

## 超高频天线传感器的优化设计

王建生<sup>1,2</sup>, 邱毓昌<sup>1</sup>, 孙晓滨<sup>2</sup>, 吴向华<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电气工程学院 陕西 西安 710049 2. 西安高压电器研究所 陕西 西安 710077)

**摘要** 描述了用于检测气体绝缘开关设备(GIS)中产生的局部放电的超高频天线传感器的结构, 分析了影响传感器灵敏度的结构参数, 并研究了为使传感器达到最佳灵敏度进行的优化设计。同时, 对传感器频率响应进行了实测。

**关键词** :传感器; 结构设计; 灵敏度; 频率响应

中图分类号: TN015 文献标识码: A 文章编号: 1000-9787(2000)02-0017-03

## Design optimization of UHF antenna sensors

WANG Jian-sheng<sup>1,2</sup>, QIU Yu-chang<sup>1</sup>, SUN Xiao-bin<sup>2</sup>, WU Xiang-hua<sup>2</sup>

(1. School of Elec. Engin. Xi'an Jiaotong University Xi'an 710049, China;  
2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Xi'an 710077, China)

**Abstract:** The construction of the ultra-high frequency (UHF) antenna sensors used to detect the partial discharges (PD) generated in gas-insulated switchgear (GIS) is described. The constructional parameters influencing the sensor sensitivity are also analyzed. The optimization of sensor design for obtaining the optimum sensitivity is performed. In addition, the measured results of the sensor frequency response are given.

**Key words**: sensor; construction design; sensitivity; frequency response

### 0 引言

目前, 在我国新建的 330 kVA 及 500 kVA 变电站, 绝大部分采用了气体绝缘开关设备(GIS)。

为确保 GIS 的运行可靠性, 各制造厂和用户一直在不断努力, 提出了各种方法来试图对 GIS 的各种性能进行评价。这也就是常说的在线监测。

从 GIS 故障来看, 绝缘故障始终是一个不可忽视的因素。由于 GIS 的制造工艺以及运输、现场装配等原因, 实际 GIS 中不可避免地存在绝缘缺陷, 这类缺陷在运行电压作用下会产生局部放电。从而加速绝缘的劣化, 诱发绝缘故障。因此, 绝缘监测主要是如何在现场进行局部放电(局放)的测量。由于局放信号很弱, 在现场测量还会受到干扰的影响, 因此, 传统的耦合电容法无法采用。近 10 年来, 国内外研究了一种称为超高频的方法来监测 GIS 中的局放, 收到了很好的效果<sup>[1]</sup>。

超高频法是基于这样一种原理: GIS 中产生的局部放电电流脉冲会在同轴系统中激发出超高频电磁波(主要是高次模波, 即 TE 和 TM 波), 通过预先装设在 GIS 中的天线传感器测量所接收到的电磁波来检测局部放电。由于不同的绝缘缺陷产生局放

所激发的电磁波的频谱不同, 因此, 用这种方法检测局放时具有抗干扰能力强, 能区分绝缘缺陷类型, 能对局放源进行定位等优点<sup>[2]</sup>。

综上所述, 用超高频法检测 GIS 中局部放电主要是用天线传感器接收电磁波来实现的, 因此, 该天线传感器就成为检测系统中的关键部件。本文对这类传感器的结构、灵敏度进行了分析, 并进行了为使传感器达到最佳灵敏度的优化设计。同时进行了频率响应的实测。

### 1 超高频天线传感器的结构

尽管在微波天线中有多种形式的天线, 它们均具有良好的灵敏度, 但由于 GIS 的同轴式结构, 内有很高的电压及几个大气压的 SF<sub>6</sub> 气体, 因此对安装在内部的传感器是有要求的。首先, 传感器的安装及结构不能影响 GIS 内部的电场分布; 另外, 一般安装传感器需在 GIS 同轴外壳上开设圆孔, 故此时较理想天线是圆板电极天线。

目前超高频天线传感器采用的型式, 如图 1 所示。

两种传感器均以圆板电极作为接收电磁波的天线, 其不同在于信号引出方式, 平板式传感器为直接

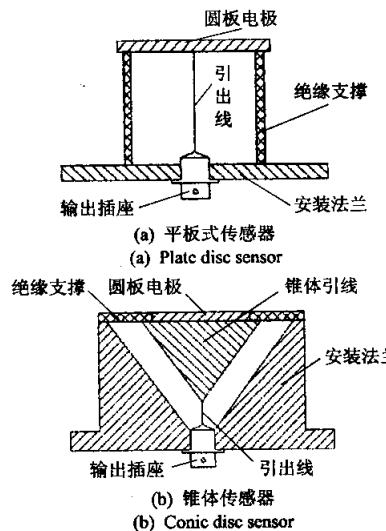


图 1 天线传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic configurations of antenna sensors

由导线引出,而锥形传感器则由阻抗与测量电缆波阻抗相等的锥体引出。其内介质均为 SF<sub>6</sub>。

最初将这类传感器用于 GIS 时,主要是测量 GIS 中隔离开关操作小电容电流引起的极快速瞬态过电压<sup>[3]</sup>。此时,由于过电压幅值高,而频率一般小于 100 MHz,故传感器实际上为电容分压器的低压臂,一般用聚丙烯膜作介质,其等值电容达几千 pF 而高压臂则是 GIS 内部高压导体与传感器电极之间的耦合电容。但用于局放测量时,由于局放信号本身很小,且又工作在超高频波段,此时传感器实际上是作为接收天线在工作,其等值电容在 30 pF 左右。

## 2 频率响应分析

图 2 表示实际装设在 GIS 母线中的两种传感器情况,图 3 为用来分析传感器频率响应的等值回路。

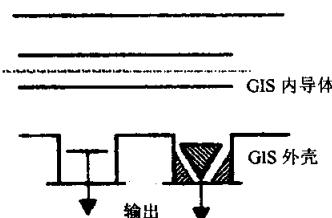


图 2 安装在 GIS 中的传感器示意图

Fig. 2 Sensor mounted in GIS

在超高频波段,传感器电极可表示为开路电压为  $U_0$  和阻抗为  $Z_a$ (近似为电容  $C_a$  和电阻  $R_a$  的串

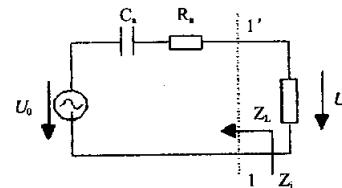


图 3 传感器等值回路

Fig. 3 Equivalent circuit of the sensor

联)的接收天线。

于是 其频率响应为<sup>[4]</sup>:

$$dB = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{Z_L}{|Z_L + Z_i|}$$

式中: $U_1$  为信号电压; $U_2$  为传感器输出电压; $Z_L$  为测量电缆阻抗(一般为 50 Ω); $Z_i$  为由传感器输出端看入的入口阻抗,对圆锥形传感器需考虑锥体本身及引出线的阻抗。

图 4 为两种传感器不同结构参数下的频率响应计算结果。

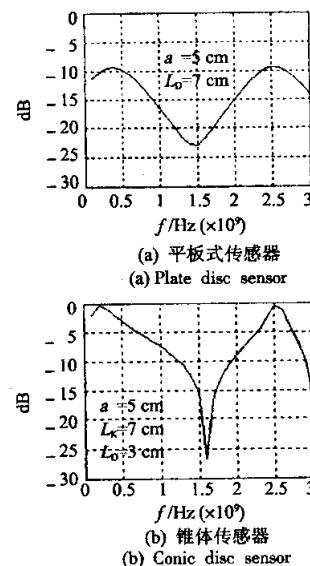


图 4 计算的传感器频率响应

Fig. 4 Calculated frequency response of the sensor

由图 4 计算结果可以看出:

(1) 被测信号频率对两种结构传感器的频率响应有很大影响,传感器的灵敏度在超高频波段中是非线性的,对某些频率特别“敏感”,而对某些频率响应很“迟钝”。对实验用的传感器尺寸,在 1.5 GHz 左右灵敏度最高;而在 0.35 GHz 及 2.5 GHz 左右灵敏度最低;

(2) 传感器结构也会对灵敏度产生影响,两种传感器相比,在大部分频率范围内,锥体传感器的灵敏度高于平板式传感器的灵敏度。尤其是最大灵敏度。

### 3 锥形传感器的优化设计

对实际测量, GIS 中绝缘缺陷产生的局部放电所激发的电磁波频谱一般在  $700\sim 1000$  MHz 范围内<sup>[5]</sup>,因此图 4 所示传感器的最佳灵敏度并未出现在该频率范围内,就是说未充分利用传感器的灵敏度。在用超高频法进行 GIS 局部放电测量中,最关键的就是如何提高灵敏度。在设计传感器时应充分考虑这一点。很容易想到的是,天线尺寸的改变对灵敏度有影响,这实际上就是天线的优化设计。

就锥形传感器来说,其尺寸参数有电极直径、锥体长度、引出线长度等。电极直径实际上受到安装孔直径的限制,又要考虑绝缘的要求,因此其变化范围不大。

实验结果表明,锥体长度  $L_k$  及引出线长度  $L_D$  的增加使出现最佳灵敏度的频率  $f_1$  降低。综合实际情况和实验结果,最后确定锥体传感器的特性尺寸为  $L_k = 12$  cm,  $L_D = 5$  cm,  $a = 6$  cm。

图 5 为上述尺寸时计算得到的锥体传感器的频率响应。此时,出现最佳灵敏度的频率  $f_1$  约为 950 MHz。

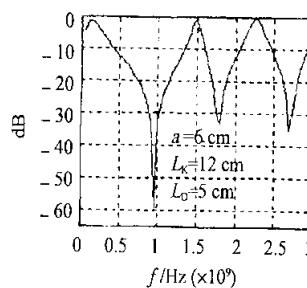


图 5 优化设计后锥体传感器的频率响应

Fig.5 Frequency response of the conic disc sensor after design optimization

### 4 传感器频率响应的测量结果

图 6 为测量传感器频率响应的实验装置。

同轴母线两端均以波阻抗等于母线波阻抗的锥形过渡至射频插座。传感器的安装模拟实际 GIS 母线。由输入端输入变频信号,用示波器测量传感器输出信号。图 7 为优化后锥形传感器的频率响应。可以看出,实验结果与理论计算基本吻合。

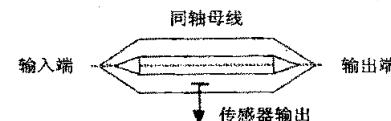


图 6 传感器频率响应测量布置示意图

Fig.6 Schematic arrangement for frequency response measurement of the sensors

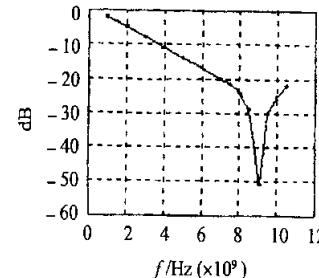


图 7 优化后锥体传感器的实测频率响应

Fig.7 Measured frequency response of the conic sensor after design optimization

### 5 结束语

(1) 介绍了用于 GIS 中局部放电测量用的超高频天线传感器的结构。

(2) 分析了传感器结构参数对传感器灵敏度的影响。

(3) 对锥形传感器进行了优化设计,使传感器的最佳灵敏度落在所测信号频率范围内。

(4) 对传感器的频率响应进行了实测。结果表明,实验结果与理论分析基本吻合。

### 参考文献:

- [1] 邱毓昌. 用超高频法对 GIS 绝缘进行在线监测[J]. 高压电器, 1997, 33(4): 36~39.
- [2] 王建生, 邱毓昌, 周新利. 超高频法在 GIS 局部放电检测中的抗干扰能力[J]. 高压电器, 1999, 35(1): 5~8.
- [3] 王建生. GIS 中隔离开关开合小电容电流时产生的VFTC[J]. 高压电器, 1992, 28(2): 22~25.
- [4] Kurrer R, Feser K, Krauß T. Antenna theory of flat sensors for partial discharge detection at ultra-high frequencies in GIS[C]. 9th ISH on High Voltage Engineering, 1995, paper 5615 Graz.
- [5] Pearson J S, Hampton B F, Sellars A G. A continuous UHF monitor for gas-insulated substations[J]. IEEE Trans on EI, 1991, 6(3): 469~478.

### 作者简介:

王建生(1962-) 浙江海盐人。1984 年毕业于西安交通大学高压专业, 西安高压电器研究所高级工程师, 一直从事高压试验和测量技术研究。现为西安交通大学博士生。

## 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>