

# 微波多层电路过孔特性测量方法研究与实现

田雨, 童玲

(电子科技大学自动化工程学院 成都 611731)

**【摘要】**使用矢量网络分析仪测量过孔结构存在测量仪器和被测件连接不匹配、测量结果需要嵌入等困难, 通过对过孔结构特性进行研究, 提出了实现过孔特性测量相关的被测件、测试夹具、连接结构、边界条件实现、校准件的设计和去嵌入方法, 并对完全电边界条件下的过孔结构进行了加工测量, 测量频段从10 MHz~20 GHz, 从测量结果的对比可以看出测量连接和夹具的影响已被去除, 获得了更准确地反映过孔特性的测量结果。

**关键词** 去嵌入; 夹具; 微波多层电路; 散射参数; 过孔

中图分类号 TP206

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.01.012

## Research and Implementation of Characteristic Measurement for Via Holes in Microwave Multilayer Circuits

TIAN Yu and TONG Ling

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** Considering the difficulty inherent in the measurement of via holes with vector network analyzer the measurement of via hole structures. The design of device under test, test fixture, test connection, boundary conditions, calibrations, and the de-embedding method are presented and experimented actually, the operating frequency covers from 10 MHz to 20 GHz. Comparison with former result, the advert side-effects caused by test connection and fixture has been removed, and furthermore, the more accurate characteristic of via holes can be acquired.

**Key words** de-embedding; fixture; microwave multilayer circuit; scattering parameter; via hole

随着微波平面电路朝着集成化、小型化的趋势发展, 以及工作频率的不断提升, 用于多层电路层间互连的过孔结构所引入的不连续性已成为制约微波电路乃至整个系统性能的瓶颈。因此, 针对过孔特性的理论分析和实际测量一直是该领域的研究热点。过孔通常分为通孔、盲孔和埋孔3种形式, 由于通孔使用范围更广和分析更为复杂, 因此通常分析都以通孔为研究对象。

在高速数字电路中, 针对过孔的研究主要集中在过孔对信号完整性的影响; 而在微波多层电路中, 则主要研究过孔所引起的传输线不连续性及其对传输线散射参数的影响。尽管微波多层电路和高速数字电路是两个不同的应用领域, 但是由于时、频域之间的相互转化关系, 研究过孔特性测量不但对微波多层电路具有重要意义, 而且对高速数字电路中信号完整性的分析也有借鉴意义。过孔在微波电路

中的理论研究已有20多年历史, 其思路可归结为通过研究过孔的结构特点, 对其进行物理建模, 进而引入不同的电磁场数值计算方法提取物理模型的微波网络参数, 最后获得其传输、反射以及辐射特性, 典型的研究方法有准静态法<sup>[1]</sup>、时域有限差分法<sup>[2]</sup>、矩阵束矩量法<sup>[3-4]</sup>、Flody-lax多径散射方程法<sup>[5]</sup>、含平行板效应的等效电路法<sup>[6-8]</sup>、频变圆柱层法<sup>[9]</sup>等。但是现有研究对于过孔特性的测量问题讨论较少, 并且由于测量仪器、测量夹具、测量连接的实现等限制因素较多, 因此过孔测量问题亦是研究中的难点。

### 1 过孔测量问题综述

使用矢量网络分析仪测量微波器件和电路的难点在于如何从原始测量结果中去除夹具、连接电缆、适配器的影响。如果被测件是标准同轴接头, 则矢

收稿日期: 2010-06-09; 修回日期: 2011-10-11

基金项目: 电子测试技术国家重点实验室基础研究基金(6143902)

作者简介: 田雨(1980-), 男, 博士生, 主要从事微波测量、无线传感器网络方面的研究。

量网络分析仪校准过程可达此目的; 如果测量是平面传输线则需使用“同轴-平面传输线”适配器进行转换, 并使用特定的平面传输线校准件进行校准。但是, 由于过孔是典型的三维结构, 使用常规的适配器难以实现测量连接, 因此需要对被测件和夹具进行特定设计以完成测量。

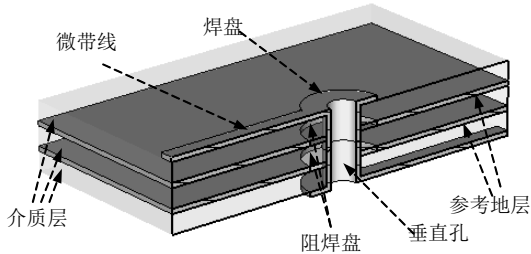


图1 四层板过孔结构示意图

图1所示是一个四层电路板上的完整过孔(通孔)结构, 从图中可知影响过孔特性的成因主要有4部分, 分别为微带线部分、微带线-焊盘-垂直孔的过渡部分、垂直孔穿越介质层和参考地层部分、以及参考地层上的阻焊盘部分。在理论分析中可进一步根据各部分特点将它们整合为外部结构和内部结构, 并运用不同的研究方法进行分析<sup>[5]</sup>。外部结构主要指微带线和微带线-焊盘-垂直孔的过渡部分, 内部结构主要指垂直孔穿越介质层和参考地层部分, 阻焊盘同时存在于内部结构和外部结构之内。但是在测量问题中, 单纯的内部结构直接测量难以实现, 因此主要研究整体结构和外部结构的测量问题。在理论分析中, 水平微带线的长度与频率相关, 通常选择1.5倍波长<sup>[3]</sup>, 但是实际加工测量的过孔结构微带线长度为单一固定值, 可通过单独测量对应微带线的散射参数, 并运用微波网络的相关理论, 通过移动测量校准的参考面, 以对比理论分析和测量结果。

## 2 被测件设计

### 2.1 被测件整体结构

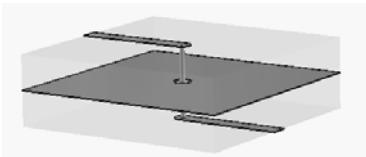


图2 过孔外部结构被测件示意图

图2所示是研究过孔外部结构特性的被测件模型。该模型为三层板结构, 且上、下两部分对称, 可视为由过孔外部结构及其对称结构共同组成, 如果可通过测量获得该被测件的S参数, 由微波网络理论可进而推知模型半结构(即过孔外部结构)的特性。

### 2.2 被测件接地问题

测量过程中需确保仪器的测量信号参考地与被测电路的“参考地层”相互连接, 对于双面板电路“接地连接”容易实现, 但是对于多层电路而言, 由于参考地层往往位于电路板的内层, 因此如何实现优良的接地连接是测量设计中需要解决的首要问题。下面以三层电路板为例介绍两种不同的接地实现方法。

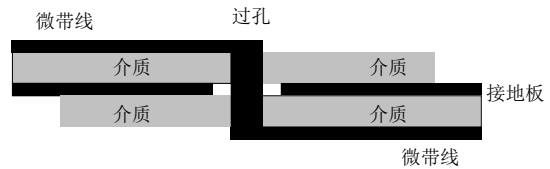


图3 暴露中间参考地层示意图

对于由三层电路板构成的被测件, 由于参考地层是中间层, 因此可采用如图3所示的方法对被测件进一步加工, 即人工打磨被测件两端的介质层, 使中间参考地层的金属暴露。该方法接地效果最好, 但是仅适用于三层被测件电路, 并且在实际加工打磨过程中容易造成被测件损坏。

也可在被测件上、下表面边缘处增加金属导带, 并使用接地孔将表面的金属涂层与中间参考地层进行电气连接, 之后通过夹具将表面边缘处的金属导带与仪器同轴接口的外导体进行连接实现接地的目的。该做法的优点是容易实现多层电路板中间参考地层与测量仪器之间的接地连接, 缺点在于四周接地孔对于过孔而言等效为完全电边界条件, 因此适用于被测电路边界条件为完全电边界的情况。

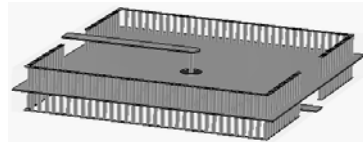


图4 接地孔连接示意图

### 2.3 边界条件实现及介质材料选择

假设被测电路板的物理尺寸为无穷大, 则由于电路板四周信号无反射, 可认为边界条件为完全匹配层。但是实际被测电路板的物理尺寸均为有限值, 因此通过计算分析确定实际加工的被测件电路板的物理尺寸大于10倍以上的微带线宽度时, 可近似认为边界条件为完全匹配层。如果被测件的尺寸不满足前述完全匹配层条件且电路板四周无接地孔, 则边界条件为开路边界条件。实际微波多层电路中的过孔多以该形式出现, 但是该边界条件下的过孔特性测量极易受到外界条件的干扰。如果被测件四周均有接地孔存在, 则边界条件为完全电边界条件,

实际加工中在电路板四周各打至少一排接地孔，接地孔的两端均延伸到电路板的顶、底层，并分别用走线相连即可实现完全电边界条件。

电路板介质材料本身的特性对于研究过孔特性的测量也有较大影响，常规的介质材料FR4在工作频率高于1 GHz时会因介质损耗过大而影响电路性能，所以微波平面电路通常选择RO4350B材料。RO4350B损耗较低，频率稳定性极佳，但是该材料的缺点是基本厚度为10 mil，其他尺寸需要在基本厚度的基础上通过半固化片进行加热粘接，并且由于材料过于坚硬，当介质厚度与基本厚度不成整数倍关系时，打磨加工精度远低于FR4。由于本文测量频率范围为10 MHz~20 GHz，因此综合各种因素，选择使用RO4350B作为被测件的介质材料。

### 3 夹具设计

由于矢量网络分析仪通用接口形式是同轴接头，因此需要单独设计、加工夹具，将同轴连接形式转换为微带形式以完成测量连接。通过参考国外已有的夹具设计，结合过孔特性被测件电路的特点，本文设计了如图5所示的夹具连接器。图中，夹具由两个固定螺钉、同轴-微带转化底座、挡片、卡板组成。被测电路板安放在底座与挡片之间，被测电路板上的微带线与同轴接头内导体相连。该夹具的优点是电路板总厚度不受限制，仅取决于固定螺钉的长度。

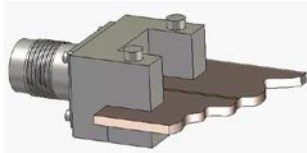


图5 夹具示意图

由于夹具是自行设计和加工的，因此必须对夹具的性能进行实际测量，以确保其加工和安装的一致性。通过任意选择若干数量的夹具，使用安捷伦E8363B矢量网络分析仪对同一段微带线进行测量，分别对比其传输系数和反射系数的测量结果，发现其相互之间差异小于0.1 dB，验证了该夹具的设计和使用性能。

### 4 去嵌入方法及测量实验

#### 4.1 去嵌入方法

去嵌入<sup>[11]</sup>的目的是从原始测量数据中去除夹具、连接电缆等的影响，以获得反映被测件真实特性的测量数据。矢量网络分析测量过孔特性的连接

示意如图6所示，矢量网络分析仪的同轴接口校准件只能校准至端口1和端口2的同轴校准面处，此时由矢量网络分析仪获得的原始测量数据涵盖了测量夹具和被测件的整体特性。为了从原始测量数据中获得反映过孔特性的真实测量值需要去除夹具等的影响，即需要额外进行“去嵌入”处理。由于过孔结构是以微带线形式与夹具相连，因此选择使用TRL去嵌入方法，即分别使用直通、大反射负载和传输线3种连接形式作为去嵌入的校准件，并且引入“测量参考面”的概念，即等效地将校准件的部分微带线作为夹具组成部分，以获得更准确地反映过孔特性的测量结果。

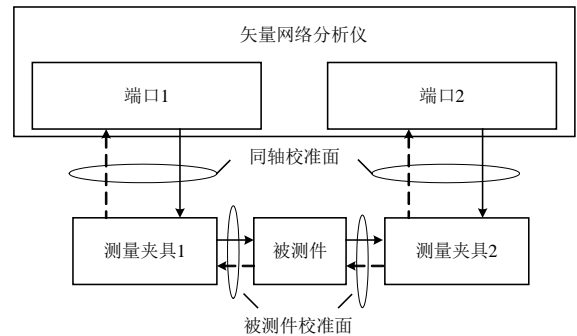


图6 矢量网络分析仪测量示意图

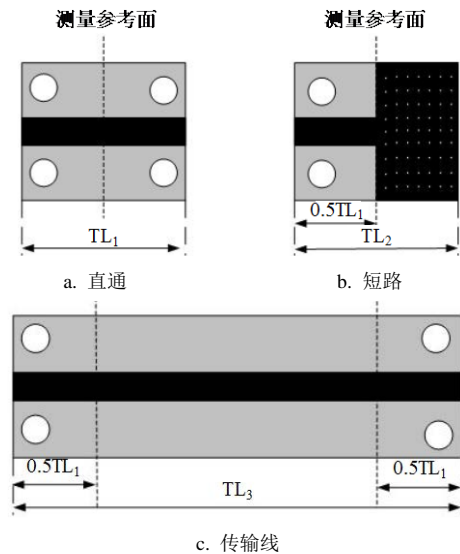


图7 TRL校准件示意图

图7所示为TRL校准件的示意图，校准件中微带线与过孔结构微带线的结构参数一致。其中，图7a、图7c是长度分别为“ $TL_1$ ”和“ $TL_3$ ”的两段微带线，图7b是微带线短路结构，通过末端金属接地孔实现短路，将其作为大反射负载。大反射负载从理论上讲可选择终端开路或者终端短路两种形式，但是由于终端开路微带线在开路端的辐射效应会导致仅有部分能量被反射，所以终端开路的微带线更像性能

较差的匹配器而非开路器, 因此选择使用终端接地的短路器作为校准件中的大反射负载。如果将测量参考面等效地放置在图7a微带线的中间位置即“ $0.5TL_1$ ”处, 并将分成为左、右两部分的微带线等效认为是测量夹具的一部分, 那么图7a中的微带线就可以被认为是TRL去嵌入过程中的直通连接。同理, 图7c中微带线作为TRL传输线校准的长度为“ $TL_3-TL_1$ ”。之后的数据处理过程同常规TRL去嵌入方法<sup>[12]</sup>。

### 4.2 实验样品参数

为了验证测量方法的正确性, 分别加工了PML边界的三层电路板和PEC边界的四层电路板实验样品。设计参数如下: 采用RO4350材料作为介质基板, 相对介电常数为 $\epsilon_r = 3.48$ , 过孔其他物理尺寸如图8所示, 介质厚度 $h = 0.762 \text{ mm}$ , 过孔半径取 $r = 0.25 \text{ mm}$ , 微带线宽 $w = 1.7 \text{ mm}$ , 微带线长度 $L = 50 \text{ mm}$ , 三层板阻焊盘半径 $r_g = 0.95 \text{ mm}$ , 四层板阻焊盘半径为 $r_g = 0.635 \text{ mm}$ , 三层板焊盘半径为 $0.85 \text{ mm}$ , 四层板焊盘半径为 $33.5 \text{ mm}$ 。校准件及被测件加工实物图分别如图9a和图9b所示。关于PML边界三层电路板的测量及方法正确性的讨论可参见参考文献[14]。

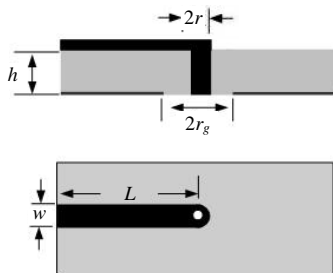
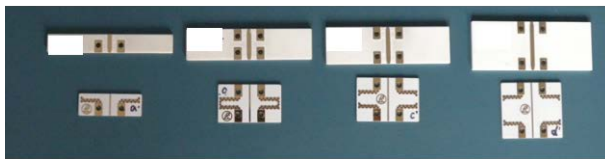
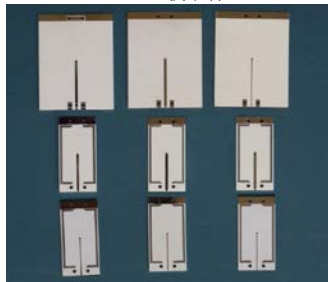


图8 测量件加工示意图



a. TRL校准件



b. 过孔被测件

图9 TRL校准件及过孔被测件

### 4.3 测量结果

图10和图11为PEC边界下四层电路板去嵌入之后的 $S_{11}$ 测量数据和理论计算数据之间的对比, 图12和图13为PEC边界下四层电路板去嵌之后的 $S_{21}$ 测量数据和理论计算数据之间的对比。其中,  $S_{11}$ 的幅值和相对比尽管存在差异, 但是谐振点的个数和谐振点的频率基本相符。 $S_{21}$ 参数的对比, 相符程度要优于 $S_{11}$ 参数, 但是在个别谐振点上理论计算数据要远小于实验数据。这是由于在微波平面电路测量中传输特性的测量要优于对反射特性的测量。需要特别指出的是, 由于PEC边界下过孔结构是强谐振结构, 因此计算和测试之间对比的主要是宽频段范围内谐振点的个数和谐振点的频率是否有对应关系。

与PML边界下三层板的测量结果类似, PEC四层板的测量在个别频点出现奇点, 这是由于测量实验在10 MHz~20 GHz的测量范围内使用了同样一组校准件, 在个别频点不满足直通与传输线之间的相位差必须远离 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 的条件<sup>[13]</sup>。

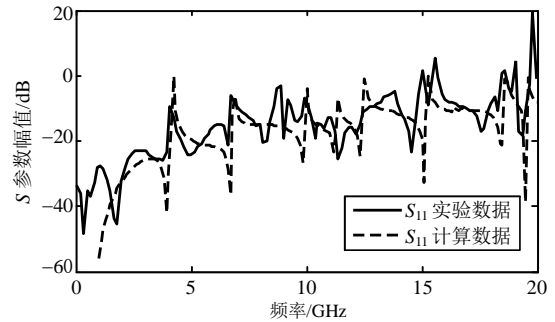


图10 PEC四层电路板 $S_{11}$ 幅值测量与计算数据对比

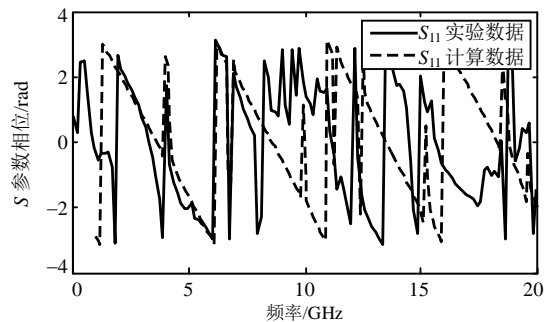


图11 PEC四层电路板 $S_{11}$ 相位测量与计算数据对比

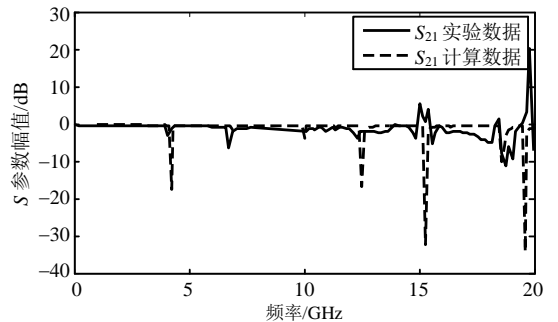


图12 PEC四层电路板 $S_{21}$ 幅值测量与计算数据对比

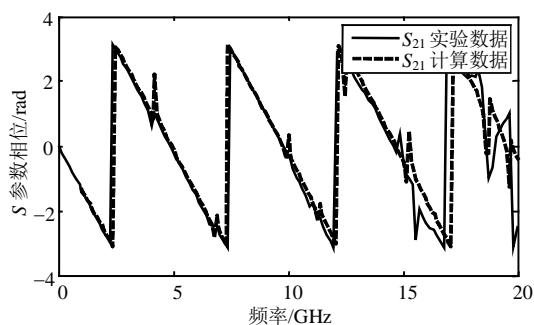


图13 PEC四层电路板 $S_{21}$ 相位测量与计算数据对比  
测量的误差来源主要有：1) 材料特性。

RO4350B的介电常数3.48是在1 GHz工作频率下的值，而测试是在10 MHz~20 GHz的范围内，实际上一般材料的介电常数都是随频率变化的，因此材料特性本身是测试误差的来源之一。2) 加工特性。RO4350B基材的基本厚度是10 mil，当加工多层电路板时必须使用半固化片RO4450B进行粘结，因此，实际加工出的多层电路板基材厚度是近似值。3) PEC条件的等效实现方式。PEC为理想电边界条件，实际测试的电路板是通过四周打接地孔的方式进行等效，该等效虽然在一定程度上模拟了PEC条件，但是与理想的PEC条件仍有差距。4) 夹具的误差。使用矢量网络分析仪进行平面电路的测量，必须使用同轴到微带过渡结构进行夹具设计，即使用同轴内导体搭接平面传输线，该结构将引入测量误差。

## 5 结论

本文对微波多层电路过孔特性的测量方法进行研究并加以实现，给出了被测件、夹具以及校准件的设计方法，并进行了实际加工、测量和去嵌入处理，尤其对过孔被测结构的PEC边界实现和实际测量中的相关问题进行了详细讨论。由于PEC边界下的过孔结构是谐振结构，相关文献较少涉及，采用本文提出的设计和测量方法，可以获得更为准确的不同边界条件下反映过孔特性的测量结果。

### 参考文献

- [1] WANG T Y, HARRINGTON R F, MAUTZ J R. Quasi-static analysis of a microstrip via through a hole in a ground plane[J]. IEEE Trans MTT, 1988, 36(6): 1008-1013.
- [2] MAEDA S, KASHIWA T, FUKAI I. Full wave analysis of propagation characteristics of a through hole using the finite-difference time-domain method[J]. IEEE Trans MTT, 1991, 39(12): 2154-2159.

- [3] HSU S G, WU R B. Full wave characterization of a through hole via using the matrix-penciled moment method[J]. IEEE Trans MTT, 1994, 42(8): 1540-1547.
- [4] 姬五胜. 微波多芯片组件中互连的仿真研究[D]. 上海: 上海大学, 2004.  
JI Wu-sheng. Study on the simulation of interconnects in microwave multi-chip module[D]. Shanghai: Shanghai University, 2004.
- [5] ONG C J, MILLER D, TSANG L, et al. Application of the foldy-lax multiple scattering method to the analysis of vias in ball grid arrays and interior layers of printed circuit boards[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(1): 225-231.
- [6] SCHUSTER C, KWARK Y H, SELLI G, et al. Developing a 'physical' model for vias[C]//IEC 2006 Design Con. Santa Clara, Ca, USA: [s.n.], 2006: 1-24.
- [7] SELLI G, SCHUSTER C, KWARK Y H, et al. Developing a physical via model for vias—Part II: Coupled and ground return vias[C]//IEC 2007 Design Con. [S.l.]: [s.n.], 2007: 1-22.
- [8] DUAN Xia0-min, RIMOLO-DONADIO R, BRÜNS H D, et al. A combined method for fast analysis of signal propagation, ground noise, and radiated emission of multilayer printed circuit boards[J]. IEEE Trans MTT, 2010, 52(2): 487-495.
- [9] LIU E X, LI E P, OO Z Z, et al. Novel methods for modeling of multiple vias in multilayered parallel-plate structures[J]. IEEE Trans MTT, 2009, 57(7): 1724-1733.
- [10] MARC C, KONDAGUNTA U S. A measurement based comparison of full-wave and quasi-static methods for baseband modeling of plated through hole structures to 20GHz[C]//2007 Electronic Components and Technology Conference. Nevada: IEEE, 2007: 810-814.
- [11] Agilent. De-embedding and embedding s-parameter networks using a vector network analyzer[EB/OL]. [2010-02-10]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5980-2784EN.pdf>.
- [12] 李秀萍, 高建军. 微波射频测量技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
LI Xiu-ping, GAO Jian-jun. Microwave and RF measurement fundamental techniques[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [13] MICHAEL H. Fundamentals of vector network analysis [M]. Munich: Rohde & Schwarz, 2005.
- [14] 田雨, 童玲. 微波多层电路过孔散射参数测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(6): 555-560.  
TIAN YU, TONG LING. Measurement method of scattering parameters for via holes in microwave multilayer circuits[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(6): 555-560.

编辑 漆蓉