

文章编号:1007-2780(2016)12-1149-07

基于无人机的输电网故障跳线联板识别

江慎旺¹, 许廷发^{1*}, 张 增², 吴新桥³, 黄 博¹, 周筑博²

(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 天津市智能遥感信息处理技术企业重点实验室, 天津 300301;

3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要:跳线联板是输电网中重要设备,其是否存在故障对输电网正常运行具有很大的影响。但由于现有的算法是对输电网中所有的故障用统一的方法进行识别,没有对各类故障输电设备进行专门的研究,导致故障跳线联板识别率低。为了高效识别红外视频图像中故障跳线联板,首先针对输电线的红外图像特征,采用改进的 OTSU 阈值分割图像对红外图像进行分割;其次,采用漫水法滤波分离各个连通域,运用形态学滤去小区域,填充大区域内的孔洞;最后,提取连通域的骨架,并从骨架图像中提取出 USFPF 特征,通过该特征识别的故障跳线联板。实验结果表明,识别故障跳线联板准确率为 85.71%,漏检率为 14.28%,误识别率为 2.8%。该方法能够较好地识别故障跳线联板,具有较好的鲁棒性。

关键词:红外图像;跳线联板;四点特征;智能识别

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163112.1149

Recognition algorithm for fault jumper connection plate of transmission network based on UAV

JIANG Shen-wang¹, XU Ting-fa^{1*}, ZHANG Zeng², WU Xin-qiao³(1. *Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*2. *Tianjin Key Laboratory of Intelligent Information Processing in Remote Sensing,**Tianjin ZhongWei Aerospace Data System Technology Co.,Ltd., Tianjin 300301, China;*3. *Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)*

Abstract: Jumper connecting plate is an important part of electricity supply network. Jumper connecting plate's status has a significant impact on electricity supply network's proper operation. However, all the existing algorithms identify the fault of electricity supply network with a unified approach, so we have no specific approach on various types of transmission equipment failure and it will result in low recognition rate of jumper connecting plate. In order to recognize the fault jumper connecting plate efficiently, we use improved OTSU method for infrared image segmentation and use flood fill method to separate each segmentation area. Secondly, we delete small areas and fill holes through dilation and

收稿日期:2016-11-06;修订日期:2016-12-01.

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 major Helicopter Special Project of China Southern Power Grid(No.K-KY2014-500)

* 通信联系人, E-mail: xutingfa@163.com

hole filling algorithm, then get connected area's skeleton by the skeleton extraction algorithm. Thirdly, we find Harris corner point in skeleton image, and calculate USFPF feature. Finally, through the slope value recognition we can discern jumper connecting plate's fault. As a result, the successful recognition rate for jumper connecting plate's fault is 85.71%, the miss rate is 14.28%, and the mistake rate is 2.8%. Experimental results show that the method has good results.

Key words: infrared image; jumper connection plate; morphology; intelligent recognition

1 引言

电力工业如同于国民经济的“心脏”，它为所有行业提供动力，是国家经济稳定发展的重要基础。但是输电线及输电设备长期在户外运行，由于老化、恶劣天气等因素的影响，时常发生故障，此类故障常常引起局部放电，从而导致局部温度升高，严重影响电网运营的流通性。因此，如何检测以及检修输电线路的故障是电力领域的难题。红外检测技术具有非接触性、安全可靠、检测速度快、判断准确、操作方便等传统检测方法难以比拟的优点，故可以利用红外检测技术对高压输电线路上的各种设备进行在线发热检测。最早 1949 年，Leslie 提出运用红外测温设备检测输电线路接头发热现象^[1]。随着科学的进步，采用无人机搭载红外热像仪或者红外相机实现不接触、不停电、远距离故障检测技术被广泛的应用^[2]。1999 年，Aksyonov^[3]对比了故障输电线路的红外检测和通过电导率检测的方法。陈晓兵提出无人飞机对输电电路的巡检^[4]。2010 年，彭晔对红外热图像检测输电线路故障做了详细的分析^[5]。2014 年，张文峰提出了基于无人机红外视频的输电线路发热缺陷智能诊断技术，从通过图像拼接和帧间差分后的图像中提取输电线的主方向，并以此作为先验知识，从红外图像中确定输电线信息。最后沿着提取的输电线区域的主方向，依据输电线故障诊断标准，对输电线路中可能的故障位置实现故障诊断^[6]的方法，但是该方法只能识别输电设备有无故障，不能具体识别故障物体为那种输电设备。对特殊输电设备进行专门研究其故障识别算法也逐渐成为一种趋势。2010 年刘健等提出了一种基于红外图像的电力变压器油位自动检测方法^[7]，专门用来检测变压器油位。

在高压输电设备中，跳线联板、接续管和绝缘子最容易发生故障。目前已有许多科研人员通过

在热图中研究高压输电设备发热区域的识别算法，但是直接通过红外图像运用图形学研究高压输电线发热区域的识别算法的研究还不够深入，本文经过对大量红外图像中故障跳线联板进行分析，总结出故障跳线联板的独特特征 U 型四点特征，并基于该特征提出了一种识别故障跳线联板的方法，首先运用改进的 Otsu 阈值分割法对红外图像进行分割，再用漫水法滤波并分离各个连通域，运用膨胀和孔洞填充算法滤去一些小区域并填充大区域内的孔洞，提取各连通域的骨架，在骨架图像中找到顶点和过程拐点，通过 U 型四点特征(USFPF)识别故障跳线联板。相比于先前用统一的方法识别所有的故障设备，USFPF 特征为故障跳线联板的独特特征，显著提高了故障跳线联板的识别率。

2 红外检测故障跳线联板原理

2.1 红外检测故障原理

红外线就是电磁波谱中比微波波长短、可见光波长长的电磁波，其波段为 $0.75\ \mu\text{m} \sim 1\ 000\ \mu\text{m}$ ^[8]。根据普朗克辐射定律^[9]以及斯蒂芬-玻尔兹曼定律，可以得知温度高于绝对零度的物体，都会自发的向外辐射红外线，并且随着温度的升高，黑体辐射中的红外辐射所占比率显著增加，并且红外对物体温度变化的灵敏度非常高，还有非接触式的优点，因此红外被广泛用于涉及温度方面的检测。

由于跳线联板长期裸露在大气中，长年收到雨淋、日晒及活性气体的侵蚀，造成跳线联板表面严重氧化，以及长期在风力作用下摆动使压接螺丝松动，使得跳线联板的电阻明显的变大^[10]。从而导致跳线联板温度明显升高。所以本文提出用红外图像来检测并识别故障跳线联板。

2.2 跳线联板特征

跳线联板形状为 U 型，如图 1，U 型形状拥有

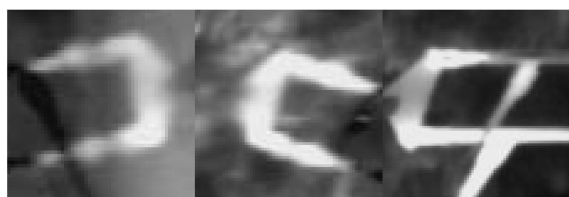


图 1 故障跳线联板示例

Fig.1 Fault Jumper connecting plate

3 条轮廓线,4 个顶点 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 ,其中相邻轮廓线两两垂直,斜率分别为 k_1 、 k_2 、 k_3 ,相对轮廓线则平行。对应关系式(1):

$$\begin{cases} \text{sign}(x_1 - x_2) = \text{sign}(x_4 - x_3) \\ |k_1 - k_2| > \tan(\pi/4) \\ |k_2 - k_3| > \tan(\pi/4) \\ |k_1 - k_3| < \tan(\pi/4) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: sign 为符号函数, $\text{sign}(x_1 - x_2) = \text{sign}(x_4 - x_3)$ 代表 $x_1 - x_2$ 和 $x_4 - x_3$ 同时大于 0 或者小于 0,表示 x_1 指向 x_2 的方向和 x_4 指向 x_3 为同一个方向。 $|k_1 - k_2| > \tan(\pi/4)$ 表示第一条线和第二条线角度相差超过 45° 。 $|k_2 - k_3| > \tan(\pi/4)$ 表示第二条线和第三条线角度相差超过 45° 。 $|k_1 - k_3| < \tan(\pi/4)$ 表示第一条线和第三条线角度相差低于 45° 。

3 跳线联板识别的关键算法

3.1 无人机图像采集系统

无人机巡检^[11]方式主要是把小型红外摄像机固定在无人机吊舱处,如图 2。对输电网进行摄像,通过算法识别红外视频中的故障跳线联板。

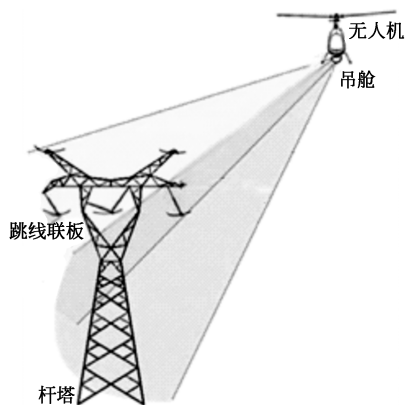


图 2 无人机巡检

Fig.2 UAV inspection

但是由于电力网分布多分布于城市、森林等,并且红外相机在拍摄时,无人机一直在飞行状态,导致红外图像含有大量的噪声并且背景复杂。为了高效识别红外视频图像中故障跳线联板,本文针对故障跳线联板分析总结出其独有特征 USFPF,提出了一种基于无人机的输电网故障跳线联板识别的方法。

3.2 改进的 Otsu 自适应阈值分割

在红外图像存在各种各样复杂的背景,阈值的选取不当,将会导致对输电设备隐患的误识别,采用 Otsu 法(大津法)^[12-13]对图像进行自适应阈值分割,可以得到较好的分割效果。其阈值为使式(1)中 Y_m 取最大值时的 m 值,其中 x 为灰度级, $p(x)$ 为灰度级 x 的概率, m 表示 Y_m 为最大值时的灰度级。

$$Y_m = \frac{\left[\sum_{x=0}^{255} x p(x) \times \sum_{x=0}^m p(x) - \sum_{x=0}^m x p(x) \right]^2}{\sum_{x=0}^m p(x) \times \left[1 - \sum_{x=0}^m p(x) \right]}. \quad (2)$$

但是用传统的 Otsu 法得到的分割图像不能直接将发热的跳线联板从背景中分割出来,如图 3(b),因为 U 型特征发热区域会明显比周围的像素灰度值会高出 60~70 的灰度级,所以算法将 Otsu 取得动态最佳阈值向上调节 n 个灰度级,即取 $m + n$ 可以得到更好的结果,如图 3(c)。

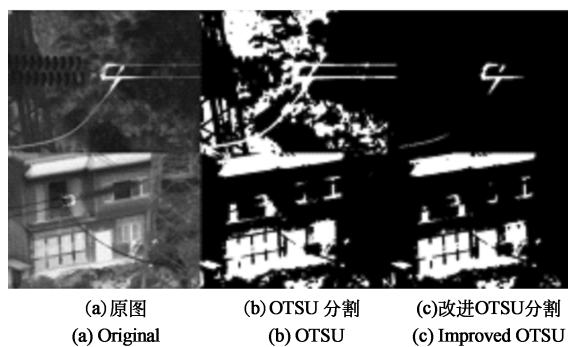


图 3 分割效果图

Fig.3 Segmentation

3.3 分离连通域

种子填充算法^[14-15]是图形学中的算法,是轮廓提取算法的逆过程,目前主要有漫水法、边界填充算法、扫描线种子填充等算法。本文选用漫水法处理,其基本方法就是从一组已知的“种子标记

像素点”开始,将与种子预先定义的性质相似的那些区域像素添加到每个种子上来形成生长区域。处理前如图 3(c),处理后如图 4。

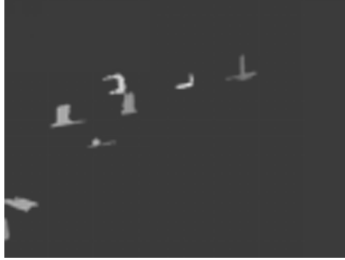


图 4 漫水法分离连通域

Fig.4 Separation of diffuse water connected domain

3.4 骨架提取

通过漫水法将可疑 U 型连通区域分离后,可能出现以下缺陷:①中间空洞,②边界锯齿,所以在提取骨架之前需要对分离出的图像做膨胀和孔洞填充的处理。缺陷示例如图 5(a)。中间空洞可以通过孔洞填充彻底消除,边界锯齿可以通过膨胀得到一定抑制。处理后的图像如图 5(b)、图 5(c)。

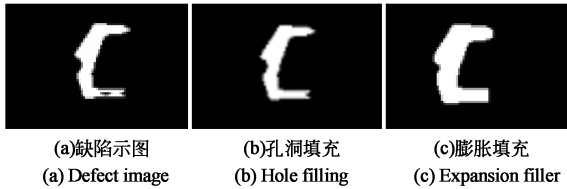


图 5 形态学处理效果图

Fig.5 Image of morphological processing effect

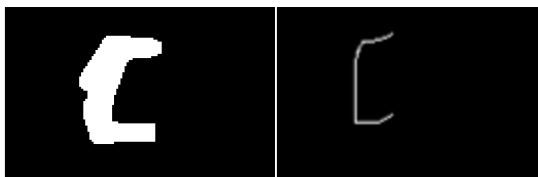


图 6 骨架处理结果

Fig.6 Skeleton results

目前有很多提取骨架的方法,可分为:基于对称轴分析的骨架提取算法,细化方法和形状分解方法三类^[16]。文章采用一种基于向量内积的新型骨架提取方法^[17]提取出图像的骨架,第一步通过腐蚀操作,标记那些要被消去的像素;第二步,只将那些消除后并不破坏连通性的标记点消除,

否则的话保留这些边界点。最后结果如图 6。

3.5 U 型四点特征

提取发热特征区域骨架结束后,从骨架中寻找符合 U 型特征的区域,并输出其位置。U 型特征区域判断方法就是能将其骨架节点找出,然后通过对骨架节点间的斜率大小关系进行判断。

3.5.1 获取节点

算法采用半闭合特征判断法,进行节点判断。

一个 U 型特征区域必须存在 4 个有效的节点,两个边界顶点和两个过程拐点,首先确定边界顶点,如图 7 所示在边界顶点的八向连通领域中只有一个前景点,而骨架过程点,必须至少存在进入点和退出点两个前景点。

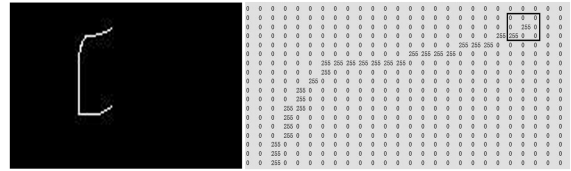


图 7 获取节点

Fig.7 Acquire node

以其中一个边界顶点为起点,然后检测窗口在骨架上移动检测如图 8 所示,(a)为窗口在各个方向上移动,在水平方向上没有灰度变化,(b)为窗口在竖直方向上没有灰度变化,(c)为窗口在各个方向移动都存在明显灰度变化。

窗口移动 $[u, v]$ 产生的灰度变化,如式(3):

$$E(u, v) = \sum_{x, y} w(x, y)$$

$$[f(x + u, y + v) - f(x, y)]^2, \quad (3)$$

其中: $w(x, y)$ 为窗口函数, $f(x + u, y + v)$ 为平移后的灰度图像,且有

$$f(x + u, y + v) =$$

$$f(x, y) + f_x u + f_y v + O(u^2, v^2), \quad (4)$$

通过式(4)将式(3)转化为:

$$E(u, v) =$$

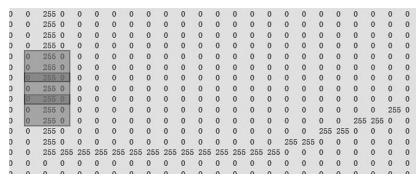
$$[u, v] \begin{bmatrix} f_x^2 & f_x f_y \\ f_x f_y & f_y^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式(5)可以近似表达为式(6):

$$E(u, v) \cong [u, v] \mathbf{M} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}, \quad (6)$$

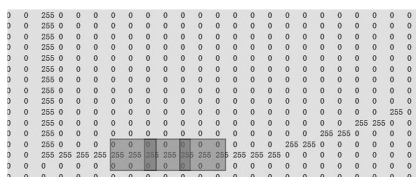
其中: $\mathbf{M}$ 为 2×2 矩阵,可由图像求导可得式(7):

$$\mathbf{M} = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} f_x^2 & f_x f_y \\ f_x f_y & f_y^2 \end{bmatrix}, \quad (7)$$



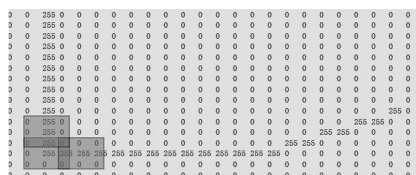
(a) 水平方向没有变化

(a) No change in the horizontal direction



(b) 垂直方向没有变化

(b) No change in the vertical direction



(c) 垂直方向水平方向都没有变化

(c) No change in the any direction

图 8 窗口移动检测过程

Fig.8 Window motion detection process

将灰度在水平和竖直方向上灰度变化最大的 2 个点确定为过程拐点。

3.5.2 将节点连线,并判断斜率

将起点、第一次搜索到的过程拐点、第二次搜索到的过程拐点及终点依次记为 $pt1(x_1, y_1)$, $pt2(x_2, y_2)$, $pt3(x_3, y_3)$, $pt4(x_4, y_4)$, 如图 9; 连接点 $pt1(x_1, y_1)$ 和 $pt2(x_2, y_2)$ 所得到直线的斜率记为 k_1 , 连接点 $pt2(x_2, y_2)$ 和 $pt3(x_3, y_3)$ 所得到直线的斜率记为 k_2 , 连接点 $pt3(x_3, y_3)$ 和 $pt4(x_4, y_4)$ 所得到直线的斜率

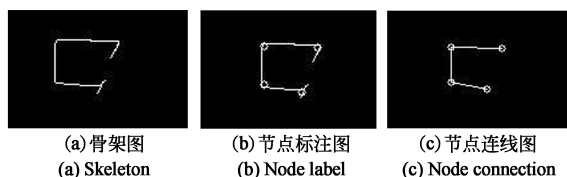
(a) 骨架图
(a) Skeleton(b) 节点标注图
(b) Node label(c) 节点连线图
(c) Node connection

图 9 节点操作图

Fig.9 Diagram of node operation

记为 k_3 ; 进行 USFPF 特征判断。

当同时满足式(1)中 4 个条件时, USFPF 特征为 1, 反之则为 0; 当 USFPF 特征为 1 时, 识别为故障跳线联板。

4 实验与结果

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 $9 \mu\text{m} \sim 17 \mu\text{m}$; 工作温度: $-30 \sim +40 \text{ }^\circ\text{C}$; 探测器: 非制冷焦平面; 探测元: 320×256 , $30 \mu\text{m}$ 。

本文所采集的数据是无人机在高原地区进行电力巡检时的数据。输电线背景为天空, 较为简单, 但是有大量的云层信息。由图 10 可以看出, 由于背景辐射放热的影响, 故障跳线联板和背景信息十分相似, 即使肉眼也很难将其分辨出来, 因此识别故障跳线联板具有较大的困难。



图 10 含有故障跳线联板红外图像

Fig.10 Infrared image including fault jumper connecting plate

对含有故障跳线联板的图像如图 10, 进行处理, 可以准确的得到故障跳线联板的位置和区域, 如图 11, 蓝色区域为找到的故障跳线联板。

运用上述方法处理 126 幅红外图像, 其中含有故障跳线联板为 21 幅, 未含有跳线联板为 105 幅。

最后正确检测到 18 幅含有故障跳线联板的图片, 正确率为 85.71%, 漏检率为 14.28%, 误检率为 2.3%, 如表 1。



图 11 故障跳线联板识别结果
Fig.11 Fault jumper connecting plate recognition result

表 1 检测结果

设备	图片 总数	故障数	正确率	漏检率	误检率
引流板	126	21	85.71%	14.28%	2.8%

漏检的主要原因是故障跳线联板附近出现热背景,并叠加在了一起,导致分割出的跳线联板形状发生了改变,不再满足 USFPF 特征。针对该问题,应该对该类跳线联板进一步分析其灰度变化,找到这类背景和跳线联板的区别,进一步加以区分即可。

误检的主要原因是有一些如云之类的背景,

它的形状和跳线联板的形状类似,将它误识别为故障跳线联板。针对该问题,应该对故障跳线联板周围的输电线,绝缘子等信息加以分析,根据他们的位置关系,排除掉一些形状类似的干扰背景。

本文提出的一种 U 型四点特征的故障跳线联板识别方法,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红外序列图像中输电线中故障跳线联板的自动提取和故障诊断的可行性和有效性。

5 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,是未来电力巡检的发展趋势。通过计算机或其他处理器对采集到的数字图像处理来对发热缺陷进行检测是还需要更多更深入研究。本文通过红外热图像识别输电线路跳线联板故障,具有良好的效果。因为该方法采用的是跳线联板独特的特征,所以在识别跳线联板具有独特的优势。实验结果证明:该方法检测并识别故障跳线联板的正确率可以达到 85.71%,误检率只有 2.8%。具有良好的效果。

参考文献

[1] LESLIE J R, WAIT J R. Detection of overheated transmission line joints by means of a bolometer [J]. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1949, 68(1): 64-69.

[2] 郭贤珊,李炜,蔡汉生.高压输电线路红外检测初探[J].*高电压技术*,1999,25(2):32-34.
GUO X S, LI W, CAI H S. Primary investigation on infrared diagnosis of HV transmission lines [J]. *High Voltage Engineering*, 1999, 25(2): 32-34. (in Chinese)

[3] AKSYONOV Y P, GOLUBEV A, MUCHORTOV A, et al. On-line a off-line diagnostics for power station HV equipment [C]//*Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference*. Cincinnati, OH: IEEE, 1999: 637-643.

[4] 陈晓兵,马玉林,徐祖舰.无人飞机输电线路巡线技术探讨[J].*南方电网技术*,2008,2(6):56-61.
CHEN X B, MA Y L, XU Z J. Research on transmission-lines-cruising technology with the unmanned aerial vehicle [J]. *Southern Power System Technology*, 2008, 2(6): 56-61. (in Chinese)

[5] 彭晔.基于红外热图像的架空输电线路故障检测软件开发[D].南京:南京理工大学,2011.
PENG Y. *Based on infrared images of overhead transmission line fault detection software* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)

[6] 张文峰,彭向阳,陈锐民,等.基于无人机红外视频的输电线路发热缺陷智能诊断技术[J].*电网技术*,2014,38(5): 1334-1338.
ZHANG W F, PENG X Y, CHEN R M, et al. Intelligent diagnostic techniques of abnormal heat defect in trans-

- mission lines based on unmanned helicopter infrared video [J]. *Power System Technology*, 2014, 38(5): 1334-1338. (in Chinese)
- [7] 刘健,解辰,蔺丽华.基于红外图像的电力变压器油位自动检测方法[J].高电压技术,2010,36(4):964-970.
LIU J, XIE C, LIN L H. Automatic detection of oil level of electric power transformers using infrared image [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(4): 964-970. (in Chinese)
- [8] 杨殿成,邱朝阳.红外检测技术原理及运用[J].新疆电力,2004(3):28-31.
YANG D C, QIU C Y. Principle and application of infrared detection technology [J]. *Xinjiang Electric Power Technology*, 2004(3): 28-31. (in Chinese)
- [9] PLANCK M. *The Theory of Heat Radiation* [M]. MASIUS M, Trans. 2nd ed. P. Blakiston's Son & Co., 1914.
- [10] 罗映昀.高压输电线路设备红外诊断与检测技术分析[J].电子测试,2013(24):115-116.
LUO Y J. Analysis of high voltage transmission line equipment of infrared diagnosis and detection technology [J]. *Electronic Test*, 2013(24): 115-116.
- [11] 陈西广,董昱,王滨海,等.固定翼无人机巡检输电线路探讨[J].山东电力技术,2011(5):1-5,8.
CHEN X G, DONG G, WANG H B, et al. Discussion on transmission line inspection with unmanned fixed-wings aircraft [J]. *Shandong Dianli Jishu*, 2011(5): 1-5, 8.
- [12] 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 of image segmentation thresholding method [J]. *Machine Building & Automation*, 2003(1): 77-80. (in Chinese)
- [13] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62-66.
- [14] 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,2009,45(6):201-202,206.
ZHANG Z F, MA S F, LI W. New regional filling algorithm based on seed [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(6): 201-202, 206.
- [15] 巨志勇,陈优广.一种新的基于链码的填充算法[J].计算机工程,2007,33(17):211-212,215.
JU Z Y, CHEN Y G. New filling algorithm based on chain code [J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(17): 211-212, 215. (in Chinese)
- [16] 廖志武.2-D骨架提取算法研究进展[J].四川师范大学学报:自然科学版,2009,32(5):676-688.
LIAO Z W. A survey of 2-D skeletonization algorithm [J]. *Journal of Sichuan Normal University: Natural Science*, 2009, 32(5): 676-688. (in Chinese)
- [17] 胡斯森,任洪斌,于鸣,等.基于向量内积的新型骨架提取方法[J].液晶与显示,2015,30(5):844-850.
HU S M, REN H B, YU M, et al. A new skeleton extraction method based on vector inner production [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 844-850. (in Chinese)

作者简介:江慎旺(1993—),男,江西九江人,硕士研究生,2014年获得北京理工大学学士学位,主要研究领域为光电成像探测与识别等。E-mail: 137376864@qq.com
许廷发(1968—),男,黑龙江肇东人,博士后,教授,主要研究领域为光电成像探测与识别等。E-mail: xutingfa@163.com