

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2026.03.002

# 气体绝缘输电线路温升响应与带电考核试验

董轩宇<sup>1</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 张森<sup>1</sup>, 张潮海<sup>1</sup>, 陈晓鸣<sup>2</sup>, 张小武<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106; 2. 江苏安靠智能输电工程科技股份有限公司, 江苏 常州 213300; 3. 江苏南瑞恒驰电气装备有限公司, 江苏 无锡 214100)

**摘要:** 气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)运行于高电压、大电流环境,其温升特性受多物理场共同作用影响。然而,传统的GIL温升分析方法仅考虑电流大小与理想简化模型带来的影响,无法有效判断GIL是否存在异常温升响应。为此,文中基于多物理场耦合策略,对GIL关键部件的温升特性展开研究。首先,建立磁-热-流体耦合理论,并完成GIL的有限元与实体模型构建;然后,考虑触头接触电阻的影响,开展工频稳态下的温升特性研究,揭示GIL关键部件温升响应规律;最后,通过带电考核试验,验证模型与温升响应结论的有效性。文中提出一种220 kV GIL响应关联模型,即指出导体温度与壳体顶端平均温度、运行电流的关系,并与实验值进行对比,结果表明该模型具有较高精度,可作为实际工程中GIL导体温度的经验计算方法。

**关键词:** 气体绝缘输电线路(GIL);多物理场耦合;有限元模型;温升响应;带电考核试验;响应关联模型

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2026)03-0011-09

## 0 引言

气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)是一种新型输电线路<sup>[1-2]</sup>,具有可靠与环境兼容等显著优势<sup>[3]</sup>,已成为高电压电网建设的核心装备<sup>[4]</sup>。2014年,溪洛渡水电站开始投运550 kV GIL,是目前世界上线路最长、垂直高差最大的GIL工程。2019年,苏通GIL综合管廊工程(淮南—南京—上海)实现了长距离、大规模特高压GIL工程的世界首次应用<sup>[5-6]</sup>。然而,GIL研究基础起步较晚<sup>[7]</sup>,在运行过程中,GIL的异常温升响应会导致热老化问题频发,甚至造成绝缘老化和热击穿,危及设备本身及整个电力系统的安全<sup>[8]</sup>。

迄今,国内外学者针对GIL设备温升特性进行了大量研究。文献[9]采用体积元法进行二维轴对称模型的热传递分析,建立焦耳损耗和热性能二者间的平衡模型,揭示了不同瞬态条件下的温度分布和能量损失,但精度不高。文献[10]提出一种基于能量守恒的节点解析法,能够快速且准确地测试GIL表面温度,该方法在数值计算上具有较高精度,但仅局限于固定部位温度分布,不具有连续性。文献[11]采用有限元法对第二代GIL进行温升仿真计算,并与解析法得到的温升情况进行对比,得到基于标准模块设计的GIL温度分布规律,但流场的处理仍然影响着计算精度。文献[12]建立磁-热-流

三维对称有限元仿真模型,研究气体压强和电流对温度分布的影响规律,但未考虑多种条件因素的影响。文献[13]采用多组分传输理论,将SF<sub>6</sub>与空气的物理性参数进行线性组合,建立包含外部空气的GIL仿真模型,实现单一模型存在不同流体时的换热分析,但模型外部仅采用了环境温度单一边界条件。文献[14]针对1100 kV环保气体特高压母线构建磁-流-热多物理场耦合数值计算模型,同时搭建通流温升测量试验平台,分析多种因素对温升的影响,但未涉及三维模型且未考虑外界环境因素。文献[15]在电磁场-流场-热场耦合基础上,引入外部多重边界条件,以控制变量法得到不同因素对GIS母线温度分布的影响规律,但基于二维模型,无法考虑管道内轴向热对流对温度分布的影响。文献[16]构建磁-热-流耦合仿真模型,获得GIL中三支柱绝缘子在额定电流下的温度分布,但尚未对其他关键部位展开研究。文献[17]研究额定电流下温度场分布以及不同通流水平下导体和铝合金外壳顶部温升关系,并通过实际工程试验加以验证,但未提及温度场的三维分布特征。文献[18]提出一种考虑环境因素和负荷电流的热稳态场计算方法并进行了实验验证,但建立的模型基于户内用的三相共箱式GIL,对外界环境因素所致影响考虑不全。文献[19]建立触头三维耦合模型,研究不同对接角度下触头温升特性和温度场分布,但仅对GIL触头展开研究,未涉及其他关键部件,且未开展实验验证。

综上,GIL的温升特性响应研究仍存在诸多难

收稿日期: 2025-07-10; 修回日期: 2025-09-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF0611304); 江苏省重点科技成果转化项目(BA2022212)

题: (1) 目前研究重点针对 GIL 壳体管道中温度场分布, 缺少对 GIL 触头、绝缘子等关键部件的研究; (2) 传统的温升响应研究策略仅局限于特定结构; (3) GIL 导体温升响应缺少适用性广且精确的理论公式支撑; (4) GIL 造价高, 且运行于高压大电流环境, 开展模型的实验验证困难。

为此, 文中提出一种精度高、适用性广的温升响应研究策略, 针对 GIL 的关键部件(导体、触头、壳体以及绝缘子)开展研究, 进行带电考核试验, 并首次构建 GIL 温升响应的关联模型, 旨在为 GIL 的安全运行与异常温升监测提供重要保障与科学指导。

## 1 多物理场耦合模型

### 1.1 电磁理论

在准静态条件下, 引入磁矢量  $\mathbf{A}$  作为参变量。麦克斯韦方程组可表示为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \\ \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{H}$  为磁场强度;  $\mathbf{E}$  为电场强度;  $\mathbf{B}$  为磁感应强度;  $\mathbf{J}$  为导体电流密度。

结合定解  $\nabla \times \mathbf{A} = 0$ , 可得电磁场控制方程<sup>[20]</sup>:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu_0 \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

式中:  $\mu_0$  为材料的磁导率。

有限元分析处理后, 可得到导电区域单个处理单元  $e$  内的电流  $I_e$  与损耗  $P_e$ <sup>[21]</sup>, 分别为:

$$I_e = \iint_{S_e} \mathbf{J}_e \cdot d\mathbf{x}dy \quad (3)$$

$$P_e = I_e^2 \frac{L_f}{\sigma_e S_e} \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{J}_e$  为处理单元  $e$  的电流密度;  $S_e$  为该处理单元  $e$  的面积;  $L_f$  为二维平面计算区域的轴向长度;  $\sigma_e$  为处理单元  $e$  内材料的电导率。

该平面导电区域内损耗  $P_c$  为:

$$P_c = \sum_{e=1}^k P_e \quad (5)$$

式中:  $k$  为该导电区域内单元总数。

### 1.2 热场及流体理论

导体、壳体与绝缘子等相互接触的部分以热传导的方式传递热量。热传导的微分控制方程<sup>[22]</sup>为:

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v = \rho_s C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

式中:  $\lambda$  为固体介质的导热系数;  $T$  为待求温度;  $q_v$  为体积热量;  $\rho_s$  为固体密度;  $C$  为固体恒压热容。

在 GIL 腔体内充有绝缘用  $\text{SF}_6$  气体, GIL 外部金属壳体与空气直接接触, 绝缘气体因长时间通入电流导致发热, 从而存在温度差, GIL 内部气体可视为自然对流。流体的稳态流动方程<sup>[23]</sup>具体如下:

(1) 质量守恒方程。

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (7)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $\mathbf{u}$  为流体速度矢量。

(2) 动量守恒方程。

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - p \mathbf{I}] + \mathbf{F} \quad (8)$$

式中:  $\mu$  为动力粘度;  $p$  为流体周围压强;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mathbf{F}$  为重力矢量。

(3) 能量守恒方程。

$$\rho c \mathbf{u} \cdot \nabla T = k_1 \nabla^2 T + Q \quad (9)$$

式中:  $c$  为流体比热容;  $k_1$  为流体导热率;  $Q$  为热流密度。

GIL 热辐射过程的控制方程描述如下:

$$q = \varepsilon (\sigma T^4 - G) \quad (10)$$

$$J_0 = (1 - \varepsilon) G + \varepsilon \sigma T^4 \quad (11)$$

式中:  $q$  为净辐射热通量;  $\varepsilon$  为辐射源表面发射率;  $\sigma$  为斯特藩-玻尔兹曼常数, 一般取  $5.67 \times 10^{-8}$ ;  $J_0$  为流出辐射热通量;  $G$  为表面投入辐射热通量。

### 1.3 温升响应策略

基于上述多物理场耦合模型的直接推导, 按以下步骤进行温升响应研究, 图 1 为研究框图。

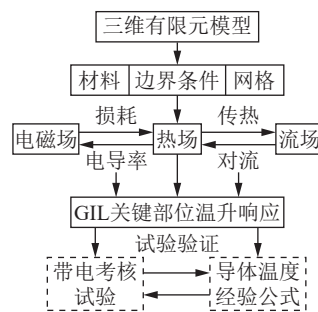


图 1 GIL 温升研究框图

Fig.1 Block diagram of temperature rise response study for GIL

步骤 1: 依托实际工程, 构建三维有限元模型。

步骤 2: 设置材料属性及模型边界条件, 构建多场耦合关系, 同时将各部分按照模型尺寸构造成不同大小的自由四面体网格。

步骤 3: 根据计算求解所得结果, 如云图、曲线等进行分析。

步骤 4: 开展带电考核试验, 进行温升测试, 验证所提模型的有效性。

步骤 5: 基于计算所得数据, 拟合出导体温度经验公式, 并与试验相互验证。

## 2 温升响应

基于 1.3 节所提温升响应策略, 采用 SOLIDWORKS 2023 完成三维模型构建, 并选择 COMSOL Multiphysics 6.2 进行多物理场耦合计算, 揭示 GIL 在工频稳态电流和过载电流下关键部件的温升响应特性。

### 2.1 有限元模型与设置

依托实际工程, 构建 GIL 实体模型, 如图 2 所示, 几何参数见表 1。

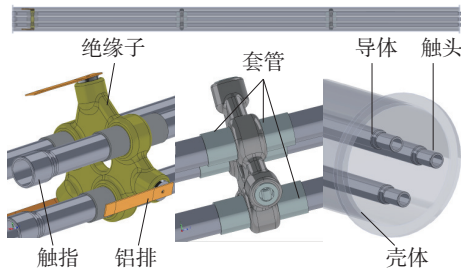


图 2 三相共箱 GIL 三维模型

Fig.2 Three-phase integrated enclosure GIL 3D model

表 1 GIL 几何参数

Table 1 Geometric parameters of GIL

参数	数值/mm
壳体外半径	313
壳体内半径	305
导体外半径	50
导体内半径	40
导体偏心距	151

因绝缘气体 SF<sub>6</sub> 相关热力学参数对温度具有敏感性<sup>[24]</sup>, 故将其密度 ρ<sub>g</sub>、热导率 λ<sub>g</sub> 及恒压热容 c<sub>g</sub> 设为关于温度的函数, 具体见式 (12), 同时为避免三维仿真计算量大导致耦合困难和耗时过长, 其他材料参数设定为恒定值 (20 °C), GIL 不同部件热力学参数由设备制造厂家提供, 具体见表 2。

$$\begin{cases} \rho_g(T) = -1.987 \times 10^{-7} T^3 + 4.082 \times 10^{-4} T^2 - 0.224 3T + 63.25 \\ \lambda_g(T) = -1.8 \times 10^{-7} T^2 - 9.02 \times 10^{-5} T + 0.02 \\ c_g(T) = -1.662 \times 10^{-9} T^4 + 5.754 \times 10^{-6} T^3 - 7.556 T^2 + 4.364 T - 214.542 \end{cases} \quad (12)$$

表 2 相关材料热力学参数

Table 2 Relevant material thermodynamic parameters

材料	密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	热导率/ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	恒压热容/ [J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]
铝合金	2 610	213.5	904
环氧树脂	980	0.21	2 000

研究考虑磁-热耦合关系, 将导体的电导率 σ<sub>Al</sub> 设置为与温度相关的函数<sup>[22]</sup>, 见式 (13), 以充分反映温度分布, 同时兼顾研究的完整性与仿真的精确性。

$$\sigma_{Al} = \frac{3.53 \times 10^7}{1 + 0.004(T - 293)} \quad (13)$$

触头与导电回路中不同导体电连接部位之间有接触电阻, 一组接触面由多个并联触点构成, 其等效电路如图 3 所示。

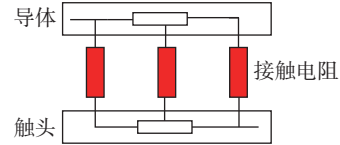


图 3 接触电阻等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of contact resistance

导体处接触电阻也是 GIL 热源之一, 文中为充分模拟实际工况, 以厂家设备中触头部位为例进行实体化建模, 以参数赋值的方式将其纳入仿真计算中, 即:

$$R = \frac{\rho_0 l}{S} \quad (14)$$

$$k_2 = \frac{LT}{\rho_0} \quad (15)$$

式中:  $R$  为接触电阻阻值;  $\rho_0$  为电阻率;  $l$ 、 $S$  分别为等效接触电阻的长度和横截面积;  $k_2$  为接触电阻热导率;  $L$  为洛伦兹数。

在温度场模拟中, 假设大气边界温度不受管道温度场影响, 环境温度恒定, 在壳体上方添加平行射线辐射源来模拟太阳辐射, 具体辐射强度依据带电考核试验现场太阳辐射热通量测量结果设置。

最后, 以对流热通量模块模拟真实环境中壳体与外界环境间对流换热。GIL 为同轴圆柱型管道, 故选取长水平圆柱外部自然对流方式, 直径为 626 mm, 外部流体为空气。

### 2.2 电磁特性

在温度场计算中, 需要将电磁场计算所得焦耳损耗作为热源载荷。为此, 首先对 GIL 电磁特性进行分析, 图 4 为初始时刻 GIL 截面电磁特性。此时 A 相导体相位为 0°, 电流过零点, 导体附近为其余两相的感应磁通, B、C 两相磁通密度由导体外壁面向外不断减小, 壳体上感应出少量磁通 (<5 mT)。由于集肤效应和临近效应, 导致导体电流密度分布不均匀, 以 B 相导体为例, 实际电流密度模值分布范围为内壁 1.26 A/mm<sup>2</sup> 到外壁 1.47 A/mm<sup>2</sup> 之间, 临近 B 相壳体电流密度模值分布范围为内壁 0.39 A/mm<sup>2</sup> 到外壁 0.02 A/mm<sup>2</sup> 之间, 可知外壳内壁感应电流大

于壳体外壁。以 B 相导体中心为起点, 经 A 相导体中心作射线至壳体, 路径上的磁通密度变化和电流密度变化见图 5, 可知在导体外壁周围磁通密度最大, 导体内壁周围磁通密度几乎为 0, 远离导体处, 磁通密度不断减小。因 A 相导体有感应电流, 故 220 mm 处磁通密度略有上升, 之后不断衰减至壳体处, 近似为 0 T, 在距离导体内半径 3 mm 处电流密度迅速降低。电磁特性规律与文献[12]吻合, 证明了计算的正确性。

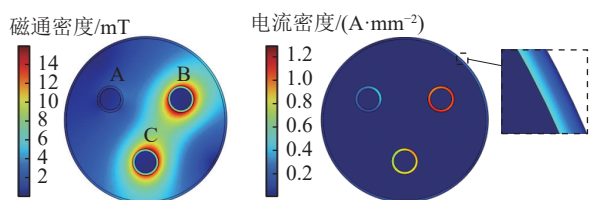


图 4 磁通密度和电流密度分布

Fig.4 Magnetic flux density and current density distribution

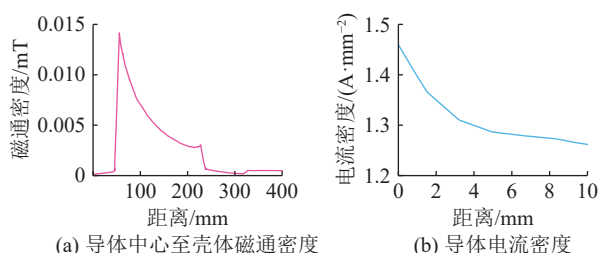


图 5 不同路径长度下磁通密度和电流密度分布  
Fig.5 Magnetic flux density and current density distribution under different path lengths

### 2.3 温升特性

#### 2.3.1 4 500 A 工频电流温升特性

仿真条件下, 导体内通入 4 500 A 的工频交流电时, 套管和导体稳态温度分布见图 6。

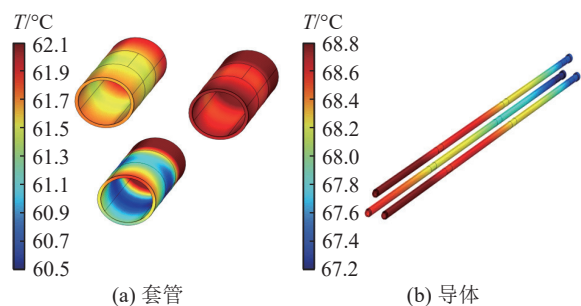


图 6 套管与导体温度分布

Fig.6 Temperature distribution of casing and conductor

由图 6(a)可知, 套管最高温度为 62.1 °C, 最低温度为 60.5 °C, 每个套管最低温度均出现在中间部位, 这是因为此处为绝缘子所包裹, 而其余部位裸露在 SF<sub>6</sub> 气体中, 固体传热效果高于气体。因导体上方流速相对较快, 传热效果良好, 故各元件正上方温度要高于下方温度。图 6(b)为三相导体温度

分布云图, 可以看出每相导体整体温度分布趋势保持一致, 温度均由触头端向触指端均匀递减, 最高温度为 68.8 °C, 位于 B 相导体触头端部, 最低温度为 67.2 °C, 位于 C 相导体触指尾部。同一导体上触头与触指最高温度差为 1.6 °C, 这是因为触指与触头所用材料不同, 触头处接触电阻更大, 导热、导电性有差异。传统模型无法考虑接触电阻影响, 认为导体温度恒定, 但计算结果显示导体温度呈明显阶梯状分布, 最高热点为临近触头部位。

图 7 为三相导体触头温度分布, 可以看出每个触头温度呈现出拧入导体位置越深而温度越低的温升分布规律, 最大温差在 0.65 °C 以内。因气体热对流及热传导影响, A、B 两相触头温度高于 C 相触头温度。

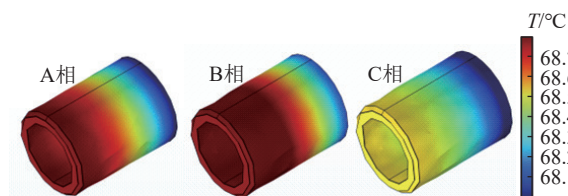


图 7 触头温度分布

Fig.7 Contact temperature distribution

图 8 为 GIL 壳体顶端与底端轴向温度分布, 壳体顶端最高温度为 44.74 °C, 出现在路径长度 8.4 m 处, 同时在路径长度 4.6 m 处也存在温度的一个高峰点, 温度为 44.23 °C, 这 2 处均为管道内部绝缘子位置处, 沿绝缘子两侧温度下降, 且呈平缓趋势, 在 0.4 °C 内浮动, 平均温度为 41.51 °C。在 0.2 m 处壳体温度有所下降, 这是因为该位置有铝排模拟焊接在壳体上, 吸收部分热量, 改变了内部温度梯度分布, 此处最大峰值为 42.16 °C。壳体底端因无太阳辐射和热对流速率缓慢, 导致整体温度低于壳体顶端, 变化趋势与壳体顶端大致相同, 但在峰值点温度分布略有差异, 平均温度为 31.39 °C。

由上述分析可知, 在单元段 GIL 管道内, 有绝缘子处温度明显高于其他位置, 因此对 GIL 内部绝缘子开展瞬态分析, 不同时刻下绝缘子的温度分布见图 9。随着时间推移, 绝缘子整体温度在不断变化且呈升高趋势, 绝缘子的温度同时受到套管与绝缘子之间热传导和 SF<sub>6</sub> 气体热对流影响, 与导体上套管紧密接触位置的部分存在明显的高温热点, 在 8 h 时, 能看到高温导体使绝缘子在局部位置处有明显红温, 而在绝缘子端部金属嵌件处温度约为 39 °C, 二者仍有较大差距。

#### 2.3.2 不同电流下温升时变特性

在工频稳态电流(4 500 A)下, GIL 在一定时间

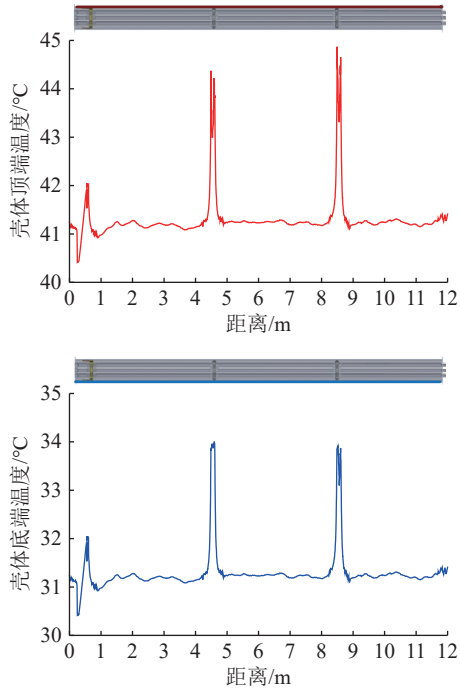


图8 壳体顶端与底端温度分布

Fig.8 Temperature distribution at the top and bottom of the enclosure

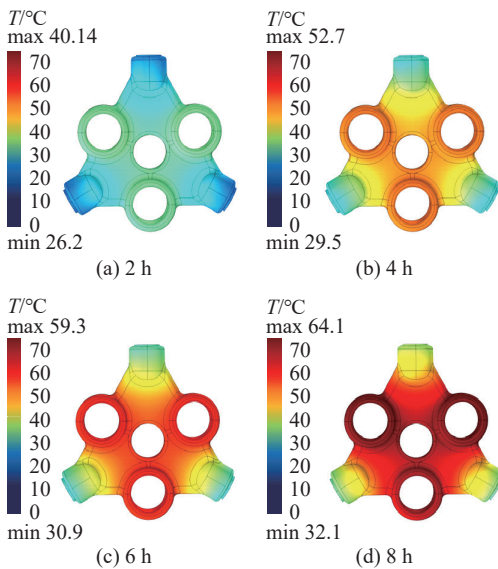


图9 绝缘子温度分布

Fig.9 Temperature distribution of insulator

内可能过载运行,考虑当过载电流为稳态电流的1.2倍时(5 400 A),GIL相关部位的温升特性。负载电流和导体、壳体平均温度随时间的变化情况见图10,GIL通流后,导体和壳体温度呈上升趋势,且导体温升更剧烈,前4 h内二者温升均较快,导体温升为41.6 °C,壳体温升为19.4 °C,在6~8 h内,二者温升速率较慢,导体温升为3.4 °C,壳体温升为1.2 °C,曲线趋于平滑,可以认为在8 h后温度达到稳态。导体稳态温升为47.2 °C,壳体稳态温升为22.4 °C。在此基础上,将电流提升至5 400 A,由蓄热效应可

知导体与壳体温度进一步持续上升,因起始温度较高,二者在后8 h温升速率低于前8 h的温升速率,在提升电流4 h后曲线趋于平稳,可认为系统温度达到稳态,相较于8 h时导体稳态温升为10.1 °C,壳体温升为5.3 °C。

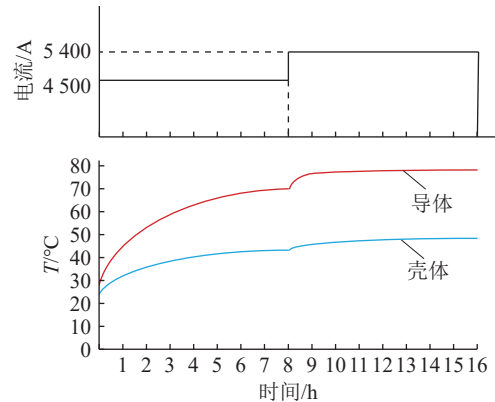


图10 导体及壳体温升时变曲线

Fig.10 Time-varying temperature rise curves of conductor and enclosure

### 3 试验验证

#### 3.1 GIL 带电考核试验平台

基于220 kV GIL试验平台进行带电考核,长期施加220 kV额定电压,确定温升测试方案,开展GIL外壳温升测试技术研究,观察GIL在长时间施加额定电压、大电流情况下是否存在设计及安装缺陷、异常发热等情况。单元结构主要包括8 m直线单元(2节)和12 m直线单元(4节)、90°直角单元(10组)、热胀冷缩补偿单元(2组)、隔离单元(2组)、角度补偿单元(1组)等多种型式。安装后的GIL主体长度约为105 m,试验辅助回路约为20 m,在分支母线上安装三相电流源施加电流,同时用三相电压源在出线套管连接处施加三相电压。现场试验平台见图11。



图11 GIL 试验平台

Fig.11 Experimental platform of GIL

#### 3.2 温升测试及模型验证

为验证模型计算的有效性,开展带电考核试

验。试验中, 220 kV GIL 加载 4 500 A 工频交流电, 为准确测量壳体上下侧温度分布, 在固定位置进行标记, 共标记 48 个测温点, 各测量点布置及相关位置示意图 12, 于当天 04:00 在导体中加载 4 500 A 工频交流电, 13:00 时提升电流至 5 400 A, 壳体温度缓慢上升, 实时测量环境温度, 当壳体温度连续 2 h 内温升小于 0.5 °C 时, 开始测量温度。每个测量点使用贴片式热电偶温度计(型号 YET-610/610L)测温, 测量精度为 0.01 °C, 导体温度测试采用手持式红外射线成像仪, 测量范围为-20~500 °C, 精度为 0.1 °C。探头与测量点之间用铝箔胶进行固定, 测量 3 组数据, 取平均值记录。

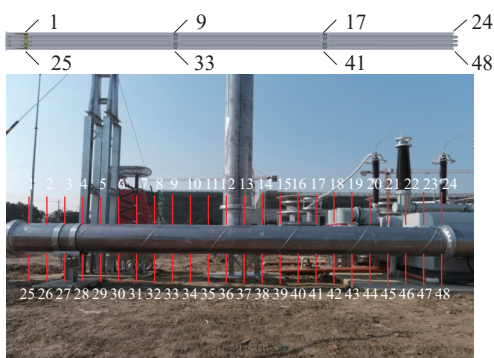


图 12 GIL 壳体测温点布置  
Fig.12 Temperature measurement point of GIL enclosure

鉴于环境温度与仿真设置的初始环境温度存在差异, 文中对相关量作修正处理, 在一定温度范围内, 环境温度与壳体温度呈线性关系<sup>[15]</sup>, 因此采用线性温度修正法。修正温度  $T_c$  为:

$$T_c = T_m + (T_i - T_a)k_1 \quad (16)$$

式中:  $T_m$  为实际测量温度;  $T_i$  为初始温度, 为 20 °C;  $T_a$  为测量时刻环境温度;  $k_1$  为修正系数, 取 0.436。

12:00 时 4 500 A 电流传热至稳态, 环境温度为 26 °C, 48 个测量点温升测试结果如图 13 所示, 壳体顶端平均温度为 41.65 °C, 壳体底端平均温度为 32.03 °C, 均高于仿真计算值的平均值, 说明实际情况下温升可能会更高。

部分测温点在 4 500 A 及 5 400 A 带电考核温升试验下 8 h 内温度变化曲线见图 14。可知, 部分测温点温度在不同电流等级下均在 7 h 后达到相对稳定的状态。其中, 在 4 500 A 电流条件下, 壳体顶端测量点 1、9、17 处温升分别为 21.53、23.76、24.21 °C, 壳体底端测量点 25、33、41 处温升分别为 12.63、13.78、13.56 °C。且上方测量点在同一时间下温度数值较为分散, 下方测量点则较为集中, 说明上方温度变化差异较大。同一位置处上下测

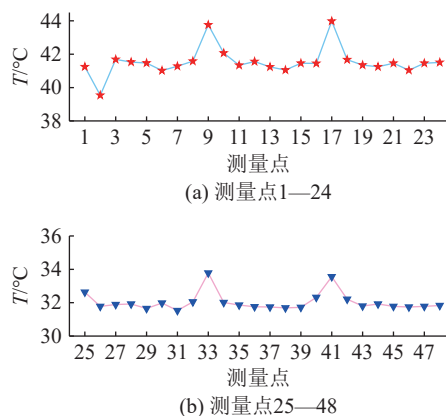


图 13 不同测量点温度测试结果

Fig.13 Temperature test results at different measuring points

量点温升差异随电流增大而增大, 以测量点 1 和测量点 25 为例, 由 4 500 A 条件下的 8.9 °C 增大到 5 400 A 条件下的 11.52 °C, 说明运行电流越大, GIL 发热越严重。

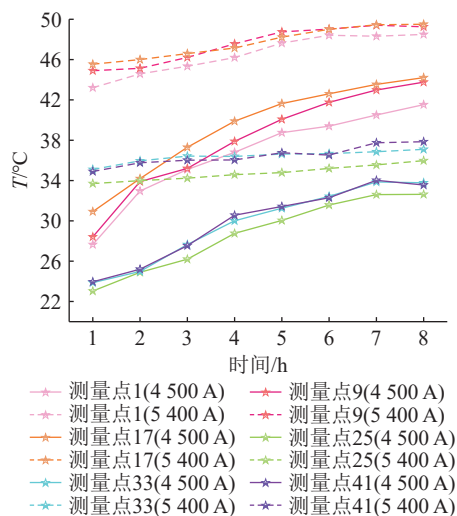


图 14 不同电流条件下测量点温度时变曲线

Fig.14 Time-varying temperature curves at measuring points under different current conditions

各测量点试验测量结果与仿真计算结果的误差见图 15(仿真结果通过校准材料导热系数与对流边界条件实现高精度匹配, 实际工程应用中需要考虑绝缘材料参数分散性及环境波动的影响)。可以看出各测量点的误差均在 5% 之内, 且误差多数为正值, 说明实际温度略高于仿真计算。测量点 2、9、25 处误差较大, 分别为 3.6%、4.2% 和 4.6%。因实际试验情况复杂, 主要误差来源如下: (1) 难以精确测量试验点位置处温度, 且受温度传感器接触与长距离空间成像影响造成的测量误差也难以避免, 具有一定随机性; (2) 现场微小风速、空气湿度等因素不可控; (3) 为方便计算, 建模过程简化了焊接在壳体内侧的铝排, 忽略了铝排的传热特性及涡流

损耗对发热的影响;(4)为节约资源,仿真模型仅考虑单节 GIL 单元段,无法充分反映多节不同结构单元段间相互作用;(5)材料参数设定与实际存在一定差异,且可能忽略温度依赖性影响。

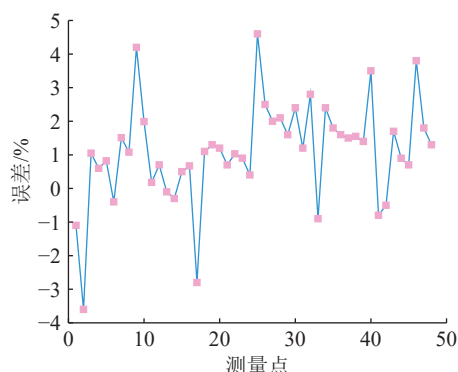


图 15 仿真计算与温升测试结果误差

Fig.15 Errors between simulation calculation results and temperature rise test results

#### 4 GIL 导体温度经验判定方法

鉴于光照强度、环境温度都是通过壳体温度间接作用于导体,可将壳体温度视为导体温度的相关函数。导体温度主要来源于电流产生的焦耳热,故与电流大小密切相关。导体产生的焦耳热也会引起壳体温度的变化,且壳体顶端温度高于底端,壳体顶端温度受太阳辐射及导体电流影响更高,同时上方导体温度大于下方导体,横向导体温度差异可忽略不计,这与文献[25-26]研究结果相符。故文中聚焦于最高导体温度,引入外壳顶端平均温度,基于仿真所得数据,对导体温度与壳体顶端平均温度和运行电流三者数值进行拟合。以 A 相导体为例,可得到经验公式:

$$T_A = 0.573I_A^2 + 0.982I_A + 1.316T_p - 1.84 \quad (17)$$

$$R^2 = 0.978 \quad (18)$$

式中:  $T_A$  为 A 相导体平均温度;  $I_A$  为 A 相导体运行电流;  $T_p$  为壳体顶端平均温度;  $R^2$  为决定系数,  $R^2$  越接近 1, 则经验公式拟合效果越好。

文中通过搭建的带电考核试验平台,对上述拟合的经验公式有效性进行验证,温升测量方法与 3.2 节相同。12:00 时测试结果发现,壳体顶端平均温度为 49.76 °C, 导体温度为 76.6 °C。于当天 13:00—21:00 施加 5 400 A 运行电流,至热平衡后测量发现,壳体顶端平均温度为 47.32 °C, 导体温度为 80.7 °C。实测结果与计算结果对比见表 3。

结果表明,测量与计算结果有微小偏差,证明了经验公式的有效性。

表 3 GIL 导体温度计算与试验结果对比

Table 3 Comparison of simulation and test results of GIL

电流/A	导体测量值/°C	公式计算值/°C	绝对误差值/°C	相对误差值/%
4 500	76.6	79.67	3.07	4.0
5 400	80.7	82.44	1.74	2.2

#### 5 结论

文中基于 220 kV GIL 大电流带电考核试验平台,研究了不同电流下 GIL 温升特性,仿真计算了 GIL 关键部件温度分布,通过仿真模拟与带电考核试验验证了仿真的合理性。具体结论如下:

(1) 仿真计算发现接触电阻会引起导体局部温升升高, GIL 温度最高为 68.8 °C, 出现在导体触头处。壳体上、下侧均有温度峰值,且壳体上方与下方平均温差为 10.12 °C。同时温升测试发现实际测量值略高于理论计算值,需要重点关注实际现场温升情况。

(2) 基于有限元软件建立磁-热-流耦合分析模型,并通过大电流下带电考核试验,分析对比了仿真计算与试验结果,结果表明二者吻合度较好,最大误差为 4.6%,证明了计算方法有效性。

(3) 文中利用导体温度与壳体顶端平均温度和运行电流三者之间数值关系,给出了工程中 220 kV GIL 导体温度经验计算公式,可有效估算导体温度。

后续将利用已有研究基础,紧密围绕 GIL 带电考核试验平台,重点聚焦于热老化与绝缘性能之间关系,同时结合材料加速老化实验和微观表征技术,深入探究热老化对绝缘性能的影响。

#### 参考文献:

- [1] 黎斌,刘琳,梁作栋,等. 特高压直流 GIL 运行可靠性设计与研究[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 69-79.  
LI Bin, LIU Lin, LIANG Zuodong, et al. Design and research on operation reliability of UHV DC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 69-79.
- [2] 江秀臣,许永鹏,李曜丞,等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 1-10.  
JIANG Xiuchen, XU Yongpeng, LI Yaocheng, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the background of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 1-10.
- [3] 谢声益,吴芳芳,朱珉,等. 三相共箱气体绝缘输电线路多物理场数值仿真分析[J]. 浙江电力, 2025, 44(8): 111-118.  
XIE Shengyi, WU Fangfang, ZHU Min, et al. Numerical simulation and analysis of multi-physics fields in three-phase enclosed GIL[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(8): 111-118.
- [4] 董曼玲,臧春艳,詹振宇,等. GIL 内部金属微粒问题研究进展

- [J]. *高压电器*, 2024, 60(1): 1-14.
- DONG Manling, ZANG Chunyan, ZHAN Zhenyu, et al. Research progress on metal particle issues inside GIL[J]. *High Voltage Apparatus*, 2024, 60(1): 1-14.
- [5] 徐长福, 赵新冬, 梁伟, 等. 基于数字孪生技术的 GIL 综合管廊气体泄漏与排除全过程风险性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(3): 160-171.
- XU Changfu, ZHAO Xindong, LIANG Wei, et al. Risk assessment of gas leakage and elimination in GIL utility tunnels based on digital twin technology[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(3): 160-171.
- [6] 彭宗仁, 张鹏飞, 刘鹏, 等. 苏通综合管廊工程特高压 GIL 绝缘关键技术[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4046-4057.
- PENG Zongren, ZHANG Pengfei, LIU Peng, et al. Key insulation technology of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4046-4057.
- [7] 杨朝锋, 臧春艳, 汤会增, 等. 特高压 GIL 现场交接试验标准研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(5): 75-83.
- YANG Chaofeng, ZANG Chunyan, TANG Huizeng, et al. Research on the standards of hand-over acceptance tests of UHV GIL[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(5): 75-83.
- [8] 高克利, 颜湘莲, 刘焱, 等. 环保气体绝缘管道技术研究进展[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(1): 3-20.
- GAO Keli, YAN Xianglian, LIU Yan, et al. Progress of technology for environment-friendly gas insulated transmission line[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(1): 3-20.
- [9] DOUKAS D I, PAPADOPOULOS T A, CHRYSOCHOS A I, et al. Multiphysics modeling for transient analysis of gas-insulated lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(6): 2786-2793.
- [10] 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 characteristics study of EHV gas insulated transmission lines in pipe gallery using node analysis method[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(5): 125-132.
- [11] 李冰, 肖登明, 赵燧, 等. 第二代气体绝缘输电线路的温升数值计算[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(13): 271-276.
- LI Bing, XIAO Dengming, ZHAO Su, et al. Temperature rise numerical calculation of the second generation gas insulated transmission line[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(13): 271-276.
- [12] QIAO Y J, LIANG R, GAO P, et al. Heat transfer analysis of different conditions for SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> gas-insulated transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 36(2): 831-840.
- [13] 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分析[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(1): 65-72.
- WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Temperature rise numerical calculation and correlative factors analysis of gas-insulated transmission lines[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(1): 65-72.
- [14] 崔兆轩, 林莘, 钟建英, 等. C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 混合气体特高压母线通流温升特性研究[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(9): 2491-2499.
- CUI Zhaoxuan, LIN Xin, ZHONG Jianying, et al. Study on the temperature rise characteristics of C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> mixed gas ultra high voltage bus[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(9): 2491-2499.
- [15] 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. Numerical calculation and correlative factors analysis on temperature distribution of GIS bus bar based on coupled multi-physics methodology combined with multiple boundary conditions[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(17): 187-195.
- [16] 高璐, 贾云飞, 汲胜昌, 等. 环保型 1 100 kV GIL 用三支柱绝缘子多物理场耦合仿真及校核[J]. *高电压技术*, 2020, 46(3): 987-995.
- GAO Lu, JIA Yunfei, JI Shengchang, et al. Multi-physical field coupling simulation and verification of tri-post insulator on environment-friendly 1 100 kV GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(3): 987-995.
- [17] 史荣斌, 秦炜淇, 张猛, 等. 特高压 C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> 混合气体 GIL 温度分布[J]. *高电压技术*, 2022, 48(2): 698-705.
- SHI Rongbin, QIN Weiqi, ZHANG Meng, et al. Temperature distribution of UHV C<sub>4</sub>F<sub>7</sub>N/CO<sub>2</sub> mixed gas GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(2): 698-705.
- [18] 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. Thermal-circuit calculation model of gas insulated bus temperature based on heat distribution of tank[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2017, 54(18): 111-117.
- [19] 梁睿, 朱思尧, 王业宁, 等. 考虑抱紧力退化和不同对接角度下的 GIL 触头温升特性[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4401-4410.
- LIANG Rui, ZHU Siyao, WANG Yening, et al. Temperature rise characteristics of GIL contacts considering holding force degradation and different inserting angles[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4401-4410.
- [20] 陈敬友, 高兵, 杨帆, 等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及绝缘气体换热能力[J]. *高电压技术*, 2020, 46(11): 4042-4051.
- CHEN Jingyou, GAO Bing, YANG Fan, et al. Numerical calculation of temperature rise of gas insulated transmission lines and heat transfer capability of insulating gases[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(11): 4042-4051.

- [21] 张艳梅, 娄彦涛, 孙小平, 等. 柔性直流输电系统的功率模块涡流损耗及其温升分析[J]. *高压电器*, 2023, 59(2): 69-80.  
ZHANG Yanmei, LOU Yantao, SUN Xiaoping, et al. Analysis of eddy current loss and temperature rise in power module of VSC-HVDC[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(2): 69-80.
- [22] 吴细秀, 程诗敏, 周帆, 等. 母线通流温升对 GIS 内绝缘特性影响的仿真研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(2): 7-14.  
WU Xixiu, CHENG Shimin, ZHOU Fan, et al. Influence of temperature rise due to rated-current flowing through busbar on the internal insulation characteristics of GIS: a simulation study[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(2): 7-14.
- [23] 范昌泓, 娄敏, 朱家星. 电-热-流多物理场耦合作用下脐带缆温度场及载流量计算研究[J]. *绝缘材料*, 2024, 57(9): 114-124.  
FAN Changhong, LOU Min, ZHU Jiaying. Study on temperature field and ampacity calculation of umbilical cable under coupling of electro-thermal-fluid multi-physical fields[J]. *Insulating Materials*, 2024, 57(9): 114-124.
- [24] 张震, 林莘, 余伟成, 等.  $C_4F_7N/CO_2$  和  $C_4F_7N/N_2$  混合气体热力学物性参数计算[J]. *高电压技术*, 2020, 46(1): 250-256.  
ZHANG Zhen, LIN Shen, YU Weicheng, et al. Thermodynamic calculation of physical properties of  $C_4F_7N/CO_2$  and  $C_4F_7N/N_2$ [J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(1): 250-256.
- [25] 胡德雄, 汪泓, 刘杰, 等. HFO-1336mzz(E)应用于气体绝缘输电线路的温升特性研究[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(12): 104-110.  
HU Dexiong, WANG Feng, LIU Jie, et al. Research on temperature rise characteristics of HFO-1336mzz(E) applied in gas insulated transmission line[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(12): 104-110.
- [26] 吴泽华, 程建伟, 吴宝英, 等. 基于数据驱动的三相共箱 GIL 温度场分布快速计算方法[J]. *高电压技术*, 2025, 51(1): 110-122.  
WU Zehua, CHENG Jianwei, WU Baoying, et al. Data-driven fast calculation method for temperature field distribution of three-phase compact GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2025, 51(1): 110-122.

#### 作者简介:



董轩宇

董轩宇(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为智能输变电技术(E-mail: [sz2303232@nuaa.edu.cn](mailto:sz2303232@nuaa.edu.cn));

张旭(1995), 男, 博士在读, 研究方向为智能输变电技术与新能源发电控制;

张森(2001), 男, 硕士在读, 研究方向为智能输变电技术。

## Temperature rise response and live assessment test of gas insulated transmission lines

DONG Xuanyu<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, ZHANG Miao<sup>1</sup>, ZHANG Chaohai<sup>1</sup>, CHEN Xiaoming<sup>2</sup>, ZHANG Xiaowu<sup>3</sup>

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. Ankura Smart Transmission Engineering Technology Co., Ltd., Changzhou 213300, China;

3. Jiangsu NARI Hengchi Electrical Equipment Co., Ltd., Wuxi 214100, China)

**Abstract:** Gas insulated transmission lines (GIL) operate under high voltage and high current conditions, and their temperature rise characteristics are influenced by the interaction of multiple physical fields. However, traditional GIL temperature rise analysis methods only consider the current magnitude and idealized simplified models, making their results insufficient to effectively determine whether GIL has abnormal temperature rise responses. To address this issue, this paper presents a study on the temperature rise characteristics of key GIL components based on a multi-physics coupling strategy. Firstly, a magnetic-thermal-fluid coupling theory is established, and the finite element and physical models of GIL are constructed, taking into account the effect of contact resistance at the contacts. Secondly, a steady-state temperature rise analysis under power frequency conditions is performed to reveal the temperature rise response patterns of key GIL components. Finally, the effectiveness of the models and temperature rise response conclusions is validated through live testing experiments. Based on the aforementioned foundation, this paper proposes a 220 kV GIL response correlation model, which relates the conductor temperature to the average temperature at the top of the enclosure and the operating current. By comparing the model results with experimental data, it is demonstrated that this model has high accuracy and can serve as an empirical calculation method for GIL conductor temperature in practical engineering applications.

**Keywords:** gas insulated transmission line (GIL); multi-field coupling; finite element model; temperature rise characteristics; live testing experiments; response correlation model

(编辑 方晶)