



·高功率微波技术·

# 高频电磁干扰对传输线耦合全波建模方法<sup>\*</sup>

杜子韦<sup>1</sup>, 张晓琴<sup>1</sup>, 朱洪斌<sup>1</sup>, 肖鹏<sup>1</sup>, 余翔<sup>1</sup>, 谢彦召<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 西安交通大学 电气工程学院  
电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

**摘 要:** 对于场线耦合问题, 经典传输线理论不适用于求解高频电磁干扰辐射下传输线负载上的电压和电流响应。针对这一问题, 首先介绍了一种基于天线理论和模拟行为建模 (ABM) 的时域全波建模方法。该方法利用 Harrington 矩量法将电流积分方程离散并推导得到宏模型时域表达式, 然后利用 ABM 频域功能实现频变参数的傅里叶逆变换和时域卷积计算。利用电路求解器, 该建模方法可直接求解任意结构传输线耦合的负载处瞬态响应; 与传统全波算法相比, 模型一旦建立便可应用于任意入射场和线性/非线性负载的情况, 无需重复耗时地求解电流积分方程。该方法可简化全波算法求解过程, 提高仿真计算效率, 尤其便于在入射场和负载存在不确定参数时进行高效重复抽样计算以获得统计特性。然后以高频电磁干扰耦合有损大地上的双导体传输线为例, 通过与数值电磁代码和传统传输线理论方法的求解结果对比, 验证了所提宏模型的有效性以及传输线理论在解决场线耦合问题时的局限性。结果表明, 基于全波方法构建的宏模型可在时域内高效准确地求解高频电磁干扰辐射下任意形状传输线负载上的瞬态响应。

**关键词:** 高频电磁干扰; 场线耦合; 天线理论; 宏模型; 模拟行为建模

中图分类号: O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220217

## Full-wave modeling method for high-frequency electromagnetic disturbances coupling to transmission lines

Du Ziweihua<sup>1</sup>, Zhang Xiaoqin<sup>1</sup>, Zhu Hongbin<sup>1</sup>, Xiao Peng<sup>1</sup>, Yu Xiang<sup>1</sup>, Xie Yanzhao<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co Ltd Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Key Laboratory of Power Equipment and Electrical Insulation, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** For field-to-line coupling problems, the classical transmission line theory is not applicable to obtain voltage/current responses on transmission lines irradiated by high-frequency electromagnetic disturbances. To solve this problem, a time-domain full-wave modeling method based on antenna theory and analog behavior modeling (ABM) is proposed. The Harrington method of moment is utilized to discretize the current integral equation and derive time-domain expression of the macromodel. Then, the inverse Fourier transform and time-domain convolution of the frequency-dependent parameters in the expression are realized by frequency domain function module (FREQ) of ABM. With embedding into the circuit solver, the model can directly solve the responses of high-frequency electromagnetic disturbances coupling to transmission lines with different structures above lossy ground. Compared with the traditional full-wave algorithms, the model can be applied to any circumstances of incident field and linear/nonlinear loads, and there is no need to solve the current integral equation repeatedly with time-consuming methods. The proposed method can simplify the process of the full-wave algorithm and improve the efficiency of simulation calculation. It is especially convenient to obtain statistical characteristics by performing efficient repeated simulations when the incident field and load are with uncertain parameters. Finally, taking the high frequency electromagnetic field coupling to two-conductor transmission lines above lossy ground as an example, the validity of the proposed macromodel and the limitation of the transmission line theory are verified by comparing the results with those of numerical electromagnetic code and traditional transmission line theory method. The results reveal that the

\* 收稿日期: 2022-07-07; 修订日期: 2022-11-23

基金项目: 江苏省卓越博士后计划项目; 国家自然科学基金项目 (61904116)

通信作者: 杜子韦, dududzw@126.com。

macromodel based on the full-wave method can efficiently and accurately acquire the transient responses on transmission lines with any structure irradiated by high frequency electromagnetic disturbances in the time domain.

**Key words:** high-frequency electromagnetic disturbances, field-to-line coupling, antenna theory, macromodel, analog behavior modeling

现代社会越来越重视对各类瞬态电磁干扰的研究,如雷电电磁脉冲、高空核电磁脉冲、开关操作产生的电磁干扰、静电放电等<sup>[1-4]</sup>。多导体传输系统,如各类电力和电子系统,可以在传输线上感应出幅值较高的电压和电流,可能对电力、电子系统中的线缆和与其相连的终端设备或元件造成严重的影响甚至损坏<sup>[5-9]</sup>。

目前,对于场-线耦合问题,学者们已开展了较为深入的理论研究并提出了多种仿真求解方法。所提方法可大致分为两类,其中较为成熟且应用最为广泛的是基于经典传输线理论的一类方法。包括经典 BLT(Baum, Liu, Tesche)方程<sup>[10-11]</sup>、时域有限差分法<sup>[12]</sup>、宏模型法<sup>[13-16]</sup>,以及分布式解析迭代技术<sup>[17]</sup>等。但由于传输线理论基于准横向电磁(quasi-TEM)模假设,因此该类方法仅适用于求解均匀传输线响应,且激励电磁场的最短有效波长需远大于(十倍以上)传输线横向电尺寸。与传输线理论不同,基于天线理论的全波算法直接由 Maxwell 方程推导而来,除细线近似外无需其他假设条件,因此对于高频电磁干扰(波长可比或小于传输线横向尺寸)作用下任意形状金属导体(包含垂直段)的耦合问题,由于传输线理论不再适用,需采用全波算法来获得包括 TEM 模、辐射模等多种响应模式的完整解<sup>[15]</sup>。全波算法包括有限元法<sup>[18]</sup>和矩量法<sup>[19-20]</sup>等。其中,矩量法在求解场线耦合问题过程中的应用更为广泛,其可将混合势积分方程(MPIE)离散转化为矩阵方程,然而该方法计算量大,效率较低,尤其是在分析电尺寸较大的多导体传输线时计算资源将面临严峻挑战。

近年来,宏模型法因其具有形式简单、计算效率高等优点,已逐渐成为传输线领域的研究热点,几种基于传输线理论的宏模型建模方法已被提出<sup>[13,15-16]</sup>。宏模型法将场线耦合问题转化为电路问题,将传输线及激励电磁场的分布特性在终端进行集总化等效,可将复杂网络模块化建模并仿真得到终端负载上的电压和电流响应。特别是当终端为非线性负载,需要在时域内求解负载上响应时,与传统时域数值方法(如 FDTD 法)相比,具有计算效率高、可借助电路求解器进行场路协同仿真等优势。目前,基于经典传输线理论的宏模型建模理论已较为成熟,但其受限于传输线理论的适用条件。因而有必要开展基于天线理论的宏模型建模方法研究,将全波方法和宏模型法优点相结合,这对于高效准确地求解高频电磁干扰作用下任意形状传输线的瞬态响应具有重要价值。目前已有学者开展了相关研究。文献[21]提出的建模方法可用于研究非均匀场激励下的复杂传输线结构,然而当改变入射场参数时,需重新运用全波算法计算端口开路电压或短路电流,这极大地限制了宏模型计算效率。

本文针对高频瞬态电磁干扰对任意形状传输线耦合这一问题,提出了一种基于严格天线理论的全波电路模型构建方法,可高效准确地求解大地频变损耗参数和非线性负载需同时考虑时的线缆响应。以高频电磁干扰耦合有损平面上的多导体传输线为例,对所提建模方法的有效性进行验证,同时将结果与传统传输线理论方法的计算结果作对比,以说明基于不同理论的建模方法在解决场线耦合问题时的异同性和局限性。

## 1 理论推导和建模

图 1 为非理想平面上受电磁干扰辐照的多导体传输线示意图。假设  $z>0$  部分为自由空间,电参数分别表示为  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$ ;  $z<0$  为有损部分,电参数表示为  $\epsilon_{rg}$  和  $\mu_0$ ; 第  $k$  根传输线的半径为  $a_k$ , 长度为  $l_k$ , 高度为  $h_k$ ; 阻抗  $Z_{1k}$  和  $Z_{2k}$  分别接在第  $k$  根传输线首末垂直段上距离平面的较小高度处。 $\mathbf{E}$  为入射电场向量。

地面上受电磁场辐照的传输线会感应产生沿线流动的电流,可表示为向量  $\mathbf{I}(x) = [I_1(x), \dots, I_k(x), \dots, I_N(x)]^T$ 。同时,感应产生的电流会向外辐射散射场,代表传输线对空间激励场的反作用。因此,空间中的总电场包括激励场和散射场两部分。导体表面的切向电场满足切向总电场为零的边界条件,以第  $k$  根传输线为例,可表示为

$$E_{l_k}^{\text{total}} = E_{l_k}^{\text{exc}} + E_{l_k}^{\text{sct}} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

式中:  $E_{l_k}^{\text{exc}}$ ,  $E_{l_k}^{\text{sct}}$  和  $E_{l_k}^{\text{total}}$  分别为第  $k$  根导线表面沿切线方向的激励电场、散射电场和总电场。

$$E_{l_k}^{\text{sct}} = -j\omega A_{l_k} - \frac{\partial \phi}{\partial l_k} \quad (2)$$

$$A_{l_k} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=1}^N \int_{l_k} I(l_k) g(l_k, l_k) dl_k \quad (3)$$



伏安特性。另一部分是不带负载阻抗的直线段,在这里称为内部电路,接下来将基于式(8),推导不带负载阻抗的直线段,即内电路的端口伏安特性。为了降低计算过程的冗余以提高计算效率,首先提取传输线负载段上的电压电流对应关系,因此定义  $2N \times M$  维稀疏矩阵  $\mathbf{W}$  ( $M$  为  $N$  根传输线所分段数总和),在  $\mathbf{W}$  的每一行,仅负载所在直线段对应的那一列元素为 1,矩阵其他元素都为 0。经过多步数学变换,式(8)可转化为

$$\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{Z}_{\text{eq}} \bar{\mathbf{I}} + \bar{\mathbf{V}}_s \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{Z}_{\text{eq}} = (\mathbf{WZ}_{\text{int}}^{-1}\mathbf{W}^T)^{-1}$  表征无源条件下的端口伏安特性;  $\bar{\mathbf{V}}_s = \mathbf{Z}_{\text{tran}}\mathbf{E}$  是与外场激励源有关的受控电压源;  $\mathbf{Z}_{\text{tran}} = -(\mathbf{WZ}_{\text{int}}^{-1}\mathbf{W}^T)^{-1}\mathbf{WZ}_{\text{int}}^{-1}$  为转移矩阵。式(11)将端口电流向量与端口电压向量联系起来,并且通过转移矩阵考虑了外部电磁场的影响,其与式(10)一同构成了宏模型基本方程。

为了更清晰地阐明建模过程,下面将针对单根传输线描述所提出的建模方法,该方法可无难度地拓展至多根传输线的情形。对于单根传输线,宏模型基本方程为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} V_1(s) \\ V_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\text{eq}11}(s) & Z_{\text{eq}12}(s) \\ Z_{\text{eq}21}(s) & Z_{\text{eq}22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s1}(s) \\ V_{s2}(s) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_1(s) \\ V_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 \\ 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1(s) \\ I_2(s) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

若激励源为瞬态场,或传输线负载为非线性时,在时域求解更为简便。将式(12)转化为时域形式

$$\begin{cases} V_1(t) = Z_{\text{eq}11}(t) * I_1(t) + Z_{\text{eq}12}(t) * I_2(t) + V_{s1}(t) \\ V_2(t) = Z_{\text{eq}21}(t) * I_1(t) + Z_{\text{eq}22}(t) * I_2(t) + V_{s2}(t) \\ V_1(t) = Z_1 I_1(t) \\ V_2(t) = Z_2 I_2(t) \end{cases} \quad (13)$$

其中\*代表时域卷积计算。根据式(13),构建电路模型的难点主要为频变参数  $\mathbf{Z}_{\text{eq}}$  的傅里叶逆变换和与端口电流的时域卷积计算。根据文献[23],Spice 电路求解器内 ABM 特性可以直接利用电路元件求解数学问题。特别是在进行瞬态分析时,ABM 库内的频域受控电压或电流源(E/GLAPLACE 和 E/GFREQ)元件可以直接对频域传递函数求解标准傅里叶逆变换,然后将得到的冲击响应与器件的输入信号进行卷积计算。具体计算流程如图 2 所示。

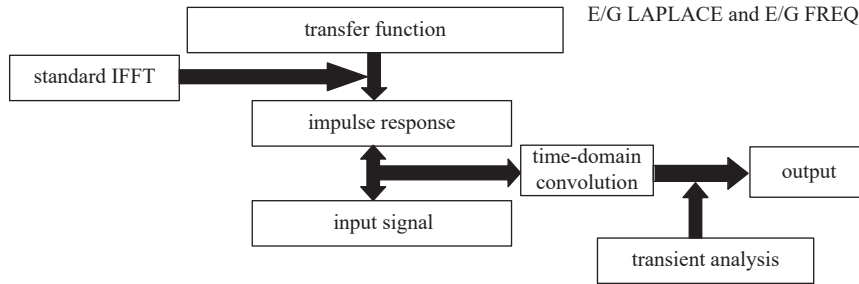


Fig. 2 Calculation process of ABM frequency-domain models during transient analysis

图 2 瞬态分析时 ABM 频域器件的具体计算流程

因此,利用以上方法,得到式(13)对应的高频电磁干扰对传输线耦合等效电路模型(以单根线为例),如图 3 所示,受控电压源分别实现了式(14)和(15)中的时域卷积运算。

$$\begin{bmatrix} V_{11} \\ V_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\text{eq}11}(t) * I_1(t) \\ Z_{\text{eq}12}(t) * I_2(t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} V_{21} \\ V_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{\text{eq}21}(t) * I_1(t) \\ Z_{\text{eq}22}(t) * I_2(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

直流电压源  $V_{\text{dc}1}$  和  $V_{\text{dc}2}$  电压值为 0,仅用来提取端口处流经负载的电流。具体实现 E/GFREQ 时采用的频率范围  $f_c$ , 频率采样点数 NFFT 等参数的选取可参考文献[22]。对于多导体传输线而言,根据式(10)和式(11),图 3 中的二端口电路模型将拓展至  $2N$  端口 ( $N$  为导体数),此时每根导线首末端电路除直流电压源和与外场激励源有关的电压源外,还分别有  $2 \times N$  个受控电压源用于实现频域向量  $\mathbf{Z}_{\text{eq}}\bar{\mathbf{I}}$  逆变换至时域后的卷积计算。综上所述,基于全波理论和模拟行为建模可构建高频电磁干扰与传输线耦合的电路模型,模型一旦建立,可重复使用以考虑任意激励

场和负载变化对响应特性的影响,且对于具有非线性特性的负载阻抗,可采用 ABM 器件 E/GVALUE 或 E/GTABLE 构建电路模型。

## 2 算例验证和分析

本小节将通过算例验证所提出模型推导及建模方法在求解高频场对多导体传输线耦合时的有效性,包括准确性和效率。首先以图 1 中的双导体传输线配置为例进行建模响应计算和研究分析,将利用全波宏模型求得的端口负载瞬态响应分别与 TL 理论计算方法以及 NEC 计算结果进行对比。利用 PSpice 电路求解器在配置为 INTEL i7 3.6-GHz CPU 的 PC 机上仿真计算所有算例。

### 2.1 算例 1

如图 1 所示,本例以双导体传输线为研究对象,导体长度  $L=10\text{ m}$ ,高度  $h=1\text{ m}$ ,导体半径  $a$  为  $0.15\text{ cm}$ ,两线之间距离为  $d=0.5\text{ m}$ 。有损平面电导率为  $0.01\text{ S/m}$ ,相对介电常数  $\epsilon_{\text{rg}}$  为  $10$ 。两根传输线近端及远端负载分别为  $Z_{11}, Z_{12}; Z_{21}, Z_{22}$ 。入射电场振幅的时域表达式为  $E_0(t) = 65\,000 \times (e^{-t \times 4 \times 10^7} - e^{-t \times 6 \times 10^8})\text{ V/m}$ ,其主频带范围上限至百 MHz,由于线缆距水平面高度为  $1\text{ m}$ ,与入射场波长可比,因此理论上不满足 TL 假设条件。入射场仰角、方位角和极化角分别为  $\theta = 30^\circ, \varphi = 120^\circ$  和  $\eta = 135^\circ$ 。将每根传输线结构分为  $120$  段,即每段长度  $\Delta l = 0.1\text{ m}$ , $Z_{11}, Z_{12}$  及  $Z_{21}, Z_{22}$  分别接于每根传输线的第一段和最后一段的中间位置,高度为  $\Delta l/2 = 0.05\text{ m}$ 。首先为了验证所提模型的有效性,设置近端及远端负载阻抗  $Z_{11}=Z_{12}=Z_{21}=Z_{22}=20\ \Omega$ 。

图 4 给出了流经首末端负载的感应电流时域波形。以 NEC 电流解为参考,与 TL 宏模型解和全波宏模型解(图中分别表示为 TL macromodel 和 MoM macromodel)进行比较可以发现,基于 TL 理论求得的电流响应结果与参考电流相比,峰值误差在 25% 左右,且整体波形差异较大,这主要是由于 TL 理论忽略了电流响应高次模,仅考虑 TEM 模式,将终端负载简单视为集总负载接在线缆首末端,未考虑线缆垂直段对电流波的散射作用;全波宏模型求得的响应结果与 NEC 参考电流波形整体吻合较好,首末端负载处的电流响应峰值误差具体分别为 0.89% 和 0.11%,此结果证明了全波宏模型在求解传输线高频电磁干扰响应时的准确性。

此外,表 1 比较了三种算法的计算时间。由该表可知,全波宏模型与传输线方法的计算时间都在 10 s 以内,且与 NEC 方法相比,在保证准确性的前提下全波宏模型将求解效率大幅提高,所需计算时间仅为 NEC 方法的 1.4%,证明了全波宏模型的高效性。需要注意的是,这里全波宏模型的计算时间是指在已建好电路模型的前提下,利用其在电路求解器内计算负载处响应所需时间,未考虑模型建立过程中利用矩量法求解宏模型端口特征阻抗矩阵  $Z_{\text{eq}}$  和  $Z_{\text{tran}}$  所需时间,这一求解过程涉及对矩量法代数方程的系数矩阵求逆及傅里叶逆变换操作,以本算例为例,该过程耗时 548.69 s,所以与利用电路模型求解时域响应这一过程相比,宏模型方法将在模型建立这一过程中相对耗费更多时间。尽管如此,与 NEC 等传统全波算法相比,基于全波理论的宏模型方法在适用性方面仍然具有其独特

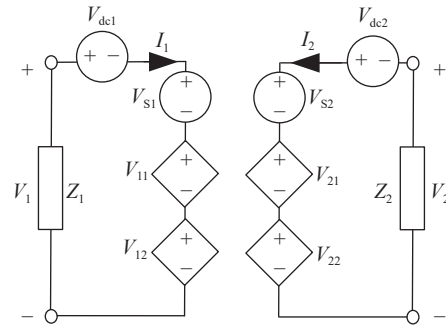


Fig. 3 Equivalent circuit of high frequency electromagnetic disturbances coupling to transmission lines (single-conductor)  
图 3 高频电磁干扰对传输线耦合的等效电路模型(单根线)

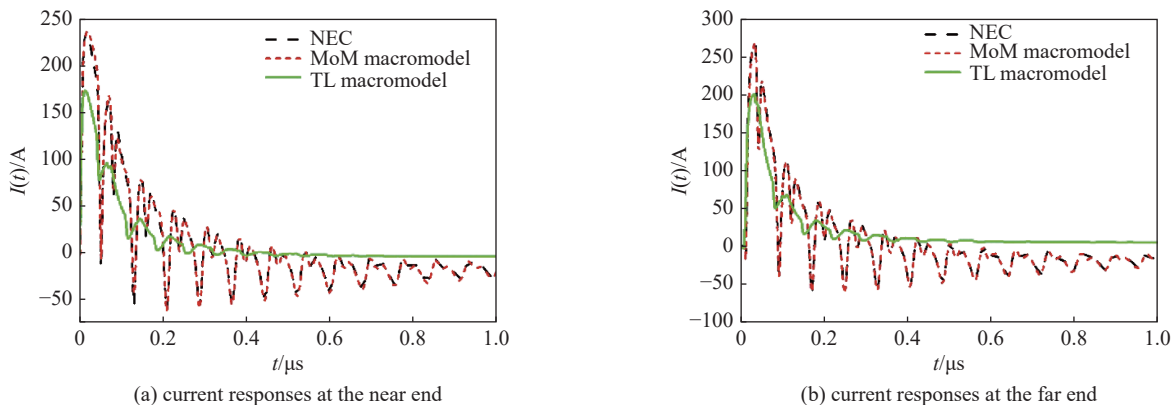


Fig. 4 Induced currents flowing through loads at the near and far ends

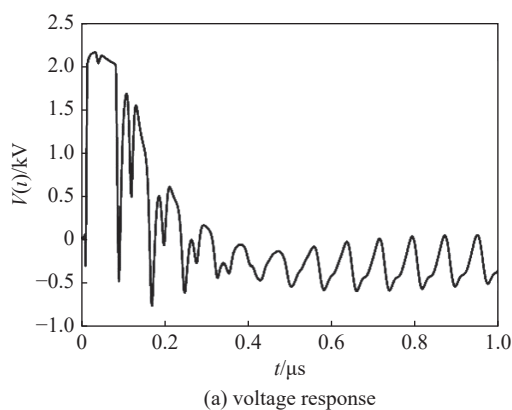
图 4 流过首末端负载的电流响应

优势:当传输线激励源和外端口负载改变,传输线结构不发生变化时,宏模型法可用于高效求解并统计分析激励源和负载变化对响应结果的影响;当传输线终端负载特性较为复杂时,可利用 Spice 等电路仿真软件元件库中的模型建模,充分发挥其在处理复杂负载方面的优势,并结合场线耦合宏模型实现场路协同仿真;当传输线终端为非线性负载时,传统矩量法无法在时域内直接求解此类问题,可利用宏模型在电路求解器内高效准确地求解线缆负载端响应;当构成传输线网络时,可利用宏模型模块化、独立性的优势,将整个网络分解为独立子模块进行建模。

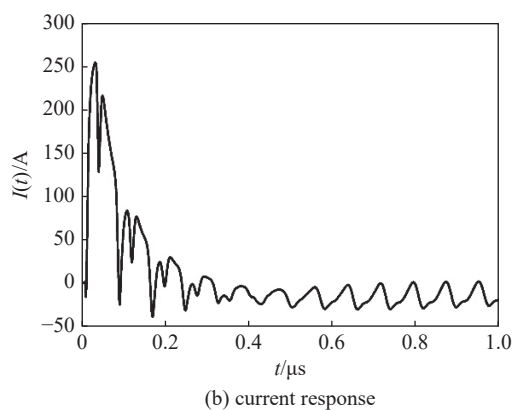
## 2.2 算例 2

算例 1 是在线性负载条件下验证了所提全波宏模型的有效性,下面将利用宏模型研究非线性负载问题。将传输线远端负载阻抗  $Z_{21}$  和  $Z_{22}$  设置为非线性负载,其伏安特性如图 5 所示,入射激励场及传输线其他参数与算例 1 保持一致。

图 5 所示的非线性负载特性可借助 Spice 电路求解器内已有的非线性电阻模型进行建模。另外,由于任意电阻都可等效为电流控制电压源,因此还可以根据非线性特性表达方式(函数表达式或数据表)借助 Spice 求解器 ABM 库内的受控电压源 EVALUATE 或 ETABLE 构建其电路模型来模拟非线性负载的伏安特性,建模过程更加便捷高效。利用算例 1 中已构建的全波宏模型,将线性电阻换为本例中的非线性负载等效电路,求解非线性负载上的电压和电流响应,如图 6 所示。



(a) voltage response



(b) current response

Fig. 6 Induced voltage and current responses of nonlinear load at the far end

图 6 远端非线性负载的电压和电流响应

由图 6 可知,非线性负载的限压作用明显,在电压超过 2 kV 后,根据非线性负载的伏安特性,负载阻抗由  $20 \Omega$  迅速下降至  $1 \Omega$ ,参考电流响应幅值,电压响应幅值将被限制在 2.2 kV 左右。图 6 中的电压响应时域波形符合此规律,这也印证了计算结果的准确性。本例计算所需时间为 4.64 s,因此全波宏模型可高效准确地求解带非线性负载的传输线高频电磁干扰耦合问题,且 Spice 内已嵌入大量非线性负载模型及 ABM 器件,能充分利用其进行复杂负载特性的建模。

## 3 结 论

本文针对激励场频谱和线缆尺寸不满足传输线近似条件时,经典传输线理论不适用于求解高频电磁干扰作用下的传输线耦合响应,但全波算法计算量大、效率低、无法求解非线性负载响应这一问题,提出了一种基于全波天线理论和模拟行为建模的时域宏模型建模方法。该方法基于矩量法并充分利用宏模型优势,可直接借助 Spice 电路求解器进行暂态分析,计算高频电磁干扰对有损大地上传输线耦合的负载处响应。本文所提全波宏模型可用于求解线性或非线性端接负载处响应,与传统全波算法(如 NEC)计算结果相比,时域响应峰值误差较小,波形整体

表 1 计算时间比较

Table 1 Comparison of computation time

method	computation time/s
NEC	603.08
TL macromodel	9.02
MoM macromodel	8.19

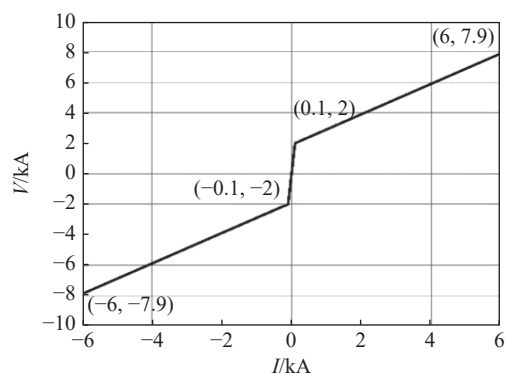


Fig. 5 V-I characteristic curve of nonlinear load

图 5 非线性负载伏安特性曲线

吻合较好；且由于该模型不需重复进行耗时的线缆离散分段及求解电流积分方程这一步骤，因此该方法与传统矩量法相比可简化整个响应求解过程，大幅提高建模及仿真计算效率，尤其便于在入射场和负载存在不确定参数时进行高效重复采样计算以获得统计特性。

#### 参考文献：

- [1] 谢彦召, 王赞基, 王群书, 等. 高空核爆电磁脉冲波形标准及特征分析[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(8): 781-787. (Xie Yanzhao, Wang Zanji, Wang Qunshu, et al. High altitude nuclear electromagnetic pulse waveform standards: a review[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 781-787)
- [2] Rachidi F. A review of field-to-transmission line coupling models with special emphasis to lightning-induced voltages[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, 54(4): 898-911.
- [3] 束国刚, 杜子韦华, 黄玮, 等. 核电站最小安全系统电磁脉冲效应试验研究[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 103203. (Shu Guogang, Du Ziweihua, Huang Wei, et al. Experiment research on electromagnetic effects of minimum safety system in nuclear power plant[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 103203)
- [4] 汪项伟, 万发雨, 冯超超, 等. 静电放电辐射场模拟及干扰预测[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3396-3402. (Wang Xiangwei, Wan Fayu, Feng Chaochao, et al. Radiation field simulation and interference prediction of electrostatic discharge[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(10): 3396-3402)
- [5] Xu F, Liu C, Hong W, et al. Fast and accurate transient analysis of buried wires and its applications[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(1): 188-199.
- [6] 陈宇浩, 谢彦召, 刘民周, 等. 高空电磁脉冲作用下电力系统主要效应模式分析[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 070007. (Chen Yuhao, Xie Yanzhao, Liu Minzhou, et al. Analysis of high-altitude electromagnetic effect models on power system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 070007)
- [7] 祁国成, 李科杰, 李亚峰, 等. 油气管道数据采集与监视控制系统电磁脉冲效应实验[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 123202. (Qi Guocheng, Li Kejie, Li Yafeng, et al. Experimental study on effects of electromagnetic pulse on pipeline supervisory control and data acquisition (SCADA) system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 123202)
- [8] 周星, 王书平, 魏光辉. 电磁脉冲对数字电路的辐照效应研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 46-49. (Zhou Xing, Wang Shuping, Wei Guanghui. Study on radiation effects of EMP on digital circuits[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(10): 46-49)
- [9] 方进勇, 申菊爱, 杨志强, 等. 集成电路器件微波损伤效应实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(6): 591-594. (Fang Jinyong, Shen Juai, Yang Zhiqiang, et al. Experimental study on microwave vulnerability effect of integrated circuit[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(6): 591-594)
- [10] Tesche F M, Ianoz M, Karlsson T. EMC analysis methods and computational models[M]. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [11] 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.
- [12] Paknahad J, Sheshyekani K, Rachidi F, et al. Lightning electromagnetic fields and their induced currents on buried cables. Part II: the effect of a horizontally stratified ground[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(5): 1146-1154.
- [13] Grivet-Talocia S, Huang H M, Ruehli A E, et al. Transient analysis of lossy transmission lines: an efficient approach based on the method of characteristics[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2004, 27(1): 45-56.
- [14] Erdin I, Dounavis A, Achar R, et al. A spice model for incident field coupling to lossy multiconductor transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001, 43(4): 485-494.
- [15] Dounavis A, Achar R, Nakhla M S. Efficient passive circuit models for distributed networks with frequency-dependent parameters[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2000, 23(3): 382-392.
- [16] Nakhla N M, Dounavis A, Achar R, et al. DEFACT: delay extraction-based passive compact transmission-line macromodeling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2005, 28(1): 13-23.
- [17] Xie Yanzhao, Canavero F G, Maestri T, et al. Crosstalk analysis of multiconductor transmission lines based on distributed analytical representation and iterative technique[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, 52(3): 712-727.
- [18] 张洪才, 何波. 有限元分析——ANSYS 13.0从入门到实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. (Zhang Hongcai, He Bo. Finite element analysis—ANSYS 13.0 from rudiments to applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2011)
- [19] Harrington R F. Field computation by moment methods[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1993.
- [20] Harrington R F. Matrix methods for field problems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 55(2): 136-149.
- [21] Erdin I, Nakhla M S, Achar R. Circuit analysis of electromagnetic radiation and field coupling effects for networks with embedded full-wave modules[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2000, 42(4): 449-460.
- [22] Rachidi F, Tkachenko S. Electromagnetic field interaction with transmission lines: from classical theory to HF radiation effects[M]. Southampton: WIT, 2008.
- [23] Du Ziweihua, Xie Yanzhao, Canavero F G. A spice-compatible macromodel for field coupling to multiconductor transmission lines based on the analog behavioral modeling[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, 61(6): 1884-1890.