

## 大功率中短波广播天线电磁辐射的预测与防护

唐章宏<sup>1</sup>, 王群<sup>1</sup>, 冀志江<sup>2</sup>, 施楣梧<sup>3</sup>

(1. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124; 2. 绿色建筑材料国家重点实验室, 北京 100024;  
3. 总后勤部军需装备研究所, 北京 100088)

**摘要:** 随着城镇密集度越来越高, 大功率电磁辐射设备如大功率中短波天线不可避免的与建筑越来越近, 因而对室内的电磁环境污染逐步加剧。电磁辐射造成的危害通常包括对人体健康的危害(健康效应)和干扰其他电磁设备而造成严重后果(电磁干扰)。针对大功率中短波天线造成的电磁环境污染问题, 提出一套远场条件下电磁辐射的预测方法并成功预测了一个典型大功率中短波天线群附近的拟建项目区域的电磁环境, 在此基础上, 提出有效的针对拟建项目的电磁防护方案。

**关键词:** 中短波天线; 方向图; 电磁环境; 等标污染指数; 电磁防护

中图分类号: TM937 文献标识码: A 文章编号: 1004-7204 (2014) S1-0079-06

### Prediction and Protection of Radio Antenna Electromagnetic Radiation With High-power Medium-short Wave

TANG Zhang-hong<sup>1</sup>, WANG Qun<sup>1</sup>, JI Zhi-jiang<sup>2</sup>, SHI Mei-wu<sup>3</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124;  
2. China Building Materials Academy, Beijing 100024;  
3. The Quartermaster Equipment Research Institute of the General Logistics Department of the PLA,  
Beijing 100088)

**Abstract:** As the population density becomes higher in cities and towns, electromagnetic radiation equipment with high-power, such as high-power medium-short wave antenna are more close to buildings which results in intensified pollution to the indoor electromagnetic environment. The harm caused by the electromagnetic radiation usually includes harm to human health (health effect) and interfering to other electromagnetic devices and cause serious consequences (electromagnetic interference). This paper proposes a set of far field electromagnetic radiation prediction method against electromagnetic environmental pollution problems caused by the high-power medium-short wave antenna and successfully predicted the electromagnetic environment of a typical superpower shortwave antenna group which is close to a planned building. Based on this, effective electromagnetic protection program is proposed for planned buildings.

**Key words:** Key words: medium-short wave antenna; directional diagram; electromagnetic environment; Standard Pollution Index; electromagnetic protection

#### 引言

为估算辐射体对环境的影响, HJ/T 10.2 -1996《辐射环境保护管理导则-电磁辐射环境影响评价方法与标准》

给出了典型的中波和短波发射台站发射天线对环境辐射的电场强度的理论计算公式<sup>[1]</sup>, 运用该公式计算天线远场的电磁辐射时, 需要有发射天线高度因子、发射天线

基金项目: 立体结构频率选择表面的优化设计 (K201204) 基于微生物模版的人工电磁媒质电磁响应的多尺度效应项目 (11104006)

垂直面方向性函数等准确参数。然而，在进行相关电磁辐射环境影响评价时，很难获取这些准确参数。因此实际预测这类大功率中短波天线的电磁辐射时，通常采用的是简化的舒来依金 - 范德波尔公式<sup>[2-4]</sup>。该公式近似认为发射天线高度因子为 1.2，发射天线垂直面方向性函数为 1，这样导致预测的电场强度与空间高度无关。另一方面，实际大功率中短波天线附近的监测结果表明，不同楼层电场强度的测量结果有较大波动，因此采用简化公式预测大功率中短波天线附近建设项目的电场强度已经不能满足要求<sup>[3-4]</sup>。为更准确预测大功率中短波天线辐射的电场强度，给出天线附近建设项目不同楼层的电场强度，本文基于电基本振子远场偶极子电场强度的计算公式，通过积分方法计算出整个天线在远场区任意点的电场强度。在此基础上，根据天线的辐射功率反推天线的电流幅值，从而实现远场区任意点电场强度的计算并获得建设项目所在区域不同楼层的电场强度分布和等标污染指数分布。根据电场强度分布和等标污染指数分布对建设项目所在区域的电磁环境进行评价，并结合建设项目的施工特点，提出电磁环境防护措施，并利用实际测试结果对这一防护措施进行了验证，表明这个防护措施施行之有效。

### 1 中短波广播天线远场区电场强度计算

大功率中波广播的发射天线一般采用单塔天线，天线高度通常为  $0.3\text{--}0.5\lambda$ <sup>[5]</sup>。由于单塔天线直立于地面，

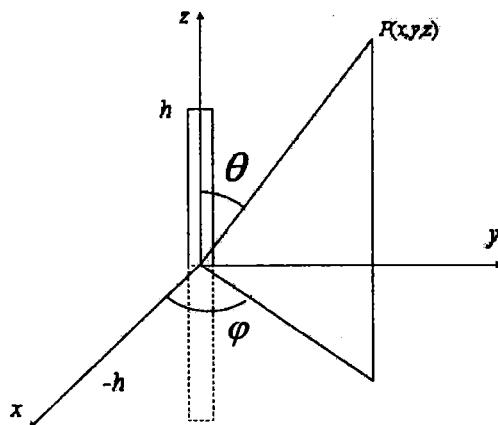


图 1 中波天线示意图

辐射垂直极化波，其在垂直面内的大部分能量，沿地面传播，只有小部分能量以不同仰角向天空辐射，远小于地波场强，因此从电磁辐射防护角度来说只需考虑地波电场强度。

图 1 为中波单塔天线示意图，图中  $xy$  为地平面，天线高度为  $h$ ，在远场区，即

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

时，电基本振子辐射的电磁场主要由  $\frac{1}{r}$  决定，此时球坐标系下电场和磁场满足以下关系式<sup>[4]</sup>：

$$\begin{cases} H_r = H_\theta = E_r = E_\phi = 0 \\ E_\theta = j \frac{60\pi I l}{\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} \\ H_\phi = j \frac{I l}{2\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\lambda$  为电磁波波长， $k$  为波数， $k=2\pi/\lambda$ ， $I$  为电基本振子的电流幅值， $l$  为基本振子的长度。

对式在天线长度方向上积分即得天线的总辐射场：

$$E(\theta) = \frac{j60Ie^{-jkr}}{r} F(\theta) \quad (3)$$

式中

$$F(\theta) = \frac{\cos(kl \cos\theta) - \cos(kl)}{\sin\theta} \quad (4)$$

称为天线的方向因子。

短波天线则利用电离层反射，以天波方式进行远距离传播。因此短波天线的对称振子水平放置，使得电磁波水平极化，以一定仰角向天空辐射。此时，可以把地面看作理想导体，因为大多数情况下水平极化波地面反射系数都接近 -1，可用地面下的负镜像天线来代替地面对辐射的影响。此时短波天线的方向图为<sup>[5]</sup>：

$$F(\Delta, \varphi) = \left| \frac{\cos(kl \cos\Delta \sin\varphi) - \cos(kl)}{\sqrt{1 - \cos^2 \Delta \sin^2 \varphi}} \right| \cdot 2 \sin(kh \sin\Delta) \quad (5)$$

通常情况下，在短波天线一面加装反射器，反射器的激励使得正方向反射器和天线的场强同相，而在相反的方向反射器和天线的场强反相，互相抵消。由于有了反射器，方向图变成了单方向，而且在正方向，场强大约增加到 $\sqrt{2}$ 倍，这样，加装反射器后短波天线正方向的辐射电场强度为：

$$E(\Delta, \varphi) = \sqrt{2} \frac{j60Ie^{-jk}}{r} F(\Delta, \varphi) \quad (6)$$

$$E(\Delta, \varphi) = \sqrt{2} \frac{j60Ie^{-jk}}{r} F(\Delta, \varphi) \quad (7)$$

以上分析仅考虑地面对中波电磁波无反射、对短波电磁波全反射的情况，实关<sup>[3]</sup>：

$$R_H = \frac{\sin \varphi - \sqrt{X - \cos^2 \varphi}}{\sin \varphi + \sqrt{X - \cos^2 \varphi}} \quad (8)$$

$$R_V = \frac{X \sin \varphi - \sqrt{X - \cos^2 \varphi}}{X \sin \varphi + \sqrt{X - \cos^2 \varphi}} \quad (9)$$

式中  $X = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma$  (10)  
 $R_H$  和  $R_V$  分别为水平极化波和垂直极化波的反射系数。

对于中波天线，其辐射的电磁波为垂直极化波，因此其反射系数如式（8）所示；对于中波天线，其辐射的电磁波为垂直极化波，因此其反射系数如式（9）所示。最终观测点的电场强度为天线辐射场强与地面反射场强的叠加。

## 2 中短波广播天线电流幅值计算

评价中短波广播天线附近建设项目所在区域的电磁环境时，通常能获取的资料仅限于天线的工作频率、尺寸、辐射功率 P 等参数，因此需要根据天线的辐射功率 P 来计算其电流幅值 I。

考虑天线有效辐射面为地面以上的半个球面，远场时天线穿过整个半球面的辐射功率与电场强度有以下关系：

$$P = \frac{1}{240\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} |E|^2 r^2 \sin \theta d\theta d\varphi \quad (11)$$

将式代入并整理得：

$$I = \sqrt{\frac{P}{30Int}} \quad (12)$$

式中

$$Int = \int_0^{\pi} \frac{(\cos(kl \cos \theta) - \cos(kl))^2}{\sin \theta} d\theta \quad (13)$$

## 3 多天线综合场强与等标污染指数计算

如果有多个中波天线或短波天线，可先分别计算单幅天线的电磁辐射，然后根据下式进行矢量叠加并计算其幅值：

$$|E| = \left| \sum_i E_i \right| \quad (14)$$

如果有多个中波天线和短波天线同时工作，由于其工作频率有很大差异，电磁辐射不能再按照矢量进行叠加，一种近似计算方法是按功率进行叠加计算综合场强：

$$E = \sqrt{\sum_i |E_i|^2} \quad (15)$$

并按以下公式计算其等标污染指数<sup>[6]</sup>：

$$SPI = \sum_i \frac{A_i}{B_i} \quad (16)$$

式中  $A_i$  为第 i 个频段辐射体辐射场的场量参数在任意连续 6 分钟内的平均值， $B_i$  为于第 i 个频段辐射的电磁辐射场的导出限值。待评价区域达标须满足等标污染指数  $SPI \leq 1$ 。

## 4 某典型区域电磁环境预测

表 1 为某中短波广播发射台的天线参数，可以看出有 4 幅天线，中波、短波天线各两幅。

在天线群以北有拟建项目，各天线与拟建项目的相对位置关系如图 2 所示，图中各位置坐标单位为 m。

根据表 1 所示的天线参数和图 2 所示的各天线与拟建项目的相对位置关系即可预测拟建项目所在的电场强度。图 3 所示为高度 1.7 m 时建设项目所在区域的电场强度分布图。图中等位线值的单位为 V/m。

图 3 可以看出，在高 1.7 m 的地面，拟建项目大部分

表 1 某中短波广播发射台的天线参数

编号	天线高度	工作频率	发射功率
中波 1#	150 m	0.6~0.8 MHz	50 kW
中波 2#	180 m	0.6~0.8 MHz	200 kW
短波 1#	60 m	3~6 MHz	120 kW
短波 2#	30 m	8~12 MHz	120 kW

区域电场强度接近 10 V/m，区域东西边界由于距离天线较近，其值超过 11 V/m。图 4 为同一高度等标污染指数分布图。

可见，在高 1.7 m 的地面，拟建项目所有区域等标污染指数均小于 1，即全部达标。但另一方面，由于拟建项目西边接近短波天线的发射方向，其等标污染指数已接近 1，因此需要采取有效的防护措施以降低建筑物室内电磁辐射。

### 5 辐射严重区域的电磁防护措施

针对拟建项目所在区域部分位置电磁辐射接近标准限值的问题，提出采用钢筋组成的金属网嵌入墙体水泥内以实现对建筑物室内的电磁屏蔽，从而减少室内的电磁辐射。可采用等效传输线法近似计算金属网孔的屏蔽效能<sup>[4]</sup>：

$$SE = A_a + R_a + B_a + K_1 + K_2 + K_3 \text{ (dB)} \quad (17)$$

式中  $A_a$ 、 $R_a$ 、 $B_a$  分别为孔的传输损耗、孔的单次反射损耗和多次反射损耗； $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为与孔个数有关的修正项、由趋肤深度不同引入的低频修正项、由相邻孔间相互耦合而引入的修正项。

由于采用钢筋组成的金属方形网孔，对以上参数选择适用于方形网孔的计算公式，再利用式（17）即可计算给定孔径大小和频率下的屏蔽效能。表 2 给出了不同电磁波频率下不同方孔孔径金属网孔的屏蔽效能。

表 2 中可以看出，同样孔径大小的金属网孔，电磁波频率越低，屏蔽效能越大；同样，相同频率的电磁波，金属网孔孔径越小，屏蔽效能越大。

由于实际存在 4 个频率的中短波，金属网对电磁波的屏蔽是对多个波段电磁波屏蔽的综合效果。

为更清楚了解金属网对电磁波的屏蔽，在该广播发

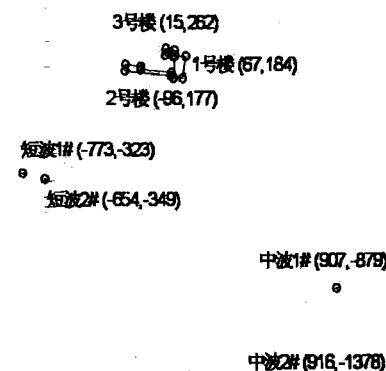


图 2 各天线与拟建项目的相对位置关系

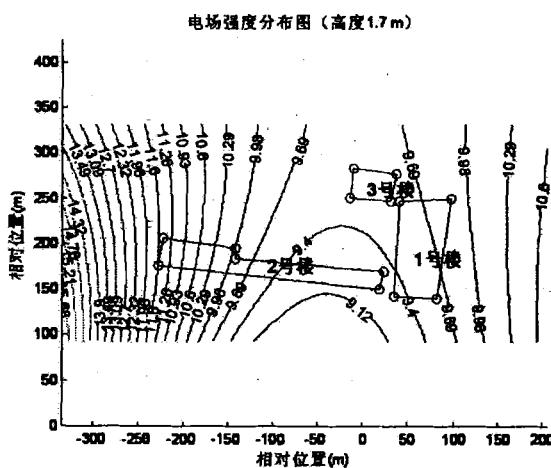
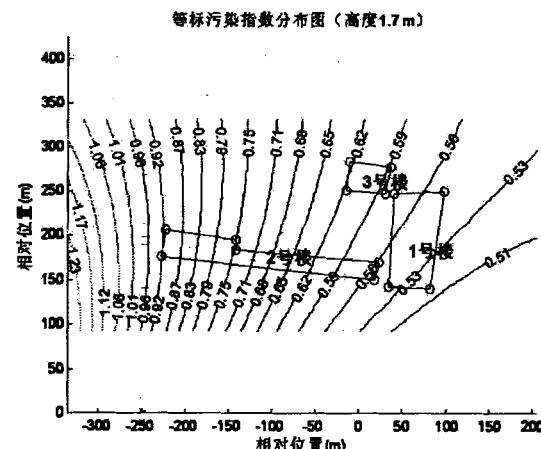
图 3 高度 1.7m 时建设项目附近电场强度分布图  
(电场强度单位：V/m)

图 4 高度 1.7m 建设项目附近等标污染指数分布图

表 2 不同网孔金属网对不同频率电磁波的屏蔽效能 (dB)

频率 孔径	0.8 MHz	3 MHz	6 MHz	12 MHz
2 m	33.39	21.92	15.94	10.09
1 m	39.41	27.93	21.92	15.94
0.5 m	45.43	33.95	27.93	21.92

射台附近某栋 6 层居民楼楼顶实际搭建钢管，模拟建筑物内的金属网，对屏蔽前后同一位置的电场强度进行了测试，测试仪器采用 EMR-300 综合场强仪，如图 5 所示。假设其他辐射源的电磁波与该广播发射台辐射的电磁波按功率密度叠加，则利用综合场强仪进行测试时，根据场强读数计算屏蔽效能的公式为：

$$SE = 20 \lg \frac{\sqrt{E_1^2 - E_0^2}}{\sqrt{E_2^2 - E_0^2}} = 10 \lg \frac{E_1^2 - E_0^2}{E_2^2 - E_0^2} \quad (18)$$

式 (18) 中  $E_0$  为读入的背景电场强度，即非广播发射台天线辐射的电场强度。为获得背景电场强度，选取远离广播发射台的地点用相同仪器测试了一组电场强度取其平均，作为背景电场强度，为 0.87 V/m。式中  $E_1$  和  $E_2$  分别为钢管屏蔽前后的读入的电场强度。

表 3 为搭建不同钢管孔径时测试的屏蔽前后的电场强度值。

考虑背景电场强度为 0.87 V/m，利用公式可计算出不同孔径钢管的屏蔽效能如表 4 所示。

表 4 结果可以看出，在钢管搭建的金属网孔径为 1 m × 0.75 m 时，其综合屏蔽效能达到 7.7 dB。对图 5 所示的不同高度的场强分布最高点 11.6 V/m，经过 1 m × 0.75 m 孔径的金属网孔屏蔽后，电场强度降为 4.8 V/m，远低于 4 个中短波任何频段对应的防护标准。可见提出的采用钢筋组成的金属网孔嵌入墙体水泥内以实现对建筑物室内的电磁屏蔽这一防护措施是行之有效的。并且，在现代建筑的实际工程中，为增加墙体强度，在墙体内布置的钢筋甚至比 1 m × 1 m 孔径的钢筋金属网更密集，因此在墙体内布置 1 m × 1 m 孔径的钢筋金属网不会额外增加太多建设成本。

工程施工上，需要金属网相互导通，否则金属网的

表 3 不同孔径钢管电磁强度测量值

规格 (m×m)	背景场强 6 次平均值 (V/m)	屏蔽后场强 6 次平均值 (V/m)
2×3	4.24	2.87
2×1.5	4.24	2.51
1×1.5	4.47	2.20
1×0.75	4.81	2.13

表 4 不同孔径钢管(铁丝网)的屏蔽效能

规格 (m×m)	屏蔽效能 (dB)
2×3	3.6
2×1.5	4.9
1×1.5	6.7
1×0.75	7.7

有效孔径不能保证，可通过焊接或编织的方法保证纵横金属网相互导通。在此基础上，利用水泥将钢筋网固定，使得钢筋网既能承重，又具有电磁屏蔽的功能。此外，考虑到窗户口径为 2 m × 2 m 或更大，即使墙体能实现很好的屏蔽，发射台辐射的电磁波还可以从窗户泄露到室内，针对这一问题的解决措施是在窗外加装防盗网形式的钢筋网，孔径为 1 m × 1 m 或更小，且保证窗外与墙体内的钢筋网相互导通。

## 6 结论

本文针对大功率中短波天线附近的拟建项目区域提出一套新的评价方法，该方法与 HJ/T 10.2—1996<sup>[1]</sup>《辐射环境保护管理导则—电磁辐射监测仪器和方法》中的计算公式相比，考虑了天线方向图，计算结果体现了建筑物高度不同带来的差异，与实际更吻合。该评价方法成

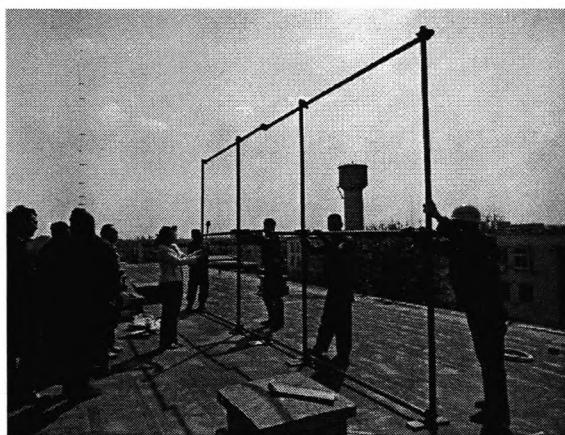


图 5 不同孔径钢管屏蔽效能的测试现场

功运用到一典型中短波发射台附近拟建项目区域的电磁环境评价。针对评价区域电磁辐射超标的问题，分别针对墙体和窗户提出一套加装钢筋金属网的电磁防护措施，该方法行之有效且不会增加太多建设成本。数值计算估计和实际测试结果表明，提出的电磁防护措施有较好的屏蔽效能，能满足超标区域的电磁辐射降低到远低于4个中短波任何频段对应的防护标准。

#### 参考文献

- [1] HJ/T 10.2-1996. 辐射环境保护管理导则 - 电磁辐射监测仪器和方法 [S].
- [2] 黄恒, 王东, 张金帆. 中波广播电台的电磁辐射环境影响分析 [J]. 环境科学与管理, 2011, 36(4): 189-192, 182.
- [3] 周扬, 赵福祥, 林炬等. 中短波广播发射台电磁辐射环境影响预测模型 [J]. 环境监测与技术, 2011, 23(1): 31-33.
- [4] 龙鹤山, 许宁, 谢明. 中波广播电磁辐射环境影响水平预测模型的研究 [J]. 卫生研究, 2005, 34(5): 631-632.
- [5] 李孝勤. 广播电视技术手册: 天线. 第7分册, 第7卷 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- [6] GB 8702-88. 电磁辐射防护规定 [S].
- [7] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
- [8] James C. Rautio, Reflection coefficient analysis of the effect of ground on antenna patterns [J]. IEEE Antennas and Propagation Society Newsletter, February, 1987.

#### 作者简介

唐章宏, 男, 北京人, 北京工业大学讲师, 主要研究方向为电磁测试与仿真。  
王群 (1964-), 男, 北京工业大学教授, 电磁防护与检测实验室 (CNAS) 主任, 主要科研方向: 电磁防护材料及电磁兼容技术。

(上接 78 页)

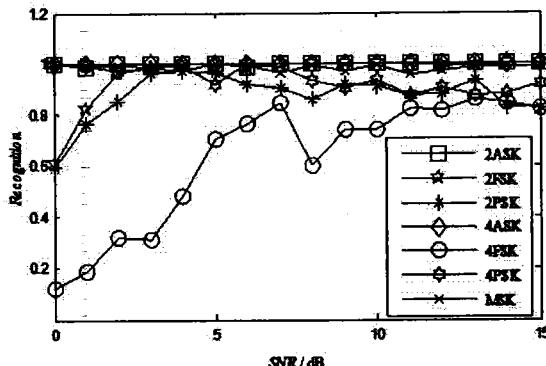


图 5 各信号的识别率曲线

更加实用、稳定、可靠的参数有待进一步研究。

此外, 本次仿真只是考虑了在高斯信道下的情况, 并未考虑实际中的多径和衰落。这也是下一步需要研究的。

#### 参考文献

- [1] 李耐根. 基于谱分析数字信号调制方式的自动识别 [D]. 南昌大学, 2006.
- [2] GARDNER W A. Spectral correlation of modulation signals: Part I analog modulation [J]. IEEE Trans. Comm. 1987, 35(6):584-595.
- [3] GARDNER W A. Spectral correlation of modulation signals: Part II digital modulation [J]. IEEE Trans. Comm. 1987, 35(6):595-601.
- [4] 韩国栋, 蔡斌, 郭江兴. 调制分析与识别的谱相关方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(3):34-37.
- [5] 游文峰. 基于谱相关的通信和雷达信号识别方法研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2009.
- [6] 罗利春. 谱相关的原理、功能与截面谱表示 [J]. 物理学报, 2002, 51(10): 2177-2181.
- [7] 王瑛, 程汉文, 吴乐南. 基于谱相关特征的信号调制方式识别 [J]. 信息技术, 2004, 12:25-28.

#### 作者简介

潘莹 (1989-), 女, 陕西人, 北京邮电大学电子工程学院硕士研究生, 生物医学工程专业, 主要从事信号处理相关的研究。

张洪欣 (1967-), 男, 山东人, 北京邮电大学电子院教授, 博士生导师。宽带通信与微波技术中心主任, 国家自然科学基金项目同行评议专家, 教育部学位与研究生教育发展中心评议专家, 中国电子学会 DSP 应用专家委员会委员, 中国工业和信息化部科技人才库专家, 北京市科学技术奖励评审专家, 北京电子电器协会电磁兼容分会委员, 中华医学预防会自由基委员会委员, 江苏省科技计划评审专家, 北京邮电大学育人标兵。

刘振 (1989-), 男, 山东人, 北京邮电大学电子工程学院硕士研究生, 电子与通信工程专业, 主要从事信号处理相关的研究。

## 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>