

新型电缆周围土壤热参数球形测量传感器

随着城市电网的发展, 电力电缆使用量剧增, 而电缆的工作状态受到其工作温度的影响, 与电缆周围土壤热参数息息相关, 因此有必要研制一种能够测量电缆周围土壤热参数的传感器以保证电缆的安全稳定运行。同时设计一种利用电感电容振荡(LC振荡)感应加热、PT100热电阻测温的空心球形传感器, 相较于传统热探针能更好地考虑探头自热容和探头与土壤之间接触热阻的影响, 最终通过Matlab非线性最小二乘拟合得出所测量土壤的热参数。

何维晟¹ 陈西平² 刘 斌² 孙振权² 杨陈波¹/1. 西安交通大学电气学院
2. 陕西省地方电力集团公司

0 引言

电力电缆在城市电网中大量使用, 保证电缆的安全和高效运行具有十分重要的意义。作为传热介质, 土壤的热参数对电缆状态具有重要影响。然而, 土壤的热参数由土壤的成分、含水量等因素决定, 易受环境影响而在较大范围内发生变化。因此, 测量电缆周围土壤热参数能经济、合理地选择电缆参数和敷设路径, 并对电缆热状态进行实时准确的评估。

目前, 现场常用热探针法测量表层土壤的热参数, 其利用非稳态导热理论, 对无限大均匀介质中线热源作用时的温度随时间变化进行测定, 求得介质的热阻系数。探针法测量方法简单, 测量时间短, 准确度高^[1]。但传统的热探针法在测量时往往是基于探针为等温面的假定, 并且忽略探针自身热容以及探针与土壤之间的接触热阻, 且不能深埋连续工作。为更准确地测量土壤热参数, 研究者提出了一些提高测量准确度的方法, 如利用蒙特卡洛法测量, 但是仍没

有考虑接触热阻的影响。文献[2]提出的测量方法通过建立接触热阻的导热微分方程进一步提高测量准确度, 但是其本质仍然是线热源模型。本文设计一种球形探头的热传感器, 从本质上改变其传热模型, 并考虑以上影响因素, 可以更为准确、方便地测量地下电缆周围土壤的热参数。

1 基本原理

设计一种利用LC电路产生振荡电磁波进行感应加热的空心球形热探头。这种球形热探头由于与土壤接触面积大, 可以充分地考虑其与土壤之间的接触热阻, 其数学模型能够考虑到探头自身的热容以及接触热阻的影响, 使测量结果更为准确、可靠。利用LC振荡电路对探头进行感应加热, 使球形探头自身作为发热体, 发热较为均匀, 可以视作等温面, 相较于利用电热丝加热的传统探针, 进一步提高了所设计传感器的准确度。

1.1 热路模型^[3]

半径为 x_0 的球形探头, 放置在热扩散率为 $a(\text{m}^2/\text{s})$ 、热导率为 $\lambda(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ 的土壤中, 土壤和探头简化后的等效热路模型如图1所示。

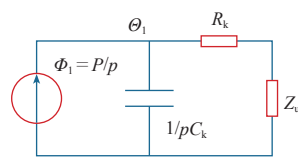


图1 探头与土壤等效热路模型

图1中, P 为加热功率; p 为拉式算子; Θ_1 为球壳温度; Φ_1 为热通量; C_k 为探



何维晟/硕士研究生

关键词/Keywords

土壤热参数 ·
球形探头 ·
LC振荡加热 ·
PT100测温 ·
非线性拟合 ·

头自热容； R_k 为探头与土壤的接触热阻； Z_u 为土壤等效热阻抗，表达式为

$$Z_u = \frac{(R_0 + R_k)\sqrt{a/x_0^2} + R_k A}{A^3 C_k R_k + A^2 \sqrt{a/x_0^2} (R_0 + R_k) C_k + A + \sqrt{a/x_0^2}} \quad (1)$$

式中， $A = \sqrt{P}$ ； R_0 为土壤热阻； a 为土壤的热扩散率。若省略式中 $A^3 C_k R_k$ ，只会对测量开始阶段产生一定影响，这些影响可通过在数据处理时的筛选来避免。因此，省去该项后得到简化后 Z_u 的表达式，通过简化的表达式可求得温度响应时域，即

$$\theta/P = K_1 f(\alpha_1^2 t) + K_2 f(\alpha_2^2 t) \quad (2)$$

式中， $f(\alpha^2 t) = 1 - \exp(\alpha^2 t) \operatorname{erfc}(\sqrt{\alpha^2 t})$ ； α_1 、 α_2 为式(1)中去掉省略项后表达式的极点，分别可表示为

$$\alpha_1 = \frac{1 - \alpha \sqrt{1 - 4C_k(R_0 + R_k)/x_0^2}}{2C_k(R_0 + R_k)} \cdot \sqrt{\frac{x_0^2}{a}} \quad (3)$$

$$\alpha_2 = 1/[\alpha_1 C_k(R_0 + R_k)] \quad (4)$$

$$K_1 = \frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \left[\frac{1}{\alpha_1 C_k} - \frac{R_k}{C_k(R_0 + R_k)} \cdot \sqrt{\frac{x_0^2}{a}} \right] \quad (5)$$

$$K_2 = R_0 + R_k - K_1 \quad (6)$$

将球形探头埋入地下并经过加热电路加热，通过测温电路测得球形探头球壳表面的温度响应数据，运用非线性最小二乘法拟合数据可以求得 α_1 、 α_2 、 K_1 和 K_2 的值，然后代入式(3)~式(6)可以反推出土壤的热阻 R_0 、热阻率 ρ 、热扩散率 a 和接触热阻 R_k 。

1.2 感应加热

将线圈放置在金属导体附近，如图2所示，线圈中流过的交变电流 I_1 激发交变磁场 H_1 ，在该磁场中导体内会产生感应电流 I_2 ，即涡流，涡流产生热能，使导体温度升高，起到感应加热的作用。

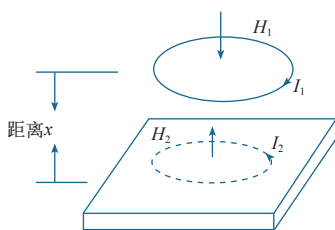


图2 涡流作用原理

2 传感器设计

2.1 球壳

所设计的球形探头采用铜锌合金作为球壳材料，既具有较高热导率又具有一定机械强度，既可以视球壳为等温面又能使球壳在使用过程中不易变形，便于长期埋地工作。球壳直径选择为10 cm，壁厚为1 mm。

2.2 加热电路

采用LC振荡回路产生的电磁振荡波对球壳进行感应加热，加热电路如图3所示。通过5个10 μF电容并联成电容组，通过漆包线绕制5个4.4 μH线圈并联成电感组，将电感组均匀置于球壳内部。电路中Mosfet1与Mosfet2互补通断，分别控制电容组充电过程以及电容组与电感组之间振荡放电过程。Mosfet由555芯片产生控制信号，然后通过mic4421/4422完成驱动。采用蓄电池作为充电电源，能够提供足够能量且适用于现场测量。

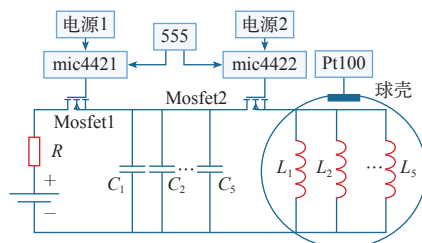


图3 加热电路示意图

2.3 测温电路^[4]

测温电路采用Pt100热电阻及其调理放大电路来实现。将Pt100贴附在球形探头的内表面以测量探头表面的温度响应数据。Pt100铂电阻阻值与温度的关系为

$$R_t = R_0(1 + AT) \quad (7)$$

式中， R_0 为100 Ω； R_t 为铂电阻在 t ℃时的阻值； A 为常数， $A = 3.908 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

温度信号的调理放大采用双恒流源差分放大电路来实现，如图4所示。

通过PSpice电路仿真得到恒流源电流为1.86 mA，放大倍数为100，即温度每升高1℃，输出电压增

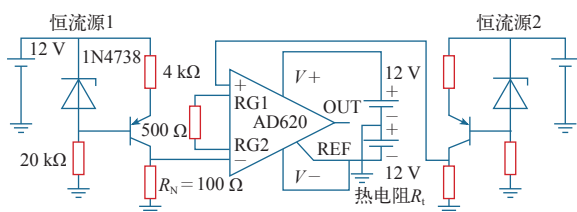


图4 测温电路

加0.07 V, 对实际电路进行测试, 恒流源1平均电流为1.86 mA, 恒流源2平均电流为1.88 mA, 平均放大倍数为100.7, 与仿真结果吻合度较高, 且符合测量的要求。

3 传感器制作及测试

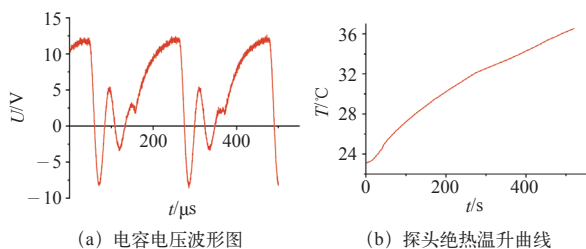
球形探头和试验平台如图5所示。测得电容电压波形如图6a所示, 振荡周期约为46 μs, 振荡频率为21.7 kHz, 与理论计算的23.99 kHz吻合, 最高电压为电源电压为12 V, 加热电路整体工作良好。



(a) 球形探头内部结构

(b) 试验测试平台

图5 球壳内部结构和试验测试平台



(a) 电容电压波形图

(b) 探头绝热温升曲线

图6 电容波形与温升曲线

在绝热环境下测量球形探头内表面的温度响应数据如图6b所示。在8 min之内, 探头表面温度升高14 °C, 由于空气比热容远小于铜, 因此近似认为

$$Q = Pt = C_{\text{shell}} \Delta T_{\text{shell}} \quad (8)$$

求得球形探头的加热功率 $P=9.73$ W, 在文献[3]推荐的功率范围5~20 W之内, 因此能满足土壤热

参数的测量要求。

空心球形探头自身热容 C_k 可以通过测量探头在空气中的温度响应求得, 探头表面产生的热量通过空气扩散, 由于球形探头与空气之间的接触热阻可以忽略, 探头表面的温度表达式为

$$\theta = PR_{\text{convection}}(1 - e^{-t/\tau_k}) \quad (9)$$

式中, τ_k 为时间常数, $\tau_k = C_k R_{\text{convection}}$; $R_{\text{convection}}$ 为对流传热热阻。

4 数据处理

通过Matlab对温度响应数据进行非线性最小二乘法拟合, 拟合的目标函数如式(2)所示。由于基函数含有未知量, 难以直接拟合, 需要将非线性函数线性化^[5]。使用高斯-牛顿迭代法, 通过泰勒级数展开式近似代替非线性模型, 该方法中需要给出迭代初值 α_{10} 和 α_{20} , 初值直接影响收敛速度, 然而初值往往需要根据经验或者通过线性化模型计算选取。现场测量时, 可以根据该地往年测量数据选取迭代初值, 有助于高效地得到测量结果。将式(2)在 α_{10} 和 α_{20} 处做泰勒展开, 得到

$$\theta/P = K_1 f(\alpha_{10}^2 t) + K_1 \Delta \alpha_1 [\partial f(\alpha_1^2 t) / \partial \alpha_1]_{\alpha_1 = \alpha_{10}} + K_2 f(\alpha_{20}^2 t) + K_2 \Delta \alpha_2 [\partial f(\alpha_2^2 t) / \partial \alpha_2]_{\alpha_2 = \alpha_{20}} \quad (10)$$

其中

$$\partial f(\alpha^2 t) / \partial \alpha = \frac{2}{\alpha} \exp(\alpha^2 t) \sqrt{\alpha^2 t} \operatorname{ierfc} \sqrt{\alpha^2 t} \quad (11)$$

由于 $K_1 \gg K_2$ 且 $\alpha_{22} \gg \alpha_{12}$, 因此式(10)的最后一项相比其他几项来说可以忽略不计, 省略掉该项并化简表达式后, 拟合的目标函数为

$$\theta = K_1 f_1(t) + K_2 f_2(t) + K_3 f_3(t) \quad (12)$$

其中, 各项基函数的表达式为

$$f_1(t) = 1 - \exp(\alpha_{10}^2 t) \operatorname{erfc} \sqrt{\alpha_{10}^2 t}$$

$$f_2(t) = 1 - \exp(\alpha_{20}^2 t) \operatorname{erfc} \sqrt{\alpha_{20}^2 t}$$

$$f_3(t) = 2 \exp(\alpha_{10}^2 t) \sqrt{\alpha_{10}^2 t} \operatorname{ierfc} \sqrt{\alpha_{10}^2 t}$$

用最小二乘法求得 K_1 、 K_2 、 $K_3 = \Delta \alpha_1 / \alpha_{10}$, 使得

$$\sum_{i=1}^n \left[\frac{\theta_i}{P} - K_1 f_1(t) - K_2 f_2(t) - K_3 f_3(t) \right]^2 = \min \quad (13)$$

式中, n 为温度响应数据的样本数量。

为了验证所设计的球形探头的有效性, 对两

处土壤进行现场测量。经过测量得到温度响应的数据点，但参与拟合的数据点应去掉时间较小部分，即约为150 s之前的数据。经过上述程序对表中温度响应数据进行拟合，温度响应数据和拟合曲线如图7所示，两处的拟合参数值如表1所示。

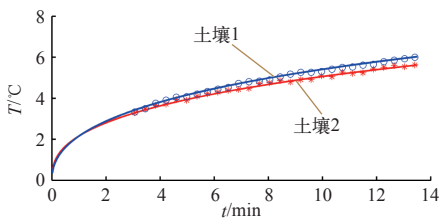


图7 温度响应数据及拟合曲线

表1 土壤1和土壤2测量温度相应拟合参数值

	K_1	K_2	K_3	α_{10}	α_{20}
土壤1	1.93	0.018	-0.12	0.014	0.326
土壤2	1.87	0.055	-0.08	0.012	0.391

将式（3）～式（6）反推，得到土壤热参数的表达式分别为

$$R_0 = \frac{K_1 + \alpha_1^2 C_k (K_1 + K_2) K_2}{1 + \alpha_1^2 C_k (K_1 + K_2)} \tag{14}$$

$$\rho = \frac{1}{\lambda} = 4\pi x_0 \frac{K_1 + \alpha_1^2 C_k (K_1 + K_2) K_2}{1 + \alpha_1^2 C_k (K_1 + K_2)} \tag{15}$$

$$a = \frac{\alpha_1^2 x_0^2}{\left[1 + \alpha_1^2 C_k (K_1 + K_2)\right]^2} \tag{16}$$

$$R_k = \frac{K_2 + \alpha_1^2 C_k (K_1 + K_2) K_1}{1 + \alpha_1^2 C_k (K_1 + K_2)} \tag{17}$$

将表1中的值代入式（14）～式（17），便可以求得被测土壤在该时段的热阻、热阻率和热扩散率的值，如表2所示。

表2 土壤1和土壤2热参数测量结果

	$R_0/(K/W)$	$\rho/(K \cdot m/W)$	$a/(mm^2/s)$
土壤1	1.85	1.161	0.47
土壤2	1.828	1.149	0.34

将所设计的感应加热空心球形传感器的测量结果与传统热探针法以及稳态同心圆柱法所测得的结果进行比较，不同方法的热阻率测量结果对比如表3所示。

由表3可以看出，相较于传统探针法，所设计的利用LC振荡感应加热的空心球形传感器对于土壤

表3 热阻率测量结果对比

		标准热	文献[2]	本文感应加热	同心
		探针法	方法	球传感器	圆柱法
土壤1	数值/ (K·m/W)	1.112	1.161 2	1.161 1	1.151
	相对误差 (%)	-3.389	0.886	0.878	—
土壤2	数值/ (K·m/W)	1.104	1.152	1.149	1.136
	相对误差 (%)	-2.817	1.408	1.144	—

注：相对误差指测量值与同心圆柱法相对误差。

热阻率的测量准确度有显著提高，对于改进的热探针方法的测量结果也有所提高。

5 结束语

研制了一种空心球形土壤热参数测量传感器，通过建立数学模型和采用感应加热方法，可以提高对土壤热参数测量的准确性。试验结果表明，所研制的传感器，采用LC振荡感应加热，球壳发热功率可达9.73 W，通过Pt100热电阻测量温度，经过对温度响应数据进行非线性最小二乘拟合，可以求得所测土壤的热阻率、热扩散率及探头与土壤之间的接触热阻。经过对比测量结果，所研制的传感器具有较好的准确度，且测量快速、方便。

参考文献

[1] 孟凡凤, 李香龙, 吴晓辉, 等. 利用探针法测定土壤的导热系数 [J]. 绝缘材料, 2006, 39 (6) : 65-66.

[2] 程文龙, 马然, 刘娜, 等. 考虑热探针接触热阻的热物性测量方法研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2010, 40 (7) : 734-738.

[3] Milun S, Kilic T, Bego O. Measurement of soil thermal properties by spherical probe [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 54 (3) : 1219-1226.

[4] 徐英, 王超, 姜印平. 热电阻测温电路设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2000 (4) : 20-22.

[5] 刘志平, 石林英. 最小二乘法原理及其MATLAB实现 [J]. 中国西部科技, 2008, 17 (7) : 33-34.

(收稿日期: 2015-09-09) EA