

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407578

# 微带天线设计及在局部放电检测中的应用\*

黄云志 王 蕾 韩 亮

(合肥工业大学电气与自动化工程学院 合肥 230009)

**摘 要:**电气设备的局部放电既是绝缘劣化的主要因素,又是有效表征绝缘缺陷的重要参量。对局部放电进行准确检测,可以及时发现危及设备安全的潜在故障。特高频检测具有实时性好、抗干扰强的优势,在放电检测中应用广泛,但现有微带天线传感器受结构尺寸限制,工作带宽难以提高。本文采用部分地板板技术结合斜切式曲流技术改善结构,综合考虑天线尺寸与工作带宽的非线性关系优化尺寸,在保持天线面积不变的前提下扩展工作带宽,并以聚酰亚胺为基底研制了新型微带天线传感器。针对尺寸优化过程中存在的单尺寸参数调整导致天线性能不稳定的问题,提出利用径向基(RBF)神经网络建立多尺寸与工作带宽之间的关系模型,运用改进白鲸优化(IBWO)算法优化天线尺寸。仿真结果表明新型柔性微带天线尺寸缩小了59.59%;工作带宽由0.598~0.6 GHz增加到0.3~3 GHz,完全满足局部放电检测的应用需求。通过模拟局部放电检测试验,并与阿基米德螺旋天线、立体螺旋天线进行比较测试,结果显示新型柔性微带天线具有更高效的检测性能。

**关键词:**局部放电检测;新型柔性微带天线;斜切式曲流技术;径向基神经网络;改进白鲸优化算法

**中图分类号:** TN822

**文献标识码:** A

**国家标准学科分类代码:** 510.8060

## Design of microstrip antenna and its application in partial discharge detection

Huang Yunzhi Wang Lei Han Liang

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Partial discharge of electrical equipment is not only the main factor of insulation deterioration, but also an important parameter to effectively characterize insulation defects. The accurate detection of partial discharge can detect the potential faults that endanger the safety of equipment in time. UHF detection has the advantages of good real-time performance and strong anti-interference, and is widely used in discharge detection. However, the existing microstrip antenna sensor is limited by the structure size, and the working bandwidth is difficult to increase. In this paper, a new flexible microstrip antenna sensor based on polyimide is developed. The partial flooring technology combined with the beveled meandering technology is used to improve the structure. The nonlinear relationship between antenna size and working bandwidth is considered to optimize the size. The working bandwidth is expanded while keeping the antenna area unchanged. In order to solve the problem that the antenna performance is unstable due to the adjustment of single size parameters in the process of size optimization, a relationship model between multi-size and working bandwidth is proposed by using radial basis function (RBF) neural network, and an improved beluga whale optimization (IBWO) algorithm is used to optimize antenna size. The simulation results show that the size of the new flexible microstrip antenna is reduced by 59.59%. The operating bandwidth is increased from 0.598~0.6 GHz to 0.3~3 GHz, which fully covers the design requirements of partial discharge detection. By simulating partial discharge test and comparing with Archimedean spiral antenna and three-dimensional spiral antenna, the results show that the new flexible microstrip antenna has more reliable detection performance.

**Keywords:** partial discharge detection; new flexible microstrip antenna; beveled meandering technology; radial basis function neural network; improved beluga whale optimization algorithm

0 引 言

电气设备作为电力系统的基石,其安全稳定运行至关重要。在实际运行中,电气设备常因绝缘介质存在缺陷、杂质或长时间运行导致绝缘损坏、老化等因素引发局部放电,进而导致电气设备故障,影响电力系统运行,因此对局部放电信号进行检测十分重要<sup>[1-3]</sup>。局部放电过程中会伴随着脉冲电流、超声波、电磁波和气体等物理现象,因此相应的放电检测方法有脉冲电流检测法、超声波检测法、特高频检测法和气体检测法等<sup>[4-7]</sup>,其中基于天线的特高频检测法具有实时性好,抗干扰能力强的优势。微带天线是一种平面结构天线,具有结构简单、体积小、重量轻等优势<sup>[8-10]</sup>,它能够检测频率在其工作带宽内电磁信号。但其工作带宽较窄,难以捕捉到放电信号,而通过增加天线尺寸来扩展工作带宽的方式会牺牲体积小的优势,不利于现场安装<sup>[11]</sup>。为了能够准确捕捉到放电信号,同时不受安装空间限制,设计一种既能满足小尺寸结构又具备宽带宽性能的柔性微带天线具有重要意义。

为此,研究者们做了诸多贡献。George 等<sup>[12-13]</sup>分别采用截断、开槽接地板技术设计了两种圆形微带天线,实现了 0.3~1.5 GHz 的工作带宽,但天线尺寸均大于 30×30×1.52 cm<sup>3</sup>;Du 等<sup>[14]</sup>利用空心圆形分形技术设计微带天线,尺寸为 150×180×1.6 mm<sup>3</sup>,但工作带宽仅 0.5~1.06 GHz;Salah 等<sup>[15]</sup>基于希尔伯特分形技术设计微带天线,工作带宽扩展到 0.36~1.03 GHz,1.5~1.9 GHz,2.3~2.75 GHz 3 个频带范围,但天线面积达 1 m<sup>2</sup>;Zhang 等<sup>[16]</sup>通过曲流技术设计单极微带天线,尺寸为 142×195×0.28 mm<sup>3</sup>,但工作带宽呈现多频窄带 0.57~0.83 GHz、1.38~1.8 GHz 和 2.2~2.76 GHz。以上设计扩展带宽的同时增大了尺寸,在扩展微带天线的工作带宽过程中,均依赖于单一尺寸参数调整法,导致检测性能不稳定,同时无法兼顾小尺寸和宽带宽性能。

因此,本文综合考虑结构尺寸参数与工作带宽之间的关系,设计一种新型柔性微带天线。首先基于部分接地板技术和斜切式曲流技术优化天线结构;然后基于径向基(radial basis function, RBF)神经网络建立天线的多个尺寸参数与工作带宽之间的数学关系模型;最后运用改进白鲸优化(improved beluga whale optimization, IBWO)算法以最大工作带宽为目标对尺寸参数进行优化,设计出一种兼顾小尺寸结构和宽带宽性能的新型柔性微带天线。最后通过放电检测试验验证了其在局部放电检测中的可靠性与高效性。

1 柔性微带天线的结构设计

柔性微带天线采用多层结构,包含辐射贴片、介质基板和接地板,如图 1 所示。为了贴合电气设备的表面,本文选用聚酰亚胺(PI)材料作为介质基层材料,介电常数为 3.5,厚度  $h$  为 0.3 mm。该介质基层材料具有良好的电气绝缘性、较高的击穿场强和延展性,可提高柔性微带天线在应用中的灵活性和稳定性。此时,根据所选择的介质基层材料的参数,柔性微带天线传统结构的尺寸参数值可由文献[17]计算得到,如表 1 所示。

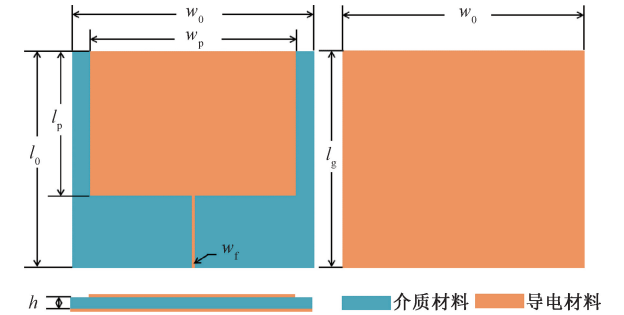


图 1 柔性微带天线结构三视图

Fig. 1 Three views of the structure of a flexible microstrip antenna

表 1 柔性微带天线的尺寸参数表

Table 1 Size parameters of flexible microstrip antenna

| 参数    | 大小      | 参数    | 大小     |
|-------|---------|-------|--------|
| $w_p$ | 166 mm  | $w_0$ | 220 mm |
| $l_p$ | 132 mm  | $l_0$ | 187 mm |
| $w_f$ | 0.63 mm | $l_g$ | 187 mm |

利用电磁仿真软件(HFSS)对传统柔性微带天线进行建模并仿真,结果显示传统结构下的柔性微带天线工作带宽仅分布在 0.598~0.6 GHz,完全不能应用于局部放电信号的检测。因此,本文首先对传统柔性微带天线结构进行设计,采用部分接地板技术改善其窄带特性,然后在辐射贴片表面引入斜切式曲流技术,保持天线面积不变的前提下扩展其工作带宽。改进后的结构如图 2 所示。

柔性微带天线由于其结构特征导致自身辐射损耗较高而呈现窄带特性,而部分接地板技术可降低它的辐射损耗,进而改善其窄带特性。仿真不同接地板长度对带宽的影响,结果显示当接地板长度  $l_g$  为 52 mm 时,天线窄带特性明显改善,带宽扩展到 0.46~0.88 GHz 和 1.79~2.34 GHz 两个频段。

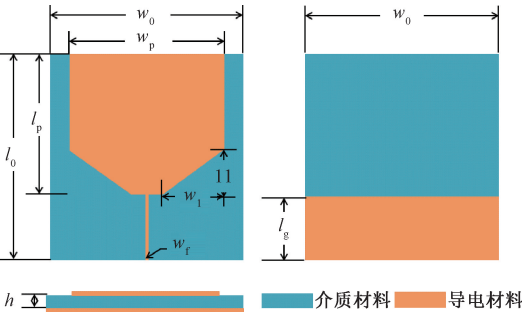


图 2 新型柔性微带天线的结构三视图

Fig. 2 Three views of the structure of a new flexible microstrip antenna

斜切式曲流技术即在辐射贴片的下左和右下角进行斜切操作,曲流形状为直角三角形,相较于传统的矩形式、梯形式曲流形状,切割直角三角形后的斜边更利于工作带宽的扩展。该技术首先通过改变电流路径走向,引入额外的谐振点;其次,在该位置进行斜切可使辐射贴片的下边缘到馈线间的距离逐渐增加,提高柔性微带天线的阻抗匹配,进而实现各谐振点之间的平滑过渡,在不增加天线面积的同时,工作带宽扩展至 0.3~0.957 GHz、1.345~2.158 GHz 和 2.227~2.614 GHz 3 个频段范围。

2 柔性微带天线的多尺寸参数优化

根据柔性微带天线的结构设计,辐射贴片尺寸和曲流尺寸是影响工作带宽的关键因素。在优化天线尺寸过程中,现有方法均采用单一变量控制法,这忽略了它们之间的相互影响,进而难以实现小尺寸结构和宽带宽性能的平衡,导致天线性能不稳定。因此,本文采用多尺寸参数优化的方法,首先利用 RBF 神经网络建立柔性微带天线的多个尺寸参数与工作带宽之间的关系模型,然后采用 IBWO 进行全局寻优,以最大工作带宽为目标优化天线尺寸。

2.1 基于 RBF 神经网络的关系模型

RBF 神经网络<sup>[18]</sup>是一种前馈神经网络,具有结构简单、训练速度快、非线性逼近能力强的优势。其网络结构包括输入层、隐含层和输出层,如图 3 所示。

在训练过程中,输入层接收训练样本  $x$ ,隐含层实现  $x$  到  $R_i(x)$  的非线性映射,输出层实现  $R_i(x)$  到  $y$  的线性映射,其中隐含层的输出如式(1)所示。

$$R_i(x) = \exp\left(-\frac{\|x - C_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right) \tag{1}$$

式中: $i=1,2,\cdots,n$ ;  $n$  为隐含层节点数;  $C_i$  为中心向量;  $\sigma_i$  为半径宽度。

输出层的输出如式(2)所示。

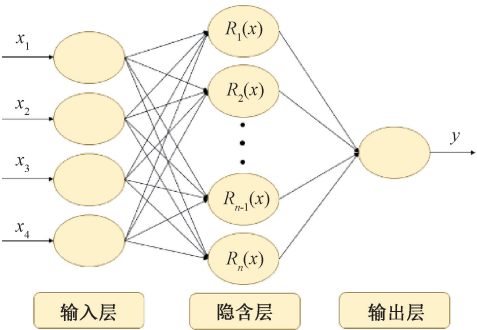


图 3 RBF 神经网络结构

Fig. 3 Structure of RBF neural network

$$y = \sum_{i=1}^n w R_i(x) \tag{2}$$

式中:  $w$  为隐含层与输出层间的连接权值。

为了评估模型的拟合效果,本文采用均方根误差 ( $RMSE$ ) 和相关系数的平方 ( $R^2$ ) 进行分析,  $RMSE$  值越小,拟合程度越好;  $R^2$  越接近 1,拟合精度越高。其中,  $RMSE$  的计算如式(3)所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \tag{3}$$

式中:  $y_i$  是真实值,  $\hat{y}_i$  是预测值。

考虑到工作带宽是频率范围,绝对工作带宽  $\Delta f$  是频率差值,为了更清晰地观察工作带宽的变化情况,本文以 4 个尺寸参数  $l_p, w_p, l_1, w_1$  为输入,以  $\Delta f$  为输出,以  $RMSE$  为适应度函数,运用 RBF 神经网络建立尺寸参数与工作带宽之间的数学关系模型,并与反向传播 (back propagation, BP) 神经网络、基于麻雀搜索算法 (sparrow search algorithm, SSA) 优化的 BP 神经网络这两种拟合方式进行比较,结果如表 2 所示。基于 RBF 神经网络的拟合结果显示  $RMSE$  为 0.062,明显小于另外两种拟合方式,且  $R^2$  更接近理想值 1。这表明基于 RBF 神经网络建立的关系模型精确度更高,更能反应天线尺寸参数与工作带宽之间的关系。

表 2 几种非线性关系拟合方法的比较

Table 2 Comparison of several nonlinear model-building methods

| 拟合方法   | $RMSE$ | $R^2$ |
|--------|--------|-------|
| BP     | 0.119  | 0.894 |
| SSA-BP | 0.092  | 0.924 |
| RBF    | 0.062  | 0.972 |

2.2 基于 IBWO 的多尺寸参数优化

IBWO 是一种元启发式算法,具备强大的全局搜索能力,特别适合处理具有多个峰值的寻优问题<sup>[19]</sup>。

该算法以 4 个尺寸参数 $[l_p, w_p, l_1, w_1]$ 为搜索个体,以最大工作带宽为目标,对柔性微带天线的尺寸进行全局寻优。在寻优过程中,通常适应度函数与目标函数呈反比关系,即目标函数值越大,相应的适应度值就越低。遵循这一原则,设计适应度函数如式(4)所示。

$$fitness = - \frac{\Delta f}{\Delta f_{\max}}$$

(4)

式中: $\Delta f \leq \Delta f_{\max}$ ,  $\Delta f_{\max} = 2.7 \text{ GHz}$ ,即频率在 0.3~3 GHz 范围内的最大差值。

寻优结果显示,当  $l_p = 80 \text{ mm}$ 、 $w_p = 72 \text{ mm}$ 、 $l_1 = 18 \text{ mm}$ 、 $w_1 = 21 \text{ mm}$  时,  $fitness$  最小,  $\Delta f$  最大,即工作带宽最大。此时,经 IBWO 寻优后的新型柔性微带天线尺寸参数如表 3 所示,相应的  $S$  参数如图 4 所示。

表 3 新型柔性微带天线的尺寸参数表

Table 3 Size parameters of new flexible microstrip antennas

| 参数    | 大小      | 参数    | 大小     |
|-------|---------|-------|--------|
| $w_p$ | 72 mm   | $w_0$ | 125 mm |
| $l_p$ | 80 mm   | $l_0$ | 133 mm |
| $w_f$ | 0.63 mm | $l_g$ | 52 mm  |
| $l_1$ | 18 mm   | $w_1$ | 21 mm  |

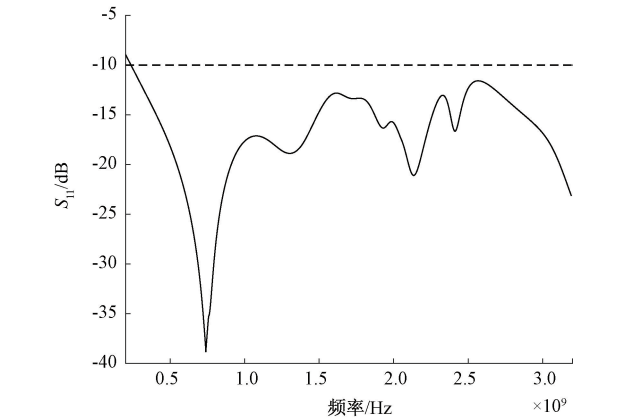


图 4 新型柔性微带天线的  $S$  参数图

Fig. 4  $S$ -parameter diagram of the new flexible microstrip antenna

由表 3 和图 4 可知,优化后的新型柔性微带天线尺寸缩减至  $133 \times 125 \times 0.3 \text{ mm}^3$ ,相对于传统结构尺寸减小了 59.59%;工作带宽扩展到局部放电检测所需的 0.3~3.0 GHz 的频带范围,完全满足局部放电检测的应用需求。将其与现有的微带天线进行比较,如表 4 所示。通过比较可知,本文采用多尺寸参数优化方法所设计的新

表 4 本文设计的微带天线与其他微带天线的比较

Table 4 Comparison of the microstrip antenna designed in this paper with other microstrip antennas

| 序号 | 天线尺寸                                      | 工作带宽/GHz                    | 介质基层 | 文献   |
|----|-------------------------------------------|-----------------------------|------|------|
| 1  | $122 \times 57 \times 4.3 \text{ mm}^3$   | 0.34~1.75                   | 刚性   | [11] |
| 2  | $300 \times 300 \times 1.52 \text{ mm}^3$ | 0.3~1.5                     | 刚性   | [12] |
| 3  | $150 \times 180 \times 1.6 \text{ mm}^3$  | 0.5~1.06                    | 刚性   | [14] |
| 4  | $142 \times 195 \times 0.28 \text{ mm}^3$ | 0.57~0.83、1.38~1.8、2.2~2.76 | 柔性   | [16] |
| 5  | $133 \times 125 \times 0.3 \text{ mm}^3$  | 0.3~3                       | 柔性   | 本文   |

3 柔性微带天线性能试验

根据新型柔性微带天线的尺寸参数值,以柔性 PI 材料作为介质基板,金属铜作为导电材料进行加工,实物如图 5 所示。为了测试该新型柔性微带天线的带宽性能及其对放电信号的检测性能,主要进行两部分的试验:1) 带宽试验;2) 局部放电检测试验。

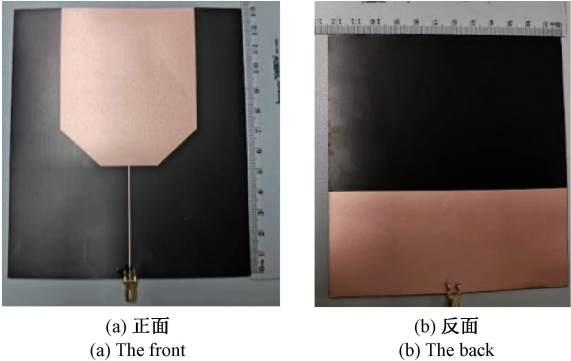


图 5 新型柔性微带天线实物正、反面

Fig. 5 The front and back of the new flexible microstrip antenna

3.1 带宽试验

为了测试新型柔性微带天线在实际应用中的带宽性能,本文分别测量其在不弯曲(弯曲半径  $R=0 \text{ mm}$ )、弯曲半径分别为 100、500 mm(气体绝缘开关设备 GIS 腔体外壳半径一般在 150~500 mm<sup>[20]</sup>) 时的  $S$  参数,如图 6 所示。实际测试显示,不弯曲状态下该天线的工作带宽为 0.293~3 GHz;横向(沿天线长度方向)弯曲半径为 100 mm 时,工作带宽为 0.328~3 GHz,横向弯曲半径为 500 mm 时,工作带宽为 0.302~3 GHz;纵向(沿天线宽度方向)弯曲半径为 100 mm,工作带宽为 0.337~3 GHz,纵向弯曲半径为 500 mm 时,工作带宽为 0.245~3 GHz。仿真与实测显示,不弯曲时天线的工作带宽在低截止频率处有细微误差,这主要受天线加工和焊接工艺精度的影响,以及测试环境中不可避免的金属导体干扰,但仍然覆盖 0.3~3 GHz。此外,即便经过不同程度弯曲,该天线的工作带宽仅存在轻微波动,这主要受形变和贴附介质的影响,但总体上带宽性能未受到显著影响。

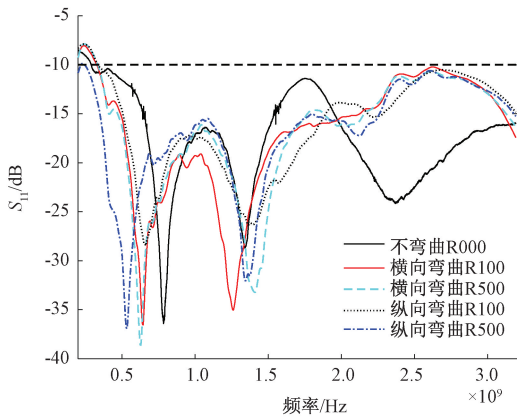


图 6 新型柔性微带天线在不同状态下的  $S$  参数

Fig. 6  $S$ -parameter diagram of the new flexible microstrip antenna in different states

3.2 局部放电检测试验

为了测试新型柔性微带天线对实际放电信号的检测性能,本文搭建放电检测试验回路,并模拟气体绝缘开关设备 (GIS) 腔内的金属污物放电,如图 7 所示。

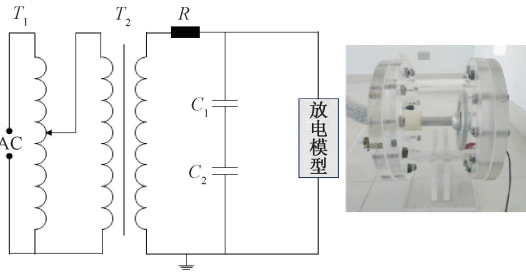


图 7 局部放电试验电路图和 GIS 腔体放电模型

Fig. 7 Partial discharge experiment circuit diagram and GIS cavity discharge model

该试验回路主要包括调压台  $T_1$ 、工频变压器  $T_2$ 、保护电阻  $R$ 、分压电容  $C_1$  和  $C_2$  以及气体绝缘开关设备 (GIS) 放电模型。试验过程中利用调压台实时控制电压,以激励 GIS 放电模型进行放电,释放电磁信号。为了安全模拟 GIS 内部的缺陷放电现象,试验中在 GIS 腔内部中填充  $\text{SF}_6$  气体,并置入典型的金属污物以模拟实际缺陷。试验中增加阿基米德螺旋天线和立体螺旋天线作为对照检测,以评估新型柔性微带天线的检测性能。如图 8 所示,阿基米德螺旋天线工作带宽为  $0.7 \sim 3 \text{ GHz}$ ,辐射单元直径为  $120 \text{ mm}$ ,高度为  $102 \text{ mm}$ ;立体螺旋天线工作带宽为  $0.4 \sim 3 \text{ GHz}$ ,天线尺寸为  $\Phi 80 \text{ mm} \times 410 \text{ mm}$ ,底座直径为  $185 \text{ mm}$ 。

为了不破坏 GIS 腔体的气密性,本文将新型柔性微带天线贴附在 GIS 腔体外壁,阿基米德螺旋天线和刚性立体螺旋天线置于 GIS 腔体旁,通过射频转接线接入泰

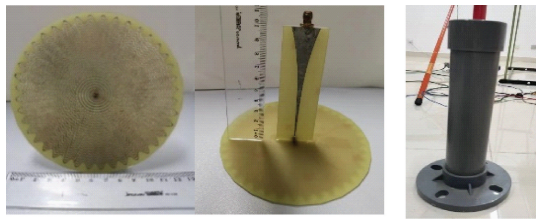


图 8 阿基米德螺旋天线 (左) 和立体螺旋天线 (右)

Fig. 8 Archimedes helical antenna (left) and stereo helical antenna (right)

克示波器 (型号 Tektronix Oscilloscope 5204B, 带宽  $2 \text{ GHz}$ , 最大采样率  $10 \text{ GS/s}$ ) 的 3 个通道。基于 3 种天线检测到放电信号数据,本文通过计算它们检测到的放电信号幅值、噪声信号幅值以及信噪比 (SNR) 来分析各自的检测性能。

$$\text{SNR} = \frac{U_{\text{signal}}}{U_{\text{noise}}} \quad (5)$$

其中,  $U_{\text{signal}}$  为放电信号幅值,  $U_{\text{noise}}$  为噪声信号幅值。

为了更好地评估新型柔性微带天线的检测性能,本文将 3 种天线进行了不同电压水平下的放电检测。试验初始阶段,首先确定安全的电压范围,记录首次检测到放电信号的电压为  $17.8 \text{ kV}$ ,击穿电压为  $24.3 \text{ kV}$ ,并据此控制电压施加区间为  $18 \sim 24 \text{ kV}$ 。随后,以  $2 \text{ kV}$  为单位递增电压进行放电信号的检测,分析比较它们检测到的放电信号幅值、噪声信号幅值及信噪比,如图 9 ~ 11 所示。结果显示,在同一测试环境下,阿基米德螺旋天线和立体螺旋天线检测到的放电信号幅值在  $3 \text{ V}$  左右,检测到的噪声信号幅值在  $0.4 \text{ V}$  左右,信噪比最高不超过  $11 \text{ dB}$ ,而新型柔性微带天线检测到放电信号幅值在  $4 \text{ V}$  左右,检测到的噪声信号幅值在  $0.2 \text{ V}$  左右,相应的信噪比最高达  $25 \text{ dB}$ 。相较于另外两种天线,新型柔性微带天线检测的放电信号幅值较高,且噪声信号幅值较低,并

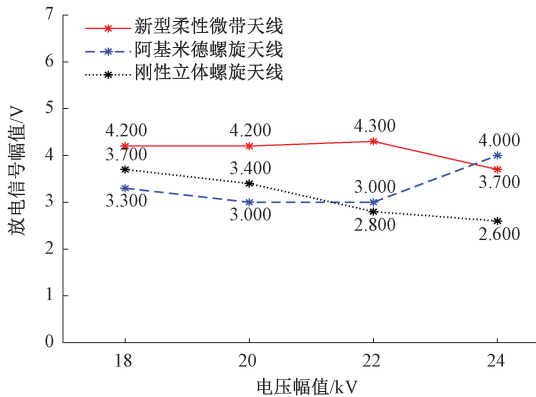


图 9 3 种天线检测的放电信号幅值

Fig. 9 The amplitude of the discharge signal detected by the three antennas

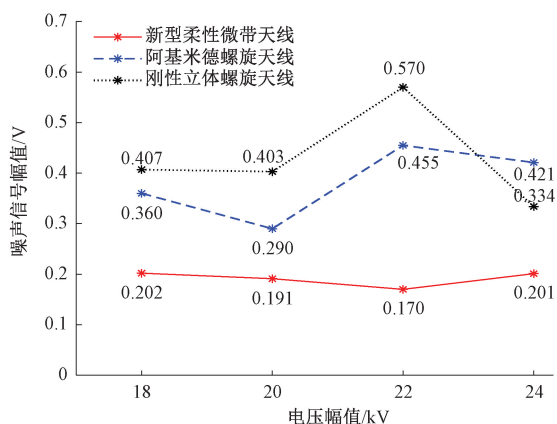


图 10 3 种天线检测的噪声信号幅值

Fig. 10 The amplitude of the noise signal detected by the three antennas

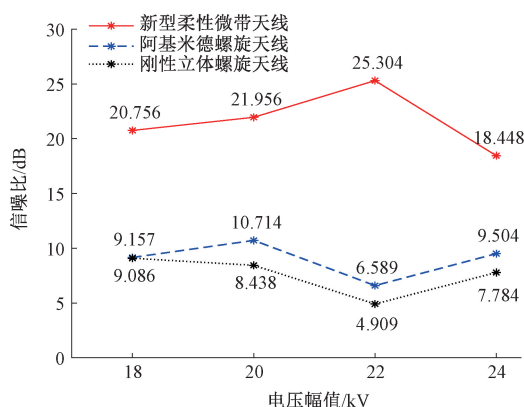


图 11 3 种天线检测的信噪比

Fig. 11 Signal-to-noise ratio for three antenna detections

表现出较高的信噪比。表明新型柔性微带天线在捕捉放电信号方面具有较高的灵敏度,同时对噪声信号有良好的抑制作用,其在放电信号检测方面具有更高效的检测性能。

## 4 结 论

在局部放电检测领域,微带天线在局部放电检测应用中具有抗干扰能力强、结构简单、体积小等优势,而较窄的工作带宽限制了其对放电信号的有效检测,通过增加尺寸扩展工作带宽的方式又牺牲了小体积的优势。因此为了获得兼顾小尺寸和宽带宽性能的柔性微带天线,本文首先对微带天线传统结构进行设计,以聚酰亚胺为基层材料,利用部分接地板技术改善其窄带特性,并引入斜切式曲流技术,在不增加天线面积的情况下扩展工作带宽;然后基于 RBF 神经网络建立柔性微带天线的多个尺寸参数与工作带宽之间的数学关系模型,并利用

IBWO 基于该模型以最大工作带宽为目标进行尺寸优化,最终实现天线尺寸由  $187 \times 220 \times 0.3 \text{ mm}^3$  缩减至  $133 \times 125 \times 0.3 \text{ mm}^3$ ,相对传统尺寸减小 59.59%;工作带宽由 0.598~0.6 GHz 扩展到完全满足放电检测带宽需求的 0.3~3 GHz。试验结果表明,新型柔性微带天线不仅能够清晰的检测到放电信号,还具有较高的信噪比,为局部放电检测提供了更高效的检测性能。

## 参考文献

- [1] RAFIQ M, SHAFIQUE M, AZAM A, et al. Transformer oil-based nanofluid: The application of nanomaterials on thermal, electrical and physicochemical properties of liquid insulation-A review [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(1): 555-576.
- [2] 李佩宜,王鹏,张曦海,等. 基于深度信念网络的变频电机局部放电起始电压预测[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 121-130.  
LI P Y, WANG P, ZHANG X H, et al. Prediction of partial discharge inception voltage for inverter-fed motor based on deep belief network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 121-130.
- [3] 王利福,刘屹江泽,王焱增. 基于 EEMD 能量矩与 ISSA-SVM 算法的 GIS 局部放电类型识别方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 204-212.  
WANG L F, LIU Y J Z, WANG Y Z. Partial discharge identification method in GIS based on EEMD energy moment and ISSA-SVM algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 204-212.
- [4] 陈君强,王鹏,黄寅,等. 变频电机绝缘局放电压自动测试系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 223(7): 114-121.  
CHEN J Q, WANG P, HUANG Y, et al. Design of an automatic test system for partial discharge voltage of inverter-fed motor insulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 223(7): 114-121.
- [5] 关少平,韩肖清,王佳莉,等. 基于联合检测的环网柜局部放电检测方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 126-136.  
GUAN SH P, HAN X Q, WANG J L, et al. Research on partial discharge of ring network cabinet based on combined detection method [J]. Journal of Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(13): 126-136.

- [6] 戴昕宇,徐焕宇,张宁. 移动端卷积神经网络开关柜局部放电样本生成与检测[J]. 电子测量技术, 2022, 45(12): 141-147.
- DAI X Y, XU H N, ZHANG N. Partial discharge sample generation and detection of convolutional neural network switchgear at mobile end [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(12): 141-147.
- [7] 邱虎,杨旭,罗传仙,等. GIS 间歇性局部放电泄漏电磁波检测传感器设计研究[J/OL]. 电测与仪表, 1-9 [2024-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230322.0908.002.html>
- QIU H, YANG X, LUO CH X, et al. Design and research of high sensitive GIS intermittent partial discharge leakage electromagnetic wave detection sensor [J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation, 1-9 [2024-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230322.0908.002.html>
- [8] WANG B B, HUANG Y Z. Design and application study of flexible wearable microstrip antenna sensor[C]. 2021 36th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2021: 821-825.
- [9] CUI Z, PARK S, CHOO H, et al. Wideband UHF antenna for partial discharge detection [J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1-10.
- [10] JARUMAN S, SAMAN N M, XIANG H C, et al. Ultrahigh frequency partial discharge sensors based on various microstrip patch antenna designs[C]. 2021 3rd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS), Bandung, Indonesia, 2021: 530-535.
- [11] MARCHAL A, MONEDERO M, THUC P L, et al. Ultra-wide band antenna for partial discharge detection inside switchgear for on-line monitoring [C]. 2018 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA), Vasteras, SWEDEN, 2018: 1-3.
- [12] GEORGE X, DA C, 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.
- [13] GEORGE X, SERRES A, DA C, et al. Circular printed monopole antenna with slotted ground plane for application in the detection of partial discharges in power transformers[C]. 2019 4th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Sao Paulo, Brazil, 2019: 1-5.
- [14] DU B X, ZHAO Y Q, KONG X X, et al. A novel UHF antenna for partial discharge detection based on fractal theory[C]. 2022 IEEE 4th International Conference on Dielectrics (ICD), Palermo, Italy, 2022: 248-252.
- [15] SALAH W S, GAD A H, ATTIA M A, et al. Design of a compact ultra-high frequency antenna for partial discharge detection in oil immersed power transformers [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2022, 13(2): 1-8.
- [16] ZHANG S, ZHANG G Z, LU C Y, et al. Flexible planar monopole built-in GIS PD sensor based on meandering technology[J]. Sensors, 2022, 22(11): 1-20.
- [17] 张安,许万涛,邢东方,等. 基于曲流技术的超宽带单极子局部放电检测天线设计[J]. 电气应用, 2022, 41(1): 85-90.
- ZHANG AN, XU W T, XING D F, et al. Design of ultrawideband monopole partial discharge detection antenna based on meander technology [J]. Electrical Applications, 2022, 41(1): 85-90.
- [18] CHEN T, CHEN H. Approximation capability to functions of several variables, nonlinear functionals, and operators by radial basis function neural networks[J]. IEEE Trans Neural Networks, 1995, 6(4): 904-910.
- [19] CHEN H, WANG Z, DI W, et al. An improved multi-strategy beluga whale optimization for global optimization problems [J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023, 20(7): 13267-13317.
- [20] 张国治,张硕,张晓星,等. 新型 GIS 局部放电柔性内置阿基米德螺旋天线研究 [J]. 高压电器, 2024, 60(1): 15-24.
- ZHANG G ZH, ZHANG SH, ZHANG X X, et al. Research on flexible built in archimedes spiral antenna for partial discharge in new type of GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 15-24.

## 作者简介



黄云志(通信作者), 2005 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为合肥工业大学电气与自动化工程学院教授、博士生导师, 兼任本科生院院长, 主要研究方向为信号处理、智能感知、机器人控制等。

E-mail: hqyz@hfut.edu.cn

**Huang Yunzhi** (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2005. Now she is a professor and doctoral supervisor in Hefei University of

Technology. Her main research interests include signal processing, intelligent instrument and robotic control.



**王蕾**, 2019 年于河南城建学院获得学士学位, 现为合肥工业大学电气与自动化工程学院硕士研究生, 主要研究方向为智能感知。

E-mail: 2635383874@qq.com

**Wang Lei** received her B. Sc. degree from Henan University of Urban Construction in 2019. Now she is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. Her main research interest includes control engineering.



**韩亮**, 2020 年于哈尔滨工业大学(深圳)获得博士学位, 现为合肥工业大学电气与自动化工程学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为机器人控制和人机交互。

E-mail: lianghan@huft.edu.cn

**Han Liang** received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology (Shenzhen) in 2020. Now he is an associate professor and master's supervisor in Hefei University of Technology. His main research interests include robotic control and human-robot interaction.