

单芯电缆线芯温度的非线性有限元法实时计算

雷鸣¹, 刘刚¹, 邱景生¹, 赖育庭¹, 刘毅刚², 简淦杨¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640;

2. 广东电网公司广州供电局, 广东省 广州市 510310)

Real-Time Core Temperature Calculation of Single-Core Cable by Nonlinear Finite Element Method

LEI Ming¹, LIU Gang¹, QIU Jingsheng¹, LAI Yuting¹, LIU Yigang², JIAN Ganyang¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China;

2. Guangzhou Power Bureau of Guangdong Power Grid Company, Guangzhou 510310, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: In IEC 60287-based computing models of cable core temperature, thermal parameters of cable materials are considered as functions of temperature and there is computational error of core temperature due to neglecting the transmission of heat along axial direction of the core. To improve the accuracy of core temperature calculation, a nonlinear finite element based method for the real-time calculation of core temperature of single-core cable is proposed. The temperature gradients of cable core conductor in axial and radial directions as well as the diffusion rule of heat quantity in cable core are researched and the influences of such factors as operating current and ambient temperature on temperature distribution of cable core in axial and radial directions are analyzed. Based on the principles of heat transfer, the influence of cable thermal parameters varying with temperature on core conductor temperature is researched and then a three-dimensional nonlinear finite element model to calculate cable core temperature is built, and the built nonlinear finite element model is validated and modified according to experimental data. Comparison of experiment data with simulation results of the proposed model shows that the calculation error of cable core temperature is caused by neglecting the transmission of heat quantity along axial direction of cable and variation of cable thermal parameters; and it is also shown that the proposed real-time cable temperature calculation model is effective and is available for reference to the monitoring of core temperature of the cable operated in high temperature environment as well as to load forecasting.

KEY WORDS: single core cable; core temperature; physical parameters; nonlinear finite element method; experimental verification; real-time calculation

摘要: 考虑电缆材料热性参数是温度的函数及忽略热量沿着线芯轴向传输所造成的线芯温度计算误差, 为提高电缆线芯温度计算的精度, 提出基于非线性有限单元法计算电缆导体的温度。研究电缆导体径向、轴向温度梯度以及热量扩散规律, 分析运行电流、外界环境温度等因素对电缆线芯轴向、径向温度分布的影响。根据传热学原理, 研究电缆热性参数随温度变化对电缆导体温度的影响, 建立电缆导体温度计算三维非线性有限元模型, 并通过实验数据对非线性有限元模型进行验证和修正。实验和有限元仿真的对比表明: 忽略电缆热量沿着轴向传输以及热性参数的改变会造成线芯温度计算误差; 所提出的电缆导体温度实时计算非线性有限元模型的有效性, 为高温下运行电缆导体温度监测与负荷预测奠定了基础。

关键词: 单芯电缆; 线芯温度; 物性参数; 非线性有限元法; 实验验证; 实时计算

0 引言

实际运行中的电缆, 由于敷设环境不同^[1], 电缆部件与电缆本体散热不同, 因而在线芯轴向方向存在一定的温度差, 简称轴向温度梯度。目前, 电缆线芯温度计算基本上基于 IEC-60287 中热路模型和实时计算模型, 而这些模型基本上是在假设电缆线芯散热外界条件相同忽略轴向热量流动的基础上建立的^[2]。数值分析法^[3-4](如有限元法^[5]、有限差分法^[6]、模拟热荷法^[7-8]等)也在忽略轴向热量传输的条件下建立二维平面模型^[2]。数值法为电缆在线监测技术提供理论依据^[9-10], 数值模型可以灵活处理复杂的边界条件, 其建模前提是假设热量仅沿着电缆截面半径方向即径向扩散^[11], 由此可知, 二维平面的数值模型所计算的电缆导体温度精度有待进一步提高。为减小导体温度计算误差, BP 神经

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB724507)。

The National Basic Research Program of China (973 Program)(2009CB724507)。

网络法在导体温度计算方面也得到了应用^[12]。敷设环境不同、线芯热量的散热条件差异造成了实际运行电缆中存在轴向温度梯度,为热量扩散提供了动力,从而导致热量传送沿着电缆轴向由高温区向低温区流动^[13]。因此,假设电缆热量只在径向传输,建立电缆二维模型在一定程度会造成线芯温度计算的误差。

实验显示,电缆轴向温度梯度随着加载电流、外界环境温度等参数增加而增加,因此对重载电缆研究电缆轴向传热尤其重要。基于上述分析,设计轴向温度梯度实验,分析轴向温度梯度的存在对线芯温度分布和计算的影响,并进一步研究建立考虑轴向传热因素的非线性有限元模型尤为必要。由于受实验条件所限,且影响电缆散热的因素较为复杂^[14-16],完全通过实验研究线芯二维传热规律显然具有较大的困难。数值计算方法具有成本低、可模拟任意复杂环境等优点。本文基于传热学原理,结合模拟实验法,建立同时考虑电缆轴向和径向热量传输三维非线性有限元模型,以最大限度降低计算误差,为电缆实际运行监测提供理论参考。

1 单芯电缆温度场非线性有限元计算原理

在运行电缆中,线芯轴向温度梯度导致热量沿电缆轴向传输^[17],电缆各层材料物性参数(如导热系数、电阻率)是温度的函数。由于电缆各层材料热性参数、产热率对温度响应较为敏感,当导体温度变化较大时,如仍将电缆产热率、导热系数作为常数代入模型,所计算的线芯温度会产生较大误差。

根据传热学有限元理论,本文应用有限单元法分析给定负荷电缆闭域的温度场分布^[18]。电缆为有热源区域,电缆暂态温度场属于含有内热源的三维模型,热源区的控制方程为

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

无热源区域的温度控制方程为

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

式中: T 为坐标 (x, y, z) 处的温度; λ 为导热系数; q_v 为体积生热率; ρ 为材料密度; c 为体积比热容; t 为热传导时间。

交流电缆的热源主要是导体损耗,热量通过热传导、对流和辐射等形式向外散热。根据传热学,边界条件可归为 3 类,即已知边界温度值、热流密

度和物体与周围流体间的表面传热系数及周围流体的温度^[19]。本文研究电缆实时导体温度的计算是基于电缆表面温度,该模型设置边界温度为已知,如式(3)所示:

$$\begin{cases} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \\ T(x, y, z) |_{\Gamma} = f(x, y, z, t) |_{\Gamma} \end{cases} \quad (3)$$

式中 Γ 为代表电缆表面的坐标。

有限元法计算温度场时常用的计算单元为三角形单元。利用 Galerkin 法可得定义域内的电缆温度场有限元方程:

根据式(1)可以得出三维暂态有内热源温度场的微分方程如下:

$$D[T(x, y, z, t)] = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

根据 Galerkin 加权余量法,取试探函数

$$T(x, y, z, t) = T(x, y, z, t, T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (5)$$

代入式(4),再将式(4)代入加权余量式 $\int W_l D(T(x)) dx = 0$ 中得出公式如下:

$$\iiint_v W_l \left[\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v - \rho c W_l \frac{\partial T}{\partial t} \right] dx dy dz = 0 \quad (6)$$

对式(6)进行改造:

$$\begin{aligned} & \iiint_v \lambda \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(W_l \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(W_l \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(W_l \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz - \\ & \iiint_v \lambda \left[\left(\frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_l}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W_l}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \right. \\ & \left. q_v W_l + \rho c W_l \frac{\partial T}{\partial t} \right] dx dy dz = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

根据斯托克斯和格林公式,求解式(7)前部分的积分:

$$\iiint_v \lambda \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(W_l \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(W_l \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(W_l \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] dx dy dz = 0 \quad (8)$$

把式(8)代入式(7)可得出定义域内的电缆温度场有限元方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J}{\partial T_l} = & \iiint_v \lambda \left(\frac{\partial W_l}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_l}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W_l}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \\ & q_v W_l + \rho c \left(W_l \frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dy dz = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: J 为泛函数; W_l 为加权函数, $l=1, 2, \dots, n$ 。

根据能量守恒原理,瞬态的热平衡方程以矩阵形式可表示为

$$C \frac{dT}{dt} + KT = Q \quad (10)$$

式中: K 为传导矩阵; C 为比热矩阵; Q 为节点产

热率矩阵； T 为节点温度矩阵。

由于实际运行电缆中的电流是周期性连续变化的，载荷是时间的函数。将变化的载荷转化为产热率代入式(10)中，得到矩阵如下：

$$C \frac{dT}{dt} + KT = Q(t) \quad (11)$$

本文建立有限元方程，研究电阻率、导热系数及比热容随温度变化的非线性热学问题，分析材料的非线性对电缆导体暂态温度计算的影响。电缆导体电阻为温度的函数，导体单位长度的直流电阻^[2]：

$$R' = R_0[1 + \alpha_{20}(\varphi_c - 20)] \quad (12)$$

导体在交流电流下具有集肤效应和邻近效应，因此，单位长度导体的交流电阻计算如式(12)所示，进而得出线芯发热功率 P 与导体温度的关系如式(13)(14)所示：

$$R = R'(1 + y_s + y_p) \quad (13)$$

$$p = i^2 R \quad (14)$$

式中： R_0 为 20 °C 时导体直流电阻； α_{20} 为温度 20 °C 时温度系数； φ_c 为电缆运行线芯温度； R 为导体交流电阻； R' 为导体直流电阻； y_s 为集肤效应因数； y_p 为邻近效应因数； i 为电缆负载电流。

电缆各层材料的导热系数与温度关系如式(15)所示；材料比热容与温度的关系如式(16)所示：

$$\lambda = \lambda^0(1 + \alpha T) \quad (15)$$

$$c = c^0(1 + \gamma T) \quad (16)$$

式中：非线性材料热系数 α 、 γ 一般由实验总结得出，取值为 0.01； λ^0 为 0 °C 时导热系数； c^0 为 0 °C 时材料比热容。

将式(15)(16)代入式(9)可得：

$$\frac{\partial J}{\partial T_i} = \iiint_v \lambda^0(1 + \alpha T) \left(\frac{\partial W_i}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial W_i}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial W_i}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - q_v W_i + \rho c^0(1 + \gamma T) \left(W_i \frac{\partial T}{\partial t} \right) dx dy dz = 0 \quad (17)$$

式中 $q_v = i^2 R_0(1 + y_s + y_p) / (\pi r^2 l)$ ，其中 r 为电缆导体半径， l 为导体单位长度。

由于线芯的电阻率、复合材料的导热系数和比热容与温度存在函数关系，结合式(10)。可得到非线性有限元瞬态分析模型：

$$C(T) \frac{dT}{dt} + K(T)T = Q(T, t) \quad (18)$$

为获得求解结果，需要在离散时间点上对式(18)进行积分，为保证解的精确性，选择适当的时间步长很重要。如果时间步长太小，解中可能会出现振

荡，导致无解；相反如果步长太长，温度梯度不能精确计算^[20-22]。采用向后差分法求解暂态温度场：

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_t = \frac{1}{\Delta t} (T_t - T_{t-\Delta t}) + O(\Delta t) \quad (19)$$

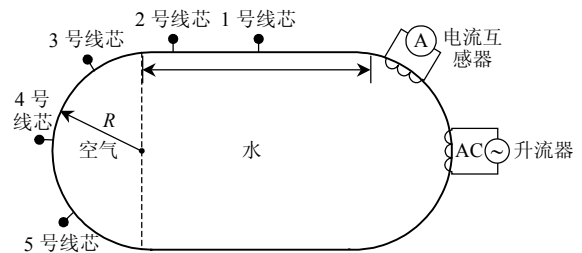
式中： Δt 为时间差分步长； $O(\Delta t)$ 为截断误差的数量级。根据前一时间步 $t - \Delta t$ 时刻的温度值，通过式(19)可以求解 t 时刻的温度值。

2 实验研究

2.1 实验设计

电缆散热不仅沿着径向流动，由于电缆轴向存在温度差别，电缆热量流动沿着线芯轴向传输。本文基于实验数据分析电缆轴向、径向的温度分布。

实验布置如图 1 所示，直线段长度为 7 m，左右分别为相等的 2 个半圆，半径 R 为 1 m。同根电缆设置 3 种敷设方式：1) 电缆敷设在空气中；2) 电缆直埋深度为 1 m 的土壤；3) 电缆敷设在水中。



● 为测温点，间隔为 1 m。

图 1 实验电缆布置

Fig. 1 Layout of test cable

2.2 电缆温度场分析

电流是决定电缆线芯温度的最重要因素^[23-24]，线芯温度 90 °C 时的电流定义为同等条件下的电缆载流量。选取 4 号热电偶组的线芯温度和全过程实验电流数据进行分析，做出实验曲线，如图 2 所示。电流阶跃上升时，线芯温度变化同步进行，并呈指数增长。电流由 0 A 跳跃至 1 000 A 时，电缆线芯温度由常温状态骤升至 1 000 A 下的稳态值，暂态持续时间大约为 4 h。电缆在 1 000 A 运行 12 h 后，

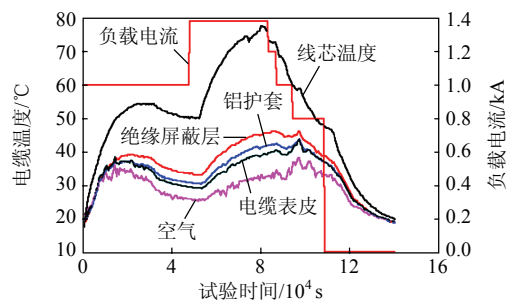


图 2 不同负载电流下电缆各层温度响应

Fig. 2 Temperature response of cable layers under different current

电流升至最大值 1380 A，同样保持为 12h。线芯温度暂态持续时间保持相对于上个阶段较长，基于传热学原理可知，线芯温度的不断升高导致电缆本体热阻、热容变化，进而导致时间常数的改变^[25]。

实验中以阶跃函数模式降低电流用于模拟实际运行电流连续下降的情景，加载电流由 1380 A 降至 1200 A，稳定 1h；再由 1200 A 降低 1000 A，保持 2h；进一步降低电流到 800 A，持续时间为 4h；最后断开电流，使线芯温度降低至与环境温度近似相等。由于电流的稳定时间为 1、2h，远小于电缆导体温度响应时间常数，因此线芯温度保持线性下降，没有突出的曲线拐点。电流降至 800 A 时，稳定时间为 4h，约等于电缆时间常数，下降曲线有明显的拐点。由上述分析可以推出，由于电缆热容的存在，连续变化电流可等效为不同等级的阶跃函数式电流以计算线芯实时温度。

电缆径向温度梯度随着电缆加载电流变化而变化，径向温差在变化电流的条件下由暂态逐渐向稳态过渡，径向温度暂态时间常数与电缆线芯暂态温度的时间常数相等。如图 3(a)所示，在电流恒定的条件下，绝缘层两侧温度差逐渐趋于稳定，且温度差变化趋势呈非线性增长。绝缘层温度差的增大说明绝缘层储存的热量在增加，即绝缘层单位体积内的热量增加，推知电缆绝缘层的比热容随着温度的升高而逐渐变大。如图 3(b)所示，在电缆加载电流由 1000 A 升至 1380 A 时，线芯与电缆表皮温度差也随之增加。对比 1000 A 和 1380 A 下温差变化

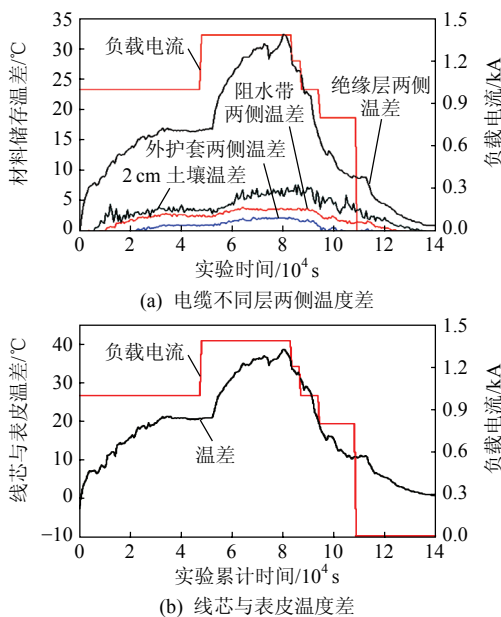


图 3 电缆径向温度差

Fig. 3 Radial temperature difference between the cable layers

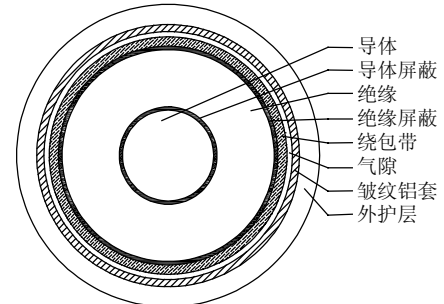
曲线可知，电缆暂态温度持续时间随着电缆运行电流的增大而增加。进一步分析可知，电缆运行电流的上升导致电缆整体温度得到提高，高温使电缆的比热容变大，从而造成电缆升温时间常数的增大。

3 单芯电缆非线性有限元模型

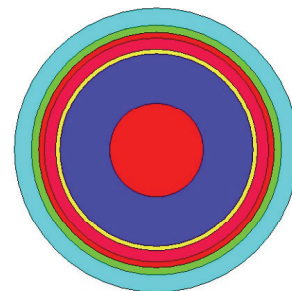
实验中所用的电缆结构及尺寸如表 1 所示。为研究不同条件下的电缆温度场分布，建立电缆有限元模型，如图 4 所示。

表 1 110 kV 电缆结构参数
Tab. 1 Parameters of composition of 110 kV cables

电缆结构	参数	取值
导体	导体材料	Cu
	导体直径/mm	30.3
绝缘层	绝缘平均厚度/mm	16.5
	绝缘屏蔽层厚度/mm	1.0
	绝缘屏蔽层外径/mm	68.0
阻水带	阻水带厚度/mm	2×1.5
	缆芯外径/mm	73.0
皱纹铝	材料	Al
	金属套厚度/mm	2.0
外护层	材料	HDPE
	电缆外径/mm	99.1



(a) 110 kV 电缆剖面图



(b) 电缆有限元图

图 4 电缆结构图示

Fig. 4 Cable model shown

为研究电缆各层材料热性参数非线性对电缆线芯温度的影响，绘出电缆的线性模型和非线性模型所计算导体暂态温度曲线如图 5 所示。根据式(15)可知，由于电缆材料热性参数的非线性，温度越高，导热系数越大，即材料导热性能比低温时更好，因此电缆非线性模型的线芯温度比电缆的线性模型

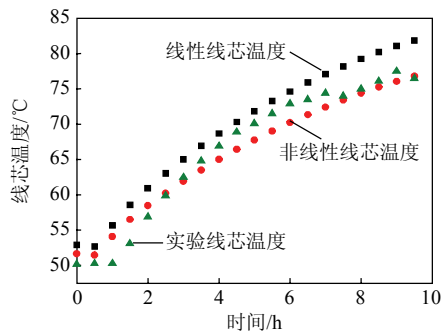


图5 线性与非线性模型计算线芯温度对比

Fig. 5 Comparison of calculated core temperature between linear and nonlinear models

要低。对比非线性模型与线性模型计算值曲线，由电缆线性模型所计算的线芯温度比实验的电缆线芯温度约高 3°C ，而电缆非线性模型得出的线芯温度显然逼近电缆线芯的实验温度。由此可知，不考虑电缆材料非线性的有限元模型计算出的线芯温度有一定的误差，采用非线性有限元模型可减少误差，可以更精确反映线芯的实际温度。

4 结论

1) 电缆线芯轴向温度梯度的变化随着暂态线芯温度的升高而增加，且与所加载的电流大小呈正相关性，同时随着电缆敷设周围环境温度增加而增加，随着温度下降而降低。

2) 在电流变化的条件下，电缆本体各层温度的变化顺序由内向外依次变化，随着时间的推移，各层温度变化幅值大小也是沿着径向由里向外逐渐减小。

3) 电缆表皮与电缆线芯温度的变化以及相对应的点的表皮和线芯温度差距具有相同变化趋势，两者保持线性相关，说明基于电缆表皮温度计算线芯温度具有合理性。

4) 有限元法计算电缆线芯的实时温度，应考虑电缆各层材料的非线性，可减少计算误差。实验验证了电缆的非线性有限元模型的正确性和实用性。

参考文献

- [1] 孟凡凤, 张兵, 方晓明, 等. 影响直埋电缆载流量的因素的研究[J]. 绝缘材料, 2007, 40(3): 64-66.
Meng Fanfeng, Zhang Bing, Fang Xiaoming, et al. Study of ampacity reduction factors for buried cable[J]. Insulating Materials, 2007, 40(3): 64-66(in Chinese).
- [2] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 148-184.
- [3] 李志坚, 张东斐, 曹慧玲, 等. 地下埋设电缆温度场和载流量的数值计算[J]. 高电压技术, 2004, 30(S1): 27-30.
Li Zhijian, Zhang Dongfei, Cao Huiling, et al. Numerical calculation of temperature field and of underground cable[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(S1): 27-30(in Chinese).
- [4] 于建立, 常树生, 牛远方, 等. 地下电力电缆温度场及载流量的数值计算[J]. 东北电力大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 62-65.
Yu Jianli, Chang Shusheng, Niu Yuanfang, et al. Numerical simulation of thermal fields and ampacity of underground power cables[J]. Journal of Northeast Dianli University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 62-65(in Chinese).
- [5] 梁永春, 柴进爱, 李彦明, 等. 基于FEM的直埋电缆载流量与外部环境关系的计算[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(4): 11-13.
Liang Yongchun, Chai Jinai, Li Yanming, et al. Calculation of ampacity reduction factors for buried cables with surroundings based on FEM[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(4): 11-13(in Chinese).
- [6] 曹惠玲, 王增强, 李雯婧, 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 Huiling, Wang Zengqiang, Li Wenjing, et al. Numerical computation of temperature distribution of underground cables and soil with combinatorial coordinates[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 59-63(in Chinese).
- [7] 柴进爱, 梁永春, 李延沐, 等. 地下直埋发热管稳态温度场计算新方法: 模拟热荷法的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 43-46.
Chai Jinai, Liang Yongchun, Li Yanmu, et al. Heat charge simulation method to calculate steady: state temperature field of underground heat pipe[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 43-46(in Chinese).
- [8] 梁永春, 李延沐, 李彦明, 等. 利用模拟热荷法计算地下电缆稳态温度场[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(5): 129-134.
Liang Yongchun, Li Yanmu, Li Yanming, et al. Calculation of the static temperature field of underground cables using heat charge simulation method[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(5): 129-134(in Chinese).
- [9] 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): 4-6.
Cheng Yonghong, Xie Heng, Yi Lidong. Study on the on-line detecting technique for power cable and terminal based on heat effect[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(3): 4-6(in Chinese).
- [10] 赵建华, 袁宏永, 范维澄, 等. 基于电缆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): 52-68.
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): 52-68(in Chinese).
- [11] 刘毅刚, 罗俊华. 电缆导体温度实时计算的数学方法[J]. 高电压技术, 2005, 31(5): 52-54.
Liu Yigang, Luo Junhua. Mathematical method of temperature calculation of power cable conductor in real time[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(5): 52-54(in Chinese).
- [12] 雷成华, 刘刚, 李钦豪. BP神经网络模型用于单芯电缆导体温度的动态计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 184-189.
Lei Chenghua, Liu Gang, Li Qin hao. Dynamic calculation of conductor temperature of single-cable using BP neural network[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 184-189(in Chinese).
- [13] Swift G, Molinski T S, Lehn W. A fundamental approach to transformer thermal modeling, part I: theory and equivalent circuit[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(2): 171-175.
- [14] Hiranandani A, Detroit E C. Calculation of conductor temperatures and ampacities of cable systems using a generalized finite difference model[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1991, 6(1): 15-21.

- [15] 赵健康, 雷清泉, 王晓兵, 等. 复杂运行条件下交联电缆载流量研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3123-3128.
Zhao Jiankang, Lei Qingquan, Wang Xiaobing, et al. Experimental research on ampacity of extruded power cable under complex operating condition[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3123-3128(in Chinese).
- [16] 王俏华, 顾金, 吴建东, 等. 预处理温度对高压直流电缆附件绝缘材料空间电荷的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 122-126.
Wang Qiaohua, Gu Jin, Wu Jiandong, et al. Influence of pretreating temperature on space charge of insulation materials for cable accessories used in HVDC transmission projects[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 122-126(in Chinese).
- [17] León de F, Anders G J. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(2): 537-543.
- [18] Tarasiewicz E, Kuffel E, Grzybowski S. Calculations of temperature distributions within cable trench backfill and the surrounding soil[J]. IEEE Trans on Apparatus and Systems, 1985, 3(8): 1973-1977.
- [19] 成永红, 衣立东, 程锡圭, 等. 运行状态下电缆终端热分布实验研究[J]. 高电压技术, 1996, 22(3): 56-58.
Cheng Yonghong, Yi Lidong, Cheng Xigui, et al. The experiment and research on thermal distribution of cable terminal in service[J]. High Voltage Engineering, 1996, 22(3): 56-58(in Chinese).
- [20] 罗俊华, 周作春, 李华春, 等. 电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 169-172.
Luo Junhua, Zhou Zuochun, Li Huachun, et al. Application of operation temperature detection technique for on-line power cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 169-172(in Chinese).
- [21] 曹惠玲, 王增强, 李文靖, 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 Huiling, Wang Zengqiang, Li Wenjing, et al. Numerical computation of temperature distribution of underground cables and soil with combinatorial coordinates[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 59-63(in Chinese).
- [22] 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.
Liang Yongchun, Li Yanming, Chai Jinai, et al. A new method to calculate the steady-state temperature field and ampacity of underground cable system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 185-190(in Chinese).
- [23] Anders G J. Power cable thermal analysis with considerations of heat and moisture transfer in the soil[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, 3(4): 1280-1285.
- [24] 赵建华, 袁宏永, 范维澄, 等. 基于电缆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(11): 52-58.
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(11): 52-58(in Chinese).
- [25] 樊友兵, 张丽, 蒙邵新, 等. 中低压交联电缆集群敷设载流量的计算[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 59-60.
Fan Youbing, Zhang Li, Meng Shaoxin, et al. Calculation of current rating for medium and low voltage XLPE cable in cluster laying[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 59-60(in Chinese).



雷鸣

收稿日期: 2011-03-28。

作者简介:

雷鸣(1984), 男, 博士研究生, 研究方向为输变电外绝缘及在线监测, E-mail: leimingtiandi@163.com;

刘刚(1969), 男, 副教授, 研究方向为电气设备在线监测与故障诊断、过电压及其防护、输变电外绝缘特性, E-mail: liugang@scut.com.cn;

刘毅刚(1956), 男, 高级工程师, 研究方向为高压电缆线路的运行、安装和设计工作。

(责任编辑 马晓华)