

HFSS 和 CST 应用于过孔模型的协同仿真研究*

彭文均

(武汉市长虹桥 37-1 号 武汉 430064)

摘要 基于过孔的实际参数,利用 HFSS 和 CST 建立了六层高速 PCB 板过孔的全波分析理论模型。在 1~10GHz 频段,研究过孔的四个重要参数,包括孔径及内外径的差值比、过孔长度、基板介电常数等,对信号传输性能的影响;并选择射频常用频点 $f=5\text{GHz}$ 进行了仿真验证,得到了优化信号完整性的设计参数:内径不大于 10mil,外径不大于 25mil,过孔长度小于 55mil,内外径差值越大越好,比值优化为 1:2.3。仿真结果表明:理论模型是实际有效的,并且优化的设计参数可以保证过孔的阻抗连续性和较小的反射损耗、插入损耗。这对高频 PCB 板的设计有很好的指导意义。

关键词 过孔建模;协同仿真;信号完整性;结构参数;PCB 设计

中图分类号 TP391.9

Research on the Co-simulation of Via Model Using HFSS and CST

PENG Wenjun

(No. 37-1, Changhongqiao Road, Wuhan 430064)

Abstract Co-simulation of the theoretical via model is presented by using HFSS and CST, with the sweep frequency ranges 1~10 GHz. The impact of structure parameters on signal integrity is analysed, including the via diameter, the ratio of inner and outer diameter, the via length and the relative permittivity of substrate. We select $f=5\text{GHz}$ as the RF validation frequency. The simulation results show that inner radius using no more than 10 mil, outer radius using no more than 25 mil and through-hole length using less than 55 mil can guarantee the continuity of impedance and cost lower insertion loss. The optimal ratio between inner diameter and outer diameter is 1 to 2.3. Above all, the model is practical and effective. It's a good guidance for the design of high-frequency Printed Circuit Board.

Key Words via model, co-simulation, signal integrity, structure parameters, PCB design

Class Number TP391.9

1 引言

过孔常见于印刷电路板或封装结构,其目的是提供不同板层之间的电气连接。最初,过孔对通过它们的信号几乎没有影响。随着数据速率不断增加,信号上升时间的下降,过孔的电气特性也要充分考虑。现在,通过准确的建模对高速互连系统的信号完整性是非常重要的。通常越是高速的环境,通孔应该越小越好,这是因为分布效应与通孔的尺寸成正比;除了离散效应以外,通孔的尺寸是和布线密度与制作成本成反比的。这里,我们只探讨通孔对高速数字系统的影响,尤其是通孔所衍生的电容和电感分布效应。

本文首先介绍了过孔的物理结构和理论模型,然后针对过孔设计的四个关键参数,进行理论建模和仿真分析,得到设计参数对信号传输的影响趋势,并给出了高频 PCB 过孔的设计规则,对高速 PCB 的设计有很好的指导意义。

2 过孔

一般来说,过孔有多种不同的类型,如通孔、盲孔和埋孔(图 1)。一方面,各种类型都有性能、成本的权衡设计;另一方面,通孔位置很重要,对于良好的信号完整性,重要考虑的是过孔附近要有足够的合适的返回路径。例如:差分过孔的

间距必须适当,以确保最小的阻抗不匹配。经过严格的理论推导和分析,过孔的等效电性模型^[1~2]如图 1 所示。

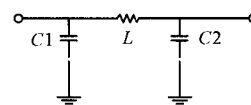


图 1 过孔的等效电性模型

其中:

$$C=1.41\epsilon_r T \frac{D1}{D2-D1} \quad (1)$$

$$L=5.08h \left[\ln\left(\frac{4h}{d}\right) + 1 \right] \quad (2)$$

C 为过孔的寄生电容,单位为 F; L 为过孔的寄生电感,单位为 H; $D1$ 为通孔的外径,单位为 mil; $D2$ 为电源隔离区的直径,单位为 mil; T 为印制电路板的厚度,单位为 mil; ϵ_r 为电路基板材料的相对介电常数,单位为 F/m; h 为通孔的高度(与板的厚度相等),单位为 mil; d 为通孔的内径,单位为 mil。

从上面的公式中可以得出,过孔的电气性能随设计参数不同而变化。PCB 叠层,孔垫的形状、尺寸,过孔的加工偏移量等都会影响信号的传输。我们重点研究关键的结构参数,包括过孔内径,过孔外径,内外径的差值比,过孔长度(介质板厚度)和基板相对介电常数对信号完整性的影响。

3 过孔建模

复杂的电路设计会增加通孔长度,同时先进的制造工

* 收稿日期:2011 年 10 月 30 日,修回日期:2011 年 12 月 2 日
作者简介:彭文均,男,高级工程师,研究方向:计算机技术。

艺可以减小钻孔直径尺寸(孔的宽度)。低长宽比的通孔通常容易生产且成本低,而高长宽比的通孔加工起来比较困难,成本高且产量低^[3]。本文在过孔设计中,分别研究了高速数字电路中的过孔内径、过孔外径以及过孔长度对高速信号传输性能的影响,并以 CST 建模协同仿真对比的方式,具体分析了过孔设计对信号完整性的重要性。

设计高性能互连系统,重要的是要准确地描述系统中的过孔结构。通过全波领域的三维几何模型求解,得到准确的模型参数,再分析独立参数的影响,以确保最佳的信号传输性能,也作为一个完整的通道模型进行验证。为了量化分析这些过孔设计参数的影响,文中选择了频域的 S 参数 S₂₁(插入损耗)和 S₁₁(反射损耗)来分析过孔的传输性能。

首先在全波仿真软件 HFSS 中建立过孔的三维物理模型^[4~5](图 2),在 CST 中建立过孔的三维物理模型^[6](图 3)。模型结构为一连接上下两层微带线的通孔,设计参数如下:介质层厚度为 50mil,介电常数为 4.4,走线宽度为 27.5mil、长度变化从 200mil~360mil,厚度为 0.6mil,过孔内径变化从 5mil~10mil,外径变化从 15mil~25mil。在接下来的仿真中,我们选择 1~10GHz 频段,涵盖了常用 ISM 频段和一些重要的频点。



图 2 过孔的三维物理模型(HFSS)



图 3 过孔的三维物理模型(CST)

4 参数分析

4.1 过孔内径的影响

通过电磁仿真,很容易得到模型的 S 参数。随着孔径的增大,插入损耗和反射损耗也逐渐增大,如图 4、图 5 所示。实际高速设计中,为了保证传输线阻抗的连续性,过孔内径应不超过 10mil。同时这也可以将插入损耗(S₂₁)控制在较小范围内。

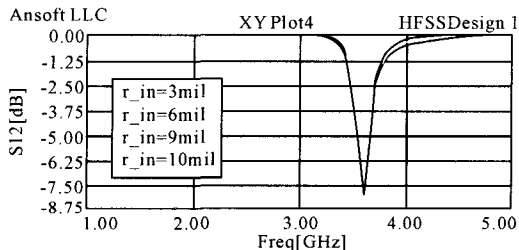


图 4 过孔内径变化的 S₁₂ 曲线

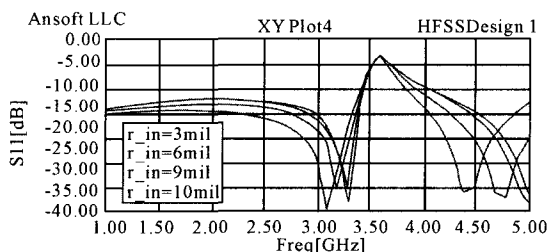


图 5 过孔内径变化的 S₁₁ 曲线

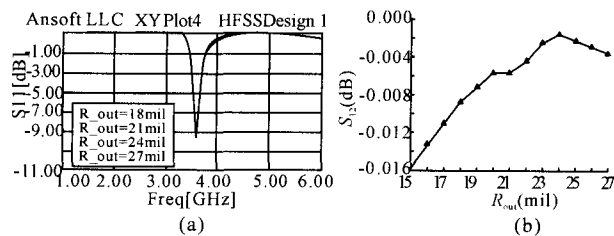


图 6(a) 过孔外径变化的 S₁₂ 曲线

图 6(b) 过孔外径变化的 S₁₂ 曲线 (f=4.95GHz)

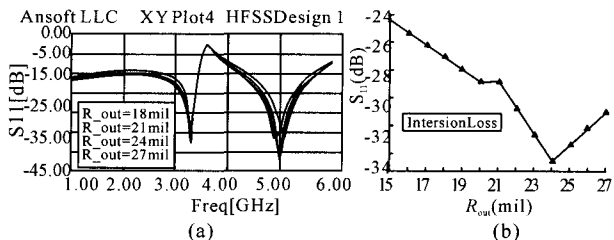


图 7(a) 过孔外径变化的 S₁₁ 曲线

图 7(b) 过孔外径变化的 S₁₁ 曲线 (f=4.95GHz)

4.2 过孔外径的影响

通过电磁仿真,很容易得到模型的 S 参数,随着孔径的增大,插入损耗和反射损耗均逐渐减小,趋近于零,如图 6、图 7 所示。明显看出,最优设计值为过孔外径=24mil。对于实际高速设计,为了节约空间、优化布线,过孔外径应不超过 25mil。同时这也可以将插入损耗(S₂₁)控制在较小范围内。

4.3 过孔长度的影响

高速 PCB 设计的复杂性使板子层数不断增加,厚度也随之增长,长度是影响过孔电感的主要因素。通孔的长度与整个 PCB 的厚度相等,典型的高速 PCB 设计厚度范围是 40mil~80mil。对于较复杂设计和军事应用,PCB 的厚度可能超过 100mil。这个厚度增长的趋势将给过孔设计满足信号完整性要求带来挑战。



图 8 加入地孔阵列的过孔模型(HFSS)

如图 8 所示,在软件中建立的结构模型为一个六层板结构,以通孔连接上下两层的微带线。为了更好地分析对比过孔长度变化带来的影响,这里在距离过孔 1mm 处加入地孔阵列,以确保信号有较好的返回路径。设计参数仍然选用宽 27.5mil、厚 0.6mil 的微带线,介电常数为 4.4,过孔内半径 10mil,外半径 20mil,地孔半径 20mil,过孔长度变化为 50mil~70mil。

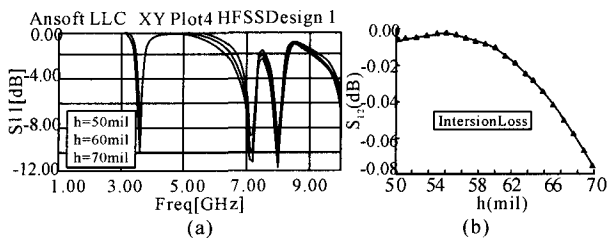


图 9(a) 过孔长度变化的 S₁₂ 曲线

图 9(b) 过孔长度变化的 S₁₂ 曲线 (f=4.95GHz)

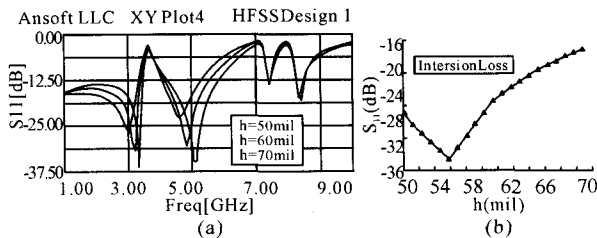


图 10(a) 过孔长度变化的 S11 曲线

图 10(b) 过孔长度变化的 S11 曲线 ($f=4.95\text{GHz}$)

从图 9、10 中可以明显得到:随着过孔长度的增加,导致了更大的插入损耗和反射损耗。最优设计值为 $h=55\text{mil}$ 。分析原因是因为 PCB 板厚度(过孔长度的增加)导致了阻抗不连续的恶化,使反射更为严重。所以在设计中,过孔长度应不大于 55mil ,以保证阻抗连续性和较小的插入损耗、反射损耗。

4.4 基板介电常数的影响

仿真中我们选择三种常用基板材料,分别是:FR4($\epsilon_r=4.4$), Plexiglass($\epsilon_r=3.2$), Rogers 5880($\epsilon_r=2.2$), 扫频范围 $1\sim 10\text{GHz}$, 谐振点是 $f=5\text{GHz}$ 。仿真结果如图 11、图 12 所示。

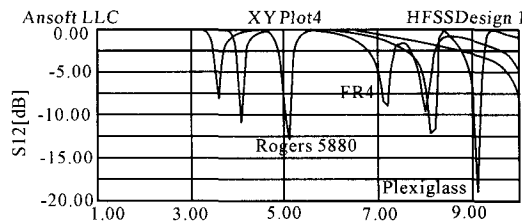


图 11 基板介电常数变化的 S12 曲线

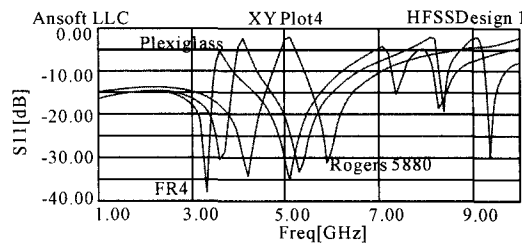


图 12 基板介电常数变化的 S11 曲线

从图中可以得出:当基板材料的相对介电常数逐渐减小时,信号的传输性能是逐渐优化的,并且有效带宽也大大增加。因为介电常数是随着频率的增加而减小,所以在实际应用中应根据工作频率确定材料的介电常数。信号在介质材料中传输速度将随着介质常数增加而减小,因此要获得高的信号传输速度必须降低材料的介电常数。同时要获得高的传输速度就必须采用高的特性阻值,而高的特性阻抗必须选用低的介电常数材料。相关文献[7]也证明了在基底加入介质补偿,可以有效降低信号的反射损耗,提高信号完整性。

5 结语

本文通过电磁仿真分析,研究了四种重要的过孔设计参数对高速 PCB 信号完整性的影响,得出了常用 ISM 频段 ($>2.5\text{GHz}$) 高速设计中,采用不超过 20mil 的过孔内径、 40mil 的过孔外径和小于 55mil 的过孔长度可以保持阻抗的连续性和较小插入损耗;同时,内外径的差值越大越好,比值优化为 $1:2.3$ 。出于工程设计和板材加工的考虑,允许 $\pm 2\text{mil}$ 的精度误差。最后,通过 CST 建模对比分析了过孔设计对高速 PCB 信号完整性的重要影响,同目前采用的其它方法相比,本文引入全波分析软件 CST 进行建模仿真,证明了模型的合理性和设计参数的有效性。

参考文献

- [1] Martin Graham. PH. D. High-speed Digital Design, A Handbook of Black Magic. University of California at Berkeley.
- [2] E. Laermans, J. De Geest, D. De Zutter, et al. Modeling differential via holes [J]. IEEE Trans. Advanced Packaging, 2001, 24(3): 357-363.
- [3] 侯莹莹, 关丹丹. 高速 PCB 中的过孔设计研究 [J]. 电子与封装, 2009(8).
- [4] Ansoft Corporation. HFSS Full Book [R]. Ansoft Corporation, 2005.
- [5] Ansoft Corporation. Designer Full Book [R]. Ansoft Corporation, 2005.
- [6] CST Corporation. Designer Full Book [R]. CST Corporation, 2005.
- [7] 刘博, 陈如山. 降低耦合微带线间串扰问题-FDTD 分析 [J]. 微波学报, 2003(9).

(上接第 86 页)

强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2807-2812.

- [8] Alexander Tartakovskiy, Skirmantas Kligys, Anton Petrov. Adaptive sequential algorithms for detecting targets in a heavy IR clutter [C]//Signal and data processing of small targets 1999, Processing of SPIE, 1999, 3809: 119-130.
- [9] Duff A L, Plantier G, Valière J C, et al. Analog Sensor Design

Proposal for Laser Doppler Velocimetry [J]. IEEE Sensors Journal, 2004, 4(2): 257-261.

- [10] 牛小东. 一种改进小波收缩阈值的信号消噪算法 [J]. 计算机与数字工程, 2011, 39(3).
- [11] 杨建国. 小波分析及其工程应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 108-109.

HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件，易迪拓培训(www.edatop.com)是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用，易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验，曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程，专家讲解，直观易学，是您学习 HFSS 的最佳选择。



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>

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>



更多 HFSS 视频培训课程:

● 两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程

课程从零讲起，通过两周的课程学习，可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS，是 HFSS 初学者的最好课程，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

● HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程

HFSS 进阶培训课程，通过十个 HFSS 仿真设计实例，带您更深入学习 HFSS 的实际应用，掌握 HFSS 高级设置和应用技巧，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

● HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程

HFSS 是天线设计的王者，该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置，让 HFSS 天线设计不再难，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

● 更多 HFSS 培训课程，敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(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相关培训课程和 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。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直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
- ※ 视频课程、既能达到现场培训的效果,又能免除您舟车劳顿的辛苦,学习工作两不误
- ※ 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>