

文章编号 1005-0388(2007)04-0659-06

## 带金属盒的月球射电仪天线特性研究

龚莉媛 陈志雨

(中国科学院电子学研究所, colour0713@hotmail.com, 北京 100080)

**摘 要** 选择 RWG 和 Costa 基函数用矩量法分析了线面结合的天线问题, 计算了月球射电仪典型天线的输入阻抗和方向图。给出了单极和双极天线的典型结果, 得到了金属盒大小对结果的影响关系。对于双极天线还对比了中馈和边馈两种方式的结果。在计算中, 使用了 9 点高斯积分法处理奇异积分, 得到了较好的效果。

**关键词** 月球射电仪, 矩量法, 金属盒, 线面结合

**中图分类号** TN820

**文献标识码** A

### Characteristics analysis of antennas with metal cases for lunar radio telescope

GONG Li-yuan CHEN Zhi-yu

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences,  
colour0713@hotmail.com, Beijing 100080, China)

**Abstract** In this paper, the problem of junction between wire antenna and conducting board is analyzed by the moment method with RWG and Costa basis functions. The input impedances and patterns of typical lunar radio telescope antennas are obtained, which include monopole and dipole antennas. The impact of metal case size is discussed. For dipole antennas, the results for different types of feed are contrasted. The 9 point Gauss integration is used to treat the integration singularity, which requires small memory with a high precision.

**Key words** lunar radio telescope, moment method, metal case, wire-board junction

## 1 引 言

随着科学的发展, 在宇宙中从伽马射线到无线电波各个频段的波, 除了 30 MHz 以下的甚低频波段(VLF), 基本上都被人们所认识了。这是由于: 甚低频的无线电波低于地球电离层的穿透频率, 基本上被地球的电离层散射和反射掉了, 使得我们要从地面上对它进行天文探测成为不可能。

探月火箭技术的发展, 使得我们有可能考虑从月球表面去探测太空的甚低频射电。月球电离层极为稀薄, 甚低频电波都能穿透。目前科学家们正在

设计一种月球射电探测仪, 频段为 100 kHz ~ 30MHz。

在一些已发表的文献[1][2]中, 在 1~30MHz 频段大都建议水平电偶极或垂直电单极天线, 天线杆的长度从 1 m 到 4 m 不等, 但总的属于短振子的范畴。用短振子而不用半波振子的优点是: 对固定天线长度, 在此频段上有几乎相同形状的方向图, 而且方向图比较胖, 可观测的范围比较宽, 没有副瓣, 而且结构简单, 便于伸缩和折叠。

在月球射电仪实际结构中, 无论垂直电单极或水平电偶极, 大都固定在一个线度为十几至二十几

厘米的金属盒上,对电单极和边馈方式的电偶极,金属盒直接起到地平面的作用。金属盒的大小对天线的阻抗和方向图都有很大的影响。而在这方面,过去的理论工作做得并不多,而直接针对月球射电仪的尚未见到。本文的目的是结合月球探测的特点,研究1~30 MHz频段的带金属盒的天线特性,对线面相连接的问题进行了矩量法数值分析,得出了金属盒对天线输入阻抗和方向图的影响,为最终的设计提供参考。

本文重点研究两种模型:1 m垂直电单极天线,和两边各2 m的水平电偶极天线,天线均带金属盒,如图1所示,其中模型2包括中馈和边馈两种馈电方式。

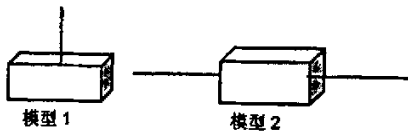


图1 射电仪天线模型

## 2 理论及方法

### 2.1 积分方程

电流的积分方程为

$$-E^{\text{inc}}(r)_{\text{tan}} = [-j\omega A(r) - \nabla\Phi(r)]_{\text{tan}} \quad r \text{ 在 } S \text{ 上} \quad (1)$$

其中 $S$ 包括天线杆和金属盒的表面, $A(r)$ 、 $\Phi(r)$ 为天线杆和导体盒上所有电流产生的矢势和标势, $E^{\text{inc}}(r)$ 为入射电场,对天线问题,除馈电点外, $E^{\text{inc}}(r)_{\text{tan}} = 0$ 。

### 2.2 基函数

以下用矩量法求解积分方程。电流的基函数有三组。金属盒采用三角形剖分,未知数是电流密度 $J_n^B$ ,用RWG基函数<sup>[3]</sup> $B_n$ 展开,形式为

$$B_n(r) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^{\pm}} \rho_n^{\pm} & r \in T_n^{\pm} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中 $l_n$ 是导体的第 $n$ 条公共边的边长, $A_n^{\pm}$ 是此边所属正负三角形 $T_n^{\pm}$ 的面积, $\rho_n^{\pm}$ 是从顶点指向三角形内一点的矢量, $\rho_n^{-}$ 是从三角形内一点指向顶点的矢量。如图2所示。

在计算中,三维的三角形剖分是通过Femlab软件实现的。

线天线上未知数是电流 $I_n^W$ ,用脉冲基函数<sup>[4]</sup> $W_n$

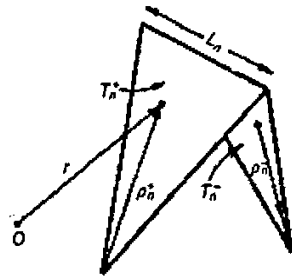


图2 三角形对与RWG基函数

展开。天线杆与金属盒连接的区域称为连接域,未知数是电流 $I'$ ,采用Costa基函数<sup>[5]</sup>展开。

于是,金属盒上的面电流密度 $J_B(r)$ 可以表示

$$\text{为 } J_B(r) = \left[ \sum_{n=1}^{N_B} J_n^B B_n(r) \right] + I' J(r) \quad (2)$$

$N_B$ 为金属盒部分的未知数个数。

天线杆上的电流强度表示为

$$I_W(r) = \left[ \sum_{n=1}^{N_W} I_n^W W_n(r) \right] + I' J(r) \quad (3)$$

$N_W$ 为天线杆部分的未知数个数。(2),(3)式的最后一项均表示连接域部分。

限于篇幅,只详细介绍连接域的Costa基函数。假定金属盒和线天线已被合适的三角形和线段剖分,则连接域就是连接点的周边区域。其导体部分是与连接点相连的三角形,线部分是与连接点相连的半段。如图3所示。

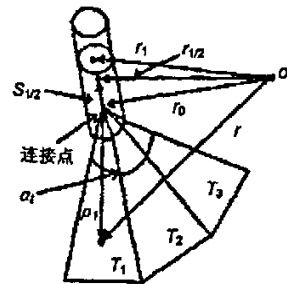


图3 连接域的基函数

则其基函数为

$$J(r) = \begin{cases} f(\rho) & r \text{ 在连接域的导体部分上} \\ W_n(s) & r \text{ 在连接域的天线部分上} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $f(\rho)$ 在三角形 $T_n$ 内表达式为

$$f(\rho) = f_n(\rho_n) = -\frac{1}{\alpha_i} \frac{1 - (1 - \eta)^2}{\rho_n^2} \rho_n, \quad r \text{ 在 } T_n \text{ 内} \quad (5)$$

$\alpha_i$ 是连接域中所有与连接点相连的三角形顶角

和,  $\rho_n = r - r_0, r, r_0$  分别为三角形内点与连接点的坐标。  $\eta = \frac{A_2}{A_n}$ , 其中  $A_2$  表示三角形内点与连接点的对边组成的三角形面积,  $A_n$  是三角形  $T_n$  的面积。

$$W_0(s) = P_0(s) \hat{s}_{1/2} \tag{6}$$

其中  $P_0(s) = 1, s_0 < s < s_{1/2}$

此处  $s$  表示天线上沿轴向的长度, 连接点处为  $s_0$ , 半段处为  $s_{1/2}$ 。于是用基函数表示的连接域中的电流强度或电流密度为

$$I_{\text{线}} = I_0 \hat{s}_{1/2}$$

$$J_{\text{面}n} = -I_0 \frac{1}{\alpha_i} \frac{1 - (1 - \eta)^2}{\rho_n^2} \rho_n$$

其中  $I_0$  就是连接域的电流强度未知数。需要注意的是, 连接域只有一个未知数, 而与连接域的三角形个数无关。

2.3 矩阵方程

对积分方程, 采用伽略金法进行加权内积, 可得矩阵方程

$$ZI = V \tag{7}$$

式中

$$Z = \begin{bmatrix} Z^{BB} & Z^{BW} & Z^{BJ} \\ Z^{WB} & Z^{WW} & Z^{WJ} \\ Z^{JB} & Z^{JW} & Z^{JJ} \end{bmatrix} \tag{8}$$

式中  $Z^{BB}, Z^{WW}$  和  $Z^{JJ}$  分别表示金属盒, 天线和连接域部分的自作用, 其它则是金属盒, 天线, 连接域之间的相互作用。所以其维数:  $Z^{BJ}$  为  $N_B \times N_J$ , 其它同理。

列向量  $I$  就是未知数,  $I = \begin{bmatrix} J^B \\ I^W \\ I^J \end{bmatrix}$

电压列向量  $V = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ V_0 \end{bmatrix}$

其中  $V_0$  为馈电电压。

2.4 奇异积分的处理

在金属盒上, 当源点与测试点重合时, 被积函数在积分域内会有奇异点。其中, 在面的部分, 每个剖分的三角形内存在一个奇异点, 即内点, 在连接域的部分, 每个剖分的三角形内有两个奇异点, 即内点和连接点, 这是由基函数决定的, 后者比较难处理。文献[6]中提出的“奇异域分离法”就是为了解决这个难题, 从理论上是有效的, 但是, 从实际的程序角度看, 无疑加大了计算的复杂性与计算量。

为了简化计算, 可以采用高斯积分, 为了避开各自的奇异点, 对于面积分, 统一选用 9 点高斯积分。

9 点高斯积分在国内文献中少有人使用, 公式如下[7]

$$\iint_e F(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) dx dy = \Delta_e \sum_{k=1}^9 \rho^{(k)} F(\lambda_1^{(k)}, \lambda_2^{(k)}, \lambda_3^{(k)}) \tag{11}$$

其中  $e$  为积分区域,  $\Delta_e$  为  $e$  的面积,  $\rho^{(k)}$  为权系数,  $(\lambda_1^{(k)}, \lambda_2^{(k)}, \lambda_3^{(k)})$  为结点坐标。数值如表 1 所示:

表 1 9 点高斯积分

结点 k	结点坐标	权系数
1	(7/9, 1/9, 1/9)	1/9
2	(4/9, 4/9, 1/9)	1/9
3	(5/9, 2/9, 2/9)	1/9
4	(4/9, 1/9, 4/9)	1/9
5	(1/9, 7/9, 1/9)	1/9
6	(2/9, 5/9, 2/9)	1/9
7	(1/9, 4/9, 4/9)	1/9
8	(2/9, 2/9, 5/9)	1/9
9	(1/9, 1/9, 7/9)	1/9

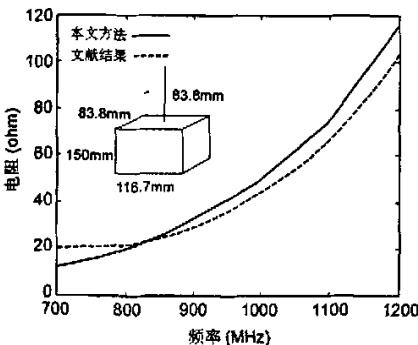
实算证明, 采取 9 点高斯积分法能取得很好的效果。

3 计算方法和程序的验证

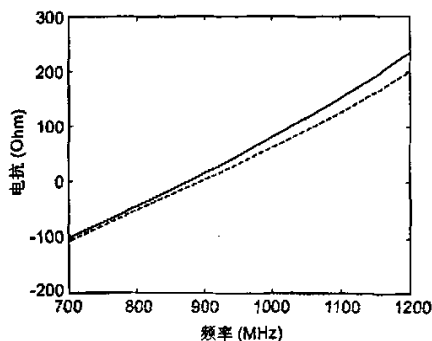
为了验证本文方法的有效性以及程序的正确性, 特对照计算了如下几个模型的输入阻抗。

(1) 文献[6]模型

计算了文献[6]中图 5 的模型, 金属盒 83.8 mm×150 mm×116.7 mm, 单极天线长 83.8 mm, 频率范围 700~1200MHz。计算结果与文献[6]吻合, 如图 4 所示。

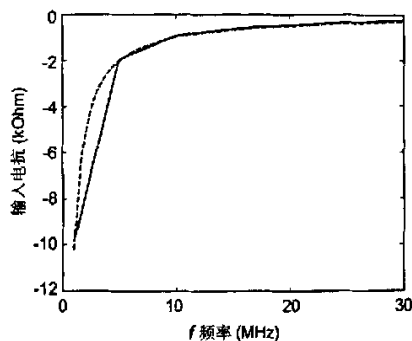


(a) 实部



(b) 虚部

图4 文献模型的计算结果对比



(b) 虚部

图5 大金属盒上方单极天线输入阻抗

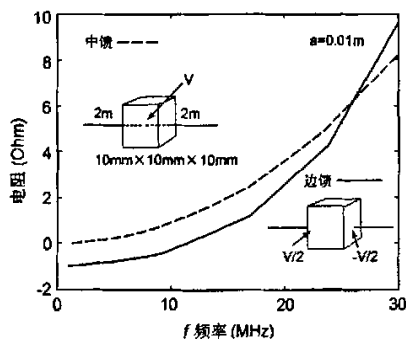
### (2) 极大金属盒上方的单极天线

将金属盒设为极大, 尺寸及计算结果如图5所示, 计算结果与镜像单极天线的输入阻抗的解析值<sup>[8]</sup>吻合。其中  $a$  为单极天线的半径。

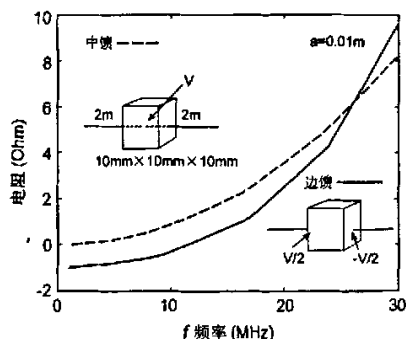
### (3) 带极小金属盒的双极天线

双极天线馈电方式分两种, 如图6所示, 其一为在双极天线由孔穿进盒子内, 在中点馈以电压  $V$ , 称为“中馈”, 其二为在两边每根天线杆与盒子之间的连接点处分别馈以电压  $V/2$  及  $-V/2$ , 称为“边馈”。金属盒缩至极小, 尺寸如图6。“中馈”的结果与偶极天线的输入阻抗的解析值吻合, 且符合单极与双极天线输入阻抗关系规律: 1 m 单极天线的输入阻抗等于 2 m 双极天线的一半。另外可以看到在这种极端的情况下, 模型接近于理想电偶极, 两种馈电方式的输入阻抗比较接近, 且都接近于理想电偶极的结果。

以上3例可以说明: 本方法和计算程序是基本可靠和正确的。

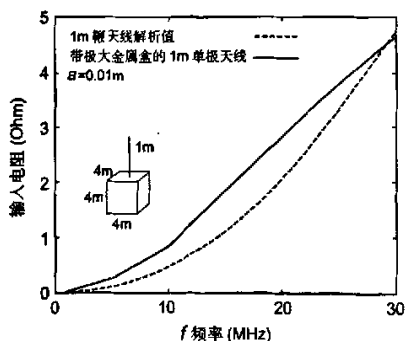


(a) 实部



(b) 虚部

图6 带极小金属盒的双极天线输入阻抗



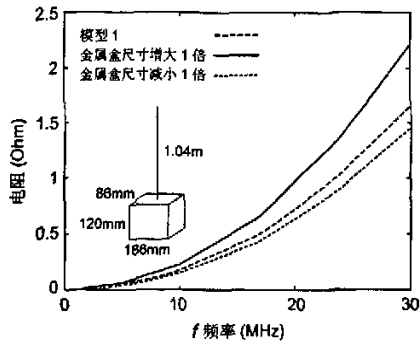
(a) 实部

## 4 计算结果及分析

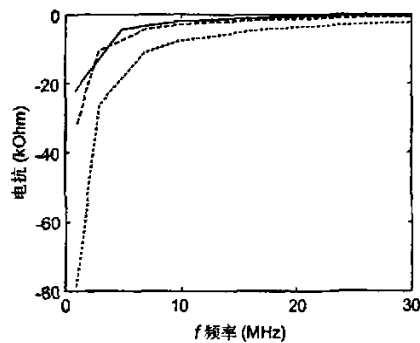
### (1) 金属盒尺寸对单极天线的影响

模型1为一种电磁兼容测试标准天线。用本文方法计算得到对不同金属盒尺寸的天线阻抗及方向图如图7所示。结果表明: 1) 在此频段和天线长度下, 天线输入阻抗是以容抗为主。这符合电短单极天线的特征。2) 金属盒越大, 天线的输入电阻越大,

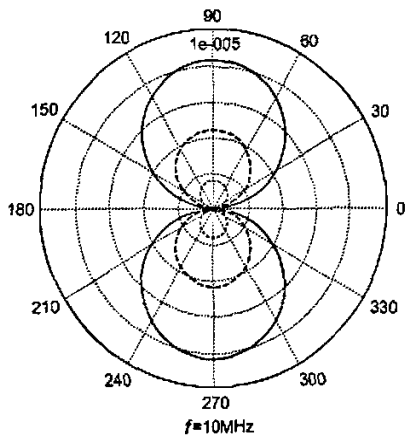
输入电抗越小。二者的电场方向图形状一样。馈电电压相同时,金属盒越大电场越强。



(a) 实部



(b) 虚部



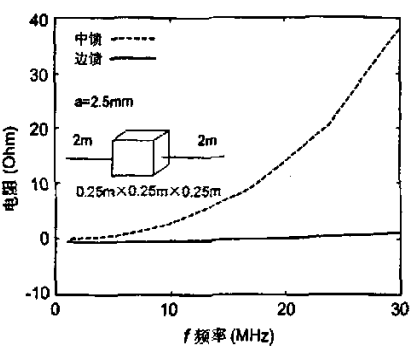
(c) 方向图

图 7 不同尺寸金属盒的单极天线输入阻抗及方向图

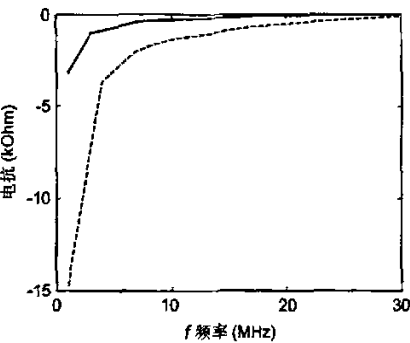
(2) 双极天线两种馈电方式对比

模型 2 为一种月球射电仪常用天线,其尺寸如图 8 所示。分别有对中馈和边馈两种方式的阻抗和方向图。

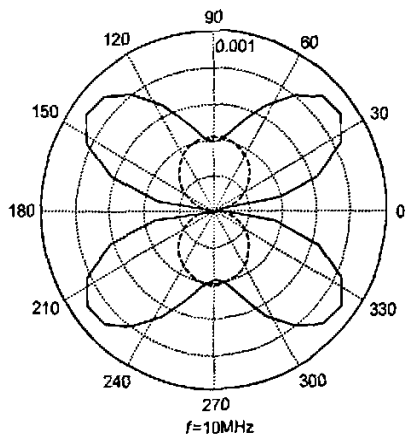
计算结果表明:中馈双极天线的输入电阻和输



(a) 实部



(b) 虚部



(c) 方向图

图 8 两种馈电方式的双极天线输入阻抗及方向图

入电抗均大于边馈。二者的电场方向图形状不同,中馈方向图不分瓣,边馈方向图分为两瓣,馈电电压相同时边馈场强较强。

(3) 金属盒大小对双极天线的影响

计算表面,对边馈方式,金属盒越大,双极天线的输入电抗越小,如图 9 所示。而对中馈方式,盒子的大小对输入电阻和电抗的影响都非常小。

(4) 拉杆天线粗细对比

对于实际的拉杆天线,其半径是从下到上逐渐减小的,对线剖分时将这个问题考虑进去,将天线分为粗细不同的5截,将其与半径一致的杆进行对比,结果如图10所示。杆粗细不一致时的输入电抗与直接按下端半径计算结果一样。同时可以看到:半径减小时,输入电抗增大。

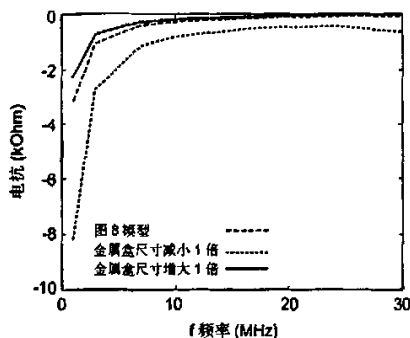


图9 不同尺寸金属盒的边馈双极天线输入电抗

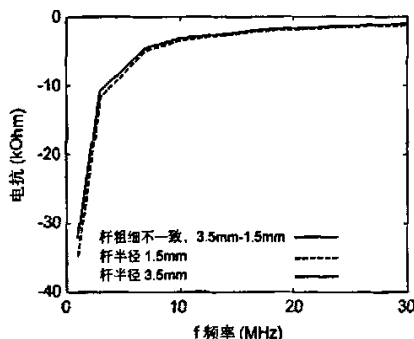


图10 三种半径的单极天线输入电抗

## 5 结论

采用矩量法,引入金属面上的 RWG 基函数和连接域的 Costa 基函数,分析了线面结合的天线问题,计算了月球射电仪所用的典型天线即单极与双极天线的输入阻抗及方向图。证明了在较低的频段(1~30MHz),矩量法依然适用。计算结果对月球射电仪的研究奠定了一定的理论基础。

## 参考文献

- [1] Yuki David Takahashi. New astronomy from the moon: a lunar based very low frequency radio array [D]. Thesis submitted to the University of Glasgow for the degree of master of science, 2003.
- [2] G Woan. A very low frequency radio telescope on the far side of the moon. In Measuring the Size of Things in the Universe[J]. HBT Interferometry and Heavy Ion Physics, 1999, 347-355.
- [3] Rao, D R Wilton and A W Glisson. Lectromagnetic scattering by surfaces o arbitrary shape[J]. IEEE Trans. Antennas and propagat, 1982, 30 (5): 409-418.
- [4] 宫德明. 天线的计算机辅助设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1988,95-98.
- [5] M F Costa, R F Harrington. Minimization o radiation from computer systems[J]. Int. Electr. Electron. Conference and Exposition Proc, 1983, (9): 660-665.
- [6] 万继响,张 玉,梁昌洪.任意导体与线天线连接问题的 MoM 分析[J]. 电波科学学报,2003,18(5):523-528.  
Wan J X, Zhang Y, Liang C H. Method of moment a-nalysis of connect between wire antennas andarbitrary shape conductors[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2003, 18(5): 523-528.
- [7] 胡建伟,汤怀民.微分方程数值方法[M]. 北京:科学出版社,1999,423-424.
- [8] C A 巴拉尼斯著,于志远,关秉田,江贤祚译.天线理论一分析与设计[M]. 北京:电子工业出版社,1988.
- [9] 孙乃华,陈涵奎.用矩量法和互易定理计算斜置天线的辐射特性[J]. 电波科学学报,1988,3(3,4):39-44.  
Sun N H, Chen H K. The calculation of radiation characteristics of TV skewed antenna by moment method and theory of reciprocity[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1988, 3(3,4): 39-44.
- [10] 李玉莹,徐晓文.基于矩量法对导体板上单极天线特性研究[J]. 电波科学学报,2002,17(4):350-353.  
Li Y Y, Xu X W. Characteristic investigation of monopole antenna on a conducting plate using method of moments[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2002, 17(4): 350-353.
- [11] 肖志文,马嘉俊,王 硕.偶极子天线矩量法分析[J]. 信息技术,2005,29(1):35-37.
- [12] 吴炎惊,万继响,梁昌洪.复杂导体目标上连接有多根天线的矩量法分析[J]. 现代电子技术,2005,28(4):1-3.
- [13] R F Harrington 著,王尔杰,肖良勇,等译.计算电磁场的矩量法[M]. 北京:国防工业出版社,1981, 73-141.

龚莉媛 (1981—),女,四川人,中国科学院电子学研究所,主要从事电磁兼容,天线等方面的研究。



陈志雨 (1945—),男,广东人,中国科学院电子学研究所研究员,长期从事电波传播、电磁兼容及天线方面的研究。



E-mail: zyichen@mail.ie.ac.cn

## 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>