

PC 集群 MPI 并行矩量法分析复杂平台多天线特性

张 玉, 王 楠, 梁昌洪

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 为分析安装于诸如飞机、舰艇等复杂目标上多天线的电磁兼容性, 本文引入了 Costa 基函数对多天线线面连接结构进行建模。针对计算量过大、耗时太长这一主要障碍, 结合 RWG 基函数特点, 设计了一种高效的适用于共轭梯度方法求解的棋盘状并行矩阵填充算法, 避免了 RWG 基相互作用的重复计算, 然后详细地讨论了并行共轭梯度算法求解矩量法矩阵方程的并行实现过程。本文进一步开发并在 PC 集群中实测了 MPI 并行矩量法程序性能, 作为应用计算了安装于某飞机头部的多天线辐射特性。

关键词: 矩量法; 多天线; 电磁兼容; 并行计算; PC 集群

中图分类号: TN821.8 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2006) 03-0478-05

Study of MPI Based Parallel MoM on PC Clusters for Multiple Antennas Mounted on Complex Platforms

ZHANG Yu, WANG Nan, LIANG Chang-hong

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: An efficient method of moment with Costa's basis function is introduced to analyze the EMC of multiple antennas mounted on complex shaped conductors. Too much time and prohibitive computation resources are needed for the EMC analysis of complicated EM environment. To overcome this drawback, a parallel algorithm that combines MoM with MPI functions is studied. The tessellation scheme is employed for parallel filling the impedance matrix and Parallel Conjugate Gradient method is used to solve the matrix equation. Several numerical results are presented to demonstrate its accuracy and efficiency.

Key words: MoM; multiple antennas; EMC; parallel computation; PC clusters

1 引言

随着通信技术的发展, 线天线作为机载、舰载、卫星、电子设备电磁能量的发射和接收端口得到了广泛的应用, 由于它们相互间的干扰影响比较大, 因而对其电磁兼容性研究极其重要。飞机、舰船都是金属表面或者可以近似看作金属表面, 其上安装的多根天线可以用金属导体面上连接有多根线天线的 MoM 模型^[1]来分析。作者在早期的工作中^[2]讨论了一个连接点的情况, 而在实际的电磁环境中, 经常出现多根天线处于同时工作的状态, 因而对多天线线面的连接结构进行建模对于电磁兼容仿真有更实际的理论价值。本文将在前期工作^[2]基础上, 采用 Costa 基函数^[1,2]对多天线线面连接问题进行深入研究。

另一方面, 由于受到计算机资源的限制, 对电大尺寸目标中天线电磁特性的分析, 一直以来难于直接在 PC 机

上实现, 因此并行电磁计算一直以来倍受国内外研究者的重视^[3]。近年来, 运用集群系统^[4]进行高性能计算成为近年来计算电磁学研究的热点问题之一。

鉴于集群并行电磁计算的重要性, 在自然科学基金以及支撑技术项目基金资助下, 笔者课题组近年来对 UTD、矩量法、FDTD 等主流方法开展了一系列基于 MPI 编程环境的并行计算电磁学算法研究工作^[5-9], 并在 PC 集群系统中实现了实际的工程计算应用。笔者在文[6]中研究的是并行高斯消元法求解线性方程组及其对应的矩量法矩阵并行填充方法。对于电大目标电磁特性矩量法分析, 并行高斯消去法运算量太大, 因而人们通常采用迭代方法求解方程, 为此, 本文将进一步深入研究并行迭代方法求解用于电磁兼容分析的 Costa 基结合脉冲基、RWG 基矩量法矩阵方程以及与之对应的高效率并行矩阵填充算法, 从而有助于解决复杂平台中多天线的电磁特性仿真这一具有

现实意义的重要课题。

2 基本原理

假设入射电场为 $\mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r})$, 根据导体表面 S 上切向电场连续条件和理想导体边界条件, 可得到电场积分方程 (EFIE):

$$\mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r})_{tan} = [\mathbf{j}\omega\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \nabla\Phi(\mathbf{r})]_{tan} \quad (1)$$

其中 \mathbf{r} 在 S 上。

为使计算模型通用化, 本文对金属导体表面采用三角形剖分、未知电流采用 RWG 基函数^[1,2]展开; 线上未知电流选用脉冲基函数^[1,2]展开; 导线与导体连接的区域 S 称之为连接域, 其上未知电流采用 Costa 基函数^[1,2]展开。采用伽略金法可得矩阵方程:

$$\mathbf{ZI} = \mathbf{V} \quad (2)$$

广义阻抗矩阵为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}^{BB} & \mathbf{Z}^{BW} & \mathbf{Z}^{BJ} \\ \mathbf{Z}^{WB} & \mathbf{Z}^{WW} & \mathbf{Z}^{WJ} \\ \mathbf{Z}^{JB} & \mathbf{Z}^{JW} & \mathbf{Z}^{JJ} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: \mathbf{Z}^{BB} , \mathbf{Z}^{BW} , \mathbf{Z}^{BJ} , \mathbf{Z}^{WB} , \mathbf{Z}^{WW} , \mathbf{Z}^{WJ} , \mathbf{Z}^{JB} , \mathbf{Z}^{JW} , \mathbf{Z}^{JJ} 分别表示维数为 $N_B \times N_B$, $N_B \times N_W$, $N_B \times N_J$, $N_W \times N_B$, $N_W \times N_W$, $N_W \times N_J$, $N_J \times N_B$, $N_J \times N_W$ 和 $N_J \times N_J$ 的阻抗矩阵。其中 $N_B = \sum_{i=1}^{Nb} N_{Bi}$, $N_W = \sum_{j=1}^{Nw} N_{Wj}$, $N_J = N_J$ 。这里, N_B , N_W 和 N_J 分别表示导体总的未知数数目、导线总的未知数数目和连接域总的未知数数目; N_{Bi} , N_{Wj} 和 N_j 分别表示导体 i 中的未知数数目、导线 j 中的未知数数目和连接点数目; Nb 和 Nw 分别表示导体数目和导线数目。可以看出: \mathbf{Z}^{BB} , \mathbf{Z}^{WW} 和 \mathbf{Z}^{JJ} 分别表征导体、导线和连接域自作用; 其它矩阵块则描述导体、导线和连接域之间的相互作用。

3 并行 CGN 方法与矩阵填充

为了扩大矩阵法的求解规模, 下面将结合 Conjugate Gradient Norm (CGN) 算法求解矩阵方程详加讨论并行矩阵法, 为此, 首先给出本文采用的 CGN 迭代算法。

3.1 CGN 算法

CGN 方法求解复线性方程组的一般步骤为:

$$\text{guess } \mathbf{X}_0; \mathbf{r}_0 = \mathbf{A}\mathbf{X}_0 - \mathbf{b}; \mathbf{P}_0 = -\mathbf{A}^+\mathbf{r}_0;$$

iterate; iterate ($n=1, 2, \dots$)

$$\alpha_n = -\frac{\langle \mathbf{A}\mathbf{P}_n, \mathbf{r}_{n-1} \rangle}{\|\mathbf{A}\mathbf{P}_n\|^2} = \frac{\|\mathbf{A}^+\mathbf{r}_{n-1}\|^2}{\|\mathbf{A}\mathbf{P}_n\|^2};$$

$$\mathbf{X}_n = \mathbf{X}_{n-1} + \alpha_n \mathbf{A}\mathbf{P}_n;$$

$$\beta_n = \frac{\|\mathbf{A}^+\mathbf{r}_n\|^2}{\|\mathbf{A}^+\mathbf{r}_{n-1}\|^2}; \mathbf{P}_{n+1} = -\mathbf{A}^+\mathbf{r}_n + \beta_n \mathbf{P}_n;$$

3.2 棋盘状划分的并行矩阵填充方式

由 3.1 可以看出 CGN 方法不仅需要计算阻抗矩阵 \mathbf{A} 与未知量 \mathbf{x} 的矩阵向量乘运算, 而且还要做阻抗矩阵的厄米矩阵相关的矩阵向量乘法运算。因此, 在并行计算时, 为

了使进程比较有效地同时计算矩阵向量乘与厄米矩阵向量乘运算, 本文将整体矩阵采用图 1 所示的棋盘状分布方式分配到各个进程, 图中同时也给出了阻抗矩阵的厄米矩阵的进程分布方式。



弱不均衡可忽略不计。

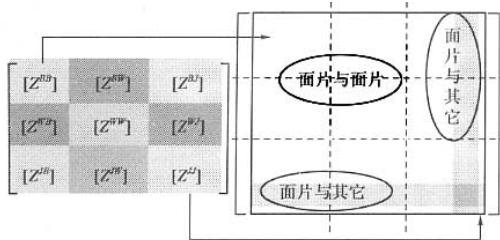


图 3 多线面连接问题矩阵法矩阵分布

3.3 并行 CGN 方法求解矩阵方程

接着我们讨论与这种填充方式相对应的并行 CGN 求解算法。由前可知,CGN 迭代解法中的关键计算是矩阵向量乘法运算,这种运算在串行程序中是不难实现的。对于并行化的 CGN 算法,问题的难点在于几个矩阵向量乘,为简单起见,归结为 $\mathbf{Ax}, \mathbf{A}^* \mathbf{x}$,只要把 $\mathbf{Ax}, \mathbf{A}^* \mathbf{x}$ 求出来,问题就解决了。因此首先讨论如何用并行求解 $\mathbf{Ax}, \mathbf{A}^* \mathbf{x}$ 。对于 \mathbf{Ax} ,以矩阵分成三行三列为例,如图 4(a)。

$$\begin{array}{ccc|ccc|ccc|c} a_{011} & a_{012} & a_{013} & a_{111} & a_{112} & a_{113} & a_{211} & a_{212} & a_{213} & x_{0361} \\ a_{021} & a_{022} & a_{023} & a_{121} & a_{122} & a_{123} & a_{221} & a_{222} & a_{223} & x_{0362} \\ a_{031} & a_{032} & a_{033} & a_{131} & a_{132} & a_{133} & a_{231} & a_{232} & a_{233} & x_{0363} \\ \hline a_{311} & a_{312} & a_{313} & a_{411} & a_{412} & a_{413} & a_{511} & a_{512} & a_{513} & x_{1471} \\ a_{321} & a_{322} & a_{323} & a_{421} & a_{422} & a_{423} & a_{521} & a_{522} & a_{523} & x_{1472} \\ a_{331} & a_{332} & a_{333} & a_{431} & a_{432} & a_{433} & a_{531} & a_{532} & a_{533} & x_{1473} \\ \hline a_{611} & a_{612} & a_{613} & a_{711} & a_{712} & a_{713} & a_{811} & a_{812} & a_{813} & x_{2381} \\ a_{621} & a_{622} & a_{623} & a_{721} & a_{722} & a_{723} & a_{821} & a_{822} & a_{823} & x_{2382} \\ a_{631} & a_{632} & a_{633} & a_{731} & a_{732} & a_{733} & a_{831} & a_{832} & a_{833} & x_{2383} \end{array}$$

(a) 矩阵与向量相乘

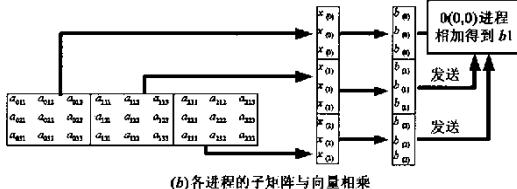


图 4

图 4(a) 中, a 下标的第一位表示进程, x 下标的前三位表示向量段存在于该数字表示的三个进程中。若令 $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, 则其分块矩阵运算可以表示为:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

各子矩阵与向量段所相应的进程为:

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 3 & 4 & 5 \\ 6 & 7 & 8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0,3,6 \\ 1,4,7 \\ 2,5,8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1,2 \\ 3,4,5 \\ 6,7,8 \end{pmatrix}$$

矩阵 A 分为 9 个分块矩阵, 每块矩阵分别存在一个进程中, 向量 x 分为 x_1, x_2, x_3 三个向量, x_1 存在进程 0, 3, 6 中, x_2 存在进程 1, 4, 7 中, x_3 存在进程 2, 5, 8 中。 A_{11}, A_{12}, A_{13} 分别与 x_1, x_2, x_3 相乘, 则进程 0, 1, 2 分别有向量 b_1, b_2, b_3 。

三个不同进程的 b_1 相加后即可得到整体的 b_1 , 结果存在 0 进程, 其计算原理如图 4(b) 所述。同理, 进程 3 得到整体的 b_2 , 进程 6 得到整体的 b_3 , 其中, x, b 下标括号内数字表示要利用该数字表示的进程中的向量段。把 b_2, b_3 传递给 0 进程即可得到所求的 \mathbf{Ax} 乘积, 记为向量 b 。类似可以求解 $\mathbf{A}^* \mathbf{x}$, 此处不予详述。

为了程序实现上的简单, 0 进程获得了矩阵向量相乘的结果 b 向量以后, 广播给所有进程。这样就可以方便的进行 CG 算法要求的其他矩阵向量乘、向量加、向量减等运算。

4 MPI 工作网络

本文应用的 PC 集群系统, 其模型如图 5 所示, 系统主要参数为: 10 节点; 每个节点 2.8GHz CPU, 1.0G Bytes 内存; 100/1000Mb/s 高速网卡; 1000Mb/s 交换机。

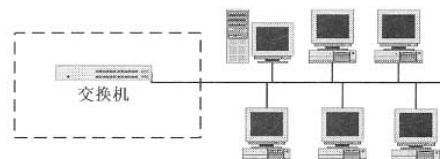


图 5 MPI 工作网络

5 并行 FDTD 性能测试与应用

5.1 算法验证

首先验证本文并行矩阵法程序的有效性。如图 6, 中心频率为 300MHz 的单极天线 1, 2 分别垂直与圆锥台表面放置, 计算两天线隔离度。

圆锥台尺寸: 下底面半径 2.4 米、上底面半径 0.66 米, 高度 4.0 米; 单极天线 1 上、下端点坐标: (0, 1.8482, 2.1376)、(0, 1.53, 2), 半径 0.00281 米; 单极天线 2 上、下端点坐标: (1.8482, 0, 2.1376)、(1.53, 0, 2), 半径 0.00281 米。

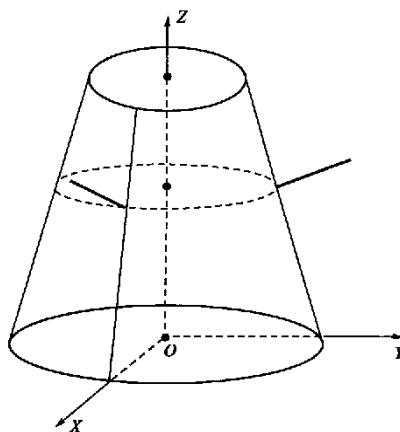


图 6 两工作单极天线垂直锥台放置

图 7 给出了本文并行 MoM 计算的隔离度随频率变化

的结果,可见与商业软件 FEKO 吻合良好.

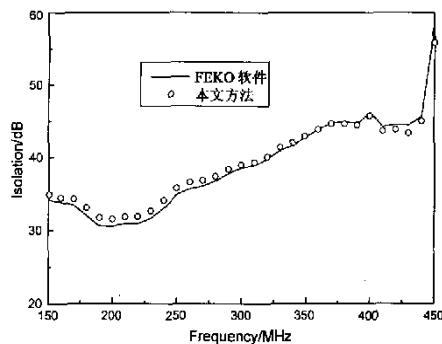


图 7 隔离度随频率变化曲线

5.2 并行性能测试

假设某飞行器模型表面按照最大边不超过 $1/10$ 波长来划分三角形(局部需要细化三角形),那么 100MHz 时其散射特性的 MoM 计算(采用双精度)具有几万个未知量,目前这在普通 PC 机上是难以实现的.为了测试算例,此处选取了 12150 个未知量的剖分情况,将并行矩量法运行于上述 PC 集群系统,则可得到其散射特性.假设 E_z 沿着 $-x$ 方向入射,则表面电流(dB 值)分布如图 8 所示.

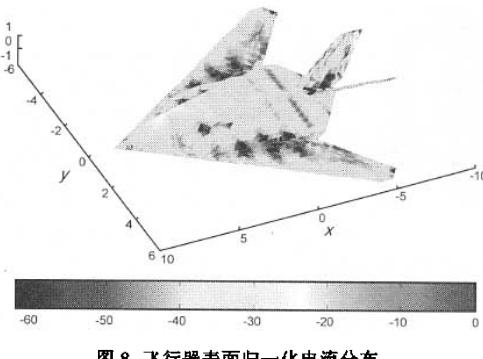


图 8 飞行器表面归一化电流分布

表 1 不同节点时并行矩量法性能比较

| 节点个数 | 填充时间 | 求解时间 | 总时间 |
|------|----------|------------|--------|
| 4 | 3 分 33 秒 | 153 分 27 秒 | 9420 秒 |
| 9 | 1 分 49 秒 | 68 分 3 秒 | 4193 秒 |

利用不同 CPU 个数时,矩量法矩阵填充与求解测试时间(具体时间与精度有关,收敛精度定为 0.05)的情况列在表 1 中.当 CPU 个数从 4 变到 9 时,矩阵填充加速了 1.954 倍,方程求解加速了 2.25 倍.尽管本文并行填充算法可以避免同一个节点中面片作用的重复计算,但是由于棋盘状划分的矩阵在填充时不同节点中的相同面片仍然可能有少量的重复运算,所以不能达到理想中的加速 2.25 倍;而求解时各节点之间无重复运算,所以可以加速 2.25 倍.总体而言,并行矩量法计算加速了 2.246 倍,非常接近于 2.25.可见,这种并行矩量法求解大型复杂问题时,是能够获得趋近理想值的线性加速比性能的.

5.3 应用实例

某客机机头模型上放置三根四分之一波长的单极天线,计算模型如图 9 所示.本文开发的并行计算软件所得立体方向图如图 10 所示.

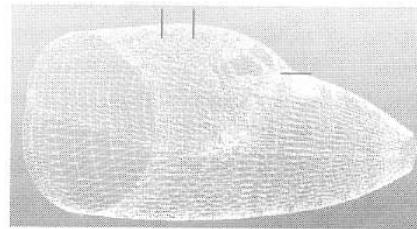


图 9 某飞机头上三根工作的单线天线

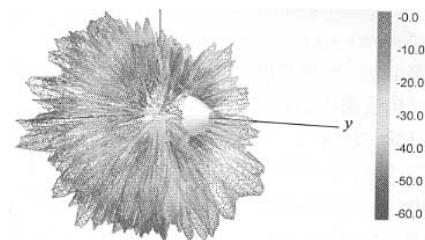


图 10 机头多天线辐射方向图

6 结束语

本文针对电磁兼容中复杂载体多天线特性分析这一工程难题,采用 Costa 基函数多线面连接结构进行建模,进一步设计了具有较高加速比性能的并行矩阵填充算法与并行 CGN 迭代算法,数值结果表明了本文方法的有效性.本文 PC 集群并行矩量法为电大复杂形状载体中多天线电磁兼容分析提供了低成本、高效率的解决途径.

参考文献:

- [1] M F Costa, R F Harrington. Electromagnetic Radiation and Scattering From A System of Conducting Bodies Interconnected By Wires [D]. Diploma, Instituto Superior Tecnico, Lisbon, Portugal. 1976. M. S. E. E., Syracuse University, Syracuse, New York, 1979.
- [2] 万继响,张玉,梁昌洪.任意导体与线天线连接问题的 MoM 分析[J].电波科学学报,2003,18(5):523-528.
WAN Ji-xiang, ZHANG Yu, LIANG Chang-hong. Method of moment analysis of connect between wire antennas and arbitrary shape conductors [J]. CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE. 2003, 18 (5): 523 - 528. (in Chinese)
- [3] Shen Xianneng. Application of massively parallel architecture to computational electromagnetics [M]. Tech Report of Syracuse University, 1994.
- [4] 都志辉.高性能计算并行编程技术[M].北京:清华大学出版社,2001.
Zhihui Du. Programming technique for high perform-

- ance computation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
- [5] 张玉, 梁昌洪. 并行 UTD 算法及在机载天线分析中的应用 [J]. 电子学报. 2003, 31(3): 332 - 334.
ZHANG Yu, LIANG Chang-hong. Parallel UTD algorithm and its application to the analysis of airborne antennas [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA. 2003, 31(3): 332 - 334. (in Chinese)
- [6] 张玉, 苏涛, 翟会清, 梁昌洪. PC 群集系统中并行矩量法研究 [J]. 电子学报. 2003, 31(9): 1368 - 1371.
ZHANG Yu, SU Tao, ZHAI Hui-qing. Study on applications of parallel MoM on PC clusters [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA. 2003, 31(9): 1368 - 1371. (in Chinese)
- [7] 张玉, 宋健, 梁昌洪. 并行共形 FDTD 算法及其在 PBG 结构仿真中的应用 [J]. 电子学报. 2003, 31(12A): 2142 - 2144.
ZHANG Yu, SONG Jian, LIANG Chang-hong. Study on the parallel modified locally conformal FDTD algorithm on cluster of PCs for PBG structures [J]. 2003, 31(12A): 2142 - 2144. (in Chinese)
- [8] ZHANG Yu, SONG Jian, and LIANG Changhong. MPI based parallelized locally conformal FDTD for modelling slot antennas and new periodic structures in microstrip [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2004, 18(10): 1321 - 1335.
- [9] ZHANG Yu, LIANG Changhong, WANG Meng, CUI Bin, TAN Yuanyang. MPI based parallel UTD with ana-

lytical methods to determine reflection points on cylinders and cones [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2005, 19(3): 355 - 371.

作者简介:



张玉 男, 1978 年生于安徽淮北, 主要从事电磁场数值计算, 并行计算, 复杂系统天线间电磁兼容分析等方面工作.
E-mail: zhangyu_xidian@163.com



王楠 男, 1981 生于辽宁凌源, 现为西安电子科技大学电磁场与微波技术专业博士研究生, 主要从事电磁兼容分析工作.



梁昌洪 男, 1943 生于上海, 教授, 博士导师, 曾任西安电子科技大学校长, 中国电子学会会士, IEEE Senior member, 研究方向包括计算微波、微波网络理论、电磁散射与逆散射、电磁兼容等方面.

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>