

## 对数周期天线的设计与仿真

万 博,胡小峰,雷晓勇,高永生

(机械工程学院静电与电磁防护研究所,河北石家庄 050003)

**摘 要:**在分析电晕放电原理的基础上,结合关于电晕放电探测系统的设计要求,选用 CST 微波工作室对对数周期天线进行了设计、优化与仿真,所得的仿真计算结果与测试结果有较好的一致性。设计出的对数周期天线具有高增益性,提高了整个电晕放电探测系统的灵敏度。

**关键词:**电晕放电;对数周期天线;CST;仿真;测试;

**中图分类号:**TN82

**文献标志码:**A

对数周期天线是由伊利诺伊大学的 Dwight Isbell 于 1960 年提出的,其结构简单、造价便宜,在 EMC 领域得到广泛应用。它是一种非频变天线,所谓非频变是指天线的阻抗、方向图、增益等电特性在频带范围内基本上无变化。它是根据以下阐述的理论构建而成的:当天线按照某一特定的比例因子  $\tau$  变换后,仍为其原来的结构。这样,出现在频率  $\tau f$  和  $\tau$  的天线性能,将在  $\tau f$  和  $\tau^2 f$  的频率范围内重复出现,依次类推,天线的电性能将在很宽的频率范围内作周期性的变化。因此若能做到在  $f-\tau f$  频带内天线性能指标变化较小,那么就有可能达到非频变天线的要求。同时对数周期天线又是一种线极化天线,电场的极化方向平行于振子的方向。因而使得对数周期天线具有宽频带特性和线极化特性,所以应用其作为电晕放电信号探测系统是天线部分的最优选择。

电晕放电是尖端带电体的电压达到一定值时,周围的气体介质发生局部电离和激发过程而形成放电通道,放电过程伴有微弱的辉光和声响,电极并不出现击穿或导通的现象<sup>[1]</sup>。电晕放电过程中,在电子阶段电流具有非常快的上升沿,而在离子阶段电流呈指数衰减,电流上升沿决定了辐射电磁波的频率特性,其能量覆盖频率较宽,如以 100~500 MHz 为例进行以下讨论。

由于对数周期天线具有宽频带特性和线极化特性,所以应用其作为电晕放电信号探测系统是天线部分的最优选择<sup>[2]</sup>。按照电晕放电探测系统的设计要求,首先设计单个的对数周期天线,提供较高的增益,在此基础上后续进行设计多个阵列进行拼接组合实现高增益阵列天线阵<sup>[3]</sup>。

## 1 对数周期天线的结构与设计

如图 1 所示,对数周期天线是由  $N$  个平行排列的对称振子按照结构周期率  $\tau$  构成的,有如下关系式:

$$\tau = \frac{d_{n+1}}{d_n} = \frac{l_{n+1}}{l_n} = \frac{R_{n+1}}{R_n} < 1.$$

式中:  $d_n, l_n, R_n$  分别是两相邻振子的间距、为虚顶点至最长振子之间的距离、天线的几何顶点到第  $n$  个振子的垂直距离;振子的序号为  $n$ 。

对数周期偶极子天线的设计按两部分进行,其整体结构要决定于周期率  $\tau$  和结构张角  $2\alpha$ 。当  $\tau$  和  $2\alpha$  确定后,对数周期天线的几何结构也就确定了(有时为了设计上的方便也引用另一个参数  $\sigma$ ,  $\sigma$  定义为  $\sigma = d_n/(2l_n)$ ,  $\sigma$  称为间隔因子)。由于  $R_{n+1} = \tau R_n$  以及  $R_n = (l_n/2) \times \cot \alpha$

所以

$$d_n = R_n - R_{n+1} = R_n(1 - \tau) = \frac{l_n}{2}(1 - \tau) \cot \alpha.$$

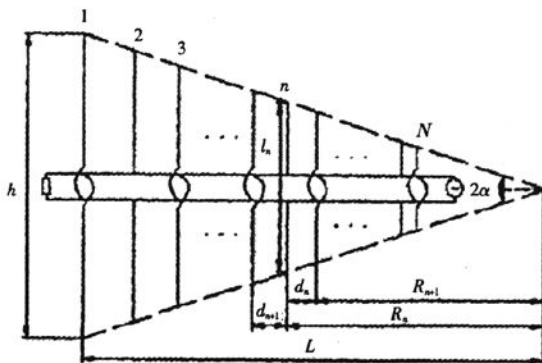


图1 对数周期天线结构示意图

因此,在确定天线的设计参数时。只要知道了  $\tau$ ,  $2\alpha$  和  $\sigma$  任意两个,天线的几何结构和电特性也就确定了。天线长度  $L = (l_1/2) \times \cot \alpha$ , 因此张角  $\alpha$  增大天线长度大大减小。

为了保证天线在两端频率能满足要求,通常采用频带的高端和低端截止常数来设计高、低端偶极子的长度,并由此确定所需的偶极子数。最长的偶极子长度为  $L_1 = K_1 \lambda_L$ 。  $\lambda_L$  是最长的工作波长,  $K_1$  是低端截止常数,  $K_2$  是高端的截止常数,两参量由经验公式可分别得出为

$$K_1 = 1.01 - 0.519\tau,$$

$$K_2 = 7.10\tau^3 - 21.3\tau^2 + 21.98\tau - 7.30 + \sigma(62.12\tau^2 - 18.29\tau^3 - 66\tau + 21.82).$$

对数周期天线的最短的偶极子长度是  $L_U = K_2 \lambda_U$ , 此式中  $\lambda_U$  是最短工作的波长。用两个截止常数及频带的最高和最低频率可求得天线上偶极子数目。

## 2 对数周期天线的建模与仿真优化

### 2.1 建立对数周期天线模型

本文所设计的对数周期天线要求工作频段为 125~500 MHz, 该阵列的增益在中心频率 250 MHz 时约为 25 dBi, 驻波比小于 2。建模过程中, 考虑到工作频率在超短波及微波波段, 电流主要集中在导体表面, 模型中对数周期线可用实心金属代替。图 2 为 CST 建模器所生成的模型。

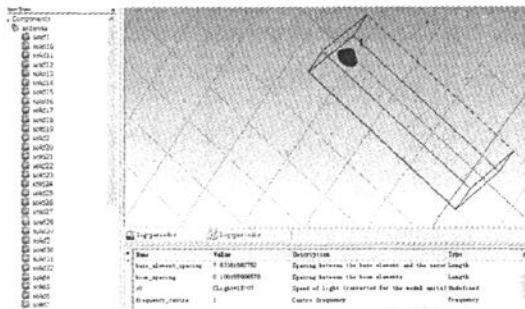


图2 对数周期天线模型

对数周期天线的辐射特性主要取决于  $\sigma$  和  $\tau$  两个参量, 根据实际工程所需要的对数周期天线, 为方便后续设计与优化, 将对数周期天线的主要参数  $\sigma$  和  $\tau$  均设为变量, 由于设计指标要求增益大于 25 dBi, 根据计

算,可将取值区间选为 $[0.85, 0.95]$ ,对应取值区间为 $[0.04, 0.09]$ ,可以在参数扫描设置中对 $\sigma$ 和 $\tau$ 同时进行扫描,比较结果选取最佳值;或者分别进行参扫,然后根据参数对考察的电特性曲线(比如 VSWR)的影响趋势向最佳值逼近。经过扫参以及变量的优化过程,最终选取 $[\tau, \sigma] = [0.924, 0.06]$ 。

## 2.2 仿真及实验结果

图 3 显示为入射、反射及传输波幅度随时间的变化。其中入射波幅度是  $i1$ ,端口的反射波幅度为  $o1,1$ 。从图 3 可知,端口的反射波幅度为  $o1,1$  幅度值比入射波幅度是  $i1$  小的多,说明反射很小,信号的衰减基本没有,能量能很好的向远处传播。

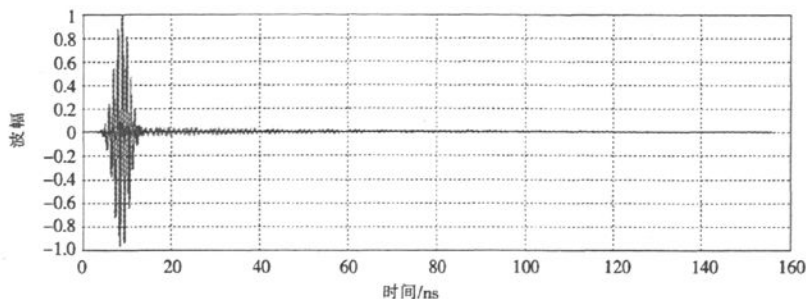


图 3 端口入、反射幅度值

图 4 为设计出的对数周期天线的三维远场图。其中设置频率观察点为中心频率 250 MHz,显示全空间的方向系数图。图 4 所示辐射的最大功率在正  $y$  方向上,天线的增益满足要求,增益大于 25 dBi。

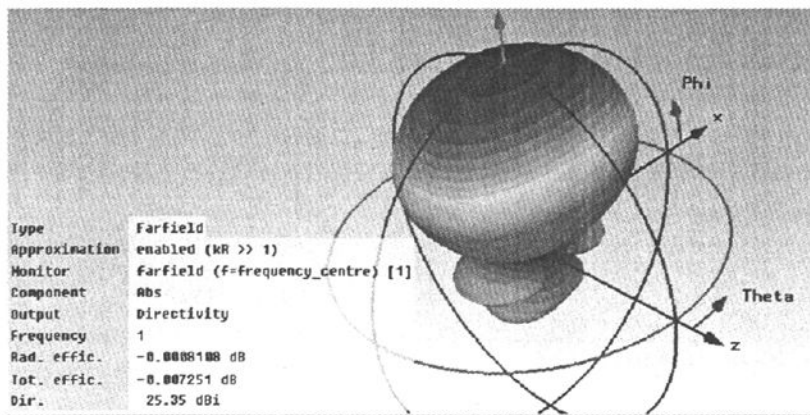


图 4 对数周期天线的三维远场图

图 5 为仿真天线 VSWR 图。从这些图中可以看出:设计的天线在 100~500 MHz 的频率范围内,驻波比小于 2,基本满足了设计要求,其驻波比变化趋势在全频带内基本一致。通过设计的天线加入接收机能够探测到电晕放电信号,设计满足要求。

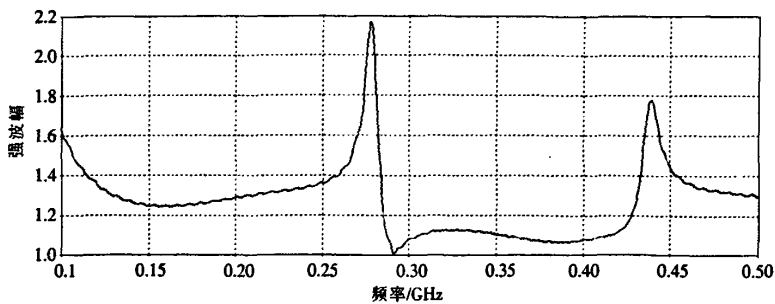


图5 仿真天线的 VSWR

### 3 结 语

经过最后测试,按此设计制作的天线达到了设计要求,为后续工作中可以此天线为单元进行对数周期天线阵设计提供了可靠的设计依据,具有一定的参考价值。最终设计出一个高增益的对数周期天线阵,为电晕放电探测系统天线部分研制提供了良好支持。

#### 参考文献:

- [1] 刘尚合. 静电理论与防护[M]. 北京:兵器工业出版社,1999.
- [2] 马汉炎. 天线技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2008.
- [3] 周朝栋. 线天线理论与工程[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1988.

(上接第 38 页)

耦合途径,阻止强电磁波进入设备件内部;另一方面,提高元器件和设备抗干扰和抗损坏能力。可以采取以下具体措施:天馈系统加固、屏蔽、接地和搭接处理、滤波等。

#### 4.3.3 元器件、PCB 层级防护

首先选择抗干扰强、能耐高压、大电流的元器件,在保证电路功能的前提下,尽量使用低功耗、低速芯片;其次,元器件在 PCB 上的布局合理,走线规范,注意消除地线和电源线的噪声,控制信号的环路面积,提高 PCB 板的抗干扰能力。

### 5 结 语

在可预见的未来,太阳风暴即将爆发,其对现代短波通信系统必将带来巨大破坏力和深刻影响,我们应该及早认识太阳风暴带来的危害,做好充分的防护准备,以便“太阳风暴”真正来临时能有针对性地采取相应措施,将其负面影响降到最低。

#### 参考文献:

- [1] THODE L E. Virtual-cathode microwave device research [J]. IEEE Transactions of Electromagnetic Compatibility, 1992(34): 2 521-2 530.
- [2] PROAKIS J G. Digital Communications[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [3] 李慧梅,唐彦峰,刘祥凯,等. 电磁脉冲武器对车辆装备的损伤效应研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(3): 31-34.
- [4] 周壁华,陈 彬,石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.
- [5] 司守训. 电磁脉冲防护技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2006.
- [6] 胡中藏. 现代短波通信[M]. 北京:国防工业出版社, 2003.

## 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>