

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.12.022

SA-APSO 算法及其在变压器油中局部放电超声定位中的应用

徐艳春¹, 王 泉¹, 李振兴¹, 李振华¹, 吕 密²

(1. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. Texas A&M University, College of Electrical Engineering and Computer, Texas 75503, America)

摘要: 针对基本粒子群算法(particle swarm optimization algorithm, PSO)局部寻优能力差及易早熟收敛的情况,提出一种融入模拟退火思路的自适应粒子群混合算法(simulated annealing-adaptive particle swarm optimization algorithm, SA-APSO),在惯性权重变化-自适应粒子群基础上融入退火思想,以一定的随机概率接收最优值,能有效提升全局寻优能力并克服早熟收敛现象。利用测试函数进行的仿真结果表明SA-APSO算法在结果精度及稳定性上明显优于基本PSO。并将其应用于变压器油中局部放电的定位计算,将结果与基本PSO及自适应粒子群进行比较,结果表明基于SA-APSO的变压器油中局部放电超声定位方法能够实现全局精确定位,且结果稳定,综合误差小于3.7 mm。

关键词: 粒子群算法; SA-APSO 算法; 变压器; 局部放电; 超声波; 定位

SA-APSO Algorithm and Its Application in Ultrasonic Location of Partial Discharge in Transformer Oil

XU Yanchun¹, WANG Quan¹, LI Zhenxing¹, LI Zhenhua¹, LYU Mi²

(1. Key Laboratory of Operation and Control of Cascade Hydropower Stations in Hubei Province, Three Gorges University, Hubei

Yichang 443002, China; 2. Texas A & M University, College of Electrical Engineering and Computer, Texas 75503, America)

Abstract: In allusion to the basic particle swarm optimization algorithm local search optimization ability is poor and it is easy to premature convergence, an improved PSO, which integrate simulated annealing idea into the adaptive particle swarm optimization algorithm, is proposed. It is named simulated annealing-adaptive particle swarm optimization algorithm (SA-APSO), based on the adaptive particle swarm optimization, it integrates the simulated annealing idea and accept the optimal value with certain probability. SA-APSO can effectively enhance the global searching ability and overcome the premature convergence phenomenon. The simulation results show that the SA-APSO algorithm is superior to the basic PSO in the accuracy and stability of the results. And its application in location of partial discharge in transformer oil is calculated, the results with the basic PSO and adaptive particle swarm optimization are compared. The results show that based on SA-APSO transformer oil partial discharge-ultrasonic positioning method can realize the accurate global localization and stable result, the synthetic error less than 3.7 mm.

Key words: particle swarm optimization algorithm; SA-APSO algorithm; transformer; partial discharge; ultrasonic; localization

0 引言

局部放电不仅是油纸绝缘故障产生的重要原

因,也是绝缘劣化程度的主要评估手段^[1-2],变压器绝缘击穿直接可导致变压器停运,这不仅会对于电网的稳定性造成巨大冲击,同时也会造成巨大的经

收稿日期:2018-04-20; 修回日期:2018-06-22

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金(KJ2015QT007); 三峡大学研究生科研创新基金(SDYC2016046)。

Project Supported by the Ministry of Education to Return Personnel Research Start Fund(KJ2015QT007), Graduate Student Research Innovation Fund of China Three Gorges University (SDYC2016046).

济损失,因此,获取变压器局放源位置对于设备运行的安全性及经济性都是极其必要的^[3-6]。

由于超声波定位抗干扰能力强、精度高等特点,因此一直作为局部放电定位的首选方法,而定位的算法选择直接关系到能否精准定位。文[7]提出一种复数域牛顿迭代网格搜索法,能有效解决因时间差误差可能导致的方程组在实数域无解的问题;文[8]提出一种将动态加权统计、能量累积曲线及小波变换相结合的局放源定位法,能有效提高定位精度;文[9]提出一种半定松弛主次逼近法,将有约束的非线性方程通过等价变换和秩一松弛转化为一个半定规划问题,使其具有全局唯一解。

当前智能算法很多,但是直接用于变压器油中局放源的定位还存在一些局限性,因此需要探索一些新算法^[10-13]。粒子群算法在理论及实际应用中存在早熟及全局寻优能力差等缺陷,对于某些复杂优化问题,容易陷入局部最优^[14-16]。针对这一问题,笔者在自适应粒子群的基础上融合模拟退火思想,提出SA-APSO算法,粒子群算法对参数的依赖性大,惯性权重值的大小直接影响定位精度,加入动态权重能在一定程度上改善粒子群算法的全局搜索能力,同时,引入退火原理,以一定的随机概率接收当前的最优值,因此能够能及时跳出局部解、克服早熟收敛现象。

利用测试函数进行仿真,结果表明SA-APSO算法在结果精度及稳定度上明显优于基本粒子群,并将其应用于变压器油中局部放电的定位计算,通过对比基本PSO及自适应算法的定位结果,发现基于SA-APSO的变压器油中局部放电超声定位方法效果良好,无论在定位精度或结果的稳定性上均具有明显优势。

1 SA-APSO混合优化算法

1.1 SA算法

模拟退火算法(simulated annealing, SA)最早是由Kirkpatrick人等开始应用于组合优化领域,基于Monte-Carlo迭代,是一种随机寻优算法,其理论基础来源于固体物质的退火原理。算法开始设定较高的初始温度,伴随温度的不断下降,在所得局部最优解中概率性地跳出并最终趋于全局最优。SA算法通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于零的概率突跳性,因此具有很强的全局寻优能力。

1.2 PSO算法

PSO算法通过群体里个体之间的信息共享与协

作来寻找最优解。迭代过程中,每个潜在解都被看作是搜索空间的一只鸟,又称“粒子”。所有“粒子”都有一个由目标函数确定的适应度(fitness value),每个“粒子”设定有一个速度,决定它们“飞行”的方向和距离。附近的粒子跟随当前的最优粒子在解空间里搜索,每一次的迭代,粒子通过跟踪两个极值来更新自己,通过个体极值及全局极值的不断迭代比较适应度,最终收敛于一个最优值。

1.3 SA-APSO算法

SA-APSO算法的基本思想是:将SA算法良好的全局搜索能力及APSO可靠的局部寻优、快速收敛能力相结合,构造SA-APSO算法,使其在最短时间得到全局最优解。

该算法基本流程如下:

1)粒子群的初始化:①设定种群的规模 m ,最大进化代数 $T_{\max}$;②初始化粒子群的速度 v_i 和位置 x_i ;③计算初始粒子群的适应度 $f(x_i)$,根据 $f(x_i)$ 相应的初始化个体极值 p_{best} 和群体极值 g_{best} ;

2)模拟退火的初始化:①设置初始温度 T ,生成初始解 $s(w, c_1, c_2)$;②求评价函数 $C(s)$;更新速度 v_i 和位置 x_i ,并计算适应度 $f(x_i)$,根据适应度相应的更新极值 p_{best} 和 g_{best} ,取 $C(s)=g_{\text{best}}$;

3)生成新解 $s'(w', c'_1, c'_2)$;

4)更新速度 v_i 和位置 x_i ,其中 w 、 c_1 和 c_2 按照 s' 取值;

5)计算适应度 $f(x_i)$;

6)求得 $C(s')=\min[f(x_i), i=1, 2, \dots, m]$, $\Delta C=C(s')-C(s)$;

If $\Delta C < 0$, 则 $C(s)=C(s')$, $s=s'$, 则接受由 s' 所更新的速度和位置, $T=\alpha T$;

Else if $\exp(-\Delta C/T) > \text{rand}(0, 1)$, 则 $C(s)=C(s')$, $s=s'$, 仍然接受由 s' 所更新的速度和位置, $T=\alpha T$;

Else 拒绝 s' 的值, s 仍为当前的状态,用 s 来更新速度和位置,并计算其适应度。

7)根据适应值更新 p_{best} 和 g_{best} ;

8)判断是否满足结束条件,若满足,输出最优值,若不满足,转步骤3)。

2 SA-APSO仿真测试

为评测SA-APSO算法性能,对3个标准函数进行了大量测试,并与基本PSO的结果进行了对比。测试函数见表1。所选测试函数均为多峰函数,具有多个局部极值点。测试函数 f_1 、 f_2 图像见图1、2。基本PSO及SA-APSO关于函数 f_2 的收敛曲线见图3。

表1 标准测试函数
Table 1 Standard test function

函数	表达式	自变量范围
f_1	$\max f_1(x,y)=0.3\cos(3\pi x)-0.3\cos(4\pi y)-x^2-y^2-0.3$	$x,y\in[-1,1]$
f_2	$\min f_2(x,y)=-20\exp(-0.2\sqrt{(x^2+y^2)/2})-\exp\{[\cos(2\pi x)+\cos(2\pi y)]/2\}+20+2.71289$	$ x \leq 5, y \leq 5$
f_3	$\max f_3(x,y)=-(x^2+y^2)^{0.25}\{\sin^2[50(x^2+y^2)^{0.1}]+1.0\}$	$-5.12\leq x,y\leq 5.12$

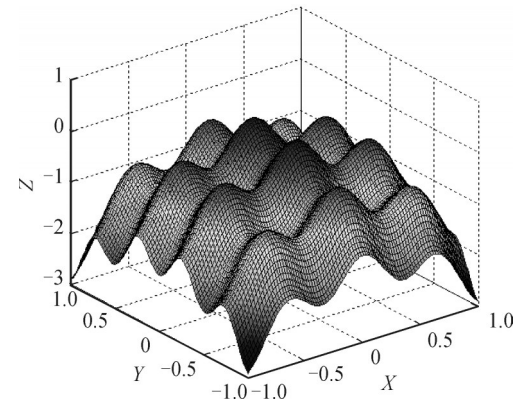


图1 测试函数1所属三维图

Fig. 1 Three dimensional graphs of test function 1

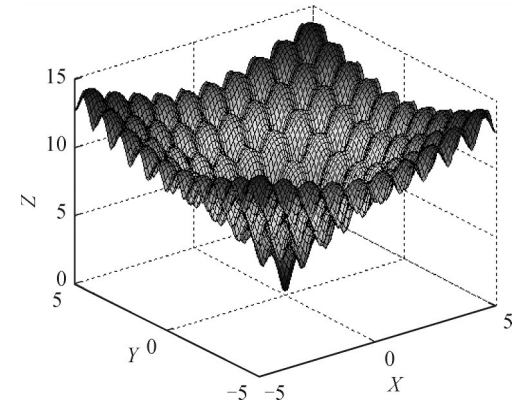


图2 测试函数2所属三维图

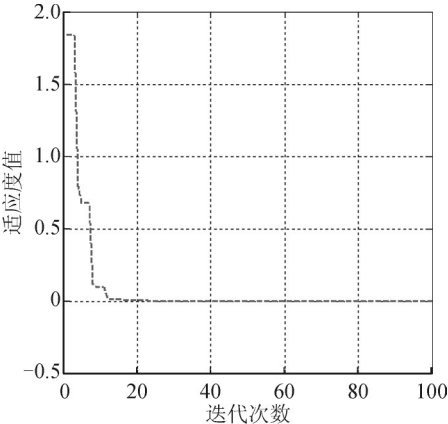
Fig. 2 Three dimensional graphs of test function 2

仿真相关参数为:种群规模 $m=30$, 最大迭代次数 1 000, 退火速度 $\alpha=0.98$, PSO 惯性权重 $w=0.6$, 学习因子 $c_1=c_2=2.05$ 。

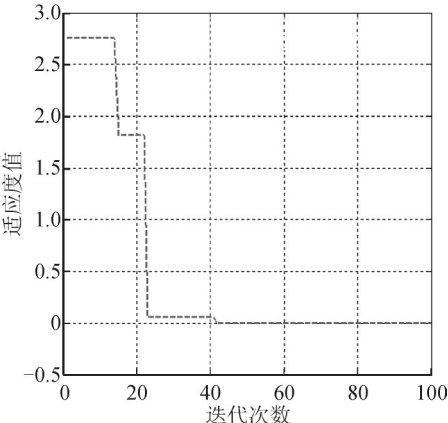
对每个标准测试函数独立测试 100 组数据, 并对数据的最优值、最差值、平均值及方差进行了对比, 对比结果见表 2。

据结果分析, 可得出如下结论:

1)SA-APSO 与 PSO 所得均值及方差比较。经 3 个标准多峰测试函数近 300 组数据的计算, 发现 SA-APSO 算法所得结果均值十分接近真实值, 而普通 PSO 由于少数粒子陷入局部最优而使得均值偏离真实值较远。方差方面, SA-APSO 计算结果的方差量极小, 接近于零, 说明结果稳定, 而普通 PSO 结果的



(a) PSO算法收敛曲线



(b) SA-APSO算法收敛曲线

图3 测试函数2的收敛曲线

Fig. 3 Convergence curve of test function 2

方差量略大, 时有陷入局部最优的现象。

2)SA-APSO 与 PSO 稳定度比较。通过测试数据可以看出, SA-APSO 算法所得结果稳定性明显优于基本 PSO, 图形显示 SA-APSO 计算多次跳出局部解, 具有了较强的全局收敛性, 虽然更多次的迭代牺牲了少许时间, 但是在稳定度上有了更大保证, 显然少许时间牺牲是值得的。

3 变压器油中局部放电超声定位原理

3.1 变压器油中超声波传播途径

变压器内部结构复杂, 超声波在变压器油中传播时常受到折反射、绕射、色散等大量干扰的影响, 定位时的波速往往不是一个定值。文[17]分析过超

表2 对测试函数的仿真结果比较

Table 2 Comparison of simulation results of test function

函数	变量	理论值	方法	最优值	最差值	均值	方差
f_1	f_1	0.240 034	SA-APSO	0.240 035	0.240 035	0.240 035	0.000 000
			PSO	0.240 035	0.174 351	0.217 351	0.041 614
	x_1	0.000 000	SA-APSO	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000
			PSO	0.000 762	2.260 471	0.413 061	1.102 317
f_1	y_1	0.230 000	SA-APSO	0.239 847	0.239 847	0.239 847	0.000 000
			PSO	0.234 369	0.169 231	0.229 461	0.039 100
	f_2	0.000 000	SA-APSO	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000
			PSO	0.001 100	0.020 100	0.039 100	0.021 900
f_2	x_2	0.000 000	SA-APSO	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000
			PSO	0.000 000	-0.030 100	0.014 500	0.021 700
	y_2	0.000 000	SA-APSO	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000
			PSO	0.000 000	1.001 800	0.203 700	0.601 400
f_3	f_3	0.000 000	SA-APSO	0.000 000	-0.003 200	0.001 100	0.002 500
			PSO	0.000 000	-0.132 900	0.043 500	0.081 300
	x_3	0.000 000	SA-APSO	0.000 000	-0.000 600	0.000 200	0.000 300
			PSO	0.001 900	0.025 900	0.013 800	0.009 100
f_3	y_3	0.000 000	SA-APSO	0.000 000	0.000 000	0.000 000	0.000 000
			PSO	0.000 000	-0.146 100	0.072 400	0.244 100

声波在变压器内的传播路径及声压分布规律,并指出仅声波入射的最前沿部分能用于时延计算;文[18]通过研究不同声介质对超声信号等值波速和频谱影响,提出了一种基于频谱分析的波速修正方案,能有效减少波速估计导致的定位误差,均表明超声波在变压器油中传播时过程复杂,数据处理时需作为变量考虑。

3.2 局部放电超声定位数学模型

基于时差定位法(time difference of arrival method, TDOAM),将变压器模拟为一个立方体^[19]。以其中一个顶角为原点,建立的三维坐标系见图4。图4中局放源以 $P(x, y, z)$ 表示,各传感器分别以 $S_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $S_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $S_3(x_3, y_3, z_3)$ 及 $S_n(x_n, y_n, z_n)$ 表示。

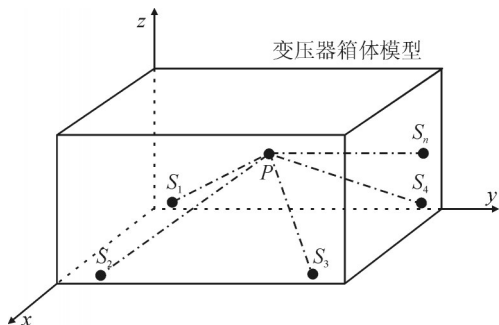


图4 局部放电定位原理图

Fig. 4 Principle of partial discharge location

基于TDOAM的时延估计原理图见图5。图5

以传感器 S_1 为基准传感器,用 τ_{i1} 表示第 i 号传感器与1号传感器接收到超声信号的时延估计值。

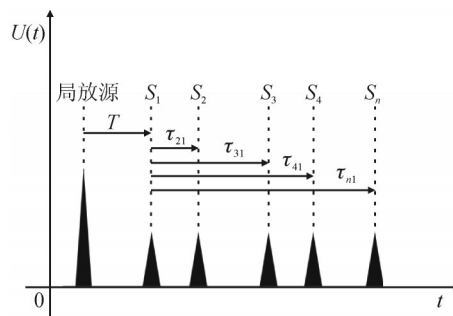


图5 基于TDOAM的时延估计原理图

Fig. 5 Schematic diagram of time delay estimation based on TDOAM

以 n 个传感器为例,局放源所在位置满足如下方程组

$$\begin{cases} (x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2=(vT)^2 \\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2=[v(T+\tau_{21})]^2 \\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2=[v(T+\tau_{31})]^2 \\ \dots \\ (x-x_n)^2+(y-y_n)^2+(z-z_n)^2=[v(T+\tau_{n1})]^2 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: (x, y, z) 为局放点的坐标; (x_i, y_i, z_i) 为各传感器的坐标; T 为基准传感器 S_1 到局放源的时间; v 为变压器油中超声波波速。将方程开根号,右式左移,则式(1)可转化为

$$f(x, y, z, v) = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{1/2} - [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2]^{1/2} - v\tau_{i1} = 0 \quad (2)$$

由于方程(2)为超定方程组,无法求其精确解,因此将其转化为优化问题,求取目标函数的最小值^[20]。

最终局放源定位的数学模型转化为求一带约束条件的优化问题

$$\begin{aligned} \min D(x, y, z, v) = & \sum_{i=2}^n \{ [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{1/2} - \\ & [(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2]^{1/2} - v\tau_{i1} \}^2 \\ \text{s.t.} & \begin{cases} 0 \leq x \leq x_{\max} \\ 0 \leq y \leq y_{\max} \\ 0 \leq z \leq z_{\max} \\ 1\,200\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \leq v \leq 1\,500\text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)中: $x_{\max}$ 、 $y_{\max}$ 、 $z_{\max}$ 分别为模拟变压器的长宽高; v 为变压器油中超声波波速; $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

4 基于SA-APSO的优化问题求解

对所建立的局放定位数学模型进行求解,算例中所取参数为:种群规模 $m=40$,最大迭代次数 $n=1\,000$,退火速度 $\alpha=0.98$, PSO 惯性权重 $w=0.6$,学习因子 $c_1=c_2=2.05$ 。

定位局放源需要获取的是三维坐标信息,待求解量存在3个未知数,因此,按照求解模型,4个传感器即可取得3个时延差,构造3个时延方程进行求解。当然,大于4个传感器获取更多时延信息,对坐标求解更有利。现引用文[21、22]的现场试验数据,1、2组数据来自文[21],第3组数据来自文[22]。

1)变压器箱体(长宽高): $1.2\text{ m} \times 0.8\text{ m} \times 1.0\text{ m}$,实际局放源坐标为: $P(0.5, 0.4, 0.4)\text{ m}$,各传感器坐标为: $S_1(0.6, 0.0, 0.5)\text{ m}$ 、 $S_2(0.0, 0.4, 0.5)\text{ m}$ 、 $S_3(0.6, 0.4, 1.0)\text{ m}$ 及 $S_4(1.2, 0.4, 0.5)\text{ m}$,时间参数:基准时间 $T=0.303\,05\text{ s}$, $\tau_{i1}=[0.364\,22; 0.434\,48; 0.505\,08]\text{ s}$,其中 S_1 为基准传感器, $i=2, 3, 4$ 。

2)变压器箱体(长宽高): $5.0\text{ m} \times 3.0\text{ m} \times 4.0\text{ m}$,实际局放源坐标为: $P(4.5, 2.6, 3.7)\text{ m}$,各传感器坐标为: $S_1(2.5, 0.0, 2.0)\text{ m}$ 、 $S_2(2.5, 1.5, 4.0)\text{ m}$ 、 $S_3(5.0, 1.5, 2.0)\text{ m}$ 及 $S_4(2.5, 3.0, 2.0)\text{ m}$,时间参数:基准时间 $T=0.002\,6\text{ s}$, $\tau_{i1}=[0.001\,6; 0.001\,5; 0.001\,9]\text{ s}$,其中 S_1 为基准传感器, $i=2, 3, 4$ 。

3)变压器箱体(长宽高): $1\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,实际局放源坐标为: $P(610, 320, 350)\text{ mm}$,各

传感器坐标为: $S_1(0, 200, 400)\text{ mm}$ 、 $S_2(0, 600, 300)\text{ mm}$ 、 $S_3(300, 1000, 200)\text{ mm}$ 及 $S_4(600, 1\,000, 500)\text{ mm}$,时间参数: $\tau_{i1}=[36; 100; 53]\text{ }\mu\text{s}$,其中 S_1 为基准传感器, $i=2, 3, 4$ 。

4)变压器箱体(长宽高): $1\,000\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm} \times 800\text{ mm}$,实际局放源坐标为: $P(610, 320, 350)\text{ mm}$,各传感器坐标为: $S_1(0, 510, 420)\text{ mm}$ 、 $S_2(300, 1\,000, 600)\text{ mm}$ 、 $S_3(1\,000, 450, 350)\text{ mm}$ 及 $S_4(840, 0, 450)\text{ mm}$,时间参数: $\tau_{i1}=[103; -166; -169]\text{ }\mu\text{s}$,其中 S_1 为基准传感器, $i=2, 3, 4$ 。

各定位算法结果见表3、4。表3、4中自适应算法定位结果来源于文[21],结果保留六位小数。

表3 算例1、2定位结果比较

Table 3 Comparison of the results of 1 and 2 mm

算例	坐标	实际局放点	SA-APSO定位结果	PSO定位结果	自适应算法定位结果
1	x	0.5	0.510 133	0.513 956	0.513 628
	y	0.4	0.441 697	0.471 435	0.489 461
	z	0.4	0.371 412	0.357 911	0.382 453
2	x	4.5	4.457 513	4.391 695	4.452 133
	y	2.6	2.501 795	2.486 524	2.505 537
	z	3.7	3.716 312	3.734 169	3.712 617

注:表3中自适应算法结果来自引用文[21],将结果保留6位小数。

表4 算例3、4定位结果比较

Table 4 Comparison of the results of 3 and 4 mm

算例	坐标	实际局放点	SA-APSO定位结果	PSO定位结果
3	x	610	609.776 2	604.417 3
	y	320	318.042 9	316.356 4
	z	350	353.181 5	355.635 9
4	x	610	611.250 2	594.541 3
	y	320	318.429 6	405.583 2
	z	350	352.894 7	759.021 4

综合误差分析:定义的距离误差公式为

$$\Delta r = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (5)$$

式(5)中: $P(x, y, z)$ 为局放源的位置; $P(x_i, y_i, z_i)$ 为计算所得的局放源坐标值。

各坐标误差由式(6)计算

$$\varepsilon = \left| \frac{D_r - D_e}{D_r} \right| \cdot 100\% \quad (6)$$

式(6)中: D_r 为真实值; D_e 为测量值

结合各定位点的误差情况进行分析,结果见表5。

表5 定位误差分析
Table 5 Positioning error analysis

算例	误差	SA-APSO 定位误差	PSO 定位误差
1	坐标 x 的误差/%	2.026 60	2.791 20
	坐标 y 的误差/%	10.424 3	17.858 80
	坐标 z 的误差/%	7.147 00	10.522 30
	综合误差 $\Delta r/\text{mm}$	5.156 15	8.402 93
2	坐标 x 的误差/%	0.944 16	2.106 78
	坐标 y 的误差/%	3.777 11	4.364 46
	坐标 z 的误差/%	0.440 86	0.923 49
	综合误差 $\Delta r/\text{mm}$	10.823 70	16.054 30
3	坐标 x 的误差/%	0.036 68	0.915 19
	坐标 y 的误差/%	0.611 59	1.138 62
	坐标 z 的误差/%	0.909 00	1.610 25
	综合误差 $\Delta r/\text{mm}$	3.741 96	8.729 58
4	坐标 x 的误差/%	0.204 95	2.534 21
	坐标 y 的误差/%	0.407 52	26.744 80
	坐标 z 的误差/%	0.827 06	116.863 00
	综合误差 $\Delta r/\text{mm}$	3.522 56	415.334 00

综合分析,通过模拟现场的系列试验,文中进行了大量数据的对比,最终得出如下结论:

1)无论从各坐标误差量或是综合误差量来看:SA-APSO算法定位效果均优于普通 PSO,同时略优于自适应优化算法,定位结果全局性强,稳定性好。

2)在SA-APSO算法中,模拟定位综合误差最大值小于3.7 mm,各坐标定位误差接近于0,满足工程实际要求,而普通 PSO算法结果常有突变极值出现,影响定位精度,因此,在定位值的精确度上,SA-APSO算法更优。

5 结论

1)提出了一种改进的粒子群算法SA-APSO,该算法在自适应粒子群的基础上引入模拟退火思想,提高了全局搜索能力,克服了早熟现象,让结果更为可信。

2)多极值测试函数仿真结果表明,在收敛精度及稳定度上SA-APSO都优于基本 PSO,说明了该算法的有效性。

3)将SA-APSO应用于求解变压器油中局部放电的定位问题,定位结果精度高、稳定性好,符合工程实际要求,具有较强的实用性。

参考文献:

[1] 陈伟根,凌云,甘德刚,等. 基于聚类-小波神经网络的

油纸绝缘气隙放电发展阶段识别方法[J]. 电网技术, 2012,36(7): 126-132.

CHEN Weigen, LING Yun, GAN Degang, et al. Method to identify developing stages of air-gap discharge in oil-paper insulation based on cluster-wavelet neural network[J]. Power System Technology, 2012, 36(7):126-132.

[2] LU Y, TAN X, HU X. PD detection and localization by acoustic measurements in an oil-filled transformer[J]. IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, 2000, 147(2):81-85.

[3] 寇晓括. 基于局部放电检测的GIS绝缘缺陷危险程度评估技术研究[D]. 西安:西安交通大学,2012:81-91.

KOU Xiaokuo. Risk assessment on insulation defects in GIS based on partial discharge detection[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University, 2012:81-91.

[4] AZEVEDO C H B, MARQUES A P, RIBEIRO C J. Methodology for the detection of partial discharges in power transformers using the acoustic method[C]//IEEE EUROCON International Conference Devoted to 150 Anniversary of Alexander Popov St. Petersburg:IEEE, 2009:618-621.

[5] VELOSO G F C, DA SILVA L E B, LAMBERT-TORRES G, et al. Localization of partial discharges in transformers by the analysis of the acoustic emission[C]//2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Montreal: IEEE, 2006:537-541.

[6] DU B X, LU Y H, WEI G Z, et al. PD localization based on fuzzy theory using AE detection techniques[C]//Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Nashville:IEEE, 2005:449-452.

[7] 郑书生,李成榕,何 梦. 变压器局部放电复数域牛顿迭代-格搜索定位方法[J]. 中国电机工程学报. 2013, 33(9): 155-161.

ZHENG Shusheng, LI Chengrong, HE Meng. A novel method of newton iteration in complex field and lattice search partial discharges in transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9):155-161.

[8] 杜 林,赵秀娜,吴高林,等. 基于能量累计曲线-小波变换和动态加权统计的局部放电源定位方法[J]. 高电压技术, 2013, 14(5):75-80.

DU Lin, ZHAO Xiuna, WU Gaolin, et al. Location method of partial discharge sources based on energy cumulative curve-wavelet transform and dynamic weighting statistics[J]. High Voltage Technology, 2013, 14(5):75-80.

[9] 黄 亮. 变压器局部放电源的半定松弛逐次逼近定位方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2014:55-77.

HUANG Liang. Research on positioning method of successive approximation for partial discharge source based on semidefinite relaxation[D]. Chongqing:Chongqing University, 2014:55-77.

[10] 周力行,何 蕾,李卫国,等. 变压器局部放电超声信号

- 特性及放电源定位[J]. 高电压技术, 2003, 29(5):11-13.
- ZHOU Lixing, HE lei, LI Weiguo, et al. Research on characteristics of ultrasonic signal of partial discharge and partial discharge sources location in transformer[J]. High Voltage Technology, 2003, 29(5):11-13.
- [11] 李军浩, 司文荣, 王 颂, 等. 电力变压器局部放电定位方法的现状及发展[J]. 变压器, 2007, 11(6):40-44.
- LI Junhao, SI Wenrong, WANG Song, et al. Situation and development of PD location method for power transformer[J]. Transformer, 2007, 11(6):40-44.
- [12] 刘嘉林, 董 明, 安 珊, 等. 电力变压器局部放电带电检测及定位技术综述[J]. 绝缘材料, 2015, 23(8):1-7.
- LIU Jialin, DONG Ming, AN Shan, et al. Review of partial discharge live detection and location technology for power transformer[J]. Insulating Material, 2015, 23(8):1-7.
- [13] 刘化龙, 胡 钊. 序列二次规划-遗传算法及其在变压器局部放电超声定位中的应用[J]. 电网技术, 2015, 39(1):131-135.
- LIU Hualong, HU Po. Sequential quadratic programming-genetic algorithm and its application in ultrasonic localization of partial discharge in power transformers[J]. Power Grid Technology, 2015, 39(1):131-135.
- [14] 律方成, 程述一, 李燕青, 等. 超声法在电力变压器局部放电检测中的应用与展望[J]. 变压器, 2012, 49(8):45-49.
- LYU Fangcheng, CHENG Shuyi, LI Yanqing, et al. Application and prospect of ultrasonic method in partial discharge detection in power transformer[J]. Transformer, 2012, 49(8):45-49.
- [15] 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.
- LI Junhao, HAN Xutao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Technology, 2015, 41(8):2583-2601.
- [16] 罗日成, 李卫国, 李成榕, 等. 基于改进 PSO 算法的变压器局部放电超声定位方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(18):66-69.
- LUO Richeng, LI Weiguo, LI Chengrong, et al. Ultrasonic localization of partial discharge in power transformer based on improved particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(18):66-69.
- [17] 金广厚, 王 庆, 李燕青, 等. 局部放电超声信号在变压器模型中的传播[J]. 高电压技术, 2003, 23(9):14-38.
- JIN Guanghou, WANG Qing, LI Yanqing, et al. Propagation of partial discharge ultrasonic signal in power transformer model[J]. High Voltage Technology, 2003, 23(9):14-38.
- [18] 桂峻峰, 高文胜, 谈克雄. 变压器绕组局部放电脉冲响应的相关分析及电气定位[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(3):304-306.
- GUI Junfeng, GAO Wensheng, TAN Kexiong. Correlation of partial discharge pulse signals in transformer windings to locate discharge locations[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition) 2003, 43(3):304-306.
- [19] 侯慧娟, 盛戈皞, 苗培青, 等. 变电站局部放电特高频信号时延的双谱估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19):208-214.
- HOU Huijuan, SHENG Gehao, MIAO Peiqing, et al. Time-delay estimation algorithm of partial discharge UHF signals in substation based on bispectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19):208-214.
- [20] 汤 林, 胡 岳, 王红斌, 等. 基于插值相关法的局部放电特高频脉冲信号时延估计[J]. 高电压技术, 2015, 41(10):3320-3325.
- TANG Lin, HU Yue, WANG Hongbin, et al. Time-delay estimation of partial discharge UHF pulse signals based on interpolation cross-relation algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10):3320-3325.
- [21] 杨 扬, 王保保. 变压器局部放电超声定位中的自适应优化算法[J]. 现代电子技术, 2007, 11(3):100-104.
- YANG Yang, WANG Baobao. Application of unconstrained optimization in ultrasonic locating of transformer partial discharge[J]. Modern Electronics Technique, 2007, 11(3):100-104.
- [22] 董自胜. 电力变压器局部放电超声波定位的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011:42-51.
- DONG Zisheng. Study on ultrasonic location for partial discharge in power transformer[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011:42-51.

徐艳春(1974—),女,博士,副教授,主要从事微弱信号检测与继电保护研究工作。

王 泉(1991—),男,硕士研究生,从事变压器微弱信号的处理研究(通信作者)。