## 基于光电检测技术的电缆表面缺陷实时监测系统研究\*

### 刘秀婷

(无锡学院 理学院,江苏 无锡 214105)

摘 要:基于光电检测技术开发了电缆表面缺陷实时监测系统。在硬件结构方面,系统采用半环形 LED 白 光源照射电缆,利用线阵 CCD 相机采集电缆表面图像。在软件算法方面,提出一种改进的 ROI(Region of Interest)算法精确定位电缆区域,利用一种基于改进双边滤波的图像差分算法建立背景模型,改进一种基 于 CV-Kmeans 区域分类自适应滤波窗口算法来凸显电缆表面缺陷特征。研究结果表明,基于光电检测技 术研发的电缆表面缺陷实时监测系统的识别能力较高,整体监测准确率不低于 97.0%。

关键词: 电缆表面缺陷;实时监测; 机器视觉; 图像处理

中图分类号: TP919.8 文献标识码: A DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2022.01.011 引用格式: 刘秀婷.基于光电检测技术的电缆表面缺陷实时监测系统研究[J] 信息技术与网络安全,2022,41(1): 69-74.

Research on the real-time monitoring system for the cable surface defects based on the photoelectric detection technology

## Liu Xiuting

(School of Sciences, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

Abstract: A real-time detection system for cable surface defects was designed based on the photoelectric detection technology. In its hardware, the linear CCD camera and the arc-shaped LED white lights were selected to take the cable images. In its software, an improved ROI(Region of Interest) algorithm was proposed to locate the cable surface defect, a novel image difference algorithm based on the improved bilateral filtering algorithm was employed to build the background model, and an adaptive filtering window algorithm based on the CV-Kmeans region classification was improved to highlight the cable defect features. The obtained results show that the developed detection system for cable surface defects has high recognition ability, and the overall monitoring accuracy is not less than 97.0%.

Key words: cable surface defect; real-time detection; machine vision; image processing

0 引言

在实际生产环境中,电缆通常受到原料、温度 等原因影响而出现小孔、鼓包、破损等表面缺陷<sup>[1]</sup>。 这些缺陷不仅影响其外观质量,而且严重影响其性 能,甚至会造成安全事故<sup>[2]</sup>。目前,国内大多数电缆 生产线的质量监测主要依赖人工目测和手触的主 观经验方法,远远不能满足工业生产的监测要求<sup>[3]</sup>。 为此,迫切需要寻找一种性能优异的自动化监测技 术来满足工程生产需求。 近年来,以机器视觉为基础的光电检测技术成 为自动监测领域的热点,得到许多学者的关注,并 对此展开了广泛的系统研究。樊迪等<sup>[4]</sup>设计了基于 机器视觉的 FTU 插口状态自动识别系统,提高了 监测作业的自动化程度,降低了人工带电作业的安 全隐患;王敏等<sup>[5]</sup>提出一种基于机器视觉的参数信 息监测方法,能够准确监测识别电能表铭牌的额定 参数信息。

数字图像处理算法是光电检测技术的核心,对 监测系统的效率和精度有决定性的影响。目前,国 内外有关基于机器视觉的电缆表面缺陷监测算法

《信息技术与网络安全》2022 年第 41 卷第 1 期 投稿网址:www.pcachina.com 69

<sup>\*</sup> 基金项目:江苏省高等学校自然科学研究项目(20KJB460004);无 锡学院人才启动项目(2019r007)

的文献并不多见。在已有研究中,张槐祥等<sup>[6]</sup>在双 峰值模糊阈值分割的基础上提出了分段自适应模 糊阈值的分割方法;Aswini等<sup>[7]</sup>先后通过形态学操 作、分水岭分割及底帽变换分析了继电器金属盘表 面的裂缝缺陷,研究发现底帽变换减弱了图像中光 照不均匀造成的影响,监测效果更好。

纵观既有电缆缺陷监测算法,在实用性、难易 性和适用性等方面并不完全符合线缆工业现场的 实际情况。因此,考虑电缆生产线的实际监测需求 并结合电缆自身特性,本文利用基于机器视觉的光 电检测技术,在硬件结构上利用线阵 CCD 相机与半 环形 LED 白光源采集电缆全景高清图像;在软件平 台上利用改进的行灰度均值法、自适应中值滤波法 和基于双边滤波的图像差分法分别处理缺陷图像, 开发一套适用于电缆表面缺陷实时监测的系统,有 效提高了缺陷的监测效率和精度。

1 硬件结构

图 1 所示为电缆表面缺陷实时监测系统的基本结构,主要包括图像采集与处理子结构(包含光 照模块、相机模块、图像处理模块)、运动控制子结构(包含运动模块、软件控制模块)、两部分。其中,需 要根据电缆的型号和形状在电缆轴心法平面的圆 上隔一定角度布置一个相机。考虑到电缆的外观侍 点、镜头景深与畸变等诸多因素,系统采用三相机 采集电缆全景图像。

电缆表面缺陷实时监测的过程大致如下:电缆 在伺服电机的驱动下水平匀速通过光照模块,三相 机以固定行频连续采集电缆全景高清图像,并将采 集到的图像通过光纤/图像采集卡传输至工业计算机,在图像处理模块进行缺陷分析与判断。当系统发现表面缺陷,首先发出报警信号,然后在存在缺陷图像上标记缺陷位置,最后将缺陷面积、位置、种类等信息在上位机页面实时显示。电缆缺陷信息记录保存在云端,可随时查询。

1.1 光照模块设计

光源是光照模块的核心元件,合理的照明设计 更能显示待测物的信息特征。为了降低图像处理算 法的难度,需使电缆背景和电缆自身特征具有较大 的对比度,以便进行电缆特征提取。为了得到光照 均匀的电缆图像,考虑电缆的外观特征,需使光线 相对于电缆曲面各个角度近似一致。由于 LED 光 源为冷光源,无热辐射,发光效率高,使用寿命长, 故系统选取半环形 LED 自光源,并对称分布在相机 两侧,如图 2 所示。



图 2 半环形 LED 光源及安装侧面示意图

1.2 相机及镜头选择

由于 CCD 成像器件具有体积小、功耗低、性能 稳定、畸变小和噪声低等诸多优点,且线阵相机更 适合测量运动状态下带状物体,故本研究选用线阵



图 1 电缆表面缺陷实时监测系统结构

70 投稿网址:www.pcachina.com 《信息技术与网络安全》2022 年第 41 卷第 1 期

CCD 相机。根据工厂实际生产需求,这里设定监测系统 精度为 w=1 mm,电缆直径为 d=20 mm,电缆两边缘 各留出距离为 20 mm,图像视野范围为 L=60 mm,电 缆行进速度 v=2 mm/s。则线阵 CCD 相机的分辨率 R 和行频 H 的大小分别为:

$$R = \frac{5L}{w} = 300 \text{ pixel} \tag{1}$$

$$H = \frac{2v}{L} R = 20 \text{ kHz}$$
(2)

综合考虑电缆生产效率与监测精度的要求,系 统选取 DALSA 系列的 S3-10-01k40-00R 相机,其 同时支持 Camera Link 和 GigE 接口。此外,综合考虑 焦距、景深、通光量等关键参数,系统选取 COMPUTAR 系列的 M1214-MP 镜头,其具有 20 mm 固定焦距。 2 软件设计

图 3 所示为电缆表面缺陷实时监测的基本流程。首先,基于弧形 LED 白光源与线阵 CCD 相机采 集被测电缆的全景图像;然后,基于图像采集卡和 预安装图像处理软件的计算机完成电缆图像的区 域定位、图像提取与预处理;最后,基于缺陷信息数 据库判断电缆图像是否存在表面缺陷,若发现电缆 表面存在缺陷,则对其进行缺陷分割、特征提取、分 类识别和图像保存,否则返回输入图像。



图 3 实时监测流程图

#### 2.1 区域提取

为了消除背景干扰和降低算法工作量,系统软件模块只需处理电缆区域图像而非完整图像即可。 为了准确快速提取图像中的电缆区域,需要一套设 计简单且准确率高的区域提取算法。由于光照模 块采用弧型光源光照,电缆图像都是深色缆面、浅 色背景,线缆区域的灰度明显低于背景的灰度,通 常可以利用行灰度均值法对电缆区域进行定位与 提取<sup>[8]</sup>,但也会不可避免地出现电缆区域发亮、背 景变暗的情况,从而增大了区域提取难度。基于此, 本文基于行灰度均值法提出一种改进的电缆区域 提取方法:该方法对电缆图像的行灰度均值u(x)乘 以一个基于高斯分布的位置权重函数 $w(x)^{[9]}$ ,则基 于改进行灰度法的电缆图像f(x,y)的第x行的特 征值 $\lambda(x)$ 表示为:

$$\begin{cases} \lambda(x) = u(x)w(x) \\ w(x) = 1 - e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \end{cases}$$
(3)

图 4(a)所示为基于高斯分布的位置权重值函数曲线,曲线以  $x=\mu$  为中心对称,且当  $x=\mu$  时 w(x)最小,此时电缆区域与背景的特征值之差最大。决定曲线分布幅度的  $\sigma^2$ 由电缆直径确定。图 4(b)所示为基于改进行灰度均值法得到的电缆图像特征值  $\lambda(x)$ 。





#### 2.2 图像预处理

同态滤波能分割和重组频域图像,通过减少低频分量增加高频分量加大图像对比度和透明度,减少光照因素造成的锐化边缘细节,进而降低数据误

《信息技术与网络安全》2022 年第 41 卷第 1 期 投稿网址:www.pcachina.com 71

差。基于此,为了减少光照不均和缆面反光等因素 对图像的影响,这里对电缆区域图像进行同态滤波 处理<sup>[10]</sup>。

#### 2.3 缺陷分割

#### 2.3.1 建模背景

为了确定一个合适的灰度分割阈值,参考文献[11] 提出一种改进的图像差分算法:假设  $P \to Q 分别是$ 输入和平滑背景图像, N 是以 <math>i 为中心的自适应滤 波窗口,  $S \to US 分别是结构与平坦区域, <math>P(\cdot)$ 是目 标像素灰度值,  $\omega(i,j)$ 是归一化后的权重系数,  $\omega_s(i,j)$ 是空间邻近函数,  $\sigma_r$  为高斯函数标准差,则电缆表 面图像的背景模型可以表示为:

$$Q = \frac{\sum_{j \in N} \omega(i,j)P(j)}{\sum_{j \in N} \omega(i,j)} = \frac{\sum_{j \in N} [1 - \omega_r^n(i,j)]P(j)}{\sum_{j \in N} \omega(i,j)}$$

$$\omega_r(i,j) = \exp\left(-\frac{|P(j) - P(i)|^2}{2\sigma_r^2}\right)$$

$$N = \begin{cases} 9 \times 9, i \in S \\ 3 \times 3, i \in \text{US} \end{cases}$$
(4)

利用该背景模型,使得无缺陷电缆面处邻域像素获取的权重值近似相等,保证了无缺陷电缆面的正常 使得缺陷边缘都与非缺陷电缆面存在较大灰度差 2.3.2 自适应滤波窗口设计

为了凸显表面缺陷特征,要在保证无缺陷缆面趋 近原始图像的前提下对缺陷边缘进行较大程度的 平滑处理。本文提出一种基于 CV-Kmeans 区域分 类<sup>[12]</sup>的自适应滤波窗口算法。假设力表示以*i*为中 心的方形邻域,SD(Ω)与 Arc(Ω)分别表示邻域内像 素灰度的标准差和均值。首先,设定原图变差系数 CV 划分电缆图像的缺陷区域与非缺陷区域,表示为:

$$CV(i) = \frac{SD(\Omega_i)}{Ave(\Omega_i)} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\Omega_i} \sum_{j \in N} [P(j) - P(i)]^2}}{Ave(\Omega_i)}$$
(5)

缺陷区域的像素灰度变化剧烈,因此 SD( $\Omega_i$ )值 较大,对应的 CV 值也大;非缺陷区域的灰度分布 相对均匀,SD( $\Omega_i$ )值较小,对应 CV 值也小。

然后,利用 Kmeans 算法<sup>[13-14]</sup>和 CV 值进行区域 分类。此外,在缺陷区域使用大的滤波窗口可以有 效平滑缺陷,在非缺陷区域使用小滤波窗口基本不 改变其灰度值大小。通过分析前期实验数据,这里 对不同区域选用的自适应滤波窗口大小为:

$$N = \begin{cases} 61 \times 61, & \text{ist} \mathbb{R} \boxtimes [ 0 \times 9, \\ 9 \times 9, & \text{it} \mapsto \mathbb{R} \boxtimes [ 0 \times ] \end{bmatrix}$$
(6)

2.3.3 缺陷判断

缺陷判断是计算机视觉监测技术的重点,往往 决定了整个监测系统的性能。本文提出一种基于 Pearson 相关系数的缺陷监测方法。假设原图像 *X* 及自适应模板 *Y* 的大小均为  $m \times n$ , X(i,j)和 Y(i,j)代表原图和模板每个像素点的灰度值,  $\overline{X}$ 和 $\overline{Y}$ 是原图 和模板的平均灰度值,则 Pearson 相关系数  $\rho(X,Y)$ 定义为<sup>[15]</sup>:

$$\left| \begin{array}{l} \rho(X,Y) = \frac{\operatorname{cov}(X,Y)}{\sqrt{D(X) \cdot D(Y)}} \\ \operatorname{cov}(X,Y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} X(i,j)Y(i,j) - \overline{X}\overline{Y} \\ D(X) = \frac{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} (X(i,j) - \overline{X})^{2}}{mn} \\ D(Y) = \frac{\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} (Y(i,j) - \overline{Y})^{2}}{mn} \end{array} \right|$$

$$(7)$$

式中,cov(X, Y)表示变量X和Y的协方差,D(X)和 D(Y)分别表示X和Y的方差。当电缆表面无缺陷时,  $\rho(X, Y)$ 的绝对值趋向于1;当电缆表面有缺陷时,  $\rho(X, Y)$ 的绝对值趋向于0。通过分析大量带缺陷样 本和无缺陷样本与自适应模板的皮尔逊相关系数 得出合适阈值 $\rho_h$ ,比较待测图像与模板的皮尔逊相 关系数和 $\rho_h$ 的大小,可知待监测图像是否有缺陷。

$$\rho(X,Y) \begin{cases} \ge \rho_h, \quad \mathcal{T} \Leftrightarrow \mathbb{R} \\ < \rho_h, \quad \mathsf{f} \Leftrightarrow \mathbb{R} \end{cases} \tag{8}$$

2.3.4 缺陷提取

电缆区域图像 F 可通过预处理图像 P 与平滑 背景图像 Q 差分运算得到,表示为:

$$F = |P - Q| \tag{9}$$

对电缆区域图像 F进行自适应阈值处理,可得 到电缆表面缺陷位置。这里将阈值设定为:

$$T_2 = \beta \sigma_F$$
 (10)  
式中,  $\sigma_F$ 为差分图像的标准差,  $\beta$ 为控制因子。

对阈值分割后的图像采用连通区域标记法标 记出缺陷所在区域,会发现电缆表面缺陷周围存在 少数小面积的伪缺陷,需要系统进行进一步的逻辑 判断。假设系统的监测精度为*a* mm,图像中每 *a* mm<sup>2</sup> 对应 *n* 个像素,则小于 *n* 个像素的区域被判定为干 扰噪声,否则被判定为电缆表面缺陷。

## 3 实例分析

本研究利用 MFC (Microsoft Foundation Classes)集 成开发环境创建了基于机器视觉的电缆表面缺陷 监测系统,并利用该系统对 200 张随机排序的电缆 全景图片(包含无缺陷图片、小孔缺陷图片、划痕缺 陷图片、折痕缺陷图片和绝缘皮破损缺陷图片)进 行实验测试。表1所示为电缆表面缺陷系统的实时 监测结果。从中可以看出,本研究创建的监测系统 性能较好,整体监测正确率不低于 97.0%。

农 I 关门皿///14本			
图片类型	图片数量	识别数量	正确率/%
有缺陷	100	97	97.0
无缺陷	100	98	98.0
综合值	200	195	97.5

为了校验本文算法对不同表面缺陷特征识别 的有效性,利用本文算法分别对划痕、小孔和绝缘 皮破损缺陷进行监测,监测效果见图 5。可以看到, 本文算法对不同类型的电缆表面缺陷都具有良好 的识别效果。

为进一步验证本文算法的先进性,分别应用本 文算法、Ostu 迭代算法与最大熵阈值算法监测处理 同一批次的电缆,监测结果见图 6。从中可以看出, 基于 Ostu 算法的监测效果最差,最大熵阈值算法也 不能完全分割电缆表面缺陷,而本文算法对电缆表 面缺陷具有良好的分割效果,这说明本文算法较其 他两种算法具有更好的监测效果,性能相对优异。 4 结论

本文基于计算机视觉监测技术开发了一套电缆 表面缺陷实时监测系统。基于全景图像采集方案并 选用线阵 CCD 相机和弧形 LED 白光源设计了电缆 缺陷图像采集与传输的硬件模块,考虑电缆图像特 征开发了适用于图像处理与缺陷监测的软件模块。

实验数据表明,本文研究开发的电缆表面缺陷实时监测系统性能优异,整体监测准确率不低于 97.0%,能够基本满足工厂环境下实时监测的实际需求,对电缆表面质量监测效率的提高具有借鉴意义。 参考文献

- [1] LI X K, GUO Y C, LI Y M.Particle swarm optimization – based SVM for classification of cable surface defects of the cable stayed bridges[J].IEEE Access, 2020, 8, 44485, 44492.
- [2] 方春华,杨司齐,叶小源,等.XLPE 表面缺陷对电场
- 及击穿电压的影响[J].水电能源科学,2021,39(3): 171-175.
- 3] 罗乐, 汪金刚. 电网电缆绝缘在线监测系统设计[J].仪表技术与传感器, 2021(3): 63-66.
- 4] 樊迪,邵志敏,张世栋,等.基于机器视觉的馈线终端单元插口状态自动识别系统研究[J].电测与仪表,2020,57(17):136-141.

[5] 王敏,郑鹏.基于机器视觉的拆回旧电能表参数信









(c)绝缘皮破损缺陷原图与监测图

图 5 电缆表面缺陷识别效果

《信息技术与网络安全》2022 年第 41 卷第 1 期 投稿网址:www.pcachina.com 73



- [7] ASWINI E, DIVYA S, KARDHEEFAN S, et al.Mathematical morphology and bottom hat filtering approach for crack detection on relat surfaces [C]//Proceedings of International Conference on Smart Structures and Systems, 2013: 108-113.
- [8] 乔湘洋,王海芳,祁超飞,等.基于机器视觉的线缆 表面缺陷监测系统设计与算法研究[J].机床与液 压,2020,48(5):49-53.
- [9] ALI H H, KOLIVAND H, SUNAR M S.Soft bilateral filtering shadows using multiple image – based algo – rithms [J]. Multimedia Tools & Applications, 2017, 76 (2): 2591–2608.
- [10] SHAHAMAT H, POUYAN A A.Face recognition under large illumination variations using homomorphic filtering in spatial domain[J].Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(5):970-977.

- [13] 王海芳,焦龙,乔湘洋,等.基于机器视觉的电缆表 面缺陷快速监测算法研究[J].组合机床与自动化 加工技术,2020(2):119-122.
- [14] BASAR S, ADNAN A, KHAN N H, et al. Color image segmentation using K-means classification on RGB histogram[C]//Recent Advances in Telecommunications, Informatics and Educational Technologies, 2014.
- [15] KEONG W W, IRANMANESH V.Malaysian automatic number plate recognition system using Pearson correlation[C]//2016 IEEE Symposium on Computer Applications and Industrial Electronics, 2016:40-45. (收稿日期:2021-09-01)

作者简介:

刘秀婷(1989-),通信作者,女,硕士,主要研究方向:光电检测技术。E-mail:961440166@qq.com。

74 投稿网址:www.pcachina.com

《信息技术与网络安全》2022 年第 41 卷第 1 期

# 版权声明

经作者授权,本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志,凡未经本刊书面同意任何机构、 组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。 未经本刊书面同意,禁止一切互联网论文资源平台非法上传、 收录本论文。

截至目前,本论文已经授权被中国期刊全文数据库 (CNKI)、万方数据知识服务平台,中文科技期刊数据库(维 普网)、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收 录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人,本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明!

《信息技术与网络安全》编辑部中国电子信息产业集团有限公司第六研究所