

HFSS/PO 混合分析飞行器放电对雷达目标特性的影响

陈博韬, 雷振亚, 谢拥军

(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要:为精确计算飞行器在飞行过程中静电放电对雷达散射截面(radar cross section, RCS)的影响,采用高频电磁仿真软件 Ansoft HFSS 与物理光学(physic-optics, PO)法相混合。用 HFSS 计算放电产生的等离子体所覆盖的局部机翼的散射场,用物理光学法计算飞行器其余部分引起的散射场,将二者的等相位面重合,保持飞行器各散射体之间的相位关系,进而计算出飞行器的宽带雷达散射截面。

关键词:雷达散射截面;混合方法;静电放电;等离子体;物理光学法

中图分类号: TN 011

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2010.09.20

Analysis of hybrid HFSS/PO in scattering characteristics of aircraft electrostatic discharging

CHEN Bo-tao, LEI Zhen-ya, XIE Yong-jun

(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The physic-optics (PO) method is combined with the electromagnetic software Ansoft HFSS to calculate accurately the radar cross section (RCS) of aircraft electrostatic discharging. HFSS is applied to compute the scattered field of the part which is covered with plasma, while PO is used for the other of the aircraft. The common constant phase front of two scattered fields is chosen to unify their phases, and the aircraft's RCS can be exactly calculated.

Keywords: radar cross section (RCS); hybrid method; electrostatic discharging; plasma; physic-optics (PO) method

0 引言

飞行器在飞行过程中会发生静电放电,在放电位置附近电离出等离子体,由于等离子体的特殊性质,会影响飞行器的雷达目标特性。因为雷达主要工作在微波频段,导弹、飞机等均属于电大尺寸的复杂目标,而等离子体只是在飞行器的局部存在,这就可以看成是在复杂电大尺寸的目标上采取了电小尺寸的局部涂覆。随着隐身与反隐身、雷达识别与反识别、精密制导以及仿真等技术的发展,对目标散射特性和目标特征提取、识别的要求越来越高,快速准确地计算飞行器放电时的雷达目标特性有着重要的意义。由于放电过程中产生了等离子体这种复杂媒质,因此单独采用几何光学法^[1]或物理光学法^[2]等高频计算方法,在计算精度上已不能满足要求;而在处理飞行器这种电大尺寸物体时,矩量法^[3]或有限元法^[4]等数值方法又需要巨大的内存和时间。因此,单独使用某一种计算方法很难快速精确分析飞行器静电放电对目标特性的影响。越来越多的学者用高频方法与数值方法结合的混合算法^[5-8]来考虑复杂目标

和复杂媒质的散射问题。但是,无论是物理光学法-矩量法^[5-6],还是一致性几何绕射理论-矩量法^[7],或矩量法-共轭梯度法和快速傅里叶变换相结合的混合法^[8],以及有限元和混合方法^[9],目前尚未用于等离子体这类复杂媒质局部涂覆电大尺寸导体目标的电磁散射计算。

本文研究了飞行器在飞行过程中的静电放电现象,综合利用物理光学法与高频电磁仿真软件 Ansoft HFSS,计算飞行器放电对宽带目标特性的影响。用物理光学法计算未涂覆等离子体部位的散射场,用 HFSS 计算等离子体包围部位产生的散射场,用共同的等相位面,将二者产生的散射场结合,计算在飞行器静电放电时飞行器的雷达散射截面积。

1 飞行器静电放电

飞行器的起电是由很多过程共同作用的结果^[10],基本可归结为摩擦起电、引擎燃烧产生等离子起电、感应起电和吸附带电粒子起电。飞机在飞行中产生的静电危害有很多,如可使飞机燃油箱起火爆炸并干扰飞机通讯和导航系统,酿成灾难。因此,现代飞行器上都在静电积聚的部位装

收稿日期:2009-08-29; 修回日期:2010-07-06。

作者简介:陈博韬(1983-),男,博士研究生,主要研究方向为计算电磁学、雷达仿真。E-mail:batistuta05@126.com

有静电消除装置,其中最主要的一种就是静电放电刷。由于静电荷最集中的地方是机翼尖端部位的后缘以及垂直和水平尾翼的后尖部位,所以放电刷通常都安装在这些部位。当达到起电电压时,就会产生电晕放电。电晕放电常发生在不均匀电场中电场强度很高的区域内(例如高压导线的周围,带电体的尖端附近),其具有与日晕相似的光层,产生等离子体以及其他少量臭氧、氧化氮等气体。电晕放电的效果随着温度不同而改变,海拔和空速也影响电晕放电效果。

等离子体是由大量的自由电子、离子和中性粒子(包括不带电荷的粒子,如原子、分子以及原子团)组成且在宏观上表现为近似电中性的非凝聚系统。如果在等离子体中存在电子的扰动(使电子与离子本底有个位移),将在等离子体中形成电子的振荡。这个振荡的频率就是等离子体频率 ω_p 。

$$\omega_p = \sqrt{N_e e_0^2 / m_e \epsilon_0} \quad (1)$$

式中, N_e 是自由电子密度; e_0 和 m_e 分别是电子电量和质量; ϵ_0 是真空中介电常数。

考虑等离子体的碰撞,非磁化冷等离子体的相对介电常数(折射率) ϵ_r 可以表示为

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu)} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} - j \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad (2)$$

式中, ω 是电磁波角频率; ν 是电子碰撞频率。电磁波在等离子体中的传播常数 k 是复数,可以表示为

$$k = k_0 \sqrt{\epsilon_r} = k_r + jk_i \quad (3)$$

式中, k_0 是真空中传播常数。

2 计算方法分析

本文设定飞行器的表面是理想导体,由于放电刷放电,在翼尖位置产生等离子体。根据等离子体的覆盖范围,将飞行器分为物理光学法计算区和 HFSS 计算区。采用 HFSS 计算放电产生的等离子体所覆盖的局部机翼的散射场,用物理光学法计算飞行器其余部分的散射场。由于飞行器属于电大尺寸,在用物理光学法和 HFSS 计算各部分的电场时,不考虑另一部分对它的耦合影响,在最后计算总场时,利用正确的相位关系来表示彼此间的干涉作用。

2.1 物理光学法

由飞行器静电放电所产生的等离子体只是覆盖在放电刷周围,其余部分设定为理想导体。在研究电磁散射问题时,如果散射体尺寸远大于电磁波波长,可以将其作为众多彼此独立的散射中心处理,物理光学方法可以很好地表示电大导体表面的实际电流密度。在光照区,表面电流大小等效为入射磁场切向分量的两倍^[11],即满足边界条件

$$\mathbf{J}(r') \approx 2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{h}_i \quad (4)$$

式中, $\hat{\mathbf{n}}$ 是外向法单位矢量; \mathbf{h}_i 是入射磁场极化方向矢量。

设 ψ 是自由空间格林函数,当观察点位于远区场时,从散射体上面或其周围的源点到远场点的距离远远大于散射体长度,可以把 ψ 进行如下近似处理

$$\nabla \psi \approx jk\hat{\mathbf{s}}\psi \quad (5)$$

式中, $\hat{\mathbf{s}}$ 表示指向散射方向的单位矢量。于是,可以利用

Stratton-Chu 积分,把目标的散射场写为

$$\mathbf{E}_s = -j2kZ_0 H_0 \psi_0 \int_S \hat{\mathbf{s}} \times [\hat{\mathbf{s}} \times (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}_i)] e^{jk\hat{\mathbf{s}} \cdot (\hat{\mathbf{i}} - \hat{\mathbf{r}})} dS \quad (6)$$

式中, ψ_0 是远场格林函数; Z_0 表示自由空间阻抗; H_0 表示入射波磁场强度; $\hat{\mathbf{i}}$ 表示入射波传播方向的单位矢量; S 表示散射体的光照表面,在物体的阴影部分表面切向场大小假设为零。

根据目标表面上各个散射部件之间的相对相位关系以及散射场的极化关系,将雷达散射截面(radar cross section, RCS)重新定义为如下复数量^[12]

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{\pi R} \frac{\mathbf{E}_s \cdot \hat{\mathbf{e}}_r}{E_0} \exp(jkR) \quad (7)$$

式中, $\sqrt{\sigma}$ 是表示各散射中心的复数散射场; R 是从雷达到该散射中心的双程距离; $\hat{\mathbf{e}}_r$ 是接受装置电极化方向的单位矢量。

2.2 HFSS

有限元法是一种近似求解数理边值问题的数值方法,在进行场域剖分时非常灵活方便。使用有限元法可以方便地分析具有复杂几何结构和复杂材料的电磁问题。

计算远区散射场,首先要是在散射体外建立辐射边界,将待求解的区域用有限个特定的小单元进行离散,在每一个离散单元内应用标量或矢量插值函数对原问题的等价泛函进行分析,求解出辐射边界内的电磁场。然后利用辐射边界上的场来计算模型周围空间的场,根据 Stratton-Chu 积分方程,可以把模型辐射边界外部的散射场写为

$$\mathbf{E}_s = \int_S [j\omega\mu_0 (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}) \Psi + (\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}) \times \nabla \Psi + (\hat{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{E}) \nabla \Psi] dS \quad (8)$$

式中, \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别是封闭的辐射边界上的电场和磁场;自由空间格林函数 Ψ 可以写为

$$\Psi = \frac{e^{-jk_0|r-r'|}}{|r-r'|} \quad (9)$$

式中, \mathbf{r} 和 \mathbf{r}' 分别表示场点和源点的位置矢量。当考虑远区场时,满足条件 $r \gg r'$,自由空间格林函数可以近似表示为

$$\Psi = \frac{e^{-jk_0 r} e^{jk_0 r' \cdot \hat{\mathbf{r}}}}{r} \quad (10)$$

将自由空间格林函数表达式(10)代入式(6),分析比较式(6)和式(8),都存在格林函数远区场的相位因子 $e^{-jk_0 r}$,为了将物理光学法和有限元法相结合,可以把相位因子都提出来,通过建立一致的零值等相位面,来保持不同散射体之间的相位关系。

将等离子体扩散到的部位等效为涂覆了非均匀等离子体的导体,利用基于有限元方法的三维电磁仿真软件 Ansoft HFSS^[13],在同一坐标系中,设置相同的人射波条件,保持各部分散射体的位置不变,利用 HFSS 软件分析在等离子体所覆盖的局部机翼的散射场。

2.3 两种方法的混合处理

利用混合方法之前需要进行消隐预处理,对飞行器等离子体涂覆区和非等离子涂覆区的结合部位进行消隐,将其设成由完全吸波材料构成的理想匹配层,用以消除混合计算所产生的交界面散射和棱边散射的影响。在 HFSS 仿真中,选择平面波入射,入射电磁波的极化方式和采用物理光学法计

算时保持一致。将坐标原点设为零相位点,则经过原点并且与入射波方向垂直的平面就是零相位面;在用物理光学法计算时,为了使两种计算方法在远场区产生的散射场的相位关系能保持一致,需要将过原点并且与入射波方向垂直的平面设置为零相位面。在 HFSS 中,某特定方向上的远区散射场强度 E_{sd} 和距离 R 结合在一起,表示为 rE ,即

$$rE = \lim_{R \rightarrow \infty} RE_{sd} \quad (11)$$

在 HFSS 中散射场 E , 还包含相位因子 $\exp(jkR)$ 。

再综合式(7),可以分别算出两部分的 $\sqrt{\sigma}$,而雷达散射截面 σ 可以表示为

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^M \sqrt{\sigma_n} + \sqrt{\sigma_{M+1}} \right|^2 \quad (12)$$

式中, $\sqrt{\sigma_n}$ 表示在物理光学法计算过程中,由散射体每个小面元散射场得到的 RCS 的复数平方根; $\sqrt{\sigma_{M+1}}$ 表示由 HFSS 计算出的等离子体涂覆部分散射场得到的 RCS 的复数平方根。

2.4 计算方法验证实例

如图 1 所示的一个理想导体平板,长宽为 $10\lambda \times 10\lambda$,厚度为 $\lambda/20$,在平板右半部分 $l=10\lambda, b=5\lambda$ 的区域上均匀涂覆了一层厚度为 $\lambda/20$ 的各向异性媒质,未涂覆区域大小为 $l=10\lambda, a=5\lambda$ 。涂敷材料相对介电常数张量 ϵ_r 为

$$\epsilon_r = \begin{bmatrix} 25.25 - j2.41 & 0 & 0 \\ 0 & 7.12 + j3.25 & 0 \\ 0 & 0 & 3.56 - j1.83 \end{bmatrix}$$

相对磁导率为 $\mu_r = 2.13 - j2.61$ 。入射波频率 $f = 5 \text{ GHz}$,与 z 轴夹角是 θ ,在 xoy 面上与 x 轴的夹角是 ϕ ,将混合计算结果与单独用 HFSS 仿真结果进行比较验证,结果如图 2 所示。

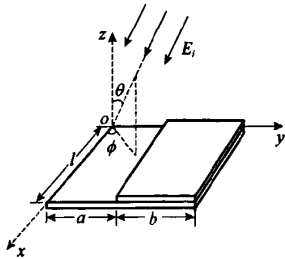


图 1 局部涂敷平板模型

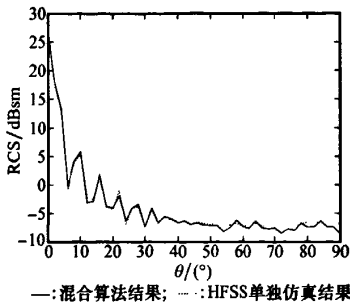


图 2 局部涂敷平板的单站 RCS($\theta = 0^\circ \sim 90^\circ, \phi = 0^\circ$)

由图 2 可以明显看出,采用混合方法计算的结果和单独用 HFSS 软件仿真的结果相比,在整体趋势上较为吻合。在垂直平板入射的角度范围附近,两种方法计算结果非常吻合;在边缘入射角度周围,混合算法计算结果还有一点误差,这是由于作为计算模型的平板厚度很小,从边缘角度附近入射时,平板边缘占了光照区绝大部分,已不能够满足电大尺寸,采用物理光学算法近似所必然造成的计算误差。将计算目标由电大简单涂敷目标应用到局部涂覆等离子体的电大复杂目标时,利用物理光学方法和高频局部性原理,对于面元的散射场计算是相同的,仅仅增加了 OpenGL 对目标进行遮挡判断的计算量,而用 HFSS 仿真的过程也相同。因此,此方法具有一定的普遍性。

3 飞行器放电仿真

图 3 是仿真中建立的某飞机模型,飞机模型尺寸:长 8.6 m,宽 6.8 m,高 1.36 m。根据电晕放电所产生的等离子体浓度和等离子体浓度的分布规律^[14-15],设定在飞机高空飞行时由于放电产生的等离子体紧靠机翼壁处电子浓度为 $4.98 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$,厚度是 0.05 m,浓度由机翼向外呈线性分布减小到零。根据等离子体的范围将飞机分为两部分:涂覆着等离子体的机翼尖端部位和其余属于电大导体的飞机部位。将两部分的结合面遮挡消隐,用 FEMAP 软件对飞机进行三角面元剖分,计算在不同入射方向的情况下,飞机模型的宽带散射特性。

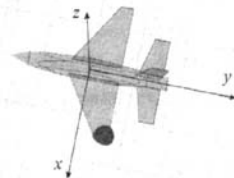


图 3 飞机模型和等离子体分布位置

图 4 中虚线表示的是在 2 GHz 频率,HH 极化时,用混合方法计算的静电放电时飞机的 RCS,实线显示的是飞行器没有涂覆,单独用高频方法计算的飞机的 RCS。从图 4 中可以看出,当飞机静电放电产生等离子体时,随着入射角的变化,飞机的 RCS 会有所改变,但是改变幅度较小。图 5 是沿机头方向入射时飞机的 RCS,由结果可以看出,飞机静电放电对其宽带散射特性的影响较小。

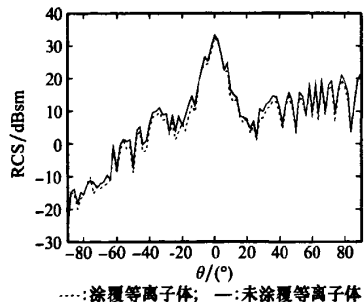


图 4 飞机 RCS(2 GHz, HH 极化, $\phi = 90^\circ$)

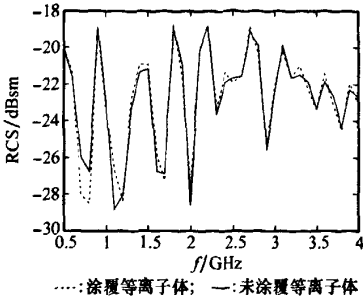


图 5 沿机头方向入射时飞机 RCS(HH 极化)

提高等离子体浓度, 设定紧靠机翼壁处电子浓度为 $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, 扩散范围是原来的 3 倍, 分布规律不变, 图 6 给出了在入射波频率是 1 GHz 的情况, 不同入射角时飞机的 RCS。由图 6 可以看出在大多数角度下飞机 RCS 会有明显的减小。计算结果表明, 当飞机静电放电时, 产生了等离子体, 在总体趋势上会减小飞机的 RCS, 但是由于所产生的等离子体浓度较小, 扩散范围有限, 所以不能大幅度降低它的 RCS。如果等离子体浓度达到一定程度, 其覆盖飞机范围较大, 会明显降低飞行器的 RCS。如何产生持续稳定、浓度足够大的等离子体, 是当今等离子体隐身技术中面临的难以解决的问题。

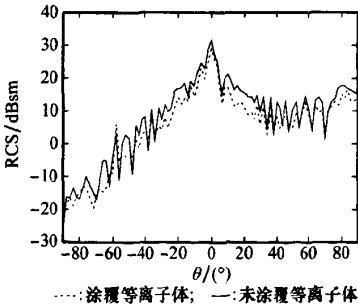


图 6 飞机 RCS(1 GHz, HH 极化, $\phi = 90^\circ$)

4 结 论

本文利用物理光学法与高频电磁仿真软件 HFSS 混合计算飞行器静电对目标特性的影响。用物理光学法计算了未涂覆等离子体部位的散射场, 用 HFSS 计算了等离子体包围部位产生的散射场, 用共同的等相位面, 将二者产生的散射场结合, 计算了在飞行器静电放电时飞行器的 RCS, 为飞行器表面涂覆材料设计和隐身性能仿真提供了一种有效方法。结果表明, 在飞行器静电放电过程中, 由于所产生的等离子体浓度较小, 扩散范围有限, 其 RCS 没有显著改变。

参考文献:

- [1] Thompson D R, Elfouhaily T M, Garrison J L. An improved geometrical optics model for bistatic GPS scattering from the ocean surface [J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2810 - 2821.
- [2] Li Xiaofeng, Xie Yongjun, Wang Peng, et al. High-frequency method for scattering from electrically large conductive targets in half space [J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2007, 6(1): 259 - 262.
- [3] Eastwood J W, Morgan J G. Higher-order basis functions for MoM calculations [J]. *IET Science, Measurement and Technology*, 2008, 2(6): 379 - 386.
- [4] Massaro A, Errico V, Stomeo T, et al. 3-D FEM modeling and fabrication of circular photonic crystal microcavity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(16): 2960 - 2968.
- [5] Djordjevic M, Notaros B M. Higher order hybrid method of moments-physical optics modeling technique for radiation and scattering from large perfectly conducting surfaces [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, 53(2): 800 - 813.
- [6] Gong Zhuqian, Xiao Boxun, Zhu Guoqiang, et al. Improvements to the hybrid MoM-PO technique for scattering of plane wave by an infinite wedge [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2006, 54(1): 251 - 255.
- [7] Persson P, Josefsson L. Calculating the mutual coupling between apertures on a convex circular cylinder using a hybrid UTD-MoM method [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2001, 49(4): 672 - 677.
- [8] 朱秀芹, 耿友林, 吴信宝. 三维各向异性介质目标电磁散射的 MOM-CGM-FFT 方法 [J]. *电波科学学报*, 2002, 17(3): 209 - 215.
- [9] Fernandez-Recio R, Garcia-Castillo L E, Gomez-Revuelto I, et al. Fully coupled multi-hybrid FEM PO/PTD-UTD method for the analysis of radiation problems [J]. *IEEE Trans. on Magnetics*, 2007, 43(4): 1341 - 1344.
- [10] 刘尚合. 静电放电及危害防护 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [11] Li Xiaofeng, Xie Yongjun, Yang Rui. Bistatic RCS prediction for complex targets using modified current marching technique [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2009, 93: 13 - 28.
- [12] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [13] 谢拥军, 刘莹, 李磊, 等. HFSS 原理与工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] 白敏西, 杨波, 周建刚, 等. 大气压下电晕电离层离子运动规律的实验研究 [J]. *核聚变与等离子体物理*, 2005, 25(4): 311 - 314.
- [15] 孙和敏, 张新好, 张乐平. 对抗等离子体隐身技术的探讨 [J]. *电子对抗*, 2003, 26(5): 36 - 40.

HFSS 视频培训课程推荐

HFSS 软件是当前最流行的微波无源器件和天线设计软件，易迪拓培训(www.edatop.com)是国内最专业的微波、射频和天线设计培训机构。

为帮助工程师能够更好、更快地学习掌握 HFSS 的设计应用，易迪拓培训特邀李明洋老师主讲了多套 HFSS 视频培训课程。李明洋老师具有丰富的工程设计经验，曾编著出版了《HFSS 电磁仿真设计应用详解》、《HFSS 天线设计》等多本 HFSS 专业图书。视频课程，专家讲解，直观易学，是您学习 HFSS 的最佳选择。



HFSS 学习培训课程套装

该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程，是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装，可以帮助您从零开始，全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装，更可超值赠送 3 个月免费学习答疑，随时解答您学习过程中遇到的棘手问题，让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

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，可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>



更多 HFSS 视频培训课程:

● 两周学会 HFSS —— 中文视频培训课程

课程从零讲起，通过两周的课程学习，可以帮助您快速入门、自学掌握 HFSS，是 HFSS 初学者的最好课程，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/1.html>

● HFSS 微波器件仿真设计实例 —— 中文视频教程

HFSS 进阶培训课程，通过十个 HFSS 仿真设计实例，带您更深入学习 HFSS 的实际应用，掌握 HFSS 高级设置和应用技巧，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/3.html>

● HFSS 天线设计入门 —— 中文视频教程

HFSS 是天线设计的王者，该教程全面解析了天线的基础知识、HFSS 天线设计流程和详细操作设置，让 HFSS 天线设计不再难，网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/4.html>

● 更多 HFSS 培训课程，敬请浏览: <http://www.edatop.com/peixun/hfss>

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,一直致力和专注于微波、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相关培训课程和 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讲授,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>