

微带线直角弯曲最佳斜切率研究

路宏敏¹, 吴保义¹, 姚志成², 万连城¹

(1. 西安电子科技大学 电子工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 解放军第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: PCB印制线直角弯曲引起的微带线特性阻抗不连续性严重影响高速电路信号传输质量. 基于微带线结构参数及相对介电常数对印制线直角弯曲45度外斜切最佳斜切率 M 影响的数值分析结果和最小二乘法原理, 应用MATLAB对数值结果进行曲线拟合, 提出了 M 与印制线宽厚比 w/h 的函数表达式, 以及50 Ω 特性阻抗微带线 M 与相对介电常数的线性关系. 结果显示: 具有最佳斜切率的印制线直角弯曲45度外斜切能够很好地保障最佳信号传输质量; 相对介电常数和印制线厚度 t 对 M 影响小, 而宽厚比 w/h 对 M 影响显著.

关键词: 微带线; 直角弯曲; 45°斜切; 最佳斜切率

中图分类号: TN817 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2400(2009)05-0885-05

Research on the optimal percentage miter of the microstrip right angle bend

LU Hong-min¹, WU Bao-yi¹, YAO Zhi-cheng², WAN Lian-cheng¹

(1. School of Electronic Engineering, Xidian Univ., Xi'an 710071, China;

2. Second Artillery Eng. Inst., Xi'an 710025, China)

Abstract: In a high-speed circuit, microstrip characteristic impedance discontinuity caused by the right angle bend of PCB traces affects the quality of the signal transmission seriously. The numerical results of the impact of microstrip structure parameters and relative dielectric constant on the optimal percentage miter M of trace right angle bend with a 45° out miter are obtained. Based on the principle of least squares, the formula for M versus the width-to-height ratio w/h is presented by fitting the numerical results with MATLAB. Similarly, the linear expression for M versus the relative dielectric constant is also presented for the 50 Ω line. The results show that the trace right-angle bend with a 45° out optimal percentage miter makes the quality of the signal transmission best. And the impact of relative dielectric constant and thickness of microstrip on M is not obvious, but the impact of w/h on M is significant.

Key Words: microstrip; right angle bend; 45° miter; optimal percentage miter

微带线是印刷电路板(PCB)上元器件互连的主要互连传输线之一,其导带通常称为印刷电路板的印制线.随着科学技术的迅速发展,电路工作频率不断提高和高速化带来的负效应,对微带线传输特性提出了更高的要求^[1-2].直角弯曲是印制线的常见结构,也是典型的印制线阻抗不连续性结构之一,制约印刷电路板的信号传输特性和信号完整性^[3-4].不同结构尺寸的印制线直角弯曲对信号传输特性和信号完整性的影响程度不同,印制线直角弯曲45°外斜切能够很好地改善信号传输特性^[5-10],进而改善信号完整性.

文献[5-6,8]以实验方法和数值方法详细分析了不同结构的印制线直角弯曲的信号传输特性,指出印制线直角弯曲45°外斜切结构形式能够很好地改善信号传输特性且存在最佳斜切率.文献[8]提出了设计印制线直角弯曲45°外斜切最佳斜切率 M 的经验公式,这一经验公式有利于提高PCB设计效率,降低设计难度.

收稿日期:2008-10-21

基金项目:国家自然科学基金资助(60571059)

作者简介:路宏敏(1961-),男,教授,博士,E-mail: hmlu@mail.xidian.edu.cn.

然而,采用经验公式的计算结果与实验结果之间存在显著的误差.因此,改进这一经验公式,对高速电路 PCB 电磁兼容性和信号完整性设计具有重要意义.

1 直角弯曲 45°外斜切最佳斜切率

印刷电路板设计中,印制线直角弯曲的几何结构如图 1 所示,图中 h 表示印制线与参考导电平面间的介质厚度, w 表示印制线宽度, t 表示印制线厚度, ϵ_r 表示印制线与参考导电平面间介质的相对介电常数.

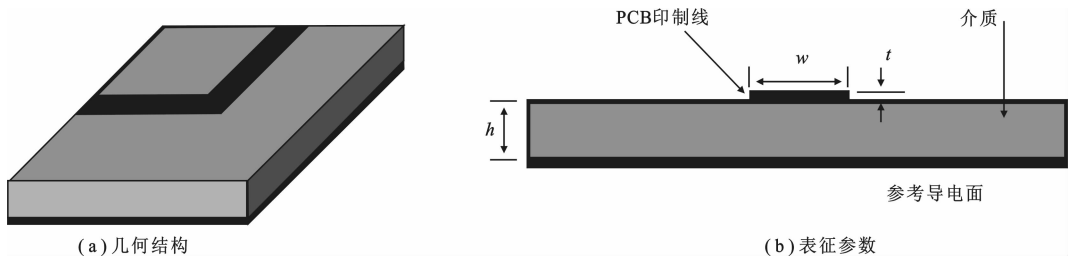


图 1 PCB 印制线直角弯曲几何结构与参数表征

对于沿传输线纵向横截面几何结构和表征参数恒定不变的均匀传输线,当信号在其上传播时,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特性的一个重要参数,与传输线的材料特性、介电常数、单位长度电容量和电感量有关,与传输线的长度无关,是传输线的固有属性.一般地,均匀微带传输线的特性阻抗 Z_0 为

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

式(1)中 C_0 表示微带传输线单位长度的电容, v_p 表示相速度, 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,且 $1 < \epsilon_e < \epsilon_r$.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.从而,信号沿均匀微带传输线传输时,印制线(导带)不会引起信号的反射,对信号完整性不会产生影响.

微带线直角弯曲处,印制线宽度的变化是最大的,微带线特性阻抗变化也最大.微带线直角弯曲处印制线的面积比均匀直线印制线的面积大,存在电荷积聚效应,导致弯曲处的电容增大,特性阻抗减小^[1,5-10],从而印制线直角弯曲处呈现特性阻抗不连续性.

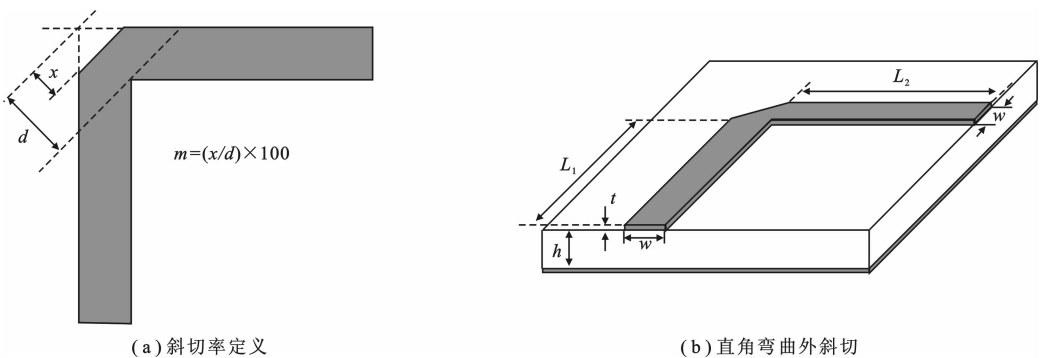


图 2 PCB 印制线直角弯曲 45°外斜切

切去印制线直角弯曲的一部分是减小其特性阻抗不连续性,改善传输和反射特性的常用方法.研究表明印制线直角弯曲 45°外斜切方法是控制微带线特性阻抗连续性的最佳方法^[6,8-10],如图 2 所示.图 2(a)中 d 表示印制线直角弯曲内拐角至外拐角的距离, x 表示 45°外斜切处至外拐角的距离. $m = (x/d) \times 100$ 表示斜切率,当 $m = 0$ 时意味着印制线直角弯曲外拐角没有被切割,而 $m = 100$ 时意味着印制线直角弯曲外拐角被完全切割以致把印制线从弯曲处分成了两部分.斜切率对微带线的传输特性影响显著,直角弯曲印制线 45°外斜切存在最佳斜切率.当斜切率为最佳斜切率 M 时,直角弯曲处的特性阻抗不连续性最小,信号传输特性

最佳. 文献[6]指出对于标称特性阻抗 $50\ \Omega$ 的微带线, 在小于 $8\ \text{GHz}$ 的频率范围内, 直角拐角印制线 45° 外斜切的最佳斜切率为 53.5% . 文献[9]指出对于标称特性阻抗 $50\ \Omega$ 且 $\epsilon_r = 2.5$ 的微带线, 从 $0.5\sim 20\ \text{GHz}$ 的宽频带范围内, 直角弯曲印制线 45° 外斜切的最佳斜切率 M 为 53% . 文献[8]给出了相对介电常数 ϵ_r 从 2.5 到 25 范围内, 直角弯曲印制线 45° 外斜切的最佳斜切率 M 与 w/h 之间的关系式

$$M = 52 + 65 \exp(-1.35w/h) \quad , \quad w/h \geq 0.25, \quad \epsilon_r \leq 25 \quad . \quad (2)$$

采用公式(2)获得的印制线直角弯曲 45° 外斜切最佳斜切率的结果与实验结果比较存在显著误差^[8], 与数值分析结果比较^[6,9]也存在明显误差. 为此, 笔者采用数值仿真和曲线拟合相结合的方法, 改进这一经验公式, 提出设计印制线直角弯曲 45° 外斜切最佳斜切率的新公式.

2 数值模拟与分析

我们将微带线直角拐角看成两端口网络, 每一端口都与均匀 PCB 印制线的特性阻抗匹配, 这样就可以用两端口网络的散射参数(S 参数) S_{11} 和 S_{21} 来描述斜切率 m 对微带线反射特性和传输特性的影响程度^[4-6,10], S_{11} 最小时的斜切率就是最佳斜切率 M . 选取微带线模型如图 2 所示, 依据式(2) 给定的参数范围, 改变 t, ϵ_r 和 w/h 的大小, 分析最佳斜切率 M 与微带线参数 t, ϵ_r 和 w/h 的函数关系, 以确定它们的内在规律. 数值仿真中, 假设微带线直角拐角一个端口施加的激励源为图 3 所示的高斯脉冲(电压激励, 单位为伏特), 其频谱范围 $0\sim 14\ \text{GHz}$, 另一端匹配. 几何参数 L_1, L_2, t 和 h 的单位均为 mm , 应用 CST DESIGN ENVIRONMENT 6.0 进行数值仿真.

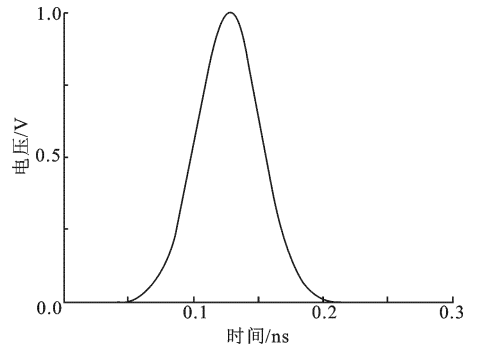


图 3 激励源信号

2.1 厚度 t 对最佳斜切率 M 的影响

选取 $\epsilon_r = 4.5, L_1 = L_2 = 30, h = 1, t$ 和 w/h 取不同的值(见表 1), 分别计算对应的 M 值, 结果如表 1 所示.

表 1 微带线厚度 t 与最佳斜切率 M 的函数关系($\epsilon_r = 4.5, h = 1, L_1 = L_2 = 30$)

t/mm	w/h								
	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
文献[8]	98.4	85.1	68.9	60.6	56.4	54.3	53.1	52.6	52.3
0	94.0	74.0	62.0	55.0	53.0	52.0	51.0	50.0	49.0
0.018	94.0	74.0	62.0	56.0	53.0	52.0	51.0	50.0	49.0
0.035	93.0	75.0	64.0	57.0	54.0	53.0	52.0	51.0	51.0
0.105	97.0	79.0	67.0	60.0	57.0	55.0	54.0	53.0	52.0

从表 1 可以看出, 导带厚度 t 远远小于介质厚度 h 时, 微带线厚度 t 对 M 的影响很小; 但是随着微带线厚度 t 增大, 最佳斜切率 M 也逐渐增大.

2.2 相对介电常数 ϵ_r 对 M 的影响

保持其他参数值不变, 通过改变 ϵ_r 的大小, 观察 M 值的变化情况. 保持 $L_1 = L_2 = 30$ 和 $t = 0.018$ 不变, 分别取不同的 ϵ_r 和 w 值, w/h 取不同的值(见表 2), 仿真计算对应的 M 值, 结果如表 2 所示.

表 2 相对介电常数 ϵ_r 与最佳斜切率 M 的函数关系($L_1 = L_2 = 30\ \text{mm}, t = 0.018\ \text{mm}$)

ϵ_r	w	w/h								
		0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
2.5	2.30	94	73	62	55	53	52	51	50	49
4.5	1.00	94	74	62	56	53	52	51	50	49
10.8	0.84	94	73	62	56	54	52	51	50	49
15	0.50	93	73	61	56	54	52	51	50	49
25	0.50	94	74	62	55	53	51	50	49	49

从表 2 可以看出, 对于不同的介电常数 ϵ_r , 最佳斜切率 M 基本不变, 与文献[8] 的结论一致. 微带线宽度

与厚度的比值 w/h 对 M 的影响显著,且 w/h 与 M 存在近似的指数关系。

2.3 w/h 与最佳斜切率 M 的关系

为了进一步验证 w/h 和 M 的关系,以及本文的理论结论,选取常用 PCB 模型参数: $\epsilon_r = 4.500$, $t = 0.018$, $h = 1$,且 $L_1 = L_2 = 30$ 。 w/h 取不同的值(见表 3),分别应用 CST 和 HFSS 电磁场仿真软件进行仿真计算对应的 M 值,结果如表 3 所示。

表 3 微带线宽厚比 w/h 与最佳斜切率 M 的关系($\epsilon_r = 4.5$, $L_1 = L_2 = 30$, $h = 1$, $t = 0.018$)

	w/h								
	0.25	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
文献[8]	98.4	85.1	68.9	60.6	56.4	54.3	53.1	52.6	52.3
CST 计算结果	94.0	74.0	62.0	56.0	53.0	52.0	51.0	50.0	49.0
HFSS 计算结果	94.0	73.0	63.0	57.0	54.0	53.0	52.0	51.0	50.0

由表 3 可知,CST 仿真结果和 HFSS 仿真结果基本一致,与后者比较,前者的误差范围为 $-2\% \sim 1.37\%$;而前者与文献[8]的经验公式误差范围为 $-13.1\% \sim -3.9\%$,后者与经验公式的误差范围为 $-14.2\% \sim -2.1\%$ 。最佳斜切率 M 与微带线宽厚比 w/h 存在近似的指数关系。

3 最佳斜切率公式推导

表 2 中应用 CST 计算得到了不同参数微带线的印制线直角弯曲 45° 外斜切最佳斜切率,取其每一列 5 个数值的平均值(用 M' 表示)。从而获得 w/h 依此取表 3 所示的 9 个值时,对应的 9 个最佳斜切率平均值 M' 。基于最小二乘法原理,利用 MATLAB 对 M' 和 w/h 两组数值进行曲线拟合,得到最佳斜切率 M 与 w/h 的函数关系

$$M = 50.1 + 35.1 \exp(-1.35w/h) + 6.5(h/w) \exp(-1.35w/h) \quad , \quad w/h \geq 0.25, \epsilon_r \leq 25 \quad . \quad (3)$$

基于表 2 参数,分别应用公式(3)、CST 仿真、HFSS 仿真和经验公式(2)计算最佳斜切率,结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,经验公式(2)计算结果与 CST 仿真结果及 HFSS 仿真结果比较,误差显著;而公式(3)计算结果与 CST 仿真结果及 HFSS 仿真结果误差较小。以表 2 中 ϵ_r 为 2.5,4.5,10.8,15.0 和 25.0 对应的最佳斜切率为参照,公式(3)计算结果与 CST 仿真结果比较,误差范围分别是 $\pm 2.51\%$, $\pm 2.51\%$, $\pm 2.53\%$, $\pm 2.53\%$ 和 $\pm 2.84\%$,最大误差小于 $\pm 2.9\%$;而经验公式(2)计算结果与 CST 仿真结果比较,误差范围分别是 $4.1\% \sim 16.6\%$, $4.6\% \sim 15\%$, $4.1\% \sim 16.6\%$, $4.1\% \sim 16.6\%$ 和 $4.6\% \sim 15\%$,最大误差小于 17% 。由此可见,与经验公式(2)比较,本文中推出的最佳斜切率公式(3)的计算精度提高了 14% 。

特性阻抗 Z_0 为 50Ω 的微带线,其印制线直角弯曲 45° 外斜切最佳斜切率 M 与相对介电常数 ϵ_r 间存在线性关系^[8]。选取分析参数如表 4 所示,应用 CST 电磁场仿真软件进行计算,结果列于表 4。表 4 中微带线特性阻抗 Z_0 依据文献[11]获得。

表 4 ϵ_r 与最佳斜切率 M 的关系($Z_0 = 50$, $t = 0.018$, $h = 1$)

ϵ_r	w/h	Z_0	M	ϵ_r	w/h	Z_0	M
29.40	0.25	49.7	94	3.02	2.50	50.3	51
18.00	0.50	49.7	74	2.30	3.00	50.2	50
9.53	1.00	49.8	61	1.79	3.50	50.3	49
6.01	1.50	50.1	55	1.43	4.00	50.3	49
4.12	2.00	50.4	53				

基于最小二乘法原理,对表 4 中 M 和 ϵ_r 这两组数值,利用 MATLAB 进行曲线拟合,得到特性阻抗为

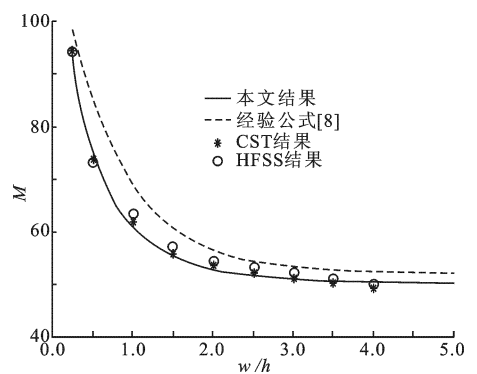


图 4 最佳斜切率 M 与 w/h 的关系曲线

50 Ω 微带线直角弯曲 45°外斜切最佳斜切率 M 与介质相对介电常数 ϵ_r 的线性函数关系:

$$M = 46.1 + 1.6\epsilon_r, \quad \epsilon_r \leq 30, \quad (4)$$

考虑表4假设的参数,应用公式(3)、公式(4)和 CST 分析 M 与 ϵ_r 的函数关系,结果如图5所示。从图5可以看出,公式(4)和公式(3)具有良好的—致性;与公式(3)比较,公式(4)的误差范围是 $\pm 3.75\%$ 。对于 $t = 0.018, \epsilon_r = 4.5, w = 3, w/h = 1.875$, 特性阻抗 50 Ω 的微带线,由公式(4)和公式(3)获得的直角弯曲 45°外斜切最佳斜切率 M 为 53.5,与文献[6]相同。

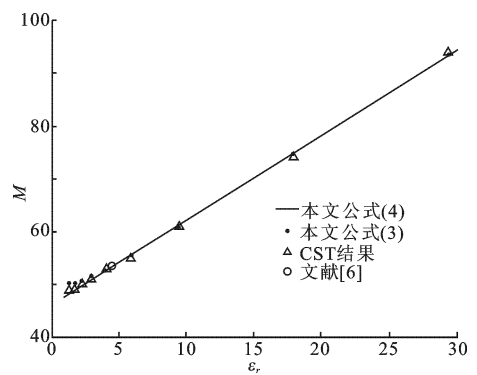


图5 50 Ω 微带线的 M 与 ϵ_r 的关系曲线

4 结 论

PCB印制线的直角弯曲 45°外斜切能够很好地改善信号传输质量,且存在最佳斜切率。基于微带线结构参数及相对介电常数对印制线直角弯曲 45°外斜切最佳斜切率 M 影响的数值分析结果和最小二乘法原理,应用 MATLAB 对数值结果进行曲线拟合,提出了最佳斜切率 M 与 w/h 的函数表达式和 50 Ω 特性阻抗、印制线直角弯曲 45°外斜切 M 与 ϵ_r 的线性关系。与文献[8]中的经验公式比较,笔者提出的最佳斜切率公式的计算精度提高了 14%。研究结果对于高速电路 PCB 电磁兼容性和信号完整性设计具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Montrose M I. EMC and the PCB-Design, Theory and Layout Made Simple [M]. Piscataway: IEEE, 1998.
- [2] Bogatin E. Signal Integrity-simplified [M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004.
- [3] Montrose M I. Time and Frequency Domain Analysis for Right Angle Corners on Printed Circuit Board Traces [C]// IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Denver: IEEE Press, 1998: 551-556.
- [4] Kergonou G, Drissi M, Zak T, et al. Frequency Dependence in High Speed Interconnection [C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Montreal: IEEE Press, 2001: 632-634.
- [5] 王克伟, 王均宏. 微带线拐角传输与反射特性的研究[J]. 微波学报, 2006, 22(3): 33-35.
Wang Kewei, Wang Junhong. Study on the Transmission and Reflection Properties of the Microstrip Line Bend[J]. Journal of Microwaves, 2006, 22(3): 33-35.
- [6] 路宏敏, 安晋元, 赵益民, 等. 印制线拐角的频域分析[J]. 西安交通大学学报, 2007, 12(41): 1451-1454.
Lu Hongmin, An Jinyuan, Zhao Yimin, et al. Frequency Domain Analysis for Right Angle Corners[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 12(41): 1451-1454.
- [7] Silvester P, Benedek P. Microstrip Discontinuity Capacitances for Right-Angle Bends, T Junction, and Crossings [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1973, 21(5): 341-346.
- [8] Douville R J P, James D S. Experiment Study of Symmetric Microstrip Bends and Their Compensation [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 1978, 26(3): 175-182.
- [9] Moore J, Hao Ling. Characterization of a 90°Microstrip Bend with Arbitrary Miter via the Time-domain Finite Difference Method [J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques, 1990, 38(4): 405-409.
- [10] Feix N, Lalande M, Jecko B. Harmonic Characterization of a Microstrip Bend via the Finite Difference Time Domain Method [J]. IEEE Trans on Microwave Theory Tech, 1992, 40(5): 955-960.
- [11] 梁昌洪, 谢拥军, 官伯然. 简明微波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 172.

(编辑: 高西全)