

## 屏蔽腔内任意高度线缆端接TVS管电路的电磁耦合时域分析

叶志红<sup>①</sup> 周海京<sup>\*②</sup> 刘 强<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

<sup>②</sup>(北京应用物理与计算数学研究所 北京 100094)

**摘要:** 该文基于时域有限差分(FDTD)方法和传输线方程, 结合插值技术和牛顿迭代法, 提出一种新的时域混合算法, 能够快速模拟屏蔽腔内任意高度线缆端接瞬态电压抑制(TVS)管电路的电磁耦合问题, 并实现空间电磁场与线缆和电路瞬态响应的同步计算。该算法首先利用 FDTD 方法结合 STL 网格剖分技术实现屏蔽腔结构的快速建模以及腔体内空间电磁场分布的准确模拟。然后利用传输线方程结合插值技术建立腔体内线缆的场线耦合模型, 结合 FDTD 方法, 迭代求解出线缆上的电压和电流响应。对于线缆端接的 TVS 管电路, 列写电压电流方程, 采用牛顿迭代法计算得到电路端口的电压响应。通过与电磁仿真软件的计算结果进行对比, 验证了所提时域混合算法的正确性。研究表明, 该算法能够很好地应用于屏蔽腔内线缆端接负载的 TVS 管限幅防护设计。

**关键词:** FDTD 方法; 传输线方程; 牛顿迭代法; 任意高度线缆; 瞬态电压抑制管电路

**中图分类号:** TM15

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2018)04-1007-05

**DOI:** 10.11999/JEIT170615

## Time Domain Coupling Analysis for the Arbitrary Height Cable Terminated with TVS Circuit in Shield Cavity

YE Zhihong<sup>①</sup> ZHOU Haijing<sup>\*②</sup> LIU Qiang<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

<sup>②</sup>(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** This paper presents a novel time domain hybrid method consisting of Finite Difference Time Domain (FDTD) method, Transmission Line (TL) equation, interpolation technique, and Newton iteration method for the coupling simulation of the arbitrary height cable terminated with TVS circuit in shield cavity rapidly. It can achieve a strong synergism computation of electromagnetic field and the responses of the cable and the circuit. The hybrid method uses FDTD method combined with the STL mesh generator technique to model the enclosure of the cavity rapidly and simulate the electromagnetic field distribution in the cavity accurately. The TL equation with interpolation technique is used to set up the coupling model of the cable in the cavity. Then the FDTD method is used to discrete the TL equation to obtain the transient voltage and current responses on the cable. The current-voltage equations are used for the analysis of the TVS circuit. Then the Newton iteration method is utilized to solve the current-voltage equations to obtain the voltage responses on the TVS. The correctness of the hybrid method is confirmed by comparing with the results obtained by electromagnetic simulation software. In testing, the hybrid method can be well applied to the limiting protection design of the loads in the terminal of the cable in shield cavity.

**Key words:** Finite Difference Time Domain (FDTD) method; Transmission Line (TL) equation; Newton iteration method; Arbitrary height cable; Transient Voltage Suppressor (TVS) circuit

### 1 引言

强电磁脉冲能够通过电子系统屏蔽外壳上的孔

缝耦合进入系统内部, 然后再作用到线缆耦合产生干扰信号, 从而对端接负载造成干扰或损坏。为了保证线缆端接负载的正常工作, 常在负载前端接上瞬态电压抑制(TVS)二极管等防护器件进行限幅, 从而将干扰信号限制到负载能够承受的范围之内。为了验证限幅防护的效果, 常用的做法是进行实验测试, 但这需要耗费大量的人力、物力资源。因此, 研究高效的数值算法用于屏蔽腔内线缆端接 TVS 管电路电磁耦合的快速模拟, 验证 TVS 管对端接负

收稿日期: 2017-06-27; 改回日期: 2017-12-04; 网络出版: 2018-01-23

\*通信作者: 周海京 zhou\_haijing@iapcm.ac.cn

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1704082), 重庆邮电大学博士启动基金(A2016-88)

Foundation Items: The Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission (KJ1704082), The Doctor Start-up Funding of Chongqing University of Posts and Telecommunications (A2016-88)

载的限幅防护效果,有助于电子系统进行电磁防护设计。

采用数值算法模拟屏蔽腔内线缆端接 TVS 管电路的电磁耦合问题,涉及到空间电磁场辐射、线缆耦合以及负载电路传导干扰的复杂场路混合问题。文献中已研究了多种有效的数值方法,用于模拟这类复杂的场路混合问题,例如,电磁拓扑(EMT)理论, FDTD-SPICE 混合算法,高阶 FDTD 与节点电压法(MNA)的混合算法和 FDTD-TL 算法,等等。

EMT<sup>[1,2]</sup>常用于电子系统系统级的电磁干扰分析,其基本思想是建立系统传输线网络的 BLT 方程<sup>[3]</sup>并进行求解,从而得到线缆端接负载上的瞬态响应,但该方法只考虑电磁能量的单向传输且只适用于线性和时不变的负载。FDTD-SPICE 混合算法<sup>[4,5]</sup>是利用 FDTD<sup>[6]</sup>方法计算屏蔽腔内线缆周围的空间电磁场,并推导出线缆的 SPICE 等效电路模型,然后将空间电磁场和线缆等效电路模型引入到 SPICE 软件进行建模,仿真得到端接电路各元件上的瞬态响应。然而,该方法在建立线缆 SPICE 等效电路模型时需要用到大量的理论推导,且空间电磁场和电路瞬态响应是分开计算的,随着计算时间的增加,计算效率会急剧降低。高阶 FDTD 与节点电压法(MNA)的混合算法<sup>[7]</sup>用于模拟集总源激励传输线网络的电磁干扰问题。该算法将传输线网络按照置换定理分解成线缆和电路两部分,并分别采用高阶 FDTD 和 MNA 方法进行建模求解,计算得到电路各元件上的瞬态响应。然而,该方法为时域和频域的混合算法,对于宽频带问题,计算效率不高。而对于复杂电路, MNA 方法建立的矩阵将非常庞大,矩阵求解比较麻烦。FDTD-TL 算法<sup>[8,9]</sup>为本文前期的研究成果,其核心思想是通过 FDTD 方法模拟屏蔽腔内部空间电磁场分布,然后采用传输线方程建立线缆的场线耦合模型,从而求解出线缆和端接负载上的瞬态响应。该算法实现了空间电磁场和传输线瞬态响应的同步计算,但是只适用于端接线性负载的情况。另外,文献提出算法在对线缆进行建模时,均假定线缆的高度为数值算法所需剖分网格的倍数,以便于计算。然而,在实际应用中,线缆的高度可为任意值,即为非整网格高度。

因此,本文结合插值技术和牛顿迭代法,对 FDTD-TL 算法进行了改进,研究了一种新的时域混合算法,使其能够快速地模拟屏蔽腔内任意高度线缆端接 TVS 管电路的电磁耦合问题,实现空间电磁场与线缆和电路瞬态响应的同步计算,从而应用于屏蔽腔内线缆端接负载的限幅防护设计。

## 2 时域混合算法的基本理论

当线缆与屏蔽腔体之间的距离小于空间电磁场的最短波长时,线缆的辐射效应可以被忽略。因此,将电子系统物理模型分解成屏蔽腔外壳结构、线缆以及端接负载与 TVS 管的并联电路。STL 网格剖分技术是使用 FDTD 方法读取实体目标的 STL 格式文件(三角面元数据)自动生成六面体网格,实现实体目标在 FDTD 程序中的快速建模。该技术的具体实施过程可以由文献[10]获得,其网格剖分结果如图 1 所示。

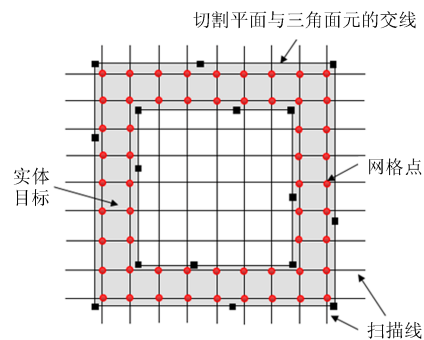


图 1 STL 网格剖分示意图

基于此,采用 FDTD 方法结合 STL 网格剖分技术,实现屏蔽腔外壳结构的快速建模以及腔体内部空间电磁场分布的准确模拟,结合插值技术,获得任意高度线缆的激励场。然后,利用传输线方程建立屏蔽腔内线缆的场线耦合模型,在每个 FDTD 时间步进上,将线缆激励场引入到传输线方程作为等效分布电压源和电流源项,采用 FDTD 方法的中心差分格式对传输线方程进行离散,迭代求解出线缆上的瞬态电压和电流响应。对于 TVS 管和负载组成的电路,列写电压电流方程,通过牛顿迭代法对方程进行求解,获得电路端口上的电压迭代公式,从而计算得到电路端口的瞬态电压响应。至此,实现了空间电磁场与线缆和电路瞬态响应的同步计算。

下面将从任意高度线缆的场线耦合模型和 TVS 管电路的传导干扰分析两个方面详细介绍该时域混合算法的实现过程。

### 2.1 任意高度线缆的场线耦合模型

空间电磁场对屏蔽腔内线缆的电磁耦合可以通过传输线方程<sup>[8]</sup>描述为

$$\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{V}(x, t) + \mathbf{L} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{I}(x, t) = \mathbf{V}_F(x, t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{I}(x, t) + \mathbf{C} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{V}(x, t) = \mathbf{I}_F(x, t) \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{L}$  和  $\mathbf{C}$  分别为线缆的单位长度电感和电容分

布参数矩阵,  $\mathbf{V}(x,t)$  和  $\mathbf{I}(x,t)$  分别表示线缆上的电压和电流向量。线缆分布参数  $\mathbf{L}$  和  $\mathbf{C}$  的计算公式可以参考文献[9]。 $\mathbf{V}_F(x,t)$  和  $\mathbf{I}_F(x,t)$  分别为传输线方程的等效分布电压源和电流源项, 可以表示为

$$\mathbf{V}_F(x,t) = -\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{E}_T(x,t) + \mathbf{E}_L(x,t) \quad (3)$$

$$\mathbf{I}_F(x,t) = -\mathbf{C} \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_T(x,t) \quad (4)$$

$E_T(x,t)$  和  $E_L(x,t)$  由空间电磁场计算得到, 可表示为

$$[\mathbf{E}_T(x,t)]_i = \int_0^{h_i} e_y^{ex}(x,y,z_i,t) dy \quad (5)$$

$$[\mathbf{E}_L(x,t)]_i = e_x^{ex}(x,h_i,z_i,t) - e_x^{ex}(x,0,z_i,t) \quad (6)$$

其中,  $i$  表示第  $i$  根线缆,  $h_i$  表示第  $i$  根线缆距离腔体壁的高度,  $e_x^{ex}$  和  $e_y^{ex}$  分别为线缆沿线的入射电场分量和垂直于线缆的入射电场分量, 如图 2 所示。可以看出, 等效分布源项只与入射电场有关, 而与线缆的散射电场无关。因此, 在模拟屏蔽腔内部空间电磁场分布时, 可以将线缆移除。

然而对于任意高度的线缆, 未必位于 FDTD 网格的棱边上, 如图 2 所示。对于非整网格高度的线缆, 需采用相应的插值方法获得线缆沿线的电场分量和邻近线缆的垂直电场分量。具体处理过程为: 线缆沿线的电场分量  $e_x^{ex}$  由周围棱边上的电场分量线性插值得到, 计算公式为:  $e_x^{ex} = (\Delta y_2 / \Delta y) E_{x1} + (\Delta y_1 / \Delta y) E_{x2}$ 。对于邻近线缆的垂直电场分量  $e_y^{ex}$ , 由网格棱边上的电场分量  $E_y$  插值得到, 计算公式为:  $e_y^{ex} = (\Delta y_2 / \Delta y) E_y$ 。然后由式(3)~式(6)即可计算得到传输线方程的等效分布源项。

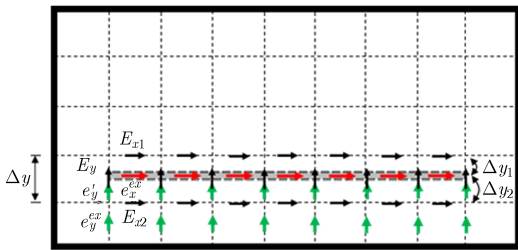


图2 线缆周围空间的电磁场分布

传输线方程建立之后, 采用 FDTD 的中心差分格式进行离散, 获得线缆上电压和电流响应的迭代公式。具体公式已在文献[8]中给出。

## 2.2 TVS 管电路的传导干扰分析

TVS 管与负载的并联电路如图 3 所示, 假定电路端口上的电压为  $U$ , 流入电路的总电流为  $I_L$ , TVS 管和负载支路(这里以电阻  $R$  代替)上的电流分别为  $I_1$  和  $I_2$ , 则

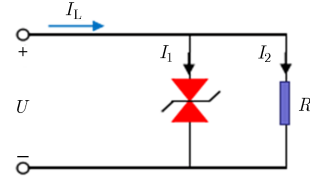


图3 TVS 管电路模型

$$I_L = I_1 + I_2 \quad (7)$$

TVS 管单向导通的端口电压和电流的伏安特性表示为

$$I_1 = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

其中,  $q$  为电子电量,  $k$  为波尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度。那么流过 TVS 管的电流  $I_1$  与电路端口上的电压  $U$  之间的关系表示为

$$I_1 = \begin{cases} I_0 \left[ \exp\left(\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right], & U \geq 0 \\ -I_0 \left[ \exp\left(-\frac{qU}{kT}\right) - 1 \right], & U < 0 \end{cases} \quad (9)$$

对于线缆终端, 无需考虑等效分布源项。对式(1)采用后向差分进行离散, 得

$$\frac{2}{\Delta x} \left( \frac{I_L^{n+1} + I_L^n}{2} - I^{n+\frac{1}{2}}(N-1) \right) + \frac{C}{\Delta t} (U^{n+1} - U^n) = 0 \quad (10)$$

将式(7)和式(9)代入式(10), 并采用牛顿迭代法进行求解, 获得终端电路端口电压响应的迭代公式为

$$U^{n+1} = \begin{cases} U^n - \frac{\frac{2}{\Delta x} \left[ I_0 \exp\left(\frac{qU^n}{kT}\right) - I_0 - I^{n+\frac{1}{2}} \left( N - \frac{1}{2} \right) + \frac{U^n}{R} \right]}{\frac{I_0 q}{\Delta x k T} \exp\left(\frac{qU^n}{kT}\right) + \frac{C}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x R}}, & U \geq 0 \\ U^n - \frac{\frac{2}{\Delta x} \left[ I_0 - I_0 \exp\left(-\frac{qU^n}{kT}\right) - I^{n+\frac{1}{2}} \left( N - \frac{1}{2} \right) + \frac{U^n}{R} \right]}{\frac{I_0 q}{\Delta x k T} \exp\left(-\frac{qU^n}{kT}\right) + \frac{C}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta x R}}, & U < 0 \end{cases} \quad (11)$$

### 3 数值模拟

首先,通过两个数值实例来验证该时域混合算法在计算任意高度线缆的场线耦合以及端接二极管瞬态响应方面的正确性,然后对 TVS 管用于屏蔽腔内线缆端接负载的限幅防护效果进行验证。

#### 3.1 时域混合算法的正确性验证

**算例 1** 屏蔽腔体内非整网格高度线缆的电磁耦合模型如图 4 所示,腔体长  $L_c = 40$  cm,宽  $W_c = 20$  cm,高  $H_c = 30$  cm,腔体壁厚度  $t_c = 5$  mm (FDTD 剖分网格为 5 mm)。腔体的上表面开有 3 条窄缝,缝的长和宽分别为 10 cm 和 1 cm。线缆长度为  $l = 30$  cm,高度  $h = 14$  mm,半径  $r = 2$  mm。线缆端接负载  $R_1$  和  $R_2$  的电阻值均为  $100 \Omega$ 。入射波为高斯脉冲,波形表达式为  $E_0(t) = \exp(-4\pi(t-t_0)^2/\tau^2)$ ,其中  $\tau = 2$  ns,  $t_0 = 0.8\tau$ 。利用时域混合算法计算负载  $R_2$  的瞬态电压响应,并与电磁场仿真软件 CST 2015 的计算结果进行对比。

图 5 给出了两种方法计算得到的负载  $R_2$  上的瞬态电压响应,可以看出,两者吻合得比较好,验证了该时域混合算法模拟屏蔽腔内非整网格高度线缆电磁耦合的正确性。

为了验证算法的高效性,对比该时域混合算法与单独使用 FDTD 算法计算所需的时间。这里, FDTD 算法采用了非均匀网格技术来提高计算效率。表 1 给出了两种算法在计算算例 1 时所需的网格大小以及计算相同时间步所耗费的时间,可以看

表 1 两种算法所需的网格大小和计算时间

算法	网格尺寸(mm)	计算时间(min)
FDTD	最小 2	86
	最大 5	
时域混合算法	5	15

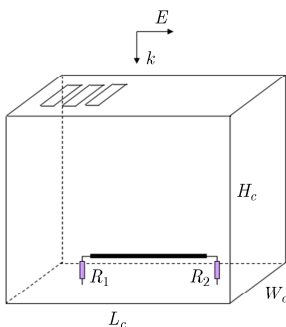


图 4 屏蔽腔体内非整网格高度线缆的电磁耦合模型

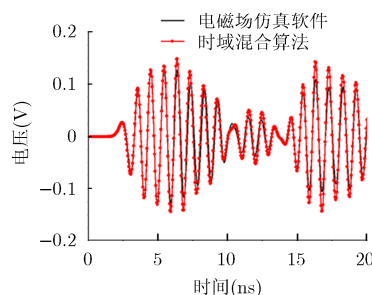


图 5 负载  $R_2$  上的电压响应

出,由于时域混合算法避免了对精细的线缆结构进行网格剖分,从而节省了大量的计算时间。

**算例 2** 屏蔽腔体内线缆端接正向导通二极管的电磁耦合模型如图 6 所示。屏蔽腔结构、入射波和线缆尺寸与算例 1 的相同。负载  $R_1$  的电阻值为  $100 \Omega$ ,二极管的伏安特性满足式(8),其中  $q = 1.6 \times 10^{-19}$  C,  $k = 1.3806505 \times 10^{-23}$  J/K,  $T = 100$  K。利用该时域混合算法计算二极管上的瞬态电压响应,并与电磁场仿真软件 CST 2015 的计算结果进行对比。

图 7 给出了两种方法计算得到的二极管端口的电压响应对比曲线,可以看出,两者吻合得比较好,验证了该时域混合算法模拟屏蔽腔内线缆端接二极管电磁耦合的正确性。

#### 3.2 TVS 管的限幅防护验证

同样地,选用上述屏蔽腔体模型作为数值实例,利用该时域混合算法模拟传输线端接负载接上 TVS 管的限幅防护效果,如图 8 所示。

TVS 二极管为双向导通二极管,TVS 二极管的伏安特性满足式(9),其中  $q, k$  和  $T$  的参数值与上述算例的相同。入射波和线缆尺寸同样与上述算例相同,负载  $R_1$  和  $R_2$  的电阻值分别为  $100 \Omega$  和  $150 \Omega$ 。利用该时域混合算法,计算得到负载  $R_2$  两端接上 TVS 二极管前后的瞬态电压响应,如图 9 所示。可以看出,接上 TVS 管之后,进入负载的干扰信号电压被限制在了  $\pm 0.1$  V 以内,从而验证了该时域混合算法可以很好地应用于 TVS 管对屏蔽腔内线缆端接负载的限幅防护设计。

### 4 结论

本文结合插值技术和牛顿迭代法,对 FDTD-TL 算法进行改进,提出了一种新的时域混合算法,使其能够解决复杂电磁环境下屏蔽腔内任意高度线缆端接 TVS 管电路的电磁耦合问题。该时域混合算法能够实现了空间电磁场与任意高度线缆和 TVS

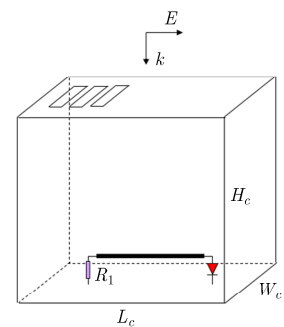


图 6 屏蔽腔内线缆端接二极管的电磁耦合模型

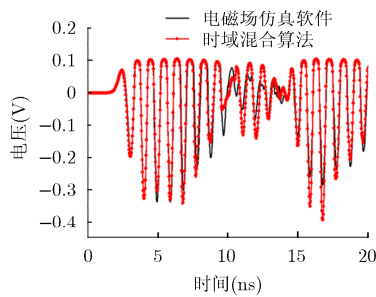


图7 二极管两端的电压响应

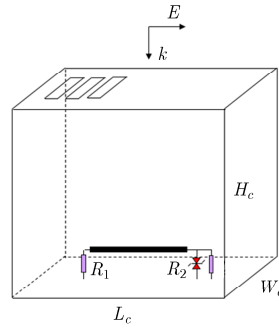
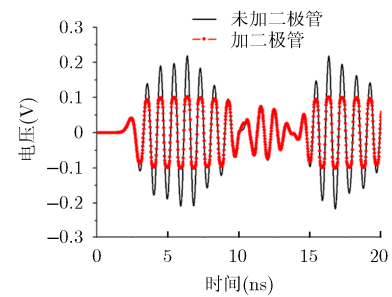


图8 屏蔽腔内线缆终端接上 TVS 管的电磁耦合模型

图9 接上 TVS 管前后的负载  $R_2$  上的电压响应

管电路瞬态响应的同步计算，且避免了对线缆精细结构的建模。通过相应算例的数值模拟表明，该时域混合算法能够很好地应用于工程上对屏蔽腔内线缆终端接负载的限幅防护设计。

### 参考文献

- [1] NODA T and KIKUMA T. A robust and efficient iterative scheme for the EMT simulations of nonlinear circuits[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(2): 1030-1038. doi: 10.1109/TPWRD.2010.2091288.
- [2] NIU B, SONG Z X, GENG Y S, *et al.* Electromagnetic topology analysis on relation between electromagnetic interference inside equipment and external electrostatic discharge[C]. *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Singapore, 2008: 815-818.
- [3] XIE Li and LEI Yinzhao. Transient response of a multiconductor transmission line with nonlinear terminations excited by an electric dipole[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, 51(3): 805-810. doi: 10.1109/TEMC.2009.2023327.
- [4] YUAN Keliang, WANG Jianguo, XIE Haiyan, *et al.* SPICE model of a single twisted-wire pair illuminated by a plane wave in free space[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(30): 574-583. doi: 10.1109/TEMC.2015.2392852.
- [5] XIE Haiyan, DU Taijiao, ZHANG Maoyu, *et al.* Theoretical and experimental study of effective coupling length for transmission lines illuminated by HEMP[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(6): 1529-1538. doi: 10.1109/TEMC.2015.2463814.
- [6] XIONG Run, CHEN Bin, MAO Yunfei, *et al.* A simple local approximation FDTD model of short apertures with a finite thickness[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 131: 135-152. doi: 10.2528/PIER12072201.
- [7] 王为, 覃宇建, 刘培国, 等. 基于高阶时域有限差分法与改进节点分析法混合求解复杂传输线网络瞬态响应[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(12): 2999-3005. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00160.
- [8] WANG Wei, QIN Yujian, LIU Peigu, *et al.* The solution of transient response for complex transmission line network by hybrid higher order finite difference time domain-modified nodal analysis method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2999-3005. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00160.
- [9] YE Zhihong, XIONG Xiangzheng, LIAO Cheng, *et al.* A hybrid method for electromagnetic coupling problems of transmission lines in cavity based on FDTD method and transmission line equation[J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2015, 42: 85-93. doi: 10.2528/PIERM15032605.
- [10] YE Zhihong, XIONG Xiangzheng, ZHANG Min, *et al.* A novel time domain hybrid method for coupling problems of long cables excited by electromagnetic pulses[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(6): 1710-1716. doi: 10.1109/TEMC.2016.2587904.
- [11] 陈伶俐, 周海京, 李瀚宇, 等. 并行时域有限差分法网格自动剖分技术[J]. *西南交通大学学报*, 2013, 48(4): 776-782. doi: 10.3969/j.issn.0258-2724.2013.04.028.
- [12] CHEN Linglu, ZHOU Haijing, LI Hanyu, *et al.* Cartesian mesh generator for parallel finite-difference time-domain method[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2013, 48(4): 776-782. doi: 10.3969/j.issn.0258-2724.2013.04.028.

叶志红：男，1988年生，讲师，研究方向为电磁兼容和计算电磁学等。

周海京：男，1970年生，研究员，研究方向为系统级电磁环境效应及数值模拟等。

刘 强：男，1987年生，助理研究员，研究方向为系统级电磁环境效应等。