

文章编号: 1001-4322(2013)11-2949-05

# 66 单元三角形栅格径向线阵列天线馈电系统\*

马 睿, 刘庆想, 李相强, 张健穹

(西南交通大学 物理科学与技术学院, 成都 610031)

**摘要:** 提出了三角形栅格布局的多单元径向线子阵的设计思想, 根据该子阵馈电系统耦合量的需求, 设计了一种新型耦合探针, 并基于此探针, 对中心频率为 2.856 GHz 的 66 单元三角形栅格径向线子阵的馈电系统进行了分析和设计。仿真计算结果证明: 该 66 单元三角形栅格径向线子阵馈电系统在中心频率处基本实现了 66 路等幅馈电, 在 2.78~2.92 GHz 的频带范围内, 反射系数小于 0.1。此外对加载单元天线的 66 单元阵列辐射特性进行了仿真计算, 进一步验证了该馈电系统设计的可行性。

**关键词:** 三角形栅格; 矩形径向线; 耦合探针; 馈电网络

**中图分类号:** TN811; TN814      **文献标志码:** A      **doi:**10.3788/HPLPB20132511.2949

随着高功率微波技术迅猛的发展, 高功率微波天线也日益受到人们的重视<sup>[1]</sup>。而作为近年来提出的一种新型高功率微波辐射天线, 高功率径向线螺旋阵列天线也受到了广泛的研究: 单层、双层圆环形径向线螺旋阵列<sup>[2-4]</sup>的研究有力地证明了径向线在实现阵列天线小型化、高效率等方面的可行性, 之后为了实现高增益而研究和设计了 16 单元矩形栅格形式的组合式径向线螺旋子阵<sup>[5-6]</sup>, 并在此基础上设计了 12 单元三角栅格布局的径向线子阵<sup>[7-8]</sup>。上述组合式径向线阵列天线是通过多级级联和多个矩形封口子阵间的组合来实现高增益的, 因此, 在组合形成大型天线阵时, 由于子阵单元数目较少, 则需要较多子阵进行组合, 从而导致下级功分系统较为复杂。为了在实现高增益的同时能减少系统级联复杂程度, 从而降低其插入损耗, 人们又提出了通过增大子阵单元数来减少级联, 从而在实现高增益的同时不会产生较大的损耗, 并对 64 单元的矩形栅格径向线螺旋子阵<sup>[9]</sup>的馈电系统进行了研究和设计, 仿真结果与实验研究都很好地证明了该设计思想的可行性。在天线的阵列布局设计上, 矩形栅格和三角形栅格布局是两种最常用的具有可拼接性的布局结构, 矩形栅格布局因结构对称而较三角形栅格布局更易于实现, 然而, 三角形栅格形式的阵列较矩形栅格的阵列在相同栅瓣条件下, 可节省 16% 的单元个数, 这对于单元数较多的大型阵列而言, 可有效地节约系统成本<sup>[10]</sup>。正是基于上述目的, 本文对多单元三角形栅格径向线螺旋子阵进行了研究。在前期对 64 单元矩形栅格径向线螺旋子阵馈电系统研究的基础上, 选取数目相当的 66 单元三角形栅格径向线螺旋子阵进行了理论分析和设计。

## 1 基本结构与工作原理

三角形栅格径向线螺旋子阵的阵列结构如图 1 所示, 与矩形栅格径向线螺旋子阵的工作原理相同: 微波由径向线底板中心处的大同轴波导输入, 通过同轴-径向模式转换器实现从同轴馈电到径向线外形波的转化; 采用不同形式的耦合探针将径向线中相应位置处的能量由径向线上板的小同轴波导耦合输出, 通过调节各耦合探针即可实现微波的等幅分布; 单元天线与小同轴波导内导体相接从而受到激励, 实现同轴波导向辐射单元的馈电。

在馈电系统的设计中, 各耦合探针在径向线内呈三角形栅格排列, 选取单元间距为  $d=0.73\lambda$ , 其中  $\lambda$  为波长。因需通过多个子阵组合形成高增益阵列天线的考虑, 径向线外沿封口仍呈规则矩形, 且最外圈探针距封口外边缘的距离为相邻两个耦合探针间距的一半, 从而形成矩形平面阵列。

## 2 新型耦合探针的设计

阵列激励的均匀分布有利于提高天线的增益、口径效率和功率容量, 因此, 设计中要求在中心频率处, 馈电系统各端口输出耦合量近似一致, 即当输入功率为 1 W 时, 各端口输出耦合量应为  $\sqrt{1/n}$ 。由此可见, 单元数

\* 收稿日期: 2013-04-23; 修订日期: 2013-07-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(SWJTU11CX077; SWJTU12CX086; SWJTU11ZT10)

作者简介: 马 睿(1988—), 女, 硕士研究生, 从事高功率微波天线馈电系统研究; maria2003sea@163.com。

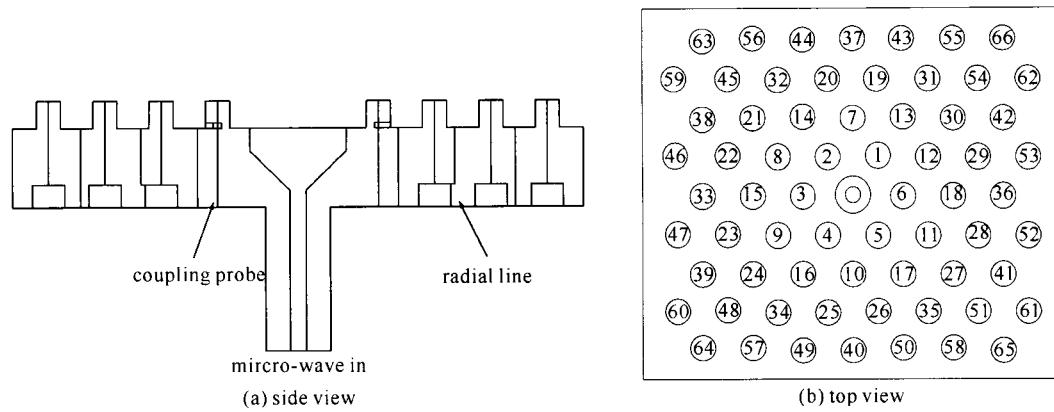


Fig. 1 Schematic diagram of triangle radial line feed network

图 1 三角形栅格径向馈电网络结构示意图

目越多,端口输出耦合量越小。因此,多单元径向线螺旋子阵馈电系统设计的首要问题在于寻求满足较小耦合量需求的探针形式。针对 66 单元子阵馈电系统输出的耦合量(约为 0.123)需求,本文研究了一种新型耦合探针形式,其结构如图 2 所示:该探针是在 L 型探针(结构如图 3 所示,  $R_d$  和  $H_d$  分别为圆柱底座半径和高度)基础上,在输出同轴外导体处加一定宽度的环,即可看作是一半径较小的同轴与半径较大同轴相接,通过调节加环内半径  $R_b$ 、加环厚度  $H_b$  即可实现一定的耦合量要求,因而称其为加环型探针。

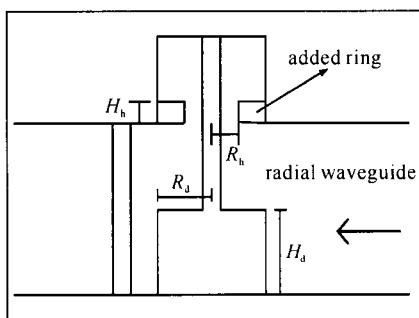


Fig. 2 Structure of coupling probe with ring

图 2 加环型探针结构

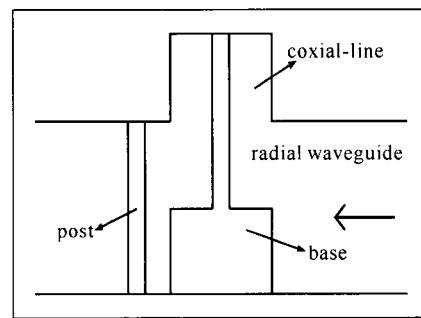


Fig. 3 Structure of L-shaped coupling probe

图 3 L型耦合探针结构

对该新型探针(加环型探针)耦合特性随相关结构尺寸变化规律进行了仿真研究,仿真结果显示该探针不仅能较大范围内调节耦合量,同时由于圆柱底座的存在,其耦合量随频率变化较平缓,即其幅频特性较好。另外,由于加环结构处于输出同轴内,因此并不会对径向线中的场产生扰动。根据耦合特性变化规律对该新型探针进行了设计,调节出了符合 66 单元三角栅格径向线螺旋子阵馈电系统输出耦合量要求的探针,并将其相关耦合特性与原有几种耦合量较小的探针<sup>[9]</sup>进行比较,结果如表 1 所示。

由表 1 可见,在该阵列布局下,加环型探针不仅耦合量能满足设计需求,同时,在相同的耦合量时,其平坦度较好,这有利于改善馈电系统的频带特性,因此,选取加环型探针作为 66 单元三角栅格阵列第一圈位置处的探针。

### 3 子阵馈电系统的仿真设计

由阵列天线理论可知,阵列天线各单元激励的均匀分布有利于提高天线的增益、口径效率和功率容量。激励单元相位的一致可以通过螺旋单元天线绕轴旋转来实现<sup>[2-3,11]</sup>,因此,在子阵馈电系统的设计中,仅需要保证在中心频率处,各个输出端口激励幅度的一致性,即耦合量的近似相等。

由于三角形栅格布局较矩形栅格布局的对称性差,各个输出口相对于输入口的位置不尽相同,因此,将处于以输入口为圆心的相同半径圆上的探针归为一组,则66个单元分为了10组(端口1-6,端口7-12,端口13-18,端口19-30,端口31-36,端口37-42;端口43-54,端口55-58,端口59-62,端口63-66),并以此由半径逐渐增加的顺序对各单元位置处的探针形式进行设计,端口标示如图1(b)所示。由此可见,三角形栅格布局的径向

Table 1 Comparison of coupling characteristics of different probe structures

coupling probe	reflecting coefficient	coupling coefficient	band flatness/dB
one-side post	0.251	0.125	3.52
probe with bearing and arm <sup>[9]</sup>	0.219	0.123	5.52
probe with ring	0.235	0.124	1.39

线阵列在实现等幅激励方面较矩形栅格形式的更为困难。

通过新型耦合探针的使用,已基本解决了多单元径向线阵列第一圈耦合量过大的问题,但在馈电系统的设计过程中发现,随着半径的不断增加,径向线内微波传输不再均匀,如图 4 所示,其中,画圈处为场强较集中位置,正是由于场强如此分布,导致最外圈各探针的耦合量很难实现近似等幅输出。研究发现,若径向线中的微波沿图 4 中箭头所示方向传播将有利于实现各单元耦合量的等幅输出。为此,通过对前圈探针立柱位置进行优化来改变微波传输路径,并根据不同位置处场强分布情况,选取不同耦合能力的探针,从而实现了各单元耦合量输出的近似相等。

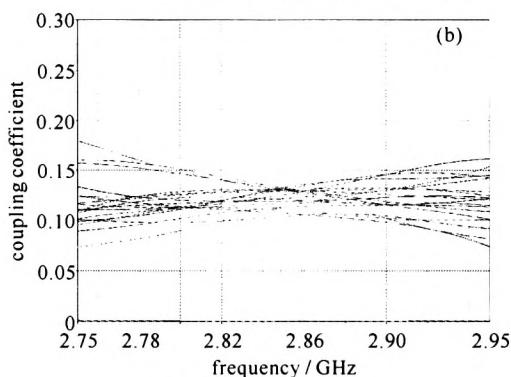
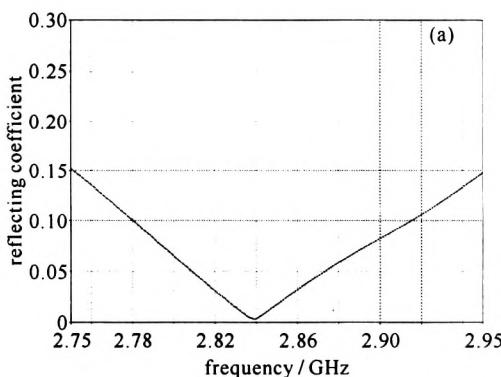


Fig. 5 Characteristic curves of 66-element sub-array feed network

图 5 66 单元子阵馈电系统相关特性曲线

采用有限积分法仿真软件,对该馈电系统进行了仿真计算,图 5 给出了子阵反射系数及各端口耦合系数曲线。由图可见,中心频率 2.856 GHz 处的阵列反射系数为 0.026,且在 2.78~2.92 GHz 的带宽范围内,反射系数均小于 0.1;中心频率处的耦合量波动度为 2.18 dB,基本实现了 66 单元的近似等幅馈电。但在低频部分,个别单元耦合曲线随频率变化较大,这与探针本身幅频特性及径向线内产生的高阶模式有关,因此,如何改善探针幅频特性以及尽可能地抑制高阶模的产生是需要进一步研究的问题。

#### 4 子阵辐射特性的研究

为了进一步验证多单元径向线子阵馈电系统的性能,将馈电系统与短螺旋天线<sup>[11]</sup>进行连接,并根据各端口的耦合相位值旋转单元天线以实现同相的设计要求。对中心频率 2.856 GHz 处的 66 单元三角形栅格螺旋阵列天线的辐射性能进行了研究,模拟计算得到的 66 单元子阵的反射系数曲线如图 6 所示,中心频率处的阵列反射系数为 0.056,较馈电系统本身的反射系数有所增大。

图 7 和图 8 分别是该子阵在中心频率下的方向图( $\varphi=0^\circ$  方向)和极化图, $\theta$  为方位角。表 2 总结了主要频点下子阵的辐射特性。在中心频率 2.856 GHz 下,子阵增益为 25.2 dB,轴比为 0.99,较好地实现了微波的圆极化辐射。

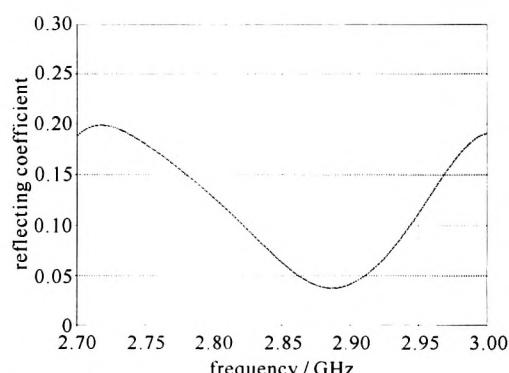
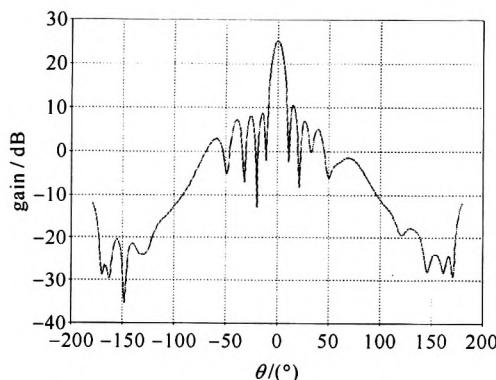
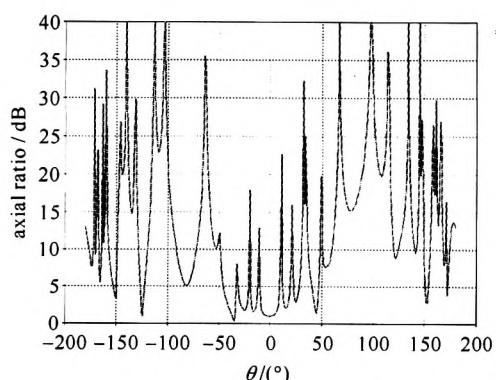


Fig. 6 Reflecting coefficient curve of 66-element sub-array  
图 6 阵列反射系数曲线

表 2 主要频点处 66 单元子阵辐射特性

Table 2 Radiation characteristics of 66-element sub-array antenna at two main frequencies

frequency/GHz	reflecting coefficient	gain/dB	angular width(3 dB)/(°)	dide lobe level/dB	axial ratio
2.856	0.056	25.19	9.3	-14.3	0.99
2.88	0.038	25.23	9.2	-13.8	0.93

Fig. 7 Pattern of 66-element sub-array ( $\varphi=0^\circ$ )图 7 66 单元子阵方向图( $\varphi=0^\circ$ )Fig. 8 Polarization of 66-element sub-array ( $\varphi=0^\circ$ )图 8 66 单元子阵极化图( $\varphi=0^\circ$ )

此外,根据仿真结果对该 66 单元三角形栅格径向线子阵的功率容量进行计算。取真空击穿场强为 45 MV/m。由模拟仿真结果可知,该子阵场强最大值为 1377 V/m,位于输入同轴内导体上,则计算可得子阵功率容量为 1.07 GW,满足了高功率容量的要求。如图 9 所示,馈电系统中场强最大值为 463 V/m,与 64 单元子阵馈电系统仿真结果相比有了较大的改进,证明上述功率容量优化方法的正确性。此时,单元天线的场强最大值为 607 V/m,可见,馈电系统并非是限制子阵实现高功率容量的因素。

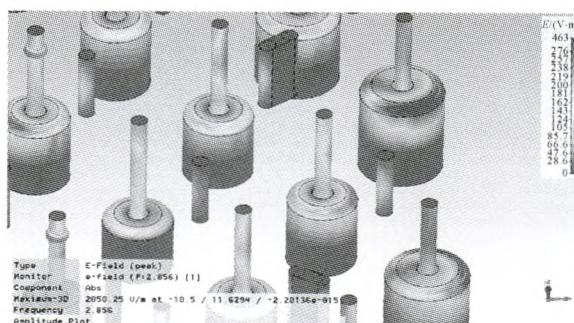


Fig. 9 Schematic diagram of electric field intensity of 66-element sub-array

图 9 66 单元子阵场强示意图

## 5 结 论

本文对 66 单元三角形栅格布局的径向线螺旋子阵进行了研究。为满足该阵列布局结构下多单元子阵输出口耦合量的要求,提出了一种新型耦合探针,模拟结果证明,该新型探针能在较大范围内有效地调节耦合量,且幅频特性较好。基于该新型耦合探针,对中心频率为 2.856 GHz 的 66 单元三角形栅格布局的径向线子阵馈电系统进行了研究和设计,模拟结果证明,该馈电系统在中心频率处基本实现了 66 路近似等幅馈电,且在 2.78~2.92 GHz 的频带范围内,反射系数小于 0.1。此外,对该 66 单元径向线子阵的辐射特性进行了研究,仿真结果证明,该阵列在中心频率下的增益可达 25.2 dB,轴比为 0.99,较好地实现了阵列天线的圆极化辐射,证明了多单元三角形栅格径向线子阵馈电系统设计的可行性。但个别端口耦合曲线随频率变化较大,这会影响整个系统的频带特性,因此,需要对探针幅频特性的改进及抑制高阶模产生的方法做进一步的研究。

## 参 考 文 献:

- [1] Nakano H, Takeda H, Kitamura Y, et al. Low-profile helical array antenna fed from a radial waveguide[J]. *IEEE Trans on Antennas Propagation*, 1992, **40**(3): 279-284.
- [2] 李相强, 刘庆想, 赵柳, 等. 3 圈 48 单元高功率径向线螺旋阵列天线研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(5): 843-846. (Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhao Liu, et al. 3-ring 48-element high power radial line helical array antenna. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(5): 843-846)
- [3] 李相强, 刘庆想, 赵柳, 等. 高功率单层径向线螺旋阵列天线的设计与模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(11): 1712-1716. (Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhao Liu, et al. High power helical array antenna fed from single-layered radial waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11): 1712-1716)
- [4] 李相强, 刘庆想, 赵柳, 等. 高功率双层径向线螺旋阵列天线实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(2): 265-268. (Li Xiangqiang, Liu

- Qingxiang, Zhao Liu, et al. Experiment research of high power helical array antenna fed from double-layered radial waveguide. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2): 265-268)
- [5] 赵柳, 李相强, 刘庆想, 等. 16单元矩形径向线螺旋阵列天线的理论分析和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(3): 431-434. (Zhao Liu, Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of 16-element rectangular helical array antenna fed from radial line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(3): 431-434)
- [6] 赵柳, 张健穹, 吴晓降, 等. 4单元矩形径向线螺旋阵列天线的理论分析和数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(11): 1869-1872. (Zhao Liu, Zhang Jianqiong, Wu Xiaojiang, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of 4-element rectangular helical array antenna fed from radial line. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(11): 1869-1872)
- [7] 张健穹, 刘庆想, 李相强, 等. 三角形栅格矩形径向线螺旋阵列天线的设计[J]. 电波科学学报, 2009, **24**(4): 583-587. (Zhang Jianqiong, Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, et al. Triangle grid radial line helix rectangular array antenna. *Chinese Journal of Radio Science*, 2009, **24**(4): 583-587)
- [8] 张健穹, 刘庆想, 李相强, 等. 三角形栅格矩形径向线螺旋阵列天线的设计与实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(4): 550-554. (Zhang Jianqiong, Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, et al. Design and experimental research on triangle-grid radial-line helical rectangular array antenna. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(4): 550-554)
- [9] 马睿, 刘庆想, 李相强, 等. 64单元矩形径向线阵列天线馈电网络的设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, **23**(11): 3131-3134. (Ma Rui, Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, et al. 64-element rectangular array antenna radial line feed network design. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(11): 3131-3134)
- [10] Skolnik M I. Radar handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [11] 李相强, 刘庆想, 赵柳. 短螺旋天线改进设计[J]. 微波学报, 2009, **25**(1): 51-54. (Li Xiangqiang, Liu Qingxiang, Zhao Liu. Amelioration of low-profile helix antenna. *Journal of Microwaves*, 2009, **25**(1): 51-54)

## Feed network of 66-element triangle-grid radial-line array antenna

Ma Rui, Liu Qingxiang, Li Xiangqiang, Zhang Jianqiong

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Multi-unit radial-line sub-array can be used to reduce cascade of array feed network, thus contributing to reducing the loss of the whole feed network, and triangle-grid arrangement can reduce the number of antenna units so as to reduce the cost effectively. Therefore, the design idea of multi-unit triangle-grid radial-line sub-array is proposed. Based on the required coupling amount of feed network, a new coupling probe is designed, and moreover a 66-element triangle-grid radial-line feed network at the center frequency of 2.856 GHz is designed. Simulation results show that, this feed network basically achieves an equal amplitude of 66 units' coupling coefficient, and in the frequency band from 2.78 GHz to 2.92 GHz, the reflection coefficient is lower than 0.1. In addition, simulation on the radiation characteristics of the feed network which is loaded with the antenna units is carried out, which further verifies the feasibility of the design.

**Key words:** triangle-grid; rectangular radial-line; coupling probe; feed network

## 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](http://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](http://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](http://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>