

高保真度超高频局放检测天线研究

毛仲虎¹, 顾剑锋¹, 张陈旭¹, 王泽典¹, 段璐琦¹, 唐万春^{2,3}

(1.南京师范大学计算机与电子信息学院,江苏 南京 210023)

(2.南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

(3.南京师范大学江苏省三维打印装备与制造重点实验室,江苏 南京 210023)

[摘要] 设计了一款用于超高频局放检测的超宽带椭圆缝隙天线. 该天线具有时域保真度高、尺寸较小、馈电简单等特点. 测试结果表明,天线在 300~1 500 MHz 频段内的回波损耗低于 -10 dB,平均等效高度 15.7 mm,满足局放检测天线的指标要求. 通过 CST Microwave Studio 软件对其时域波形保真度进行仿真计算分析,对局放检测时天线的摆放方向提供参考. 结果表明,椭圆缝隙天线在一些角度上的保真度超过 0.9,能较好地还原局部放电波形,同时天线较小的尺寸也能更好地适应局部放电现场检测.

[关键词] 超宽带天线,局部放电检测,超高频,时域保真度

[中图分类号] TN822.8 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2024)01-0040-05

Research on High Fidelity Antenna for UHF Partial Discharge Detection

Mao Zhonghu¹, Gu Jianfeng¹, Zhang Chenxu¹, Wang Zedian¹, Duan Luqi¹, Tang Wanchun^{2,3}

(1.School of Computer and Electronic Information, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2.NARI School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(3.Jiangsu Key Laboratory of 3D Printing Equipment and Manufacturing, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: An ultra-wideband elliptical slot antenna for UHF partial discharge detection is proposed. The antenna has the characteristics of high time domain fidelity, small size and simple feeding. The test results show that the return loss of the antenna in the frequency band of 300~1500 MHz is lower than -10 dB, and the average equivalent height is 15.7 mm, which satisfies the index of the partial discharge detection antenna. The time domain waveform fidelity is simulated and analyzed by CST Microwave Studio software to provide reference for the placement of antenna in partial discharge detection. The research shows that the fidelities of the elliptical slot antenna at some angles exceed 0.9, which can better restore the partial discharge waveform, and the smaller size of the antenna can better adapt to partial discharge on-site detection.

Key words: Ultra-wide-band antenna, partial discharge detection, ultra-high frequency, time domain fidelity

局部放电是高压电气设备引发绝缘故障、发生事故的主要原因,因此局部放电检测是电气设备绝缘状态评估和故障预警的有效方法^[1-2]. 局部放电发生时,会向外辐射频率在 300 MHz 以上的超高频(UHF)电磁波,高于检测现场大部分电磁干扰信号的频率^[3]. UHF 检测法正是利用这一点,具有较强的抗干扰能力,成为目前的主流局部放电检测方法之一^[4].

天线负责获取局部放电产生的超高频信号,是 UHF 局放检测中至关重要的部分^[5]. 由于放电超高频信号的频段较宽,局放检测天线往往需具备超宽带特性. 平面螺旋天线是典型的非频变天线,具有极宽的阻抗带宽,被广泛应用于 UHF 局放检测^[6]. 但由于其不同频率下的有效辐射区域不同,会导致不同频率分量的延迟和滞后^[7],造成时域波形的展宽与拖尾,波形保真度较低,难以提取和还原局部放电波形,不利于局部放电的检测和识别. 此外,国内外学者也设计了众多形式的 UHF 局放检测天线,如单极子天线^[8]、Vivaldi 天线^[9]、Hilbert 天线^[10]、蝶形天线^[11]等,但都没有对天线的波形保真度进行分析.

因此,本文设计了一款用于 UHF 局放检测的高保真度超宽带椭圆缝隙天线. 天线的工作频率为 300~1 500 MHz,尺寸为 265 mm×250 mm×2 mm. 工作频段内的平均等效高度为 15.7 mm,具有良好的灵敏

收稿日期:2023-03-16.

通讯作者:唐万春,博士,教授,研究方向:RFID 天线技术、电磁环境、周期结构特性、局部放电信号检测, E-mail: eewctang@njnu.edu.cn

度. 通过 CST Microwave Studio 软件仿真得到天线在特定角度的保真度在 0.9 以上, 局放检测时将这些角度面向主要测量方向, 能够较好地还原放电波形.

1 时域波形保真度

在 UHF 局放检测系统中, 天线负责接收局放激发的 UHF 电磁波, 我们希望该接收信号尽可能地还原局放激发的电磁波信号. 在窄带系统中, 天线对正弦信号的幅频、相频响应相对固定, 因此只需对天线进行频域分析即可保证其波形保真度. 而在 UHF 局放检测这样的宽带系统中, 天线在高频与低频的相位延时、幅度响应有较大差异, 单独通过频域分析并不能准确反映天线对时域信号转换的保真程度^[12]. 因此, 对于 UHF 局放检测天线, 需要通过时域分析来反映其保真度.

1.1 保真度定义

为了对比不同天线的保真度高低, 需要对保真度进行量化^[13]. 以发射机馈入信号 $s_1(t)$ 为基准信号, 以天线外部某处的电场强度分量 $s_2(t)$ 为待分析信号. 那么天线在某方向辐射的信号保真度可以定义为该信号与基准信号的最大归一化互相关系数^[14], 表达式为

$$\rho = \max_{\tau} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} s_1(t) s_2(t + \tau) dt}{\sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} s_1^2(t) dt} \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} s_2^2(t + \tau) dt}} \right]. \quad (1)$$

其中, ρ 的变化范围为 0 到 1, 反应待分析时域信号与基准信号的相似程度, 值越大, 相似程度越高.

1.2 仿真方法

在 CST Microwave Studio 中建立天线模型, 利用软件中的电场探针功能, 可获取空间指定方位的时域场强信号, 即 $s_2(t)$. 仿真采用时域求解器, 激励信号 $s_1(t)$ 为 0.3~1.5 GHz 的高斯脉冲信号. 将两个时域信号代入式(1)即可计算保真度 ρ .

2 超宽带椭圆缝隙天线

2.1 结构

超宽带椭圆缝隙天线的结构如图 1 所示. 天线由共面波导馈电, 贴片与地板缝隙的形状均为椭圆. 介质基底材料为 2 mm 厚的 FR4, 相对介电常数 4.4, 长 $L=265$ mm, 宽 $W=250$ mm; 共面波导长 $L_1=25$ mm, 宽 $W_1=2.8$ mm, 缝隙宽度 $S=0.7$ mm; 两个椭圆的短轴和轴比分别为 $R_1=115$ mm、 $C_1=1.03$ 和 $R_2=70$ mm、 $C_2=1.1$.

2.2 天线性能

使用 CST Microwave Studio 软件对天线进行仿真. 结果表明, 天线在 0.3~1.5 GHz 的回波损耗 S_{11} 低于 -10 dB, 如图 2 所示. 实物测试的 S_{11} 基本满足要求, 仅在 0.45 GHz、1.35 GHz 附近略高于 -10 dB. 仿真与实测的误差可能由于椭圆圆弧加工精度不足以及 SMA 同轴连接器的焊接误差导致.

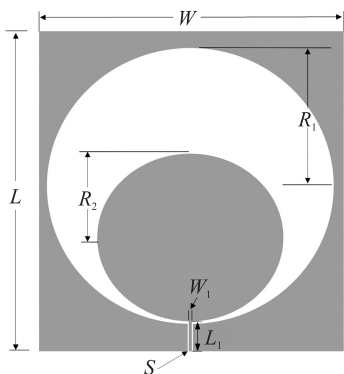


图 1 椭圆缝隙天线模型

Fig. 1 Model of the elliptical slot antenna

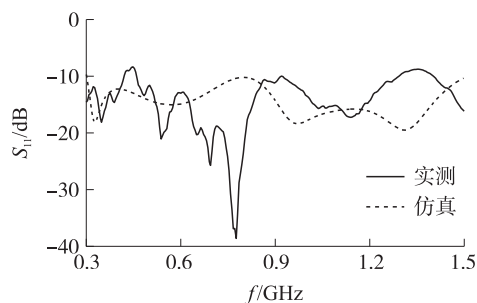


图 2 椭圆缝隙天线 S_{11}

Fig. 2 S_{11} of the elliptical slot antenna

图 3 为天线 0.5,0.8,1.1,1.5 GHz 的 E 面(垂直于椭圆平面)方向图。低频段的仿真与实测结果比较吻合,高频段误差稍大,原因可能是测试时使用的固定夹具遮挡了一部分共面波导结构所造成。0.5,0.8,1.2,1.5 GHz 共 4 个频率处的最大增益(G)分别为 4.55,4.01,-0.46,-2.18 dB,随着频率增加,最大增益减小。

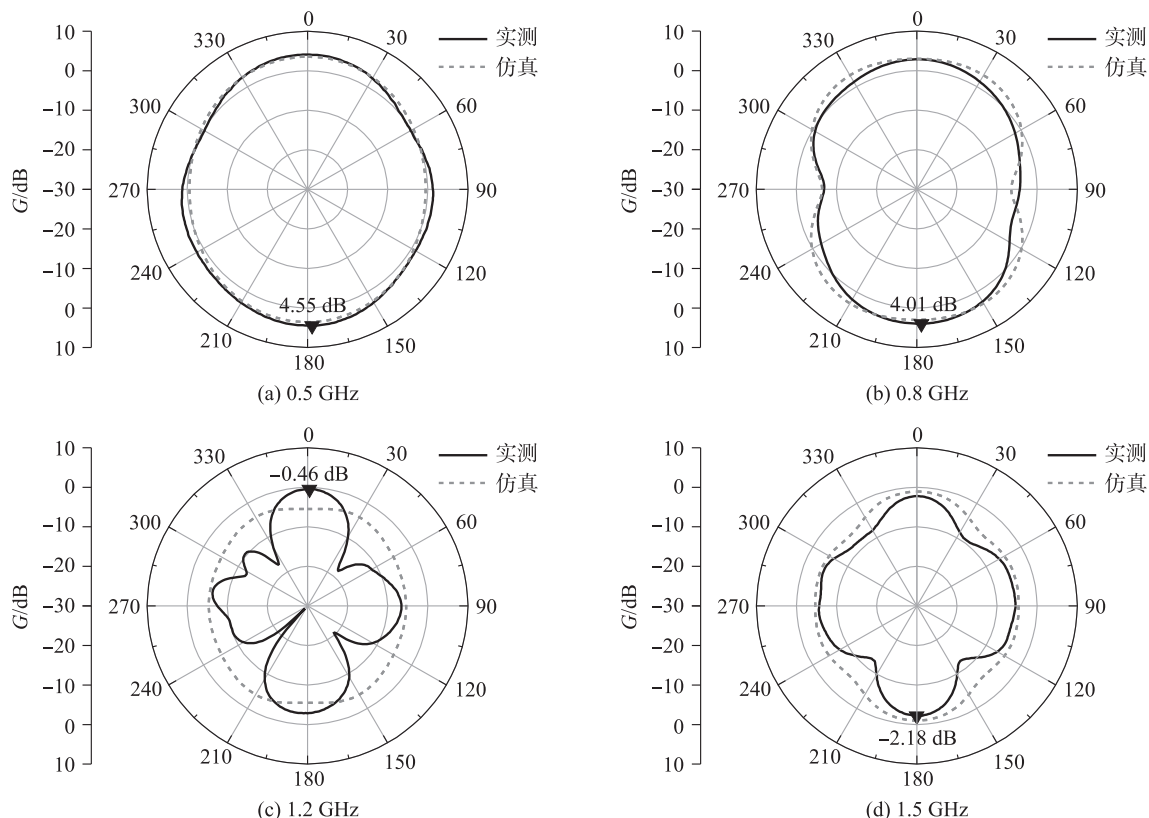


图 3 椭圆缝隙天线 E 面方向图

Fig. 3 E -plane radiation pattern of the elliptical slot antenna

电力系统中,通常使用 GTEM 小室对局放检测天线进行灵敏度标定^[15]。图 4 为 GTEM 小室标定得到的等效高度曲线。在 300~1 500 MHz 内,天线的平均等效高度为 15.7 mm,大于 3 mm 的频率占比为 98.8%,灵敏度良好^[16]。

3 天线保真度分析

3.1 保真度计算

如图 5 所示,当 φ 分别为 0° 和 90° 时,在椭圆缝隙天线上设置远场电场探针,抓取远场辐射电场波形,计算天线多角度的保真度。探针分布在 $\theta = -75^\circ, -60^\circ, \dots, 75^\circ$,方向为垂直极化(主极化)方向^[17]。

将 $\varphi = 90^\circ, \theta = 15^\circ$ 处(P 处)的时域场强与激励高斯脉冲作归一化波形对比,如图 6 所示。二者相似度很高,场强波形仅有微弱拖尾,无展宽现象。这意味着在该方向上,天线有着较高的保真度,有利于在局放检测中准确还原放电波形,获取放电信息。经计算, P 处的保真度 $\rho = 0.984$ 。

按照式(1)计算天线在上述所有探针所示角度上的保真度,如图 7 所示。由于天线关于 YOZ 平面对称,所以 $\varphi = 0^\circ$ 的保真度曲线关于 $\theta = 0^\circ$ 对称。而在 $\varphi = 90^\circ$ 方向上保真度的变化较大且与 $\varphi = 0^\circ$ 不一致,这是由于天线在 H 面的辐射是非全向的,在图示 $\varphi = 90^\circ, \theta = -30^\circ$ 附近的馈电方向上天线辐射较弱,因此保真度较其他位置低。选取的 21 个角度上,有 8 处的保真度大于 0.9,最大值为 0.984,说明天线具备较高的时域波形保真度。

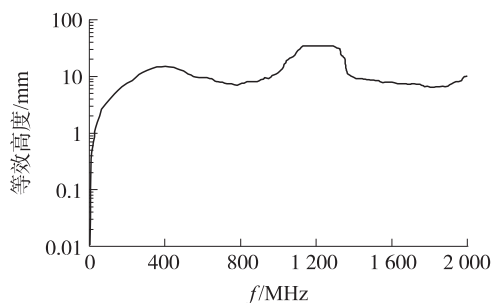


图 4 椭圆缝隙天线的等效高度

Fig. 4 Effective height of the elliptical slot antenna



图5 电场探针的位置

Fig. 5 Position of electric field probes

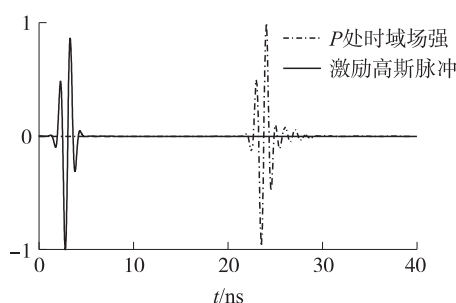


图6 归一化波形对比

Fig. 6 Comparison of normalized waveforms

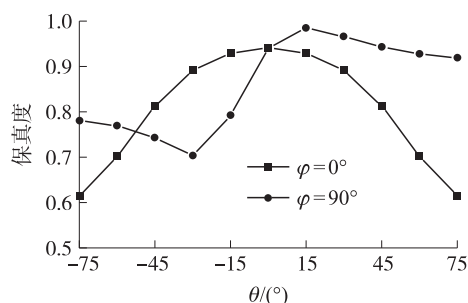


图7 各角度保真度

Fig. 7 Fidelity from different angles

3.2 天线摆放角度参考

由图7可以看出,在 $\varphi=0^\circ, -15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ 以及 $\varphi=90^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ 范围内,保真度大于0.9. 因此可以推出,在使用椭圆缝隙天线作为UHF局放检测天线时,将天线YOZ平面内 $0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ 的角度范围面向可能的局放源,能够获得最佳的放电波形还原效果,如图8所示.

4 结论

本文设计了一款用于UHF局放检测的高保真度椭圆缝隙天线,工作频率为300~1 500 MHz,并创新性地通过分析天线各方向的保真度对局放检测天线的摆放角度提供参考,以获得最佳的放电波形还原效果,为局放检测工程应用提供了便利. 具体结论如下:

(1)天线的实物测试结果表明:工作频段内的回波损耗基本低于-10 dB,0.5 GHz、0.8 GHz、1.2 GHz、1.5 GHz共4个频率处的最大增益分别为4.55 dB、4.01 dB、-0.46 dB、-2.18 dB. 平均等效高度15.7 mm,灵敏度较高.

(2)通过软件仿真计算了天线正上方各角度主极化方向的时域波形保真度. 结果表明,天线具有高保真度:最大值为0.984,且在 $\varphi=0^\circ, -15^\circ \leq \theta \leq 15^\circ$ 以 θ 及 $\varphi=90^\circ, 0^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$ 范围内高于0.9.

(3)通过保真度分析,为UHF局放检测时天线的最佳摆放角度提供了参考. 将保真度大于0.9的角度范围面向可能的局放源,可获得最佳的放电波形还原效果.

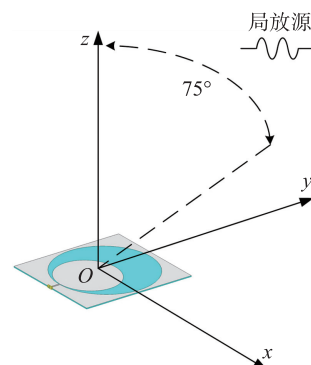


图8 天线局放检测时的最佳摆放角度

Fig. 8 The recommended antenna placement angle for PD detection

[参考文献](References)

- [1] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.
- [2] 郭俊,吴广宁,张血琴. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报,2005(2):29-35.
- [3] XAVIER G,COSTA E,SERRES A,et al. Design and application of a circular printed monopole antenna in partial discharge detection[J]. IEEE Sensors Journal,2019,19(10):3718-3725.

- [4] LI J H,ZHANG X R,HAN X T,et al. A partial discharge detection method for SF₆ insulated inverted current transformers adopting inner shield case as UHF sensor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(6):3237-3239.
- [5] 汲胜昌,王圆圆,李军浩,等. GIS 局部放电检测用特高频天线研究现状及发展[J]. 高压电器,2015,51(4):163-172,177.
- [6] 刘成,赵玉顺,罗义华,等. 局部放电检测用小型化宽带平面螺旋天线研究[J]. 南方电网技术,2020,14(9):37-44.
- [7] 范琪凯. 超宽带天线的研究和仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
- [8] YADAM Y R,RAMANUJAM S,ARUNACHALAM K. An ultrawideband conical monopole with radome for detection of partial discharges[J]. IEEE Sensors Journal,2021,21(17):18764-18772.
- [9] 周文俊,刘宇舜,李鹏飞,等. 基于特高频法检测电气设备局部放电的改进 Vivaldi 天线[J]. 电工技术学报,2017,32(12):259-267.
- [10] YOUNG J L. On the exact mutual reactance of a line source array:a hilbert transform methodology[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2019,67(3):1681-1687.
- [11] 贺俊铤,李相强,张健穹,等. 应用于局放检测的宽带小型化蝶形天线设计[J]. 电子元件与材料,2022,41(5):520-525.
- [12] 王伟. 超宽带天线及其阵列的分析与设计[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [13] ALLEN O E,HILL D A. Time-domain antenna characterizations[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,1993,35(3):339-346.
- [14] LAMENDS D,SUSMAN L. Baseband-pulse-antenna techniques[J]. IEEE Antennas Propagation Magazine,1994,36:20-30.
- [15] JUDD M D,FARISH O. A pulsed GTEM system for UHF sensor calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,1998,47(4):875-880.
- [16] JUDD M D,LI Y,HUNTER I B B. Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part 2:field experience[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2005,21(3):5-13.
- [17] ROY J E,SHAFI L. Generalization of the Ludwig-3 definition for linear copolarization and cross polarization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2001,49(6):1006-1010.

[责任编辑:陈 庆]