

一起劣化悬式瓷质高压绝缘子红外检测案例分析

胡淋波¹, 李唐兵², 姚建刚¹, 朱向前¹, 卢航³, 慕陆杰¹, 郑玲¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;
2. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 3. 国网金华供电公司, 浙江 金华 321017)

摘要: 绝缘子是变电站的重要供电设备, 绝缘子劣化会导致绝缘子闪络或掉串, 对电力系统的安全稳定运行具有严重威胁。红外检测技术在瓷质绝缘子方面的应用是一种可靠、高效的检测手段, 但使用目前的红外检测标准会造成多数劣化绝缘子的漏判。针对这种情况, 笔者通过一起劣化绝缘子案例, 基于劣化绝缘子发热原理, 设计图像分割算法求出钢帽以及盘面区域, 然后提取盘面以及钢帽温度特征, 分析钢帽与盘面的发热规律。针对绝缘子钢帽与盘面的发热规律, 提出相应的诊断方法及其预防措施, 进一步提高劣化绝缘子红外检测的准确性。

关键词: 劣化绝缘子; 红外检测; 图像分割

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)07-0622-05

Analysis of an Infrared Detection Case of Degraded Ceramic Voltage Insulator

HU Linbo¹, LI Tangbing², YAO Jiangang¹, ZHU Xiangqian¹, LU Hang³, QI Lujie¹, ZHENG Ling¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

3. State Grid Zhejiang Electric Power Company Jinhua Power Supply Branch, Jinhua 321017, China)

Abstract: Insulator is major power supply equipment of substation. Degraded insulator can lead to insulator flashover or bunch-drop, and it is a serious threat to safe and stable operation of the power system. In the application of porcelain insulator detection, infrared detection technology is a reliable and efficient detection means. Application of current infrared detection standards will cause the leakage of most degraded insulators. In this paper, an infrared detection case is analyzed by designing image segmentation algorithm to calculate the steel cap and disk areas and extract the temp characteristic to analyze the law of fever based on heating mechanism of degraded insulator. In view of the insulator steel cap and disk fever regularity, and the corresponding diagnostic methods and preventive measures are put forward to improve the accuracy of the infrared detection for degraded insulators.

Key words: degraded insulator, infrared detection, image segmentation

0 引言

绝缘子是用来固定发电厂、变电站和高压输电线导线的重要绝缘部件, 同时也是故障多发元件, 污秽、裂纹、破损等问题严重威胁输电线路的安全运行^[1], 红外检测技术在高压绝缘子状态检测方面的应用是一种可靠、高效的检测手段, 目前, 红外热像法绝缘子检测依据的标准是 DL/T664-2008《带电设备红外诊断技术应用导则》^[2]。该标准提出, 运行中的低值绝

缘比正常绝缘子温度高, 零值绝缘子温度较正常绝缘子低, 判断标准为温差 1 K。实际情况是, 受环境因素、表面污秽等因素的影响, 劣化绝缘子与正常绝缘子的温差往往是小于 1 K 的。

笔者通过一起劣化悬式瓷质高压绝缘子红外检测案例, 分析了绝缘子发热原理, 设计了绝缘子串自动定位算法和钢帽与盘面区域的提取算法, 并统计钢帽与盘面的温度特征, 总结劣化绝缘子的发热规律。针对绝缘子钢帽与盘面的发热规律, 提出相应的诊断

收稿日期: 2016-01-07; 修訂日期: 2016-03-04。

作者简介: 胡淋波 (1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 电气设备智能检测与图像处理。

通讯作者: 姚建刚 (1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力市场, 电力系统。

基金项目: 江西省电力公司科技项目 (赣电科 52182015000P)。

方法及其预防措施,进一步提高劣化绝缘子红外检测的准确性。

1 劣化绝缘子红外检测案例

2015年9月14日,国网江西省电力科学研究院组织对上饶220kV变电站所有悬式绝缘子进行了带电红外检测,发现110kV侧101间隔多个构架发现多串绝缘子串中有明显发热的绝缘子,为了保证电力系统的稳定、安全运行,2015年12月24日,国网江西省电科院组织上饶供电公司,根据带电检测结果,停电更换已发现劣化的绝缘子串,并组织利用HVM-5000绝缘电阻测试仪对更换的劣化绝缘子串进行绝缘子电阻测试,仪器绝缘电阻测试范围5000kΩ~500GΩ,绝缘精度±5%,其绝缘电阻结果如表1和表2所示。

表1 110kVⅡ母3#小号侧三相电阻

Table 1 The three-phase electrical resistance of Ⅱ MU 3#

绝缘子位置	A 相	B 相	C 相
1	7.17 GΩ	1.39 MΩ	2.4 MΩ
2	5.92 GΩ	1.31 GΩ	12.8 GΩ
3	9.3 GΩ	9.43 GΩ	6.98 GΩ
4	9.36 GΩ	41.8 MΩ	4.26 GΩ
5	10.8 GΩ	6.46 GΩ	10.2 GΩ
6	11.2 GΩ	9.38 GΩ	10.4 GΩ
7	9.8 GΩ	8.34 GΩ	8.2 GΩ
8	9.56 GΩ	1.64 GΩ	12.7 GΩ

从表1电阻测试可以看出B相第1片与第4片绝缘子劣化,C相第1片绝缘子劣化(劣化绝缘子电阻≤300MΩ)。

表2 110kV101间隔1#上层大号侧三相电阻

Table 2 The three-phase electrical resistance of 101 interval

绝缘子位置	A 相	B 相	C 相
1	295 MΩ	3.1 GΩ	2.58 GΩ
2	3.01 GΩ	6.6 GΩ	103 MΩ
3	4 GΩ	5.6 GΩ	31.8 MΩ
4	43.4 MΩ	7.8 GΩ	2.13 GΩ
5	1.8 GΩ	22.8 Ω	2.19 GΩ
6	1.53 GΩ	4.72 GΩ	2.04 GΩ
7	2.5 GΩ	6.97 GΩ	7.23 GΩ
8	11.2 GΩ	5.13 GΩ	36.6 MΩ

从表2电阻测试可以看出A相第1片与第4片绝缘子劣化,B相第5片绝缘子劣化,C相第2、3片绝缘子劣化(劣化绝缘子电阻≤300MΩ)。

2 劣化绝缘子发热理论分析

劣化绝缘子的并联等值电路^[3-7]如图1所示, C_0 是极间电容, R_J 是介质损耗的等值阻值, R_L 是劣化通道漏电损耗的等值电阻, R_w 是表面污秽层漏电损耗的等值电阻。这样,劣化绝缘子等效电导为:

$$\frac{1}{R_X} = \frac{1}{R_J} + \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_w} \quad (1)$$

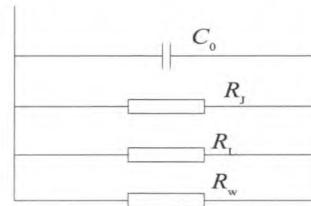


图1 劣化绝缘子的等效图

Fig.1 Equivalent circuit of degraded insulator

对于一个洁净完好的绝缘子来说, R_L 和 R_w 均明显大于 R_J ,故 $R_X \approx R_J$,发热功率:

$$P = U_k^2 R_J / (X_D^2 + R_J^2) \quad (2)$$

式中: $R_J = 1/wC_0 \operatorname{tg}\delta$,对陶瓷绝缘子来说,介质损耗角的正切值 $\operatorname{tg}\delta$ 约为0.015~0.025,取 $C_0=50\text{ pF}$, R_J 约为2550~4250MΩ,远大于 X_D ,故此时的发热功率为 $P = U_k^2 w C_0 \operatorname{tg}\delta$, U_k 为第k片绝缘子两端电压。

当绝缘子劣化时, R_L 变小, $R_X \approx R_J$,这时发热集中在钢帽内部,钢帽温度将明显升高,当 R_L 继续下降且小于 X_D 时,发热功率将小于正常值,钢帽的热像图变暗。当绝缘子积污较为严重,污秽层的电阻 R_w 明显变小,此时 $R_X \approx R_w$,绝缘子发热集中在盘面表面。

3 红外图谱分析

由上述发热理论分析可知,当绝缘子劣化时,钢帽出现温度比正常值偏高或者偏低,红外图谱表现较为明显。图2为101间隔1#上层大号侧三相红外图谱,通过分析此三相的红外图谱特征总结劣化绝缘子的红外图谱特征。

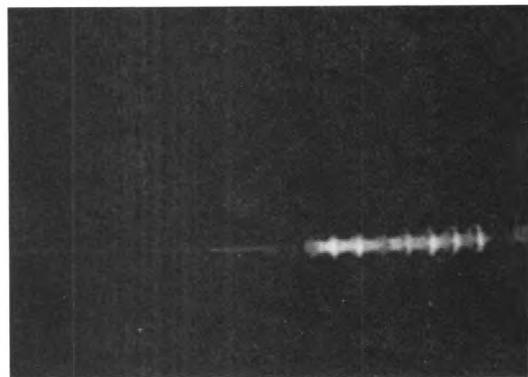
从三相图谱看出,A相钢帽第1、4片发热不明显,但盘面第1、4片较其余盘面亮度较暗;B相第5片盘面较其余盘面亮度较暗;C相第1、2片钢帽发热明显,但第2、3、8片的盘面较其余盘面亮度较暗。根据绝缘电阻测试结果,劣化绝缘子的盘面发热不明显。

4 盘面与钢帽发热规律智能分析

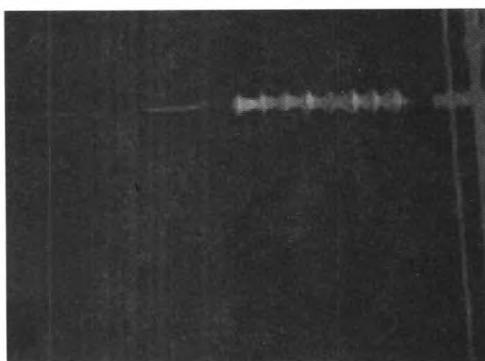
4.1 绝缘子串自动定位

4.1.1 基于Otsu阀值的灰度线性变换图像增强

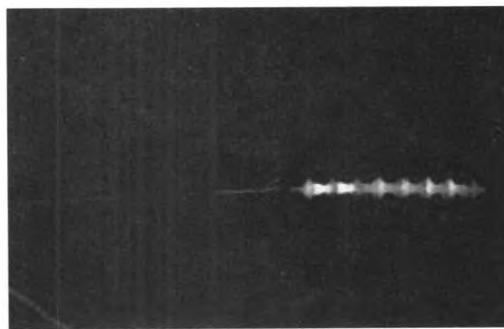
基于方差的 Otsu 阈值法是众多图像分割阈值法性能最好的一种^[8-10]。利用 Otsu 阈值分割法对红外图像进行分割，往往能将背景和目标较好地分离，但绝缘子红外图像中存在导线、钢架等伪目标，分割往往达不到理想的效果。



(a) 101 间隔 1#A 相



(b) 间隔 101 间隔 1#B 相



(c) 间隔 101 间隔 1#C 相

图 2 三相红外图谱

Fig.2 The Three-phase Infrared spectrum

红外图片灰度化之后，其灰度范围为[0,255]，假设根据 Otsu 阈值分割法将[0, 255]灰度区域分为背景[0, t]和前景[t , 255]的 2 个区域，则[t , 255]区域一般包含着目标和导线、钢架等伪目标区域，对[t , 255]这个区域进行灰度拉伸，则可以增大目标和伪目标的对比度，其灰度平均差也相应增大，为后面的阀值分割和区域过滤提取绝缘子区域奠定基础。改进的灰度线性变换表达式为：

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & 0 < f(x, y) \leq t \\ \frac{255}{255-t}[f(x, y) - t] & t < f(x, y) \leq 255k \\ f(x, y) & f(x, y) > 255k \end{cases} \quad (3)$$

式中： t 为 Otsu 阈值法确定的阀值； k 为小于 1 的加权系数。多次试验表明 k 在取值范围[0.8, 0.9]中时，分割结果较好。

4.1.2 图像去噪

灰度图像的开操作和闭操作与二值图像的对应操作具有相同的形式。用子图（结构元素） b 对图像 f 进行开操作同二值图像中的情况一样，先用 b 对 f 进行简单的腐蚀操作，而后用 b 对得到的结果进行膨胀操作。

4.1.3 图像二值化

经过图像增强和图像去噪，应用阀值分割将灰度图像转为二值图像，本文采用基于 Otsu 阈值分割法，利用其确定分割阀值 T ，并引入权值系数对阀值进行修正。其分割原理表达式如下：

$$g(x, y) = \begin{cases} 0 & f(x, y) < uT \\ 1 & f(x, y) > uT \end{cases} \quad (4)$$

式中： u 为经验权值系数。可根据图像背景复杂程度进行调节，非目标区域在整个红外图像中占据区域越大， u 的值相应增大， u 的范围为[1, 1.2]。

4.1.4 区域过滤提取绝缘子串区域

经过前面几步的处理，钢架被分成很多小块区域，绝缘子区域占据面积最大，去除小区域即可得到绝缘子串区域。首先采用连通区域标记法对二值图进行区域标记，区域标记后，提取最大区域即可将绝缘子串区域提取出来。

4.1.5 绝缘子串定位

首先提取绝缘子串区域骨架，提取中心轴若干个特征点，根据绝缘子串骨架特点，可以求取十字交叉点作为特征点。将所求的点膨胀之后作为 Hough 变换的特征点，通过 Hough 变换的相关函数即可求得绝缘子串的中心轴，再计算中心轴的斜率便可得到倾斜角 θ 。通过旋转倾斜角度将绝缘子串水平校正，再通过行列扫描，确定绝缘子串边界，实现绝缘子串的定位。

4.2 钢帽及盘面的温度特征分析

4.2.1 钢帽及盘面区域提取

在红外图像中，形状、尺寸基本一致；红外图像中的绝缘子盘面常呈现为椭圆形、绝缘子钢帽呈现为等腰梯形，在两片绝缘子连接的位置，钢帽直径最小^[11]。

由绝缘子结构特征可知，绝缘子钢帽直径要小于

盘面直径，在图像上显示为钢帽区域像素长度小于盘面区域。绝缘子钢帽区域像素长度变化缓慢，在钢帽和盘面交界处会出现像素长度突变，以像素长度突变位置作为分割位置，即可将绝缘子钢帽和盘面分离。

4.2.2 钢帽及盘面温度特征提取

提取钢帽和盘面区域之后，可以将钢帽的平均温度作为钢帽温度特征，但由于盘面区域在绝缘子串中较小，盘面分割往往包含钢帽部分区域，盘面与背景接触部分，因此盘面的平均温度不能反映盘面的真实温度。

盘面的骨架反映出盘面的中心线，因此盘面骨架上的温度能正确反映盘面的真实温度。求取盘面的骨架，截取中心区域的骨架点的位置，求对应点的温度平均值作为盘面的温度特征参考。图3为钢帽与盘面区域提取图。

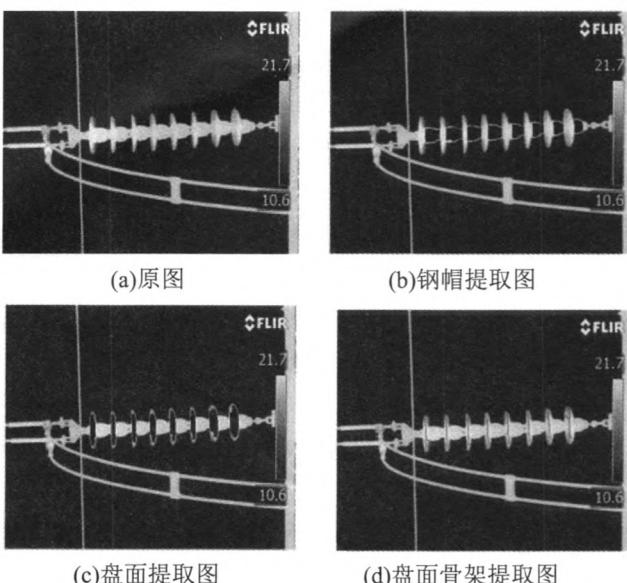
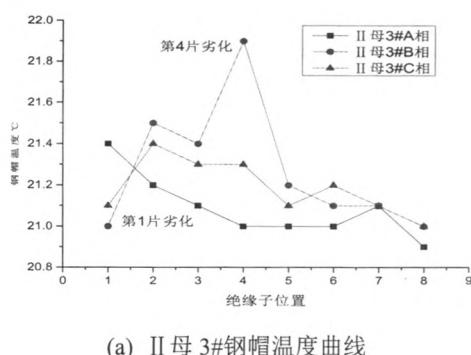


图3 钢帽和盘面区域提取图

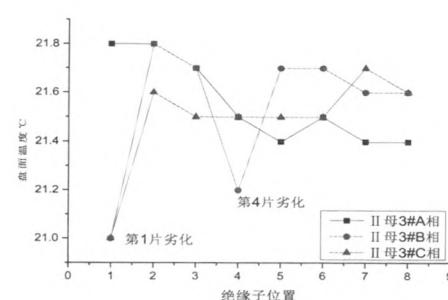
Fig.3 The extracted results of disks and steel caps area

4.2.3 钢帽与盘面温度特征分析

根据上述算法，提取 110kV II 母 3# 小号侧三相和 101 间隔 1# 上层大号侧三相的温度特征，进行三相对比。图 4 为 II 母 3# 小号侧三相温度曲线对比图，图 5 为 101 间隔 1# 上层大号侧三相的温度对比图。



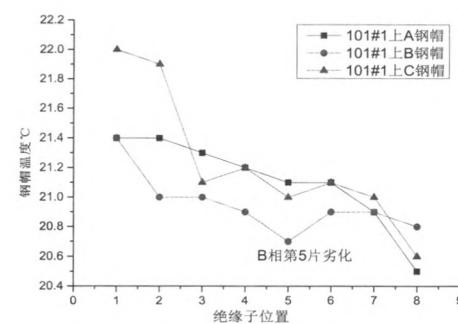
(a) II母3#钢帽温度曲线



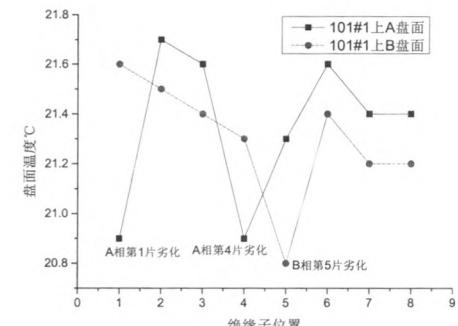
(b) II母3#盘面温度曲线

图4 II母3#小号侧三相温度曲线

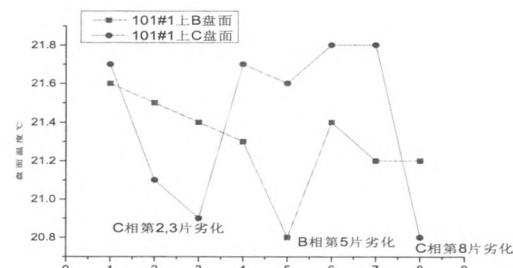
Fig.4 The Three-phase temperature curve of II MU 3# small side



(a) 101间隔1#钢帽温度曲线



(b) 101间隔1#盘面A、C相



(c) 101间隔1#盘面B、C相

图5 101间隔1#三相温度曲线

Fig.5 The Three-phase temperature curve of 101 interval

从上述 6 串绝缘子串的温度曲线分布图来看，正常的绝缘子串分布呈不对称的马鞍形，劣化绝缘子低于 $10 M\Omega$ 时，和正常的马鞍形相比，钢帽的平均温度比正常时较低，在 $20 M\Omega$ 以上的劣化绝缘子发热较为

明显，但有时受环境因素的影响，钢帽发热并不很明显，从盘面发热图来看，当绝缘子劣化时，盘面温度较正常盘面温度偏低。

5 结论

从上述案例分析结果可以得出以下几点结论：

1) 正常绝缘子串的钢帽发热规律成不规则的马鞍形，相邻绝缘子温差较小；在污秽较轻且天气干燥的情况下，正常绝缘子串的盘面发热基本相同。

2) 在不同环境下，劣化绝缘子钢帽发热与正常绝缘子温差可能小于1 K，但与正常的不规则的马鞍形存在不同大小的波动。

3) 劣化绝缘子钢帽温升可能并不明显，但在污秽较轻且天气干燥的情况下，劣化绝缘子盘面温度比正常绝缘子低。

鉴于以上3点结论，在劣化绝缘子红外检测的过程中，判断劣化绝缘子时可以参考绝缘子钢帽的平均温度与盘面骨架中心部分的平均温度，提高劣化绝缘子判别的准确度。

通过此案例的分析，上述结论可以为电网供电公司劣化绝缘子的红外判别上提供一个参考依据，但由于现场运行环境复杂，以上结论需更多的案例验证，不同环境下对绝缘子钢帽与盘面的发热规律的影响待进一步研究和总结完善。

参考文献：

- [1] 何洪英，姚建刚，蒋正龙，等. 基于支持向量机的高压绝缘子污秽等级红外热像检测[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 70-74.
HE Hongying, YAO Jiangang, JIANG Zhenglong, et al. Infrared thermal image detecting of high voltage insulator contamination grades based on support vector machine[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2005, 29(24): 70-74.
- [2] 国家能源局. DL/T664-2008 带电设备红外诊断技术应用导则[S]. 北京：中国电力出版社，2008.
National Energy Administration. Application rules of infrared diagnosis for DL/T664-2008 live electrical equipment[S]. Beijing: China electric power press, 2008.
- [3] 李佐胜，姚建刚，杨迎建，等. 湿污绝缘子发热模型[J]. 电工技术学报, 2009(7): 21-27.
LI Zuosheng, YAO Jiangang, YANG Ying-jian, et al. Heating model of polluted and wetted insulators[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009(7): 21-27.
- [4] 胡世征. 劣化绝缘子的发热机理及热象特征[J]. 电网技术, 1997(10): 44-46.
HU Shizheng. Heating mechanism and thermograph of degraded insulators[J]. *Power System Technology*, 1997(10): 44-46
- [5] 金光熙，权光日，郎成，等. 故障绝缘子的发热机理及其红外热像检测[J]. 电瓷避雷器, 2011(5): 12-15.
JIN GuangXi, QUAN Guangri, LANG Cheng, et al. Heating mechanism and infrared thermography detection of failure insulators[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2011(5): 12-15.
- [6] 梁飞，MacAlpine Mark，关志成，等. 污秽绝缘子表面干区形成的影响因素[J]. 高电压技术, 2012(10): 2604-2610.
LIANG Fei, MacAlpine Mark, GUAN Zhicheng, et al. Factors affecting dry-band formation on the surface of polluted insulator[J]. *High Voltage Engineering*, 2012(10): 2604-2610
- [7] 李唐兵，陈国峰，饶斌斌，等. 一种改进的劣化盘形悬式瓷绝缘子红外热像诊断方法[J]. 电瓷避雷器, 2014(6): 8-13.
LI Tangbing, CHEN Guofeng, RAO Binbin, et al. A Improved method of detecting deterioration insulator based on infrared thermal image[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2014(6): 8-13.
- [8] 门洪，于加学，秦蕾. 基于CA和OTSU的电气设备红外图像分割方法[J]. 电力自动化设备, 2011(9): 92-95.
MEN Hong, YU Jiaxue, QIN Lei. Segmentation of electric equipment infrared image based on CA and OTSU[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011(9): 92-95.
- [9] Yen J C, Chang F J, Chang S. A new criterion for automatic multilevel thresholding[J]. *IEEE transactions on image processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society*, 1995, 43: 370-378.
- [10] Hamed Shahhosseini, Reza Safabakhsh. Automatic multilevel thresholding for image segmentation by the growing time adaptive self-organizing map[J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2015, 19: 2605-2617.
- [11] 姚建刚，李唐兵，付鹏，等. 绝缘子串红外图像中绝缘子盘面和钢帽区域的自动提取方法[J]. 红外技术, 2014, 36(8): 644-648.
YAO Jiangang, LI Tangbing, FU Peng, et al. Algorithm research on automatically extracting the disks and steel caps area of insulator from infrared image of an insulator string[J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(8): 644-648.