

# 土壤温度特性试验及其对圆环型直流接地极发热影响分析

袁涛<sup>1</sup>, 骆玲<sup>1</sup>, 杨庆<sup>1</sup>, 司马文霞<sup>1</sup>, 王建东<sup>2</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044;  
2. 三亚供电局生产技术部, 海南省 三亚市 572000)

## Analysis on the Temperature Characteristic of Soil and Its Influence on the Cirque Grounding Electrode Heating

YUAN Tao<sup>1</sup>, LUO Ling<sup>1</sup>, YANG Qing<sup>1</sup>, SIMA Wenxia<sup>1</sup>, WANG Jiandong<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment and System Safety and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 2. Sanya Electric power Bureau, Sanya 572000, Hainan Province, China)

**ABSTRACT:** In order to have a comprehensive analysis of the grounding electrode heating process and optimize the electrode design, this paper selects two different textures of soil to have a temperature simulation experiment. The temperature characteristic of soil water content, soil thermal parameters and soil resistivity obtained from the experiment results. According to the soil temperature characteristic, the finite element method and the electric-thermal dynamical coupling model were integrated to simulate the temperature rise of the cirque grounding electrode in the monopole ground return mode in a long duration, and then compare with the calculation method without considering the effect of soil temperature rise. The results of experiment and simulation indicate that: soil parameters will vary with the temperature rise, lead to grounding electrode have further heating, and the worse temperature rise can result in abnormal operating of the grounding electrode. Therefore, combine soil temperature characteristic with the grounding electrode design can ensure more safety operation of the grounding system.

**KEY WORDS:** soil thermal parameters; temperature characteristic; electric-thermal coupling; cirque grounding electrode; grounding electrode temperature rise

**摘要:** 为了更全面的分析直流输电接地极的发热过程, 优化接地极设计, 针对 2 种不同质地的土壤样品进行了温升模拟

试验研究, 建立了土壤含水量、热参数以及土壤电阻率的温度特性。同时, 结合试验结果, 采用有限元方法, 建立了电热动态耦合模型, 仿真分析了单圆环、双圆环型接地极在直流输电系统长时间单极运行时的温升情况, 与传统模型中未考虑土壤温升效应的仿真结果进行了对比。试验及仿真结果表明: 土壤参数会随温度而变化, 从而进一步影响接地极的发热升温, 而温升过高可能导致接地极不能正常工作。因此, 结合土壤温度特性对接地极进行设计, 能更大程度的保证接地系统的安全运行。

**关键词:** 土壤热参数; 温度特性; 电热耦合; 圆环型接地极; 接地极温升

## 0 引言

随着特高压直流输电工程的快速发展, 直流系统受端接地极极址选择日益困难, 多个直流系统共用接地极的情况日趋普遍<sup>[1-3]</sup>, 从而导致接地极所流过的入地电流也不断增大。当直流输电系统处于单极大地回线运行状态时, 工作电流持续经由接地极向周围土壤散流, 电阻热效应会使土壤在溢散电流的作用下发热升温。同时若接地极在温度过高的环境中工作, 其出现烧毁的概率将大大增加。因此研究土壤的温度特性, 分析接地极的温升过程, 合理的进行接地极设计是确保接地极系统安全运行的基础。

国内外诸多学者针对土壤的热特性及土壤电阻率进行了大量的研究, 如土壤质地对土壤热特性的影响<sup>[4]</sup>, 土壤热参数的计算方法与测定方法<sup>[5-6]</sup>以及一定温度范围内土壤电阻率随温度的变化情

**基金项目:** 国家创新研究群体基金(51021005); 国家重点基础研究发展计划(973 项目)(2009CB724504); 国家自然科学基金(51107153)。

Project supported by the Funds for Innovative Research Groups of China (51021005); The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724504); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51107153).

况<sup>[7-8]</sup>等。通过分析已有文献中有关土壤电阻率的试验结果,发现在 0℃ 以上时,随着温度的逐渐升高,土壤电阻率趋于下降,但并未就 45℃ 以上温度对土壤电阻率的影响进行研究。而目前针对接地极的发热分布<sup>[9-11]</sup>和其它接地特性<sup>[12-15]</sup>(地表电位、散流分布)的计算,仍采用恒定的土壤热参数及土壤电阻率,忽略了土壤温度上升后与土壤参数的相互影响。因此,为了使接地极温升计算方法更加完善,接地极最大温升的控制更加准确、可靠,需将土壤各参数的温度特性均引入到接地极温升计算中。

由于更高的温度可能导致土壤中水分蒸发而影响土壤电阻率以及与含水量相关的土壤热参数,从而影响接地极升温过程。因此,为了更全面的分析直流输电接地极的发热,本文将通过试验进一步分析更大温度范围内土壤各参数的温度特性,并结合这一特性对圆环型接地极发热过程进行分析。

1 土壤温度特性试验

1.1 土壤样品的选取及处理

随着电网的发展趋势,高压直流输电系统的受端将分布在我国的东部、南部以及东南地区,由中国土壤分布图<sup>[16]</sup>可知,覆盖以上地区的土壤类型大部分为黄壤、赤红壤、红壤。本文选取赤红壤与红壤两种土壤为样品进行试验。

根据《土的工程分类标准》<sup>[17]</sup>判断出本文试验所采用的土壤样品质地分别为壤土(赤红壤)和粘土(红壤)。取适量的土壤样品放入 105℃ 的恒温箱中风干 6~8h,待土壤完全干燥后,称取干燥土壤的质量。再按照式(1)计算预控制的土壤初始含水量所需的水分。最后将水分注入干燥的土壤中混合静置,直至颜色均匀,通过土壤自身的毛细作用使水分在土壤中分布更加均衡。

$$\theta_m = m_w / m_s \tag{1}$$

式中:  $\theta_m$  为含水量;  $m_w$  为水的质量;  $m_s$  为干燥土壤的质量。

1.2 试验方案

将土壤样品均匀盛放在设置有刻度试验容器中。将每组试验设立多个相同的试验样品以避免试验过程中各种因素所带来的误差。由于试验过程中需考虑土壤含水量变化的影响,因此在土壤升温过程中未将容器封闭(如图 1),便于土壤溶液中的水分随温度的变化自然蒸发。

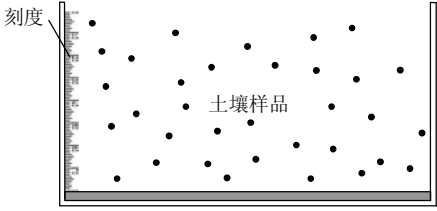


图 1 试验样品

Fig. 1 Experimental sample

采用恒温箱给土壤样品加温,并从温度 20℃ 开始升温,以 6℃ 为间隔对样品进行土壤重量(精度为 0.01 g 的天平)与土壤电阻率的测量(采用伏安法<sup>[7,18]</sup>,其测量电路如图 2 所示,用精度为 0.01 μA 的电流表测量回路中的电流),并采用绝热性能良好的石棉作为保温材料,以减小土样在高温下测量时,因散热过快导致温度降低而引起的测量误差。试验电压采用 15 V 的直流电源,而各电极均采用厚度为 0.002 m 铜板,其中测量电极的尺寸为 0.07 m × 0.07 m,公共电极 0.13 m × 0.13 m,辅助电极 0.01 cm × 0.07 cm。外加电源后,通过回路中的电流和电压值,结合欧姆定律可得到所测土壤样品的电阻率如式(2):

$$\rho = US / IL \tag{2}$$

式中:  $U$  为电压表的读数, V;  $I$  为电流表的读数, A;  $S$  为测量电极的面积, m<sup>2</sup>;  $L$  为测量电极与公共电极之间的距离, m。

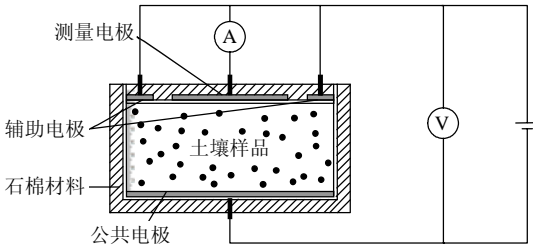


图 2 测量电路

Fig. 2 Measurement circuit

1.3 试验结果及分析

1.3.1 样品土壤温升试验结果

表 1 中给出了赤红壤,红壤在 20~92℃ 范围内温度逐渐上升时土壤含水量及土壤电阻率的变化情况。其中,  $\theta_m$  为含水量;  $\rho$  为试验土壤样品的电阻率。由于土壤容重  $\rho_b$  也是影响土壤电阻率的一个重要因素,因此,表 1 中也给出了土壤的试验容重。

从表 1 可以看出,随温度的逐渐升高,土壤电阻率变化的总趋势为:初始温度为 20℃ 时,土壤

电阻率随温度的升高先呈现略微减小的趋势, 到达 40 ℃ 后土壤电阻率随温度的升高急剧增大。而土壤含水量则是一直处于下降趋势。

表 1 含水量以及土壤电阻率随温升的变化

温度 $T/^\circ\text{C}$	土壤亚类(试验容重 $\rho_b$ )			
	赤红壤(0.882 g/cm <sup>3</sup> )		红壤(1.334 g/cm <sup>3</sup> )	
	$\theta_m/\%$	$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	$\theta_m/\%$	$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$
20	29.56	120	25.57	71
26	29.42	118	25.45	65
32	29.05	116	25.20	62
38	28.46	111	24.16	61
44	27.47	128	23.04	79
50	25.31	159	19.22	180
56	21.22	540	13.92	689
62	16.53	2 528	9.70	2 814
68	11.85	18 733	6.98	5 598
74	6.94	127 270	5.40	9 567
80	3.71	737 654	3.80	32 548
86	1.12	2 953 300	1.54	129 354
92	0.18	—	0.39	412 598

根据表 1 中的土壤电阻率随温升的变化趋势, 结合土壤电导理论<sup>[19]</sup>可将土壤电阻率的变化分为 2 个阶段:

1) 平稳阶段。在温度上升初期, 温升既增加了土壤溶液中电解质的溶解度与电离度, 又促进了土壤中水分的蒸发, 而前者促使土壤电阻率降低, 后者使土壤电阻率增大。在该阶段, 由于土壤温度不太高其含水量只稍有下降, 温度上升对土壤溶液中电解质的作用略大于水分减少给土壤电阻率带来的影响, 因此  $\rho$  也呈现略微下降趋势, 但相比  $\rho$  在整个试验过程中的变化量而言, 可认为温度上升初期  $\rho$  处于平稳阶段。

2) 急剧增长阶段。随着温度的持续升高, 土壤中水分蒸发量逐渐增大, 使土壤导电通道中电解溶液的含量大大降低, 降低了土壤溶液中离子的迁移, 使由离子运动呈现的离子电导逐渐消失, 只剩下由土壤颗粒吸附电荷所构成的胶体电导作用。对比温升对土壤溶液中电解质溶解度与电离度的作用而言, 后者已经微不足道。所以, 该阶段土壤电阻率急剧增大。

1.3.2 土壤含水量与温度的关系

土壤样品在温升过程中含水量的变化如图 3 所示。通过对含水量变化趋势的观察, 将整个试验温

度区间划分为 2 部分, 分别进行含水量变化的数据拟合即采用分段拟合可得到更好的拟合公式, 拟合结果显示图 3 中 2 种土样含水量变化的拟合函数其相关系数平方  $R^2$  值都高于 0.99, 为后期的仿真计算提供了良好的基础。

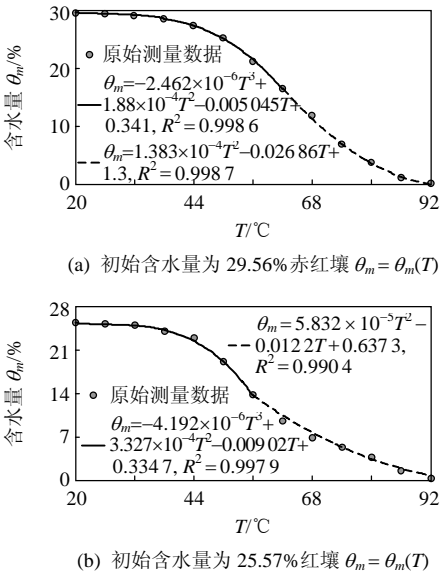


图 3 土壤含水量随温度的变化

Fig. 3 Water content changes with the temperature rise

1.3.3 土壤热参数与温度的关系

土壤的热导率( $k$ )、容积热容量( $C_v$ )以及热扩散率( $\alpha$ )是土壤反应土壤热特性的 3 个重要参数, 三者之间存在的函数关系<sup>[15]</sup>可表示为

$$k = C_v \alpha \tag{3}$$

在一定容积的土壤中, 土壤空气质量很小, 可忽略不计, 所以土壤的容积热容表示为

$$C_v = \rho_b (c_s + c_w \theta_m) \tag{4}$$

式中:  $\rho_b$  为土壤的试验容重;  $c_s$  为土壤中固相的比热容;  $c_w$  为土壤中液相的比热容。同时, 矿物质的比热容一般为 0.85 J/(g·℃), 水的比热容 4.2 J/(g·℃), 土壤的试验容重一定, 因此土壤的容积热容量如下:

$$C_v = 0.85 \rho_b + 4.2 \rho_b \theta_m \tag{5}$$

从式(5)可以发现, 土壤热容量是随土壤含水量的变化而变化。如将前文中含水量与温度的关系式引入式(5), 将其式转化为容积热容量与温度之间的关系, 可得结果如下:

$$\left. \begin{aligned} C_v &= C_v(\theta_m) \\ \theta_m &= \theta_m(T) \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_v(\theta_m(T)) \Rightarrow C_v(T) \tag{6}$$

依据式(6)进行计算, 可绘出 2 种土壤样品容积热容量随温度的变化曲线如图 4 所示。

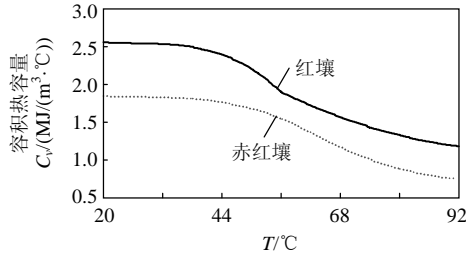
图 4 土样容积热容量随温度的变化  $C_v = C_v(T)$ 

Fig. 4 Volume heat capacity changes with the temperature rise

根据 Campbell 提出的土壤电导率公式<sup>[5](7)</sup>—(13)可知, 土壤电导率与容积含水量、土壤容重以及土壤黏粒的含量有关。

$$k = A_1 + B_1\theta_v - (A_1 - D_1)\exp[-(C_1\theta_v)^{E_1}] \quad (7)$$

其中,

$$A_1 = 0.65 - 0.78\rho_b + 0.60\rho_b^2 \quad (8)$$

$$B_1 = 1.06\rho_b \quad (9)$$

$$C_1 = 1 + 2.6/m_c^{0.5} \quad (10)$$

$$D_1 = 0.03 + 0.1P_b^2 \quad (11)$$

$$E_1 = 4 \quad (12)$$

$$\theta_v = \theta_m \rho_b / \rho_w \quad (13)$$

式中:  $\theta_v$  为土壤容积含水量;  $\rho_w$  为水的密度, 通常取  $1\text{ g/cm}^3$ ;  $m_c$  为土壤黏粒的含量, 可根据土壤的质地和分类查阅相关标准<sup>[17]</sup>得出。依据式(7)—(13)可发现, 在温升过程中只有  $\theta_v$  是随温升而变化的量, 其余参数均恒定。由于  $\theta_v$  的值决定于  $\theta_m$ , 因此, 与土壤热容量相似, 同样可以得到土壤热导率与温度关系  $k(T)$ , 如式(14), 其相应的变化曲线如图 5 所示。

$$\left. \begin{aligned} k &= k(\theta_v) \\ \theta_v &= \theta_v(\theta_m) \\ \theta_m &= \theta_m(T) \end{aligned} \right\} \Rightarrow k(\theta_m(T)) \Rightarrow k(T) \quad (14)$$

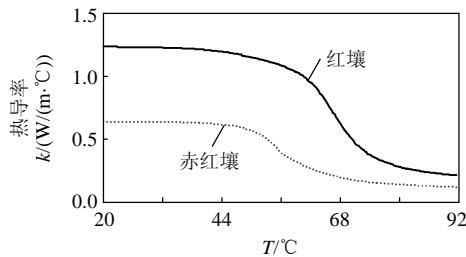
图 5 土样热导率随温度的变化  $k = k(T)$ 

Fig. 5 Thermal conductivity changes with the temperature rise

### 1.3.4 土壤电阻率与温度的关系

温升导致了土壤含水量的变化, 而温升与含水量变化共同影响了土壤电阻率的大小。因此, 通过式(15)简单推导可得到土壤电阻率与温度的直接关系, 建立土壤电阻率的温度特性。

$$\left. \begin{aligned} \theta_m &= \theta_m(T) \\ \rho &= \rho(T, \theta_m) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \rho = \rho(T, \theta_m(T)) \Rightarrow \rho = \rho(T) \quad (15)$$

根据前文的分析, 土壤电阻率在温升中的变化可分为平稳和急剧增长 2 个阶段, 将第 1 阶段的  $\rho$  值视为恒定, 第 2 阶段的  $\rho$  值进行拟合, 得式(16):

$$\left\{ \begin{aligned} \rho &= \text{恒定值}, & \text{第 1 阶段} \\ \rho &= a \exp(bT), & \text{第 2 阶段} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

分别作出 2 种土壤样品的温度特性如图 6 所示, 图中以半对数坐标的形式突出了土壤电阻率数量级上的差异, 同时, 也证明了土壤电阻率在第 2 阶段的的增长趋势能很好的满足指数关系, 并且其相关系数平方  $R^2 > 0.99$ , 可认为在土壤电阻率的急剧增长阶段其增长趋势符合指数规律。

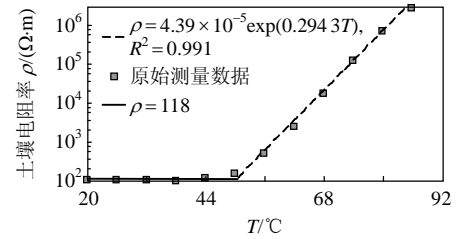
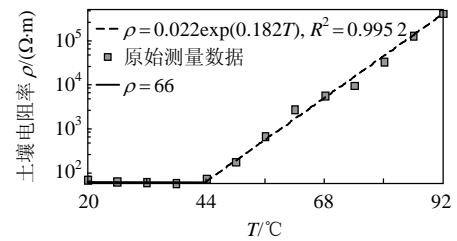
(a) 初始含水量为 29.56% 赤红壤  $\rho = \rho(T)$ (b) 初始含水量为 25.57% 红壤  $\rho = \rho(T)$ 

图 6 土壤电阻率随温度的变化

Fig. 6 Soil resistivity changes with the temperature rise

## 2 接地极温升计算控制方程

### 2.1 电流场

大地可以认为是一个半无限的, 各向同性的均匀介质或者分层介质, 而接地极仅仅占据相对较小的空间, 因此可用电流场原理分析接地极相关特性。设接地极及土壤中任何一点  $P(x, y, z)$  的电位  $\varphi$  满足拉普拉斯方程:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

(17)

该场域中电位梯度  $\nabla \varphi$ 、电流密度  $\boldsymbol{J}$  和电场强度  $\boldsymbol{E}$  满足以下 3 式:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J} = 0$$

(18)

$$\boldsymbol{E} = -\nabla \varphi$$

(19)

$$\boldsymbol{J} = \gamma \boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{E}}{\rho}$$

(20)

式中  $\gamma$  为土壤电导率。

电流场计算中的边界条件为: 无穷远边界电位为零; 地表面法向电流密度为零; 接地导体与土壤的分界面满足连续性边界条件。

2.2 温度场

由于本文重点考察的是接地极温升变化的动态过程, 因此根据传热学原理, 列出土壤的瞬态热传导方程如下式:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho J^2 - C_v \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

(21)

式中:  $k_x$ 、 $k_y$ 、 $k_z$  分别为土壤在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的导热率, 本文中假设土壤为各向同性, 因此  $k_x = k_y = k_z = k$ 。

式(21)须满足一定的边界条件时才能有定解。假设距离接地极较远处, 土壤温度不发生变化, 与环境温度  $T_0$  相同, 此边界  $S_q$  满足传热学中的第 1 类边界条件

$$T = T_0$$

(22)

接地极与土壤的交界面处于第 2 类边界, 满足连续性条件。而在接地极运行过程中产生的热量除了使土壤温度升高以外, 其中一部分向无穷远处扩散, 另一部分则通过地面与空气对流换热, 因此土壤表面  $S_p$  属于第 3 类边界, 所满足如下边界条件:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h_0 (T_{\text{air}} - T)$$

(23)

式中:  $h_0$  为地面的传热系数;  $T_{\text{air}}$  表示空气的温度。

2.3 电流场与温度场的耦合

直流入地电流溢散到接地极周围的土壤中时会引起土壤发热升温。而温度上升又会导致土壤含水量, 热参数, 土壤电阻率的变化, 从而影响土壤的温升过程, 严重时还会进一步加剧土壤发热, 导致接地极不能正常工作。

结合式(6)、(14)、(15)及式(20)可共同求解式(21), 此时, 温度  $T$  既是待求量, 也是方程式中参数的自变量, 实现了电流场与温度场的耦合。

3 圆环型接地极温升仿真模型分析

3.1 建立仿真模型

接地极有直线型、星型及圆环型等多种结构型式, 而圆环型接地极具有溢散电流密度分布均匀的特点<sup>[21]</sup>, 因此, 成为了特高压输电工程常用的接地极型式。本文将分别对单、双圆环接地极的温升过程进行仿真分析。

有限元计算完全以场的形式进行, 可以精确的模拟实际接地极, 也可避免离散化土壤区域时带来的计算误差。因此, 本文的仿真计算以有限元法为基础, 并基于电流场理论及传热学原理建立仿真模型, 其仿真流程如图 7 所示。

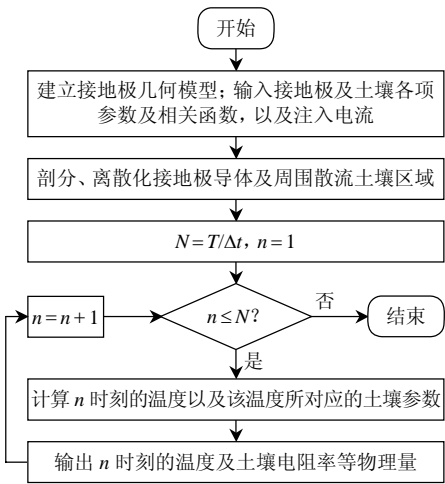


图 7 仿真建模流程图

Fig. 7 Flow chart of simulation

选取红壤为接地导体的埋设土壤, 根据前文的试验结果, 结合特高压直流输电的现状, 设定仿真模型参数如表 2 所示。

表 2 仿真模型基本参数

Tab. 2 Parameters of the simulation model

接地体参数	数值	土壤初始参数	数值
单圆环半径/m	1 000	热导率/(W/(℃·m))	1.16
双圆环半径/m	400/600	容积热容量/(MJ/(℃·m³))	1.916
接地体直径/m	0.03	电阻率/(Ω·m)	66
埋深/m	3.5	地表传热系数/(W/(℃·m²))	1
注入电流/A	4 000	环境温度/℃	20

3.2 无限元处理无穷散流边界

建模中, 直流接地极电流的散流区域为无界开区域, 电位的参考点应取在无穷远处。有限元法处

理这类无限区域需要将求解域扩展到很大范围，从而认为边界上的电磁场已衰减为零。该求解域需要大量的网格单元，导致自由度成倍的增长，使得计算存储量巨大，求解时间冗长。并且接地导体与土壤几何尺寸之间的巨大差异会使网格难以分割。因此，需要在有限元数值模拟的基础上引入无限元来解决无穷边界的问题。如图 8 所示，将模型的局部区域  $r_0$  延伸到更大的区域，扩展区域  $\delta r$  的内部边界  $\Gamma$  和局部区域边界连接，外部边界  $\Gamma_\infty$  扩展至无限远<sup>[22]</sup>。图 8 中  $r'$  表示扩展区域  $\delta r$  中坐标  $r$  被映射到无限远处的实际位置。

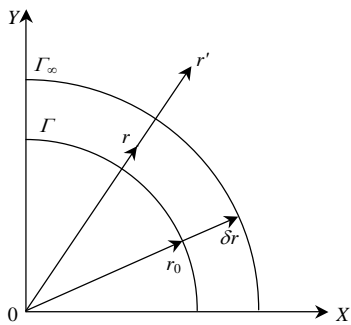


图 8 映射无限元坐标转换

Fig. 8 Coordinate transform used for mapped infinite element technique

3.3 仿真结果分析

为简化分析，忽略导流系统对电流分布的影响。首先采用传统模型中将土壤参数视为恒定的方法，计算单、双圆环的接地极温升结果如表 3 所示。表 3 中， $t$  为单极运行时长； $T_m$  为为最大温升。通过表 3 中的  $T_m$  值可知，采用表 2 中接地极的尺寸，最大温升满足系统运行要求<sup>[23]</sup>。

在已建几何模型基础上，引入土壤的温度特性参数(土壤电阻率  $\rho(T)$ ，热导率  $k(T)$ ，容积热容量  $C_v(T)$ )再对模型进行计算，该耦合模型与传统模型计算结果的对比见表 3：2 种电极型式均在未达到最大单极运行时长时，已超过标准所规定的最大允许温度值  $90\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[23]</sup>。因此，如按照表 2 中的接地极尺寸进行设计，可能会导致接地极过度发热而影响

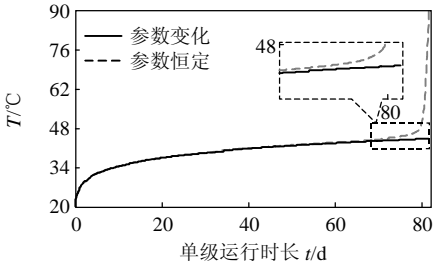
表 3 仿真计算结果

Tab. 3 Results of the simulation

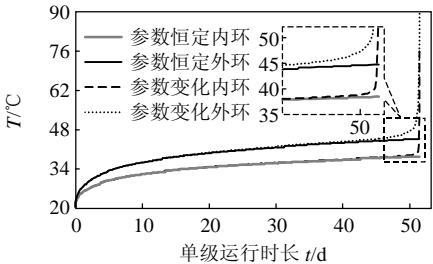
计算模型	电极型式	环径/m	$t/\text{d}$	$T_m/^\circ\text{C}$
传统模型	单圆环	1 000	180.0	44.88
	双圆环	400/600	180.0	52.32
耦合模型	单圆环	1 000	81.7	90.13
	双圆环	400/600	51.4	90.19

接地系统的正常运行。

通过对比 2 种计算模型的温升过程(图 9)发现，在传统模型计算中，由于土壤各参数不随温度变化，因此接地极温度随运行时间增加而平缓上升。而考虑电流场与温度场的耦合作用时，接地极温度的增长过程会出现温度转折点，该转折点后的温升速度难以控制，给接地极的维护带来不便，同时也会威胁到接地系统的安全运行。



(a) 单圆环接地极温升过程对比



(b) 双圆环接地极温升过程对比

图 9 2 种电极型式温升过程对比

Fig. 9 Heating process comparison on two different electrodes

土壤电阻率的变化也会直接影响系统接地电阻值。从图 10 可看到，单圆环接地极的接地电阻在  $87.8\text{ }^\circ\text{C}$ 、双圆环结构接地极在  $83\text{ }^\circ\text{C}$  都出现了急剧增长的变化。其接地电阻随温度的变化规律与土壤参数恒定模型计算结果不同。同时，由于 2 种结构接地极散热条件不同，单、双圆环结构接地极其温升快慢不同，达到  $90\text{ }^\circ\text{C}$  的相同温度时，单圆环结构可持续运行  $82\text{ d}$ ，双圆环结构仅可持续运行  $52\text{ d}$ 。

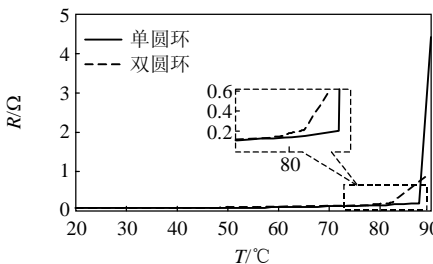


图 10 2 种电极型式接地电阻对比

Fig. 10 Grounding resistance comparison on two different electrodes

根据我国电力行业的标准,直流输电系统处于单极大地回线运行时间每年不超过 6 个月<sup>[23]</sup>,表 4 是以电热耦合模型对常见尺寸的圆环型接地极单极运行 180 d 后的温度进行计算的结果。由于直流接地极的尺寸大小根据热特性加以确定后,还需要以跨步电压进行校核<sup>[23]</sup>。因此,表 4 中列出了各电极尺寸最大温升所对应的跨步电压值,并且均符合接地极设计要求。

表 4 不同环径的仿真计算结果

Tab. 4 Results of the different circle diameters simulation

电极型式	环径/m	t/d	$T_m/^{\circ}\text{C}$	$U_s/\text{V}$
单圆环	1 200	180	40.16	2.62
	1 120	180	43.33	2.81
	1 100	180	44.95	2.86
双圆环	600/800	180	34.48	2.54
	500/700	180	42.58	2.98
	480/680	180	44.97	3.08

结合图 9 的温升过程以及表 4 的仿真计算结果,本文认为如将 6 个月运行时间内的最大温升控制在土壤电阻率的平稳阶段,能更好的保证接地极的安全运行。同时,考虑到接地极的建设成本,在额定电流 4 000 A,埋设土壤为红壤的条件下,单圆环接地极环径宜取 1 100 m,双圆环接地极宜取 480/680。

4 结论

通过土壤温升模拟试验以及对试验结果的分析,得到了土壤参数的温度特性,并在此基础上建立了接地极的温升模型进行仿真。试验及仿真结果如下:

1) 通过试验数据,建立了定量表征温度与含水量的函数关系  $\theta_m(T)$ ,并将土壤热参数与含水量的关系转换为以温度为自变量的函数,建立了热参数的温度特性  $k(T)$ 、 $C_v(T)$ 。

2) 试验土样的土壤电阻率在温升过程中随温度的变化呈现出平稳阶段以及急剧增长阶段,且急剧增长阶段土壤电阻率随温升成指数上升趋势。

3) 电热耦合模型计算结果表明:由于土壤参数温度特性的影响,直流接地极温升过程存在转折点,且转折点之后的温度急速上涨。

4) 额定工作电流下,最长单极运行时间的最大温升控制在土壤电阻率变化的平稳阶段,才可避免接地极出现急剧温升而导致的接地故障。

参考文献

[1] 陈凡,何金良,张波,等. 共用接地极对云广与贵广 II 回直流系统的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 743-748.  
Chen Fan, He Jinliang, Zhang Bo, et al. Influence of common grounding electrode on yunnan-guangdong DC transmission project and Guizhou-Guangdong II DC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 743-748(in Chinese).

[2] 郭剑,陆家榆. 直流接地极结合均流系统的计算模型与求解[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 1-6.  
Guo Jian, Lu Jiayu. Calculation model and solving method of HVDC grounding electrode with average-current system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 1-6(in Chinese).

[3] 赵杰,何金良. 特高压和高压直流输电系统共用接地极模式分析[J]. 中国电力, 2007, 40(10): 45-47.  
Zhao Jie, He Jinliang. Analysis on the common grounding electrode mode for UHVDC and HVDC power transmission systems[J]. Electrical Power, 2007, 40(10): 45-57(in Chinese).

[4] 李毅,邵明安,王文焰,等. 质地对土壤热性质的影响研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 62-65.  
Li Yi, Shao Ming'an, Wang Wenyan, et al. Influence of soil textures on the thermal properties[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 62-65(in Chinese).

[5] 李婷,王全九,樊军. 土壤热参数确定方法比较与修正[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 59-64.  
Li Ting, Wang Quanjiu, Fan Jun. Modification and comparison of methods for determining soil thermal parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 59-64(in Chinese).

[6] Stanko M, Tomislav K, Ozren B. Measurement of soil thermal properties by spherical probe[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(3): 1219-1226.

[7] 曹晓斌,吴广宁,付龙海,等. 温度对土壤电阻率影响的研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 1-6.  
Cao Xiaobin, Wu Guangning, Fu Longhai, et al. Study of temperature impact on soil resistivity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 1-6(in Chinese).

[8] 韩立华,刘松玉,杜延军. 温度对污染土壤电阻率影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1151-1155.  
Han Lihua, Liu Songyu, Du yanjun. Experiment study on effect of temperature on electrical resistivity of contaminated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1151-1155(in Chinese).

[9] Greiss H, Mukhedkar D, Lagace P J. Transient analysis of heat dissipation due to a HVDC ground electrode[J].



- IEEE Trans. on Power Delivery, 1989(2): 916-920.
- [10] Chen Fan, Zhang Bo, He Jinliang. Influence of coke bed on HVDC grounding electrode heat dissipation[J]. IEEE Trans. on Magnetics, 2008, 44(6): 826-829.
- [11] 陈凡, 何金良, 张波, 等. 特高压共用接地极热参数分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1267-1273.  
Chen Fan, He Jinliang, Zhang Bo, et al. UHVDC common ground electrode thermal parameters analysis[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1267-1273(in Chinese).
- [12] 刘曲, 李立涅, 郑健超. 复合土壤模型下 HVDC 系统单极大地运行时的电流分布[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 8-13.  
Liu Qu, Li Licheng, Zheng Jianchao. DC currents distribution in HVDC systems of monopolar operation With ground return in complex soil structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 8-13(in Chinese).
- [13] 张波, 赵杰, 曾嵘, 等. 直流大地运行时交流系统直流电流分布的预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 84-88.  
Zhang Bo, Zhao Jie, Zeng Rong, et al. Estimation of DC current distribution in AC power system caused by HVDC transmission system in ground return status[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 84-88(in Chinese).
- [14] 司马文霞, 雷超平, 袁涛, 等. 改善冲击散流时地中电场分布的接地降阻试验[J]. 高电压技术, 2011, 37(9): 2294-2301.  
Sima Wenxia, Lei Chaoping, Yuan Tao, et al. Experimental study on grounding resistance reduction based on improved grounding electric field distribution induced by the diffuser of impulse current[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(9): 2294-2301(in Chinese).
- [15] 袁涛, 司马文霞, 李晓莉. 两种常见接地极电流分布的探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 239-242.  
Yuan Tao, Sima Wenxia, Li Xiaoli. Current distribution of two kinds grounding electrode[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(2): 239-242(in Chinese).
- [16] 王静爱, 左伟. 中国地理图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2010: 46.  
Wang Jingai, Zuo Wei. China's geographic atlas[M]. Beijing: SinoMaps Press, 2010: 46.
- [17] 中华人民共和国建设部. GB/T 50145-2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.  
Ministry of Construction, Peoples' s Republic of China. GB/T 50145-2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: Chinese Plan Publishing House, 2008.
- [18] 曹晓斌, 吴广宁, 付龙海, 等. 直流密度对土壤电阻率的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 37-42.  
Cao Xiaobin, Wu Guangning, Fu Longhai, et al. The impact of DC current density on soil resistivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 31-42(in Chinese).
- [19] 李良福. 土壤电学[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 91-93.  
Li Liangfu. Soil Electric[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008: 91-93.
- [20] 解文艳, 樊贵盛. 土壤质地对土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报, 2004, 35(5): 537-540.  
Xie Wenyan, Fan Guisheng. Influence of soil structure on infiltration characteristics in field soils[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2004, 35(5): 537-540(in Chinese).
- [21] 何金良, 曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 327-328.  
He Jinliang, Zeng Rong. Power system grounding technology[M]. Beijing: Science Publishing House, 2007: 327-328.
- [22] Zienkiewicz O C, Emson C, Bettess P. A novel boundary infinite element[j]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1983, 19(3): 393-404.
- [23] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5224-2005 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
National Development and Reform Commission. DL/T 5224-2005 Technical rule of the design of HVDC earth return operation system[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.



袁涛

收稿日期: 2012-09-25。

作者简介:

袁涛(1976), 男, 博士, 从事电力系统过电压及接地技术研究, yuantao\_cq@cqu.edu.cn;

骆玲(1986), 女, 硕士研究生, 从事电力系统接地技术研究, luolingll@cqu.edu.cn;

杨庆(1981), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事高电压输变电技术、外绝缘技术及电力系统过电压研究, yangqing@cqu.edu.cn;

司马文霞(1965), 女, 博士, 教授, 博导, 从事电力系统的防雷与过电压防护研究、特殊环境中外绝缘放电特性及机理的研究, cqsmwx@cqu.edu.cn;

王建东(1974), 男, 工程师, 从事高电压输变电技术、电力系统及其自动化及电力系统过电压方面的研究, wangjd7410@sohu.com。

(责任编辑 王剑乔)