

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.022

应用于紫外检测技术的 ICA 图像融合算法*

马立新, 张建宇, 周小波

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要:针对高压电气设备电晕放电故障点定位问题,对 ICA 图像融合算法、紫外检测技术和紫外成像系统等方面进行了研究。将 ICA 图像融合算法运用到高压设备电晕放电检测中,根据高压设备局部放电会发出紫外光的原理和紫外光波长在日盲 200 nm ~ 400 nm 波段的特点,对高压设备局部放电区域采集紫外光图像和可见光图像进行图像融合,在融合图像中准确定位局放故障点。研究针对紫外图像和可见光图像灰度直方图差别大的特点,对传统 FastICA 算法进行优化,以优化后的权值对融合系数进行加权处理,建立融合规则使局放故障点表达更加清晰,并将算法运用于紫外成像系统。研究表明,改进后的 FastICA 算法对比于紫外成像仪的其他算法所得图像信息更加丰富、定位更加精准,融合图像可以有效地定位高压设备电晕放电故障点。

关键词:紫外检测技术;图像融合;FastICA 算法;融合规则

中图分类号:TM51;TP391.41

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0111-05

ICA image fusion algorithm applied in UV detection technology

MA Li-xin, ZHANG Jian-yu, ZHOU Xiao-bo

(Department of Electrical Engineering School of Optical-Electrical and Computer Engineering,
University of Shanghai for Science&Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the phenomena of locate the point of high voltage corona discharge equipment fault, The ICA image fusion algorithm and ultraviolet detection technology, ultraviolet imaging system was studied to solve the problem. The ICA image fusion algorithm was used in high voltage corona discharge equipment testing, ultraviolet discharge image and visible image was acquired and integrated in the discharge area according to the ultraviolet wavelength is from 200 nm to 400 nm in sun-blind band. Then the accurate discharge point was located on fusion image. Research aiming at uv and visible light image's gray histogram were much different, traditional FastICA algorithm and the weights of weighted fusion coefficient was optimized before processing, fusion rules was established to make partial discharge fault point express more clear. Experimental results show that the algorithm compare to the rest of the ultraviolet imager's algorithms, the image information is richer, more accurate positioning and image fusion can effectively locate the high voltage corona discharge equipment point of failure.

Key words: UV detection technology; image fusion; fastICA algorithm; fusion rules

0 引 言

电气故障紫外线检测是近几年发展起来的故障检测技术。紫外成像仪是较常用的紫外检测设备,所采用的就是紫外检测技术。由于在日常情况下,局部放电是很难用肉眼看到的,但可以通过紫外摄像机捕捉

到紫外光信号。紫外成像仪的原理是先采集故障点的紫外图像和可见光图像,然后采用图像融合技术,将两幅图像融合成一幅既包含局放点紫外光又包含可见光背景的新图像,从而准确定位故障点。国外先进的紫外成像仪有以色列 ofil 公司的全日盲紫外成像仪 SUP-BER、UVOLLE-VC 和南非 CSIR 公司生产的 CoroCAM

收稿日期:2015-09-02

基金项目:上海张江国家自主创新重点资助项目(201310-PI-B2-008)

作者简介:马立新(1960-),男,陕西安康人,工学博士,教授,主要从事电力系统稳定性与优化运行、电气系统故障诊断与模式识别、群体智能与智能电网、电力能效测评系统、调速系统智能控制等方面的教学与科研工作。E-mail:malx_ail@sina.com

紫外成像仪等^[1-2]。

图像融合技术^[3]是紫外检测技术的核心部分,是把两个或者多个信号源的图像按照一定的规则融合成新的图像,然后生成融合图像。融合图像可以很好地表达融合源图像的图像信息。紫外光与可见光图像融合是近十几年才发展起来的图像融合技术,目前市面上的紫外成像仪大都采用紫外图像融合技术,但所运用的融合算法却不尽相同,例如加权融合算法和拉普拉斯融合算法都是比较常见的融合算法。

独立成分分析^[4](independent component analysis, ICA)是上世纪 90 年代以后才发展起来的信号处理方法,其主要作用是从混合信号中分离出独立的、原始的信号。独立成分分析在信号去噪方面也有很广泛的用途。不同于其他融合算法,ICA 算法可以有效地去除图像系数冗余性,在应用到图像融合技术时具有很大的优势。目前市场上的紫外成像仪使用的图像融合方法有很多,应用最广泛的是加权融合法,但是效果一般。由于笔者研究的紫外图像融合算法适用于电气设备局放检测,它对融合后的局放故障点的轮廓、信息量、能量值等要求很高。

文献[7]提出的方法在紫外图像和可见光图像融合中的效果并没有达到预想的要求,故本研究通过对系数处理和对 ICA 算法的改进,弥补 ICA 算法直接应用于紫外图像融合的优点,以获得较好的融合效果。

1 紫外成像系统设计

双通道电晕紫外检测系统是紫外成像仪常采用的紫外成像系统,该系统把可见光分为两条光路,一条为可见光通道,另一条是紫外光通道,两条通道采集的图像信号通过图像采集卡传输到 PC 端,然后进行图像融合,得到可识别电晕故障点的融合图像,从而准确定位故障^[5-8]。

双通道电晕紫外检测系统结构图如图 1 所示。

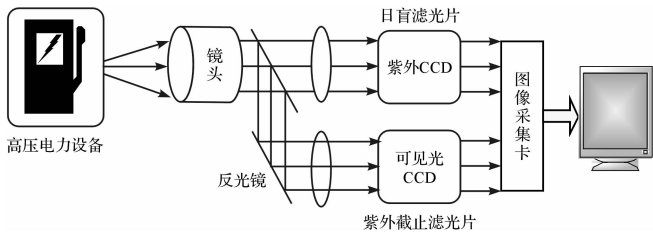


图 1 双通道紫外检测系统

2 ICA 算法基本原理

ICA 算法实际上是一种将源信号从未知混合信号

中分离算法,它可以把信号分解成若干个互相独立的成分,是一种根据源信号系数的统计特性,仅由观察的混合信号分离出未知源信号的过程^[9]。

首先假设有 N 个观测信号 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 记做 X ,它可由 N 个独立变量 $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ 线性组成,即 $X = AS$ 。(式中 A 是混合矩阵)。

ICA 算法的基本原理是在源信号 S 和混合信号 A 均不可知的情况下,求得解混矩阵 W ,使得 X 经过 W 之后所得输出 $Y(Y = WS)$ 是 S 的最优逼近。

ICA 解混模型示意图如图 2 所示。

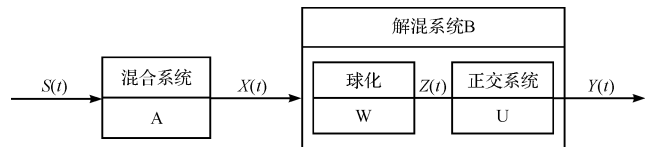


图 2 解混模型示意图

为了方便起见,在进行独立分量分析的时候一般进行以下假设:

- (1)待观察信号数目 M 不小于源信号数目 N ,取 $M = N$,即信混合之后所得矩阵为满秩矩阵。
- (2)源信号 S 的每个分量之间是保持相互统计独立的。
- (3)源信号的每个分量最多只有一个是服从高斯分布的。

目前对于 ICA 算法的研究分为两大类,一是迭代估计方法,二是统计学的代数方法。由于源信号具有独立性和非高斯性,故研究者可以运用统计学和信息论等方法对其进行研究,例如针对最大熵、最大似然、负熵和最小互信息等计算方法对独立分量进行估算。其中,常用的 ICA 算法有 FastICA 算法,Infomax 算法和最大似然估计算法等^[9]。

3 ICA 算法的改进方法

本研究使用的算法是由芬兰赫尔辛基大学 Hyvärinen 等学者提出的 FastICA 算法,也叫作固定点算法。FastICA 是用于寻优的迭代算法,与其他算法相比, FastICA 算法具有速度快的特点,与传统神经网络算法的不同之处在于其可以对信号进行批量处理,这样可以为算法的迭代过程节省大量时间。利用最大熵原理来接近负熵的原理是 FastICA 算法的基本思想,故其可以说是一种最小化估计分量互信息的神经网络方法,通过合适的非线性函数来寻找最优^[10]。

FastICA 算法采用的是固定点迭代优化算法,具体

可以总结为以下几步:

(1) 将混合信号 X 进行中心化,即令混合信号系数均值为 0;

(2) 白化数据 $Z = Q \times X$,其中 Q 是白化矩阵,之后算法对 Z 进行操作;

(3) 获取需要估计分量的数量,设置最大迭代次数 $P \leftarrow 1$;

(4) 设置 W_p 为随机初始权矢量,使其满足 $\|W_p(0)\|_2 = 1$;

(5) 令 $W_p = E\{Zg(W_p^T Z)\} - E\{g'(W_p^T Z)\}W$ (式中: g, g' —导函数和非线性函数);

(6) 归一化:令 $W_p = W_p / \|W_p\|$,如果未收敛,则返回步骤(3)。

和其他文献不同的是,本实验所用信号源为紫外图形和可见光图像,两幅图像在图像能量、低频系数灰度值方面差异很大,若直接进行 ICA 分析,将会出现紫外图像信息丢失的现象,为使处理会图像系数既可以表达紫外图像信息又具备可见光图像信息,本研究对 FastICA 算法的改进思想是首先把两幅源图像小波分解后的系数进行加权处理,即 $D = aD_1 + bD_2$,其中 D_1 为可见光图像系数, D_2 为紫外图像系数,从而形成一组新的系数 $D(d_1, d_2, d_3 \cdots d_n)^{[11]}$ 。

对于加权系数的选取规定 $a + b = 1$,经过多次实验加权系数取值范围为 a 的取值范围 $[0.1, 0.4]$ 。为了使处理后的图像保持清晰且图像系数尽可能保留原可见光图像信息并含有紫外图像信息,实验决定在保证平均梯度 $AG > 2.0$ 的前提下,在 $[0.1, 0.4]$ 之间选取 30 个点进行择优,以加权后图像和原紫外光图像的相关系数 $Corr$ 和加权后图像与原可见光图像偏差指数 B_{index} 为权值择优依据,选取 $Corr - B_{index}$ 最大时的 a 的值为最优权值。

相关系数 $Corr$ 的公式为:

$$Corr = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (X_{ij} - \bar{X})(Y_{ij} - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N X_{ij} - \bar{X})^2 (\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Y_{ij} - \bar{Y})^2)}} \quad (1)$$

式中: X, Y —待融合的紫外和可见光图像中提取的系数。

偏差指数 B_{index} 的公式为:

$$B_{index} = \frac{1}{m+n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{|x_{i,j} - x'_{i,j}|}{x_{i,j}} \quad (2)$$

式中: $x_{i,j}, x'_{i,j}$ —原图像和处理之后图像的灰度值。

取 $Corr - B$ 值最大时求得的 a 值,然后得到加权

所得系数 D 。加权后的图像系数同时具备紫外图形和可将光图像的信息,然后将加权所得的系数 D 和可见光图像系数 D_1 进行串接组合,形成混合信号 X 。设每幅图像的系数长度为 N ,则 X 为大小为 $2 \times N$ 的矩阵。

将所得的混合系数 X 进行独立分量分析,从而得到源信号的估计系数 $Y(y_1, y_2, y_3, \cdots, y_n)$ 。此时系数 Y 可以很好地表达融合图像的高频系数和低频系数,但对于紫外图像故障点的表达并不是很理想。本研究使用对图像系数绝对值取大的融合规则,将源信号估计系数 Y 与加权系数 D 进行融合,达到对故障点清晰显示的效果,融合规则如下:

若 $abs(D(i, j)) - abs(Y(i, j)) > 0$, 则 $M(i, j) = D(i, j)$;

若 $abs(Y(i, j)) - abs(D(i, j)) > 0$, 则 $M(i, j) = Y(i, j)$;

其中: (i, j) —图像系数矩阵在第 i 行、第 j 列的数值。

4 仿真实验及方法比较

本次实验选取一组电缆线上的紫外图像和可见光图像,尺寸为 369×463 。笔者采用 4 种融合方法与本研究改进方法进行比较,分别是:

- (1) 简单加权融合法;
- (2) 拉普拉斯金字塔融合算法;
- (3) 小波变换融合算法;
- (4) 传统 ICA 融合算法;

其中方法一是市面上的紫外成像仪通常采用的基于小波的加权平均融合法,方法二采用文献[12]中的拉普拉斯融合算法,采用 5 层金字塔分解,其融合规则是:顶层子图像采用基于区域平均梯度取大进行融合,其余层子图像采用基于区域能量取大进行融合。方法三采用基于小波变换的低频系数取平均值,高频系数求绝对值然后取极大的融合规则^[13]。方法四直接采用 FastICA 算法对图像进行融合。以上小波变换所采用小波均为 bior1.1 小波。对紫外图像和可见光图像融合仿真实验结果及对比图如图 3 所示。

由图 3(f)、3(g) 可以很直观地看出传统的 FastICA 图像融合方法在人眼视觉上效果不好,对局部故障点的表达很不清晰。为了更好地评价改进后方法和他四种方法的融合效果,本研究采用以下 5 个指标进行评价^[14]:

- (1) 熵(H)。熵表示图像的平均信息量,是表达

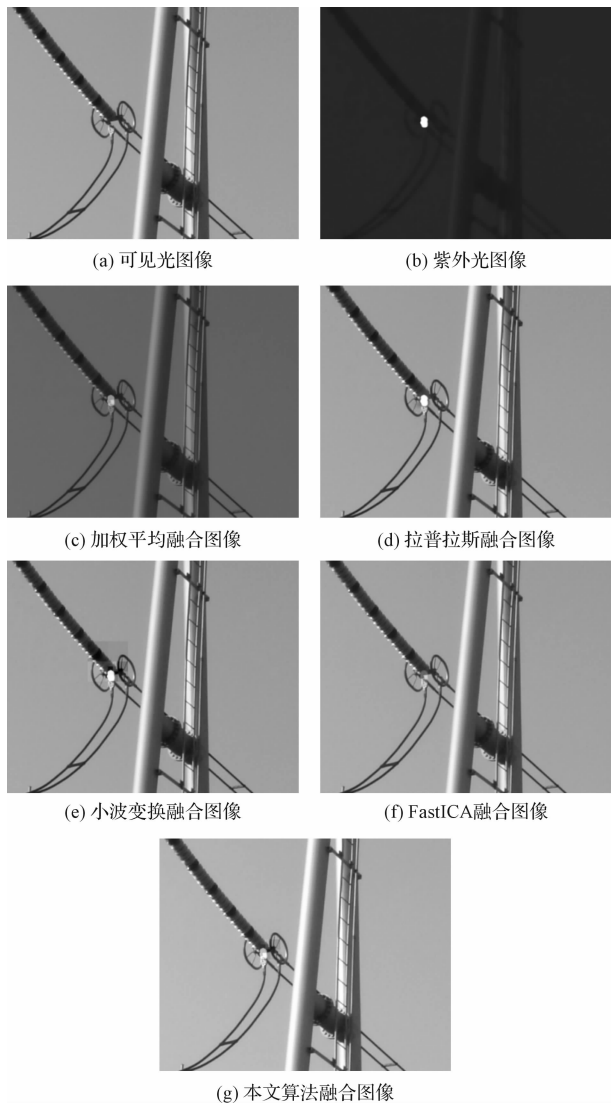


图 3 紫外和可见光图像以及融合图像

图像信息是否丰富的评价指标;

(2)平均梯度(AG)^[15]。平均梯度表示图像的清晰度,即图像对细节对比的表达能力和纹理反差特征;

(3)空间频率(SF)。空间频率可以很好地表达融合图像在空间域中的总体活跃度;

(4)相关系数(Corr)。相关系数表示的是两幅图像之间的相关性,相关系数越小则两幅图像的相似程度越低;

(5)标准差(SD)。标准差是把融合图像灰度相对于灰度均值的离散情况数值化;

若评价指标的数值越大,则表示图像融合效果越好。四种融合算法的融合图像评价指标对比如表 1 所示。

由表 1 的评价指标可以看出,本研究提出的图像融合方法的各项评价指标都优于其他方法,达到了较好的融合效果。

表 1 几种算法的融合图像评价指标对比

融合方法	<i>H</i>	<i>AG</i>	<i>SF</i>	<i>Corr</i>	<i>SD</i>
方法一	5.948 2	2.596 5	8.489 1	0.988 2	23.303 8
方法二	6.823 9	4.902 0	16.478 5	0.991 4	43.672 5
方法三	6.865 2	4.974 8	16.573 5	0.990 2	43.965 7
方法四	6.813 9	4.784 6	16.013 8	0.999 3	43.179 6
本研究方法	6.866 6	5.108 8	17.273 1	0.995 4	46.587 8

5 结束语

紫外检测技术在电气故障方面的应用前景十分广阔,笔者根据紫外检测技术的原理,针对紫外图像和可见光图像的特点改进了传统的 ICA 图像融合算法。并将实验结果与另外 4 种算法进行比较,通过评价指标可以看出改进后算法的可行性和优越性。经过仿真实验将该算法运用于紫外成像系统,可以准确定位电晕放电故障点,图像清晰度高、过渡平滑、融合效果很理想,适用于紫外成像技术和紫外成像设备。

紫外成像仪常用的方法是加权融合方法,需要根据图像采集区域实际情况进行调节融合参数。本研究融合方法可以自主调节融合参数,融合图像更加清晰,轮廓更加完整,故障点定位更加精准。

参考文献 (References) :

[1] 马 斌,周文俊,汪 涛,等. 基于紫外成像技术的极不均匀电场电晕放电[J]. 高电压技术,2006,32(7):13-16.

[2] 汪金刚. 高压设备放电紫外检测技术及其应用研究[D]. 重庆大学电气工程学院,2008.

[3] 郭 雷,李晖晖,鲍永生. 图像融合[M]1 版. 北京:电子工业出版社,2008.

[4] 杨福生,洪 波. 独立分量分析原理与应用[M]1 版. 北京:清华大学出版社,2006.

[5] 李 洪,庞其昌,靳贵平,等. 应用于双光谱检测的图像融合技术[J]. 暨南大学学报:自然科学与医学版,2006,27(5):687-692,709.

[6] LINDNER M, ELSTEIN S, LINDER P, et al. Daylight com-na Discharge imager[J]. EPRI.,1998(8):4349-4352.

[7] 张海峰,庞其昌,陈秀春,等. 高压电晕放电特征及其检测[J]. 电测与仪表,2006,43(2):6-8,31.

[8] 王胜辉,律方成,李和明,等. 高压电气设备紫外成像检测管理系统的开发与应用[J]. 高压电器,2009,45(4):146-149.

[9] 曹 杰,龚声蓉,刘纯平,等. 一种基于 ICA 的多源图像融合算法[J]. 中国图象图形学报,2007,12(10):1857-1860.

[10] 岳 晋,宦若虹,上官晋太,等. 一种新的 ICA 域图像融

合算法[J]. 光电工程,2008,35(5):129-134.

- [11] 陈 蜜, 佘剑辉, 李德仁, 等. 独立分量分析的图像融合算法[J]. 光电工程,2007,34(6):82-87.
- [12] 陈 浩, 王延杰. 基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合算法研究[J]. 激光与红外,2009,39(4):439-442.
- [13] 李 伟, 庞其昌, 李 洪, 等. 小波变换在紫外图像融合中的应用[J]. 科学技术与工程,2005,5(15):1067-1069.

- [14] X. Otazu, Introduction of sensor spectral response into image fusion methods. Application to wavelet-based methods, Geoscience and Remote Sensing[J]. **IEEE Transactions on**,2005:2376-2385.
- [15] 陈 超, 江 涛, 徐文学, 等. 基于平均梯度的多聚焦图像融合方法研究[J]. 山东建筑大学学报,2009,24(2):133-137.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

马立新, 张建宇, 周小波. 应用于紫外检测技术的 ICA 图像融合算法[J]. 机电工程,2016,33(1):111-115.

MA Li-xin, ZHANG Jian-yu, ZHOU Xiao-bo. ICA image fusion algorithm applied in UV detection technology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(1):111-115.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 87 页)

计的脉冲发送模块进行仿真分析,得到稳定且调频范围在1 Hz—25 MHz 的脉冲信号,完全覆盖伺服电机的工作频段,其中 1 Hz 的分辨率可使电机加减速更加平稳,再对所发送的脉冲进行计数,实现精确的位置控制。在硬件平台上进行实际测试,测试结果表明,基于 FPGA 的脉冲发送模块设计,发送脉冲频率稳定、计数准确,调频范围广、波动小、分辨率高。而且接口设计完善、耗费资源少、可移植性强,当需要控制多组伺服电机时候,配置简单方便。

参考文献(References):

- [1] 谢立峰. 基于 FPGA 的 DDS 信号发生器的简单实现[J]. 沿海企业与科技,2007(12):53-55.
- [2] 许 伍, 郎 朗, 李腾飞. 基于 FPGA 的手摇脉冲发生器模块的实现[J]. 重庆工商大学学报,2013,30(10):70-72.
- [3] 王 怒, 许 雄, 熊振华. 基于 FPGA 的脉冲控制发生器设计与研究[J]. 微电机,2010,43(12):53-57.
- [4] 张孝飞, 赵孔新, 张赛男. 基于 FPGA 的脉冲发生器波形模块设计[J]. 长春工业大学学报,2011,32(3):258-262.
- [5] 黄兆斌, 黄云龙, 余世明. 几种步进电机加减速方法的对

- 比研究及其应用[J]. 机电工程,2011,28(8):951-953.
- [6] 陆 俊, 陈安明. 基于 FPGA 技术的高速数控 DDA 插补器的设计与研究[J]. 控制与检测,2010,(10):52-54,60.
- [7] 何 磊, 孔令成. DDS 技术在高频手术驱动器驱动中的应用[J]. 自动化仪表,2013,34(1):73-75.
- [8] 夏宇闻. Verilog 数字系统设计教程[M]. 2 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2013.
- [9] 孙立志. PWM 与数字化电动机控制技术[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [10] 梁劲斐, 于兆勤, 郭钟宇. 基于 FPGA 的纳秒级微细电解加工脉冲电源研制[J]. 机电工程技术,2013,42(9):97-100.
- [11] 陈 刚, 张 京, 唐 建. 一种基于 FRGA 的 PCIe 总线及基 DMA 的设计方法[J]. 兵工自动化,2014,35(5):79-81.
- [12] 马 泽, 胡旭东, 杨亮亮. 基于 FPGA 的速度动态估算方法[J]. 机电工程,2013,30(11):1420-1424.
- [13] 陶仁浩, 罗福源. 基于 DSP 和 FPGA 提高增量式光电编码器精度的研究[J]. 机电一体化技术,2012(4):25-28.
- [14] 周 峰, 王纪森. 新型通用液体伺服控制器的设计[J]. 液压气动与密封,2014(8):36-39.

[编辑:张 豪]