

文章编号:1004-4213(2010)03-0477-4

基于光电检测技术的交联聚乙烯电缆 料纯净度测量技术*

徐国盛

(潍坊学院 信息与控制工程学院, 山东 潍坊 261061)

摘要:针对交联聚乙烯电缆绝缘料纯净度检测的问题,研制了基于线阵 CCD 技术的高速扫描测量系统.该系统在平行光的照射下,通过线阵 CCD 控制电路获得电缆材料缺陷信号,使用虚拟示波器 DSO-2902 对缺陷信号进行采集、传输,借助于计算机进行分析处理,从而精准地检测出缺陷.由数据采集系统对计算机内的信号数据进行处理,在保留杂质信息的前提下大幅度减少了待处理数据,从而实现对缺陷具体尺寸和所处位置的检测.结果表明,该系统能够准确地测出交联聚乙烯的杂质颗粒的横向与纵向尺寸,并能够确定该杂质颗粒所处的准确位置与杂质颗粒的个数等特性,其分辨力可达到 $20\ \mu\text{m}$,误差小于 5%,杂质的检出率达 100%.

关键词:光电子学;线阵 CCD;虚拟仪器;缺陷检测;信号处理

中图分类号: TP274

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103903.0477

0 引言

交联聚乙烯 (Crossing-Linkable Polyethylene, XLPE) 高压电缆绝缘料中的杂质颗粒是限制电缆耐电强度和寿命的主要因素.对于电缆绝缘料生产厂家或电缆生产厂家来说,除了要具有超净化的生产环境外,还必须具有一定的检测手段来检测电缆绝缘料中的杂质.目前国际上通行的测量方法有,激光扫描法和电子摄像法.对于激光扫描法,由于系统制造复杂和造价高等原因影响了其实际应用^[1].电子摄像法以电荷耦合固体电子摄像器件 CCD 为核心,具有制作简单、准确度高、成本低和性能稳定等优点.赵洪,等在 20 世纪 90 年代研制的 XLPE 电缆绝缘料杂质测量系统可以测量材料缺陷的尺寸和个数^[2-3].但是随着测量技术和高性能信号处理器件的发展,对其杂质的扫描测量已经要求能够测得杂质颗粒的形貌,将误差降至最低,并且能够检测到尽量小的杂质.因此,本课题组开发了基于线阵 CCD 的电子摄像式 XLPE 电缆绝缘料纯净度测量系统.本文以高压 XLPE 绝缘料纯净度检测为研究目标,根据电缆料扫描的特点,设计了图像压缩方法并使用 FPGA+USB2.0 具体实现^[4-5],建立了基于 CCD 线阵的高速扫描缺陷形貌测量系统.

1 杂质测量系统组成及工作原理

CCD 扫描缺陷检测装置的结构如图 1.整个装置包括:机械部分、照明光源、光学系统、CCD 电子摄像机、缺陷数据处理系统等.

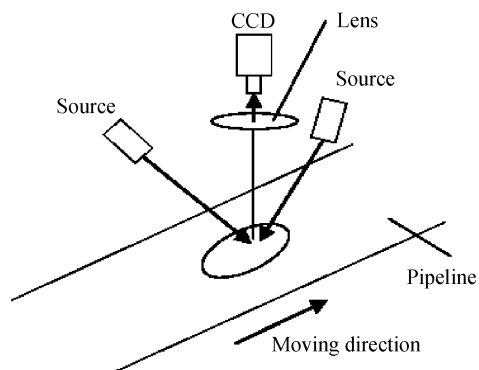


图 1 材料缺陷检测装置的整体结构

Fig. 1 The structure of material defect detector

工作原理:被测原料由挤出装置的平膜模具挤出,通过三辊压膜器后制成宽约 20 mm、厚约 1 mm、表面光洁、均匀透明的膜带,电机带动三辊压膜器滚动从而使电缆绝缘料以恒定速度移动,经收取器收集并拖动匀速地通过电子摄像机.当所要检测的缺陷通过这一检测区域时,光源一部分光线被缺陷遮挡而无法到达 CCD,使 CCD 各光敏元的感光强度不同. CCD 输出的载有材料信息的信号经过缺陷数据处理系统的一系列处理,在上位机获得缺陷的显微图像.

CCD 模块输出的信号如图 2. 图 2(a) 中的 SH

* 国家自然科学基金(40706037)和山东省自然科学基金(Z2007F08)资助

Tel: 0536-8785611 Email: xuguosheng666666@163.com

收稿日期: 2009-10-23

修回日期: 2009-11-06

信号在 t_0 时刻输出 1 个正脉冲, CCD 模块随即输出一段时间长度为 T 的信号; (b) 为没有缺陷信息的 CCD 信号, $t_0 \sim t_0 + T$ 时间内输出电平都高于动态阈值电平; (c) 为含有缺陷信息的 CCD 信号, 当 $t_1 \sim t_2$ 时间内的 CCD 输出电平低于动态阈值电平时为缺陷信息. CCD 输出的时域信号与扫描行的位置是映射的关系, t_1 、 t_2 分别对应扫描行缺陷的起始位置和终止位置, $(t_2 - t_1)$ 对应本行缺陷的横向尺寸, t_1 到 t_2 之间的 CCD 信号电平值携带了本行缺陷的灰度信息, 而 SH 脉冲个数即扫描次数携带了缺陷的纵向位置信息. 将各行缺陷信息汇总, 依靠上位机的分析处理, 能够得到被测缺陷的大小、位置、形状和灰度等信息.

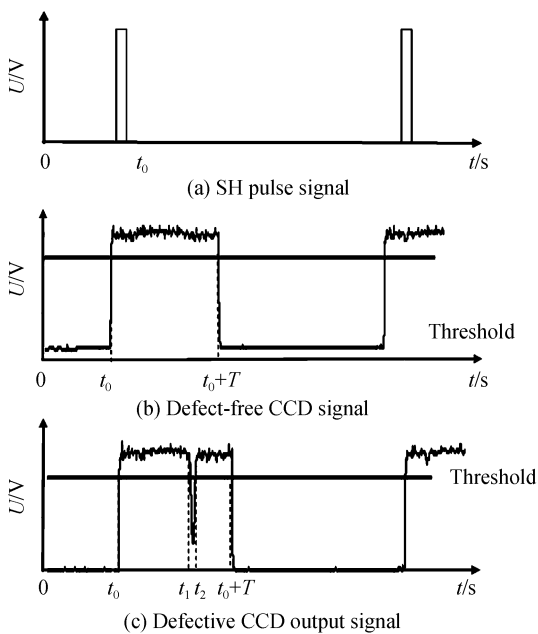


图 2 CCD 模块输出信号

Fig. 2 CCD module output signal

2 缺陷数据处理系统硬件设计

材料缺陷检测的一个显著特点就是数据处理量大. 以检测电缆绝缘料为例, 材料以较快的速度运行, 假设应用 1 024 像元的 CCD 扫描被测材料, 扫描频率为 1 000 次/s, 如果使用 8 位 A/D 转换器且每个像元采样 2 次, 则每秒采集 2.048×10^6 个字节的数据, 对应每秒约 20 Mb 的数据处理量. 这对于计算机系统是一个巨大的开支, 有时甚至是不可能实现的. 因此, 在缺陷数据实时处理系统的方案选择中需要解决数据处理量大的问题.

对 CCD 输出信号有两种处理方法: 一是对 CCD 输出信号进行二值化处理后, 再进行数据采集, 在不需要图像灰度信息的系统中, 为了提高系统的处理速度和降低成本大多采用二值化图像处理方法; 二是对 CCD 输出信号采样, 量化编码后再采集

到计算机、单片机或者数字信号处理机 (Digital Signal Processor, DSP) 等微处理器系统中, 然后借助于微处理器并结合一定的算法, 对量化的数据进行处理, 以得到精确的测量值. 这种方法的特点是分辨率和准确度较高, 缺点是数据量大、运算复杂, 难以保证系统实时性.

在缺陷图像检测过程中, 人们期望对缺陷的扫描检测能够用图像技术来获得缺陷的显微图像. 用户可以据此追溯缺陷的来源, 因此本文选择第二种方案对 CCD 信号进行处理. 采用具有速度优势的硬件方案实现缺陷数据的实时处理, 将 FPGA 的快速性和 PC 机的灵活性通过高速 USB 有机地结合起来, 设计了一套以 FPGA 为核心的缺陷数据处理系统, 其结构如图 3. 信号采集模块对 CCD 输出信号进行模数转换; FPGA 模块是缺陷数据处理系统的核心模块, 完成图像预处理, 包括图像数据压缩、数据封装等; 处理后的数据通过 USB 总线传输至上位机进行后续处理.

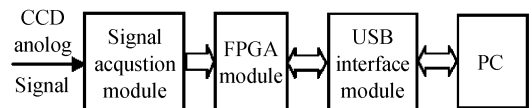


图 3 缺陷数据处理系统

Fig. 3 Defects data processing system

3 数据压缩预处理

本文在保证检测效果的前提下, 选用基于像素灰度值的处理算法较好的控制了算法的复杂度. 根据被测材料的特点, 设计了基于 FPGA 的缺陷图像预处理方法: 使用动态确定的灰度阈值分割扫描图像, 一方面将高于阈值的图像数据即图像的背景信息舍弃, 另一方面保留低于阈值的图像灰度信息, 即保留缺陷的显微图像信息, 这样能够最大限度地减少上传到上位机的数据量, 从而提高图像处理速度^[6-8]. 这个过程实际上完成了缺陷图像数据的压缩.

根据重建缺陷显微图像所需的缺陷特征参量, 设计了数据封装方法. CCD 每扫描一行输出一个行标志字“11111111111111”, 供上位机确定缺陷的纵向位置. 如果本次扫描检测到缺陷则继续输出缺陷数据字, 标志位 $b_{14} \sim b_{15}$ 设为“10”, $b_{10} \sim b_{13}$ 为保留位, 默认为“0000”, $b_0 \sim b_9$ 为 10 位缺陷数据. 缺陷数据输出完毕之后输出缺陷地址字, 为了压缩数据, 缺陷地址字不包括缺陷的起始地址, 上位机能够根据缺陷数据字的个数和最后一个缺陷数据的位置计算出缺陷的起始位置. 缺陷地址字的标志位 $b_{14} \sim b_{15}$ 设为“00”, $b_{11} \sim b_{13}$ 为保留位, 默认为“000”, $b_0 \sim$

b_{10} 为采集最后一个缺陷数据时的 11 位计数值,即缺陷的末位位置信息。

基于 FPGA 的数据处理结构整体设计中, SH 脉冲作为时钟计数单元的启动信号, 计数器 2(counts₂) 为其他单元提供状态跳转的判据。A/D 控制单元输出波形控制 A/D 转换芯片将 CCD 模块输出的模拟信号转换为 10 位数字信号。数字信号分为两路, 一路信号进入动态阈值计算单元计算阈值, 另一路信号与 10 位动态阈值进行比较提取出缺陷数据。缺陷数据在经过数据封装单元后生成相应的数据结构, 通过 FIFO 缓冲之后在 FIFO 控制单元的控制下输出。这些子模块有些是基于 FPGA 内部宏单元在 Mega Wizard 上设计完成的, 有些是通过 VHDL 程序实现的。

在缺陷数据处理系统中, FPGA 是核心的功能模块, 承载了全部的数字电路部分。FPGA 完成的功能可以主要描述为:

- 1) 利用内部 PLL, 将外部时钟引入 FPGA 中, 并做相应的分频处理, 为 A/D 转换模块和 FPGA 内部各模块提供工作时钟;
- 2) 计数器模块对系统时钟计数, 用来提供其他模块动作的判据;
- 3) 通过利用流水线方法设计的加法器阵列和移位操作, 完成动态阈值的求取工作;
- 4) 在有限状态机的控制下实现比较器和数据封装功能, 完成材料缺陷信息的提取和封装;
- 5) 通过其内部的异步 FIFO 缓存处理后的数据;
- 6) 设计 USB 接口逻辑, 将缓存在 FPGA 的 FIFO 中的数据上传到 USB 内部的 FIFO 中;
- 7) 通过 Quartus II 软件中自带的仿真器, 验证各逻辑模块功能, 验证无误后进行硬件调试。

4 实验与分析

为了验证基于 FPGA 的缺陷数据实时处理技术的有效性, 以 CCD 扫描缺陷检测装置为实验平台, 对含有 5 个缺陷的标准模板和实际电缆绝缘料进行了实验验证与分析。

对含有 3 个缺陷的标准模板进行测试, 高像素微距照相机拍摄的缺陷图像如图 4, 缺陷直径分别为 1 000 μm 、400 μm 和 70 μm 。

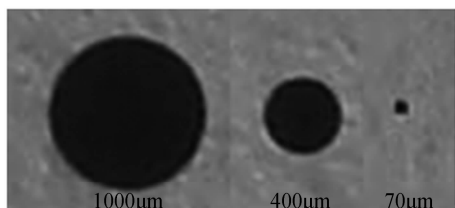


图 4 标准缺陷图像

Fig. 4 Standard defects images

将标准模板以 20 mm/s 的速度匀速通过检测

装置 100 次, 实验结果表明, 系统对 70 μm 以上的缺陷测中率为 100%。上位机应用程序通过上传的数据对 3 个尺寸的缺陷进行重建, 能够实时显示缺陷的显微图像。其中某一次的重建图像如图 5, 标定缺陷的数据依次为缺陷的序号、横向最大尺寸对应的采样点数和纵向的扫描次数。为了提高系统的处理速度, 对 CCD 扫描图像进行了压缩, 减少了数据传输量, 但是缺陷的形状、灰度等信息仍能满足系统的要求, 重建的缺陷图像在缺陷形状及灰度方面与实际缺陷有很好的 consistency。

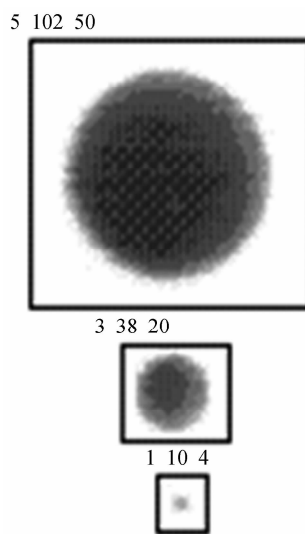


图 5 重建缺陷图像

Fig. 5 Reconstructed defects images

记录缺陷特征数据, 缺陷横向的实际尺寸、实验中测得的平均尺寸以及平均误差的信息如表 1。

表 1 检测结果

Table 1 Inspecting results

Actual size/ μm	Measured mean size/ μm	Mean error
1 000	1 009.1	0.91%
400	407.3	1.83%
70	72.5	3.57%

由检测结果可知, 缺陷的尺寸越小, 平均误差越大, 70 μm 的缺陷检测误差最大, 其他的缺陷检测误差均在 2.48% 以下, 这是由于检测系统受到 CCD 器件分辨率和照相物镜分辨率的影响。

5 结论

材料缺陷数据处理系统是 CCD 扫描缺陷检测装置的核心模块, 往往也是制约整个缺陷检测装置性能提升的关键所在。本文针对电缆绝缘料缺陷检测过程中速度和准确度的要求, 围绕着现有缺陷检测系统的数字化改进与性能提升展开一系列的工作。为了解决缺陷检测过程中数据处理量大的问题, 针对被测材料的缺陷信号的数据特征, 研究了一种适合材料表面缺陷检测的基于 FPGA 的缺陷数据

实时处理技术.采用专用硬件 FPGA 在低层进行图像预处理,利用动态阈值确定缺陷范围,在保留完整缺陷图像灰度信息的前提下,最大限度的压缩了上传的数据量,减轻了上位机的数据处理压力,从而提高整个装置的检测速度和准确度.实验结果表明,采用该方法上位机能够实时准确的显示缺陷的显微图像.

参考文献

- [1] ZHAO Hong, TU De-min, LIU Zi-yu. Holographic sizing of contaminant particles in XLPE cables[J]. *IEEE Trans on Electrical Insulation*, 1991, **2**:217-221.
- [2] ZHAO Hong, WANG Xuan, CUI Si-hai, *et al.* Inspection system based on CCD for contaminant particles in XLPE insulating compound[J]. *Electric Machines and Contro*, 2002, **16**(4):342-345.
赵洪,王暄,崔思海,等.基于 CCD 的 XLPE 电缆料杂质颗粒测量系统的研制[J]. *电机与控制学报*, 2002, **16**(4):342-345.
- [3] ZHAO Hong, WANG Xuan. Signal pick up and processing of laser detection for foreign particles in insulating polyolefine compounds[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 1996, **30**(8):4-9.
赵洪,王暄.聚烯烃化合物中杂质颗粒的激光扫描检测[J]. *西安交通大学学报*, 1996, **30**(8):4-9.
- [4] WANG Hai-hong, ZENG Ni, LU Wei, *et al.* Edge detection of laser imaging radar based on wavelet transform and mathematical morphology[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, **35**(6):903-906.
王海虹,曾妮,陆威,等.基于小波变换和数学形态学的激光成像雷达图像边缘检测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):903-906.
- [5] ZHOU Bing, WANG Yong-zhong, SUN Li-hui, *et al.* Study on local entropy used in small target detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2):382-387.
周冰,王永仲,孙立辉,等.图像局部熵用于小目标检测研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2):382-387.
- [6] ZHAO Shan, ZHAI Hai-xia. Image retrieval based on bit-plane distribution feature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8):2150-2154.
赵珊,翟海霞.基于位平面分布特征的图像检索算法[J]. *光子学报*, 2009, **38**(8):2150-2154.
- [7] YE Chuan-qi, MIAO Qi-guang, WANG Bao-shu. An image fusion algorithm using region segmentation and contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):447-453.
叶传奇,苗启广,王宝树.基于区域分割和 Counterlet 变换的图像融合算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):447-453.
- [8] CHAI Yong, He You, QU Chang-wen. Multiscale image fusion algorithm based on sub pixel weighted region energy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10):2732-2737.
柴勇,何友,曲长文.基于亚像素区域加权能量特征的多尺度图像融合算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10):2732-2737.

XLPE Insulation Compound Purity Evaluation Based on Photo-electrical Testing Technique

XU Guo-sheng

(School of Information and Control Engineering, Weifang University, Weifang, Shandong 261061, China)

Abstract: To solve the crossing-linkable polyethylene (XLPE) insulation compound purity evaluation problem, a high speed scanning measurement system is designed according to Linear CCD technology. The inspecting system of defects in cable materials based on CCD obtains signals of defects in cable materials with irradiation of parallel light, by using linear array CCD control circuit. The defect signals are collected and transferred by using virtual oscillograph DSO-2902, and the defect signals are analyzed and processed by using computer. The defects are precisely figure out. The data of signals memorized in computer are processed by using software system of data collecting, the data quantity to be processed is decreased greatly, while the contamination information data are reserved. Thereby, the inspection of precise size and location of defects are achieved. The experiment results show that the proposed system can measure both the transverse and the longitudinal size of the XLPE contamination particle well and truly, and also detect the accurate positions and the number of a certain kind of impurity particle. The acuity of this system can reach 20 μm and the error ratio is less than 5%. The detecting ratio of the contamination particles can be high up to 100%.

Key words: Optoelectronics; Linear CCD; Virtual oscillograph; Defects detection; Signal processing



XU Guo-sheng was born in 1979, and obtained the Ph. D. degree form Harbin University of Science and Technology, Now he is a lecturer at Weifang University, and his research interests focus on measurement technology photoelectric.