

# 鞭天线场强和天线耦合度计算

海军论证中心标准规范研究所 周大华 刘玉琴

**摘要** 本文给出鞭天线场强和天线耦合度的计算方法，并对有天线调谐器的情况进行分析。

**关键词** 鞭天线 场强 耦合度

## 1. 引言

鞭天线属小电尺寸天线，天线高度  $h$  与波长  $\lambda$  之比  $h/\lambda < 1$ ，这种天线的场分为电抗近场区和辐射远场区，不存在辐射近场区，在离天线  $r = \frac{\lambda}{2\pi}$  处，电抗近场等于辐射远场，这是它们 0 的界线。在  $r = 0.5\gamma$  处，辐射远场场强比电抗近场场强大 10dB，故从辐射远场导出的公式(5)，适合于  $r > 0.5\lambda$  的工程计算。 $r$  在  $\frac{\lambda}{2\pi}$  和  $0.5\lambda$  之间，计算值仅作参考。在  $r < \frac{\lambda}{2\pi}$ ，电抗场占优势，电磁能量只在场源和场之间来回振荡，能量不向外辐射，场强电场与  $r$  的三次幂成反比，即场强随距离迅速下降，故它的场强应小于本文式(5)的计算值，这在实际测试中已得到证实。

本文将结合舰船实际情况，从电磁兼容性角度看，短波 1kW 发射是本舰最大的干扰源，故以它为例子进行计算。

## 2. 鞭天线场强计算

有一无方向性天线辐射功率为  $P$  (瓦)，功率均匀地分布在以天线为球心的球面上，离天线  $r$ (米)处的功率密度  $S$  为：

$$S = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

坡印亭矢量为：

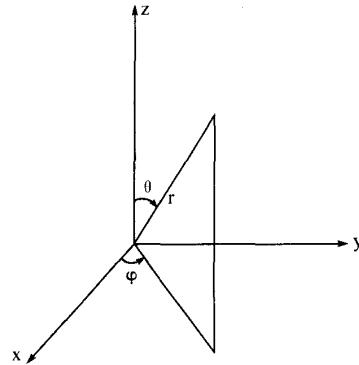


图 1 天线辐射的坐标系

$$S = EXH = \frac{E^2}{120\pi} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

或(1)与式(2)相等，可得离天线  $r$  处辐射场强为：

$$E = \frac{\sqrt{30P}}{r} \quad (\text{V/m}) \quad (3)$$

实际上天线是有方向性的，设发射天线方向性系数为  $D$ ，在自由空间离天线  $\gamma$  处的场强为：

$$E = \frac{\sqrt{30PD}}{r} \quad (\text{V/m}) \quad (4)$$

对鞭天线，设地面为理想导电面，它不吸收功率，使天线辐射功率全部集中在上半空间，故上半空间上任一点单位面积功率密度比自由空间提高一倍，因此，电场强度为：

$$E = \frac{\sqrt{60PD}}{r} \quad (V/m) \quad (5)$$

发射鞭天线方向性系数 D 为

$$D = \frac{60F^2(\theta)}{R_r} \quad (6)$$

式中,  $F(\theta)$  为天线 E 面(垂直于导电面)方向图函数,  $R_r$  为鞭天线辐射电阻。

$$F(\theta) = \frac{\cos(\beta h \cos\theta) - \cos\beta h}{\sin\theta} \quad (7)$$

式中,  $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $h$  为鞭天线高度。由式(7)画出  $F(\theta)$ , 见图 2<sup>[3]</sup>, 天线置于 Z 轴。当  $h > 0.5\lambda$  时, 开始出现旁瓣; 当  $h = 0.72\lambda$  时,  $\theta = 90^\circ$  处的主瓣与  $\theta = 40^\circ$  处的旁瓣相等; 当  $h > 0.72\lambda$  时,  $\theta = 90^\circ$  处成为旁瓣, 而主瓣出现在别处; 当  $h = \lambda$  时,  $\theta = 90^\circ$  处辐射为零。

鞭天线辐射电阻  $R_r$  为:

$$R_r = \frac{15}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi F^2(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta d\varphi \quad (8)$$

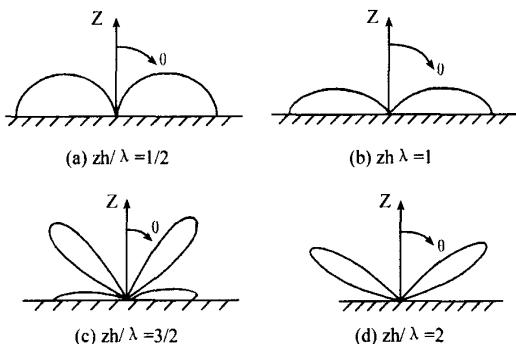


图 2 鞭天线 E 面方向图

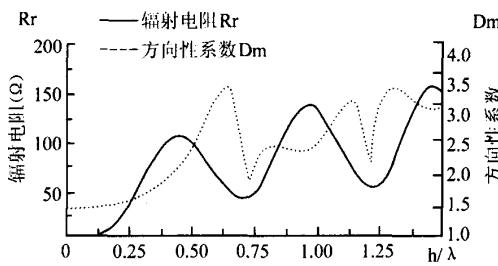


图 4 鞭天线辐射电阻  $R_r$  和方向性系数  $D_m$

积分后的  $R_r$  公式太复杂, 不列出, 仅用图 3 表示  $R_r$  与  $h/\lambda$  的关系<sup>[1]</sup>。

把式(7)和图 3 的  $R_r$  值代入式(6), 可得  $D$ 。

一般以天线在最大辐射方向的方向性系数  $D_m$  作为该天线的方向性系数,  $D_m$  与  $h/\lambda$  的关系见图 4<sup>[4]</sup>, 把图中的  $D_m$  值代入式(5), 可得该天线在最大辐射方向的场强。但在实际情况下, 需知道任一处的场强, 这就要先求出该处的  $\theta$  值, 再通过式(7)、图 3、式(5)求出  $E$  值。在  $\theta = 90^\circ$  方向,  $D$  与  $h/\lambda$  的关系见图 5。

例 1 在理想导电面上发射鞭天线高度  $h = 10m$ , 发射频率从 3MHz 到 30MHz, 发射功率均为  $P = 1000W$ , 求  $\theta = 90^\circ$  方向(即导电面水平方向)离天线 50m 处的场强。

解: 把  $r$  和  $P$  值代入式(5), 得  $E = 4.9\sqrt{D}$ , 把图 5 中  $D$  值代入, 即得  $E$  值, 画于

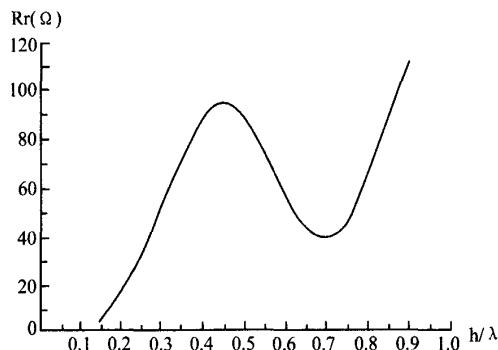


图 3 鞭天线辐射电阻  $R_r$  与  $h/\lambda$  的关系

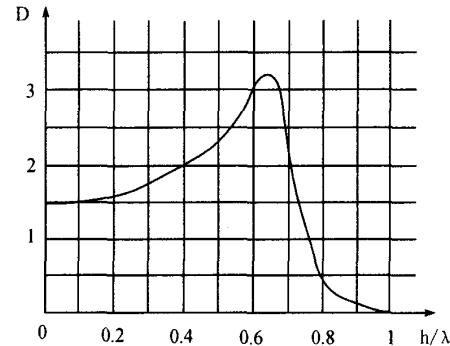


图 5  $D$  与  $h/\lambda$  关系(在  $\theta = 90^\circ$  方向)

图 6。

例 2 对例 1 情况, 若求离天线的水平距离仍为 50m, 离地面高度为 20m 处的场强。

解: 可求出  $\theta = 68.2^\circ$ ,  $r = 53.85m$ , 由式(5)得  $E = 4.55\sqrt{D}$ , 再从式(7)、图 3、式(6)求出 D 值, 再得 E 值画于图 7。

例 1 说明接收点场强随发射频率变化而变化, 场强零点发生在 30MHz。例 2 在例 1 相同条件下, 仅接收点高度不同, 场强随发射频率变化规律就不一样, 场强零点发生在 22MHz 附近, 而 30MHz 处场强很大, 但在 15MHz ( $h/\lambda = 0.5$ ) 以下频率, 场强变化规律相似。对舰船情况, 上层建筑是由形状复杂的金属物体构成, 金属物体的反射波与直射波的叠加, 必然形成驻波, 故舰船上鞭天线发射时, 周围会形成很复杂的驻波, 例 1 和例 2 中场强零点, 在实际测试中, 会有一个较小的场强存在, 其它频率, 实测与计算也会存在差异; 另外, 式(5)场强

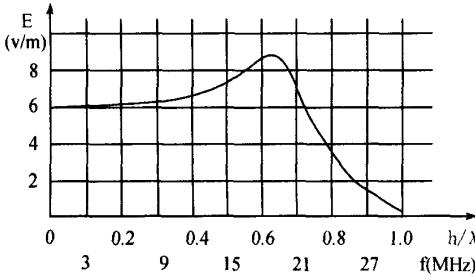


图 6 例 1 中 E 与 f 的关系

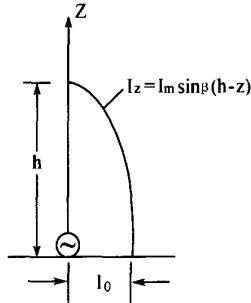


图 8 以馈电点电流  $I_0$  计算的鞭天线有效高度

随距离 r 增加而减小, 但因驻波存在, 实测中会出现距离 r 增加, 场强也增加的现象, 还有, 场强探头座离金属物体 0.3m 以上。

### 3. 天线耦合度计算

#### 3.1 鞭天线有效高度

用馈电点电流  $I_0$  作为基准电流, 设天线上电流分布为(见图 8)

$$I_z = I_m \sin \beta (h - z) \quad (9)$$

$$I_o = I_m \sin \beta h \quad (10)$$

$$I_o h_e = \int_0^h I_z dz = \int_0^h I_m \sin \beta (h - z) dz$$

由积分得鞭天线有效高度  $h_e$  为

$$h_e = \frac{1}{\beta} \operatorname{tg} \frac{\beta h}{2} \quad (11)$$

当  $h = \frac{\lambda}{4}$  时,  $h_e = \frac{\lambda}{2\pi}$ ; 当  $h < 0.1\lambda$  时,

$h_e = \frac{h}{2}$ 。但当  $h = \frac{\lambda}{2}$  时,  $h_e = \infty$ 。这不符合实际情况, 故此时应按波腹电流  $I_m$  为基准电流来计算  $h_e$ , 见图 9。

$$I_m h_e = \int_0^h I_m \sin \beta (h - z) dz \quad (12)$$

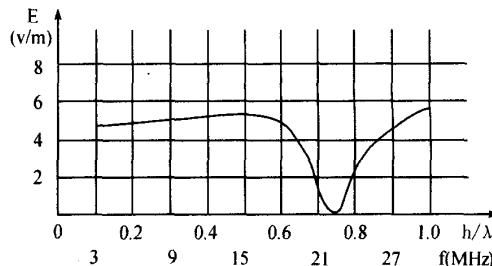


图 7 例 2 中 E 与 f 的关系

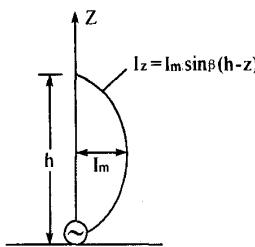


图 9 以波腹电流  $I_m$  计算的鞭天线有效高度

$$h_e = \frac{1}{\beta} (1 - \cos \beta h) \quad (13)$$

上式当  $h = \frac{\lambda}{4}$  时,  $h_e = \frac{\lambda}{2\pi}$ , 结果与式(11)相同; 当  $h = \frac{\lambda}{2}$  时,  $h_e = \frac{\lambda}{\pi}$ , 这符合实际情况, 故当  $h \leq \frac{\lambda}{4}$  时, 用式(11)计算  $h_e$ , 当  $h \geq \frac{\lambda}{4}$  时, 用式(13)计算  $h_e$ 。

$$Z_A = \frac{Z_c}{\operatorname{ch} 2\alpha' h - \cos 2\beta' h} \left[ (\operatorname{sh} 2\alpha' h - \frac{\alpha'}{\beta'} \operatorname{Sin} 2\beta' h) - j(\frac{\alpha'}{\beta'} \operatorname{sh} 2\alpha' h + \operatorname{Sin} 2\beta' h) \right] \quad (15)$$

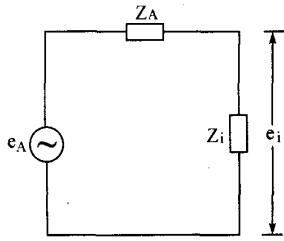


图 10 接收天线等效电路

式中,  $\alpha' = \frac{Rr}{Z_c \cdot h (1 - \frac{\operatorname{Sin} 2\beta h}{2\beta h})}$  为天线上衰减常数,  $\beta' = \frac{2\pi}{\lambda'}$  为天线上相移常数,  $\lambda'$  为天线上波长,  $Z_c$  为鞭天线特性阻抗:

$$Z_c = 60 \left( \ln \frac{2h}{a} - 1 \right) \quad (16)$$

式中,  $a$  为鞭天线半径。

仅当  $h/\lambda$  在  $0 \sim 0.35$  及  $0.65 \sim 0.85$  范围内时,  $Z_A$  为,

$$Z_A = \frac{Rr}{\operatorname{Sin}^2 \beta h} - j Z_c \cdot \operatorname{ctg} \beta h \quad (17)$$

图 10 中  $Z_i$  为接收机或测试设备的输入阻抗, 一般均为  $50\Omega$ , 天线端感应电压  $e_i$  为,

$$e_i = \frac{e_A Z_i}{Z_A + Z_i} = \frac{50 e_A}{\sqrt{R_A^2 + X_A^2} + 50} \quad (18)$$

### 3.2 天线感应电动势

电磁波在接收天线上产生的感应电动势为

$$e_A = E h_e \quad (14)$$

### 3.3 天线端感应电压

当天线与接收机输入端相连接时, 其等效电路如图 10 所示,  $Z_A$  为鞭天线输入阻抗,  $Z_A = R_A + jX_A$ ,  $|Z_A| = \sqrt{R_A^2 + X_A^2}$ ,  $Z_A$  为,

### 3.4 天线耦合度

从图 10 可知, 接收机输入功率  $P_i$  为

$$P_i = \frac{e_i^2}{Z_i} = \frac{e_A^2 Z_i}{(\sqrt{R_A^2 + X_A^2} + Z_i)^2} \quad (19)$$

把式(14)代入, 得

$$P_i = \frac{E^2 h_e^2 Z_i}{(\sqrt{R_A^2 + X_A^2} + Z_i)^2} \quad (20)$$

$$= \frac{60 P D h_e^2 Z_i}{r^2 (\sqrt{R_A^2 + X_A^2} + Z_i)^2} \quad (21)$$

天线耦合度  $C$  为,

$$C = \frac{P_i}{P} \quad (22)$$

$$= \frac{3000 D h_e^2}{r^2 (\sqrt{R_A^2 + X_A^2} + 50)^2} \quad (23)$$

式中,  $D$  为发射鞭天线方向性系数,  $h_e$  为接收鞭天线有效高度,  $r$  为收发天线距离,  $R_A$  和  $X_A$  为接收天线输入阻抗。

例 3 发射鞭天线  $h = 10m$ ,  $f = 7.5\text{MHz}$ , 离发天线  $r$  处, 有一根半径为  $a = 0.001\lambda$ , 高度可改变的收鞭天线, 求天线耦合度。

解:  $f = 7.5\text{MHz}$ ,  $\lambda = 40m$ ,  $h = \lambda/4$ ,  $D = 1.64$ , 若收鞭天线  $h = \lambda/4$ , 即  $h = 10m$ , 由式(11)或(13)均可得  $h_e = \frac{\lambda}{2\pi}$ 。由于电磁波沿导线传播速度比在自由空间慢, 故天线中波长比自由空间短, 工程上采用下式计

算<sup>[6]</sup>:

$$h' = \frac{\lambda}{4} \left( 1 - \frac{27}{Z_c} + \frac{2300}{Z_c^2} \right) \quad (24)$$

由式(16)求得  $Z_c = 313\Omega$ , 代入上式, 得  $h' = 0.234\lambda$ , 这是天线中  $\lambda/4$  处,  $X_A = 0$ , 但天线实际高度为  $0.25\lambda$ , 比  $h'$  高出  $0.016\lambda$ ,  $X_A$  应呈现感性, 把  $h = 0.25\lambda + 0.016\lambda = 0.266\lambda$  代入式(17)中, 可得  $R_A = 31.5\Omega$ ,  $X_A = 31.3\Omega$ , 代入式(23), 得

$$C = -18.55 + 20\lg\lambda - 20\lg r \quad (\text{dB}) \quad (25)$$

这是在  $a = 0.001\lambda$  时, 收发天线高度均为  $0.25\lambda$  时的天线耦合度。

式(24)仅在  $h = \frac{\lambda}{4}$  处考虑, 其它情况可略。

若接收鞭天线  $h = 0.15\lambda$  ( $h = 6\text{m}$ ), 由式(11)、(16)、(17)、(23)可求出  $C = -33.1 + 20\lg\lambda - 20\lg r$ , 比式(25)下降  $14.55\text{dB}$ ; 若接收鞭天线  $h = 0.35\lambda$  ( $h = 14\text{m}$ ), 由式(13)、(16)、(17)、(23)可求出  $C = -25.8 + 20\lg\lambda - 20\lg r$ , 比式(25)下降  $7.25\text{dB}$ 。用同样方法可求出接收天线不同高度时的天线耦合度, 以式(25)收天线  $h = \frac{\lambda}{4}$  耦合度为基准, 可画出图 11 所示实线曲线, 可见收天线高度低于  $\lambda/4$ , 耦合度下降快, 反之下降慢。

例 3 中, 其它情况不变, 仅改变收天线半径  $a$ , 见图 11, 对因子  $b$  有影响, 但不大。

### 3.5 天线耦合度计算方法

由式(23)计算天线耦合度有点烦, 舰船上收发天线周围有各种形状的金属体及非线性构件, 使周围电磁场变得复杂, 精确计算费时费力, 而工程计算在工程上是有意义的, 在此, 采用逆向计算方法。

式(23)中  $D$  是发天线方向性系数, 式(25)是  $D = 1.64$  时求得, 若求  $D$  为任意值时的  $C$  值, 则要加修正:  $10\lg D - 10\lg 1.64 = 10\lg D - 2.15$  (dB), 即式(25)变为,

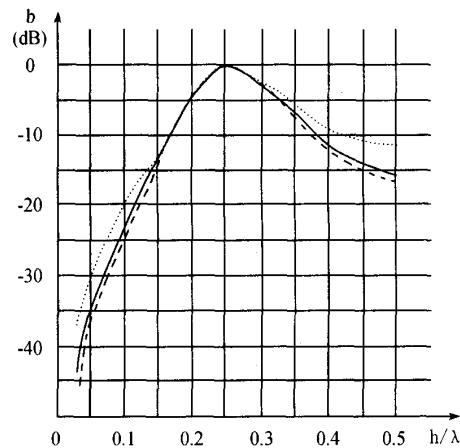


图 11 接收天线高度校正因子  $b$  与  $h/\lambda$  的关系

——  $a = 0.001\lambda$

……  $a = 0.005\lambda$

- - -  $a = 0.0005\lambda$

$$C = -20.7 + 20\lg\lambda - 20\lg\gamma + 10\lg D \quad (\text{dB}) \quad (26)$$

应再考虑收鞭天线高度校正因子  $b$ , 则式(26)为,

$$C = -20.7 + 20\lg\lambda - 20\lg\gamma + 10\lg D + b \quad (\text{dB}) \quad (27)$$

上式即为天线耦合度计算公式。

例 4 发鞭天线高度  $h = 10\text{m}$ , 距离  $50\text{m}$  处有一根收鞭天线, 半径  $a = 0.001\lambda$ , 高度为  $2\text{m}$ , 若发射频率为  $15\text{MHz}$ , 求天线耦合度。

解:  $f = 15\text{MHz}$ ,  $\lambda = 20\text{m}$ , 发  $h = 0.5\lambda$ , 从图 5 可查出  $D = 2.35$ , 收  $h = 0.1\lambda$ , 从图 11 可查得  $b = -22.5$ , 代入式(27)得

$C = -20.7 + 20\lg 20 - 20\lg 50 + 10\lg 2.35 - 22.5 = -47.3$  (dB), 若发射功率  $P = 1\text{kW} = 60\text{dBm}$ , 由式(22)可得接收机输入功率  $P_i = p + c = 60 - 47.3 = 12.7\text{dBm}$ , 天线端感应电压  $e_i = 107 + 12.7 = 119.7\text{dB}\mu\text{V}$ 。若收发鞭天线不在同一水平面上, 即  $\theta \neq 90^\circ$ , 则  $D$  由式(6)确定。

### 4. 考虑天线调谐器

上述计算中没考虑天线调谐器, 现实

中，对短波大功率发射机与鞭天线间一定会有天线调谐器，而接收机与鞭天线间不一定有天调。天调主要用于阻抗匹配，使发出的功率达最大。目前，一般用单片机来自动控制天调中网络元件，使驻波比在 2 以下（有的设备指标在 3 以下），按传输线理论，天线输出的功率  $P_A$  等于发射机输出功率  $P_t$  乘阻损失配因子  $\mu$ ，有，

$$P_A = P_t \cdot \mu \quad (28)$$

$$\mu = 1 - \left| \frac{S_v - 1}{S_v + 1} \right|^2 = \frac{4S_v}{(S_v + 1)^2} \quad (29)$$

式中， $S_v$  为驻波比。

若  $S_v = 2$ ，由式 (29)， $\mu = 0.89$ ，若发射机指示发出 1kW，实际上天线仅发出 0.89kW，若按 1kW 计算，会带来 0.5dB 误差。故对式 (5) 要乘  $\sqrt{\mu}$ ，对式 (23) 要除以  $\mu$ ，对式 (27) 要减去  $10\lg\mu$ (dB)。

对老型号大功率短波发射机，采用手工调谐，有驻波比显示，即可得到  $\mu$  值。但对新型设备，采用自动调谐，无驻波比显示，有的设备有发射机输出功率  $P_t$  和反射功率  $P_f$  显示，反射系数的平方为，

$$|\Gamma|^2 = \frac{P_f}{P_t} \quad (30)$$

$$\mu = 1 - |\Gamma|^2 \quad (31)$$

若接收天线有天调，则该天调调谐于远方的有用信号，而非调谐于本舰的干扰信号。驻波比的测试需用专用的网络分析仪，在此不作详述。

### 参考文献

1. 谢处方等编“天线原理与设计”西北电讯工程学院出版，1985 年
2. 总参谋部通信部，“电波传播与通信天线”，解放军出版社，1985 年
3. D. 郑钧著，“电磁场与波”，上海交通大学出版社，1983 年
4. C. A. 巴拉尼斯，“天线理论—分析与设计”，1982 年
5. KENNETH R. SIARKIEWICZ & AR-LONT. ADAMS, “Near – and – Field Thin – Wire Coupling Theory and Experiment” IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol EMC – 19 No. 4 Nov. 1977
6. Smith, “Aerials for meter and decimeter wavelength”, Cambridge Univ Press, 1949

## 突尼斯加入国际电工委员会

国际电工委员会 (IEC) 最近又增加了新成员国——突尼斯。联系方式：

Tunisian National Committee of the IEC  
National Institute for Standardization and Industrial Property (INNRP)  
B. P. 23  
1012 Tunis – Belvedere

Tunisian

电话：+ 216 1 785 922

传真：+ 216 1 781 563

电子邮件：INORPI@ email. ati. tn (注意：此处仅有一个“N”)

INNRP 的总负责人是 Mohamed Chaouch 先生

## 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>