电缆线芯温度推算方法及电缆沟在线监测系统研究

随着城市化的快速推进，电力电缆在低压城网中得到广泛应用，电缆安全可靠运行与电缆线芯、绝缘的温度关系紧密，快速、准确得出关键地区电缆的温度场分布及线芯温度对于电力的可靠、经济供应具有重要意义。本文以实际电缆沟为研究对象，分析了在稳态下电缆沟的热过程，分别采用解析和数值仿真的方法计算了敷设于电缆沟中的电缆线芯温度。数据证明，与实际温度检测数据比较，数值仿真的方法较解析法得到更精确的温度结果。其中，利用COMSOL数值分析软件，采用有限元数值计算法得出了8.7/15 kV YJV 1×400 mm^{2}的XLPE三回路电力电缆温度场分布。在此基础上，根据电缆沟的实际环境，开发了一套集温度、水位等环境因子监测的电力电缆在线监测与预警系统，该系统可实现准确、实时、多环境量监测，并在异常状况下及时报警通知相关人员，对建设可靠、坚强的电力电网具有积极意义。

焦阳[1] 熊兰[1] 郜建祥[1] 徐敏捷[2] 杨子康[1]/1.重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 2.国网江苏省电力公司南通供电公司

焦阳/硕士研究生

关键词/Keywords
电力电缆·
温度场·
在线监测·
ComsolMultiphysics·
交联聚乙烯·

0 引言

电力电缆具有不用杆塔、占地少、基本不占地面上空间、维护工作少等优点，因而在城网中的应用越来越广泛。电缆在安装、运行进程中会由于机械、电磁、温度等因素的作用发生破损老化，继而导致故障发生率增加，威胁电网安全。这些因素中，电缆的温升超过长期允许工作温度是电缆发生故障的主要原因。如果线芯温度超过该温度值，易引发触电、火灾等事故[1]。

电力电缆温度场及线芯温度推算法的计算方法主要有两种：解析法和数值法。解析法是一种较为原始的方法，电力电缆IEC-60287 标准[2]介绍的热路法就是基于解析法的。解析法计算过程方便、简单，然而，由于假设前提较多，使得计算结果不够精确，且比较保守。

另一种方法是数值法[3-5]，主要包含有限差分法及有限元法等。相比解析法而言，数值法具有运算适应性强、模拟工程实际能力强、多物理场耦合分析等优点。近年来数值法成为了研究电缆热问题的主要手段。文献[6-9]分别利用解析法和数值法通过对不同敷设环境设定不同边界条件和改变电缆结构参数等方法，对电缆稳态温度场进行分析。然而，对于电缆表皮推算电缆内部温度分布，计算与仿真结果的现场验证，以及此类方法在电缆在线监测系统中的应用，相关文献中涉及较少。

基金项目：国家自然科学基金（51077139）；重庆市电器检测工程技术研究中心（cstc2011pt-gc70009）

1 计算原理

1.1 电力电缆结构

本文以型号为8.7/15 kV YJV 1×400 mm^{2}的单芯XLPE（交联聚乙烯）低压电缆为研究对象，其主要结构如图1所示。

其各层尺寸参数如表1所示。

1.2 IEC-60287热路法

IEC-60287是国内外公认的计算电缆线芯温度及载流量的解析法，它以热路为计算原则，通过计算电缆的损耗及周

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

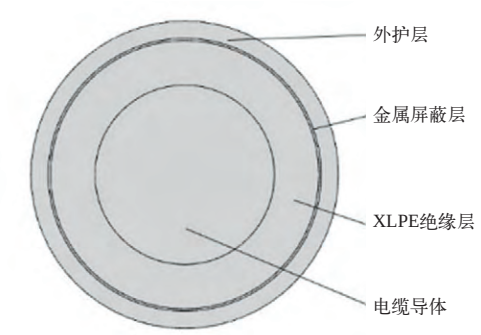

图1 电力电缆结构示意图

表1 电缆结构参数

电缆结构	参数值/mm
电缆导体半径	11.9
绝缘层宽度	5.9
金属屏蔽层宽度	0.3
外护层宽度	2.3
电缆整体半径	42

围环境的热阻来导出电缆的温度分布。电缆及周围环境热路如图2所示。

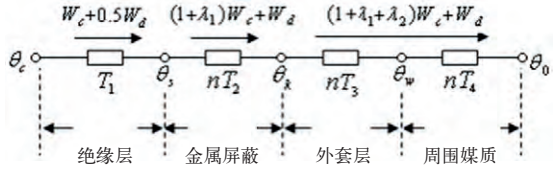

图2 热路法电缆模型

由热路可得

$$\theta_c=\theta_0+(I_2R+0.5W_d)T_1+[I_2R(1+\lambda_1+\lambda_2)+W_d](T_2+T_3+T_4) \quad (1)$$

式中，$I_2R=W_c$为单位长度电力电缆缆芯导体的损耗，单位为 W/m；I为电缆导体中电流有效值，单位为A；R为电缆导体在最高温度工作时的交流电阻，单位Ω/m；W_d为电力电缆绝缘层单位长度的损耗，单位为W/m；λ_1、λ_2分别为金属屏蔽层和铠装层损耗系数，无量纲；T_1 、T_2、T_3、T_4分别表示绝缘层、金属屏蔽层、外护层和周围介质的热阻； θ_c 、θ_0分别表示电缆缆芯和电缆表皮的温度，单位为T。

本文研究的电缆为单芯电缆，因此一根电缆缆芯数n=1。式（1）中的热阻与损耗可通过IEC标准提供的公式进行计算。由此即可在获得电缆表皮温度的情况下通过解析计算得出电缆的导体温度。

1.3 数值计算方法

1.3.1 电缆沟数学模型

由于电缆的长度相对其截面积可视为无限长，采用二维电缆沟作为研究对象反映电缆沟内温度分布足够精确，故以二维模型为对象建立模型。根据现场实际运行电缆沟建立的电缆沟三回路几何模型示意图如图3所示（土壤未绘出）。

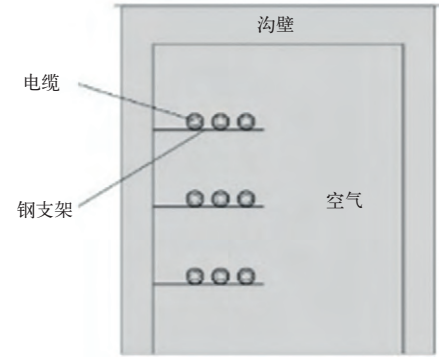

图3 电缆沟二维几何模型

图3所示的电缆沟各部分尺寸为：电缆沟截面积为0.6 m×0.8 m（不包括电缆沟壁），电缆沟壁尺寸分别为0.065 m（左右）、0.1 m（上部），土壤尺寸为4 m×3.5 m。支架直径为4 mm，钢支架间距为0.2 m。

1.3.2 传热方程

数值计算模型属于二维稳态传热问题，传热方程以是否包含热源分为以下两种。

1）包含热源的区域（电缆缆芯、金属屏蔽层）热传递微分方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{qv}{\lambda}=0 \quad (2)$$

2）不包含热源的区域（除缆芯及金属屏蔽层外的其他电缆结构、电缆周围环境媒介）热传递微分方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0 \quad (3)$$

1.3.3 边界条件

传热问题的边界条件主要有三种。包括

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\text{恒温条件}\begin{cases}\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0\\ T(x,y)\big|_{\Gamma_1}=f(x,y)\big|_{\Gamma_1}\end{cases}\tag{4}$$

$$\text{法相热流条件}\begin{cases}\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0\\ \lambda\dfrac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Gamma_2}+q_2=0\end{cases}\tag{5}$$

$$\text{对流换热条件}\begin{cases}\dfrac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\dfrac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0\\ -\lambda\dfrac{\partial T}{\partial n}\Big|_{\Gamma_3}=a(T-T_f)\big|_{\Gamma_3}\end{cases}\tag{6}$$

式中，λ为导热系数，单位为W/(m·K)；q_2为热流密度，单位为W/m^2；α为对流换热系数，单位为W/(m^2·℃)；T_f为流体温度，单位为℃；Γ为积分边界。

根据电缆沟实际环境，可确定电缆沟模型温度场边界条件如下。

对于图3所示的电缆沟模型，在距离电缆沟1.2 m的边界水平方向温度无变化，因此，模型左右边界为法相热流条件；上边界为地平面，直接与空气流体接触，符合对流换热条件，其中空气温度取室温25 ℃。深层土壤为恒定温度边界条件，符合恒温条件。

1.3.4 材料与物性参数

为了有限元数值计算得出结果，需要对数学模型的相应区域赋予材料及物性参数，其具体取值如表2所示。

表2　电缆群环境参数

敷设环境	参数值
土壤热阻/(m·K/W)	23.8
空气温度/K	313
深层土壤温度/K	293
沟壁导热系数/(W/(m·K))	1.73
支架导热系数/(W/(m·K))	44.5

1.3.5 线芯温度推算方法

根据数值计算得出的温度场分布结果，绘出沿电缆径向温度随度变化的函数，即可得到从电缆表皮到线芯的温度变化趋势以及电缆的线芯温度值如图4所示。

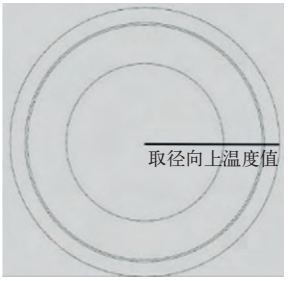

图4　沿电缆径向取温度值

2　计算结果与验证

以三回路型号为8.7/15 kV YJV 1×400 mm^{2}的XLPE电力电缆为研究对象在一般负荷条件（电流小于载流量），计算得到了规则敷设电缆沟流过电流为200 A时的温度场分布，如图5所示。

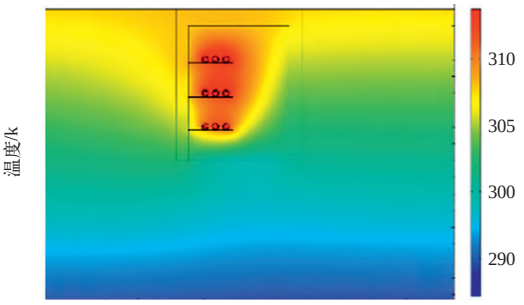

图5　电缆群温度场分布（单位：K）

从图5可以看出，电缆沟的最热部分分布在电缆上，电缆沟内环境温度与室温（298 K）相差不大，约为300 K，较大的空气热阻和电缆沟较密封的环境使得热量不易扩散到外界。电缆沟系统的最热点出现在中间层电缆缆芯处，最高温度为312 K。

取最下层一回，靠近电缆沟壁的电缆进行推算电缆缆芯温度研究，得到温度沿电缆径向变化曲线图如图6所示。

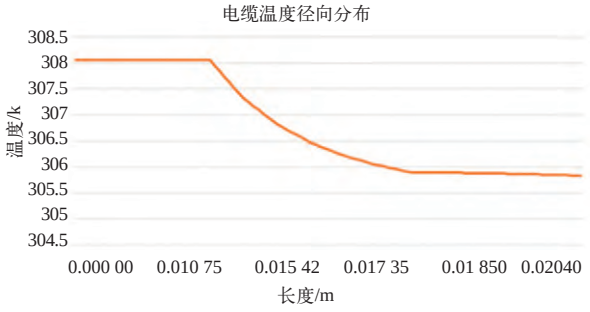

图6　电缆温度沿电缆径向温度分布曲线

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

由图6可以看出，电缆缆芯部分的温度为308 K，且在导体缆芯处温度几乎为恒定不变。沿电缆绝缘层温度下降很快，由于该层的导热系数较低，散热能力不强。沿电缆金属屏蔽层和电缆外护层温度变化趋势趋于缓和，温度稍有降低。由此图容易得出电缆表面温度与线芯温度差为约2.3 K。

本文通过实测实际运行的电缆导体温度值，对解析法和数值法的计算结果准确性做了验证。表3分别列出了在解析法、数值计算法计算得线芯温度值和实测的线芯温度值。

表3　计算值与实际值

计算值/K		实测值/K
热路法	数值计算法	311
319.2	308.26	

由表3可得，热路法计算温度值的绝对误差为2.3%，数值计算法计算温度值的绝对误差为0.88%。采用数值计算法推算电缆线芯温度的方法更加接近真实值，该算法已足够满足工程使用需要。

3　电缆沟在线监测系统

3.1　系统概述

为了实现对电缆沟各项环境参数，特别是电缆线芯温度的实时监测，本文开发了电缆沟在线监测及预警系统[10-11]。整个监测系统方案设计如图7所示，硬件设计方案如图8所示。

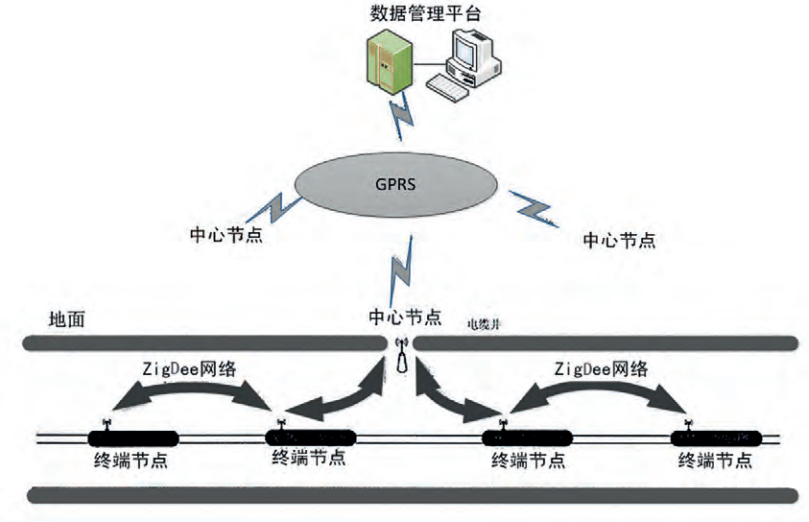

图7　系统整体方案设计图

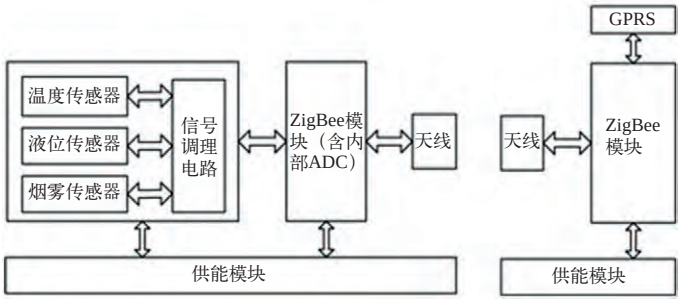

图8　硬件设计方案

由图7、图8可以看出，终端节点安装在中间接头的监测单元，监测单元包括各类传感器模块、数据采集模块和ZigBee无线发射模块。中心节点安装在电缆沟出口处，包括ZigBee中心节点模块、GPRS发射模块和电源，采用轮询的方式读取其负责范围内的终端节点温度数据。GPRS发射模块利用GPRS网络将数据上传给数据管理平台的数据采集终端。数据管理平台具有接收和分析处理数据的功能，采用了前文叙述的数值方法推算电缆线芯温度的算法，具有快速、准确、实时的特点。

3.2　监测系统程序设计与实现

上电初始化之后，协调器就会选择合适的信道建立自己的一个新的网络，这包括了PANID的设定，协调器短地址的生成等。然后协调器在uint16SampleApp_ProcessEvent(uint8 task_id, uint16 events)事件处理函数中通过调用子函数SampleApp_MessageMSGCB(MSGpkt)完成数据包的接收。终端节点发送入网信号给协调器，从而加入网络，在函数uint16 SampleApp_ProcessEvent(uint8 task_id, uint16 events)中登记事件，设置编号、发送时间等。设置好后调用函数SampleApp_SendPeriodicMessage()对各类传感器数据进行周期性广播。

3.3　测系统性能测试

为了测试系统的灵敏度及准确性，本文以一块恒

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

温板为测试对象，应用系统对其进行多组温度采集，采集数据如表4所示。

表4 温度测试数据

测试项目	实际值/℃	测试值/℃
节点2 温度	16.5	16.2
节点2 温度	15.2	15.0
节点2 温度	13.5	13.0
节点2 温度	13.1	13.2
节点2 温度	12.4	12.2

由表4可知，测试结果的最大误差为3.7%，满足工程实际需求。

3.4 监测系统应用

为了节约空间及统一性，本文对系统节点所有模块及供电电源进行了封装，封装图及运行结果如图9所示。该系统对于多状态监测起到了良好效果。

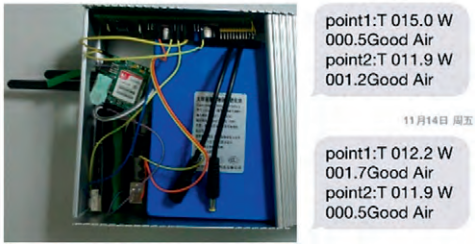

图9 封装后的测试节点与运行结果

4 结束语

本文建立了三回路电缆沟二维温度场分析模型，研究了通过数值法计算的电缆稳态温度场分布以及电缆表皮推算线芯温度算法，比较并验证了计算的准确性。在此基础上，开发了一套电缆沟多状态在线监测及预警系统。另外，本文得出结论如下。

1）三回路电缆沟稳态温度场的最高温度出现于中间层电缆缆芯处，最低温度出现于电缆沟下层电缆表皮处。

2）数值法根据电缆表皮温度推算缆芯温度计算结果较传统解析法更准确，数值法计算的相对误差为0.88%，解析法计算相对误差为2.3%。

3）在温度场数值分析的基础上研发了电力电缆工作环境在线监测系统。该系统响应速度快、精度高、可靠性强，对电缆中间接头的温度，沟内水位及烟雾浓度进行综合监测，利用多参量综合评价电缆运行状况，及早发现故障，提高其运行可靠性。

参考文献

[1] 罗涛. 电力电缆温度场及载流量计算方法研究[D]. 重庆大学，2009.

[2]International Electrotechnical Commission. IEC 60287-1. Calculation of currentrating part 1.

[3] 雷鸣. 依据表皮温度准确计算单芯高压电缆线芯温度的理论及实验研究[D]. 华南理工大学，2011.

[4] 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): 185-190.

[5] 王有元，陈仁刚，陈伟根，等. 电缆沟敷设方式下电缆载流量计算及其影响因素分析[J]. 电力自动化设备，2010，30(11): 24-28.

[6] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M].第四版.北京：高等教育出版社，2006

[7] 赵健康，姜芸，杨黎明，等. 中低压交联电缆密集敷设载流量试验研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 55-58.

[8] Carlos Gaggido，Antonio F.Otero，and Jose cidras. Theoretical model to calculate steady state and transient smpacity and temperature in buried cables[J].IEEE Trans．on Power Delivery，2003，18(3)：667～677

[9] 程子霞，薛文彬，周远翔，等. 电气化铁路27.5 kV单相单芯交联聚乙烯电缆载流量计算[J].高电压技术，2011，11：3067-3073.

[10] 韩筱慧. 电力电缆中间接头温度在线监测系统的研究[D]. 北京：华北电力大学，2012.

[11]杨平，王威. 电力电缆接头温度无线监测前端装置设计[J]. 仪表技术与传感器，2011：44-47.

（收稿日期：2015-05-15）EA

作者简介

焦阳（1991-），男，硕士研究生。主要研究方向为电气设备在线监测及故障诊断。

熊兰（1972-），女，博士，教授，硕士生导师。主要从事电气设备的在线监测、状态评价与故障诊断，以及脉冲功率技术的水处理应用研究。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net