

## 立体弯折线缆线束电磁耦合分析的时域混合算法

叶志红\* 鲁唱唱 张 玉

(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

**摘要:** 受复杂系统布线空间的制约, 线缆通常为线束结构, 并呈现弯折和空间立体分布形态。目前, 针对立体弯折线缆线束(BSCs)的电磁耦合, 仍缺乏高效的时域建模分析方法。因此, 该文基于时域有限差分(FDTD)方法和传输线(TL)方程, 提出自适应线缆网格技术, 结合高效插值技术和电荷守恒定律, 研究了一种高效的时域混合算法, 实现立体弯折线缆线束的电磁耦合时域快速同步计算。首先, 将立体弯折线束整体结构按照弯折节点分解成多段独立的子线束。然后, 基于传输线方程和FDTD方法, 结合自适应线缆网格技术和插值技术, 构建各段空间立体分布的子线束电磁耦合模型, 并求解得到线束沿线各点的瞬态响应。最后, 根据电荷守恒定律, 构建弯折节点的等效电路模型并求解得到节点处的电压, 实现各段子线束之间的干扰信号传输。通过理想导电板上和屏蔽机箱内立体弯折线束电磁耦合的数值模拟, 从计算精度和耗用时间方面与CST和FDTD-SPICE的仿真结果进行对比, 验证所提方法的正确性和高效性。

**关键词:** 立体弯折线缆线束; 自适应线缆网格技术; 插值技术; 电荷守恒; 时域有限差分与传输线方程的混合算法  
**中图分类号:** TM15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2023)12-4345-07

**DOI:** 10.11999/JEIT221320

## Time Domain Hybrid Algorithm for the Coupling Analysis of Harness Cable with Bent and Stereoscopic Configurations

YE Zhihong LU Changchang ZHANG Yu

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

**Abstract:** Restricted to the spatial layout of complex systems, the cables used in these systems are usually harness structures, and have bent and stereoscopic configurations. At present, efficient time-domain modeling and analysis methods for the coupling of harness cable with Bent and Stereoscopic Configurations (BSCs) are still rare. Therefore, an efficient time-domain hybrid method, consisting of the Finite Difference Time Domain (FDTD) method, Transmission Line (TL) equations, adaptive cable mesh technique, interpolation techniques and charge conservation law, is studied to achieve the fast and synchronous calculations of space electromagnetic field radiation and the coupling responses of harness cable with BSCs. Firstly, the structure of the harness cable with BSCs is decomposed into multiple independent sub harness cable according to the bending nodes. Then, the coupling model of each sub harness cable is constructed by the TL equations, in which the adaptive cable mesh technique and some interpolation techniques are employed to compute the distribution sources of the TL equations, and the FDTD is applied to solve the transient responses on the sub harness cable. Finally, the equivalent circuit model of the bending nodes are constructed by the charge conservation law, and the voltages at the nodes are solved and fed back to these sub harness cables to realize the interference signal transmission between these cables. To verify the accuracy and efficiency of the proposed method, two coupling problems of the harness cable with BSCs in the environments of free space and shielding enclosure are solved by this method, CST and Finite Difference Time Domain-Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (FDTD-SPICE) method, which are compared in the calculation precision and time consumption.

收稿日期: 2022-10-20; 改回日期: 2023-03-13; 网络出版: 2023-03-20

\*通信作者: 叶志红 yezh@cqupt.edu.cn

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目(CYS21297)

Foundation Item: The Graduate Scientific Research Innovation Project of Chongqing (CYS21297)

**Key words:** Harness cable with Bent and Stereoscopic Configurations(BSCs); Adaptive cable mesh technique; Interpolation techniques; Charge conservation law; Finite Difference Time Domain-Transmission Line equation (FDTD-TL) method

## 1 引言

随着电子系统工作频率的不断提高, 各类设备的高度集成化致使线缆必须压缩敷设空间, 使得立体弯折线缆线束(Bent and Stereoscopic Configurations, BSCs)成为电子系统中常见的一种线缆形态。空间强电磁骚扰源作用到电子系统中的弯折线缆线束, 将耦合产生干扰信号并传播至端接敏感设备, 造成设备工作信号失真、误码等故障。因此, 针对立体弯折线缆线束的电磁耦合, 开展高效时域建模分析方法研究, 可为电子系统的电磁防护设计提供理论依据。

为了简化线缆线束的电磁干扰建模与分析过程, 国内外学者提出了线束等效建模方法(Equivalent Cable Bundle Method, ECBM)<sup>[1-3]</sup>。该方法通过比较复杂线束终端阻抗与其特征阻抗的大小关系, 将复杂线束等效成不超过4根导线的简化模型, 并利用多导体传输线理论获得线束简化模型的横截面结构参数和终端等效负载。一些学者在ECBM方法的基础上, 与时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)方法等数值算法相结合, 应用于汽车等领域的线缆线束开展串扰与辐射敏感度的预测研究<sup>[4]</sup>。虽然ECBM大大降低了线缆线束的建模复杂度, 但是已知线束端接负载大小是使用ECBM方法的必备条件, 而在实际工程中, 线束端接负载难以直接获得。另外, 尚未见ECBM用于弯折线缆线束电磁耦合计算的研究报道。

根据弯折线束的结构特点, 可将其看成由多段子线束组成的传输线网络。目前, 针对传输线网络的电磁耦合, 国内外学者已开展了大量的研究, 提出了Baum-Liu-Tesche(BLT)方程方法<sup>[5-8]</sup>、FDTD-SPICE (Finite Difference Time Domain-Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)算法<sup>[9-11]</sup>和FDTD-TL (Finite Difference Time Domain Transmission Line)算法<sup>[12,13]</sup>等多类高效的场线耦合计算方法。BLT方程方法基于电磁拓扑理论, 将干扰源作用传输线网络的耦合过程抽象为节点和管道的形式, 并求解节点和管道对应的散射矩阵与传输矩阵, 构建干扰源与传输线网络端接负载响应之间的关系矩阵方程, 进而通过矩阵运算求得端接负载的电压电流响应。然而, 当干扰源为宽频带信号时, BLT方程需要进行多次重复求解, 在传输线网络规模庞大时, 计算效率低下。此时, 时域数值算法更具优势。FDTD-SPICE和FDTD-TL是现阶段

应用最为广泛的两类场线耦合时域算法。FDTD-SPICE根据传输线分布参数理论, 构建传输线网络的SPICE等效电路模型, 并使用FDTD方法<sup>[14]</sup>计算传输线网络激励场, 引入SPICE等效电路作为分布源项, 进而通过SPICE软件仿真求得端接负载瞬态响应。然而, 该方法构建SPICE等效电路模型的过程涉及大量理论推导, 复杂度高, 而且空间电磁场辐射与负载瞬态响应不能同步完成计算, 当干扰源持续时间较长时, 计算效率不高。相较于FDTD-SPICE, FDTD-TL的优势在于实现了干扰源空间辐射场和传输线沿线各点及其端接负载瞬态响应的同步计算, 大大提高了场线耦合计算效率。

因此, 一些学者将FDTD-TL算法扩展应用于弯折单导线网络<sup>[15]</sup>和弯折多导线网络<sup>[16,17]</sup>的场线耦合计算研究。文献<sup>[15]</sup>首先按照FDTD网格划分计算区域, 并将弯折单导线网络的连接节点平移至其所在FDTD网格的中线位置, 进而以FDTD网格为基准均匀划分单导线网络。然后将弯折单导线网络分解成多段独立的斜置单导线, 使用FDTD-TL快速计算各段单导线的电压电流响应, 相邻单导线的连接处使用诺顿定理构建等效电路, 并使用电路分析方法求得各段单导线端口电压, 实现弯折单导线网络的电磁耦合计算。文献<sup>[16,17]</sup>同样需要对弯折多导线网络的连接节点进行平移, 并以FDTD网格划分多导线网络。将弯折多导线网络分解成多段独立的多导线, 研发FDTD-TL并行计算程序求得各段多导线的电压电流响应, 并应用电荷守恒实现各段多导线之间的数据交换, 完成弯折多导线网络的电磁耦合计算。这些文献的研究需要对弯折线束进行位置平移, 当弯折线束为空间任意变化的立体形态时, 建模误差将不容忽视。

因此, 基于FDTD-TL算法, 本文提出自适应线缆网格技术, 并结合电荷守恒定律和高效插值技术, 研究一种高效的时域算法, 构建适用于任意长度和高度的立体弯折线束的电磁耦合模型, 实现空间电磁场辐射与线束瞬态响应的快速同步计算。

## 2 时域混合算法理论

图1为典型的空间电磁场作用立体弯折线缆线束的电磁耦合模型。线缆线束由多段独立的子线束通过弯折节点连接形成网络结构, 而且各段子线束具有任意的长度、高度以及走线方向。线束两端各导线通过电阻负载与接地面相连接。

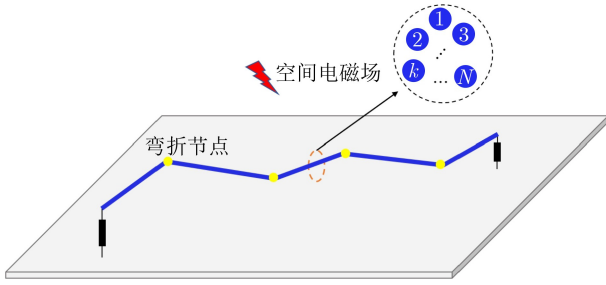


图1 空间电磁场作用弯折线束的电磁耦合模型

时域混合算法实现空间电磁场作用弯折线束的场线耦合建模包括3个重要步骤：首先，将弯折线束整体结构按照弯折节点分解成多段独立的子线束和弯折节点结构，并应用自适应线缆网格技术对各段子线束进行网格划分。然后，根据传输线方程，结合插值技术，构建各段子线束的电磁耦合模型，并使用FDTD的中心差分格式对传输线方程进行求解，计算得到各段子线束上的瞬态电压和电流响应。最后，根据电荷守恒定律，构建弯折节点的等效电路模型，并使用FDTD进行求解，获得弯折节点处的电压响应，并反馈给各段子线束作为边界条件，实现各段子线束之间的干扰信号传输。

下面将从子线束的场线耦合建模和弯折节点的电磁耦合计算两方面，详细介绍该时域混合算法的实现过程。

### 2.1 子线束的场线耦合模型

一般情况下，线缆线束需贴近接地面布线，使得线束与接地面之间的距离小于激励源对应最小波长，此时线束的辐射效应可以被忽略。因此，各段子线束的电磁耦合通过传输线方程表示为

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

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

其中， $l$ 表示子线束的走线方向。 $\mathbf{V}(l, t)$ 和 $\mathbf{I}(l, t)$ 分别为子线束的电压和电流向量， $\mathbf{L}(l)$ 和 $\mathbf{C}(l)$ 分别为子线束的单位长度电感和电容分布参数矩阵。 $\mathbf{V}_F(l, t)$ 和 $\mathbf{I}_F(l, t)$ 分别为等效分布电压源项和电流源项，表示为

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

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

其中， $\mathbf{E}_T(l, t)$ 表示子线束垂直方向电场分量的沿线积分， $\mathbf{E}_L(l, t)$ 表示子线束沿线切向电场分量与接地面表面切向电场分量之差。这里，线束沿线方向和垂直方向的电场分量，通过FDTD方法对移除

线束以后的接地板/屏蔽体进行建模并计算得到。 $\mathbf{E}_T(l, t)$ 和 $\mathbf{E}_L(l, t)$ 的具体表达式见文献[12]。

根据传输线方程可知，各段子线束瞬态耦合响应的计算准确度取决于传输线方程的建模精度，而准确构建传输线方程关键在于精确计算线束的分布参数和等效分布源项。

如图2所示，由于各段子线束在空间立体分布，将3维空间按照FDTD网格划分以后，各段子线束的起点和终点在FDTD网格的位置是任意的。此时，若直接按照FDTD网格划分子线束网格并抽样对应的电压和电流节点，必然造成各段子线束划分的网格大小不一致。当最大网格与最小网格的比例过大时，容易造成迭代求解发散的问题。因此，研究了自适应的线缆网格技术，对于各段子线束根据自身实际长度，按照适配的整网格数划分成多段均匀的线束单元。以其中一段子线束为例进行说明，若子线束长度为 $l_c$ ，按照整网格数 $M$ 对子线束进行均匀网格划分， $M$ 的选定只需让网格大小 $l_c/M$ 满足Courant稳定性条件即可。

各段子线束按照对应的网格划分成多段线束单元以后，需要计算各段线束单元的单位长度分布参数和等效分布源项。

线束单元的单位长度电感参数矩阵可由经验公式计算得到<sup>[18]</sup>，表示为

$$L_{ij} = \begin{cases} \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left( \frac{2h_i}{r_i} \right), & i = j \\ \frac{\mu_0}{4\pi} \ln \left( 1 + \frac{4h_i h_j}{d_{ij}^2} \right), & i \neq j \end{cases} \quad (5)$$

其中， $h_i$ 和 $h_j$ 分别代表线束单元第 $i$ 和第 $j$ 根导线的高度， $d_{ij}$ 表示第 $i$ 根和第 $j$ 根导线之间的间距， $r_i$ 和 $r_j$ 表示线束单元第 $i$ 和第 $j$ 根导线的半径。 $\mu_0$ 是真空磁导率。

线束单元单位长度电容参数矩阵可由单位长度电感和电容矩阵的关系式 $\mathbf{C} = \mu_0 \epsilon_0 \mathbf{L}^{-1}$ 计算得到。

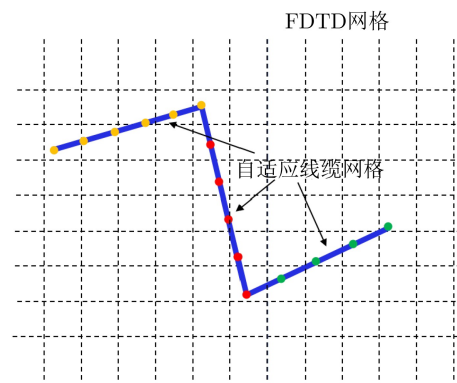


图2 弯折线束的自适应网格剖分



根据式(3)和式(4)可知, 计算线束单元的等效分布源项, 需要获得线束单元沿线方向和垂直方向的电场分量。由于线束单元的起点和终点可能位于FDTD网格的任意位置, 无法由FDTD网格上的电场分量直接获得, 需采用插值技术进行处理。

对于线束单元的切向电场分量, 需由  $\mathbf{E} \cdot \mathbf{e}_l$  计算得到, 其中  $\mathbf{E}$  表示线束单元各导线中心位置的电场,

$$\mathbf{E}_y = \begin{cases} (1.5 - c) \{ a [(1 - b) \mathbf{E}_{y5} + b \mathbf{E}_{y6}] + (1 - a) [(1 - b) \mathbf{E}_{y7} + b \mathbf{E}_{y8}] \} \\ \quad + (c - 0.5) \{ a [(1 - a) \mathbf{E}_{y9} + b \mathbf{E}_{y10}] + (1 - a) [(1 - b) \mathbf{E}_{y11} + b \mathbf{E}_{y12}] \}, & c \geq 0.5 \\ (0.5 + c) \{ a [(1 - b) \mathbf{E}_{y5} + b \mathbf{E}_{y6}] + (1 - a) [(1 - b) \mathbf{E}_{y7} + b \mathbf{E}_{y8}] \} \\ \quad + (0.5 - c) \{ a [(1 - b) \mathbf{E}_{y1} + b \mathbf{E}_{y2}] + (1 - a) [(1 - b) \mathbf{E}_{y3} + b \mathbf{E}_{y4}] \}, & c < 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $a, b$  和  $c$  分别表示线束单元中心点在FDTD网格  $x, y$  和  $z$  方向所占的比例因子。

对于线束单元的垂直电场分量, 同样需采用插值技术进行处理。如图4所示, 线束单元的高度是任意的, 这将导致线束单元的起点和终点不在激励场计算的FDTD元胞的场节点位置, 此时邻近线束的垂直电场分量需由相邻FDTD网格上的8个电场分量插值得到, 对应的插值公式为

$$\mathbf{E}'_z = \begin{cases} (1.5 - \alpha) [\beta [\gamma \mathbf{E}_{z1} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z3}] + (1 - \beta) [\gamma \mathbf{E}_{z2} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z4}]] \\ \quad + (\alpha - 0.5) [\beta [\gamma \mathbf{E}_{z9} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z11}] + (1 - \beta) [\gamma \mathbf{E}_{z10} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z12}]], & \alpha \geq 0.5 \\ (0.5 + \alpha) [\beta [\gamma \mathbf{E}_{z1} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z3}] + (1 - \beta) [\gamma \mathbf{E}_{z2} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z4}]] \\ \quad + (0.5 - \alpha) [\beta [\gamma \mathbf{E}_{z5} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z7}] + (1 - \beta) [\gamma \mathbf{E}_{z2} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z4}]], & \alpha < 0.5 \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  分别为电场分量  $\mathbf{E}'_z$  在FDTD网格  $x, y$  和  $z$  方向所占的比例因子。

对于积分路径上的其他垂直电场分量, 可以通过FDTD网格上的4个电场插值得到, 如图4所示,

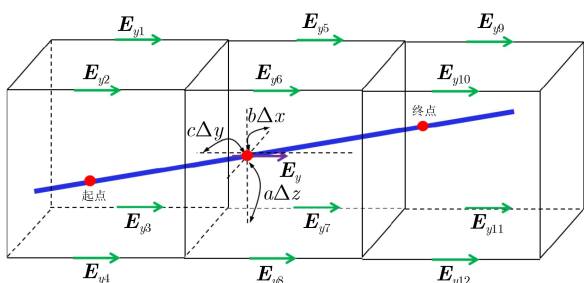


图3 线束切向电场分量的插值示意图

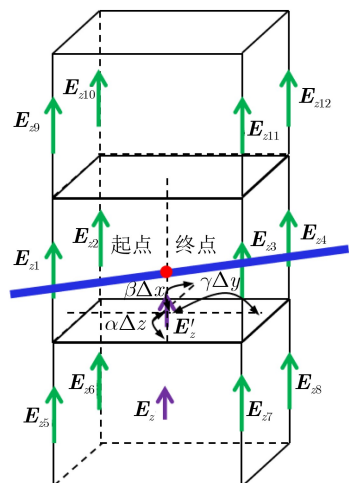


图4 线束垂直方向电场分量的插值示意图

$\mathbf{e}_l$  为线束单元各导线的单位方向矢量。如图3所示, 考虑到线束单元各导线的走线方向保持一致, 可由线束单元任一导线的起点和终点坐标确定线束单元的方向矢量。各导线中心位置的电场  $\mathbf{E}$  由  $\mathbf{E}_x, \mathbf{E}_y$  和  $\mathbf{E}_z$  3个分量构成, 每个电场分量由相邻FDTD网格上的8个电场分量插值得到。这里以  $\mathbf{E}_y$  为例, 对应的插值公式为

对应的插值公式可以表示为

$$\mathbf{E}_z = \beta [\gamma \mathbf{E}_{z5} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z7}] + (1 - \beta) \cdot [\gamma \mathbf{E}_{z6} + (1 - \gamma) \mathbf{E}_{z8}] \quad (8)$$

将各段线束单元的沿线电场分量和垂直电场分量代入式(3)和式(4), 求得各段子线束对应的等效分布源项, 完成传输线方程的构建。使用FDTD方法的中心差分格式离散传输线方程, 即可获得子线束上网格节点处的电压和电流迭代公式, 从而快速计算得到各段子线束沿线各点的电压和电流响应。

### 2.2 弯折节点的电磁耦合计算

由于弯折线束节点处的电压不满足FDTD的中心差分格式, 无法通过FDTD差分离散求解得到。考虑到节点处的电压在相邻线束之间必须保持连续(见图5), 分别对各段子线束在弯折节点处应用电荷守恒定律, 可表示为

$$\frac{\Delta l_1}{2} C_1 \frac{\partial}{\partial t} V_0 = -(I_0 - I_1) \quad (9)$$

$$\frac{\Delta l_2}{2} C_2 \frac{\partial}{\partial t} V_0 = -(I_2 - I_0) \quad (10)$$

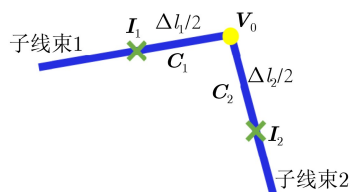


图5 弯折节点电压的计算格式

其中,  $\mathbf{I}_1$ 和 $\mathbf{I}_2$ 分别表示子线束1和子线束2上邻近弯折节点的电流向量,  $\mathbf{V}_0$ 和 $\mathbf{I}_0$ 分别为弯折节点处的电压向量和电流向量。将式(9)和式(10)相叠加, 即可得到弯折节点电压满足的电荷守恒表达式为

$$\left(\frac{\Delta l_1}{2}C_1 + \frac{\Delta l_2}{2}C_2\right)\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{V}_0 = -(\mathbf{I}_2 - \mathbf{I}_1) \quad (11)$$

对式(11)使用FDTD的中心差分格式进行离散, 获得弯折节点电压的迭代公式为

$$\mathbf{V}_0^{n+1} = \mathbf{V}_0^n - \Delta t[C_1\Delta l_1/2 + C_2\Delta l_2/2]^{-1} \cdot (\mathbf{I}_2^{n+1/2} - \mathbf{I}_1^{n+1/2}) \quad (12)$$

### 3 数值验证

采用时域混合算法, 对理想导电板上和屏蔽机箱内立体弯折线束的电磁耦合进行数值仿真, 并与电磁仿真软件CST以及FDTD-SPICE的计算结果和耗用时间进行对比, 验证该算法的计算精度和效率。时域混合算法、CST和FDTD-SPICE均在联想服务器(64GB内存, Intel Xeon 4210R CPU@ 2.4 GHz 2.39 GHz)上执行计算。

**算例1** 图6为空间电磁场作用理想导电板上立体弯折线束的电磁耦合模型, 导电板大小为 $L_c \times W_c = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , 厚度为1 cm。弯折线束由3段子线束组成, 线束端口节点以及中间连接节点的物理坐标分别为#1(0.29, 0.3, 0.02) m, #2(0.3, 0.5, 0.023) m, #3(0.8, 0.5, 0.02) m和#4(0.81, 0.705, 0.017) m。线束包含5根导线, 各导线在线束横截面上的位置见图6, 各导线半径 $r$ 均为1 mm, 相邻导线之间间距 $d$ 为3 mm。线束始端负载均为50  $\Omega$ 的电阻, 终端负载均为100  $\Omega$ 的电阻。平面波垂直照射弯折线束, 波形为高斯脉冲 $E(t) = E_0 \exp[-4\pi(t-t_0)^2/\tau^2]$ , 其中 $E_0 = 1000 \text{ V/m}$ ,  $\tau = 2 \text{ ns}$ ,  $t_0 = 0.8\tau$ 。

FDTD-SPICE, CST和时域混合算法计算得到的线束端接负载 $R_2$ 和 $R_{10}$ 上的电压响应如图7和图8所示。可以看到, 该算法在处理自由空间下弯折线束的电磁耦合问题时, 能够保持与CST全波仿真相同的计算精度。FDTD-SPICE在使用FDTD模拟

空间电磁场时与时域混合算法保持相同网格精度, 其计算结果与CST仿真结果之间误差偏大。同时, 表1给出了时域混合算法与CST和FDTD-SPICE计算所需网格量和时间的对比。由于CST最小剖分网格受到线束导线半径的限制(这里设置为1 mm), 因此线束在CST中建模时剖分所需网格量较大。而时域混合算法与FDTD-SPICE无需对弯折线束结构进行精细建模, 相较于CST, 可以节省大量的剖分网格量和计算时间。与此同时, FDTD-SPICE的计算时间较多于时域混合算法, 是因为该算法需要存储FDTD计算的空间电磁场并由SPICE读取构建等效分布源项, 此过程所耗用的时间与FDTD迭代时间步数成正比。

**算例2** 为了验证该算法处理复杂电磁环境下弯折线束电磁耦合的有效性, 将算例1中的线束模型放置于屏蔽机箱内, 如图9所示。屏蔽机箱的尺寸为 $L_c \times W_c \times H_c = 1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ , 厚度为1 cm。箱体上表面开有3条尺寸为 $l_s \times w_s = 0.3 \text{ m} \times 0.04 \text{ m}$ 的缝隙。平面波垂直照射屏蔽机箱, 极化方向与缝隙

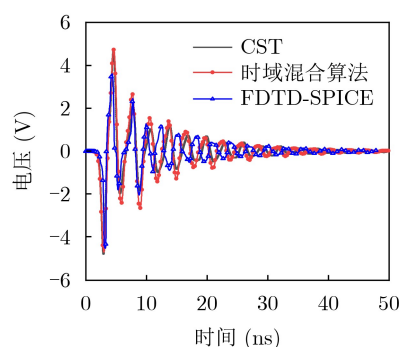


图7 算例1的负载 $R_2$ 电压响应

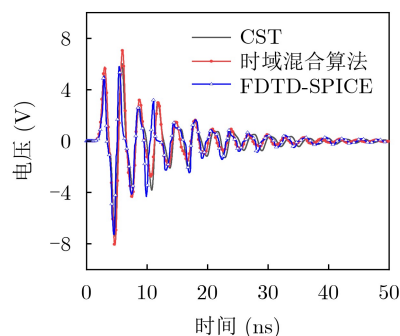


图8 算例1的负载 $R_{10}$ 电压响应

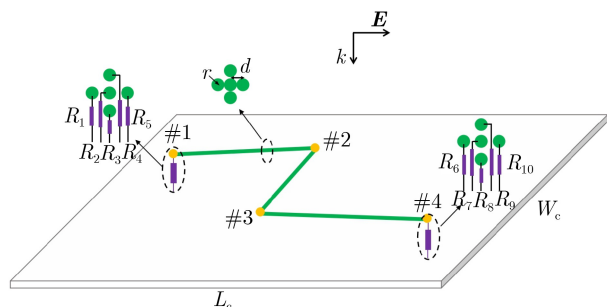


图6 理想导电板上弯折线束的电磁耦合模型

表1 算例1的时域混合算法与CST和FDTD-SPICE所需网格量和计算时间

数值方法	网格量	计算时间(min)
时域混合算法	$6.84 \times 10^5$	2.4
CST	$2.7 \times 10^6$	3.3
FDTD-SPICE	$6.84 \times 10^5$	2.6

窄边平行, 波形同样为幅度1 000 V/m、脉宽2 ns的高斯脉冲。

时域混合算法和CST计算得到的弯折线束端接负载 $R_5$ 和 $R_{10}$ 的电压响应如图10和图11所示。可以看到, 时域混合算法在模拟屏蔽腔内立体弯折线束的电磁耦合问题时, 仍能保持与CST全波仿真相同的计算精度。同样地, 表2给出了时域混合算法和CST所使用的网格量和计算时间的对比。与CST相

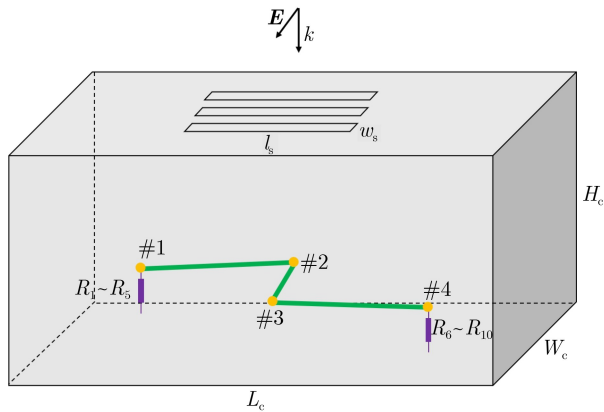


图9 屏蔽机箱内立体弯折线束的电磁耦合模型

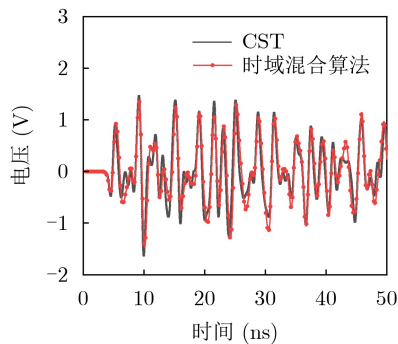


图10 算例2的负载 $R_5$ 电压响应

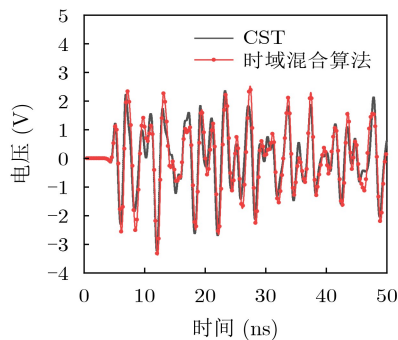


图11 算例2的负载 $R_{10}$ 电压响应

表2 算例2的时域混合算法和CST所需网格量和计算时间

数值方法	网格量	计算时间(min)
时域混合算法	$1.77 \times 10^6$	4.91
CST	$9.088 \times 10^6$	9.25

比, 在计算区域扩大以后, 时域混合算法的计算效率提升更为明显。

## 4 结论

本文提出高效的自适应线缆网格技术, 并与FDTD-TL算法、插值技术以及电荷守恒定律相结合, 研究了一种高效的时域混合算法, 从时域角度解决了立体弯折线束电磁耦合的高效仿真问题。与同类场线耦合算法相比, 该时域混合算法的优势在于: 一是, 实现了空间任意分布的立体弯折线束的自适应网格划分; 二是, 构建了适用于立体弯折线束的场线耦合模型, 实现了空间电磁场辐射与立体弯折线束瞬态响应的快速同步计算。通过相应算例的数值仿真验证表明, 时域混合算法能够与全波算法保持相同的计算精度, 且明显优于同类场线耦合算法。计算效率方面, 相较于全波算法节省了较多的计算时间, 与同类场线耦合算法相比亦有所提升。

## 参考文献

- [1] ANDRIEU G, KONÉ L, BOCQUET F, *et al.* Multiconductor reduction technique for modeling common-mode currents on cable bundles at high frequency for automotive applications[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, 50(1): 175–184. doi: 10.1109/TEMC.2007.911914.
- [2] LI Zhuo, LIU Liangliang, DING Ji, *et al.* A new simplification scheme for crosstalk prediction of complex cable bundles within a cylindrical cavity[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, 54(4): 940–943. doi: 10.1109/TEMC.2012.2200042.
- [3] LI Zhuo, LIU Liangliang, YAN Jian, *et al.* An efficient simplification scheme for modeling crosstalk of complex cable bundles above an orthogonal ground plane[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, 55(5): 975–978. doi: 10.1109/TEMC.2012.2237033.
- [4] 高印寒, 安占扬, 王举贤, 等. 等效线束法在汽车线束时域辐射敏感度分析中的应用[J]. *吉林大学学报:工学版*, 2015, 45(3): 946–952. doi: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201503038. GAO Yinhan, AN Zhanyang, WANG Juxian, *et al.* Application of equivalent cable bundle method in time domain radiation sensitivity of automotive cable harness[J]. *Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition*, 2015, 45(3): 946–952. doi: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb201503038.
- [5] 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.

- [6] 尹名初, 杜平安. 开孔屏蔽腔内传输线负载所受电磁干扰的解析算法[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(12): 123201. doi: [10.11884/HPLPB201628.160421](https://doi.org/10.11884/HPLPB201628.160421).  
YIN Mingchu and DU Ping'an. Analytic formulation for load response of transmission line enclosed in enclosure with apertures[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(12): 123201. doi: [10.11884/HPLPB201628.160421](https://doi.org/10.11884/HPLPB201628.160421).
- [7] 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 Da, DU Ping'an, 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).
- [8] 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.j.cjors.2018111902](https://doi.org/10.13443/j.j.cjors.2018111902).  
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.j.cjors.2018111902](https://doi.org/10.13443/j.j.cjors.2018111902).
- [9] 李春荣, 李帅, 王新政, 等. 电磁脉冲与微带线耦合效应的数值模拟[J]. *微波学报*, 2013, 29(2): 66–70. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.2013.02.020](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.2013.02.020).  
LI Chunrong, LI Shuai, WANG Xinzheng, *et al.* Numerical simulation on coupling effects of electromagnetic pulse onto microstrip line[J]. *Journal of Microwave*, 2013, 29(2): 66–70. doi: [10.14183/j.cnki.1005-6122.2013.02.020](https://doi.org/10.14183/j.cnki.1005-6122.2013.02.020).
- [10] 谢海燕, 李勇, 宣春, 等. 不同频率高功率微波辐照下PCB电路的混合模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(3): 033016. doi: [10.11884/HPLPB201628.033016](https://doi.org/10.11884/HPLPB201628.033016).  
XIE Haiyan, LI Yong, XUAN Chun, *et al.* Mixed simulation of PCB circuit illuminated by high power microwave with different frequencies[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(3): 033016. doi: [10.11884/HPLPB201628.033016](https://doi.org/10.11884/HPLPB201628.033016).
- [11] 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).
- [12] 叶志红, 苟丹, 吴小林, 等. 传输线端接复杂电路的电磁耦合时域分析方法[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(1): 242–248. doi: [10.11999/JEIT191026](https://doi.org/10.11999/JEIT191026).  
YE Zhihong, GOU Dan, WU Xiaolin, *et al.* Time domain analysis method for the coupling problem of transmission lines terminated with complex circuits[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(1): 242–248. doi: [10.11999/JEIT191026](https://doi.org/10.11999/JEIT191026).
- [13] WEI Jinhong, YAN Youjie, WANG Shengtao, *et al.* FDTD-TL method for the prediction of the transient response of shielded cable above the ground[C]. 2021 International Applied Computational Electromagnetics Society (ACES-China) Symposium, Chengdu, China, 2021: 1–2. doi: [10.23919/ACES-China52398.2021.9581658](https://doi.org/10.23919/ACES-China52398.2021.9581658).
- [14] 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).
- [15] YE Zhihong, WU Xiaolin, and ZHANG Jie. Time domain hybrid method for the coupling analysis of oblique transmission line network excited by ambient wave[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, 62(6): 2450–2457. doi: [10.1109/TEMC.2020.2982430](https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.2982430).
- [16] MENG Xuesong, BAO Xianfeng, ZHENG Yuteng, *et al.* An efficient modeling technique for time domain field-to-wire coupling in the massively parallel computer codes JEMS-FDTD[C]. 2019 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Guangzhou, China, 2019: 1–3. doi: [10.1109/ICMMT45702.2019.8992178](https://doi.org/10.1109/ICMMT45702.2019.8992178).
- [17] MENG Xuesong, BAO Xianfeng, ZHENG Yuteng, *et al.* Time-domain modeling of field-to-wire coupling in obliquely oriented multiwire cables with junctions using JEMS-FDTD[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2020, 62(6): 2458–2467. doi: [10.1109/TEMC.2020.2968076](https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.2968076).
- [18] ROTGERINK J L, SERRA R, and LEFERINK F. Multiconductor transmission line modeling of crosstalk between cables in the presence of composite ground planes[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, 63(4): 1231–1239. doi: [10.1109/TEMC.2020.3040689](https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.3040689).
- 叶志红: 男, 副教授, 研究方向为电磁安全与智能电磁计算、计算电磁学.  
鲁唱唱: 女, 硕士生, 研究方向为电磁兼容.  
张 玉: 女, 硕士生, 研究方向为电磁兼容.

责任编辑: 余 蓉