

基于 ART 算法的运动阳极弧根电流密度分布重建研究

徐铁军, 荣命哲, 吴 翊, 马 强

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 笔者提出应用 ART 算法根据测量得到的两个垂直方向上的弧根线性电流分布重建弧根电流密度分布的方法。对 Drouet M G 实验测量的弧根在 2 个互相垂直方向的电流分布进行计算, 获得了 2-D 弧根电流密度分布并加以讨论。结果表明, ART 重建算法结合分离极板法所测的弧根电流分布是获得其电流密度分布的一个切实可行而有效的途径。

关键词: 阳极弧根; 电流密度分布; 代数迭代重建技术; 分离极板法

中图分类号: TM561.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0005-03

Reconstruction of Current Density Distribution in a Moving Anode Arc Root Based on the ART Algorithm

XU Tie-jun, RONG Ming-zhe, WU Yi, MA Qiang

(State Key Lab of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This paper presents a method to reconstruct the current density distribution in arc root using the measured linear current distribution in two orthogonal directions, by applying the ART (algebra reconstruction technique). Calculation is conducted on the basis of the experimental results of linear current distribution in two orthogonal directions obtained by M G Drouet, and then the 2-D current density distribution is yielded and discussed. This study indicates that the ART combined with the linear current distribution in arc root measured via split electrode method is an effective and practical approach to reconstruct the current density distribution in moving anode arc root.

Key words: anode arc root; current density distribution; ART; split electrode method.

0 引言

弧根电流密度是表征电弧特性的基本参数之一。它与电弧在与电极接触区域(即弧根)的热流分布有着密切关系, 它决定着弧根的温度分布以及电弧电极的烧蚀率。因此, 弧根电流密度分布的测试和研究对于电器触头组织性能的预测和质量控制, 以及电弧的计算机模拟尤其是 3-D 模拟有着重要的意义。

早期的弧根电流密度测试方法均属于间接测量法, 主要包括烧蚀痕迹分析法和高速摄影法, 这两种方法都存在缺点和局限性^[1], 并且这两种方法很难对电流密度分布进行分析。文[2-5]给出了几种弧根电流密度分布的直接测试方法。

然而, 孤立地从运动弧根在两个互相垂直方向上的电流分布分析, 还不够描述其电流密度 2-D 分布。弧根电流分布是弧根电流密度在一定方向直线

积分的分布^[6], 因而需要引进适当的算法来由线积分分布反演电流密度分布本身, 这是典型的反问题之一, 笔者将弧根电流密度与待重建的断面图像作对比, 从而利用在医学成像领域广泛应用的 ART 算法由其线积分分布重建弧根电流密度分布。

1 数学模型

对弧根电流密度分布进行离散化处理, 见图 1, 设弧根域为 Ω , 弧根运动方向 V_x 平行于 x 方向。作正方形区域 Q 使其包含 Ω , 并且一边沿 x 向, 将 Q 划分成 $N=n \times n$ 正方形网格, 每个正方形网格边长为 δ 。将这些网格按照一定顺序编号, 文中以从上到下、从左至右的顺序。记第 k 网格的电流密度为 j_k , 那么第 i 列网格(图中竖直阴影网格)电流密度之和 ΔI_i 为

$$\Delta I_i = \sum_{k=1}^N w_{i,k} j_k \delta^2 \quad i=1 \cdots n \quad (1)$$

式(1)中, 系数 $w_{i,k}$ 表示第 k 个网格电流密度对 ΔI_i 的贡献, 由下面公式决定

收稿日期: 2008-04-09; 修回日期: 2008-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50525722)。

作者简介: 徐铁军(1976-), 男, 陕西省西安市人, 博士, 研究方向为电弧等离子体诊断理论与技术。

$$w_{i,k} = \begin{cases} 1 & \text{第 } k \text{ 个网格在阴影中} \\ 0 & \text{第 } k \text{ 个网格不在阴影中} \end{cases} \quad (2)$$

同理,第 l 行网格(图中水平阴影网格)电流密度之和 ΔI_l 为

$$\Delta I_l = \sum_{k=1}^N w_{l,k} j_k \delta^2 \quad l=1 \cdots n \quad (3)$$

显然, ΔI_l 是弧根电流沿 x 方向的变化量,可由式(4)近似得到

$$\Delta I_l = \frac{dI(x)}{dx} \delta \quad i=1 \cdots n \quad (4)$$

式(4)中, $\frac{dI(x)}{dx}$ 是弧根电流沿 x 方向的分布。

同样的, ΔI_l 是弧根电流沿 y 方向的变化量,由式(5)决定。

$$\Delta I_l = \frac{dI(y)}{dy} \delta \quad l=1 \cdots n \quad (5)$$

所以,式(1)和(3)中所有的 ΔI_i 和 ΔI_l 都可以通过分别测试弧根电流沿 x 和 y 方向的电流或电流分布得到。

求解式(1)和(3),可以获得近似的弧根电流密度 2-D 分布。显然对于 $n \times n$ 个未知的 j_k , 方程组是欠定的,而且系数矩阵是稀疏矩阵,因而需要引入合适的求解算法。

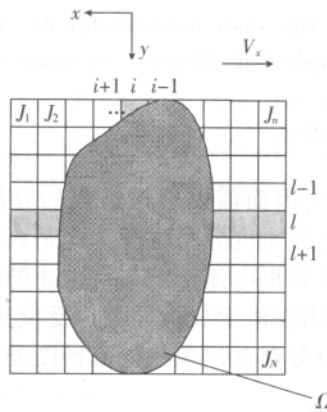


图1 运动弧根电流密度分布离散化模型

2 ART 算法

ART 算法是 CT 成像技术重要的重建算法之一,由 Kaczmarz 于 1937 年在求解相容性线性方程组时提出的^[7]。ART 算法将丢失的投影看作缺少的方程,必然收敛于相容性线性代数方程组的真实解^[8],因而 ART 算法特别适用于对少量投影数据的图像重建^[9],并且由于收敛快、精度高的特点,所以在医学成像和工业无损探测领域具有广泛的应用。

ART 算法将待重建的 2-D 断层图像 $f(x, y)$ 离散化为 $n \times n$ 个正方形网格,小网格内部 $f(x, y)$ 视为常数,称为一个像素,这 $n \times n$ 个像素按一定顺序排列成一 $N=n \times n$ 维向量,用 f_j 代表第 j 个像素内的值, N 为像素总数。对应于第 i 条射线的投影值 p_i , 图像重

建可以描述为一个线性方程组

$$p_i = \sum_{j=1}^N w_{ij} f_j \quad i=1, 2, \dots, M \quad (6)$$

式(6)中, f_j 为待求像素值; w_{ij} 为投影权因子,代表了第 j 个像素对第 i 条射线的贡献; M 为射线总数。ART 算法的迭代公式为

$$f_j^{(k+1)} = f_j^{(k)} + \lambda \left[\frac{p_i - \sum_{n=1}^N w_{in} f_n^{(k)}}{\sum_{n=1}^N w_{in}^2} \right] w_{ij} \quad i=1, 2, \dots, M \quad (7)$$

式(7)中, λ 是松弛因子 ($0 < \lambda < 2$), k 为迭代次数。

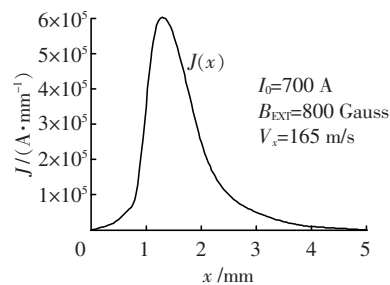
ART 算法求解是根据高维函数在各个方向的直线积分重建高维函数本身的处理过程,是典型的反问题之一。

将电流沿 x 方向的分布对应于 CT 领域中射线沿竖直方向扫描的投影,相应的,电流沿 y 方向的分布对应于射线沿水平方向扫描的投影,这样对于弧根电流密度分布的求解问题就可以借鉴根据射线投影重建被测物体断面图像的方法。

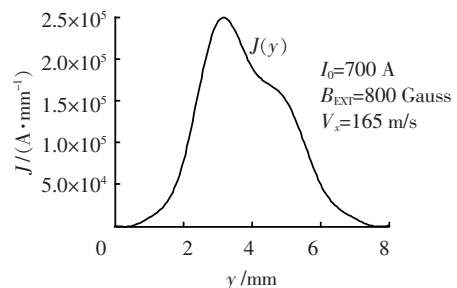
3 计算结果及讨论

3.1 阳极弧根实验结果

文 [10] 测试了在空气环境下,直流电弧电流 700 A、电极间隙为 1.6 mm,由 80 mT 横向磁场驱动电弧沿 x 方向运动的电弧条件下,弧根电流沿 x 方向的电流分布和其横向磁场方向即 y 方向的电流分布。图 2(a)为弧根电流沿 x 方向电流分布,原点在弧根右上端。图 2(b)是弧根电流沿 y 方向的电流分布。从图 2 中可以看出,弧根电流在这两个方向都不对称,这些结果只是弧根电流沿两个方向的电流分



(a) 弧根沿 x 方向的电流分布



(b) 弧根沿 y 方向的电流分布

图2 Drouet M G 实验获得的弧根沿两个方向电流分布^[10]

布,还不能反映弧根电流密度分布的状况。

3.2 计算结果及讨论

对生成两个方向电流密度分布的投影权因子矩阵调用 ART 算法,经过迭代计算 30 次,获得弧根 2-D 电流密度分布,见图 3。从图 3 中可以看出,电流密度峰值达到 $1.5 \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$,在数量级上与文[3,11]获得的结果一致。另一个较小的峰值达到 $1.2 \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。弧根主体轮廓呈现出具有拖尾的近似椭圆形,且峰值电流密度区域倾向于弧根前部。由重建结果可以得出弧根最大半径为 3 mm,大于弧痕法测量的静态弧根半径^[11]。这主要是由于弧根在运动时,周围的磁场和气流场的联合作用下,弧根在运动方向的尺寸被压缩而纵向尺寸得到拉伸所致。

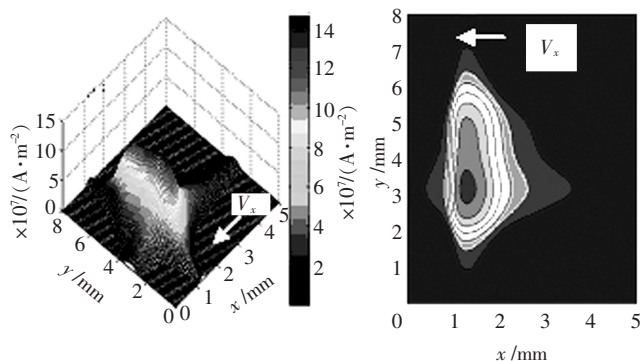


图 3 由 ART 算法迭代 30 次计算的弧根电流密度分布

同时,还可以根据 ART 算法得到的结果计算出电流密度超过 $10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 的区域约占弧根总面积的 14.68%。

对 ART 算法重建结果得出的沿 x 和 y 方向电流分布,并与 Drouet M G 的测量结果进行对比,见图 4。ART 算法重建结果沿 x 方向电流分布与 Drouet M G 的测量结果吻合很好,最大误差为 0.5%, y 方向电流分布最大误差为 3%,由此看来,应用 ART 算法根据实验获得的电流分布值来重建弧根电流密度分布是非常有效的^[12-16]。

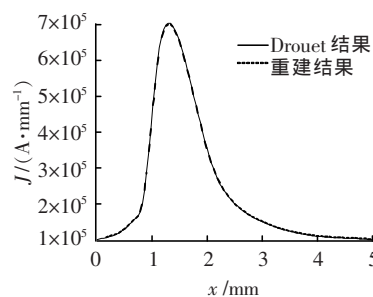
4 结语

通过对弧根作离散分析,并应用 ART 算法对 Drouet M G 实验测出的两个电流分布结果进行计算,获得了运动阳极弧根 2-D 电流密度分布,可以得出以下结论:

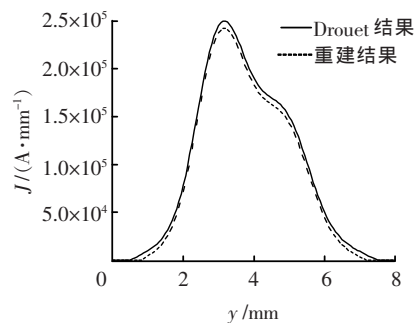
(1) 弧根电流密度分布与其电流分布的模型用线性方程组来描述,而电流分布可用分离极板法或 Drouet M G 的“狭缝-孔结构”的电极形式测试得到。

(2) ART 算法可以有效的根据所测的电流分布重建弧根电流密度分布,ART 算法所做的是通过大量线积分反演其本身的过程。

笔者的研究对于无论是阳极弧根还是阴极弧根电流密度分布的研究和测试提出了一种新的理论模



(a) 重建结果 x 方向电流分布与测量结果的电流分布比较



(b) 重建结果 y 方向电流分布与测量结果 y 电流分布比较

图 4 重建结果电流分布与 Drouet M G 测量结果电流分布比较

型,由此方法获得的结果将会为各研究领域提供更为准确且直观的弧根电流密度分布参数。

参考文献:

- [1] SZENTE R N, DROUET M G, MUNZ R J. Method to Measure Current Distribution of an Electric Arc at Tubular Plasma Torch Electrodes[J]. Rev. Sci. Instrum, 1990, 61(4): 1 259-1 262.
- [2] SHIH K T. Anode Current Density in High-current Pulse Arcs[J]. Journal Applied Physics. 1972(12): 5 002-5 005.
- [3] 贾昌申, 肖克民, 刘海侠, 等. 直流 TIG 焊接电流密度研究[J]. 西安交通大学学报, 1994, 28(4): 33-38.
- [4] BEAUDET R, DROUET M G. Technique, Applicable to Circuit Breakers, for the Measurement of the Spatial Distribution of the Current in an Arc [C]// IEEE Switchgear Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1974: 1 054-1 062.
- [5] NESTOR O H. Heat Intensity and Current Distribution at the Anode of High Current Inert Gas Arcs [J]. Journal of Applied Physics, 1962(5): 1 638-1 648.
- [6] DROUET M G, GRUBER S. Dynamic Measurements of Cathodic Emission in a Moving Arc [C]// IEEE Switchgear Committee of the IEEE Power Engineering Society, 1975: 105-112.
- [7] HERMAN G T. Image Reconstruction from Projections [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [8] GROETSCH C W. Inverse Problems in the Mathematical Sciences[M]. Braunschweig: Vieweg, 1993.
- [9] ANDERSEN A H. Algebraic Reconstruction in CT from Limited Views [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 1989, 8(1): 50-55.
- [10] DROUET M G, BEAUDET R, JUTRAS R. Anode Current Distribution in a Moving Arc [J]. AIAA Journal, 1975, 13 (7): 929-933.

(下转第 14 页)

况下首匝过电压峰值均小于雷电波作用下的情况。参考雷电侵入波的耐受值, 可以认为匝间绝缘也能耐受操作侵入波。

5 结论

笔者在已知电抗器分布参数的基础上, 用链型分布参数等值电抗器, 采用 PSCAD/EMTDC 软件分析了电抗器在雷电、操作冲击下的电位分布。得到以下结论:

(1) 不论是雷电还是操作冲击, 电抗器外圈匝间过电压值大于内圈, 较内圈严重, 这主要是由于外圈匝数较少导致单匝分压大于内圈;

(2) 电抗器首匝承受的匝间过电压最大。电抗器在端口遭受雷电波直接侵入时(端口对地), 外圈首匝匝间过电压可达 19.8 kV, 首匝承受的匝间过电压最大, 后续匝逐渐衰减, 最低约为 16 kV; 雷电波正常侵入时(端口对端口), 外圈首匝承受匝间过电压为 19 kV, 尾部的匝间电压约为 15 kV。电抗器匝间绝缘设计值为 18 kV \times 2=36 kV (每根导体的雷电冲击电压耐受值为 18 kV), 因此匝间绝缘可以承受雷

(上接第 7 页)

[11] 孙明. 触头弧根瞬时电流密度的测量[J]. 高压电器, 1996, 32(1): 22-24.

[12] DROUET M G, WANG Bo-han, MORIN R. Arc Foot Motion, Current Distribution, Arc Short-circuiting and Arc Clogging in an Air-blast Interrupter [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100: 3 350-3 355.

[13] HSU K C, ETEMADI K, PFENDER E. Study of the Free-burning High-intensity Argon Arc [J]. J. Appl. Phys., 1983, 54(3): 1 293-1 301.

(上接第 10 页)

5 结语

笔者所提方法很好地解决了自适应噪声对消器滤波参数难以确定和经验模态分解基于极值包络而不能很好提取信号特征的问题, 将 EMD 的多分辨思想引入到自适应噪声对消器滤波处理中, 实现了窄带干扰的有效抑制。

参考文献:

[1] 谢良聘, 朱德恒. FFT 频域分析算法抑制窄带干扰的研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 6.

[2] 杨永明, 孙才新, 李新. 局部放电在线监测中干扰的识别及抑制方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(3): 242-243.

[3] 唐炬, 孙才新, 许中荣, 等. 局部放电信号中的白噪声和窄带干扰[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 8-10.

[4] 王晓蓉, 杨敏中, 严璋. 电力设备局部放电测量中抗干扰研究的现状和展望[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 41-45.

[5] 乐波, 曹戌平, 李俭, 等. 局部放电在线监测中的自适应数字滤波器研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(6): 617-621.

[6] 杨永明, 孙才新, 严欣平, 等. 抑制局部放电在线监测中周期

电侵入波;

(3) 操作波正常侵入时(端口对端口), 首匝过电压小于 7 kV; 操作波直接侵入电抗器端口时(端口对地), 首匝过电压小于 10 kV。操作波侵入的两种情况下首匝过电压峰值均小于雷电波作用下的情况。参考雷电侵入波的耐受值, 可以认为匝间绝缘也能耐受操作侵入波。

参考文献:

[1] AMON J F, FERNANDEZ P C, ROSE E H, et al. 巴西在将限流电抗器用于短路电流限值方面取得的成功经验 [J]. 电气应用, 2006, 25(1): 4-8.

[2] BELLEI T A, CAMM E H, RANSOM G. Current-limiting Inductors Used in Capacitor Bank Applications and Their Impact on Fault Current Interruption [C]// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2001: 603-608.

[3] 李刚, 李宏光. 限流电抗器对短路电流的影响分析 [J]. 煤矿自动化, 2003(1): 31-32.

[4] 殷可, 高凯. 应用串联电抗器限制 500 kV 短路电流分析 [J]. 华东电力, 2004, 32(9): 7-10.

[14] ANDERSON A H, KAK A C. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART): A New Implementation of the ART Algorithm [J]. Ultrason. Imaging, 1984(6): 81-94.

[15] MERCURE H P, DROUET M G. Dynamic Measurements of the Current Distribution in the Foot of an Arc Propagating Along the Surface of an Electrolyte [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101: 725-736.

[16] 张顺利, 张定华, 熬波, 等. 不完全投影数据图像重建的 ART 算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(10): 8-10.

性干扰的级联式 IIR 陷波滤波器的研究 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(5): 75-78.

[7] 于鹏娟, 聂卫东. 一种可用于局部放电在线检测的数字滤波器[J]. 变压器, 1999, 36(2): 30-33.

[8] 赵学梅, 王立欣, 蔡惟铮. 局部放电在线监测中的自适应滤波方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(20): 29-32.

[9] 黄成军, 郁惟镛. 基于小波分解的自适应滤波算法在抑制局部放电窄带周期干扰中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 107-111.

[10] 钱勇, 黄成军, 戚伟. 基于经验模态分解的自适应滤波算法在局部放电窄带干扰抑制中的应用 [J]. 继电器, 2006, 34(22): 27-31.

[11] HUANG N E, WU M C, LONG S R, et al. A Confidence Limit for the Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectral Analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 2003(459): 2 317-2 345.

[12] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 112-114.

[13] 贾嵘, 徐其惠, 田录林. 基于经验模态分解的水轮发电机组局部放电信号提取[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 146-150.