

文章编号:1673-5005(2012)03-0146-05

基于形态学方法的工件表面缺陷红外热像检测技术

谢 静¹, 杨晓燕², 徐长航¹, 陈国明¹, 葛苏鞍³

(1. 中国石油大学 机电工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 青岛中油华东院安全环保有限公司, 山东 青岛 266071;
3. 中国石油天然气集团公司 西北油田节能检测中心, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:提出一种基于形态学理论的红外热像分割方法,用于工件表面缺陷的自动检测。首先在含缺陷钢制试件红外热成像检测试验的基础上,对工件的红外热像进行灰度化、高斯高通滤波、对数变换和二值化等方法相结合的增强处理;然后采用形态学方法,基于缺陷的空间连续性和缺陷与噪声的尺寸差别,设定连通分量所含像素数的阈值,最终实现红外热像的有效分割。结果表明,新的红外热像处理方法可以实现缺陷位置和形状的精确检测,可作为含缺陷部件的红外检测和自动识别手段。

关键词:形态学; 红外图像; 缺陷检测; 连通分量; 图像分割

中图分类号:TN 219 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2012.03.025

Infrared thermal images detecting surface defect of steel specimen based on morphological algorithm

XIE Jing¹, YANG Xiao-yan², XU Chang-hang¹, CHEN Guo-ming¹, GE Su-an³

(1. College of Electromechanical Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Qingdao China Petroleum EDI Safety & Environment Protection Company Limited, Qingdao 266071, China;
3. Northwest Oilfield Energy Saving Monitor Center of CNPC, Karamay 834000, China)

Abstract: An infrared thermal image processing framework to detect surface defect of a steel specimen was proposed. It includes two steps; First, gray processing, Gaussian high pass filter, logarithmic transformation and thresholding were used on the original infrared thermal image in sequence for contrast enhancement; Second, based on the spatial continuity of defect and the size difference between noise and defect, a segmentation method based on morphological algorithm was applied. The threshold number of pixels contained in connected component was set and the effective segmentation of the infrared thermal image was realized. Experimental results show that the proposed framework has very promising segmentation performance and can obtain precise defect information of a steel specimen. It can be used as infrared detection and automatic identification means for components with surface defects.

Key words: morphological algorithm; infrared image; defect detection; connected component; image segmentation

红外热像检测技术利用不同物体或同一物体的不同表面状态引起温度场不同分布的原理,实现表面与近表面缺陷的非接触、高效检测,在高温、有毒等危险检测环境下有着良好的适用性。对于工件表面缺陷检测问题而言,缺陷引起检测表面温度场的异常分布^[1],从而使得正常表面和缺陷表面的红外热图存在一定图像特征差异,应用恰当的图像处理

技术可以实现对缺陷的自动检测^[2]。目前,包括图像增强、图像分割等在内的图像处理技术方法繁多^[3-6],但是尚无方法能够在所有特定应用领域中都得到满意的效果。因此,需要以含缺陷工件表面红外热像特征为出发点,探索适用的图像处理技术,最终实现具有满意结果的缺陷自动检测。由于红外热像仪设备本身成像特点及环境干扰等原因,红外热

收稿日期:2011-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(50679083)

作者简介:谢静(1977-),女(汉族),山东庄平人,讲师,硕士,研究方向为图像处理与红外热成像无损检测技术。

像在生成和传输过程中不可避免地受到随机噪声、起伏背景的干扰并伴有热扩散效应,从而引起图像模糊和边缘扩散,使得图像的可视程度降低^[7-8]。对于含有表面缺陷的工件红外热像来说,当缺陷深度较浅时,缺陷部分与正常表面对比度很低,以上两个原因加剧了应用红外热像进行工件缺陷检测的难度。笔者综合运用灰度化、高斯高通滤波、对数变换和二值化处理技术对原红外热像进行增强,将形态学方法用于红外热像,对增强图像进行8-连通分量检测,设定连通分量像素数阈值进行缺陷表面的分割。

1 试验及图像增强

1.1 试验

试验对象材料为45号钢制成的板型试件(尺寸为90 mm×40 mm×8 mm),在试件上预制了3种缺陷:深度分别为0.5 mm和1 mm的直线裂纹、Φ4 mm的通孔。试验过程中采用SAT HY6850型红外热像仪检测并记录试件的温度场。该仪器的主要特性如下:系统获取数据的最大帧速为50 帧/s,温度分辨率为0.08 ℃,空间分辨率可达1.3 mrad。试验时环境温度为21 ℃,热激励方式为电加热炉激励。图1(a)为试验得到的含缺陷工件的红外热像(已进行图像区域选择处理)。

1.2 图像增强

由于红外热像的低清晰度以及缺陷与正常表面低对比度的存在,为了得到理想的缺陷检测效果,在进行图像分割之前,需要对原始红外热像进行增强。综合考虑带缺陷工件红外热像的特征,进行灰度化、高斯高通滤波、对数变换和二值化处理相结合的图像增强处理,使缺陷在图像中更加明显,以利于后续的图像分割处理。

1.2.1 红外热像灰度化

待处理的原始红外热像一般为RGB空间模式,而其中的亮度信息代表温度的高低。因此,灰度图像可以完整保留原图像的温度信息,并使后续处理更加快速和便捷。借助NTSC彩色模式将原始红外热像转换成灰度图,用以描述每一像素位置的亮度^[9]。在NTSC彩色制式中,图像数据由3部分组成:亮度Y、色调I和饱和度Q。Y、I、Q三个分量可以从一幅RGB图像中得到:

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.596 & -0.274 & -0.322 \\ 0.211 & -0.523 & 0.312 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,亮度描述灰度信息,色调和饱和度描述彩色信息。因此,将I和Q的值赋为0,Y值保持不变,就可以达到仅保留图像灰度信息的目的。然后,使用公式

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.956 & 0.621 \\ 1.000 & -0.272 & -0.647 \\ 1.000 & -1.106 & 1.703 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

返回RGB空间,得到原红外热像变换后的灰度图像。

应用上述灰度变换方法对原始红外热像灰度化处理后得到的结果见图1(b)。

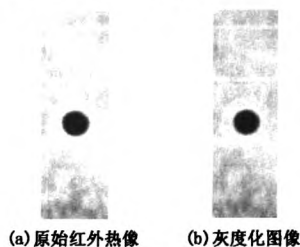


图1 原始红外热像及灰度化图像

Fig.1 Original infrared thermal image and gray-level image

1.2.2 高斯高通滤波

通过分析灰度化后的图像,可以看出通孔所模拟缺陷的灰度值与正常表面灰度值有很大差异,而两道深度较浅的裂纹性缺陷所对应的灰度值与正常表面几乎没有差异。因此,用灰度值阈值方法进行缺陷分割对于此类图像很难取得理想的处理效果。借鉴人工识别3个缺陷的经验可知,缺陷边缘与其周围像素灰度存在着较大差异是人工识别缺陷的主要依据,因此可以使用边缘增强来进行缺陷的增强,以提高缺陷识别的精度。

锐化技术是用于加强图像中的目标边界和图像细节的一种处理方法^[10]。图像中的边缘对应图像的高频成分,因此选择高通滤波器来锐化图像,从而实现缺陷成分的增强。常用的高通滤波器有理想高通滤波器、高斯高通滤波器和巴特沃思高通滤波器类型。由于高斯高通滤波器比其他两种高通滤波器的滤波效果都要更加平滑^[9],因此本文使用高斯型高通滤波器来锐化图像。

截至频率距原点为 D_0 的高斯型高通滤波器的传递函数为

$$H(u, v) = 1 - \exp[-D^2(u, v)/(2D_0^2)] \quad (3)$$

式中, $D(u, v)$ 为点 (u, v) 距离频率矩形中心的距离。

假设所要处理的图像尺寸为 $M \times N$,则它的傅里

叶变换也具有相同的尺寸。在变换被中心化后,频率矩形的中心位于 $(u, v) = (M/2, N/2)$ 处,因此,点 (u, v) 距离频率矩形中心的距离为

$$D(u, v) = [(u - M/2)^2 + (v - N/2)^2]^{1/2}. \quad (4)$$

滤波后的图像为

$$g(x, y) = F^{-1}[H(u, v)F(u, v)]. \quad (5)$$

式中, $F(u, v)$ 为灰度图像的傅立叶变换。

对图1(b)进行高斯高通滤波后的图像如图2所示。

1.2.3 对数变换

由图2可以看出,由于高通滤波器偏离了直流项,从而把图像的平均值降低到了零,而背景基本接近于黑色。对此类图像的传统补偿方法有高频提升滤波和低频提升滤波,这两种方法都可以在一定程度上增强图像的平均强度。分别使用这两种方法,结合后续提出的缺陷提取方法,对红外热像实例进行处理。处理结果表明,这两种补偿方法对最终的缺陷提取的效果均不够理想。因此,本文中使用时对对比度拉伸对高频滤波后的图像进一步增强。

使用对数变换的对比度拉伸方法,对数变换可以使亮度较低的部分得到拉伸,而亮度较高的部分得到压缩。可以描述为

$$s_k = b + \lg(a(r_k + 1) + c), \quad k = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (6)$$

式中, r_k 为输入图像第 k 个像素的灰度值; s_k 为该像素对数变换后的灰度值; n 为输入图像的像素数; a 、 b 、 c 为对数变换的参数,其值根据应用对象确定。

通过实例测试发现,对于本类应用对象,将参数选为 $a=1, b=0, c=0.8$ 可以得到良好的效果。图2经过对数变换后的结果如图3(a)所示。实例结果表明,该方法可以取得良好的处理效果。

1.2.4 二值化处理

使用阈值方法对对数变换后的灰度图像进行二值化处理,转换成黑白图像。设定一个阈值,对每一像素的灰度值作判断,大于此阈值将其设为黑色,小于或等于此阈值则将其设为白色。即

$$s_{kl} = \begin{cases} 1, & r_k \leq l; \\ 0, & r_k > l. \end{cases} \quad (7)$$

式中, l 为设定的阈值; s_{kl} 为二值化处理后该像素点的灰度值。

阈值的选取对于分割结果的影响很大,本文中基于直方图选取此阈值。由于工件表面绝大多数为正常表面,缺陷和噪声占有的像素数通常远小于正常表面的,因此直方图中最高点的灰度值所代表的通常是正常表面的灰度值。基于此值将二值化处理的阈值选为

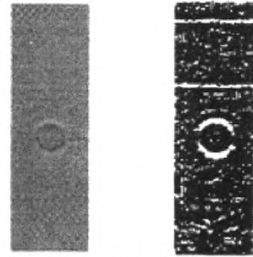
$$l = r + d. \quad (8)$$

式中, r 为直方图中最高点对应的灰度值; d 为调整参数,选为 $d=2$ 。

处理后的效果如图3(b)所示。由图3(b)可以看出,二值化处理后的图像中,缺陷成分得到相当程度地增强。



图2 高斯高通滤波后的图像
Fig.2 Gaussian high pass filter image



(a) 对数变换 (b) 二值化处理后的图像

图3 对数变换及二值化处理后的图像
Fig.3 Logarithmic transformation image and binary image

综上所述,综合应用灰度化、高斯高通滤波、对数变换和二值化的方法对原始红外热像进行处理后,图像中无缺陷区域表现为黑色像素,而缺陷和噪声成分则表现为白色像素,这样的处理结果可为图像分割奠定重要的基础。

2 图像分割

经过图像增强后,缺陷成分在图像中已经得到比较明显的体现。为了将缺陷部分从整个图像中自动提取出来,需要使用图像分割技术做进一步的处理。

对于存在表面缺陷的工件,其红外热像具有两个特征:其一是每个缺陷在空间上是连续的,在图像中表现为每个缺陷对应的像素具有连通性,以裂纹缺陷为例,从裂纹的起点到终点,其在空间上是基本连续的,在图像上则表现为一组连通的像素;其二是图像中的噪声成分通常呈散点分布,且所覆盖区域的面积相对于缺陷而言非常小。

提出一种用于缺陷检测的形态学红外热像分割方法。首先,基于特征一,将增强图像中灰度值为255的8-连通分量检测出来,这些连通分量对应缺

陷和噪声两部分;基于特征二,计算检测出的每个8-连通分量包含的像素个数,即连通分量在空间中的尺寸。以连通分量所含像素个数为对象进行阈值处理。根据连通分量包含像素数的分布情况,设定一个合适的阈值,所含像素数大于此阈值的连通分量对应的是缺陷,否则为干扰噪声。

2.1 8-连通分量检测

坐标为 (x, y) 的像素具有8个邻接像素,其坐标分别为: $(x+1, y), (x-1, y), (x, y+1), (x, y-1), (x+1, y+1), (x+1, y-1), (x-1, y+1), (x-1, y-1)$ 。在二值图像中,两个像素如果是8邻接像素,仅当它们具有同一灰度值时,才具有连通性。对于增强后的图像,缺陷和噪声的灰度值为255,正常表面的灰度值为0,所以仅对灰度值为255的像素进行8-连通分量的检测。

8-连通分量检测可以使用形态学的方法实现。数学形态学的概念由 Matheron^[11]提出, Serra^[12]将其用于图像处理中。令 Y 表示一个包含于集合 A 中的连通分量,并假设 Y 中的一个点 p 为已知,使用下式即可得到 Y 的所有元素:

$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A, k=1, 2, 3, \dots, n. \quad (9)$$

其中, $X_0=p, B$ 为 3×3 的结构元素。如果 $X_k = X_{k-1}$,则算法收敛,并且令 $Y=X_k$ 。

应用式(9)对图3(b)进行8-连通分量检测,结果显示图3(b)中共有309个8-连通分量。8-连通分量所包含像素的个数分布如图4所示。由图4可以看出,有5个连通分量所含的像素数远远大于其他的连通分量,其编号分别为1、2、6、113、117。

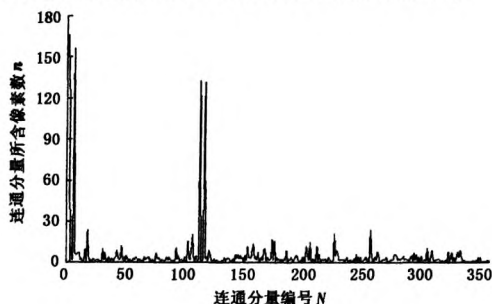


图4 连通分量所包含的像素数

Fig. 4 Number of pixels in connected components

2.2 连通分量像素数的阈值处理

由于缺陷的空间连续性,工件表面缺陷对应的图像连通像素个数与噪声相比通常很大。在本文实例中,有5个连通分量所包含的像素个数远远大于其他连通分量,因此使用阈值方法可以将这5个连

通分量提取出来。由于缺陷和噪声所含像素数的显著差异,阈值可以在较大范围内选取。根据连通分量包含像素数目的曲线图,可以很容易地选择一个合适的阈值。当阈值选为100时,编号为1、2、6、99、106的连通分量被判断为缺陷,所含像素的灰度值保持为255。其他连通分量由于所含像素值小于阈值,判断为噪声干扰,所含像素的灰度像素值都置为0。图5中给出了阈值选为100时的分割结果,其中白色对应缺陷成分,黑色对应试件无缺陷区域。由于阈值选取对图像处理效果具有重要的影响,因此阈值的自动确定是下一步研究工作的目标。

图5的5个连通分量分别为与裂纹缺陷对应的两条直线、与通孔对应的两个半圆,以及试件上方由于高斯高通滤波引入的影响区域。其中试件上方的连通分量是由于离散傅里叶变换计算中暗含的周期性造成的,这一影响还有待在下一步研究工作中通过选用合适的方法将其去除。从图5可以明显看出,经过对原始红外热像的一系列处理,缺陷区域已经被精确地与无缺陷区域分割开来。



图5 分割结果

Fig. 5 Result of segmentation

3 结束语

提出灰度化、高斯高通滤波、对数变换和二值化处理相结合的图像处理方法,用于钢制试件红外热像的增强。依据缺陷的连续性、噪声与缺陷相比面积通常很小的特征,应用形态学图像处理方法提出基于连通分量所含像素数阈值的缺陷分割方法。以具有多类型缺陷试件的红外热像为实例,对提出的增强和分割方法进行试验验证。新提出的红外热像处理方法使图像中所含缺陷成分得到很大程度的突出,并且能够实现工件表面不同类型缺陷的精确、有效识别。

参考文献:

- [1] 陈伯良. 红外焦平面成像器件的重大应用[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2): 168-172.
CHEN Bo-liang. Important applications of IRFPA imaging devices [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(2): 168-172.
- [2] NODA N. Thermal stresses intensity factor for functionally gradient plate with an edge crack [J]. Journal of Thermal Stresses, 1997, 20(3): 373-387.

- [3] PAL N R, PAL S K. A review on image segmentation techniques [J]. *Pattern Recognition*, 1993, 26(9): 1277-1294.
- [4] JIAN Bo-shi, JITENDRA Malik. Normalized cuts and image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(8): 888-905.
- [5] ROBERT M, HARALICK, LINDA C Shapiro. Image segmentation techniques [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1985, 29(1): 100-132.
- [6] SONG Chun-zhu, ALAN Yuille. Region competition; unifying snakes, region growing, and Bayes/MDL for multiband image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1996, 18(9): 884-900.
- [7] DATTOMA V, MARCUCCIO R, PAPPALLETTERE C, et al. Thermography investigation of sandwich structure made of composite material [J]. *NDT & E International*, 2001, 34(8): 515-520.
- [8] 邢素霞, 张俊举, 常本康, 等. 非制冷红外热成像技术的发展与现状 [J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(5): 441-444.
- XING Su-xia, ZHANG Jun-ju, CHANG Ben-kang, et al. Recent development and status of uncooled IR thermal imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(5): 441-444.
- [9] RAFAEL C, GONZALEZ, RICHARD E woods. Digital image processing [M]. Prentice Hall, 2007.
- [10] CAROSEN A Meola. A new approach for estimation of defects detection with infrared thermography [J]. *Materials Letters*, 2007, 61(3): 747-750.
- [11] MATHERON G. Random sets and integral in geometry [M]. New York: Wiley, 1975.
- [12] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology [M]. London: Academic, 1982.

(编辑 沈玉英)

(上接第139页)

- [7] 李华, 陈德春, 孟红霞. 水平井变密度射孔优化设计模型 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(3): 363-368.
- LI Hua, CHEN De-chun, MENG Hong-xia. Optimized models of variable density perforation in the horizontal well [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(3): 363-368.
- [8] 严科, 杨少春, 任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究 [J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 870-874.
- YAN Ke, YANG Shao-chun, REN Huai-qiang. Research on quantitative characterization of macroscopic heterogeneity of reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 870-874.
- [9] 王敬, 刘慧卿, 刘松原, 等. 非均质底水油藏水平井水淹规律研究 [J]. *石油学报*, 2010, 31(6): 970-974.
- WANG Jing, LIU Hui-qing, LIU Song-yuan, et al. A flooding law in horizontal wells of heterogeneous reservoirs with bottom water [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(6): 970-974.
- [10] DUILLOFSKY L J. An approximate model for well productivity in heterogeneous porous media [J]. *Mathematical Geology*, 2000, 32(4): 421-438.
- [11] GRINGARTEN A C, jr RAMEY H J. The use of source and Green's functions in solving unsteady-flow problems in reservoirs [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1973, 13(5): 285-296.
- [12] BESSON J. Performance of slanted and horizontal wells on an anisotropic medium [R]. SPE 20965, 1990.
- [13] SHENG J J. Formulation of the flow problem in anisotropic porous media using different coordinate transformations [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, 75(1/2): 203-208.
- [14] FURUI K, ZHU D, HILL A D. A new skin-factor model for perforated horizontal wells [J]. *SPE Drilling & Completion*, 2008, 23(3): 205-215.
- [15] FURUI K, ZHU D, HILL A D. A rigorous formation damage skin factor and reservoir inflow model for a horizontal well [J]. *SPE Production & Operations*, 2003, 18(3): 151-157.
- [16] YILDIZ T. Assessment of total skin factor in perforated wells [R]. SPE 82249, 2003.
- [17] OUYANG L, ARBABI S, AZIZ K. General wellbore flow model for horizontal, vertical, and slanted well completions [J]. *SPE Journal*, 1998, 3(2): 124-133.
- [18] WHITE F M. Fluid mechanics [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, 1986.

(编辑 李志芬)