

# 有屏蔽罩结构的 GIS 触头温度红外在线监测技术

丛浩熹<sup>1</sup>, 行晋源<sup>2,3</sup>, 李庆民<sup>2,3</sup>, 齐波<sup>2,3</sup>, 李成榕<sup>2,3</sup>, 刘有为<sup>4</sup>, 肖燕<sup>4</sup>

(1. 山东大学 电气工程学院 山东省特高压输电变电技术与气体放电重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 华北电力大学 高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206;

3. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

4. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 由于红外温度传感器不能直接测量带屏蔽罩结构的 GIS 触头温度, 因此提出了通过直接测量屏蔽罩温度来间接获得触头部位温度的方法。建立了 GIS 开关传热模型, 获得了触头处温度场分布。研究了 GIS 开关触头温度与屏蔽罩温度、环境温度关系, 并且运用支持向量机算法和神经网络算法预测了触头温度和屏蔽罩温度之间的映射关系, 结果表明神经网络算法的拟合预测准确度更高。

**关键词:** GIS; 红外传感; 红外辐射; 触头; 温度测量; 监测; 神经网络; 屏蔽罩; 模型

**中图分类号:** TM 56; TN 219

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.025

## 0 引言

气体绝缘金属封闭开关(GIS)以 SF<sub>6</sub> 气体作为绝缘介质, 具有开断能力强、故障率低、维护费用少、占地面积小等优点, 在变电站中获得了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。而当 GIS 触头接触不良时, 其接触电阻变大, 通过负载电流时将产生过热现象。触头和母线过热会引起绝缘老化甚至击穿, 以至引发重大事故和经济损失<sup>[3-4]</sup>。据不完全统计, 国内外众多电力公司所采用的 GIS 设备, 均不同程度地出现过封闭母线、隔离开关、电缆头等部件因绝缘老化或接触不良而造成的温度异常现象及并发事故<sup>[5-6]</sup>。因此, 实现对 GIS 设备温度的在线监测, 提前发现并消除热故障隐患, 对 GIS 安全可靠运行具有非常重要的意义。

目前, 在现场中应用的预防 GIS 设备触头过热的措施主要有 3 种: 人工观察触头表面颜色<sup>[7]</sup>、定期测量回路电阻和使用红外成像仪<sup>[8-9]</sup>对固定监测点定期进行温度监测。这些方法均存在着一定不足: 前 2 种方法需要 GIS 设备停电检修, 第 3 种方法红外成像技术的分辨率和精度都难以达到要求, 而且这 3 种监测方法均难以实现对 GIS 设备温度的持续测量, 即不能实现在线监测。而目前在开关柜触头测温中应用较为广泛的光纤光栅在线测温方法<sup>[10-11]</sup>, 由于 GIS 结构的特殊性还没得到广泛应用。

红外温度在线监测技术<sup>[12-13]</sup>可实现对被测物体的非接触式测量, 且干扰或破坏被测物体的温度场和热平衡状态, 同时解决了高电压和高温部分的有效隔离, 可对 GIS 设备触头的温度进行连续自动测

量以及越限预警, 实现对潜在故障设备实施主动保护的可能性, 具有广阔的应用前景<sup>[14-15]</sup>。不过, 对于 GIS 设备中装设屏蔽罩的断路器和隔离开关触头, 则一般难以实现对触头温度的直接红外测量。本文通过建立 GIS 设备的传热计算模型, 提出一种由直接测量屏蔽罩温度而间接获得触头部位温度的方法, 并基于实验研究获得了触头温度与屏蔽罩温度的定量关系曲线, 为实现 GIS 触头的红外在线测温提供了技术基础。

## 1 GIS 设备红外在线温度监测原理

红外测温是一种非接触式的测量方法, 通过接收被测物体的辐射来确定被测物体的温度。在自然界中, 一切温度高于绝对零度的物体都在不断地向周围空间辐射红外辐射能量。物体红外辐射能量的大小及其按波长的分布与它的表面温度有着十分密切的关系。物体的温度越高, 发出红外辐射的能量也越大, 而且只要温度出现微小变化, 就可引起辐射能量明显的变化。因而, 通过测量物体自身辐射红外能量的大小便能准确地测定它的表面温度, 这就是红外测温所依据的客观基础。

对于 GIS 设备中装设屏蔽罩结构的开关, 如断路器和部分隔离开关, 红外温度传感器难以实现对触头温度的直接红外测量。触头温度与电流大小、触头接触状态以及触头处是否存在电晕等因素都有关系, 但这些因素可以反映在触头和屏蔽罩的温度变化上。针对这种情况, 本文提出如下方法: 采用红外测温探头可直接测量触头位置处金属屏蔽罩的温度, 然后利用建立的传热学模型结合实验研究获得触头温度与金属屏蔽罩温度之间的定量关系, 间接获得 GIS 开关静触头部位的温度。如图 1 所示, 通过红外传感器能够直接测量的屏蔽罩(T<sub>1</sub>处)温度来间接

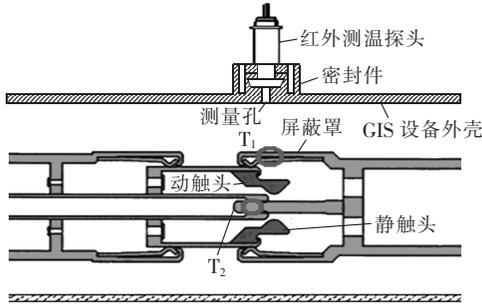


图 1 有屏蔽罩结构 GIS 红外在线温度监测装置原理图  
Fig.1 Schematic diagram of infrared online temperature monitoring device for shielded GIS contacts

获得触头(T<sub>2</sub>处)温度。

## 2 GIS 设备传热计算模型

### 2.1 温度场的计算模型

以某 GIS 设备的单相隔离开关为例,其结构与工况参数如表 1 所示,界面结构如图 2 所示。其中,在隔离开关内部触头与金属外壳之间的密闭空间内,填充有 SF<sub>6</sub> 气体。

表 1 GIS 单相隔离开关基本参数  
Tab.1 Basic data of single-phase GIS disconnecting switch

参数	数值	参数	数值
外壳外径/mm	260	屏蔽罩内径/mm	105
外壳内径/mm	248	屏蔽罩外径/mm	109
触头外径/mm	43	导体电流/A	2000

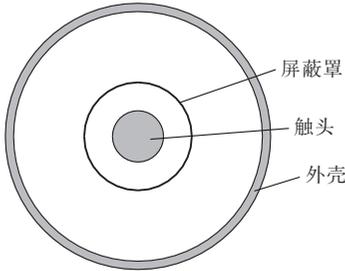


图 2 隔离开关界面示意图

Fig.2 Cross section of disconnecting switch

开关触头处的热源主要是流过触头的电流产生,散热主要包括导体和屏蔽罩之间的气体对流散热、屏蔽罩上传导散热、屏蔽罩和外壳之间的气体对流散热、外壳上传导散热、外壳与外界空气的对流散热等多个环节。这里进行 3 点假设:

- a. 开关触头处金属发热均匀;
- b. 外界远离 GIS 设备处的空气环境温度恒定;
- c. 除密度外,内部 SF<sub>6</sub> 气体的其他物理特性保持恒定。

在二维温度场求解中,气体稳态自然对流时,其温度和速度受质量传递、动量传递和能量传递的共同支配,由如下方程描述。

a. 触头和屏蔽罩之间的气体对流。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left( \frac{\partial u_1}{\partial \tau} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) = F_{x1} - \frac{\partial p_1}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_1}{\partial \tau} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} \right) = F_{y1} - \frac{\partial p_1}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial t_1}{\partial \tau} + u_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial t_1}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 t_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_1}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

b. 屏蔽罩的热传导过程。

导热微分方程:

$$\frac{\partial^2 t_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_s}{\partial y^2} = 0 \quad (5)$$

c. 屏蔽罩和外壳之间的气体对流。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left( \frac{\partial u_2}{\partial \tau} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) = F_{x2} - \frac{\partial p_2}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_2}{\partial \tau} + u_2 \frac{\partial v_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial v_2}{\partial y} \right) = F_{y2} - \frac{\partial p_2}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 v_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_2}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial t_2}{\partial \tau} + u_2 \frac{\partial t_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial t_2}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 t_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

d. GIS 外壳的热传导过程。

导热微分方程为:

$$\frac{\partial^2 t_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_w}{\partial y^2} = 0 \quad (10)$$

e. 外壳与空气的自然对流过程。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial u_3}{\partial x} + \frac{\partial v_3}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left( \frac{\partial u_3}{\partial \tau} + u_3 \frac{\partial u_3}{\partial x} + v_3 \frac{\partial u_3}{\partial y} \right) = F_{x3} - \frac{\partial p_3}{\partial x} + \eta \left( \frac{\partial^2 u_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_3}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_3}{\partial \tau} + u_3 \frac{\partial v_3}{\partial x} + v_3 \frac{\partial v_3}{\partial y} \right) = F_{y3} - \frac{\partial p_3}{\partial y} + \eta \left( \frac{\partial^2 v_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_3}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial t_3}{\partial \tau} + u_3 \frac{\partial t_3}{\partial x} + v_3 \frac{\partial t_3}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 t_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_3}{\partial y^2} \right) \quad (14)$$

式(1)~(14)中,  $u_i, v_i$  分别表示气体沿  $x$  和  $y$  方向的速度分量;  $t_i$  为气体温度;  $F_{xi}, F_{yi}$  分别为体积力在  $x$  和  $y$  方向的分量; 下标中  $i$  可取 1、2、3, 分别对应触头和屏蔽罩之间的气体对流、屏蔽罩和外壳之间的气体对流、外壳与空气的自然对流;  $\rho$  为气体的密度;  $c_p$  为气体的比热;  $p$  为气体压力;  $t_s, t_w$  分别为屏蔽罩温度和外壳温度;  $\eta$  为气体运动粘性系数;  $\tau$  为时间。

计算边界条件:

$$t(x, y)|_{x^2+y^2=\infty} = t_\infty, \quad u(x, y)|_{x^2+y^2=\infty} = 0$$

$$v(x, y)|_{x^2+y^2=\infty} = 0, \quad p(x, y)|_{x^2+y^2=\infty} = 0$$

$$t(x, y)|_{x^2+y^2=r_{s0}^2} = t_{s0}, \quad u(x, y)|_{x^2+y^2=r_{s0}^2} = 0$$

$$v(x, y)|_{x^2+y^2=r_{s0}^2} = 0, \quad p(x, y)|_{x^2+y^2=r_{s0}^2} = 0$$

其中,  $t_\infty$  为周围环境温度;  $r_{s0}$  为屏蔽罩到触头中心线的距离, 对应的屏蔽罩外表面处的温度为  $t_{s0}$ 。

辅以定解条件, 可对上述微分方程组进行求解。求解方法可采用有限元法、边界元法、离散单元法和有限差分法等, 进行离散迭代求解直至收敛, 即可逐层得到各节点的温度分布情况。

## 2.2 导体触头与屏蔽罩温度的仿真分析

根据上述微分方程组及边界条件, 纳入 GIS 设备的结构尺寸, 采用 ANSYS 软件对导体触头和屏蔽罩处的温度进行仿真计算, 得到的温度场分布如图 3 所示。图 3 给出了沿轴心从内到外(开关触头、屏蔽罩、外壳)的温度场分布, 可清晰地看出触头和屏蔽罩的温度差异。因屏蔽罩的存在, 直接测量触头温度较为困难, 可通过直接测量屏蔽罩温度来间接获得触头部位的温度。

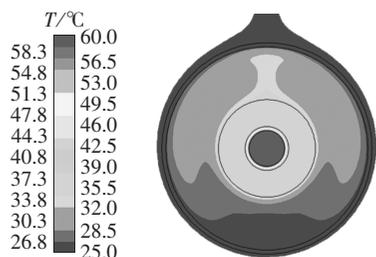


图 3 GIS 设备触头处的温度场分布剖面图

Fig.3 Sectional view of temperature-field distribution around GIS contacts

利用数值仿真可大致获得触头温度与金属屏蔽罩温度的关系, 但要获得准确实用的定量关系, 还得依据实验方法。

## 3 实验方案与实验结果

整个 GIS 设备实验平台包括大电流发生器、GIS 隔离开关实验模型、红外温度传感器、热电偶等, 热电偶分别放置在隔离开关的触头处、屏蔽罩处、

GIS 设备外的空间中。

如图 4 所示, 首先将经过校验的热电偶传感器植入到 GIS 隔离开关模型的屏蔽罩(图 1 中  $T_1$  处)和开关触头处(图 1 中  $T_2$  处)。2 个热电偶的插头均用硅脂涂满, 保证热电偶与被测物体均匀良好接触。其中屏蔽罩上的热电偶涂满硅脂后再用胶带固定在屏蔽罩上, 触头处的热电偶用硅脂黏贴在触头处触指上, 2 个热电偶的引线分别通过观察窗下的密封口引出。然后调节大电流发生器输出电流的大小直至热电偶的温度示数稳定, 经过大量实验, 获得不同工况下 GIS 隔离开关触头温度与屏蔽罩温度的关系曲线。

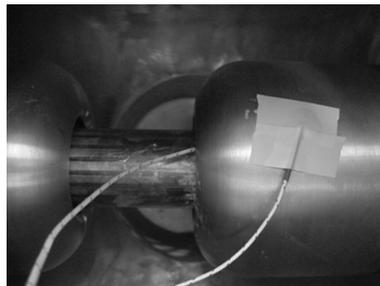


图 4 热电偶植入图

Fig.4 Embedded thermocouple

针对不同的环境温度, 由实验获得 GIS 设备稳态运行时(在某一恒定电流下运行时的工况)的温度数据, 屏蔽罩温度和触头温度关系分布图见图 5。

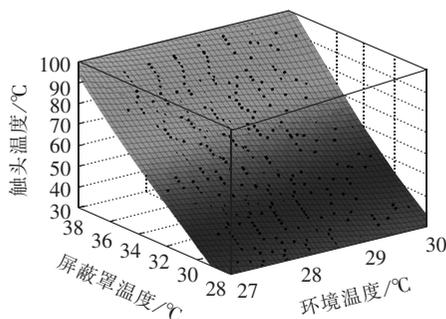


图 5 稳态时触头温度与屏蔽罩温度关系图

Fig.5 Relationship between contacts temperature and shield temperature in static state

从图 5 中的分析可以看出: 屏蔽罩温度与导体触头和环境温度之间存在密切关系, 当环境温度一定时, 屏蔽罩温度随着导体触头温度的上升而上升; 当导体触头温度一定时, 屏蔽罩温度随环境温度降低而降低; 导体触头与屏蔽罩温度和环境温度之间的关系曲线较为复杂, 需要寻找一种合适的算法通过屏蔽罩温度和环境温度来反推触头温度。

## 4 触头与屏蔽罩温度映射关系

4.1 GIS 设备传热模型仿真结果和实测数据的对比  
根据第 2 节建立的 GIS 设备传热模型通过数值

仿真可大致获得触头温度与金属屏蔽罩温度和环境温度的关系,表 2 给出了部分仿真结果与实测数据的对比。

表 2 仿真结果与实验数据的比较  
Tab.2 Comparison between simulative results and test data

屏蔽罩温度/℃	环境温度/℃	触头温度/℃		相对误差/%
		仿真值	实测值	
23.6	14.7	27.6	28.8	4.2
28.9	16.7	35.4	34.3	3.2
35.1	16.4	42.1	43.7	3.7
39.7	12.1	50.9	52.7	3.4
45.5	13.6	57.8	59.7	2.7
49.8	12.9	64.9	66.7	2.6
53.6	14.6	69.0	71.2	3.1
59.0	18.7	73.8	76.3	3.3
62.0	13.1	80.1	83.7	4.3
69.1	18.5	87.5	89.9	2.7

由表 2 可以看出,仿真结果和实测结果之间存在着一定的误差,这是由于:实验中 GIS 设备处于无限大空间中,而仿真中为简化计算,设定 GIS 设备处于有限的空间中;仿真中将导体、屏蔽罩和外壳内部的发射率均设为 0.05, GIS 温度变化时各部分发射率可能发生改变;实验所采用的热电偶温度传感器误差为 1℃,实验测量本身存在一定的误差。

4.2 触头与屏蔽罩温度映射关系拟合

在数据拟合和预测中,以支持向量机(SVM)算法<sup>[16-17]</sup>和人工神经网络(ANN)算法<sup>[18-19]</sup>应用较为广泛。SVM 算法基于统计学习理论和结构风险最小化原理,可以通过有限的样本信息在模型的复杂度和学习能力之间寻求平衡,以达到最好的推广能力,对于小样本数据更具有优势。人工神经网络算法具有良好的非线性映射能力,具有高度的自学习、自组织和自适应能力,不需知道具体的精确模型,可逼近输入和输出之间的多维非线性关系。接下来的研究将应用这 2 种算法对触头与屏蔽罩温度的映射关系进行研究。

本文采用最小二乘 SVM 方法进行数据的拟合和预测,其具体的非线性建模过程如下。

a. 建立 SVM 模型:

$$t_w(i+1) = f(t_w(i), t_e(i))$$

其中,  $t_w(i)$  为触头温度,  $t_w(i) \in \mathbf{R}$ ;  $t_e(i) = [t_s(i), t_e(i)] \in \mathbf{R}^2$ ,  $t_s(i)$ 、 $t_e(i)$  分别为屏蔽罩温度和环境温度。

b. 以样本  $\{(t_i, t_{wi}) | t_i \in \mathbf{R}^2, t_{wi} \in \mathbf{R}, i = 1, 2, \dots, L\}$  为训练样本集建立系统模型,  $L$  为训练样本总数。

c. 计算第  $i$  步输出量的预测值,并计算实测值与预测值之间的误差。

d. 令  $i=i+1$ ,重复步骤 c 直至收敛。

将实验获得的数据采用 MATLAB 的 trainlssvm 函数和 simlssvm 函数分别进行训练和求解,以屏蔽

罩温度、环境温度为输入变量,触头温度为输出变量,核函数采用径向基函数。随机选取 10 组检验样本,表 3 给出了上述算法的数据预测结果与实测值之间的对比。

表 3 实测值与 2 种算法的预测结果的比较  
Tab.3 Comparison between measurements and forecasts by two algorithms

屏蔽罩温度/℃	环境温度/℃	触头温度/℃			相对误差/%	
		SVM 预测结果	BP 网络法 预测结果	实测值	SVM 法	BP 网络法
23.6	14.7	28.3	28.5	28.8	1.6	1.0
28.9	16.7	33.6	35.2	34.3	2.0	2.6
35.1	16.4	44.5	43.9	43.7	1.8	0.5
39.7	12.1	53.6	51.4	52.7	1.7	2.5
45.5	13.6	58.4	59.0	59.7	2.1	1.2
49.8	12.9	64.7	65.1	66.7	3.0	2.4
53.6	14.6	69.5	69.9	71.2	2.4	1.8
59.0	18.7	77.0	76.2	76.3	0.9	0.1
62.0	13.1	85.2	81.9	83.7	1.8	2.2
69.1	18.5	90.9	90.2	89.9	1.1	0.3

在设计 BP 网络时,输入矢量包含屏蔽罩温度、环境温度,输出矢量为触头温度,因此该网络的输入层节点数为 2,输出层节点为 1。本文采用的 BP 网络结构如图 6 所示。

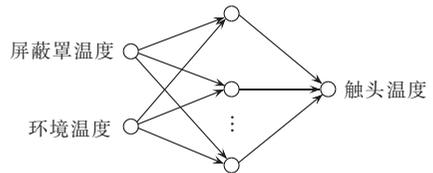


图 6 本文采用的 BP 网络模型示意图  
Fig.6 Schematic diagram of applied BP network model

通过对检验样本泛化能力的比较,最终确定网络的隐层节点数为 12。采用基于 Levenberg-Marquardt 算法的变梯度 BP 算法对 BP 网络的权系数和阈值进行训练,经过有限次的训练迭代,训练误差迅速收敛到一个很小的数值,表明训练算法快速有效。将 10 组检验样本的数据输入到上述经过训练的 BP 网络,就可得到预测数据。将实验获得的 200 组数据分为两部分,从中随机选取 10 组为检验样本,其余部分作为训练样本。表 3 给出了 BP 网络算法预测结果与检验样本的实际数据的比较。

对比表 3 可见,SVM 方法和 BP 网络算法均能够根据屏蔽罩温度的变化对导体触头温度做出较准确的预测。尽管预测模型结果和实际结果存在微小差别,但均在误差允许的范围内,总体而言,BP 网络算法预测准确度更高。

5 暂态温升实验

由第 4 节可知,基于 BP 网络算法可由屏蔽罩温度准确预测稳态时的 GIS 触头温度。为研究电流突

然变化时上述方法的可行性,开展了如下实验。

分别加载大电流( $i_L$ 分别取 1.0 kA、1.8 kA)并保持稳定,此时环境温度基本恒定,同时记录导体触头温度随时间的变化情况并将 BP 网络算法的计算拟合结果与实测曲线进行对比,如图 7 所示。

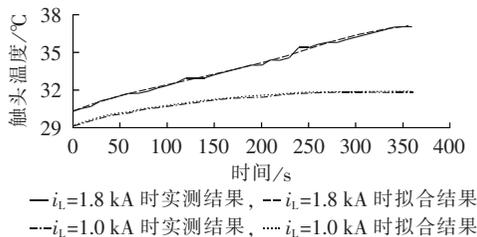


图 7 暂态时触头温度的拟合结果

Fig.7 Results of contacts temperature fitting in transient state

从图 7 可以看出,在导体电流突然变化时,BP 网络算法的计算拟合结果仍具有较高的准确度,由屏蔽罩的温度仍可准确反映触头的温度变化,本文的测温方法和 BP 网络算法仍然非常有效。

## 6 结论

针对红外传感器不能直接测量带有屏蔽罩结构的导体触头温度,本文提出由直接测量屏蔽罩温度来间接获得触头部位温度的方法,建立了 GIS 传热分析模型,并通过实验获得了各个部位温度之间的定量关系,进而采用 SVM 算法和 BP 网络算法实现触头温度的准确预测。相关技术可实现对 GIS 设备触头温度的连续自动监测以及越限预警,为 GIS 设备的触头测温 and 运行状态评估提供了基础依据。

## 参考文献:

- [1] FANG Shuhua, LIN Heyun, HO S L, et al. Contact parameter computation and analysis of air circuit breaker with permanent magnet actuator[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2013, 8(3): 595-602.
- [2] SEO Hun-chul, JANG Won-hyeok, KIM Chul-hwan, et al. Analysis of magnitude and rate-of-rise of VFTO in 550 kV GIS using EMTP-RV[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2013, 8(1): 11-19.
- [3] WU Meiyang, DAI Miaolin, FU Xiaofeng, et al. The study on a seismic test of high-voltage electrical switch cabinet[C]//Power and Energy Engineering Conference. [S.l.]: IEEE, 2009: 1-6.
- [4] YAO Liangzhong, LI Naihui, KOU Hao, et al. Reliability tests of a wireless system of monitoring and controlling for high voltage switch cabinets[C]//POWERCON 2010. [S.l.]: IEEE, 2010: 1-5.
- [5] 魏翔. 气体绝缘金属封闭开关柜在线测温系统设计[J]. 电工电气, 2010(1): 51-54.  
WEI Xiang. Design of online temperature measuring system for gas-insulated metal-closed switchgear[J]. Electronics Electric, 2010(1): 51-54.
- [6] DERVOS C T, VASSILIOU P, MERGOS J A. Thermal stability of SF<sub>6</sub> associated with metallic conductors incorporated in gas insulated switchgear power substations[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2007, 40(2): 6942-6952.
- [7] 程少勇, 刘志远, 李新华, 等. 基于面积效应的真空灭弧室触头间隙击穿特性研究[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 161-164.  
CHENG Shaoyong, LIU Zhiyuan, LI Xinhua, et al. Investigation on breakdown characteristics in contact gap for vacuum interrupters on area effect[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 161-164.
- [8] 师晓岩, 查玮, 孙福, 等. UHV GIS 内部温度场的红外热诊断技术[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 16-20.  
SHI Xiaoyan, ZHA Wei, SUN Fu, et al. Inner temperature distribution of UHV GIS using infrared thermo-diagnosis technology [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 16-20.
- [9] 陈衡, 侯善敬. 电力设备故障红外诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 218-219.
- [10] 时斌. 光纤传感器在高压设备在线测温系统中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 169-174.  
SHI Bin. HV switchgear temperature on-line monitoring system with distributed optical fiber sensor[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 169-174.
- [11] 孙晓雅, 李永倩, 李天, 等. 基于光纤光栅的开关柜温度在线监测系统的设计[J]. 电力系统通信, 2012, 33(5): 6-10.  
SUN Xiaoya, LI Yongqian, LI Tian, et al. Design of the switchgear temperature on-line monitoring system based on optical fiber grating[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2012, 33(5): 6-10.
- [12] 张良胜, 张杰. 红外在线监测系统在封闭开关柜中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 150-153.  
ZHANG Liangsheng, ZHANG Jie. Application of switch tank temperature online monitor system based on infrared[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 150-153.
- [13] 武胜斌, 郑研, 陈志彬. 基于红外测温技术的 GIS 导体温度在线监测的方案[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 100-102.  
WU Shengbin, ZHENG Yan, CHEN Zhibin. An on-line monitoring scheme of conductor temperature in GIS based on infrared temperature measurement [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 100-102.
- [14] 刘有为. 基于智能高压设备的主动保护与控制技术[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 71-75.  
LIU Youwei. Active protection and control technique based on smart high voltage equipment[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 71-75.
- [15] 丛浩熹, 李庆民, 齐波, 等. 基于红外传感的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 144-148.  
CONG Haoxi, LI Qingmin, QI Bo, et al. Research on on-line temperature monitoring technology for GIS disconnecting switch contacts based on infrared sensing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 144-148.
- [16] 戴栋, 黄筱婷, 代洲, 等. 基于支持向量机的输电线路覆冰回归模型[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2822-2828.  
DAI Dong, HUANG Xiaoting, DAI Zhou, et al. Regression model for transmission lines icing based on support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2822-2828.
- [17] 邓军, 逍遥, 郝艳捧, 等. 基于模糊聚类和最小二乘支持向量机的特高压直流输电线路合成电场预测方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 149-155.  
DENG Jun, XIAO Yao, HAO Yanpeng, et al. Compound electric

field prediction method for the UHVDC transmission lines based on fuzzy clustering and least squares support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12):149-155.

[18] GUAN L, CHENG S. Artificial neural network power system stabilizer trained with an improved BP algorithm[J]. IEEE Proceeding-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(2):135-141.

[19] 杨存祥, 朱琛, 解豪杰. 基于RPROP神经网络算法的异步电动机故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1):80-83.

YANG Cunxiang, ZHU Chen, XIE Haojie. Fault diagnosis based on RPROP neural network for asynchronous motor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1):80-83.

#### 作者简介:

丛浩熹(1989-),男,山东潍坊人,博士研究生,主要从事高压开关在线温度监测方面的研究工作(E-mail:conghaoxi@163.com);



丛浩熹

行晋源(1990-),男,河南焦作人,硕士研究生,主要从事高压开关在线温度监测方面的研究工作;

李庆民(1968-),男,山东菏泽人,教授,博士研究生导师,主要从事新型高压电器方面的科学研究工作;

齐波(1980-),男,山东临沂人,副教授,博士,研究方向为高压电气设备在线监

测与故障诊断;

李成榕(1957-),男,福建福州人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为气体放电及脉冲功率技术、电气设备绝缘在线监测与故障诊断、电介质材料介电特性;

刘有为(1962-),男,内蒙古乌兰察布人,教授级高级工程师,从事高压设备智能化、状态检修方面的研究工作;

肖燕(1973-),女,辽宁沈阳人,高级工程师,博士,从事高压电气设备检修优化策略、高压设备可靠性技术等方面的研究工作。

## Infrared online temperature monitoring technology for shielded GIS contacts

CONG Haoxi<sup>1</sup>, XING Jinyuan<sup>2,3</sup>, LI Qingmin<sup>2,3</sup>, QI Bo<sup>2,3</sup>, LI Chengrong<sup>2,3</sup>, LIU Youwei<sup>4</sup>, XIAO Yan<sup>4</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of UHV Transmission Technology and Gas Discharge Physics, School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. Beijing Key Laboratory of High Voltage and EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

4. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** As the infrared temperature sensor can not directly measure the temperature of shielded GIS (Gas Insulated Switchgear) contacts, it is proposed to measure the shield temperature for indirect getting the contacts temperature. The heat transfer model of GIS switch is established and the temperature-field distribution around the contacts is obtained. The relationship among contacts, shield and environmental temperatures is studied and the mapping relationship between contacts and shield temperatures is fitted respectively by SVM(Support Vector Machine) method and neural network algorithm for forecasting the contacts temperature. Results show the neural network algorithm has higher accuracy.

**Key words:** GIS; infrared sensing; infrared radiation; contacts; temperature measurement; monitoring; neural networks; shielding; models