

自适应特征引流管故障智能识别方法

黄博¹, 江慎旺¹, 张增², 张静², 张巍³, 许廷发^{1*}

(¹北京理工大学光电学院光电成像系统与技术教育部重点实验室, 北京 100081;

²天津航天中为数据系统科技有限公司, 天津 300301;

³南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510080)

摘要: 为了实现高压输电线存在的故障隐患进行自动检测, 本文提出了一种自适应特征引流管故障隐患智能识别算法。首先, 分析了故障引流子的红外热图像特征, 把故障分为两类: 明显发热和微弱发热; 其次, 针对引流管所引起的明显发热, 采用改进的 Otsu 阈值分割法对红外图像进行分割, 运用改进的 Sobel 算子提取轮廓; 第三, 用种子填充算法分离连通域, 通过 Thread 特征判断是否为故障引流管; 最后, 进入引流管所引起的微弱小区域发热识别, 运用高压输电线平行特征寻找主干线区域, 在主干线区域检测 Harris 角点, 通过 STWN 特征判断是否为故障引流子。实验结果表明, 发热隐患的识别率为 94.6%, 漏检率为 2.2%, 误识别率为 5.5%。

关键词: 红外热图像; 边界拓展; 形态特征; 智能识别

中图分类号: TP317.4; TN219 文献标识码: A doi:10.3788/CO.20171003.0340

Intelligent identification algorithm of adaptive feature drainage tube fault

HUANG Bo¹, JIANG Shen-wang¹, ZHANG Zeng², ZHANG Jin², ZHANG Wei³, XU Ting-fa^{1*}

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Imaging System and Technology, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Tianjin Aerospace Science and Technology Co., Ltd. for the Data System, Tianjin 300301, China;

3. Southern Power Grid Science Research Institute Co., Ltd, Guangzhou 510080, China)

* Corresponding author, E-mail: xutingfa@163.com

Abstract: In this paper, an intelligent recognition algorithm for hidden danger of drainage tube is presented in order to realize the automatic detection of the faults of the high voltage transmission line. First, the thermal image feature of faults is analyzed, and the faults can be divided into two types: obvious heating and weak heating. Second in view of the obvious heating caused by the drainage tube, the improved Otsu threshold segmentation method is used to implement infrared image segmentation and the improved Sobel operator is used to implment contour extraction. Third, the seed filling algorithm separation is used to connect domains, and we can determine whether the drainage tube is fault through the thread characteristics. Finally, we check the weak heating caused by the drainage tube, applying high pressure transmission line parallel features to find the

收稿日期: 2017-01-19; 修订日期: 2017-03-27

基金项目: 南方电网直升机重大专项资助项目 (No. K-KY2014-500)

Supported by Helicopter Major Project of China Southern Power Grid (No. K-KY2014-500)

region of trunk line, and then get the Harris corner around the trunk region and determine whether it is fault drainage through the STWN characteristics. Experimental results show that the successful identification rate of hidden heat fault is 94.6%, false negative rate is 2.2%, and false recognition rate is 5.5%.

Key words: infrared thermal image; boundary development; morphological feature; intelligent recognition

1 引言

随着低空技术的广泛应用,无人机巡检方式检查高压输电线故障,并进行检修成为一个研究热点^[1]。研究人员对实时从无人机巡检设备获取的视频图像中有效提取输电线路算法进行了研究,通过 Hough 变换和 FCM 聚类等方法能够成功自动识别检测线路^[2],但并未提出识别输电线路故障的方法。为了解决当输电线路因为受重力和设计等原因而弯曲非简单的直线的问题,Shengzhi Du 和 Chunling Tu 提出了分段识别测量的算法^[3],该算法并不能有效容忍复杂背景和噪声的干扰。为了进一步提高巡检的准确性,红外探测技术检测零值绝缘子的方法已经得到应用^[4-8],但完全依赖操作人员的经验和感知能力识图存在一定主观性和盲目性。目前,还没有完善可靠高压输电线故障的智能识别方法。2015年, Fuyu Huang 等人提出超大视场空中红外目标的检测方法,指出了红外探测对克服背景复杂、杂波干扰、目标信息少等问题的优势^[9],本文根据无人机采集的红外热图像^[10]故障引流管的特征来进行智能识别,实现了无人机巡检故障自动诊断的目的,准确性高,能够克服复杂背景的干扰,得到了较好的实验效果。

2 自适应特征引流管故障智能识别方法

2.1 引流管故障明显发热特征

通过对大量高压输电线故障引流管的红外热图像的分析,发现故障引流管引起的发热普遍出现在线与线的交接处,这种节点发热一般呈现两种特征:(1)引流管引起明显发热,发热区域与线路形状相吻合(如图1所示);(2)引流管处微弱发热,发热区域较小且呈现不规则形状,但是线路

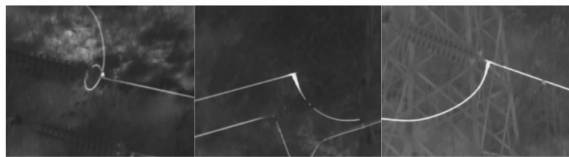


图1 引流管引起明显发热图例

Fig. 1 Obvious heating caused by drainage tube

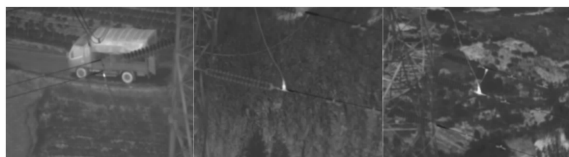
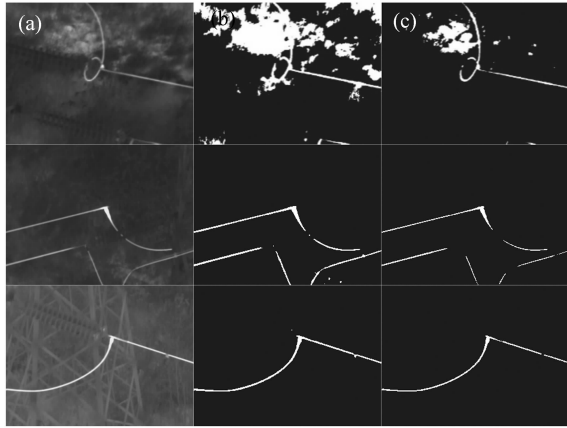


图2 引流管处小区域发热图例

Fig. 2 Small area heating caused by drainage tube

必然贯穿发热区域(如图2所示)。

由图1可以看出,引流管故障的明显特征就是发热区域与输电线路形状相吻合,因此发热的线路与背景存在明显的灰度差,通过阈值分割将发热区域当作前景色从背景中分离出来。但是背景色中较亮的区域也会被当作发热区域给分离出来,因此,算法对其进行分类处理:(1)误判的区域与发热线路并没有连通,可以通过种子填充法形态判断来去除误判区域;(2)误判区域与发热线路有连通像素,直接从图像中提取出所需的发热线路具有一定的难度,因此本文提出一种 Otsu 算法与 Sobel 算法边界拓展融合的分割方法,然后再用种子填充法形貌判断是否是故障引流子引起的发热线路区域。在实际热红外图像的采集过程中,将会存在各种各样复杂的背景,阈值的选取不当,将会导致对输电线隐患的误识别。采用 Otsu 法^[11-13]自动进行阈值分割,可以得到较好效果,如图3(b)所示。但是当背景较亮,如图3中第一组图片,直接用 Otsu 进行阈值分割将会得到大面积的误判区域,所以将 Otsu 法取得阈值升高 30 灰度级进行分割,在不丢失故障发热区域的情况下可以得到更好效果。经过大量红外热图



(a) 原图 (b) Otsu (c) 阈值上调 30 灰度级
 (a) Original image (b) Otsiu (c) Increase of the threshold by 30 gray level

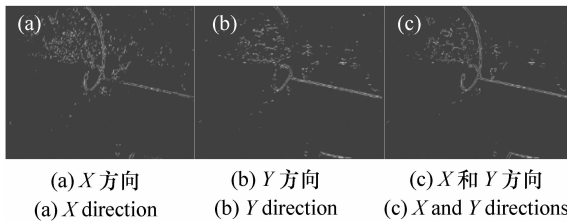
图 3 阈值分割

Fig. 3 Threshold segmentation

像的实验,该操作可以有效减少细小噪声,使算法更加准确实用,如图 3(c)。

2.2 边界拓展提取轮廓

提取轮廓的方法有很多,其中使用一阶微分梯度算法较为简单,并且也能够准确检测边缘。一阶微分梯度算法要求在图像的每个位置计算偏导 $\partial f/\partial x$ 和 $\partial f/\partial y$,算法用一点的邻域上偏导数的数字近似。通过 Sobel 算子^[14]处理后的结果如图 4 所示。



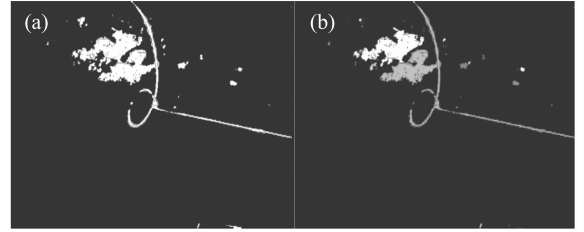
(a) X 方向 (b) Y 方向 (c) X 和 Y 方向
 (a) X direction (b) Y direction (c) X and Y directions

图 4 Sobel 算子边缘检测

Fig. 4 Edge detection of Sobel operator

选用 Sobel 算法对 X 和 Y 方向提取边缘,采用 Sobel 检测的边缘对 Otsu 处理后的二值图像进行漫水法分割,效果如图 5(b) 所示。

由图 5(a) 可以看出,直接用 Sobel 的结果进行分割,得不到有效分离的效果,因为 Sobel 的边界并不是连续的,必须进行边界拓展,才可以将更多的支线边界信息提取出来,得到更好的分割效果。



(a) Sobel 分割阈值图像 (b) 漫水法分离图像
 (a) Threshold image (b) Division of water segmentation by Sobel operator (b) Diffuse region

图 5 区域划分

Fig. 5 Region division

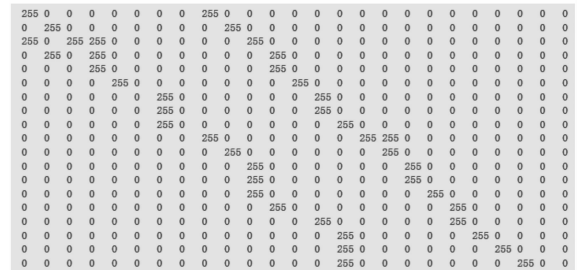


图 6 Sobel 边缘数据图像

Fig. 6 Sobel edge data image

由图 6 可以看出, Sobel 产生的轮廓信息,在 8 向邻域内并不全部连通,边界会存在隔断的情况,将应该连续的边界连通起来。算法如下:

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

如果 z_5 为边缘点,在 $z_5(x, y)$ 的 8 向邻域中,如果只存在一个边界轮廓点,那么将 $z(x, y)$ 标记为可疑间断点,以边界点 $z(x, y)$ 为中心找到边界轮廓点 (x_0, y_0) 对称点 $(2x - x_0, 2y - y_0)$,以对称点 $2x - x_0, 2y - y_0$ 为基点,以 $z(x, y)$ 与边界轮廓点 (x_0, y_0) 的反方向,划定小范围的拓展区域,如图 7 所示。在拓展区域搜索是否有可以间断点,如果有则将其连接起来,没有则划除可疑间断点的属性。最后边界拓展后效果如图 8(b) 所示。

种子填充算法是图形学中的算法,是轮廓提取算法的逆过程,如目前漫水法、边界填充算法、扫描线种子填充等各种成熟的实现算法^[15],其基本方法就是从一组已知的“种子标记像素点

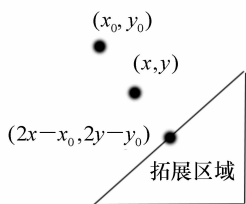


图7 边界拓展原理图

Fig. 7 Principle diagram of boundary extension

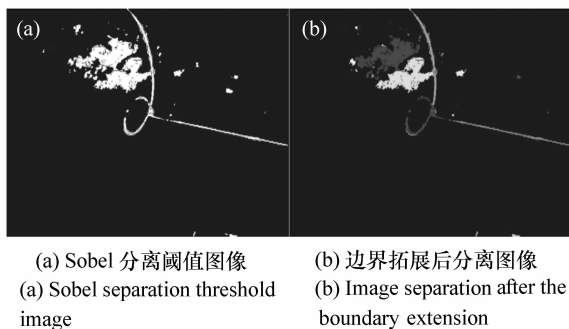


图8 直接分离与边界拓展后分离对比
Fig. 8 Comparison of the images obtained by direct separation and boundary extension

(x, y) ”开始,将与种子预先定义的性质相似的那些邻域像素(四邻域或八邻域。四邻域即从区域一点出发,通过4个方向上、下、左、右来检索,而八邻域加上了左上、左下、右上、右下4个方向)添加到每个种子上来形成生长区域。

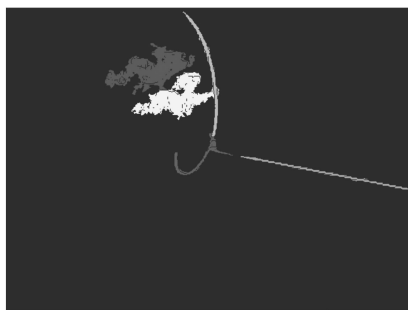


图9 去除噪声后输出

Fig. 9 Output after removing noise

2.3 特征判断提取区域

通过上面的处理,已经把各个可以漏电区域提取分离了,对该类引流管故障进行分析可以得知,输电线支线漏电的特征有:(1)最小宽度窄,(2)长度较长,(3) X 、 Y 方向上不存在宽度像素都

超过30的区域。处理过程如下:对分离区域进行行列的扫描,记录宽度小于10像素的行数或者列数(判断是竖直漏电支线和横向漏电支线);如果横向宽度和纵向宽度都小于50,则不符合故障引流管特征,将该区域删除;再判断行数和列数两个方向像素宽度都超过30,并且行数或者列数不少于50,则认定其并不是“细线”型,将其删除;最后未被删除的区域为故障引流管区域。



图10 输电线发热区域输出

Fig. 10 Output of heating zone of transmission line

3 自适应故障识别

如图2所示,当引流管处微弱发热,发热区域较小且呈现不规则形状,如果直接进行Otsu阈值处理来分离引流管处微弱发热区域,那么许多背景的噪声也会误判为发热区域,所以算法必须先缩小微弱引流管发热可能存在的位置。因为引流管是线路主干线与线路支线的交点,存在的一个特征就是分布在主干线的周围。算法先确定主干线路的位置,然后从主干线路附近区域出发来寻找引流管微弱发热区域,这样将大大减少引流管微弱发热区域的误判率。

3.1 主干线区域识别

首先需要识别到主干线路所在位置,通过分析大量红外图像,发现高压主干线路一般都近似直线,并且一般为多股线路,拥有平行特征。因此,算法首先通过霍夫变换来检测直线,运用输电线路的平行特征,滤除不必要的噪声直线,进而确定主干线路的位置。具体处理过程如下:对Canny算子边缘检测后的边缘图做霍夫变换^[16]处理得到直线,得到大量直线信息,其中包含很多错误

的直线信息,即噪声。对噪声进行滤波,滤波原则:通过分析大量红外图像可知主干线路一般大于两条,也就是说,至少存在 4 条边界,而 4 条边界近似平行。滤波过程中对所有直线循环处理,将没有平行边界或平行边界较少的直线全部滤除。处理结果如图 11 所示。

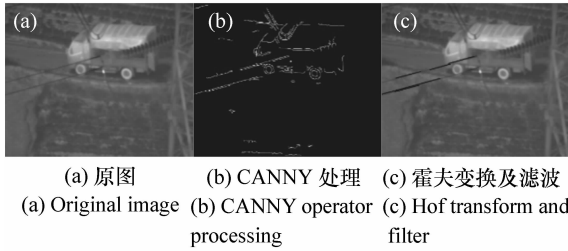


图 11 高压输电线路主干线区域识别

Fig. 11 Main line area identification of high voltage transmission line

3.2 故障引流子识别

当确定主干线路的位置后,在主干线路附近五个像素的范围内进行搜索,可搜索区域如图 12 (a) 所示。在可搜索区域内做 Harris 角点检测^[17-20],找到灰度值变化巨大的位置,如图 12 (b) 所示,直接 Harris 判断得到的角点存在很多的误检测,最后通过灰度及形态特征判断确定微弱发热的位置。

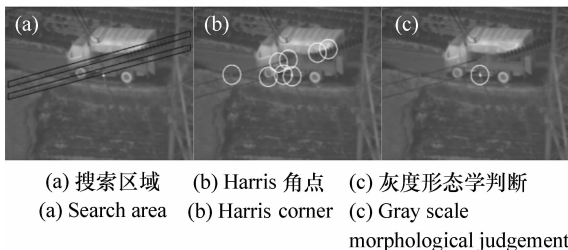


图 12 故障引流子识别

Fig. 12 Fault drainage identification

灰度及形态判断准则:因为引流管处故障不明显情况下一般呈现为点状,具有小目标 (Small Target) 特征,所以规定在角点附近 20×20 像素的区域内,如果超过 200 个像素为前景色 (灰度值较大),则不满足引流管小目标 (Small Target) 的属性,因此该角点区域不为故障引流子;如果灰度值全部为背景色或者在区域内前景色的像素不超

过 5 个,该点为噪声,也不是故障引流子,以此达到削弱噪声 (Weaken Noise) 的目的;剩余的位置判定为故障引流子。最后得到结果图如图 12 (c) 所示。

3.3 实验结果与分析

本文实验中,无人机所搭载的红外数据采集设备为德国 AVT 公司的 Goldeye P/CL-008 SWIR 型号红外相机,其硬件相关的重要参数如下:波长范围 $9 \sim 17 \mu\text{m}$;工作温度: $-30 \sim +40 \text{ }^\circ\text{C}$;探测器:非制冷焦平面;探测元: $320 \times 256, 30 \mu\text{m}$ 。

本文所采集的数据是无人机由上向下采集,输电线路背景多为草地、灌木丛、树林等,较为复杂,背景干扰较多。由图 13 可以看出,由于背景辐射放热的影响,故障引流子与背景信息十分相似,即使肉眼也很难将其分辨出来,因此识别故障引流子具有较大的困难。当引流子明显故障时,如图 1 所示,此时,由于发热现象明显,引流子温度相对于背景明显增大,导致背景在图像中被抑制,基本呈现黑色。

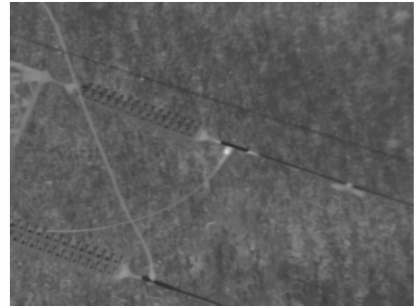


图 13 Goldeye P/CL-008 SWIR 采集红外热图像

Fig. 13 Infrared thermal image acquisition with Goldeye P/CL-008 SWIR camera

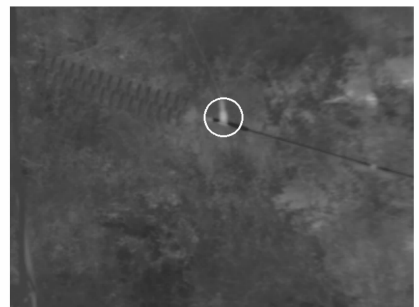


图 14 故障引流子

Fig. 14 Fault drainage

对含有故障引流子的图像进行处理,可以准确的得到故障引流子的位置和区域,如图14所示,白色圆圈区域为找到的故障引流子。

运用上述方法处理92幅红外图像,其中含有

故障发热的图像为38幅,没有明显故障发热图像54幅,最后正确检测到33幅含有故障发热的图片,误检5幅,漏检2幅。正确率为94.6%,误检率5.5%,漏检率2.2%,具体结果如表1。

表1 92幅红外图像处理结果

Tab.1 Processing results obtained from 92 infrared images

设备	总图片数量	故障数	正确检测到的故障数	误检率	漏检率
引流子	92	38	33(94.6%)	5.5%	2.2%

主要的误检类型有漏检以及多检,漏检多是由于引流子故障不明显,发热现象极弱、背景极其复杂和主干线区域不明显的红外图像,如图15所示;多检主要是由于主干线路区域存在背景亮点,引起多检以及错检,如图16所示。该图存在一个故障引流子,但是由于背景噪声的影响,检测出来两个故障引流子,引流子无故障时则会引起错检现象。

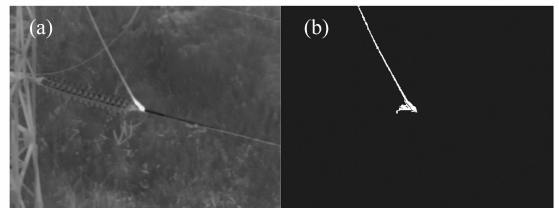
阈值的选取对检测结果也有很大的影响。同样的一幅红外图像,当阈值选取不一样时,检测的结果也会有所不同。这些不同的结果主要是故障区域灰度值与背景灰度值的差异来引起的。如图17所示,当选取阈值为Otsu动态阈值上调15个灰度值时,该图像检测结果为引流管引起明显发热;当选取阈值为Otsu动态阈值上调30个灰度值时,该图像检测结果为引流管处小区域发热。



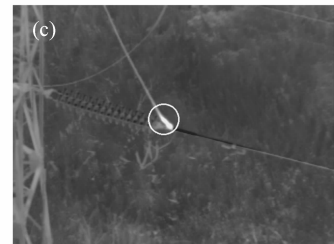
图15 发热极弱、背景复杂导致引流子故障不明显
Fig.15 Drainage fault is not obvious due to the very weak heat and the complicated background



图16 背景噪声造成的错检现象
Fig.16 False detection caused by background noise



(a) 原图
(a) Original image
(b) 阈值上调15灰度级
(b) Increase the threshold by 15 gray level



(c) 阈值上调30灰度级
(c) Increase the threshold by 30 gray level

图17 阈值选取对检测的影响

Fig.17 Effect of threshold selection on detection

图17(c)的输电线分支线线路上的灰度值确实高于背景灰度值,但是它的灰度值与左边竖立着塔架的灰度值相差无二,所以不认为其属于故障发热区域。本文通过对大量图像分析,最终采用阈值上调30个灰度级的方案是比较合理的。

本文提出的自适应特征引流管故障智能识别方法,原理简单、易于实现,受环境的影响较小。利用本文中方法对多个样本进行测试,故障识别率较高,误检率较低,取得了比较理想的结果,具有较强的稳定性,也验证了本文的方法用于输电线路红外序列图像中故障引流子的自动提取和诊断的可行性和有效性。

4 结 论

直升机巡检输电线路,利用先进的拍摄仪器,

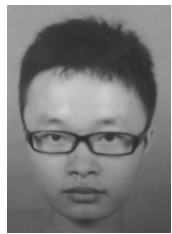
通过对设备进行多角度俯视、侧视检测,能细致全面地检查和捕捉线路上的设备运行情况,是未来电力巡检的趋势。本文通过红外热图像识别输电线路引流管故障,将引流管故障引起发热分为明显区域发热和微弱小区域发热两种类型,采用改进的 Otsu 阈值分割算法,使其更加实用。此外,本文采用的边界拓展进行漫水法区域划分及主干线周围 Harris 角点检测来识别故障发热区域,具有良好的效果。最后,对 92 幅红外热图像进行实验,正确识别率为 94.6%,误检率 5.5%,漏检率 2.2%,算法的识别准确率较高。

参考文献:

- [1] 陈韬. 直升机在输电线路运检工作中的技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2010.
CHEN T. Research on the technology of helicopter in the operation of transmission line inspection[D]. Beijing:North China Electric Power University,2010. (in Chinese)
- [2] TANG W Y, HANG Y, QIU Q R, *et al.*. Overhead Power Line Detection from UAV Video Images[C]. 19th international conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice. Auckland, New Zealand, 2012:74-79.
- [3] DU SH ZH, TU CH L. Power line inspection using segment measurement based on HT butterfly[C]. International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Xi'an, 2011:1-4.
- [4] 张来明, 郭劲, 杨贵龙, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. 中国光学, 2013, 6(4):501-512.
ZHANG L M, GUO J, YANG G L, *et al.*. The latest progress in mid infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4):501-512. (in Chinese)
- [5] 赵建川, 王弟男, 陈长青, 等. 红外激光主动成像和识别[J]. 中国光学, 2013, 6(5):795-802
ZHAO J CH, WANG D N, CHEN C Q, *et al.*. Infrared laser active imaging and recognition[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5):795-802. (in Chinese)
- [6] 唐攀龙. 高压输电线路绝缘子红外监测方法的研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2009:8-11
TANG P L. Research on infrared monitoring method of high voltage transmission line insulator[D]. Changsha:Changsha University of Science and Technology, 2009:8-11. (in Chinese)
- [7] 陈豪, 陈原, 赵雪松, 等. 红外测温技术在复合绝缘子检测中的应用[J]. 电力设备, 2006, 7(9):42-43.
CHEN H, CHEN Y, ZHAO X S, *et al.*. Application of infrared temperature measurement technology in the detection of composite insulators[J]. *Electric Power Equipment*, 2006, 7(9):42-43. (in Chinese)
- [8] 王灿进, 石宁宁, 孙涛. 同态非局部滤波在激光主动成像散斑抑制中的应用研究[J]. 液晶与显示, 2016, 31(2):193-200.
WANG C J, SHI N N, SUN T. Application of homomorphic non-local filters in speckle noise suppression for laser active imaging[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(2):193-200. (in Chinese)
- [9] 黄富瑜, 沈学举, 刘旭敏, 等. 基于空时域融合处理检测超大视场红外目标[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8):2328-2338.
HUANG F Y, SHEN X J, LIU X M, *et al.*. Detection of super wide-field infrared target based on spatial-temporal fusion processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8):2328-2338. (in Chinese)
- [10] 鲁剑锋. 无人机光电载荷图像处理器器的设计[J]. 中国光学, 2011, 4(5):448-452.
LU J F. Design of UAV photo electric load image processor[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5):448-452. (in Chinese)
- [11] 陈冬岚, 刘京南, 余玲玲. 几种图像分割阈值选取方法的比较与研究[J]. 机械制造与自动化, 2003(1):77-80.
CHEN D L, LIU J N, YU L L. Comparison and Research on threshold selection methods of several kinds of image seg-

- mentation[J]. *Machinery Manufacturing and Automation*,2003(1):77-80. (in Chinese)
- [12] 袁小翠,吴禄慎,陈华伟. 基于 Otsu 方法的钢轨图像分割[J]. *光学精密工程*,2016,24(7):1772-1781.
YUAN X C,WU L SH,CHEN H W. Rail image segmentation based on Otsu method[J]. *Opt. Precision Eng.*,2016,24(7):1772-1781. (in Chinese)
- [13] 孟亚州,马瑜,白冰,等. 基于粒子群优化的 Otsu 肺组织分割算法[J]. *液晶与显示*,2015,30(6):1000-1007.
MENG Y ZH,MA Y,BAI B,*et al.* Improved lung segmentation algorithm based on 2 D Otsu optimized by PSO[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2015,30(6):1000-1007. (in Chinese)
- [14] 王智文. 几种边缘检测算子的性能比较研究[J]. *制造业自动化*,2012,34(11):14-16.
WANG ZH W. A comparative study on the performance of several edge detection operators[J]. *Manufacturing Automation*,2012. 34(11):14-16. (in Chinese)
- [15] 张正峰,马少飞,李玮. 新的种子点区域填充算法[J]. *计算机工程与应用*,2009(6):201-202.
ZHANG ZH F,MA SH F,LI W. New seed point region filling algorithm[J]. *Computer Engineering and Applications*,2009(6):201-202. (in Chinese)
- [16] MUKHOPADHYAY P,CHAUDHURI B B. A survey of hough transform[J]. *Pattern Recognition*,2015,48(3):993-1010.
- [17] 王崴,张宇红,洪军,等. 一种改进的 Harris 角点提取算法[J]. *光学精密工程*,2008,16(10):1995-2001.
WANG W,ZHANG Y H,HONG J,*et al.* An improved Harris corner detection algorithm[J]. *Opt. Precision Eng.*,2008,16(10):1995-2001. (in Chinese)
- [18] 李海,张宪民,陈忠. 基于直线检测的棋盘格角点自动提取[J]. *光学精密工程*,2015,23(12):3480-3489.
LI H,ZHANG X M,CHEN ZH. Automatic extraction of corner points of a chess board based on line detection[J]. *Opt. Precision Eng.*,2015,23(12):3480-3489. (in Chinese)
- [19] 刘博超,赵建,孙强. 基于边缘改进的 Harris 角点检测方法[J]. *液晶与显示*,2013,28(6):939-942.
LIU B CH,ZHAO J,SUN Q. Improved Harris corner detection method based on edge[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2013,28(6):939-942. (in Chinese)
- [20] 杨云,岳柱. 基于融合图像轮廓矩和 Harris 角点方法的遮挡人体目标识别研究[J]. *液晶与显示*,2013,28(2):273-277.
YANG Y,YUE ZH. Human body target recognition under occlusion based on fusion of image contour moment and Harris angular points[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*,2013,28(2):273-277. (in Chinese)

作者简介:



黄博(1993—),男,重庆长寿人,硕士研究生,主要从事光电成像探测与识别、目标跟踪、光电测量和可见光通信方面的研究。E-mail: a1039377853@163.com



许廷发(1968—),男,黑龙江肇东人,博士,教授,博士生导师,1992年、2000年于东北师范大学分别获得学士、硕士学位,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,2006年于华南理工大学博士后出站,主要从事光电成像探测与识别等方面的研究。E-mail: xutingfa@163.com