

文章编号 1005-0388(2009)05-0869-05

新型 RF-MEMS 可重构分形天线

罗 阳 朱守正 王小玲

(华东师范大学信息科学与技术学院, 上海 200241)

摘要 设计了一种新型的集成 RF-MEMS 开关的混合分形可重构天线, 该天线为加载了 1 阶 Koch 曲线的 1 阶 Sierpinski 三角垫片结构。仿真结果表明: 所设计的天线在 MEMS 开关全闭合和全断开的状态下分别具有多个不同的工作频带。详细地分析了天线的重构特性, 按照仿真模型在高阻硅片上运用微电子工艺制作出了天线样品。对样品进行了测试, 最后比较和分析了测试结果。

关键词 分形; RF-MEMS; 重构天线

中图分类号 TN82 **文献标志码** A

Novel RF-MEMS reconfigurable fractal antenna

LUO Yang ZHU Shou-zheng WANG Xiao-ling

(School of Information Science and Technology, East
China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract New type of reconfigurable fractal antenna is designed, in which Koch curve loaded Sierpinski gasket integrated with RF-MEMS switches. Simulation results show that the antenna has several different operation bands respectively when the MEMS switches keep on and off. Detailed analysis of the reconfigurable property is presented. Samples of the designed antenna are fabricated on a high-resistivity silicon substrate by microelectronic technique. Finally the experimental results are offered as well as analysis and explanations.

Key words fractals; RF-MEMS; reconfigurable antennas

引 言

从 1993 年 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers) 的一个研讨会上首次正式提出分形天线概念^[1] 和 1994 出现了设计分形天线的文献^[2], 到现在的 15 年间, 分形天线的研究设计取得了相当大的进展。而重构天线的概念早在上世纪 80 年代就被提出了^[3], 起初是指对波束形状和方向性的重构, 后来也包括对工作频率的重构。将 RF-MEMS (Radio Frequency Microelectromechanical Systems) 技术与分形天线技术相结合起来, 进行

RF-MEMS 可重构分形天线的设计, 这样在保留了分形天线的一些优点的基础上还可实现频率或方向图的重构, 拓宽了可重构天线的应用范围。

我们提出了一种集成 RF-MEMS 开关, 加载了 Koch 分形曲线的 Sierpinski 三角垫片的混合分形单极子天线。这种天线不但能保持混合分形天线的多频段特性, 还能够通过 RF-MEMS 开关阵列的通断控制进一步改变天线结构, 从而有效地实现天线的频率重构。仿真分析和实测结果表明, 该结构天线能比普通分形天线增加天线的工作频段和带宽, 并为根据实际需要灵活选择合适频带提供了更多自

收稿日期: 2008-12-24.
(No. 514370201)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60571064); 天线和微波国家重点实验室基金

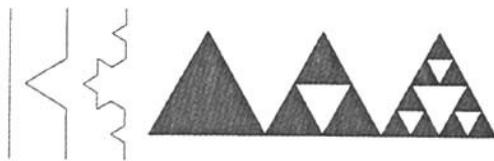
联系人: 朱守正 E-mail: szzhu@ee.ecnu.edu.cn

由度。

1 分形天线

上世纪 70 年代中期, 法国数学家 MANDELBROT B B 使用了“fractal(分形)”这个词, 并在 70 年代末到 80 年代初发展成为一门新的几何学: 分形几何^[4]。分形有两个主要的特性: 自相似性和空间填充性。分形的形式一般有 Koch 分形、Sierpinski 分形、Minkowski 分形和 Hilbert 分形等。对分形天线进行较系统的研究始于 90 年代, 由于分形的自相似性, 使分形天线具备了宽频、多频特性, 而其空间填充性使天线设计尺寸大为减小, 分形天线的研究取得了一系列的成果。WERNER 等在文献[5]中对分形天线做了详尽的总结和回顾。在这方面国内也开展了一些研究^[6,7]。

分形结构可以直接应用于天线的设计, 因而分形本身具有一些几何特性转变为天线的电特性。图 1(a)所示是初始线段和对其进行了 1 次、2 次迭代生成的夹角为 60° 的 Koch 曲线, 图 1(b)所示是初始正三角和对其进行了 1 次和 2 次迭代生成的自相似因子 $\delta=2$ 的 Sierpinski 分形。



(a) Koch 分形曲线 (b) 正三角 sierpinski 分形

图 1 Koch 曲线和 Sierpinski 分形

由 Koch 曲线的形成过程可知, 夹角为 60° 的 Koch 曲线每迭代一次, 总的曲线长度就增加 $1/3$ 。高度为 h , 经过了 N 次迭代的 Koch 曲线总长度满足以下关系式

$$L_n = h \left(\frac{4}{3}\right)^N \quad (1)$$

PUENTE 等在文献[8]中研究和阐述了利用 Koch 分形的空间填充性设计和改善小尺寸单极子天线。当 Koch 分形天线高度 h 不变, 迭代次数增加时, 天线的辐射电阻会增加; 辐射频率则会减小, 并逐渐趋于一有限值; 品质因数会减小, 并也逐渐趋于一有限值。所以进行有限次迭代的 Koch 分形天线能实现天线小型化。同时由于天线性能会随着迭代次数增加而趋于饱和, 而且迭代次数过多, 天线结构会过于复杂, 因此实际设计 Koch 分形天线时其

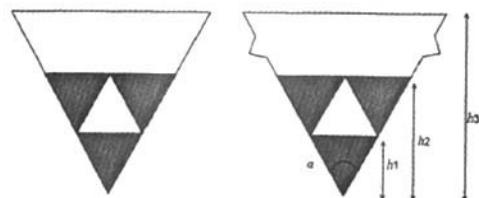
迭代次数不宜过大。

此外他们还在文献[9]中对 Sierpinski 分形天线基于 Sierpinski 分形自相似性所表现出的多频特性做了研究和阐述。研究表明 Sierpinski 分形单极子天线有对数周期性, 频带内表现出显著的相似性。可用频率呈现以下近似关系式

$$f_n \approx 0.26 \frac{c}{h} \delta^n \quad (2)$$

式中, c 是自由空间光速; h 是 Sierpinski 三角垫片的最大高度; δ 是分形的对数周期因子(自相似因子); n 是自然数; 常数 0.26 与介质板的相对介电常数 ϵ_r 和介质板厚度有关。

值得注意的是普通分形天线的结构一旦确定, 其相邻频率的比值也就固定了。比如传统缩放因子为 1/2 的正三角 Sierpinski 垫片单极子天线高阶相邻工作频率之比接近其周期因子 2, 但第二工作频率 f_2 与第一工作频率 f_1 之比却基本不受周期因子影响保持在 3.5 左右^[9], 即式(2)实际上对应于 $n \geq 2$ 的情况。而 f_1 与 f_2 之间相距过大且不能调控制约了 Sierpinski 垫片单极子天线在双频、多频方面的应用。解决这一问题的方法之一是对传统 Sierpinski 三角进行改进, 比如图 2(a)修正了的天线结构(这里称之为普通加载 Sierpinski 三角形)其 f_2/f_1 降低到了 2.18^[10]。考虑到 Koch 曲线相比普通曲线具备空间填充性如式(1), 因而用它取代图 2(a)中的普通加载曲线形成如图 2(b)的结构, 构成混合分形天线, 这样对分形天线设计提供了更多的自由度, 可以增加天线的电流有效路径, 降低天线的工作频率, 对此我们已在文献[11]中做了较细致的研究。



(a) 普通加载的 1 阶 Sierpinski 三角形

(b) 1 阶 Sierpinski 三角形 Sierpinski 三角形垫片 加载 1 阶 Koch 分形

图 2 加修正的 Sierpinski 三角形分形结构

2 可重构分形天线的分析与设计

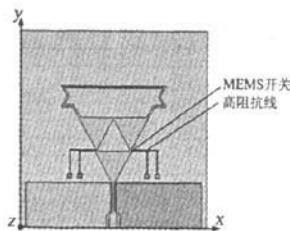
MEMS 技术是一项近年来发展起来的集微电子和微机械优点的高新技术。MEMS 技术用于射频、微波、毫米波领域, 即 RF-MEMS, 可使射频、微波、毫米波器件和电路的结构和特性有一个根本性

的改变。RF-MEMS 开关运用到可重构分形天线的设计是最近几年才发展起来的新的天线设计技术。比较早的如文献[12]中研究了 Hilbert 分形天线的频率和辐射模式的重构特性;文献[13]中设计制作了集成 RF-MEMS 开关的 Siepinski 三角垫片重构天线,该天线共有 3 个辐射频段,这些频段上的辐射模式都非常相近,天线表现出多频和自相似性。

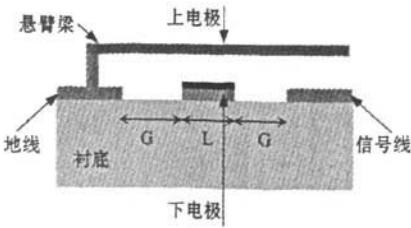
本文设计了一种新的混合分形可重构天线,在图 2(b)的结构上集成 RF-MEMS 开关。开关可以置于 Siepinski 三角垫片和 Koch 曲线的连接处,这样重构前后的天线结构分别为传统一阶 Siepinski 三角垫片天线和加载了 Koch 曲线的混合分形天线;开关也可以置于 Siepinski 三角形分形的交接处,这样重构前后的天线结构分别为 Siepinski 三角垫片天线和加载了 Koch 曲线的混合分形天线。两种方式比较而言,后一种方式重构的两种天线结构几何差别更大一些。

按照后一种方式设计天线,天线以高阻硅为衬底材料,硅介质的厚度为 0.52 mm,介电常数为 11.9;天线总高度为 $h_3=10.5$ mm,加载线元部分高度(h_3-h_2)占总高度 h_3 的 1/3,开关位于下部的 Siepinski 分形天线的交接处,天线结构如图 3(a)所示。天线中的 RF-MEMS 开关选用悬臂梁式开关,这种开关的结构如图 3(b)所示。

在 20 GHz 频率范围内对所设计的天线进行仿真,得到结果如下:



(a) RF-MEMS 开关位于 Siepinski 分形处的复合分形,共面波导馈电的单极子天线结构



(b) 悬臂梁开关剖面图

图 3 天线及 MEMS 开关结构

1)开关都闭合时仿真结果表明天线有四个工作频率,分别为 3.75 GHz、10.95 GHz、16.84 GHz、19.8 GHz,各工作频率的增益分别为 -4.65 dB、5.89 dB、5.01 dB、5.03 dB。工作频率处的 S11 如图 4 所示,方向图如图 5(a)所示。

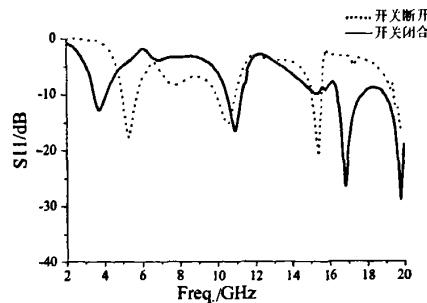
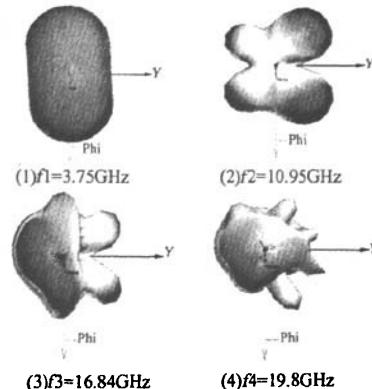


图 4 MEMS 开关闭合和断开时天线的工作频率点 S11 比较



(a) 开关全闭合时四个工作频率点上的方向图

(3) $f_3=15.4$ GHz

(b) 开关全断开时三个工作频率点上的方向图

图 5 MEMS 开关闭合和断开时天线各工作频率处的方向图

2)开关都断开时仿真结果表明天线有三个工作频率,分别为5.3 GHz、10.53 GHz、15.4 GHz,各工作频率的增益分别为3.68 dB、5.91 dB、5.02 dB。工作频率处的S11如图4所示,方向图如图5(b)所示。

将RF-MEMS开关闭合和断开时天线的工作频率总结在表1中。分析图4、图5和表1可知,开关闭合和断开这两种模式下天线均有多个工作频率,重构天线很好地保留了分形结构的多频特性;其次,对比两种模式下相近频率的辐射方向图,可以看出在低次工作频率上两种模式的方向图几乎保持一致,高次工作频率上旁瓣增多略有变化;最后对比天线在两种模式下的各个工作频率,可以发现开关闭合和断开时天线的各工作频率均没有重合而存在较明显的差异。通过RF-MEMS开关的重构,天线的可用频段和带宽都有增加。

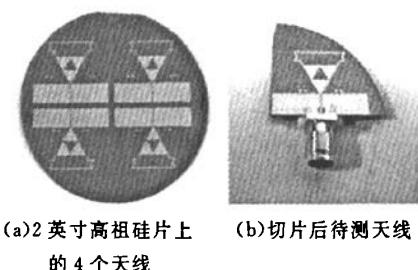
表1 天线工作频率、S11和相邻频率比

	开关闭合	开关断开
f_1 (GHz)/S11(dB)	3.75/-12.88	5.30/-17.73
f_2 (GHz)/S11(dB)	10.95/-16.59	10.53/-15.36
f_3 (GHz)/S11(dB)	16.84/-26.46	15.40/-21.07
f_4 (GHz)/S11(dB)	19.80/-28.89	
f_2/f_1	2.92	1.98
f_3/f_2	1.54	1.42
f_4/f_3	1.18	

由以上分析可见,新型天线实现了工作频率的可重构,且保留了分形天线多频、小型等特性,这符合我们的设计初衷。

对设计结果做进一步分析。从表1中可见,开关闭合模式下的天线工作频率 f_2/f_1 为2.92, f_3/f_2 为1.54, f_4/f_3 甚至达到了1.18。当天线的高度 h_3 确定后,天线辐射的第一工作频率就基本确定了,相邻工作频率比则可以通过适当地改变加载混合分形结构来调整,比如可以通过降低加载曲线的高度(h_3-h_2)来减小 f_2/f_1 ;改变Sierpinski三角垫片的张角 α ^[14]或者改变分形的对数周期因子 δ ^[15]也都可以达到调整工作频率的目的。另外前面已经提及,当RF-MEMS开关放置的位置不同,天线重构的结构也不同,因而天线的辐射特性也会有所改变。比如,可以在加载复合分形结构上放置多个RF-MEMS开关,这样通过开关阵列的控制可以重构出多种结构,获得更多的频带和更大的带宽,当重构的结构之间丧失了相似性时,天线的辐射方向图也可能随之改变,因此这种类型的重构天线除了能实现频率重构外也有可能实现方向图的重构。

我们在2英寸的高阻硅片上制作了集成MEMS开关的天线样片,如图6(a)所示。一个硅圆片上同时制作了4个天线,应用时加以切割。MEMS开关的尺寸为下电极宽140 μm ,长100 μm ,材料为金;悬臂梁长320 μm ,MEMS桥宽100 μm ,材料为铝硅合金,厚度为1 μm ;悬臂梁与下电极间距2 μm ;两边的地线和信号线与下电极的间距50 μm ,材料也都是金。高阻线材料为铬,天线材料为金。制作过程要经过生长氧化硅、光刻电极和引出线、光刻天线图形、PECVD生长氮化硅薄膜、光刻生成桥墩和传输线、旋涂牺牲层、蒸铝硅合金生成MEMS桥、去除牺牲层等步骤。所设计天线的馈电是共面波导结构的,为了用普通网络分析仪测试,我们设计了共面波导与SMA接头的过渡,为了避免焊接对天线造成损伤,SMA接头与天线是通过导电银胶来粘接的。带SMA接头的天线样片如图6(b)所示。用Agilent的PNA-L网络分析仪进行测试。图7所示为其中开关闭合的一组测试曲线。测试结果显示开关闭合时20 GHz频率范围内天线有两个工作频率,分别在3.55 GHz和10.69 GHz,S11分别为-25.57 dB和-12.42 dB。这与仿真结果的第一、第二次工作频率比较吻合。实测的 $f_2/f_1=3.01$ 较仿真值2.92稍高。可以说测试结果与设计值有较好的吻合。由于测试使用的是普通的SMA接头,其高频性能不很理想,所以没有给出更高次工



(a)2英寸高阻硅片上的4个天线
(b)切片后待测天线

图6 天线样片

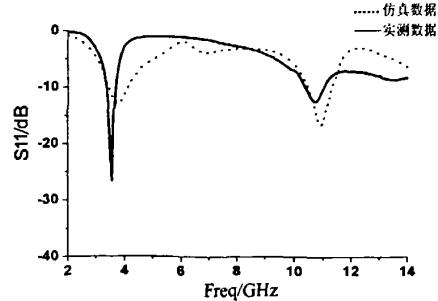


图7 实测天线的两个频率与仿真结果比

作频率的测试结果。

3 结 论

本文提出与设计了一种集成 RF-MEMS 开关的 1 阶 Sierpinski 三角垫片加载 1 阶 Koch 分形的混合分形可重构天线, 并制作出了天线样片。计算机仿真和实验测试的结果表明, 这种新型可重构天线在 RF-MEMS 开关闭合和断开两种模式下均具有多个工作频率且互不重合, 保留了分形结构的多频、小型等特性, 并且实现了天线的工作频率重构。在这种结构中只要适当地改变一些几何参数就可以灵活方便设计出一系列的重构天线。文中给出了 1 阶 Sierpinski 正三角垫片加载 1 阶 Koch 曲线混合分形可重构天线的情况, 其他形式的分形结构以及不同 MEMS 开关阵列的拓扑结构对天线性能影响的研究正在进行中。

参考文献

- [1] WERNER D H. Fractal electrodynamics [C]//the Central Pennsylvania Section of the IEEE. Bucknell University, Lewisburg, Pennsylvania, 1993.
- [2] WERNER D H. Fractal Radiators[C]//Proceedings of the 4th Annual 1994 IEEE Mohawk Valley Section Dual-Use Technologies & Applications Conference, SUNY Institute of Technology at Utica/Rome, New York, 1994, I: 478-482.
- [3] SCHAUBERT D, FARRAR F, HAYES S, et al. Frequency-Agile, Polarization Diverse Microstrip Antenna and Frequency Scanned Arrays: US 4, 367, 474 [P]. Jan. 4, 1983.
- [4] MANDELBROT B B. The Fractal Geometry of Nature [M]. New York: W. H. Freeman, 1983.
- [5] WERNER D H, GANGULY S. An overview of fractal antenna engineering research[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2003, 45(1): 38-57.
- [6] 刘英, 龚书喜, 傅德民. 分形天线的研究进展[J]. 电波科学学报, 2002, 17(1): 54-58.
LIU Ying, GONG Shuxi, FU Demin. The advances in development of fractal antennas[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(1): 54-58. (in Chinese)
- [7] 王琪, 何庆强. 分形倒 L 天线的研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 385-388.
WANG Qi, HE Qingqiang. Analysis and design of fractal inverted-L antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 385-388. (in Chinese)
- [8] PUENTE C, ROMEU J, POUS R, et al. The koch monopole: a small fractal antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2000, 48(11): 1773-1781.
- [9] PUENTE C, ROMEU J, POUS R, et al. On the behavior of the sierpinski multiband fractal antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1998, 46(4): 517-524.
- [10] TSACHTSIRIS G F, SORAS C F, KARABOIKIS M P, et al. Analysis of a modified sierpinski gasket monopole antenna printed on dual band wireless devices[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52(10): 2571-2579.
- [11] 肖光国, 朱守正. 加载式混合分形天线及其应用[J]. 微波学报, 2008, 24(3): 40-43.
- [12] VINOY K J, JOSE K A, VARADAN V K, et al. Hilbert curve fractal antennas with reconfigurable characteristics[C]// Microwave Symposium Digest, 2001 IEEE MTT-S International, 2001: 381-384.
- [13] ANAGNOSTOU D E, ZHENG G, CHRYSSOMALIS M T, et al. Design, fabrication, and measurements of an RF-MEMS-based self-similar reconfigurable antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(2): 422-432.
- [14] PUENTE C, NAVARRO M, ROMEU J, et al. Variations on the Fractal Sierpinski Antenna Flare Angle [C]// IEEE International Symposium on Antennas and Propagation Digest, Atlanta, Georgia, 1998, 4: 2340-2343.
- [15] PUENTE C, ROMEU J, BARTOLEME R, et al. Perturbation of the sierpinski antenna to allocate operating bands[J]. IEE Electronics Letters, 1996, 32(24): 2186-2188.

罗 阳 (1982—), 男, 四川人, 华东师范大学博士生。研究方向为超材料的设计及应用, 无线通信技术。



朱守正 (1949—), 男, 浙江人, 博士, 华东师范大学教授, 博士生导师。研究方向为新型天线, 计算电磁学, 超材料及其应用, 无线技术与无线通信等。



王小玲 (1980—), 女, 湖北人, 华东师范大学硕士研究生。研究方向为新型天线的设计及应用等。



如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



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，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



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,一直致力于专注于微波、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经典培训课程和 **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、既能达到了现场培训的效果, 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主讲, 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>