

〈红外应用〉

## 基于红外弱目标提取的绝缘设备故障检测研究

王媛彬, 尹 阳

(西安科技大学 电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对红外图像中背景与目标的复杂性和多样性给变电站绝缘套管状态监测带来的困难, 提出基于红外弱目标提取的检测方法。首先进行二维小波分解, 将低频分量进行 Retinex 理论增强, 其余高频分量进行局部方差映射, 完成小波重构后进行对比度增强, 最后实现基于分步双阈值的目标提取。实验结果表明, 该方法不仅改善了绝缘套管局部过热区域的红外图像的处理效果, 还实现了过热点及其连带过热区域的提取和区分。

**关键词:** 绝缘套管; 红外弱目标; 小波分解; 局部方差; 对比度增强; 阈值分割

**中图分类号:** TP391.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2018)02-0193-07

### Research on the Insulation Equipment Fault Detection Based on Infrared Weak Target Extraction

WANG Yuanbin, YIN Yang

(School of Electric and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The complexity and diversity of backgrounds and targets in the infrared images bring difficulties in monitoring of the insulation sleeve in the substation. In order to overcome this deficiency, a method based on infrared weak target extraction is proposed. First, the image is decomposed by using the two-dimensional wavelet. Then, the low-frequency components are enhanced by retinex theory, and local variance mapping for the other high-frequency components is executed. After wavelet reconstruction, contrast enhancement is carried out. Finally, the target is extracted on the basis of the step-and-double threshold. Experimental results show that the method not only improves infrared image processing effect of the local superheated region of the insulating sleeve, but also realizes the extraction and division of the hot spot and its associated overheated region.

**Key words:** insulation sleeve, weak infrared target, wavelet decomposition, local variance, contrast enhancement, threshold segmentation

## 0 引言

红外目标检测是一项重要技术, 独特的原理特性使得它在电力系统中的应用很广泛<sup>[1]</sup>。变电站作为电力系统中的重要枢纽, 设备的绝缘安全尤为重要, 绝缘子就是保障变电站设备安全运行的重要器件之一, 目前用来检测其缺陷的方法种类很多, 红外图像法就是其中应用最广泛的方法之一<sup>[2]</sup>。但是红外检测中一个微弱的局部过热点如果不能被及时发现, 异常状态就会继续恶化, 最终造成严重的系统故障。所以这对

红外弱目标的检测提出了新的要求<sup>[3]</sup>。传统的基于阈值的分割法<sup>[4]</sup>、基于形态学的分割法<sup>[5]</sup>、基于纹理的分割法<sup>[6]</sup>、以及基于分形学理论的检测法等<sup>[7]</sup>, 分别利用图像在灰度、纹理等方面的差异实现了对一般弱目标的检测。但是对于光照不均匀引起的红外图像质量差、图像中存在大量干扰噪声和面积干扰背景等情况, 这些方法就不能够准确地提取出目标。

小波分析在时域和频域都有良好的局部化分析和细化能力, 这使其在带电设备缺陷的红外检测方面有着独特的优势<sup>[8]</sup>。用多级向量小波变换的高频部分进行

收稿日期: 2017-02-23; 修订日期: 2017-11-24.

作者简介: 王媛彬 (1977-), 女, 博士, 副教授, 主要从事图像处理与模式识别等方面研究。E-mail: 13379232752@163.com.

基金项目: 陕西省教育厅自然科学专项 (14JKk1467); 西安科技大学博士启动资金 (2014QDJ010)。

简单分割并加以决策可得到小目标的粗略位置<sup>[9]</sup>。根据在小波分解的不同尺度下，小波函数抑制噪声和提取边缘的能力不同，可以在小波分解尺度增加的情况下，将噪声和背景杂波逐步地从图像中分离出，进而得到目标的轮廓<sup>[10]</sup>。

考虑到传统检测方法的不足和小波变换良好的细节分析能力，本文结合了 Retinex 增强理论对红外图像进行亮度调节从而突出暗区域的细节，另外还将能够有效反映图像局部变化情况的局部特征作为图像局部变化的检测工具，针对小波分解后的不同分量进行局部特征提取，进而强化和突出红外图像中的弱小目标，最后通过灰度统计和分析实现对变电站绝缘套管局部过热点目标和连带过热点区域的准确提取。

### 1 实验的软硬件环境

#### 1.1 硬件环境

目前的变电站中广泛使用红外检测系统主要包括带云台的在线式红外传感器、传输光纤和后台处理器。本文的实验硬件环境是模拟变电站红外检测系统，通过红外摄像头获取图像，然后由图像数据压缩与传输控制单元控制经过局域网的传输，最后在 PC 机上实现软件的检测结果显示。模拟的实验硬件平台如图 1 所示。

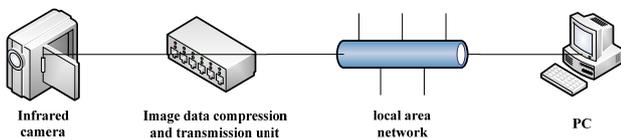


图 1 模拟的实验硬件平台

Fig.1 Simulated experimental hardware platform

图 1 中所示的硬件环境核心是数据压缩与传输控制单元，该单元中首先要实现图像的 A/D 转换，该环节的主要工作是实现在指定的时间间隔内完成静态红外图像的获取，并将获取的图像数据压缩后通过无线网络传输到后台服务器的图像处理和分析单元。该单元内部的功能模块构成如图 2 所示。

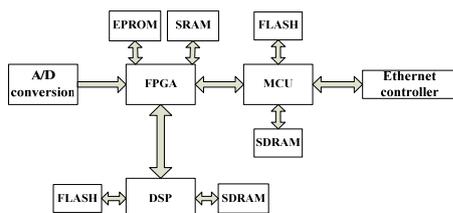


图 2 图像压缩与传输控制单元的内部功能模块构成

Fig.2 The internal function module of the image compression and transmission unit

该单元中包含 A/D 转换模块、FPGA 模块、DSP

模块、扩展存储模块和 MCU 模块，每个模块都有自己的功能：

**A/D 转换模块的功能：**将采集的模拟图像信号转换为数字图像信号并传入控制器。

**FPGA 模块的功能：**控制系统的静态图像采集和存储的时序逻辑，控制和协调各模块的工作，完成与 DSP 模块的通信。

**DSP 模块的功能：**对传入的图像数据进行编解码，对图像数据的进行压缩，期间还要控制外部扩展存储的读取，完成向 MCU 的压缩后数据传输，期间还实现与 FPGA 模块和 MCU 模块的通信。

**扩展存储模块的功能：**EPROM 用来保存 FPGA 的配置信息，SDRAM 用来存储处理前后的图像数据，FLASH 用来保存控制器的程序。SRAM 用来储存 FPGA 缓存的图像信号，其不需要刷新电路就可以保存。

**MCU 模块的功能：**将 DSP 模块处理完的数据进行缓存，然后通过无线网将数据传给后台服务器。

#### 1.2 软件环境

实际的变电站红外检测系统中的软件部分由系统管理、云台控制、红外检测和信息发布 4 个模块组成。本文所研究内容的软件功能是在 MATLAB 编程环境下实现的，具体功能包括红外检测的核心功能，包括图像的调用、图像处理以及检测结果显示，其中核心是图像处理环节软件功能组成如图 3 所示。

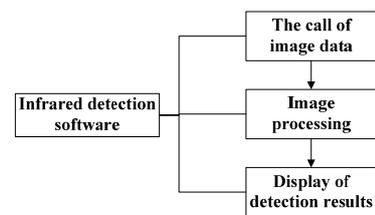


图 3 实验软件的功能组成

Fig.3 The functional composition of the experimental software

### 2 算法仿真与结果分析

#### 2.1 红外弱目标建模

如图 4 所示的绝缘套管上存在图 5 所示的故障区域，其中包含局部过热点和相关的过热区域。一般情况下只包含少数的像素点，没有明显的结构形状特征和灰度特征，同时背景的干扰增加了检测的难度。

目标信号的强弱通常可用对比度 (C) 和信噪比 (SNR) 来描述，因此对于包含红外弱目标的图像可用(1)式的模型进行描述<sup>[11]</sup>：

$$f(x,y) = T(x,y) + B(x,y) + n(x,y) \quad (1)$$

式中:  $f(x,y)$ 为获取的图像;  $T(x,y)$ 为目标;  $B(x,y)$ 为背景;  $n(x,y)$ 为噪声。

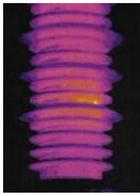


图4 绝缘套管红外图像  
Fig.4 Infrared image of insulated bush

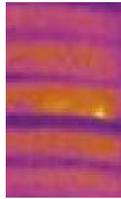


图5 故障区域  
Fig.5 Fault area

信噪比(SNR)指的是目标与噪声的强度比值。

SNR的定义如式(2):

$$SNR = \frac{\mu_T - \mu_B}{\sigma_B} \quad (2)$$

式中:  $\mu_T$ 表示目标灰度的平均值;  $\mu_B$ 、 $\sigma_B$ 分别表示背景灰度的均值和标准差。信噪比反映了信号与噪声的强度关系。当信噪比为1时信号将完全被噪声淹没。当信噪比为4时,信号与背景杂波的强度已经相当了。

对比度描述的是目标和周围背景干扰之间的灰度差异。其定义如式(3):

$$C = \frac{\mu_T - \mu_B}{\mu_B} \quad (3)$$

式中:  $\mu_T$ 、 $\mu_B$ 分别表示目标和背景灰度的平均值。

## 2.2 目标提取算法步骤及框图

在传统的小波分解后,对低频部分进行 Retinex 理论增强,对3个高频部分分别提取其局部特征图像,然后重构出红外图像,最后进行红外图像对比度增强和弱目标分割。具体的算法步骤如下:

步骤1:对输入图像进行一级的二维小波分解;

步骤2:对分解后低频分量进行 Retinex 算法增强,将分解后的水平、垂直和对角高频细节分量映射为局部特征图像;

步骤3:进行二维小波重构,得到亮度优化和细节强化后的红外图像;

步骤4:对得到的红外图像进行对比度增强,突出弱目标;

步骤5:完成弱目标提取。

由上述设计的算法步骤可以绘制出如图6的算法框图。

## 2.3 故障区域红外图像预处理

### 2.3.1 二维离散小波变换

小波是一类在有限区间内快速衰减到0的函数,其平均值为0。小波趋于不规则、不对称,用它来分析比用平滑的正弦波更能描述信号的局部特征。小波变换是一种在有限宽度的范围内进行的变换。小波变换的基函数是一种不仅在频率上而且在位置上变化

的有限宽度的波形函数。根据尺度因子和平移因子的取值是否连续将小波分析分为连续小波分析和离散小波分析。相较于连续小波分析而言,离散小波分析在缩放因子和平移因子的选取上进行了优化,大大缩减了计算量<sup>[12]</sup>。

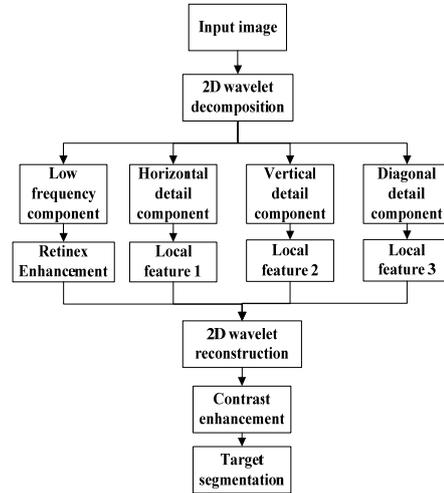


图6 分割算法框图

Fig.6 Block diagram of segmentation algorithm

在实际应用中,小波基函数的选取需要考虑其正交性、紧支性和对称性,考虑其正交性是为了保证提取的信息特征不相关,提高目标的检测准确性;而对称性是要考虑它适应于人眼的视觉系统,又使得图像在边界处易于处理;紧支性特点是为了使图像处理简单、计算量小。本文选择使用 Haar 小波作为变换工具, Haar 小波的小波母函数和尺度函数分别定义为:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (4)$$

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \phi(2^j t - k) \quad (5)$$

式中:  $j, k \in \mathbb{Z}$ ;  $j$ 是伸缩因子;  $k$ 是平移因子。Haar 函数定义为:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$\phi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

对图5所示局部过热点图像进行1层的二维小波分解后得到的各个成分如图7(a)和(b)所示所示,其中(a)为小波分解后的低频分量及其灰度分布的三维表示,(b)从左往右依次为水平、垂直和对角高频分量。

### 2.3.2 Retinex 算法增强

根据 Edwin Land 提出的理论,一幅图像  $S(x,y)$  分解为两幅不同的图像:反射物体图像  $R(x,y)$  和入射光图像  $L(x,y)$ ,对于观察图像  $S$  中的每个点  $(x,y)$  用公式可表示为:

$$S(x,y)=R(x,y)\cdot L(x,y) \quad (8)$$

实际上, Retinex 理论是通过图像  $S$  来得到物体的反射性质  $R$ , 也就是去除了入射光  $L$  性质得到物体原本该有的样子<sup>[13]</sup>。基于 Retinex 算法的增强步骤如下:

1) 利用取对数的方法将照射光分量和反射光分离, 即:

$$S(x,y)=\log[R(x,y)]+\log[L(x,y)] \quad (9)$$

2) 用高斯模板对原图像做卷积, 即相当于对原图像做低通滤波, 得到低通滤波后的图像  $D(x,y)$ ,  $F(x,y)$  表示高斯滤波函数:

$$D(x,y)=S(x,y)\cdot F(x,y) \quad (10)$$

3) 在对数域中, 用原图像减去低通滤波后的图像, 得到高频增强的图像  $G(x,y)$ :

$$G(x,y)=R(x,y)-\log[D(x,y)] \quad (11)$$

4) 对  $G(x,y)$  取反对数, 得到增强后的图像  $R(x,y)$ :

$$R(x,y)=\exp[G(x,y)] \quad (12)$$

该方法对光照不均匀的红外图像进行亮度调节, 增强了暗区域, 提升了图像的整体质量。对于小波分解后的低频分量增强后的效果及其灰度分布的三维表示如图 8(a) 所示。

与图 7(a) 所示的增强前的效果对比来看低频分量的整体亮度得到了改善, 从三维表示图中可以看到图

8(a) 相较于图 7(a) 多了一个灰度峰值, 这说明 Retinex 增强算法进一步突出原来不明显的过热区域。

### 2.3.3 局部特征映射

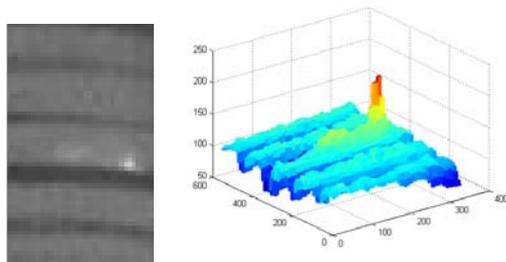
方差是描述随机变量与其均值的偏离程度的一个量<sup>[14]</sup>。作为局部方差, 在一个  $(m+n)\times(m+n)$  的邻域内, 设  $\mu(i,j)$  为灰度均值,  $\sigma_2(i,j)$  为局部方差, 则:

$$\mu(i,j)=\frac{1}{(m+n+1)^2}\sum_{x=i-m}^{i+m}\sum_{y=j-n}^{j+n}f(x,y) \quad (13)$$

$$\sigma_2=\frac{1}{(m+n+1)^2}\sum_{x=i-m}^{i+m}\sum_{y=j-n}^{j+n}[f(x,y)-\mu(i,j)]^2 \quad (14)$$

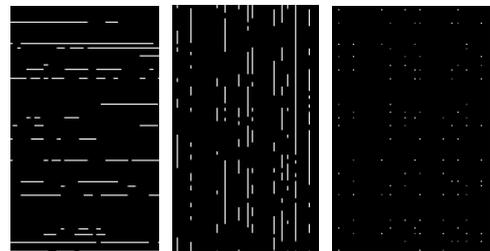
式中:  $f(x,y)$  为图像的任一像素的灰度值;  $f(i,j)$  为邻域中心点的像素, 一般邻域取得比较小, 这样可以将图像分成一系列小区域, 通过滑动可以计算各个小块的方差, 即可将原图像映射为局部方差图。对图 7(b) 所示小波分解后的 3 个高频分量进行局部方差图像映射, 映射结果如图 8(b) 所示。

以水平分量为例, 将所示的局部方差图与图 7(b) 中的水平分量进行对比, 可以看出原始水平分量中变化的高频分量得到了加强和突出, 这就进一步证明和凸显了局部方差对目标的加强作用。



(a) 增强前的低频分量图及其三维表示

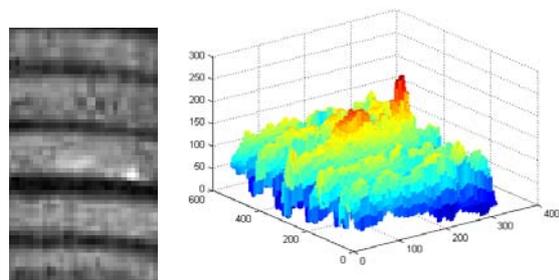
(a) The low frequency component diagram of the original graph and its three dimensional representation



(b) 增强前的水平、垂直和对角高频分量图

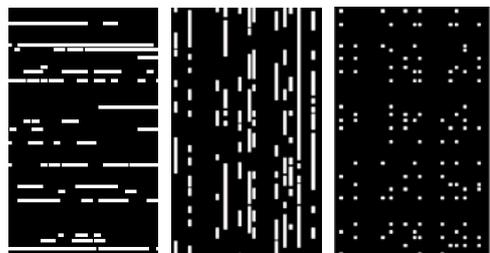
(b) The horizontal, vertical and diagonal high frequency components before the enhancement

图 7 增强前的各小波分量 Fig.7 Wavelet components before enhancement



(a) 增强后的低频分量图及其三维表示

(a) Enhanced low-frequency component graph and its three-dimensional representation



(b) 水平、垂直和对角高频分量的局部方差图

(b) Local variance diagram of horizontal, vertical and diagonal high frequency components

图 8 增强后的各小波分量 Fig.8 Each wavelet components after enhancement

将上述的 Retinex 算法增强后的低频分量和局部方差映射后的 3 个高频分量进行小波重构得到如图 9(a)所示的效果图和三维灰度分布图。

从图 9(a)可以看出过热区域中的局部过热点已经得到了加强和突出, 三维表示中直观地显示出了过热点的位置和灰度值。

### 2.3.4 图像对比度增强

从重构后的过热区域的三维表示可以看出过热点与周围热区域的灰度值差异, 这为实现局部增强创造了条件。局部对比度增强方法可以突出目标细节信息<sup>[15]</sup>。局部对比度增强算法的公式可表示为:

$$I'(i,j) = m(i,j) + a[I(i,j) - m(i,j)] \quad (15)$$

其中:

$$m(i,j) = \frac{1}{b \times c} \sum_{i,j \in Q} I(i,j) \quad (16)$$

式中:  $m(i,j)$ 表示规定矩形区域  $Q$  内部的各个像素的均值。  $b$  和  $c$  分别为矩形区域  $Q$  的长和宽;  $I(i,j)$ 表示处理前区域中心像素的灰度值;  $I'(i,j)$ 表示处理后区域中心像素的灰度值;  $a$  为修正因数。

通过式(15)和式(16)可以看出, 当  $a > 1$  时, 若  $I(i,j) > m(i,j)$ , 则  $I'(i,j) > I(i,j)$ ;

若  $I(i,j) < m(i,j)$ , 则  $I'(i,j) < I(i,j)$ , 这样就可以增强目标的细节信息。鉴于规定区域的大小会影响  $m(i,j)$  的取值, 修正因数也会影响增强效果。经过多次试验, 如果把区域的大小设置为  $5 \times 3$ , 且修正因数取 3.5 时可以达到如图 9(b)所示的效果。

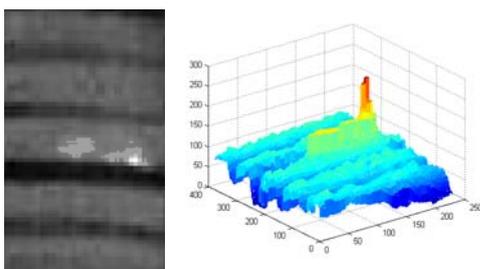
由图 9(b)可以看出, 热区域中的过热点及其连带过热区域得到了进一步加强和突出, 三维表示中可以清晰地看出过热点和热区域之间的灰度值差异。

由表 1 中的数据可以看出低频分量增强后的图像的灰度均方差有较大的增大, 这说明对红外图像的亮度调整改善了由于光照不均匀引起的细节模糊情况; 但是由于亮度调节是整体性的, 故而其他 3 个参数没有较大的变化。在完成小波变换后, 图像的整体亮度变弱, 但是对比度 ( $C$ ) 和信噪比 ( $SNR$ ) 得到较大提高, 目标得到了突出和加强。在完成对比度增强后, 这一效果进一步被提升, 这为后期的目标提取提供了便利。

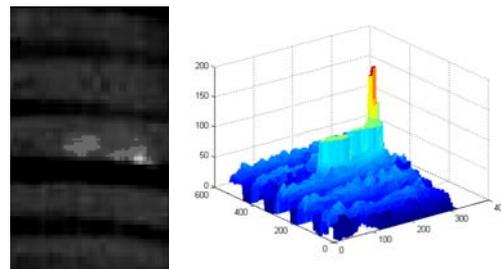
### 2.4 故障区域过热点的分割

图像预处理已经达到了良好的效果, 局部过热点及其连带区域的信息已经得到了加强, 对于过热点的提取就选用基于阈值的目标分割法<sup>[15]</sup>。由图 9(b)的三维表示可以看出, 过热区域与故障点之间的灰度值是较大差异的。鉴于故障区域有故障点和连带过热区域之分, 所以考虑采用分步的双阈值分割策略。首先对原始红外图像进行直方图统计, 得到各个灰度级的存在比例, 然后进行灰度变化差分析, 最后综合这两方面逐步确定连带过热区域和过热点的分割阈值。

图 9(b)所示的增强后图像三维表示已经可以形象地看到目标和背景的灰度变化是有层次的, 从如图 10 所示二维的灰度统计直方图可以定量地统计出整个区域的灰度分布情况。



(a) 重构后的区域灰度图及其三维表示  
(a) Restructured regional grayscale and its three-dimensional representation



(b) 对比度增强后的区域灰度图及其三维表示  
(b) Regional grayscale map and its three-dimensional representation after contrast enhancement

图 9 对比度增强前后的效果对比 Fig.9 Comparison of effect before and after contrast enhancement

表 1 各阶段图像数据对比 Table 1 Image data contrast in each stage

Processing stage	Grayscale mean	Gray mean square variance	SNR	C
Original image	108.2095	14.5203	0.00873	0.4
Enhanced low-frequency components	106.2538	41.4525	0.00762	0.42
After reconstruction of wavelet transform	84.4036	27.0112	0.1014	0.56
Contrast enhancement	32.1908	21.9609	0.3637	0.69

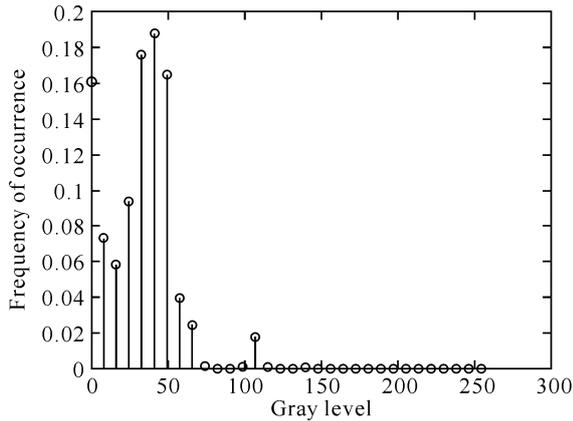


图10 局部对比度增强后过热区域的灰度分布直方图

Fig.10 Histogram of gray distribution of superheated region after local contrast enhancement

具体的双阈值确定步骤为:

1) 借由灰度分布直方图, 确定分布最广的灰度值, 找到背景区域的大致范围; 再确定最大的灰度级, 以此作为过热点目标;

2) 以分布最广灰度值为起点, 延灰度值增大的方向依次计算相邻灰度级的变化差并统计;

3) 以最大灰度值为起点, 延灰度值减小的方向依次计算相邻灰度级的变化差并统计;

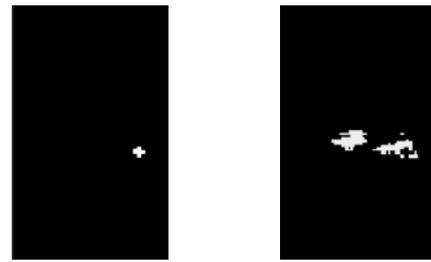
4) 综合 2、3 两步中计算并统计的双向的灰度变化差, 确定最大变化差, 确定该变化差的灰度级上下限;

5) 结合灰度三维表示, 确定最终的过热区域的灰度级范围。

经对预处理后图像灰度分布直方图的分析, 确定分布最广的灰度级为 49, 故而小于 49 的灰度级显然属于背景区域。双向的灰度变化差最大的点出现在灰度值为 71 的时候, 故而确定连带过热区域的灰度值的范围为 71~126, 分割故障点的阈值为 126。从分割效果图可以看出, 两者形成互补, 完成了对过热区域的全部覆盖, 如图 11 所示为绝缘套管的故障区域的提取效果图, 分割出的故障点及其连带过热区域分别如图 11(a)和图 11(b)所示。

### 2.5 实验结果分析

在前几部分的实验中, 该方法针对经由二维小波分解后的高频和低频分量各自的特点, 对低频分量进行了整体灰度分布改善, 提升了整体质量; 然后对 3 个高频分量进行了能突出灰度变化的局部方差映射; 然后对重构后的图像进行局部对比度增强, 最后对增强后的区域进行了分步的双阈值分割, 进一步地提取不出过热点周围的连带区域。



(a) 过热点的提取效果图 (b)过热连带区域的提取效果图  
(a) Extraction result of hot spot (b) Extraction result of superheated joint zone

图11 绝缘套管故障区域提取效果

Fig.11 The effect of fault area extraction for insulation bush

实验结果显示该方法在检测电力绝缘设备的局部微小缺陷方面有着独特的优势。但是在经过大量实验中也发现了该方法存在的些许不足。

因为该方法实质是基于灰度值差异的区域内分割, 那么针对存在边界区域的图像处理中就会有干扰存在, 具体效果如图 12 所示。



(a) 预处理效果 (b) 分割效果  
(a) Preprocessing effect (b) Segmentation effect

图12 某绝缘设备的整体处理效果

Fig.12 Overall treatment effect of an insulating equipment

由图 12 中所示的图像预处理效果和分割效果显示, 边界区域对处理效果产生了较大的干扰, 这是因为前景和背景的边界区域灰度值变化差异较大, 这些区域会在局部方差的映射中被盲目放大, 这并不是方法本身的理论性不足, 而是针对整体性地区域检测存在应用中的局限性, 针对这一局限性还进一步改进。

### 3 结论

本文针对基于红外技术的电力绝缘设备故障检测中现存的红外目标提取方法的缺陷, 在模拟变电站红外检测系统的软硬件实验环境下, 结合小波分析的独特优势, 对绝缘套管的红外图像进行了局部特征分析和局部对比度增强, 最后完成了绝缘设备红外图像中的过热点及其连带过热区域的分步双阈值提取, 实现了变电站绝缘套管局部过热的检测。实验效果图与数据对比显示该方法有良好的提取效果, 但是该检测

方法在实际应用中对能有效地应用于变电站绝缘设备的状态监测中。

### 参考文献:

- [1] 王杰, 黄志刚, 白凤春. 红外线成像技术在电力系统中的应用[J]. 电力安全技术, 2010, 12(3): 65-66.  
WANG Jie, HUANG Zhigang, BAI Fengchun. Application of infrared imaging technology in electric power system[J]. *Power Safety Technology*, 2010, 12(3): 65-66.
- [2] 马世伟, 张鑫, 范兴明, 等. 电力绝缘子检测方法及其应用现状[J]. 桂林电子科技大学学报, 2013, 33(6): 456-460.  
MA Shiwei, ZHANG Xin, FAN Xingming. Power insulator detection method and its application status[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2013, 33(6): 456-460.
- [3] 李吉成, 沈振康, 李秋华. 强背景杂波条件下运动的弱小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 208-211.  
LI Jicheng, SHEN Zhenkang, LI Qiuhua. Moving and weak target detection in heavy clutter background[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2): 208-211.
- [4] 李佐勇, 刘传才, 程勇, 等. 红外图像的统计阈值分割方法[J]. 计算机科学, 2010, 37(1): 282-286, 298.  
LI Zuoyong, LIU Chuancan, CHENG Yong, et al. Statistical thresholding method for infrared images[J]. *Computer Science*, 2010, 37(1): 282-286, 298.
- [5] YE Bin, PENG Jiaxiong. Application of the order morphology filtering on detecting of small target and point target[C]//*Proc. of SPIE*, 2001, 4554: 94-99.
- [6] 朱立, 盛文, 彭复员. 基于图像纹理频谱的弱小目标自动检测[J]. 红外与激光工程, 2001, 30(10): 374-376.  
ZHU Li, SHENG Wen, PENG Fuyuan. Automatic faint target detection based on image texture spectrum[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(10): 374-376.
- [7] 李柯, 黄席樾, 李建科, 等. 基于分形学理论的红外检测算法[J]. 激光与红外, 2009, 39(10): 1115-1118.  
LI Ke, HUANG Xiyue, LI Jianke, et al. Infrared target detection algorithm based on fractal theory[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(10): 1115-1118.
- [8] 郝建新. 基于小波变换与 Retinex 的电路板红外图像增强技术[J]. 红外技术, 2015, 37(12): 1036-1040.  
HAO Jianxin. Infrared image enhancement technology of PCB based on wavelet transform and Retinex[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(12): 1036-1040.
- [9] 常宏韬, 孟庆虎. 基于小波变换的一种红外图像增强算法[J]. 河南科技大学学报, 2015, 36(1): 48-51.  
CHANG Hongtao, MENG Qinghu. An infrared image enhancement algorithm based on wavelet transform[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology*, 2015, 36(1): 48-51.
- [10] 温佩芝, 史泽林, 于海斌. 基于小波变换的复杂海平面背景红外小目标检测[J]. 激光与红外, 2003, 33(6): 449-452.  
WEN Peizhi, SHI Zhelin, YU Haibin. Small infrared target detection of complex sea level background based on Wavelet transform[J]. *Laser and Infrared*, 2003, 33(6): 449-452.
- [11] 李涛. 数字图像处理之红外弱目标分割方法研究[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2016.  
LI Tao. *Research on Infrared Weak Target Segmentation Method for Digital Image Processing*[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2016.
- [12] 张铮, 徐超, 任淑霞, 等. 数字图像处理与机器视觉[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.  
ZHANG Zheng, XU Chao, REN Shuxia, et al. *Digital Image Processing and Machine Vision*[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2014.
- [13] Jobson Dj, Rabman Z, Woodell Ga. Properties and performance of a center/surround retinex[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: Special Issue on Color Processing*, 1996, 6(3): 451-462.
- [14] Wilhelmus M, Klamer Schutte, Albert M Vossepoel. Feature-based detection of land mines in infrared images[C]//*Proc. of SPIE*, 2002, 4742(108): 108-119.
- [15] 胡谋法, 陈曾平. 一种实用的可见光图像自适应对比度增强方法[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(4): 22-25.  
HU Moufa, CHEN Zengping. A practical adaptive contrast enhancement method for visible light images[J]. *Optical and Photoelectric Technology*, 2005, 3(4): 22-25.