

文章编号: 1006-2467(2001)06-0831-04

# 共面结构双面印刷电路板的电特性仿真

曹毅, 李征帆

(上海交通大学 电子工程系, 上海 200030)

**摘要:** 介绍了一个用于双面印刷电路板电特性分析的软件, 它以布线软件生成的电路板描述文件、集总参数元件列表文件和芯片 I/O buffer 的 IBIS 模型文件为输入, 用部分元等效电路模型对双面板上的导体建模并利用部分高斯消去法进行含非线性元件的电路分析, 可计算各种激励下的电路响应。对试验电路板的分析表明, 该软件的分析结果与测量结果符合较好。

**关键词:** 双面印刷电路板; 部分元等效电路; 电特性分析

中图分类号: TN 47 文献标识码: A

## *Electrical Performance Analysis of 2-Side Printed Circuit Board*

CAO Yi, LI Zheng-fan

(Dept. of Electronic Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

**Abstract:** A 2-side Printed Circuit Board (PCB) electrical performance analyzing program was introduced. This program uses the description files given by layout software, lumped elements table files and the IBIS model files of the I/O buffer on chips as the input data. The PCB is modeled by partial element equivalent circuit (PEEC) and the circuit including nonlinear elements is solved by partial Gaussian elimination. The circuit response under various excitation can be solved. This program is performed on a test board, the results fit well to the measurements.

**Key words:** 2-side printed circuit board; partial element equivalent circuit (PEEC); electrical performance analysis

在现代通信电子设备中大量地应用了印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)技术。传统 PCB 的基本形式为多层板, 其中有专门的接地层和馈电层, 将布线层隔离开。近年来为降低成本, 提高 PCB 的利用率, 出现了共面结构的双面印刷板, 即将信号线、馈电线/板和接地线/板共面做在介质板的两面, 两面布线由通孔实现连接。这种双面板和传统的多层板相比, 布线面积利用充分, 结构更为紧凑, 同时可大幅度降低生产成本, 是一种有发展前途的电路形式。

但是, 由于这种 PCB 没有专门的馈电层和接地层, 因此信号线、接地线/板和馈电线/板都在一个布

线层上, 形状既不规则又相互交错。这样的结果是引入了明显的由互连线和结构引起的寄生效应, 对系统的电特性产生显著影响。其后果是布线前预期的电性能在经过布线和实际生产后产生很大的偏差, 造成电路性能降低甚至不能正常工作。为此, 迫切需要在这种特殊形式的电路板投入加工前进行电特性仿真。但双面板是一种三维结构, 不适合用现有大多数仿真软件所采用的二维模型建模和分析, 而且还有仿真规模的问题, 因此目前尚无针对这项任务的软件。

为完成上述任务, 可以对所需的软件作如下的设想和要求。在双面板的电磁建模中可认为印刷电路板上所有的导体互连线构成一个线性无源的网络。尽管整个电路板的总体性能是由板上所有的导

体和器件共同决定的,但由于器件往往采用成品的缘故,调整的范围有限,而互连网络调整修改的余地较大,而且线性无源网络的分析方法较为完善,因此在进行较大规模电路板性能分析和 CAD 的时候往往采用如下方法:① 先按经验进行认为合适的布线;② 用电磁场方法对线网的电特性进行分析,观察可能出现问题的互连线两端的信号,评估时延、畸变等性能(这可能需要对多根连接线进行很多次分析);③ 修改布线;重复②. 经以上步骤处理,如能使线网的传输特性满足要求的话,基本可保证电路板的正常工作.

为了尽可能地与电路板的实际工作状态接近,各芯片的 I/O buffer 也应该端接在互连线上一同分析. 但 buffer 是非线性器件,因此完整的分析应解决含非线性元件的电路分析问题. 另外,由于要分析的双面板是为实际生产设计的,分析软件就必须与自动布线软件有好的接口,以便直接接收电路板的描述信息供分析之用. 而且对于实际的电路板,这些信息的录入若靠手工完成也是不可能的.

本文介绍一个用于双面印刷电路板的电特性分析软件,它可计算各种激励下的电路响应.

## 1 电路的建模

对整个双面 PCB 电路的建模,选择部分元等效电路(Partial Element Equivalent Circuit, PEEC)模型<sup>[1,2]</sup>,并以该模型生成的状态方程进行时域响应分析. 要完整地分析一个几何结构的电磁特性,理论上应该进行全波分析,但由于电路结构的复杂性和高昂的计算代价,在对实际电路的分析中一般仍用似稳场建模的等效电路方法,而其中 PEEC 模型是一种很好的选择,因为它同时考虑了结构的电效应和磁效应.

PEEC 的原理是:

$$-\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{A}(\mathbf{r}, t) - \nabla \mathcal{Q}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

中的电磁位用积分形式

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \sum_{k=1}^K \frac{\mu}{4\pi} \int_{V_k} \bar{\mathbf{K}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \mathbf{J}(\mathbf{r}', t) d\mathbf{v}' \quad (2)$$

$$\mathcal{Q}(\mathbf{r}, t) = \sum_{k=1}^K \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{S_k} \bar{\mathbf{K}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') q(\mathbf{r}', t) ds'$$

表示,得到式(1)在第  $l$  个单元的离散表达式:

$$\int_{V_l} \mathbf{J}_l(\mathbf{r}, t) d\mathbf{v}_l + \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^{N_{yk}} \frac{\mu}{4\pi} \int_{V_k} \bar{\mathbf{K}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') d\mathbf{v}' d\mathbf{v}_k \left| \frac{\partial \mathbf{J}_{ynk}}{\partial t} + \right.$$

$$\sum_{k=1}^K \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_{V_k} \frac{\partial}{\partial t} \left[ \int_{S_k} \bar{\mathbf{K}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') q(\mathbf{r}', t) ds' \right] d\mathbf{v}_l = 0 \quad (3)$$

式中,  $\bar{\mathbf{K}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$ , 再利用部分电感的公式:

$$L_{p12} = \frac{\mu}{4\pi a_1 a_2} \int_{V_1} \int_{V_2} \frac{\mathbf{l}_1 \cdot \mathbf{l}_2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d\mathbf{v}_1 d\mathbf{v}_2 \quad (4)$$

最终整理可得如下形式的系统状态方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G} & \mathbf{C}_{ui} \\ \mathbf{C}_{iu} & \mathbf{R}_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{i} \end{bmatrix} + \mathbf{b}e(t) \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{i}$  分别为节点电压和支路电流;  $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{L}$  分别为各电容单元的互电容矩阵和各支路的互电感矩阵;  $\mathbf{G}$  和  $\mathbf{R}_{ii}$  分别为电导和电阻矩阵;  $\mathbf{C}_{iu}$ 、 $\mathbf{C}_{ui}$  分别为节点和电流的连接关系矩阵. 在运用 PEEC 模型时,先将电路(导体,有时还包括介质)划分成为电容和电感单元,然后计算这些单元之间的自、互电容和电感. 最后再进行电路模拟.

## 2 任意形状接地/馈电板的自动单元分割

由于边缘效应,在工作时接地/馈电板的电流分布将集中于边缘上,因此在单元分割时是基于图形的边界. 自动单元分割的思路是:将整个板按一定的单位画上坐标网格,以图形边界上与坐标线相交的点为边界节点,以在图形内部的坐标格点为内部节点. 边界节点由边界电流连接(电流可以由不同方向的几段连接而成),相同纵、横坐标的节点在图形内部分别由横向、纵向电流连接. 整个算法中均假定图形内部在边界的右边. 这一思路的大意如图 1 所示.

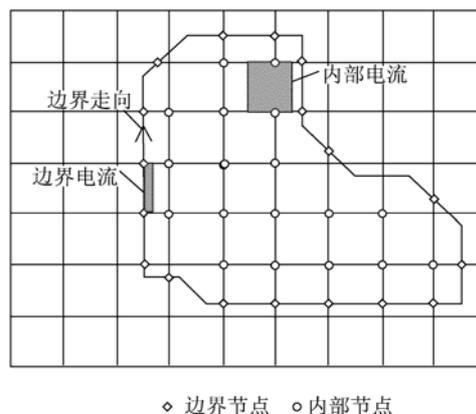


图 1 不规则形状的单元分割

Fig. 1 Schematic diagram of partitioning of arbitrary shape

在上面的单元分割过程中,电流和节点间的连接关系即矩阵  $[\mathbf{C}_{iu}]$  和  $[\mathbf{C}_{ui}]$  也同时确定了. 分割时所用的单位是根据电路的工作频率和双面板的尺寸决定的.

### 3 含有非线性元件的电路分析

求解电路的时域响应就是时域的迭代, 而每一步都相当于解一个线性方程组. 对于线性电路, 由于元件参数不会随电路变量(电压和电流)的改变而变化, 所以状态方程是非时变的. 在电路分析时只需对状态方程矩阵求逆一次, 以后的迭代都可使用该结果. 但对于含非线性元件的电路, 元件参数是随电路变量而改变的, 因此状态方程在每一迭代步都不同, 原则上每步迭代都要重新求逆. 但通常非线性元件比之线性元件在数量上少得多, 故可用下述部分高斯消去法求解状态方程, 以节省计算量.

先将非线性电路变量集中放置在变量向量一端(通常为上部), 于是待求解的状态方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ i \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} u \\ i \end{bmatrix} + b \rightarrow$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{nl} \\ x_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{nl} \\ A_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{nl} \\ x_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{nl} \\ b_l \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: 下标  $nl$  代表非线性部分;  $l$  代表线性部分;  $x$  为总的变量, 包括电流和电压. 式(6)的时域求解可按如下的格式进行迭代:

$$x(t + \Delta t) - x(t) = [Ax(t + \Delta t) + b(t)]\Delta t \rightarrow$$

$$[I - A\Delta t]x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t b(t) \quad (7)$$

此格式的每一步实际为求解一线性方程组, 部分高斯消去法的处理如图 2 所示.

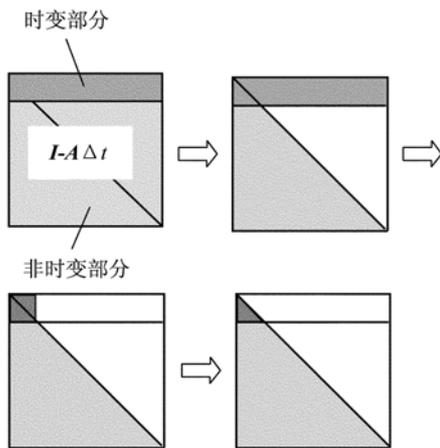


图 2 部分高斯消去法的图示

Fig. 2 Demonstration of partial Gaussian elimination

非时变部分的上三角化只需做一遍即可, 但在每一步, 时变部分都有改变, 此时可用固定的已经上三角化的非时变部分将时变部分化为对角线上的方阵. 然后再按一般的消去法将该小规模方阵三角化, 这样整个矩阵就三角化了. 因为非时变部分占矩阵的绝大部分, 所以每一迭代步由非线性元件带来

的额外运算较少.

### 4 结果比较

图 3~ 图 6 所示为本程序对测试板进行分析后所得的部分结果(上图)和测量结果(下图)的比较. 测试板尺寸为  $6\,600\text{ mil} \times 4\,000\text{ mil}$  ( $1\text{ mil} \approx 25.4\ \mu\text{m}$ ), 电路变量数 1 718. 图 3~ 图 6 为一组 15 根连接 2 块芯片的耦合线在不同激励情况下的波形, 由一块发送信号而另一块接收. 部分波形图还显示了电源和接地管脚上电压的波动情况.

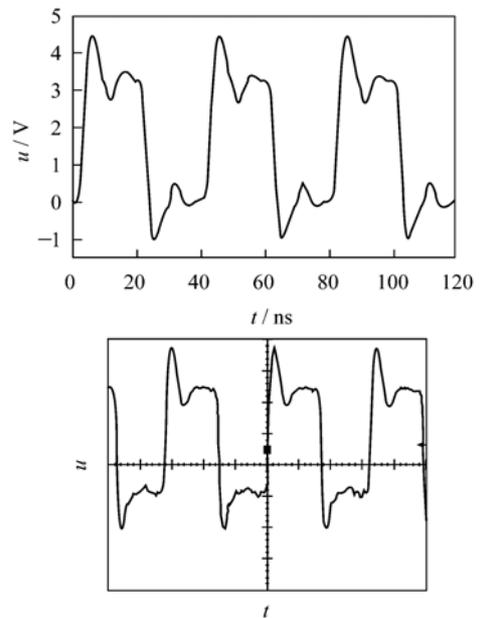


图 3 最边上第 1 根互连线接收端的波形

Fig. 3 Waveform at the receiving end of line 1

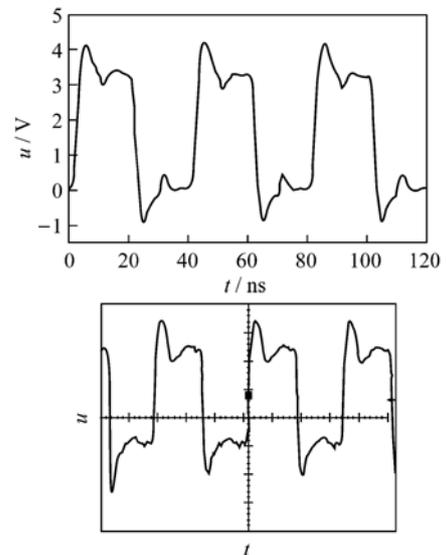


图 4 最边上第 2 根互连线接收端上的波形

Fig. 4 Waveform at the receiving end of line 2

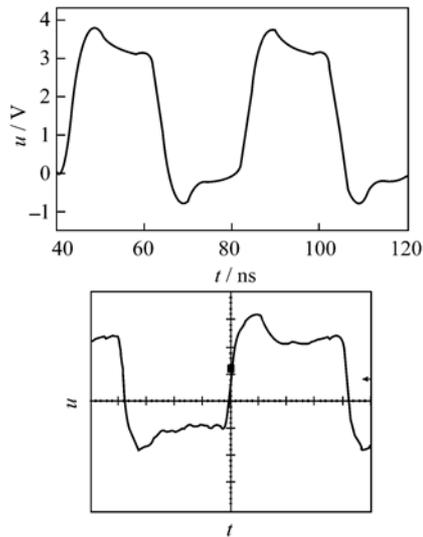


图 5 接收端并联 3 个管脚的波形

Fig. 5 Waveform at the receiving end with 3 parallel pins

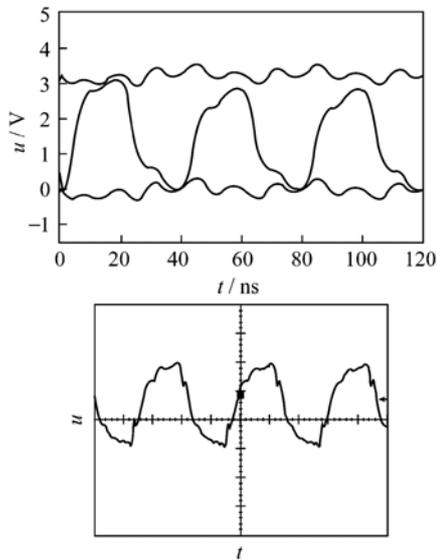


图 6 输出端串联电阻负载端为电阻电容并联的波形

Fig. 6 Waveform at the receiving end with parallel RC and output with serial R

## 5 结论

PCB, 特别是特殊结构的如双面板那样的 PCB 的电特性仿真具有较大的实际意义, 但由于电路结构的复杂和非线性元件的引入, 迄今尚无较完满的解决办法. 本文介绍了一个直接利用布线软件生成的版图信息对实际双面板进行电特性仿真的软件, 它采用了针对双面板特殊结构的某些较新电磁建模方法, 可直接从布线软件获取版图几何信息进行自动单元分割; 结合集总元件列表和 buffer 的 IBIS 模型构成等效电路; 采用部分高斯消去法进行含非线性元件电路的时域分析. 仿真结果与实测结果吻合较好, 进一步完善后该软件将有较大的实用价值.

### 参考文献:

- [ 1 ] Ruehli A E. Equivalent circuit models for three dimensional multiconductor systems [ J ]. IEEE Trans MTT, 1974, 22(3): 216~ 221.
- [ 2 ] Heeb H, Ruehli A E. Three-dimensional interconnect analysis using partial element equivalent circuits [ J ]. IEEE Trans CAS-I, 1992, 39(11): 974~ 982.

### 作者简介:



曹毅 1971 年生. 1996、1999 年于上海交通大学电子工程系分别获硕士、博士学位, 并留校任教. 主要研究领域为高速集成电路系统中互连与封装结构的电磁建模、参数提取和电特性分析. 已发表学术论文 10 余篇.

李征帆 男, 1958 年毕业于清华大学无线电系, 并留校任教; 1981~ 1983 年为美国康奈尔大学访问学者, 现为上海交通大学电子工程系教授、博士生导师. 主要从事微波集成电路和高速数字集成电路系统中的电磁场理论和电路理论及 CAD 方法的研究, 承担国家重点攻关及自然科学基金等研究项目. 在国外学术刊物上发表论文 40 多篇; 国内学术刊物上发表论文 90 多篇.

下期发表论文摘要预报

## 基于时序分析的电火花线切割伺服进给状态

伍俊, 李明辉

(上海交通大学 塑性成形工程系, 上海 200030)

摘要: 为研究电火花线切割加工中伺服进给状态, 开发了一种间隙放电状态检测系统, 对典型伺服进给状态下高速走丝电火花线切割加工过程进行了检测, 并运用时序分析的方法对正常放电序列结构进行了辨识. 研究结果揭示了电火花线切割加工中伺服进给状态与间隙放电状态之间的关系, 为实现其高速、高质量加工提供了重要依据.