

文章编号: 1672-8785(2011)06-0010-05

基于红外测温的电气控制柜内部元件 热缺陷严重程度的反问题识别

闫光辉 杨 立 范春利

(海军工程大学动力工程系, 湖北武汉 430033)

摘 要: 根据国家相关标准建立了电气控制柜内部元件发热故障的判断方法和标准。结合红外辐射理论分析了控制柜内部过热元件对壳体内表面的热辐射, 得到了壳体内表面的辐射热流密度, 并针对受热壳体建立了二维热传导模型。基于壳体表面的红外成像测温数据, 运用 L-M 算法进行了导热反问题模拟研究, 准确求解了控制柜内部元件在不同热缺陷程度时的发热温度。最后运用表面温度判断法对控制柜内部元件热缺陷的严重程度进行了识别。结果表明, 测量误差对过热元件的故障诊断影响较小。

关键词: 内部热缺陷; 温度识别; 表面温度判断法; 红外热像仪; 导热反问题

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2011.06.003

Inverse Problem Identification of Thermal Defects of Fault Components in Electric Control Cabinet Based on Infrared Temperature Measurement

YAN Guang-hui, YANG Li, FAN Chun-li

(Department of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The method and standard for judging overheated components in an electric control cabinet are established according to the related GB in China. The thermal radiation emitted from the overheated components to the inner surface in an electric control cabinet is analyzed according to the infrared radiation theory. The heat flux distribution of the inner surface in the cabinet is obtained and a two-dimensional heat transfer model for the heated cabinet casing is built. On the basis of the infrared imaging temperature measurement data obtained, a L-M algorithm is used to study the inverse heat conduction problem and the heating temperature of the overheated component with different thermal defects in an electric control cabinet is solved accurately. Finally, the severity of the thermal defects of the component in the electric control cabinet is identified by using a surface temperature judgment method. The result shows that the method is useful for the fault diagnosis of the overheated components in electric control cabinets.

Key words: inner thermal defect; temperature identification; surface temperature judgment method; infrared thermal imager; inverse heat conduction problem

0 引言

电气控制柜内部有许多电气元件, 如接触

器、开关以及各种接线端子等。在设备运行期间, 不能打开柜门对电气元件进行检测。经过长期运行, 各元件极易出现过热故障。根据元件过

收稿日期: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50906099)

作者简介: 闫光辉 (1986-), 男, 河南正阳人, 硕士, 主要研究方向为红外故障诊断。E-mail: 19861125ygh@163.com

热的严重程度, 这些故障可以分为一般热缺陷、严重热缺陷和危急热缺陷三种^[1]。而分析和判断控制柜内部元件故障的严重程度是确保设备的绝缘体不因温度过高而损坏或使用寿命过分降低, 保证安全发供电的一项重要技术措施, 也是为相关技术人员提供维修建议的重要依据。

在电气控制柜内部, 热故障点一般密封于绝缘材料或金属外壳内。由于红外线的穿透能力较弱, 基本上不能穿透绝缘材料和设备外壳, 所以无法直接用红外热成像装置检测设备内部的热缺陷。但是内部热缺陷不易受外界环境条件变化的影响, 其发热比较稳定, 而且发热源可以通过热辐射和热传导等热传递方式与周围壳体进行热量交换, 从而引起周围壳体的温度升高。

红外成像检测技术通过接收物体发出的红外线(红外辐射)并将其热像显示在荧光屏上, 便可准确判断物体表面的温度分布情况。该技术具有准确、实时、快速等优点, 在缺陷检测、故障诊断等领域取得了日益广泛的应用。

目前, GB/T110 22《高压开关设备和控制设备标准的共同技术要求》和 DL/T664-2008《带电设备红外诊断应用规范》是红外测温中的常用判据, 也是确定电气设备热故障的基本依据。例如, 文献[2]说明了使用相对温差判断方法判断电气设备缺陷的必要性, 并确定了相对温差判据标准。文献[3]采用 DL/T664-2008 中提出的相对温差判断方法诊断了电流致热型设备的热缺陷, 并对其原理和判据进行了分析。这些研究都是针对设备的外部故障进行的, 而内部热故障的红外热诊断则是在红外成像测温的基础上, 借助计算机求解导热反问题, 获取设备内部过热元件的温度值, 从而实现过热程度判别的。

针对电气设备内部故障的实际检测需求, 结合相应的判别标准, 本文先以电气控制柜为例, 分析控制柜中过热元件对壳体内表面的辐射传热情况, 计算出壳体内表面的辐射热流密度; 然后对长方形壳体建立二维热传导模型, 并通过红外热像仪对壳体表面进行红外成像测温; 接着运用 L-M 算法编写反问题求解程序,

进行导热反问题模拟研究, 从而准确求解控制柜内部故障元件的发热温度; 最后运用表面温度判断法识别元件的热缺陷严重程度。

1 内部发热元件过热程度判断方法及判断依据

1.1 表面温度判断法

根据测得或求解的元件表面温度值, 对照 GB/T11022 中高压开关设备和控制设备的各种部件、材料以及绝缘介质的温度与温升极限和《高压电器在长期工作时的发热》所规定的各部分的最大发热允许温度的极限值进行判定。

1.2 判断依据

根据 DL/T664-2008, 按温升高低及其对设备的危害程度可将热故障分为一般热缺陷、严重热缺陷和危急热缺陷三种。

(1) 一般热缺陷: 发热元件的温升范围在 10 ~ 20 ℃ 之间。与相同运行条件下的设备相比, 该元件有一定的温升, 此时用红外成像仪仅可发现轻微的热像特征。

(2) 严重热缺陷: 其温升范围在 40 ~ 70 ℃ 之间, 或者实际温度在 80 ~ 110 ℃ 之间, 热像特征明显。该缺陷处已造成严重热损伤, 对设备运行构成严重威胁。

(3) 危急热缺陷: 发热元件的温升范围超过 70 ℃, 或者最高温度已超过 DL/T664-2008 所规定的该材料最高允许值。热像图非常清晰, 外观可见严重的烧伤痕迹。

本文对电气控制柜的内部元件采用以上判别方法和判断依据, 并假定元件的正常发热温度为 40 ℃。表 1 所示为热缺陷的判定标准。

表 1 控制柜内部元件的故障判定标准

表面温度值		
一般热缺陷	严重热缺陷	危急热缺陷
发热温度	发热温度	发热温度
≤ 55 ℃	≥ 80 ℃	> 110 ℃

2 物理和数学模型

2.1 控制柜内部发热元件对壳体内表面的红外辐射模型

图 1 所示为存在元件发热故障的电气控制柜的结构示意图。

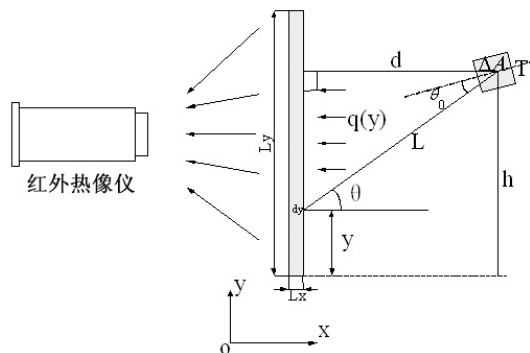


图 1 检测控制柜的结构示意图

控制柜中的过热元件可以看成是一个红外辐射源，它会向壳体内表面辐射热量。假设该红外辐射源是一个小面源，其面积为 ΔA ，被照面的微元面积为 dy ，两者之间的距离为 L ，小面源投射到 y 处单位面积上的辐射为 $q(y)$ ，且 ΔA 面与 dy 面的法线与 L 的夹角分别为 θ_0 和 θ 。另外，过热元件的发热温度为 T ，过热元件与壳体内表面的距离（即垂直距离）为 d ，与侧面端的距离（即水平距离）为 h 。将此小面源看成是朗伯辐射源，根据朗伯辐射源的辐射特征，便可得到小面源 ΔA 的辐射强度：

$$I = L_0 \cos \theta_0 \Delta A \quad (1)$$

式中， L_0 为辐射亮度。

小面源 ΔA 对壳体内表面产生的辐射热流密度为

$$q(y) = \frac{dp}{dA} = \frac{I \cos \theta}{L^2} = L_0 \Delta A \frac{\cos \theta_0 \cos \theta}{L^2} \quad (2)$$

在辐射源表面与长方形壳体板平行的情况下， $\theta_0 = \theta$ ，故

$$q(y) = L_0 \Delta A \frac{\cos^2 \theta}{L^2} = L_0 \Delta A \frac{d^2}{L^4} \quad (3)$$

式中， $L^2 = (h - y)^2 + d^2$ ，故

$$q(y) = L_0 \Delta A \frac{d^2}{[(h - y)^2 + d^2]^2} \quad (4)$$

朗伯辐射源的辐射亮度 L_0 与温度 T 的关系为 $L_0 = \sigma T^4 / \pi$ [9]。

2.2 受热壳体的二维热传导模型

长方形壳体板在 $y = 0$ 及 $y = Ly$ 表面上为绝热，在 $x = 0$ 表面上为对流换热，在 $x = Lx$ 表面上为热流密度（辐射）传热，壳体内部为稳态传热，表面的换热系数均匀，无内热源。因此，壳体内部的二维稳态导热公式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial t}{\partial y} \right) = 0 \quad (5)$$

边界条件为

$$-k \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad y = 0 \quad (6)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial y} = 0, \quad y = Ly \quad (7)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha(t - t_\infty), \quad x = 0 \quad (8)$$

$$-k \frac{\partial t}{\partial x} = q(y), \quad x = Lx \quad (9)$$

式中， k 为壳体内部的导热系数； α 为 $x = 0$ 面上的对流换热系数； $q(y)$ 为 $x = Lx$ 面上的热流密度，可由式 (4) 求解得到，其中含有控制柜中过热元件的发热温度 T 。

利用有限体积法对式 (5) ~ 式 (9) 进行求解计算，可获得壳体表面的温度分布，因此这可以作为求解反问题的基础。

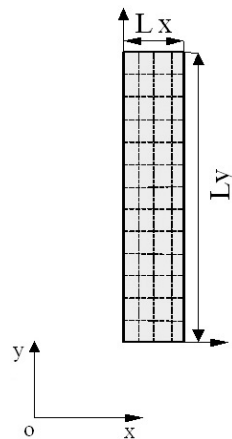


图 2 受热壳体的二维热传导模型

2.3 基于 L-M 算法的传热反问题求解过程

假设壳体内表面的热流密度分布 $q(y)$ 未知, 即过热元件的发热温度 T 未知, 由于式 (5) 中的其它参数均已知, 被检测表面的温度分布可通过红外热像仪测得。将被检测表面上的离散温度值表示为 $Y_i (i = 1 \sim ni)$ 。因此可将反问题描述为: 根据壳体表面的红外测温数据估计内表面的热流密度分布, 从而准确计算出过热元件的发热温度。

L-M 计算方法^[10] 为

$$f^{n+1} = f^n + (\Phi^T \Phi + \mu^n I)^{-1} \Phi^T (Y - T) \quad (10)$$

$$\Phi = \left[\frac{\partial T}{\partial f} \right]^T \quad (11)$$

式中, 上标 n 和 T 分别表示迭代次数和矩阵转置; $f(x)$ 为描述控制柜内部元件的发热温度的参数值; T 是根据 $f(x)$ 的估计值通过式 (5) 进行正问题计算得到的被检测表面温度值; I 为单位矩阵; Φ 为雅可比矩阵。

式 (10) 的迭代收敛条件为

$$J[f_g(x)] < \varepsilon \quad (12)$$

式中, ε 为某个给定的很小的正数。

通过 L-M 算法迭代求解过热元件的发热温度的计算方法如下:

(1) 对故障处的发热温度作初始假设, 得到 f^n 的初始值, 并将其作为输入开始迭代计算;

(2) 通过有限体积方法对式 (5) 进行求解, 从而得到 T_i^n ;

(3) 检查迭代收敛条件是否满足, 若 f^n 满足收敛条件, 则停止, 否则继续;

(4) 通过再次求解正问题得到雅可比矩阵, 然后通过式 (10) 求得 f^{n+1} , 并返回到第 (2) 步继续进行计算。

3 发热温度的实例计算及分析

根据编好的反问题求解程序, 为过热元件的发热温度 (T) 设定初始值, 然后进行循环迭代求解。通过对壳体表面进行红外成像测温, 得到

发热温度的估计值, 并根据控制柜内部元件故障判定标准来判断元件的过热程度。

长方形壳体板的尺寸为 $0.005 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$, 导热系数为 $50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 壳体外侧的流体温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 对流换热系数为 $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

设发热元件的面积 $\Delta A = 0.02 \text{ m} \times 0.02 \text{ m} = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 垂直距离 $d = 0.05 \text{ m}$, 水平距离 $h = 0.15 \text{ m}$ 。

3.1 控制柜内部元件正常工作时的反问题求解温度

假设元件的正常工作温度 $T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, 则壳体板外表面的温度场分布如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 壳体板外表面的最大温差为 $0.52 \text{ }^\circ\text{C}$, 高于热像仪检测的临界温度值 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此该元件的正常工作情况可以通过红外热像仪检测获悉。

对计算得到的表面温度场温度进行离散化, 得到在被检测表面上离散的温度值。设定初始未知数, 运用 L-M 算法进行导热反问题计算, 得到工作温度值 $T'_0 = 39.78 \text{ }^\circ\text{C}$, 其平均相对误差 $E_{\text{error}} = 0.5 \%$ 。结果证明, 该方法能够求解控制柜内部元件的正常工作温度, 并且具有较高的求解精度。

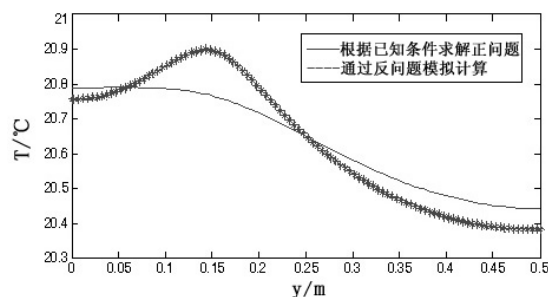


图 3 被检测表面的温度分布

3.2 控制柜内部元件存在一般热缺陷时的反问题求解温度

假设故障元件的过热温度 $T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$, 则壳体板外表面的温度场分布如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 壳体板外表面的最大温差为 $0.62 \text{ }^\circ\text{C}$, 高于热像仪检测的临界温度值 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 因此该元件的过热情况可以通过红外热像仪检测获悉。

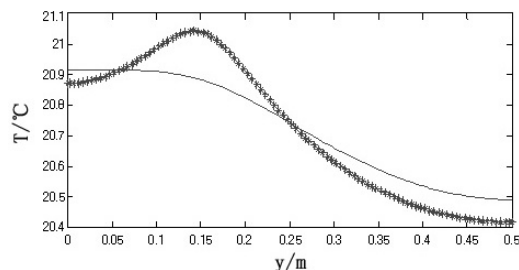


图 4 被检测表面的温度分布

对计算得到的表面温度场温度进行离散化, 得到在被检测表面上离散的温度值。设定初始未知数, 通过导热反问题计算得到发热温度值 $T' = 54.65\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其平均相对误差 $E_{\text{error}} = 0.64\%$ 。

3.3 控制柜内部元件存在严重热缺陷时的反问题求解温度

假设故障元件的过热温度 $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则壳体板外表面的温度场分布如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 壳体外表面的最大温差为 $0.84\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高于热像仪检测的临界温度值 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此该元件的过热情况可以通过红外热像仪检测获悉。

通过反问题求解得到的发热温度值 $T' = 79.78\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其平均相对误差 $E_{\text{error}} = 0.28\%$ 。

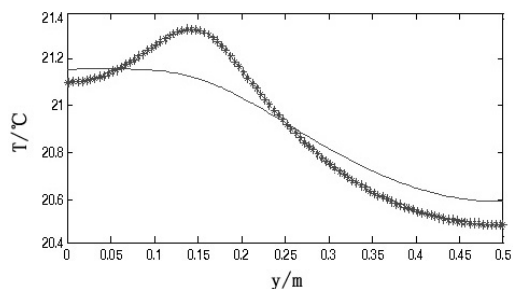


图 5 被检测表面的温度分布

3.4 控制柜内部元件存在危急热缺陷时的反问题求解温度

假设故障元件的过热温度 $T = 110\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则壳体板外表面的温度场分布如图 6 所示。从图 6 中

可以看出, 壳体板外表面的最大温差为 $1.16\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高于热像仪检测的临界温度值 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此该元件的过热情况可以通过红外热像仪检测获悉。

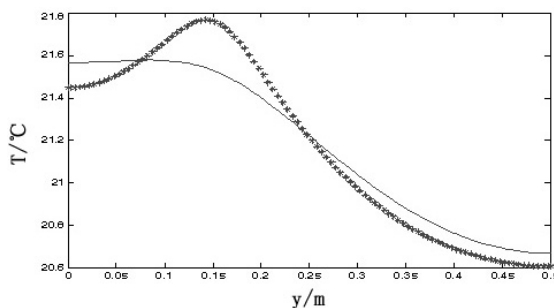


图 6 被检测表面的温度分布

通过反问题求解得到的发热温度值 $T' = 108.92\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其平均相对误差 $E_{\text{error}} = 0.98\%$ 。

图 3、图 4、图 5 和图 6 分别为控制柜内部元件在不同发热时间段的温度值模拟结果。结果表明, 不同发热时段的设备表面温度分布图像均可通过红外热像仪检测得出; 通过 L-M 反问题求解算法并利用设备外表面的温度分布, 便能准确求解控制柜内部元件的发热温度, 进而可运用表面温度判断法和判别依据进一步识别元件热缺陷的严重程度。

3.5 温度测量误差对元件热缺陷严重程度判别的影响

本文通过将一个随机误差加到正问题的精确计算结果中, 模拟了带有误差的实际红外温度测量值:

$$Y = Y_{\text{exact}} + \omega\sigma \quad (13)$$

式中, Y_{exact} 为根据 $f(x)$ 求解式 (5) 得到的精确的检测表面温度值, σ 为实际测量的标准偏差, ω 为 -1.0 和 1.0 之间的随机数。

表 2 所示为 σ 取不同值时的元件发热温度

表 2 σ 取不同值时的计算结果

$\sigma / ^{\circ}\text{C}$	$f(x)$	$T = 40 (^{\circ}\text{C})$	$E_{\text{error}} / \%$	$T = 55 (^{\circ}\text{C})$	$E_{\text{error}} / \%$	$T = 80 (^{\circ}\text{C})$	$E_{\text{error}} / \%$	$T = 110 (^{\circ}\text{C})$	$E_{\text{error}} / \%$
0.02	$f_g(x)$	39.88	0.3	55.24	0.44	80.35	0.44	109.79	0.19
0.5	$f_g(x)$	40.99	2.47	55.53	0.96	82.77	3.46	112.02	1.84
1	$f_g(x)$	45.04	12.6	62.98	14.51	76.78	4.02	119.22	8.38
2	$f_g(x)$	46.78	16.96	72.20	31.27	82.29	2.86	132.88	20.80

(下转第 22 页)