

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.014

基于降维技术的CRPDUAS稀疏结构优化设计

刘 丹¹, 孔 静², 谢 庆¹, 陶珺函¹, 李 通¹, 刘绪英¹

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 局部放电超声阵列检测方法是将阵列传感器与阵列信号处理技术应用于局部放电超声检测中的一种新方法,具有信噪比高、检测可靠性高等优点。相比较满阵,稀疏阵列传感器检测系统结构简单,成本低廉,能够满足工程需要。现有的稀疏结构优化设计算法相对复杂,会影响检测的成功率和准确度。因此,文中提出一种基于降维技术的圆环形局放超声阵列传感器(circular ring partial discharge ultrasonic array sensors, CRPDUAS)的稀疏结构优化设计方法。首先将平面二维圆环形阵的搜索降维处理成对应的一维线阵的搜索,并采用遗传算法执行直线阵搜索,然后再还原为圆环形阵列结构计算其阵列性能,最终获得多个约束条件下圆环形局放超声阵列传感器的优化稀疏结构。最后对优化稀疏结构进行Music测向仿真研究,结果表明文中方法正确有效。

关键词: 局放; 超声; 阵列传感器; 降维; 稀疏

Optimal Design for Sparse Structural of CRPDUAS Based on Dimensionality Reduction Technology

LIU Dan¹, KONG Jing², XIE Qing¹, TAO Junhan¹, LI Tong¹, LIU Xuying¹

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. Nuclear and Radiation Safety Center, Beijing 100082, China)

Abstract: The detection method of partial discharge (PD) ultrasonic array is a new method that applies the array sensors and array signal process technique to the PD detection. It has high signal-to-noise ratio and reliability of detection performance. Compared with the full array, the structure of sparse array detection system meeting the accuracy of the direction is simpler and cheaper. The existing sparse structure optimization design algorithm is complex, and affects the success rate and accuracy of detection. Accordingly, a method of sparse structure optimal design for the CRPDUAS (the circular ring partial discharge ultrasonic array sensors) is presented. Firstly, the method of dimensionality reduction transforms the position of planar two-dimensional concentric ring array into one-dimensional linear array by using genetic algorithm to perform linear array search, and then restore to the concentric ring array when calculating its performance, so optimized sparse structure of circular arrays is obtained. At last, the simulated the sparse structure by music direction proves the correctness and effectiveness of the method.

Key words: PD; ultrasonic; array sensor; dimensionality reduction; sparse structural

收稿日期:2016-07-19; 修回日期:2016-08-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51307060); 河北省高等学校科学技术研究指导项目(Z2013086); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2014MS84); 新能源电力系统国家重点实验室开放基金项目(LAPS14011); 河北省自然科学基金项目资助(E2015502081)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307060), Colleges and Universities in Hebei Province Science and Technology Research Project(Z2013086), Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014MS84), New Energy Power Systems State Key Laboratory Fund(LAPS14011), Hebei Provincial Natural Science Foundation(E2015502081).

0 引言

目前超声阵列传感器在局部放电检测中是一种较新的检测方法, 主要阵列阵形有直线形、L 形、十字形、方形、和圆环形^[1-8]。由于圆环形超声阵列传感器优越的对称结构特点和良好的测向性能, 使其在阵形应用方面引起大家的关注。

在相同的阵元孔径条件下, 阵元个数增加到一定个数后, 随着阵元个数的增加, 测向精度不会有明显增加^[9-11], 反而会显著增加检测系统的复杂程度, 提高硬件制作难度和成本。相比阵元间距为半波长的均匀阵列来说, 在满足工程所需的测向精度的前提下, 稀疏阵列检测系统简单, 成本低。但稀疏阵列具有栅瓣或高旁瓣等缺点^[12-13], 为降低工程成本同时保持阵列较低旁瓣, 需要对其进行阵形优化。

目前针对超声阵列传感器在电气设备局放故障检测的研究中, 大多数的阵列阵形是均匀满阵, 稀疏阵列的研究很少, 对超声稀疏圆环形阵列阵元位置优化的研究则少之又少。文[14]中利用声学评价指标应用穷举的方法对稀疏圆环形阵列传感器结构进行优化, 但随着阵列规模增大, 穷举法计算量会成指数递增, 对于目前普通计算机而言, 优化一个阵元数为 30 到 50 的中小型圆环形阵列已欠缺可行性。

对于稀疏圆环形阵列优化, 文[15]中应用的遗传算法和文[16]中应用的粒子群算法解决小规模圆环形阵列效果较好, 对于大规模稀疏圆环形阵列来说, 由于搜索的是二维数据, 随着阵元数的增加, 搜索时间极长, 甚至不可能实现; 文[17]中提出的模拟退火算法对于大规模稀疏圆环形阵列效果较好, 但前提稀疏圆环形阵列是对称结构, 这样就局限了优化的圆环形阵列的结构形式。

针对上述二维圆环形阵列稀疏优化缺点, 据此文中提出一种基于遗传算法降维技术的 CRPDUAS 稀疏结构方法: 将二维稀疏圆环形局放超声阵列传感器阵元分布优化设计降维为一维的稀疏直线形局放超声阵列传感器阵元分布优化设计, 建立二维圆环形阵列与一维线阵的关系, 基于遗传算法进行对一维直线阵阵元位置优化, 获得稀疏圆环形局放超声阵列尽量低的峰值旁瓣, 降低模型的复杂性, 并对搜索出的较优稀疏阵元位置和 3 种随机稀疏阵元位置进行 Music 测向仿真验证。

1 CRPDUAS 稀疏降维方法及优化模型建立

1.1 CRPDUAS 稀疏降维原理

在局部放电超声阵列定位中, 单个传感器简称

阵元, 由多个阵元按一定间距沿圆环排列组成的平面阵成为圆环形阵列^[18]。一个稀疏阶数为 f , 稀疏后阵元数目为 M , 阵元间距为 $d \geq 0.5\lambda$ 的稀疏圆环形阵见图 1 (满阵为 36 元, 稀疏阶数为 11 圆环形阵列), 以圆心作为坐标原点。

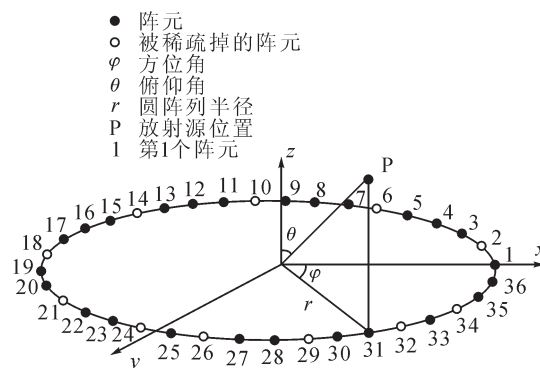


图 1 圆环形局放超声阵列传感器稀疏优化模型

Fig. 1 The sparse structure model of the circular ring PD ultrasonic array sensors

降维技术是将二维圆环形阵列阵元位置对应为一维直线阵列阵元位置。建立圆环形阵列和直线阵列的相互转化关系: 分析图一的稀疏圆环形阵列, 将圆环形阵列的轨迹从与 x 正半轴相交处的阵元 1 位置断开, 然后按逆时针方向展开成一条线段见图 2, 则断开处阵元 1 对应一维直线阵的原点坐标, 其他圆环形阵列阵元位置对应一维直线阵列的位置 x , 将第 m 个阵元位置的极坐标为 (r, φ_m) 的 2 维圆环形阵列降维转化为变量为 x 的 1 维直线阵列。

$$x = r \times \varphi_m. \quad (1)$$

反之, 如果已知某阵元在直线阵列中的位置 x , 则可以通过(1)式转换为圆环形阵列阵元的极坐标位置。

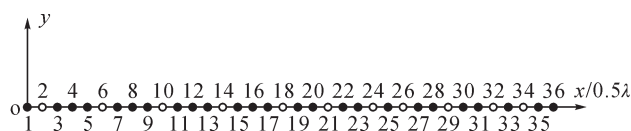


图 2 二维圆环形阵列轨迹展开后的一维直线阵列模型

Fig. 2 One-dimensional linear array model of the expended two-dimensional circular array

1.2 CRPDUAS 稀疏优化模型

设第 m 个阵元位置的极坐标为 (r, φ_m) , 阵元性能一致, 则远场窄带圆环形阵列的阵因子^[18]为

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{M-1} \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} r \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_m) + j \phi \right]. \quad (2)$$

式(2)中: λ 为超声波波长; ϕ 是信号源相位; θ, φ 分别为波束方向的俯仰角和方位角, $0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$ 。

当稀疏优化设计的圆环形阵列半径为 r 时,优化变量阵元分布位置,使得阵列方向图的相对较大副瓣^[10]。

$$F = \left[20 \lg \left(\frac{F_{\max_{\text{all}}}}{F_{\max}} \right) \right] \quad (3)$$

式(3)中: $F_{\max}$ 为主瓣峰值; $F_{\max_{\text{all}}}$ 为相对较大旁瓣值, F 越小,旁瓣越小,阵列分辨率越高,抗干扰性能越好。

2 基于遗传算法降维技术的 CRPDUS 稀疏结构优化实现过程

遗传算法^[19-21]是通过随机选择、交叉和变异,产生更加适应环境的个体,令群体中个体渐渐进化到搜索空间中较优的区域,这样不断迭代逐步改进当前群体中个体,直至收敛到一个最适应环境的个体上,求得问题相对应的最优解。以下是基于遗传算 CRPDUS 降维优化方法的主要步骤。

1)遗传降维(遗传算法降维技术)初始群体建立和操作预处理。

根据圆环形阵阵元极坐标转换线阵位置的表达式(1),将一个稀疏阶数为 f ,稀疏后阵元数目为 M ,阵元间距为 $d \geq 0.5\lambda$ 的 2 维稀疏圆环形阵转化为一维的稀疏直线阵。由于圆环形阵满阵的阵元间距 $d = 0.5\lambda$ 。满阵阵元个数为 $N = M + f$,则对应的圆环形阵满阵阵元位置为 x 。在闭区间 $[0, N-1]$ 内产生 M 个独立的随机正整数得

$$y = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_M]^T \quad (4)$$

则直线阵上阵元位置矢量为

$$x = y \times d \quad (5)$$

式(4)、(5)中: x 为遗传降维群体的真实个体; y 为遗传降维修正群体中对应的修正个体。创建个体数为 P 的初始群体

$$x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_M]^T \quad (6)$$

采用式(5)间接生成的直线阵列个体 x 转换为圆环形阵列时,阵元间距满足 $d \geq 0.5\lambda$,而且阵元间距 d 满足 0.5λ 的整数倍,符合稀疏阵列定义。

2)遗传降维的交叉、变异和操作后处理。

交叉和变异操作只需在遗传降维修正群体 y 中进行。假如修正群体中的第 i 个和第 j 个个体被选中,并在第 k 号基因处发生单点交叉,则交叉后的两个新个体为

$$\begin{cases} y'_i = [y_{1i}, y_{2i}, \dots, y_{ki}, y_{kj}, \dots, y_{Mi}]^T \\ y'_j = [y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{ki}, y_{kj}, \dots, y_{Mj}]^T \end{cases} \quad (7)$$

选定第 s 个个体的第 v 号基因进行变异,变异后的新个体为

$$y'_s = [y_{1s}, y_{2s}, \dots, y_{(v-1)s}, \varepsilon, y_{(v+1)s}, \dots, y_{Ms}]^T \quad (8)$$

式(8)中随机正整数数 $\varepsilon \in [0, N-1]$,发生交叉和变异的基因数是由给定的交叉率和变异率决定。经过选择、交叉和变异,再通过式(5)得到新一代线阵列群体

$$x'_k = [x'_{1k}, x'_{2k}, x'_{3k}, \dots, x'_{Mk}]^T \quad (9)$$

3)遗传降维优化适应度值计算

将式(6)的一维直线阵阵元位置转换为二维圆环形阵的阵元分布。圆环形阵半径为 r ,则其幅角 φ_m 为

$$\varphi_m = \frac{x_m}{r} \quad (10)$$

根据式(2)计算适应度函数,即计算圆环形阵的相对较大副瓣 F 。如果副瓣性能满足给定的目标副瓣要求,则退出搜索,结束遗传算法;否则继续迭代,直到达到相对较大遗传代数。当前群体中副瓣性能相对较优的个体所对应的修正个体将保留,不参与交叉和变异,直接成为下一代种群个体,以便保证迭代所得相对较优个体是逐代改良。

3 仿真研究

设有一满阵 $N=36$ 元的圆环形阵列,稀疏阶数为 11,阵元性能一致,远场窄带环境,则圆环形阵列半径

$$r = \frac{d}{2 \times \sin(\pi/N)} \quad (11)$$

式(11)中, $d=0.5\lambda$ 。

对于遗传算法基本参数的设定,群体大小一般为 20~100,最大迭代次数为 100~500,交叉概率为 0.4~0.99,变异概率为 0.000 1~0.5。根据基本的遗传算法参数设定范围,结合文中满阵为 36 元的圆环形阵列,稀疏阶数为 11 的搜索较优位置的要求,使其 F 相对较低,而且每个阵元间距为的整数倍,遗传降维基本参数设定见表 1。

表 1 遗传降维搜索基本参数

Table 1 Basic parameters of genetic dimension reduction

参数类别	数值
群体大小 p	30.00
迭代次数 G	200.00
交叉概率 pc	0.50
变异概率 pm	0.10

通过计算机仿真得到较优稀疏阵列阵元分布,优化得相对较大副瓣 F 为 -30.045 7。12 组阵元被稀疏掉时所得的 F 的值见表 2。通过大量调研发现,目前大部分优化得出的平面稀疏阵具有对称性,所以表 2 列举的 12 组稀疏阵元位置是具有对称代表

性得来, 其可以代表大多数稀疏圆环阵的对称结构。比较 12 组对称结构对应的 F 值, 可得搜索出来的结果是较优的稀疏结构。

表 2 稀疏阶数为 11 的 36 元圆环阵列分布情况

Table 2 The distribution of 36 circular ring arrays with sparse order 11

组数	稀疏位置(被稀疏掉的阵元位置, 如 X_1 代表第 1 个阵元被稀疏掉)	相对较大副瓣 F
1	$X_1 X_5 X_6 X_{10} X_{14} X_{15} X_{19} X_{23} X_{24} X_{28} X_{32}$	-12.796 5
2	$X_1 X_2 X_9 X_{10} X_{11} X_{18} X_{19} X_{20} X_{28} X_{29} X_{36}$	-30.045 7
3	$X_1 X_2 X_9 X_{10} X_{11} X_{18} X_{19} X_{20} X_{27} X_{28} X_{29}$	-23.373 6
4	$X_4 X_5 X_9 X_{13} X_{14} X_{18} X_{22} X_{23} X_{27} X_{31} X_{32}$	-11.625 2
5	$X_4 X_5 X_8 X_{11} X_{15} X_{17} X_{19} X_{25} X_{26} X_{32} X_{33}$	-22.374
6	$X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_8 X_9 X_{10} X_{11}$	-18.437 6
7	$X_1 X_3 X_5 X_8 X_9 X_{11} X_{19} X_{20} X_{24} X_{26} X_{33}$	-27.295 2
8	$X_2 X_8 X_{13} X_{14} X_{15} X_{16} X_{22} X_{26} X_{27} X_{31} X_{33}$	-12.019 6
9	$X_1 X_4 X_8 X_{12} X_{15} X_{16} X_{20} X_{22} X_{23} X_{25} X_{29}$	-13.914 7
10	$X_1 X_3 X_5 X_7 X_9 X_{11} X_{13} X_{15} X_{17} X_{19} X_{28}$	-14.837 4
11	$X_1 X_4 X_7 X_{10} X_{13} X_{16} X_{19} X_{22} X_{25} X_{28} X_{31}$	-12.411 0
12	$X_2 X_5 X_8 X_{11} X_{14} X_{17} X_{20} X_{23} X_{26} X_{29} X_{32}$	-23.151 8

由表 2 可知, 满阵为 36 元圆环阵列稀疏度为 11 时不同稀疏位置相对较大副瓣也不尽相同。而利用文中提出的优化方法搜索出的稀疏结构对应的 F 最小, 可以实现对 36 元 CRPDUAS 进行 11 阶稀疏优化设计。

4 基于 Music 的 CRPDUAS 稀疏结构测向精度仿真验证

稀疏结构阵列见图 3。图 3(a)为相对较优稀疏结构(稀疏 1、2、9、10、11、18、19、20、28、29、36 号); 图 3(b)为任意 3 种随机稀疏结构, 即随机稀疏结构(稀疏 4、5、9、13、14、18、22、23、28、31、32 号); 图 3(c)为随机稀疏结构(稀疏 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11 号); 图 3(d)为随机稀疏结构(稀疏 2、5、8、11、14、17、20、23、26、29、32 号)的 36 元圆环阵列, 进行测向精度仿真研究, 仿真参数设定见表 3。

设定局放源位置为 $(130.6^\circ, 45.3^\circ)$, 测得图 3(a)的测向角度为 $(131.3^\circ, 45.5^\circ)$, 测向谱图与等高线见图 4。图 3(b)的仿真测向角度为 $(133.0^\circ, 45.7^\circ)$, 测向谱图与等高线见图 5; 图 3(c)的仿真测向角度为 $(128.8^\circ, 45.0^\circ)$, 测向谱图与等高线见图 6; 图 3(d)的仿真测向角度为 $(132.4^\circ, 45.6^\circ)$, 测向谱图与等高线见图 7。

由图 4~7 可以看出, 稀疏阶数为 11 的 36 元圆环阵局放超声阵列传感器, 应用基于遗传算法的降维优化方法搜索出的稀疏 1、2、9、10、11、18、19、20、28、29、36 号阵元时旁瓣较低, 测向精度相对较优,

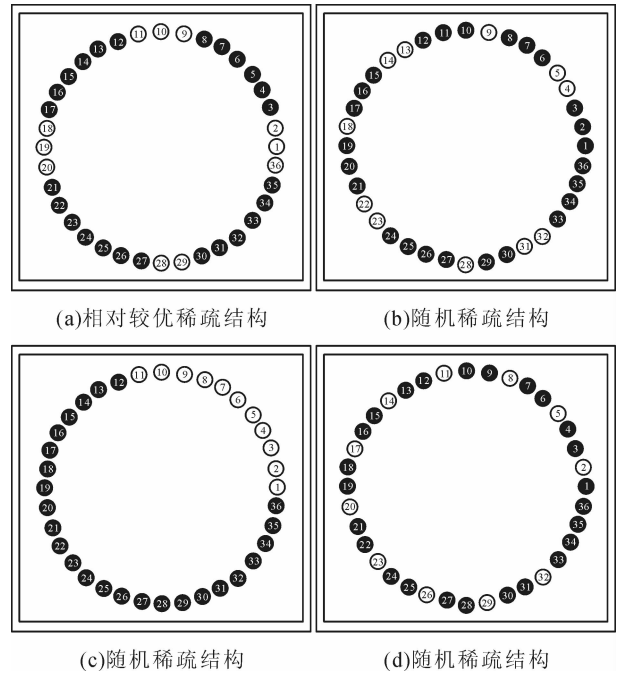


图 3 稀疏结构阵列

Fig. 3 The sparse structure of the array

表 3 Music 测向仿真参数

Table 3 Music simulation parameters

参数类别	数值
信噪比/dB	20
信号中心频率/kHz	150
超声波速度/(m·s ⁻¹)	1 500
阵元间距/mm	5
采用频率/MHz	10

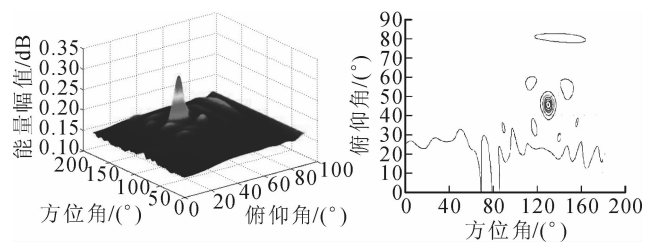


图 4 相对较优稀疏结构图 3(a)仿真测向谱图和等高线

Fig. 4 The simulation stereo diagram and contour map of relatively sparse structure Fig. 3(a)

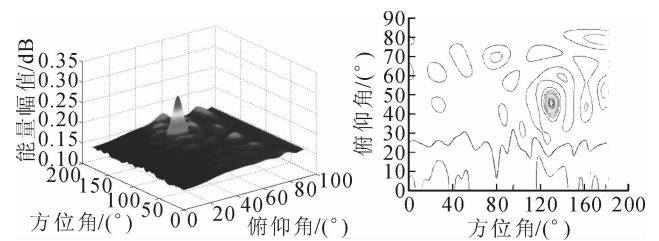


图 5 随机稀疏结构图 3(b)仿真测向谱图和等高线

Fig. 5 The simulation stereo diagram and contour map of relatively sparse structure Fig. 3(b)

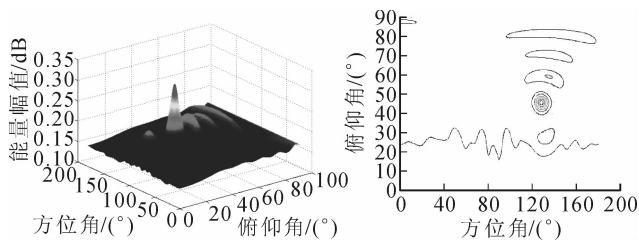


图 6 随机稀疏结构图 3(c)仿真测向谱图和等高线

Fig. 6 The simulation stereo diagram and contour map of relatively sparse structure Fig. 3(c)

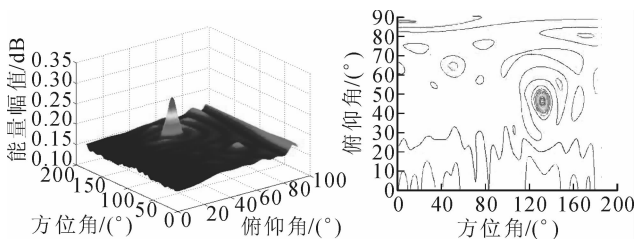


图 7 随机稀疏结构图 3(d)仿真测向谱图和等高线

Fig. 7 The simulation stereo diagram and contour map of relatively sparse structure Fig. 3(d)

测向谱图与等高线误差也相对较小。

对上述 4 种阵列结构分别进行了 10 次仿真验证,仿真结果平均误差分别为 $(2.6^\circ, 2.4^\circ)$, $(2.9^\circ, 2.6^\circ)$, $(2.7^\circ, 3.5^\circ)$ 和 $(3.1^\circ, 3.9^\circ)$,根据文中搜索出的较优稀疏结构平均误差较小。

由上述仿真实验,表明根据设定的局放超声阵列孔径,阵元数目等约束条件的前提下,由文中提出的基于遗传降维优化方法搜索出的 CRPDUAS 较优稀疏结构,实现了更好的旁瓣性能,测向精度更准确。

5 结论

提出一种基于降维技术的 CRPDUAS 稀疏结构优化设计,主要工作如下:

1)建立 CRPDUAS 稀疏结构优化模型。该模型的建立使局放超声阵列传感器稀疏结构声学性能中的旁瓣性能优化更简单方便;

2)对基于遗传算法降维技术的 CRPDUAS 稀疏结构优化进行仿真研究。通过基本参数设定,对满阵阵元数为 36 元的 11 维稀疏圆环形阵列的阵元分布运用降维处理,并采用遗传算法进行优化搜索,得到了多个约束条件下相对较优的 CRPDUAS 稀疏结构;

3)采用经典 Music 测向算法对较优稀疏结构和任意 3 种随机稀疏结构进行测向仿真比较。经过前后测向精度对比,较优稀疏结构平均误差为 $(2.6^\circ, 2.4^\circ)$,比其他任意 3 种随机稀疏结构平均误差要小,

测向更精确,从而验证了文中方法是正确有效的。

文中提出的优化方法为解决局放超声平面阵列稀疏结构优化提供了新思路,下一步将搭建一套与该方法相对应的实验平台,进行实验验证。

参考文献:

- [1] 张贤达,保铮. 通信信号处理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
ZHANG Xianda,BAO Zheng. Communication signal processing[M]. Beijing: National Defense University Press, 2000.
- [2] 罗勇芬,李彦明,刘丽春. 基于超高频和超声波相控接收原理的油中局部放电定位法仿真研究[J]. 电工技术学报,2004, 19(1):35-39.
LUO Yongfen, LI Yanming, LIU Lichun. Simulation of PD location method in oil based on UHF and ultrasonic phased array receiving theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(1): 35-39.
- [3] LUO Yongfen,JI Shengchang, LI Yanming. Phased-ultrasonic receiving-planar array transducer for partial discharge location in transformer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2006, 53(3):614-622.
- [4] 丁亚军,钱盛友,胡继文,等. 超声相控阵在多层媒质中的声场模式优化[J]. 物理学报,2012, 61(14):248-254.
DING Yajun,QIAN Chengyou,HU Jiwen,et al. Optimization of phased array ultrasonic field in multi-medium[J]. Acta Physica Sinica,2012,61(14): 248-254.
- [5] XIE Qing,TAO Junhan,WANG Yongqiang,et al. Use of ultrasonic array method for positioning multiple partial discharge sources in transformer oil[J]. Review of Scientific Instruments,2014,85(8): 084705-084712.
- [6] 董旭柱,王昌长,朱德恒. 电力变压器局部放电在线监测研究的现状和趋势(二)[J]. 变压器,1996, 33(5):2-7.
DONG Xuzhu,WANG Changchang,ZHU Deheng. Research status and trend of on-line PD monitoring for power transformer(2)[J]. Transformer,1996,33(5): 2-7.
- [7] 姚陈果,周电波,陈攀,等. 采用超高频法监测变电站设备局放水平及其早期预警[J]. 高电压技术,2011,37(7): 1670-1676.
YAO Chenguo,ZHOU Dianbo,CHEN Pan,et al. UHF-based monitoring for equipment PD within the substation and early warning[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1670-1676.
- [8] 朱德恒,谈克雄. 电绝缘诊断技术[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
ZHU Deheng, TAN Kexiong. Electrical insulation diagnosis technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [9] XIE Qing, CHENG Shuyi, LU Fangcheng, et al. Location

- of partial discharge in transformer oil using circular array of ultrasonic sensors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5):1683-1690.
- [10] 史东湖, 习靖, 周志伟. 对称平面稀疏阵列阵形优化方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(4):302-305.
- SHI Donghu, XI Jing, ZHOU Zhiwei. Research on optimization method of symmetric thinned planar array[J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2013, 32(4): 302-305.
- [11] 夏菲, 陶海红, 李军. 基于改进遗传算法的非均匀稀疏阵列优化[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(6):466-471.
- XIA Fei, TAO Haihong, LI Jun. Optimal design of nonuniform sparse arrays based on modified genetic algorithm[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(6): 466-471.
- [12] 陈客松. 稀疏天线阵列的优化布阵技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- CHEN Kesong. Research on synthesis and optimization techniques of sparse antenna arrays[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006.
- [13] HAUPT R L. Thinned arrays using genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(7): 993-999.
- [14] XIE Qing, CHENG Shuyi, LYU Fangcheng, et al. A new sparse design method on phased array-based acoustic emission sensor for partial discharge detection[J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(3): 035102-035112.
- [15] MANDAL D, MAJUMDAR A, KAR R, et al. Thinned concentric circular array antennas synthesis using genetic algorithm[C]//Proceedings of the IEEE Research and Development (SCORed), [S.l.]:IEEE, 2011: 194-198.
- [16] MANDAL D, KAR R, GHOSH S P. Thinned concentric circular array antenna synthesis using particle swarm optimization with constriction factor and inertia weight approach[C]//Proceedings of the IEEE Recent Trends in Information Systems(ReTIS). Kolkata:IEEE, 2011: 77-81.
- [17] 廖先华, 杨建红, 张立军, 等. 基于模拟退火算法的平面稀疏阵优化[J]. 现代雷达, 2012, 34(10):57-59.
- LIAO Xianhua, YANG Jianhong, ZHANG Lijun, et al. Optimization of planar sparse array using simulated anneal algorithm[J]. Modern Radar, 2012, 34(10):57-59.
- [18] 薛正辉, 李伟明, 任武. 阵列天线分析与综合[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- XUE Zhenghui, LI Weiming, REN Wu. Analysis and synthesis of array antenna[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2011.
- [19] CHEN K, SONG H Z, HAN C L. A modified real GA for the sparse linear array synthesis with multiple constraints[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2006, 54(7):2169-2173.
- [20] 杨勇, 谭渊, 张晓发, 等. 基于遗传算法的毫米波稀疏阵列优化[J]. 电波科学学报, 2010(25):31-34.
- YANG Yong, TAN Yuan, ZHANG Xiaofa, et al. Optimization of millimeter wave sparse array based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010(25): 31-34.
- [21] 霍健, 杨平, 施克仁, 等. 基于遗传算法的二维随机型稀疏阵列的优化研究[J]. 声学学报, 2006, 31(2):187-192.
- HUO Jian, YANG Ping, SHI Keren, et al. Optimal design of random sparse 2-D arrays based on genetic algorithm[J]. Acta Acustica, 2006, 31(2): 187-192.
- 刘丹(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

(上接第 79 页)

- HOU Jianguo, XU Bin. Comparison of safety setting level in design codes of overhead transmission lines in China and abroad[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011(s1):162-171.
- [18] 潘晓春, 王作民. 架空输电线路气象条件设计标准刍议[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(z1):50-56.
- PAN Xiaochun, WANG Zuomin. Discussion on the design standard of meteorological conditions for overhead transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(z1): 50-56.
- [19] 陈科全, 严波, 郭跃明, 等. 超高压输电线脱冰动力响应数值模拟[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2009, 32(5):544-549.
- CHEN Kequan, YAN Bo, GUO Yueming, et al. Dynamic responses of ultra-high voltage transmission line ice shedding[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2009, 32(5): 544-549.
- [20] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 电网覆冰防治方法和研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(4):7-13.
- LI Zaihua, BAI Xiaomin, ZHOU Ziguan, et al. Prevention and treatment methods of ice coating in power networks and its recent study[J]. Power System Technology, 2008, 32(4):7-13.
- 巢亚锋(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事输变电设备外绝缘、过电压与绝缘配合研究。