

电线电缆破损的定量热像检测与诊断方法研究

范春利¹, 孙丰瑞¹, 杨立¹, 刘宝华²

(1. 海军工程大学船舶与动力学院, 湖北省武汉市 430033;

2. 海军飞行学院教研部, 辽宁省葫芦岛市 125001)

STUDY ON QUANTITATIVE METHODS OF INSPECTION AND BREAKAGE DIAGNOSES OF HIGH VOLTAGE LINE AND CABLE BY THERMOGRAPHY

FAN Chun-li¹, SUN Feng-rui¹, YANG Li¹, LIU Bao-hua²

(1. Shipping and Power College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei Province, China;

2. Department of Teaching and Research, Naval Academy of Aviation, Huludao 125001,

Liaoning Province, China)

ABSTRACT: Based on the control volume method, a physical and mathematical heat transfer model is built, with the consideration of the axial heat conduction, the high voltage line and cable with breakage, and the temperature distribution rules near the breakage are studied. Moreover, an inverse method, based on the temperature measurement by the infrared thermography, for quantitatively diagnosing the breakage ratio of high voltage line and the cable is presented. Both the numerical analysis and the experimental study of the commonly used line and cable with breakage certify the effectiveness of the quantitative methods of inspection and breakage diagnoses for high voltage line and cable by infrared thermography.

KEY WORDS: Cable; Infrared thermography; High voltage line; Nondestructive testing (NDT); Breakage

摘要:通过控制容积法对带有破损的高压输电线及电缆建立了物理和数学模型。模型考虑了电线和电缆芯的轴向导热,更精确地描述了破损程度和温度响应的关系;得到了无破损以及不同程度破损时电线以及电缆的表面温度分布规律;提出了通过红外热像仪测量表面温度分布在线检测与诊断输电线和电缆破损程度的方法,并针对常用电线电缆进行了具体分析和诊断。理论和实验研究均证明了红外在线检测电线电缆破损的可行性及定量诊断方法的有效性。

关键词: 电缆; 红外热像仪; 高压输电线; 无损检测; 破损

1 引言

电线电缆是电力部门最常用的设备之一,尽管物理结构比较简单,但在运行的过程中,如果没有

及时发现故障隐患,一旦失效就会给国民经济带来巨大的损失。因此,人们对电线电缆各种故障的诊断进行了大量的研究。文献[1]通过对交链聚乙烯(XLPE)电力电缆试品在工频、0.1Hz超低频和振荡波3种击穿电压下的平行对比试验研究,探讨了能够有效发现、判别XLPE电力电缆运行故障隐患的试验方法;文献[2]提出了电桥法测定电缆三相绝缘故障的新方法;文献[3]将分布式光纤温度传感器应用于交联聚乙烯绝缘地下电缆故障检测。此外还有小波重构故障测距方法^[4]、阻抗法^[5]以及局部放电检测方法^[6]等。

近年来,随着红外热像仪测温精度的提高,加之体积小、效率高、适合大面积在线检测等优势,其在电线电缆的检测以及故障诊断中发挥了越来越重要的作用。文献[7]提出了基于表面温度场检测电缆芯温度的计算方法;文献[8]建立了高压输电线破损的红外诊断系统,通过检测红外探测器的响应电压来判断高压输电线的破损程度;文献[9]借助红外辐射理论,建立了破损导线的热辐射场和红外传感器对其输入响应的模型。前人的检测系统建立在电压响应信号的基础上。然而,随着热像仪精度的提高,可以通过热像仪直接精确地读出所检测部位的温度分布,通过红外特征分析和导热反问题求解相结合,直接判断设备内部是否存在故障以及故障的严重程度。

本文的工作就是针对常用电线电缆建立存在破损时内部传热的物理和数学模型,模型考虑了电

线和电缆的轴向导热, 更加精确地描述了破损程度和温度响应的关系; 分析在不同破损程度时破损处附近的轴向温度分布特征, 从而研究红外热像检测的可行性; 提出根据表面温度分布确定内部破损程度的反问题计算方法, 并针对常用电线电缆进行具体分析和实验研究来验证方法的有效性。

2 高压输电线

2.1 物理模型

高压输电线破损的横截面变化如图 1 所示。破损前, 电线由一根钢芯和 n 根铝导线组成, 而破损后, 只有 $n-k$ 根铝导线处于工作状态。其中, 钢芯的截面积为 S_0 , 而铝导线的总截面积为 S , 破损后 S_s 。

有破损的高压输电线的控制体模型见图 2。原点取在破损段的中心位置, 破损段的长度为 $2L$ 。设导线的单位长度电阻为 R , 破损段的单位长度电阻为 R_s , 电流为 I 。

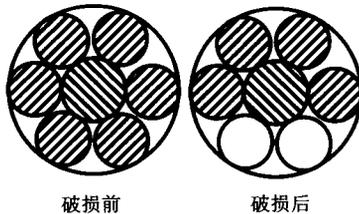


图 1 电线横截面结构示意图

Fig. 1 Cross-sectional schematic of high voltage line with breakage

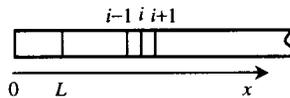


图 2 电线纵截面控制体示意图

Fig. 2 Schematic of control volume of line

2.2 数学模型

破损段及其附近的温度分布可由式(1)~(2)求得

$$Sk \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} + Sk \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta x} - Q = 0 \quad (1)$$

$$Q = I^2 R \Delta x - 2\pi r \Delta x \alpha (T_i - T_f) \quad (2)$$

相应的边界条件为

当 $x=0$

$$\partial T / \partial x = 0 \quad (3)$$

当 $x \rightarrow \infty$

$$\partial T / \partial x \rightarrow 0 \quad (4)$$

当 $x < L$ 时, 式(1)中面积为 S_s , 式(2)中电阻取为 R_s 。 Δx 为控制体步长; T_f 为环境温度; k 为导热系数。 α 为输电线表面自然对流换热系数。

2.3 电线电阻值 R 的确定

通常交流电阻总是以直流电阻 R_d 乘以交直流

电阻比 β 表示^[10]为

$$R = \beta \cdot R_d \quad (5)$$

如果忽略温度对导体直流电阻的影响, 则

$$R_d = \frac{4\rho\lambda_{am}}{\pi d^2 N} \quad (6)$$

式中 ρ 为铝单线的电阻率; λ_{am} 为铝线平均绞入率按各层铝线平均节距比计算; d 为铝单线直径; N 为铝线总根数。

2.4 电线破损程度的诊断

一般电线破损的长度都比较小, 且破损的长度没有太大的差别。当热像仪测得表面温度分布以后, 首先, 假设电线破损处的电阻值, 然后根据式(1)~(4)计算电线表面的温度分布, 通过和所测温度分布进行对比, 不断修正假设值, 从而得到破损处的电阻。最后通过式(6)得到破损铝线的根数。

3 电缆

3.1 物理模型

电缆的结构示意图如图 3 所示。本文对电缆的分析, 做如下假设: ①电缆处于稳定的工作状态; ②忽略绝缘层内部的轴向导热; ③缆芯温度只存在轴向变化。

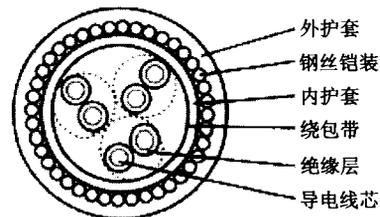


图 3 电缆横截面结构示意图

Fig. 3 Cross-sectional schematic of cable

3.2 缆芯温度的检测

缆芯温度是电缆的一个重要参数, 对于单芯电缆和多芯电缆, 电缆运行时缆芯温度计算式为^[10]

$$T = T_f + (I^2 R + 0.5W_d)R_{T1} + [I^2 R(1 + \lambda_1) + W_d] \cdot$$

$$nR_{T2} + [I^2 R(1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d]n(R_{T3} + R_{T4}) \quad (7)$$

式中 I 为一根导体中流过的电流; R 为最高工作温度下导体单位长度的交流电阻; W_d 为导体绝缘单位的介质损耗; R_{T1} 为一根导体和金属套之间单位长度热阻; R_{T2} 为金属套和铠装之间内衬层单位长度热阻; R_{T3} 为电缆外护套单位长度热阻; R_{T4} 为电缆表面和周围介质之间单位长度热阻; n 为电缆中载有负荷的导体数; λ_1 和 λ_2 分别为电缆金属套损耗和铠装损耗相对于所有导体总损耗的比率。具体每

个参数的确定参见文献[10]。

当用红外热像仪进行电缆缆芯温度检测时,首先根据热像仪所测表面温度、电缆所处的工作环境,通过经验公式^[11]

$$Nu_d = CR_{ed}^n Pr_m^{1/3} \quad (8)$$

确定 R_{T4} , 然后计算其他热阻和损耗, 通过式(7)得到电缆的缆芯温度。式(8)中 C 、 n 为常数, 其它变量为无量纲参数。

3.3 电缆缆芯破损后的表面温度分布规律

图4为单芯电缆纵截面示意图。其中, 坐标原点为破损段中央处, 破损段的长度为 $2L$, 对于破损段和破损段附近的控制体, 传热方程为

$$S_c k \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x} + S_c k \frac{T_i - T_{i+1}}{\Delta x} - Q = 0 \quad (9)$$

$$Q = I^2 R \Delta x - 2\pi r \Delta x \alpha (T_{io} - T_f) \quad (10)$$

其中, T_i 为电缆芯的温度; T_{io} 为电缆表面温度; k 、 S_c 分别为缆芯的导热系数和截面积; α 为电缆表面自然对流换热系数; r 为电缆截面最大半径。相应的边界条件同式(3)、(4)。当 $x < L$ 时, 式(9)中 S_c 取破损后面积 S_{cs} , 式(10)中的电阻值取为 R_S 。根据导热方程, T_i 和 T_{io} 的换算关系为

$$2\pi r \alpha (T_{io} - T_f) = \frac{T_i - T_{io}}{R_{T1} + R_{T2} + R_{T3}} \quad (11)$$

钢管电缆除外, 其他电缆导体最高工作温度下单位长度的交流电阻为式(12)

$$R = R' (1 + Y_s + Y_p) \quad (12)$$

式中 R' 为最高工作温度下的导体的直流电阻; Y_s 为集肤效应因数; Y_p 为邻近效应因数。 Y_s 和 Y_p 的计算公式详见文献[10], α 为电缆表面的自然对流换热系数, 其计算可参见文献[11]。

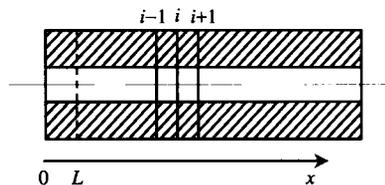


图4 电缆纵截面控制体示意图

Fig. 4 Schematic of controlling volume of cable

3.4 电缆破损程度的诊断

通过红外热像仪检测, 找到存在温升的导线破损部位, 根据温度值以及电缆所处环境确定电缆表面和环境的换热系数 α 。首先, 假设电缆破损处的电阻值, 然后根据式(9)~(11)计算电缆表面的温度分布, 通过和所测温度进行对比, 不断修正假设值,

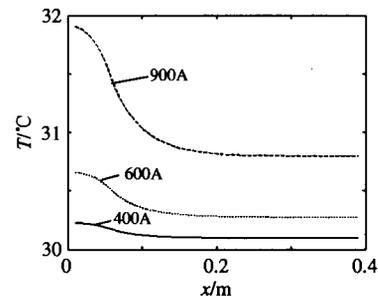
从而得到破损处的电阻。最后通过式(12)得到电缆破损导线的根数或破损比。

4 算例

4.1 高压输电线破损

本文以钢芯铝绞线 (GLGJ-210/360) 为例计算有无破损时电线表面的温度分布以及通过测量表面温度诊断电线破损程度。假设电缆的破损长度固定为 0.05m, 环境温度为 30℃。

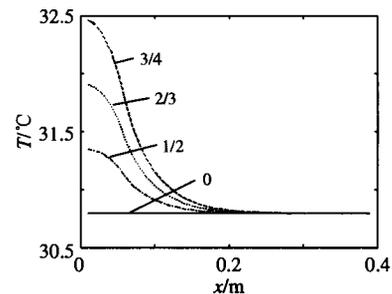
不同电流和不同破损比例时破损处附近温度分布分别如图5和图6所示。由图可以看出随着电流的增大以及破损程度的增强, 破损处的温度升高。并且图中各种情况下的温差均高于热像仪的最小分辨温差 0.2℃^[12]。由此可见, 通过热像仪扫描检测高压输电线的破损情况是可行的。图7为破损处附近的温度分布受表面换热系数的影响曲线。如果风速等因素使得表面散热加强, 则表面温度降低, 同时也使得有无破损处的温差降低, 热像仪的可检测性降低。相反, 则使得热像仪的可检测性增强。



注: 破损 2/3, 1500W/(m²·°C)

图5 不同电流时破损处温度分布

Fig. 5 Temperature distribution under different current

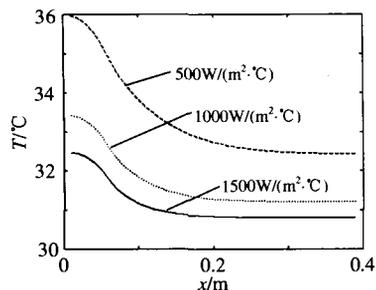


注: 900A, 1500W/(m²·°C)

图6 不同破损程度条件下温度分布

Fig. 6 Temperature distribution under different breakage ratio

电线表面对流换热系数为 500W/(m²·°C), 电流为 900A 时的诊断结果如图8所示。根据红外热像仪所测的温度分布, 直接可以判断出钢芯周围铝导线破损的根数。值得指出的是, 当 T_{max} 和环境温度比



注：电流 900A，破损 3/4

图 7 不同换热系数时破损处附近的温度分布
Fig. 7 Temperature distribution under different heat exchange coefficient

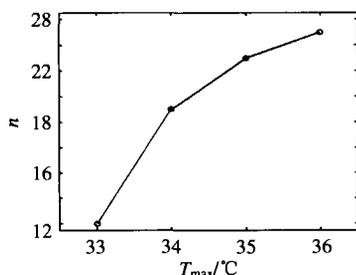


图 8 换热系数 500W/(m²·°C)，电流 900A 时的诊断结果
Fig. 8 Diagnosis results under heat exchange coefficient 500W/(m²·°C) and current 900A

较接近时，由于此时的最大温差和热像仪的测量误差比较接近，使得破损程度的可诊性下降。

4.2 电缆破损

以 8.7/15kV YJV 1×400mm² 交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电缆为例计算电缆不同破损程度时电缆缆芯以及外表面的温度分布。环境温度取 40℃，电流强度为 680A。表面为自然对流和辐射换热。电缆的具体参数详见国标。

图 9 为电流强度为 680A 时，在破损中心附近的缆芯和电缆外表面的温度分布。由于电缆各种热阻的影响使得缆芯和外表面的温度相差达 20℃ 以上。所以，为了保证电缆不超过其最高工作温度必须对电缆的外表面温度进行监控，通过式(7)进行反向计算，得到缆芯的温度。

图 10 为电缆不同破损程度时电缆外表面的温度分布。从图中可知，随着破损程度的增加，电缆表面的温差加大；并且，在不同破损程度时，破损处和无破损处的最大温差均大于 1.5℃，远远大于热像仪的最小分辨温差。证明了红外检测电缆的可行性。

图 11 为破损处不同最高温度时，根据红外热像仪所测得的表面温度分布通过反向计算诊断电缆缆芯破损程度的结果。

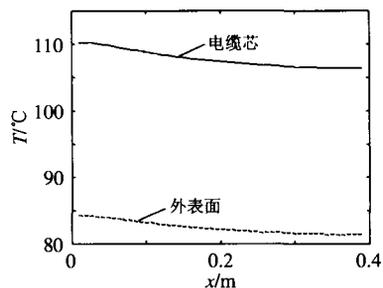


图 9 破损处缆芯和外表面的温度分布 (破损 1/3)
Fig. 9 Temperature distribution of cable core and cable surface (breakage ratio 1/3)

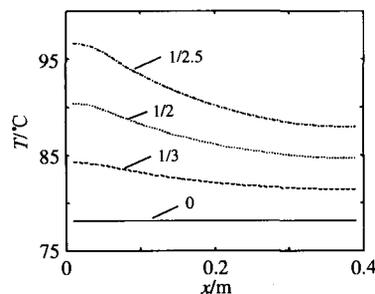


图 10 不同破损程度时电缆外表面的温度分布
Fig. 10 Temperature distribution of cable surface under different breakage ratio

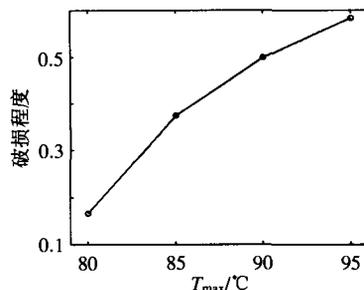


图 11 据表面温度分布诊断破损程度的诊断结果
Fig. 11 Diagnosis results based on temperature distribution

5 实验验证

本文对 YH 型单芯电缆进行实验研究。电流 14A，环境温度 20℃。电缆破损处的红外热像图如图 12，其中左端为破损中心。其轴向温度分布与理论值的结果吻合如图 13 所示；诊断结果为破损比 0.77，证明了模型和诊断方法的正确性。由于受实验条件限制，电流较小，所以表面温差较小。



图 12 电缆破损处的红外热像图
Fig. 12 Thermal image of cable breakage

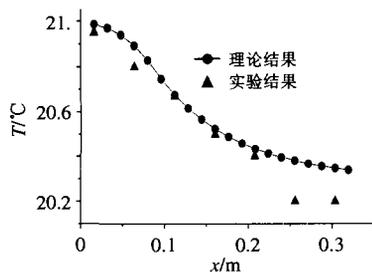


图13 电缆破损4/5时破损处温度分布的理论和实验结果

Fig. 13 Analytical and experimental results of temperature distribution on cable surface under breakage ratio 4/5

6 结论

本文提出了通过红外热像仪在线检测和诊断电线电缆破损程度的方法。通过对带有破损的常用电线电缆的数值模拟以及实验研究,证明了定量检测与诊断方法的可行性。

本文所研究的电缆破损是指单芯电缆缆芯的部分破损或者多芯电缆中一个绝缘层内导电线芯(如图3所示)的部分破损。而对于多芯电缆一根或多根导电线芯全部折断的情况,由于导电线芯外存在绝缘层,不会引起电阻的轴向变化。可通过有无损的电缆表面温度值的对比来进行判断。

在实际的检测工作中,为了提高红外热像检测与诊断的可靠性,应对根据不同的检测环境,首先分析热像仪的测量误差^[13-14],对温度分布值进行修正,然后再进行诊断工作。

参考文献

- [1] 罗俊华, 马翠娟, 邱毓昌, 等. 35kV 及以下 XLPE 电力电缆试验方法的研究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 58-61.
Luo Junhua, Ma Cuijuan, Qiu Yuchang *et al.* Study on test methods of XLPE power cable rated up to 35kV[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 58-61.
- [2] 叶芃生, 董华霞, 叶靖波. 电桥法测定电缆三相绝缘故障的新方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(5): 361-363.
Ye Pengsheng, Dong Huaxia, Ye Jingbo. Novel method for locating insulation failure of three-phase cables by bridge circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(5): 361-363.
- [3] 张晓虹, 蒋雄伟, 王振华, 等. 分布式光纤温度传感器在交联聚乙烯绝缘地下电缆故障检测中的应用[J]. 电网技术, 1999, 23(12): 36-38.
Zhang Xiaohong, Jiang Xiongwei, Wang Zhenhua *et al.* Application of fiber optic distributed temperature sensor to fault detection of XLPE insulated underground cable[J]. Power System Technology, 1999, 23(12): 36-38.
- [4] 熊小伏, 林金洪. 基于小波重构的电力电缆故障测距方法[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 36-38.
Xiong Xiaofu, Lin Jinhong. A wavelet reconstruction based fault location method for power cables[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 36-38.
- [5] 王玮, 蔡伟, 张元芳, 等. 基于阻抗法的电力电缆高阻故障定位理论及试验[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 38-41.
Wang Wei, Cai Wei, Zhang Yuanfang *et al.* Theory and experiment of a cable fault location method based on impedance and using frequency-variable source[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 38-41.
- [6] 罗俊华, 冯江, 袁检, 等. 交联聚乙烯电缆局部放电高频检测技术的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(12): 42-45.
Luo Junhua, Feng Jiang, Yuan Jian *et al.* Study on detection of partial discharge in XLPE cable at higher frequency[J]. Power System Technology, 2001, 25(12): 42-45.
- [7] 赵建华, 袁宏永, 范维澄, 等. 基于表面温度场的电电缆芯温度在线诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(1): 52-54.
Zhao Jianhua, Yuan Hongyong, Fan Weicheng *et al.* Surface temperature field based online diagnoses study for electric cable's conductor temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(1): 52-54.
- [8] 戴锦春, 吴功平, 郭应龙, 等. 高压输电线破损的红外故障诊断系统[J]. 武汉水利水电大学学报, 1998, 31(2): 61-64.
Dai Jinchun, Wu Gongping, Guo Yinglong *et al.* A breakdown diagnostic system for high-voltage transmission-line by infrared ray[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998, 31(2): 61-64.
- [9] 吴功平, 戴锦春, 郭应龙, 等. 输电导线机械破损的红外检测与故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(6): 571-574.
Wu Gongping, Dai Jinchun, Guo Yinglong *et al.* Infrared ray detection and fault diagnosis of mechanical fault on high voltage lines[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(6): 571-574.
- [10] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [11] 王补宣. 工程传热传质学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [12] Inagaki T, Ishii T, Iwamoto T. On the NDT and E for the diagnosis of defects using infrared thermography[J]. NDT&E International, 1999, 32(5): 247-257.
- [13] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999, 21(4): 20-24.
Yang Li. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager[J]. Infrared Technology, 1999, 21(4): 20-24.
- [14] 范春利, 孙丰瑞, 杨立. 管壁减薄的红外检测方法研究[J]. 激光与红外, 2004, 34(6): 452-454.
Fan Chunli, Sun Fengrui, Yang Li. Study on detection of pipeline wall thinning by infrared NDT[J]. Laser and Infrared, 2004, 34(6): 452-454.

收稿日期: 2005-03-10。

作者简介:

范春利(1978-), 男, 博士研究生, 研究方向为传热传质热流体力学及其应用、电子器件散热、红外故障诊断等;

孙丰瑞(1939-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代热力学、有限时间热力学、传热传质、热力系统故障诊断等;

杨立(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为传热传质热流体力学、热物理量测技术和设备红外诊断等;

刘宝华(1971-), 男, 讲师, 研究方向为电力电子与电力拖动。