

基于图像识别的叶片结冰检测方法研究

孙凯¹, 张新燕¹, 常喜强², 周登钰¹, 李振恩¹, 罗嘉良¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 随着化石燃料的大量消耗, 环境污染严重, 清洁、环保的可再生能源发电渗透率持续提升, 寒冷地区风电场建设规模不断扩大, 将导致叶片结冰, 严重会导致叶片断裂, 因此有必要对叶片结冰识别进行深入研究。通过分析现有的叶片结冰检测方法, 基于图像识别, 通过改进 Canny 算法与显著物识别算法结合, 将图像的边缘像素识别出来, 然后计算每一个点的像素梯度, 利用灰度值分割法确定最优阈值, 再进行显著物的识别, 对叶片结冰图像识别进行研究。研究表明叶片结冰图像识别高效可靠, 可以有助于对叶片进行除冰, 确保风电机组安全可靠的运行。

关键词: 风电机组; 叶片结冰; 图像识别; 边缘检测

中图分类号: TM615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)02-0001-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.02.001

Research on Blade Icing Detection Method Based on Image Recognition

Sun Kai¹, Zhang Xinyan¹, Chang Xiqiang², Zhou Dengyu¹, Li Zhenen¹, Luo Jialiang¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, Xijiang, China;

2. State Grid Urumqi Electric Power Supply Company, Urumqi 830011, Xijiang, China)

Abstract: With the consumption of fossil fuels, environmental pollution is serious, the permeability of clean and environmental protection renewable energy power generation continues to increase. And with the expansion of wind farm construction in cold areas, it will lead to blade icing, which will seriously lead to blade breakage. Therefore, it is necessary to study the blade icing recognition. Based on the analysis of the existing blade icing detection methods, the edge pixels of the image are recognized by combining the improved Canny algorithm with the salient recognition algorithm, and the pixel gradient of each point is calculated. The optimal threshold is determined by using gray value segmentation method, and after the significant recognition is carried out, the recognition of icing image of the blade is studied. The research shows that the image recognition of blade icing has a high efficiency and reliability, which can help the blade deicing and ensure the safe and reliable operation of wind turbines.

Key words: wind turbines; blade icing; image recognition; edge detection

0 引言

近几年风力发电发展迅速, 大多都建在高原寒冷的山区和潮湿的地区, 因此风力发电机组面临着叶片覆冰的考验。结冰是水蒸汽凝结在叶片表面形成的水滴, 由于温度低于冰点而在叶片上凝结成冰晶的过程。叶片结冰后对机组主要会造成如下影响^[1-4]: 升力系数下降, 导致风能利用率 C_p 降低, 造成发电量的损失; 阻力系数增加, 导致传动链轴向载

基金项目: 国家自然科学基金项目(51667018)

荷过大, 可能造成机舱加速度超限; 叶片质量增加, 轮毂转矩增大, 影响叶根处疲劳寿命; 叶轮气动、质量不平衡。

目前风电机组叶片结冰成了阻碍风能发展的重要因素, 大大降低了机组的利用率, 严重威胁风电机组的安全运行。如何准确识别风电机组叶片结冰问题也就具有重大的现实意义。文献[5]监测叶片的振动模态信号, 并提取叶片状态信息分析结冰状况, 但无线信号在强电磁干扰中不稳定性极高。文献[6]通过叶片的曲率模态, 提取并判断风机叶片覆冰参数特征值。文献[7-9]都是设计结冰传感器并进

行应用,但存在传感器与叶片结冰不同步现象。

提出一种采用边缘检测算法和显著物识别算法构建视频的叶片结冰检测系统的方法。基于机器视觉技术,通过摄像头对于风机叶片进行实时检测,一旦发现叶片出现结冰则可以启动相应的除冰设备或向中央控制系统发出警告,当系统检测到叶片结冰现象消失后则可以重新启动风机,在确保风机安全运行的情况下减少因为叶片结冰停机而导致的经济损失。

基于机器视觉的叶片结冰图像识别是一种直接测量叶片结冰的模式。并且由于摄像头的技术发展,在夜间通过红外补光灯也可以获取相对准确的图像资料。一般的结冰传感器,只能判断是否结冰。基于视频的叶片结冰监测系统,不仅能够判断是否结冰,而且能估算出结冰的具体区域。同时,在冰融化后该系统会自动重启风机,减少了不必要的停机时间,有效增加了风机的发电量。

1 风机叶片结冰和检测方法分析

1.1 叶片结冰背景分析

在冬季调查的 600 个风场样本中,出现叶片结冰的风场样本总数为 268 个,无一解决结冰监测和除冰问题。各机型具体分布见表 1。从发电量损失维度来说,在调查样本中,因叶片结冰故障导致的发电量损失约 75 648 621. 93 kWh(此数字为接入 SCADA 数据计算所得),主要集中在新疆、华北片区 1.5 MW、2.0 MW 机组。

从单次结冰故障平均时长维度统计,其结果见图 1 所示。

1.2 现有叶片结冰检测方法分析

现有的叶片覆冰检测方法主要有:

1) 风功率不匹配算法,是通过对预测功率与实际功率进行对比。由于其他原因出现风功率不匹配

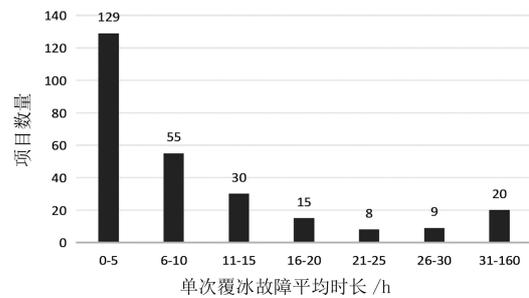


图 1 单次结冰时长对样本数

而误启动叶片除冰程序则会对叶片产生一定损伤,并且无法及时监测除冰情况。

2) 机舱式结冰传感器监测,属于相对监测,结冰传感器结冰即认为叶片就结冰,这就造成了叶片和结冰传感器结冰状态可能不同,影响叶片结冰判断。

3) 叶片式结冰传感器一般安装在叶片上,结冰感应区域就是叶片结冰区域。叶片式结冰传感器如果需要监测大片区域则需要被大量部署,意味着成本急剧提升,并且由于叶片式结冰传感器通常贴在叶片上,能否长期稳定运行也存在一定问题。

基于现实情况及其他除冰方式的缺陷,提出一种直接观测式的叶片结冰监测,系统通过使用摄像机在短间隔下不断拍摄一定时长的视频采集叶片图像信息;利用图像识别技术监测叶片情况,如果发现叶片出现结冰则启动除冰系统,根据相应的叶片除冰系统算法不断触发除冰过程并不断监测。

2 基于图像识别的结冰算法

2.1 算法设计建模与流程图

所提算法主要是改进了识别流程图判断部分,通过改进 Canny 算法和 HED(holistically - nested edge detection) 显著物检测算法相结合,使得检测更加准确。算法设计流程见图 2。

2.1.1 改进 Canny 算法边缘检测

首先采用高斯函数构成滤波器,对采集图像进行

表 1 各机型结冰分布

机型	涉及项目数量	涉及机组台数	各片区数量						
			西北	华中	华南	宁夏	东北	华北	新疆
1.5 MW	246	9037	7	15	22	30	38	45	89
2.0 MW	18	555	0	6	3	5	1	2	1
2.5 MW	4	35	1	0	1	0	0	2	0
汇总	268	9627	8	21	26	35	39	49	90

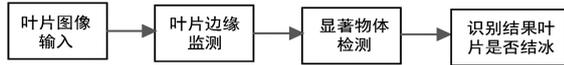


图2 算法设计流程

平滑滤波 其中 σ 为标准差。Canny 算子检测边缘的实质是求信号函数的极大值来判定图像边缘像素点。为了实现边缘像素提取,首先通过 Canny 算子计算统计平均值,使图像像素的高斯分布趋于平衡。对图像滤波窗口采样 5×5 区域,计算此区域的均值,并与所有像素点进行比较。采用定义域 $G(x, y)$ 对图像进行平滑滤波,函数公式如式(1)。

$$G(x, y) = \sum_{x-m}^{x+m} \sum_{y-m}^{y+m} \exp \left| -\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2} \right| \quad (1)$$

式中, $m = (n - 1) / 2$, n 表示高斯滤波窗口大小。

边缘检测算法主要是利用图像强度的一阶和二阶导数。导数通常对噪声很敏感,因此必须要采用滤波来改善与噪声有关的边缘检测性能^[10-12]。经过增强的图像,往往区域中有许多点的梯度值比较大,而在特定的应用中,这些点并不是要找的边缘点,所以应对这些点进行取舍,常通过阈值化方法来检测。计算梯度幅值 ∇G 和方向 θ 为

$$\nabla G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{G_y}{G_x} \right) \quad (3)$$

梯度方向近似到可能角度(一般为 0° 、 45° 、 90° 、 135°)之后进行非极大值抑制。这样能够排除非边缘像素,只保留了一些细线条(待选边缘)。其次, Canny 使用了滞后阈值,滞后阈值需要高阈值和低阈值:如果某一位置像素点的幅值超过高阈值,则该像素被保留为边缘像素;如果某一位置像素点的幅值小于低阈值,则该像素被排除;如果某一位置像素点的幅值在高低阈值之间,则该像素只会在连接到一个高于高阈值的像素时被保留。

如图3所示,根据当前点 (x, y) 的梯度值,与每个方向上的梯度值比较,判断出该点是否已经具备最大梯度值。

左上位置点 (x-1, y+1)	上位置点 (x, y+1)	右上位置点 (x+1, y+1)
左位置点 (x-1, y)	中心位置点 (x, y)	右位置点 (x+1, y)
左下位置点 (x-1, y-1)	下位置点 (x, y-1)	右下位置点 (x+1, y-1)

图3 梯度求取点分布

利用最优阈值灰度分割确定高阈值 T_H 。基本

思想是:对于非极大值抑制图像 $g(i, j)$,设初阈值 T_0 。将图像灰度级别分为背景灰度和目标灰度两类,分别确定背景平均灰度阈值 T_1 和目标平均灰度阈值 T_2 。将 T_1 和 T_2 的平均值作为新的阈值 T ,利用迭代法得到最优阈值。

对极大值抑制图像 $g(i, j)$ 进行扫描,得到最大灰度值 Z_{\max} 和最小灰度值 Z_{\min} ,令初阈值为

$$T_0 = \frac{Z_{\max} + Z_{\min}}{2} \quad (4)$$

根据设定阈值 T_k 求背景和目标的平均阈值 T_1, T_2 :

$$T_1 = \frac{\sum_{z(x,y) < T_k} Z(x,y) \times N(x,y)}{\sum_{z(x,y) < T_k} N(x,y)} \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{\sum_{z(x,y) > T_k} Z(x,y) \times N(x,y)}{\sum_{z(x,y) > T_k} N(x,y)} \quad (6)$$

式中: $Z(x, y)$ 是图像上 (x, y) 点的灰度值; $N(x, y)$ 是 (x, y) 点的权重系数,一般设 $N(x, y)$ 为 1。

求出新的阈值 T_{k+1} 为

$$T_{k+1} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (7)$$

如果 $T_{k+1} = T_k$,则所求阈值 T_k 即为最优阈值。最优阈值即所求的高阈值 T_H 。

一般情况下,高阈值和低阈值之间的关系为

$$T_L = 0.5 T_H \quad (8)$$

2.1.2 显著物体识别

显著物检测的目标是识别一张图片上最具有视觉特征的区域,通过一系列的短连接,从深层输出结果到浅层输出结果。所提结构优点明显:高层次特征可以转换到浅输出层,而且可以更好地定位显著物区域;浅输出层可以学习丰富的低层特征,从而定义稀疏和不规则的预测区域。这个结果提供了一种在每个层次中进行分段检测的边界特征图。主要的显著物体检测方法基于局部特征和全局特征。

基于 HED 的显著物检测,将从标准 HED 架构及其扩展版本开始,用于显著对象检测,并逐步移至所提出的架构。HED 结构,使 $T = f(X_n, Z_n)$, $n = \{1, \dots, N\}$ 表示训练集; $X_n = \{x_j\}$, $j = 1, \dots, N$, 表示输入图像; $Z_n = \{z_j\}$, $j = 1, \dots, N$, $z_j \in [0, 1]$, 表示关于 X_n 对应连续真实显著区域。下面描述中省略下标 n , 是因为假设输入都是彼此独立的。表示所有标准网络的集合层参数 w , 假设有 M 侧输出,每个输出与分类器相关联,其中相应的权重可以表示为

$$w = (w^{(1)}, w^{(2)}, \dots, w^{(M)}) \quad (9)$$

因此, HED 的侧目标函数可以表示为

$$L_{\text{side}}(W, \mu) = \sum_{m=1}^M \alpha_m J_{\text{side}}^{(m)}(W, \mu^{(m)}) \quad (10)$$

式中: α_m 是第 m 侧损失的权重; L_{side} 为第 m 个边输出的图像级别平衡交叉熵损失函数。此外, 添加加权融合层以更好地捕获每个侧输出的优势。熔融层的熔融损失 L_{fuse} 可以表示为

$$L_{fuse}(W, \mu, f) = \sigma(Z, h(\sum_{m=1}^M f_m A_{side}^{(m)})) \quad (11)$$

式中: f_m 是熔权重; A_{side} 是激活第 m 层的输出; $h()$ 为一个 sigmoid 公式, 表示地面真实图和融合预测之间的距离, 其被设置为图像水平的类平衡交叉熵损失。

通过显著物体监测, 可以将风机叶片单独识别出来, 将其他的噪声信息删去从而使整个神经网络不会受到噪声信息的干扰。而且风机叶片上的结冰情况也可以作为显著物体被识别出来。

风机所处环境多变, 背景噪声如云、太阳、光线所造成的光斑均属于噪声信号, 这些信号又与叶片结冰的特征存在一定的相似性。故需要将叶片从整体背景中提取出来, 在删去噪声信号的同时又不损失叶片图像的信息量。

2.2 图像处理流程图

通过分析叶片结冰对机组的影响, 提出一种基于图像识别结冰的方法, 分析非最大抑制的梯度复制图和阈值方法, 加入均值法进行自适应阈值, 再把改进 Canny 算法与 HED 显著物识别算法相结合, 从而使得算法更加准确高效便捷。叶片结冰图像处理逻辑流程见图 4。

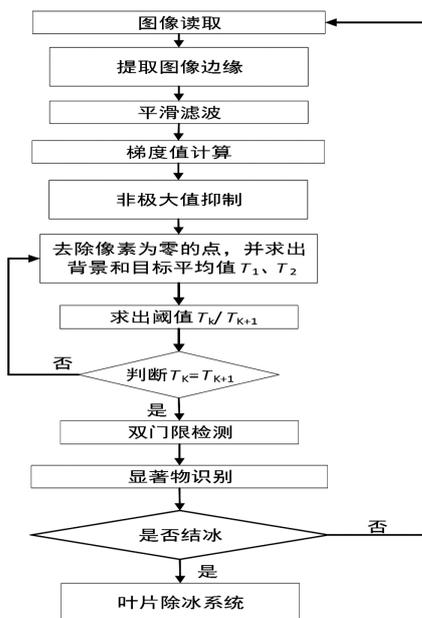


图 4 叶片结冰图像处理流程

基于视觉的叶片结冰图像检测是一种直接测量叶片结冰的模式。由于摄像头的技术发展, 在夜间

通过红外补光灯可以使该系统在夜间也有较高的识别率。由于该系统可以做到实时监控, 一旦发现叶片结冰就可以触发相应的报警或者除冰模块, 一旦结冰情况消失则可以迅速反馈到中控室, 既可以防范叶片结冰造成的危害, 也可以作为相关故障解决系统的触发信号, 还可以在故障解决之后的第一时间重启风机, 降低由于叶片结冰导致停机所造成的经济损失。

3 结果分析与实验验证

3.1 与传统方法的比较

所提供的方法具有实时监控、高效除冰和减少停机时间等优点。传统结冰传感器在监测结冰与除冰时间上具有间隔性, 与叶片结冰并非同步, 易造成假结冰现象, 使其机组自耗电增加; 其次, 在监测到结冰后需要进行停机再除冰, 增加了风电机组非故障停机时间, 减少发电量。

通过视频结冰监测, 监测的目标对象直接是叶片, 得到的结冰信号都是真信号。只要结冰量低于预设值, 机组不需要停机随时进行除冰, 可以更好地提高发电量。图像监测叶片结冰方法与传统方法对比见图 5。

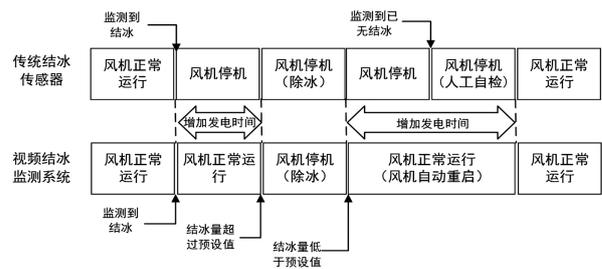


图 5 与传统除冰方式对比

3.2 实验验证

根据上述模型和算法, 以某风场机组采集图像为例进行对比验证。在图像采集和传输过程中有许多干扰和噪声影响边界轮廓的提取, 但滤波过程不能影响图片边界轮廓。通过实验验证, 所提方法不但能够检测到图像局部特征, 同时还可以保证边缘连续性。将所提的算法与常用传统算法 Canny 进行对比, 图 6 为无结冰状态下图片检测结果对比。

从图 6 分析可以看出, 在无结冰状态下, 传统的 Canny 算法对噪声较为敏感, 把蓝天白云视作噪声, 使得边缘效果模糊不清。而所提改进后的算法能够保证在噪声消除后, 边缘细节更加清晰。

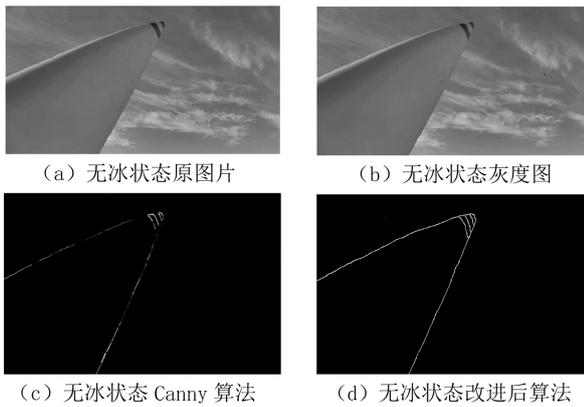


图 6 无结冰状态下检测结果对比

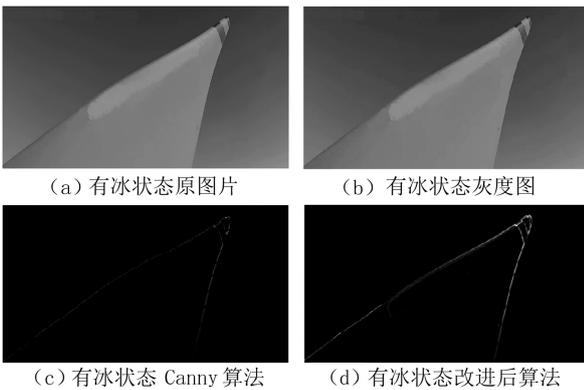


图 7 有结冰状态下图片检测结果对比

图 7 为有结冰状态下图片检测结果对比。从图中分析可以看出,图片上明显有区域结冰,在传统的 Canny 算法进行边缘检测时,把结冰区域视为噪声进行消除,偏离了识别结冰的目的。从图 7 可以清楚地看出所提算法监测的结果明显可以判断出叶片结冰区域,并准确判断是否结冰。

从结冰与无冰图像对比,两种算法具有明显区别:传统算法对噪声比较敏感,控制噪声会以损失边缘细节为代价,同时此类算法最优阈值设置困难;所提方法自适应能力强,不需要人工设置阈值参数,可自动寻优,监测结果表明,不但能够监测到图像局部细节,同时能保证图像边缘连续性。

4 结 语

通过改进的 Canny 算法和 HED 显著物识别算法相结合,针对叶片结冰除冰进行研究。首先,图像提取后进行平滑滤波,求取均值并自适应设置高低阈值;滤波后的图片再进行 HED 显著物检测,判断叶片是否有结冰状况,这样可避免误判断使得信号更加可靠。该系统解决了传统依靠传感器间接检测

结冰存在的非同步性和因除冰需要停机影响发电量的问题。经过试验表明,利用所开发的叶片结冰检测除冰系统,检验结果与实际情况基本相符,系统稳定性和可靠性能够满足工程实际需求。

参考文献

- [1] 雷利斌,李录平,刘胜先,等.基于振型曲率的风力机叶片覆冰检测技术[J].太阳能学报,2014,35(5):841-847.
- [2] 颜健,李录平,雷利斌,等.风力机桨叶超声波除冰实验技术研究及其应用[J].可再生能源,2015,33(1):68-74.
- [3] 谭海辉,李录平,靳攀科,等.风力机叶片超声波除冰理论与方法[J].中国电机工程学报,2010(35):112-117.
- [4] Olivier Parent, Adrian Ilinca. Anti-icing and De-icing Techniques for Wind Turbines: Critical Review [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65: 88-96.
- [5] 李录平,颜健,封江,等.基于 WiFi 技术的风力机叶片覆冰监测系统研究[J].可再生能源,2016(4):543-549.
- [6] 刘胜先,李录平,余涛,等.基于振动检测的风力机叶片覆冰状态诊断技术[J].中国电机工程学报,2013,33(32):88-95.
- [7] 卢方.风机叶片覆冰监测与防冰除冰试验研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [8] 尹胜生,叶林,陈斌,等.可识别冰型的光纤结冰传感器[J].仪表技术与传感器,2012(5):9-11.
- [9] 禹迅.风力发电机叶片结冰检测系统研究开发[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [10] Gonzalez C Rafael, Woods E Richard. 数字图像处理(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [11] 罗桓,田翔.基于改进 Canny 算子的电力设备图像检测研究[J].电测与仪表,2014,51(10):77-81.
- [12] 孙智鹏,邵仙鹤,王翥,等.改进的自适应 Canny 边缘检测算法[J].电测与仪表,2016,53(6):17-21.

作者简介:

孙凯(1992),硕士研究生,研究方向为风电机组控制技术;

张新燕(1964),教授,博士生导师,主要研究方向为新能源发电控制与并网技术;

常喜强(1982),高级工程师,研究方向为电力系统运行与仿真;

周登钰(1994),硕士研究生,研究方向为新能源并网技术;

李振恩(1986),博士研究生,研究方向为风电机组故障诊断及健康评估;

罗嘉良(1994),硕士研究生,研究方向为新能源并网技术。

(收稿日期:2018-12-03)