

文章编号：2095-4980(2024)03-0324-07

基于 Agrawal 模型的双绞线受扰机理与场线配置

祁子扬，陈韦韦，戎帆，吉宇航，闫丽萍，赵翔

(四川大学 电子信息学院，四川 成都 610065)

摘要：电磁环境日益复杂，电磁兼容性问题涌现，各类干扰对传输线信号传输造成的影响不容忽视。基于经典场线耦合 Agrawal 模型，结合时域有限差分法(FDTD)对双绞线(TWP)各场线参数的电磁耦合效应进行定量计算，为减少受扰的场线配置提出指导性意见。总结了各参数对双绞线电磁耦合效应的具体影响：线长会影响端接负载处的选频特性；节距影响较小，较小的节距会减小耦合；距地高度会显著影响电磁耦合，且高度越高耦合越强；决定入射方式的入射角、方位角和极化角对电磁耦合效应均有不同程度的影响，通过电场切向分量切片图可知，对某一角的分析需要考虑到其余两角的影响。双绞线传输线的电磁耦合效应与场线参数密切相关，各参数均有不同程度的影响，借助本文模型的计算与对结果的分析，可获得有效的低受扰双绞线传输线配置。

关键词：Agrawal 模型；时域有限差分法；场线参数；受扰分析

中图分类号：TN

文献标志码：A

doi: 10.11805/TKYDA2023246

Disturbed mechanism and field-line configuration of Twisted-Wire Pair based on Agrawal model

QI Ziyang, CHEN Weiwei, RONG Fan, JI Yuhang, YAN Liping, ZHAO Xiang
(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Due to the complex electromagnetic environment, Electromagnetic Compatibility(EMC) problems emerge, and the impact of interference on transmission lines can not be ignored. Based on the classical field-line coupling model—Agrawal model, this paper calculates the electromagnetic coupling effect of each field-line parameter of Twisted-Wire Pair(TWP) with Finite-Difference Time-Domain (FDTD), and gives guidance on the field-line configuration to reduce the disturbance. Finally, the influence of each parameter on the electromagnetic coupling effect of the interference source on the twisted pair is summarized: length will affect the frequency selection characteristic at the terminal load; the effect of pitch is small, and the shorter pitch will decrease the coupling; the height significantly affects the electromagnetic coupling, and the higher the height, the greater the coupling is; the incidence angle, azimuth and polarization angle all influence the electromagnetic coupling effect differently, and it can be seen from the tangential component of electric field's slice diagram that the analysis on one corner needs to take into account the influence of the other two corners. The electromagnetic coupling effect of TWP transmission line is closely related to the field line parameters, and each parameter shows different degrees of influence. Through the calculation of the model in this paper and the analysis on the results, an effective configuration of low-disturbed TWP transmission line can be obtained.

Keywords: Agrawal model; Finite-Difference Time-Domain; field-line parameter; disturbed analysis

电子设备的普及与无线通信技术的发展使频谱资源日益紧张，电磁环境日益复杂，凸显出一系列电磁兼容性(EMC)问题^[1-3]。作为电子设备的重要组成部分，传输线的 EMC 问题备受关注^[4-5]。在干扰场的辐照下，传输线上会产生等效分布源，干扰其传输信息或能量，甚至有损害设备的风险，这就是传输线的场线耦合效应^[6-10]。

双绞线(TWP)相较于直导线，能够有效减小外界电磁噪声与线间串扰，广泛用于电子设备或系统中^[11]。与直

导线结构特性的差异决定了两者场线耦合效应的不同，目前有对TWP场线耦合模型中线长^[12-19]、节距^[16-18,20]、距地高度^[21]、入射方式^[13,17,19,21-22]的场线耦合效应的分析报道。2014年，王利萍等基于BLT(Bilotti-Levy-Tanaka)方程，分析了不同线长、线间距与入射方式的TWP终端负载在1~100 GHz频段的电磁耦合特性^[17]；2016年，王浩等采用实测方式，改变雷电电磁脉冲场波形、线长、入射方式和终端负载，分析终端负载处的响应电压规律^[19]；2018年，YAN Youjie等基于时域有限差分法(FDTD)研究了不同线长、入射角和方位角下，TWP的瞬态响应特性^[13]；同年，LIAO Huimin等对0.1 m、0.4 m和0.8 m节距，10 m、20 m、40 m的TWP起始端进行时域和频域分析^[16]。但这些研究大部分仅对1~3个场线参数进行分析，缺乏参数全方面、系统性的研究。本文旨在通过经典场线耦合Agrawal模型，结合FDTD方法对TWP电磁耦合效应进行数值模拟与分析。通过广泛场线参数的电磁耦合效应分析，深入探究TWP受扰机理，为降低辐射干扰的TWP配置提供指导性意见。

1 计算模型的建立与验证

1.1 TWP参数方程与p.u.1电感电容矩阵计算

建立的TWP场线耦合模型如图1所示。对于一段中心轴距离理想地平面为 h ，沿 z 轴延伸，导体间距为 s ，节距为 p 的TWP，其三维坐标系下的沿线几何位置参数为^[23]：

$$\begin{cases} x_n(l) = h - \frac{s}{2}(-1)^{n+1} \sin(\alpha l) \\ y_n(l) = \frac{s}{2}(-1)^{n+1} \cos(\alpha l) \\ z_n(l) = \frac{p\alpha l}{2\pi} \end{cases} \quad (1)$$

式中： n 为导体编号($n=1, 2$)； l 为沿线弧长；扭转因子 $\alpha = \left[\left(\frac{s}{2} \right)^2 + \left(\frac{p}{2\pi} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$ 。

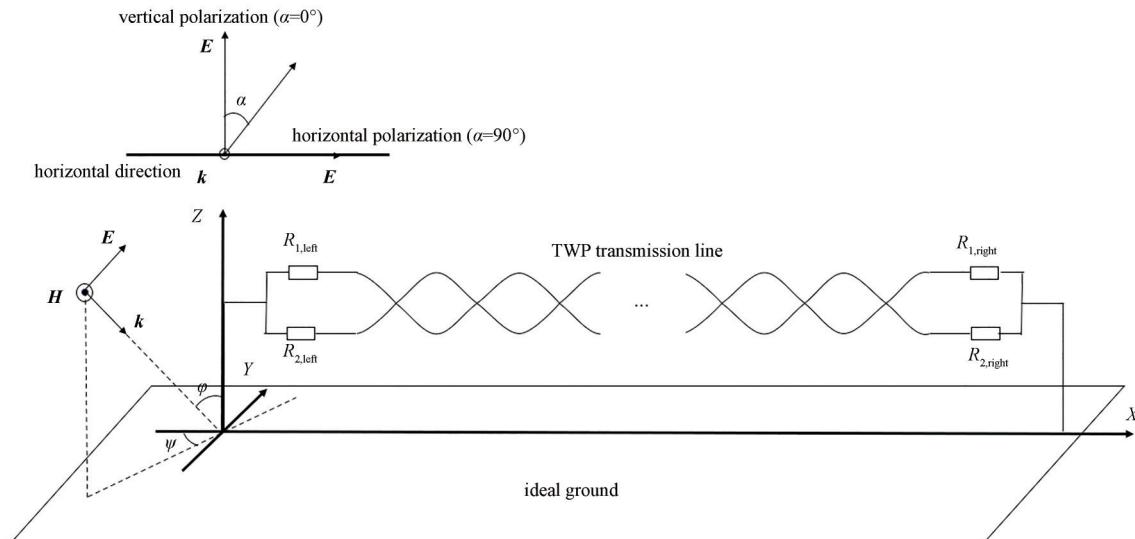


Fig.1 Field line coupling model of TWP
图1 TWP场线耦合模型

TWP的p.u.1电感矩阵为 $\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_s \end{bmatrix}$ ，其中，自感系数 $L_s = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r_w}$ ，互感系数 $L_m = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{2h}{s} \right) + \frac{s^2}{16h^2} \right)$ ， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 为真空磁导率， r_w 为TWP导体半径。进一步可以计算出p.u.1电容矩阵 $\mathbf{C} = c_0^{-2} \mathbf{L}^{-1}$ ， $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s为真空中光速^[24]。

1.2 FDTD法求解Agrawal场线耦合模型及验证

Agrawal场线耦合模型又称“散射电压模型”，该模型将外界电磁场入射看作电磁散射问题，以电场在导体的切向分量作为激励传输线的分布电压源^[9]：

$$\begin{cases} \frac{\partial U^s(l,t)}{\partial x} + L \frac{\partial I(l,t)}{\partial t} = E_t^s(l,t) \\ \frac{\partial I(l,t)}{\partial x} + C \frac{\partial U^s(l,t)}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $U^s(l,t)$ 和 $I(l,t)$ 分别为沿线散射电压与感应电流； $E_t^s(l,t)$ 为激励电场的导体切向分量。总感应电压 $U(l,t) = U^s(l,t) - \int_{h_{ref}}^{h_i} E_z^e(l,t) dz$ ， $\int_{h_{ref}}^{h_i} E_z^e(l,t) dz$ 表示激励场垂直于地面的分量从参考导体(理想地面)到导体的积分，对双导体， $i=1,2$ 。本文通过 FDTD 法求解 Agrawal 场线耦合模型获得沿线电压电流时域响应，并通过傅里叶变换得到频域响应。

采用某商业线缆求解器验证本文求解器的计算结果。TWP 由以下线参数表征：线长 $L=0.5\text{ m}$ 、 1 m 、 2 m ，距地高度 $h=0.05\text{ m}$ ，绞线间距 $s=0.0032\text{ m}$ ，节距 $p=0.1\text{ m}$ ，导体半径 $r_w=0.0003\text{ m}$ 。在幅值为 1 V/m ，入射角为 60° ，方位角为 0° 的垂直极化平面波激励下，在两导体终端均加载 50Ω 。1 号线左端负载在 $30\sim300\text{ MHz}$ 的电压频谱下计算结果对比如图 2 所示，由此可以验证该求解器的准确性与有效性。

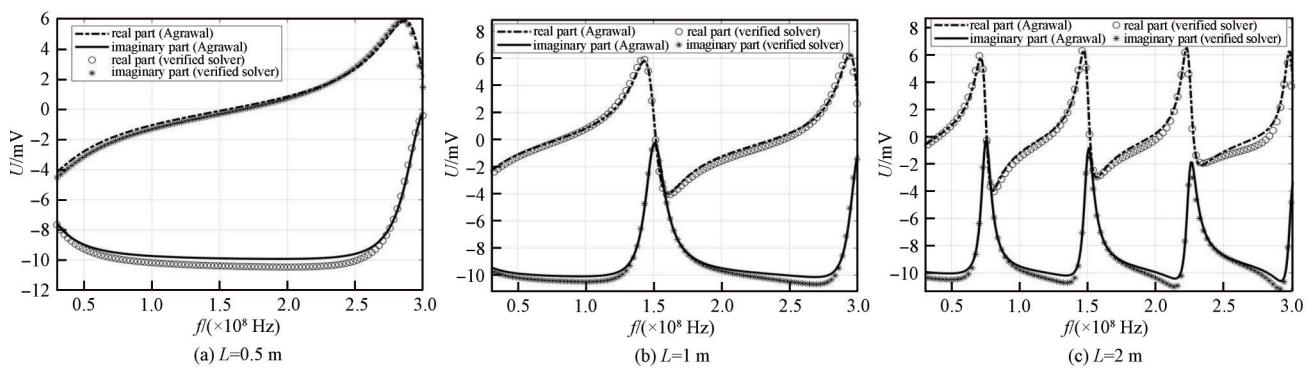


Fig.2 Calculated results of the confirmatory example obtained by the solver in this paper

图 2 采用本文求解器获得的验证性算例计算结果

2 线长、节距和距地高度对电磁耦合效应的影响

为研究不同线长(本文线长指 TWP 沿纵向从首端至尾端的直线距离)下终端负载频谱在 $30\sim300\text{ MHz}$ 的变化趋势，设置 TWP 参数距地高度 $h=0.05\text{ m}$ ，绞线间距 $s=0.0032\text{ m}$ ，节距 $p=0.1\text{ m}$ ，导体半径 $r_w=0.0003\text{ m}$ ，在两导体终端均加载 50Ω 。入射波为垂直极化平面波(极化角 $\alpha=0^\circ$)，入射角 $\varphi=60^\circ$ ，方位角 $\psi=0^\circ$ ，场强幅值为 1 V/m ，设置线长 $L=0.5\text{ m}$ 、 1 m 、 1.5 m 、 2 m 、 2.5 m 。TWP 的 1 号导体左右两端电压频谱如图 3(a)~(b) 所示。

如图 3(a) 所示，TWP 线长决定了场线耦合效应的选频特性^[16-19]。各线长在该频段的弱耦合点数量正比于线长。如 $L=0.5\text{ m}$ 时，弱耦合点在约 300 MHz 处； $L=1.5\text{ m}$ 时，弱耦合点在约 100 MHz 、 200 MHz 和 300 MHz 处。与图 3(a) 相比，图 3(b) 所示的导体右端幅值波动较大，可能是电压波通过非均匀分布参数的传输线传播，并与入射场的激励电压相叠加而导致。考虑到导体左右端频谱特性并无太大差异，接下来的结果仅呈现导体左端。

设置线长 $L=1\text{ m}$ ，节距 $p=0.05\text{ m}$ 、 0.1 m 、 0.2 m 、 0.25 m ，维持其余参数不变。TWP 的 1 号导体左端电压频谱如图 3(c) 所示。节距不会破坏选频特性，且对电磁耦合效应的影响并不显著，较小的节距可在一定程度上减小电磁耦合效应。关于 TWP 非均匀节距的影响，可参考文献[20]。

设置线长 $L=2\text{ m}$ ，距地高度 $h=0.05\text{ m}$ 、 0.075 m 、 0.1 m 、 0.125 m 、 0.15 m 。TWP 的 1 号导体左端电压频谱如图 3(d) 所示。考虑到经典场线耦合模型的准 TEM 波近似条件，即传输线的横向尺寸需满足电小条件，否则传输线上会出现更高阶的天线模式，经典模型的计算结果不再适用。一般以横向尺寸小于 $1/6$ 波长为准则^[25]。距地高度同样不会破坏选频特性，但对耦合电压有较大影响。减小距地高度可以减小辐射场到传输线的耦合。该结果在频域上拓展并验证了文献[26] 中的相同冲击电流下，传输线耦合电压会随高度升高而增加的结论。对于距地高度的影响机理，可以通过斯托克斯定理解释。导体与理想地平面可构成一个封闭曲面，且相同线长下曲面面积随距地高度增加而增加，从而导致耦合电压增大。因此在实际布线中，应将传输线与地平面尽量靠近。

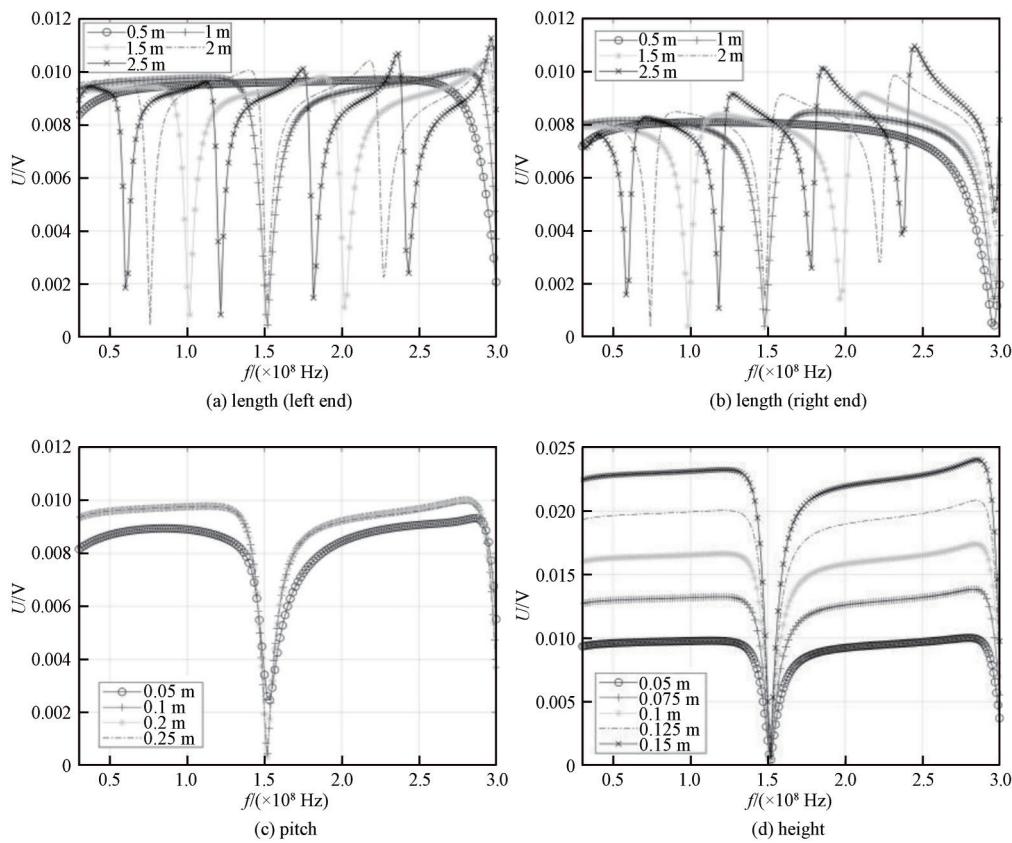


Fig.3 Voltage spectrum of different line parameters
图3 不同线参数的电压频谱

3 外场入射方式对TWP电磁耦合效应的影响

3.1 入射角、方位角和极化角对电磁耦合效应的影响

模拟辐射干扰的平面波激励由幅值和入射方式决定，本文主要讨论入射方式对电磁耦合效应的影响。平面波的入射方式由入射角 φ 、方位角 ψ 和极化角 α 表征，各角定义如图1所示。

以方位角 $\psi=0^\circ$ 为例，此时入射面与TWP纵向方向平行，入射角 φ 为入射向量与 z 轴负半轴的夹角。设置线长 $L=1\text{ m}$ ，入射角 $\varphi=0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ，维持其余参数不变。TWP的1号导体左端电压频谱如图4(a)所示。入射角对弱耦合点频率与峰值有较大影响，在接近垂直入射($\varphi=0^\circ$)时，会消除 $L=1\text{ m}$ 在150 MHz下的弱耦合点。入射波对电磁耦合效应的影响主要取决于传输线方程中激励电场在导体切向方向的分量 $E_t^e(l, t)$ 。当 $\varphi=0^\circ$ 时，入射电场方向与TWP纵向方向平行，因此较多能量耦合进入线上。

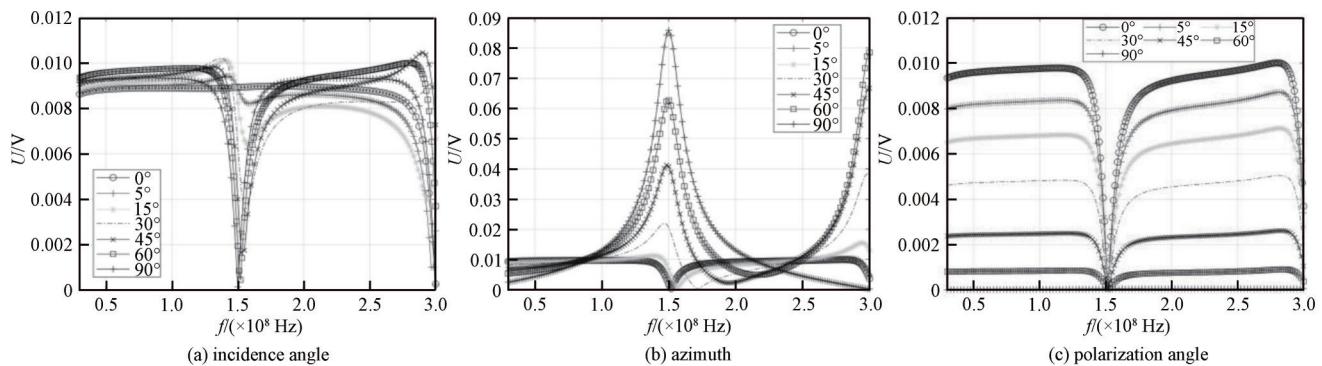


Fig.4 Voltage spectrum of different incidence angles
图4 不同入射方式的电压频谱

设置方位角 $\psi=0^\circ, 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 。TWP的1号导体左端电压频谱如图4(b)所示。可见方位角

对弱耦合点处电压值也有显著影响，且随着方位角增大，弱耦合点变为强耦合点，但不改变该点频率。当 $\psi = 90^\circ$ 时，也就是入射向量垂直于沿 TWP 纵向的直线，此时耦合最强；当 $\psi = 0^\circ$ 时，则反之。

极化角表征了电场矢量方向与入射面的夹角。设置极化角 $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 85^\circ, 90^\circ$ 。TWP 的 1 号导体左端电压频谱如图 4(c) 所示。随着极化角 α 的增加，入射波由垂直极化变为水平极化，耦合电压也逐渐减小直至接近 0V。可以注意到，在该入射角与方位角下，极化角对耦合电压有着与距地高度相似的变化规律。

3.2 入射方式对电磁耦合效应影响的进一步讨论

前文对入射方式的分析结果与基于 BLT 方程的分析结果^[19]基本吻合，但这些结果不一定具有普适性，这是因为入射角、方位角和极化角并非独立影响电场的切向分量(即分布式电压源)。若要对入射方式的影响得出一个普适的结论，需要对 3 个角综合考量，如对于水平极化的情况，在方位角为 0° 时，几乎没有能量耦合进线内；但方位角不为 0° 时，存在不可忽略的耦合能量。因此就不能认为水平极化波不会使入射场与传输线产生电磁耦合效应。

考虑到入射方式本质上是通过改变电场沿线切向分量来影响传输线的电磁耦合效应，又因 TWP 的水平分量(x 分量)占比较大，本文以入射电场的 x 分量大小反映耦合强度。入射电场在导体处 x 分量为：

$$E_x^e(x) = E_0(\cos \alpha \cos \varphi \cos \psi + \sin \alpha \sin \psi)(e^{jkh \cos \varphi} - e^{-jkh \cos \varphi})e^{-jkx \sin \varphi \cos \psi} \quad (3)$$

式中 k 为波数。取单位振幅，距地高度 $h = 0.05$ m，频率 $f = 100$ MHz， x 仅对其相位有影响。取其幅值，可以得到入射角、方位角和极化角三者对于入射电场在线上的切向分量的切片图。

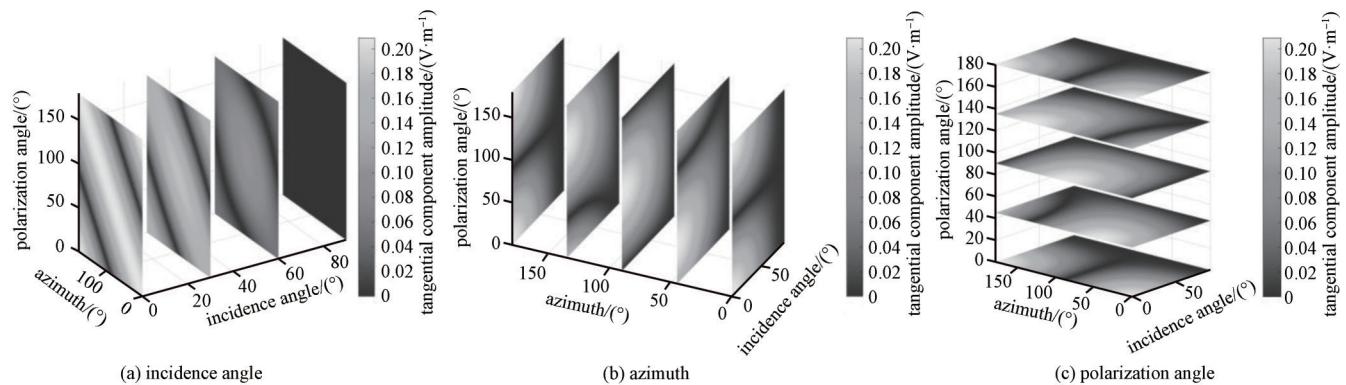


Fig.5 Slice diagrams of different angles with respect to the tangential component

图 5 各角关于切向分量的切片图

通过图 5(a) 所示的不同入射角的切片图可以发现，整体耦合强度随入射角度的增加(由垂直入射到斜入射)而减小，但耦合强弱分布(随其他两角的变化)没有太大变化。当以 90° 入射时，切向分量不随方位角与极化角而改变，且为 0，因为此时电场方向与导体纵向正交，说明入射角在 90° 时耦合最弱。图 5(b) 和图 5(c) 所示的方位角与极化角的切片图结果呈现一致，因为根据式(3)，方位角和极化角对切向分量的影响是相似的。与入射角切片不同，整体耦合强度并未随角度而变化，而耦合强弱分布呈现出周期性变化。该切片图同样也可以解释 3.1 节的结果。对某一固定的角度或者极化角，可以通过类似于对入射角的分析方式，找到耦合最弱时其余两角关系，以此对 TWP 场线进行配置。由切片图可知，抛开其余两角而单独分析某一个角对电磁耦合效应的影响，可能会导致结论在其他角度范围不再成立。

4 结论

电磁环境的日益复杂，使传输线耦合干扰造成危害不容忽视。通过得到验证的基于 Agrawal 模型和 FDTD 算法的场线耦合求解器，可以有效定量求解干扰源对传输线的电磁耦合效应。本文针对广泛使用的 TWP，计算各种线参数在不同干扰源下的电磁耦合效应，并对减小耦合干扰的场线配置提出指导性意见。研究发现：对于线参数，线长通过改变终端负载处频率响应的选频特性而显著影响干扰源对 TWP 的耦合，且在相同频域范围内谐振点的数量正比于线长。距地高度对电磁耦合效应的影响较节距更显著，一般可以通过减小距地高度与节距的方法减小电磁耦合效应。对于模拟辐射干扰的平面波入射，其入射方式参数：入射角、方位角和极化角，均对电磁耦合效应有不同程度影响。研究发现入射角 $\varphi = 0^\circ$ 、方位角 $\psi = 0^\circ$ 的水平极化波可以有效减小电磁耦合效

应。对固定平面波入射，可以通过入射角、方位角、极化角与电磁耦合效应的切片图与求解器的精确计算，调整场线配置以减小入射场在TWP切向分量从而减小耦合。本文虽然是基于经典模型开发的求解器，但旨在全面分析各种场线参数，包括大多数研究忽略的距地高度，得到其他研究没有得出的机理，如节距对耦合强度的影响、入射方式各角的耦合机理。验证加强已经得出的机理，如线长的选频特性、距地高度的影响。这是本文相较于已有相关研究的创新性。目前，经典场线耦合理论还受准横电磁波(Transverse Electric and Magnetic Field, TEM)近似的限制，对横向尺寸小于1/6波长的线参数计算存在无法忽略的误差，后续需要借助高频理论与模型对更广泛线参数进行分析。在辐射干扰方面，本文只分析了平面波固定入射情况，对更贴近物理实际的随机入射与非平面波问题需要进一步研究。

参考文献：

- [1] LEE J Y, COLLINS G J. Risk analysis of electromagnetic environmental effects in aircraft systems[C]// 2017 IEEE Aerospace Conference. Big Sky:IEEE, 2017:1–7. doi:10.1109/AERO.2017.7943922.
- [2] 刘尚合,孙国至. 复杂电磁环境内涵及效应分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(1):1–5 (LIU Shanghe,SUN Guozhi. Analysis of the concept and effects of complex electromagnetic environment[J]. Journal of the Academy of Equipment Command and Technology, 2008,19(1):1–5.) doi:10.3783/j.issn.1673–0127.2008.01.001.
- [3] 卫宁. 基于复杂系统的电磁兼容设计方法可行性分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(4):653–656. (WEI Ning. Feasibility analysis of EMC design method based on complex system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(4):653–656.) doi:10.11805/TKYDA201904.0653.
- [4] TESCHE F M, IANZOZ M, KARLSSON T. EMC analysis methods and computational models[M]. New York:John Wiley & Sons, 1996.
- [5] LI Zhuo, LIU Liangliang, GU Changqing. Generalized equivalent cable bundle method for modeling EMC issues of complex cable bundle terminated in arbitrary loads[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012(123):13–30. doi:10.2528/PIER11102601.
- [6] VANCE E F. Coupling to shielded cables[M]. New York:Wiley, 1978.
- [7] PAUL C R. Analysis of multiconductor transmission lines[M]. 2nd ed. New York:John Wiley & Sons, 2008.
- [8] 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. doi:10.1109/TAP.1965.1138574.
- [9] AGRAWAL A K, PRICE H J, GURBAXANI S H. Transient response of multiconductor transmission lines excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980, EMC-22(2): 119–129. doi:10.1109/TEMC.1980.303824.
- [10] RACHIDI F. Formulation of the field-to-transmission line coupling equations in terms of magnetic excitation field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1993,35(3):404–407. doi:10.1109/15.277316.
- [11] TANG Lijuan, YE Zhihong, CHEN Linglu, et al. The study on crosstalk of single wire and twisted-wire pair[C]// 2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation. Nanjing,China:IEEE, 2013:1008–1011.
- [12] VEROPOULOS G P, PAPAKANELLOS P J. A probabilistic approach for the susceptibility assessment of twisted-wire pairs excited by random plane-wave fields[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017, 59(3): 962–969. doi:10.1109/TEMC.2016.2626787.
- [13] YAN Youjie, MENG Lin, LIU Xiaolong, et al. An FDTD method for the transient terminal response of twisted-wire pairs illuminated by an external electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018,60(2):435–443. doi:10.1109/TEMC.2017.2729662.
- [14] MAGDOWSKI M, LABDURY J, HOLLOWAY C, et al. Measurement of the stochastic electromagnetic field coupling to an unshielded twisted pair cable[C]// 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Gothenburg:IEEE, 2014: 659–664. doi:10.1109/EMCEurope.2014.6930987.
- [15] MAGDOWSKI M, VICK R. Simulation of the stochastic electromagnetic field coupling to an unshielded twisted pair of wires[C]// 2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Denver:IEEE, 2013:33–37. doi:10.1109/IEMC.2013.6670377.
- [16] LIAO Huimin, LIU Qifeng, WU Weijun, et al. The field-wire coupling characteristics of the twisted-wire pairs illuminated by the electromagnetic pulse[C]// 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium–China(ACES). Beijing,China:IEEE, 2018:1–2. doi:10.23919/ACESS.2018.8669344.
- [17] 王利萍,周东方,饶育萍,等. 高频电磁环境下双绞线的耦合特性仿真与分析[J]. 信息工程大学学报, 2014,15(4):425–429.

- (WANG Liping,ZHOU Dongfang,RAO Yuping,et al. Modeling and simulation of twisted-pair line in HF EM environment[J]. Journal of Information Engineering University, 2014,15(4):425–429.) doi:10.3969/j.issn.1671-0673.2014.04.007.
- [18] 廖慧敏. 核电磁脉冲环境下舰船桅杆及不均匀双绞线的耦合特性研究[D]. 北京:中国舰船研究院, 2019. (LIAO Huimin. The Research on coupling characteristics of mast of ships and non-uniform twisted wires pair under nuclear electromagnetic pulse environment[D]. Beijing:China Ship Research and Development Academy, 2019.)
- [19] 王浩,陈亚洲,万浩江,等. 雷电电磁脉冲场对双绞线的耦合研究[J]. 微波学报, 2016,32(1):41–48. (WANG Hao,CHEN Yazhou, WAN Haojiang, et al. Study on coupling between lightning electromagnetic field and twisted pair[J]. Journal of Microwaves, 2016,32(1):41–48.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.201601009.
- [20] LIU Qifeng,LIAO Huimin,WU Weijun,et al. Time-domain coupling characteristics of nonuniform twisted pair cable under nuclear electromagnetic pulse[C]// 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium-China (ACES). Nanjing,China:IEEE, 2019:1–2. doi:10.23919/ACES48530.2019.9060448.
- [21] CHEN Xuqi,CHEN J X,LIU Qifeng,et al. Accurate evaluation of transmission line model at higher frequencies for characterising field-to-wire coupling of coated twisted-wire pair with a grounded conductor[C]// 2019 Joint International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sapporo and Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC Sapporo/APEMC). Sapporo,Japan:IEEE, 2019:239–242. doi:10.23919/EMCTokyo.2019.8893706.
- [22] ARMENTA R B,SARRIS C D. Modeling the terminal response of a bundle of twisted-wire pairs excited by a plane wave[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007,49(4):901–913. doi:10.1109/TEMC.2007.908812.
- [23] GASSAB O,ZHAN Qiwei,ZHOU Liang,et al. Transmission line model for a shielded TWP with apertures and generalization to braided-shielded TWP cables[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2021,63(6): 2115–2123. doi:10.1109/TEMC.2021.3066608.
- [24] PIGNARI S A, SPADACINI G. Plane-wave coupling to a twisted-wire pair above ground[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011,53(2):508–523. doi:10.1109/TEMC.2010.2061855.
- [25] HAASE H, NITSCH J, STEINMETZ T. Transmission-line super theory: a new approach to an effective calculation of electromagnetic interactions[J]. URSI Radio Science Bulletin, 2003(307):33–60. doi:10.23919/URSIRSB.2003.7909507.
- [26] 李祥超,徐晓培,董昌鑫,等. 双绞线耦合雷电电磁脉冲特性的分析[J]. 电瓷避雷器, 2018(1):1–7. (LI Xiangchao,XU Xiaopei, DONG Changxin, et al. Analysis on lightning electromagnetic pulse characteristics of twisted pair[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(1):1–7.) doi:10.16188/j.isa.1003-8337.2018.01.001.

作者简介:

祁子扬(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁兼容.email:qiziyang1009@foxmail.com.

赵 翔(1973-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁效应评估与电磁兼容、计算电磁学.

陈韦韦(1991-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁兼容、计算电磁学.

戎 帆(1994-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁兼容、计算电磁学.

吉宇航(1999-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为电磁兼容、计算电磁学.

闫丽萍(1972-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁兼容、电磁场数值计算.