad (12)$$

其中,  $p_m$  为导体区域所求得损耗值。式(12)表示导体的总生热量等于对流换热和辐射换热的总热量。

外壳由于日照和风速的作用存在一定的差异性,外壳接收太阳辐射的能量可表述为:

$$Q_s = E_{fs} \eta F \quad (13)$$

其中,  $Q_s$  为太阳辐射产生的热量;  $E_{fs}$  为太阳辐射总量;  $\eta$  为外壳表面吸收率;  $F$  为外壳水平投影面积。

外壳换热过程中的对流换热和辐射换热可表述<sup>[14]</sup>为:

$$Q_{kc} = h_2 D_k^{0.75} (T_k - T_0)^{1.25} + h_3 (v D_k)^m (T_k - T_0) \quad (14)$$

$$Q_{kr} = A_k \varepsilon \delta (T_k^4 - T_0^4) \quad (15)$$

其中,  $Q_{kc}$  为外壳对流换热量;  $h_2$  为外壳外表面自然对流换热系数;  $h_3$  为强制对流换热系数;  $v$  为风速大小;  $m$  为雷诺数对应指数;  $A_k$  为导体接触面积;  $D_k$  为外壳直径;  $T_0$  为环境温度。

外壳的换热平衡满足关系式:

$$p_m + p_k + Q_s = Q_{kr} + Q_{kc} \quad (16)$$

其中,  $p_k$  为外壳区域所求得损耗值。式(16)表示外壳外表面进行对流换热和辐射换热的总热量等于太阳辐射、导体生热量与外壳生热量之和。

### 2.4 模型求解的边界条件

对 GIL 二维横截面求解区域进行分析,该区域需满足以下边界条件。

a. 取边界  $L_1$  的温度为环境温度<sup>[19]</sup>,满足:

$$T|_{L_1} = T_0 \quad (17)$$

b. 对于外壳和导体外表面的对流换热和辐射散热关系,其边界条件<sup>[20]</sup>可表示为:

$$-\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial n} \Big|_{L_2} = Q_m + Q_k + Q_s \quad (18)$$

$$-\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial n} \Big|_{L_3} = Q_m \quad (19)$$

其中,  $\lambda_k$  和  $\lambda_m$  分别为外壳和导体的导热系数;  $n$  为边界面的法线方向;  $Q_m$ 、 $Q_k$  分别为导体和外壳损耗所产生的热量。

c. 在模型中存在 2 种不同的流体,各流体部分的压强表示为:

$$P|_{P_1} = P_0 \quad (20)$$

$$p|_{P_2} = 4P_0 \quad (21)$$

其中,  $P_1$  为空气区域压强;  $P_2$  为 SF<sub>6</sub> 区域压强;  $P_0$  为标准大气压强。

d. 在风速作用下,边界  $L_4$  和  $L_5$  分别作为入口和出口,其边界条件表示为:

$$v_n|_{L_4} = v_0 \quad (22)$$

$$w|_{L_5} = 1 \quad (23)$$

其中,  $v_n$  为边界  $L_4$  的法向速度;  $v_0$  为设定的边界  $L_4$  的法向速度数值大小;  $w$  为该出口处流体所占比重。

### 3 仿真模型验证

本节通过多场耦合计算原理对 GIL 仿真物理模型对 GIL 温度场进行仿真计算,并与文献[14]中的实验进行对比以验证 GIL 仿真物理模型的准确性。

#### 3.1 多场耦合计算

多场耦合的过程:首先在电磁场模型中分别设置导体和外壳的初始温度为  $T_{m0}$  和  $T_{k0}$ ,根据式(5)确定该温度下外壳和导体的电导率,根据式(4)求解导体焦耳损耗和外壳涡流损耗值,然后将损耗值作为温度场-流场的激励热源,在考虑边界条件式(17)~(23)和传热控制方程式(9)的前提下,根据热平衡原理,由式(10)~(16)求解得环境因素影响下的 GIL 温度场分布,最后将求得外壳和导体温度与设置的导体和外壳的初始温度进行比对,若误差不满足要求则更新初始温度值然后重新进行电磁场损耗计算,从而实现了温度场-流场与电磁场的耦合。在迭代的过程中,需要根据式(5)~(8)对实时更新材料参数进行。多物理场耦合的具体过程如图 3 所示。

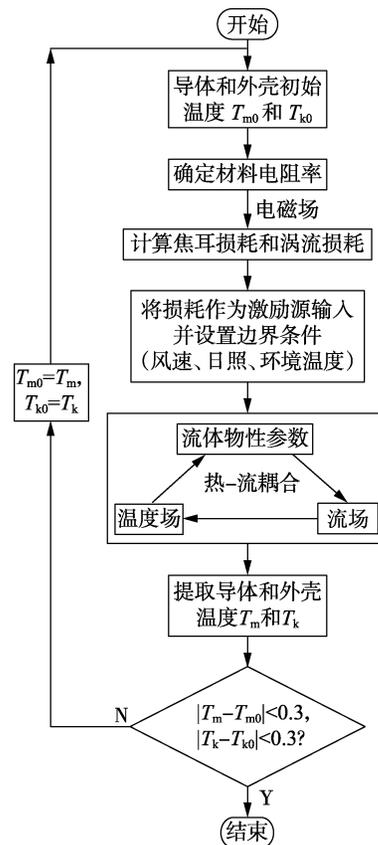


图 3 多物理场耦合过程

Fig.3 Coupling process of multiple physical fields

### 3.2 损耗分布

对二维 GIL 横截面进行有限元建模仿真分析, 得到其导体和外壳的损耗如图 4 所示。

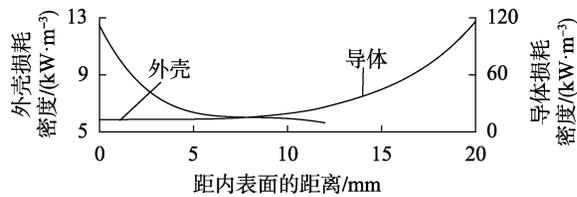


图 4 导体及外壳损耗分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of conductor and shell losses

从图 4 可以看出, 导体和外壳中的电流都存在明显的集肤效应, 导体外表面区域的损耗较大, 而外壳损耗较大的区域却在其内表面部分。

对每个单元进行积分运算, 得到导体和外壳的整个横截面的损耗计算分别为 354.4 W/m 和 130.3 W/m。可以看出导体的损耗值明显大于外壳的损耗值, 说明导体上的焦耳损耗是主要热源。

### 3.3 温度场分布特征与结果验证

将根据电磁场仿真计算得到的损耗结果作为温度场仿真计算的热源进行温度场的仿真, 设置环境温度为 20 °C 时得到其温度场的分布如图 5 所示。

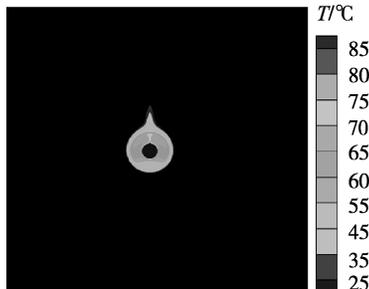


图 5 二维温度场分布

Fig.5 Distribution of two-dimensional temperature field

由图 5 可以看出, 外壳温度为 51.4 °C, 最高温度位于导体正上方, 为 87.4 °C。将二维温度场的仿真结果与文献[14]中实验数据进行对比, 如表 3 所示。

表 3 仿真值与实验值对比

Table 3 Comparison between simulative and experimental values

元件	仿真值/°C	实验值/°C	误差/%
导体	87.4	89.8	2.6
外壳	51.4	53.7	4.3

图 5 中温度场的形成主要是因为导体周围的 SF<sub>6</sub> 气体受热膨胀, 在重力作用影响下其周围气体向上运动, 在触碰到外壳后向两边散开, 在这个过程中 SF<sub>6</sub> 气体不断从导体上带走热量与外壳进行热交换, 最后达到导体-外壳-环境热交换的动态平衡。

## 4 环境影响因素下的温升分析

对于地面敷设和架空敷设 2 种安装方式下的

GIL 输电线路, 其安装的地理环境条件对内部温度场的影响不容忽略, 下面将分别讨论风速、环境温度和日照强度等因素对 GIL 温升的影响, 并与文献[14]中的实验值和参考值进行对照比较。

### 4.1 风速对 GIL 温升的影响

本文主要考虑自然风的作用, 讨论不同风速对 GIL 温升的影响, 图 6 为 2 种不同风速下 GIL 所处的流场分布。

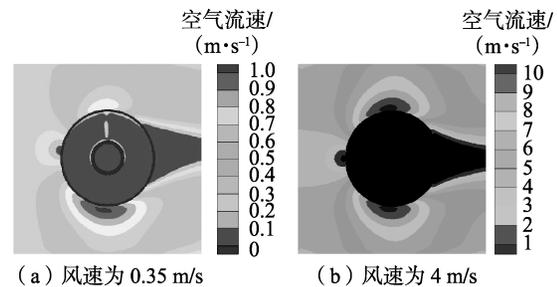


图 6 不同风速下的 GIL 外部流场分布

Fig.6 External flow field distribution of GIL under different wind speeds

从图 6 中可以看出在风速较小时, GIL 外部流场的分布出现上下不对称的分布特征, 这主要是因为上方流速是上升的气流与风速共同作用的结果, 从而导致原本流向因偏移而减小, 而底部主要是风速作用; 相比之下, 风速为 4 m/s 时由于 GIL 腔体上升的气流流速与风速相比较小, 风速占有主导作用, 故外部流场出现上下基本对称的分布现象。通过仿真不同风速对 GIL 内部温升的影响得到温降与风速大小的关系如图 7 所示, 其中温降表示在该风速下的温度与无风下对应温度的差值大小。

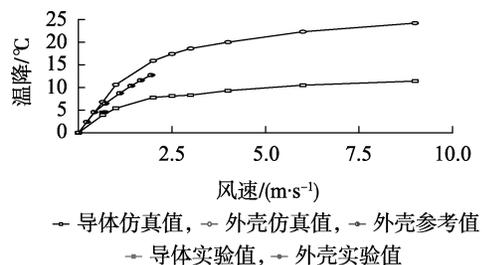


图 7 温降与风速的关系

Fig.7 Relationship between temperature drop and wind speed

在外界风的影响下外壳和导体温度都会呈现下降趋势, 随着风速的增加导体和外壳温降有减缓的趋势并趋于饱和状态, 说明风速对于导体和外壳温度的影响是有一定的限度的, 针对本文中的 GIL 仿真物理模型, 导体和外壳温度分别向 75 °C 和环境温度 20 °C 趋近, 并且同一风速下导体的温降远小于外壳的温降。外界风的存在会影响外壳的换热状态从而影响原有的外壳温度分布, 即外壳热点发生偏移导致温度不再是正弦分布, 如图 8 中虚线所示。图 8 中的圆周距离指以 GIL 右边水平为原点, 逆时针旋转距原点的距离。

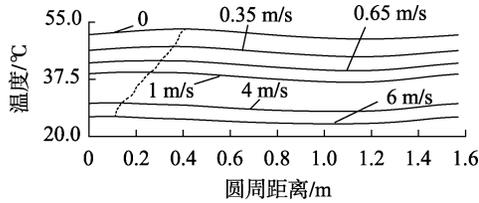


图 8 外壳温度分布与风速关系

Fig.8 Relationship between shell temperature distribution and wind speed

外壳温度和外壳对流换热与辐射散热有关,辐射散热与材料本身的属性直接相关,对流换热系数则随换热过程的变化而变化。外壳的对流换热系数分布如图 9 所示,由图可以看出:在无风环境条件下,外壳正上方的对流换热系数最小,所以外壳正上方温度最高;随着风的出现,外壳的对流换热系数分布发生改变,外壳热点位置发生偏移并逐渐向最小对流换热系数处靠近(图 9 中虚线 C 标示区域),并且对流换热系数最小点的位置也决定了外壳温度热点位置的偏移极限,二者位置较为吻合。

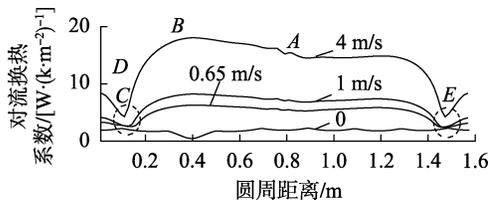


图 9 外壳外表面的对流换热系数分布

Fig.9 Convective heat transfer coefficient of outer surface of shell

外壳外表面的流场分布如图 10 所示。由图可见:在风的强制对流和重力的双重作用下,热气流上升导致由点 A 沿上壁面的流动加快,湍流发展较快,在接近正上方点 B 处的区域为湍流完全发展区,此处的对流换热系数最大<sup>[21]</sup>,随后气流逐渐与壁面分离,到达点 C 后与壁面完全分离,对流换热系数最小,与文献[22]中的脱体点位置较为吻合;在区域 C 到区域 D 的自然对流换热为主导的作用下,对流换热系数出现小幅度的增加;同时沿下壁面的气流在重力作用下受到阻力作用,所以其对流换热系数增加较慢,虽然在点 E 也出现了最小对流换热系数,但流场分布出现了左右不对称的现象。

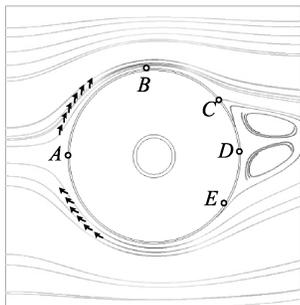


图 10 外壳外表面的流场分布

Fig.10 Flow field distribution of outer surface of shell

由于该位置并非主要换热位置故不会出现热点现象。

#### 4.2 环境温度对 GIL 温升的影响

环境温度也是影响 GIL 正常运行的因素之一,通过仿真不同环境温度下 GIL 内部温度场,得到导体和外壳温度随环境温度的关系曲线如图 11 所示。由图可见,外壳和导体温度随着环境温度的增加呈近似线性增加。

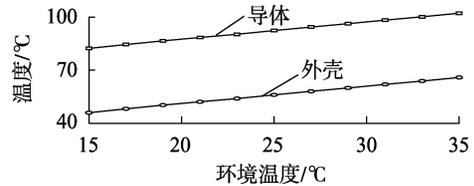


图 11 外壳和导体温度与环境温度关系

Fig.11 Relationship among shell temperature, conductor temperature and ambient temperature

#### 4.3 太阳辐射对 GIL 温升的影响

考虑太阳辐射方向和辐射强度对 GIL 内部温度场的影响,以右边水平位置为起点、逆时针旋转计算太阳辐射角度,得到 GIL 内部温度场如图 12 所示。

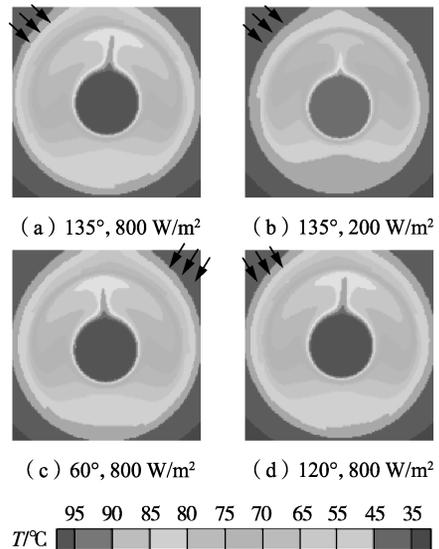


图 12 不同太阳辐射强度和角度下 GIL 温度场分布

Fig.12 Temperature distribution of GIL under different solar radiation intensity and angle conditions

从图 12 中可以看出,在太阳辐射的作用下,GIL 腔体内的温度场向背辐射侧发生偏移,太阳辐射强度越大温度场偏移程度越严重。

根据导体和外壳温度与环境温度呈线性关系,对文献[14]中的实验数据进行处理,得到外壳和导体温升与太阳辐射强度的关系如图 13 所示,由图可见:太阳辐射对外壳温度的影响较大,在太阳辐射强度为  $800 \text{ W/m}^2$  时,导体温度升高  $11.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,外壳温度升高  $14.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

太阳的辐射作用会影响外壳外表面的温度分布及对流换热系数分布,外壳外表面的热点温度向正

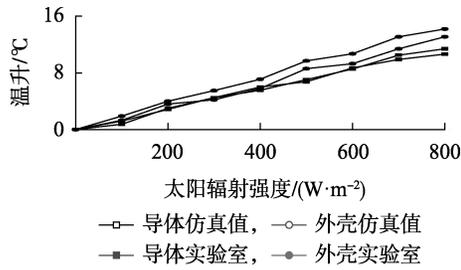


图 13 外壳和导体温升与太阳辐射强度的关系  
Fig.13 Relationship among shell temperature rise, conductor temperature rise and solar radiation intensity

辐射方向靠近,相同的太阳辐射强度下,不同的太阳辐射角度与 GIL 外壳外表面温度分布的关系如图 14 所示,由图可见,不同太阳辐射角度下的外壳外表面温度分布具有对称性,当太阳辐射角度为 90° 时,外壳外表面的热点温度最高。

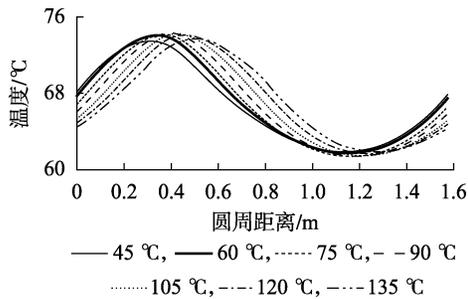


图 14 不同太阳辐射角度下外壳外表面温度分布  
Fig.14 Temperature distribution of outer surface of shell with different solar radiation angle conditions

外壳外表面对流换热系数分布与太阳辐射角度的关系如图 15 所示,由图可见,外壳外表面的对流换热系数随太阳辐射角度呈对称变化,整体上向正辐射侧发生些许偏移。

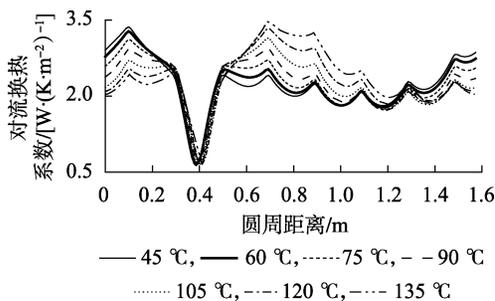


图 15 不同太阳辐射角度下外壳外表面对流换热系数分布  
Fig.15 Distribution of convective heat transfer coefficient of outer surface of shell under different solar radiation angle conditions

通过仿真计算分析得到同一太阳辐射方向(太阳辐射角度为 135°)下外壳外表面温度分布与太阳辐射强度的关系如图 16 所示,图中点划线表示外壳外表面的热点位置。由图可看出,随着太阳辐射强度的增加,外壳外表面热点位置不断向正辐射侧靠近。

外壳外表面的对流换热系数见图 17。由图可

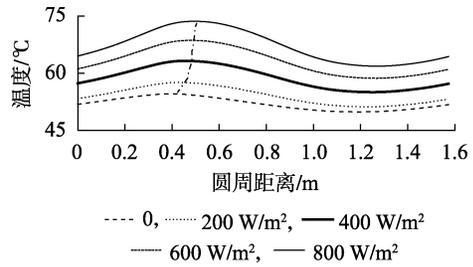


图 16 不同太阳辐射强度下外壳外表面温度分布

Fig.16 Temperature distribution of outer surface of shell under different solar radiation intensity conditions

见,随着太阳辐射强度的增加,外壳的对流换热系数也随之整体增加,特别是太阳直接辐射区域的对流换热系数增加幅度较大,最大对流换热系数在无太阳辐射时为  $2.1 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ ,当太阳辐射强度为  $800 \text{ W}/\text{m}^2$  时,对流换热系数增加到  $3.5 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ 。

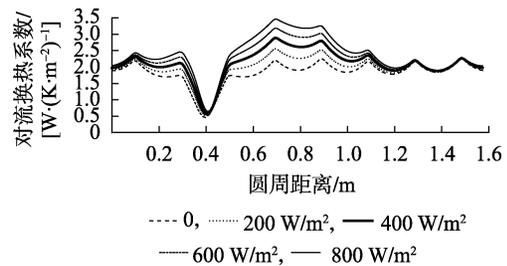


图 17 不同太阳辐射强度下外壳外表面对流换热系数分布

Fig.17 Distribution of convective heat transfer coefficient of outer surface of shell under different solar radiation intensity conditions

#### 4.4 环境因素对不同负荷电流 GIL 温升的影响

上文讨论了在额定工况下环境因素对 GIL 温升的影响,但在实际 GIL 运行中由于其运行负荷电流不为定值,不同的负荷电流将导致 GIL 温升有所差异,下面讨论环境因素对不同负荷电流下 GIL 温升的影响。

由上文可知,外壳和导体温度与环境温度近似呈线性关系,故不再讨论环境温度对不同负荷电流 GIL 温升的影响。

不同负荷电流下不同太阳辐射强度对导体和外壳温升的影响如图 18 所示。由图可见,导体和外壳

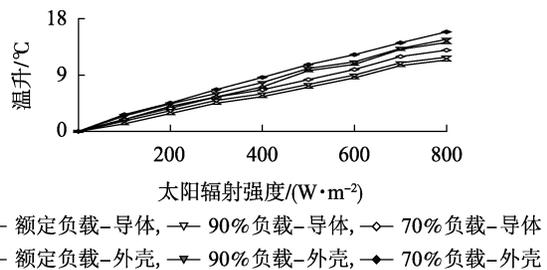
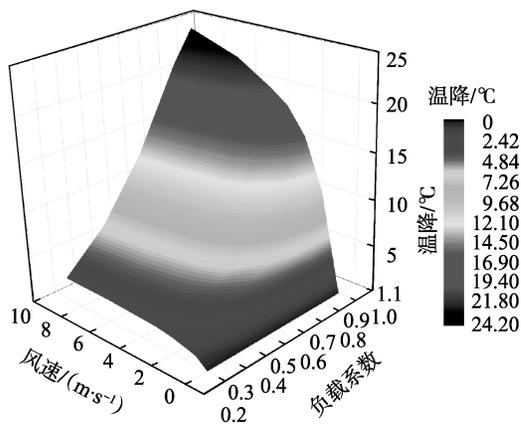


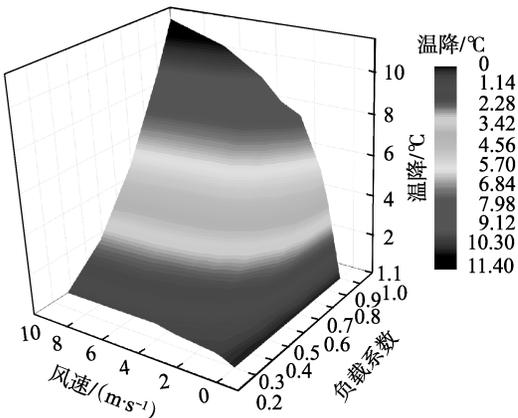
图 18 太阳辐射强度和负荷电流对 GIL 温升影响  
Fig.18 Effect of solar radiation intensity and load current on GIL temperature rise

温度都随着太阳辐射强度的增加而增加,但是对于相同的太阳辐射强度下,导体和外壳温升差随着负载电流的增加而减小,其中对外壳的温升影响较显著。

由 4.1 节可知,额定电流下,风速对于外壳和导体温度的温降都是有限度的。不同负荷电流下,风速对外壳和导体温降的影响如图 19 所示。由图可见,对于外壳和导体温降与负载系数、风速之间的关系趋势大致相同,以外壳温降为例,在额定负载、最大风速 9 m/s 条件下外壳温降达到最大值 24.2 °C,在同一风速下,外壳温降随着负载系数的增大而呈非线性增大,这是由于在小负载电流下 GIL 本身产热量数值较小导致其外壳与环境的温度差较小,即风速的作用使外壳温度接近环境温度降的最大限度也较小,故在小负载下风速对外壳温度的影响作用相对不明显;但是在任何负载系数条件下,风速对外壳温降的作用都比对导体温降的作用显著。



(a) 外壳温降、风速和负载系数关系



(b) 导体温降、风速和负载系数关系

图 19 风速对不同负荷下的 GIL 温降影响

Fig.19 Effect of wind speed on GIL temperature drop under different load conditions

## 5 结论

本文考虑不同负荷 GIL 间的差异性,研究不同环境因素对架空敷设式 GIL 线路温升的影响,得到了如下结论。

a. 风速与 GIL 温降的关系是非线性的,由于风速作用外壳的热点位置向背风侧发生偏移;风速为 0~3 m/s 时,外壳和导体的温度下降较快;当风速高于 3 m/s 时,外壳和导体温度随风速增加而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;风速相同时,GIL 负荷电流越大,导体和外壳温降速度越大。

b. 太阳辐射强度对 GIL 温升的影响基本呈线性关系,且太阳辐射强度对外壳温升的影响更明显,太阳辐射强度相同时,导体和外壳温升差随着负载电流的增加而减小;导体和外壳温度与环境温度基本呈线性关系,导体和外壳的温度差基本为定值。

c. 本文方法可准确分析环境因素(风速、太阳辐射强度等)对 GIL 温升特性的影响,并通过实验验证其准确性和可行性,所得结论可为 GIL 前期的尺寸设计及后期的运行维护检修提供可靠的理论依据。

## 参考文献:

- [1] KOCH H, SCHUETTE A. Gas insulated transmission lines for high power transmission over long distances [J]. Electric Power System Research, 1998, 44(1): 69-74.
- [2] BENATO R, CARLINI E M, MARIO C D, et al. Gas-insulated transmission lines in railway galleries [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 704-709.
- [3] VOLCKER O, KOCH H. Insulation coordination for gas-insulated transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 16(1): 122-130.
- [4] HO S L, LI Y, EDWARD W C, et al. Analysis of three-dimensional eddy current field and thermal problems in an isolated phase bus [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1515-1518.
- [5] 曾雨顺. 智能化 GIS 中 SF<sub>6</sub> 气体在线监测系统研究 [D]. 南京: 国网电力科学研究院, 2013.  
ZENG Yushun. The research of on-line monitoring system of SF<sub>6</sub> gas intelligent GIS [D]. Nanjing: State Grid Electric Power Research Institute, 2013.
- [6] KIM S W, KIM H H, HAHN S C, et al. Coupled finite-element-analytic technique for prediction of temperature rise in power apparatus [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 921-924.
- [7] 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(增刊): 241-244.  
FAN Zhennan, ZHANG Dewei, et al. Electromagnetic field and fluid field calculation and analysis about the loss and heat of GIS bus bar [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(Supplement): 241-244.
- [8] 李洪涛, 舒乃秋, 孙国霞, 等. 基于相似理论与准则关联式的气体绝缘母线电磁场-温度场综合模拟 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 59-63.  
LI Hongtao, SHU Naiqiu, SUN Guoxia, et al. Comprehensive simulation of electromagnetic-temperature field in GIB based on similarity theory and nondimensional correlation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 59-63.
- [9] 范镇南, 张德威, 陈显坡, 等. 用电磁场和流场模型计算 GIS 母线损耗发热 [J]. 高电压技术, 2009, 34(12): 3016-3021.  
FAN Zhennan, ZHANG Dewei, CHEN Xianpo, et al. Calculation of loss and heat of GIS bus bar using electromagnetic field and fluid

- field[J]. High Voltage Engineering, 2009, 34(12): 3016-3021.
- [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. Thermal field calculation and analysis of gas insulated busbars based on fluid multiple species transport[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 141-147.
- [11] 金向朝, 谢志杨, 刘秀甫, 等. 基于有限元法的三相同壳结构GIS母线热分析[J]. 武汉大学学报, 2013, 46(5): 654-658.  
JIN Xiangzhao, XIE Zhiyang, LIU Xiufu, et al. Thermal analysis of three-phase enclosed GIS bus bar based on finite-element method[J]. Journal of Wuhan University, 2013, 46(5): 654-658.
- [12] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及相关因素研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 65-72.  
WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Thermal rise numerical calculation and correlative factors analysis of gas-insulated transmission lines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 65-72.
- [13] 张扬, 舒乃秋, 罗晓庆. 基于有限元法的直埋式气体绝缘输电线路温升数值计算与分析[J]. 武汉大学学报, 2015, 48(6): 820-825.  
ZHANG Yang, SHU Naiqiu, LUO Xiaqing. Temperature rise numerical calculation and analysis of gas-insulated transmission lines based on finite element method[J]. Journal of Wuhan University, 2015, 48(6): 820-825.
- [14] MINAGUCHI D, GINUO M, ITAKA K, et al. Heat transfer characteristics of gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(1): 2-9.
- [15] HO S L, LI Y, LIN X, et al. Calculations of eddy current, fluid, and thermal fields in an air insulated bus duct system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1433-1436.
- [16] 宋凡, 申春红, 林莘, 等. 800 kV GIS 隔离开关磁场-温度场计算与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1383-1388.  
SONG Fan, SHEN Chunhong, LIN Xin, et al. Calculation and analysis on magneto-thermal fields of 800 kV GIS disconnecter[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1383-1388.
- [17] 孙国霞, 关向雨, 金向朝, 等. 基于多场耦合计算的气体绝缘开关设备母线接头过热性故障分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3445-3451.  
SUN Guoxia, GUAN Xiangyu, JIN Xiangchao, et al. Temperature rise calculation and overheating fault analysis of gas insulated switchgear bus connector based on coupled field theory[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3445-3451.
- [18] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2006: 2-8.
- [19] HAM J K, KIM Y K, KIM J S, et al. Heat transfer in gas-insulated bus bars[C] // Proceedings of the ASME Summer Heat Transfer Conference. Las Vegas, USA: ASME, 2003: 453-459.
- [20] WU Xiaowen, NAI Qishu, LI Hongtao, et al. Contact temperature prediction in three-phase gas-insulated bus bars with the finite-element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 277-280.
- [21] 于承训. 工程传热学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1990: 89-98.
- [22] 章熙民, 任泽需, 梅飞鸣. 传热学[M]. 6版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 111-123.

#### 作者简介:



周利军

周利军(1978—), 男, 浙江萧山人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 通信作者, 主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的研究(E-mail: zhoulj@swjtu.cn);

张汎培(1992—), 男, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事 GIL 温度场方面的研究(E-mail: 1656592704@qq.com)。

## Simulation and analysis of GIL temperature rise characteristics under effects of environmental factors

ZHOU Lijun, ZHANG Jipei, WANG Pengcheng, QIU Qiwei, HE Jian, LIU Dongcai

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to study the influence of different environmental factors on temperature rise characteristics of overhead GIL (Gas-Insulated metal enclosed transmission Line), an electromagnetic-thermal-flow coupling model is established, with which, the temperature variation characteristics of GIL shell and conductor, the convective heat transfer coefficient of shell surface and the difference of GIL temperature rise under different environmental factors are analyzed. The results show: the relationship between wind speed and GIL temperature drop is non-linear; if wind speed is in the interval of 0 to 3 m/s, the temperature of shell and conductor decreases rapidly; when wind speed is bigger than 3 m/s, the temperature decrease of shell and conductor becomes smaller along with the increase of wind speed, and finally keeps a stable value, the shell temperature is gradually close to the environmental temperature; when wind speed is the same, the bigger GIL load current is, the greater conductor and shell temperature drops; the effect of solar radiation intensity on GIL temperature rise is basically linear and more obvious on temperature rise of shell; under the same solar radiation intensity, the difference of temperature rise between conductor and shell decreases along with the increase of load current; the temperature of conductor and shell is basically linear with the environmental temperature.

**Key words:** GIL; coupling; losses; temperature rise; environmental factors