

基于微波网络参数的非均匀传输线终端响应研究

鲁合德¹, 朱峰², 刘庆想¹, 李鑫²

(1. 西南交通大学物理科学与技术学院 成都 610031; 2. 西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

【摘要】为了研究电磁场对有损大地非均匀传输线终端响应的影响,以传输线模型为基础,应用微波网络参数转移矩阵推导了平面波入射条件下有损大地上突变型非均匀传输线终端响应公式。利用该公式可精确计算突变型非均匀传输线的终端响应大小。为了证明该理论的正确性,对有损大地上接有转换器的突变型非均匀传输线结构进行了理论分析计算。分别对不同电导率有损大地的情况进行了理论分析计算:不同电导率对终端感应电流的影响相差小于3 dB。最后结合实际选取大地电导率的典型值0.01S/m对该非均匀传输线结构终端电流响应进行了实测。实测结果与理论结果对比,两者吻合较好,因此该微波网络转移矩阵方法特别适合对突变型非均匀传输线场线耦合终端响应的求解计算。

关键词 突变型非均匀传输线; 转换器; 微波网络参数; 转移矩阵; 传输线模型
中图分类号 TN97 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.05.010

Research on Terminal Response of Abruptly Non-Uniform Transmission Line Based on Microwave Network Parameters

LU He-de¹, ZHU Feng², LIU Qing-xiang¹, and LI Xin²

(1. School of Physics Science and Technology, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University Chengdu 610031)

Abstract In order to study the terminal response characteristics of abruptly non-uniform line on a lossy ground exposed in radiation field, the terminal response formula of abruptly non-uniform transmission line above a lossy ground is derived based on transmission line model and microwave network parameters transition matrix. The terminal response of the abruptly non-uniform line can be calculated accurately based on the derived formula. To confirm the validity of the theory, the abruptly non-uniform transmission line with a converter is analyzed and calculated theoretically. The terminal response of transmission line structure with different conductivity is analyzed and calculated theoretically: the influence of different conductivities on the terminal conducted current is less than 3dB. Based on practice, the terminal response of non-uniform transmission line with a converter above a lossy ground, whose conductivity is 0.01S/m, is measured. It is shown that the theoretical results are in agreement with the measured results. This proves that the method of microwave network transition matrix in this paper is especially suitable for the calculation of the response of the response of the abruptly non-uniform lines.

Key words abruptly non-uniform transmission line; converter; microwave network parameters; transition matrix; transmission line model

无论是电力系统还是电子信息系统,都离不开各类传输线来进行能量或信号的传输,而传输线系统极易受到外部电磁场的影响。外部电磁场在传输线上产生感应电流,从而将能量施加到传输线上,影响传输线正常的响应,因此电磁场与传输线之间的耦合作用是电磁兼容的关键问题之一^[1-3]。传输线模型在电磁兼容计算模型中扮演着重要角色^[4],如多导体传输线间的串扰^[5-7]、外电磁场照射下的传输线响应^[8-10]等一直是电磁兼容研究的热点。对于场线

耦合的研究,文献[6, 11]分别给出了不同的计算模型;文献[12-13]研究了大地对传输线的影响效果,得到地电阻的不同求解形式。文献[14]对传输线和散射模型在计算高空核电磁脉冲对地面上长导线的响应进行了比较,并对两种模型进行了数值计算。文献[15-16]应用细线天线理论推导了电磁场对有损地面上有限长传输线场线耦合电报方程的一般形式及其时域方程,并同传输线模型进行了对比计算。文献[17]使用时域BLT方程对非线性终端传输线进行

收稿日期: 2017-06-21; 修回日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(U1434203)

作者简介: 鲁合德(1988-),男,博士生,主要从事电磁兼容场线耦合相关方面的研究。

了分析研究。文献[18]对不同传输线模型进行了比较分析。文献[19]利用电磁拓扑学使用扩展的BLT方程得到了电偶极子激励下架空传输线的瞬态响应。文献[20-21]对有损大地架空屏蔽线缆耦合特性进行分析研究, 并对传输线共模和异模分量进行了分析计算。

不同传输线之间经常会使用转换器进行连接, 而转换器的加入会造成传输线特性的突变, 使得传输线整体不均匀。文献[1, 22-25]对非均匀传输线的研究作了大量工作。文献[1]基于Sturm-Liouville特征函数解及有限差分法得到有场激励情况下的非均匀传输线响应。文献[26]对非均匀传输线的场路特性进行了详细的研究。文献[27]利用等效电路法解决电磁脉冲注入下有损非均匀传输线及其网络端接非线性负载的时域响应问题。

微波网络是用参数化矩阵表示任意微波端口的特性, 不用考虑网络内部详细的场结构, 只需要知道端口处的参数即可, 对于只关心终端响应的情况非常适用。转移矩阵(或链参数矩阵)是微波网络参数矩阵的一种, 它给出的是传输线输入端电压电流与输出端电压电流间的关系, 对于由几部分串联而成的传输线, 其总转移矩阵是每个部分转移矩阵的乘积^[5,28]。因此对于突变型非均匀传输线可以等效为几段均匀传输线的级联, 通过转移矩阵相乘得到总转移矩阵, 进而得到最终的终端响应。总结文献发现, 对于非均匀传输线的计算, 文献[5]首先提出使用微波网络的转移矩阵法计算突变非均匀传输线, 只是针对无源情况下的突变非均匀传输线的计算。有源传输线的转移矩阵法的理论计算及实验研究却很少涉及。本文以传输线模型为基础, 结合微波网络的转移矩阵方法, 推导了平面波照射下有损大地上突变型非均匀传输线的终端响应。然后结合推导公式

在不同电导率情况下, 对接有转换器的传输线结构进行了理论计算分析。最后选取大地电导率典型值0.01 S/m, 通过实验实测了接有转换器的传输线终端电流响应结果, 与通过转移矩阵级联得到的结果对比, 两者吻合较好。该计算方法特别适合突变型非均匀传输线终端响应的计算, 为计算接有转换器的非均匀传输线提供了理论方法。

1 微波网络转移矩阵参数

微波网络的转移矩阵是用来描述二端口网络输入端口电压和电流与输出端口电压和电流关系的。二端口网络结构如图1所示。转移矩阵元素无明确的物理意义, 但特别适合分析二端口网络, 尤其对于级联网络的计算, 可以直接通过矩阵相乘得到, 其转移矩阵为^[5]:

$$\begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} = \Phi_1 \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中, Φ_1 为二端口网络的转移矩阵, 是一个二维方阵。对于图2所示的级联形式, 可以用转移矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_N \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^N \Phi_i \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \Phi_N \begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

对于突变型非均匀传输线, 可以进行分段处理, 每一段都是均匀传输线, 可以得到每段均匀传输线的转移矩阵形式, 然后各均匀段的转移矩阵相乘, 进而得到突变型非均匀传输线终端响应结果。

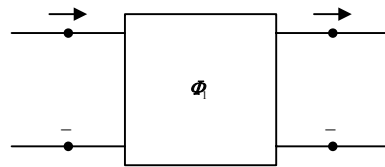


图1 二端口网络结构

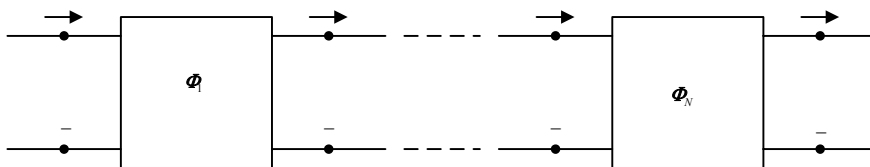


图2 N个二端口网络的级联

2 传输线终端响应公式推导

2.1 传输线模型的转移矩阵形式

计算模型如图3所示, 传输线长度为L, 导线半

径为a, 导线位于有损地面上方h处, 其中大地的电导率为 σ_g , 相对介电常数为 ϵ_r 。入射波为任意极化平面波以任意角度入射, 入射电磁场在导线上感应出沿线的分布电流源和电压源。

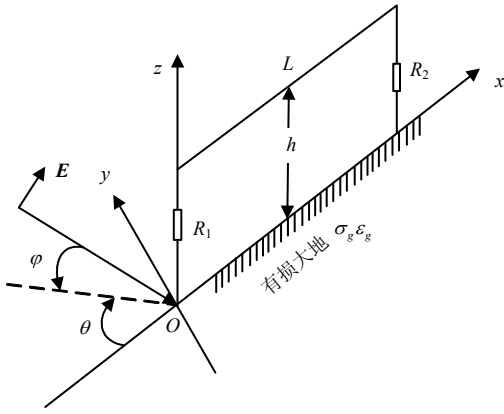


图3 平面波照射有损大地传输线模型图

图3所示的传输线模型的电报方程为^[4]:

$$\frac{dV(x)}{dx} + Z'_\omega I(x) = V_s(x) \quad (3)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} + Y'_\omega V(x) = I_s(x) \quad (4)$$

式中, Z'_ω 和 Y'_ω 分别为有损大地情况下传输线的单位长度特性阻抗和单位长度特性导纳; $V_s(x)$ 和 $I_s(x)$ 是电磁场在导线表面激励起的分布源, 通过求解麦克斯韦方程组可以得到。根据电路理论可以得到传输线的边界条件为:

$$V(0) = -R_1 I(0) \quad (5)$$

$$V(L) = R_2 I(L) \quad (6)$$

由电报方程式(3)和式(4)及它们的边界条件可以使用格林函数方法得到电报方程的解: 通过传输线电流和电压的表达式求出各点的电压和电流, 以

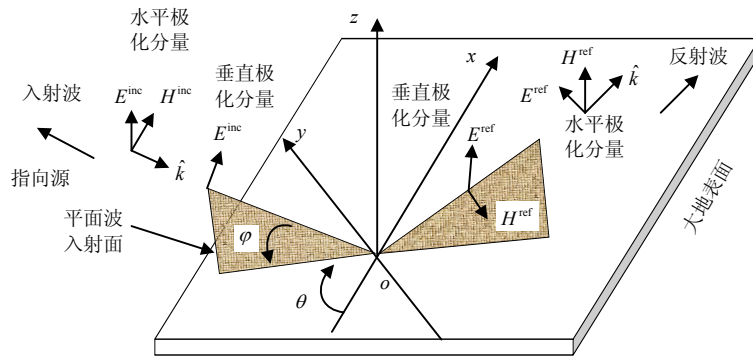


图4 有损大地表面平面波入射和反射示意图

为求得分布电压源和电流源需要先求得电磁场的电磁场分量 H_y 和 E_z ^[4]。参照图4所示, 入射场的入射角为 φ 和 θ , 地上部分电场及磁场各分量为入射场和反射场的叠加:

$$E_z^{\text{ex}}(x, z) = E_z^{\text{inc}} + E_z^{\text{ref}} = E_0 \cos \alpha \cos \varphi e^{-jkx \cos \varphi \sin \theta} [e^{jkz \sin \varphi} + R_v e^{-jkz \sin \varphi}] \quad (12)$$

此作为格林函数的激励源在源分布范围内积分, 就可以得到传输线上任意一点的电压和电流值。

当只考虑传输线终端电压电流的响应时, 将方程式(3)和式(4)的解写成转移矩阵的形式如下^[5,28]:

$$\begin{bmatrix} V(L) \\ I(L) \end{bmatrix} = \Phi(L) \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{V}_s(L) \\ \hat{I}_s(L) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $\hat{V}_s(L)$ 、 $\hat{I}_s(L)$ 分别为平面波在均匀传输线上各点激励起的分布源项在终端 L 处产生的电压和电流。转移矩阵中各元素的表达式分别为^[5]:

$$\phi_{11} = \cosh(\gamma L) = \frac{e^{\gamma L} + e^{-\gamma L}}{2} \quad (8)$$

$$\phi_{12} = -Z'_\omega \sinh(\gamma L) = -Z'_\omega \frac{e^{\gamma L} - e^{-\gamma L}}{2} \quad (9)$$

$$\phi_{21} = -\frac{1}{Z'_\omega} \sinh(\gamma L) = -\frac{1}{Z'_\omega} \frac{e^{\gamma L} - e^{-\gamma L}}{2} \quad (10)$$

$$\phi_{22} = \cosh(\gamma L) = \frac{e^{\gamma L} + e^{-\gamma L}}{2} \quad (11)$$

式中, γ 为有损大地情况下平面波的传播常数。

2.2 有损大地的影响

用菲涅尔反射系数表示电磁波入射到有损大地上产生的反射激励场, 如图4所示。入射电磁波为平面波, 振幅为 E_0 。任意极化方向入射的平面波都可以分解为垂直极化分量 ($E^{\text{inc}} = E_0 \cos \alpha$) 和水平极化分量 ($E^{\text{inc}} = E_0 \sin \alpha$), 其中 α 为极化角, 入射电场及反射电场的表达式不再详细推导, 具体推导详见文献[4]。

$$E_x^{\text{ex}}(x, 0) = E_x^{\text{inc}} + E_x^{\text{ref}} = E_0 [\cos \alpha \sin \varphi \cos \theta (1 - R_v) + \sin \alpha \sin \varphi (1 + R_h)] e^{-jkx \cos \varphi \cos \theta} \quad (13)$$

$$H_y^{\text{ex}}(x, z) = H_y^{\text{inc}}(x, z) + H_y^{\text{ref}}(x, z) = -\frac{E_0}{Z'_\omega} [\cos \alpha \cos \theta (e^{jkz \sin \varphi} + R_v e^{-jkz \sin \varphi}) + \sin \alpha \sin \varphi \sin \theta (e^{jkz \sin \varphi} + R_h e^{-jkz \sin \varphi})] e^{-jkx \cos \varphi \cos \theta} \quad (14)$$

利用式(12)~(14)式可以通过求解麦克斯韦方程得到传输线上分布源, 进而通过式(7)得到传输线的终端响应值。

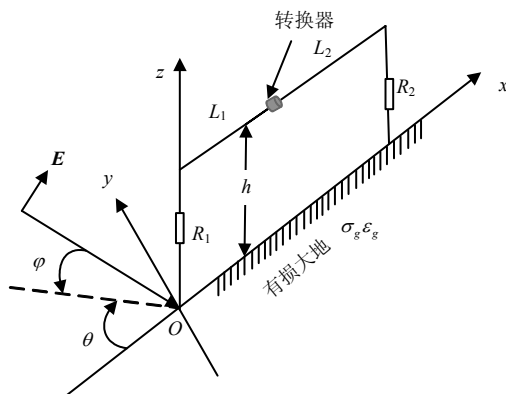
对于有损大地情况, 可以将地面的影响考虑成附加了单位地电阻 Z_g , 地电阻的大小用文献[13]的近似表达式得到:

$$Z_g = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1+\gamma_g h}{\gamma_g h}\right) \quad (15)$$

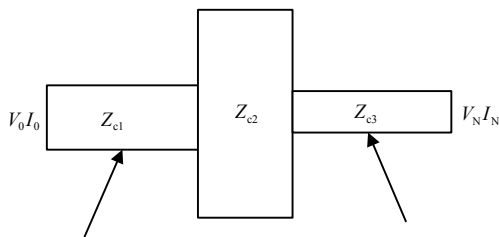
式中, γ_g 为电磁波在大地中的传播常数。有损大地的影响是通过影响电磁波的传播常数影响地电阻的大小, 从而对传输线的响应产生影响。不同的大地电导率的电阻大小不同。利用该地阻抗可以求得有损大地情况下传输线的特性阻抗和特性导纳。

3 理论计算

为了证明上述理论的正确性, 本节对接有转换器的非均匀传输线结构进行理论计算, 讨论不同大地电导率对理论计算结果的影响。



a. 转换器连接不同特性传输线模型图



b. 转换器连接的传输线等效网络结构图

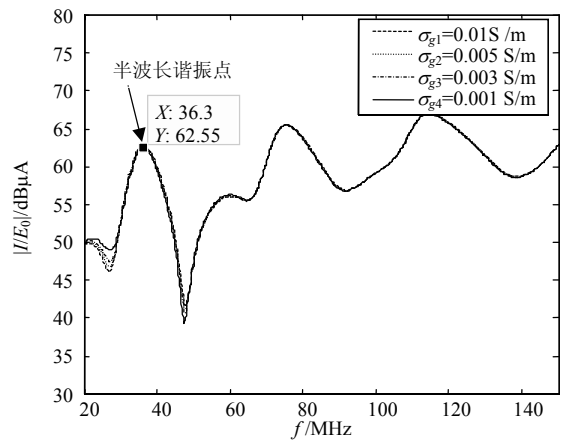
图5 传输线与转换器连接示意图

非均匀传输线结构如图5所示, 两段特性不同的均匀传输线中间通过转换器进行连接。该结构在连接处传输线特性突变导致传输线整体不均匀, 该结构可以等效为三段均匀传输线的级联, 从而利用上

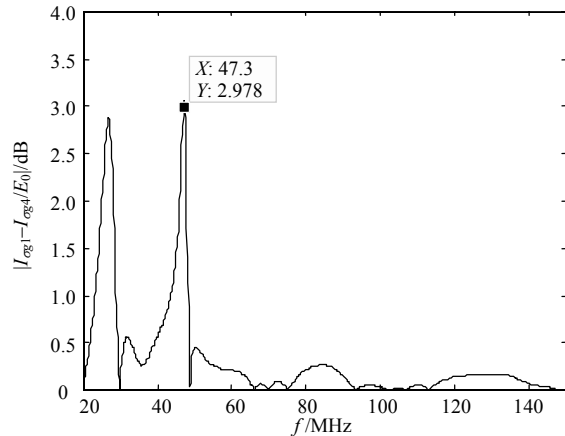
面推导的公式进行理论计算。其中传输线1和传输线2的长度均为4 m($L_1=L_2=4$ m), 半径分别为 $a_1=4$ mm, $a_2=2$ mm。传输线距离地面的高度 $h=0.3$ m, 平面波采用垂直计划照射(即 $\alpha=0$), 入射角度 $\varphi=45^\circ$, $\theta=45^\circ$, 传输线两端电阻 $R_1=0 \Omega$, $R_2=50 \Omega$ 。

通过式(8)~式(11)可以得到传输线1和传输线2的网络参数转移矩阵 Φ_1 和 Φ_3 , 选用的转换器的特性阻抗为 $Z_{c2}=50 \Omega$, 其转移矩阵为 Φ_2 。则传输线2终端的响应结果由式(7)可以得到:

$$\begin{bmatrix} V_N \\ I_N \end{bmatrix} = \Phi_1 * \Phi_2 * \Phi_3 \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{V}_s \\ \hat{I}_s \end{bmatrix} \quad (16)$$



a. 不同大地电导率传输终端电流响应



b. 电导率 0.001 S/m 和 0.01 S/m 的电流响应的差值曲线

图6 不同大地电导率情况下传输线2终端电流响应结果

根据上述推导结果, 利用MATLAB编程理论计算不同大地电导率情况下传输线2终端响应的频谱结果, 如图6所示。通过图6可以看出, 大地电导率对结果的影响很小, 通过图6b可以看出只在低频端几个特殊频点影响较大, 最大相差2.978 dB, 因此在实验验证时选取电导率的典型值 $\sigma_g=0.01$ S/m; 传输线终端感应电流呈现谐振现象, 这是由于传输线两端阻抗不匹配反射的结果, 图中第一个谐振点对应传输线非均匀处半波长谐振; 在高频端, 传输线终

端感应电流整体大于低频端感应电流。

4 实验验证

为了验证上述数值计算结果的正确性,对接有转接头的传输线的电流响应进行实测验证。实验中用到的实验设备及参数如表1所示。实验测试平台布置示意图如图7所示,天线距离线缆的距离为25 m,因此线缆位置属于天线测试各频点的远场区。信号发生器产生特定频率的电磁波通过天线进行发射以此来近似平面波照射。

表1 实验设备及参数

实验设备	型号	技术指标
信号源	Agilent N9310A	9 kHz~3 GHz
发射天线	R&S:HK116	20 MHz~300 MHz
电流探头	BK-CP-02	10 Hz~100 MHz
接收机	R&S ESCI	9 kHz~3 GHz
线缆、转接头	HUBER+SUHNER	RG_213、32-N-50
场强仪	TES-593	10 MHz~8 GHz

首先在没有传输线存在时使用场强仪测量传输线1始端位置处的场强大小,从而可以以此场强值计算得到传输线2终端电流响应的理论值。然后使用电流探头连接到接收机上,对传输线2的终端电流响应进行实测。接收机上得到的读数为电压值,需要加修正因子转换为电流值,同时电缆存在一定的损耗,还要加上电缆的损耗才是实测的电流值。

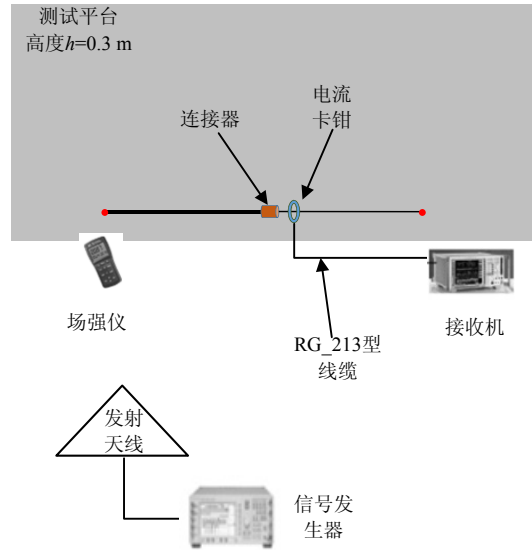


图7 实验测试平台示意图

选取感应电流极小值和极大值点附近的频率,同时选取几个典型频率值进行实测,根据场强大小,利用微波网络参数转移矩阵理论方法计算得到的电流响应值与实测电流响应值对比见表2。其中所用线缆为RG_213型号线缆,单位长度的衰减系数为:

$$Att = a\sqrt{f} + bf \quad (17)$$

式中, $a=0.1679$; $b=0.0585$; f 的单位为GHz; Att 单位为dB/m。其中所用线缆的长度为5 m,由此可以得到不同频率下线缆的损耗值。其中,电流实测值=接收机电压读数+修正因子+线缆损耗。表2给出了感应电流实测值与理论计算值的对比结果。

表2 感应电流理论值与实测值对比结果

频率/MHz	场强/ $V \cdot m^{-1}$	理论值/ $dB\mu A$	接收机读数/ $dB\mu V$	修正因子/dB	线缆损耗/dB	实测值/ $dB\mu A$	误差/dB
27.5	0.56	27.46	43.73	-17.0	0.15	26.88	0.58
30	0.84	44.25	60.28	-17.0	0.15	43.43	0.82
36.3	0.77	48.17	63.68	-17.0	0.17	46.83	1.34
43	0.68	36.91	53.07	-17.0	0.19	36.24	0.67
48	0.74	29.84	47.48	-17.0	0.20	30.63	0.79
60	0.61	34.88	50.42	-17.0	0.22	33.64	1.24
75	0.68	44.54	62.01	-16.9	0.25	45.26	0.72
90	0.66	39.43	53.87	-16.8	0.28	37.45	1.98
115	0.73	48.87	52.97	-16.5	0.32	46.62	2.25

通过上表可以看出,实测结果与理论值的误差范围为0.58~2.25 dB。其中造成误差的原因有以下3点:1) 大地电导率的不均匀性会造成地电阻的不均匀,从而影响感应电场的大小;2) 线缆接头处接触不好也会对测试结果造成一定影响;3) 天线产生的电磁场在远场处可以近似看作平面波,此处的近似也会对测试结果产生一定的影响。同时接近

100 MHz的两个频点90 MHz和115 MHz实测值和理论值相差较大,这是由于电流探头工作频带范围为10 Hz~100 MHz,超出电流探头工作频段上限会造成较大误差。

综上所述,通过表2可以看出通过微波网络参数转移矩阵理论计算得到的理论值与实测值之间误差在3 dB以内,证明了使用微波网络参数方法计算突

变型非均匀传输线的正确性。

5 结束语

本文将微波网络中的转移矩阵应用到传输线模型中, 对有损大地上突变型非均匀传输线进行数值计算, 并通过实验进行了验证, 实验结果与理论计算结果吻合较好。该方法特别适合外场激励下有明显突变的非均匀传输线终端响应的计算, 省去了传输线中间非均匀段的繁琐计算, 只要知道传输线一端的响应参数, 另一端的响应参数可以很容易地得到。为计算接有转接器等类型非均匀传输线提供了理论方法。

参 考 文 献

- [1] SEBASTIAN S, ANDREAS M, MARCO L. Efficient modal network model for nonuniform transmission lines including field coupling[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(4): 1359-1366.
- [2] MARCO L, ANDREAS M. A foster-type field to transmission line coupling model for broadband simulation[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2014, 56(6): 1630-1637.
- [3] FARHAD R. A review of field to transmission line coupling models with special emphasis to lightning-induced voltages on overhead lines[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, 54(4): 898-911.
- [4] FREDERICK M T, MICHEL V, TORBJORN K. EMC analysis methods and computational models[M]. New York, USA: John Wiley and Sons Inc, 1997.
- [5] CLAYTON R P. Analysis of multiconductor transmission line [M]. New York, USA: John Wiley and Sons, Inc, 2008.
- [6] 闫哲, 何晶, 孙婉君, 等. 应用电磁拓扑方法求解孔线耦合的瞬态响应[J]. *电子科技大学学报*, 2013, 42(6): 852-856.
YAN Zhe, HE Jing, SUN Wan-jun. Transient response of aperture and lines coupling solved by using electromagnetic topology method[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(6): 852-856.
- [7] 叶志红, 廖成, 张敏, 等. 基于时域BLT的多导体传输线串扰响应分析[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(7): 201-204.
YE Zhi-hong, LIAO Cheng, ZHANG Min, et al. Analysis of cross-talk responses of multi-conductor transmission lines based on time domain BLT equation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(7): 201-204.
- [8] XIE Hai-yan, LI Yong, QIAO Hai-liang, et al. Empirical formula of effective coupling length for transmission lines illuminated by E1 HEMP[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2016, 58(2): 58-64.
- [9] GASPARD L, SERGEY V T, FARHAD R, et al. High-frequency electromagnetic coupling to multiconductor transmission lines of finite length[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(6): 1714-1723.
- [10] 周香, 曹玉梅, 臧家左. 基于BLT方程的外场照射下线缆终端耦合响应分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(6): 1061-1065.
ZHOU Xiang, CAO Yu-mei, ZANG Jia-zuo. Analysis of terminal coupling response of the cable exposed in radiation field based on BLT equation[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(6): 1061-1065.
- [11] TAYLOR C, SATTERWHITE R, HARRISON C. The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1965, 13(6): 987-989.
- [12] VANCE E F. Coupling to shielded cables[M]. Melbourne, Australia: R E Krieger, 1988.
- [13] SUNDE E D. Earth conduction effects in transmission systems [M]. New York, USA: Van Nostran, 1949.
- [14] FREDERICK M T. Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1992, 34(2): 93-99.
- [15] DRAGAN P, FARHAD R, SERGEY V T. Generalized form of telegrapher's equations for the electromagnetic field coupling to finite-length lines above a lossy ground[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2007, 49(3): 689-697.
- [16] DRAGAN P, ABDOLHAMID S, FARHAD R, et al. Time-domain generalized telegrapher's equations for the electro-magnetic field coupling to finite length wires above a lossy ground[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, 54(1): 218-224.
- [17] FREDERICK M T. 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.
- [18] 王川川, 汪连栋, 曾勇虎, 等. 场线耦合问题研究现状及其发展综述[J]. *电子科学研究所学报*, 2014, 9(4): 353-359.
WANG Chuan-chuan, WANG Lian-dong, ZENG Yong-hu, et al. The present research and development trend of transmission line system's coupling with electromagnetic fields [J]. *Journal of CAEIT*, 2014, 9(4): 353-359.
- [19] 谢莉, 雷银照. 架空传输线在电偶极子激励下的瞬态电磁响应[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(4): 6-13.
XIE Li, LEI Yin-zhao. Transient electromagnetic response of overhead transmission line excited by an electric dipole[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(4): 6-13.
- [20] 朱峰, 邱日强, 牛大鹏, 等. 基于有源传输线模型的地-架空屏蔽线缆耦合特性分析与参数计算[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(4): 22-27.
ZHU Feng, QIU Ri-qiang, NIU Da-peng, et al. Coupling characteristic analysis and parameter calculation of ground and above-ground shielded cables based on transmission line with a distributed source model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(4): 22-27.
- [21] 邱日强, 朱峰. 有损大地上屏蔽电缆耦合的感应电流分布特性[J]. *高压技术*, 2016, 42(8): 2451-2456.

- QIU Ri-qiang, ZHU Feng. Induced current distribution characteristics for the electromagnetic field coupling to shielded cable above a lossy ground[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2451-2456.
- [22] HEIKO H, TORSTEN S, JURGEN N. New propagation models for electromagnetic waves along uniform and non-uniform cables[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(3): 345-352
- [23] EMAD G, MICHEL N. Efficient simulation of non-uniform transmission lines using integrated congruence transform[J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration(VLSI)Systems, 2004, 12(12): 1307-1320
- [24] MOHAMMAD K A. Analysis of coupled nonuniform transmission lines using Talor's series expansion[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006, 48(3): 594-600.
- [25] 贾磊, 张亚婷, 赵训君, 等. 非均匀传输线中电磁暂态过程的新型时域算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(2): 430-434
- JIA Lei, ZHANG Ya-ting, ZHAO Xun-jun, et al. New time domain algorithm for computation of electromagnetic transients in non-uniform transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(2): 430-434.
- [26] 张卉. 非均匀传输线场路特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- ZHANG Hui. Research on the field and circuit characteristics of non-uniform transmission line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [27] 杨清熙, 周星, 王国庆, 等. 一种有损非均匀传输线时域分析方法[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(11): 110-116.
- YANG Qing-xi, ZHOU Xing, WANG Guo-qing, et al. Equivalent circuit model for transient analysis of lossy non-uniform transmission line network[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(11): 110-116.
- [28] CLATON R P, ROBERT T A. Coupling of electromagnetic fields to transmission lines[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Boulder, Australia: IEEE, 1981.

编辑 税红