

多导体传输线非线性负载响应的 FDTD 模拟

胡 凯,赵 翔,闫丽萍,刘长军,黄卡玛

(四川大学电子信息学院,四川成都 610064)

摘 要:多导体传输线(MTLs)对激励信号非线性响应的仿真研究在电磁兼容分析和电磁效应评估研究中具有重要作用。本文采用 FDTD 方法研究集总源对端接非线性负载的 MTL 的影响,推导出电报方程的差分格式与边界条件,计算得到了 MTL 上电压波和电流波的瞬态响应情况,所得结果和已有文献中利用时域 BLT 方法算出的结果完全吻合。

关键词:多导体传输线;非线性负载;瞬态响应;时域有限差分

中图分类号:O451 文献标志码:A

多导体传输线(MTLs)是电子系统中射频能量传输的重要途径,因此 MTL 对激励信号响应的仿真研究在电磁兼容分析和电磁效应评估研究中具有重要作用^[1]。由于电子系统中非线性元器件的广泛使用,对 MTL 上非线性负载的非线性响应过程研究就显得很有必要,为此在时域对 MTL 方程进行求解是合理且可行的。本文采用时域有限差分(FDTD)方法研究集总源对端接非线性负载的 MTL 的影响,推导出电报方程的差分格式与边界条件,计算并验证了已有文献中利用时域 BLT 方法算出的结果。

1 多导体传输线方程及其 FDTD 方法

不考虑外界电磁场作用的情况下,在如图 1a)所示的 MTL 上,电流波向量 $[I_i(z)]$ 和电压波向量 $[V_i(z)]$ 满足电报方程^[2]

$$\frac{\partial}{\partial z}[V_i(z)] + [R_{ij}][I_i(z)] + [L_{ij}]\frac{\partial}{\partial t}[I_i(z)] = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}[I_i(z)] + [G_{ij}][V_i(z)] + [C_{ij}]\frac{\partial}{\partial t}[V_i(z)] = 0, \quad (2)$$

其中 $i, j=1, 2, \dots, N-1$; N 为导体个数。 $[R_{ij}]$ 、 $[L_{ij}]$ 、 $[G_{ij}]$ 和 $[C_{ij}]$ 分别是 $(N-1) \times (N-1)$ 阶的单位长度电阻、电感、电导和电容矩阵。对于无耗三导体线^[3](设导线 0 为接地线),有

$$[V_i(z)] = \begin{bmatrix} V_1(z) \\ V_2(z) \end{bmatrix}, [I_i(z)] = \begin{bmatrix} I_1(z) \\ I_2(z) \end{bmatrix}, [L_{ij}] = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix}, [C_{ij}] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}。$$

采用 FDTD 方法进行方程(1)和(2)的求解。将传输线长等分为 K 段,采用差分格式对微分方程在时间和空间上进行离散^[4]。

对方程在 k 位置、 n 时刻进行差分离散

$$\left[\frac{V_i^n(k + \frac{1}{2}) - V_i^n(k - \frac{1}{2})}{\Delta z} \right] + [R_{ij}] \left[\frac{I_i^{n+\frac{1}{2}}(k) + I_i^{n-\frac{1}{2}}(k)}{2} \right] + [L_{ij}] \left[\frac{I_i^{n+\frac{1}{2}}(k) - I_i^{n-\frac{1}{2}}(k)}{\Delta t} \right] = 0. \quad (3)$$

对方程(2)在 $k + \frac{1}{2}$ 位置、 $n + \frac{1}{2}$ 时刻进行差分离散:

收稿日期:2011-06-20;责任编辑:王士忠

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(60801035)

作者简介:胡 凯(1985-),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要从事计算电磁学方面的研究。

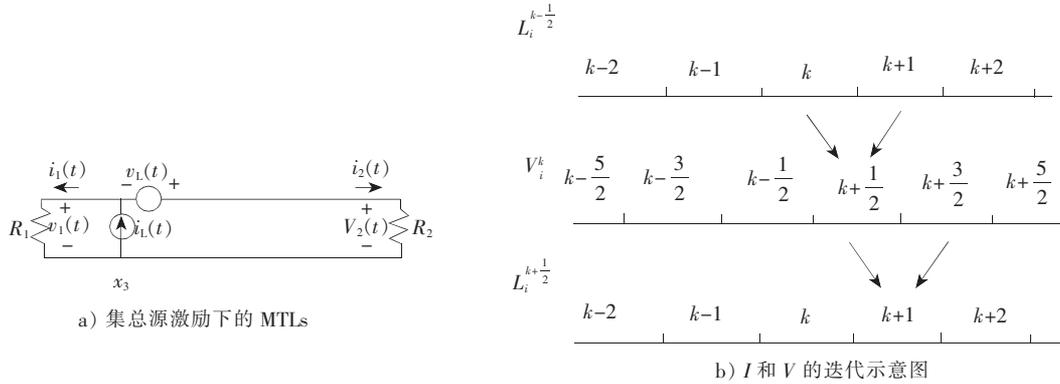


图1 MTL 及其电流电压的迭代

$$\left[\frac{I_i^{n+\frac{1}{2}}(k+1) - I_i^{n+\frac{1}{2}}(k)}{\Delta z} \right] + [G_{ij}] \left[\frac{V_i^{n+1}(k+\frac{1}{2}) + V_i^n(k+\frac{1}{2})}{2} \right] + [L_{ij}] \left[\frac{V_i^{n+1}(k+\frac{1}{2}) - V_i^n(k+\frac{1}{2})}{\Delta t} \right] = 0. \tag{4}$$

令

$$Ia_{ij} = \left[\left(\frac{E}{\Delta t} - \frac{R_{ij}}{2L_{ij}} \right) / \left(\frac{E}{\Delta t} + \frac{R_{ij}}{2L_{ij}} \right) \right], Ib_{ij} = \left[E / \left(L_{ij} \Delta z \left(\frac{E}{\Delta t} + \frac{R_{ij}}{2L_{ij}} \right) \right) \right],$$

$$Va_{ij} = \left[\left(\frac{E}{\Delta t} - \frac{G_{ij}}{2C_{ij}} \right) / \left(\frac{E}{\Delta t} + \frac{G_{ij}}{2C_{ij}} \right) \right], Vb_{ij} = \left[E / \left(C_{ij} \Delta z \left(\frac{E}{\Delta t} + \frac{G_{ij}}{2C_{ij}} \right) \right) \right],$$

得到最终的迭代格式(参见图 1b)):

$$[I_i^{n+\frac{1}{2}}(k)] = Ia_{ij} \times [I_i^{n-\frac{1}{2}}(k)] + Ib_{ij} \times \left[V_i^n(k - \frac{1}{2}) - V_i^n(k + \frac{1}{2}) \right], \tag{5}$$

$$[V_i^{n+1}(k + \frac{1}{2})] = Va_{ij} \times [V_i^n(k + \frac{1}{2})] + Vb_{ij} [I_i^{n+\frac{1}{2}}(k) - I_i^{n+\frac{1}{2}}(k+1)]. \tag{6}$$

为保证迭代过程的稳定性,时间步长应足够小,满足约束条件^[5]:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta z}{c \sqrt{n}},$$

其中, n 是对应空间的维数, V 是 MTL 上电波传播速度。

2 计算实例

利用上述方法并结合一定的边界条件来计算 MTL 端接线性负载(例 1)和非线性负载(例 2)的实例^[11]。

例 1:如图 1a),一长度为 $L=1$ m 且集总电压源接在 $x_s=0.2$ m 处的同轴传输线,其表达式如下:

$$V_0(t) = V_p(1+\Gamma)e^{-(t-t_s/t_f)} [0.5 \operatorname{erfc}(-\sqrt{\pi} \frac{t-t_s}{t_r})] \times \Phi(-(t-t_s)) + [1-0.5 \operatorname{erfc}(\sqrt{\pi} \frac{t-t_s}{t_r})] \Phi(t-t_s),$$

式中 $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 是误差宗量函数, $\Phi(\cdot)$ 表示单位阶跃函数。波形的峰值电压 $V_p=10$ kV,其中常量 $\Gamma=0.024$, $t_r=100$ ps, $t_f=4$ ns, $t_s=0.2$ ns。同轴线内、外导体半径分别为 $a=2.5$ mm 和 $b=9.345$ mm,并且外导体厚度为 $tk=0.6$ mm,内外导体之间填充相对介电常数 $\epsilon_{rel}=2.5$ 的介质,可以求得该同轴线的特征阻抗为 50Ω 。在同轴线左端和右端分别接上 $R_1=10 \Omega$ 和 $R_2=100 \Omega$ 的负载电阻,相应的边界条件为

$$V(t) = -I(t) \times R_1 \text{ 和 } V(t) = I(t) \times R_2.$$

经过约 15 000 个时间步的计算,获得如图 2a)所示的负载响应结果。

例 2:设例 1 中右端负载 R_2 为非线性负载,其非线性特征由下式给出。

$$v(t) = \begin{cases} R_L \times i(t) & \text{当 } |v(t)| \leq V_z, \\ v_z + (i(t) - V_z/R_L) \times C & \text{当 } v(t) > V_z, \\ -V_z + (i(t) + V_z/R_L) \times C & \text{当 } v(t) < -V_z, \end{cases}$$

其中 $C=1$, $V_z=2\ 000$, $R_L=100$ 。同理可得右端非线性负载的响应情况,如图 2b)。

(下转第 213 页)

明显影响,对其危害主要表现为意外发火和爆炸;静电放电对微电子设备的影响则主要表现在软损伤、硬损伤和电磁干扰等3个方面。因此,航天器静电防护工作应结合测试厂房防静电装置与技术工序,完善静电安全防护制度,加强技术、人员管理,确保在航天器运输、储存、测试和加注过程中不发生静电损害事故。

参考文献:

- [1] 魏光辉,潘晓东,孙永卫. 通用电爆装置抗静电能力研究[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2008, 28(5): 480-485.
- [2] GB 12158—2006, 防静电事故通用导则[S].
- [3] 胡允娥. 论静电对电子行业的危害及防护[J]. 科技信息, 2010(15): 70-71.
- [4] 孙延真. 电子工业静电防护指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] 武占成, 刘尚合. 静电放电及危害防护[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.

(上接第 179 页)

图 2 所示的计算结果和已有文献^[5-6]中利用时域 BLT 方法得到的结果完全吻合。

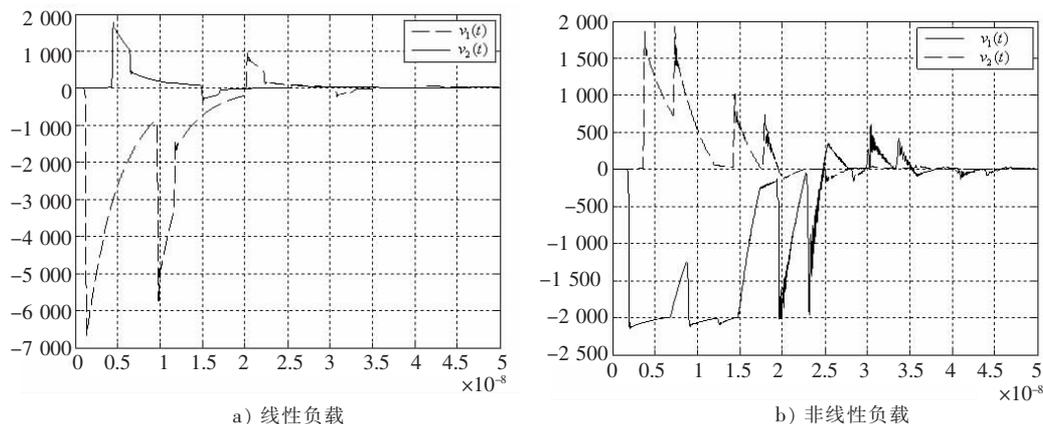


图 2 负载电压的瞬态响应

3 结 语

采用 FDTD 方法研究集总源对端接非线性负载的 MTL 的影响,推导出电报方程的差分格式与边界条件,计算得到了 MTL 上电压波和电流波的瞬态响应情况,所得结果和已有文献中利用时域 BLT 方法算出的结果完全吻合。对场线耦合情况下的仿真将在后续工作中通过施加分布式电压源和电流源来实现。

参考文献:

- [1] BAGCI H, YILMAZ A E, MICHELSEN E. An FFT-accelerated time-domain multiconductor transmission line simulator[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2010, 52(1): 15-25.
- [2] PAUL C R. Incorporation of terminal constrains in the FDTD analysis of transmission lines[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 1994, 36(2): 85-95.
- [3] 李 莉, 冀维林. 端接非线性负载的不等长传输线瞬态分析[J]. 电波科学学报, 2009, 24(3): 529-532.
- [4] POLLARD R D B. Electromagnetic Simulation Using the FDTD Method [M]. New York: Sullivan D M, 2000.
- [5] TESCHE F M. Development and use of the BLT equation in the time domain as applied to a coaxial cable[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2007, 49(1): 101-115.
- [6] TESCHE F M. On the analysis of a transmission line with nonlinear terminations using the time dependent BLT equation[J]. IEEE Trans Electromagn Compat, 2007, 49(2): 11-26.