

电力电缆无线测温系统研究

胡娟¹, 巫京励², 程文婷³

(1 四川省电力公司超(特)高压运行检修公司, 四川 成都 610041

2 成都电业局高新供电局, 四川 成都 610041; 3 四川电力试验研究院, 四川 成都 610072)

摘要:交联聚乙烯(XLPE)电力电缆具有无油、附属设备少、安装敷设和运行维护简单等优点,得到了越来越广泛应用。作为一种简便的电缆绝缘运行状态监测方法——电缆温度监测有利于及时发现 XLPE 电力电缆绝缘缺陷,防止事故发生,保证电缆的安全运行。在综合分析国内外电缆温度监测方法和技术研究现状的基础上,给出了缆芯温度和表面温度间关系以及电缆温度与载流量间关系的数学模型,详细论述了电缆温度无线监测系统的硬、软件设计,并就现场安装方案等问题进行了深入的研究。

关键词:交联聚乙烯电缆;表面温度;缆芯温度;载流量;有限元;无线监测

Abstract: XLPE power cable has so many merits such as oil-free, less auxiliary equipment, easy installation and operation maintenance, and has been widely used. Cable temperature monitoring can help identify the insulation defects of power cable, prevent fault occurring in time and ensure the safe operation of the cable as the simple monitoring way of cable insulation operation. Based on the present research of cable temperature monitoring technologies and methods at home and abroad, the relationship between core temperature and surface temperature is studied, and the mathematical model of the relationship between the cable temperature and the current capacity is established. The design of hardware and software for wireless monitoring system is discussed in detail, and the on-site installation programs and other issues are also studied deeply.

Key words: XLPE cable; surface temperature; core temperature; current capacity; finite element; wireless monitoring

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)06-0067-04

0 引言

交联聚乙烯电力电缆具有运行可靠、不易受外界影响、不需架设电杆、不占地面、不碍观瞻等优点^[1-3]。随着现代工业的发展和城市化水平的提高,电力电缆作为传输电能的重要工具,越来越得到人们的重视。

电缆敷设环境与使用状态会极大地影响电缆的寿命。电缆投入运行后在外界环境作用下,常发生绝缘老化,同时伴随以温度过高、局部放电、树枝老化等形态表现出来,但最终都归结于电树枝而导致绝缘击穿^[4,5]。电力电缆一旦发生故障,寻找起来十分困难,不仅要浪费大量人力物力,而且还将带来难以估计的停电损失。为了保证电力电缆可靠运行,有必要在运行过程中掌握电缆绝缘的劣化状况,并对之进行在线的绝缘检测及诊断^[6]。研究发现,载流量估算过高,电缆运行于过热状态,造成导体工作温度超过允许值,电缆绝缘寿命就比期望值缩短^[7-10],若估算

过低,则导体铜材或铝材就未获充分利用,传输能力浪费。

电力电缆温度在线监测系统可很好地反映高压电力电缆及其附件的运行状况。通过对 XLPE 电力电缆的温度在线监测,可有效评估 XLPE 绝缘老化状况,及时发现电缆故障隐患。实验研究表明电力电缆运行中的这些温度指标与水树引发速率、水树长度等主要绝缘指标有较好的相关性。另外,通过温度的在线监测能准确地确定其载流量,保障电力电缆安全可靠运行。综上所述,通过温度在线监测来反映电力电缆绝缘状态是一种切实可行的方法。

目前广泛应用的几种典型温度在线检测技术有:红外测温技术、热电阻测温法、光纤测温技术、无线测温技术和数字传感器测温技术。

这里提出的无线测温系统由于采用无线方式传输数据,测温点无需有线连接,测温终端可放置于电缆的任何部位,不受环境影响,机动性好、灵活性强、运行管理灵活、维护操作简单。应用所提出的无线测温技术可提高电力电缆运行可靠性和稳定性,减轻管

理人员和巡查人员的工作强度,具有较好社会效益。

1 电缆缆芯温度与表面温度间的关系

无线测温系统的测试终端是对电缆表面温度进行采集和无线传输的设备。由于电缆表面温度并不能完全显示电缆运行的全部状态,因此准确掌握电缆运行状态的关键是找出电力电缆内部导体温度和表面温度之间的相互关系。当电力电缆在运行中产生的热能,一部分存贮在导线及绝缘材料内,其余的热能以传导形式经绝缘材料传递到电缆连接头的表面,然后通过对流及辐射传递给周围环境。由于导线与绝缘之间、绝缘与周围环境之间存在着热阻,导线温度将上升,其电阻率也随之增加并产生更多的热能,直至线路处于稳态。在这种情况下所产生的全部热量传递给周围环境,而导线的温度将保持恒定。电力电缆内部导体温度和表面温度的基本关系为:电流使内部导体温度变化,而表面温度由于导体热能经过能量传递而随之产生变化,两者间存在着因果关系。

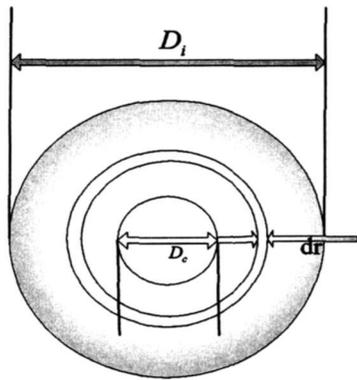


图 1 电缆热流平衡示意图

① 电力电缆缆芯温度与表面温度间对应关系的数学模型

由于电缆均为圆柱形体,在电缆热场计算中故采用柱面坐标。为便于分析,先以单芯电缆进行计算。如图 1 所示。

② 建立导热散热物理模型的基本假设

本系统采用温度场有限单元法。这种方法将研究对象从宏观转为微观,由总体转到局部单元,求得每一个微点的温度和温升。模型中所采用的电缆敷设情况假设如下。

(1) 电缆的外径远远小于电缆的长度,因此取一个截面来研究。设定传热的各个平壁间紧密接触,电缆可看成是一种发热热源。

(2) 任意相邻的两根电缆之间的温度分布中间截面对称,因此中间截面是一个绝热面。没有热流流量。可以认为热流密度为 0,即 $q = 0$ 。

(3) 取得一个二维平面问题来研究。

(4) 电缆敷设的周围媒质是固体,彼此接触紧密,认为是通过导热来传递热量的。固体和空气接触层表面应该看成对流换热,那么边界的条件采用第三类边界条件。

根据以上假设,可完成电缆散热物理模型的建立。

③ 传热过程数学模型

采用有限元方法建立电缆温度场的分布模型,相比热路法具有明显的优点:能反应局部温度和温升情况,改善传统热路方法中因受环境温度、土壤热阻系数等各种外界因素影响较大的缺点等等,因此采用有限元方法建立的模型更准确、更具可靠性。

电力电缆的稳态温度场属于二维稳态导热稳态。有热源区域(如电缆导体、金属屏蔽层和铠装层)和无热源区域,它们的温度控制方程如式(1)和式(2)所示。

$$\frac{d^1 \theta}{dx^2} + \frac{d^2 \theta}{dy^2} = \frac{w_i}{\lambda} \tag{1}$$

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} + \frac{d^2 \theta}{dy^2} = 0 \tag{2}$$

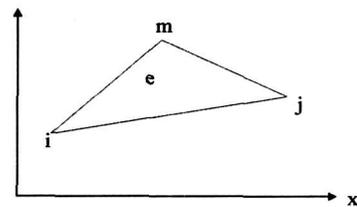


图 2 三角形网格单元

任何传热问题的边界条件均可归结为三类边界条件。第一类边界条件为已知边界温度;第二类边界条件为已知边界法向热流密度;第三类边界条件为对流边界条件,即已知对流换热系数和流体温度。在本模型中,采用三角形划分网格,根据线性插值函数知,如图 2 所示,在每个平面三角形单元内的泛函形式为

$$\begin{aligned} J^e[\theta] = & \int_{\Omega^e} \left[\frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 + \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 - q \theta \right] dx dy \\ & - \int_{\Gamma_{in}^e} q \theta ds + \theta \int_{\Gamma_{in}^e} \left(\frac{1}{2} \theta^2 - \theta_r \alpha \theta \right) ds \tag{3} \end{aligned}$$

总之,在有限单元法中,把单元的系数相叠加到整体的系数相中去就称作“贡献”。同一单元中的相邻节点,在合成时对该节点方程的系数值有所“贡

献”，而在不同单元中的其余节点就不会有所“贡献”，这是总体合成的关键。对 n 个节点温度都求偏导，并使之等于零，就可以得到 n 个代数方程，写成或者简写成： $[K][T]=[P]$

其中， $[K]$ 为温度刚度矩阵；

$[T]$ 为未知温度值的列向量；

$[P]$ 为等式右端项组成的列向量。

最后，用变带宽一维压缩存储的高斯消去法求解上面的线性方程组，从而得到各节点的温度值。

④ 电力电缆温度场和载流量的数值算法

对给定的传热问题，首先是要写出它的控制方程和定解条件，有了这个前提，才能利用正确的数值方法，借助于计算机，得到反映传热过程内涵的数值结果，获得几何参数、初始状态、工质的物性、流动状况和边界条件等对系统内的温度分布及其变化规律，边界处的热流或热换系数等的影响关系。

(1) 导热微分方程式的确立

在某一时刻，物体内部所有各点的温度分布的总称，称为该物体在此时刻的温度场。一般，温度场是空间坐标和时间的函数，在直角坐标系中可表示为

$$t=f(x, y, z, \tau) \quad (4)$$

式中， x, y, z 为空间直角坐标；

τ 表示时间， t 为 τ 时 (x, y, z) 点的温度。

(2) 确定单值性条件

导热微分方程式是描述导热过程中物体的温度随空间坐标及时间变化的一般性关系式，它描述的是同类导热过程的共性而没有涉及特定过程的具体特点，所以适用于所有同类导热体内部的导热过程，由它得到的解释这类问题的通解。要获得某个具体导热问题的特解，还必须说明特定导热过程的具体特点，这些说明导热过程具体特点使导热微分方程式获得唯一解的条件称为单值性条件或定解条件。因此，对于一个具体的导热问题，其完整的数学描述应包括相应的导热微分方程式和单值性条件。单值性条件一般包括以下几项。

1) 几何条件：导热体的几何形状、尺寸大小及相对位置等；

2) 物理条件：所研究导热体的物理特性。如物体的物性参数的数值及其特点（是否随温度变化），内热源的大小及分布情况等；

3) 时间条件：通常说明导热过程初始时刻导热体的温度分布规律，又称为初始条件；

4) 边界条件：说明导热物体边界上的热状态以及与周围环境相互作用的情况，常用的边界条件有三类。

⑤ 有限元法求解地下电缆温度场

在地下电缆温度场整体区域变分求解遇到困难的情况下，采用网格剖分技术，使变分计算在每一个局部的网格单元中进行，最后再合成为整体的线性代数方程组进行求解。此方法将研究对象从宏观转为微观，由总体转为局部单元，可以求得每个单元的温度，从而确定整个求解区域的温度分布。

地下电缆温度场导热微分方程的确立具有内热源的固体导热偏微分方程如式（5）。

$$\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = -Q + c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

式中， T 表示温度场内各点温度； k, c 及 Q 各为微元体的导热系数、比热容、单位体积中内热源的生成热； t 表示时间。

确立了地下电缆温度场的导热微分方程，接下来就是根据边界条件对方程进行求解。任何传热问题的边界条件均可归结为三类边界条件。第一类边界条件为已知边界温度；第二类边界条件为已知边界法向热流密度；第三类边界条件为对流边界条件，即已知对流换热系数和流体温度。

2 电力电缆无线测温系统设计

系统主要由一台上位监控计算机（上位机）和多台现场无人值守自动测温站点（下位机）组成，构成集散型监控网络，并在实际工程中应用，实现了电缆温度的无线监测，并具有结构简单、可靠性高、可扩展性强等一系列特点。软件部分的设计是交联聚乙烯电力电缆温度在线监测系统的核心之一。

① 系统硬件设计

根据实际使用要求，系统由一台上位监控计算机（上位机）和多台现场无人值守自动测温站点（下位机）组成，现场下位机和中心监控计算机通过 GPRS 无线公网和公共数据互联网进行沟通，将来根据系统管理的需要，现场下位机容量扩容及检测点区域分布要求，可扩展成多级监控网络，一个监控中心可同时管理几个中心计算机。系统构成如图 3 所示。

本系统是以计算机应用技术、数字通信技术、数字测温技术为基础的大型监控系统，具有技术含量

高、覆盖面广、使用简单可靠,功能齐全、可靠性要求高等特点,它可保证电缆系统的实时监控,达到建设周期合理、性价比优越,能及时发现电缆运行中所存在的问题。

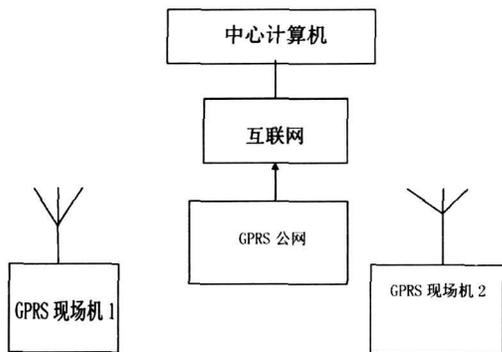


图 3 系统硬件结构图

② 系统软件设计

根据集中控制的原则和设计思路,将系统控制、数据采集、数据处理、数据和信息的显示等功能都集中于控制主机,并给出了软件设计的总体框图。该软件系统主要包括子站软件,工作站软件和通讯软件,并给出了数据采集、数据处理、子站接收和发送数据、工作站发送命令、接收数据等子程序的流程图。XLPE 电缆接头温度在线监测系统的软件为系统运行人员提供了直观、简洁的数据显示和系统控制界面。电力电缆温度在线监测系统软件设计的总体目标是在软件系统的控制下,实现在线监测系统现场各部件的协同工作,完成对温度信号采集以及数据的相关处理等主要功能。主要包括下位机监测软件、通讯控制程序、上位机工作站程序三个主要功能部分,其总体框图如图 4 所示。

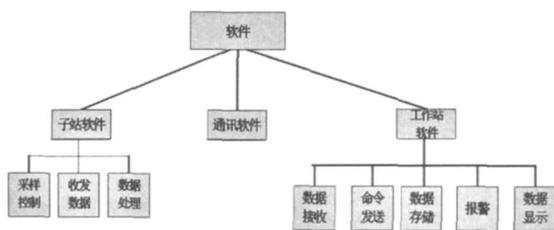


图 4 系统软件总体框图

3 结束语

前面建立了缆芯温度和表面温度间关系以及电缆温度场与载流量间的数学模型,并对电缆温度无线监测系统的硬、软件设计进行了介绍,对现场安装方案及其应用问题进行了深入讨论。通过所提出的电缆温度无线监测系统的应用表明,对电力电缆温度的监测可实时确定交联聚乙烯电力电缆载流量及其绝缘的运行情况,及时发现其绝缘缺陷,防止事故发生,保证电缆安全运行。

参考文献

- [1] 郑肇骥,王昆明. 高压电缆线路 [M]. 北京:水利电力出版社, 2003.
- [2] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [3] 高自伟. 电力电缆在线载流能力预测系统的研究 [D]. 哈尔滨理工大学硕士学位论文, 哈尔滨理工大学, 2005, 12—29.
- [4] 李常禧. 电气设备诊断技术概论 [M]. 北京:水利电力出版社, 2004.
- [5] 电力部电力科学研究院. 1994—2006 年 110 千伏及以上等级变压器事故统计分析 [N], 2007.
- [6] 王东星. 电缆在线监测系统的应用研究 [D]. 东北大学, 2005.
- [7] 孙林, 刘惠民. 我国电网及输变电技术的回顾和展望 [J]. 华东电力, 200(12): 21—26.
- [8] 何旭东. 交联聚乙烯电缆绝缘的劣化机理及在线监测方法的研究 [D]. 重庆大学, 1996; 5—35.
- [9] 李忠旺, 王庆雄. 电力电缆温度的在线监测 [J]. 宝钢科技, 2007(33): 41—43.
- [10] John S, Johnson et al. Detection of Slot Discharge in High-voltage Stator Windings during Operation [J]. AIEE Trans Part II 2001(7): 9—19.

(收稿日期: 2010-09-15)

· 简讯 ·

当前中国核电出现了快速发展的强劲势头

当前中国核电出现了快速发展的强劲势头。根据中国中长期核电发展规划,到 2020 年核电运行装机容量要达到 40 000 MW。据了解,这个指标还要突破,即要达到 70 000~80 000 MW。

这种大规模的发展核电会使中国天然铀供应出现严重不足,而要解决天然铀供应问题必须大力发展快堆,彻底解决天然铀的供应问题。现在实验堆建成了,就应该抓紧建设商用快堆。而要实现这个目标必须尽快实现关键技术和设备的国产化,而产、学、研相结合应是最佳途径。这在中国实验快堆上已经有成功的先例。