

文章编号: 1003-501X(2011)03-0076-05

基于红外图像的 SF₆ 检漏定位系统

毕国玲, 赵建, 隋龙, 张艳超

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 设计与开发了一种基于红外图像的 SF₆ 气体检漏定位系统。本系统利用 TMS320C6416 高速图像处理能力及其灵活可配置的视频端口, 结合 S3C6410 强大的控制能力, 对可能发生 SF₆ 泄漏的现场进行红外视频图像的实时采集, 利用帧间差分法和局部熵差相结合的算法对泄漏点进行检测和定位。仿真及实验结果表明, 该算法不仅克服了帧间差分法检测位置不够精确和局部熵差法计算量大的缺点, 同时还有效的降低了诊断过程中被测对象的外形、表面缺陷和背景环境的噪声等影响, 能够高效、准确地实现 SF₆ 泄漏点的检测和定位。

关键词: 检漏定位; 红外图像; 帧间差分; 局部熵差; SF₆ 气体

中图分类号: TP311

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.03.014

SF₆ Leak Detection and Location System Based on Infrared Image

BI Guo-ling, ZHAO Jian, SUI Long, ZHANG Yan-chao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A leak detection and location system for SF₆ based on infrared image is designed and developed. By using the high speed microprocessor TMS320C6416 and its configurable video ports and combined with the powerful control capability of the S3C6410, the real-time infrared image where SF₆ leakage may occur is collected and processed. Combine with the frame of difference algorithm and the local entropy algorithm, detect and locate leaks. Experimental results show that the algorithm not only effectively improves the precise detecting location of frame difference algorithm and reduces calculated amount of local entropy method, but also effectively reduces the effect of diagnosis process with object shape, surface defects and environmental background noise etc, which can efficiently and accurately implement SF₆ leak detection and location.

Key words: leak detection and location; infrared image; frame difference; local entropy; SF₆ gas

0 引言

SF₆ 气体无色, 无味, 常温下无腐蚀性的惰性气体。SF₆ 具有优异的灭弧和绝缘性能, 在同样条件下, 其绝缘能力是空气、氮气的 215 倍以上, 灭弧能力更是空气的 100 余倍, 因此在电力系统中的应用越来越广泛^[1]。但由于设备老化而导致泄漏时有发生, 常规检漏方法有: 包扎法、刷肥皂泡法、定性定量检漏仪法等, 这些方法都需要停电作业, 不仅工作量大, 而且很难精确定位漏点。

本文根据实际需要设计开发了一种基于红外图像的高效、可靠的检漏定位系统, 利用本系统对现场红外视频图像进行采集, 通过帧间差分法和局部熵差相结合的算法实现对泄漏点的检测和定位。

收稿日期: 2010-11-18; 收到修改稿日期: 2010-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977001); 吉林省科技发展计划杰出青年项目; 省院省校合作基金资助项目

作者简介: 毕国玲(1981-), 女(汉族), 河北唐山人。硕士, 主要研究工作是嵌入式技术、数字图像处理、软件设计等方面的研究。

E-mail: biguoling2004@163.com。

1 系统工作原理及组成

1.1 系统工作原理

SF₆ 对从地球表面反射的红外辐射具有极强的吸收能力, 利用此特性可以使通常不可见的气体泄漏在红外探测器及先进的红外探测技术的帮助下变得可见。本系统就是利用红外成像系统将不可见的气体泄漏成像, 对 SF₆ 设备进行非接触、实时远距离监测, 快速、准确地查找 SF₆ 气体的泄漏点。

由于系统所需图像的数据量较大, 对运算能力有较高的要求, 要实现系统的主要功能, 必须选用合适的硬件处理系统, 同时还要配以高效的算法。DSP 能实现高速图像的实时处理, 但目前国内同类样机中大多采用单片 DSP 芯片进行算法处理, 对于处理完成的结果无法保存和显示, 必须借助 PC 机来完成。为了满足系统的独立性及便携性的需求, 采用 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320C6416 进行系统算法处理, 系统的控制显示功能由三星公司的基于 ARM11 核的控制芯片 S3C6410 来完成, 软件系统则采用 WinCE 6.0 嵌入式操作系统。这样不仅满足了算法运算处理能力和控制功能的要求, 同时提高了系统的集成度^[2]。

1.2 系统组成

TMS320C6416 是当前单片性能突出的 32 位数字信号处理器, 工作主频高达 1 GHz, 支持 8 条指令并行执行, 定点处理能力最高到 8 GIPS。为使数据能保持对超快速 DSP 内核的供给, TMS320C6416 采用了两级超高速缓存器。其片内资源主要含有增强型直接存储器访问(EDMA)控制器、外部存储器接口(EMIF)、主机接口(HPI)等。其中高速 64 bits 宽度的 EMIF 接口, 最高吞吐能达到 1 064 MB/s。

三星公司的 S3C6410 是一款低功率、高性能的 RSIC 微处理器。其稳定工作频率为 667 MHz, 128 MB DDR 内存, 256 MB NandFlash 和 1 MB NorFlash。S3C6410 包括很多硬件功能外设: Camera 接口, TFT 24 bit 真彩色 LCD 控制器, 32 通道的 DMA, SD Host 和高速 MMC 卡接口等。

由常温下 SF₆ 气体光谱透过率可知, SF₆ 气体在红外有一个以波长 10.56 μm 为中心的吸收带, 因此本系统采用非制冷长波红外(8~12 μm)探测器进行成像。探测器信号输出为标准的 PAL 制式信号, 采用解码芯片 TVP5150 将其转化为数字信号提供给 DSP 进行处理。采集进来的数字信号按奇、偶场分别存储, 并将存储设计为乒乓结构, 使得 DSP 的读取操作可与存储体的写入操作同时进行。

对 TMS320C6416 可配置两个视频口, 分别作为视频数据采集口和 TV 信号输出口, 以便连接监视器或数据采集卡进行其它操作。而通过 HPI 口也可将视频信号送往 S3C6410 的 LCD 控制寄存器, 从而可以用 LCD 进行现场显示。具体系统组成框图如图 1 所示。

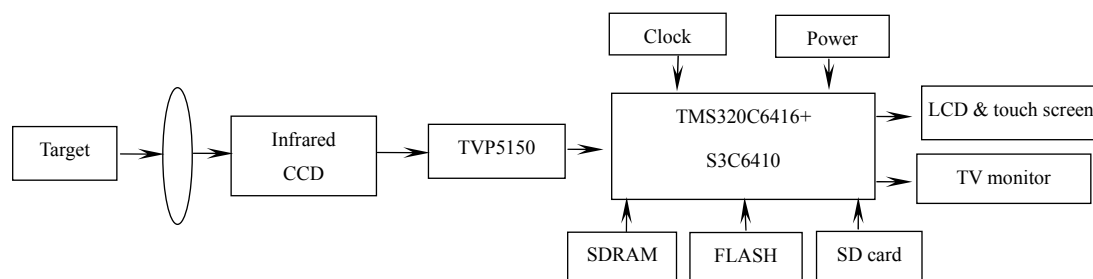


图1 系统组成框图

Fig.1 Frame of the system

2 检漏定位算法

2.1 算法基本原理

一般地, SF₆ 气体的泄漏是一个渐变微弱的过程。为了把微弱变化的目标提取出来, 本系统在对目标红外图像进行处理时采用帧间差分和局部熵差相结合的算法的检漏定位算法。

帧间差分法是利用图像序列中相邻帧图像之间做差来提取图像中的运动区域。首先将几帧图像校正正在

同一坐标系下,然后将同一背景不同时刻的两幅图像进行差分运算,在差分图像中,灰度不发生变化的背景部分被减掉,相对运动变化的目标就会被提取出来。通过阈值来提取序列图像中运动变化的区域,第 k 帧图像的灰度值 $I_k(x_i, y_i)$ 和第 $k+1$ 帧图像的灰度值 $I_{k+1}(x_i, y_i)$ 之间的变化可用一个二值差分图像 $Df(x, y)$ 表示:

$$Df(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } |I_{k+1}(x_i, y_i) - I_k(x_i, y_i)| > T \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y) 为运动渐变目标在图像空间中的位置, T 为阈值。帧间差分法对场景中的光线渐变不敏感,检测有效且稳定,但一般不能完全提取所有相关的特征像素点,在运动变化的实体内部容易产生空洞现象,难以获得运动目标的完整轮廓,检测的目标位置也不精确^[3-4]。

信息熵是表征信源本身统计特性的一个物理量,是信源平均不确定性的度量。是从整体的统计特性上对信源的一个客观的描述。将信息熵引入图像处理中就是用熵决定一个合适的阈值将序列图像中形成的差分图像分割为目标和背景,使目标和背景的信息量取得最大值。

设 $f(x, y)$ 为图像中的点 (x, y) 处的灰度,显然 $f(x, y) > 0$, 对于一幅 $M \times N$ 大小的红外图像,定义^[5-6]:

$$H_f = -\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} \log P_{ij} \quad (2)$$

$$P_{ij} = \frac{f(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j)} \quad (3)$$

式中: H_f 为该图像的熵, P_{ij} 为某一灰度值在区域内出现的概率,如果对图像的某一局部计算熵值,即可得到局部熵。图像中定义的局部熵反映了图像灰度的离散程度,在图像灰度离散性较大的地方 P_{ij} 较小,局部熵较大;图像灰度相对较均匀的地方 P_{ij} 较大,局部熵小。这与图像灰度的均值无关,因此可以根据图像的局部熵把相对均匀的多目标分割出来^[7]。由于局部熵的大小依赖于整个局部区域的灰度统计特性,对单点噪声不敏感,具有一定的滤波效果。而 P_{ij} 的归一化处理也起到平滑噪声的作用,所以局部熵具有良好的抗噪与抗几何失真的能力^[8-9]。

为了使计算速度满足实时性要求,由公式(2)定义的熵涉及到对数运算,计算工作量大,运行速度慢。可以将式(2)中的对数计算简化,通过 Taylor 展开得到近似公式:

$$H_f = -\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{ij} (P_{ij} - 1) = 1 - \sum_{(i,j) \in (M,N)} P_{ij}^2 \quad (4)$$

由于泄漏温差的存在,漏点的信息被包含在红外热像中,因此泄漏发生前后,泄漏区域的红外图像的局部熵值将发生变化。

2.2 算法的实现

SF₆ 现场的背景通常是相对静止的。采集一帧红外图像作为帧间差分算法的背景图像,隔几帧再采集红外图像作为当前的图像,使其与背景图像做帧间差分算法处理。根据统计差分后图像的直方图选取阈值并进行二值化处理。

如果没有发现可疑泄露点,将当前采集的图像作为更新后的背景,继续用帧间差分的方法进行检测;如果有可疑的泄漏点,则保留当前的背景图像,并初步确定可能的泄露点位置,以这个位置为中心取一个局部窗口,这样,尽量缩小了局部窗口的大小,使局部熵差法计算量大大减小。设局部窗口大小为 $M \times N$ 的红外图像 K ,利用 $m \times n$ 的计算模板 A 对 K 进行遍历扫描,根据式(4)计算图像 K 基于窗口 A 的局部熵,当扫描完成后便得到了图像 K 的局部熵值矩阵 $V_K(m, n)$ 。同理,对当前采集的红外图像 L 进行类似的计算,从而得到图像 L 基于窗口 A 的局部熵值矩阵 $V_L(m, n)$ 。最后,按式(4)计算两幅图像的局部熵差矩阵

$$\Delta V(m, n) = V_K(m, n) - V_L(m, n) \quad (5)$$

选用 $\Delta V(m, n)$ 作为泄漏检测和定位的诊断因子。如果局部红外图像 K 与 L 匹配得很好,局部熵差矩阵 $\Delta V(m, n)$ 中各元素的值很小且趋近于 0,则可以判定被测对象没有发生泄漏。设定阈值 δ , 如果 $\Delta V(m, n)$ 中某一连续区域元素的值大于阈值 δ ,则可以判定被测对象在该区域发生了泄漏(可能不只一个区域)。对所有 $\Delta V(m, n) > \delta$ 的区域进行反向映射计算,求取该区域在热像图 L 中对应的像素位置,从而通过被测对象的

红外图像与空间坐标的几何对应关系可以得出泄漏点的精确位置^[10-11]。本算法实现的流程图如图 2 所示。

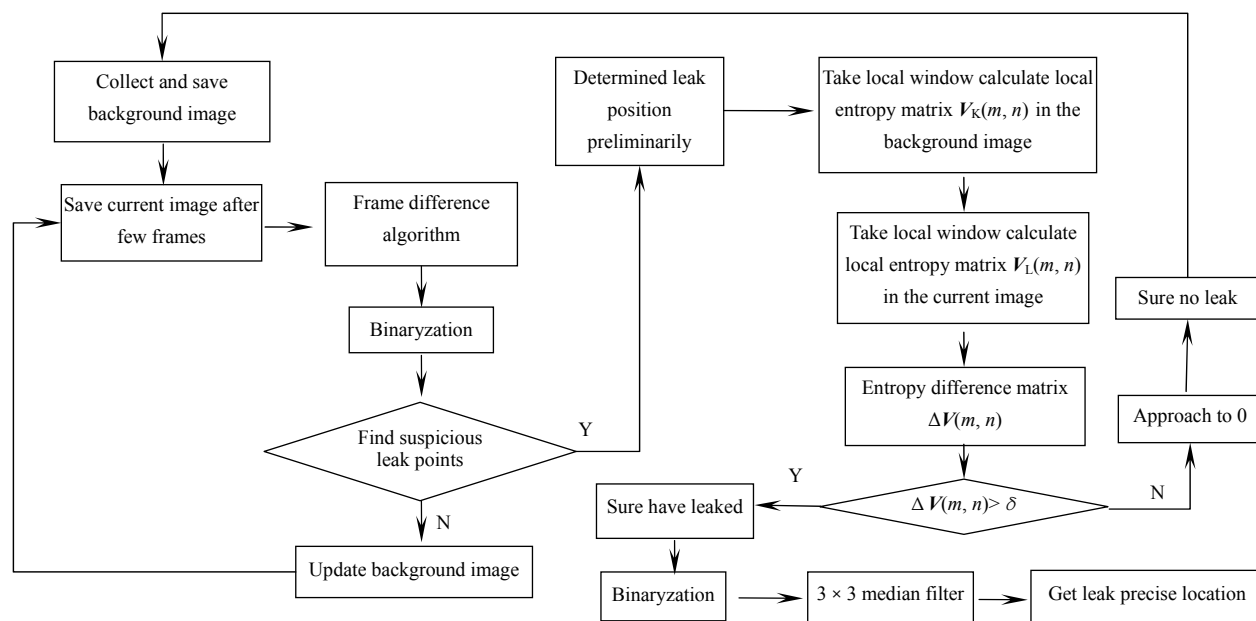


图 2 算法实现的流程图

Fig.2 The flow chart of fusion algorithm

3 仿真实验结果与分析

利用本系统对可能发生 SF₆ 泄漏现场采集红外视频图像, 图像分辨率为 320×240。下面采用了模块化、层次化设计思想进行软件开发, 运用 TI 公司集成开发环境 CCS3.3 进行了仿真实验。利用帧间差分法检测到可疑泄漏点后, 运用局部熵差法算得阈值 δ 。通过实验设定泄漏诊断阈值 $\delta=2.3$, 利用 5×5 像素模板算出局部熵差矩阵 $\Delta V(5, 5)$, 可检测最小精度为 5×5 像素大小, 从而精确定位泄漏点。如图 3 为二值化和 3×3 中值滤波处理后得到的结果。对现场图像进行处理得到精确的泄漏位置后并在原红外图像中将泄漏点用小方格标记出来, 如图 4 所示。

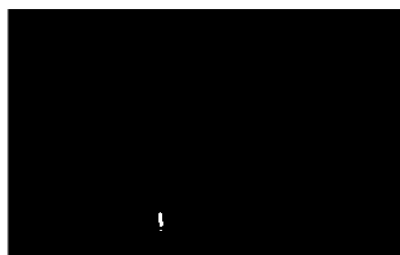


图 3 处理后的结果

Fig.3 The result after processing

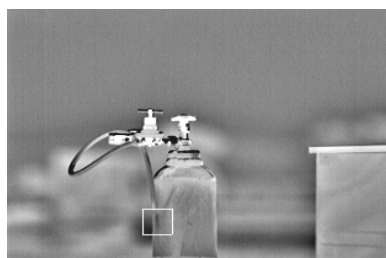


图 4 泄漏点的精确定位

Fig.4 Leak precise location

仿真实验结果显示两帧相减算法检测可疑泄漏点位置, 只需 21.7 ms, 而单独局部熵差算法进行检漏需要 52.1 ms。如果将两种算法结合起来, 需要的时间是 38.6 ms, 满足 25 frame/s 的实际需求。仿真实验结果表明, 本算法能够准确地提出 SF₆ 精确的泄漏位置。局部熵差与帧间差分法的结合有效的提高了速度。

4 结 论

本文针对现有泄漏定位检测方法存在的问题, 设计与开发了一个基于红外图像的 SF₆ 检漏定位系统, 提出了一种基于 SF₆ 的红外图像的帧间差分法和局部熵差算法相结合的检漏定位方法。在没有可疑泄露点时,

系统采用帧间差分算法来进行判断, 它比局部熵差分算法计算量小很多, 这就使系统更具实时性; 如果有可疑的泄露点, 则通过两种算法的结合判断, 缩小了局部熵的窗口, 克服了局部熵差法的计算量大、处理速度慢等缺点, 能够高效、准确地实现 SF₆ 泄漏点的检测和定位。同时得益于熵值的统计特性, 可以有效避免由于被测对象外形不规则、表面缺陷和背景环境噪声等造成的干扰。

因本系统硬件上采用了 DSP+ARM, 不但可将实时的红外视频图像在任何标准的显示器上显示, 也可在系统自带的 LCD 上显示, 方便灵活, 易于控制。本系统不用将被检测设备停止工作, 便可实时地获得 SF₆ 泄漏视频图像, 能够检测出微量 SF₆ 的泄漏, 准确地找出泄漏位置, 不仅可节省时间及人力资源, 还可降低 SF₆ 气体的购买量。此外, 本系统也可适用于在对应红外波段能成像的其它气体的泄漏检测。

参考文献:

- [1] 李森. 六氟化硫中微水检测技术进展 [J]. 天津电力技术, 2010(1): 25-26.
LI Sen. SF₆ water detection technology progress [J]. **Tianjin Electric Power Technology**, 2010(1): 25-26.
- [2] 曲锋, 刘英, 王健, 等. 红外双波段图像实时融合系统 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1685-1686.
QU Feng, LIU Ying, WANG Jian, *et al.* Infrared dualband realtime image fusion system [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2010, 18(7): 1685-1686.
- [3] 谢凤英, 赵丹培, 姜志国. Visual C++ 数字图像处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 449-451.
XIE Feng-ying, ZHAO Dan-pei, JIANG Zhi-guo. **Visual C++ digital image processing** [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008: 449-451.
- [4] 潘翔鹤, 赵曙光, 柳宗浦, 等. 一种基于梯度图像帧间差分 and 背景差分的运动目标检测新方法 [J]. 光电子技术, 2009, 29(1): 34-35.
PAN Xiang-he, ZHAO Shu-guang, LIU Zong-pu, *et al.* Detection of Video Moving Objects by Combining Grads-based Frame Difference and Background Subtraction [J]. **OPTOELECTRONIC TECHNOLOGY**, 2009, 29(1): 34-35.
- [5] 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): 381-382.
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): 381-382.
- [6] 蔡倩, 张焕春, 王凤至. 基于某微型飞行器的 2 种图像导航算法性能比较 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28(3): 30-31.
CAI Qian, ZHANG Huan-chun, WANG Feng-zhi. Comparison of two image navigation algorithms based on micro aerial vehicle [J]. **Transducer and Microsystem Technologies**, 2009, 28(3): 30-31.
- [7] 廖斌, 肖山竹, 卢焕章. 基于加权局部熵的图像兴趣点检测方法 [J]. 激光与红外, 2007, 37(4): 381-382.
LIAO Bin, XIAO Shan-zhu, LU Huan-zhang. Interest Points Detection Based on Weighted Local Entropy [J]. **Lasers & Infrared**, 2007, 37(4): 381-382.
- [8] ZHANG Chi, ZHANG Hong-bin. Detecting digital image forgeries through weighted local entropy[C] // **Proceedings of 2007 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology**, Piscataway, USA: IEEE Press, 2007: 62-67.
- [9] 张永亮, 卢焕章. 基于图像局部熵的红外图像分割方法 [J]. 红外技术, 2006, 28(11): 656-657.
ZHANG Yong-liang, LU Huan-zhang. Infrared Image Segmentation Based on Local Entropy of Image [J]. **Infrared Technology**, 2006, 28(11): 656-657.
- [10] 葛楠, 彭光正, 姜牧舟. 基于红外热像图局部熵差的泄漏定位方法 [J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(7): 597-598.
GE Nan, PENG Guang-zheng, JIANG Mu-zhou. Leak Localization Method Based on Infrared Thermography Using Local Entropy Difference Algorithm [J]. **Journal of Beijing Institute of Technology**, 2009, 29(7): 597-598.
- [11] 葛楠, 彭光正, 纪春华, 等. 红外图像融合在气体泄漏定位中的应用 [J]. 光电工程, 2009, 36(8): 37-38.
GE Nan, PENG Guang-zheng, JI Chun-hua, *et al.* Application of Infrared Image Fusion in Air Leakage Localization [J]. **Opto-Electronic Engineering**, 2009, 36(8): 37-38.