

# 基于 SIwave 和 Designer 的差分过孔仿真分析<sup>\*</sup>

麻勤勤 石和荣 孟宏峰

(南京电子技术研究所 南京 210039)

**摘 要:** 随着信号频率和 PCB 布线密度的不断提高,PCB 中的过孔结构对信号完整性的影响愈加凸显。过孔设计的合理性会极大地影响 PCB 上信号的传输质量。本文基于 SIwave 和 Designer 仿真软件,建立了用于差分过孔分析的 PCB 结构模型,针对不同的孔径、焊盘尺寸、反焊盘尺寸、过孔长度以及是否具有残桩、非功能焊盘的情况,分别提取了频域 S 参数,并仿真得到了相应的时域 TDR 波形,较为全面地分析了过孔结构参数对传输信号的影响,给出了 PCB 过孔设计的建议。通过实际 PCB 中差分线上过孔的分析,验证了过孔设计建议的合理性。

**关键词:** 差分过孔;高速 PCB;信号完整性;S 参数;TDR

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.1040

## Simulation and analysis of differential via based on SIwave and Designer

Ma Qinqin Shi Herong Meng Hongfeng

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

**Abstract:** With the increasement of signal frequency and PCB wiring density, the effect of PCB via structure on signal integrity is more and more obvious. The rationality of via design can greatly affect the transmission quality of PCB signal. Based on SIwave and Designer simulation software, the PCB structure model for differential via analysis is established. According to different via radius, pad size, antipad size, via length and whether it has a stub, non-functional pads, the S parameters in the frequency domain are extracted respectively and the TDR waveforms of the corresponding time domain are obtained. The influence of via structural parameters on the transmitted signal is analyzed in a comprehensive way, and suggestions on the PCB via design are proposed. Through the analysis of via on the differential line of actual PCB, the rationality of the proposed via design is verified.

**Keywords:** differential via; high-speed PCB; signal integrity; S parameter; TDR

## 1 引 言

随着信号速率向更高的方向发展,高速系统中的信号完整性问题更加严重<sup>[1]</sup>。过孔作为 PCB 的重要组成部分,是多层 PCB 实现电气连接的必要结构。在高频条件下,过孔的寄生电容、寄生电感会导致信号传输路径不连续,从而引起反射、衰减等信号完整性问题<sup>[2-4]</sup>。因此,分析过孔寄生效应的影响,以及设计合理的过孔结构,对高速 PCB 设计具有非常重要的意义。

对于过孔特性的研究,文献[5]采用 HFSS 和 CST 软件对单个过孔进行建模,仿真分析了过孔孔径和长度对高速 PCB 信号完整性的影响。文献[6]通过实验测量研究了短桩对过孔阻抗和损耗的影响。文献[7]基于 Foldy-Lax 多径散射方程和模态扩展的方法,研究了高速互连电路中大规模过孔的电磁耦合问题。

随着差分线在高速设计中的普遍应用<sup>[8-9]</sup>,对差分过孔的研究愈加重要。其中较早采用的是工程近似方法,运用传输线的等效电路模型来分段建模差分过孔<sup>[10]</sup>。目前主要集中于软件的建模仿真,如 HFSS<sup>[11]</sup>。

本文利用 SIwave 和 Designer 软件,对 PCB 差分过孔进行建模,从频域和时域两个角度,分析不同结构参数下的过孔特性,并在实际的 PCB 板中进行仿真验证,分析过孔设计对信号完整性的影响。

## 2 过孔

### 2.1 过孔简介

一般而言,过孔分为盲孔、埋孔和通孔三类。出于工艺和成本的考虑,通孔成为 PCB 最常用的过孔类型。

过孔的基本结构如图 1 所示。其中,中间的金属圆柱体为过孔孔壁,是不同叠层之间的电气通路。焊盘为圆环

收稿日期:2015-04

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金(61201092)、辽宁省自然科学基金(201202015)、辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2013047)

状垫片,用于将孔壁与顶层或内部传输线相连。不用于任何连接的焊盘,即为非功能焊盘。平面层上在过孔周围挖空的部分称为反焊盘,主要用于隔离。此外,过孔中不用于连接的部分称之为残桩。

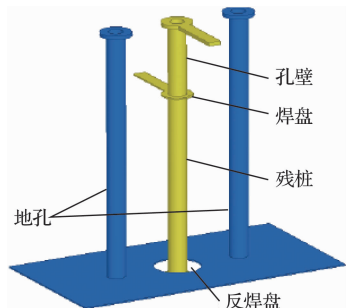


图 1 过孔的基本模型

## 2.2 过孔特性

过孔是 PCB 上的一个重要的阻抗不连续点。当高速信号通过时,过孔的寄生电容,会造成信号上升时间延长,传播速度减慢,而寄生电感的存在,会削弱电源旁路电容的滤波功能。如果过孔的寄生电感值过大,会使电源系统的滤波作用降低甚至失效,从而使得高频信号无法由旁路电容引回接地层,而在电路板中到处流窜,引发串扰以及 EMI 问题<sup>[12]</sup>。

过孔的寄生电容估算为:

$$C = \frac{1.41\epsilon_r T D_1}{D_2 - D_1} \quad (1)$$

式中:  $C$  为过孔的寄生电容(pF),  $D_2$  为反焊盘直径(in),  $D_1$  为焊盘直径(in),  $T$  为印制电路板厚度(in),  $\epsilon_r$  为电路板的相对介电常数。

过孔的寄生电感估算为:

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

式中:  $L$  为寄生电感(nH),  $h$  为过孔长度(in),  $d$  为过孔直径(in)。

通过上述公式可以看出,过孔的寄生电容、寄生电感与孔径、焊盘反焊盘等参数有关。因此,可通过过孔结构的优化设计,降低寄生电容和寄生电感的影响,从而提高信号的传输质量。

## 3 差分过孔仿真模型

利用 SIwave 建立一个六层的 PCB 板结构,由上到下依次是 Top\_S1, GND1, S2, Power, GND2, Bottom\_S3。微带差分线从顶层打孔至信号层 S2 或 S3,信号走线大致如图 2 所示,线长为 2000 mil,线宽 8 mil,材质为 copper。内、外层走线的特性阻抗都为  $50 \Omega$ 。最下方是一对无过孔的差分线,用以对比说明过孔的存在所带来的影响。上面 3 对差分线用于对比说明过孔结构参数变化带来的影响。典型的过孔半径为 6 mil,焊盘半径 12 mil,反焊盘半径为 18 mil,其他尺寸均在此基础上进行改变。

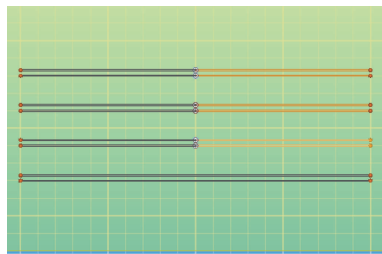


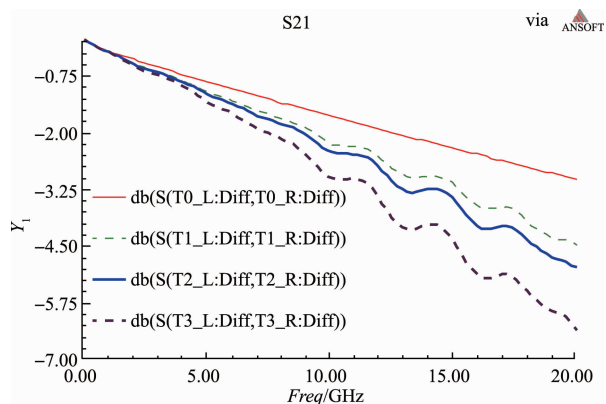
图 2 SIwave 建立的 PCB 结构模型

## 4 过孔仿真分析

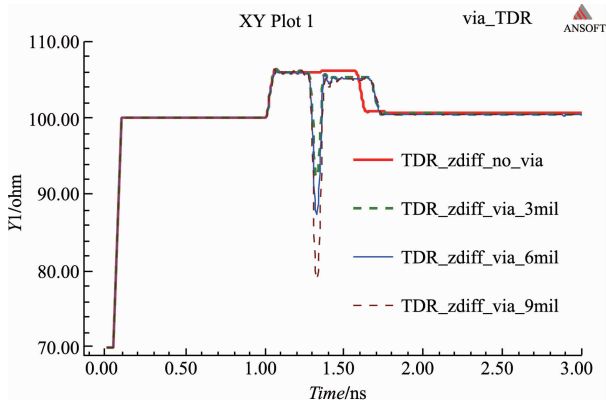
在高速互连电路中,  $S$  参数常用来分析端口的网络<sup>[13-14]</sup>, TDR 可以很好地分析互连中的不连续结构<sup>[15-16]</sup>。因此,本文利用 SIwave 提取过孔的频域  $S$  参数,并通过其中的  $S_{21}$ (插入损耗)来分析过孔的传输性能,然后将  $S$  参数导入 Designer,仿真过孔的时域 TDR 波形,进而分析过孔引起的阻抗不连续现象。

### 4.1 孔径的影响

当过孔焊盘和反焊盘的尺寸固定,分别为 12 mil 和 18 mil,当过孔半径分别为 3 mil、6 mil 和 9 mil 时,通过 SIwave 仿真得到的过孔  $S$  参数( $S_{21}$ )和由 Designer 得到的 TDR 曲线分别如图 3(a)、(b)所示。



(a) 无过孔及不同过孔半径的  $S$  参数



(b) 无过孔及不同过孔半径的 TDR 曲线

图 3 无过孔及不同过孔半径的  $S$  参数和 TDR 曲线

由  $S$  参数对比可知,有存在时,传输线特性变差,随着

半径的增大,过孔的衰减增加,尤其在高频情况下,这种现象更为明显。由 TDR 对比可知,过孔的存在,使得阻抗的不连续性增加,孔径变大时,会引起更大的阻抗不连续,主要表现为过孔的寄生电容加大。

#### 4.2 焊盘尺寸的影响

图 4(a)、(b)分别为焊盘半径为 9 mil、12 mil 和 15 mil 时,仿真得到的 S 参数和 TDR 曲线。

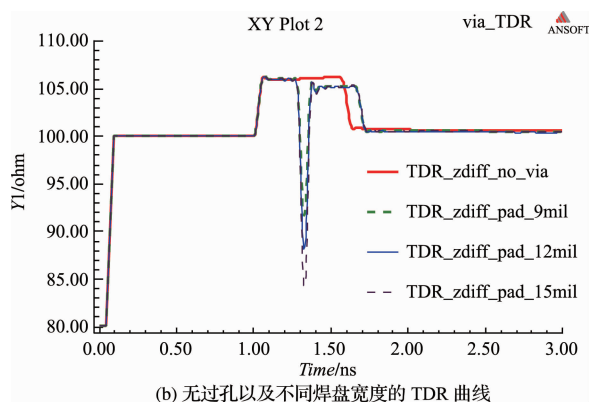
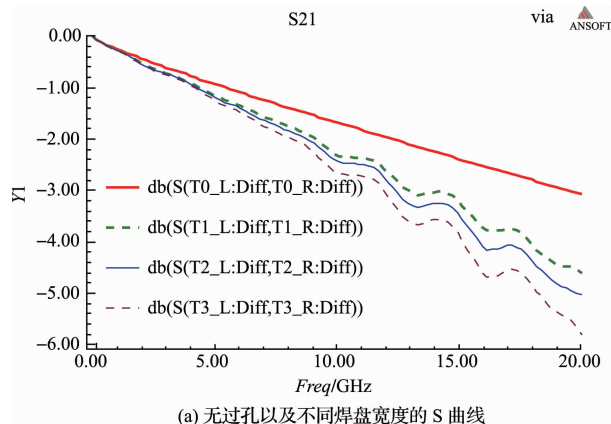


图 4 无过孔及不同焊盘宽度的 S 参数和 TDR 曲线

由 S 参数对比可知,随着焊盘的增大,信号通过过孔时损耗增大,尤其在高频情况下,信号的衰减更为明显。由 TDR 可知,焊盘变大时,过孔的寄生电容加大。这是因为,当焊盘直径变大时,增加了焊盘与周围导体边缘的耦合,相当于增加了容性负载,从而使过孔的阻抗减小。

#### 4.3 反焊盘尺寸的影响

图 5(a)、(b)分别为反焊盘半径为 12 mil、15 mil 和 18 mil 时,仿真得到的 S 参数和 TDR 曲线。

由 S 参数和 TDR 参数对比可知,随着反焊盘的增大,过孔的衰减减小,寄生电容减小。这是因为,反焊盘直径的增大,使得金属铜平面与焊盘及过孔孔壁的耦合减小,从而容性负载减小。

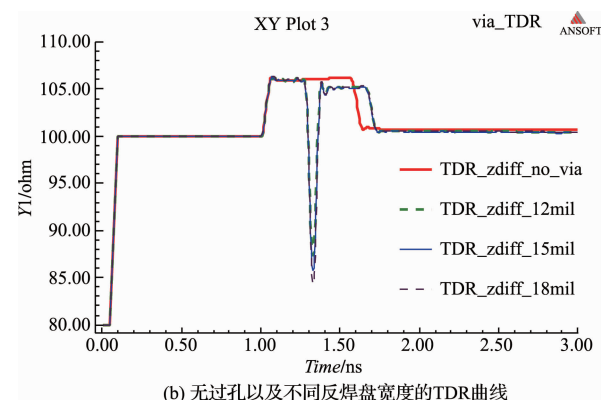
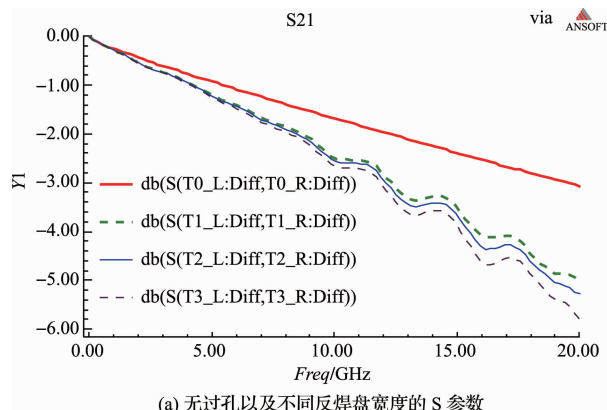


图 5 无过孔及不同反焊盘宽度的 S 参数和 TDR 曲线

#### 4.4 过孔残桩的影响

过孔残桩为过孔中不用于连接信号线的部分。图 6 所示为 S1 到 S2 层走线过孔无残桩及有残桩的情况。

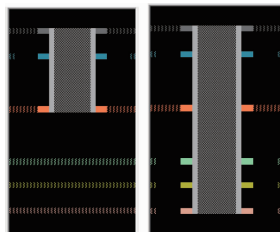


图 6 S1 到 S2 层走线过孔无残桩及有残桩的对比图

过孔残桩的存在,会严重影响信号的传输质量。图 7 所示的曲线中,分别是无过孔、S1 到 S2 层走线无残桩及有残桩的 S 参数和 TDR 曲线情况。

由 S 参数曲线对比可知,过孔残桩的存在,使得信号的衰减增大。此外,在 29.5 GHz 附近,还发生了残桩谐振,并使得谐振频率附近的插入损耗明显增大。由 TDR 曲线可知,残桩增加了过孔的寄生效应,使得阻抗的突变更为明显。

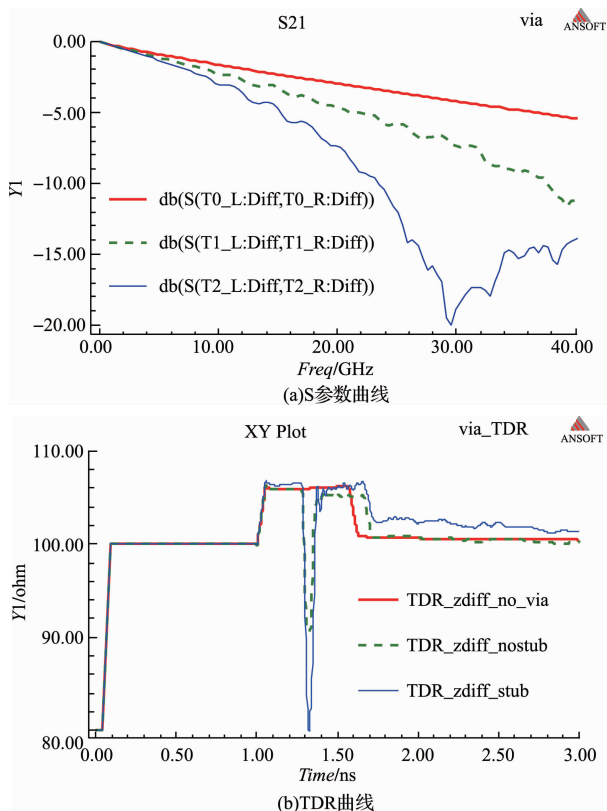


图7 无过孔及有无残桩的S参数和TDR曲线

#### 4.5 过孔长度的影响

PCB层数的不断增加,使得其厚度也随之增长,过孔长度是影响过孔电感的主要因素。图8所示分别为信号层S1到S2的过孔和S1到S3的过孔。其中前一个过孔的参考平面是GND1,后一个过孔的参考平面是GND2。

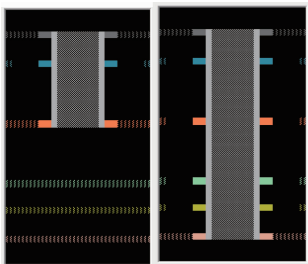


图8 信号层S1到S2的过孔和S1到S3的过孔

通过仿真,得到过孔的S参数和TDR曲线分别如图9(a)、(b)所示。

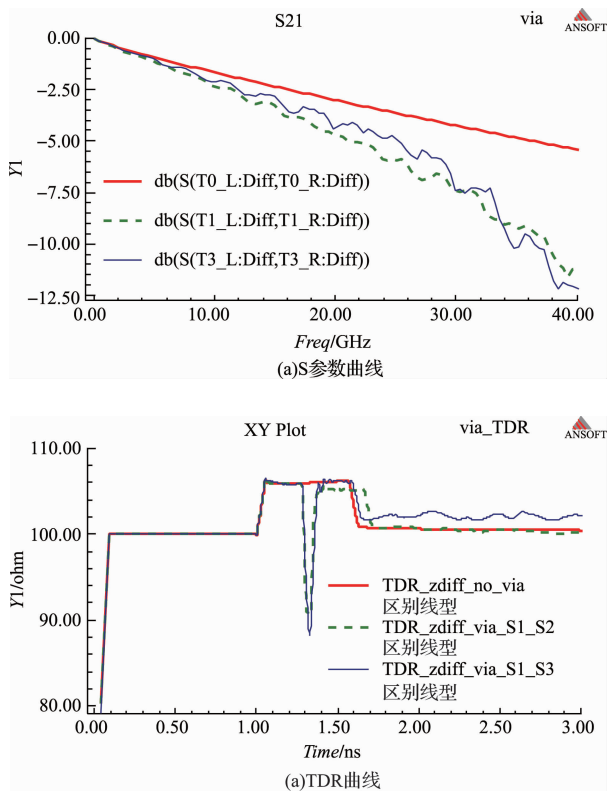


图9 无过孔及过孔长度不同的S参数和TDR曲线

过孔长度的增加,使得高频时的衰减明显增大,并且增加了过孔的寄生电容和电感,导致了阻抗不连续性的恶化。

#### 4.6 非功能焊盘的影响

非功能焊盘不用于连接任何的信号线。通常情况下,内层的非功能焊盘可以去掉,以减小焊盘与周围平面导体之间的寄生电容,减小容性负载,从而提高差分传输线的阻抗。图10所示分别为S1到S3层过孔有无非功能焊盘的情况。

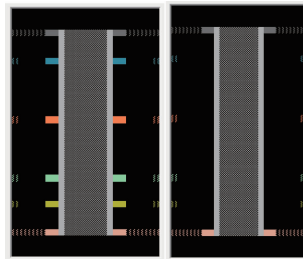


图10 S1到S3的过孔有无非功能焊盘的对比

通过仿真,得到过孔的S参数和TDR曲线分别如图11(a)、(b)所示。



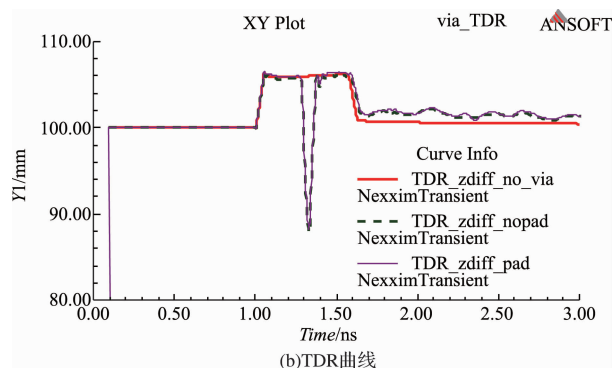
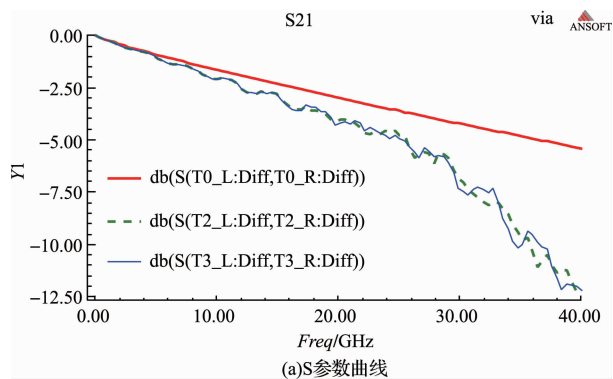


图 11 无过孔及有无非功能焊盘的 S 参数和 TDR 曲线

由 TDR 曲线观察易知,去掉非功能焊盘后,明显地提高了过孔的阻抗。

通过上述的仿真分析可知,在高速 PCB 设计时,为保证信号的传输,应根据实际需要,尽量减少使用不必要的过孔。对于过孔的选择,尽量使孔径较小、焊盘尺寸较小,并使反焊盘尺寸较大。尽量去掉非功能焊盘,选择不带过孔残桩或使过孔残桩尽可能短。

## 5 PCB 过孔设计对信号完整性的影响

用来分析的实际 PCB 板是一个简单的六层板,第二层为地层,第五层为电源层。图 12 为 PCB 板的一部分,主要是顶层和底层的部分走线,黄色的部分为一对连接顶层和底层的差分线 P0,通过三对差分过孔进行三次换层。利用 SIwave 和 Designer 进行仿真,考察该差分线上信号的传输情况,并分析过孔对信号完整性的影响。



图 12 带有差分过孔的 PCB 布线图

差分线 P0 上的三对过孔,首先选择的过孔尺寸结构为:孔径 6 mil、焊盘 11 mil、反焊盘 12 mil,通过仿真得到 S 参数曲线和时域 TDR,再换用孔径为 4 mil、焊盘 8 mil、反

焊盘 15 mil 的较小过孔进行仿真,所得结果对比如图 13 所示。

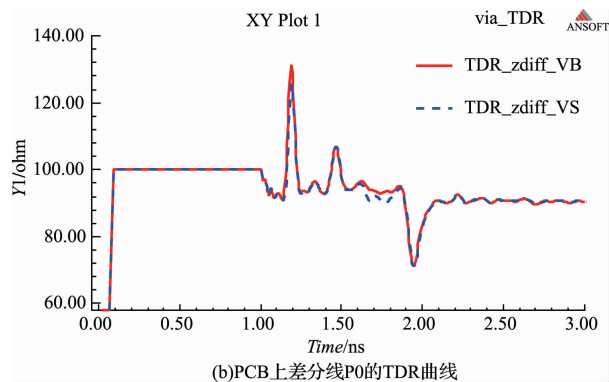
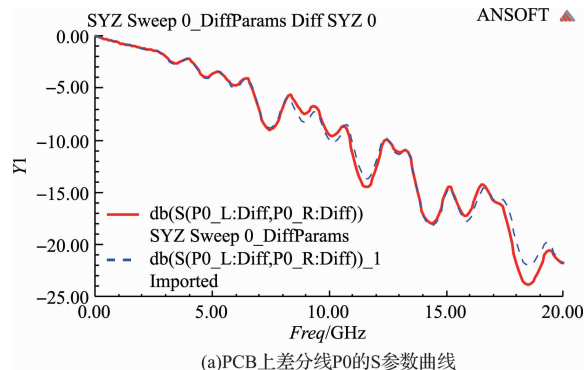


图 13 PCB 上差分线 P0 的 S 参数和 TDR 曲线

上图曲线中,红色的部分是过孔尺寸结构较大时差分线上信号的传输情况,蓝色部分是换成孔径和焊盘较小,而反焊盘较大过孔时的情况。

由 S 参数曲线可知,差分线经过三次换层,引起了较大的插入损耗,尤其频率越高,损耗越大。由 TDR 曲线知,信号在差分线 P0 上进行传输,经过过孔时,引入了较大的过孔寄生效应,使得阻抗突变异常明显。使用孔径和焊盘较小,而反焊盘较大的过孔时,差分线的插入损耗和阻抗不连续性得到了改善。

此处仅以 PCB 上一对差分线以及过孔尺寸的微小改变为例,来说明过孔对传输信号的影响。对于整个 PCB 而言,合适的过孔设计,会较大影响 PCB 的信号传输质量。

## 6 结 论

PCB 中过孔设计的好坏,关系到整个 PCB 的性能。合理地设计过孔的结构,对提高 PCB 的信号完整性有重要的意义。本文利用 SIwave 和 Designer 协同仿真,分别讨论了不同结构参数下的过孔寄生效应,并在实际 PCB 板中进行仿真,进一步分析了过孔的结构特性对信号传输质量的影响,对实际的高速 PCB 设计具有一定的指导意义。

(下转第 53 页)