

多导体传输线电容电感矩阵的分析求解^{*}

秦润杰 张清鹏 卢秋朋

(天津市特种设备监督检验技术研究院 天津 300192)

摘要: 随着系统频率的不断提高,许多影响系统性能的噪声就会出现,造成系统性能的下降,信号完整性问题变得越来越严重。串扰就是一个经常遇到的问题,而引起串扰的根本原因就是边缘场导致攻击线和受害线之间产生容性耦合和感性耦合。在对引起串扰的原因进行分析的基础上,介绍了利用二维场求解器求解单位长度电感和电容矩阵的方法,在求得单位长度电感和电容矩阵以后,就可以建立传输线的 SPICE 电路模型,对电路系统的信号完整性进行研究。

关键词: 串扰;电容矩阵;电感矩阵;二维场求解器;Ansoft Q3D

中图分类号: TM15 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.35

Analysis and solution of capacitance and inductance matrix of multi-conductor transmission line

Qin Runjie Zhang Qingpeng Lu Qiupeng

(Tianjin Special Equipment Inspection Institution, Tianjin 300192, China)

Abstract: With the constant improvement of the system frequency, many noise appeared, which can cause the deterioration of the system performance and make the signal integrity problems to become more and more serious. Crosstalk is a frequently encountered problem, which is caused by the capacitive coupling and the inductive coupling as the reason of edge field generated between aggressive lines and victim lines. On the basis of the analysis of the causes of crosstalk, this paper introduced how to use a 2D field solver to solve per unit length inductance and the capacitance matrix so as to establish the SPICE circuit of transmission lines and analyze the signal integrity of multiple conductor transmission line system.

Keywords: crosstalk; capacitance matrix; inductance matrix; two-dimensional field solver; Ansoft Q3D

1 引言

在高速电路设计中,工程师会遇到许多影响信号完整性^[1]的噪声,串扰作为其中最经常出现的一个,它可能会引起电路的误触发、或邻近线路中元器件的损伤^[2],严重的会使设备遭受干扰而导致性能降低或功能异常^[3],对于串扰的研究就显得非常迫切和重要。文献[2]通过场仿真器获得 PCB 板 3 条微带线系统的电感电容矩阵,进而建立传输线 PSpice 模型,并将模型结果通过信号完整性分析工具进行了验证。文献[3]利用电感矩阵和电容矩阵构建传输线模型进行了仿真,并通过试验分析对比了单线和双绞线抗干扰能力,并重点研究了端接负载变化对双绞线抗干扰能力的影响规律。文献[4-5]分别对 3 线系统采用了

HyperLynx 仿真软件验证了线间距、耦合线长度、介质层厚度、端接技术等不同参数对串扰的影响。文献[6]利用 HSPICE 软件建立了 3 线模式的 U 形传输线 RC 网络,并通过仿真分析了传输线线宽和线间距对串扰的影响。文献[7]对多芯屏蔽电缆以及屏蔽同轴电缆的串扰进行了研究,在忽略受害线对攻击线产生感应电流和电压的情况下给出了串扰电压的解,并通过试验进行了验证。文献[8]利用矩量法(MOM)计算得到 3 条导线的单位电感电容矩阵,建立 Spice 模型,对 PCB 板多传输线间的串扰进行了仿真研究。文献[9]是基于 RLC 模型建立并验证了新的串扰峰值估计公式。文献[10]采用考虑趋肤效应的导体二维切分的方法对高频单根传输线的寄生参数进行了提取和建模。

虽然以上文献都采用不同的方法对传输线之间的

收稿日期:2014-10

* 基金项目:国家质检总局科技计划(2012QK293)项目

串扰进行了分析,但是都没有对多导体传输线电感矩阵和电容矩阵的提取进行详细介绍,而电感电容矩阵是建立 SPICE 电路模型的基础,所以本文对如何利用二维场求解器获取多导体传输线电感电容矩阵的方法进行了细致的研究分析。

2 串扰介绍

2.1 串扰的定义

串扰指的是相互靠近的导线和 PCB 上的连接盘之间无意的电磁耦合,即有害信号从一个信号路径转移到相邻的线路上。通常把噪声源所在的导线称为动态线或攻击线,而把有噪声产生的导线称为静态线或受害线。

2.2 串扰产生的机理

当信号沿传输线传播时,在传输线的周围会产生磁力线,信号线和返回线之间也产生电力线,如图 1 所示,这些电磁场会延伸到周围的空间中,形成边缘场,距离越近,边缘场就越强。如果在一条线路的边缘场很强的区域内有其他线路的时候,则其他线路上就会产生串扰噪声。在多导线系统中,若传输线间的串扰太大,就会产生两种有害的影响。

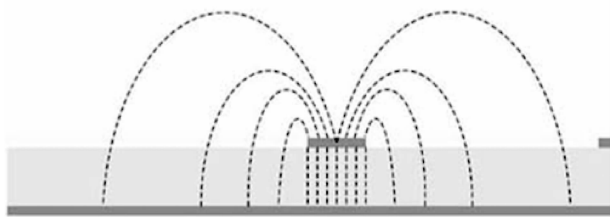


图 1 信号线周围产生的边缘场

1) 串扰会使传输线的有效特征阻抗和传播速度发生改变,影响系统级时序和信号完整性,从而改变总线上传输线的性能。

2) 串扰会在其他传输线上引入感应噪声,进一步降低信号完整性,并使噪声容限减小。

引起串扰的根本原因就是边缘场导致动态线和静态线之间产生容性耦合和感性耦合,容性耦合是由攻击网络上的电压变化在受害网络上引起感应电流从而导致的电磁干扰,而感性耦合则是由攻击网络上的电流变化产生的磁场在受害网络上引起感应电压,从而导致的电磁干扰。

研究串扰的最基本的方法就是利用多导体传输线方程,计入传输线的分布参数对信号传输延迟的影响,构建由传输线的单位长度电容、单位长度电感以及耦合线之间的单位长度互容、单位长度互感组成的等效电路模型来分析^[1]。对于多导体传输线系统,我们将这些单位长度电参数以矩阵的形式来表示,即单位长度电容矩阵(C)和单位长度电感矩阵(L)。对于具有 3 条导线的系统,其单位长度电容矩阵和电感矩阵分别如式(1)和式(2)所示。

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{31} \\ C_{21} & C_{22} & C_{32} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & l_{31} \\ l_{21} & l_{22} & l_{32} \\ l_{31} & l_{32} & l_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:对角线元素为导线自身的单位长度电容和电感,非对角线元素为导线之间的单位长度互容和互感。

3 单位长度电参数的求解

3.1 Ansoft Q3D 软件介绍

Ansoft Q3D 是一款为高速、高性能互联设计提供全面电磁解决方案的直观、易用的软件,能实现 RLC 参数提取所需的电磁场仿真功能无缝集成,并自动产生等效电路模型。设计者可以利用这种基于电磁场的等效电路模型准确完成如串扰、地反弹、延时、振铃、反射等问题的信号完整性分析。

利用 Ansoft Q3D 软件的二维场求解器可以方便快捷的提取多条传输线的单位长度电容矩阵和电感矩阵。

Ansoft Q3D 软件的操作流程如图 2 所示。

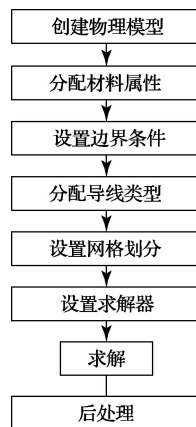


图 2 Ansoft Q3D 软件操作流程

3.2 3 条圆形导线

利用 Ansoft Q3D 软件建立位于无限大良导体接地平面上 3 条圆形导线的物理模型如图 3 所示。

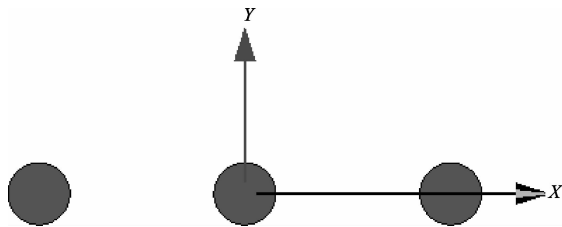


图 3 3 条圆形导线的物理模型

3 条导线都是 20 cm 规格的实心裸线,线间距为 2 cm,

导线半径为 0.040 64 cm(16 mil),离地平面的距离也是 2 cm,地平面为参考导体,导线的材质为铜,传输线长 4.674 m,忽略导线的介质绝缘层,所以对 3 条导线的研究就可以认为是均匀介质问题。经过求解以后,分别得到 3 条导线的单位长度电容矩阵和单位长度电感矩阵如下。

单位长度电容矩阵如式(3)所示。

$$C = \begin{bmatrix} 9.842\ 9 & 2.099\ 2 & 0.584\ 6 \\ 2.099\ 2 & 8.652\ 7 & 2.099\ 7 \\ 0.584\ 6 & 2.099\ 7 & 9.846\ 4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

单位长度电感矩阵如式(4)所示。

$$L = \begin{bmatrix} 935.25 & 161.43 & 69.882 \\ 161.43 & 935.28 & 161.43 \\ 69.882 & 161.43 & 935.35 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中单位长度电容矩阵的单位是 pF/m,单位长度电感矩阵的单位是 nH/m。

3.3 PCB 板上 3 条微带线

利用 Ansoft Q3D 软件建立 PCB 板上 3 条微带线的物理模型如图 4 所示。

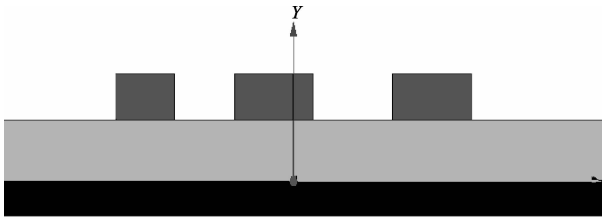


图 4 3 条矩形微带线的物理模型

微带线所在 PCB 板的介质材料的相对介电常数为 4.2,介质材料厚度为 22 μm ,地平面厚度为 12 μm ,3 条微带线厚度为 16.5 μm ,宽度分别为 30 μm ,40 μm ,40 μm ,微带线的材质为铜,经过求解以后,分别得到 3 条导线的单位长度电容矩阵和单位长度电感矩阵如下。

单位长度电容矩阵如式(5)所示。

$$C = \begin{bmatrix} 92.288 & 117.25 & 0.843\ 08 \\ 117.25 & 102.84 & 8.1818 \\ 0.843\ 08 & 8.181\ 8 & 112.32 \end{bmatrix} \quad (5)$$

单位长度电感矩阵如式(6)所示。

$$L = \begin{bmatrix} 465.08 & 132.01 & 8.149\ 6 \\ 132.01 & 420.69 & 95.629 \\ 8.1496 & 95.629 & 427.07 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中单位长度电容矩阵的单位是 pF/m,单位长度电感矩阵的单位是 nH/m。

4 结 论

在高速电路系统中,相邻的导线之间由于边缘场的作用会产生串扰,如果要研究串扰对系统造成的影响,就必须首先知道导线之间的互容和互感,利用二维场求解器 Ansoft Q3D 软件可以方便快捷地求解多导线之间的单位长度电容矩阵和单位长度电感矩阵,然后建立 SPICE 电路模型,对电路系统的信号完整性进行研究,可以有效的指导系统设计中减小串扰噪声。

参考文献

- [1] 邓集杰,刘铁根,褚备,等.高速视频处理系统的信号完整性分析[J].电子测量与仪器学报,2009,23(6):34-41.
- [2] 段天睿,滕照宇,姚勇,等.柔性线路板串扰 PSpice 仿真分析及应用[J].安全与电磁兼容,2009(5):80-83.
- [3] 赵乾,钱建平,郭恩全,等.双绞线电磁干扰防护研究[J].电子测量与仪器学报,2010,24(3):279-282.
- [4] 梁晓琳.基于 HyperLynx 的 PCB 电路信号串扰分析与仿真[J].河池学院学报,2007(2):34-37.
- [5] 曾爱凤,王海鹏.板级互连线的串扰规律研究与仿真[J].电子测量技术,2010,33(8):9-12.
- [6] 姜书艳,罗刚,吕小龙,等.90 nm 和 65 nm 工艺下片上网络互连串扰故障模型分析[J].电子测量与仪器学报,2012,26(3):267-272.
- [7] 马云双,闻映红,张丹,等.动车组屏蔽线缆间串扰特性及其试验验证研究[J].仪器仪表学报,2013,34(5):1188-1194.
- [8] 李世文,王贵.多导体传输线间的串扰分析与仿真[J].声学及电子工程,2009(2):31-33.
- [9] 李朝辉.基于 RLC 模型的集成电路互连线串扰估计[J].电子测量技术,2008,31(5):49-51.
- [10] 彭修宇.高频互连线 RLC 寄生参数提取和低阶建模[J].信息技术,2008(4):91-93.
- [11] 顾长青,邵志江,李苗.一种分析线束串扰的等效方法[J].电波科学学报,2011(3):509-514.

作者简介

秦润杰,1975 年出生,本科。主要研究方向为电梯检验及电磁兼容技术研究。

E-mail:13752674177@139.com