

高压输电线路热故障红外诊断的一维瞬态理论模型

曹春梅, 刘小文

(华北电力大学数理系, 河北 保定 071003)

摘要:针对架空高压输电线路热故障红外巡航检测,建立了一维瞬态导热模型,并对结果进行了理论求解和模拟结果分析,所得结论可为高压线路热故障红外巡航检测提供科学的理论依据。

关键词:高压线路热故障;红外诊断;一维瞬态导热模型

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A

One Dimensional Unstable State Model of Infrared Diagnosis of Heat Defect in High Voltage Transmission Line

CAO Chun-mei, LIU Xiao-wen

(Dept. of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: One dimensional unstable state heat conduction model is set up for infrared aerial detection of defect in high voltage transmission line, and results are discussed theoretically and simulated numerically. The solution established provides theoretical reference for infrared aerial detection of defect in high voltage transmission line.

Key words: defect in high voltage transmission line; infrared diagnosis; one dimensional unstable state heat conduction model

1 引言

在架空高压输电线路上有许多接头连接件,由于各种原因造成的不良连接,会使接头处接触电阻率较高,从而电流流过时产生的焦耳热造成的温升也较其他部位为高,形成过热接头故障点,影响安全运行,是一种危害性很大的事故隐患。对这种故障,用现代红外技术对温度进行测量从而检测出热故障点是一种很好的方法,具体的操作是将红外热像仪装载在直升飞机上进行在线寻线检测。为用红外技术检测架空高压线路导线接头故障,必须研究和掌握故障接头的发热特征,有文献[1] - [4]提出基于绝对温差法、相对温差法及电阻判据等给出输电线路的红外诊断,但所作讨论未考虑有瞬时大电流通过故障点的情况,所得结论不具有普适性。为了解

有瞬时大电流(如线路遭受雷击或系统出现短路)通过输电线路时故障点温度变化,本文建立了一维输电线路发热故障点瞬态发热的理论模型,为确定高压输电线路故障红外检测条件提供必要的科学理论依据。

2 物理模型

根据普遍性热传导理论,在一般情况下,有内热源的瞬态热传导方程为^[5]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho_0 c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{Q}}{\rho_0 c} \quad (1)$$

作者简介:曹春梅(1965-),女,教授,在读博士,从事物理教学工作,主要研究方向为红外热诊断在电气工程实际的应用,已发表论文多篇。E-mail: caochunmeihd@sohu.com

收稿日期:2008-07-13

为使问题简化,假定输电线路的长度远远大于其导电截面,致使在任一时刻同一截面上的热量分布和温度分布相同,可视为一无限长的均匀通电导线,因此端点的影响可忽略,又据导线对故障点有对称特性,只需要考虑定义域的一半,在忽略径向温度变化的情况下,可建立以故障点为坐标原点的一维瞬态导热方程如下:

$$\rho_0 c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{Q} \quad (2)$$

式中, \dot{Q} 为通电线路单位容积内热源的生成热,在不考虑辐射热交换影响的情况下,可表示为:

$$\dot{Q} = \frac{I^2 \rho}{\pi^2 R^4} - \frac{2\alpha}{R}(T - T_e) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),可得如下形式的通电线路一维瞬态导热微分方程式:

$$\frac{\rho_0 c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{2\alpha}{\lambda R} T + \frac{1}{\lambda} \left[\frac{I^2 \rho}{\pi^2 R^4} + \frac{2\alpha T_e}{R} \right] \quad (4)$$

式中, T 为输电线路的温度, K; ρ_0 为输电线路的密度, kg/m^3 ; λ 热传导系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; c 为输电线路的比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; R 为输电线路横截面半径, m; I 输电线路的负荷电流, A; T_e 为空气(环境)的温度, K; ρ 为通电导线的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; α 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

与文献[4]一致,仍取 $\frac{2\alpha}{\lambda R} = a$, $\frac{1}{\lambda}$

$\left[\frac{I^2 \rho}{\pi^2 R^4} + \frac{2\alpha T_e}{R} \right] = b$, 并令 $\frac{\rho_0 c}{\lambda} = k$, 则式(4)变为:

$$k \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - aT + b \quad (5)$$

与方程(5)对应的定解条件为:

$$T|_{t=0} = T_\infty \quad (6)$$

$$T|_{x=\infty} < \infty \quad (7)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{1}{2\lambda} \left(\frac{I^2 \rho'}{\pi^2 r'^4} \right) = -b' \quad (8)$$

其中, ρ' 为接头的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; r' 为接头处截面半径, m。

对一维瞬态导热问题式(5)~(8),关于 t 取拉氏变换^[6-7], 设 $L[T] = Y$, 有:

$$\frac{d^2 Y}{dx^2} - (kP + a)Y = -\frac{b}{P} \quad (9)$$

$$Y|_{x=\infty} < \infty \quad (10)$$

$$\left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=\infty} = -\frac{b'}{P} \quad (11)$$

式(9)的解析通解形式为:

$$Y = C_1 e^{-\sqrt{kP+ax}} + C_2 e^{\sqrt{kP+ax}} + \frac{b}{P(k+a)}$$

由式(10)可得 $C_2 = 0$, 由式(11)可得 $C_1 = \frac{b'}{P\sqrt{kP+a}}$, 从而方程组式(9)~(11)的解为:

$$Y = \frac{b'}{P\sqrt{kP+a}} e^{-\sqrt{kP+ax}} + \frac{bk}{P(k+a)} \quad (12)$$

查表,式(12)的拉氏逆变换为:

$$T(x, t) = \frac{b'}{\sqrt{a}} \left[\exp(-\sqrt{ax}) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{kt}} - \sqrt{\frac{a}{k}t} \right) - \exp(\sqrt{ax}) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{kt}} + \sqrt{\frac{a}{k}t} \right) \right] + \frac{b}{a} (1 - e^{-\frac{a}{k}t}) \quad (13)$$

其中, $\operatorname{erfc}(z)$ 为余误差函数, 其表达式为:

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-x^2} dx \quad (14)$$

3 理论解与模拟结果分析

取输电线路的运行参数参考数值如下:

对流换热系数 α : $10 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

热传导系数 λ : $200 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$

输电线路的密度 ρ_0 : $2.7 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$

输电线路的比热 c : $0.9 \times 10^3 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K}$

输电线路横截面半径 R : 0.01 m

空气(环境)的温度 T_e : 300 K

通电导线的电阻率 ρ : $0.0272 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$

输电线路的负荷电流 I : 50 A 100 A 200 A

接头处截面半径 r' : 0.01 m

接头处(故障点)单位长度电阻值 R_l : $0.001 \Omega/\text{m}$ $0.002 \Omega/\text{m}$ $0.003 \Omega/\text{m}$

3.1 触点 $x=0$ 短时升温

将 $x=0$ 代入式(13), 可得触点处温度随时间的变化过程的计算公式:

$$T(0, t) = \frac{b'}{\sqrt{a}} \left[\operatorname{erfc} \left(-\sqrt{\frac{a}{k}t} \right) - \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{a}{k}t} \right) \right] + \frac{b}{a} (1 - e^{-\frac{a}{k}t}) = \frac{2b'}{\sqrt{a}} \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{a}{k}t} \right) + \frac{b}{a} (1 - e^{-\frac{a}{k}t}) \quad (15)$$

当 $z \leq 0.1$ 时, 则 $\operatorname{erf}(z) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} z$, 相对误差在 1%

以内, 将 $\operatorname{erf}(z) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} z$ 代入公式(15)可得 $x=0$ 短时

温度变化过程解为:

$$T(0,t) = \frac{4b'}{\sqrt{k\pi}}\sqrt{t} + \frac{b}{k}t \quad (16)$$

针对瞬时电流,由式(13)和式(14)知,当 $z \leq 0.1$ 时, $t \leq 12.15\text{s}$ 。根据已知运行参数,即可得到不同瞬时电流、不同阻值的触点,在短时间内,其温度随时间变化的温升曲线,如图 1~3 所示。

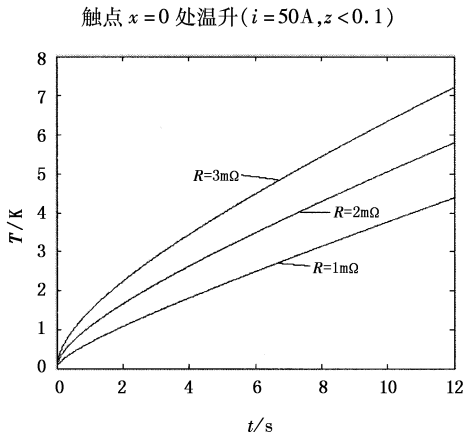


图1 瞬时电流 $I=50\text{A}$ 时,不同故障接头瞬态温升曲线

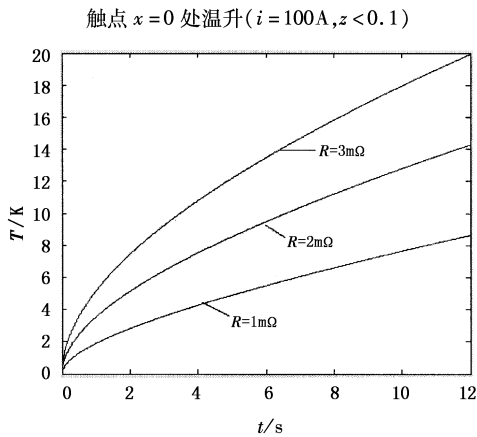


图2 瞬时电流 $I=100\text{A}$ 时,不同故障接头瞬态温升曲线

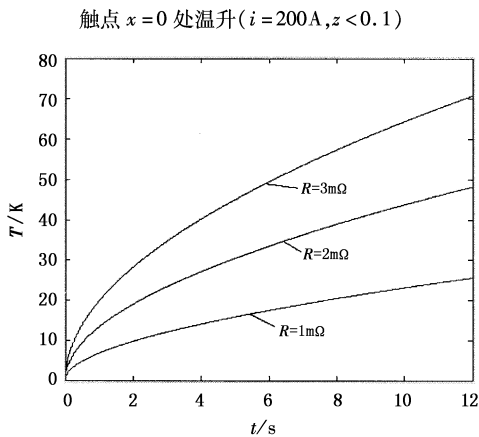


图3 瞬时电流 $I=200\text{A}$ 时,不同故障接头瞬态温升曲线

根据以上理论及图表分析,我们得出以下结论:

在接头触点(故障点) $x=0$ 处,导线瞬时温升较快,且与故障点的接触电阻阻值和通电电流大小有关,温升随接触电阻和通电电流的增大而明显增大。

3.2 稳态解析解

当 $t \rightarrow \infty$ 时,式(13)表现为稳定温升,有 $T(x) = \frac{2b'}{\sqrt{a}}\exp(-\sqrt{ax}) + \frac{b}{a}$,若令故障点(接头)的温度为 $T(0)$,则 $T(0) = \frac{2b'}{\sqrt{a}} + \frac{b}{a}$,从而稳态时输电线路与

故障点相距 x 处的温度为 $T(x) = \left[T(0) - \frac{b}{a} \right] \cdot \exp(-\sqrt{ax}) + \frac{b}{a}$,此时当 $x \rightarrow \infty$ 时, $T(\infty) = \frac{b}{a}$,

$\frac{T(x) - T(\infty)}{T(0) - T(\infty)} = \exp(-\sqrt{ax})$,显然,该比值仅与位置 x 及参数 $a = \frac{2\alpha}{\lambda R}$ 有关,与线路负荷电流大小及接头电阻无关,该结论与文献[4]的结论一致。图 4~6 给出了线路电流分别 50A,100A,200A 时,不同故障接头附近稳态温升曲线。

置 x 及参数 $a = \frac{2\alpha}{\lambda R}$ 有关,与线路负荷电流大小及接头电阻无关,该结论与文献[4]的结论一致。图 4~6 给出了线路电流分别 50A,100A,200A 时,不同故障接头附近稳态温升曲线。

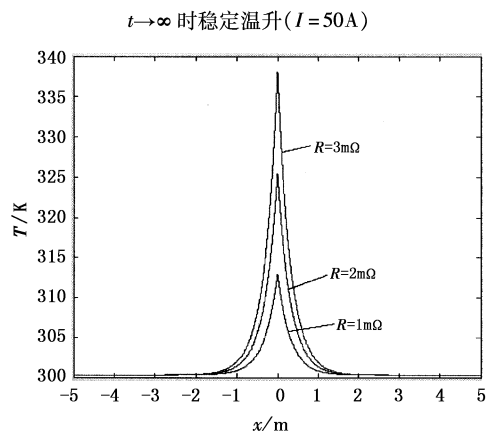


图4 线路电流 $I=50\text{A}$ 时,不同故障接头附近稳态温升曲线

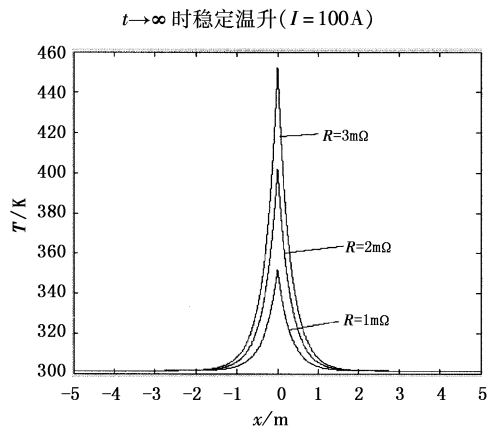


图5 线路电流 $I=100\text{A}$ 时,不同故障接头附近稳态温升曲线

(下转第 49 页)

20 个开关单元经过 5 级互连而成。开关单元为 2×2 MMI-MZI 光开关。在阵列中引入了 SSC 和隔离槽来减小损耗,降低功耗。整个器件的消光比大于 17dB。器件中开关单元功耗小于 240mW。开关上升时间为 2.18 μ s,下降时间为 2.63 μ s,比类似结构的 SiO₂ 开关阵列快了约 100 倍^[2]。阵列插入损耗特性较差,超过了 23dB。如果能够提高大面积 ICP 刻蚀的均匀性,减小粗糙表面所引起散射损耗,器件的损耗特性将会有明显改善。

参考文献:

- [1] YangDi, Li Yan-Ping, Sun Fei, et al. Fabrication of a 4×4 strictly nonblocking SOI switch matrix [J]. Opt. Commun., 2005, 250: 48-53.
- [2] Goh T. Recent advances in large-scale silica based thermo-optic switches [C]//SPIE, 2001, 4582: 49-56.
- [3] Moosburger R, Petermann K. 4×4 digital optical matrix

switch using polymeric oversized ribwaveguides [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1998, 10(5): 684-686.

- [4] Soldano L B, Penning E C M. Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications [J]. IEEE J. Lightwave Technol., 1995, 13(4): 615-627.
- [5] Soldano L B, Veerman F B, Smit M K, et al. Planar monomode optical couplers based on multimode interference effects [J]. IEEE J. Lightwave Technol., 1992, 10(12): 1843-1850.
- [6] Day I, Evans I, Knights A, et al. Tapered silicon waveguides for low insertion loss highly-efficient high-speed electronic variable optical attenuators [C]//Opt. Fiber Commun., 2003, 1: 249-251.
- [7] Li Yan-Ping, Yu Jin-Zhong, Chen Shao-Wu. A silicon-on-insulator-based thermo-optic waveguide switch with low insertion loss and fast response [J]. Chin. Phys. Lett., 2005, 22(6): 1449-1451.

(上接第 41 页)

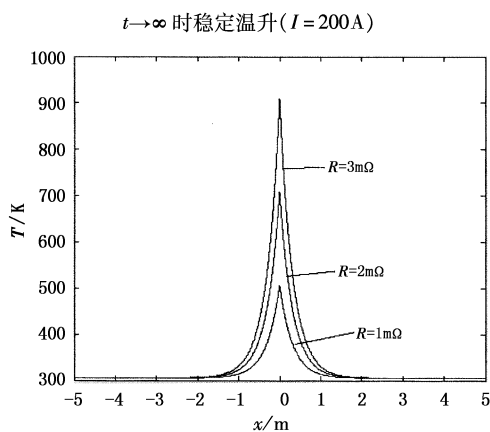


图 6 线路电流 $I=200A$ 时,不同故障接头附近稳态温升曲线

根据以上理论及图表分析,我们得出以下结论:
 $t \rightarrow \infty$ 时,导线温升为稳态温升,其大小与距故障点的距离及电流大小有关, $x=0$ 处温升最高,距故障点越远、温升越小,电流越小、温升越小,接头电阻越小、温升越小。另外,我们从图 4~6 中可看出,远处温升与线路电流、接头电阻无关, x 越大时,接触电阻影响变得越小,即接触电阻产生的热只对触点及其附近的导线产生影响,这与实际情况吻合。且比较三个图中还可看出高压输电电缆上距故障点 2m 处的温度与无穷远处的温度几乎无差别,因此可作为温度比较的基准,并由此判定故障点的位置,这与文献[4]的结论有一定差别,这可能是辐射项造成的。

4 结论

目前在电力设备红外诊断技术领域的基础理论研究仍然十分落后,这是制约红外诊断技术水平迅

速发展的根本原因。为提高诊断的客观性和准确性,应该开展大量的基础理论研究工作^[8]。电气设备故障红外诊断的基础在于探测与识别故障目标温度的特征性变化与分布。本文针对有热故障点的一维输电线路,建立了具有普遍意义的红外热诊断理论模型,给出了输电线路故障点及距故障点任意距离处的温度随时间变化的普遍解析表达式,并进行了模拟结果分析,所得结论为一维输电线路热故障的红外热诊断提供了充分可靠的理论依据,同时也拓宽了红外测温技术的应用前景,有利于促进红外技术的快速发展。

参考文献:

- [1] 谌青昊,吴功平,骆敏华,等. 高压输电线路红外诊断系统开发[J]. 机械与电子,2004,(3): 31-33.
- [2] 戴文进,郭世才. 高压输电线路故障的红外诊断技术[J]. 电力建设,2005,(4): 46-47.
- [3] 尹增谦. 输电线路接头热故障红外检测的电阻判据[J]. 红外技术,2000,22(5): 54-56.
- [4] 尹增谦,陈素敏,黄明强,等. 高压输电线路热故障红外诊断的理论分析和模拟实验[J]. 激光与红外,1994,24(3): 23-25,59.
- [5] 程尚模. 传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988.
- [6] 徐世良. 数学物理方法解题分析[M]. 江苏:江苏科学技术出版社,1982.
- [7] 李震彪,程礼椿. 短路电流下的电器发热分析[J]. 低压电器,1995,(6): 28-30.
- [8] 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.