

文章编号:1002-0640(2011)06-0067-03

## 左手材料涂敷目标的 RCS 仿真研究 \*

吕 丹<sup>1,2,3</sup>, 童创明<sup>2,3</sup>

(1. 解放军 93704 部队, 北京 101149, 2. 空军工程大学导弹学院, 陕西 三原 713800,  
3. 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

**摘要:**左手材料的介电常数和磁导率都为负值, 电场、磁场和波矢量在左手材料中表现为左手螺旋关系, 相速与群速方向相反。根据传输线理论分析了波入射到分层媒质上的表面反射系数, 计算了随入射波频率、涂层厚度变化情况下的左、右手材料的反射率; 基于非均匀有理 B 样条参数曲面模拟目标的几何外形, 采用物理光学法计算了涂敷左手材料目标的雷达散射截面。结果说明左手材料能明显减少反射波, 使目标的 RCS 大大减缩。

**关键词:**左手材料, 反射率, 非均匀有理 B 样条, 雷达散射截面

中图分类号: TN252 文献标识码: A

## RCS Simulation of Target Coated with Chiral Medium

Lü Dan<sup>1,2,3</sup>, TONG Chuang-ming<sup>2,3</sup>

(1. Unit 93704 of PLA, Beijing 101149, China, 2. Air Force Engineering University, Missile Institute, Sanyuan 713800, China, 3. State Key Lab. of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The permittivity and permeability of left-handed material both are negative. When electromagnetic wave is propagating in this medium, the electric field, magnetic field and wave vector conform to the left-hand screw rule. It means that the direction of phase velocity is contrary to the direction of group velocity. The reflection coefficients of multilayered coating are analyzed by transmission line model. And the reflectivity of left-handed material and the reflectivity of right-handed material are computed based on varied frequency of incident wave and varied thickness of coating. Shape of the target is modeled with non-uniform rational B-spline surfaces. And the radar cross section (RCS) of the target coated with left-handed material is calculated by physical optics method. The results show that the reflected wave is reduced by left-handed material. Additionally, the RCS of coated target is decreased obviously.

**Key words:** left-handed material, reflectivity, non-uniform rational B-spline, radar cross section

## 引言

介电常数和磁导率是表征物质电磁性质的两个重要参数, 决定着电磁波在物质中的传播特性。自然界中最常见的介电常数和磁导率一般都为正, 折射率为正, 在平面电磁波传播中, 电场、磁场、波矢量

是右手螺旋关系, 这类物质称为“右手材料”。到目前为止自然界中还没有发现介电常数和磁导率都为负的材料, 直到美国的 Smith 教授在实验室中首次得到了同时具有负的介电常数和磁导率的物质<sup>[1]</sup>。在这种材料中折射率为负, 电场、磁场、波矢量表现为左手螺旋关系, 故称之为“左手材料”。

正因为左手材料中传播的电磁波的相速与群速相反, 因此表现出一些特殊的物理性质, 比如逆多普勒效应、逆切伦可夫效应、完美成像等等。左手材料在微波、光学、天线等领域的应用前景非常广阔, 比如可设计出超薄谐振腔、能量分束器、具有超高分

收稿日期: 2010-03-24 修回日期: 2010-05-31

\* 基金项目: 毫米波国家重点实验室基金资助项目  
(K200818)

作者简介: 吕 丹(1981- ), 女, 陕西柞水人, 博士生, 研究方向: 电磁散射与辐射方面的研究工作。

分辨率的扁平光学透镜、新型光学存储系统、后向波辐射天线、漏波天线等<sup>[2-4]</sup>。另外还有一个重要的应用就是将左手材料作为涂敷材料可以将电磁波反向散射出去,使得从正面接收不到反射信号<sup>[5]</sup>,对方难以发现和跟踪。

本文采用传输线理论计算了左、右手材料的反射率与入射波频率、涂层厚度之间的变化关系,运用非均匀有理 B 样条(Non-Uniform Rational B-Spline,简称 NURBS)参数曲面描述目标,应用物理光学(Physical Optics,简称 PO)法计算了左手材料涂敷目标的雷达散射截面(Radar Cross Section,简称 RCS)。

## 1 左手材料的反射率

损耗介质的相对介电常数和相对磁导率可表示为  $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ ,  $\mu_r = \mu'_r - j\mu''_r$ 。对于右手材料  $\epsilon'_r, \epsilon''_r, \mu'_r, \mu''_r$  均大于零;对于左手材料  $\epsilon'_r, \mu'_r$  大于零而  $\epsilon''_r, \mu''_r$  却是小于零的。假定  $\tan\delta_e = \epsilon''_r/\epsilon'_r, \tan\delta_m = \mu''_r/\mu'_r$ 。通过解方程最后得到波数  $k = k' - jk''$  及阻抗  $Z = Z' - jZ''$  在右手材料和左手材料中分别有下面形式<sup>[5]</sup>:

$$k'_{\text{right}} = \frac{\omega \sqrt{\epsilon'_r \mu'_r}}{c} \sqrt{0.5[-1 - \tan\delta_e \tan\delta_m + \sqrt{(1 + \tan\delta_e^2)(1 + \tan\delta_m^2)}]} \quad (1)$$

$$k'_{\text{right}} = \frac{\omega \sqrt{\epsilon'_r \mu'_r}}{c}.$$

$$\sqrt{0.5[\tan\delta_e \tan\delta_m - 1 + \sqrt{(1 + \tan\delta_e^2)(1 + \tan\delta_m^2)}]} \quad (2)$$

$$k'_{\text{left}} = \frac{-\omega \sqrt{\epsilon'_r \mu'_r}}{c}.$$

$$\sqrt{0.5[1 - \tan\delta_e \tan\delta_m + \sqrt{(1 + \tan\delta_e^2)(1 + \tan\delta_m^2)}]} \quad (3)$$

$$k'_{\text{left}} = \frac{\omega \sqrt{\epsilon'_r \mu'_r}}{c}.$$

$$\sqrt{0.5[\tan\delta_e \tan\delta_m - 1 + \sqrt{(1 + \tan\delta_e^2)(1 + \tan\delta_m^2)}]} \quad (4)$$

$$Z'_{\text{right}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu'_r}{\epsilon_0 \epsilon'_r}} \frac{1}{\sqrt{1 + \tan\delta_e^2}}.$$

$$\sqrt{0.5[\tan\delta_e \tan\delta_m + \sqrt{(1 + \tan\delta_e^2)(1 + \tan\delta_m^2)}]} = Z'_{\text{left}} \quad (5)$$

$$Z'_{\text{right}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu'_r}{\epsilon_0 \epsilon'_r}} \frac{1}{\sqrt{1 + \tan\delta_e^2}}.$$

$$\sqrt{0.5[-1 - \tan\delta_e \tan\delta_m + \sqrt{(1 + \tan\delta_e^2)(1 + \tan\delta_m^2)}]} = Z'_{\text{left}} \quad (6)$$

其中下标 left 和 right 分别表示左、右手材料。通过比较可以知道当  $\epsilon'_{\text{right}} = -\epsilon'_{\text{left}}, \epsilon''_{\text{right}} = -\epsilon''_{\text{left}}, \mu'_{\text{right}} = -\mu'_{\text{left}}, \mu''_{\text{right}} = -\mu''_{\text{left}}$ , 时有:  $k'_{\text{right}} = -k'_{\text{left}}, k''_{\text{right}} = -k''_{\text{left}}, Z_{\text{right}} = Z_{\text{left}}$ 。所以在计算反射系数时就可用相应参数的右手材料而得到左手材料的波数和阻抗,同时可得到折射率的关系:  $n = n' - jn'', n'_{\text{right}} = -n'_{\text{left}}, n''_{\text{right}} = n''_{\text{left}}$ 。

运用传输线理论分析有多层涂敷介质的底板,如图 1 所示,从空气到底板共  $N$  层。 $\epsilon_r^{(n)}, \mu_r^{(n)}, d^{(n)}$ 、 $\alpha^{(n)}$  分别为第  $n$  层介质的相对介电常数、相对磁导率、厚度、入射角。

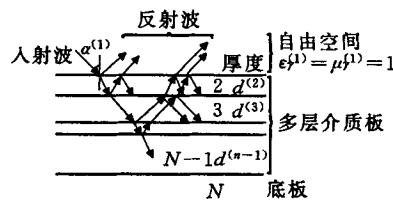


图 1 多层有耗介质散射示意图

平行极化反射系数  $R_{\parallel}$  和垂直极化反射系数  $R_{\perp}$  由下面公式递推得到<sup>[6,7]</sup>:

$$R_{\parallel} = \frac{Z_i^{(1)} \cos\alpha^{(1)} - Z_i^{(2)} \cos\alpha^{(2)}}{Z_i^{(1)} \cos\alpha^{(1)} + Z_i^{(2)} \cos\alpha^{(2)}} \quad (7)$$

$$R_{\perp} = \frac{Z_i^{(2)} \cos\alpha^{(1)} - Z_i^{(1)} \cos\alpha^{(2)}}{Z_i^{(2)} \cos\alpha^{(1)} + Z_i^{(1)} \cos\alpha^{(2)}} \quad (8)$$

其中,  $Z_i^{(n)}$  和  $Z_i^{(\perp)}$  分别表示平行极化和垂直极化情况下第  $n$  层的输入阻抗:

$$Z_i^{(n)} = \frac{Z_i^{(n+1)} \cos\alpha^{(n+1)} - jZ^{(n)} \cos\alpha^{(n)} \tan(c^{(n)} d^{(n)})}{Z^{(n)} \cos\alpha^{(n)} - jZ_i^{(n+1)} \cos\alpha^{(n+1)} \tan(c^{(n)} d^{(n)})} Z^{(n)} \quad (9)$$

$$Z_i^{(\perp)} = \frac{Z_i^{(n+1)} \cos\alpha^{(n)} - jZ^{(n)} \cos\alpha^{(n+1)} \tan(c^{(n)} d^{(n)})}{Z^{(n)} \cos\alpha^{(n+1)} - jZ_i^{(n+1)} \cos\alpha^{(n)} \tan(c^{(n)} d^{(n)})} Z^{(n)} \quad (10)$$

当  $n=N$  时,有:  $Z_i^{(N)} = Z_i^{(\perp)} = Z^{(N)}$ 。

$Z^{(n)}$  和  $k^{(n)}$  分别是第  $n$  层的阻抗和波数,  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别是自由空间的介电常数和磁导率,  $c^{(n)} = k^{(n)} \cos\alpha^{(n)}$ 。其中  $Z^{(n)}, k^{(n)}$  和  $\cos\alpha^{(n)}$  都是左手材料中的计算值。

$$\text{反射率定义为: } r = 20 \lg(|R|) \quad (11)$$

## 2 基于参数曲面的 PO 积分

### 2.1 NURBS 参数曲面建模

目标表面几何坐标  $\vec{r}(u, v)$  用一张  $k \times l$  次的 NURBS 曲面方程表示为<sup>[8,9]</sup>:

$$\vec{r}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} \vec{d}_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)} \quad (12)$$

其中,  $\vec{d}_{i,j}$  ( $i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n$ ) 是控制顶点, 它呈拓扑矩形阵列, 形成一个控制网格;  $\omega_{i,j}$  是与控制顶点  $\vec{d}_{i,j}$  相联系的权因子;  $N_{i,k}(u)$  ( $i=0, 1, \dots, m$ ) 和  $N_{j,l}(v)$  ( $j=0, 1, \dots, n$ ) 分别为  $u$  向  $k$  次和  $v$  向  $l$  次的规范 B 样条基, 分别由  $u$  向与  $v$  向的节点矢量按德布尔-考克斯递推公式决定。以  $u$  向为例, B 样条基可表示为:

$$\begin{cases} N_{i,0} = \begin{cases} 1 & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{define } \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

## 2.2 涂敷目标的 PO 场

非良导体目标的散射场可以表示为:

$$\vec{E}' = \frac{-jk \exp(-jkr)}{4\pi r} \int_s (\hat{n} \times \vec{E} - Z_0 \hat{s} \times (\hat{n} \times \vec{H})) \exp(jk \vec{r}' \cdot \hat{s}) ds' \quad (14)$$

其中  $k$  和  $Z_0$  分别为真空中的传播常数和本征阻抗,  $\hat{i}$  和  $\hat{s}$  分别为入射波和散射波的单位矢量,  $\vec{r}$  为观察点的位置矢量,  $\vec{r}'$  为目标表面点的位置矢量,  $r$  为观察点到原点的距离,  $\hat{n}$  为目标表面点的外法向单位矢量,  $\vec{E}$  和  $\vec{H}$  分别为边界上总的电场和总的磁场。

在参数曲面上  $\hat{n}$  和  $ds'$  可转化成

$$\hat{n} = \frac{\vec{r}_u \times \vec{r}_v}{|\vec{r}_u \times \vec{r}_v|}, ds' = |\vec{r}_u \times \vec{r}_v| du dv \quad (15)$$

上式中  $\vec{r}_u$  和  $\vec{r}_v$  分别表示 NURBS 几何坐标  $\vec{r}(u, v)$  对  $u, v$  求偏导。

将式(15)代入式(14), 得到基于 NURBS 曲面的后向 RCS 表达式:

$$\sqrt{\sigma} = \frac{-jk}{\sqrt{\pi}} \int_0^1 \int_0^1 (R_\perp (\hat{e}_i \cdot \hat{e}_\perp)^2 - R_\parallel (\hat{e}_i \cdot \hat{e}_\parallel)^2) (\vec{r}_u \times \vec{r}_v) \cdot \hat{i} \exp(j2k \vec{r} \cdot \hat{s}) du dv \quad (16)$$

上式中单位矢量  $\hat{e}_i$  表示入射电场方向, 单位矢量  $\hat{e}_\perp$  和  $\hat{e}_\parallel$  分别为入射电场平行入射面的极化方向和垂直入射面的极化方向,  $R_\perp$  和  $R_\parallel$  分别为介质表面在垂直极化和平行极化时的反射系数。

## 3 仿真计算

算例一: 一无限大金属底板上分别涂敷右手和

左手材料, 入射波频率  $f = 10$  GHz, 电磁波垂直入射。采用了文献[5]中左手材料的优化介质参数, 左、右手材料的介电常数和磁导率分别为:  $\epsilon_r^{\text{left}} = -7.756878 - j0.001205$ ,  $\mu_r^{\text{left}} = -4.998715 - j4.361804$ ,  $\epsilon_r^{\text{right}} = -7.756878 - j0.001205$ ,  $\mu_r^{\text{right}} = 4.998715 - j4.361804$ , 涂层厚度  $d = 1.59047$  mm。这里只是为了比较, 选择左手材料电磁参数与右手材料的虚部一致, 实部互为相反数。图 2 为不同涂层的反射率与频率之间的关系曲线, 图 3 为不同涂层的反射率与厚度之间的关系曲线。

图 2 中实线和点线分别为左手、右手材料的反射率, 在给定的频率范围内每个频率点上左手材料的反射率比右手材料要小得多, 也就意味着左手材料吸收了更多的入射波。右手材料在频带内变化缓慢, 基本上没有明显的峰值; 而左手材料的反射率随着频率的增加先减小再增大, 且在某一点处反射率降到很小。

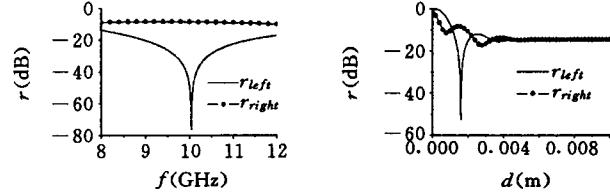


图 2 反射率与入射波频率的变化关系

图 3 反射率与涂层厚度的变化关系

图 3 中实线和点线分别为左手、右手材料的反射率, 两者在涂层厚度较小的阶段起伏较强烈, 随着厚度的增加逐渐趋于稳定, 且两者最后的稳定值大小一致。在一定的频率下, 在某些涂层厚度下左手材料的反射率大于右手材料的反射率, 而在另一些涂层厚度下又是相反的情况。

算例二: 一金属圆柱上涂敷左手材料, 介质参数如算例一中所示。圆柱直径  $D = 3\lambda$ , 长  $L = 4\lambda$ , 中心轴平行于  $z$  轴。为了与文献[10]中目标涂敷右手吸波材料的 RCS 作比较, 涂层厚度与文献一致取  $d = 0.04\lambda$ , 入射波频率为 10 GHz, 水平极化。图 4 为涂敷目标的后向 RCS 随高低角的变化曲线(方位角为 90°)。

图 3 中实线为金属圆柱没有涂敷任何吸波材料时的后向 RCS, 虚线为涂敷文献所给的右手材料时的 RCS, 点线为涂敷本文所给的左手材料时的 RCS。从结果来看左、右手吸波材料都有效地吸收了

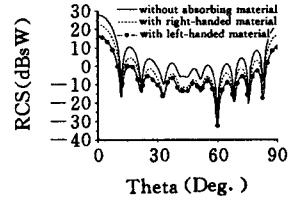


图 4 涂敷圆柱的后向 RCS

速度,特别是在系统速度换向时,能够及时产生相应的补偿控制量,抑制摩擦和齿隙非线性的影响。

图 7 为系统自适应模型跟随曲线,图 8 为模型跟随误差曲线。由图可知,系统具有良好的跟踪性能,且换向过程中速度较平稳。

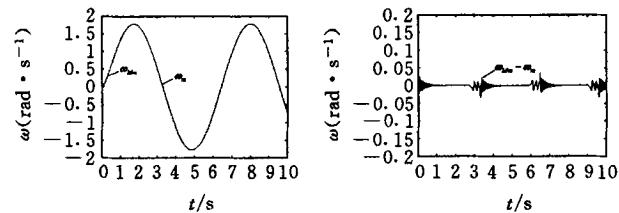


图 7 自适应模型跟随曲线

图 8 模型跟随误差

上述仿真表明,本文所设计的自适应模型跟随控制器能够克服系统齿隙、摩擦和参数漂移等非线性因素的影响,有效地改善系统性能。

## 5 结 论

(1) 基于“等效扰动”思想,将系统的各种非线性环节等效为外部扰动,从而将炮控系统的非线性补偿控制转化为线性系统的扰动抑制问题。可简化研究难度,有利于进一步开展其补偿控制研究。

(2) 采用自适应模型跟随控制方法,可抑制系统齿隙、摩擦和参数漂移等非线性因素的影响,有效地改善系统性能,且易于工程实现。

(上接第 69 页)

入射电磁波,而且本文所给的左手材料更明显地减小了目标的 RCS。

## 4 结 论

左手材料由于其介电常数和磁导率同时为负的特性,给很多领域的发展都带来了新局面。本文分析计算了左、右手吸波材料的反射率和涂敷目标的 RCS,结果证明了左手材料作涂层可以有效地吸收入射波能量,减小目标的 RCS。但是从左、右手材料的反射率曲线也发现并不是所有左手材料的吸波性能一定好于右手材料,吸波性能的好坏与介电常数、磁导率、入射波频率、涂层厚度都有关系,所以还要进一步优化参数,具体分析。

### 参考文献:

- [1] Smith D R, Padilla W, Vier D C. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity[J]. Physics Review Letters, 2000, 84(18):4184-4187.
- [2] Engheta N . An Idea for Thin , Subwavelength

(3) 采用 ESO 提取系统输出和外部扰动的高阶微分信号,能够克服经典微分器的噪声放大等问题,并具有良好的动态跟踪效果。

### 参 考 文 献:

- [1] 朱志昆. 坦克交流全电式炮控系统研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2006.
- [2] 冯亮, 马晓军, 吴之峰, 等. 坦克炮控系统自适应模糊滑模控制方法[J]. 电机与控制学报, 2007, 11(1): 65-69.
- [3] 蔡克茂, 马晓军, 李长兵. 现代坦克炮控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [4] 刘强, 尔联洁, 刘金琨. 摩擦非线性环节的特性、建模与控制补偿综述[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(11):45-52.
- [5] 赵国峰, 樊卫华, 陈庆伟, 等. 齿隙非线性研究进展[J]. 兵工学报, 2006, 27(6):1072-1080.
- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京: 中国科学院数学与系统工程研究院, 2003.
- [7] 吴士昌, 吴忠强. 自适应控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [8] 吴忠强. 一种克服扰动的 MRACS 设计[J]. 自动化技术与应用, 2002, 19(3):32-34.
- [9] 朗道 I D, 吴伯凡, 译. 自适应控制——模型参考方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.

Cavity Resonators Using Metamaterials with Negative Permittivity and Permeability [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letter, 2002, 1 (1): 10-13.

- [3] 王永华. 左手介质及左手介质波导传输特性[D]. 成都: 四川师范大学, 2006.
- [4] 张世鸿, 陈良, 徐彬彬. 左手材料研究进展及应用研究[J]. 功能材料, 2006, 37(1): 1-5.
- [5] 王小小. 左右手材料结构吸波体吸波性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [6] 宋培茗. 雷达目标 RCS 的建模与检测[D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 23-26.
- [7] Klement D, Preissner J, Volker S. Special Problems in Applying the Physical Optics Method for Backscatter Computations of Complicated Objects [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1988, 36(2): 228-237.
- [8] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [9] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [10] 李建周. 复杂目标一体化电磁散射计算与优化研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.

## 雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

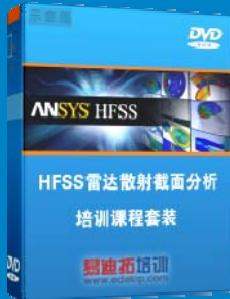
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS.

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

---

### HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

---

### ● 更多培训课程：

#### ● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

#### ● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

#### ● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>