

梯度收缩法在局部放电定位中的应用

邵敏茹, 王保保, 豆增发

SHAO Min-ru, WANG Bao-bao, DOU Zeng-fa

西安电子科技大学 计算机学院, 西安 710071

College of Computer, Xidian University, Xi'an 710071, China

E-mail: shaominru_2006@hotmail.com

SHAO Min-ru, WANG Bao-bao, DOU Zeng-fa. Application of gradient shrink method in location of transformer partial discharge. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(29): 209-210.

Abstract: Gradient shrink method is employed to perform partial discharge location in transformer. Gradient shrink method combines the advantages of Newton method and Conjugate gradient method. It employs second-order derivatives of objective function, so the convergence rate of the method is outstanding, and it has rather good accuracy and quadratic termination property. The testing results show that gradient method can effectively solve partial discharge location problem in transformer.

Key words: gradient shrink; Newton method; conjugate gradient method; partial discharge; ultrasonic location

摘要: 使用梯度收缩法开展了变压器局部放电源的超声定位工作。梯度收缩法结合了牛顿法和共轭梯度法的优点, 应用目标函数的二阶导数, 收敛速度快, 具有牛顿法的“二次收敛”特性, 并具有较高的精确度。实验结果表明, 梯度收缩法能有效解决变压器局部放电点定位问题。

关键词: 梯度收缩; 牛顿法; 共轭梯度法; 局部放电; 超声定位

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.29.062 文章编号: 1002-8331(2009)29-0209-02 文献标识码: A 中图分类号: TP391

1 引言

电力变压器是现代电力系统中最重要、最昂贵的设备之一。其运行的安全可靠直接影响着整个电力系统的稳定性, 因而及早发现故障隐患是十分必要的。变压器故障的原因有很多, 而局部放电是危害最大的一个。因此, 对电力变压器进行在线监测, 及时准确地找出局部放电源的位置, 有利于发现变压器故障并对其进行及时准确的维修。

在变压器局部放电过程中, 较大的能量释放会激发机械振荡波, 产生超声波信号并以球面波的形式经固体、液体绝缘介质向四周传播。位于变压器外壳上的传感器能够接收这种超声信号, 并通过 GPRS 网络传输给计算机。计算机对接收到的超声信号进行处理, 并计算超声信号传播的时延^[1], 并联立求解定位方程组便可得到局部放电源的位置。

传统的局部放电定位方法有最小二乘法, 遗传算法, 自适应优化算法等等。其中, 最小二乘法由于起始点只有一个, 搜索路径单一, 因而易陷入局部最优, 而无法找到真正的放电源。遗传算法虽然具备全局搜索能力, 然而由于算法本身的问题, 迅速收敛得到的也可能是局部最优解。结合牛顿法和最速下降法得到的自适应优化算法在放电定位中也取得了良好的效果, 但是初始点的选取是否适当直接影响到计算结果, 若初始点选取不当, 则可能导致定位失败。

梯度收缩法(Gradient Shrink Method)是一种解决无约束优化问题的新算法^[2]。它结合了牛顿法和共轭梯度法的优点, 收

敛速度很快, 尽管在迭代过程中也用到了目标函数的二次导数, 却不用求 Hessian 矩阵的逆, 因此当 Hessian 矩阵为奇异阵时也可以进行计算。该文将梯度收缩法应用于变压器局部放电定位, 取得了良好的效果。

2 局部放电定位的数学模型

设变压器内局部放电源为 $P(x, y, z)$, x, y, z 均为未知量; 变压器外壳上装贴有 m 个传超声传感器, 其坐标分别为 $S_1(x, y, z)$, $S_2(x, y, z)$, $S_3(x, y, z)$, \dots , $S_m(x, y, z)$ 。当局部放电源发生放电时, 产生的超声波以球面波向四周传播, 放电点与传感器的位置关系如图 1 所示。

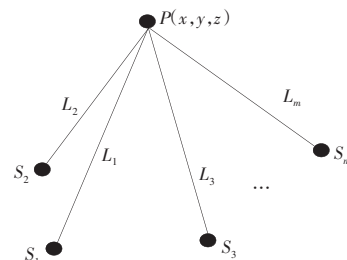


图1 放电点与传感器的位置关系

设超声波从放电点 P 到传感器 S_i 的传播时间为 T , τ_{1i} 为第 i 个传感器 S_i 和第 1 个传感器 S_1 之间的时延, v_s 为超声波在变

作者简介: 邵敏茹(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为计算辅助变压器故障检测; 王保保(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域为智能检测、计算机图像处理; 豆增发(1979-), 博士研究生, 主要研究领域为智能信息处理。

收稿日期: 2008-06-03 修回日期: 2008-09-08

压器内部传播的等值声速,为未知量。则放电点到达各传感器的距离分别为:

$$\begin{cases} L_1=v_s T_1=v_s T \\ L_2=v_s T_2=v_s (T+\tau_{12}) \\ \dots \\ L_m=v_s T_m=v_s (T+\tau_{1m}) \end{cases} \quad (1)$$

由此可知放电源 P 与传感器 S_i 的关系为:

$$f_i(x,y,z,v)=\sqrt{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2+(z-z_i)^2}-v_s(T+\tau_{1m})=0 \quad (2)$$

($i=1, 2, 3, \dots, m$)

上述定位方程有 4 个未知量 x, y, z, v_s , 对于方程组(2), 选用以下的函数作为目标函数

$$\min F(x,y,z,v)=\sum_{i=1}^m f_i(x,y,z,v)^2 \quad (3)$$

这样,就把变压器局部放电问题转化为无约束优化问题。

3 梯度收缩法

存在多经典算法求解无约束优化问题式(3),如牛顿法、最速下降法、共轭梯度法等。在这些无约束优化技术中,大多数利用目标函数的梯度。牛顿法的收敛速度非常高,并具有“二次终止”特性,但是当遇到 Hessian 矩阵为奇异的时候,牛顿法及其各种变种都因为无法计算 Hessian 矩阵的逆而失败^[3]。而由 Fletcher 和 Reeves 提出的共轭梯度法虽然相比最速下降法收敛速度有所改进,却远远比不上牛顿法的速度^[3]。但是由于共轭梯度法仅仅需要用到目标函数的一阶导数,因此奇异的 Hessian 矩阵不会导致这种方法失败,而且这种方法也具有“二次终止”特性。在这里引入一种梯度收缩法^[2],它结合了牛顿法和共轭梯度法的优点,应用到变压器局部放电中,显示了其优越性。

3.1 算法描述

对于无约束优化问题 $\min_x f(x), x \in R^4$, 设其最优解为 x^* , 则 $\nabla f(x^*)=0$ 。事实上,由于计算机数值计算精度限制, $\nabla f(x^*)=0$ 精确成立的可能性非常小。所以,引入的算法以 $\|\nabla f(x)\|$ 的最小化为基础,使其逐渐收缩到 0, 以达到 $f(x)$ 极小化。该方法基于梯度的收缩,所以称“梯度收缩法”^[2]。在梯度收缩法中,将收敛条件 $\nabla f(x^*)=0$ 扩展为一个子问题,即用变形的共轭梯度法对 $\min_s F(s)$ 进行求解问题,其中步长 $s=x_{k+1}-x_k$ 。这个过程相当于努力收缩 $\|\nabla f(x)\|$ 到尽可能小。

3.2 算法步骤

- (1)任意指定初始点 $x_0 \in R^4$, 精度 $\varepsilon=10^{-6}, k=0$ 。
- (2)若 $\|\nabla f(x_k)\| < \varepsilon$, 输出 $x^*=x_k$, 迭代结束; 否则转(3)。
- (3)计算 $A(x_k)=2\nabla^2 f(x_k)^T \nabla^2 f(x_k), b(x_k)=-2\nabla^2 f(x_k)^T \nabla f(x_k)$ 。
- (4)使用共轭梯度法求解子问题 $\min_s F(s)=\min_s [\frac{1}{2}S^T A(x_k)S - b^T(x_k)s]$, 求 s 的最优解:

①设定 s 的初始值 $s_0=0$, 指定精度要求 $\varepsilon'=10^{-6}, k'=0$, 计算 $r_0=A(x_k)s_0-b(x_k), d_0=-r_0$

②若 $\|r_k\| < \varepsilon$ 或 $k=n$, 则子问题求解停止, 转(5)。

③计算 $d_{k'+1}=-r_{k'+1}+\beta_k d_k$, 其中 $\alpha_k=\frac{(r_k, d_k)}{(d_k, A(x_k)d_k)}, s_{k'+1}=\alpha_k d_{k'+1}+s_k$

$$s_{k'+1}+\alpha_k d_{k'}, r_{k'+1}=r_k+\alpha A(x_k) d_{k'}, \beta_k=\frac{(r_{k'+1}, A(x_k) d_{k'})}{(d_{k'}, A(x_k) d_{k'})}$$

④ $k'=k'+1$, 转②。

(5) $x_{k+1}=x_k+s; k=k+1$, 转(2)。

4 算例及讨论

实验变压器的规格为 $0.8 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。当有不同的放电源发生放电时,采集到较强信号的传感器位置也会发生变化。由于传感器的位置也会影响到局部放电定位的结果,因此当某放电源发生放电时,在变压器外壁每个面上选择一个采集到较强信号的传感器作为有效传感器,记为 S_1, S_2, S_3, S_4 。变压器及传感器模型如图 2 所示。

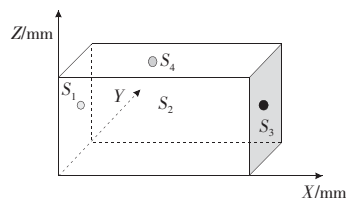


图 2 变压器及传感器模型

当有局部放电发生时,传感器接收变压器内部的超声波信号,并经过 GPRS 网络传给计算机。计算机首先计算超声传播的时延,结合梯度收缩法求解定位方程。经计算,得到定位结果如表 1 所示。由表 1 可知,梯度收缩法在变压器局部放电源定位中得到的放电源坐标与真实放电源的位置偏差不大,效果比较理想,其表现是值得肯定的。

表 1 梯度收缩法对局部放电点的定位结果

迭代变量	真实放电源/m 超声传播速度/(m/s)	传感器坐标/m	定位结果/m
$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ v \end{bmatrix}$	0.100	$S_1(0.00, 0.30, 0.40)$	0.227 819 173
	0.100	$S_2(0.30, 0.00, 0.40)$	0.101 064 051
	0.500	$S_3(1.20, 0.40, 0.50)$	0.411 440 463
	1 400	$S_4(0.30, 0.80, 0.40)$	1 399.120 000
	0.500	$S_1(0.00, 0.60, 0.80)$	0.375 066 093
	0.400	$S_2(0.30, 0.00, 0.70)$	0.379 224 051
	0.500	$S_3(1.20, 0.65, 0.70)$	0.530 893 030
	1 400	$S_4(0.30, 0.75, 0.65)$	1 397.873 601
	1.000	$S_1(0.00, 0.60, 0.80)$	1.105 116 297
	0.800	$S_2(1.00, 0.00, 0.70)$	0.692 900 352
	0.500	$S_3(1.20, 0.65, 0.70)$	0.474 861 906
	1 400	$S_4(0.80, 0.70, 0.60)$	1 390.928 027

同时,在该变压器参数条件下,将梯度收缩法得到的定位结果与最小二乘法以及遗传算法做了对比,如表 2 所示。由表 2 的结果可以看出,在传感器位置相同的情况下,梯度收缩法得到的结果明显优于最小二乘法以及遗传算法。由于自适应优化算法的结果与初始点选取有很大关系,所以在这里不予以比较。

5 结束语

将梯度收缩法应用于变压器局部放电定位,充分体现了梯度收缩法的优越性。梯度收缩法保留了牛顿法的“二次收敛”特性, Hessian 矩阵的奇异不会导致计算失败; 和共轭梯度法相比,梯度收缩法的收敛速度大大加快。另外,计算精度随着数据