

# PCB 印制线间串扰的 MATLAB 分析

李卫兵

(滨州学院 物理科学与工程系 山东 滨州 256603)

**摘 要:**借助于数值分析软件 MATLAB, 利用传输线理论对二平行印制线间的串扰耦合进行分析, 得出耦合响应与传输线参数的定量关系, 给出电子电路设计中 PCB 印制线布设的原则。

**关键词:**串扰; 耦合响应; PCB 印制线; MATLAB

**中图分类号:**O 453 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-2618(2005)03-0081-04

随着电子系统中逻辑和系统时钟频率的迅速提高和信号边沿不断变陡, 印刷电路板的线迹互连和板层特性对系统电气性能的影响也越发重要。在评定系统性能时也必须考虑印刷电路板板材的电参数。因此, 高速系统的设计必须面对互连延迟引起的时序问题以及串扰、传输线效应等信号完整性问题。设备的小型化使得在较小的印刷电路板上设大量的印制线, 不可避免的会存在相互间的串扰。若能够在布线前对印制线间的串扰进行预测, 根据预测结果合理布线则可缩短设计周期, 满足电磁兼容要求, 提高产品的设计成功率。本文针对高速印刷电路板的印制线分析其串扰, 研究串扰与信号频率的关系、串扰与印制线传输参数的关系, 给出印制线实际布线设计依据。

## 1 传输线模型及耦合响应

二平行印制线结构示意图如图 1, 其端接阻抗示意图如图 2。两印制线平行, 其中一条印制线一端有信



图 1 串扰的二印制结构

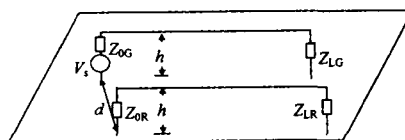


图 2 印制线端接阻抗示意图

号源  $V_s$  及内阻  $Z_{0G}$ , 另一端有负载  $Z_{LG}$ , 回路通过地平面构成闭环。另一条印制线中仅有阻抗  $Z_{0R}$ 、 $Z_{LG}$ , 也是对地平面构成闭环。图中有信号源的线称为发射线或干扰线, 另一导线中由于电磁耦合会感应电流、电压, 故称为接受或受害线。为分析方便, 导线的轴定义为  $x$  轴, 导线耦合有效长度为  $L$ , 左端在  $x=0$ , 右端在  $x=L$  处。阻抗的第一下标对应导线的端点坐标, 第二下标对应电路:  $R$ (接受线)、 $G$ (发射线)。

两导线间由于电磁耦合而产生串扰, 串扰的分析就是给定电路结构及信号频率的情况下, 计算由于发生电路的电源而感应的接受电路端的干扰电压。  $V_R(0)$  为在  $x=0$  处的接受线干扰电压,  $V_R(L)$  是  $x=L$  处的接受线干扰电压, 其他电压、电流定义类似。串扰的度量一般由电压转移系数(又叫归一化电压响应)

表示:  $TR_0 = \frac{V_R(0)}{V_s}$  和  $TR_L = \frac{V_R(L)}{V_s}$ 。

收稿日期: 2005-04-22

基金项目: 滨州学院科学基金资助项目(BZXYLG200506)

作者简介: 李卫兵(1971-), 男, 山东邹平人, 讲师, 硕士, 主要从事电磁兼容、电子电路 EDA 研究。

串扰耦合分析可用传输线理论. 传输线理论是将单位长度传输线等效为如图 3 等效电路, 线段  $\Delta x$  的性质用单位长度互感  $M$  与互容  $C_M$ , 单位长度自感  $L_G, L_R$  和自容  $C_G, C_R$  描述. 对应图 3 电路结构, 单位长度参数的计算公式由 Teche<sup>[1]</sup>、Walker<sup>[2]</sup> 给出. 二平行印制线耦合模型可看成是图 3 所示的若干  $\Delta x$  串接而成的, 其等效电路如图 4. 印制线长度为  $L$ , 宽度为  $w$ , 间距为  $d$ , 距地面的高度  $h$ .

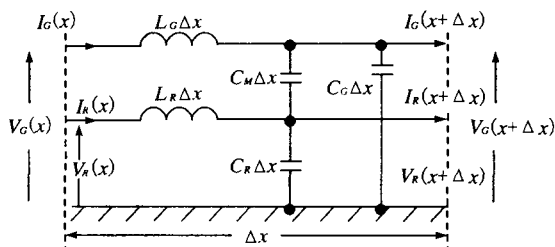
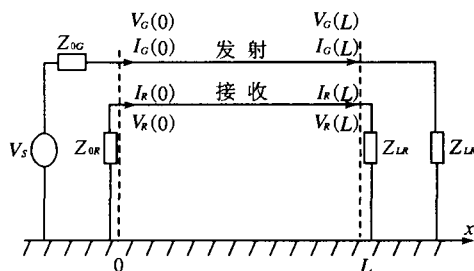
图3 单位长度( $\Delta x$ )耦合模型

图4 二平行印制线耦合等效电路

对于图 2 中  $\Delta x$  等效电路令  $\Delta x \rightarrow 0$  可得传输线方程<sup>[3]</sup>. 求解传输线方程可得共地平行印制线间串扰耦合响应为<sup>[4]</sup>.

$$V_R(L) = \frac{S}{D} \left[ -\frac{Z_{LR}}{Z_{0R} + Z_{LR}} \cdot j\omega ML I_{Gdc} + \frac{Z_{0R} Z_{LR}}{Z_{0R} + Z_{LR}} \cdot j\omega C_M L V_{Gdc} \right], \quad (1)$$

$$V_R(0) = \frac{S}{D} \left[ \frac{Z_{0R}}{Z_{0R} + Z_{LR}} \cdot j\omega ML \cdot F_L I_{Gdc} + \frac{Z_{0R} Z_{LR}}{Z_{0R} + Z_{LR}} \cdot j\omega C_M L F_C V_{Gdc} \right]. \quad (2)$$

其中

$$D = C^2 - S^2 \omega^2 \tau_R \tau_G [1 - k^2 \frac{(1 - \alpha_{0G} \alpha_{LR})(1 - \alpha_{LG} \alpha_{0R})}{(1 + \alpha_{0R} \alpha_{LR})(1 + \alpha_{0G} \alpha_{LG})}] + j\omega CS(\tau_R + \tau_G), \quad (3)$$

$C = \cos(\beta L)$ ,  $S = \frac{\sin \beta L}{\beta L}$ ,  $\beta$  为相位常数  $\beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $v$  是波在周围介质中的传播速度,  $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ ,  $\mu, \epsilon$  是周围介质的磁导率、介电常数.

端接阻抗与耦合传输线中单根传输线特性阻抗  $Z_{0G}(Z_{0R})$  的比率:  $\alpha_{0R} = \frac{Z_{0R}}{Z_{CR}}$ ,  $\alpha_{LR} = \frac{Z_{LR}}{Z_{CR}}$ ,  $\alpha_{0G} = \frac{Z_{0G}}{Z_{CG}}$ ,  $\alpha_{LG} = \frac{Z_{LG}}{Z_{CG}}$ .

$Z_{0G}(Z_{0R})$  是考虑接收线(发射线)存在时, 发射线(接收线)的特性阻抗, 其定义与孤立传输线的特性阻抗的定义不同. 当两电路耦合很弱时,  $C_M \ll C_G$  时,  $Z_{CR}, Z_{CG}$  就成了孤立传输线的特性阻抗了.

$\tau_R, \tau_G$  为接收线(发射线)时间常数;  $k$  为耦合系数;  $V_{Gdc}, I_{Gdc}$  为零频率时发射线上的直流电压和电流.

系数  $F_C, F_L$  的表达式为:  $F_C = C + \frac{j2\pi(L/\lambda)}{\sqrt{1-k^2}} \alpha_{LG} S$ ,  $F_L = C + \frac{j2\pi(L/\lambda)}{\sqrt{1-k^2}} \frac{1}{\alpha_{LG}} S$ .

由(1)、(2)式可以明显看出串扰耦合分两部分: 第一部分磁场耦合(电感耦合)和第二部分电场耦合(电容耦合). 0 端负载响应是两种耦合的相加, 而  $L$  端负载响应是两种耦合的相减. 以上提供了一个减少电磁耦合的抗干扰设计思路,  $L$  端可以选择负载以抵消两种耦合影响.

## 2 PCB 印制线的串扰预测

### 2.1 印制线串扰耦合与频率的关系

2.1.1 串扰预测印制线的参数 如图 1 印制线结构, 设置其实验参数为宽度  $w=0.1$  mm, 印制线的厚度  $t=0.035$  mm, 印制线的间距  $d=1$  mm, 印制线距接地面的距离即介质层的厚度  $h=1.5$  mm, 印制板介质层采用环氧层压玻璃纤维材料, 其相对介电常数  $\epsilon_r=4.7$ , 印制线长度  $L=10$  cm.

2.1.2 串扰耦合与频率的关系 印刷电路板上的印制线实现了高速器件的电器连接, 无论是模拟系统还是数字系统处理的信号都可以分解为不同频率不同幅度正弦波的叠加, 故印制线对正弦信号呈现的规律

就是印制线对实际信号呈现的规律,该分析具有普遍意义.

计算印制线的串扰耦合与信号频率的关系如图 5. 由图可见在信号频率较低时串扰近似随频率呈线性上升,这个规律也可用传统的容性耦合和感性耦合的叠加理论来分析<sup>[5,6]</sup>. 但当频率较高时,印制线的传输特性必须用分布参数等效电路来分析,传统的串扰耦合理论就不适用了. 信号频率较高时,串扰耦合呈现振荡特性,是因为  $C$  和  $S$  随频率作周期变化;同时由于  $\omega$  较大, (3) 式中的第一项与第二项、第三项相比,后者占主要地位. 以上内容也决定了 (1) 式中  $V_R(L)$  的幅值为有限值.

耦合响应的变化周期由  $\sin(\beta L)$  确定,由  $L = \pi$  可求得其周期.  $\beta = \omega/v$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $\beta$  与传输线的分布电容和电感有关. 高频振荡由传输线的分布电容和电感决定. 由图 5 可以得出其高频振荡周期为  $10^9$  Hz.

## 2.2 串扰耦合与印制线结构参数的关系

2.2.1 串扰耦合与印制线间距的关系 为了适应当前电路系统小型化的要求,印刷电路板的印制线布线是一个要重点解决的问题. 主要包括印制线的宽度设计,印制线间距的设计. 印制线宽度决定了其传输信号的特性<sup>[7]</sup>. 印制线间距的设计一个要基于印制板的面积,再就是要基于印制线间的串扰. 印制线间的串扰与间距的关系如图 6. 由图可以看出随间距的增大,串扰减小且不是呈线性变化. 在小于 5 mm 的范围内,串扰减小了约 26 dB,之后在 5 mm 到 2 cm 间距的变化串扰才减小了 20 dB 左右,由此可以看出在印制线布线时,为了减小相互间的串扰,提高信号的一致性,在 5 mm 范围内间距应尽可能的大.

2.2.2 串扰耦合与介质层高度的关系 现在的高速电路板都是多层板,既可以满足系统小型化的要求实现高密度布线,又可以具有一定的电磁屏蔽作用,提高整个系统的电磁兼容性,其中一般存在一个接地平面. 印制线距接地平面的距离即介质层的高度影响印制线间的串扰. 印制线间串扰与介质层高度的关系如图 7. 由图可见随介质层高度的增加串扰加强,特别是间距在 5 mm 内时串扰变化大. 高度由 0.2 mm 变化

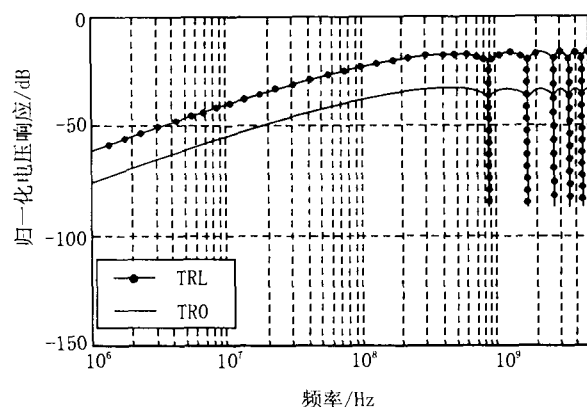


图5 串扰耦合与信号频率的关系

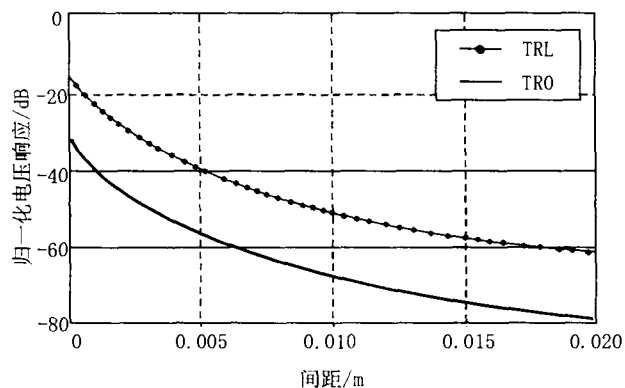


图6 串扰耦合与印制线间距的关系

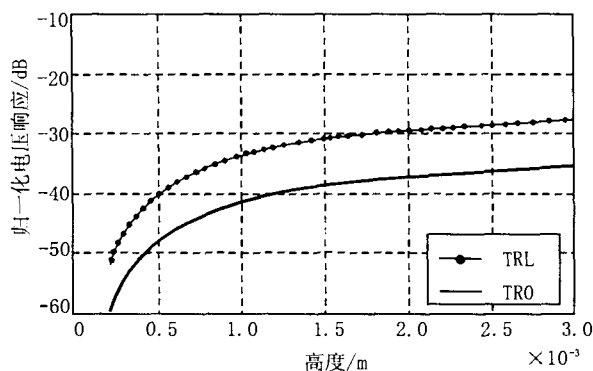


图7 耦合响应与介质层高度的关系

到 1 mm,  $L$  端串扰就由  $-49$  dB 变化到  $-25$  dB, 变化了 24 dB. 而在由 1~3 mm 的范围内串扰才变化了约 6 dB. 可见在印制线布线时,板层的设计非常重要,从电磁兼容方面考虑原则上是板层在 1 mm 内可尽可能的薄.

## 3 结 论

应用传输线模型研究 PCB 印制线间的串扰问题,主要从串扰的频率特性、串扰大小与印制线间距的

关系和印制线离共地平面的距离对其串扰的影响等几个方面分析研究。

结果表明,频率小于 200 MHz 的范围内,串扰大小与频率成线性关系;频率越高串扰越大;当频率大于 200 MHz 时,二平行线串扰大小随频率呈周期性,并伴有周期的极大值点。加大印制线间的间距,尤其是 0~5 mm 以内,线间距的加大,使串扰迅速下降 -26 dB,这说明布线中,在 5 mm 范围内,应尽可能加大印制线的间距。两印制线如果接近一共接地面,其与共接地面距离小于 1 mm,也可使串扰耦合迅速减小。

本文的研究对于优化 PCB 的电磁兼容型设计,降低设备内部和相互间的干扰具有良好的指导意义和实际价值。

### 参 考 文 献:

- [1] F. M. Tesche et al. EMC Analysis Method and Computational Models[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [2] C. S. Walker. Capacitance, inductance, and crosstalk analysis[M]. Boston: Artech House, 1990.
- [3] 闫润卿, 李英惠. 微波技术基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- [4] C. R. Paul. Solution of the Transmission-Line Equation for Three-Conductor Lines in Homogeneous Media[J], IEEE Trans. Electromag. compat, 1978, 20: 216~222.
- [5] C. R. Paul. On the Superposition of Inductive and Capacitive Coupling Crosstalk-Prediction Models [J], IEEE Trans. Electromag. compat., 1982, 24: 335~343.
- [6] 蔡仁刚. 电磁兼容原理、设计和预测技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1997.
- [7] 李卫兵. 印制线的传输特性研究[J]. 滨州师专学报, 2002, 18(2): 21~24.

## Crosstalk Analysis between two PCB Traces with MATLAB

LI Wei-bing

(Department of Physics and Engineering, Binzhou University, Binzhou 256603, China)

**Abstract:** Analysis is performed for crosstalk coupling between two parallel PCB traces in terms of transmission line theory with MATLAB. Result is obtained about relation of coupling response to parameters of transmission line. It gives arrangement of PCB traces in electric circuit design.

**Keyword:** crosstalk; coupling response; PCB trace; MATLAB

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>