

# 基于顶加载天线的近场电场测量系统的研究

杨斌 张卫东 崔翔 谷雪松

华北电力大学电气与电子工程学院, 保定, 071003

**摘要:** 为了解决近场电场的测量问题, 本文从理论上研究顶加载电小偶极子天线的特性, 对其构成的电场测量系统进行了分析。应用电磁场仿真计算软件分析了电小天线的阻抗特性和方向图, 并采用网络分析仪测量了电小天线的输入阻抗。通过研究设计运算放大器来实现天线与接收机的匹配, 提高了测量系统灵敏度。通过对平行板电容器板间电场的测量, 验证了本测试系统在近场测量应用中的有效性。

**关键词:** 近场; 电场强度; 顶加载; 电小偶极子; 天线

## The research of the measurement system based on the top loading – antenna electric field intensity in near field

Yang Bin Zhang Weidong Cui Xiang Gu Xuesong

(School of Electrical and Electronic Engineering,

North China Electric Power University, Baoding, Hebei, 071003, China)

**Abstract:** For measuring the electric-field intensity in near field, the Characteristics of the top loading—short dipole antenna is studied theoretically in this paper, and has carried on the analysis to the electric field measurement system. The antenna impedance characteristics and orientation map is analyzed with using the electromagnetic simulation software, and the electric-short antenna input impedance is measured with the help of network analyzer. Designing operational amplifier is studied for antenna-to-receiver match, and sensitivity of the measurement system is increased. The validity of the measurement of electric-field intensity in near field is detected by measuring the electric field of the parallel-plate capacitor.

**Keywords:** near field, electric-field intensity, top loading, electric-short dipole, antenna

## 1 引言

近几年来, 随着互联网技术的飞速发展, 上网的人数日益增加, 为了更好的解决用户终端能够方便的连接到最近的宽带网络连接设备的问题, 出现了低压高速电力线通信技术(PLC)<sup>[1]</sup>, 即利用380/220V的低压电缆, 传递速率1Mbit/s以上的数字信号的技术。这项技术使用户可以在房间内的任意电源插座上通过PLC调制解调器接入互联网, 使现有低压配电网得到充分利用。PLC网络使用的频率在短波频段范围内, 一般为1MHz-30MHz之间。而目前在这个频率范围内还没有空闲频率分配给PLC网络专用, 所以, PLC网络的电磁辐射特性成为PLC技术发展的一个关键问题。

目前在国际上该频段所采用的天线主要有电场和磁场两种测量天线<sup>[2]</sup>, 电场天线使用总长度为1m的鞭状天线, 磁场天线一般使用带静电屏蔽的直径为0.6m的环形天线。这两种天线均用于该频段远场测量, 如用于近场测量则会产生如下问题: 1) 该频段在近场内的电磁波不能看成平面波; 2) 鞭状天线作为金属体测量电场所带来的引入效应比较大, 收发天线的感应耦合和多次辐射耦合比较大, 对被测场的畸变比较严重; 3) 环形天线也有对引入效应的影响, 另外目前国际上大多数标准针对电场设定的, 在远场条件下, 磁场强度转化为电场强度的方法采用空气中的波阻抗377Ω作为转化系数, 而在近场条件下, 磁场与电场的关系并不能通过377Ω进行转化, 其转化关系还需要进一步研究。由于PLC网络的电磁辐射特性往往会在近场中

测量, 如何在近场测量成为本文研究的主要问题。

基于以上问题, 本文采用电场测量, 针对一种小天线测量系统进行了研究。

## 2 顶加载偶极子天线工作原理

考虑到在近场范围内测量尽可能减少引入效应带来的误差, 则应将天线尺寸变小, 本文所采用的是偶极子天线, 由两条铜线组成。另外为使天线上的电流分布大致均匀, 使天线的电流波腹点上移, 进而提高天线的有效高度, 在天线两端加载电容, 使天线的输入电抗减小, 做法为将两个圆铜板焊接在两偶极子天线两端, 天线参数如图 1 所示:

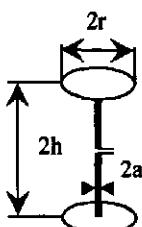


图 1 天线模型<sup>[3]</sup>

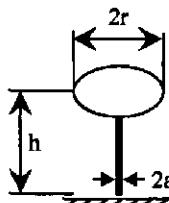


图 2 天线等效模型

该天线可等效成图 2 所示模型, 设铜板的对地电容为  $C_a$ , 则等效线段的长度  $h'$ <sup>[4]</sup> 为:

$$h' = \frac{1}{\alpha} \cot^{-1} \left( \frac{1}{Z_a \times \omega \times C_a} \right) \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为相位常数,  $\alpha = 2\pi/\lambda$ ;  $\omega$  为角频率,  $\omega = 2\pi f$ ;  $Z_a$  为垂直天线特性阻抗,

$$Z_a = 60 \ln \left( \frac{2h}{a} - 1 \right) .$$

理论分析天线的电阻很小, 可忽略不计, 而天线输入电抗  $X_A$  为:

$$X_A = Z_a \cot \left[ \alpha(h + h') \right] = Z_a \cot \left( \alpha h_0 \right) \quad (2)$$

式中  $h_0 = h + h'$  为加顶负载后天线的等效高度。

该处求得的天线电抗为原模型天线的一半。

天线的有效高度可由下式求得

$$h_e = \frac{2 \sin \left[ \alpha \left( h_0 - \frac{h}{2} \right) \right] \sin \frac{\alpha h}{2}}{\alpha \sin \left( \alpha h_0 \right)} \quad (3)$$

天线上感应的电压为

$$U(f) = h_e(f) E_i(f) \quad (4)$$

式中  $f$  为频率;  $h_e(f)$  为天线有效长度;  $E_i(f)$  为外部场强。

则接收天线所带负载上产生的电压为<sup>[5]</sup>

$$U_L(f) = \frac{h_e(f) E_i(f) Z_L(f)}{Z_A(f) + Z_L(f)} \quad (5)$$

式 (5) 表明天线两端的电压与外部场强之间存在转换关系, 可以通过测量天线两端的电压来得到外部场强。

在 PLC 系统 1-30MHz 近场范围内测量, 该天线几何尺寸远远小于波长, 可以认为其所测量的区域为均匀场, 从而可以保证测量的准确性。

## 3 输入阻抗及方向图

### 3.1 输入阻抗分析

该偶极子天线为电小天线, 主要表现为容性, 天线顶载铜板对地电容可按照平行板电容器求得

$$C_a = \frac{\epsilon S}{h} \quad (6)$$

式中  $\epsilon$  为介电常数;  $S$  为铜板面积;  $h$  为天线对地高度。

为比较天线的输入阻抗, 本文通过电磁场仿真计算软件进行了计算, 并采用网络分析仪对实际天线进行了测量, 以下为理论值、计算值与测量值如图 3 所示:

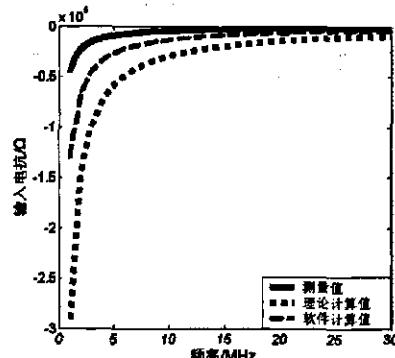


图 3 输入电抗比较

图中计算值与计算值有差别, 分析其原因为:

1、计算所得天线的有效长度为 0.0659m, 电小偶极子天线的有效长度可近似为  $h$ , 即 0.05m, 理论上天线的有效长度增加了 0.0159m。

2、天线理论计算时是把顶加载铜板看成是平行板电容器, 而实际上是有差别的。

3、本文采用的天线为手工焊接而成, 与理想天线有一定差别, 故使天线的输入阻抗在高频情况下有一定的影响, 另外天线实际测量时输出端由两根长为 3cm 的细导线与网络分析仪相连, 也会对测量产生一定的影响。

综上, 该天线主要表现出的是容性, 可近似把它看成是电容, 应用下述公式  $C = 1/2\pi X_A$  可推导出实际天线的等效电容值, 近似为 3.4pF。



图 4 天线方向图

### 3.2 天线方向图

顶加载使天线末端不再是电流波节, 而有一定电流, 图 4 为通过电磁场数值计算软件得出的天线方向图, 可以看出, 天线方向图和偶极子方向图相同。

### 4 频带宽度与提高灵敏度

无源天线的工作频带取决于天线结构及其电尺寸。对于电小天线, 由于其  $Q$  值很高, 阻抗的频率特性十分恶劣, 只能工作在很窄的频带内。如果将电小天线和有源电路相结合, 则可获得宽频带特性。这是因为电小天线的方向图几乎不随频率的变化而出现明显的改变, 其阻抗随频率的快速变化则可通过有源电路的变换作用使其带出阻抗在很宽的频率范围内保持稳定。只要放大器具有良好的宽频带特性, 与电小天线组合的有源天线就具有很宽的工作频带。

电小天线主要表现为容性电容  $C_a$ , 天线接入负载后等效电路如图 5 所示:

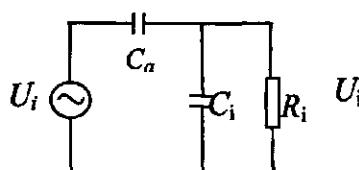


图 5 天线接负载后等效电路图<sup>[6]</sup>

其中  $C_i$  为电路输入端的等效电容,  $R_i$  为电路输入端的等效电阻。由等效电路可得:

$$(U_i - U_L)j\omega C_i = (j\omega C_i + \frac{1}{R_i})U_L \quad (6)$$

通过整理得:

$$U_L = \frac{\frac{C_a}{C_a + C_i}}{1 - j \frac{1}{(C_a + C_i)R_i\omega}} U_i \quad (7)$$

当  $(C_a + C_i)R_i\omega \gg 1$ , 即  $(C_a + C_i)R_i \gg \frac{1}{\omega}$  时,

$$U_L \approx \frac{C_a}{C_a + C_i} U_i = \frac{C_a}{C_a + C_i} \cdot h_a \cdot E_t = K \cdot E_t \quad (8)$$

式中  $K$  为转换系数, 可以看出, 当满足  $(C_a + C_i)R_i$  足够大, 即电路的时间常数越大, 系统的低频响应越好,  $(C_a + C_i)R_i$  决定该系统的低频响应范围。

本文采用 AD8047 和 AD8099 组建有源运算放大模块。运用 AD8047 搭建高输入阻抗电压跟随器, 然后接入 AD8099 进行信号放大, 最后接入接收机。其中 AD8047 所组成的前置电压跟随器采用了自举电路模式<sup>[7]</sup>, 可以实现很高的输入阻抗和低输出阻抗, 从而实现天线与运放的阻抗匹配; AD8099 是一款低失真, 低噪音, 宽带, 高速运算放大器, 通过在输出端接入 56 欧姆电阻, 实现与接收机间的阻抗匹配。图 6、7 分别为电路原理图和实际增益变化图。

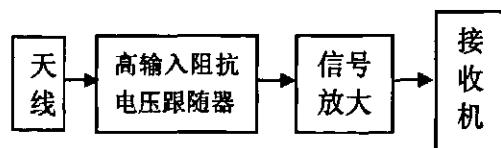


图 6 电路原理图

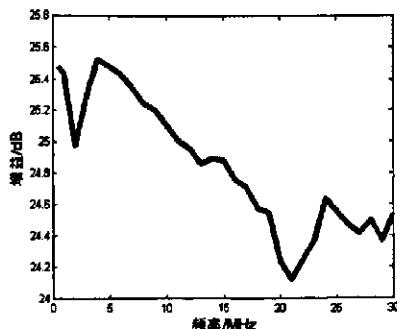


图 7 频率增益图

## 5 测量系统的实验

本文对平行板电容器进行测量,如图 8 所示,由两块 1m 见方的铝板构成,四角用绝缘材料支撑,两板之间的距离  $d$  为 0.396m。通过信号发生器在两个极板上施加一定强度和频率的信号,从而在两板之间产生一个均匀电场。将天线置于铝板中间,使天线中心与上下两板的距离相等,并将天线通过运放再接同轴电缆与接收机相连。

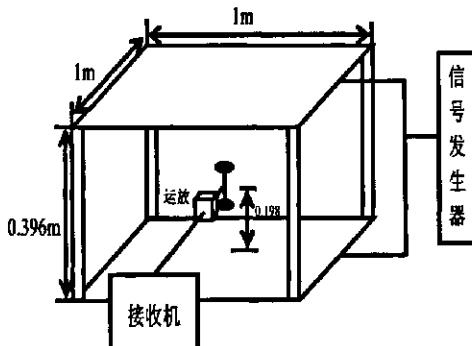


图 8 实验系统示意图

在 1~30MHz 频率范围内,两板之间施加一定强度的信号,并用示波器测量每个频点上两板之间的电压峰值  $U_b$ ,同时记录相应频点上接收机测得的天线的感应电压峰值  $U_m$ ,然后通过公式  $E=U_b/d$  估算出每个频点上两板之间的场强峰值,从而可以得到测量系统的幅频响应曲线如图 9 所示,从图中可以看出,在加入运放后,测量系统的灵敏度有明显的提升,即测得天线的感应电压明显提高。

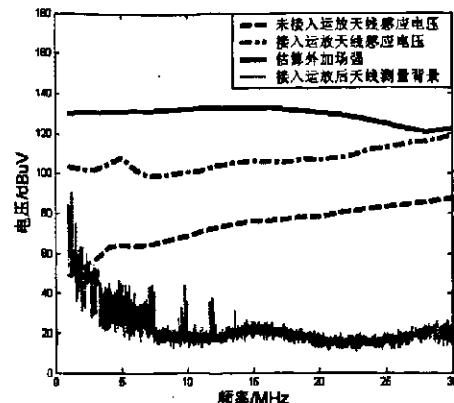


图 9 测量系统测量效果对比

测量系统的输入电阻为  $R_i=1.15\text{M}\Omega$ , 输入电容为  $C_i=11.5\text{pF}$ , 将输入电容及天线电容  $C_a$  带入公式 (8), 计算得到  $K$  的频率响应曲线与通过测量值按公式  $K=\frac{E_0}{U_m}$  增益 得到的  $K$  的频率响应曲线对比,如图 10 所示。从图中可以看出该系统的转换参数随频率还是有很大变化的,需进一步完善电路。

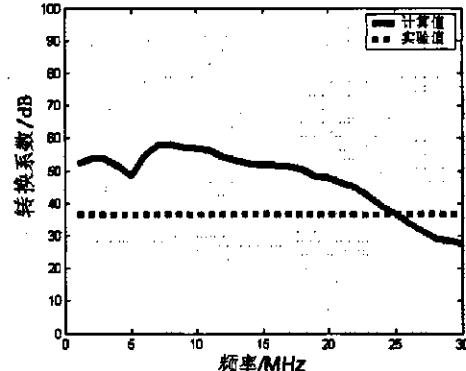


图 10 传输参数 K 试验值与理论计算值的对比

## 6 结论

本文在对顶加载电小偶极子天线特性进行分析的基础上,开发了基于顶加载电小偶极子天线的近场电场测量系统。通过加装前置运算放大器,实现天线与接收机的匹配,提高了测量系统灵敏度,通过对平行板电容器内电场强度的测量,验证了该系统的可行性。

## 参考文献

- [1] 赵丙镇.电力线高速通信技术的现状及发展.电力系统通信. 2003(1):12-16.
- [2] FCC PART 15 - RADIO FREQUENCY DEVICES
- [3] John D. Kraus, Ronald J. Marhefka 著. 天线. 电子工业出版社, 2004 年 Nov.4-7,2003 Hangzhou, China
- [4] 朱崇灿等编. 天线. 武汉大学出版社, 1996 年
- [5] Xie Yanzhao. Development of a small passive

- electro-optic EMP sensor. Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics CEEM'2003 Nov.4-7,2003 Hangzhou, China
- [6] 祝敏, 贺亦成, 郑振兴, 焦杰. 新型偶极电场探测器及对空间电场的测量. 传感器技术. 2000 年第 19 卷第 4 期
- [7] 周亦武, 孙威娜. 放大电路指南. 福州: 福建科学技术出版社, 2004

## 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>