

汽车轮毂内部缺陷的自动分割

张俊生^{1,2} 王明泉¹ 丁杰¹ 张堃¹

(中北大学信息与通信工程学院¹,太原 030051;太原工业学院电子工程系²,太原 030008)

摘要 汽车轮毂的内部缺陷需要用X射线无损探伤的方式来检测,其中X光图像上缺陷的自动分割是整个检测过程的关键。提出一种基于数学形态学重建运算的图像分割方案,选定结构元素后先对原始图像进行顶帽变换得到模板图像,再对原始图像进行顶帽重建变换得到标记图像,通过标记图像去重建模板图像,最后对重建结果进行二值化处理,得到轮毂缺陷的最终分割结果。实验结果表明,提出的技术方案切实可行,能准确提取轮毂的缺陷区域。

关键词 无损探伤 数学形态学 图像分割 图像二值化

中图法分类号 TP391.41; **文献标志码** A

轮毂作为汽车的重要构成部件,其质量的好坏直接决定了车辆行驶过程中的安全性能^[1]。目前汽车轮毂的主要生产工艺为低压铸造,融化的合金液浇铸到设计好的模具里,成型过程中受工艺参数、冷却系统等因素的影响,极易产生气孔、缩孔、缩松等内部缺陷,导致产品的质量下降^[2]。X射线无损探伤是检测轮毂内部缺陷的最佳方式,初始成型的毛坯轮毂被机电控制系统送入铅房后,分区域多次成像,实现整只轮毂的全部检测,目前已经在广大生产厂商中得到推广和应用^[3]。轮毂的X射线检测方式分为手动、半自动和全自动三种,手动检测方式是发展最早的一种,由检测人员手工全程操控轮毂的成像过程,通过人眼观察来确定产品质量是否合格。半自动检测方式提前在下位机设置好轮毂的运行流程,每个部位的成像过程无需人工干预,检测人员仅需观察该部位的X射线图像来决定产品质量。全自动检测方式在下位机设置好轮毂检测时的运行流程,上位机设置好轮毂缺陷检测的相关参数,整个检测过程无需人工干预,全部自动完成。轮毂的全自动检测方式不受检测人员主观状态的影响,

检测数据客观可靠,是目前轮毂X射线检测技术的发展方向。在轮毂的全自动检测过程中,轮毂缺陷的自动分割算法起着至关重要的作用,它直接决定了检测结果的准确程度,是整个自动检测技术中最核心的部分。

针对轮毂缺陷的自动分割问题,国内外学者提出了多种方法^[4-6]。现以数学形态学中的顶帽变换及其重建运算为核心,提出一套合理可行的技术方案,实现轮毂内部缺陷的自动分割。

1 数学形态学

数学形态学起源于20世纪60年代法国学者对过孔介质透气性的几何学研究,刚开始局限于二值图像的几何形态分析,后慢慢扩充到灰度图像和彩色图像领域,在数学意义上以集合理论、积分几何和网格代数为基础,逐渐发展成为一门强大的图像分析技术^[7]。数学形态学通过一个称为结构元素的小集合去探测图像,基本运算包括膨胀和腐蚀,在此基础上通过不同组合形成其他变换。

1.1 结构元素

数学形态学中的结构元素一般以二值矩阵的形式出现,矩阵的大小和中心分别称为结构元素的大小和中心,反映了形态学运算中涉及的像素范围及运算中心。结构元素可以有不同的形状,如常见的方形、圆形、十字交叉等,通过设置二值矩阵中取1的元素来实现。为了获得唯一的中心,结构元素的大小一般取奇数,图1为5×5大小的方形和十字形的结构元素,代表数学形态学运算时每次涉及25像素,方形结构元素25像素全部参与运算,十字形结构元素仅有水平垂直方向上的9元素参与运算。

2017年5月8日收到
国家重大科学仪器设备
开发专项(2013YQ240803)、山西省科技
攻关项目(20140321010-02,201603D121040-1)
和山西省高等学校科技创新项目(2013163)资助

第一作者简介:张俊生(1981—),博士研究生。研究方向:工业X射线无损探伤。E-mail:zhangsheng658@qq.com。

引用格式:张俊生,王明泉,丁杰,等. 汽车轮毂内部缺陷的自动分割[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(35): 268—271

Zhang Junsheng, Wang Mingquan, Ding Jie, et al. Automatic segmentation of internal defects of auto-hub[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(35): 268—271

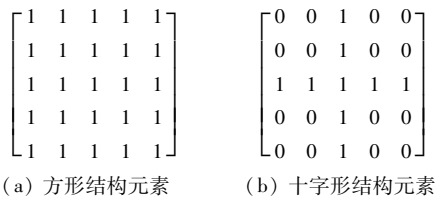


图1 结构元素

Fig. 1 Structuring elements

1.2 膨胀和腐蚀

假设待处理图像为 $f(x,y)$,结构元素为 B ,则数学形态学的膨胀定义为

$$f_d(x,y) = f(x,y) \oplus B \tag{1}$$

数学形态学的腐蚀定义为

$$f_e(x,y) = f(x,y) \ominus B \tag{2}$$

膨胀运算和腐蚀运算都是通过结构元素 B 在 $f(x,y)$ 中不断遍历来实现,每次运算时 B 的中心对应的像素灰度值由 B 中所有取1位置对应的像素灰度值来共同决定:膨胀运算取所有灰度值中的最大值,腐蚀运算取所有灰度值中的最小值。膨胀运算相当于一个局部最大值算子,每次寻找结构元素对应灰度的最大值赋给中心像素,使得图像整体变亮;腐蚀运算相当于一个局部最小值算子,每次寻找结构元素对应灰度的最小值赋给中心像素,使得图像整体变暗。

1.3 开运算和顶帽变换

数学形态学的开运算定义为

$$f_o(x,y) = f(x,y) \circ B = [f(x,y) \ominus B] \oplus B \tag{3}$$

开运算先对 $f(x,y)$ 进行腐蚀运算,再对 $f(x,y)$ 进行膨胀运算,相当于通过结构元素 B 依次进行最小值运算和最大值运算,最终结果是 $f(x,y)$ 中比 B 小的亮细节被完全去除,比 B 大的亮细节中仅被去掉了不能容纳 B 的部分,其他灰度基本不受影响。

数学形态学的顶帽变换定义为

$$f_{wTH}(x,y) = f(x,y) - f_o(x,y) \tag{4}$$

顶帽变换运算是原始图像减去其开运算,使得被开运算去除的亮细节保留了下来,不受开运算影响的其他区域相减过程中抵消,灰度接近于0。

1.4 重建变换和顶帽重建变换

数学形态学的重建变换定义为

$$f_R(x,y) = R_{f(x,y)}[m(x,y)] \tag{5}$$

式中, $f_R(x,y)$ 为重建变换结果; $f(x,y)$ 为重建变换中的模板图像; $m(x,y)$ 为重建变换中的标记图像。重建变换是一个迭代运算,使用 $m(x,y)$ 去恢复 $f(x,y)$,运算过程是首先对 $m(x,y)$ 使用 3×3 的全1方形结构元素膨胀,膨胀结果与 $f(x,y)$ 逐点相比取较小值得到的中间结果,然后中间结果再膨胀、与 $f(x,y)$ 逐点相比再取较小值得到下一个中间结果,

直到每次得到的中间结果不再变化为止。标记图像 $m(x,y)$ 一般由模板图像 $f(x,y)$ 自身的变换得到,与 $f(x,y)$ 大小相同,灰度值小于或等于对应 $f(x,y)$ 的灰度值。经过重建运算后, $m(x,y)$ 上完全消失的亮区域在 $f_R(x,y)$ 中不会恢复, $m(x,y)$ 上存在部分的亮区域 $f_R(x,y)$ 中得到恢复,其他灰度重建过程中基本不受影响。

基于标记图像 $m(x,y)$ 的不同得到方式,重建运算衍生出不同的定义。开重建的定义为

$$\gamma_R(x,y) = R_{f(x,y)}[m(x,y)] = R_{f(x,y)}[f(x,y) \ominus B] \tag{6}$$

开重建运算会恢复受腐蚀影响但没有完全消失的亮区域,不像开运算仅能恢复能容纳结构元素 B 的部分。顶帽变换重建运算的定义为

$$f_{RWTH}(x,y) = f(x,y) - \gamma_R(x,y) \tag{7}$$

顶帽变换重建运算通过相减,保留了开重建运算中没有恢复的部分。

2 实验过程与结果

汽车轮毂结构复杂,一般划分为轮心、轮辐和轮辋3部分,在进行缺陷检测的时候很容易把轮毂本身的几何特征误判为缺陷。使用数学形态学进行分割处理时,可以利用结构元素的初始定义避开轮毂的几何特征,实现缺陷的准确分析。

2.1 轮毂的X射线图像

轮毂体积巨大,在进行X射线检测时需要分区域多次成像。图2为某轮毂一条轮辐的X射线图像,在轮辐和轮辋的连接处出现了大面积的缩孔缺陷,需要把它准确提取出来。

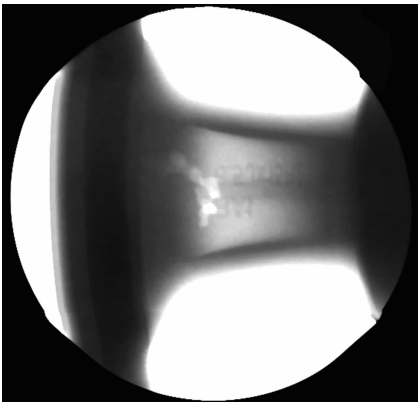


图2 轮辐的X射线图像

Fig. 2 X-ray image of spoke

2.2 轮辐图像的顶帽变换和顶帽重建

对图2进行顶帽变换,可以获得比结构元素小的亮细节。轮毂的缺陷在X射线图像上表现为亮细节,设置与缺陷大致相当的结构元素,可以初步提

取出缺陷。

使用 39×39 的方形结构元素,用式(4)对图 2 进行顶帽变换运算,得到的结果图像中大部分区域的灰度值相减过程中相互抵消,接近于 0;被开运算去掉的部分被保留了下来,灰度取值较大,如图 3(a)所示。从图 3 中可以看到,缺陷区域被完整提取了出来,但轮毂本身几何结构上不能容纳结构元素的地方,也被提取了出来,会对缺陷分割造成干扰。

使用同样的结构元素用式(7)对图 2 进行顶帽重建变换,得到的结果图像如图 3(b)所示。可以看到,顶帽重建运算去除了轮毂几何结构中不能容纳结构元素的区域,同时缺陷区域也仅保留了部分。

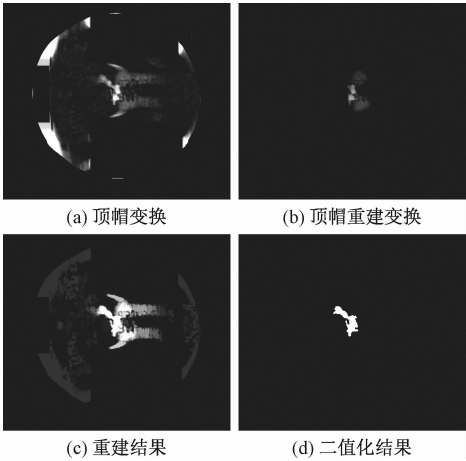


图 3 轮辐的顶帽运算
Fig. 3 Top-hat filter of spoke

以图 3(b)中的图像为标记图像,图 3(a)中的图像为模板图像,进行式(5)定义的形态学重建运算,重建结果为图 3(c)。可以看到,通过重建运算,轮毂中的缺陷区域得到了完全恢复,同时顶帽变换中产生的几何结构干扰被去除,图像中仅剩下缺陷区域和部分灰度更低的部分干扰区域。

对图 3(c)使用固定阈值法来二值化,当阈值为 12 时得到图 3(d)的结果。由于原始图像经过以顶帽重建为标记、顶帽变换为模板的形态学重建运算,复杂的背景灰度基本被去除,设定较小的固定阈值即可提取缺陷区域。

2.3 轮辐图像的缺陷分割结果

将图 3(d)中的分割结果标注在轮辐的原始图像上,如图 4 所示。从图中可以直观看到缺陷被提取了出来,实现了自动分割的目的。

对分割出来的结果可以做定量分析,如得到缺陷的面积、周长、等效直径、偏心率等几何特征,方便缺陷的类型识别和等级判定,如表 1 所示。

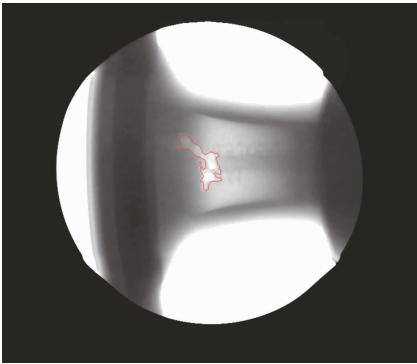


图 4 轮辐分割结果的标注
Fig. 4 Label of spoke segmentation result

表 1 轮辐缺陷的定量分析
Table 1 Quantitative analysis of spoke defect

缺陷面积/ 像素	缺陷周长/ 像素	等效直径/ 像素	偏心率/ %
2517	393	56	90.24

3 结论

汽车轮毂结构复杂,X 射线图像背景复杂,很难直接将缺陷区域提取出来。数学形态学通过结构元素去分析图像,通过定义合适的结构元素,使用顶帽变换可以提取轮毂的内部缺陷,但同时不可避免地包含了轮毂本身的部分几何结构,使用顶帽重建变换只能提取缺陷中灰度最亮的部分,但不包含轮毂本身的几何结构。以顶帽重建变换的结果为标记,去重建顶帽变换的结果图像,重建结果中既包含了全部缺陷,又去除了轮毂本身的几何结构,再经过简单的二值化方法就能实现轮毂内部缺陷的自动分割。

参 考 文 献

1 李 伟,何顺荣,李 丹. 浅谈铝合金轮毂生产技术的发展现状. 中国铸造装备与技术, 2015; 297(3):1—5
Li Wei, He Shunrong, Li Dan. Development status of aluminum alloy auto wheel production. China Foundry Machinery & Technology, 2015; 297(3):1—5
2 贾晓飞,王志峰,赵维民,等. 低压铸造铝合金轮毂内部缺陷分析及改进措施研究. 铸造, 2010; 59(12):1298—1302
Jia Xiaofei, Wang Zhifeng, Zhao Weimin, et al. Defects analysis and prevention measures of low pressure die casting of A356 aluminum alloy wheels. Foundry, 2010; 59(12):1298—1302
3 吕金旗. 低压铸造轮毂缺陷 X 射线检测系统的原理及应用. 特种铸造及有色合金, 2013; 33(2):155—156
Lü Jinqi. Application of X-ray NDT in casting aluminum alloy wheel. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013; 33(2):155—156
4 何再兴,张树有,黄长林. 基于缺陷特征与种子填充的轮毂缺陷检测方法. 浙江大学学报(工学版), 2009; 43(7):1230—1237

He Zaixing, Zhang Shuyou, Huang Changlin. Approach to detecting defects in wheels based on flaws characteristics and seed region growing method. Journal of Zhejiang University (Engineering Science). 2009; 43(7):1230—1237

5 谈绍熙,黄茜. 一种在铸件缺陷识别中的区域形分割方法. 中国图形图像学报, 2008; 13(5):918—923

Tan Shaoxi, Huang Qian. A fractal based region segmentation method and its application in casting defect recognition. Journal of Image and Graphics, 2008; 13(5):918—923

6 李高亮. 基于 X 射线图像的汽车轮毂缺陷自动检测与识别技术研究. 太原: 中北大学, 2013

Li Gaoliang. Research on automatic detection and recognition technology of automobile hub defect based on X-ray images. Taiyuan: North University of China, 2013

7 Soille P. 形态学图像分析原理与应用. 2 版. 王小鹏, 等译. 北京: 清华大学出版社, 2008

Soille P. Morphological image analysis: principles and applications. 2nd ed. Wang XiaoPeng, Trans. Beijing: Tsinghua University press, 2008:1—3

Automatic Segmentation of Internal Defects of Auto-hub

ZHANG Jun-sheng^{1,2}, WANG Ming-quan¹, DING Jie¹, ZHANG Kun¹

(School of Information and Communication Engineering, North University of China¹, Taiyuan 030051, P. R. China;
Department of Electronic engineering, Taiyuan Institute of Technology², Taiyuan 030008, P. R. China)

[**Abstract**] The internal defects of wheel hub need to be detected by X-ray non-destructive testing technology, and the automatic segmentation of defects on the X-ray image is the key to the whole testing process. A new image segmentation method based on mathematical morphological reconstruction is proposed using selected structural elements. The original image is transformed into mask image by top-hat firstly, and then transformed into marker image by top-hat reconstruction. The mask image is reconstructed by the marker image and processed by binarization to obtain the final segmentation results. Experimental results show that the proposed scheme is feasible and can extract the defect area of the wheel hub accurately.

[**Key words**] non-destructive test image segmentation mathematical morphology image binary