

# 10 kHz 交流等离子体天线辐射特性和电磁兼容性分析

赵建森<sup>1</sup>, 李延建<sup>2</sup>, 许少杰<sup>2</sup>, 姚京<sup>2</sup>, 张映辉<sup>2</sup>, 张芝涛<sup>1,2</sup>

(1. 大连海事大学轮机工程学院, 大连 116026; 2. 大连海事大学物理系, 大连 116026)

**摘要:** 表面波等离子体天线因存在很强的电磁干扰而导致电磁兼容性较差, 必须采用相应技术手段或利用新型电源作为天线激励源以满足天线的电磁兼容性要求。为此, 采用5~20 kHz高压交流电源作为激励源构建了10 kHz交流等离子体天线, 并分析了其辐射特性和电磁兼容性。研究结果表明, 在较宽的频带范围内, 该10 kHz交流等离子体天线的电压驻波比(VSWR)<2; 同50 Hz交流等离子体天线相比, 该天线的噪声明显减小, 且天线的增益在150~350 MHz频带范围内有所提高; 使用该天线接收无线广播时收音机可以接收到广播电台信号, 而表面波等离子体天线则会因过强的干扰而导致收音机不能正常工作。该10 kHz交流等离子体天线不仅在带宽特性上有所改观, 而且同表面波等离子体天线相比具有较低的电磁干扰。

**关键词:** 等离子体; 天线; 阻抗; 辐射; 交流(AC)电源; 表面波; 电磁兼容

DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2012.09.028 文章编号: 1003-6520(2012)09-2336-07

## Analysis on Radiation Characteristics and Electromagnetic Compatibility of 10 kHz AC Plasma Antenna

ZHAO Jiansen<sup>1</sup>, LI Yanjian<sup>2</sup>, XU Shaojie<sup>2</sup>, YAO Jing<sup>2</sup>, ZHANG Yinghui<sup>2</sup>, ZHANG Zhitao<sup>1,2</sup>

(1. School of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Department of Physics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The strong electromagnetic interference in surface wave plasma antenna leads to its poor electromagnetic compatibility. In order to find appropriate means or new power supply to solve the problem, a 10 kHz AC plasma antenna prototype was established using a 5~20 kHz high voltage AC power supply. The prototype's radiation characteristics and electromagnetic compatibility were measured and analyzed. The results show that voltage standing-wave ratio (VSWR) is less than 2 in broad frequency range. Compared with 50 Hz AC plasma antennas, the noise reduces, and the gain increases from 150 MHz to 350 MHz. When connecting the plasma antenna to a radio, the radio can receive radio broadcasting normally. For the 10 kHz AC plasma antenna, there is improvement not only in its bandwidth, but also in its electromagnetic compatibility.

**Key words:** plasma; antenna; impedance; radiation; alternative current (AC) power supply; surface wave; electromagnetic compatibility

## 0 引言

等离子体天线是利用等离子体来代替金属的射频天线<sup>[1-2]</sup>, 通过调节放电功率, 改变等离子体放电状态, 可动态调节天线的阻抗、增益、方向性等天线参数<sup>[1-6]</sup>, 是一种具有良好发展前景的智能天线。同时, 等离子体天线具有隐身特性, 当关闭气体放电管的激励源时, 天线处于不工作状态, 雷达波可穿过气体放电管而回波功率很小, 具有非常小的雷达散射

截面(RCS)<sup>[1-2]</sup>。

目前, 对等离子体天线性能的研究主要包括天线的阻抗<sup>[5-9]</sup>、天线的增益<sup>[8-10]</sup>、辐射方向图<sup>[1,5,9-14]</sup>、辐射散射特性<sup>[15-20]</sup>、电磁波在等离子体天线中的传输特性的理论与实验研究<sup>[21-22]</sup>等等。Rayner等人着重研究了表面波激励的等离子体天线的激发特性、天线的噪声及方向图特性, 证明出等离子体柱长度与激励功率平方根成正比、频率为100 MHz时天线效率为65%<sup>[1]</sup>。Kumar等人在近期实验研究了等离子体天线中出现的分段等离子体柱的现象, 实验发现在等离子体柱的激励生成过程中, 通过控制气压、激励功率、输入功率等参数, 单根等离子体柱可以变化为多个短等离子体分段, 这样便可构成几种不同形状的天线<sup>[8-9]</sup>。Bhaskar等人研究了雷达散射界面的优化<sup>[10]</sup>。Gerri和Russo等人利用波导装置激励等离子体柱, 作为天线辐射电磁波, 测量并分析了该等离子体天线的辐射特性、开关特性, 结果发现等离子

**基金资助项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)主题项目(2012AA062609); 国际科技合作项目(2010DFA61470); 中央高校基本科研业务费专项资金(2012QN067; 2012TD061)。

Project supported by National High-tech Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA062609), International Scientific and Technological Cooperation of China(2010DFA61470), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2012QN067, 2012TD061).

体天线可快速开启和关闭,功率为 100 W 时天线效率为金属天线效率的 65%<sup>[11-13]</sup>。中科院梁志伟、赵国伟等人测量了表面波等离子体天线的阻抗及噪声特性,给出了较为实用的测量方法,并且利用数值分析了柱形等离子体天线的辐射特性,结果表明天线具有类似金属的辐射特性,同时也具有动态重构特性<sup>[4-7]</sup>。石磊等人研究了等离子体单极子天线的辐射特性和隐身性能,结果表明了等离子体天线具有优良的性能和很好的隐身效果<sup>[14]</sup>。吴振宇等人提出了一种表面电流分布模型并计算了天线的辐射方向图,计算结果与测量结果符合良好<sup>[15]</sup>。李学识等人研究了表面波激励等离子体天线的近场特性、远场辐射特性及动态可重构性<sup>[16-17]</sup>。吕军慰等人根据气体分子动力学和玻耳兹曼方程建立了基于柱形单极表面波等离子体天线结构的控制模型,该模型可用于等离子体天线的参数控制、预测以及参数重构控制<sup>[18-19]</sup>。本文作者曾经通过理论结合实验研究了电磁波在柱形等离子体中的传播特性<sup>[20]</sup>与柱形等离子体天线的阻抗带宽及辐射特性<sup>[21]</sup>。在目前所报道的等离子体天线中,工频交流所激励的天线的噪声较大,而且天线的效率和增益也不理想<sup>[1,4]</sup>;大多数研究者采用射频源与微波源激励气体放电管<sup>[1,2,4-5,8-13,16-19,28]</sup>,电磁波以表面波的形式产生和维持等离子体,这种等离子体天线称为表面波等离子体天线。研究证明,该等离子体天线具有较高的增益、较低的噪声和动态重构的特性,但成本较高,能耗较大,通信频带受限,尤为重要的是表面波激励通道和信号通道之间存在强烈的电磁干扰,严重地影响了连接天线的仪器的正常工作。因此,电磁干扰问题如果得不到较好的解决,就很可能会造成较大的损失<sup>[24-25]</sup>。

本文采用了 5~20 kHz 高压交流电源作为等离子体天线的激励源,设计了 1 款 10 kHz 交流等离子体天线模型,并对天线的辐射特性和电磁兼容性进行了分析,所得出的结果可以为构建具有较好电磁兼容性的等离子体天线提供实验参考。

## 1 天线结构与实验装置

本文所设计的天线结构与实验装置如图 1 所示,天线主体是总长度为 1.2 m、直径为 1 cm 的方环形气体放电管,内充氩(Ar)与汞(Hg)的混合气体,气压约为 200 Pa。放电管的两极和高压电源电路板均放入绝缘盒中,考虑到屏蔽输电线产生的电磁干扰<sup>[26-29]</sup>,绝缘盒内置有金属屏蔽层。放电管一侧利

用电容耦合模式进行馈电,外面封有由铸铝制成的金属屏蔽盒。为防止高电位对电磁波信号接收、发射装置造成伤害,电容耦合器离放电管接地电极的距离≤0.2 m。通过调节等离子体天线电源的频率调节旋钮,可以在 5~20 kHz 频率范围内动态调节电源的输出频率。

5~20 kHz 交流高压电源工作流程比较简单,AC 220 V 工频市电经过低通滤波后送入 AC/DC 桥式全波整流电路,目的是将 50 Hz 交流电转变为脉动的直流电。经过电容滤波后将脉动的直流电转变为平滑的直流电,生成约 300 V 的直流电压。该直流电压经过半桥变换器后转变为 5~20 kHz 高频交流输出。主控部分主要是对功率驱动单元进行功率调节与频率调节,频率调节通过变频器件产生 5~20 kHz 可调的高频信号,通过升压变压器得到最高 7 kV 的输出高压,激励放电管产生高密度、均匀的等离子体。本实验中放电频率为 10~12 kHz 时天线增益较高,因此后面的实验中本文所设计天线的放电频率都采用 10 kHz,此款天线即称为 10 kHz 交流等离子体天线。在图 1 的天线测量实验装置中,示波器一端口通过高压探头连接放电管的高压端,用来测量天线的激励电压;另一端口连接放电管的接地端,用来测量天线的放电电流,进而计算放电功率。利用经过校准的矢量网络分析仪来测量等离子体天线的输入阻抗,连接天线和矢量网络分析仪射频端口的传输线为特性阻抗为 50 Ω 的同轴线,网络分析仪的输出端口特性阻抗为 50 Ω。测量相对增益时,发射天线与信号发生器之间设有阻抗匹配电路,确保在较宽的频带下天线的电压驻波比<2。参考天线为在较宽频带内电压驻波比<1.5 的标准增益天线。利用频谱分析仪所接收的信号频谱来间接表征等离子体天线的噪声特性。根据远场测量方法,利用矢量网络分析仪来测量天线的辐射方向图,场地设置在空旷的楼顶。实验中待测天线选用 4 款自制的天线,除了已介绍过的 10 kHz 交流等离子体天线外,其他 3 款天线分别为:50 Hz 交流等离子体天线、铜金属线天线、40.68 MHz 表面波等离子体天线。在实验中 4 款天线均为接收天线,都是在测量完阻抗、增益特性之后将这 4 款天线接上已经拆除拉杆金属天线的收音机,测试收音机的工作性能。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 等离子体天线的辐射特性

利用示波器来测量 10 kHz 交流等离子体天线

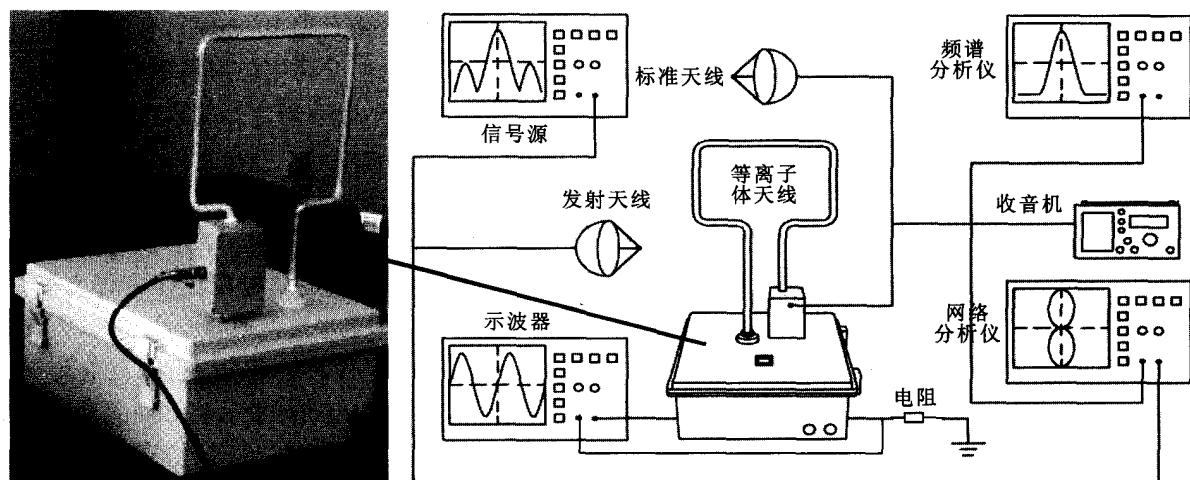


图 1 天线测量实验装置

Fig. 1 Experimental setup of antenna measurement

的激励电压  $U_e$  和通过放电管的放电电流  $I$ 。该条件下 10 kHz 交流等离子体天线的放电功率为 6.2 W, 50 Hz 交流等离子体天线的放电功率(天线长度为 1 m, 直径为 1 cm)约为 5.8 W, 表面波等离子体天线(天线长度为 0.6 m, 直径为 1 cm)的输出功率(由功率计测得)为 29 W。

利用矢量网络分析仪测量得到的 10 kHz 交流等离子体天线、50 Hz 交流等离子体天线的输入阻抗  $Z_m = R + jX$ (其中  $Z_m$  的实部为电阻  $R$ , 虚部为电抗  $X$ )分别如图 2、图 3 所示, 测量频率  $f$  的范围为 100 ~ 400 MHz。从图 2、图 3 可以看出, 这 2 款天线在较宽的频带范围内电阻  $R$  接近于 50 Ω, 电抗  $X$  接近于 0, 具有宽频带阻抗特性。但不同的是, 50 Hz 交流等离子体天线的阻抗曲线比较粗糙; 而 10 kHz 交流等离子体天线的阻抗曲线比较平滑。说明 50 Hz 交流产生的等离子体稳定性较差, 对接收信号的干扰很强, 导致所测量的阻抗值变动较大; 相比之下, 10 kHz 交流等离子体源激励产生的等离子体稳定性较好, 对入射电磁波的干扰较弱, 使得测量的阻抗曲线较平滑。

10 kHz 交流等离子体天线、50 Hz 交流等离子体天线的相对增益  $S_{21}$  如图 4 所示, 测量频率  $f$  的范围为 150~400 MHz, 在该频率范围内这 2 款等离子体天线的相对增益  $< 2$ 。从图 4 可以看出, 50 Hz 交流等离子体天线的导电性较差, 相对增益很低, 且随频率而变化较大; 相比之下, 10 kHz 交流等离子体天线在较宽的频带范围内具有较为理想的增益, 且增益随频率而变化较小。

利用矢量网络分析仪测得的 10 kHz 等离子体天线归一化辐射方向图如图 5 所示。图 5 中, 左边

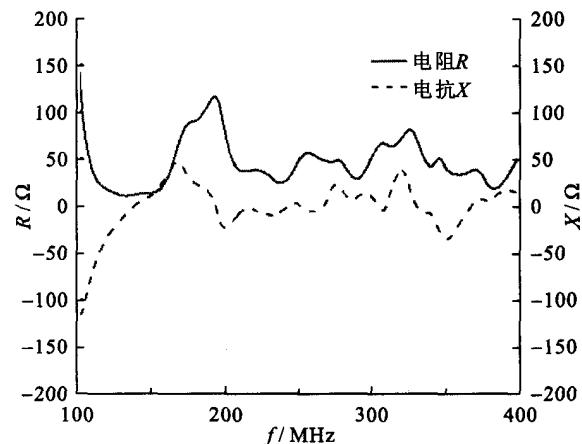


图 2 10 kHz 交流等离子体天线的输入阻抗

Fig. 2 Input impedance of 10 kHz AC plasma antenna

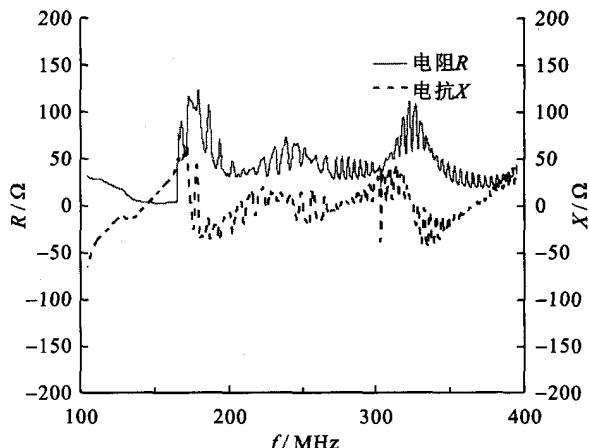


图 3 50 Hz 交流等离子体天线的输入阻抗

Fig. 3 Input impedance of 50 Hz AC plasma antenna

纵轴坐标代表辐射方向图中各同心圆归一化后的辐射方向相对刻度; 测量频率为 250 MHz, 在该频率下

等离子体天线的电压驻波比为 1.17;图中虚线为水平面方向图;实线为垂直面方向图。从图 5 可以看出,在对水平面方向图的测量中,由于屏蔽盒的影响,天线辐射功率最大的方向在 223° 和 316° 附近;在对垂直面方向图的测量中,由于绝缘盒中的金属屏蔽层对电磁波有一定的反射作用,使得等离子体天线具有一定的方向性。

## 2.2 等离子体天线的电磁兼容性

图 6 所示的是以等离子体天线和金属天线作为接收天线所接收到的信号频谱图。金属天线和等离子体天线连接频谱分析仪,发射天线所发射信号的频率分别为 100 MHz 和 150 MHz,功率均为 0 dB(单位 dB 的基准值为 0 dB 对应 1 mW,下同)。考虑到表面波等离子体天线的信号通道和激励通道之间存在较强的电磁干扰,本实验中并未采用该天线。金属天线配有相应的匹配电路,通过调节使得天线的电压驻波比约为 1.5。图 6(a)3 个小图为所接收的 150 MHz 信号频谱,图 6(b)3 个小图为所接收的 100 MHz 信号频谱。从图 6 可以看出,50 Hz 交流等离子体天线所接收到的信号电平较低,为 -84.77 dB,而噪声电平较高,约 -95 dB。而且相比于接收 100 MHz 信号时的噪声电平,接收 150 MHz 信号时的噪声电平明显增高,约 -92 dB,几乎与所接收的信号电平相接近,电磁兼容性较差。而从金属天线和 10 kHz 交流等离子体天线所接收到的信号频谱来看,2 款天线的噪声电平在该频率范围内都很低,约 -125 dB,而且增益也相差不大。10 kHz 交流等离子体天线所接收信号的功率略小于金属天线,但与金属天线相差不大(约 1 dB)。说明在一定频率范围内,等离子体对空间电磁波的干扰程度较小,该 10 kHz 交流天线在电磁兼容性方面优于 50 Hz 交流等离子体天线。实验中还发现当信号频率 > 250 MHz 时,连接天线的接收机所接收到的信号噪声电平开始增高,而且随着频率的升高而越来越高,表明等离子体本身所产生的场对高频电磁波产生了较强的电磁干扰,且在一定范围内,信号频率越高则电磁干扰越强。

将金属天线、50 Hz 交流等离子体天线、表面波等离子体天线及 10 kHz 交流等离子体天线分别接在收音机上,利用收音机接收大连电台信号。表 1 为在接入不同天线的条件下收音机所接收信号的强度即收音机显示的信号强度和发出的噪声。实验发现,虽然在收音机和表面波等离子体天线之间设有高通滤波器,但等离子体激励通道所产生的电磁干

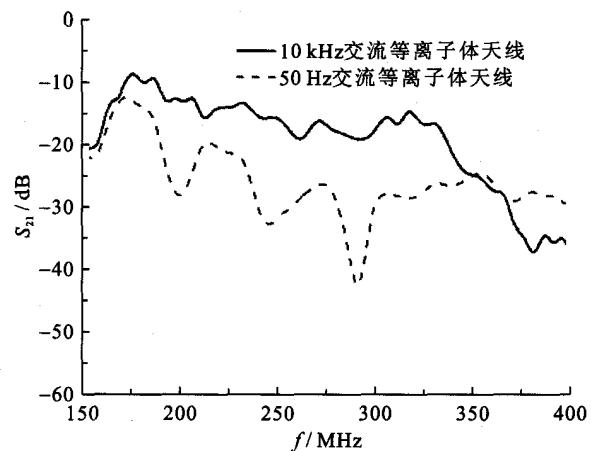


图 4 等离子体天线的相对增益

Fig. 4 Relative gain of plasma antenna

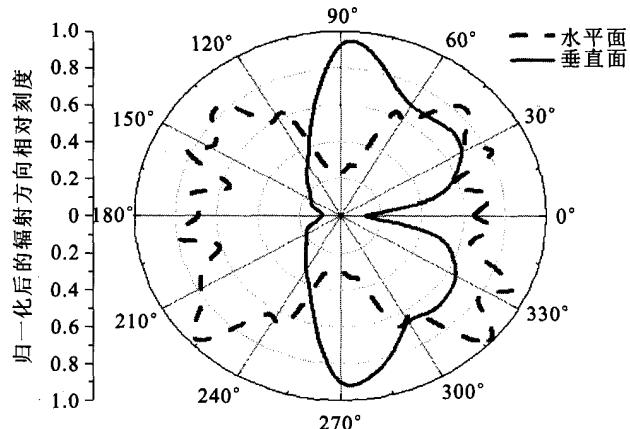


图 5 等离子体天线的辐射方向图

Fig. 5 Radiation pattern of plasma antenna

扰仍使收音机无法正常工作,因此表面波等离子体天线的电磁兼容性问题需要进一步加以解决。在未接天线时收音机屏幕显示无信号。在与 50 Hz 交流等离子体天线相连接时收音机虽然可以接收到电台的信号,但显示的信号强度较弱,而且具有很大的噪声。当接入 10 kHz 交流等离子体天线时,收音机的工作效果要比接入 50 Hz 交流等离子体天线时好很多,而且噪声较小。10 kHz 交流等离子体天线虽然比金属天线还有一定的差距,但在电磁兼容性方面比其他 2 款等离子体天线有着较大的进步。

## 3 电磁兼容性讨论

在等离子体天线系统中,存在着影响等离子体天线电磁兼容性的大量因素,其中等离子体中的带电粒子和入射电磁波的相互作用不可避免。等离子体中的带电粒子在入射电磁波产生的高频电场  $E(t) = E_0 \cos \omega t$  中发生振荡(其中,  $E_0$  为交变电场振幅,



极碰撞产生二次电子,可能是 10 kHz 交流等离子体天线的噪声相对较小的原因之一。同时 10 kHz 电磁波的传输方式与信号通道发射接收的 MHz 信号的传输方式差别很大,对信号通道的电磁干扰很少。因此 10 kHz 交流等离子体天线在噪声和电磁兼容性方面的解决方法相对另外 2 种天线来说更简便。目前,10 kHz 交流及表面波等离子体天线的噪声机制和电磁兼容性问题正在研究当中。

## 4 结论

1) 10 kHz 交流等离子体天线与 50 Hz 交流等离子体天线均具有宽频带阻抗特性,但前者的相对增益在较宽的频带范围内随频率而变化很小,且增益高于后者。

2) 10 kHz 等离子体天线的噪声电平较低,与金属天线相接近,而且在一定频带范围内相对增益与金属天线相差不大。相比表面波等离子体天线,10 kHz 交流等离子体天线对收音机的干扰相当小,在电磁兼容性方面有一定的优势。

## 参考文献 References

- [1] Rayner J P, Whichello A P, Cheetham A D. Physical characteristics of plasma antennas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(1): 269-281.
- [2] 李圣. 表面波等离子体天线物理特性的理论分析[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2007, 21(2): 37-40.  
LI Sheng. Theoretical analysis of characteristics of plasma antennas driven by surface wave[J]. Journal of University of South China (Science and Technology), 2007, 21(2): 37-40.
- [3] 李学识,胡斌杰,李瀚宇,等.等离子体天线研究与应用进展[J].现代电子技术,2010(5):66-69.  
LI Xueshi, HU Binjie, LI Hanyu, et al. Research and application progress of plasma antenna[J]. Modern Electronics Technique, 2010(5): 66-69.
- [4] 梁志伟,王之江,赵国伟,等.等离子体天线的噪声测量及分析[J].电波科学学报,2007, 22(6): 971-975.  
LIANG Zhiwei, WANG Zhijiang, ZHAO Guowei, et al. Noise measurement and analysis of plasma antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(6): 971-975.
- [5] 梁志伟,赵国伟,徐杰,等.柱形等离子体天线辐射特性的矩量法分析[J].电波科学学报,2008, 23(4): 749-753.  
LIANG Zhiwei, ZHAO Guowei, XU Jie, et al. Analysis of plasma-column antenna using moment method [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(4): 749-753.
- [6] 梁志伟,孙海龙,王之江,等.等离子体天线输入阻抗测量及分析[J].物理学报,2008, 57(7): 4292-4297.  
LIANG Zhiwei, SUN Hailong, WANG Zhijiang, et al. Measurement and analysis of plasma antenna input impedance[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(7): 4292-4297.
- [7] 赵国伟,徐跃民.等离子体隐身中天线参数的数值计算[J].微波学报,2008, 24(3): 17-20.  
ZHAO Guowei, XU Yuemin. Calculation of antenna's parameters in plasma stealth antenna[J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(3): 17-20.
- [8] Kumar R, Bora D. A reconfigurable plasma antenna[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(5): 053303.
- [9] Kumar R, Bora D. Wireless communication capability of a reconfigurable plasma antenna[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(6): 063303.
- [10] Bhaskar C, Shashank C. Study and optimization of plasma-based radar cross section reduction using three-dimensional computations [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(11): 2116-2127.
- [11] Cerri G, Leo R D, Primiani V M, et al. Measurement of the properties of a plasma column used as a radiating element[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(2): 342-347.
- [12] Russo P, Primiani V M, Cerri G, et al. Experimental characterization of a surfaguide fed plasma antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(2): 425-433.
- [13] Russo P, Cerri G, Vecchioni E. Self-consistent analysis of cylindrical plasma antennas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(5): 1503-1511.
- [14] 石磊,丁君,丁芊,等.等离子体单极天线辐射特性和隐身性能研究[J].航空计算技术,2009, 39(1): 31-34.  
SHI Lei, DING Jun, DING Qian, et al. Radiation characteristics and stealth properties of unipole plasma antenna[J]. Aeronautical Computing Technique, 2009, 39(1): 31-34.
- [15] 吴振宇,杨银堂,汪家友.等离子体天线表面电流分布与辐射特性研究[J].物理学报,2010, 59(3): 1890-1894.  
WU Zhenyu, YANG Yintang, WANG Jiayou. Study on current distribution and radiation characteristics of plasma antennas[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(3): 1890-1894.
- [16] Li X S, Luo F, Hu B J. FDTD analysis of radiation performance of a cylinder plasma antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 756-758.
- [17] Li X S, Hu B J. FDTD analysis of a magneto-plasma antenna with uniform or ununiform distribution[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 175-178.
- [18] LÜ J W, Li Y S, Chen Z L. A self-consistent model on cylindrical monopole plasma antenna excited by surface wave based on the maxwell-boltzmann equation[J]. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2011, 3: 297-304.
- [19] 吕军慰,陈自力,李迎松.柱形单极表面等离子体天线控制模型研究[J].真空科学与技术学报,2012, 32(4): 285-290.  
LÜ Junwei, CHEN Zili, LI Yingsong. Control of cylindrical monopole plasma antenna excited by surface wave[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2012, 32(4): 285-290.
- [20] 赵建森,张芝涛,王健,等.柱形等离子体天线阻抗及辐射特性实验研究[J].电波科学学报,2012, 27(2): 372-376.  
ZHAO Jiansen, ZHANG Zhitao, WANG Jian, et al. Experimental study on impedance and radiation properties of plasma-column antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012, 27(2): 372-376.
- [21] Zhang Z T, Zhao J S, Xu X W, et al. Experimental study on the interaction of electromagnetic waves and glow plasma[J]. Plasma Science and Technology, 2011, 13(3): 279-285.
- [22] 李江挺,郭立新,金莎莎,等.等离子体鞘套中的电磁波传播特性研究[J].电波科学学报,2011, 26(3): 494-500.



# 10kHz交流等离子体天线辐射特性和电磁兼容性分析

作者: 赵建森, 李延建, 许少杰, 姚京, 张映辉, 张芝涛  
作者单位: 赵建森(大连海事大学轮机工程学院, 大连, 116026), 李延建, 许少杰, 姚京, 张映辉(大连海事大学物理系, 大连, 116026), 张芝涛(大连海事大学轮机工程学院, 大连116026 大连海事大学物理系, 大连116026)  
刊名: 高电压技术 [ISTIC EI PKU]  
英文刊名: High Voltage Engineering  
年, 卷(期): 2012, 38(9)

## 参考文献(29条)

1. Rayner J P;Whichello A P;Cheetham A D Physical characteristics of plasma antennas [外文期刊] 2004(01)
2. 李圣 表面波等离子体天线物理特性的理论分析 [期刊论文]-南华大学学报(自然科学版) 2007(02)
3. 李学识;胡斌杰;李瀚宇 等离子体天线研究与应用进展 [期刊论文]-现代电子技术 2010(05)
4. 梁志伟;王之江;赵国伟 等离子体天线的噪声测量及分析 [期刊论文]-电波科学学报 2007(06)
5. 梁志伟;赵国伟;徐杰 柱形等离子体天线辐射特性的矩量法分析 2008(04)
6. 梁志伟;孙海龙;王之江 等离子体天线输入阻抗测量及分析 2008(07)
7. 赵国伟 徐跃民离子‘体隐身中天线参数的数值计算 2008(03)
8. Kumar R;Bora D A reconfigurable plasma antenna [外文期刊] 2010(05)
9. Kumar R;Bora D Wireless communication capability of a reconfigurable plasma antenna 2011(06)
10. Bhaskar C;Shashank C Study and optimization of plasma-based radar cross section reduction using three-dimensional computations 2009(11)
11. Cerri G;Leo R D;Primiani V M Measurement of the properties of a plasma column used as a radiating element [外文期刊] 2008(02)
12. Russo P;Primiani V M;Cerri G Experimental characterization of a surfaguide fed plasma antenna 2011(02)
13. Russo P;Cerri G;Vecchioni E Self-consistent analysis of cylindrical plasma antennas 2011(05)
14. 石磊;丁君;丁芊 等离子体单极天线辐射特性和隐身性能研究 2009(01)
15. 吴振宇;杨银堂;汪家友 等离子体天线表面电流分布与辐射特性研究 2010(03)
16. Li X S;Luo F;Hu B J FDTD analysis of radiation performance of a cylinder plasma antenna 2009
17. Li X S;Hu B J FDTD analysis of a magneto-plasma antenna with uniform or ununiform distribution 2010
18. LU J W;Li Y S;Chen Z L A self-consistent model on cylindrical monopole plasma antenna excited by surface wave based on the maxwell-boltzmann equation 2011
19. 岳军慰;陈自力;李迎松 柱形单极表面等离子体天线控制模型研究 2012(04)
20. 赵建森;张芝涛;王健 柱形等离子体天线阻抗及辐射特性实验研究 2012(02)
21. Zhang Z T;Zhao J S;Xu X W Experimental study on the interaction of electromagnetic waves and glow plasma [期刊论文]-Plasma Science and Technology 2011(03)
22. 李江挺;郭立新;金莎莎 等离子体鞘套中的电磁波传播特性研究 2011(03)
23. 王仲;张贵新;王强 开放式微波等离子体源的研究进展 [期刊论文]-高电压技术 2011(03)
24. 王新新;马蕾;蔡新景 抗强电磁干扰的高电压同步控制系统 2010(03)
25. 刘进;陈永光;谭志良 静电放电电磁场的特性及分布规律 2012(02)
26. 刘士利;王泽忠;孙静 高压直流输电换流系统屏蔽罩寄生电容的数值计算方法 2010(12)
27. 刘兴发;尹晖;邬雄 高压输电线路无线电干扰和电磁散射对GPS卫星信号影响测试及分析 2011(12)
28. 陈楠;文习山;蓝磊 交叉跨越输电导线三维工频电磁场计算 2011(07)
29. 张广洲;朱银军;张业茂 输电线路工频电场分布特性与计算方法辨析 2011(10)

## 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>