

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.09.016

用模拟热荷法进行复合介质温度场计算的研究

柴进爱¹, 王金源², 李彦明³

(1. 中国石油集团海洋工程有限公司, 青岛 266520; 2. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 青岛 266555;
3. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 根据电场和温度场的相似性,提出了用于计算复合介质地下电缆群稳态温度场的模拟热荷法。文中将电缆等效为缆芯和外护两层结构,借鉴静电场计算中复合介质交界面两侧介质的不同而用单一介质代替时的方法,根据束缚电荷引入“束缚热荷”的概念。认为在土壤和外护两种介质的分界面上有“束缚热荷”,在不同介质区域中布置模拟热荷来等效缆芯表面的热荷分布及不同介质分界面上的“束缚热荷”的作用。根据场的唯一性原理,用模拟热荷法计算土壤直埋下的电缆的复合介质稳态温度场,得出温度场图及热荷热量分布图。建立等效处理后的模拟电缆的试验模型进行试验研究,以及 ANSYS 有限元仿真计算。将模拟热荷法计算结果与试验结果和仿真结果进行对比,验证了模拟热荷法计算复合介质温度场的可行性。

关键词: 稳态温度场; 模拟热荷法; 束缚热荷; 复合介质

Study on Temperature Field Calculation of Composite Dielectric by Using Heat Charge Simulation Method

CHAI Jin'ai¹, WANG Jinyuan², LI Yanming³

(1. CNPC Offshore Engineering Company Limited, Qingdao 266520, China; 2. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Qingdao 266555, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Base on the similarity of electric field and temperature field, the heat charge simulation method was given to calculate the composite dielectric steady temperature field for underground cables. In this paper, the cable was equivalent to two layers. Using the calculation method of composite dielectric electrostatic field for reference, we introduce the concept of bound heat charge according to the bound charge. Based on uniqueness principle of field, steady temperature of buried cable was calculated by heat charge simulation method. The graphs of temperature field and heat quantity were given. The test and finite element method (FEM) simulation have proved that heat charge simulation method is effective to calculate the steady temperature field of underground cables.

Key words: steady temperature field; heat charge simulation method; bound heat charge; composite dielectric

0 引言

为了解决城市建设与电力建设的矛盾,现在电缆的敷设方式大多采用地下电缆的形式。由于地下电缆成本高、投资大,而且维修不方便,为确保其安全工作,确定电缆的载流量有重要的意义。

连续负载流量是地下电缆运行中的重要参数,载流量偏大,造成缆芯工作温度超过容许值,绝缘的寿命就会比预期值缩短;载流量偏小,则缆芯铜材或铝材就不能得到充分的利用,导致不必要的浪

费。为确保电缆能够安全、可靠地工作,采用有效的方法计算地下电缆的温度分布对载流量计算具有重要意义^[1-4],目前大多采用数值计算的方法计算地下电缆的载流量。

已有的电缆温度场数值计算方法有有限差分法、边界元法、有限元法^[5-16]。对于地下电缆用数值方法能够根据实际情况,准确计算地下电缆直埋敷设的温度场,但建模比较复杂,计算耗时较长,不利于用于工程实际。因此,有必要寻找一种既可真实反应电缆实际情况,又可简便、快速、计算电缆温度场的方法。借鉴计算静电场的模拟电荷法^[17-18],提出了计

收稿日期:2015-03-22; 修回日期:2015-04-26

算温度场的模拟热荷法计算复合介质的温度场,确定地下电缆的散热和周围土壤的温度分布。

模拟热荷法是根据场的唯一性定理,在被求场域以外,用一组位于导体内部的若干个离散的集中热荷,即称之为模拟热荷,来等效代替导体发热。复合介质分界面上的束缚热荷的作用用放置在不同介质中的热荷来等效。

文中采用直埋带绝缘的发热管模拟土壤直埋敷设形式的电缆发热,用有限元 ANSYS 进行仿真计算。通过将模拟热荷法的计算结果与试验结果、ANSYS 仿真结果进行比较,验证了模拟热荷法可以用于对复合介质形式的地下埋管的温度场计算的设想。

1 模型的建立

当电缆直埋于土壤时,电缆长度远远大于电缆截面,可以认为此时的温度场为二维场。做如下假设:单芯电缆仅有导体和外护两层结构,且损耗全部集中在导体内;电缆导体为金属,导热率很高,可认为导体为等温体。用发热管导体加外套 1 个橡胶套,来模拟电缆芯和外护两层结构。

发热管计算模型见图 1,将套有橡胶套的发热管埋于深 h 的土壤中,建立直角坐标系。 k_1 、 k_2 分别为橡胶套和土壤的导热系数; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 分别为发热管导体芯、橡胶套、地面和深层土壤 4 个边界。根据传热学^[9]可知,模型的数学描述见式(1)、(2)。

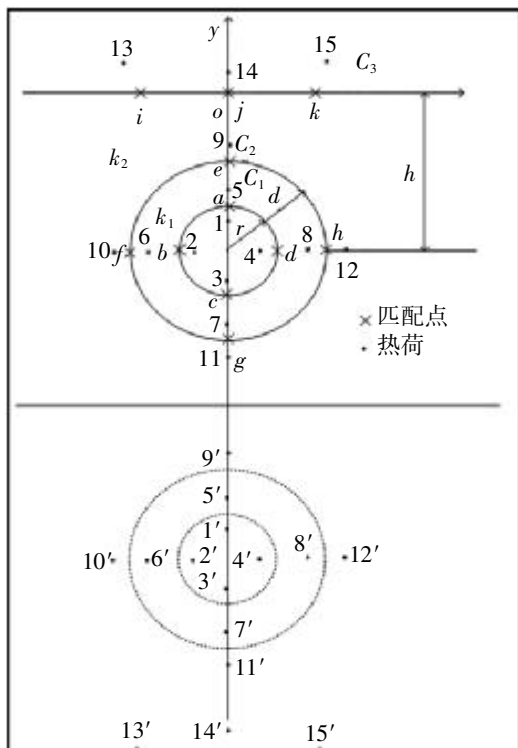


图 1 发热管计算模型

Fig. 1 Model of heat pipe calculation

土壤区域满足的控制方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0. \quad (1)$$

发热管区域满足的控制方程为

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

式(1)、(2)中: T 为场域温度,℃; q 为热流密度,W/m; k 为介质导热系数,W/(m·K)。

边界条件:

- 1) 在发热管芯 C_1 上,为等温面温度不变 $T(i)$;
- 2) 介质的分界面 C_2 上,为温度的连续以及热流密度的法线方向分量的连续;
- 3) 在地面 C_3 上,满足土壤与环境对流换热的第 3 类边界条件;
- 4) 在深层土壤 C_4 上,为参考温度,文中取 20 ℃。

图 1 中把发热管导体内、橡胶套、土壤、空气中的模拟热荷加以编号,热量分别为 $Q_0(j)$ ($j=1 \sim k$)、 $Q_1(j)$ ($j=k+1 \sim m$)、 $Q_2(j)$ ($j=m+1 \sim n$)、 $Q_3(j)$ ($j=n+1 \sim p$),则在各轮廓点 i 上的边界条件 1)、2)、3)如下。

1.1 发热管导体芯上

k_1 侧发热管上:

$$\sum_{j=1}^k P(i, j) Q_0(j) + \sum_{j=m+1}^n P(i, j) Q_2(j) = T(i). \quad (3)$$

k_2 侧发热管上:

$$\sum_{j=1}^k P(i, j) Q_0(j) + \sum_{j=k+1}^m P(i, j) Q_1(j) = T(i). \quad (4)$$

在图 1 中, k_2 侧没有发热管,实际计算中不用式(4)。另外,镜像热荷^[12]的作用,包含于温度系数 $P(i, j)$ 内。

1.2 土壤和绝缘介质分界面上

分界面上温度的连续条件为

$$\sum_{j=k+1}^m P(i, j) Q_1(j) - \sum_{j=m+1}^n P(i, j) Q_2(j) = 0. \quad (5)$$

分界面上热流密度的连续条件为

$$k_1 \sum_{j=m+1}^n \frac{\partial P(i, j)}{\partial n} Q_2(j) + k_2 \sum_{j=k+1}^m \frac{\partial P(i, j)}{\partial n} Q_1(j) = 0. \quad (6)$$

式(3)–(6)中: Q 为热量,W; $P(i, j)$ 为温度系数。

1.3 第 3 类边界条件

已知地面的对流换热系数 α 、土壤导热系数 k 、环境温度 T_r ,则满足方程

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \alpha (T - T_r) \Big|_r. \quad (7)$$

这一边界条件的处理,将计算中的埋深用等效埋深^[14] h_e 代替,即

$$h_e = h + \frac{k}{\alpha} \quad (8)$$

式(8)中: α 为对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; k 为土壤导热系数, $W/(m \cdot K)$; T_i 为环境温度, $^{\circ}C$ 。

2 计算过程

直埋电缆由于它本身的特点, 可以将其看作为线热源, 有一定的长度即可视为无限长线热源。常功率持续作用的线热源在无限大物体中造成的稳态温度分布计算公式为^[20]

$$\theta(R) = \frac{q_l}{2\pi k} \ln \frac{1}{R} \quad (9)$$

式(9)中: θ 为场域任意点的过余温度即场域实际温度与参考温度之差, $^{\circ}C$; R 为场域任意点与热源之间的距离, m ; k 为介质导热系数, $W/(m \cdot K)$; q_l 为线热源热量, W/m 。

图 1 中, 模拟热荷分别编号为 1-15; 热量分别为 q_1-q_{15} ; 镜像热荷为 1'-15'; 热量分别为 $-q_1--q_{15}$ 。轮廓点分别标号为 $a-k$ 。

根据式(3)-(9)列写控制方程:

$$\begin{bmatrix} P_{a1}-P_{b1} & P_{a2}-P_{b2} & P_{a3}-P_{b3} & P_{a4}-P_{b4} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{a9}-P_{b9} & P_{a10}-P_{b10} & P_{a11}-P_{b11} & P_{a12}-P_{b12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{b1}-P_{c1} & P_{b2}-P_{c2} & P_{b3}-P_{c3} & P_{b4}-P_{c4} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{b9}-P_{c9} & P_{b10}-P_{c10} & P_{b11}-P_{c11} & P_{b12}-P_{c12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{c1}-P_{d1} & P_{c2}-P_{d2} & P_{c3}-P_{d3} & P_{c4}-P_{d4} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{c9}-P_{d9} & P_{c10}-P_{d10} & P_{c11}-P_{d11} & P_{c12}-P_{d12} & 0 & 0 & 0 \\ P_{e1} & P_{e2} & P_{e3} & P_{e4} & -P_{e5} & -P_{e6} & -P_{e7} & -P_{e8} & P_{e9} & P_{e10} & P_{e11} & P_{e12} & -P_{e13} & -P_{e14} & -P_{e15} \\ \vdots & & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ P_{h1} & P_{h2} & P_{h3} & P_{h4} & -P_{h5} & -P_{h6} & -P_{h7} & -P_{h8} & P_{h9} & P_{h10} & P_{h11} & P_{h12} & -P_{h13} & -P_{h14} & -P_{h15} \\ k_1 \frac{\partial P_{e1}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{e2}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{e3}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{e4}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{e5}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{e6}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{e7}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{e8}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{e9}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{e10}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{e11}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{e12}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{e13}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{e14}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{e15}}{\partial n} \\ k_1 \frac{\partial P_{h1}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{h2}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{h3}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{h4}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{h5}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{h6}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{h7}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{h8}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{h9}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{h10}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{h11}}{\partial n} & k_1 \frac{\partial P_{h12}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{h13}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{h14}}{\partial n} & -k_2 \frac{\partial P_{h15}}{\partial n} \\ 0 & & & & & & & & & & & & P_{i13} & P_{i14} & P_{i15} \\ \vdots & & & & & & & & & & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{k5} & P_{k6} & P_{k7} & P_{k8} & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{k13} & P_{k14} & P_{k15} \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 \\ q_5 \\ \vdots \\ q_{11} \\ q_{12} \\ q_{13} \\ q_{14} \\ q_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ T_i - T_s \\ T_i - T_s \\ T_i - T_s \\ Q \end{bmatrix} \quad (11)$$

式(11)中, 各匹配点的温度系数的计算方法为:

1) 计算发热管芯表面匹配点的温度时, 用自身发热管芯中热荷和自身发热管附近土壤中的热荷。如计算单回路电缆时, A 相电缆的缆芯匹配点温度用 A 相电缆缆芯中的热荷和其周围土壤中的热荷, 计算 B、C 相电缆缆芯表面的温度方法一样。

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi k_1} \ln \frac{R_{ij'}}{R_{ij}}, i=a \sim d; j=1 \sim 4, 9 \sim 12. \quad (12)$$

2) 计算发热管橡胶绝缘外套表面的温度时, 在绝缘介质中时, 同计算发热管芯温度的方法一样, 见式(13); 在土壤介质中时, 用所有发热管绝缘介质中的热荷和等效空气作用的热荷, 见式(14)。

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi k_1} \ln \frac{R_{ij'}}{R_{ij}}, i=e \sim h; j=1 \sim 4, 9 \sim 12; \quad (13)$$

$$\begin{cases} \left(\sum_{j=1}^4 P_{aj}q_j + \sum_{j=9}^{12} P_{aj}q_j \right) - \left(\sum_{j=1}^4 P_{bj}q_j + \sum_{j=9}^{12} P_{bj}q_j \right) = 0 \\ \left(\sum_{j=1}^4 P_{bj}q_j + \sum_{j=9}^{12} P_{bj}q_j \right) - \left(\sum_{j=1}^4 P_{cj}q_j + \sum_{j=9}^{12} P_{cj}q_j \right) = 0 \\ \left(\sum_{j=1}^4 P_{cj}q_j + \sum_{j=9}^{12} P_{cj}q_j \right) - \left(\sum_{j=1}^4 P_{dj}q_j + \sum_{j=9}^{12} P_{dj}q_j \right) = 0 \\ \left(\sum_{j=1}^4 P_{ij}q_j + \sum_{j=9}^{12} P_{ij}q_j \right) - \left(\sum_{j=5}^8 P_{ij}q_j + \sum_{j=13}^{15} P_{ij}q_j \right) = 0. \end{cases} \quad (10)$$

(i=e, f, g, h)

$$k_1 \left(\sum_{j=1}^4 \frac{\partial p_{ij}q_j}{\partial n} + \sum_{j=9}^{12} \frac{\partial p_{ij}q_j}{\partial n} \right) - k_2 \left(\sum_{j=5}^8 \frac{\partial p_{ij}q_j}{\partial n} + \sum_{j=13}^{15} \frac{\partial p_{ij}q_j}{\partial n} \right) = 0$$

(i=e, f, g, h)

$$\sum_{j=5}^8 p_{ij}q_j + \sum_{j=13}^{15} p_{ij}q_j = T_i - T_s, (i=i, j, k)$$

$$\sum_{j=1}^4 q_j = Q$$

式(10)中: T_s 为参考温度即深层土壤的温度, $^{\circ}C$; T_i 为环境温度, $^{\circ}C$; Q 为发热管芯的发热量, W/m 。

式(10)可以转化为矩阵方程:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi k_2} \ln \frac{R_{ij'}}{R_{ij}}, i=e \sim h; j=5 \sim 8, 13 \sim 15. \quad (14)$$

3) 计算等效后的地表温度时, 因为它在土壤中, 计算方法与发热管绝缘表面外在土壤中情况一样, 见式(15)。

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi k_2} \ln \frac{R_{ij'}}{R_{ij}}, i=i \sim k; j=5 \sim 8, 13 \sim 15. \quad (15)$$

式(13)-(15)中: P_{ij} 为温度系数; k 为介质导热系数, $W/(m \cdot K)$; R_{ij} 是 i 点到 j 点距离, m 。

为了方法的自身验证应取校核点, 计算时用校核点的温度和匹配点温度比较, 使其满足一定精度要求。因为在计算中取缆芯导体表面为等温面而用少量几个匹配点将条件离散化, 应在缆芯导体表面取校核点; 同时, 等效地表为等温面计算时也只取了

几个匹配点,所以在等效地表上也应取校核点。校核点温度计算和匹配点方法是一样的。

计算流程图见图 2。

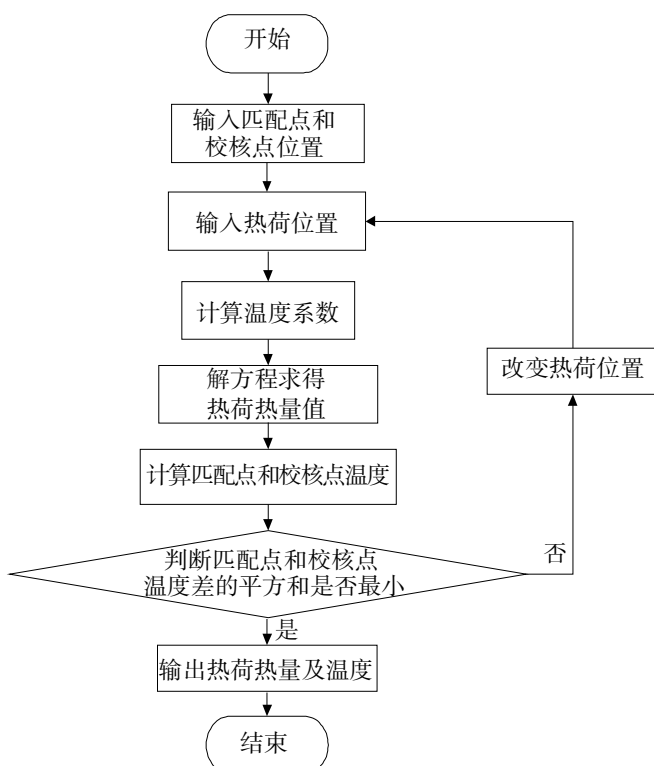


图 2 程序计算流程图

Fig. 2 Flow chart of program calculation

3 试验验证

为了验证模拟热荷法计算复合介质温度场的有效性,对电缆群在土壤直埋敷设时的情况利用套有绝缘外护的发热管进行了模拟试验,发热管参数:长为 2.5 m,截面直径为 12 mm,电阻为 120 Ω ;用橡胶管作绝缘外套,其参数:橡胶导热系数为 0.25 W/(m·K),厚度为 0.004 m。

试验布置图见图 3,将带绝缘发热管埋入土壤中,两端接在可调幅值的交流电源上,通过施加不同的电压改变其发热量,利用数字式温度计和热电偶测量发热管表面和橡胶表面的温度,记录温度场上升至稳定时的稳态值。



图 3 试验布置示意图

Fig. 3 Test schematic diagram

试验结果发热管导体温度为 65 $^{\circ}\text{C}$,模拟热荷法结果为 65.054 $^{\circ}\text{C}$,有限元计算结果为 65.98 $^{\circ}\text{C}$ 。可见,

模拟热荷法可以对复合介质温度场进行有效的计算。

4 计算实例

以单回路 800 mm² YJLW02 XPLE 电力电缆为例,计算了已知电流时的电缆线芯导体温度。电缆结构参数见表 1,敷设条件见表 2。

表 1 电缆结构参数

参数	数值
导体直径	34
绝缘层厚度	20
金属屏蔽层厚度	2
外护层厚度	5
电缆外径	88

表 2 电缆群敷设条件

参数	数值
埋深/m	0.7
土壤热阻/(K·m·W ⁻¹)	1.0
空气温度/ $^{\circ}\text{C}$	40.0
土壤环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	20.0
排列方式	水平排列

假设电缆双端接地,导体通以 500 A 的电流,绝缘层热阻为 3.5 K·m/W,三相导体损耗为 6.229 7、6.235 2、6.228 8 W/m,三相电缆金属套屏蔽层损耗为 13.893 0、10.314 5、9.837 5 W/m。将金属套屏蔽层损耗归算到导体后,绝缘层热阻将变为 1.083 5、1.318 6、1.356 9 K·m/W。

计算单芯电缆单回路双端接地时电缆的温度场,电缆缆芯、外护、各相电缆周围土壤中,分别沿圆周均匀布置了 8 个热荷;等效空气作用的热荷沿直线分布 11 个热荷,计算模型见图 4。

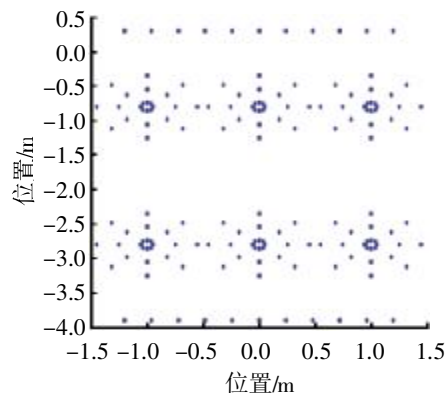


图 4 热荷位置分布图

Fig. 4 Heat charge lay-out

用模拟热荷法计算得到的各相电缆缆芯导体表面的匹配点和校核点的温度, 每相电缆的匹配点与校核点的取法是, 将校核点按顺时针排序编号, 见图 5。三相电缆缆芯表面及等效地表匹配点及校核点温度计算结果见表 3、4。

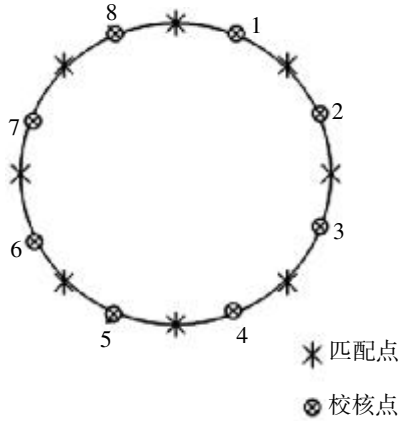


图 5 匹配点与校核点布置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of matching points and checking points

表 3 A、B、C 相电缆缆芯匹配点和校核点温度

Table 3 Checking and matching points temperature of

A, B and C phase cable			℃
编号	A 相电缆	B 相电缆	C 相电缆
1	57.982 5	58.565 0	56.262 8
2	57.982 7	58.565 2	56.262 8
3	57.982 7	58.565 2	56.262 8
4	57.982 4	58.565 0	56.262 8
5	57.982 4	58.565 0	56.262 8
6	57.982 4	58.565 2	56.263 1
7	57.982 4	58.565 2	56.263 1
8	57.982 4	58.565 0	56.262 9
匹配点	57.982 7	58.565 3	56.263 0

表 4 等效地表上匹配点温度和校核点温度

Table 4 Checking and matching temperature on the equivalent ground points

编号	温度
1	40.039
2	39.985
3	40.007
4	39.997
5	40.001
6	40.001
7	39.997
8	40.007
9	39.985
10	40.039
匹配点	40.000

校
核
点

此时, 匹配点与校核点温度之差的平方和最小为 0.003 5, 满足精度要求。

所得到的电缆导体、电缆外护、土壤中和等效空气作用的热量值做出热荷热量分布图见图 6、7。图 6 中: 横坐标均为沿圆周分布弧度, (°); 纵坐标均为热量, W/m。由热荷热量计算整个区域的温度场分布, 见图 8。

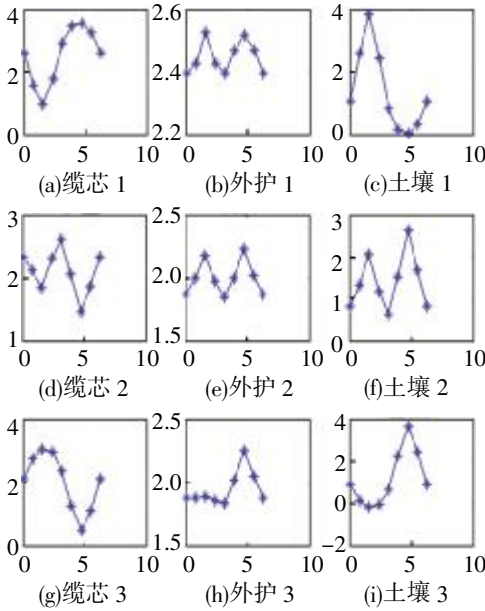


图 6 缆芯、外护和土壤热荷热量分布图

Fig. 6 Heat quantity graphs of heat charges in cable core, outer sheath and soil

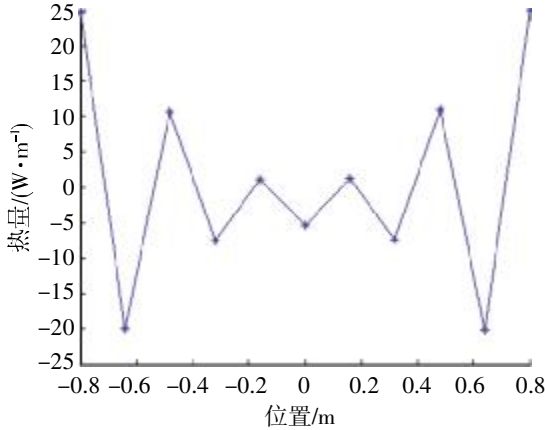


图 7 等效空气作用的热荷热量分布图

Fig. 7 Heat charge temperature distribution graph of equivalent air

从图 6、7 可以看出, 电缆各个部分及土壤中的热荷热量分布是有一定规律可循的。

将模拟热荷法与 ANSYS 有限元方法计算结果进行比较, 见表 5, 计算误差在 0.3 ℃ 以内。

5 结语

阐述了模拟热荷法对复合介质温度场的计算方法, 并以土壤直埋的 3 根单芯电缆(单回路)的稳态

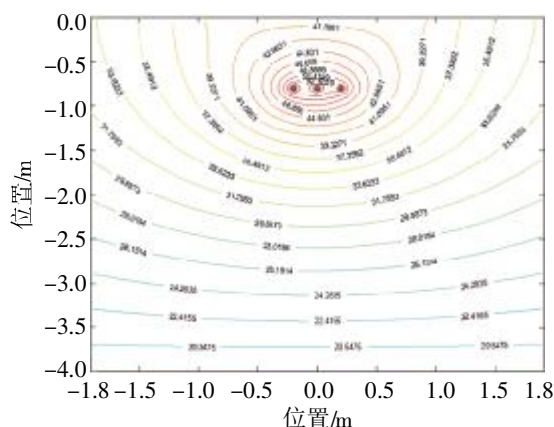


图 8 温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution

表 5 模拟热荷法与有限元计算结果比较

Table 5 Heat charge simulation method and

FEM results comparison

℃

计算方法及误差	导体温度 A	导体温度 B	导体温度 C
有限元	58.200 0	58.700 0	56.200 0
模拟热荷法	57.982 7	58.565 3	56.263 0
误差	0.217 3	0.134 7	0.063 0

温度场计算为例,对等效后的电缆导体及其周围土壤温度场进行了初步试探性计算。初步验证了该方法用于计算电缆稳态温度场的可行性,但该方法尚有不足之处需要完善,对于实际直埋敷设电缆处于多种介质的计算,以及热荷位置的人为经验设置的局限、热荷形式的选择等需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] NEHER J H, McGRATH M H. The calculation of the temperature rise and load capacity of cable systems [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Part III Power Apparatus and Systems, 1957, 76(3): 752-764.
- [2] NEHER J H. The temperature rise of buried cables and pipes [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1949, 68(1): 9-21.
- [3] NEHER J H. The transient temperature rise of buried cable systems [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1964, 83(2): 102-114.
- [4] IEC 60287-1-1:2006 Calculation of the continuous current rating of cables (100% load factor) [S]. 2006.
- [5] KELLOW M A. A numerical procedure for the calculation of the temperature rise and ampacity of underground cables [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(7): 3322-3330.
- [6] GELA G, DAI J J. Calculation of thermal fields of underground cables using the boundary element method [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1988, 3(4): 1341-1347.
- [7] HANNA M A, CHIKHANI A Y. Thermal analysis of power cables in multi-layered soil, Part2: Practical consideration [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3): 772-777.
- [8] HANNA M A, CHIKHANI A Y, SALAMA M M A. Thermal analysis of power cables in multi-layered soil, Part3: case of two cables in a trench [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 1994, 9(1): 572-578.
- [9] HANNA M A, CHIKHANI A Y, SALAMA M M A. Thermal analysis of power cables in multi-layered soil [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 761-771.
- [10] GARRIDO C, OTERO A F, CIDRÁS J. Theoretical model to calculate steady-state and transient ampacity and temperature in buried cables [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(3): 667-678.
- [11] 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): 43-47.
CHAI Jin'ai, 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): 43-47.
- [12] 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(16): 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]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 129-134.
- [13] 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 Jin'ai, 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.
- [14] 梁永春, 孟凡凤, 王正刚, 等. 土壤直埋电缆群额定载流量的计算 [J]. 高压电器, 2006, 42(4): 244-247.
LIANG Yongchun, MENG Fanfeng, WANG Zhenggang, et al. Ampacity calculation for groups of buried cable [J]. 2006, 42(4): 244-247.
- [15] 柴进爱, 梁永春, 李彦明. 三相电缆并联导体间电流分布的研究 [J]. 电力设备, 2007, 8(9): 16-18.
CHAI Jin'ai, LIANG Yongchun, LI Yanming. Study on current distribution of conductor in parallel three-phase cable [J]. Electrical Equipment, 2007, 8(9): 16-18.
- [16] 梁永春, 柴进爱, 李延沐, 等. 基于 FEM 的同相并联大截面三相电缆电流分布的研究 [J]. 高压电器, 2007, 43(3): 186-188.

(下转第 102 页)

- [6] 南方电网科学研究院有限责任公司. 南方电网融冰技术应用专题报告[R]. 广州: 南方电网科学研究院有限责任公司, 2011.
- [7] 黄新波, 欧阳丽莎, 王娅娜, 等. 输电线路覆冰关键影响因素分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1677-1682.
HUANG Xinbo, OUYANG Lisha, WANG Yana, et al. Analysis on key influence factor of transmission line icing [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1677-1682.
- [8] 刘文涛, 和识之, 陈亦平, 等. 基于直流融冰的电网大面积冰灾防御策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 102-107.
LIU Wentao, HE Shizhi, CHEN Yiping, et al. Defensive strategy for wide area ice disaster of power grid based on DC deicer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(11): 102-107.
- [9] 刘泽洪. 直流输电线路覆冰与防治[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [10] 陈彦州, 王奇, 蔡延雷, 等. 南方电网主网架直流融冰工作流程与融冰效率研究[J]. 高压电器, 2013, 49(6): 86-92.
CHEN Yanzhou, WANG Qi, CAI Yanlei, et al. Analysis on DC deicing process and efficiency in China Southern Power Grid[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(6): 86-92.
- [11] 陈智. 江西省电网直流融冰计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 72-74.
CHEN Zhi. The research of DC anti-icing for Jiangxi grid [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 72-74.
- [12] 中南电力设计院. 500 kV 桂山甲乙线架空地线融冰改造工程可行性报告[R]. 武汉: 中南电力设计院, 2012.
- [13] 蒋兴良, 范松海, 胡建林, 等. 输电线路直流短路融冰的临界电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 111-116.
JIANG Xingliang, FAN Songhai, HU Jianlin, et al. Analysis of critical ice-melting current for short-circuit DC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 111-116.
- [14] 陆佳政, 谭艳军, 李波, 等. 特高压直流输电线路分段直流融冰方案[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 541-545.
LU Jiazheng, TAN Yanjun, LI Bo, et al. Segmented DC ice-melting solution of UHV DC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 541-545.
- [15] PÉTER Z. Modeling and simulation of the ice melting process on a current-carrying conductor [D]. Québec: Université Du Québec, 2006.
- [16] HUNEAULT M, LANGHEIT C, CARON J. Combined models for glaze ice accretion and de-icing of current-carrying electrical conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1611-1616.
- [17] 何鹏飞, 王渝红, 李兴源, 等. 换流变压器在直流融冰装置中的作用研究[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 113-117.
HE Pengfei, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. Research on influences of converter transformer on DC ice-melting device[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 113-117.
- [18] 王少华. 输电线路典型覆冰事故及防治技术分析[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 85-89.
WANG Shaohua. Analysis of typical ice accidents of transmission lines and preventing techniques [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 85-89.
- [19] 彭向阳, 周华敏, 杨楚明. 广东电网直流融冰装置安装调试及实冰演练[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 98-102.
PENG Xiangyang, ZHOU Huamin, YANG Chuming. Installation debugging and ice-melting drilling of DC de-icer in Guangdong power grid [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 98-102.

李晋伟(1986—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事柔性输电与直流融冰、超高压交直流系统在线监测方面的工作。

王奇(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事电力系统稳定与控制、直流及串补控制保护方面工作。

唐金昆(1973—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统控制保护、柔性输电技术研究。

(上接第 96 页)

- LIANG Yongchun, CHAI Jin'ai, LI Yanmu, et al. Study on current distribution in same phase of two parallel large section cables based on FEM[J]. High Voltage Apparatus 2007, 43(3): 186-188.
- [17] SINGER H, STEINBIGLER H, WEIB P. A charge simulation method for the calculation of high voltage fields [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1974(93): 1660-1667.
- [18] 河野照哉. 电磁场数值算法[M]. 宅间董, 尹克宁, 译. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [19] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [20] 张洪济. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- 柴进爱(1981—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力电缆温度场、载流量方面的研究和海洋电气工程设计工作。
- 李彦明(1946—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力设备在线监测方面的研究。