

文章编号: 100124322(2004) 1021295204

脉冲泄流时土壤条件对冲击接地阻抗的影响^x

贺宏兵, 周璧华, 陈加清

(解放军理工大学 电磁脉冲防护研究中心, 江苏 南京 210007)

摘 要: 为了探寻电流脉冲泄流时, 设备的接地是否有效可靠, 用 FDTD 法分析了脉冲泄流时均一土壤、分层土壤及局部改善土壤的电导率对冲击接地阻抗 (TGR) 的影响。结果表明: 大地电导率对冲击接地阻抗的影响很大; 对均一土壤, TGR 随大地电导率的增大而减小, 大地电导率越大, TGR 对接地体的埋深越不敏感。对分层土壤, 接地体要埋在大地电导率大的土壤层中, 且不要靠近交界面; 局部改善大地导电性能对降低 TGR 效果明显, TGR 对改善区域的体积非常敏感, 而当电导率大于一定值时, 大地电导率的再增加, 对 TGR 的影响不明显。

关键词: 电磁防护; 冲击接地阻抗; 时域有限差分法

中图分类号: O441.3

文献标识码: A

随着信息时代的到来, 对电子、电气设备构成严重威胁的高功率电磁辐射越来越受到人们的重视^[1]。高功率电磁辐射的能量可通过多种途径耦合到电子、电气设备中, 最后都反映为传导回路的电磁干扰电压或电流, 故从电磁防护的角度出发, 一方面要控制外界电磁辐射的耦合通道, 另一方面给设备提供泄流通路的保护接地是否有效可靠也非常重要。根据电磁学理论可知: 接地阻抗越小, 泄流越快。在高功率电磁环境中, 耦合到设备中的干扰电压或电流在许多情况下为短脉冲, 高频分量丰富, 于是接地系统的冲击阻抗对脉冲泄流的快慢起决定作用。因此研究脉冲泄流时的接地体冲击接地阻抗 (TGR) 的特点及其影响因素, 对电磁防护系统的设计有重要参考价值。

前人对直流或工频接地电阻的研究较多, 但这些研究成果对脉冲泄流时的情况并不完全适用。文献[2]用 FDTD 方法对高压输电线的铁塔埋地基础在雷电泄流情况下的冲击阻抗进行了计算, 部分结果与实测一致, 为研究接地系统的冲击接地阻抗提供了参考。当然, 铁塔的埋地基础与实际的接地体毕竟有区别, 而且其算法也有待改进。本文以工程上常用的金属板接地体作为研究对象, 采用 FDTD 法, 但边界条件的设置与文献[2]不同, 分析了均一土壤、分层土壤及局部改善土壤的电导率对冲击接地阻抗的影响。

1 模拟计算模型分析

1.1 接地计算模型

对处于高功率电磁环境中的电子、电气设备及系统, 流入接地体的脉冲干扰电流覆盖的频带很宽, 在此冲击电流作用下, 接地体表面不是一个等位面, 接地体不能得到充分利用, 接地阻抗也不再是一个常数, 而是随时间变化的, 最后趋近于一个稳态值 (静态接地阻抗)^[1]。

为了讨论冲击接地阻抗, 建立了如图 1 所示的接地模型^[2], 该模型将大地包含在传导回路中。为了模拟高功率电磁环境, 把干扰的影响集中到一个脉冲干扰源上, 在远处设置一个参考电极以构成一个放电回路。接地体为一边长 2m、厚 0.01m 的正方形钢板, 水平放置。土壤厚度设为 30m, 其电导率 $\sigma_g = 0.01 \sim 0.001 \text{ S/m}$, 相对介电常数 $\epsilon_g = 5 \sim 10$ ^[1]。

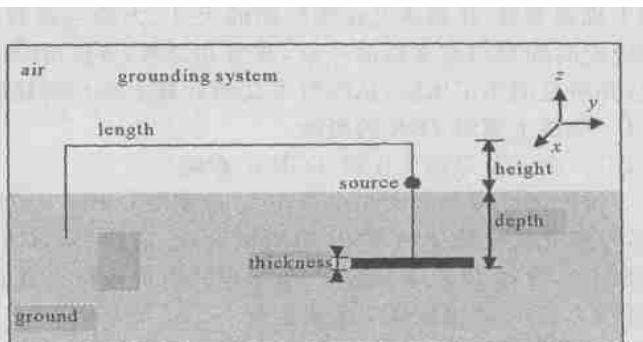


Fig. 1 Computation model of TGR

图 1 冲击接地阻抗的计算模型

^x 收稿日期: 200402203; 修订日期: 200406202

基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (60172002, 50237040)

作者简介: 贺宏兵 (1969—) 男, 安徽合肥人, 副教授, 博士研究生, 主要从事接地技术及电磁场计算研究; E-mail: hhh@jsnj.cnuninet.net。

由于干扰频带很宽,不同频率的接地阻抗不同,为计算方便,采用 FDTD 法,取直角坐标及 Yee 差分网格^[3,4],采用简化的吸收边界条件,在 x, y, z 方向网格大小相同,网格步长 s 选取为

$$s = c / (10f \sqrt{\epsilon_r}) \quad (1)$$

式中: c 为电磁波在大气中的传播速度; f 为干扰信号的上限频率。

计算时间步长 t 必须满足 Courant 条件,本文选取

$$t = s / 2c \quad (2)$$

组成接地系统的放电回路为导线,由于其半径相对于选用的网格步长 s 小得多 (s 一般大于 10 倍导线半径),所以可看作为细导线。本文对环导线的磁场迭代按文献[5]给出的方法进行。

1.2 脉冲干扰源设置

为模拟方便,我们采用一个源内阻 $R = 50$ 的电流脉冲干扰源,设为双指数型,其表达式为

$$I = kI_0(e^{-t/\tau_r} - e^{-t/\tau_f}) \quad (3)$$

式中: $k = 37.618 \text{ s}^{-1}$; $\tau_r = 1.13643 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$; 上升时间(从峰值的 10% 上升至 90% 所经历的时间) $\tau_r = 0.2 \mu\text{s}$; 峰值半宽度 $\tau_f = 19 \mu\text{s}$ 。波源设置在接地体的上方,计算时为了消除虚假反射,把源作为电场的一个修正项^[6,7]。

1.3 冲击阻抗获取

冲击接地阻抗定义为瞬时的冲击电压 V_t 与冲击电流 I_t 之比,即

$$R_t = V_t / I_t \quad (4)$$

I_t 可由安培环路定律算出,以向上为正方向(与 z 方向一致),则表达式为

$$I_t = [H_x(i, j - 1/2, k + 1/2) - H_x(i, j + 1/2, k + 1/2)] x + [H_y(i + 1/2, j, k + 1/2) - H_y(i - 1/2, j, k + 1/2)] y \quad (5)$$

在用 FDTD 方法进行计算时,在每个单元网格范围内可以认为电场 E 是均匀分布的,故每个单元网格两边的电位差 V_j 可写为

$$V_j = -E s \quad (6)$$

从接地体到无限远处的冲击电压 V_t 可通过从接地体入地点积分到场区边界求得:

$$V_t = \sum_{j=N_{PS}}^{N_{RL}} V_j \quad (7)$$

式中: N_{PS} 为接地体入地点的网格位置; N_{RL} 为场区边的网格位置。

2 数值分析

对 TGR 进行数值分析时,取 $\rho_g = 0.001 \text{ S/m}$, $\rho_g = 8$ 。根据所选脉冲干扰源, $s = 0.5 \text{ m}$, t 由(2)式求出。当干扰源参数、接地体及接地回路的尺寸、大地电参数等取值与文献[2]的相同时,算得的 TGR 峰值、稳态值及稳定时间都与该文献的一致,并且用文献[8]的计算公式计算了本文所用的接地体接地电阻与 TGR 稳态值,并将它们作了比较,从而对本文的计算方法作间接验证。

2.1 单层土壤对 TGR 的影响

2.1.1 大地电导率变化对 TGR 的影响

接地体埋深 2m,大地电导率 ρ_g 分别取 0.01, 0.005, 0.003, 0.001 S/m,计算结果如图 2 所示。由图 2 可见, ρ_g 变化对接地体的 TGR 影响很大, ρ_g 值越大, TGR 越小,且 TGR 在 ρ_g 较小时呈容性(起始段的阻抗较稳态值小),在 ρ_g 较大时呈感性(起始段的阻抗较稳态值大),这一规律与文献[2]一致。

2.1.2 TGR 随接地体埋深的变化

当接地体埋深 h 分别为 1, 2, 3, 4m 时, ρ_g 分别取 0.001, 0.003 S/m,计算结果如图 3 所示。由该图可见,埋深 h 变化对接地体的 TGR 影响也很大,接地体埋得越深, TGR 越小,但随深度加大,其影响变小;大地电导率越大,埋深对 TGR 影响越小。

2.2 分层土壤对 TGR 的影响

在接地工程中,可能碰到土壤分层的情况。当两层土壤电导率不同,选择合理的接地体埋设方法能够有利于减小 TGR。假定上层土壤厚度为 2.5m,两层土壤电导率分别为 0.001, 0.003 S/m。计算结果如图 4 所示,其

中图(a)表示上层土壤电导率大的情况,图(b)表示上层土壤电导率小的情况。由图 4 可见,在土壤分为两层的情况下,接地体应埋在电导率大的土壤中,若上层土壤电导率大,则接地体不要靠近土壤的分界面埋设。

2.3 土壤电导率的局部改善对 TGR 的影响

在接地体周围使用降阻剂,可使其周围土壤电导率增加。当接地体埋深 $h=2\text{m}$ 时,分两种情况进行讨论。第一种情况:令降阻剂作用区域 V_s 分别为 $2\text{m} \times 2\text{m} \times 3\text{m}$, $3\text{m} \times 3\text{m} \times 3\text{m}$, $4\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$, 土壤电导率从 0.001S/m 提高至 0.01S/m , 计算结果如图 5 所示。第二种情况:降阻剂作用区域 V_s 为 $4\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$, 经改善后的土壤电导率 σ_g 分别变为 0.005 , 0.01 , 0.02 , 0.05S/m , 计算结果如图 6 所示。从图 5 和图 6 中可看出,降阻剂对降低 TGR 效果明显, TGR 随降阻剂作用区域变大而迅速下降;当降阻剂作用区域一定时, TGR 先有一个大幅下降, 然后受土壤电导率的影响并不明显。

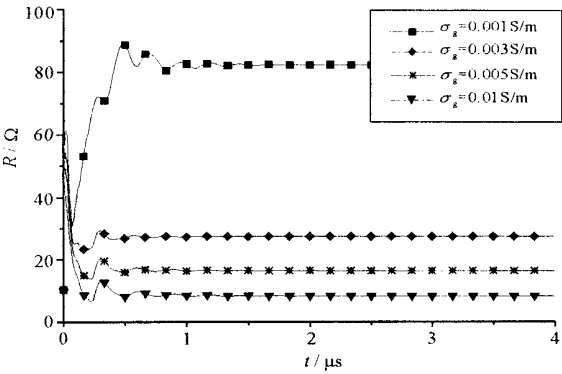


Fig. 2 Influence of the homogeneous soil σ_g on TGR
图 2 TGR 随大地电导率的变化

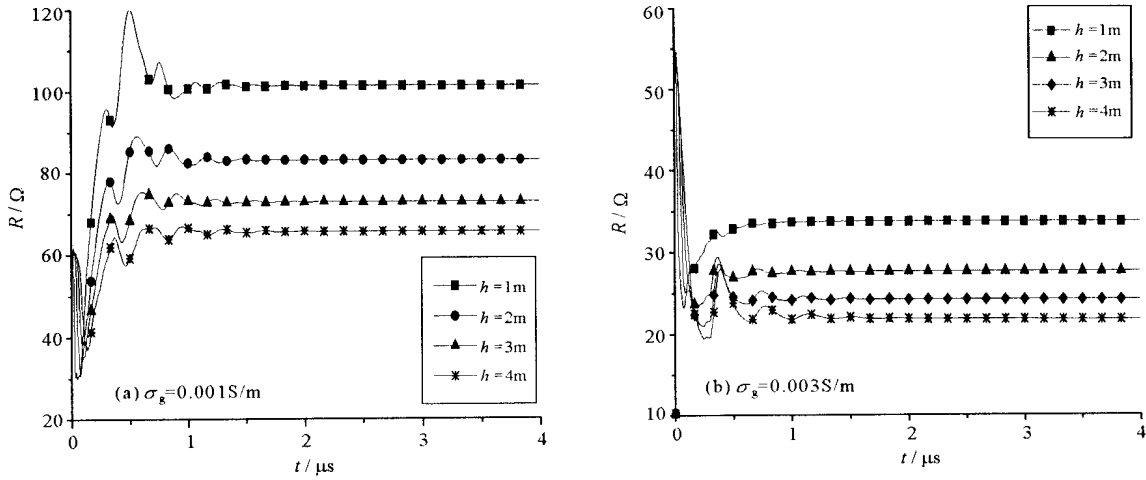


Fig. 3 Influence of buried depth of the grounding conductor on TGR
图 3 TGR 随接地板埋深的变化

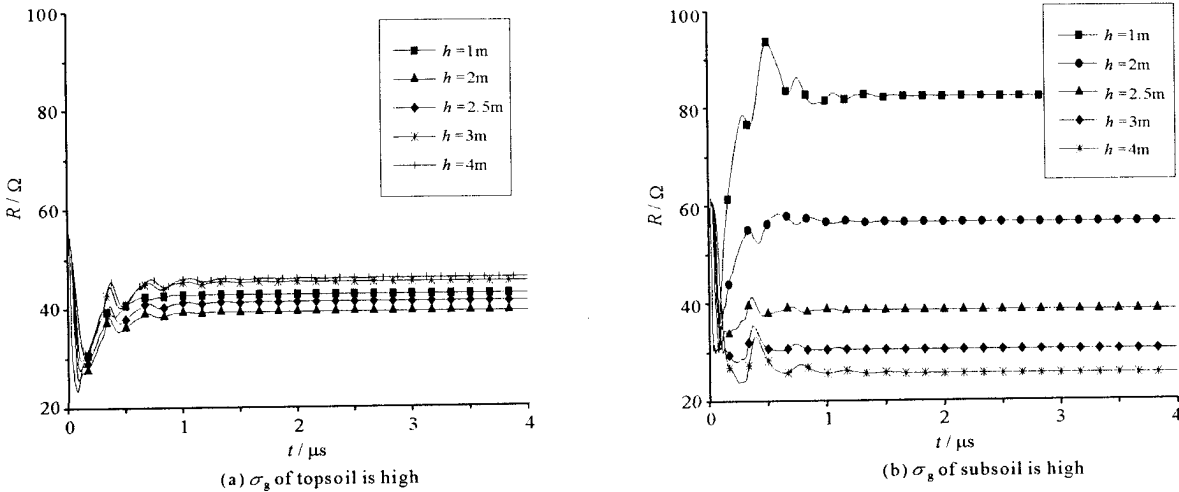


Fig. 4 Influence of layered soil on TGR
图 4 分层土壤对 TGR 的影响

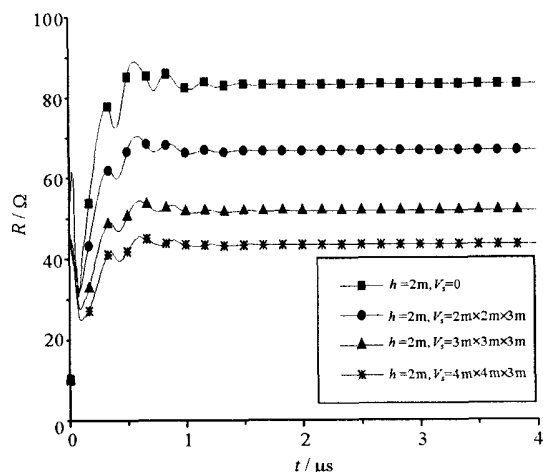
Fig. 5 Influence of range of high σ_g soil on TGR ($V_g=4\text{m} \times 4\text{m} \times 3\text{m}$)

图 5 TGR 随降阻剂作用区域改变的变化

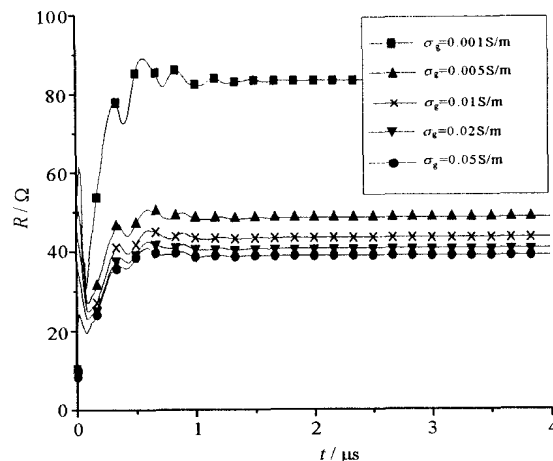
Fig. 6 Influence of high σ_g soil on TGR

图 6 TGR 随降阻剂作用区域电导率改变的变化

3 结 论

通过以上土壤条件对 TGR 影响的分析,得到以下结论:大地电导率 σ_g 对 TGR 的影响很大;对均一土壤, TGR 随 σ_g 增大而减小, σ_g 越大, TGR 对接地体的埋深越不敏感;对分层土壤,接地体要埋在 σ_g 大的土壤层中,且不要靠近交界面;局部改善导电性能对降低 TGR 效果明显, TGR 对改善区域的体积非常敏感,而当电导率大于一定值时, σ_g 的继续增加对降低 TGR 的作用就不明显了。

参考文献:

- [1] 周璧华,陈彬,石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003. (Zhou B H, Chen B, Shi L H. EMP and EMP Protection. Beijing: National Defence Industry Press, 2003)
- [2] Tanabe K. Calculation results for dynamic behavior of grounding systems obtained using the FDTD method[A]. Conference Proceedings of ICLP 2000[C]. Rhodes, Greece, 2000. 452—457.
- [3] Yee K.S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation[J]. IEEE Trans AP, 1966, 14(4):302—307.
- [4] Chen B, Wang T Y, Gao C, et al. Full2wave analysis of the EMP induced current in cables near the ground[A]. Conference Digest of CEEM 2000[C]. Shanghai, 2000. 359—363.
- [5] Taflov A, Umashankar K R, Beker B, et al. Detailed FDTD analysis of electromagnetic fields penetrating narrow slots and lapped joints in thick conducting screens[J]. IEEE Trans AP, 1988, 36(2):247—257.
- [6] Noda T, Yokoyama S. Development of a general surge analysis program based on the FDTD method [J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2001, 121B(5):625—632.
- [7] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京:科学出版社,2002. (Wang B Z. Computation electromagnetics. Beijing: Science Press, 2002)
- [8] 川濑太郎. 接地技术与接地系统[M]. 北京:科学出版社,2001. (Tarou K. Grounding technology and system. Beijing: Science Press, 2001)

Influence of the soil on transient grounding resistance under pulsed discharging current

HE Hongbing, ZHOU Bi2hua, CHEN Jia2qing

(Research Center of EMP Protection, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: The influences of homogeneous, layered and fractional improved conductivity soil on transient grounding resistance (TGR) under pulsed discharging current are analyzed by using FDTD method in this paper. The results show that the ground conductivity has significant influence on TGR. In homogeneous soil, TGR and the influence of the buried depth of the grounding conductor on TGR decrease with increasing ground conductivity. In layered soil, the grounding conductor should be buried in the high conductivity layered soil, and not near the layered boundary. The locally improved conductivity will decrease TGR, and TGR is sensitive to this locally improved soil volume. And for the locally improved soil where the conductivity is enough large, the farther increasing of the conductivity has little effect on decreasing TGR.

Key words: Electromagnetic protection; Transient grounding resistance; Finite difference time domain method