

文章编号 1005-0388(2009)05-0879-05

## 三维机翼前缘影区爬行波 RCS 研究

马东立 刘忠铁

(北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要** 分析了三维机翼前缘影区的爬行波散射机理, 建立了前缘影区爬行波的雷达散射截面(RCS)计算模型。根据光滑凸曲面的一致性绕射理论(UTD)给出爬行波的后向散射远区电磁场计算公式, 按 RCS 定义计算爬行波散射贡献。采用微分几何原理分析任意凸曲面上的爬行波短程线特性, 根据爬行波在光滑凸曲面上的短程线测得曲率为零的条件, 给出一种三维机翼表面短程线计算方法。对三维机翼前缘爬行波进行计算和测试, 并计算分析不同机翼参数对前缘影区爬行波的影响。计算结果和测试结果吻合良好, 表明该方法计算爬行波 RCS 快捷有效, 可应用于工程分析。

**关键词** 爬行波; 雷达散射截面; 一致性绕射理论; 短程线

**中图分类号** V243.2      **文献标志码** A

### RCS of creeping wave for shadow region of wing leading edge

MA Dong-li LIU Zhong-tie

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University  
of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract** Scattering mechanism of creeping wave for shadow region of wing leading edge was analyzed. A calculating model of radar cross section(RCS)for shadow region creeping wave of leading edge was presented. Far-field back scattering electromagnetic formulas of creeping wave was given on the basis of uniform geometrical theory of diffraction (UTD) of smooth convex surface, and the contribution of creeping wave was calculated in terms of RCS definition. The characteristic of geodesic on arbitrary convex surface was analyzed with differential geometry. A method of solving geodesic was given based on the condition that the geodesic curvature of geodesic was zero on smooth convex surface. The creeping wave on leading edge of the wing was calculated, and effect of different parameters of wing was calculated and analyzed. The agreement of the calculating results with the experimental results indicates this method could be used to estimate the creeping wave RCS quickly and effectively in engineering analysis.

**Key words** creeping wave; radar cross section; uniform theory of diffraction; geodesic

### 引言

在机翼的雷达散射截面(RCS)计算中一般只考

虑目标表面和尖劈的散射, 忽略其他弱散射机理, 对常规布局的飞机这样做是可以的。但对于具有低散射特性的飞机, 表面和尖劈的散射已经得到很大减

缩,在一定角域内,机翼前缘阴影区的爬行波贡献将大于表面和尖劈的散射。尤其在垂直极化雷达波从机翼后缘方向入射时,机翼的镜面散射贡献很低,后向 RCS 主要由处于影区的机翼前缘爬行波产生。因此,计算低散射飞机 RCS 必须考虑机翼前缘爬行波的贡献。

文献[1]对二维机翼影区爬行波的 RCS 进行了研究,其方法对大展弦比平直机翼是有效的。而现代先进战斗机多采用大后掠三角翼和翼身融合设计,机翼形状为典型的三维情况。根据机翼剖面形状和后掠角等参数建立了三维机翼几何模型,并计算了机翼前缘影区爬行波 RCS 贡献。

三维机翼爬行波计算中的关键问题是任意曲面上短程线的求解。文献[2]~[4]给出了在圆柱上、一般旋转抛物面(GPOR)上和基于样条排列方法的短程线精确求解方法,文献[5]~[7]给出了任意曲面的短程线求解步骤。但是这些方法有的只能处理特殊形状的物体,有的需要求解二阶微分方程,不利于实际工程应用,或者仅给出了计算步骤而没有说明求解原理。本文根据微分几何理论得出了短程线的求解原理并给出了相应的工程计算方法。根据曲面的网格划分按照数值方法求解短程线,不需要给出曲面方程,便于实际工程应用。

## 1 机翼前缘影区爬行波

假设机翼为全金属光滑表面,没有缝隙等不连续处,且是电大尺寸,可以按广义费马原理进行射线追踪。

如图 1 所示,  $Q_1$  和  $Q_2$  点是绕射射线在机翼表面的爬行起始点和结束点。 $Q_1$  点处的法向单位矢量为  $n_1$ , 射线切向单位矢量为  $t_1$ , 副法线单位矢量  $b_1 = t_1 \times n_1$ 。在  $Q_2$  点也可定义一组类似的单位矢量  $t_2, n_2, b_2 = t_2 \times n_2$ , 其中  $t_2$  是绕射射线方向的单位矢量。 $i_1$  和  $i_2$  分别是从上、下表面入射的射线, 对应的绕射射线是  $s_1$  和  $s_2$ 。图中  $i_1$  和  $s_2$ ,  $i_2$  和  $s_1$  是重合的, 分开画只是为了指示清楚。

由互易定理可知,这两条射线产生的 RCS 贡献是相同的,因此只需对一条射线进行计算即可。下面以射线  $i_1$  为例进行推导,给出散射场计算公式。

机翼前缘影区爬行波的后向散射电场可以表示为

$$\mathbf{E}^d = \mathbf{E}^i(Q_1) \cdot \mathbf{T}(Q_1, Q_2) e^{-jkr} / R \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{E}^i(Q_1)$  为  $Q_1$  点处的入射电场值;  $k = 2\pi/\lambda$  表示波数;  $R$  是绕射末点  $Q_2$  到观察点的距离;  $\mathbf{T}(Q_1,$

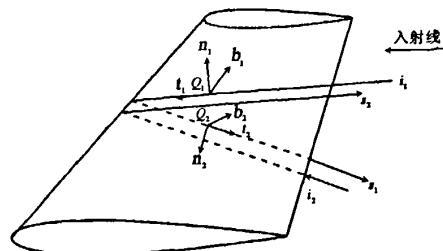


图 1 机翼前缘处于影区时的绕射示意图

$Q_2$ ) 为一致性几何绕射理论中凸曲面上爬行波的并矢绕射系数<sup>[8]</sup>,且有

$$\mathbf{T}(Q_1, Q_2) = T_s \mathbf{b}_1 \mathbf{b}_2 + T_h \mathbf{n}_1 \mathbf{n}_2 \quad (2)$$

式中,  $T_s$  和  $T_h$  分别对应软边界和硬边界条件的绕射系数,

$$T_{s,h} = - \left[ \frac{\sqrt{m(Q_1)m(Q_2)} \sqrt{2/k}}{\left\{ \frac{j e^{-j(\pi/4)}}{2\sqrt{\pi}\xi^d} [1 - F(X^d)] + P_{s,h}(\xi^d) \right\}} \right] e^{jkr} \quad (3)$$

上式中各主要参数的表达式给出如下:

$$m(Q) = \left( \frac{k \rho_g(Q)}{2} \right)^{1/3} \quad (4)$$

$\rho_g(Q)$  为曲面上  $Q$  点处沿爬行路径的曲率半径。

$$\xi^d = \int_{Q_1}^{Q_2} \frac{m(t')}{\rho_g(t')} dt' \quad (5)$$

$\xi^d$  为爬行波衰减项,是沿爬行路径的曲线积分。

$$X^d = \frac{k L^d (\xi^d)^2}{2m(Q_1)m(Q_2)} \quad (6)$$

$L^d$  为阴影边界的距离因子,在一致性绕射理论中根据阴影边界场的连续性推导出  $L^d$  的表达式为<sup>[4]</sup>

$$L^d = \frac{(\rho_1^d + s_0)(\rho_2^d + s_0)}{(\rho_1^d + [s_0 + s])(\rho_2^d + [s_0 + s])} \frac{s(\rho_2^d + s)}{\rho_2^d} \quad (7)$$

假设源点和场点都在无穷远处,可以简单取  $L^d = 1$ 。

$$F(X^d) = 2j \sqrt{X^d} e^{jX^d} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dr}{\sqrt{X^d}} e^{-jr^2}, X^d > 0 \quad (8)$$

上式为含有菲涅尔积分的过渡函数,其数值计算表达式为

$$F(X^d) \approx \begin{bmatrix} \sqrt{\pi X^d} - 2X^d e^{j\frac{\pi}{4}} \\ -\frac{2}{3} (X^d)^2 e^{-j\frac{\pi}{4}} \end{bmatrix} e^{j(\frac{\pi}{4} + X^d)} \quad (\text{小自变量渐进式})$$

$$F(X^d) \approx 1 + j \frac{1}{2X^d} - \frac{3}{4} \frac{1}{(X^d)^2} - j \frac{15}{8} \frac{1}{(X^d)^3} + \frac{75}{16} \frac{1}{(X^d)^4}$$

(大自变量渐进式)

$$t = \int_{Q_1}^{Q_2} dt' \quad (9)$$

式中,  $t$  的物理意义是爬行路径的长度。需要注意的是, 爬行波在曲面上的行进路线是  $Q_1$ 、 $Q_2$  点之间沿曲面的最短距离。

$$\begin{cases} P_s(\xi^d) \approx \frac{e^{-j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\pi}} \sum_{p=1}^N \frac{e^{j\frac{\pi}{8}} e^{j\frac{4}{q_p} \rho_p} e^{-j(\frac{5\pi}{8})}}{2[Ai'(-q_p)]^2} \\ P_h(\xi^d) \approx \frac{e^{-j\frac{\pi}{4}}}{\sqrt{\pi}} \sum_{p=1}^N \frac{e^{j\frac{\pi}{8}} e^{j\frac{4}{q_p} \rho_p} e^{-j(\frac{5\pi}{8})}}{2\bar{q}_p [Ai(-\bar{q}_p)]^2} \end{cases} \quad (\xi^d \gg 0) \quad (10)$$

式中,  $Ai$  表示克勒尔类型的艾里函数,  $Ai'$  是它的导数;  $q_p$  和  $\bar{q}_p$  分别由  $Ai(-q_p) = 0$  和  $Ai'(-\bar{q}_p) = 0$  确定。

由式(5)可知, 爬行波衰减项  $\xi^d$  与爬行路径长度  $t$  成正比, 与沿爬行路径的曲率半径  $\rho_s$  成反比, 即爬行路径长度  $t$  越大, 曲率半径  $\rho_s$  越小, 爬行波衰减越强。因此, 爬行波的散射强度将随  $t$  的增大和  $\rho_s$  的减小而减小。

沿翼展方向积分, 得到绕射电场和绕射磁场为

$$E^d = \frac{e^{-jkR}}{R} \int_0^L e^{-jk(r_1+r_2)} [E^s(Q_1) T(Q_1, Q_2)] dl \cdot b_2 \quad (11)$$

$$H^d = \frac{e^{-jkR}}{R} \int_0^L e^{-jk(r_1+r_2)} [H^s(Q_1) T(Q_1, Q_2)] dl \cdot b_2 \quad (12)$$

式中,  $L$  为机翼展向长度。绕射电场和磁场均在  $b_2$  方向上。总的绕射电场为

$$E^d(P) = E^d b_2 + Z_0 H^d n_2 \quad (13)$$

式中,  $P$  为远区场点。由互易定理, 上下表面的爬行波电场值相同, 两者相加得

$$E = 2E^d(P) \quad (14)$$

机翼前缘影区爬行波的 RCS 贡献为

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \left| \frac{E \cdot e_r}{E^s(Q_1)} \right|^2 \quad (15)$$

式中,  $e_r$  为雷达接收机的极化方向。

## 2 短程线求解

图 2 所示为任意光滑凸曲面上爬行波的行进路线。由广义费马原理, 图中由  $O$  点经曲面上的  $Q_1$  和  $Q_2$  点到达  $P$  点的路程是  $O$  点和  $P$  点间不穿过曲面的最短距离, 即入射射线和绕射射线分别在  $Q_1$  和  $Q_2$  点与曲面相切, 而表面射线是  $Q_1$  和  $Q_2$  间的最短

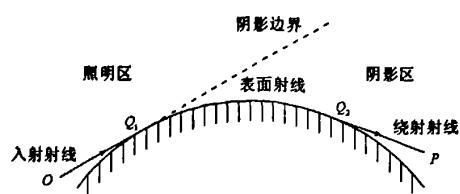
距离<sup>[9]</sup>。

图 2 光滑凸曲面上的爬行波

根据微分几何理论, 任意曲面上有限区域内两点间的最短距离是测地线。因此, 确定爬行波在任意曲面上的行进路线, 就变成了求解曲面上两点间测地线的问题。测地线的定义是: 曲面上测地曲率等于零的曲线称为测地线。

设曲面 S 的参数方程表达式为  $X(x(u, v), y(u, v), z(u, v))$ , 根据 Frenet 原理, 在曲面上取正交标架  $\{r; e_1, e_2, e_3\}$ 。曲面上弧长参数曲线  $r = r(s)$  的测地曲率  $k_g$  为

$$k_g = \left( \frac{D e_1}{ds}, e_2 \right) = \left( \frac{de_1}{ds}, e_2 \right) = \left( \frac{d^2 r}{ds^2}, e_2 \right) \quad (16)$$

式中,  $D e_1$  是标架  $e_1$  的协变微分。测地曲率  $k_g$  表示曲线  $r = r(s)$  在曲面切平面内的弯曲程度。

测地线的  $k_g = 0$  表示测地线在曲面切平面内不发生弯曲, 因而在切平面内的传播方向也不会变。因此, 只要保证爬行波路径上每一点切平面内的传播方向相同, 就可以确定它是一条测地线。

测地线是平面直线在曲面上的推广, 和平面上从任意一点出发沿给定方向均可作一条直线一样, 按照给定的切线方向, 从曲面上一点出发只有唯一的一条测地线, 符合爬行波从曲面上一点开始沿入射方向只能有一条表面传播路径的情况。

对于任意凸曲面, 根据型值点数据生成曲面后, 按照测地曲率  $k_g = 0$  的条件求解从入射切点开始的短程线路径。求解步骤如下:

1) 在入射点  $P_0$ , 根据入射方向  $i$  求出在入射点切平面内入射射线的投影方位角  $\varphi_i$ 。

2) 从  $P_0$  出发按入射方向  $i$  找到邻近一点  $P_1$ , 在  $P_1$  点的切平面内由方位角  $\varphi_i$  确定散射方向  $s_1$ 。

3) 从  $P_1$  出发根据散射方向  $s_1$  求出爬行路径的下一点  $P_2$ , 并由方位角  $\varphi_i$  求得散射方向  $s_2$ 。以此类推即可求出该曲面短程线上的所有点。

## 3 计算与测试结果分析

为验证方法的适用性, 对图 4 所示三维机翼进

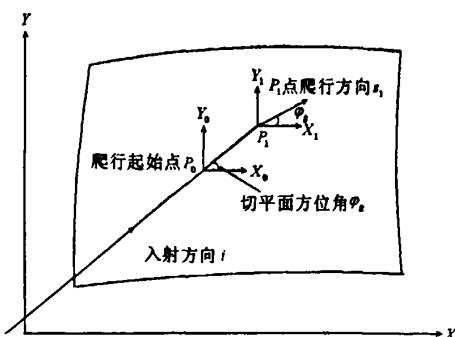


图 3 短程线求解示意图

行了计算和测试。模型采用 NACA0015 对称翼型，展长  $L$  为 0.6m，翼根弦长和翼尖弦长分别为 0.25m 和 0.2m，前缘后掠角为  $10^\circ$ ，相对厚度为 15%，计算与测试频率为 14GHz。测试模型为实心全铝结构，表面非常光滑，符合爬行波产生条件。

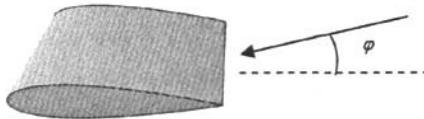


图 4 三维机翼计算模型

图 5 为方位角在  $-20^\circ \sim 0^\circ$  之间的前缘影区爬行波 RCS 计算结果，极化方式为垂直极化，俯仰角为  $0^\circ$ 。爬行波 RCS 最大值出现在前缘内法线方向 ( $\varphi = -10^\circ$ )，与预期结果相符。

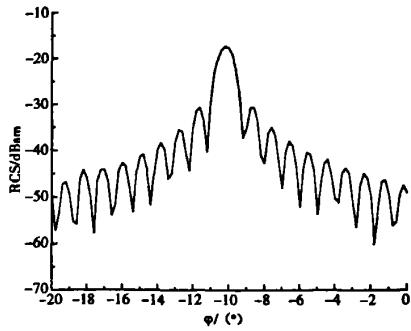


图 5 机翼前缘影区爬行波 RCS 计算结果

图 6 为不包含爬行波贡献的 RCS 计算和测试结果的对比。从图中可以看出，计算结果对机翼两个端面的散射、前缘散射和后缘尖劈散射等峰值的预测与测试结果吻合良好。而测试结果中在前缘内法线方向出现的峰值在计算结果中并没有体现，所以计算中不考虑爬行波就不能准确预估机翼的散射

结果。

图 7 为包含爬行波贡献时整个机翼 RCS 的计算和测试结果比较。在该图中，计算结果准确预测了前缘影区爬行波峰值。峰值位置为前缘内法线方向，爬行波峰值的计算结果为  $-18.7\text{dBsm}$ ，测试结果为  $-24.2\text{dBsm}$ 。

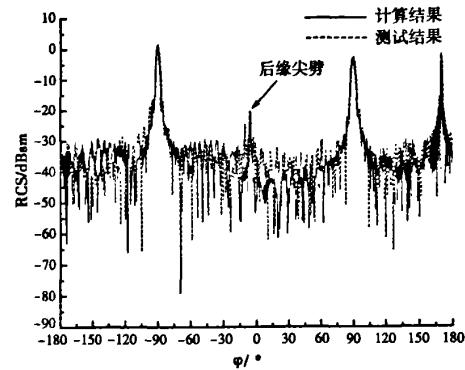


图 6 三维机翼 RCS 不包含爬行波贡献的计算与测试结果

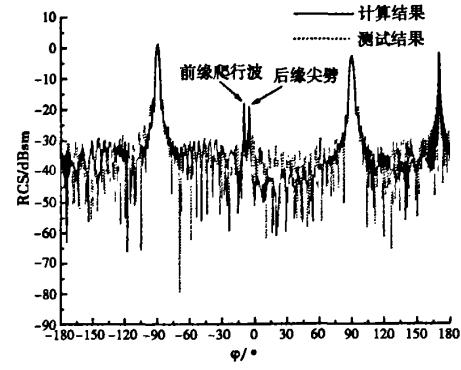


图 7 三维机翼 RCS 包含爬行波贡献的计算与测试结果

为了分析爬行波 RCS 与机翼长度  $L$ 、弦长  $C$  及入射波频率  $F$  的关系，分别计算了单一参数变化对机翼前缘影区爬行波 RCS 贡献的影响。

由于篇幅所限，仅给出计算结果：

1) 机翼展长：随着机翼展长的增大，爬行波 RCS 贡献也随之增大，二者呈线性关系。这是因为绕射电场和绕射磁场的求解中要对机翼展长进行积分，所以展长越大计算结果越大。

2) 机翼弦长：随着机翼弦长的增加，爬行波 RCS 贡献减小。弦长增加会使爬行路径增大，表面射线在更长的爬行过程中要损失更多能量，因此回

到雷达方向的绕射线能量减小, RCS 贡献也减小。

3) 入射波频率: 爬行波 RCS 贡献随入射波频率的减小而增大。因此对于低频雷达, 爬行波的 RCS 贡献会更显著。

## 4 结 论

提出了采用一致性绕射理论处理三维机翼前缘影区爬行波的计算方法, 并给出了机翼表面短程线的工程求解方法。

计算和测试结果显示, 机翼前缘影区爬行波 RCS 贡献的最大值出现在前缘内法线方向, 因此在隐身飞机设计中通常把垂直前缘方向偏离机身轴向的敏感部位, 以减小飞机被敌方雷达探测到的可能性。

前缘影区爬行波 RCS 贡献与机翼展长、弦长以及入射频率等参数有关, 这些规律在隐身飞机的机翼设计中具有十分重要的意义。

## 参 考 文 献

- [1] 马东立, 武哲. 二维机翼影区爬行波 RCS 的研究[J]. 航空学报, 1996, 17(7): 116-119.  
MA Dongli, WU Zhe. Study about radar cross section of creeping waves for a two dimensional wing[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 1996, 17 (7): 116-119. (in Chinese)
- [2] 李伟明, 高本庆. 圆柱体上爬行波场分析及电磁兼容性设计应用[J]. 电波科学学报, 2003, 18(1): 82-85.  
LI Weiming, GAO Benqing. Analysis of the diffraction field on conductive cylinder and applications of electromagnetic compatibility designing[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(1): 82-85. (in Chinese)
- [3] JHA R M, BOKHARI S A, WIESBECK W. A novel ray tracing on general paraboloids of revolution for UTD applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(7): 934-939.
- [4] ZHU X, JEN L, WANG W. Accurate ray-tracing method for the creeping wave on a numerically specified surface[J]. Electronics Letters, 1995, 31(4): 260-261.
- [5] 吴萍, 吴先良. 凸曲面爬行波射线寻迹的研究[J]. 微机发展, 2003, 13(9): 60-62.  
WU Ping, WU Xianliang. Ray path tracing on convex surface with applications to creeping wave[J]. Micro-computer Development, 2003, 13(9): 60-62. (in Chinese)
- [6] 宁焕生, 杨志凌, 王宝发. C-R 样条用于低散射目标爬行波求解[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26 (2): 137-140.  
NING Huansheng, YANG Zhiling, WANG Baofa. C-R spline fitting theory for the rcs computation of low scattering targets[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics And Astronautics, 2000, 26 (2): 137-140. (in Chinese)
- [7] 宁焕生, 钮保强, 王宝发. 低雷达散射目标的 RCS 分析与求解[J]. 航空学报, 1998, 19(7): 78-80.  
NING Huansheng, NIU Baoqiang, WANG Baofa. RCS computation and analysis of low scattering radar targets[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 1998, 19(7): 78-80.
- [8] PATHAK P H, BURNSIDE W D, MARHEFKA R J. A uniform GTD analysis of the diffraction of electromagnetic waves by a smooth convex surface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1980, 28 (5): 631-642.
- [9] 汪茂光. 几何绕射理论[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985: 138-141.



马东立 (1966—), 男, 山东人, 北京航空航天大学教授、博士生导师。主要研究方向: 飞行器总体设计、隐身设计、效能评估、无人机技术。



刘忠铁 (1980—), 男, 辽宁人, 博士生。研究方向为飞行器隐身技术。

## 雷达散射截面（RCS）分析培训课程

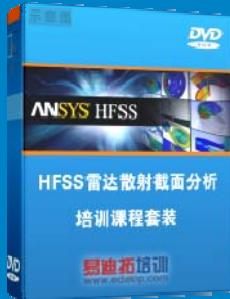
易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

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/>