

# 磁窗天线增强等离子体鞘套透波特性研究

于哲峰<sup>1,2</sup>, 刘佳琪<sup>1</sup>, 任爱民<sup>1</sup>, 张生俊<sup>1</sup>, 马平<sup>2</sup>, 石安华<sup>2</sup>

(1. 试验物理与计算数学国家级重点实验室, 北京 100076;  
2. 中国空气动力研究与发展中心, 绵阳 621000)

**摘要:** 当飞行器以高超声速在大气层中飞行时, 周围形成的等离子体鞘套将影响电磁波的传播特性, 严重时传输完全中断(黑障)。外加强磁场可以形成“磁窗”, 有效地增强右旋圆极化电磁波在等离子体鞘套中传播时的透波特性, 但是在产生磁窗过程中(例如使用超导产生磁窗)有一系列的问题如磁体的重量和复杂性等需要克服。为解决这一问题, 提出了天线和强永磁体一体化综合设计的新思路——磁窗天线。设计出一种圆极化 GPS 天线, 它的表面贴片为对磁场影响很小的镀铜片, 接地板为稀土永磁体 NdFeB(钕铁硼), 永磁体同时也做为强磁场的发生装置。分析了圆极化 GPS 天线的性能和周围磁感应强度的分布, 估算了磁窗天线减缓通信中断的效果, 在所研究的情况下, 使用磁窗天线可以显著地提高等离子体鞘套的透波特性。

**关键词:** 磁窗天线; 等离子体鞘套; 黑障

**中图分类号:** O53      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2011)07-1564-05

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.07.019

## Research on Magneto Window Antenna for Improving Propagation Characteristic of Electromagnetic Wave in Plasma Sheath

YU Zhe-feng<sup>1,2</sup>, LIU Jia-qi<sup>1</sup>, REN Ai-min<sup>1</sup>, ZHANG Sheng-jun<sup>1</sup>, MA Ping<sup>2</sup>, SHI An-hua<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Test Physics & Numerical Mathematical, Beijing 100076, China;  
2. China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** The communication blackout, caused by plasma sheath around a hypersonic vehicle flying in atmosphere is a problem to aerospace vehicles. A magneto window will be formed when a static magnetic field is applied to plasma sheath, and it can be used to reduce the attenuation of right circularly polarized wave in the sheath. The best way to build the magnetic window is by use of superconductive devices. However, there are some problems such as heavy weight and complex structure in use for superconductive devices to generate a magneto window. In this paper, an integrated concept, i. e. magneto window antenna, is proposed. A circular polarized GPS antenna is designed according to this concept. The antenna patch was made of copper and the ground plate is made of rare earth magnet NdFeB. The magnet will work as a part of antenna and be used to produce a strong magnetic field for magneto window as well. Radiation pattern and magnetic field intensity surrounding the antenna are analyzed by numerical simulation. It is shown that the attenuation of right circularly polarized wave through plasma sheath is reduced obviously.

**Key words:** Magneto window antenna; Plasma sheath; Blackout

## 0 引言

当飞行器以高超声速在大气层中飞行时, 飞行器周围高温气体将发生电离, 形成部分电离气体或

称等离子体。电磁波通过等离子鞘套传播过程中, 因被等离子体鞘套反射、折射和吸收, 波束强度衰减, 并出现偏折、延时、相移等效应, 情况严重时电磁波的传输将会完全中断<sup>[1]</sup>。目前, 我国在“通信中

“断”研究方面积累了一定的知识和经验,但是,中断问题并没有完全解决。我国新一代航天飞行器在大气层中飞行时间长、速度快,为了保障飞行器的飞行安全以及落点的精度,迫切需要开展减缓“通信中断”技术研究。

为了减缓电磁波在等离子体中的衰减,学者们提出了不少减缓措施,如改变气动外形、提高通信频率、喷射亲电子性物质等,但是每一种措施都有一定的局限性。如改变气动外形会改变飞行器的气动特性并带来防热问题;提高通信频率会涉及到雨衰和大气传输衰减问题,还涉及到新的通信系统体制研制问题;外加强磁场和喷射亲电子性物质会增加整个系统的重量和复杂性。

Hodara 等最早提出可以利用外加磁场的办法减缓右旋圆极化电磁波在等离子体流场中传播时的衰减<sup>[2]</sup>。其原理是有恒磁场  $B_0$  存在时,自由电子在与磁力线相垂直的平面内以回旋频率  $\omega_b = q_e B_0 / m_e$  做圆周运动( $q_e$  和  $m_e$  分别为 mks 单位制给出的电子电荷和电子质量),于是引入了新的传播模式。例如,对于无碰撞等离子体(碰撞频率为 0),当外加磁场  $B_0 = 0$  时,工作频率小于等离子体频率的电磁波不可能传播。随着  $B_0$  的增加,电子回旋轨道半径减小。而当  $B_0$  为无限大时轨道半径是 0,也即电子的运动被冻结在横向平面内,因此电子不再与  $B_0$  相垂直的平面电磁波发生作用,而是打开了一个“频谱窗口”,平面波透过此窗口传播犹如在真空中传播一样。Russo 和 Hughs 在 20 世纪 60 年代开展了再入等离子体鞘套透波试验,该试验最重要也最直接的意义在于证明了外加强磁场减缓通信中断的有效性。为了研究通信中断现象,Starkey<sup>[3]</sup> 用无粘、定常、非平衡等离子体模型估算了航天飞机、RAMC-II 和吸气式高超声速飞行器再入等离子体鞘套的情况,分析了电磁波频率为 2.45GHz、10GHz 和 20GHz 时外加强磁场对等离子体透波特性的影响。结果表明,当  $B_0 = 1.0T$ (特斯拉)时,强磁场对减缓右旋圆极化波衰减的作用非常明显。

理论计算和试验研究证明利用外加强磁场减缓飞行器在大气层飞行过程中的通信中断问题是可行的,但是在产生“磁窗”的过程中有一系列的问题需要克服。例如,产生磁场装置的重量和复杂性限制了磁窗技术的使用。目前,在通信中断问题研究中,产生强磁场主要有永磁体、电磁线圈和超导磁体三种方式<sup>[1,4-5]</sup>。

Melvin 提出了用永磁氧化钡产生磁场的方案。直圆柱永磁氧化钡的直径为 12.5cm,高度为 8.0cm。氧化钡具有高磁场保留物并同时具有电磁波传输性,在其表面可以获得接近于 0.15T 的磁场,在距离表面 5.0cm 处可以得到 0.05T 的磁场。螺旋天线位于磁体后面,信号先穿过氧化钡,再穿过等离子体。磁体对 9.0GHz 信号的损耗约为 7.0dB。

Carbinc 提出的一种电磁线圈磁窗系统工作频率为 250MHz,天线是直径为 30.5cm 的圆极化螺旋式天线。磁场用 1000 匝 10 号铝线制成。绕组重约 15.9kg,功耗为 150W,用 25V 标准直流电源供电,预计在等离子体鞘套中电子浓度最高处可提供 0.05T 磁场。为了提高磁场的强度,美国空军电子学实验室采用超导技术制作了一个可在实际飞行中应用的超导磁体,超导磁体采用合金钕铌片,工作时需要很低的温度,大约 4K,相当于液态氮的温度。此温度下合金线圈变成超导体,在地面上激励后就可以把电源移走。只要线圈处于超导状态,线圈中的电流就能不断循环流动。为了在发射和飞行期间降低超导体的温度,需要用杜瓦瓶给超导线圈降温,但这增加了整个系统的重量和复杂性。最近,为了减轻超导磁体的重量,Chapman 等已在讨论利用碳纳米管产生强磁场<sup>[5]</sup>。我国中科院力学所也进行了超导磁窗方面的研究并在激波管上开展了地面试验研究,在磁体中心处可形成 4.0T 左右的强磁场。电子科技大学开展过数值分析方面工作<sup>[6-7]</sup>。

由以上分析可知:使用电磁线圈产生磁场,线圈的体积和重量都会很大。而使用超导技术则需要额外地添加冷却系统并需要提前激励超导线圈。使用透波永磁氧化钡产生的磁场较弱,并且电磁波在氧化钡中传播时还会对电磁波产生衰减。为解决这一问题,本文改变了磁体和天线分开设计的传统方案,提出了天线和强永磁体一体化综合设计的新思路,也就是利用某些磁体的导电性,既把磁体作为磁场发生装置产生强磁场,又把磁体作为天线的一部分发射电磁波,此种天线本文称之为“磁窗天线”。这样既可以利用强磁场增强电磁波在等离子体鞘套中的透波特性,又可以不显著地增加系统的重量和复杂性。下面分别从外加强磁场的影响、磁窗天线总体方案设计、天线性能分析、磁窗天线周围磁场强度分布和减缓通信中断效果估算等几方面对磁窗天线进行讨论。

## 1 外加强磁场的影响

外加强磁场对右旋圆极化电磁波在等离子体鞘中的透波特性影响十分复杂, 这里只对均匀等离子体鞘套和外加均匀磁场的情况做简要分析。

设  $\omega_p$  为等离子体的谐振频率, 它是电子数密度的函数, 可写为:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{q_e^2 N_e}{m_e \epsilon_0}} \quad (1)$$

其中,  $N_e$  为电子数密度,  $\epsilon_0$  为自由空间介电常数。

当电磁波传播方向和磁场方向平行时, 若入射波角频率、电子回旋频率和等离子体频率之间满足如下关系:

$$\omega^2 \ll \omega_b^2 \ll \omega_p^2 \quad (2)$$

对于有限厚度的均匀等离子体层, 无外加强磁场和有外加强磁场时等离子体的透波系数可以根据文献[8]提到的公式进行预测, 分别为:

$$\begin{aligned} T_0 &\sim 16(\omega^2/\omega_p^2) e^{-2(\omega_p/\omega) \cdot L/\lambda_v} \\ T_1 &\sim 4\omega_b\omega/\omega_p^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $L$  为等离子体厚度,  $\lambda_v$  为入射波波长。二者的比值为:

$$T_1/T_0 = [\omega_b/(4\omega)] e^{2(\omega_p/\omega) \cdot L/\lambda_v} \quad (4)$$

由此可以估算出外加强磁场对等离子体透波性的改善情况:

$$A = 10 \lg T_1/T_0 \quad (5)$$

## 2 磁窗天线总体方案设计

磁窗天线的示意图如图 1 所示, 磁窗天线选用稀土永磁体做为天线的接地板, 同时也做为强磁场的发生装置。稀土永磁体中的 NdFeB(钕铁硼)系永磁体剩余磁感应强度可以达到 1.4T 左右, 是目前磁性最强的永磁材料, 本文选用这种材料作为接地板。微带天线表面的贴片采用对磁场影响很小的抗磁介质或顺磁介质, 这两种材料在一般的技术分析中常不考虑它们对磁场的影响。

## 3 圆极化 GPS 磁窗天线性能的分析

磁窗天线设计为可应用于全球定位系统(GPS)的单馈点圆极化微带天线。表面的贴片采用镀铜片, 铜是一种顺磁介质, 对磁场影响很小, 贴片的尺寸如图 2 所示。介质板材料采用普通的介质材料  $\epsilon_r = 3.0$ , 高度  $h = 1.524\text{mm}$ 。馈电时采用同轴线, 馈点位置为(0mm, 10.7mm)。

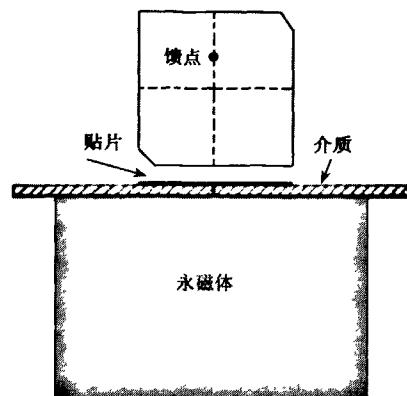


图 1 磁窗天线示意图

Fig. 1 Sketch map of magneto window antenna

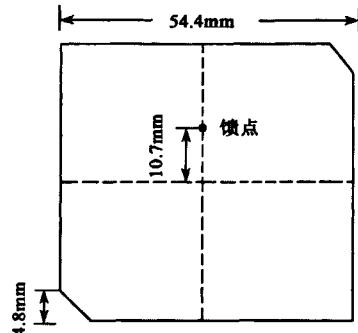


图 2 圆极化微带天线贴片

Fig. 2 Circularly polarized microstrip antenna

贴片外形为方形, 边长为 54.4mm。对角线上切掉两个 45° 的角, 切掉的三角形直角边边长为 4.8mm, 形成分离单元<sup>[9]</sup>。分离单元使馈电场形成的两个空间正交简并模的谐振频率发生分离, 分离的大小决定于  $\Delta s/s$  ( $\Delta s$  为分离单元的总面积,  $s$  为无分离单元时的面积)。附加分离后产生两个特征模, 两个特征模对应的谐振频率分别为:

$$\begin{cases} f_a = f_0 \left(1 - 2 \frac{\Delta s}{s}\right) \\ f_b = f_0 = \frac{c}{2a \sqrt{\epsilon_r}} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $a$  为边长,  $\epsilon_r$  为介质板介电参数, 圆极化时工作频率为这两个谐振频率的算术平均值。为实现圆极化, 这两个模必须幅值相等、相位相差 90°, 这些要求可以通过适当调节馈电位置来实现。

由圆极化条件, 确定贴片天线  $Q$  值与微扰尺寸的关系有:

$$\frac{\Delta s}{s} = \frac{1}{2Q} \quad (7)$$

利用 CST 软件对图 1 所示磁窗天线的  $S_{11}$  参数

进行了模拟,仿真计算结果如图3所示,由图中可见天线的谐振频率为1.545GHz。

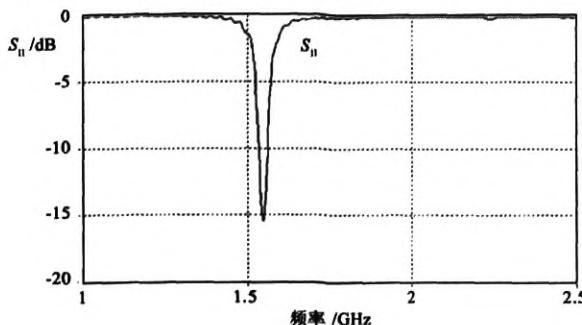


图3 磁窗天线的  $S_{11}$  参数

Fig. 3  $S_{11}$  parameter of magneto window antenna

仿真给出圆极化微带天线对于右旋圆极化波的方向图特性如图4所示。

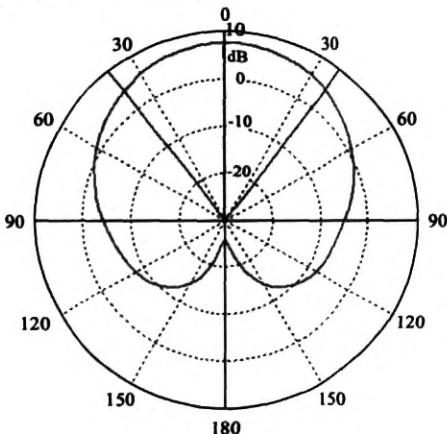


图4 磁窗天线方向图

Fig. 4 Pattern of magnetic window antenna

#### 4 磁窗天线周围磁场强度分布

为了计算磁窗天线周围磁场强度分布情况,对永磁体三维场计算方法进行了研究。采用物质磁化的安培电流模型法将永磁体等效为空间磁化电流分布<sup>[10-11]</sup>。根据分子电流观点,永磁体外部空间一点P的磁矢量位A的计算表达式为:

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{M \times n}{r} dS + \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\nabla \times M}{r} d\tau_0 \quad (8)$$

式中:  $\nabla$  为旋度算子;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m, 为真空磁导率;  $M$  为永磁铁磁化强度;  $n$  为磁铁外表面法向;  $S$  为围住磁铁的曲面;  $r$  为从源点到场点的距离。等效面电流密度  $K$  和等效体电流密度  $J$  定义为:

$$K = M \times n, \quad J = \nabla \times M \quad (9)$$

将式(9)代入(8)得:

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{K}{r} dS + \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J}{r} d\tau_0 \quad (10)$$

通过计算得到  $A$ ,再对  $A$  求旋度即可得到磁感应强度  $B$ :

$$B = \nabla \times A \quad (11)$$

仿真时采用烧结钕铁硼永磁体,轴向充磁,充磁后的剩余磁感应强度  $B_r = 1.4$  T,永磁体尺寸为 150mm × 150mm × 100mm,相对磁导率为  $\mu_r = 1.05$ ,铜的相对磁导率  $\mu_r = 1 - 1.0 \times 10^{-5}$ 。仿真得到的磁窗天线周围磁感应强度矢量分布如图5所示,磁感应强度绝对值云图如图6所示。

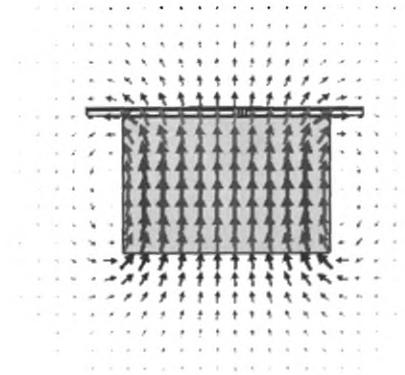


图5 磁窗天线磁感应强度矢量图

Fig. 5 Vectorgraph of magnetic field

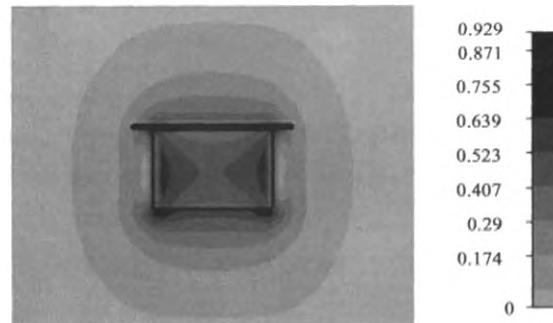


图6 磁窗天线磁感应强度云图

Fig. 6 Gradient map of magnetic field

在轴线上,磁感应强度随离磁体表面距离的变化如图7所示。从图中可知:在轴线上,磁体表面磁感应强度可以达到0.49T,在离表面60mm范围内磁感应强度超过0.20T,在80mm处磁感应强度为0.16T。

#### 5 外加强磁场减缓通信中断效果估算

下面简单分析一下外加强磁场对均匀等离子体

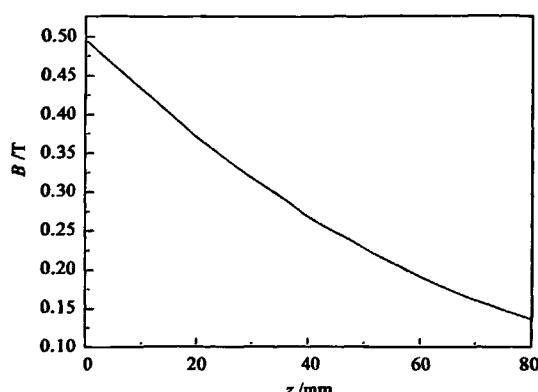


图7 磁感应强度随距离变化曲线

Fig. 7 Magnetic field vs distance

鞘套透波特性的影响。设均匀等离子体鞘的电子数密度  $N_e = 5.0 \times 10^{12}/\text{cm}^3$ , 等离子体鞘套厚度  $L = 60\text{mm}$ 。外加强磁场看作是均匀的  $B_0 = 0.2\text{T}$ 。磁窗天线工作频率为  $1.545\text{GHz}$ 。

利用公式(5)近似估算出无外加强磁场和有外加强磁场时透射系数分别为  $T_0 = 2.89 \times 10^{-6}$  和  $T_1 = 8.59 \times 10^{-2}$ , 分别衰减  $55.40\text{dB}$  和  $10.66\text{dB}$ 。若系统有  $30\text{dB}$  的冗余, 则无外加磁场时通信会中断, 而有外加强磁场时通信将保持畅通, 外加强磁场对等离子体鞘套透波性的改善为  $A = 44.74\text{dB}$ 。

在实际应用中, 磁窗天线的效果需要根据飞行器周围的等离子体流场电子数密度的峰值和分布情况做更详细地模拟与评估。

## 6 结 论

为解决高超声速飞行器在大气层中的通信中断问题, 本文提出了天线和强永磁体一体化综合设计的新思路。设计出一种圆极化 GPS 磁窗天线, 分析了磁窗天线的性能和周围磁场强度的分布。估算了磁窗天线减缓通信中断的效果, 为进一步深入探讨磁窗天线的可行性奠定了基础。

利用磁窗天线的优点是:可以增强等离子体透波特性, 同时不改变飞行器的气动特性、不改变靶场现有设备的通信制式, 不用像采用超导体作为磁场发生装置那样在飞行器发射前需要预充电, 无冷却系统要求, 不会明显地增加整个系统的复杂性而且造价低廉。但是, 磁窗天线是否能够在航天飞行器上真正应用, 还有许多问题需要考虑。下一步打算针对典型飞行器的等离子体鞘套情况, 进一步开展磁窗天线的优化和设计。同时, 在等离子体模拟设

备粉末激波管上开展相关试验研究, 验证理论分析和仿真模拟的结果。

## 参 考 文 献

- [1] Hartunian R A, Stewart G E, Ferguson S D. Cause and mitigation of radio frequency (RF) blackout during reentry of reusable launch vehicles [R]. Aerospace Report, Jan 2007.
- [2] Hodara H. The use of magnetic fields in the elimination of the reentry radio blackout [J]. Proceedings of the IRE, 1961, 49 (12): 1825 - 1830.
- [3] Starkey R P. Electromagnetic wave / magnetoactive plasma sheath interaction for hypersonic vehicle telemetry blackout analysis [C]. 34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, Orlando, USA, June 23 - 26, 2003.
- [4] Russo F P, Hughes J K. Measurement of the effects of static magnetic field on VHF transmission in ionized flow field [R]. NASA TM X - 907, March 1964.
- [5] Chapman J N, Ruoff R S, Litchford R J. Flightweight magnets for space application using carbon nanotubes [C]. 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA, Jan 6 - 9, 2003.
- [6] Gao Z P, Ma Z G, Liu J, et al. Transmission properties of radar wave through reentry plasma sheath [J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2007, 5(1): 29 - 32.
- [7] 竺乃宜, 李学芬, 周学华. 激波管用于此等离子体中电波传输的研究[J]. 流体力学试验与测量, 1993, 7(3): 69 - 74. [Zhu Nai-yi, Li Xue-feng, Zhou Xue-hua. A study of electromagnetic wave propagation in magnetic plasma by shock tube [J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1993, 7 (3) : 69 - 74. ]
- [8] Mullin C R. Elimination of re-entry radio blackout [J]. Proceedings of the IRE, 1962, 50 (10): 2108 - 2110.
- [9] Wong K L. Compact and broad band microstrip antenna [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [10] Lounan P, Kousin D R. 电磁场与波 [M]. 陈成军译. 北京: 人民教育出版社, 1980.
- [11] 王柏懿, 徐燕侯, 姜震宇. 电磁波在非均匀有损耗再入等离子体鞘层中的传播 [J]. 宇航学报, 1985, 6(1): 35 - 40. [Wang Bai-yi, Xu Yan-hou, Ji Zhen-yu. Propagation of electromagnetic waves in inhomogenous and lossy reentry plasma sheath layer [J]. Journal of Astronautics, 1985, 6(1) : 35 - 40. ]

作者简介:于哲峰(1977-),男,博士,副研究员,研究方向为再入/临近空间飞行器目标特性和天线系统设计。

通信地址:四川绵阳安县 63839 部队 43 分队(621000)

电话:13981165616

E-mail: uwbr@ hotmail. com

(编辑:曹亚君)

## 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>