

大地对电磁脉冲感应的电缆电流影响的数值计算¹

程引会 周 辉 谢秦川 李宝忠

(西北核技术研究所 西安 710024)

摘 要 与电子系统相连的电缆被电磁脉冲感应形成的脉冲电流, 构成了对电子系统的严重威胁。该文用时域有限差分法计算了大地电参数对感应电流的影响。计算获得了电缆上皮电流与电缆距地高度的关系, 并与自由空间的结果进行了比较。

关键词 时域有限差分法, 电缆, 感应电流, 大地, 电磁脉冲

中图分类号 TN015

1 引 言

脉冲作为一种重要的电磁干扰源, 对电子系统构成威胁, 而与电子系统相连的电缆感应的皮电流是引入这种威胁的重要原因之一。许多文献对这种情况进行了分析, 对短电缆计算给出了简单的解析模型^[1], 也可以用数值方法进行计算^[2,3], 我们也对自由空间情况下不同电磁脉冲对较短的电缆耦合电流进行过数值计算^[4]。但自由空间条件与真实情况有较大不同, 主要是连接电子设备的电缆或多或少的要受到大地的影响。本文研究了不同大地电参数、电缆距大地距离对感应电流的影响。

2 计算模型

在时域有限差分法的基础上, 采用对细线结构的特殊处理方法, 可以较好地计算像电缆类电磁耦合感应问题。文献 [2,3] 给出的方法处理电缆在自由空间的情况有令人满意的结果。但文献 [2] 的方法要求电缆只能处在差分网格的节点上。当考虑导电大地对耦合的影响时, 电缆如果必须处于网格节点, 会引起空间网格数目的急剧增加, 使得该算法不再表现出优越性。而采用等效电感的方法, 电缆可以处于空间网格的任何位置 (只要位置不使等效电感的积分计算式失效), 大大方便了计算。

对有一定长度的细导线进行 FDTD 计算时, 必须采用三维模型, 涉及麦克斯韦方程的 6 个标量方程, 在计算模型中, 麦氏方程中的电流源是电磁脉冲的总场在细导线上的感应电流, 假定细导线没有弯曲, 沿 Z 轴放置, 则 J_x, J_y 为零。

空间细导线采用等效电感模型进行处理, 假设细导线处在某一差分网格中央, 沿 Z 轴放置, 取导线为中心点的柱坐标系, 有

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = -\mu_0 \frac{\partial H_\theta}{\partial t} \quad (1)$$

当满足网格尺寸比最小工作波长小时, 上式中的 E_r 和 H_θ 可以分别用导线上电荷和电流表示, 将上式对 r 积分 (细导线表面 E_z 为零) 后再在网格内求平均值得到

$$L \left(\frac{\partial I}{\partial t} + \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \frac{\partial Q}{\partial z} \right) = E_z \quad (2)$$

其中 L 具有电感的量纲, I 是线上电流, Q 是单位长度电量。由一维的电流连续性方程可得

¹ 1999-12-17 收到, 2000-06-22 定稿

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

如果求解自由空间情况,导线电流的所有微分方程全部已建立,只要采用普通的吸收边界,如 Mur 吸收边界^[5],变成差分方程就可进行求解。当电缆位于无限大地面上时,自由空间吸收边界不再适用,需要用到有耗导电介质吸收边界,为了简化数值模拟,能依旧使用自由空间边界条件,做了下面的近似处理,无限大地平面看成有限大,与电缆一起构成散射体,如图 1 所示,可以这样近似处理的理由是:大地本身是有耗媒质,只要其空间体积取得足够大,就可以使边界反射波在到达电缆以前被大地媒质衰减到足够小,该反射波到达电缆后的大小可以通过调整大地散射体的大小达到要求,从而忽略没有采用有耗媒质边界吸收边界带来的影响,这种近似要求增加计算空间,而等效电感模型恰恰可以满足较大空间求解的要求。

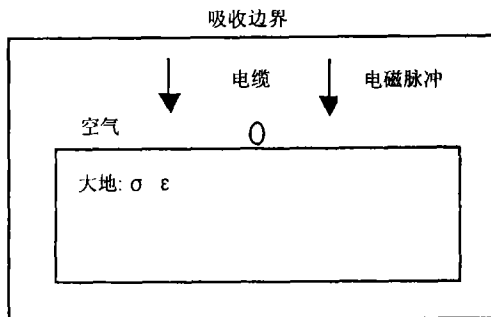


图 1 考虑大地影响的线缆近似处理模型

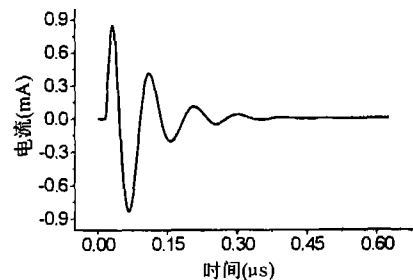


图 2 电缆中心电流波形

3 计算结果和分析

3.1 大地电参数对电缆感应电流的影响

真实的大地的电导率和介电常数是受季节、土壤湿度等因素影响而变化的,首先对长度 6m,直径 9mm 的电缆距地 3cm 时,大地电导率和介电常数变化的情况进行了数值计算,入射电场为: $E(t) = E_0 \exp[-\alpha^2(t - t_{\max})^2]$, $\alpha = 3.2 \times 10^8 \text{s}^{-1}$, $t_{\max} = 7 \times 10^{-9} \text{s}$, $E_0 = 1 \text{V/m}$, 电场矢量平行于电缆轴向。为了计算条件简单,便于分析,电缆两端分别开路和对地短路。空间网格取边长 0.25m 的立方体,共取 $101 \times 101 \times 84$ 个单元,大地厚度取 10m。对电缆上电流分布进行了计算,给出了电缆中心的最大电流,大地相对介电常数为 4,电导率为 0.05S/m 时 6m 电缆开路状态中心电流如图 2 所示。表 1 和表 2 分别给出了介电常数变化和电导率变化对电流峰值的影响。随着大地电导率和介电常数的增加,开路状态时阻尼振荡衰减加快,电流幅度减小。短路状态的电流波形与入射电磁脉冲波形相似,不表现出阻尼振荡波形,但也不是对称的高斯波形,随着电导率和介电常数的增加,电流脉冲宽度和幅度均减小,短路状态的电流峰值比开路状态大的多。

表 1 电导率为 0.01S/m

相对介电常数	4	9	16	25
开路电流峰值 (mA)	1.7	1.0	0.6	0.42
短路电流峰值 (mA)	36.0	*	*	15.6

* 表示没有计算结果

表 2 相对介电常数为 4

电导率	0.003	0.01	0.05
开路电流峰值 (mA)	2.2	1.7	0.85
短路电流峰值 (mA)	42.0	36.0	21.0

3.2 电缆距地高度对感应电流的影响

地面不同高度电磁脉冲强度不同, 电缆感应电流的辐射场与大地作用后又反作用于电缆, 这种自洽过程随电缆距地面高度的变化而变化。电缆长度取 100m, 入射电磁脉冲为图 3 所示的双指数脉冲, 空间取 $101 \times 101 \times 160$ 个单元, 大地厚度取 95m, 其它计算条件与前面相同。

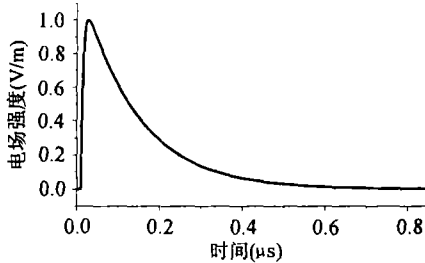


图 3 入射电场波形

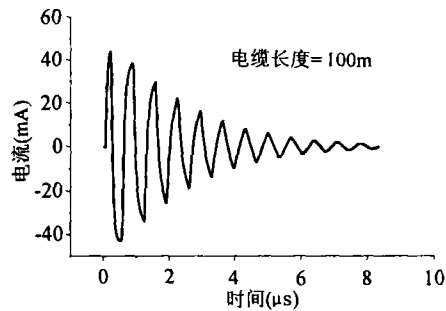


图 4 自由空间电缆中心电流

图 4 是自由空间电缆中心电流波形。图 5 是电缆距地面 3cm 时中心点电流, 表 3 给出了不同高度时电缆开路状态中心电流峰值和频谱峰值的比较; 短路状态电缆中心的皮电流峰值。大地电参数选取为干沙地的典型电参数^[6]: 相对介电常数为 4, 电导率为 0.003S/m。

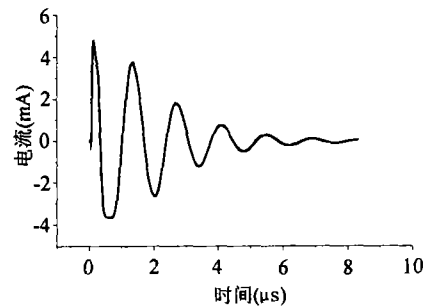


图 5 地面上 3cm 处电缆中心电流

表 3 距地面不同高度电流峰值和频谱峰值

距地面高度 (cm)	3	50	75	自由空间
开路电流峰值 (mA)	4.8	8.4	11.0	45.0
频谱峰值 (MHz)	0.72	0.87	1.02	1.45
短路电流峰值 (mA)	40.0	43.0	45.0	52.0

因为电缆直径将近 1cm, 距离地面 3cm 高度可以看作电缆就放在地面。开路状态时, 感应电流只有自由空间感应电流的十分之一, 感应电流大大减小。与自由空间感应的电流波形比较, 阻尼振荡的频率减小, 随着高度的增加, 趋向自由空间的振荡频率, 即与电缆长度 (l) 有关的谐振频率 $2l/c$ 。受大地影响后的电流波形振荡频率变低, 可以理解为电磁波在相对介电常数为 4 的介质中传播速度变慢引起的。

短路状态时结果与前面计算结果类似。从结果可以看出, 电缆距地面高度对开路状态影响较大。

4 结 论

从前面计算结果我们可以得出下面的看法:从电磁脉冲耦合皮电流的角度看,大地是电缆的天然保护伞,与电子系统相连的电缆与地面距离越大,电缆所处大地电导率与介电常数越小,电子系统受电磁脉冲的威胁越大。计算中认为大地是一种均匀介质,实际上大地不同深度的地质条件不同,电参数也会不同,如果要考虑这种因素,还需要对大地作分层处理。

参 考 文 献

- [1] M. Tesche, EMC Analysis Methods and Computational Models, New York, Wiley, 1997, 321-365.
- [2] K. S. Kunz, R. J. Luebbers, The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetic, Boca Raton, CRC Press, 1993, 185-190.
- [3] R. Holland, Finite-difference analysis of EMP coupling to thin struts and wires, IEEE Trans. on EMC, 1981, 23(2), 88-97.
- [4] 程引会等,不同电磁脉冲对细导线的耦合,强激光与粒子束, 2000, 12(1), 91-94.
- [5] G. Mur, Absorbing boundary condition for finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic field equation, IEEE Trans. on EMC, 1981, 23(4), 1073-1077.
- [6] 王元坤,电波传播概论,北京,国防工业出版社, 1984, 15.

NUMERICAL CALCULATION OF PLANE GROUND INFLUENCE ON INDUCED CURRENT ON CABLE BY EMP

Cheng Yinhui Zhou Hui Xie Qinchuan Li Baozhong

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract The induced pulse current by EMP on cable that is connected to electric system threatens seriously the system. In this paper, the influence of conductivity and permittivity of plane ground on this current is calculated by FDTD method. The relationship between induced current and cable position above the earth is obtained, and the results are compared with the free-space case.

Key words FDTD, Cable, Induced current, Plane ground, EMP

- 程引会: 男, 1967年生,高级工程师,硕士,研究方向是与电磁脉冲有关的理论模拟,测量和加固应用。
周 辉: 男, 1962年生,研究员,硕士,从事抗辐射加固研究。
谢秦川: 男, 1973年生,研究实习员,硕士,现主要从事电磁脉冲耦合的理论模拟及瞬态天线等方面的研究工作。
李宝忠: 男, 1971年生,学士,研究方向是带电离子与电磁脉冲相互作用理论模拟与测试。