

电力电缆接头温度场分布的理论研究

徐元哲, 王乐天, 高洪学, 谢学征

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 电力电缆接头事故在电力电缆故障中占很大的比例, 电力电缆接头的温度是反应其运行状态的重要参数。文中构建了电力电缆接头的简化结构模型, 运用传热学的原理建立了电力电缆接头的温度场数学模型, 应用有限元法分析了电力电缆接头的温度场分布。根据温度场的分布, 把温度传感器合理地安装在接头的表面, 可以通过电力电缆接头的结构特性、表面温度和环境温度, 得到更加接近实际温度的接头线芯温度, 能够及时准确地了解电力电缆接头的运行状况。

关键词: 电力电缆接头; 传热学; 温度场; 有限元

The oretical study on temperature field distribution of power cable junction

XU Yuan-zhe, WANG Le-tian, GAO Hong-xue, XIE Xue-zheng

(Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: There are many power cable junction faults in cable accidents, the temperature of the cable junction is very important and it can react to the cable junction running. This paper establishes a simplified power cable junction structure model, it uses the principle of heat transfer to establish power cable connector mathematical model of the temperature field, and applies Finite Element Method to calculate and simulate temperature field of cable junction. The temperature sensor is installed in the surface of the cable junction reasonably according to the temperature field, it can measure the core temperature which is closer to the actual temperature through the structure, surface temperature and ambient temperature of the power cable junction, the operation of the power cable junction should be known timely and accurately.

Key words: power cable junction; Heat Transfer; temperature field; FEM

中图分类号: TM8 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)24-0004-04

0 引言

根据电力事故调查, 电缆过热故障可引起火灾导致大面积电缆烧损, 造成被迫停机, 短时间内无法恢复生产, 造成重大经济损失。通过对事故的分析, 电缆接头过热是引起电缆火灾的直接原因, 电缆接头过热是因为接头压接头不紧、接头氧化等导致接触电阻过大, 长期的高温运行使绝缘下降并击穿, 最后导致电缆火灾的发生。

电缆接头的线芯温度是反应电缆接头运行状态的重要参数, 当电缆在正常负荷运行时, 接头内部的温度可达 100℃, 当电缆满负荷时, 电缆芯线温度达到 90℃, 接头温度会达 140℃左右, 当温度再升高时, 接头处的氧化膜加厚, 接触电阻随之加大, 在一定通电时间的作用下, 接头的绝缘材料碳化为非绝缘物, 导致故障发生。因此, 准确了解电缆接头的线芯温度, 对监测电缆接头是否正常运行具有重要意义^[1-3]。

本文通过建立电力电缆接头的简化模型, 运用传热学的原理, 应用有限元法模拟电力电缆接头的温度场分布。根据温度场的分布, 把温度传感器合理的安装在电力电缆接头的表面, 可以通过电力电缆接头的结构特性、表面温度和环境温度, 得到更加接近实际温度的电缆接头线芯的温度, 从而可以准确地对电力电缆接头的运行状况进行实时在线监测。

1 电缆接头的结构模型

根据传热学理论分析, 电力电缆接头的表面温度是导体线芯温度和介质损耗通过导热的方式经过各层紧密接触的护套传到接头的外表面, 并在已知对流换热系数和周围环境温度的对流边界条件下形成的。在分析电力电缆接头温度场分布的过程中, 作出如下基本假设:

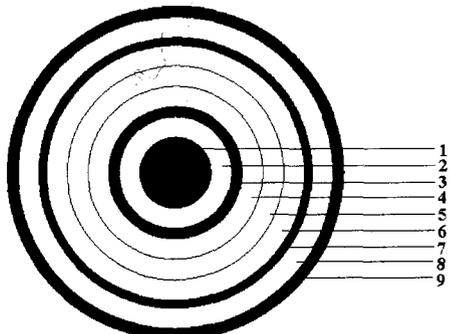
(1) 传热过程达到热平衡时, 温度不随时间变化, 温度场是稳态的;

- (2) 电力电缆接头为圆柱体, 截面为圆面;
 (3) 电缆线芯的导体温度是均匀的;
 (4) 电缆接头的各种材料的结构特性不随温度

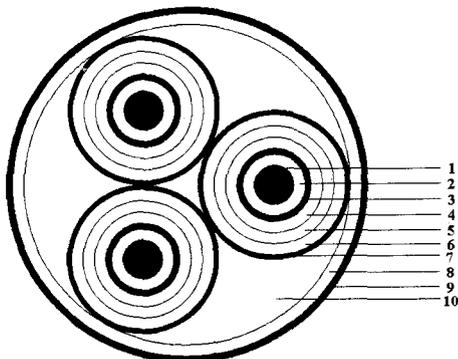
发生变化;

(5) 各层护套之间紧密接触, 忽略线芯与各护层以及各护层之间的接触电阻。

经过上述简化, 电力电缆接头的温度场分布转化为含有内热源的三维圆柱径向稳态导热问题。电力电缆接头剖面结构图如图 1 所示^[4-6]。



单芯电缆接头结构



三芯电缆接头结构

1 导电线芯 2 连接管 3 半导电带 4 内绝缘管 5 外绝缘管 6 半导电管 7 铜屏蔽网 8 内护套管 9 外护套管 10 填充条

图 1 电缆接头结构

Fig.1 The structure of power cable junction

2 电缆接头温度场数学模型

对于导体线芯温度和介质损耗通过各层护套的导热过程, 因为导体线芯可以作为均匀的内热源, 各层护套的导热系数为常数, 所以根据能量守恒定律和傅立叶导热定律, 温度场控制方程式为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{\phi}{\lambda} = 0 \quad (1)$$

式中: ϕ 为内热源的热能; λ 为导热系数; t 为物

体的温度。

边界条件主要是外护套与周围空气之间的自然对流, 其表达式为

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f) \quad (2)$$

式中: n 为换热表面的外法线; h 为对流换热系数; t_w 为边界温度; t_f 为周围空气温度^[7]。

其中对流换热系数的计算公式为

$$h = \frac{N_u \lambda_k}{2r_w} \quad (3)$$

式中: λ_k 为空气的导热系数; r_w 为外护套的外径; N_u 为努谢尔数, 邱吉尔和朱曾推荐, 对于相当广阔的瑞利数范围采用单一的关系式:

$$N_u = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 R_{ad}^{1/6}}{[1 + (0.559/P_r)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (4)$$

($10^{-5} < R_{ad} < 10^{12}$)

式中: P_r 为空气普朗特数, 取 0.7; R_{ad} 为空气的雷利数, 其表达式为

$$R_{ad} = \frac{g \beta (t_w - t_f) r_w^3}{\nu \lambda_k} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度; β 为空气的热膨胀系数; ν 为动力粘度^[8-10]。

将式(1)、式(2)转化为相应的等价变分问题为

$$J = \frac{\lambda}{2} \int_V \left[\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)^2 - \phi t \right] dV + \frac{1}{2} h \int_S (t_w - 2t_f) dS \quad (6)$$

把求解域离散成有限单元, 将上式进行离散化处理, 得到

$$[K] [T] = [Q] \quad (7)$$

式中: $[K]$ 为系数矩阵; $[T]$ 为温度列阵; $[Q]$ 为荷载叠加列阵^[11-14]。

3 电缆接头温度场计算

本文选取 10 kV 交联电缆热缩附件 JSY-10/1.2 和 JSY-10/3.2 制作的电力电缆接头为研究对象, 运用有限元数值模拟方法计算电缆接头温度, 并

模拟电缆接头的温度场。电缆接头的结构和参数如表 1 所示。

表 1 电缆接头参数

Tab.1 Parameters of power cable junction

名称	厚度 / mm	导热系数 / (W/m×℃)
连接管	4	0.48
半导体带	2	0.48
内绝缘管	4	0.48
外绝缘管	4	0.48
半导体管	4	0.48
铜屏蔽网	1.2	401
内护套管	4	0.335
外护套管	2.1	0.25
填充料		0.41

根据上述参数，取空气温度取为 25℃，计算得到了单芯电缆接头发生故障时，在电缆接头横截面中从圆心到外径的温度变化曲线如图 2 所示。

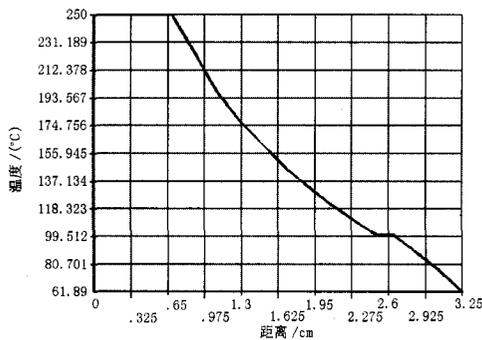


图 2 单芯电缆接头温度变化曲线

Fig.2 The diagram of temperature for single-core cable junction

当单芯电缆接头发生故障时，线芯温度与外护套表面温度相差 188℃。可见电缆接头的线芯温度与外表面温度有很大的差别，所以准确地测量电缆接头的表面温度对于及时了解接头线芯的运行状况具有重要的意义^[13]。

对于三芯电缆接头，通过计算可知，其正常运行、单芯发生故障、两芯发生故障和三芯发生故障时，外表面的温度值也会有较大的差别。下面以发生单芯故障和三芯故障时外表面的温度变化曲线来比较说明，温度变化曲线如图 3 所示。

通过图 3 的温度变化曲线，可以看出当电缆接头发生故障时，不仅线芯的导体温度与接头表面温度相差很大，而且接头不同部位的表面温度也有明显的差别，其中三个温度较高的点分别为离线芯导体距离最近的点。为了更直观简便的描述电缆接头的温度场的分布，本文模拟了电缆接头横截面的温

度场云图，其中三芯电缆接头单芯故障时温度场分布云图如图 4 所示。

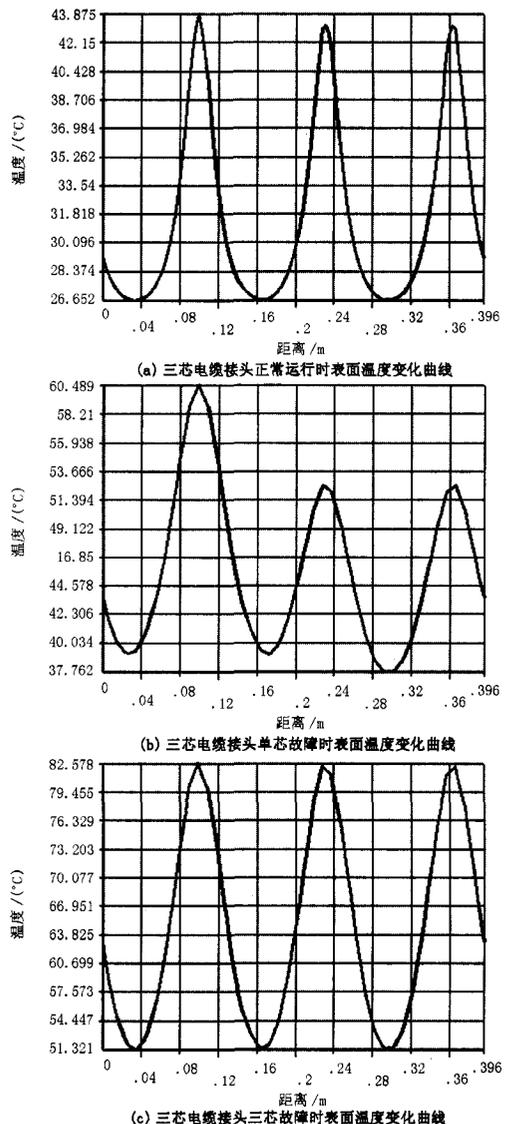


图 3 三芯电缆接头温度变化曲线

Fig.3 The diagram of temperature for three-core cable junction

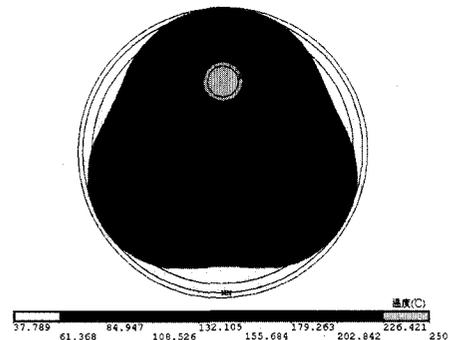


图 4 三芯电缆接头温度场云图

Fig.4 The nephogram of temperature field for three-core cable junction

因此,如果把温度传感器安装于图3中温度值较高的点上,可以更容易地监测到线芯温度的变化情况。

4 实验分析

以10 kV XPLE单芯电力电缆接头为实验对象,用发热棒模拟线芯的导体温度。通过光纤布喇格光栅温度传感器测量电缆接头其中几个介质层的温度。实验结果与计算结果的比较如表2所示^[15]。

表2 计算值与测量值的比较

Tab.2 The compare between calculated value and measured value

	计算值/(°C)	测量值/(°C)
空气温度	25	18.7
线芯温度	250	248.8
内绝缘管温度	145.99	142.6
铜屏蔽层温度	100.63	98.3
外护套管温度	61.89	57.4

由表2可以看出,如果考虑接头模型和测量设备存在的误差,计算值与测量值是基本吻合的。所以本文对电力电缆接头的温度场分析可以为实际工程提供依据。

5 结论

针对电力电缆接头结构复杂,容易发生故障的问题,建立了电力电缆接头的传热模型,运用有限元数值模拟方法分析了电缆接头的温度场的分布,根据温度场的分布,可以确定温度传感器的合理安装位置。在工程上可以根据电缆接头的表面温度较为准确地监测电缆接头线芯的实际运行温度。利于及时发现故障隐患,提高电力电缆运行的可靠性和安全性。

参考文献

[1] 高小庆,姜芸.XLPE电力电缆过负荷温升与早期损坏机理的研究[J].高电压技术,1997,23(2):62-64.
GAO Xiao-qing,JIANG Yun. Study of XLPE Power Cable Overload Temperature Rise and Early Damage Mechanism[J]. High Voltage Engineering,1997,23(2):62-64.

[2] 何国平.电缆着火原因及防火措施[J].石油化工安全技术,2000.
HE Guo-ping. Cable Fire Causes and Fire Prevention Measures[J]. Petroleum and Chemical Safety Technology,2000.

[3] 张世雄.浅谈交联电缆接头故障原因及对策[Z].中国电气,2008.

[4] 张建华,杨建军.交联聚乙烯电力电缆接头制作[J].南方金属,2006,02(124):43-44.
ZHANG Jian-hua,YANG Jian-jun.Manufacturing of Electrical Cable Hend Insulated with Crosslinked Polyethylene[J].Southern Metals,2006,02(124):43-44.

[5] 李蜀.电线电缆及电缆附件常用数据资料[Z].筑龙网,2004.

[6] 成永红,谢恒,衣立东.基于热效应的电力电缆及其终端在线检测技术[J].高电压技术,1999,25(3):4-5.
CHENG Yong-hong,XIE Heng,YI Li-dong. Study on the On-line Detecting Technique for Power Cable and Terminal Based on Heat Effect[J]. High Voltage Engineering,1999,25(3):4-5.

[7] 陶文铨.传热学[M].西安:西北工业大学出版社,2006.

[8] 赵建华,袁宏永,范维澄.基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究[J].中国电机工程学报,1999,19(1):52-54.
ZHAO Jian-hua,YUAN Hong-yong,FAN Wei-cheng. Surface Temperature Field Based Online Diagnoses Study for Electric Cable's Conductor Temperature[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(1):52-54.

[9] 王文,刘志刚,张智.气体普朗特数变化规律的初步研究[J].西安交通大学学报,1999,33(1):77-80.
WANG Wen,LIU Zhin-gang,ZHANG Zhi. Variation of Parandtl Number of Gas in Dilute and Dense State[J]. Journal of Xi' an Jiaotong University,1999,19(1):52-54.

[10] 安利强,王璋奇,唐贵基.干式电抗器三维温度场有限元分析与温升实验[J].华北电力大学学报,2002,29(3):75-78.
An Li-qiang,WANG Zhang-qi,TANG Gui-ji. 3D--tem Perature Field Prediction by FEM and Temperature--rise Test for dry--type Reactor[J]. Journal of North China Electric Power University,2002,29(3):75-78.

[11] 李伟力,候云鹏.大型水轮发电机定子股线导热的数值分析[J].中国电机工程学报,2001,21(7):115-119.
LI Wei-li,HOU Yun-peng. Heating Analysis of Stator Strands of Large Hydro-generator Based on Numerical Method[J]. Proceedings of the CSEE,2001,21(7):115-119.

[12] 李季,罗隆福,许加柱.电力机车主变压器油箱三维温度场有限元分析[J].高电压技术,2005,31(8):21-23.
LI Ji,LUO Long-fu,XU Jia-zhu. Finite Element Analysis of the 3D Thermal Field of Main Transformer Oil Tank of Electric Locomotive[J]. High Voltage Engineering,2005,31(8):21-23.

[13] 傅晨钊,汲胜昌,等.基于有限元方法的电缆变压器绕组的热路模型研究[J].高压电器,2003,39(2):1-3.

(下转第13页 continued on page 13)

Expansion Planning[C]. Brazil: 2000.

[8] Hobbs B F, Inon J, Stoft S E. Installed Capacity Requirements and Price Caps: Oil on the Water, or Fuel on the Fire?[J]. The Electricity Journal, 2001, 14: 23-34.

[9] 丁伟, 李星梅. 电力市场中发电项目投资风险研究[J]. 现代电力, 2006, 23(3): 84-88.

DING Wei, LI Xing-mei. Research on Investment Risk of Electricity Generation Project in Electricity Market[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(3): 84-88.

[10] De Vries L J. Securing the Interest in Electricity Generation Market[D]. Amsterdam: Delft University of Technology, 2004.

[11] 臧宝锋, 胡汉辉, 王建兴. 电力市场条件下的发电投资均衡[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 41-44.

ZANG Bao-feng, HU Han-hui, WANG Jian-xing. Investment Equilibrium in Power Generation of Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 41-44.

[12] 马歆. 对中国电力投资中存在问题的思考[J]. 特区经济, 2006, 210(7): 35-36.

MA Xin. Thinking of the Problem in China Power Investment[J]. Special Zone Economy, 2006,210(7): 35-36.

[13] Doorman G. Capacity Subscription and Security of Supply in Deregulated Electricity Markets. SINTEF Energy Research, 2003.

[14] Jaffe A B, Felder F A. Should Electricity Markets have a Capacity Requirement? If so, How Should it be Priced?[J]. The Electricity Journal, 1996, 9(10): 52-60.

[15] Rochlin C. Resource Adequacy Requirement, Reserve Margin, and the Public Goods Argument[J]. The Electricity Journal, 2004, 17(3): 52-59.

[16] Jaffe A B, Felder F A. Should electricity Markets Have a Capacity Requirement? If so, How Should it be Priced?[J]. The Electricity Journal, 1996, 9(10): 52-60.

收稿日期: 2008-03-15; 修回日期: 2008-08-24

作者简介:

刘国跃(1962-), 男, 博士研究生, 研究方向为能源与电力经济. E-mail:junguoia@126.com

(上接第 3 页 continued from page 3)
的有效和先进性, 而在电缆长为数百公里甚至数千公里的特高压输电线路中, 由于故障波形长距离的运行、其衰减更为严重, 频率-相位解析法的优势则更为明显。

参考文献

[1] Sachse W, Pao Y H. On the determination of phase and group velocities of depressive waves in solid” [J].J. of Applied Physics, Vol. 49, pp. 4320-4327 (1978).

[2] Rokhlin S I, et al.. Real Time Study of Frequency Dependence of Attenuation and Velocity of Ultrasonic Waves During the Curing Reaction of Epoxy Resin[J]. J. of Acoustic Society of Am. , Vol. 79, pp. 1786-1793 (1986).

[3] 川田 昌武. 電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法 [J]. 電気学会論文誌, Vol.115, No.10, 1168-1173 頁, 1995 年.

[4] 犬塚 博 他: “電力ケーブル故障点探査における信号処理による精度改善” T.IEE Japan, Vol.120-B, No.11, 1416-1423 頁 2000.

收稿日期: 2008-11-05

作者简介:

王柏恒(1966-), 男, 硕士, 工程师, 长期从事高压直流输电控制系统方面的研究; E-mail:wangbaiheng@xjgc.com
姚致清(1960-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统保护与控制研究;
封晓东(1962-), 男, 高级工程师, 长期从事电网运行、检修及生产管理工作。

(上接第 7 页 continued from page 7)

FU Chen-zhao, JI Sheng-chang, et al. Study of Thermal Circuit Model for the Cable Ttransformer Coil Based on Finite Element Method[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2): 1-3.

[14] 曹惠玲, 王增强, 等. 坐标组合法对直埋电缆与土壤界面温度场的数值计算[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 59-63.

CAO Hui-ling, WANG Zeng-qiang, et al. Numerical Computation of Temperature Distribution of Underground Cables and Soil with Combinatorial Coordinates[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2003, 18(3): 59-63

[15] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 等. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8):

185-189.

LIANG Yong-chun, LI Yan-ming, CAI Jin-ai, et al. A New Method to Calculate the Steady-State Temperature Field and Ampacity of Underground Cable System[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2007, 22(8): 185-189.

收稿日期: 2008-07-16; 修回日期: 2008-10-06

作者简介:

徐元哲(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力设备故障诊断的研究; E-mail:xuyuanzhe@263.com
王乐天(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力设备故障诊断的研究。