

碳纤维复合芯导线 X 射线图像标准化增强与缺陷检测方法

陈大兵¹, 魏寒来², 胡轶宁², 舒华忠³, 王 征²

(1. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京, 211103; 2. 东南大学网络空间安全学院, 南京, 210096; 3. 东南大学计算机科学与工程学院, 南京, 210096)

摘 要: 碳纤维复合芯导线能够大幅度提高输电线路输送容量, 但由于不耐弯折等原因导致多发断线, 严重危害线路运行安全。为实现对长距离输电线路进行在线缺陷检测, 本文提出了碳纤维复合芯导线缺陷自动检测方案。该方案首先对碳纤维复合芯导线的 X 射线图像进行图像成像标准化, 进行了导线弯曲补偿和亮度一致化矫正, 提高了数据的一致性, 为导线自动化分析提供条件; 然后利用深度卷积神经网络技术进行缺陷检测。以双层铝股线类型的碳纤维复合芯导线 X 射线图像作为研究对象进行实验, 结果证明该方案可快速自动识别导线缺陷。

关键词: X 射线成像; 碳纤维复合芯导线; 标准化; 缺陷检测

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

Standardized Enhancement and Detection of Defects in X-Ray Images of Carbon Fiber Composite Core Wires

CHEN Dabing¹, WEI Hanlai², HU Yining², SHU Huazhong³, WANG Zheng²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing, 211103, China; 2. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China; 3. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: Carbon fiber composite core wires can greatly increase transmission capacity of transmission lines. However, many breaks are caused due to the bending resistance and other reasons, which seriously endangers the safety of line operation. In order to realize on-line defect detection for long-distance transmission lines, this paper proposes an automatic defect detection scheme for carbon fiber composite core conductors. Firstly, the X-ray image of carbon fiber composite core conductors is standardized. Then, data consistency is improved to provide conditions for automatic analysis of conductors after bending compensation and brightness normalization. Finally, the deep convolution neural network technology is used for defect detection. Experiments on aluminum conductor composite core (ACCC) show that the scheme can quickly and automatically identify the defects of carbon fiber composite core conductors.

Key words: X-ray imaging; aluminum conductor composite core (ACCC); standardization; flaw detection

引言

中国电力系统发展十分迅速,提高电网输电能力、节省投资、保护环境、提高电网的经济效益和安全可靠性成为电网发展亟待解决的问题。如今部分应用于高压电网的碳纤维复合芯导线(Aluminum conductor composite core, ACCC)因具有重量轻、载流量大、线损低及弧垂小等技术优势,成为最具发展潜力的新型导线品种^[1]。但是,ACCC抗弯曲性是推广和应用的主要障碍,因此碳纤维复合材料芯损伤的检测必不可少^[2]。然而通过诸如应力检测^[3-4]、电磁感应检测^[5-6]及声波检测^[7-8]等均无法穿透 ACCC 外层导电层并有效探测到其中碳纤维芯棒存在的缺陷。X射线近年来被广泛应用于工业无损探伤领域^[9-10],但一方面由于 ACCC 导线 X 射线所成图像中缺陷部位的对比度严重不足,另一方面由于输电线路很长,导致导线在线检测需要对大量图片进行识别,极易因人员疲劳造成漏检,因此限制了该项技术在 ACCC 导线无损检测产业中的应用。随着人工智能的发展,以 Faster RCNN 方法为代表的目标分类检测算法^[11-12]在无损检测领域得到了广泛的应用^[13-14]。然而 Faster RCNN 算法直接应用于 ACCC 导线缺陷检测时,限于在线拍摄环境,存在导线区域弯曲、不同区域亮度差异大以及不同图像间亮度一致性较差等问题,难以获得高精度的检测结果。

针对这一难题,本文提出了一套结合图像标准化增强与深度神经网络的快速 ACCC 导线缺陷自动检测方案。该方案对导线的区域弯曲进行补偿,不同区域亮度进行一致化,并通过直方图规定算法将图像亮度映射为标准亮度,以降低训练/检测难度,提高检测精度。在此基础上结合 Faster RCNN 网络进行自动缺陷检测。以双层铝股线类型的碳纤维复合芯导线 X 射线图像作为研究对象进行实验,结果表明:通过该标准化方案,能够有效提高利用卷积神经网络对 ACCC 导线进行自动缺陷检测的效率,大幅提高检测精度和稳定性。

1 碳纤维导线 X 射线图像的标准化

1.1 碳纤维复合芯导线 X 射线成像

为了实现 ACCC 导线的在线成像以及缺陷检测,本文设计开发了一套爬线机器人。机器人自重 25 kg,运行速率为 0.2 m/s,载有额定电压 80 kV,额定电流 0.7 mA 的 X 射线源;X 射线探测板型号为 PerkinElmer XRpad2,分辨率为 100 μm 。机器人搭配 ARK1123H 小型工控系统,CPU 为 Intel Celeron J1900,作为下位机,负责图像采集与部分前处理。上位机为 Dell G7 笔记本电脑,显卡为 NVIDIA 2070-Q,负责图像亮度标准化、图像增强和实时检测运算。

系统采集所得图像如图 1 所示,导线影像为长条状,仅占据了探测板有效靶面的小部分,受重力等因素影响,导线的形态呈轻微垂弧(图 1(a)),且图像间成像亮度存在不一致(图 1(b))。在通过机器学习进行缺陷自动识别之前,需要通过图像剪裁、弯曲补偿及灰度标准化等预处理,以降低学习成本,提升学习效率。

1.2 导线区域弯曲补偿

经过裁剪后的导线区域,为了保证图像位置一致性,需进行弯曲补偿。在补偿过程中仅考虑垂直方向形变,因此本文通过边界检测获得导线的上下边界,取其中点生成偏移曲线,并以列为单位完成补偿。利用偏移曲线对导线图像进行弯曲补偿时由于边界检测采

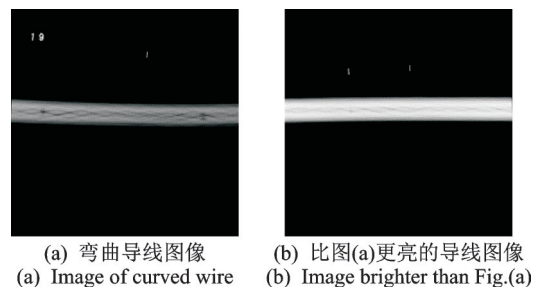


图 1 碳纤维复合芯导线 X 射线图像
Fig.1 X-ray image of carbon fiber composite core wire

用了阈值分割,相邻列偏移量不连续,将产生竖条状伪影(图 2(a)),为解决这一问题本文采用高斯滤波对偏移曲线进行滤波,滤波公式为

$$f(x) = \exp\left\{-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (1)$$

式中: σ 为方差; x 为横坐标。设离散化滤波核长度为 17,根据滤波结果进行线性插值,其结果如图 2(b)所示。对比可发现,滤波消除了矫正图像中的竖条状伪影,提升了补偿效果。

1.3 亮度一致化

在 ACCC 导线 X 射线图像的采集过程中,导致图像亮度不一致的因素有两种:(1)平板探测器中心和四周区域的射线响应不同,导致单幅图像中目标亮度不一致;(2)采集过程中,为爬线机器人供电的电池电量下降引起 X 射线强度下降,与成像板做亮度场校正时的射线场存在差异。针对这两种不同的亮度不一致现象,本文分别采用单幅图像亮度一致化和多幅图像亮度标准化技术进行解决。

(1)单幅图像亮度一致化

考虑到 ACCC 导线的整体均匀性,同一张图像不同位置的 ACCC 导线局部亮度应趋于一致。由于绞线空隙纹理的存在,本文在导线的每一个水平中心位置附近选取一定宽度的区域,进行局部亮度统计,之后根据局部亮度信息对 ACCC 导线进行整体亮度一致性补偿。

给定一致化目标亮度 B_m ,然后逐列统计局部亮度 $B_{area}(i)$ 为

$$B_{area}(i) = \sum_{j=i-W/2}^{i+W/2} \sum_{k=0}^H B(j,k) \quad (2)$$

式中: H 为图像高度; W 为区域宽度。

根据统计亮度和与规定亮度的比值,对该窗口中间一列各点像素值进行映射,统一映射到一致化目标亮度 B_m 。

$$B'(i,j) = \frac{B_m \times H \times W}{B_{area}(i)} \times B(i,j) \quad (3)$$

式中 $B'(i,j)$ 与 $B(i,j)$ 分别表示映射前后像素 (i,j) 的亮度。

(2)多幅图像亮度标准化

直方图规定^[15]是一种寻找直方图之间单调映射的方法,通过将原始图像各灰度级映射到目标图像各灰度级来实现不同图像的亮度标准化,本文通过直方图规定算法实现了多幅图像亮度标准化。图 3 中左侧为 3 幅不同亮度分布的导线图像及其灰度直方图;中间为标准图像及灰度直方图,该标准图像下缺陷与背景对比较为明显且接近标准成像条件下的成像效果;右侧为直方图规定转换后图像,转换后图像与标准图像具有完全相同的灰度分布。

2 目标检测网络

本文采用了经典的 Faster RCNN (Region convolutional neural network) 模型^[12]对 ACCC 导线 X 射线图像中

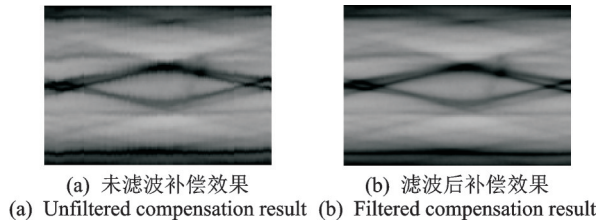


图 2 导线弯曲补偿效果对比

Fig.2 Comparison of wire bending compensation

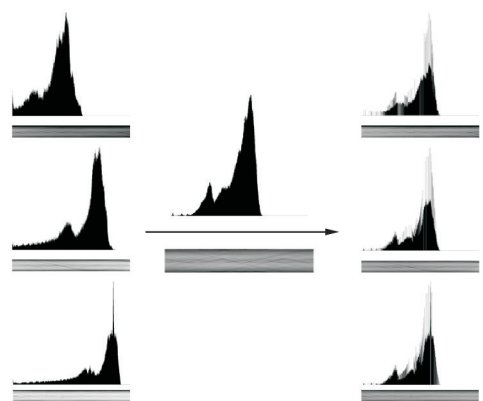


图 3 直方图规定化效果图

Fig.3 Effect diagram of histogram normalization

的缺陷进行自动检测。样本分为有/无缺陷二分类,缺陷包括锯口、折口、空隙及劈裂等,训练参数样本 1 250 张,测试样本 638 张,测试样本中包含缺陷样本 320 张。

Faster RCNN 依次由卷积层(Convolution layers)、区域选取网络(Region proposal network, RPN)、感兴趣区域(Region of interests, ROI)池化层、分类和回归(Classifier)4个部分组成。

卷积层用于提取图片的特征,输入为 $2\ 475$ 像素 \times 225 像素大小经过预处理的图片,输出为提取出的特征(Feature maps)。本文使用了 5 种不同特征提取网络,包括 VGG, GoogleNet, Inception v2, Resnet 和 WideResnet 进行实验,并对比最终结果,以寻找较为合适的特征提取网络。

RPN 网络对提取的卷积特征图进行处理,用于寻找可能包含缺陷目标的区域(目标建议)。本文用所有以 Mini Batch 梯度下降法筛选出来的 Anchor Box 先验框和二进制交叉熵来计算分类损失,用 IoU (Intersection of union) 值大于 0.5 的前景 Mini Batch 锚点来计算回归损失。RPN 在自身训练的同时,还会提供 ROI 给 Fast RCNN(RoIHead)作为训练样本。为解决多个目标建议在单一目标上重叠的问题,本文采用了非极大抑制算法(Non-maximum suppression, NMS)。NMS 保留评分最高的 N 个建议,由于电缆图像数据中缺陷尺寸较小,故可以适当降低 N 的大小,本文实验设置 N 大小为 1 000。

通过 RPN 获得目标建议后,将目标建议与由卷积层获得的特征图一起输入到 ROI 池化层,为每个目标建议提取固定长度的特征,分类和回归层使用这些特征进行分类,并进一步进行边框调整,计算得到候选区域所属的类,以及候选区域在图像中的精确位置。

Faster RCNN 训练方法采用端到端的联合训练方法,同时本文用随机梯度下降的动量算法训练,将动量值设置为 0.9。学习率从 0.001 开始,50 000 步后下降为 0.000 1。

3 实验验证

为验证前面提出的导线图像标准化方法对深度学习自动检测准确率起到的提升作用,以双层铝股线类型的碳纤维复合芯导线 X 射线图像作为研究对象。本文分别采用原始图像和标准化后图像进行对比实验,其中标准化部分包含单张亮度一致化和多图亮度标准化。图 4 为含各种不同类型缺陷的样本图标准化处理前后对比效果,图 4(a)为处理前图像,图像间存在较大亮度差异,图 4(b)为处理后图像,具有较高的亮度一致性。

标准化处理后图像大小为 $2\ 475$ 像素 \times 225 像素,将其输入神经网络模型进行检测。未经标准化处理的部分样本在检测中出现了较高的误检率和漏检率,如图 5 所示。图中 1 号样例右侧区域的误检原因是整体亮度的偏低,导致网络将过暗的斜纹错误认作了缺陷;2 号样例右侧区域的误检原因是整体亮度的偏高且背景与碳纤维芯棒对比度不高,导致了误检;3 号样例右侧区域是由于边界的弯曲不平,导致神经网络出现了误判;4,5 号样例中标注区域为漏检缺陷区域,图像整体亮度过大,而缺陷较为不明显,对比度较低,使得网络未能将原有的

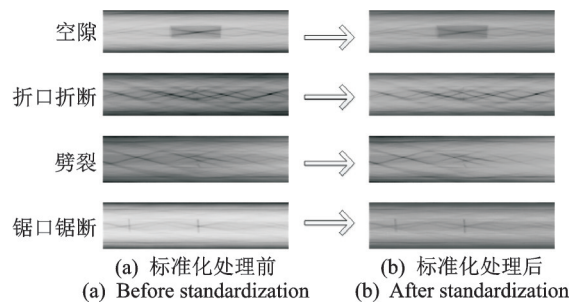


图 4 标准化处理前后对比

Fig.4 Comparison before and after standardization

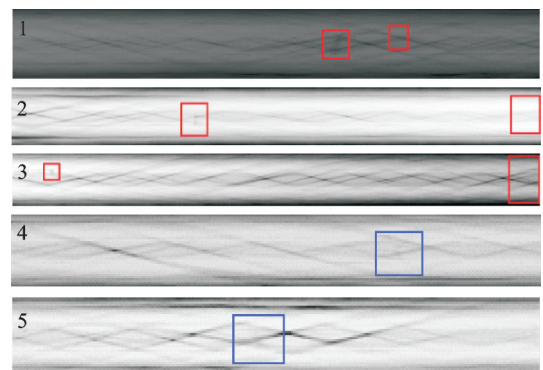


图 5 未经标准化处理发生漏检/误检样例

Fig.5 Examples of missed / falsely detected cases without standardization

缺陷识别出来。而这些漏检和误检在进行前端标准化后可以正确识别。

本文采用了多种不同的前处理方案,包括未进行标准化前处理、仅进行悬垂补偿、进行了悬垂补偿及单张图像亮度一致化、进行了全部标准化前处理共 4 种。采用 Resnet 作为特征处理网络,进行了 Faster RCNN 缺陷检测试验,结果统计情况如图 6 所示。通过对比可以发现,不论是正确识别率、漏检率还是误检率,随着图像依次进行悬垂补偿、单张亮度标准化以及多张亮度标准化,其检测精度逐步提升。由此可得出结论,本文提出的碳纤维导线 X 射线图像标准化方法,能够有效地提高神经网络对碳纤维导线 X 射线图像缺陷的识别率。

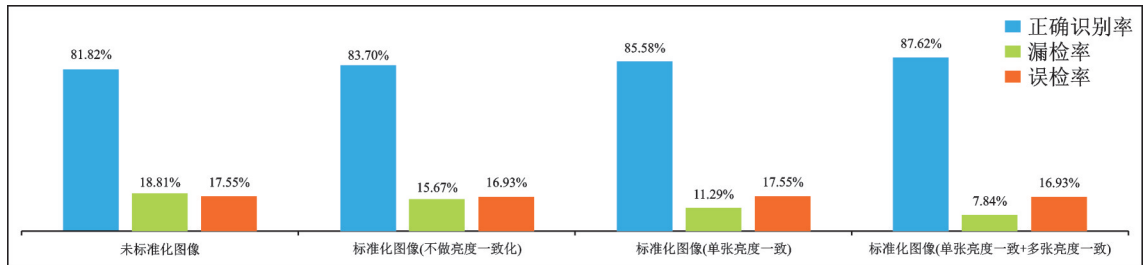


图 6 同网络下有无标准化处理的图像缺陷二分类识别率对比

Fig.6 Comparison of classification rate of image defects with and without standardized processing in the same network

本文实现了 VGG, GoogleNet, Resnet, Inception v2 和 WideResnet 特征提取网络结构,各特征提取网络的检测结果如图 7 所示。经对比可发现,无论采用何种特征提取网络,标准化前处理均可以一定程度上提高检测精度,而其中 Resnet 特征网络具有最高的检测精度。

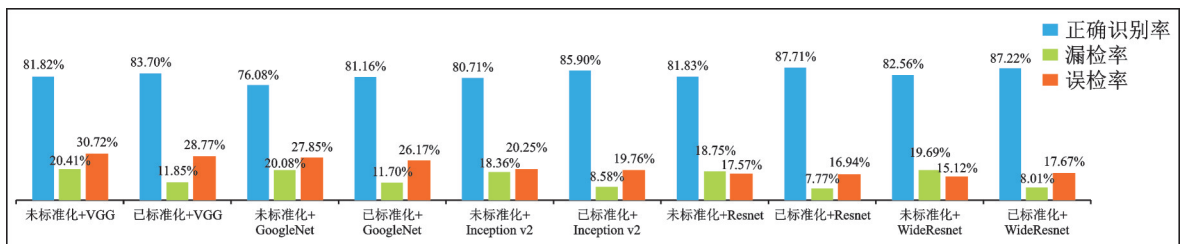


图 7 不同特征提取网络下有无标准化处理的图像缺陷二分类识别率对比

Fig.7 Comparison of classification rate of image defects with or without standardized processing under different feature extraction networks

4 结束语

针对碳纤维复合芯导线中碳纤维芯棒抗弯折强度低,容易发生诊断而无法有效检测的难题,本文提出了一种基于 X 射线成像,结合了前端图像标准化处理以及 Faster RCNN 深度学习网络的自动检测方案。经实验对比,所提出的悬垂补偿、亮度标准化等前端图像标准化处理可以有效提高检测精度,而使用 Faster RCNN 和 Resnet 特征提取网络,可以取得最佳的检测精度。

参考文献:

[1] 周菲. 关于新型导线在高压输电线路增容改造中的应用探讨[J]. 低碳世界, 2016(26): 75-76.
 ZHOU Fei. Discussion on the application of new conductor in the capacity expansion and transformation of high voltage transmission lines[J]. Low Carbon World, 2016 (26): 75-76.

[2] 谭笑, 陈杰, 李陈莹, 等. 高压电力电缆增加段长关键技术研究展望及应用[J]. 电力工程技术, 2018, 36(3): 91-96.

- TAN Xiao, CHEN Jie, LI Chenying, et al. Research prospect and application of key technologies for increasing length of high voltage power cable[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 36(3): 91-96.
- [3] SZU H H, DAI L, ZHENG Y, et al. Independent component analyses, compressive sampling, large data analyses (LDA), neural networks, biosystems, and nanoengineering XIII—Remote stress detection using a visible spectrum camera[C]// *Proceedings of SPIE Sensing Technology and Applications*. Baltimore, Maryland, United States: [s.n.], 2015: 949602.
- [4] SIERRA A D S, AVILA C S, CASANOVA J G, et al. A stress-detection system based on physiological signals and fuzzy logic[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(10): 4857-4865.
- [5] ALVEY B, HO D K C, ZARE A. Fourier features for explosive hazard detection using a wideband electromagnetic induction sensor[C]// *Proceedings of Detection and Sensing of Mines, Explosive OBJECTS, and Obscured*. Anaheim, California, United States: [s.n.], 2017. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2263019>.
- [6] WANG L. Electromagnetic induction holography imaging for stroke detection[J]. *Journal of the Optical Society of America—An Optics Image Science & Vision*, 2017, 34(2): 294.
- [7] SUTER S M, GIORDANO M, NIETLISPACH S, et al. Non-invasive acoustic detection of wolves[J]. *Bioacoustics*, 2017, 26(3): 237-248.
- [8] FAN Y, KONG P, QI H, et al. A surface acoustic wave response detection method for passive wireless torque sensor[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(1): 015321.
- [9] MU Canxing. An investigation of protection performances of industrial X-ray flaw detection machines[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1986(5): 642.
- [10] GODOI W C, DE GEUS K, DA SILVA R R, et al. Automated flaw detection in X-ray tomography of polymer insulators[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2010, 52(10): 533-539.
- [11] REN S, GIRSHICK R, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [12] JIANG H, LEARNEDMILLER E. Face detection with the faster R-CNN[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition*. [S.l.]: IEEE, 2017. DOI: <https://arxiv.org/abs/1606.03473v1>.
- [13] MA Q, JIAO J, HU P, et al. Excitation and detection of shear horizontal waves with electromagnetic acoustic transducers for nondestructive testing of plates[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(2): 428-436.
- [14] SONG W, XU C, PAN Q, et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(2): 365-371.
- [15] SHAPIRA D, AVIDAN S, HEL-OR Y. Multiple histogram matching[C]// *Proceedings of 2013 20th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. [S.l.]: IEEE, 2013. DOI: <https://10.1109/ICIP.2013.6738468>.

作者简介:



陈大兵(1978-),男,正高级工程师,研究方向:电力设备检验检测与评价等,E-mail:dabingchen@163.com。



魏寒来(1995-),男,硕士研究生,研究方向:图像处理与模式识别等,E-mail:874755290@qq.com。



胡轶宁(1981-),男,副教授,研究方向:图像处理与模式识别等,E-mail:hyn.list@seu.edu.cn。



舒华(1965-),男,教授,研究方向:图像处理与模式识别等,E-mail:shu.list@seu.edu.cn。



王征(1978-):男,讲师,研究方向:图像处理与模式识别,E-mail:fiki@seu.edu.cn。

(编辑:张黄群)