

# 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

柴进爱<sup>1</sup>, 梁永春<sup>1,2</sup>, 李延沐<sup>1,3</sup>, 孟凡凤<sup>1</sup>, 方晓明<sup>1</sup>, 李彦明<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 河北科技大学电气信息学院, 河北 石家庄 050054;  
3. 西安建筑科技大学机电学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了寻找一种既可真实反映电缆实际情况, 又可简便、快速计算电缆温度场的方法, 笔者根据温度场和电场的相似性, 提出了一种计算地下直埋发热管稳态温度场的新方法—模拟热荷法。首选利用换热量相等的原则, 将地表空气对流换热系数等效为一定厚度的土壤, 在发热管芯和空气中用模拟热荷代替原来的发热管损耗和空气对土壤温度场的影响; 然后根据镜像法, 按照地表空气等温、导体等温列出约束方程组; 最后利用高斯法求解方程组, 求得地下直埋发热管稳态温度场的分布。试验及有限元 Ansys 仿真验证了模拟热荷法在地下直埋发热管稳态温度场计算中的有效性。

关键词: 稳态温度场; 模拟热荷法; 镜像法; 高斯法

中图分类号: TM247

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)01-0043-04

## Heat Charge Simulation Method to Calculate Steady-state Temperature Field of Underground Heat Pipe

CHAI Jin-ai<sup>1</sup>, LIANG Yong-chun<sup>1,2</sup>, Li Yan-mu<sup>1,3</sup>, MENG Fan-feng<sup>1</sup>, FANG Xiao-ming<sup>1</sup>, LI Yan-ming<sup>1</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Xi 'an Jiaotong University, Xi 'an 710049, China;

2. Department of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050054, China;

3. Department of Mechanical and Electrical, Xi 'an University of Architecture and Technology, Xi 'an 710055, China)

Abstract: In order to find a method that not only can reflect the cable's actual situation turely but also can caculate the cable temperature field simply and rapidly, a new method named heat charge simulation method was proposed to calculate the steady temperature field of underground heat pipe according to the comparability of electric field and temperature filed. Based on the equivalent quantity of heat exchange, the coefficient of air convection was replaced by the equivalent depth of soil. The simulated heat charge was substituted for the loss in heat pipe core and for the effect of air on soil temperature field. The constraint isothermal equations were established via mirror method. The Gaussian method was used to solve the equations and calculate the steady temperature field of underground heat pipe. The trial and finite element method (FEM) simulation proves that the heat charge simulation method is effective to calculate the steady temperature field of underground heat pipe.

Key words: steady temperature field; heat charge simulation method; mirror method; gaussian method

## 0 引言

用数值方法分析电气设备的温度场已经得到广泛的应用, 其方法有有限差分法、有限元法、边界元法、有限容积法<sup>[1-6]</sup>等。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映电缆实际情况, 又可简便、快速计算电缆温度场的方法。笔者借鉴计算静电场的模拟电荷法<sup>[7, 8]</sup>, 提出了计算温度场的模拟热荷法。

模拟电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

电荷(即称之为模拟电荷)来等效代替电极表面连续分布的电荷。模拟电荷的位置和形状是由人们事先根据电极的形状和对场图的定性分析所假设, 而电荷值则由电极的边界条件决定<sup>[9, 10]</sup>。

电场中的电位可以类比于温度场中的温度, 电量类比于热量。因此, 根据相似性理论, 电场和温度场具有高度的相似性, 将电场中的模拟电荷法引入温度场计算, 即利用“模拟热荷法”对温度场进行计算。笔者用直埋热管模拟土壤直埋敷设形式的电缆导体发热, 同时用有限元 Ansys 进行仿真计算<sup>[11]</sup>。通过将模拟热荷法的计算结果与试验结果及 Ansys 仿真结果进行比较, 验证了模拟热荷法可以用于对地下埋管的温度场计算。计算结果在满足精度的基础上, 可以大大提高计算的速度。

收稿日期: 2007-07-25; 修回日期: 2007-12-25

作者简介: 柴进爱(1981-), 女, 硕士研究生, 从事电力电缆载流量方面的研究。

### 1 计算方法

#### 1.1 温度场和电场的相似性

将温度场中的过剩温度类比于电场中的电压, 热量类比于电量, 热阻类比于电阻。于是, 将用于静电场计算的模拟电荷法应用于稳态温度场中。

模拟热荷法同模拟电荷法一样, 也是在所求场域之外用虚拟的热源进行模拟。虚拟热源的位置可以根据需要事先设定, 虚拟热源的大小则可利用给定的边界条件以及传热学中的理论联合求解, 将传热学中的过剩温度 类比于模拟电荷法中的电位 , 将热源 q 类比于模拟电荷法中的电荷量 q, 在电场计算中有{ }=[A]{Q}, 其中 A 为电位系数, Q 为模拟电荷的电量。相类比可以得出稳态温度场计算 { }=[a]{q}, 其中, [a] 为温度系数矩阵, { } 为过剩温度, {q} 为模拟热荷热量。

#### 1.2 建立试验模型

在假设电缆表面温度相等时, 地下直埋电缆与地下直埋发热管相似。因此, 可以用地下直埋发热管来模拟地下直埋电缆。地下直埋发热管的温度场分布特性, 可以反应地下直埋电缆的温度场特性。为了验证模拟热荷法计算地下直埋电缆温度场的有效性, 利用多组发热管进行了模拟试验。发热管参数如下: 长 2.5 m, 截面直径为 12 mm, 电阻 120 。用发热管模拟电缆发热, 直埋发热管试验模型见图 1。

#### 1.3 建立计算模型

当发热管直埋于土壤中时, 发热管长度与直径相比近似于无穷大, 因此可以把发热管看作无限长线热源产生的温度场, 认为此时的发热管只有沿径向的传热, 所要计算的温度场就可以认为是二维场。同时, 发热管为金属导体, 导热率很高, 可以认为发热管表面为等温面。以单根发热管为例, 建立土壤直埋发热管的模拟热荷法计算温度场的模型见图 2。

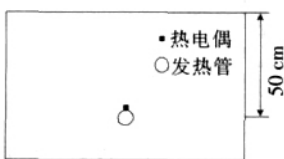


图 1 发热管试验模型示意图

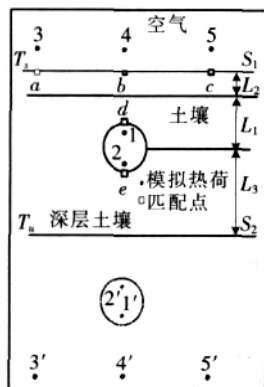


图 2 单根发热管模拟热荷法示意图

#### 1.4 边界条件的处理

以大地表面为分界线, 地上空气和地下土壤存

在温度差, 在地表以空气对流的形式传热。假定空气热容很大, 可以认为空气为等温。由此可以计算出地表的空气对流换热系数, 并通过式(1)计算大地和空气对流散热的热量。

$$Q_1 = \alpha \cdot T \tag{1}$$

现假设将地面抬高, 以等效深度的土壤传导换热代替对流换热。已知深度的土壤传导换热量可由式(2)计算。

$$Q_2 = \frac{\lambda}{L} \cdot T \tag{2}$$

使式(1)、(2)计算的散热量相等, 即  $Q_1=Q_2$ , 可得等效土壤厚度为

$$L = \frac{\lambda}{\alpha} \tag{3}$$

其中  $\alpha$  为对流换热系数;  $\lambda$  为土壤导热系数;  $L$  为土壤厚度。图 2 中  $L_1$  为实际电缆埋深,  $L_2$  为将对流换热系数转换后的等效土壤厚度。

在对流换热系数置换为相应的土壤后, 模型中出现以  $S_1$  为界面、上部为空气、下部为土壤的模型。为了便于计算, 须将空气域也转换为土壤, 构成无限大平面场。

$S_1$  为等温面, 且  $S_1$  上温度为空气温度  $T_0$ 。根据温度唯一性, 只要保持  $S_1$  上温度值不变, 就可以保证土壤内温度场计算的准确性。因此, 可以在空气域内设几个虚拟热源来代替空气对土壤的作用, 同时在  $S_1$  上设几个匹配点。要求空气域内虚拟热源和土壤内模拟热荷共同作用下,  $S_1$  上匹配点的温度相等, 且等于空气温度  $T_0$ 。这样, 图 2 中的空气域可用土壤代替。

由于深层土壤温度不随外部环境所改变, 即保持在一个恒定的温度。因此, 可设定发热管以下 2 m 处为等温边界, 即  $L_2=2\text{ m}$ ,  $S_2$  为等温边界, 且  $T_d$  为土壤深层温度。

这就形成了图 2 所示的以  $S_2$  为分界线的半无限大平面场。由于假设发热管为等温体, 此时的地下发热管稳态温度场与以大地为分界面、上部有带电圆柱体、具有单一介质的静电场完全相似。根据相似性原则, 将静电场计算中的模拟电荷法、镜像法的思想引入地下发热管稳态温度场计算中, 即可采用模拟热荷法、镜像法对地下发热管稳态温度场进行求解计算<sup>[12-14]</sup>。

为满足土壤深层边界  $S_2$  为等温线, 将镜像法引入地下发热管温度场计算。在  $S_2$  下方土壤中对称地分布镜像热荷, 且热荷值与  $S_2$  上方热荷值大小相等、符号相反。由于  $S_2$  为对称轴, 在对称热荷的作用下, 可以保证  $S_2$  为一条等温线。

#### 1.5 模拟热荷和匹配点布置

在电场计算中, 模拟电荷的种类、数目及电极表

面匹配点与电荷之间的匹配关系将直接影响到计算量的大小和计算结果的精确度。

在电场计算中, 根据计算对象的形状采用不同形式的模拟电荷源函数。对于发热管, 采用线热荷作为源函数<sup>[15-17]</sup>, 并且在电场计算中取模拟电荷和匹配点数目相等。所以, 如图2所示, 在发热管域内用2个模拟热荷代替导体发热对外部的影响; 在原空气域内以3个模拟热荷代替空气对土壤温度的影响。同时在发热管表面边界上取2个匹配点; 在空气与土壤边界取3个匹配点。

在图1所示模型中, 导体中的模拟热荷位于在距圆心  $r/4$  处。见图3, 热荷3、4、5等效空气作用, 热荷3和热荷5对称放置, 距  $S_1$  垂直距离  $y_1=0.1$  m, 水平距离  $x_1=0.2$  m, 热荷4距离  $S_1$  如图3取  $y_0=y_1$ , 在计算多根发热管时, 取小于  $y_1$  可以提高计算精度。

在计算多根发热管时, 热荷的个数可能要增加, 并且热荷布置方法也将会有所改变, 以满足计算精度的要求。如在计算3根发热管时采用每根管子布置4个热荷可能精度会高, 但同时要考虑计算的复杂性。同时, 与热荷相匹配的匹配点的布置方式也将影响计算, 笔者采用与热荷对应沿径向布置的方式。

1.6 约束方程

地下发热管温度场有3类约束方程: 第1类, 边界温度相等, 如发热管表面边界2个匹配点温度相等; 第2类, 已知匹配点温度, 如  $S_1$  上3个匹配点, 温度为空气温度  $T_s$ ; 第3类, 发热管内模拟热荷总热量与发热管的发热功率相等。

因此, 可得求解方程组

$$T_a=T_s; T_b=T_s; T_c=T_s; T_d=T_s; q_1+q_2=Q \quad (4)$$

式(4)中,  $Q$  为导体损耗,  $W$ ;  $q$  为模拟热荷热量,  $W$ ;  $T$  为匹配点温度,  $^{\circ}C$ 。

1.7 匹配点温度计算

土壤深层边界  $S_2$  为等温线, 于是图1中以  $S_2$  为  $x$  轴, 同时以  $T_u$  为基准温度, 区域内各点的过余温度为

$$=T-T_u \quad (5)$$

因此, 地下发热管温度场的基本导热控制方程为

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = 0 \quad (6)$$

边界条件为:  $\frac{\partial T}{\partial x} = 0, y=0$ , 即  $x$  轴上各点过余温度为0。设土壤中任意点  $P(x, y)$ , 该点距  $q$  为  $r_1$ , 距  $-q$  为  $r_2$ , 见图4。

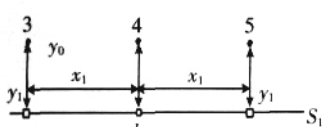


图3 空中域中热荷位置布置图

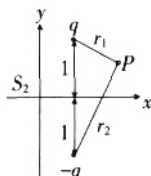


图4 温度计算示意图

$q$  单独作用时,  $P$  点的温度可以由圆管导热推导出。通过内径为  $r_0$ 、外径为  $r_1$  的圆管的导热量为

$$q = \frac{w_1 r_1}{2 \ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (7)$$

$P$  点的温度为

$$r_1 = w_1 \frac{q}{2} \ln \frac{r_1}{r_0} \quad (8)$$

同理可导出, 当  $-q$  单独作用时  $P$  点的温度为

$$r_2 = w_2 \frac{q}{2} \ln \frac{r_2}{r_0} \quad (9)$$

两者相加, 且  $w_1 + w_2 = 0$ ,  $P$  点的温度为

$$(x, y) = \frac{q}{2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (10)$$

由此可推导出图2中各匹配点的温度。各个匹配点温度为

$$T_i = \frac{q_i}{2} \ln \sqrt{\frac{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} \quad (i=1, 2; j=a, b, c, d) \quad (11)$$

1.8 高斯法

将传热学中的过余温度、热荷的热量  $q$  应用上述温度计算公式列方程整理可以得出温度系数  $a$ , 这样, 可列出方程

$$i = \sum_{j=1}^5 a_{ij} q_j \quad (i=a, b, \dots, e; j=1, 2, \dots, 5) \quad (12)$$

上式转换为矩阵形式为

$$\{i\} = [a] \{q\} \quad (13)$$

式中  $[a]$  为温度的系数矩阵,  $\{i\}$  为各匹配点过余温度,  $\{q\}$  为待求模拟热荷热量。

再加上约束方程中的  $q_1 + q_2 = Q$ , 写成矩阵形式, 构成关于  $q$  的线性方程组。由于 Matlab 在矩阵处理和图形处理上有着得天独厚的优势, 因而使用 Matlab 进行计算可以使工作大大简化, 计算精度更高。采用 Matlab 中的高斯消去法求解线性方程组, 解出热荷的热量, 进而求出场域各点温度, 高斯法求解方程可以满足精度要求。

2 结果验证

以土壤直埋3根一字排列发热管试验为例, 用模拟热荷法计算其稳态温度场, 试验模型见图5。试验参数为: 土壤的导热系数  $1.664 \text{ W/(mK)}$ , 对流系数  $12.5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ , 埋深  $0.5 \text{ m}$ ; 发热管的半径  $0.006 \text{ m}$ , 发热管的长度  $2.5 \text{ m}$ , 发热管的电阻  $120 \Omega$ ; 深层土壤温度  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 空气温度  $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 所加电压  $120 \text{ V}$ 。

模拟热荷法计算模型中, 每根发热管导体中布置4个热荷, 见图6。4个热荷将发热管均分为4部分, 放置在距离圆心  $2r/3$  处。等效空气作用的热荷

可以布置 5 个, 沿中间发热管上方放 1 个热荷, 然后以它为对称中心在其两边分别放置 2 个热荷, 位置可以适当调整, 从左到右依次为 1, ..., 5。计算后它们的热量分别为: - 16.283 6、- 12.968 4、- 15.644 4、- 12.968 4、- 16.283 6 cal/m。

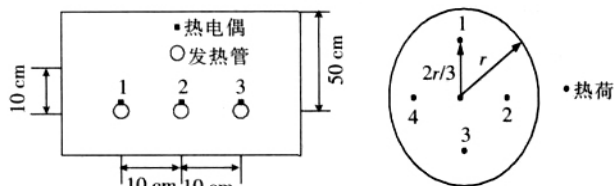


图 5 试验模型示意图

图 6 热荷分布示意图

经计算, 3 根发热管中的热荷的热量值见表 1。

表 1 热荷的热量

发热管	热荷 1/(cal·m <sup>-1</sup> )	热荷 2/(cal·m <sup>-1</sup> )	热荷 3/(cal·m <sup>-1</sup> )	热荷 4/(cal·m <sup>-1</sup> )
管 1	12.358 6	14.532 9	11.870 9	9.237 6
管 2	12.427 5	11.818 9	11.934 7	11.818 9
管 3	12.358 6	9.237 6	11.870 9	14.532 9

将以上各个热荷的热量带入式(11)可以计算领域中任一点的温度, 3 根裸管发热管的稳态温度场分布, 见图 7。

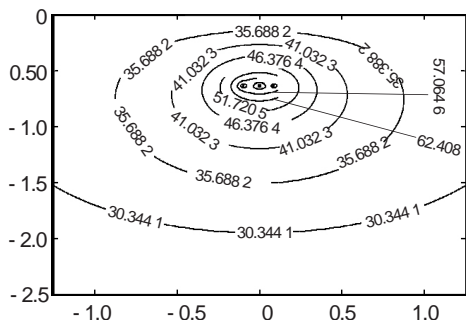


图 7 温度场图

在用模拟热荷计算时, 每根发热管中放置的热荷个数增加后, 计算结果的误差有所降低, 当布置过密时将造成误差变大, 同时热荷位置在计算过程的变动对误差也有一定影响。因此, 热荷布置要合理才能使计算满足所需精度的要求。将模拟热荷法计算的发热管温度与 Ansys 仿真结果及试验结果进行对比, 见表 2。

表 2 模拟热荷法与 Ansys 结果及试验结果对比

计算方法	管 1 温度/	管 2 温度/	管 3 温度/
Ansys 仿真结果 T <sub>1</sub>	73.358 0	76.478 0	73.358 0
试验结果 T <sub>2</sub>	73.000 0	76.000 0	72.000 0
模拟热荷法结果 T	72.549 7	75.654 0	72.549 7
T-T <sub>1</sub>	0.808 3	0.824 0	0.808 3
T-T <sub>2</sub>	-0.450 3	-0.346 0	

模拟热荷计算值与实测值及 Ansys 仿真结果差值不大, 误差在 1 以内, 能够满足实际研究及工程

设计的需要。同时, 用模拟热荷法计算所需时间远远少于采用有限元 Ansys 仿真计算需要的时间, 在满足精度要求的基础上大大减少了计算所需时间, 有利于工程实际的需要。

### 3 结语

笔者借鉴电场计算中的模拟电荷法, 提出了新的用于地下管道稳态温度场计算的方法- 模拟热荷法, 并通过进行发热管试验验证了其有效性。下一步将研究多层介质情况下温度场计算, 从而可以将其应用于实际电缆的多层结构温度场计算。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 傅晨钊, 汲胜昌, 王世山, 等. 基于有限元法的电缆变压器绕组的暂态热路模型研究 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(2): 77-82.
- [3] 李伟力, 赵志海, 候云鹏. 大型同步发电机定子同相槽和异相槽的温度场计算[J]. 电工技术学报, 2002, 17(3): 1-6.
- [4] NEHER J H, MCGRATH M H. The Calculation of the Temperature Rise and Load Capability of Cable Systems[C]// AIEE Summer General Meeting, Canada, Montreal, 1957: 752-772.
- [5] 程树康, 李伟力, 候云鹏. 基于耦合边界条件的发电机定子非线性温度场计算[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 1-6
- [6] 李志刚, 耿英三, 王建华. 基于流场-温度场耦合计算的新型空芯电抗器设计与分析 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(6): 59-63.
- [7] IEC 60287 -3. Calculation of the Current Rating-Part 3: Sections on Operating Conditions[S]. 1999.
- [8] MAXWELL J C. A Treatise in Electricity and Magnetism[M]. London: Oxford Press, 1892.
- [9] 河野照哉, 宅间董. 电磁场数值算法 [M]. 尹克宁, 译. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [10] 盛剑甍. 工程电磁场数值分析 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [11] 唐兴伦. ANSYS 工程应用教程(热与电磁学篇)[M]. 北京: 中国铁道出版, 2003.
- [12] 徐建源, 汪 枫, 何荣涛, 等. 110 kV 三相共箱式 GIS 内隔离开关部位电场及击穿特性的分析和研究 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(9): 31-35.
- [13] 孙才华, 宗 伟, 李世琼, 等. 一种较精确的分裂导线场强计算方法[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 92-96.
- [14] 杨 帆, 何 为, 杨 浩, 等. 高压磁质绝缘子电场逆问题的研究及其应用[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 36-40.
- [15] 张洪济. 热传导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [16] CARSLAW H S, JAEGER J C. Conduction of Heat in Solids [M]. Clarendon Oxford Press, Oxford, 1986.
- [17] SCHNEIDER P J. Conduction Heat Transfer [M]. Addison-wesley Publishing Company, 1955.