

一种基于视频序列的绝缘子识别技术研究

针对直升机电力巡检拍摄到的实时视频序列，利用背景的颜色特征，首先对其进行过滤，有效地抑制了背景噪声杂波的影响。接着，对实时视频序列进行中值滤波，进一步地滤除噪声。然后，提取该视频序列的HOG特征，利用AdaBoost分类器对目标进行分类和识别，最后根据绝缘子的轮廓特征对识别结果进行进一步的筛选，最终实现绝缘子的有效识别。巡线结果反馈的数据证明了算法对正向拍摄清晰的白色绝缘子能准确地进行识别，且识别率较高，具有一定的工程实用性。

张 巍¹ 吴新桥¹ 杨鹤猛² 张贵峰¹ 周筑博² 林良辉³ 胡 展³ 张 宁³
 /1.南方电网科学研究院有限责任公司 2.天津航天中为数据系统科技有限公司 3.广州科易光电技术有限公司

0 引言

“直升机巡检为主，人工巡视为辅”是我国高压、超高压输电线路巡检的发展方向^[1-4]。且自20世纪50年代，欧美一些发达国家率先展开对架空输电线路巡检的航空作业。我国从20世纪80年代展开对直升机电力巡线的研究。到目前为止，南方电网、华中电网和华北电网公司等相继开展了直升机巡检的尝试，并取得了良好的巡检效果，积攒了宝贵的经验。绝缘子是架空高压输电线路的重要组成部分，常用的绝缘子主要包括陶瓷、钢化玻璃和复合材料3种^[5]，绝

缘子的作用表现在两个方面：首先是进行电气隔离，防止在绝缘子顶端的导线和绝缘子尾端的塔杆形成电气通路，避免发生安全事故；其次，绝缘子作为导线和塔杆的连接设备，需要承受导线的自重和导线在各种自然环境下的拉力。绝缘子对于电力系统的正常运行起着非常关键的作用，可有效避免安全事故的发生^[6]。文献[7]利用颜色特征检测绝缘子的裂纹及污移；文献[8]采用最大阈值方法对图像进行饱和度单通道分割，实现绝缘子串的识别与标记。文献[9]在HIS空间对图像进行基于形态学的OET分割后滤波，根据绝缘子的形状特征对其进行识别。本文在前人研究的基础上，研究直升机进行电力巡检绝缘子的自适应检测和识别技术。

1 算法架构

1.1 算法流程

本文算法流程如图1所示。对原图像先进行颜色特征的滤除，然后进行中值滤波以抑制脉冲噪声对目标的影响，再利用HOG算法对绝缘子进行特征提取，通过OpenCV自带的基于HOG特征的级联分类器对图像正负样本进行训练和检



张 巍/高级工程师

关键词/Keywords

绝缘子 ·
HOG ·
AdaBoost ·
识别 ·

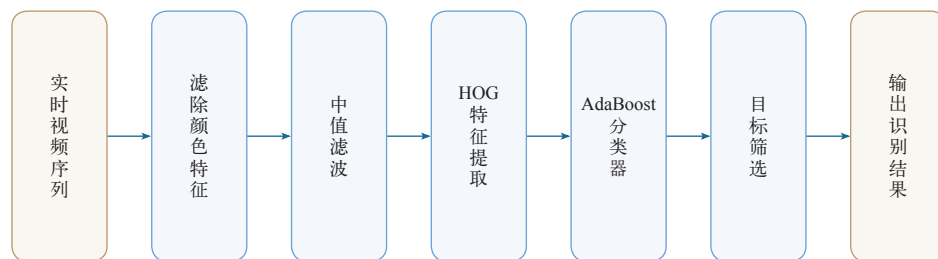


图1 算法流程图

测,即可识别出绝缘子。

1.2 颜色特征的滤除

在图像采集过程中,往往因为环境干扰、设备内部噪声等影响了图像信息的真实表达。因此,在研究和分析图像前,首先对图像进行滤波降噪等预处理操作,便于进一步的分析。

输电线路巡检时,所拍摄到的可见光图像背景较为复杂,不仅包含了大量的具有不同特征的自然地貌,如山林、河流、农田、道路和雨雪等,且随着四季的更迭,背景外观也会随时改变。在这种复杂自然背景下,目标提取变得非常困难,对目标检测和识别构成了一定的影响。因此,可对这些具有颜色特征的背景分量在RGB空间进行过滤。

1.3 中值滤波

中值滤波器主要用来抑制脉冲噪声,它是一种不需要利用图像的统计特征,简单方便的典型非线性滤波算法,不仅在一定程度上可以克服线性滤波器(如均值滤波器)引起的图像细节模糊,同时又能较好地保护图像边缘细节信息特征。传统的中值滤波采用的滑动窗口(滤波模板),通常含有奇数个像素点,如比较常见的大小为 3×3 , 5×5 , 7×7 的局部窗口。

对于给定窗口内按从小到大排列的 n 个像素值 $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$,根据 n 值的奇偶性,有两种不同的取值结果:当 n 为奇数时,中值即为位于这 n 个像素值中间位置的值;当 n 为偶数时,中值为位于这 n 个像素值中间位置的那两个数的平均值,均可记作 $\text{med}\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ 。二维中值滤波器的原理类似于均值滤波器,同样需要一个滑动的窗口 S ,只不过是用窗口中所有像素值的中值替换当前像素值。即

$$\bar{f}(x, y) = \text{med}\{f(i, j)\} \quad (i, j) \in S \quad (1)$$

考虑到图像滤波的效果较大程度地受来自二维中值滤波器的窗口形状和尺寸的影响,因而在实际生活中,应根据不同的图像内容 and 应用要求,采用合适形状和尺寸的滤波窗口。经常见到的有线形、圆形、十字形、方形和菱形等形状的

窗口。方形或者圆形的滤波模板较为适合图像中有较长的轮廓线物体;十字形滤波模板较为适合图像中包含尖顶角的物体。

1.4 HOG特征提取

方向梯度直方图(Histogram of Oriented Gradient, HOG)是特征^[10]视觉和图像处理中用来进行物体检测的特征描述子。它通过计算和统计图像局部区域的梯度方向直方图来构成特征。利用HOG特征识别绝缘子主要有以下5个步骤。

(1) 标准化Gamma空间

在将原始图像 $I(x, y)$ 转化成灰度图像后,采用Gamma校正法对输入图像进行颜色空间的标准化(归一化),以调节图像的对比度,降低图像局部的阴影和光照变化所造成的影响,同时抑制噪声的干扰

$$I(x, y) = I(x, y)^{\gamma} \quad (2)$$

(2) 计算图像梯度

分别计算图像在 x 方向的水平梯度和 y 方向的垂直梯度

$$G_x(x, y) = I(x+1, y) - I(x-1, y) \quad (3)$$

$$G_y(x, y) = I(x, y+1) - I(x, y-1) \quad (4)$$

计算任一像素点 (x, y) 的梯度幅值和方向

$$G(x, y) = \sqrt{G_x(x, y)^2 + G_y(x, y)^2} \quad (5)$$

$$\theta(x, y) = \arctan \frac{G_y(x, y)}{G_x(x, y)} \quad (6)$$

(3) 统计梯度直方图

把图像分割成若干个像素单元(cell),每个单元格的大小为 8×8 ,每4个单元格组成一个块(block),梯度范围被分为9个方向角度,利用9个方向角度对 8×8 个像素的梯度信息进行直方图加权投票,权重为每个像素的梯度幅值。

(4) 块内归一化

计算特征向量的 L_2 范数

$$f = \frac{v}{\sqrt{v^2 + e^2}} \quad (7)$$

式中, v 为标准化前的特征向量; e 为一个很小的标量以防止分母为0。然后把 v 的最大值限定为0.2,再进行归一化。

(5) 收集HOG特征

图像的梯度方向向量数由图像大小、单元格大小和每个单元格选取的梯度维数等共同决定

$$D = D_c \times \left(\frac{S_b}{S_c} \right)^2 \times \frac{(w - S_b + l_b) \times (h - S_b + l_b)}{l_b^2} \quad (8)$$

式中, D_c 为单元格维数; S_b 为块大小; S_c 为单元格大小; l_b 为块移动步长(本文设为8个像素); w 与 h 分别为图像的宽与高。

1.5 AdaBoost分类器

Robert Schapire^[11]于1990年提出了Boosting学习算法, 并从理论上证明了可以通过对多个弱学习器模型组合的方式等效一个强学习器模型。之后, Freund^[12-13]和Schapire提出了一种迭

代生成的, 能够自适应调整和组合弱分类器的Boosting算法, 即AdaBoost (Adaptive Boost) 学习。AdaBoost针对同一个训练集训练不同的分类器(弱分类器), 然后把这些弱分类器集合起来, 最终构成一个强分类器。算法本身是通过改变数据分布实现的, 根据每次训练集之中每个样本的分类是否正确, 以及上次的总体分类的准确率, 来确定每个样本的权值。将修改过权值的新数据集送给下层分类器进行训练, 最后将每次训练得到的分类器融合起来, 作为最后的决策分类器。使用AdaBoost分类器可以排除一些不必要的训练数据特征, 并放在关键的训练数据上面。通过不断的训练, 可以提高对数据的分类能力。AdaBoost自适应训练过程如图2所示。

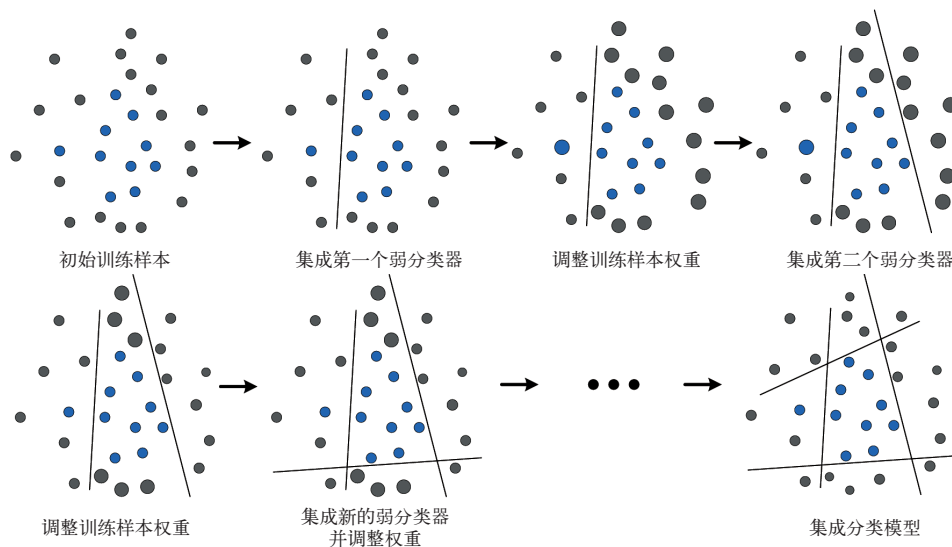


图2 AdaBoost自适应训练过程

AdaBoost算法的具体训练过程如下。

给定训练样本集 $S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_M, y_M)\}$, 分配并初始化样本权值 $D_1(i) = 1/M$; 对于第 k 个弱分类器, $k = 1, 2, \dots, K$ 。

在样本分布 $D_k(i)$ 下, 求解弱分类器决策函数 $h_k(x)$, 使得其在样本集 $S = \{(x_1, y_1), \dots, (x_M, y_M)\}$ 上的具有最小决策误差 ε_{h_k} , 即

$$h_k(x) = \operatorname{argmin} \varepsilon_{h_k} = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^M D_k(i) I[h(x_i) \neq y_i] \quad (9)$$

计算影响因子 α_k 计算公式为

$$\alpha_k = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - \varepsilon_{h_k}}{\varepsilon_{h_k}} \quad (10)$$

更新训练样本的权值分布 $D_{k+1}(i)$ 计算公式为

$$D_{k+1}(i) = \frac{D_k(i) \exp\{-y_i \alpha_k h_k(x_i)\}}{\sum_{j=1}^M D_k(j) \exp\{-y_j \alpha_k h_k(x_j)\}} \quad (11)$$

集成分类器 $H(x)$ 计算公式为

$$H(x) = \operatorname{sign} \left[\sum_{k=1}^K \alpha_k h_k(x) \right] \quad (12)$$

选取1 200张包含绝缘子的灰度图片作为正样本, 大小统一调整为 40×20 像素, 同时挑选2 500张

不含绝缘子的灰度图片作为负样本，大小统一调整为 48×24 像素。部分样本如图3所示。

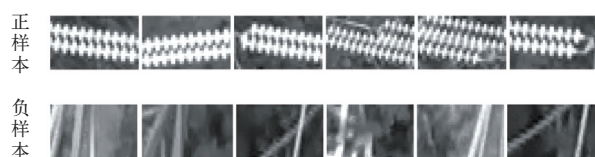


图3 部分训练样本

1.6 目标筛选

对于初步识别结果，有时候存在一些误判，如把部分杆塔误识别成绝缘子，如图4a和图4b所示，图4c和图4d为正确识别。

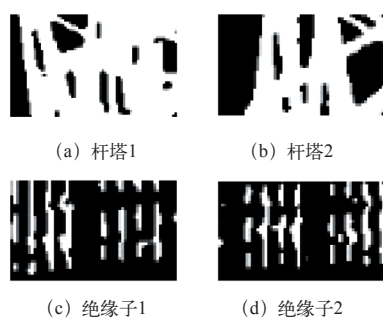


图4 初步识别结果

同时，从图4中不难看出，绝缘子的轮廓特征构成了较多且像素值为1的连通闭合区域，而对于部分杆塔，则是像素值为0的连通闭合区域较为明显，且数量明显少于图4c和图4d中的连通闭合区域的数目。为了能更有效地识别，提高绝缘子识别的准确率，可设定一个阈值，利用绝缘子的轮廓特征对初步识别的结果进行进一步的筛选。

2 硬件系统集成

以上算法均是在FPGA环境下实现的。使用FPGA进行图像处理时，首先安装Matlab以及由MathWorks公司和Xilinx公司联合推出的System Generator，在Simulink中添加一些Xilinx公司提供的模块搭建图像处理算法，可以进行仿真、硬件协仿真、直接生成HDL代码和生成TestBench等操作。

在Simulink环境中实现定点算法，根据系统设计功能将Xilinx模块连接成设计系统，并定义

合适的系统参数；而后利用System Generator将Simulink模型转换为可执行的硬件模型，将系统定义的参数对应到硬件实现的模块、输入/输出端口等属性；再借助于ModelSim软件验证相应的设计是否和Simulink输出一致，否则需要重新修改设计；最后将设计生成可对器件编程的比特流文件，将其下载到目标芯片中。

System Generator最大的特点就是可利用Simulink建模和仿真环境来实现FPGA设计，无须了解和使用RTL级硬件语言，让DSP设计者能够发挥基于FPGA的DSP的最大性能和灵活性，并缩短整个设计的周期，极大地提高了开发的效率。

3 检测结果和分析

本次测试的主要飞行线路有云南临沧220 kV新临线和500 kV博墨I回线。直升机在两条线路飞行时均距离输电线40~50 m，输电线结构均为四分裂。

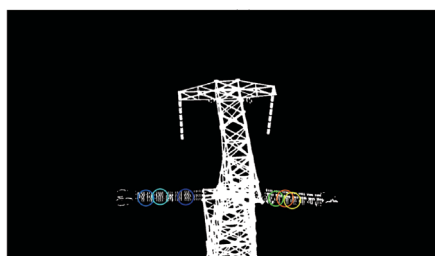
对视频序列进行实时检测，任意选取第475帧、2 762帧以及3 844帧，识别结果如图5所示。

图5a、图5c和图5e为可见光图像绝缘子检测和识别结果；图5b、图5d和图5f为二值图像绝缘子检测和识别结果。

两条线路飞行测试的数据结果分别如表1、表2所示。



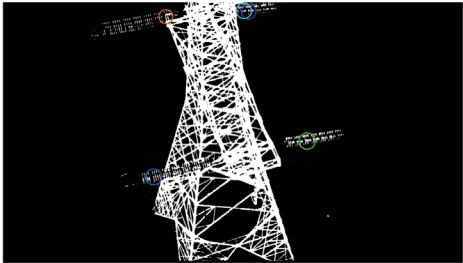
(a) 识别结果1



(b) 识别结果2



(c) 识别结果3



(d) 识别结果4



(e) 识别结果5



(f) 识别结果6

图5 检测结果

表1 220 kV新临线巡检数据

220 kV 新临线	绝缘子 类型	拍摄 质量	拍摄 角度	错检率 (%)	漏检率 (%)	识别率 (%)
	绿色水平 悬挂双串	模糊	正向	21.36	50.21	28.43
	白色水平 悬挂双串	清晰	正向	2.17	17.6	80.23
	白色水平 悬挂双串	清晰	侧面	4.78	44.87	50.35
	白灰色水平 悬挂双串	模糊	正向	32.53	41.25	26.22

表2 500 kV博墨 I 回线巡检数据

500 kV 博墨 I 回线	绝缘子类型	拍摄 质量	拍摄 角度	错检率 (%)	漏检率 (%)	识别率 (%)
	绿色透明 V型悬挂	清晰	侧面	57.07	34.56	8.37
	绿色透明 水平悬挂双串	清晰	侧面	44.94	37.38	17.68
	绿色透明 水平悬挂双串	清晰	正向	33.91	36.69	29.46

从表1、表2中可以看出无论是220 kV还是500 kV的输电线路，白色绝缘子在清晰拍摄时，识别率高达80.23%，取得了较好的识别效果；而绿色绝缘子普遍识别率低下，尤其在拍摄角度不佳和视频模糊的情况下，几乎无法识别。

4 结束语

本文对无人机电力巡检拍摄到的可见光图像先进行颜色特征的滤除，然后进行中值滤波以抑制脉冲噪声对目标的影响，利用HOG算法对绝缘子进行特征提取后，通过AdaBoost分类器对图像正负样本进行训练和识别，并利用其特征进行进一步的筛选。Visual Studio 2010环境下编程实现后，又集成到FPGA硬件实现，有效增强了系统的稳定性。根据对云南临沧220 kV新临线和500 kV博墨I回线巡线结果反馈的数据证明了本文算法对白色绝缘子正向拍摄清晰时，能准确识别绝缘子，且识别率较高，具有一定的工程实用性。

参考文献

- [1] 张柯, 李海峰, 王伟. 浅谈直升机作业在我国特高压电网中的应 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (6) : 45-55.
- [2] 李国兴. 我国直升机电力作业的现状与发展 [J]. 电力设备, 2006 (7) : 41-45.
- [3] 王平, 李刚, 朱康, 等. 输电线路应用直升飞机巡线维护试验研究 [J]. 四川电力技术, 2002 (1) : 4-6.
- [4] 于德明, 沈建, 汪骏, 等. 直升机在电网运行维护中的研究与应用 [J]. 电网技术, 2009, 33 (6) : 107-112.

- [5] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘/清华大学学术专著[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [6] 赵明杰. 基于图像处理的接触网状态检测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [7] 葛玉敏, 李宝树, 赵书涛, 等. 基于航拍图像的绝缘子表面状态检测[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 65-68.
- [8] 黄宵宁, 张真良. 直升机巡检航拍图像中绝缘子图像的提取算法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 194-197.
- [9] 姚春羽, 金立军, 闫书佳. 直升机巡检航拍图像中绝缘子图像的提取算法[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1818-1822.
- [10] Navneet Dalal, Bill Triggs. Histograms of oriented gradients for human detection[C]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, 1: 886-893.
- [11] Schapire R E. The strength of weak learnability[J]. Machine Learning, 1990, 5(2): 197-227.
- [12] Freund Y, Schapire R E. Experiments with a new boosting algorithm[C]. ICML, 1996: 148-156.
- [13] Freund Y, Schapire R E. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting[J]. Journal of computer and system sciences, 1996, 55(1): 119-139.
- (收稿日期: 2016-12-20) **EA**

信息动态

伊顿发布全新应用

全球领先的动力管理公司伊顿近日在美国加利福尼亚州圣迭戈市举办的DistribuTECH年度大会上发布了一款全新应用, 用于帮助各类公用事业高效、准确地集成分布式能源, 且不会对可靠性和电力品质造成不良影响。作为伊顿CYMETM软件平台的最新应用, 集成能力分析模块可提供定制化的电气系统研究, 满足客户独特的应用需求, 降低成本、提高效率及改善性能。

“随着分布式能源部署的不断加速和互联工艺需求的日益上升, 公用事业在当今社会面临着不断增加的能源需求。”伊顿CYME解决方案总经理Daniel Desrosiers介绍说。“新的CYME集成能力分析模块可准确评估分布式系统的发电及负荷承载能力, 为公用事业快速提供必备知识以简化当前和未来基础设施发展所面临的挑战。”

通过CYME集成能力分析模块, 工程师们不再需要使用手动工具来运行模拟测试, 从而减少人力投入和人为误差。用分布式系统完整或局部模型进行评估之前要输入最低数量的参数, 例如考虑最大容量、峰值以及最小负荷情况。

随后, 用户通过参照一系列标准自行定义的一组阈值可作为依据确定最大承载容量, 这些标准包括热过载、反

向电流、异常稳态电压、瞬态电压变化(闪烁)、保护范围缩小和交感性跳闸。CYME软件强大的报告能力允许用户发布彩色编码承载能力电路图, 从而帮助客户和开发商确定分布式能源互联项目合适的地点。

通过使用CYME软件工具, 伊顿工程团队可提供交钥匙解决方案——从基础到复杂的专业研究, 快速识别特定设备或整个网络设计中的关键参数。交钥匙解决方案包括网络建模、初始网络性能诊断以及一系列电力工程研究, 涵盖范围从瞬变现象到战略投资计划。

通过对电气系统的深入研究, 伊顿还可以提供资产与负荷管理、可靠性改善以及损耗优化等方面的相关建议。借助模拟测试, 伊顿还能为客户提供经济有效的方案, 评估在其网络中使用新技术的潜在影响。如需了解更多相关信息, 敬请访问公司网站www.eaton.com/cyme。

伊顿的电气业务在配电和电路保护、备用电源保护、控制与自动化、照明与安全、架构与布线设备、恶劣和危险环境解决方案以及工程服务等诸多领域处于全球领先地位。伊顿凭借其全球化解决方案, 积极应对当今所面临的最大挑战, 即电力管理。