

印制线拐角的频域分析

路宏敏, 安晋元, 赵益民, 朱满座
(西安电子科技大学电子工程学院, 710071, 西安)

摘要: 分析了印制线直角拐角特性阻抗的不连续性及其对传输特性的影响, 提出一种设计印制线拐角的新方法. 基于时域有限差分法, 研究了4种常见印刷电路板(PCB)印制线直角拐角的传输特性和反射特性. 结果表明: 印制线直角拐角传输特性改善的次序依次为直角拐角、圆拐角、内外斜切45°拐角和外斜切45°拐角, 最佳拐角为45°外斜切直角弯曲; 印制线拐角特性阻抗与其外斜切45°直角拐角最佳斜切率有依赖关系; 对于标称特性阻抗50 Ω 的微带线, 在小于8 GHz的频率范围内, 其外斜切45°直角拐角的最佳斜切率约为0.535.

关键词: 印刷电路板; 时域有限差分法; 印制线拐角

中图分类号: TN81; TN41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)12-1451-04

Frequency Domain Analysis for Right Angle Corners

Lu Hongmin, An Jinyuan, Zhao Yimin, Zhu Manzuo
(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The characteristic impedance discontinuities of the right angle corners on printed circuit board traces were analyzed, along with their effect on transmission characteristics, and a novel method for designing the trace corner is given. Based on the finite difference time domain method, the reflection and transmission characteristics of the four common types of right angle corner were investigated numerically. The simulated results confirm that the degree of improvement on transmission characteristics is right angle corner, round corner, 45° inner and out miter, and 45° out miter in-order, the optimal corner shape is a 45° out miter. Further, there is a relation between the characteristic impedance and the optimal miter ratio for a 45° out miter corner and for lines of nominally 50 Ω characteristic impedance, this miter ratio is about 0.535 over a broad frequency range lower than 8 GHz.

Keywords: printed circuit board; finite-difference time-domain method; trace corner

近年来, 电子设备的小型化、集成化和高速化, 使得信号完整性成为高速数字设计领域十分关键的理论 and 工程问题. 信号完整性是信号在电路中能以正确的时序和电压做出响应的能力, 描述信号传输质量^[1]. 从广义上讲, 信号完整性指高速产品中由互连线引起的所有问题, 主要研究互连线的电气特性对数字信号波形所造成的不同影响. 信号波形的失真可能由多种不同的原因引起, 但是反射、串扰和地弹这3种干扰问题最受关注^[2-3]. 源端阻抗、负载端阻抗与传输线阻抗不匹配, 以及传输线阻抗自身的

不连续性导致了传输线上的反射. 印刷电路板(PCB)的走线与其毗邻的参考接地面形成了简单的微带传输线, 这种传输线是连接PCB上各种元件和器件的互连线. 具有不同几何结构和介质材料的印制线, 其特性阻抗不同. PCB印制线拐角是一种重要的传输线特性阻抗不连续性结构, 制约数字电路正常工作, 影响信号完整性^[2-10].

本文分析了印制线拐角特性阻抗的突变及其对信号完整性的影响, 采用时域有限差分法, 研究直角拐角、圆拐角、45°内外斜切拐角和45°外斜切拐角的

传输特性和反射特性,提出了设计具有最佳传输特性的印制线拐角的新方法.

1 印制线拐角特性阻抗突变分析

传输线上传输高速电信号时,就会有电磁波沿传输线进行传播,因此 PCB 印制线传输高频信号与传送直流或低频信号有很大的不同,PCB 印制线工作于高频也就是微带线或带状线.我们以微带线作为印刷电路板上的传输线,进行理论和仿真分析. PCB 印制线 90° 拐角的几何结构如图 1 所示.沿传输线纵向横截面几何结构和表征参数恒定不变的传输线称为均匀传输线,当信号在均匀传输线上传播时,传输线上任何一处的特性阻抗都是相同的.特性阻抗是描述传输线的电气特性和信号与传输线相互作用关系的一个重要参数,是传输线的固有属性,与传输线的材料特性、介电常数和单位长度电容量有关,与传输线的长度无关.特性阻抗也是影响传输线电路中信号完整性的一个主要因素.一般地,均匀微带传输线的特性阻抗为

$$Z_0 = (v_p C_0)^{-1}; v_p = c \cdot (\epsilon_e)^{-1/2} \quad (1)$$

式中: C_0 表示微带传输线单位长度的电容; v_p 表示微带传输线中的相速度; c 表示光速; ϵ_e 表示微带传输线的等效介电常数,它与微带传输线的几何结构参数及印制线与参考平面间介质的相对介电常数 ϵ_r 有关.式(1)表明,均匀微带传输线的特性阻抗 Z_0 由其几何结构参数和介质的材料特性、介电常数决定,因此均匀微带传输线的特性阻抗 Z_0 沿传输线纵向的任何一处为恒定的常数,即特性阻抗连续.因而,信号沿均匀微带传输线传输时,印制线自身不会引起信号的反射,对信号完整性不会产生影响.

当 PCB 印制线经过拐角时,印制线宽度的变化是最大的,印制线的特性阻抗变化也最大.由于印制线在经过拐角时宽度变宽,所以走线与参考层之间的电容增大,走线的特性阻抗减小^[9].因此,印制线拐角处存在特性阻抗不连续性,从而导致印制线上信号反射,影响信号完整性.印制电路板工业协会(IPC)推荐的微带线特性阻抗通用近似式为^[3]

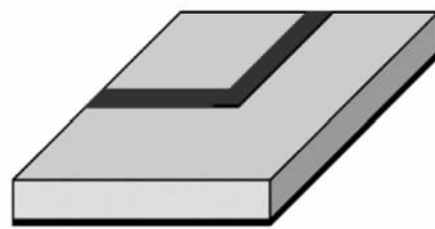
$$Z_0 = 87(1.41 + \epsilon_r)^{-1/2} \ln\left(\frac{5.98h}{0.8w+t}\right) \quad (2)$$

$$0.381 < w < 0.635$$

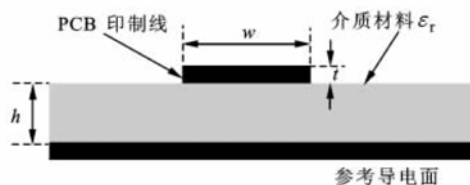
$$Z_0 = 79(1.41 + \epsilon_r)^{-1/2} \ln\left(\frac{5.98h}{0.8w+t}\right) \quad (3)$$

$$0.127 < w < 0.381$$

式(2)和式(3)表明,其他参数保持不变,印制线宽度



(a)几何结构



(b)参数表征

h :印制线与参考平面间的介质厚度; w :印制线宽度; t :印制线厚度; ϵ_r :印制线与参考平面间介质的相对介电常数

图1 PCB印制线

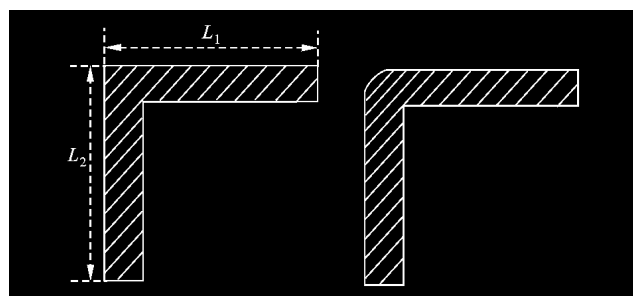
w 变化时,传输线特性阻抗改变.从而,证明印制线拐角处存在特性阻抗不连续性.

因此控制印制线阻抗,必然要求对印制线的几何形状和介电常数进行控制.

2 数值模拟结果与讨论

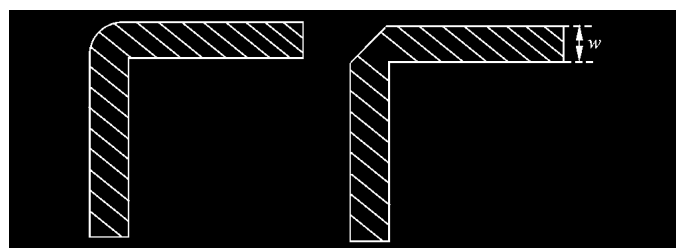
为了分析印制线拐角几何形状对信号传输质量的影响程度,将印制线看成两端口网络,每一端口均与 PCB 印制线的特性阻抗匹配,仅考虑拐角几何形状变化对信号传输质量的影响.这样,可以采用两端口网络的散射参数 S_{11} 和 S_{21} 评价不同拐角几何形状的反射和传输特性^[6-8],从而反映信号传输质量的差异.散射参数 S_{11} 表示端口 2 接匹配负载时,端口 1 的反射系数;散射参数 S_{21} 表示端口 2 接匹配负载时,信号从端口 1 向端口 2 传输的传输系数.本文考虑的印制线拐角几何形状如图 2 所示,微带线几何结构参数为 $w=3 \text{ mm}$, $h=1.6 \text{ mm}$, $t=0.02 \text{ mm}$, $L_1=L_2=L=30 \text{ mm}$, $\epsilon_r=4.5$, 这样的微带线其特性阻抗约 50Ω . 端口 1 施加如图 3 所示的高斯脉冲源,端口 2 匹配.

制造 PCB 最常用的材料是 FR-4,此材料的相对介电常数 ϵ_r 随信号频率的变化而变化,频率范围为 $100 \text{ kHz} \sim 10 \text{ GHz}$ 时, ϵ_r 在 $4.5 \sim 4.7$ 之间^[3].因此,严格地说微带线的特性阻抗是频率的函数.分析中我们选择介质的相对介电常数 $\epsilon_r=4.5$,假设端口激励源为如图 3 所示的高斯脉冲(电压激励,单位为伏特),其频谱覆盖 $0 \sim 14 \text{ GHz}$ 的范围,且采用时



(a)直角拐角

(b)圆拐角



(c)45°内外斜切

(d)45°外斜切

图2 印制线拐角几何形状

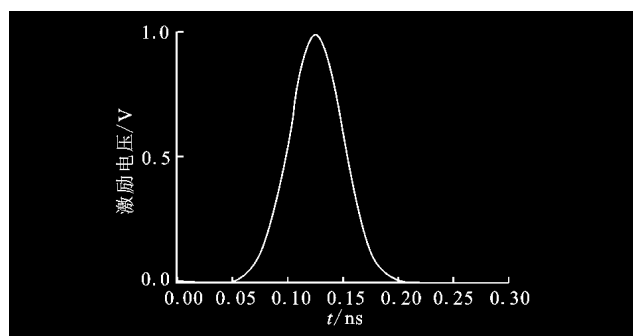


图3 高斯脉冲激励源

域有限差分法(FDTD法)进行数值计算。

2.1 直角拐角的反射和传输特性

印制线直角拐角的几何结构如图2a所示,为了与文献[4]的结果比较,验证所用数值方法的有效性,特别选取印制线直角拐角的几何参数 $w=3$ mm, $h=1.6$ mm, $t=0.002$ mm, $L_1=19.8$ mm, $L_2=9$ mm, $\epsilon_r=4.5$, 均匀印制线的特性阻抗 $Z_0=50$ Ω , 激励源为图3所示的高斯脉冲, 仿真结果如图4所示。由图4可以看出, 本文数值计算结果与文献[4]的结果基本吻合, 高频时存在微小差异。此外, 印制线直角拐角如同一个低通滤波器, 其截止频率约为10 GHz, 高频信号反射比低频信号反射大。

2.2 不同几何形状拐角的反射和传输特性比较

选用常见PCB印制线拐角的几何形状(如图2所示), 不同几何形状拐角的反射和传输特性如图5所示。

图5表明, 在相同频率范围, 不同几何形状印制线拐角的反射和传输特性各异。传输特性呈现优良

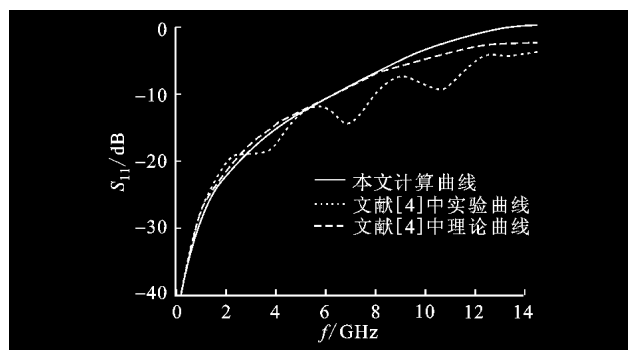
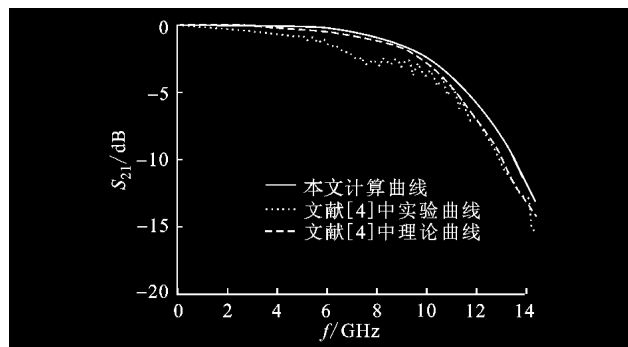
(a)反射系数 S_{11} 幅度(b)传输系数 S_{21} 幅度

图4 直角拐角的反射和传输特性

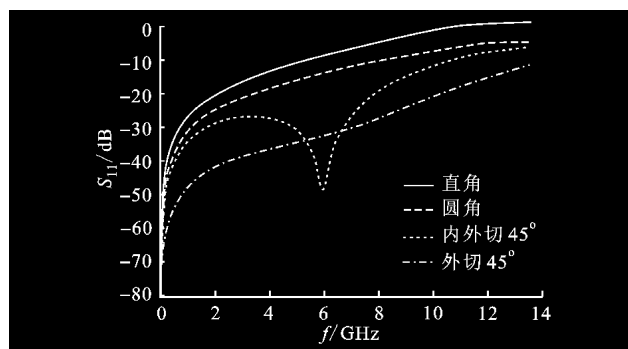
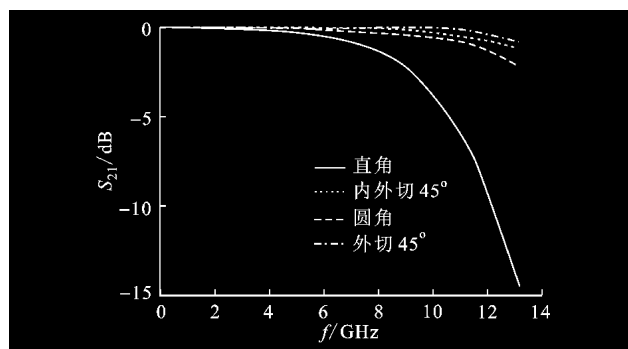
(a)反射系数 S_{11} 幅度(b)传输系数 S_{21} 幅度

图5 不同几何形状印制线拐角的反射和传输特性

的次序为:45°外斜切、内外45°斜切、圆角、直角,印制线拐角最佳几何结构为直角弯曲45°外斜切。小于2 GHz的频率范围,印制线拐角几何结构对信号传输特性几乎没有影响,但随着频率的提高,其影响

显著增强,特别是直角拐角.建议印制线拐角采用直角弯曲 45°外斜切的几何结构,其自身对信号完整性的影响相对较小.

2.3 45°外斜切拐角的反射和传输特性

直角弯曲 45°外斜切拐角的斜切率对信号反射和传输特性有显著影响^[5],但影响程度如何,是否存在最佳斜切率,是本文研究的问题.直角弯曲 45°外斜切拐角的几何结构如图 6 所示,其斜切率定义为 $m=x/d$,当 $x=0$ 时, $m=0$,没有斜切,即直角拐角.

45°外斜切拐角的反射和传输特性的仿真结果如图 7 所示.图 7 表明直角弯曲 45°外斜切拐角的斜切率不同,对应 45°外斜切拐角的信号反射和传输特性不同.小于 8 GHz 的频率范围内,斜切率 $m=x/d=0.535$ 时,信号反射最小且传输较好,因此最佳斜切率 $m=0.535$.数值结果与文献[5]给出的经验公式计算结果不完全一致,但在文献[5]所给的误差范围内.然而,大于 8 GHz 的频率范围,直角弯曲 45°外斜切拐角没有明显的最佳斜切率存在.

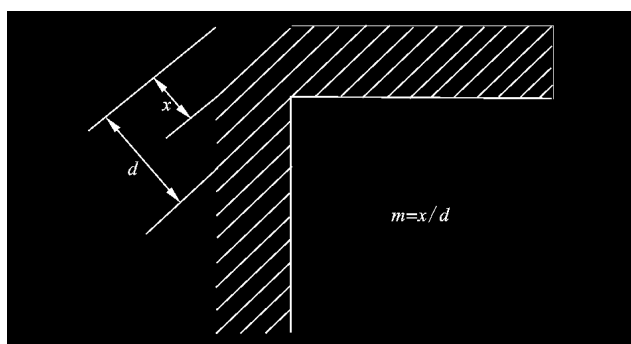


图 6 直角弯曲 45°外斜切拐角

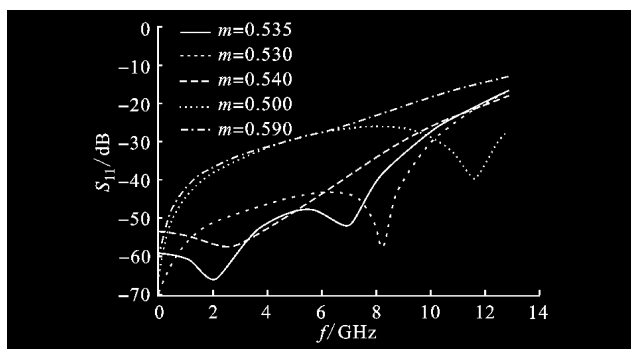


图 7 斜切率与 S_{11} 的关系

3 结 论

本文以理论分析和数值计算证明了印制线拐角的特性阻抗不连续性,及其对信号反射特性和传输特性的影响.印制线拐角处存在的特性阻抗不连续性,导致印制线上信号的反射,从而影响信号完整性.不同形状印制线拐角的传输特性呈现优良的次

序为 45°外斜切、内外 45°斜切、圆角、直角,印制线拐角的最佳几何结构为直角弯曲 45°外斜切.标称特性阻抗 50 Ω 的印制线,在小于 8 GHz 的频率范围内,直角弯曲 45°外斜切拐角的最佳斜切率约为 $m=0.535$;在大于 8 GHz 的频率范围,直角弯曲 45°外斜切拐角没有明显的最佳斜切率存在.PCB 印制线拐角设计成具有最佳斜切率的 45°外斜切直角拐角,能够极大地改善信号的传输特性,提高信号完整性.

参考文献:

- [1] Bogatin E. Signal integrity: simplified [M]. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2004.
- [2] Johnson H, Graham M. High-speed digital design: a handbook of black magic [M]. New York: Pearson Education Inc., 1993.
- [3] Montrose M I. EMC and the PCB: design, theory and layout made simple [M]. Piscataway, USA: IEEE Press, 1998.
- [4] Feix N, Lalande M, Jecko B. Harmonic characterization of a micro-strip bend via the finite difference time domain method [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1992, 40(5): 955-961.
- [5] Douville J P, James D S. Experiment study of symmetric micro-strip bends and their compensation [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1978, 26(3): 175-182.
- [6] Montrose M. Time and frequency domain analysis for right angle corners on printed circuit board traces [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway, USA: IEEE, 1998: 551-556.
- [7] Kergonou G, Drissi M, Zak T, et al. Frequency dependence in high speed interconnection [C] // Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Piscataway, USA: IEEE, 2001: 632-634.
- [8] Silvester P, Benedek P. Micro-strip discontinuity capacitances for right-angle bend, T junctions, and crossings [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1973, 21(5): 341-346.
- [9] Brooks D. Signal integrity issues and printed circuit board design [M]. Upper Saddle River, USA: Prentice Hall, 2003.
- [10] Kodali V P. Engineering electromagnetic compatibility: principles, measurements, technologies, and computer models [M]. 2nd ed. New York: Wiley Publishing Inc., 2001.

(编辑 刘杨)