

FDTD 分析二项式阵列天线

胡 沥 高本庆 薛正辉

(北京理工大学 电子工程系 100081)

摘要：本文利用 FDTD 法对二项式阵列天线进行了仿真，利用电流提取法计算出二项式阵列天线的振子臂电流分布，在此基础上对天线振子间的互耦影响作了分析；本文还利用电流元提取法计算出了阵列天线的远场方向图，并与用等效积分面法、和方向图乘积原理所得结果互相比较，一致性较好。

关键词：电流元提取法，FDTD，等效积分面，二项式阵列天线

Abstract: A binomial antenna array was simulated with the method of FDTD, and the couple influence between the array elements was analyzed on the basis of calculating the current distribution of the antenna arms. Furthermore the far-field patterns was compared in the paper, which was obtained from three method :the calculation of current element ,the equivalent integration, and the multiplication of patterns; and the results are in good agreement with each other.

Key words: Abstraction of current element, FDTD, Equivalent integration, Binomial antenna array

1 前言

机载相控阵雷达在航空移动器中的应用范围相当广泛，它通过控制阵列天线单元间的相位差，可在较大范围内改变天线波束的指向，与常规雷达，即机械式的，靠旋转碟形天线导向的雷达相比较，具有高速扫描、多目标搜索与跟踪的优点，更重要的是它免除了复杂的机械结构，更适于安装在飞行器上；因此机载相控阵天线一直是航空电子领域的研究热点。由于近十年来，计算机的速度与容量出现了突飞猛进的发展，在分析相控阵天线时，人们更倾向于使用理论模型相对简单的数值计算方法，时域有限差分法（FDTD）可算其中的代表。

FDTD 是利用从 Maxwell 方程直接离散化而得到的迭代方程对电磁场的空间传播进行仿真，它比其他数值计算方法更具有直观性，如果建模恰当的话，FDTD 能真实的模拟出电磁场在空间的传播，因此应用 FDTD 方法利于研究和解决天线问题。用 FDTD 法研究天线可以直接得到天线的近场和远场的瞬态结果，由此可以清楚地看出天线辐射的物理过程，同时可以得到若干定量结果（如天线输入导纳，方向图等），所得数值结果均有较高精度。

天线远场方向图的计算中大多数会利用等效积分面法，即用一个假象的闭合表面完全包围住天线辐射体，由 FDTD 计算得到闭合表面上的切向场分量，运用场的等效性原理，求得闭合面上的等效电、磁流，由此求得任意空间点的远场。本文计算天线远场方向图是采用电流提取法，顾名思义，电流提取法就是通过对磁场的积分而计算出法向上的电流分量，当积分路径围绕天线时，则可求出天线表面电流，用它既可计算天线阻抗，也可计算天线远场方向图。下面作者将在二项式阵列天线的 FDTD 仿真的基础上，对电流提取法作详细介绍，并给出若干计算结果。

2 二项式阵列天线的 FDTD 计算

2.1 天线建模

设所研究的二项式阵列天线的单元为半波振子天线，工作频率为 1.3GHz，波长为 23cm。计算空间的网格尺寸必须满足条件^[2]：

$$\text{Max}(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \leq \lambda/10$$

因此，在建模时，选择空间网格为：

$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5\text{mm}$ ；在这种建模尺度下，单元振子长为 23 个网格，其中心网格处设立馈源。为计算方便，在将天线放在计算空间区域时，使其横截面为正方形且面积正好为一个网格的面积。由于存在以电场为棱的子域和与其相交叉的以磁场为棱的子域如图 1(a)和 1(b)所示，因而在放置天线时可将天线表面放置得与图 1(a)所示子域一致，也可与图 1(b)一致。计算表明，这两种放置方法所得到的空间场分布没有差别^[3]。本文中采用与图 1(b)所示子域一致的方法放置天线，这样做一方面在编程上较简单；另一方面可以很容易得到天线上电流的表达式。

2.2 计算结果及分析

五元二项式阵列天线按 y 轴排列的方式如图 2 所示。振子间的间距 $d = \lambda/2$ ，在振子臂中央网格处赋以高斯电压脉冲作为激励源。根据二项式阵列天线原理，从 1# 振子到 5# 振子所加载电压源的幅度比例应该为 1:4:6:4:1。在上述的建模参数及激励源设置下，用电流提取法可得到单元振子的表面电流分布，如图 3 所示。

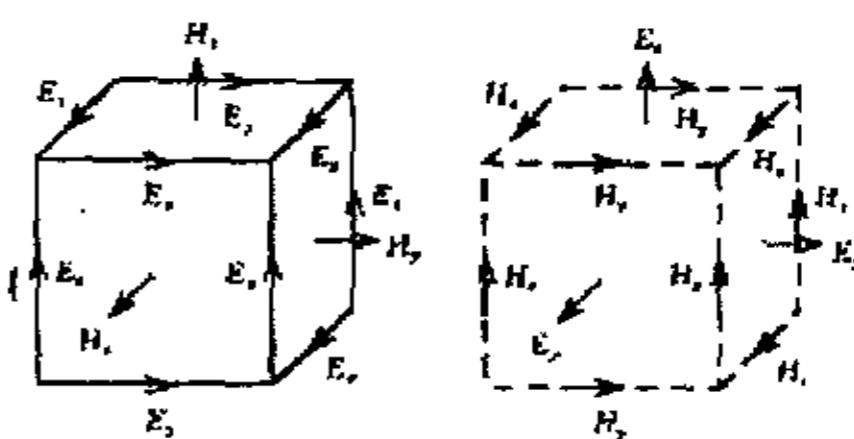


图 1 电场及磁场子块上各场量的设置方法

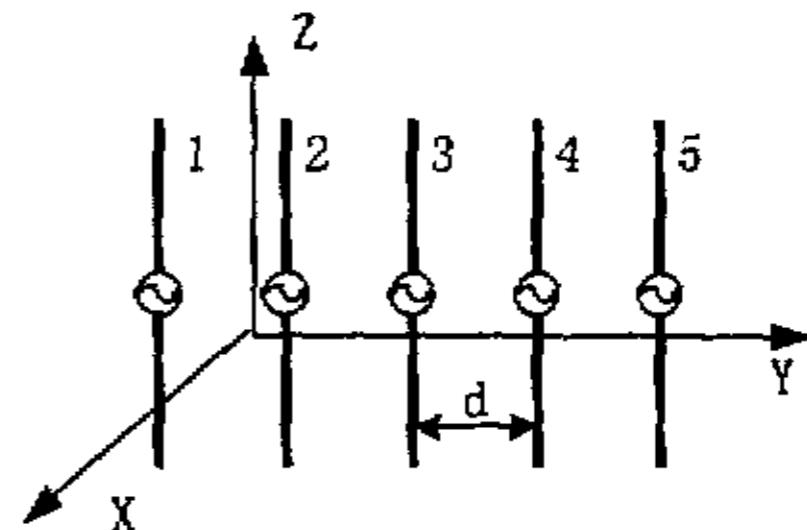


图 2. 五元二项式阵列天线示意图

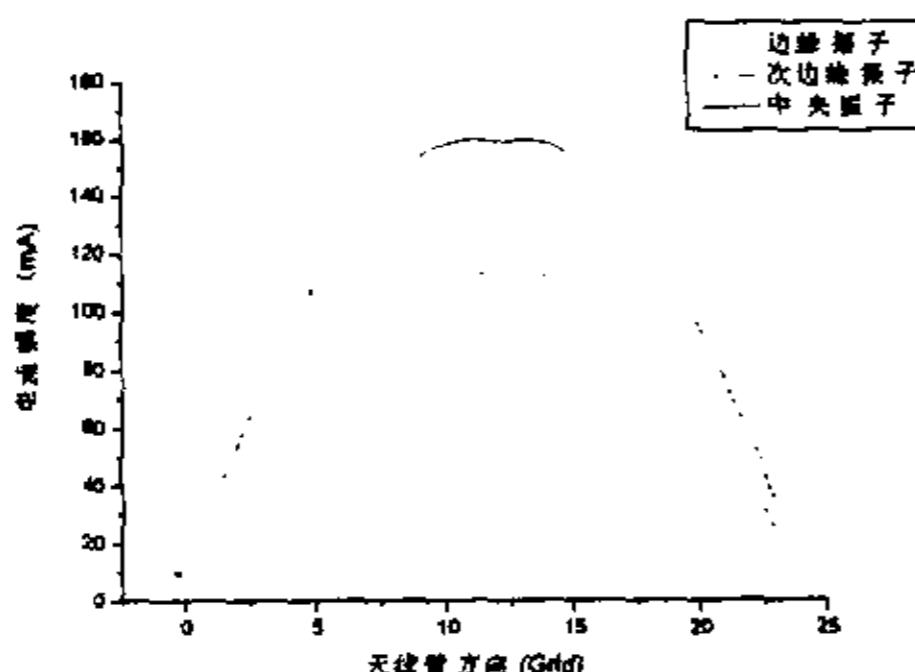


图 3 单元振子电流幅度分布

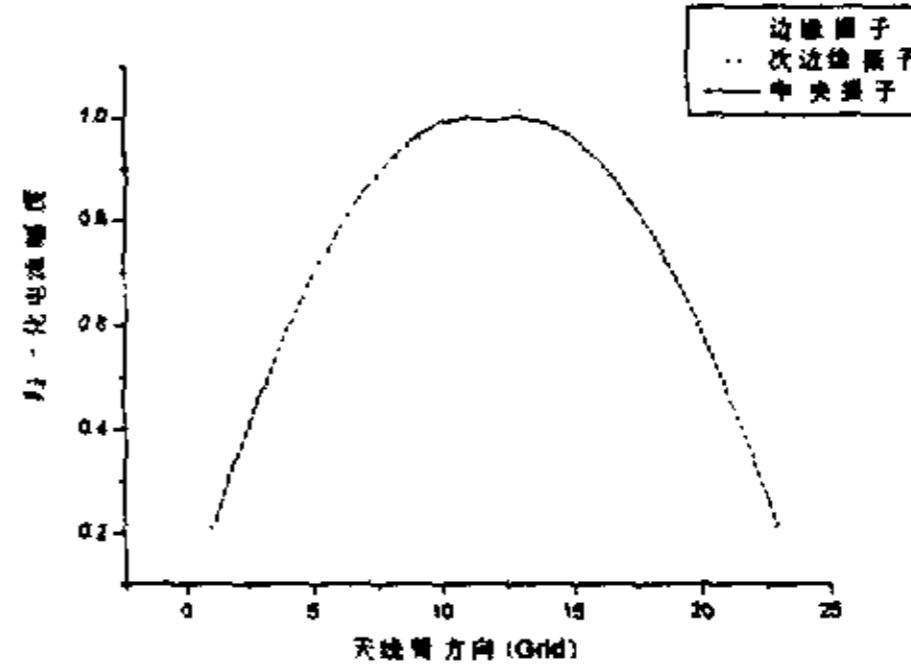


图 4 规一化单元振子电流幅度分布

图 4 显示出二项式阵列天线各个振子的规一化电流幅度分布是一致的，都近似于正弦规律分布，但边缘振子到中央振子的电流幅度之比不再是 1:4:6，而近似于 1:3:4。这是因为振子间存在着明显互耦，而且中央振子受其它振子的影响要比边缘振子大，即中央振子的互耦要大于边缘振子的互耦，而当振子间距大于或等于 $\lambda/2$ 时，振子的自阻抗又几乎相等^[4]，所以中央振子的互耦造成的‘分流’作用比边缘振子更明显，从而造成中央振子的电流幅度比预期要小。图 5 表示单元振子的电流相位分布，从图中可见各个振子上的相对电流相位分布是近似一致的，只是中心相位有偏移，但这对振子的远场方向图影响不大。由单元振子上的电流分布可求出阵列天线的远场方向图，其结果如图 6 所示。

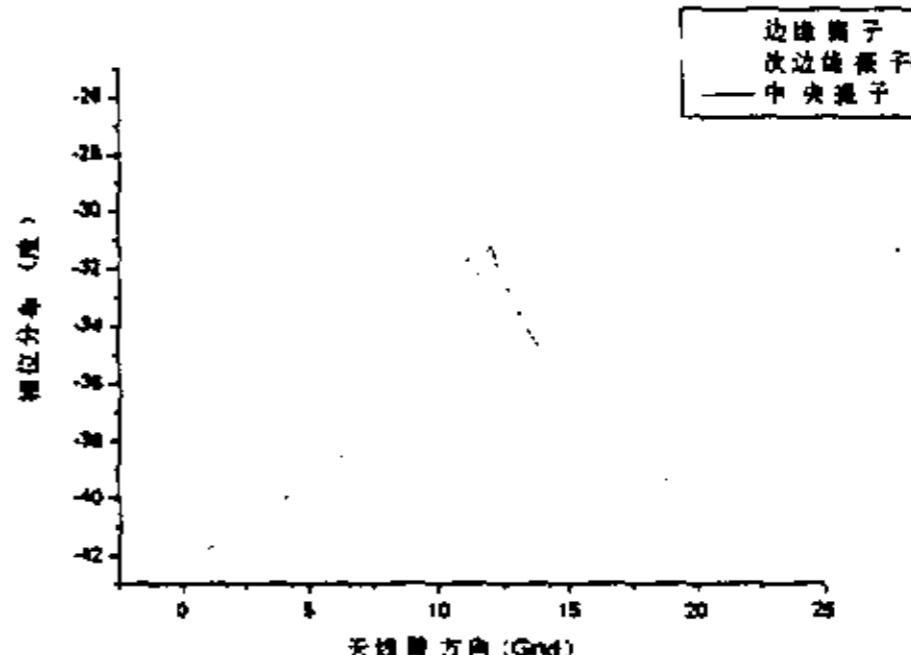


图 5 振子臂电流相位分布

由图 6 可以看出，电流提取法与等效积分面法所得到的远场方向图完全一致，这证明了电流提取法的准确性；但是这两种方法所得结果与二项式阵列天线的理论方向图有所差异，这是由于前面所述的原因：单元振子上的电流幅度之比并没有严格等于 1:4:6:4:1，而造成远场方向图的波瓣有小的拓宽，如果只用等效积分面法来计算天线远场方向图，则这细微的差别就可能被掩盖而归咎于计算误差。此外，如图 7 一图 8 所示，本文还给出 Z 轴排列的五元二项式阵列的计算结果以作比较，由图中可见，不仅边缘振子到中央振子的电流幅度分布不满足 1:4:6:4:1 的比例，而且边缘振子的相对相位分布也不再对称，这显然是由振子间的互耦因素造成的。

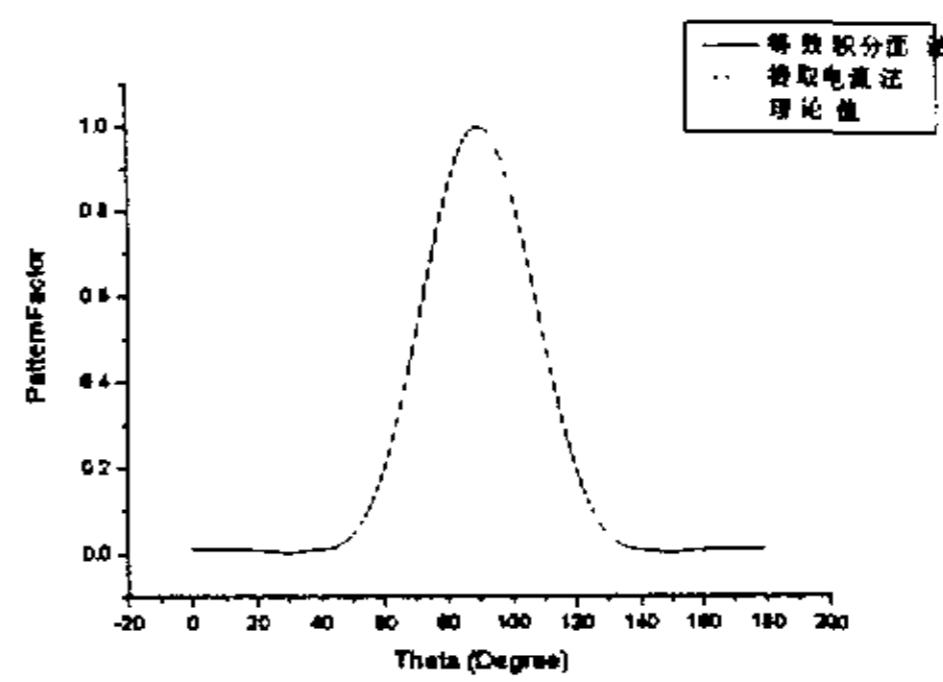


图 6 Y 轴排列二项式阵列天线方向图

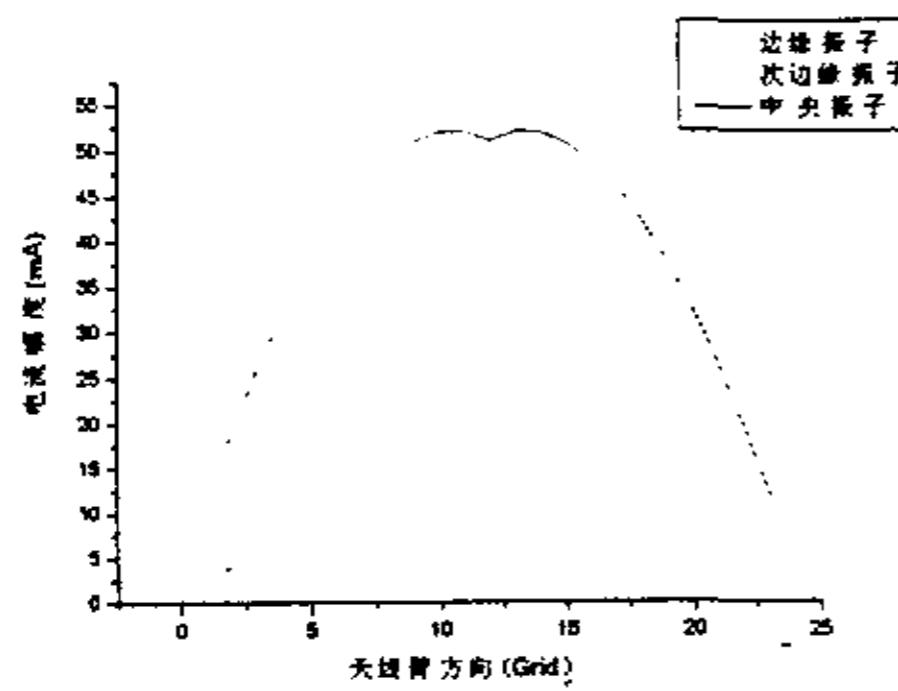


图 7 振子臂电流幅度分布

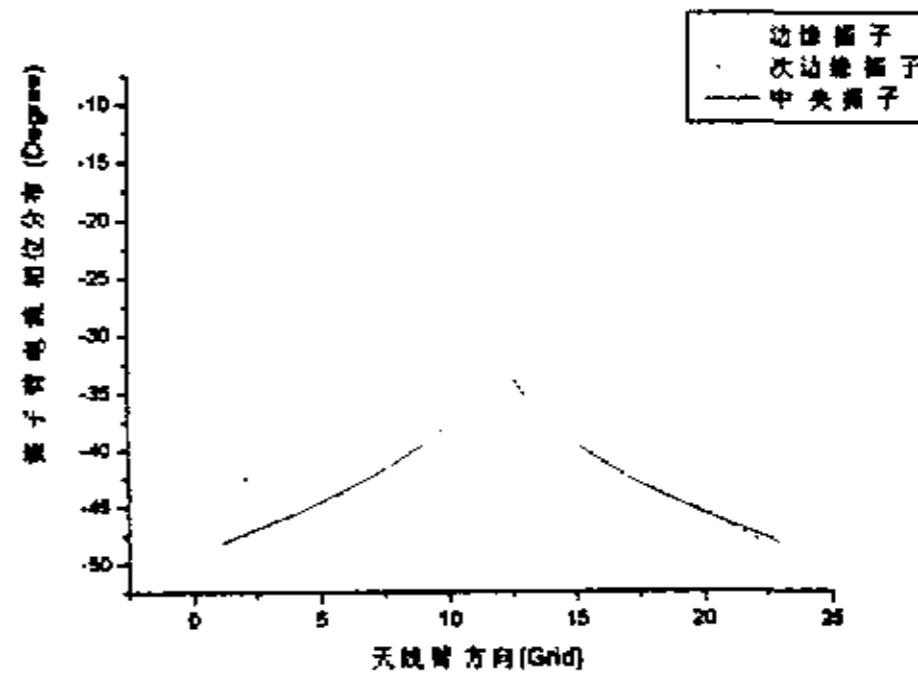


图 8 振子臂电流相位分布

3 结论

电流提取法依靠天线振子的电流分布来计算远场方向图，它建立起了‘源’与‘场’之间的联系，它将等效积分面法所掩盖的技术环节显现出来，让我们能清楚的洞察到问题的细节（电流分布），这正是电流提取法的优势所在。

参考文献

- [1] 藤本共荣, J.R 詹姆斯著, 杨可忠等译, 《移动天线系统手册》, 人民邮电出版社, 1997
- [2] 高本庆 编著, 《时域有限差分法 FDTD》, 国防出版社, 1995
- [3] 王均宏, ‘脉冲电磁波通过偶极天线辐射的物理过程及数值模拟’, www.emcchina.com
- [4] [美] Robert S. Elliott 编著, 汪茂光 等译, 《天线理论与设计》, 国防工业出版社, 1992

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>