

基于无人机红外热像的电缆隐患点智能检测^①



周咏晨¹, 邹翔宇¹, 蓝耕¹, 王火根²

¹(国网上海电缆公司, 上海 200072)

²(上海曦途信息科技有限公司, 上海 200437)

通讯作者: 王火根, E-mail: 45827730@qq.com

摘要: 城市输电电缆是城市电力供应的生命线, 保障其安全可靠地运行是电网企业日常工作的重中之重, 运维工作面临巨大的挑战, 人工检查手段难以快速有效发现并及时排除隐患点. 因此, 本文提出基于无人机红外热像智能检测电缆隐患点的方法. 首先, 采用无人机对户外电缆终端进行航拍, 得到户外电缆终端的红外热图; 其次, 对红外热图采用改进的 Bernsen 二值化处理; 再次, 使用投影法从二值化图像中提取出待检测的主体电缆, 通过形态学方法去除背景或干扰区域对隐患点诊断的影响; 最后, 根据强度色谱确定主体电缆图像中颜色高亮的异常区域为隐患点. 通过应用本方法, 电网企业能够实现快速的缺陷识别, 消缺和故障判断, 全面提升城市输电电缆状态的管控能力.

关键词: UAV; 红外热图; 二值化; 投影法; 隐患点检测

引用格式: 周咏晨, 邹翔宇, 蓝耕, 王火根. 基于无人机红外热像的电缆隐患点智能检测. 计算机系统应用, 2020, 29(8): 249-254. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7608.html>

Intelligently Detecting Hidden Points of Cables Based on Infrared Thermal Image of UAV

ZHOU Yong-Chen¹, ZOU Xiang-Yu¹, LAN Geng¹, WANG Huo-Gen²

¹(State Grid Shanghai Cable Company, Shanghai 200072, China)

²(Xitu Information Technology Limited Cooperation, Shanghai 200437, China)

Abstract: Urban transmission cables are the lifeline of urban power supply. It is important for grid corporations to ensure the safe and reliable operation of the cables in the daily work. It still remains to be a challenge and manual inspection is difficult to quickly and effectively find and eliminate hidden dangerous points. Therefore, this study proposes a method for intelligently detecting hidden dangerous points of cables based on infrared thermal images. First, using UAV to obtain the infrared map of the outdoor terminal of the cable. Next, the infrared thermal map is binarized by an improved Bernsen algorithm. Then, the projection method is used to extract the subject cables from the binary image in order to eliminate the influence of the background. Finally, according to the intensity chromatogram, the abnormal areas with bright colors in the subject cable image are determined as hidden dangerous points. By applying this method, grid corporations can achieve rapid defect identification, elimination, and fault judgment. It can comprehensively improve the ability to manage and control the status of urban transmission cables.

Key words: UAV; infrared thermal image; Bernsen binarization; projection method; hidden points detection

1 引言

随着我国经济的高速发展, 城市对电力的需求量

与日俱增, 保障城市电力供应具有重要的意义, 而户外电缆终端的可靠运行是输电电缆稳定工作的关键因素.

^① 收稿时间: 2020-01-22; 修改时间: 2020-02-27, 2020-03-24; 采用时间: 2020-04-03; csa 在线出版时间: 2020-07-29

在使用过程中,户外电缆终端常年暴露在复杂多变的自然环境中,性能的稳定极易受到天气情况的影响.因此,定时定点地对其进行检测成为电网企业的日常工作之一.由于输电线路和电缆结合部的户外电缆终端平台的高度约为十米,运维人员手持专业设备登塔进行检查存在较高的安全风险,并且日常运维工作中现场采集的大量可供分析的数据,采用传统的人工检查手段难以快速有效地发现隐患点.因此,提出一种代替传统人工巡检的方法具有重要的应用价值.

为了提高电网企业的工作效率,本文提出基于无人机红外热像智能检测电缆隐患点的方法.一方面,与传统人工巡检相比,无人机巡检操作简单,具有高空作业风险低,不受高度限制等特点,可以多维度地获取户外终端设备的运行数据.目前,无人机巡检在电力行业中得到了广泛运用并取得了一定的进展.宁柏锋^[1]实现无人机巡检图像中输电线路销钉脱落故障的自动检测.张国祥^[2]将无人机应用到光伏电站提高巡检效率,延长光伏发电机组使用寿命.另一方面,红外检测技术可以非接触地对运动目标和微小目标测温,并直观地显示物体表面的温度场,具有温度分辨率高,可采用多种显示方式进行数据存储和处理的优点.因此,以无人机为基础作业平台,探索红外热成像技术智能识别和检测输电电缆隐患点是一种可行高效的方法,研究学者针对红外图像检测做了许多工作.黄华勇等^[3]提出的高频谐波下电缆头热点温升的红外测量方法,利用建立了电缆头的有限元模型,通过电热耦合分析软件对电缆头进行电场和温度场耦合仿真分析电缆头温升的影响.杨政勃等^[4]利用输电线路温升变化,采用红外图像识别输电线路电缆故障.杨可等^[5]通过直方图分析的背景温度计算和形态滤波去噪分析,提出一个基于计算机视觉的电缆终端表面温升分析系统.王海元^[6]对采集的电力设备热红外图像等温线温度场分割进行处理,确定出热红外图像的缺陷中心位,快速预测出电力设备故障点.尽管以往研究取得一定成果,但是针对电力公司要求的电缆终端的检测研究还是很少的.本文从实际应用出发,为了提高电缆故障点检测的效率,避免施工人员的危险作业,提出了替代人工的智能检测方法.首先,采用无人机对户外电缆终端进行航拍,得到户外电缆终端的红外热图;其次,对红外热图采用改进的 Bernsen 二值化处理;再次,使用投影法从二值化图像中提取出待检测的主体电缆,去除背景对隐

点诊断的影响;最后,根据强度色谱确定主体电缆图像中颜色高亮的异常区域为隐患点,从而实现对电缆隐患点的智能检测.

2 方法

本方法主要包括目标检测和目标识别两个过程,流程如图 1 所示.具体来讲,在目标检测中,利用改进的 Bernsen 二值化进行图像处理,然后采用投影法和形态学提取红外图像中待检测的主体电缆;在目标识别中,通过主体电缆图像中颜色高亮的异常区域确定可疑的隐患点.

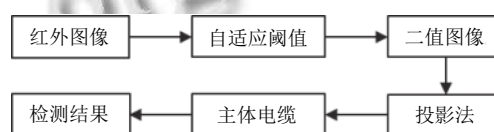


图 1 检测流程

2.1 改进的 Bernsen 二值化算法

图像二值化是数字图像处理中一个重要的预处理步骤,是将图像中所有像素的灰度值根据选定的阈值设置为 0 (黑色) 或者 1 (白色),使整幅图像呈现出只有黑色和白色两种颜色的效果.经过二值化处理后的图像可以比较容易地从背景中提取出物体,将前景像素与背景像素分离.常见的二值化方法有灰度平均值法, Otsu 方法^[7] 以及自适应阈值方法^[4].前两种方法的共同点是基于全局的二值化方法,使用单一阈值对图像进行处理.最后一种方法认为图像中每个像素对应的阈值是不相同的,在二值化的时候为每个像素根据其邻域范围内像素值选取一个合适的阈值进行处理^[8,9].在实际应用中,图像的灰度变化较大,易受到光照、噪声等不利因素的影响.因此,本文为了克服光照不均和噪声影响,提出了一个改进的 Bernsen 算法对红外图像进行二值化处理.

Bernsen 算法是一种局部阈值算法,适合解决光照不均的问题,其核心思想实在灰度图像中以像素点 (i, j) 为中心的 $(2w + 1) \times (2w + 1)$ 窗口,计算各个像素点的阈值 $T(i, j)$:

$$\begin{cases} T(i, j) = 0.5 \times \max[f(i+k, j+l)] + \min[f(i+k, j+l)] \\ -w \leq k, l \leq w \end{cases} \quad (1)$$

其中, k, l 为窗口位置参数,为了减少光照、噪声的影响,本文再将图像 $f(i, j)$ 逐点先进行高斯滤波:

$$f'(i, j) = \frac{1}{(2w+1)^2} \sum_{i,j} f(i, j) \times \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma}\right)^2 \right]\right) \quad (2)$$

其中, σ 为高斯滤波平滑尺度, 然后再对其进行 Bernsen 二值处理得到 $T'(i, j)$:

$$\begin{cases} T'(i, j) = 0.5 \times \max[f'(i+k, j+l)] + \min[f'(i+k, j+l)] \\ -w \leq k, l \leq w \end{cases} \quad (3)$$

遍历该图像每个点, 得到改进的 Bernsen 二值化图像:

$$b(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{iff } (i, j) < 0.5 \times (T(i, j) + T'(i, j)) \\ 1, & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

在本文中, 窗口大小采用 5×5 , 式 (2) 中 T 和式 (3) 中 T' 随着窗口在图像的滑动, 每个区域会产生不同的值, 经式 (4) 计算, 最终实现自适应阈值的二值化图像。

2.2 投影法

红外图像经过二值化处理之后, 可以得到主体电缆的大致轮廓。投影法^[10-13]是对二值图像进行前景与背景分割的常用方法。为了提取出图像中的主体电缆部分, 利用投影法得到其上下左右四个边界的坐标信息, 从而进行分割。投影法主要由两个过程组成: 水平投影(行投影), 实现步骤为循环各行, 统计该行前景像素的个数。经过水平投影之后, 可以得到前景的上边界和下边界的坐标信息。同理, 为了得到前景的左边界和右边界的坐标信息, 对二值图像进行垂直投影。

2.3 形态学处理

提取出红外图像中的主体电缆之后, 需要进一步对其是否存在隐患点进行识别。本文通过比较主体电缆图像中颜色高亮的异常区域和强度色谱的分布初步确定发热点。但是得到的高亮区域数量可能过多, 存在某些高亮区域面积过小的情况, 所以需要初步确定的异常区域进行合并处理, 合并过程通过数学形态学处理方法中的腐蚀, 膨胀和开闭运算^[14]实现。腐蚀和膨胀操作是数学形态学处理方法的基础, 以集合为操作对象, 从数学意义上来说是一种非线性操作。

假设 A 和 B 是 Z^2 中的两个集合, 集合 B 对集合 A 的腐蚀可以表示为:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (5)$$

根据定义, 可以看出 B 对 A 的腐蚀是 A 中包含的一个用 z 平移的 B 中的所有的点 z 的集合。

集合 B 对集合 A 的膨胀可以表示为:

$$A \oplus B = \{z | [(B)_z \cap A] \subseteq A\} \quad (6)$$

根据定义, 可以看出 B 对 A 的膨胀是所有位移 z 的集合, 这样, 和 A 中至少有一个重叠元素。

腐蚀操作会缩小图像中的组成部分, 实际应用中可以去掉图像中细微的连接线, 点等; 膨胀操作则会扩大图像的组成部分, 可以粗化图像中的物体。

开运算和闭运算是建立在腐蚀和膨胀基础之上的另外两种形态学处理方法。集合 B 对集合 A 的开运算可以表示为:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (7)$$

集合 B 对集合 A 的闭运算可以表示为:

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (8)$$

本文在提取电缆主体部分之后采用数学形态学对小区域部分进行融合。开运算先膨胀再腐蚀, 而闭运算的实现顺序正好与之相反。开运算和闭运算都能够对物体的轮廓进行平滑, 开运算能够断开较窄的狭颈并消除细的突出物, 闭运算通常会弥合较窄的间断并消除小的孔洞。因此, 通过这些操作可以将电缆主体中距离较近的多个高亮区域合并成一个, 同时去除高亮区域的内部孔洞, 隐患点识别具体分为以下步骤:

- (1) 利用强度色谱与主体电缆图像的整体颜色分布确定高亮阈值, 得到主体电缆图像中所有高亮区域;
- (2) 选择合适面积阈值, 将面积过小的的高亮区域移除;
- (3) 根据上述 4 种形态学处理方法将距离较近的多个高亮区域合并成一个, 同时去除高亮区域的内部孔洞;
- (4) 剩余被保留下来的高亮区域为最终的隐患点, 将结果输出。

通过上述方法, 可以实现对电缆隐患点的智能检测。现将算法流程总结如算法 1。

算法 1. 智能检测电缆隐患点算法

- 1) 用无人机航拍一幅电缆红外热像, 对其进行改进的 Bernsen 二值化处理;
- 2) 根据二值化图像, 利用垂直和水平投影法提取出红外图像中的主体电缆;
- 3) 通过强度色谱, 初步确定主体电缆中的颜色高亮区域为异常区域;
- 4) 对异常区域进行形态学处理, 保留符合条件的异常区域;
- 5) 输出隐患点位置信息。

3 实验结果

本实验主要分为两个部分,分别为主体电缆提取和隐患点识别。

3.1 主体电缆提取

本实验首先使用无人机航拍得到户外电缆终端设备的红外热像,拍摄到的图像大小均为 640×480。如图 2 所示。图 2(a) 为户外电缆终端处理正常状态的图像,整体发热温度较低且几乎没有差异。图 2(b) 为处于异常状态的图像,存在局部发热温度过高的区域且整体温度偏高,该情况说明此时户外电缆终端处于非安全的工作状态。

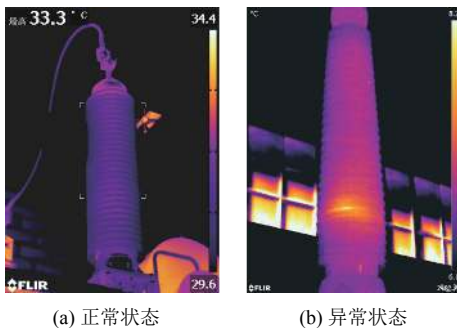


图 2 户外电缆终端红外热像

户外电缆终端红外热像经过改进的 Bernsen 二值化和形态学去除干扰区域处理得到的结果如图 3 所示。第一行为三张户外终端红外热像原始图像,第二、三行分别为使用 Bernsen 二值化处理结果和形态学处理后的图像。二值图像清楚地显示出主体电缆的轮廓。本文使用形态学的先膨胀后腐蚀的处理方式,即闭运算,使得主体部分较好的合并为一起,便于后期的前景背景分离。

经上述处理之后,需要对二值图像进行投影,找出主体电缆的位置。提取图像中的主体电缆部分是重要的一步。因为隐患点只可能存在于户外电缆终端上,不可能存在于其他地方,所以去除电缆终端以外的部分有利于提高后续隐患点识别的正确率。投影之后提取出的结果如图 4 所示。图 4 结果从左至右分别是图 3 中的户外电缆终端红外热像所对应的主体电缆部分。

3.2 隐患点识别

提取出主体电缆之后,本文通过强度色谱确定主体电缆中颜色高亮的区域为可疑的发热区域即隐患点。强度色谱如图 5(a) 所示,不同的色谱带表示不同的温

度范围。色谱颜色亮度越大,表示的温度越高;反之,色谱颜色亮度越低,代表的温度也越低。

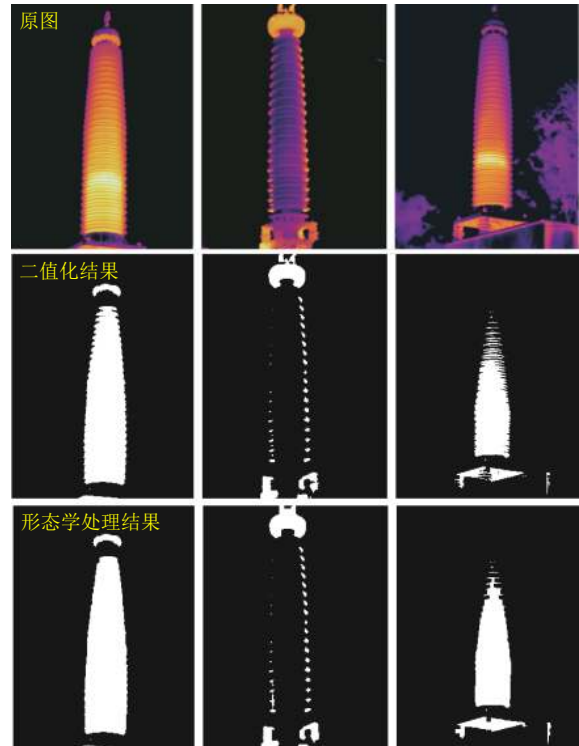


图 3 改进 Bernsen 二值化和形态学闭运算处理结果

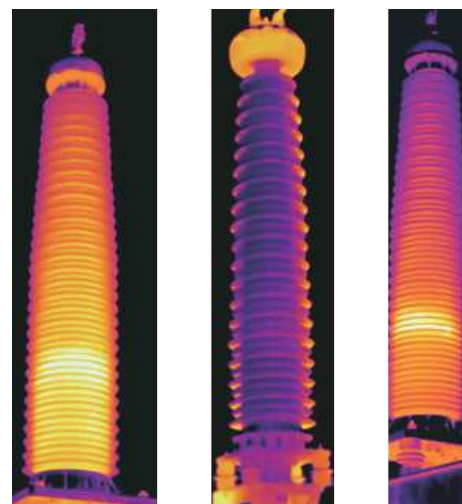


图 4 主体电缆

首先确定每张主体电缆图像的高亮阈值,得到所有可能的异常区域。通过高亮区域确定可疑发热区域中部分图像效果如图 5(b) 和图 5(c) 所示。其中图 5(b) 所确定的发热区域已经逼近最终发热区域,但是存在多个面积过小的亮区域;图 5(c) 的高亮区域属于干

扰区域. 如果不去除这些干扰或者面积过小的区域, 将对结果产生影响. 因此需要进一步的检测来去除这些干扰的区域. 本方法通过设定高亮区域面积阈值的方式去除这些干扰区域. 只有大于面积阈值的高亮区域才得以保留, 而小于面积阈值的则认为不是可疑的发热区域. 因此, 经过面积阈值判断之后, 图 5(b) 和图 5(c) 中红色圆圈标记处的面积过小的区域将被去除.

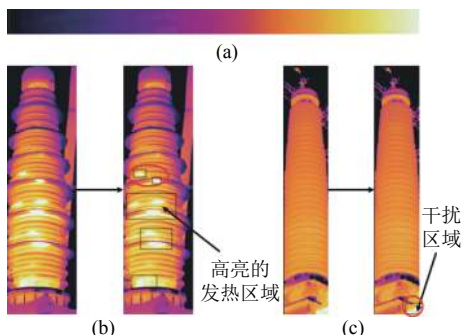


图 5 强度色谱和高亮区域示意图

对保留下来的区域进一步处理. 通过形态学处理方法连接较近的区域, 并消除区域内部的细小孔洞. 经过处理之后得以保留的区域为最终的发热区域, 即隐患点, 在主体电缆图像中标出隐患点位置进行输出. 检测结果如图 6 所示, 分别对应图 6 中的隐患点位置. 检测结果显示, 本方法可以准确地检测出电缆中存在的隐患点. 图 7 为本算法检测实例平台展示.

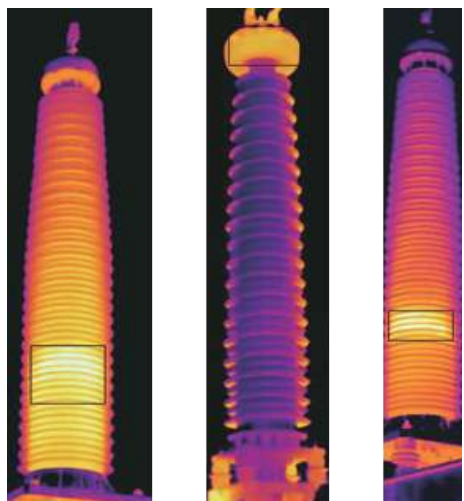


图 6 隐患点检测结果

为了进一步验证本文方法的性能, 我们使用本方法对 8 个不同地区的变电站采集到的共计 5800 幅户

外电缆终端的红外热像进行检测. 预先经过人工检测将采集到的图像进行检查分为正常和异常两类, 并对存在隐患点的图像标记处位置便于与使用本文方法检测的结果进行比较.

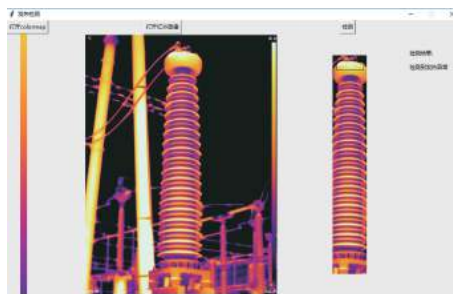


图 7 检测实例

高亮区域面积阈值大小对于识别正确率有着一定的影响, 它们之间的关系如图 8 所示. 从图 8 中, 我们可以看出, 识别正确率与面积阈值成负相关, 也就是面积阈值设置的值越大, 正确率越低, 这是因为去除干扰区域的时候, 如果面积阈值设置的过大, 会将原本存在隐患点的区域一并去除, 影响后续的形态学处理效果. 因此, 本文最终将高亮区域面积阈值设置为 100.

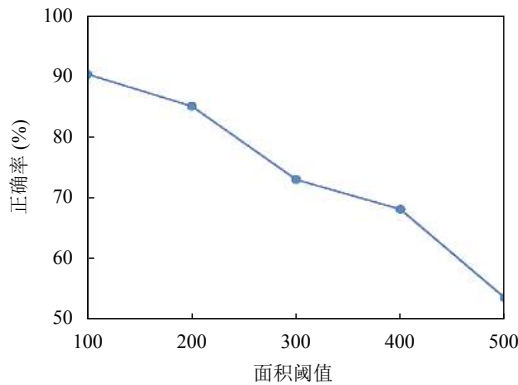


图 8 高亮区域面积阈值对识别正确率的影响

为了验证本文提出的改进的 Bernsen 二值化结合形态学提取电缆的效果, 本文与传统的 Bernsen 二值化和 Otsu 二值化方法的检测结果进行比较, 如表 1. 由表 1 可以看出, 采用本文的方法检测结果高于传统的 Bernsen 二值化和 Otsu 二值化方法的 92.20% 和 88.66%, 达到了 98.79%, 说明本文提出的方法检测电缆主体是有效的.

最后, 将本文提出的方法用于 5800 幅红外图像检测电缆故障点, 该图像经人工测定区分了正常和异常

两种结果,本文方法检测结果见表2。从表2中我们可以看出,对于正常和异常两类户外电缆终端红外图像,本文方法都可以准确地判断出图像中是否存在隐患点,检测正确率均在90%以上。

表1 本文方法与传统二值化方法分割电缆主体比较结果

方法	数量	检测成功数量	正确率(%)
Bernsen	5800	5348	92.20
Otsu	5800	5142	88.66
本文方法	5800	5730	98.79

表2 本文方法检测电缆故障点统计结果

类别	数量	检测成功数量	正确率(%)
正常	1450	1370	94.48
异常	4350	3940	90.57

4 总结与展望

本文从电网中检测电缆隐患点的实际问题出发,针对传统人工巡检困难,难以快速有效地发现缺陷和故障这一现状,提出了基于无人机红外热像智能检测电缆隐患点的方法。采用改进 Bernsen 二值化方法和投影法从红外图像中提取主体电缆,基于强度色谱和形态学处理进行识别。实验结果显示,本方法检测隐患点的正确率能够满足实际应用要求,是一种代替人工检测的可行且高效的方法。

参考文献

- 1 宁柏锋. 基于深度学习的无人机巡检图像销钉故障检测. 计算机测量与控制, 2019, 27(11): 25–29.
- 2 张国祥. 无人机在光伏电站巡检中的应用. 电子技术与软件工程, 2019, (22): 212–213.
- 3 黄华勇, 魏长明, 毛欣, 等. 高频谐波下电缆头热点温升的红外测量与分析. 电测与仪表, 2013, 50(7): 29–34. [doi: 10.3969/j.issn.1001-1390.2013.07.007]

- 4 杨政勃, 金立军, 张文豪, 等. 基于红外图像识别的输电线路故障诊断. 现代电力, 2012, 29(2): 76–79. [doi: 10.3969/j.issn.1007-2322.2012.02.017]
- 5 杨可, 刘明军, 毛欣, 等. 基于计算机视觉的电缆终端表面温升分析系统. 电视技术, 2013, 37(7): 179–183. [doi: 10.3969/j.issn.1002-8692.2013.07.054]
- 6 王海元. 热红外图像等温线温度场分割研究. 科学技术与工程, 2013, 13(2): 491–494. [doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2013.02.048]
- 7 Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62–66. [doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076]
- 8 Chen YP, Wang LS. Broken and degraded document images binarization. Neurocomputing, 2017, 237: 272–280. [doi: 10.1016/j.neucom.2016.12.058]
- 9 Koike S. Adaptive threshold nonlinear algorithm for adaptive filters with robustness against impulse noise. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(9): 2391–2395. [doi: 10.1109/78.622963]
- 10 Blayvas I, Bruckstein A, Kimmel R. Efficient computation of adaptive threshold surfaces for image binarization. Pattern Recognition, 2006, 39(1): 89–101. [doi: 10.1016/j.patcog.2005.08.011]
- 11 方徐伟, 付晓薇. 基于投影法和 Caffe 框架的身份证分割算法. 计算机工程与应用, 2017, 53(23): 113–117. [doi: 10.3778/j.issn.1002-8331.1704-0262]
- 12 杨晓娟, 宋凯. 基于投影法的文档图像分割算法. 成都大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 139–141.
- 13 郭艳平, 丁万山. 基于投影法定位与分割的美元号码识别系统. 航空计算技术, 2007, 37(5): 45–48. [doi: 10.3969/j.issn.1671-654X.2007.05.013]
- 14 Gonzalez RC, Woods RE. Digital Image Processing. 3rd ed. London: Prentice Hall, 2007.