

文章编号:1671-6833(2009)04-0120-03

# 传输线端接阻抗对线间串扰的影响研究

罗映红, 张 博

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 运用多导体传输线理论为均匀及非均匀介质中的传输线耦合情况建立相应的等效电路模型, 借助 Matlab 软件对 PCB 板上三导体传输线的线间串扰进行仿真计算. 首先分析终端为匹配负载的情况下, 主串回路的电压变化对串扰电压的影响, 然后分析了终端接电阻、电抗、阻抗三种不同的终端负载情况下串扰电压的变化. 结果表明, 串扰电压随主串回路电压的增加而增加, 且匹配的电阻值能够减小串扰电压, 容性负载对串扰电压的影响要比感性负载大.

**关键词:** 多导体传输线; 端接阻抗; 串扰

**中图分类号:** TM 15 **文献标识码:** A

## 0 引言

串扰是指信号在传输线上传输时, 电磁场对相邻的传输线产生的不期望的干扰电压或电流噪声. 这种干扰是由于信号线之间的耦合引起的. 串扰按产生机理分为电感性耦合和电容性耦合; 按串扰在被干扰线上产生的位置又可以分为近端串扰与远端串扰. 影响传输线间串扰的因素很多<sup>[1-2]</sup>, 目前关于传输线串扰的研究方法也很多<sup>[3-7]</sup>. 文献[8]分析了简单导线终端分别为开路、接有 50  $\Omega$  电阻以及接电阻并带有短截线 3 种情形时的辐射干扰, 没有对更多的负载状况进行分析. 笔者在文献[9]的基础上, 分析不同终端的负载阻抗特性对串扰电压的影响.

## 1 多导体传输线理论

电子电气设备内部的布线和电子电气设备间的连接线路以及印制板的布线都存在导线平行排列的情况, 并且许多平行的导线由于几何长度  $l$  和信号的波长  $\lambda$  不能满足  $l \ll \lambda$  的条件, 使得低频模型不再有效, 为了较为准确地分析信号连接线上各点的电压、电流, 必须把信号连接线看作是具有分布参数的传输线结构, 需采用分布参数建立模型, 如图 1 所示.

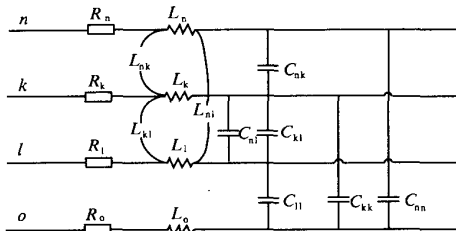


图 1 多导体传输线的电容电感

Fig. 1 Inductance and capacitance of multi-conductor transmission line

### 1.1 均匀介质中的无损耗多导体传输线

对电缆耦合建立多导体传输线的模型需要忽略电缆导体的损耗和周围媒质的损耗, 并且假定传播的是横电磁波, 即电场、磁场都在与能量传播方向垂直的横截面上. 对于  $n+1$  根导线系统, 电压、电流满足的是矩阵方程, 将平行双线传输线方程中的电压、电流、单位长度的电感、电容都换成矩阵<sup>[8]</sup>, 则相应的传输线方程变为

$$\begin{cases} \frac{dU(z)}{dz} + j\omega L_0 I(z) = 0 \\ \frac{dI(z)}{dz} + j\omega C_0 U(z) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

将(1)式中的电压、电流去做耦合处理, 再把电压、电流分解成入射波分量及反射波分量的合成, 并加上已知的  $n$  个边界条件, 即可得到多导体传

收稿日期:2009-04-11; 修订日期:2009-07-18

基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(2008GS02606)

作者简介:罗映红(1961-), 女, 广东省汕头人, 兰州交通大学教授, 主要从事电工理论与新技术, 电磁干扰与电磁兼容的研究, E-mail: lyhdd-321@163.com.

输线终端的  $U(L)$ 、 $I(L)$  的正弦稳态解如下:

$$\begin{bmatrix} U_1(L) \\ \vdots \\ U_n(L) \\ I_n(L) \\ \vdots \\ I_1(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta L_1 & -j\omega \frac{\sin\beta L}{\beta} \\ -j\omega \frac{\sin\beta L}{\beta} C_0 & \cos\beta L_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(0) \\ \vdots \\ U_n(0) \\ I_1(0) \\ \vdots \\ I_n(0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

## 1.2 不均匀介质中的无损耗多导体传输线

通常,导线周围都覆盖有绝缘介质,平行导线间存在的单位长度的电感、电容的乘积与介质常数之间的对应关系就不再满足,意味着该系统中可能有不同模式的波存在<sup>[9]</sup>. 先把电压、电流通过转换矩阵人为地分解成  $m$  个不同模式的电压波  $U_m(z)$ 、电流波  $I_m(z)$  (下标表示不同的模式数), 即,  $I(z) = TI_m(z)$ ,  $U(z) = TU_m(z)$  而每个模式的电压、电流波相当于互相独立的均匀系统中的波动方程. 并且每个模式电压、电流都可表示为入射波分量和反射波分量之和, 综合可得电压、电流的列向量可表示为

$$\begin{cases} U(z) = Y_0^{-1} T \Gamma (e^{-\Gamma z} I_m^+(z) + e^{\Gamma z} I_m^-(z)) \\ I(z) = T (e^{-\Gamma z} I_m^+(z) - e^{\Gamma z} I_m^-(z)) \end{cases} \quad (3)$$

将电源端或负载端的电压、电流矩阵代入式(3), 即可获得多导体传输线方程的解:

$$\begin{cases} U(L) = A_{11}(L)U(0) + A_{12}(L)I(0) \\ I(L) = A_{21}(L)U(0) + A_{22}(L)I(0) \end{cases} \quad (4)$$

其中, 式(4)中的4个链参数为

$$\begin{cases} A_{11}(L) = \cosh((Z_0 Y_0)^{\frac{1}{2}} L) \\ A_{12}(L) = -\sinh((Z_0 Y_0)^{\frac{1}{2}} L) Z_c \\ A_{21}(L) = -\sinh((Y_0 Z_0)^{\frac{1}{2}} L) Z_c^{-1} \\ A_{22}(L) = \cosh((Y_0 Z_0)^{\frac{1}{2}} L) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Z_c = Y_0^{-1} TIT^{-1}$  为特征阻抗, 在已知始端的电源电压  $U_s$ , 电源内阻抗  $Z_s$ , 负载阻抗  $Z_L$  以及  $U(0) = U_s - Z_s I(0)$ ,  $U(L) = Z_L I_L$ , 可推得末端电流矩阵的表达式为

$$I(L) = A_{21}(L)U_s + (A_{22}(L) - A_{21}(L)Z_s)I(0) \quad (6)$$

## 2 端接阻抗对串扰影响的仿真及分析

以如图2所示的印刷电路板上的3根平行导线(3+1系统)为例, 计算其终端负载阻抗的变化对串扰电压的影响. 设该图中的印刷电路板宽为5 mm, 高为1.75 mm, 介质常数  $\epsilon_r$ , 导线宽度  $\omega = 0.125$  mm, 厚度  $b = 0.035$  mm, 导线间距分别为  $D_1 = 4\omega$  ( $R_1$  与  $R_2$  之间的间隔),  $D_2 = 1.5\omega$  ( $R_2$

与  $R_3$  之间的间隔), 导线长度为  $L = 0.1$  m. 设主串回路的电源初始电压为1 V, 频率为1 GHz.

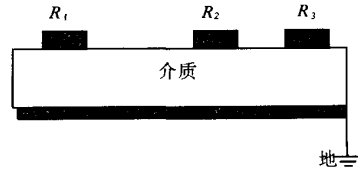


图2 印刷电路板上平行导线横截面图

Fig.2 Screenshots of parallel horizontal wire on printed circuit board

我们将负载阻抗特性分以下几种情况分别来进行仿真, 并对结果进行对比分析, 以更好地观察其对串扰电压的影响.

### 2.1 终端为匹配负载时, 主串回路电压对串扰电压的影响

由图3可以看出1号线和3号线的近端、远端的串扰电压均随着主串回路的电压的增加而增加, 近似于线性关系. 而3号线的近端、远端串扰电压要稍大于1号线的近端、远端串扰电压, 这是由于3号线比1号线离2号线更近的缘故.

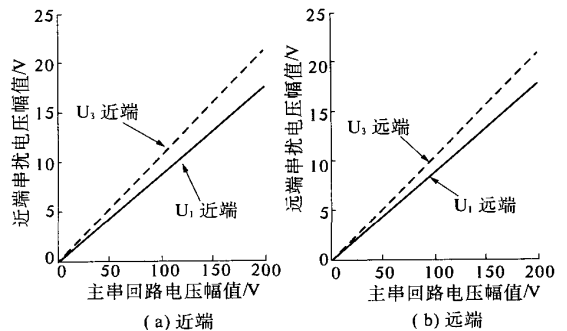


图3 近端、远端串扰电压随主串回路电压变化曲线

Fig.3 Near end and far end crosstalk voltage curve with the main loop of string voltage change

### 2.2 纯电阻负载对串扰电压的影响

由图4可以看出1、3号线的近端串扰电压值均在电阻值为0~150  $\Omega$  时随着电阻值的增大而迅速下降, 在电阻值达到150  $\Omega$  后近端串扰电压趋于稳定; 远端的串扰电压在电阻值为0~110  $\Omega$  随着电阻的增大迅速增加, 在电阻值为110~1 000  $\Omega$  时呈下降趋势. 在电阻值大于50  $\Omega$  后, 远端的串扰电压幅值要开始大于近端串扰电压幅值.

### 2.3 纯电抗负载对串扰电压的影响

由图5可以看出, 在端接阻抗为纯电抗时, 1号线和3号线的近端和远端的串扰电压均随着电抗的变化近似为抛物线形, 近端串扰电压在电抗

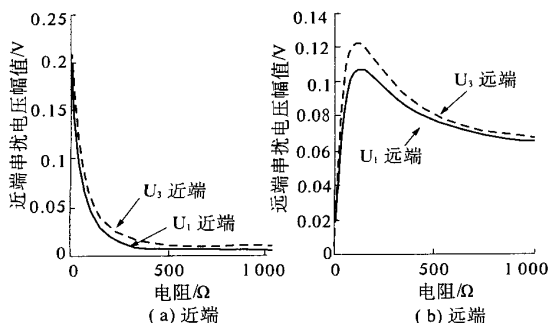


图4 终端为纯电阻时近端、远端干扰电压变化曲线

Fig.4 Near end and far end crosstalk voltage curve of termination resistance

值为  $-j1\ 000 \sim -j110\ \Omega$  时呈上升趋势,在电抗值为  $-j110 \sim j1\ 000\ \Omega$  时呈下降趋势,远端串扰电压在电抗值为  $-j1\ 000 \sim -j180\ \Omega$  呈上升趋势,在电抗值为  $-j180 \sim j1\ 000\ \Omega$  呈下降趋势,其中在电抗值为零时远端串扰电压值为零.并且在电抗值相同时,远端串扰电压的幅值要明显高于近端串扰电压的幅值.同时由此波形可以看出,容性负载对串扰电压的影响比感性负载要大.

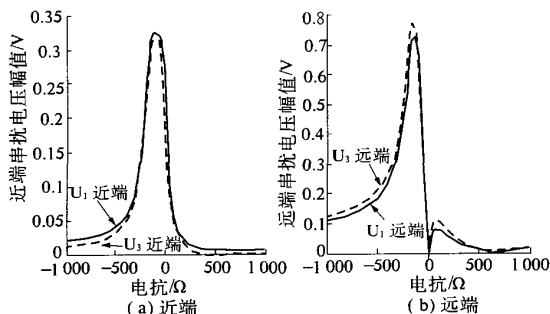


图5 终端为纯电抗时近端、远端干扰电压变化曲线

Fig.5 Near end and far end crosstalk voltage curve of termination reactance

## 2.4 复阻抗对串扰电压的影响

将电阻值设为  $50\ \Omega$ ,电抗值的变化范围  $-j1\ 000 \sim j1\ 000\ \Omega$ ,近端、远端的串扰电压变化如图6所示.由图6可以看出,这种情况下1号线和3号线的近端、远端的串扰电压变化曲线与负载阻抗为纯电抗时波形的变化情况基本一致,区别是近端、远端串扰电压的幅值都要减少接近一半.说明匹配的电阻值对串扰电压的减小有很大帮助.

## 3 结束语

笔者运用 Matlab 工具对印刷电路板上3条平

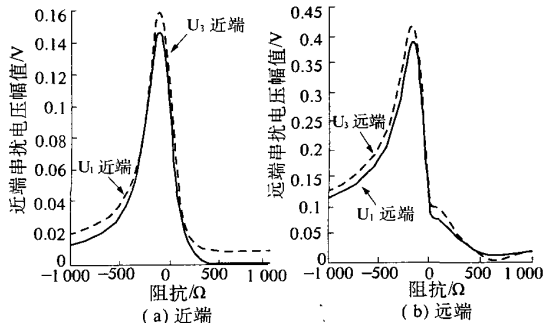


图6 终端为阻抗时近端、远端干扰电压变化曲线

Fig.6 Near end and far end crosstalk voltage curve of termination impedance

行导线的串扰电压幅值进行了仿真计算.结果表明,离主串回路越近的导线,导线上所产生的串扰电压就越大;串扰电压随着主串回路电压的增加而增加;无论负载阻抗为何种情况,远端的串扰电压都要大于近端的串扰电压;匹配的电阻值能够减小小串扰电压,容性负载对串扰电压的影响要比感性负载大.

## 参考文献:

- [1] 李莉,万里兮,咸金龙,等.多导体传输线互耦实验研究[J].电波科学学报,1999,14(2):165-171.
- [2] 李莉,李卫兵,王学刚,等.两平行传输线间的串扰分析[J].电波科学学报,2001,16(2):271-274.
- [3] PAUL C R. Decoupling the multi-conductor transmission line equations[J]. IEEE Trans on Microwave theory and Technique, 1996, 44(8):1429-1440.
- [4] PAUL C R. Solution of the transmission-line equations under the weak-coupling assumption[J]. IEEE Trans on EMC, 2002, 44(3):413-423.
- [5] 郭裕顺.用 NILT 导出的传输线瞬态分析模型[J].电子学报,2002,30(3):381-385.
- [6] 张希,刘宗行,孙韬.传输线方程的一种数值解法[J].重庆大学学报,2004,27(2):116-119.
- [7] 衣斌,张楠,王泽忠.基于 FDTD 法的传输线串扰时域响应分析与实验研究[J].现代电力,2008,25(1):40-43.
- [8] 俞集辉,邹志星,李永明,等.导线电磁干扰的数值仿真[J].重庆大学学报:自然科学版,2007,30(9):47-50.
- [9] 罗映红,陶彩霞,陈明,等.基于模式理论的传输线高频串扰预测仿真[J].自动化与仪器仪表,2008,135(1):9-12.

(下转第127页)

- 的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(6): 681 - 686.
- [5] CHEN S T, YU P S. Pruning of support vector networks on flood forecasting[J]. Journal of Hydrology, 2007, 347: 67 - 78.
- [6] 李 琪. 全国水文预报技术竞赛流域水文模型分析[J]. 水科学进展, 1998, 9(2): 187 - 195.
- [7] 胡彩虹, 郭生练, 彭定志, 等. 半干旱半湿润地区流域水文模型分析比较研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2003, 36(5): 38 - 42.
- [8] HU C H, GUO S L, XIONG L H, et al. A modified Xinjiang model and its application in Northern China[J]. Nordic Hydrology, 2005, 36(3): 175 - 192.
- [9] 张尧庭, 方开泰. 多元统计分析引论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 313 - 361.
- [10] 陈玉林, 韩家田. 半干旱地区洪水预报的若干问题[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 612 - 616.

## Application of Support Vector Machine Based on Clustering in Flood Forecast

HU Cai - hong, WANG Yan - ju, WU Ze - ning

(School of Water Conservancy and Environment Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The difficulty of the runoff simulation has been increased due to the specificity of the semi - arid region, which is still a hot and difficult topic in current study. The detailed information is hard to obtain because of the complicated process of the runoff, so it is difficult to forecast flood, especially the flood peak forecast. The different characteristics of flood can not be reflected completely if all samples were used to calibrate the parameter of the model. Thus the support vector machine method based on clustering is used. And the Lan River basin in the semi - arid region is taken as an example to be simulated and tested. The results have shown that most efficient coefficient is beyond 85%, and the modulus of the relatively average error is mostly less than 1.5%. Additionally, the peak flow modulus of the relatively average error is less than 15%, particularly in the flood of large peak flow, the relatively average error is less than 1%. The qualification rate of the peak flow and the peak time difference is 100%.

**Key words:** system clustering; support vector machine; flood forecasting

(上接第122页)

## Research on Impact of Termination Impedance to Crosstalk of Transmission Line

LUO Ying - hong, ZHANG Bo

(College of Automatic and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** This paper establishes the mode of corresponding equivalent circuit for transmission line coupling in homogeneous and inhomogeneous media based on the theory of multi - conductor transmission line, simulates and calculates the crosstalk among three conductor transmission lines on the PCB board using Matlab software. Firstly, the paper analyzes the voltage change of main loop of string on the impact of crosstalk voltage in the case of the terminal is matched load. Then we analyze the change of the crosstalk voltages in the terminal access resistance, terminal access reactance, terminal access impedance of the three different terminal load cases, and gets the appropriate conclusions. The results show that crosstalk voltage as the main string loop voltage increases, matched resistance value can reduce the crosstalk voltage, and capacitive load is more significant than inductive load on the impact of crosstalk voltage.

**Key words:** multi - conductor transmission line; termination impedance; crosstalk