

文章编号: 2095-4980(2016)03-0405-04

## 基于传输线理论的双绞线电磁脉冲响应

王川川, 曾勇虎, 蒙 洁, 贾 锐

(电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003)

**摘 要:** 双绞线是电子信息设备综合布线工程中最常用的一种线缆, 在高频电磁环境中, 双绞线将成为外界电磁信号的耦合对象, 对端接设备造成干扰甚至破坏作用。为研究双绞线的电磁脉冲效应, 基于分布参数传输线理论, 推导得到了双绞线在外界电磁脉冲激励下的耦合响应计算公式。结果表明, 在高频电磁环境中, 双绞线相对于平行线确有较强的抗干扰能力。研究方法和结论对于双绞线电磁脉冲响应的定量研究及抗干扰能力评估具有一定参考意义。

**关键词:** 双绞线; 电磁脉冲; 传输线理论; 抗干扰

**中图分类号:** TN811<sup>+</sup>.1; TM246 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201603.0405

## Response of twisted-wire pair to electromagnetic pulse based on transmission line theory

WANG Chuanchuan, ZENG Yonghu, MENG Jie, JIA Rui

(State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang Henan 471003, China)

**Abstract:** Twisted-Wire Pair(TWP) is commonly used in the comprehensive wiring of electronics and information equipment. In high frequency electromagnetic environment, TWP may couple with external electromagnetic fields, which would interfere or destroy the connected equipment. In order to research the TWP's electromagnetic pulse effect, based on transmission line theory, the calculation expressions of TWP response to external electromagnetic pulse are deduced. Results show that in high frequency electromagnetic environment, the TWP has stronger anti-electromagnetic interference ability. The research method and conclusion in this paper may be helpful to the quantification research of TWP's electromagnetic pulse effect and the anti-electromagnetic interference ability assessment.

**Key words:** Twisted-Wire Pair; electromagnetic pulse; transmission line theory; anti-electromagnetic interference

双绞线(TWP)是一对互相绝缘且绞合的导线。在电子信息设备中, 双绞线是综合布线工程中最常用的一种线型。与其他传输媒质相比, 双绞线具有抗干扰能力强、可靠性高、布线容易、价格低廉、使用方便等优点, 所以在工业控制及其他干扰较大的场所获得了广泛应用。在低频电磁环境下双绞线具有优良的抗干扰能力, 但是在高功率微波等高频电磁脉冲环境下, 实际中发现双绞线也会通过耦合引入外界电磁干扰, 对端接设备造成干扰甚至破坏作用。目前, 对于双绞线与外界电磁脉冲的耦合响应及其抗干扰能力还不是十分清楚, 因此研究双绞线在高频电磁环境下的耦合特性显得尤为必要。文献[1]基于双绞线的双螺旋结构, 研究了电场极化方向平行于电缆轴时, 平面波辐射在双绞线上的感应电流。文献[2]给出了任意极化方向平面波照射下双绞线终端感应电流的通用表达式, 但该表达式中存在不可积项。文献[3]应用软件对双绞线近端串扰进行了计算。文献[4]基于传输线模型研究了平行线的电磁脉冲响应。文献[5]应用实验方法研究了屏蔽双绞线的电磁脉冲响应, 试验环境搭建复杂。文献[6]应用统计方法和蒙特卡洛方法对绞线串扰最严重情况进行了估计, 没有考虑外场激励的影响。文献[7]基于 BLT 方程研究了双绞线的电磁耦合问题, 没有给出感应信号的瞬态响应。文献[8]提出了一种接地双绞线端接负载电磁脉冲响应的新方法。综合来看, 目前国内外对于双绞线电磁脉冲响应主要有全波分析方法和传播模型法。前者计算结果精确, 应用范围较广, 但建模计算过程复杂。本文基于分布参数传输线理

论, 推导得到了双绞线对外界电磁场响应的解析计算表达式, 可以满足工程实际需要。

## 1 双绞线场线耦合模型

在高频情况下, TWP 必须看成分布参数系统。本节利用传输线理论, 推导了双绞线在外界电磁场干扰下其首末两端感应信号的电压、电流表达式。

### 1.1 双绞线双螺旋结构模型

双绞线的双螺旋结构模型如图 1 所示<sup>[1,9]</sup>。通常, TWP 导体的电导率是频变的, 导体外绝缘层是非均匀有损耗介质。为应用传输线理论对双绞线进行研究, TWP 中每一根线的具体坐标都必须确定, 这需要用 TWP 的弧长  $l$ , 如图 1 所示。根据文献[9]所采用方法, 线 1 和 2 的位置坐标分别为:

$$x_1(l) = \frac{s \cdot \cos(\alpha l)}{2}, \quad y_1(l) = \frac{s \cdot \sin(\alpha l)}{2}, \quad z_1(l) = \frac{p \alpha l}{2\pi} \quad (1)$$

$$x_2(l) = \frac{-s \cdot \cos(\alpha l)}{2}, \quad y_2(l) = \frac{-s \cdot \sin(\alpha l)}{2}, \quad z_2(l) = \frac{p \alpha l}{2\pi} \quad (2)$$

其中, TWP 旋度参数  $\alpha$  可定义为:  $\alpha = 2 / \sqrt{s^2 + p^2 / \pi^2}$ 。

如图 2 所示, TWP 线对上任意点处的切线方向向量分别为<sup>[9-10]</sup>:

$$I_1(l) = -\frac{s\alpha}{2} [\sin(\alpha l) \mathbf{a}_x - \cos(\alpha l) \mathbf{a}_y] + \frac{\alpha p}{2\pi} \mathbf{a}_z \quad (3)$$

$$I_2(l) = \frac{s\alpha}{2} [\sin(\alpha l) \mathbf{a}_x - \cos(\alpha l) \mathbf{a}_y] + \frac{\alpha p}{2\pi} \mathbf{a}_z \quad (4)$$

单位向量  $I_1(l)$  和  $I_2(l)$  是线 1 和线 2 在  $a(l)$  和  $b(l)$  点处的切向向量, 这两点的坐标为:  $a(l) = \{x_2(l), y_2(l), z_2(l)\}$ ,  $b(l) = \{x_1(l), y_1(l), z_1(l)\}$ 。

用于确定 TWP 两根线相对位置的第 3 个单位向量为:

$$\mathbf{t}(l) = \cos(\alpha l) \mathbf{a}_x + \sin(\alpha l) \mathbf{a}_y \quad (5)$$

向量  $\mathbf{t}(l)$  从线 2 指向线 1, 处于  $x$ - $y$  平面内, 单位向量  $I_1(l)$  和  $I_2(l)$  如式(3)和式(4)所示。

### 1.2 外界电磁场辐照下双绞线的感应信号计算

为获得双绞线在外界电磁场辐照下的终端感应信号, 可以应用传输线模型, TWP 的频域传输线方程为:

$$dV(l)/dl = -ZI(l) + V_F(l) \quad (6)$$

$$dI(l)/dl = -YV(l) + I_F(l) \quad (7)$$

式中:  $Z$  为 TWP 的分布阻抗, 包括单位长度内部阻抗  $Z_i$  和单位长度外电感  $L_e$  的贡献项;  $Y$  为 TWP 的分布导纳, 包括单位长电导  $G$  和单位长度电容  $C$  的贡献项。TWP 的弧长  $l$  是唯一决定 TWP 沿线所有观测点位置的变量。  $V_F(l)$  和  $I_F(l)$  分别为由外场形成的分布电压激励源和电流激励源, 可表示为:

$$V_F(l) = -\frac{\partial}{\partial l} \int_{a(l)}^{b(l)} \mathbf{E}^i(\rho, l) d\rho + \mathbf{E}^i(x_1(l), y_1(l), z_1(l)) \cdot \mathbf{I}_1 - \mathbf{E}^i(x_2(l), y_2(l), z_2(l)) \cdot \mathbf{I}_2 \quad (8)$$

$$I_F(l) = -Y \frac{\partial}{\partial l} \int_{a(l)}^{b(l)} \mathbf{E}^i(\rho, l) \cdot d\rho \quad (9)$$

式中: 微分向量  $d\rho$  可表示为  $d\rho = \mathbf{t}(l) d\rho$ ,  $\rho$  是径向的柱坐标。  $\mathbf{E}^i(x, y, z)$  是入射电磁场的电场向量;  $V(l)$  是 TWP 的线电压(在  $b(l)$  处为正号, 在  $a(l)$  处为负号);  $I(l)$  是 TWP 线电流(向  $I_1(l)$  方向流动, 向  $-I_2(l)$  方向返回)。

假设 TWP 受到均匀平面波的辐照, 均匀平面波入射角度定义如图 3 所示,  $\theta_p$ ,  $\varphi_p$  和  $\theta_E$  分别为入射波的俯仰角、方位角和极化角。根据图 3, 入射平面波电场可表示为<sup>[11]</sup>:

$$\mathbf{E}^i(x, y, z) = E^i(e_x \mathbf{a}_x + e_y \mathbf{a}_y + e_z \mathbf{a}_z) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)} \quad (10)$$

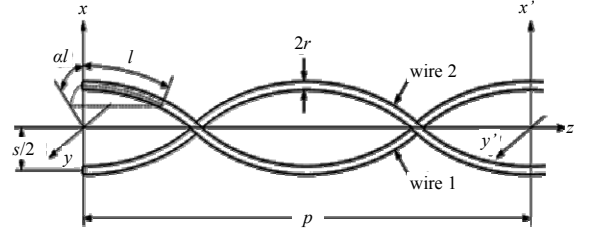


Fig.1 TWP's double spiral structure model  
图 1 TWP 双螺旋结构模型图

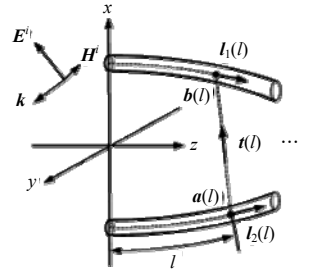


Fig.2 TWP's orientation vector  
图 2 TWP 方向向量示意图

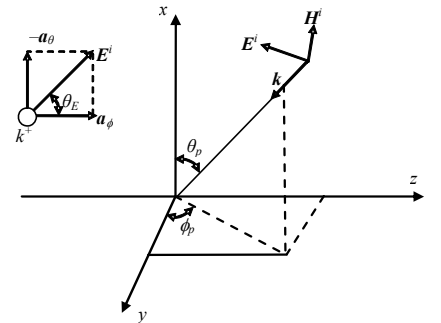


Fig.3 Definitions of uniform plane wave's incident angles  
图 3 均匀平面波入射角度定义

$$\text{式中: } \begin{cases} e_x = \sin(\theta_E)\sin(\theta_P) \\ e_y = -\sin(\theta_E)\cos(\theta_P)\cos(\varphi_P) - \cos(\theta_E)\sin(\varphi_P) \\ e_z = -\sin(\theta_E)\cos(\theta_P)\sin(\varphi_P) + \cos(\theta_E)\cos(\varphi_P) \end{cases} \quad \begin{cases} k_x = -k\cos(\theta_P) \\ k_y = -k\sin(\theta_P)\cos(\varphi_P) \\ k_z = -k\sin(\theta_P)\sin(\varphi_P) \end{cases}$$

常数； $\omega$  和  $\lambda$  分别为入射波的角频率及波长； $c_0$  为真空中的光速。

为求得 TWP 的负载端电流响应，依据分布参数传输线理论<sup>[11]</sup>，在  $\lambda \gg s$  的条件下，求解传输线方程式(6)~式(7)，可得：

$$I(0) = \frac{-E^i s}{2D} [(\alpha e_x + jk_y e_z)(F_+(L) + \frac{Z_L}{Z_C} F_-(L)) - (\alpha e_y - jk_x e_z)(K_+(L) + \frac{Z_L}{Z_C} K_-(L)) + 2(e_x \cos(\alpha L) + e_y \sin(\alpha L))e^{-jk_z L} - 2e_x (\cosh(\gamma L) + \frac{Z_L}{Z_C} \sinh(\gamma L))] \quad (11)$$

$$I(L) = \frac{-E^i s}{2D} [(\alpha e_x + jk_y e_z)(F_+^*(L) + \frac{Z_L}{Z_C} F_-^*(L)) - (\alpha e_y - jk_x e_z)(K_+^*(L) + \frac{Z_S}{Z_C} K_-^*(L)) + 2(\cosh(\gamma L) + \frac{Z_S}{Z_C} \sinh(\gamma L))(e_x \cos(\alpha L) + e_y \sin(\alpha L))e^{-jk_z L} - 2e_x] \quad (12)$$

式中： $F_{\pm}(L) = F_1(L) \pm F_2(L)$ ， $K_{\pm}(L) = K_1(L) \pm K_2(L)$ ， $F_{\pm}^*(L) = \pm F_1(L)e^{-\gamma L} + F_2(L)e^{\gamma L}$ ， $K_{\pm}^*(L) = \pm K_1(L)e^{-\gamma L} + K_2(L)e^{\gamma L}$ ，

$$F_1(L) = \frac{\alpha e^{-\gamma L} - (\alpha \cos(\alpha L) + (\gamma + jk_z') \sin(\alpha L))e^{-jk_z' L}}{(\gamma + jk_z')^2 + \alpha^2}, F_2(L) = \frac{\alpha e^{-\gamma L} - (\alpha \cos(\alpha L) + (-\gamma + jk_z') \sin(\alpha L))e^{-jk_z' L}}{(\gamma - jk_z')^2 + \alpha^2}, k_x' = \frac{k_x \alpha p}{2\pi},$$

$$k_y' = \frac{k_y \alpha p}{2\pi}, k_z' = \frac{k_z \alpha p}{2\pi}, K_1(L) = \frac{[\alpha \sin(\alpha L) - (\gamma + jk_z') \cos(\alpha L)]e^{-jk_z' L}}{(\gamma + jk_z')^2 + \alpha^2} + \frac{(\gamma + jk_z')e^{\gamma L}}{(\gamma + jk_z')^2 + \alpha^2},$$

$$K_2(L) = \frac{[\alpha \sin(\alpha L) + (\gamma - jk_z') \cos(\alpha L)]e^{-jk_z' L}}{(\gamma - jk_z')^2 + \alpha^2} + \frac{(-\gamma + jk_z')e^{\gamma L}}{(\gamma - jk_z')^2 + \alpha^2}.$$

## 2 双绞线抗干扰能力分析

以 24-AWG 型双绞线为例证明双绞线的抗干扰能力。24-AWG 型 TWP 横截面及主要参数如图 4 所示。24-AWG 的螺距为  $p$ ，轴向长度(即在坐标轴上的投影长度)为  $L_z = 30$  m，轴向长度  $L_z$  和总弧长  $L$  的关系为  $L_z = p\alpha L / (2\pi)$ ，端接负载分别为  $Z_S$  和  $Z_L$ 。

设平面波激励源场强为  $E^i = 1$  mV/m，入射角度为： $\theta_E = 0, \theta_P = 0$ ， $\varphi_P = \pi/2$ ，则双绞线终端感应信号功率谱如图 5 所示，对比可看出，本文计算结果正确。

平行双线的长度、线间距、导体电导率、半径、外绝缘层参数、端接负载及入射波参数同 24-AWG。设入射波中瞬态电场为 Bell 实验室标准 HEMP，入射角度为： $\theta_E = 0, \theta_P = 0, \varphi_P = \pi/3$ 。当 TWP 的螺距  $p$  分别为 11 cm, 24 cm, 30 cm 时，TWP 和平行双线  $Z_L$  端的感应电流对比如图 6 所示。

从图 6 可以看出，双绞线与平行双线相比，感应电流峰值只有后者的约 10%，且双绞线感应电流脉宽很窄。从计算结果还可发现，双绞线末端负载上的感应信号峰值随着螺距的减小而减小。由此可见，2 种线型中，双绞线具有很突出的抗电磁干扰能力。根据双绞线的结构特征分析可知，双绞线抗干扰能力强于平行线的物理原理为：双绞线可以通过相互绞合的方式来抵御外界电磁干扰，同时其一根导线在传输中辐射的电磁场会被另一根线上辐射的电磁场因反向而抵消，也可以降低自身信号的对外干扰。将绞

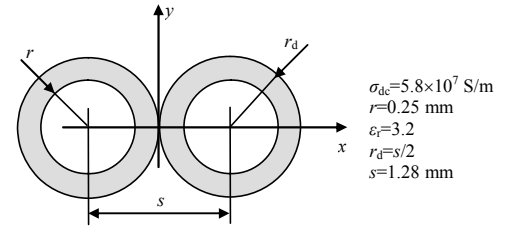


Fig.4 Schematic map of 24-AWG type TWP's transverse section

图 4 24-AWG 型 TWP 的横截面示意图

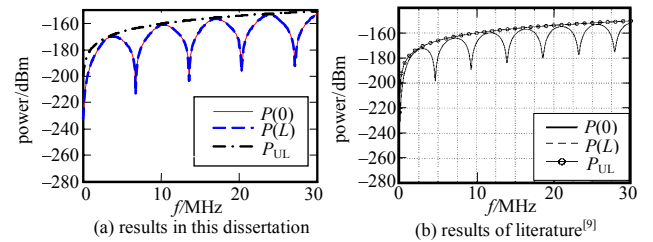


Fig.5 Validation of calculation results in this dissertation

图 5 本文计算结果验证

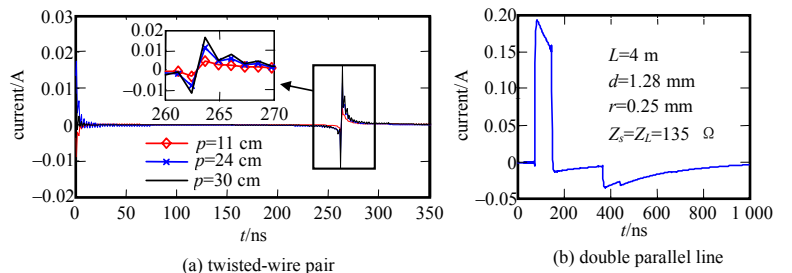


Fig.6 Comparison of double parallel line's and TWP's induced currents

图 6 双绞线和平行双线感应电流对比

线引入到电子信息设备综合布线之中,将能在一定程度上改善设备的电磁安全性。

### 3 结论

双绞线在电子信息设备综合布线工程中获得了广泛的应用,然而,在高频电磁环境中,双绞线也会耦合外界电磁脉冲进而对端接设备造成干扰甚至破坏作用。本文基于分布参数传输线理论,推导得到了双绞线在外场激励下的响应计算公式,以具体算例为例,定量对比分析了双绞线和平行线的抗干扰能力。研究方法和结论对于双绞线的电磁脉冲效应研究具有一定意义。

#### 参考文献:

- [1] TAYLOR C D,CASTILLO J P. On the response of a terminated twisted-wire cable excited by a plane-wave electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1980,22(1):16-19.
- [2] 马金平,毛乃宏,丁君,等. 场对双绞线的电磁耦合研究[J]. 电波科学学报, 1998,13(1):93-96. (MA Jinping,MAO Naihong,DING Jun,et al. On the electromagnetic interference of a terminated twisted-wire pair[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1998,13(1):93-96.)
- [3] ARMENTA R B,SARRIS C D. Efficient evaluation of the terminal response of a twisted-wire pair excited by a plane-wave electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007,49(3):698-707.
- [4] 李宝忠,何金良,周辉,等. 电磁脉冲在传输线上激励电流规律研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010,8(1):36-40. (LI Baozhong,HE Jinliang,ZHOU Hui,et al. Study about induced current law by EMP on transmission line[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(1):36-40.)
- [5] 刘承智,丁国良,王玉明,等. 电磁脉冲对屏蔽双绞线耦合效应实验研究[J]. 军械工程学院学报, 2012,24(4):29-32. (LIU Chengzhi,DING Guoliang,WANG Yuming,et al. Study on the coupling effect of electromagnetic pulse on shielded twisted-pair[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2012,24(4):29-32.)
- [6] LI Xiang,WU Meilin,BEETNER Daryl,et al. Rapid simulation of the statistical variation of crosstalk in cable harness bundles[C]// 2010 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility. Fort Lauderdale,USA:IEEE, 2010:614-619.
- [7] 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.)
- [8] 耿利飞,曾勇虎,王福志,等. 接地地的双绞线负载响应简化模型[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(2):023203-1-023203-4. (GENG Lifei,ZENG Yonghu,WANG Fuzhi,et al. Simplified model for load response of twisted-wire pair connected with ground[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(2):023203-1-023203-4.)
- [9] ARMENTA R B,SARRIS C D. Efficient evaluation of the terminal response of a twisted-wire pair excited by a plane-wave electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2007,49(3):698-707.
- [10] 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.
- [11] PAUL C R. Analysis of Multiconductor Transmission Lines[M]. New York:Wiley, 2007.

#### 作者简介:



王川川(1985-),男,河南省濮阳市人,博士,助理研究员,主要研究方向为电子信息系统效能评估.email:15032743708@126.com.

曾勇虎(1972-),男,江西省龙南县人,博士,研究员,主要研究方向为电子信息系统建模仿真与评估、复杂电磁环境模拟及效应。

蒙洁(1972-),女,广西壮族自治区梧州市藤县人,硕士,高级工程师,主要研究方向为电子信息系统效能评估。

贾锐(1986-),男,河南省焦作市孟州市人,博士,工程师,主要研究方向为复杂电磁环境模拟构建及效应。