

# 甚低频电磁波穿透地层无线通信 系统天线装置的研究

陶晋宜

**摘 要** 根据甚低频电磁波在半导体媒质中的传播特点,简要介绍几种常用的甚低频天线主要电性能,分析比较其优缺点及适用场合,研究其输入阻抗、电流分布、方向特性,设计出适合本课题要求的天线装置。

**关键词** 半导体媒质;电性天线;接地电偶极子;磁性天线

**中图分类号** TN822.1

## Study on Antenna Equipment for Communication of Very-low-frequency (VLF) Electromagnetic Wave Propagation through Earth

Tao Jinyi

(College of Electrical & Power Engineering of TUT)

**Abstract** The paper, according to the characteristic of the VLF electromagnetic wave propagation through a dissipative media, introduces the electric properties of several kinds of VLF electromagnetic wave, compares their advantages and disadvantages, and analyzes their input impedance, distributed current and direction coefficient. Then the antenna equipment is designed, which is suitable to the demands of this project.

**Key words** dissipative media; electrical antenna; earthing electrical double-pole; magnetic antenna

## 0 概 述

穿透地层的通信属无线通信范畴,但与常见的电视、广播、手持移动电话等无线通信形式有所不同。在地面,信号的传播是以空气为通信媒质,它几乎没有损耗,信号频率可选取高频、超高频,因此,其辐射效率高,天线物理尺寸短,体积小。而穿透地层通信电磁波是在损耗较大的煤层和岩石层中传播,工作频率必须降到甚低频段(VLF)乃至音频段(VF),才能有一定的穿透能力。从幅值衰减常数的表达

式  $\beta = \sqrt{\pi f \mu \sigma}$  可知,电磁波的频率越低,媒质的电导率 越小,衰减速度越慢,越有利于信号的传送。

甚低频(VLF)电磁波穿透地层的无线通信的实现，有赖于在给定的信号传输条件下，选择最佳的发射和接收天线装置。要想用评价一般天线的效率、方向系数、增益等参数的方法来解决这个问题是极其困难的。因为在矿井无线信道中通常是利用感应场实现信号的传输，而引用上列各参数时，却是以信号在辐射场传播为前提。另外，当天线装置的经典算法推广到半导体媒质时，会导致天线装置效率的非单值性。其原因是由于天线的效率、方向系数、增益等参数与岩层的电导率有关。

穿透地层无线通信系统信道的总体方框图如图1所示。

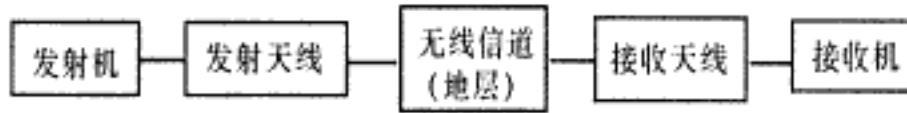


图1 穿透地层无线信道总体框图

## 1 发射天线的研究

发射天线是一种把电能转换成电磁能的装置。确定天线发射效率的大小，是在发射机功率 $P$ 一定时，天线所激励的有用信号在接收点的场强电平。

在传输距离超过天线几何尺寸的情况下，接收器上任意一个场分量的计算公式为：

$$E = Dm. \quad (1)$$

式中： $D$ 为辐射器的电流矩； $m$ 为标准电流矩 $D=1$ 的辐射器场的计算比值。其中 $E$ 在球坐标系中的表达式为：

$$\left\{ \begin{array}{l} E_r = \frac{IL}{2\pi} e^{-jkr} \left( \frac{\eta}{r^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon_k r^3} \right) \cos\theta, \\ E_\theta = \frac{IL}{4\pi} e^{-jkr} \left( \frac{j\omega\mu}{r} + \frac{\eta}{r^2} + \frac{1}{j\omega\epsilon_k r^3} \right) \sin\theta, \\ H_\varphi = \frac{IL}{4\pi} e^{-jkr} \left( \frac{jk}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \sin\theta, \\ E_\varphi = H_r = H_\theta = 0. \end{array} \right.$$

### 1.1 电性辐射器的特性

电性辐射器电流矩的表达式为：

$$D = I_0 h_{ef} = \left[ \frac{P}{R} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot h_{ef}. \quad (2)$$

式中： $I_0$ 为辐射器的输入电流； $h_{ef}$ 为辐射器的有效高度； $R$ 为输入电阻； $P$ 为发射机的功率。

所以，辐射器结构参数的最佳化，就在于要保证天线有最大的有效高度和最小的输入电阻，这些都将有助于增大电流矩 $D$ 和场强 $E$ 。接地电偶极子是半导电媒质中低频无线通信系统电性天线的基本型式，因此我们主要研究这种辐射器的特性。

### 1.1.1 接地电偶极子的有效高度及电流分布

接地电偶极子的原理图如图2所示。

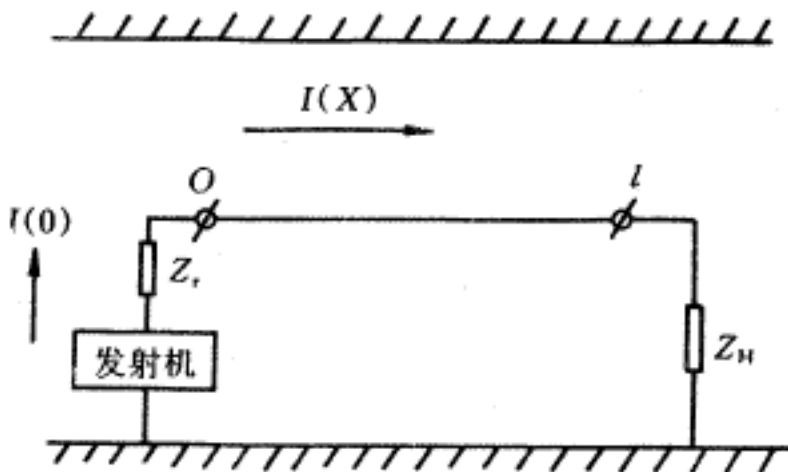


图2 接地电偶极子的原理图

用绝缘导体做成的辐射器放在井下巷道的大气中时，能使接地电偶极子的有效高度 $h_{ef}$ 大大增加，它相当于用一个电介质层把载流导体和岩层分开，这样会使衰减常数减小，波长缩短的现象消弱，沿天线传播的波阻抗增加。这将有助于电磁场沿辐射器长度的均匀分布，在相当宽的频率范围内，它的有效高度约等于几何长度：

$$h_{ef} = l. \quad (3)$$

在半导电媒质中，沿着圆柱形空腔的导体传播的电磁场的传播常数的表达式为：

$$K = k_0(-j). \quad (4)$$

式中： $k_0$ 为自由空间的波数； $\alpha$ ， $\beta$ 为标准衰减常数和相位常数，且有

$$\alpha = \frac{\pi}{8} \left[ \ln 0.8 \frac{\delta}{a} \ln \frac{b}{a} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

$$\beta = \left[ \frac{\ln 0.8 \frac{\delta}{a}}{\ln \frac{b}{a}} \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

式中,  $a$ ,  $b$ 分别为导线的直径和井下巷道的直径,  $\delta$ 为集肤深度.

按照这个估计, 在具有中央导线的圆柱空腔中, 频率为10 kHz( $\lambda_0=30$  km)的电磁场的波长缩短了20%, 约为25 km.随着绝缘层相对厚度的增加, 波阻抗越接近空气中的波阻抗, 它的模可达几十或者上百欧。因此, 当接地偶极子满足以下条件之一, 它上的电流分布将是矩形分布, 即 $I(x)=I_0$ .

这些条件是: 终端负载 $Z_H=5 \sim 20$  ; 辐射器与负载相匹配, 即 $Z_0=Z_H$ ; 网络接近于短路状态, 即 $Z_0 > Z_H$ .

### 1.1.2 接地电偶极子的输入阻抗

图3所示是接地电偶极等效电路中的各元件。

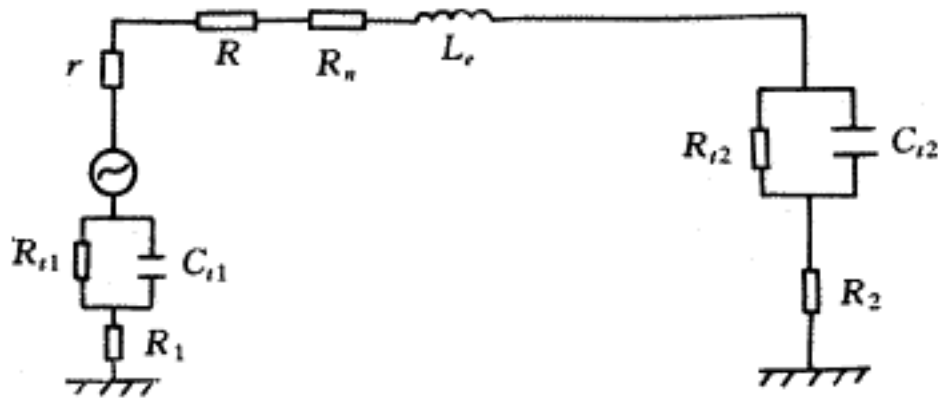


图3 接地电偶极子的等效电路图

- 1)  $R$ 是导线中的欧姆损耗电阻, 由导线的直径、材料的电导率决定, 是频率的函数。
- 2)  $R_n$ 近区中的损耗电阻, 等于接地器的漏泄电阻之和:

$$R_n = R_1 + R_2 = \frac{1}{2\pi\sigma} \cdot \frac{1}{r_1}. \quad (6)$$

式中:  $\sigma$ 为地层的电导率,  $r_1$ 为接地器的等效半径。

3) 电极的接触阻抗，等于 $R_t$ 与 $C_t$ 的并联：

$$Z_t = R_{t1} // \frac{1}{j\omega C_{t1}} + R_{t2} // \frac{1}{j\omega C_{t2}}. \quad (7)$$

式中， $R_t$ ， $C_t$ 是接触电阻和接触电容。 $R_t$ 的大小取决于接地器在岩层的埋置条件，当电极很湿润时， $R_t \rightarrow 0$ 。

4) 输入电感是导线上长度为 $l$ 的直线的外部电感

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[ \ln \frac{2l}{a} - \frac{l}{2} \right],$$

式中， $a$ 为导线的半径， $\mu_0$ 为磁导率。

5) 振子的复阻抗：

$$Z_e = \frac{1}{4\pi\sigma} \cdot \frac{2}{3} K^3 l^2. \quad (9)$$

其中 $K$ 的表达式为：

$$\vec{K} = \vec{U}_x K_x \sin \alpha_E \cos \beta_E + \vec{U}_y K_y \sin \alpha_E \cos \beta_E + \vec{U}_z K_z \cos \alpha_E.$$

这个阻抗值与媒质的波阻抗、辐射器的电长度成正比。在 $f < 100$  kHz的频率范围内， $Z_e$ 的模一般不超过十分之几的数量级。因此，接地偶极子的输入电阻决定于接地器的合成电阻：

$$R_e = R_1 + R_2 + R_{t1} + R_{t2}. \quad (10)$$

综合以上结果得出，接地器的电阻是决定作为发射天线的接地偶极子效率的基本参数。随着这个电阻的减小，辐射器的电流矩会增大。

接地器的电极通常是薄板或棒状结构。这些接地器等效半径的估算可用下式：

$$r \approx \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \text{ 或 } r \approx \frac{d_m}{\ln(2d_m/l_m)}. \quad (11)$$

式中， $S$ 为薄板的面积； $d_m$ ， $l_m$ 为棒的直径和长度。

增加接地电极的面积和数目,改善电极与岩层的接触,如加大量的浓盐水浸湿电极表面,就能达到降低接地电阻的目的。

## 1.2 磁性发射天线

在半导体媒质中传输低频信号,可采用的两种磁性天线,铁氧体天线和框形天线。铁氧体天线与框形天线的不同是,它具有铁氧体磁芯。如果框的直径可选得比铁氧体直径大得多,框形天线的圈面面积的增加就补偿了磁芯所起的影响,而采用铁氧体天线的效果显得较差。框形天线的等效电路图如图4所示。

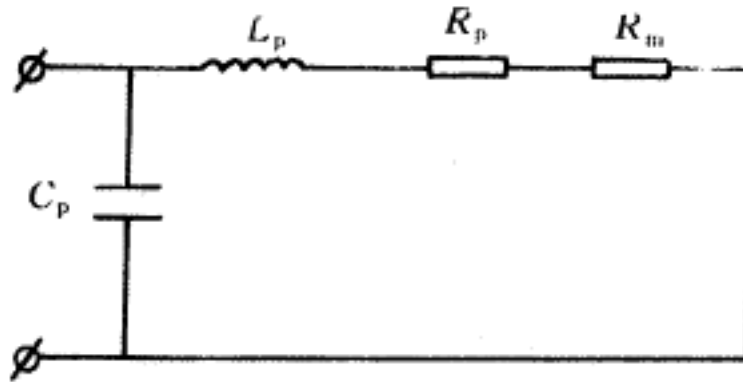


图4 框形天线的等效电路图

图4中各参数包括框的自感 $L_p$ , 匝间电容 $C_p$ , 导线的欧姆损耗 $R_p$ 和辐射器的辐射电阻 $R_m$ .在分析框形天线的输入阻抗时,把问题限定在框的导线长度 $l \ll \lambda$ 的情况。

单匝圆形框的电感

$$L_p = \mu_0 \frac{d_p}{2} \left[ \ln \frac{4d_p}{a} - 1.75 \right]. \quad (12)$$

式中,  $\mu_0$ 为磁导率,  $d_p$ 为圆形框的直径,  $a$ 为导线的半径。

多匝框的电感按匝数的平方成比例增加,即:

$$L = Cn^2 L_p. \quad (13)$$

式中,  $C$ 为匝间偶合系数。

与接地电偶极子不同,框向周围发射的全部有功能量都是靠波动场来传递的。辐射电阻的大小首先决定于离辐射器最近区域中电磁场的结构。

对于位于井下巷道的 $n$ 匝圆形框辐射电阻为:

$$R_m = \frac{2}{3\pi} \cdot \frac{(nS)^2}{\delta^4} \cdot \frac{1}{\sigma r} \quad (14)$$

式中,  $S$ 为圆形框的框面积,  $r$ 为巷道的半径,  $\sigma$ 为介质的电导率,  $\delta$ 为集肤深度。可见辐射电阻的大小仅决定于巷道的半径 $r$ 。

在低频范围内,  $R_m$ 可忽略, 框的输入电阻决定于导体中的欧姆电阻 $R_i=R_p$ 。若在已知天线电感的情况下, 能够估算出框形天线输入电阻的最小值:

$$R_{imin} = BL_p \quad (15)$$

式中,  $B$ 为天线回路的带宽。

在发射功率一定, 即 $p$ 等于常数时, 调谐到谐振的框形天线的电流矩为

$$D_m \approx S \sqrt{\frac{P}{BL_p}} \quad (16)$$

与框的匝数无关。因而在设计框形天线时, 一是应选择尽可能大的面积, 这一条对用于井下的发射天线不易实现; 二是应选择最少匝数的框形天线。第一点可保证提高辐射效率, 第二点对装置的安全性能有良好的作用。

### 1.3 电性天线与磁性天线比较

在地下通信中, 由于地层对电磁波的吸收很严重, 接收点的信号十分微弱, 因此对发射天线主要的评价标准是: 当天线的输入功率给定, 发送与接收距离已设定的情况下, 能在接收点获得尽可能大的场强。

设电性天线与磁性天线的输入电流为 $I_e$ 和 $I_m$ , 输入电阻分别是 $R_{ie}$ 和 $R_{im}$ , 输入的有功功率分别为 $P_e$ 和 $P_m$ , 在地面接收点产生的电场的垂直分量分别为 $E_{ze}$ ,  $E_{zm}$ , 与输入电流成正比, 于是有

$$E_{ze} = C_e I_e = C_e \sqrt{\frac{P_e}{R_e}} \quad (17)$$

$$E_{zm} = C_m I_m = C_m \sqrt{\frac{P_m}{R_m}} \quad (18)$$

式中,  $C_e$ ,  $C_m$ 为比例常数, 它与天线的结构、尺寸、工作频率、通信距离、地的电导率有关。令电性天线和磁性天线的输入功率相同 $P_e=P_m$ , 在同一接收点产生的场强的平方之比:



$$\epsilon = \left[ \frac{E_{zm}}{E_{ze}} \right]^2 = \left[ \frac{C_m}{C_e} \right]^2 \frac{R_{ie}}{R_{im}}. \quad (19)$$

称作磁性天线相对于电性天线的通信效率。现设磁性天线是单圈环形天线，电性天线是电长度较短的接地电偶极子(即终端短路双极天线)。

当电性天线和磁性天线的输入功率相同时，即 $P_e=P_m$ 时，磁性天线相对于电性天线的通信效率：

$$\epsilon = \left[ \frac{E_m}{E_e} \right]^2 \approx \frac{a}{0.424 L}. \quad (20)$$

式中， $a$ 为单圈环形天线的半径， $L$ 为终端短路双极天线的全长。

通常井下巷道的长度都在几十米以上，甚至几百米。沿坑道架设几十、几百米的单极天线很方便，而巷道的宽度一般在4 m左右，在地下架设环形天线其等效半径 $a$ 一般不超过2 m.例如，当 $L=60$  m， $a=2$  m时， $\epsilon=0.0786$ .可见，在输入功率相同的条件下，单圈天线在接收点产生的能流密度，只有终端短路天线的0.0786倍。

若将单圈天线变为多圈，磁性天线相对于电性天线的通信效率：

$$\epsilon' = \frac{n^2 C_m^2}{C_e^2} \cdot \frac{R_e}{n^2 R_m} = \epsilon. \quad (21)$$

所以增加磁性天线的圈数，并不能提高环形天线的通信效率。

通过分析比较，在本设计中发射天线采用水平放置的终端短路单极天线(即接地电偶极子)。

## 2 接收天线的研究

接收天线是这样一种装置，当其置于电磁场中时，能从场中获取能量。在甚低频频段，通常采用两类接收天线，即电性接收天线和磁性接收天线。

### 2.1 接地电偶极子型接收天线

在接收状态下的接地偶极子的主要优点是灵敏度高，输出阻抗呈电阻性。在低频范围内，接收状态下接地偶极子的输出电阻，决定于接地极的散流电阻。因为在很大程度上，散流电阻决定于周围岩层的参数，所以，接收元件最适合在高阻值不匹配负载状态下工作，而起着负载作用的接收元件是接收机的输入阻抗，它很容易达到几十千欧姆，因此也就降低了对接地极散电阻的要求，用不大的金属板或金属棒作为接地装置就可以满足要求。

接收天线装置作为把电磁场能量变换成接收机输入端有用信号的一个能量变换器，它的效率可以用有效高度 $h_{ef}$ 来估算，对于接地电偶极子，其有效高度的表达式为：



$$h_{ef} = \frac{V_e}{E} = L, \quad (22)$$

式中,  $V_e$ 为接收天线端点上信号的电平;  $E$ 为接收点上的电场强度的分量。可见电性天线的有效高度等于天线的全长。

## 2.2 磁性接收天线

甚低频环形接收天线是常用的接收天线, 包括空芯的和带铁芯的, 从电气上说相当于很小的磁偶极子。这些天线的优点是它们具有方向性, 因此能抑制不需要的噪声, 同时也有抑制本地静电场的能力。通常绕组与屏蔽之间的电容相当小, 环形天线中的电流是均匀的。

对于单圈环形天线, 其有效高度表达式为:

$$h_{ef} = S \sqrt{\omega \mu \sigma}, \quad (23)$$

$S$ 为单圈环形天线的面积。

$$\frac{h_{ef}}{L} = \frac{S \sqrt{\omega \mu \sigma}}{L}, \quad (24)$$

如果将60 m长的双极天线和一个面积 $S=1 \text{ m}^2$ 匝数为10匝的环形天线相比, 前者的有效高度约是后者的120多倍。因此, 电性天线的接收能力比磁性天线要高。但磁性天线在甚低频通信中用于接收天线仍然是可取的。接收时, 主要关心的是信噪比, 天线的有效高度低, 收到的信号弱, 但收到的噪声也弱。当外部噪声为主要时, 有效高度的差别对接收机的影响不大。经过以上分析比较, 在本设计中同样采用终端短路电性天线做接收天线。

## 3 天线装置分析

本设计的条件如下: 地层的平均电导率 $\bar{\sigma} = 1.77 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ , 地层的厚度 $H=304 \text{ m}$ , 载波信号的频率 $f=4980 \text{ Hz}$ , 天线的长度 $L=100 \text{ m}$ . 根据以上分析选择的天线型式, 建立坐标系如图5所示。

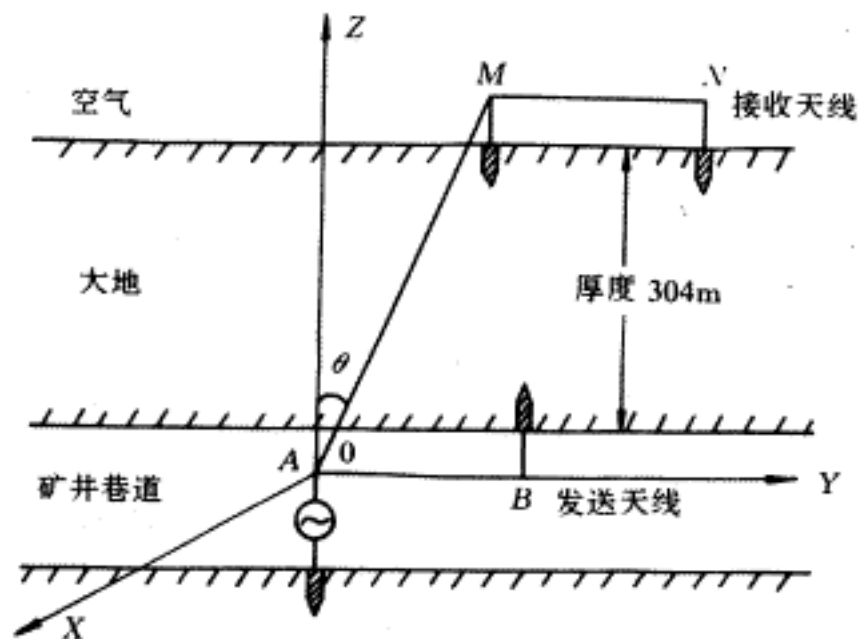


图5 天线装置安装示意图

在本设计中，选择接地的金属棒的半径为26 mm，埋入地下0.5 m，代入(11)式，得出接地器的等效半径 $r = 0.120$  m；代入(6)式，得到接地器的漏泄电阻 $R_1 + R_2 = 75$ ；由(8)式得到的输入电感 $L_e = 215$   $\mu$  H。

当电磁波从发射天线向上传播时，由于天线电长度非常小，近似为准球面波。对本设计而言：

穿透岩层衰减因子：

$$A_{th} = e^{-\frac{H}{\delta}} \approx 0.0036,$$

折射因子：

$$A_{re} = \frac{1}{\sqrt{60\lambda\sigma}} \approx 0.004.$$

考虑到电磁波穿透地层时有穿透衰减，越过大地-空气界面时发生折射，在地面M点收到的电磁场的场强为：

$$E_{\theta} = \frac{Il}{4\pi r^3 \sigma} \cdot e^{-jkr} (1 - jkr - k^2 r) \cdot A_{th} \cdot A_{re}. \quad (25)$$

是发射天线AB的端点A与接收天线MN的端点M的矢径与Z轴的夹角，I是发射天线中的电流幅值，l为天线的长度。当M和A在同一条直线，即 $\theta = 0$ 时， $E = E_{zmax}$ ，得

出发射天线所需的最小发射电流为：

$$I_{\min} = \frac{\bar{\sigma}_r \lambda^2 V_{MN}}{2\pi l^2 A_{th} \cdot A_{re}} \cdot e^{\frac{2\pi r}{\lambda}} \quad (26)$$

$V_{MN}$ 是接收天线的信号电压， $L$ 为AB的长度。取 $AB=MN=L$ ， $V_{MN}=2\mu V$ 求得所需的最小发射电流为 $I_{\min}=24\text{ mA}$ 。发射机的最大输出功率为 $5\text{ W}$ ，最大输出电流约为 $167\text{ mA}$ ，发射天线上的电流 $I$ 应在 $24\sim 167\text{ mA}$ 范围内，即可满足可靠接收所需的天线上的最小电流，又不会超过发射机的最大输出功率。

## 4 结束语

天线装置是无线通信的重要环节，正确地选择地下通信中的天线是保证无线通信的重要措施。在甚低频段，电磁波的波长较长，天线的相对电长度较短，效率较低，加之在复杂多变的半导电媒质中传播，预测其电磁场的分布规律显得更为困难。

虽然选择设计出了适合本设计要求的天线，但实际应用起来还应在接地方式，与发射机、接收机的耦合方式、阻抗匹配等方面加以考虑。

作者单位：太原理工大学电气与动力工程学院

## 参考文献

- 1 Ronold W P King, Glenn S Simith. Antennas in Matter Fundamental, Theory and Applications. Copyright The Massachusetta Institute of Technology, 1988. 82 ~ 97, 326 ~ 373
- 2 奥戈罗德涅丘克 [ 苏 ]. 矿井低频无线通讯. 北京：煤炭工业出版社，1981. 64 ~ 83, 87 ~ 103
- 3 林昌禄. 近代天线设计. 北京：人民邮电出版社，1993. 98 ~ 139
- 4 Mahomoud S F. Characteristics of Electromagnetic Guided Wave for Communication in Mine. IEEE, 1988, 66(1): 95 ~ 98

(本文责任编辑：庞富祥)

## 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](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>