

## 传输线端接复杂电路的电磁耦合时域分析方法

叶志红\* 苟丹 吴小林 周健健

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

**摘要:** 该文基于时域有限差分(FDTD)方法和传输线方程, 结合Ngspice软件, 提出一种高效的时域混合算法, 能够快速模拟空间电磁场作用传输线端接复杂电路的电磁耦合问题。该算法的优势在于实现了空间电磁场辐射与端接复杂电路瞬态响应的协同计算, 且避免了对传输线和复杂电路结构的直接建模。首先, 将复杂电路通过传输线的特性阻抗进行等效, 采用FDTD方法结合传输线方程, 求解得到特性阻抗上的入射电流响应。然后, 在每个时间步上, 将该电流引入复杂电路作为激励源, 联合电路模型建立网表文件。最后, 使用Ngspice软件读取网表文件, 并仿真得到电路各元件上的瞬态响应。通过相应计算实例的数值模拟, 与电磁场仿真软件CST的计算结果以及耗用内存和时间进行对比, 验证了算法的正确性和高效性。

**关键词:** 传输线; 复杂电路; FDTD方法; 传输线方程; Ngspice软件

中图分类号: O441

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)01-0242-07

DOI: [10.11999/JEIT191026](https://doi.org/10.11999/JEIT191026)

## Time Domain Analysis Method for the Coupling Problem of Transmission Lines Terminated with Complex Circuits

YE Zhihong GOU Dan WU Xiaolin ZHOU Jianjian

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** An efficient time domain hybrid method is presented consisting of Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method, Transmission Line (TL) equations, and Ngspice software to be well applied to the coupling analysis of transmission lines terminated with complex circuits excited by space electromagnetic fields. The significant features of this presented method are that it can realize the co-calculation of electromagnetic field radiation and transient responses on the lines and complex circuits, and avoid modeling the structures of transmission lines and circuits directly. Firstly, the complex circuits are replaced by the characteristic impedances of corresponding transmission lines, and then the FDTD method combined with TL equations is adopted to solve the incident currents on these impedances. Secondly, the incident currents are introduced into the complex circuits as excitation sources at each time step of FDTD simulation, which are combined with the circuits to form the netlist files. Finally, transient responses on the elements of circuits are obtained by using the Ngspice software. Numerical simulations are utilized to verify the correctness and efficiency of this hybrid method by comparing with the electromagnetic software CST in simulation results and consumptions of memories and computation time.

**Key words:** Transmission lines; Complex circuits; Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method; Transmission line equations; Ngspice software

收稿日期: 2019-12-23; 改回日期: 2020-10-27; 网络出版: 2020-11-16

\*通信作者: 叶志红 yezh@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701057), 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2017jcyjAX0345)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61701057), The Chongqing Research Program of Basic Research and Frontier Technology(cstc2017jcyjAX0345)

### 1 引言

随着通信技术和微电子技术的快速发展，新的电磁频谱不断引入，空间电磁环境变得越来越复杂。空间电磁场作用电子设备，会通过设备中的传输线产生干扰信号，进而对端接电路造成干扰，影响电路的正常工作。因此，模拟和分析空间电磁场对传输线端接复杂电路的电磁耦合效应，可为电子设备的电磁防护提供理论和数据支撑。

针对传输线端接复杂电路的电磁耦合分析方法，国内外学者已开展了大量的研究。首先，最直接的求解方法是全波算法。文献[1]通过推导3维集总元件的FDTD迭代公式，实现了对微带低通滤波器与非线性混合电路的全波分析。但是，该方法需要对微带线结构的滤波器直接建模，而且针对不同的电路，则需重新推导FDTD迭代公式，通用性不强。为此，国内外学者研究了多种场路混合算法，以避免对传输线和复杂电路的直接建模。其中，最具代表性的方法有BLT方程<sup>[2-5]</sup>、FDTD-SPICE方法<sup>[6-10]</sup>和FDTD-TL算法<sup>[11-13]</sup>，等等。

传统的BLT方程是一种频域方法，只适用于传输线终端为线性和时不变负载的情况。因此，文献[14,15]提出了时域BLT方程，用于求解传输线端接非线性负载的瞬态响应。但是，该方法需要用到大量的卷积计算，而且需要求解非线性矩阵方程来获得时域反射系数，计算效率不高。FDTD-SPICE方法是一种经典的全波算法与电路分析方法相结合的场路混合时域算法，其通过FDTD方法<sup>[16-18]</sup>计算

传输线的激励场，并作为附加电压源引入到SPICE软件，联合传输线端接电路构建SPICE等效电路模型，再利用SPICE软件仿真得到电路上的瞬态响应。但是，该算法计算效率不高，是因为其将空间电磁场与电路响应计算分开处理。

FDTD-TL算法是本文前期研究成果，同样是一种时域方法，其首先通过FDTD方法模拟传输线周围空间的电磁场分布，并在每个时间步上引入传输线方程作为等效分布源项。然后，采用FDTD方法的中心差分格式离散传输线方程，求解得到传输线及其端接负载上的瞬态响应。相较于其他算法，该方法的优势在于实现了空间电磁场辐射与传输线瞬态响应的同步计算。但是，目前该方法只能模拟传输线端接线性电路的电磁耦合问题。

因此，本文将基于FDTD-TL算法，结合Ngspice软件求解复杂电路瞬态响应的优势，研究一种高效的时域混合算法，快速模拟传输线端接复杂电路的电磁耦合，并实现空间电磁场辐射与复杂电路瞬态响应的协同计算。

### 2 时域混合算法理论

时域混合算法用于传输线端接复杂电路电磁耦合计算的实施步骤(见图1)为：(1) 通过CAD软件绘制去除传输线之后的理想导电板物理模型，保存为STL格式文件；(2) 将该STL格式文件导入FDTD仿真程序，实现对理想导电板的网格剖分，并利用FDTD方法计算得到传输线周围空间的电磁场分布；(3) 根据传输线的单位长度分布参数，求取传

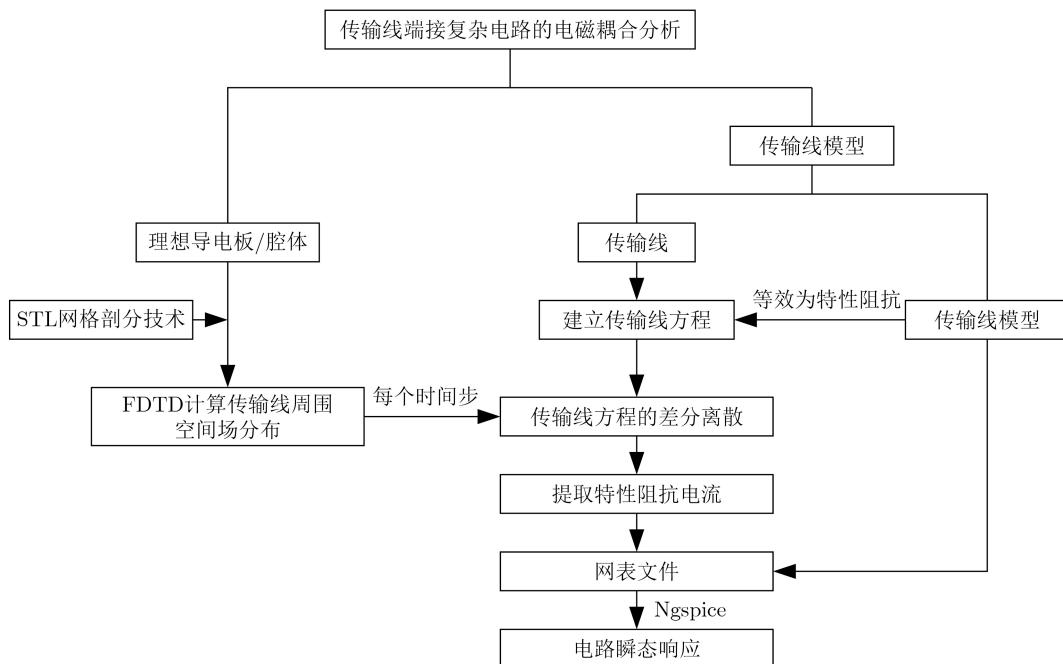


图1 时域混合算法的实施步骤

输线的特性阻抗,并替换复杂电路加载到传输线端口;(4)使用传输线方程,构建电磁波作用传输线的电磁耦合模型,并对传输线方程采用FDTD方法的中心差分格式进行离散,迭代求解得到特性阻抗端口上的电流响应;(5)在每个时间步上,提取特性阻抗上的电流加载到复杂电路作为激励源,连同复杂电路构建网表文件,然后通过Ngspice软件读取网表文件并仿真得到电路各个元件上的瞬态响应。

下面将从复杂电路激励源提取与电路传导干扰的Ngspice仿真两方面详细介绍时域混合算法的具体实施过程。

## 2.1 基于FDTD-TL算法的复杂电路激励源提取

理想导电板上多导体传输线端接复杂电路的物理模型,如图2所示。当传输线距导电板的高度小于空间电磁场的最小波长时,传输线的辐射效应可以忽略。此时,空间电磁场作用多导线的电磁耦合可以通过传输线方程描述为

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

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

其中,  $\mathbf{V}(y,t)$ 和 $\mathbf{I}(y,t)$ 分别为多导线的电压和电流向量,  $\mathbf{L}$ 和 $\mathbf{C}$ 分别为多导线单位长度的电感和电容参数矩阵,  $\mathbf{V}_F(y,t)$ 和 $\mathbf{I}_F(y,t)$ 分别为等效分布电压源和电流源项,可以表示为

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

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

其中,  $\mathbf{E}_T(y,t)$ 和 $\mathbf{E}_L(y,t)$ 为多导线激励场,可以描述为

$$\mathbf{E}_T(y,t) = \int_0^h e_z^{\text{ex}}(x,y,z,t) dy \quad (5)$$

$$\mathbf{E}_L(y,t) = e_y^{\text{ex}}(x,h,z,t) - e_y^{\text{ex}}(x,0,z,t) \quad (6)$$

其中,  $h$ 表示多导线距离导电板的高度,  $e_z^{\text{ex}}$ 和 $e_y^{\text{ex}}$ 分别表示由FDTD方法计算得到的多导线垂直方向和沿线切向的入射电场分量,那么 $\mathbf{E}_T$ 表示从导电板到多导线位置处的垂直电场分量的沿线积分,而 $\mathbf{E}_L$ 表示多导线位置处的切向电场分量与导电板表面的切向电场分量(对于导电板,该项为0)之差。由于 $\mathbf{E}_T$ 和 $\mathbf{E}_L$ 与多导线的散射场无关,因此,使用FDTD方法计算多导线激励场时,可以将多导线移除。

建立好传输线方程之后,采用FDTD方法对其进行差分离散,从而迭代求解得到多导线上的电压和电流响应,称为FDTD-TL算法。需要说明的是,多导线端接负载上的电压不满足中心差分格式,需采用前向或后向差分进行离散。如图3所示,以多导线终端负载为例,假定多导线按照FDTD网格划分成 $N$ 段,对终端负载上的电压 $V_N$ 采用后向差分表示为

$$\frac{1}{\Delta y/2} \left( \frac{I_L^{n+1} + I_L^n}{2} - I_{N-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \right) + \mathbf{C} \frac{V_N^{n+1} - V_N^n}{\Delta t} = 0 \quad (7)$$

当终端负载为电阻时,流过电阻的电流 $I_L$ 可以通过欧姆定律表示为 $I_L = V_N/R_L$ ,代入式(7)即可获得终端负载电压的迭代公式。但是,当终端负载为包含非线性器件的复杂电路时,直接获取电路端口电压和电流的伏安关系非常困难。为了分析电磁波通过传输线耦合产生的干扰信号在复杂电路上的响应,可以先获取电路端口的入射电流,然后再结合电路分析方法进行模拟。因此,将复杂电路通过与之相连导线的特性阻抗进行等效,这样根据式(7)计算得到的特性阻抗上的电流即为流入电路的入射电流。对于多导线的每根导线,对应的特性阻抗可以通过相应导线的自电感和自电容计算得到,即 $Z_{0i} = \sqrt{L_{ii}/C_{ii}}$ ,其中,  $i$ 表示第 $i$ 根导线,  $Z_{0i}$ 表示第 $i$ 根导线的特性阻抗,  $L_{ii}, C_{ii}$ 分别表示第 $i$ 根导线的单位长度自电感和自电容,计算公式为

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(2h_i/a_i) \quad (8)$$

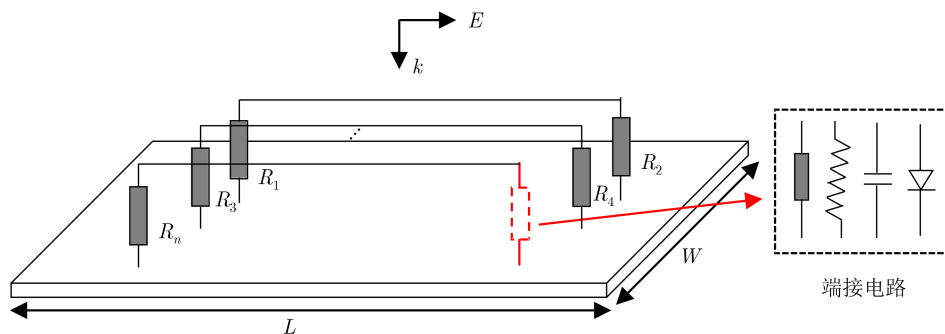


图2 导电板上多导线端接复杂电路的物理模型

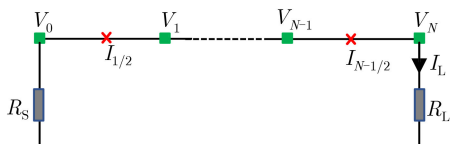


图3 传输线的FDTD网格划分

$$C_{ii} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(2h_i/a_i)} \quad (9)$$

其中， $h_i$ 和 $a_i$ 分别表示第 $i$ 根导线的距地高度和半径； $\mu_0$ 和 $\epsilon_0$ 分别表示自由空间的磁导率和介电常数。

### 2.2 电路传导干扰的Ngspice仿真

将计算得到的特性阻抗上的电流加载到复杂电路端口作为激励源，如图4所示。使用Ngspice软件对电路的传导干扰进行仿真分析，具体的实施步骤为：首先，将激励源与复杂电路联合建立网表文件并保存为cir格式；然后，在FDTD的每个时间步上采用计算得到的入射电流数据替换cir文件中的源项数据；最后，调用Ngspice软件读取cir文件，从而仿真得到电路各元件上的瞬态电压响应，实现了空间电磁场辐射与电路瞬态响应的协同计算。

### 3 数值模拟

采用时域混合算法，对多导线端接复杂线性电路和非线性电路的电磁耦合进行仿真分析，并与CST CS工作室的仿真结果进行对比，验证时域混合算法的正确性和高效性。

**算例1** 平面波作用理想导电板上端接复杂集

总电路的多导体传输线模型，如图5所示。理想导电板的长度和宽度分别为 $L=60$  cm,  $W=20$  cm, 厚度为1 cm。4根传输线平行放置在导电板上，长度为40 cm, 半径为1 mm, 距离导电板的高度为1 cm, 相邻两线间距为1 cm。传输线端接负载 $R_1 \sim R_7$ 均为179.66  $\Omega$ , 端接复杂电路的元件参数值为： $R_{r1} = R_{r2} = R_{r6} = R_{r7} = 150 \Omega$ ,  $R_{r3} = R_{r4} = 50 \Omega$ ,  $R_{r5} = 100 \Omega$ , 电容大小为1 pF, 电感为1 nH。入射波为高斯脉冲垂直照射多导线，波形表达式为 $E_0 \exp(-4\pi(t-t_0)^2/\tau^2)$ ，其中幅度为 $E_0=1000$  V/m,  $t_0=1.6$  ns,  $\tau=2.0$  ns。

图6给出了时域混合算法和CST仿真软件，模拟得到的复杂电路电阻元件 $R_{r2}$ 上的电压响应对比曲线。可以看出，两种方法的计算结果吻合得比较好，验证了时域混合算法的正确性。同时，表1给出了两种方法计算所需内存大小以及耗用时间的对比。可以看出，时域混合算法避免了对传输线及端接电路的直接剖分，相较于CST，节省了大量的内存需求和一定的计算时间，验证了算法的高效性。

**算例2** 图7为平面波作用理想导电板上端接复杂非线性电路的多导体传输线模型。理想导电板尺寸、入射波以及多导线结构参数均与算例1中相同。同样地，传输线端接负载 $R_1 \sim R_7$ 均为179.66  $\Omega$ 。非线性电路的元件参数值为： $R_{l1}$ ,  $R_{l2}$ 和 $R_{l3}$ 为电阻，阻值分别为180  $\Omega$ , 100  $\Omega$ 和100  $\Omega$ 。电容 $C_1$ 和

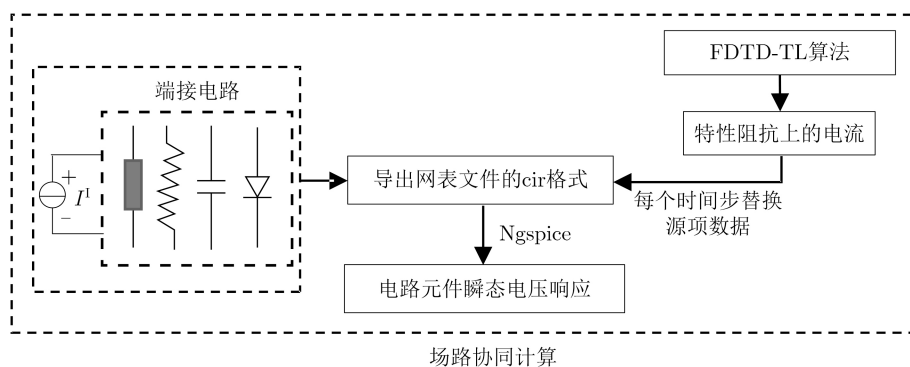


图4 电路传导干扰的Ngspice仿真过程

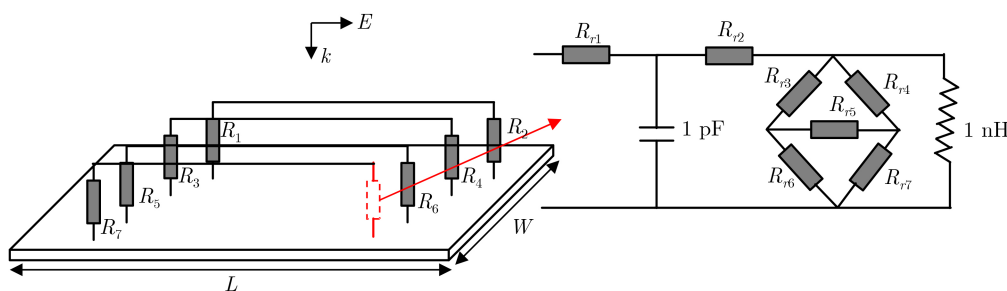


图5 理想导电板上端接复杂集总电路的多导体传输线模型

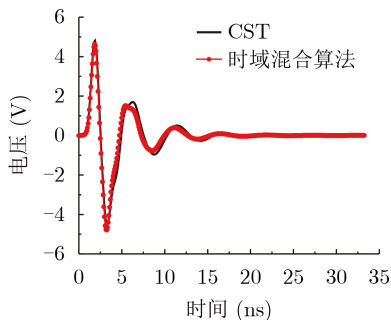


图6 集总电路中电阻 $R_{72}$ 的瞬态电压响应

表1 两种方法计算所需内存和时间的对比

方法	内存(MB)	计算时间(s)
CST	125.8	480
时域混合算法	25.5	400

$C_2$ 均为1 pF, 电感为1 nH。D是型号为D1N4376的二极管, 其饱和电流 $I_s$ 为 $8.578900 \times 10^{-10}$  A, 寄生串联电阻 $R_s$ 为 $2.53577 \Omega$ , 发射系数 $N$ 为1.88811, PN结电势为0.75 V。

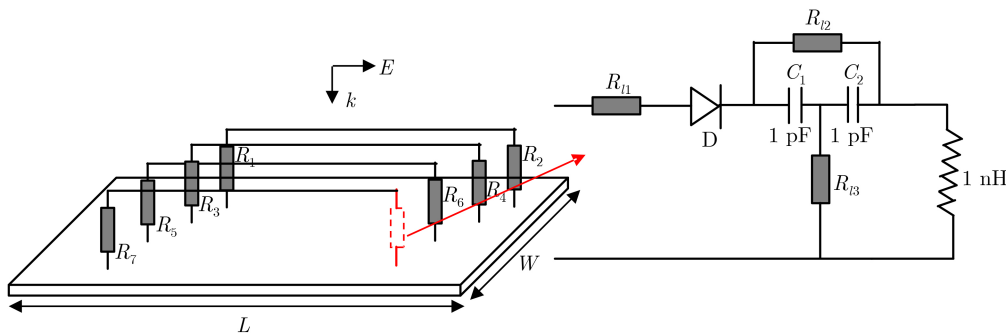


图7 理想导电板上端接复杂非线性电路的多导体传输线模型

图8给出了时域混合算法和CST仿真软件, 模拟得到的复杂电路电阻元件 $R_{l2}$ 上的电压响应对比曲线。可以看出, 虽然两种方法的计算结果在幅值上存在一些偏差, 但是曲线的变化趋势和峰值基本保持一致, 验证了时域混合算法处理复杂非线性电路的正确性。

**算例3** 为了验证该时域混合算法, 模拟非平面波作用传输线端接复杂电路电磁耦合的正确性, 将算例1的传输线端接复杂集总电路模型放置于屏蔽腔内, 如图9所示。屏蔽腔的尺寸为 $L = 60$  cm,  $W = 20$  cm,  $H = 50$  cm, 厚度为1 cm。腔体的顶部开有一条矩形缝隙, 尺寸为 $10$  cm  $\times$   $2$  cm。入射波同样为高斯脉冲, 垂直照射屏蔽腔, 波形与算例1的相同。

时域混合算法与CST仿真软件模拟得到的复杂电路中电阻元件 $R_{g2}$ 上的电压响应对比曲线, 如图10所示。可以看出, 时域混合算法与CST的计算结果能够保持良好的一致性, 进一步证明了该时域

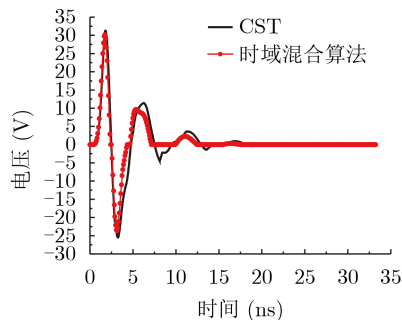


图8 非线性电路电阻 $R_{l2}$ 的瞬态电压响应

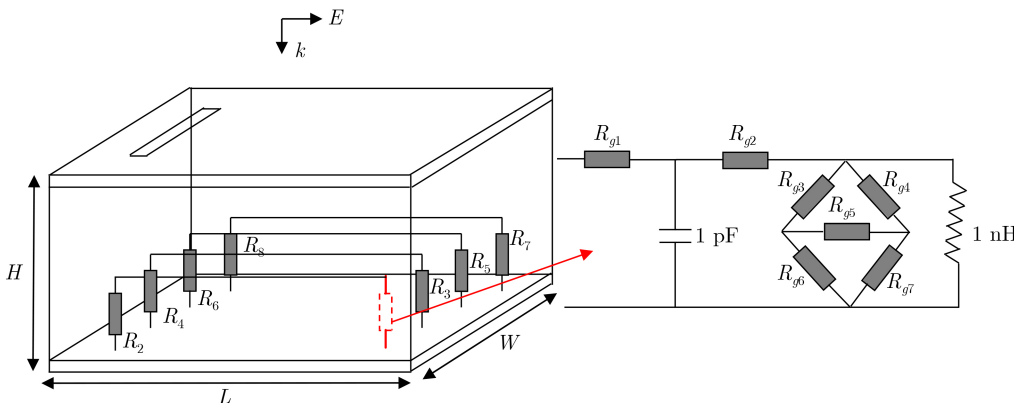


图9 屏蔽腔内端接复杂集总电路的多导体传输线模型

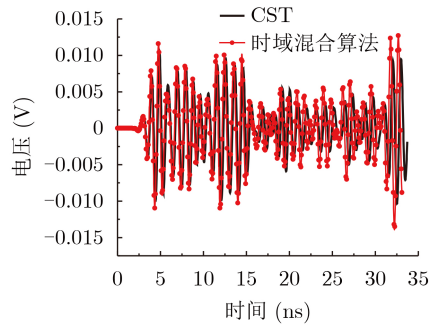


图 10 屏蔽腔内集总电路电阻 $R_{g2}$ 的瞬态电压响应

混合算法在处理复杂电磁环境下传输线端接复杂电路电磁耦合的正确性。

#### 4 结束语

本文将FDTD方法与传输线方程和Ngspice软件结合起来, 研究了一种高效的时域混合算法, 能够快速模拟空间电磁场作用传输线端接复杂电路的电磁耦合问题, 并实现空间电磁场辐射与复杂电路瞬态响应的协同计算。首先, 将传输线端接复杂电路通过特性阻抗进行等效, 结合FDTD方法和传输线方程, 提取特性阻抗上的电流响应作为复杂电路的激励源。然后, 在每个时间步上, 将该激励源与复杂电路联合构建网表文件。最后, 通过Ngspice软件调用网表文件仿真得到电路各元件的瞬态响应。数值仿真表明, 该时域混合算法所得电路元件瞬态电压与CST仿真结果基本一致, 且占用内存和计算时间少, 验证了算法的正确性和高效性。

#### 参 考 文 献

- [1] MEI Yicai, WU Xianliang, HUANG Zhixiang, *et al.* Simulation of nonlinear hybrid circuit by FDTD[C]. 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Shenzhen, China, 2012: 1–3. doi: [10.1109/ICMMT.2012.6230408](https://doi.org/10.1109/ICMMT.2012.6230408).
- [2] LI Fulin, HAN Jihong, and ZHANG Chang. Calculation of the electromagnetic pulse effect based on integral equation equivalent circuit and electromagnetic topology[C]. The 3rd IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, Chongqing, China, 2018: 246–250. doi: [10.1109/IAEAC.2018.8577741](https://doi.org/10.1109/IAEAC.2018.8577741).
- [3] 任丹, 杜平安, 陈珂, 等. 基于模式匹配及BLT方程的腔体内场线耦合计算方法研究[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 2014–2018. doi: [10.11999/JEIT161101](https://doi.org/10.11999/JEIT161101).  
REN Dan, DU Pingan, CHEN Ke, *et al.* Analytic method based on mode matching and BLT equation for field to wire coupling in an enclosure[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 2014–2018. doi: [10.11999/JEIT161101](https://doi.org/10.11999/JEIT161101).
- [4] 王怡, 张馨丹, 甄琦, 等. 平面波照射下贯通导线电磁干扰快速算法[J]. 电波科学学报, 2019, 34(4): 429–435. doi: [10.13443/j.cjors.2018111902](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2018111902).
- [5] WANG Yi, ZHANG Xindan, ZHEN Qi, *et al.* Fast algorithm of plane wave coupling to transmission lines penetrating through metallic enclosure[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2019, 34(4): 429–435. doi: [10.13443/j.cjors.2018111902](https://doi.org/10.13443/j.cjors.2018111902).
- [6] YAN Liping, ZHANG Xindan, ZHAO Xiang, *et al.* A fast and efficient analytical modeling approach for external electromagnetic field coupling to transmission lines in a metallic enclosure[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 50272–50277. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2867686](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2867686).
- [7] XIE Haiyan, WANG Jianguo, FAN Ruyun, *et al.* A hybrid FDTD-SPICE method for transmission lines excited by a nonuniform incident wave[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2009, 51(3): 811–817. doi: [10.1109/TEMC.2009.2020913](https://doi.org/10.1109/TEMC.2009.2020913).
- [8] XIE Haiyan, WANG Jianguo, FAN Ruyun, *et al.* SPICE models for prediction of disturbances induced by nonuniform fields on shielded cables[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(1): 185–192. doi: [10.1109/TEMC.2010.2045895](https://doi.org/10.1109/TEMC.2010.2045895).
- [9] CHEN Hongcai, DU Yaping, YUAN Mengqing, *et al.* Lightning-induced voltages on a distribution line with surge arresters using a hybrid FDTD-SPICE method[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2018, 33(5): 2354–2363. doi: [10.1109/TPWRD.2017.2788046](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2788046).
- [10] FUJITA K and NAMIKI T. FDTD-SPICE direct linking simulation of transient fields caused by electrostatic discharge[C]. 2013 International Symposium on Electromagnetic Theory, Hiroshima, Japan, 2013: 112–115.
- [11] FUJITA K. Numerical modeling of ESD events including both charging and discharging processes with FDTD-SPICE direct linking solver[C]. 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo, Japan, 2014: 17–20.
- [12] YE Zhihong, ZHOU Jianjian, GOU Dan, *et al.* Coupling analysis of ambient wave to the shielded cavity with penetrated wire using a time domain hybrid method[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2019, 61(11): 2551–2556. doi: [10.1002/MOP.31918](https://doi.org/10.1002/MOP.31918).
- [13] YE Zhihong, LIAO Cheng, WANG Yang, *et al.* Notice of retraction: A hybrid method for the coupling analysis of unequal length MTLs with arbitrary heights based on FDTD-TL method[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, 61(3): 954–961. doi: [10.1109/TEMC.2018.2836349](https://doi.org/10.1109/TEMC.2018.2836349).
- [14] 叶志红, 周海京, 刘强. 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[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 1007–1011. doi: [10.11999/JEIT170615](https://doi.org/10.11999/JEIT170615).
- [15] YE Zhihong, ZHOU Haijing, and LIU Qiang. Time domain

- coupling analysis for the arbitrary height cable terminated with TVS circuit in shield cavity[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 1007–1011. doi: [10.11999/JEIT170615](https://doi.org/10.11999/JEIT170615).
- [14] TESCHE F M. On the analysis of a transmission line with nonlinear terminations using the time-dependent BLT equation[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 49(2): 427–433. doi: [10.1109/TEMC.2007.897141](https://doi.org/10.1109/TEMC.2007.897141).
- [15] TESCHE F M. Development and use of the BLT equation in the time domain as applied to a coaxial cable[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 49(1): 3–11. doi: [10.1109/TEMC.2006.888184](https://doi.org/10.1109/TEMC.2006.888184).
- [16] MAI Huanxiao, CHEN Juan, and ZHANG Anxue. A hybrid algorithm based on FDTD and HIE-FDTD methods for simulating shielding enclosure[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(5): 1393–1399. doi: [10.1109/TEMC.2017.2771413](https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2771413).
- [17] INOUE Y and ASAI H. Efficient electromagnetic simulation of PCB with SPICE elements by using HIE-FDTD method[C]. 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, Singapore, 2018: 893–896. doi: [10.1109/ISEMC.2018.8393910](https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8393910).
- [18] 许杰, 徐珂, 黄志祥. 一种新型的高阶时域有限差分方法[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(2): 425–429. doi: [10.11999/JEIT190050](https://doi.org/10.11999/JEIT190050).
- XU Jie, XU Ke, and HUANG Zhixiang. A new high order finite difference time domain method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(2): 425–429. doi: [10.11999/JEIT190050](https://doi.org/10.11999/JEIT190050).
- 叶志红: 男, 1988年生, 副教授, 研究方向为电磁兼容和计算电磁学等.
- 苟 丹: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为电磁兼容等.
- 吴小林: 男, 1983年生, 讲师, 研究方向为电力线通信、智能电网、统计与自适应信号处理和机器学习系统.
- 周健健: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为电磁兼容等.

责任编辑: 马秀强