

文章编号 1005-0388(2003)05-0491-05

腔基微带天线的矢量 有限元——边界积分方法分析^{*}

班永灵 周乐柱

(北京大学信息科学与技术学院电子学系, ho_tvfem@std. uestc. edu. cn, 北京 100871)

摘要 该文将矢量有限元——边界积分(Edge-Based FE-BI)混合方法用于腔基微带贴片线的辐射特性分析。分别计算了在无阻抗负载和加有阻抗负载两种情况下的输入阻抗,以此验证了该混合方法的正确性;然后计算了贴片天线表面缝隙部分的场分布,验证微带天线分析模型——传输线模型的合理性;最后计算了E面、H面方向图以及相应的交叉极化方向图。

关键词 有限元, 边界积分, 微带贴片天线, 方向图, 输入阻抗

中图分类号 TN82 文献标识码 A

A hybrid edge-based finite-element and boundary-integral method for analysis of by cavity-backed microstrip patch antennas

BAB Yong-ling ZHOU Le-zhu

(Department of Electronics, Peking University,
ho_tvfem@std. uestc. edu. cn, Beijing 100871, China)

Abstract In this paper, the hybrid edge-based finite element and boundary-integral method is used for radiation properties of microstrip patch antenna residing in a cavity recessed in a ground plane. The hybrid method combines the edge-based finite-element and boundary integral methods to formulate a system for the solution of the fields at the aperture and those inside the cavity. By virtue of the finite element method, the method is applicable to various patch antennas residing on or embedded in a layered dielectric substrate. Input impedance computed at the absence of impedance load and at the presence of impedance load is used for the numerical validity of the hybrid method. The aperture field distribution is presented for demonstrating the rationality of the transmission model-microstrip antennas analysis model. Finally, cross-polarization radiation patterns of E-plane and H-plane are obtained.

Key words edge-based finite-element, boundary integral, cavity-backed microstrip patch antennas, radiation pattern, input impedance

1 引言

微带贴片天线以其剖面薄, 易于载体共形, 馈电

网络与天线结构一起集成等优点, 已广泛应用于军事(导弹, 卫星)、民用便携式设备上。对于这种结构的天线, 解析方法已不适用, 常用的数值分析方法

* 收稿日期: 2002-12-24.

基金项目: 国家自然科学基金(600710167), 教育部博士点基金(20010001037)资助项目

有：积分方程法、有限元法、时域有限差分法等。积分方程法通过适当的格林函数考虑进了索末菲辐射条件，使离散区域保持到最小（例如小到天线表面），但它对复杂的结构、特别是带腔的结构难以实现，且形成满秩矩阵，其处理需要较大的内存量和计算时间；有限元法适用于任意复杂的结构，而且产生稀疏的带状矩阵，但当单独使用有限元方法时，要求将离散区域扩展到远离源区处才可强加辐射条件或者引入适当的吸收边界条件或完全匹配层，增加了变量的数目和计算复杂度。有限元—边界积分方法则将两者结合起来。它的一般原理是引入一个包围结构或非均匀目标的虚构边界，在这个边界内部的场用有限元方法的公式给出，外部区域的场用边界积分表达。这两个区域中的场在虚构边界上通过场的连续性耦合起来，从而得到一个内部和边界场解的耦合方程组。这样，既克服了两者的缺点，又保留了它们的优点。值得指出的是，在三维电磁场的有限元分析中，矢量有限元（边棱元）由于其特有的优点已逐渐取代传统的有限元（节点元）^[1,2]。已有不少文献报道了有关的研究，其中，文献^[3,4]分别将有限元加边界积分混合方法应用于三维腔基微带贴片天线的散射特性分析（雷达散射截面）与辐射特性（输入阻抗），但用的是传统有限元，不是矢量有限元。本文则将矢量有限元——边界积分混合方法用于腔基微带贴片天线的辐射特性分析。首先给出了FE—BI混合方法的公式，然后分别计算了在无阻抗负载和加有阻抗负载两种情况下的输入阻抗，验证了该混合方法的正确性；还计算了贴片天线表面缝隙部分的场分布，确证微带天线分析模型—传输线模型的合理性；最后计算了E面、H面方向图以及相应的交叉极化方向图。

2 矢量有限元—边界积分(Edge-Based FE—BI)方法公式

所考虑的微带贴片天线的一般结构如图1。图中，微带贴片位于或镶嵌在基片上，而基片座放置在一个腔体中，腔体凹陷在一个导电面内。

腔体内及表面缝隙 S_a 上的场可通过下述变分问题求得

$$\begin{cases} \delta F(\mathbf{E}) = 0 \\ \mathbf{n} \times \mathbf{E} = 0 \end{cases} \quad \text{在导电壁上}$$

其中^[3]

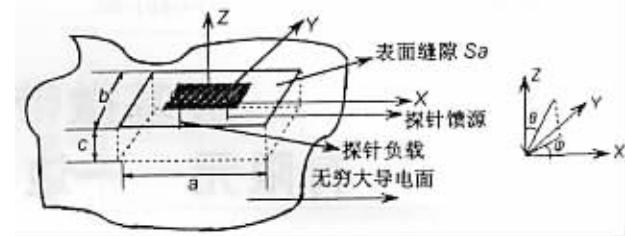


图1 腔基微带贴片天线几何结构

$$\begin{aligned} F(\mathbf{E}) = & \frac{1}{2} \iiint_v \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 \epsilon \mathbf{E} \cdot \mathbf{E} \right] dV + \\ & \iiint_{v_s} \left[jk_0 z_0 \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} - \frac{1}{\mu_r} \mathbf{M} \cdot (\nabla \times \mathbf{E}) \right] dv - \\ & k_0^2 \iint_{S_a} [\mathbf{z} \times \mathbf{E}(r)] \cdot \left\{ \iint_{S_a} [\mathbf{z} \times \mathbf{E}(r')] G_0(r, r') dS' \right\} dS + \\ & \iint_{S_a} \{ \nabla \cdot [\mathbf{z} \times \mathbf{E}(r)] \} \cdot \left\{ \iint_{S_a} G_0(r, r') \nabla' \cdot \right. \\ & \left. [\mathbf{z} \times \mathbf{E}(r')] dS' \right\} dS \end{aligned} \quad (1)$$

其中 V 是整个腔体， v_s 是仅包含馈源的腔体部分， \mathbf{J} 和 \mathbf{M} 分别是源电流，源磁流， S_a 是表面缝隙部分，相关的积分已通过格林函数考虑了索末菲辐射条件。

针对腔基贴片天线的腔具有大而薄的特点，本文采用矩形块（六面体）单元离散有限元区域腔体。腔中每个单元内任意一点的场 \mathbf{E}^e 可用电场矢量在其边棱上的分量 E_i^e 展开为

$$\mathbf{E}^e = \sum_{i=1}^{12} E_i^e \mathbf{N}_i^e = \{E^e\}^T \{\mathbf{N}^e\} = \{\mathbf{N}^e\}^T \{E^e\} \quad (2)$$

其中， \mathbf{N}_i^e 是矢量有限元的矢量型基函数^[4]， $\{\mathbf{N}^e\}$ 和 $\{E^e\}$ 分别为包含第 e 个单元矢量基函数和展开系数的列向量。

腔体开口面 S_a 被分成许多小的面单元，每个面单元中任意一点的表面场 \mathbf{E}^s 可用电场矢量在面单元边棱上的分量 E_i^s 展开为

$$\begin{aligned} \mathbf{z} \times \mathbf{E}^s &= \sum_{i=1}^4 E_i^s \mathbf{S}_i^s = \{E^s\}^T \{\mathbf{S}^s\}^T \\ &= \{\mathbf{S}^s\}^T \{E^s\} \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $\mathbf{S}_i^s = \mathbf{z} \times \mathbf{N}_i^s$ 为表面矢量型基函数。

将(2)、(3)式代入(1)式中，得到

$$\begin{aligned} F = & \frac{1}{2} \sum_{e=1}^M \{E^e\}^T [\mathbf{K}^e] \{E^e\} + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{M_s} \sum_{t=1}^{M_s} \{E^s\}^T \\ & [\mathbf{P}^s] \{E^s\} - \sum_{e=1}^{M_f} \{E^e\}^T \{b^e\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 M 是体单元的总数， M_s 是组成腔体开口面的

面单元总数, M_f 是馈源部分的棱边总数, 指标 s, t 分别表示表面的第 s, t 个单元, $\{\mathbf{S}^s\}, \{\mathbf{S}^t\}$ 分别为包含表面第 s, t 单元矢量基函数的列向量, 单元矩阵和向量为

$$[\mathbf{K}^e] = \iiint_{V^e} \left[\frac{1}{\mu_r^e} \{\nabla \times \mathbf{N}^e\} \cdot \{\nabla \times \mathbf{N}^e\}^T - k_0^2 \epsilon_r^e \{\mathbf{N}^e\} \cdot \{\mathbf{N}^e\}^T \right] dV \quad (5)$$

$$[\mathbf{P}^s] = 2 \iint_{S_a} \{\nabla \cdot \mathbf{S}^s\} \left[\iint_{S_a} \{\nabla' \cdot \mathbf{S}^t\}^T G_0 dS' \right] dS' - 2k_0^2 \iint_{S_a} \{\mathbf{S}^s\} \cdot \left[\iint_{S_a} \{\mathbf{S}^t\}^T G_0 dS' \right] dS \quad (6)$$

$$\{b^e\} = - \iiint_{V^e} [jk_0 z_0 \mathbf{J} - \frac{1}{\mu_r^e} \mathbf{M} \cdot \{\nabla \times \mathbf{N}^e\}] dV \quad (7)$$

使用全局编码,(4)式可写为

$$F = \frac{1}{2} \{E\}^T [\mathbf{K}] \{E\} + \frac{1}{2} \{E\}^T [\mathbf{P}] \{E\} - \{E\}^T \{b\} \quad (8)$$

其中 $[\mathbf{K}]$ 和 $[\mathbf{P}]$ 是 $N \times N$ 方阵, 它们分别是由 $[\mathbf{K}^e]$ 和 $[\mathbf{P}^s]$ 组合而成, N 表示单元棱边总数。 $\{E\}$ 是 $N \times 1$ 的列向量, 表示棱边场; $\{b\}$ 是 $N \times 1$ 的已知向量, 表示馈源激励。取泛函 F 对每个棱边场; E_i 的偏导数, 并令其为 0, 得到一方程组

$$[\mathbf{A}] \{E\} = \{b\} \quad (9)$$

其中 $[\mathbf{A}] = [\mathbf{K}] + [\mathbf{P}]$, 强加边界条件, 即可求解上面的方程组。

3 天线馈源及负载阻抗的模拟

探针馈源是一种经常使用的天线激励源, 对薄介质基片, 探针馈源可用电流丝线代替。在这种情况下, 馈源对向量 $\{b^e\}$ 的贡献简化为

$$\{b^e\} = -jk_0 Z_0 I L \iint_{S_a} z \cdot \{\mathbf{N}^e\} \delta(x - x_f) \delta(y - y_f) dxdy \quad (10)$$

其中 I 表示丝线的电流, L 是它的长度, (x_f, y_f) 表示它的位置。

Z_L 阻抗负载可模拟为一个连接贴片和腔体底部的具有有限导电率的杆。假设该杆具有长度 L , 横截面 s , 那么, 该杆所需要的电导率必须是 $\alpha = L / (Z_L s)$ (或者, 当杆的材料即 α 给定为有限值时, 可调节杆长 L , 使 $L = \alpha Z_L s$), 因此, 它对矩阵 $[\mathbf{K}^e]$ 的贡献是

$$[\mathbf{K}^e] = \frac{jk_0 Z_0 L}{Z_L s} \iiint_{V^e} \{\mathbf{N}^e\} \cdot \{\mathbf{N}^e\}^T dV \quad (11)$$

其中积分是在杆的体积内。在本文的计算中, 假设杆很细, 则

$$[\mathbf{K}^e] = \frac{jk_0 Z_0 L^2}{Z_L} \iint \{\mathbf{N}^e\} \cdot \{\mathbf{N}^e\}^T \delta(x - x_L) \gamma(y - y_L) dxdy \quad (12)$$

其中, (x_L, y_L) 表示阻抗负载的位置。另外, 如果细杆与第 i 个棱边重合, 那么它只对矩阵 $[\mathbf{K}]$ 的对角线的项有贡献, 且该贡献为 $jk_0 Z_0 L^2 / Z_L$ 。

4 数值算例

针对图 2 的腔基微带贴片天线, 本文分别计算了该天线的表面电场、方向图及输入阻抗的分布。

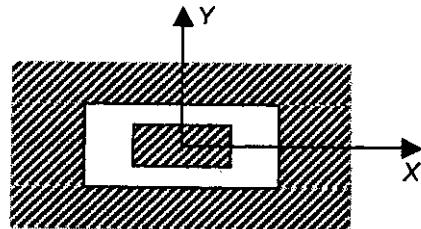


图 2 矩形贴片(大小为 $5.0\text{cm} \times 3.4\text{cm}$)位于厚度为 $h=0.08779\text{cm}$, $\epsilon_r=2.17$, 损耗正切角为 0.0015 的介质基片上, 该介质基片位于 $7.5\text{cm} \times 5.1\text{cm} \times 0.08779\text{cm}$ 的长方体腔内, 腔体镶嵌在导电平面内, 贴片由一电流探针(位于 $x_f=1.22\text{cm}$, $y_f=0.85\text{cm}$ 处)激励, 负载位于 $x_L=2.2\text{cm}$, $y_L=1.5\text{cm}$ 处

4.1 输入阻抗的计算

探针模型的输入阻抗可简单地计算为在馈电点处的电压与放在贴片与导电面间的激励电流之比:

$$J = zI\delta(x - x_f)\delta(y - y_f) \\ R_{in} + jX_{in} = -\frac{1}{I^2} \iiint E \cdot J dV \quad (13)$$

针对图 2 中的模型, 本文分别计算了在无阻抗负载时和加有阻抗负载时该天线的输入阻抗。图 3 和图 4 给出了本文的计算结果与文献[4]的计算结果及文献[5]测量结果的比较。输入阻抗的准确性计算是天线模拟分析的难点之一。本文计算仅用少数几个网格来模拟探针, 就得到了比较好的结果, 证明了矢量有限元——边界积分混合方法的精确性和有效性。

4.2 贴片天线表面电场分布及方向图

在 1 单位电流(1A)做激励源的条件下, 计算了无阻抗负载、频率取 1.96724G 时天线表面的电场(E_x, E_y)分布以及方向图, 图 5~图 7 给出了计算

结果。

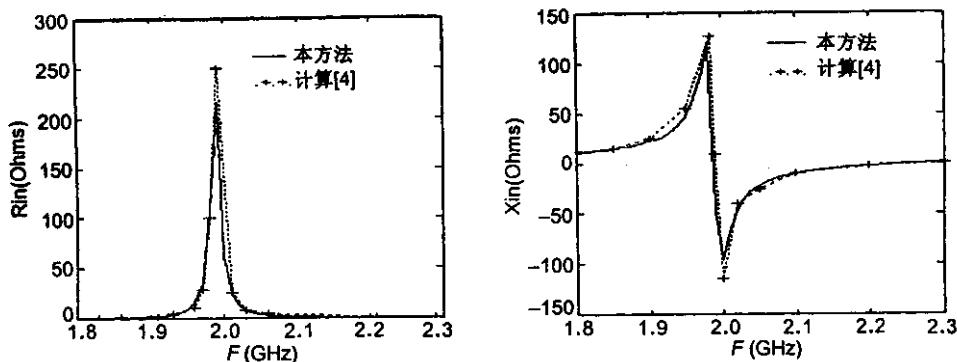


图 3 无阻抗负载时腔基微带天线的输入阻抗

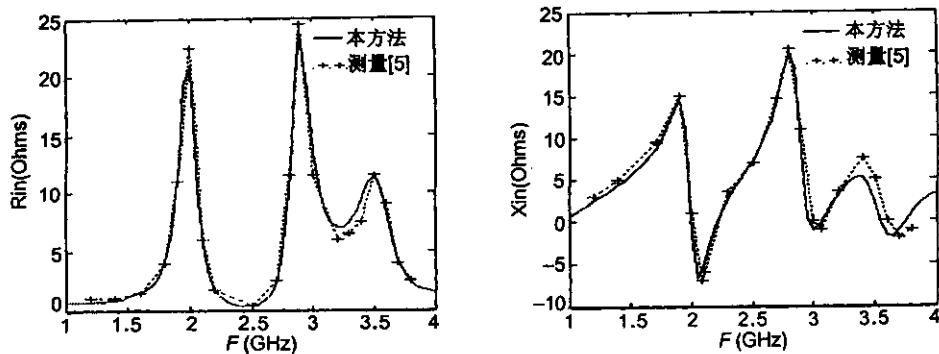


图 4 加有阻抗负载时腔基微带天线的输入阻抗

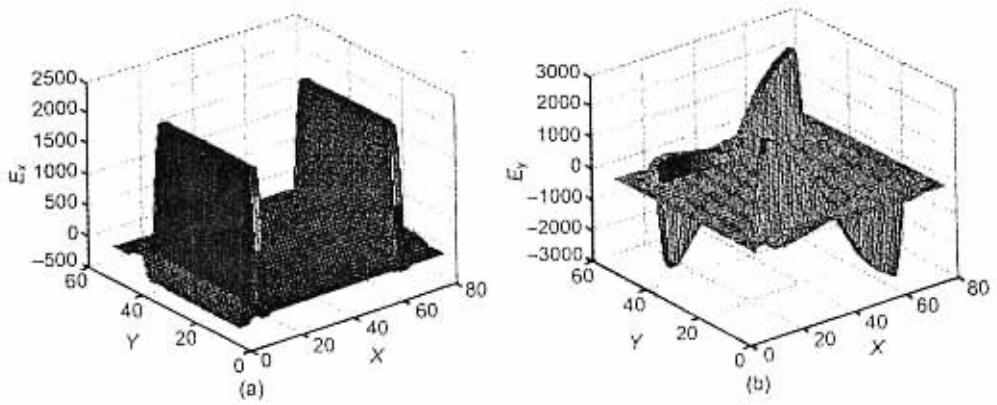


图 5 天线的表面电场(E_x, E_y)分布

从图 5 可看出, 沿 y 轴的两条窄缝的表面电场是同相位的, 近似呈均匀分布, 而沿 x 轴的两条窄缝的表面电场呈反对称分布。因此该腔基微带天线的辐射主要由沿 y 轴的两条窄缝形成。窄缝表面的这种场分布形式也是微带天线的传输线分析模型的

基础, 从而保证了传输线模型用于解决微带天线问题的合理性。

天线主要向上半空间辐射, 对上半空间而言, 无穷大导电面的效应近似引入磁流 M 的正镜像。图 6 给出了 E 面和 H 面功率方向图, 图 7 分别给出了

E 面、H 面的交叉极化方向图。从图 7 可看出, E 面方向图中最大的交叉极化电平是 -30.9 dB, H 面方向图中最大的交叉极化电平也是 -30.9 dB。

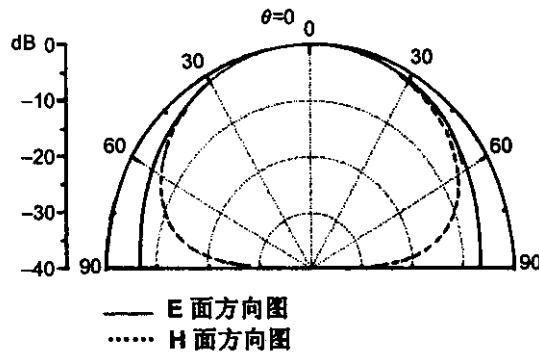


图 6 天线的功率方向图

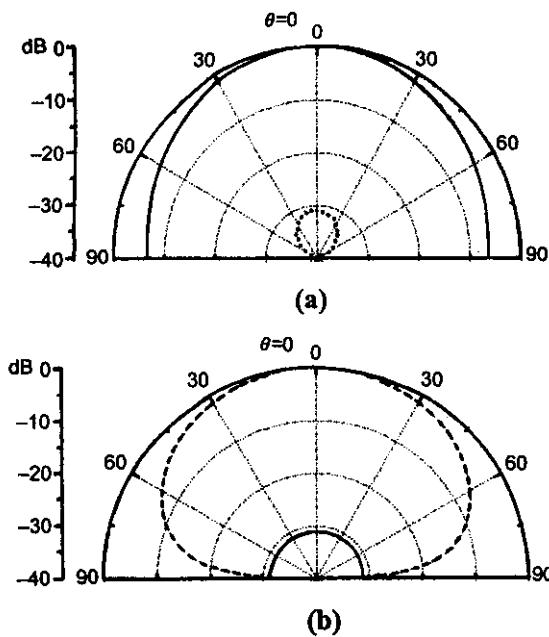


图 7 交叉极化方向图
(a:E 面, b:H 面) — $E_\theta \cdots \cdots E_\phi$

5 结论

本文基于矢量有限元—边界积分混合方法计算了微带贴片天线的方向图与输入阻抗,采用天线的表面作为有限元计算的边界区域,使有限元的计算区域达到最小。针对微带天线厚度相对特别小的结构,剖分采用了六面体(矩形块)单元,仅剖分了 340 个左右的六面体就得到了与其它文献相一致的

结果,验证了本文公式和有关程序的正确性。矢量有限元—边界积分混合方法适合处理复杂的几何结构和边界条件,相比较有限元其它的边界处理方法,它对存储量的需求也较小。作者将根据本文的方法和程序对更复杂结构的天线进行进一步的分析和研究。

参考文献

- [1] 金建铭(美)著,王建国译. 电磁场有限元方法[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1998.
- [2] 周乐柱. 边棱元法——一种模拟和分析电磁场的新型计算方法[J]. 电子学报,1994,2(12):1~7.
- [3] J M Jin and J L Volakis. A finite element boundary integral formulation for scattering by three-dimensional cavity backed apertures [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. 1991,39(1):97~104.
- [4] J M Jin and J L Volakis. A hybrid finite element method for scattering and radiation by microstrip patch antennas and arrays residing in a cavity[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. 1991,39 (11):1598~1604.
- [5] D P Forrai and E H Newman. Radiation and scattering from loaded microstrip antennas over a wide bandwidth [J]. Ohio State University Technical Report 719493-1, Sept, 1988.



班永灵 (1978-),男,河南人,硕士生,2000 年毕业于山东大学数学学院信息与计算科学系获理学学士学位,同年考入北京大学电子学系攻读硕士研究生。现主要从事有限元混合算法及微带天线分析方面的研究。

周乐柱 (1944-),男,贵州人,北京大学教授、博士生导师,CIE 会士,IEEE 高级会员。分别于 1968 年,1981 年在北京大学物理系,电子学系获理学学士,理学硕士学位,毕业后留校任教至今。1991 年 8 月~1993 年 3 月在英国伦敦大学学院作高级访问学者,1994 年 10 月~1997 年 1 月在英国曼彻斯特科技大学(UMIST)作研究教授。长期从事电磁场理论及微波技术方面的科研和教学工作,已发表论文,专著和教材等几十篇本。当前主要研究兴趣是计算电磁学及其应用(散射、天线、微波器件)。

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>