

# 轮毂表面自动探伤系统设计

崔 坚, 汤 进, 罗 斌

(安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039)

**摘 要:**综合运用图像处理中的边缘检测、形态学处理、频域滤波、最优阈值分割等基本方法,在 VC++ 6.0 环境下,实现了轮毂表面在线自动探伤系统。该系统能有效地抑制背景光照不均和刀纹、水渍、油渍等干扰的不利影响,较好地实现了对裂纹特征的检测。实验表明,系统所采用的方法具有运算速度快、误判漏判率低、满足在线检测需求的特点。

**关键词:**磁粉探伤;边缘检测;形态学;频域滤波;阈值分割;裂纹

**中图分类号:**TP391.41

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2007)04-0214-04

## Design of On-line Automatic Flaw Inspection System of Nave Surface

CUI Jian, TANG Jin, LUO Bin

(Ministry of Education Key Lab. of Intelligent Computing and Signal Processing,  
Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** In this paper, based on the algorithms of edge detection, morphological operation, frequency domain filtering and optimal threshold segmentation, have constructed an on-line automatic flaw inspection system of the train nave surface by using VC++ programming language. The system works well for effectively restraining background asymmetric illumination, blade lines, water spots, oil stains, etc, while getting satisfying results of crack detection. The experiments indicate that the proposed method in the system is computationally efficient, has low flaw missing rate and false alarm rate, and meets the need of on-line flaw inspection.

**Key words:** magnetic particle flaw inspection; edge detection; morphology; frequency domain filtering; threshold segmentation; crack

### 0 引 言

目前,对于金属工件表面的裂纹或其他缺陷的检测,主要采用目视、超声波探伤、电涡流法、表面磁粉探伤、表面着色渗透探伤及接触电位差法<sup>[1]</sup>等。磁粉探伤是铁磁性材料表面及近表面缺陷检测的有效方法,由于其具有缺陷直观、灵敏度高、检测速度快、成本低等优点<sup>[2]</sup>,而被广泛用于金属工件的表面探伤中。但在传统的磁粉探伤中,检测结果主要还是依靠人眼进行判别,存在工作效率低、工作环境恶劣特别是易漏检等问题。

火车轮毂是车辆行驶中直接承受载荷与钢轨冲击的重要部分,在行驶中同时受到热应力、冲击力、压应力与摩擦力的作用,容易产生疲劳裂纹。车轮轮毂裂纹如不及时被发现,就很有可能引发严重的交通事故。

因此在出厂前对车轮轮毂表面进行裂纹的检测是十分必要和重要的。目前,数字图像处理技术已被广泛用于金属表面缺陷的检测之中,现有的检测方法是使用自适应阈值分割和条件跟踪<sup>[3,4]</sup>等,但这些方法对于噪声严重的图像,无法很好地将背景和目标区分开来。针对以上种种现状,文中提出了一套采用先进的成像和采集系统,并利用数字图像处理和模式识别中相关技术,在 VC++ 6.0 环境下实现了对轮毂表面缺陷进行在线自动探伤的系统。

### 1 系统的组成及工作原理

本系统主要由紫外光源、CCD 摄像头、图像采集卡(板卡)、监控计算机等组成,如图 1 所示。磁粉探伤中,工件被磁化并烧淋磁悬液后,在裂纹处的漏磁场,带有荧光物质的磁粉在紫外灯的照射下呈绿色。利用 CCD 摄像系统将磁痕图像采集后送给计算机进行处理和识别。主要工作是:图像预处理和目标(裂纹)识别。本系统即用高像素的 CCD 摄像机获取较清晰的原始视频信号,经高速图像采集卡实时处理转换为数字图像(帧图像),再送给计算机进行相应图像处理,能

收稿日期:2006-06-02

基金项目:安徽省人才开发基金(2001Z021);安徽大学 211 工程  
学术创新团队项目

作者简介:崔 坚(1982-),男,安徽黄山人,硕士研究生,研究方向为数字图像处理;罗 斌,教授,博士生导师,研究方向为图像处理与模式识别。

很好地将目标信号分割出来,使缺陷更加明显,当检测到缺陷时及时给出警报,并在电脑的磁盘里做好记录,从而完成视频信号采集、图像预处理、特征提取直至输出报警的功能,实现了轮毂表面的在线探伤。

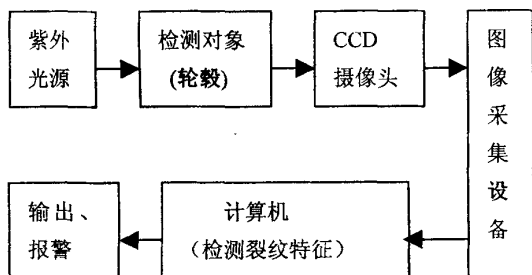


图1 系统原理框架图

## 2 算法设计

图2为一幅轮毂表面的原始图像。可以看出图像上除刀纹(生产过程所留下)和背景亮度不均匀(光照不均匀)外,还存在着采集系统引起的噪声以及油渍、水渍等,而检测目标(裂纹,图中已圈出)相对并不明显。因此,对轮毂磁痕图像的处理和目标的提取并不是一个简单的过程。本系统兼顾运行速度和检测精度,结合使用阈值分割和边缘检测,并综合频域滤波、形态学处理等方法。能够达到目标提取的精度和速度等要求。

文中的方法是首先利用 Sobel 算子检测图像边缘(双边缘),再用形态学中的二值膨胀、腐蚀、细化算法消除双边缘,作为第一步处理结果;对原图进行频域滤波,再用最优阈值分割得到第二步处理结果;然后把二者做点乘,最后用文献[3]中的模板对图像进行消噪,得到最终的检测结果。

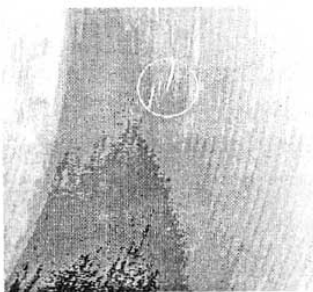


图2 原始图像

### 2.1 Sobel 边缘检测

Prewitt 和 Sobel 算子是在实践中计算数字梯度时最常用的,Prewitt 模板实现起来比 Sobel 模板更为简单,但后者在噪声抑制特性方面略胜一筹。兼顾运行速度与检测效果,这里采用了 Sobel 算子。

### 2.2 形态学膨胀、腐蚀与细化

针对检测得到的双边缘的问题,使用形态学的二值膨胀,以消除双边之间的间隙。为了保持目标原来的尺寸又对膨胀后的目标做腐蚀,膨胀和腐蚀<sup>[5]</sup>是形态学的最基本运算。膨胀和腐蚀的定义是和集合及集合的运算密切相关的。膨胀的运算定义式为: $A \oplus B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\}$ ,表示图像 A 被结构元素 B 膨胀,膨胀的结果与结构元素 B 的选取有关。本算法中使用线形结构元素<sup>[6]</sup>对边缘检测结果进行膨胀,消除了双边缘。腐蚀的运算定义式为: $A \ominus B = \{z \in \Omega \mid B^z \subseteq A\}$ ,其中  $\Omega$  为二维欧几里得空间,图像 A 和结构元素 B 均为  $\Omega$  的子集, $B^z$  是 B 被 z 平移的结果。最后用形态学细化算法<sup>[7]</sup>对结果细化,使得边缘在宽度上更接近原始目标。

### 2.3 频域滤波

从原始图片中看出轮毂在生产过程中留下了刀纹,及由于光照引起的大片白色亮斑。针对该问题,文中采用频域滤波中的二维离散傅里叶变换与反变换处理<sup>[8]</sup>。离散傅里叶变换的输入输出都是离散值。设原始图像函数为  $f(m, n)$ ,其二维离散傅里叶变换定义为:

$$F(p, q) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) e^{-j(2\pi/M)pm} e^{-j(2\pi/N)qn}$$

式中,  $p = 0, 1, \dots, M-1$ ;  $q = 0, 1, \dots, N-1$ ;  $F(p, q)$  为  $f(m, n)$  的离散傅里叶变换系数。

离散傅里叶反变换定义为:

$$f(m, n) = \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} F(p, q) e^{j(2\pi/M)pm} e^{j(2\pi/N)qn}$$

式中,  $m = 0, 1, \dots, M-1$ ,  $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。

通过二维离散傅里叶变换,得到原始图像的傅里叶频谱。在频域,使用高通滤波和带阻滤波,分别去除对应于白斑的低频分量和对应于刀纹的部分高频分量。再通过傅里叶反变换回到时域。为了提高运算速度,应用二维快速傅里叶变换及其反变换来实现。

### 2.4 最优阈值分割

最优阈值分割就是将图像的直方图用两个或多个正态分布的概率密度函数来近似,阈值取为最小概率处的灰度值,这样被错误分割的像素数目最小。

最优阈值算法步骤<sup>[9]</sup>:

①假设没有有关物体确切位置的知识,作为第一步近似,考虑图像四角含有背景像素而其他部分含有物体像素。

②在第  $t$  步,分别计算背景和物体的灰度均值  $\mu_B^t$  和  $\mu_o^t$ ,其中在第  $t$  步将图像分割为背景和物体的阈值是  $T^t$ ,它是前一步确定的:

$$\mu'_B = \frac{\sum_{(i,j) \in \text{background}} f(i,j)}{\# \text{background\_pixels}}, \mu'_{\text{obj}} = \frac{\sum_{(i,j) \in \text{objects}} f(i,j)}{\# \text{objects\_pixels}}$$

③ 设  $T^{r+1} = \frac{\mu'_B + \mu'_{\text{obj}}}{2}$ ,  $T^{r+1}$  提供一个更新了的背景与物体的区分。

④ 如果  $T^{r+1} = T^r$ , 则停止; 否则返回第 2 步。

### 3 实验结果

将工件磁化后, 磁力线在有缺陷的工件表面发生变化, 部分磁力线逸出工件表面, 在缺陷处形成磁极, 从而形成漏磁场, 漏磁场对磁粉具有吸附作用。当在工件表面喷洒磁悬液时, 磁粉被吸附在漏磁场处, 形成缺陷显示——磁痕, 显示出缺陷的形状和大小, 达到检验缺陷的目的。

Sobel 算子能清楚地提取目标的边缘, 有效地抑制背景光照不均的影响。但目标边缘中有双边缘, 形态学处理填补了双边缘之间的间隙, 得到了清楚连续的目标, 但仍留下部分刀纹和亮斑边缘 (如图 3a 所示), 尚不符合最终检测要求。

将原始图像做二维离散傅里叶变换, 并将频谱中心移到矩阵中心。由于刀纹的规则性和周期性, 刀纹的频率分量分布在以矩阵中心为圆心, 宽度狭窄的一段环形弧内 (设其内半径为  $R_1$ , 外半径为  $R_2$ ), 白斑则分布在以矩阵中心为圆心, 半径为  $R$  的圆内。在频域中去除对应于大片亮斑和部分刀纹的频率分量, 反复实验, 当  $R$  取 10,  $R_1$  取 54,  $R_2$  取 56 时, 效果最佳。之后做二维离散傅里叶反变换。可见大片亮斑基本消除, 刀纹变得较不明显, 背景变暗, 突出了裂纹 (如图 3b 所示)。

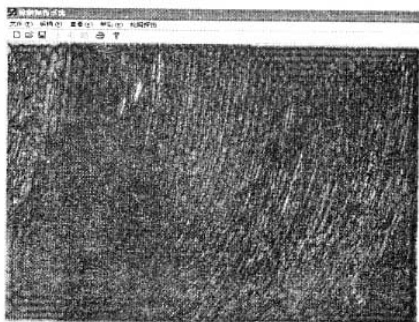
用最优阈值分割法对离散傅里叶变换处理后的图 3b 进行分割, 可以得到均匀连续的裂纹形状 (如图 3c 所示), 该结果相对于图 3b, 背景上刀纹明显减少, 留有一些噪点。比较图 3a 与图 3c, 可以看出两种方法各有优缺点: 图 3a 虽留有大量刀纹边缘, 但其余背景干净, 噪点少; 图 3c 虽很好地抑制了刀纹的影响, 但残留较多的噪点, 所以为了将背景中多余刀纹线条和噪点数降到最小, 采用一个互补的方法, 即将边缘提取和形态学处理后的结果与经频域滤波和阈值分割后的结果相点乘, 得到更加完善的结果 (如图 3d 所示)。可见, 将两图做点乘运算, 既保留了较连续均匀的目标边缘, 又使背景的噪声的大小和数目降到最小。

然后, 用文献[3]中的方法消除图像上残留的噪声点, 得到如图 3e 所示的最终结果。即用  $N \times N$  的模板自上而下、自左而右在图像上移动, 计算该模板区域内的白色像素点个数, 并确定阈值  $Th$ 。若像素点个数小于  $Th$ , 则认为该区域内的像素点是噪声, 予以清除;

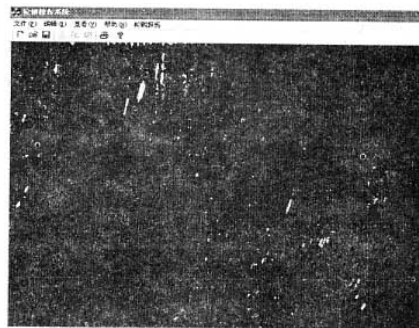
反之认为是有用信息予以保留。实验得到: 当  $N$  取 50,  $Th$  取 90 时, 在保留目标的同时滤除了多余的噪声。最后, 可以根据处理结果实现系统的自动报警, 当处理结果中存在缺陷时, 系统发出警报, 同时在磁盘里做下记



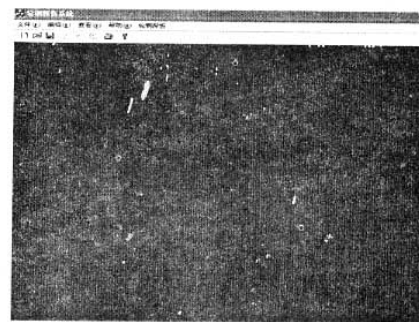
(a) 边缘提取经形态学处理结果



(b) 频域滤波结果



(c) 最优阈值分割结果



(d) 点乘的结果



(e) 模板去噪结果

图3 用各种方法进行实验的结果

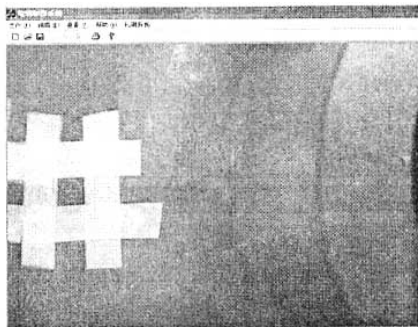


图4 现场图

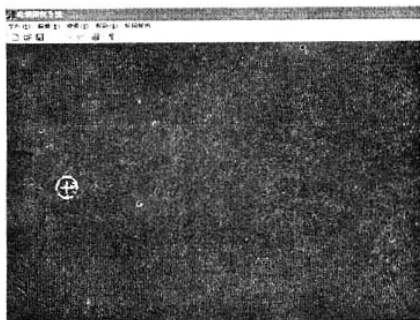


图5 检测结果

录;反之,轮毂顺利通过生产线。图4,图5分别为现场图与检测结果。

#### 4 结束语

本系统完成了从图像采集到图像处理、特征提取,直至输出报警的功能,不仅在实验中取得了良好的效果,也在现场的测试中很好地完成了各项功能,满足了在线检测的精度和速度方面的要求,系统具有一定的推广价值。

#### 参考文献:

- [1] 吴并臻,王俊然,铃木昭.接触电位差法固定探头式金属表面探伤装置[J].北京科技大学学报,1998,20(2):164-168.
- [2] 周 军,李新昊.荧光磁粉自动无损检测系统[J].工矿自动化,2005(1):15-16.
- [3] 周 军,彭培欣.自动磁粉探伤系统中的图像技术[J].仪器仪表学报,2003(8):461-462.
- [4] 刘 磊,刘秀兰,俞 序.全自动荧光磁粉检测系统研究[J].机械工程与自动化,2004(6):12-14.
- [5] Wilson S S. Theory of Matrix Morphology[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,1992,14(6):636-652.
- [6] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital Image Processing Using MATLAB[M]. [s.l.]: Prentice Hall,2004:337-345.
- [7] Shih F Y, Mitchell O R. Industrial Parts Recognition and Inspection by Image Morphology[C]//IEEE International Conference. [s.l.]:[s.n.],1988:1764-1766.
- [8] 胡广书.数字信号处理——理论、算法与实现[M].第2版.北京:清华大学出版社,2003:150-155.
- [9] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision[M]. Second Edition. United States of America: Thomson Learning and PT Press,2003:128-130.

(上接第213页)

出图像质量。该算法适用于对图像缩放的质量与处理速度都要求较高的应用场合。

#### 参考文献:

- [1] 冈萨雷斯,伍 兹.数字图像处理[M].北京:电子工业出版社,2003:50-51.
- [2] 杨朝霞,逯 峰,关履泰.用B样条的尺度关系来实现图像任意精度的放大缩小[J].计算机辅助设计与图形学学报,2001,13(9):824-827.
- [3] Lehmann T M, Gonner C, Spitzer K. Addendum: B-spline interpolation in medical image processing[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging,2001,20(7):660-665.
- [4] DeRose T D, Barsky B A. Geometric continuity, shape parameters, and geometric constructions for Catmull-Rom splines[J]. ACM Transactions on Graphics,1988,7(1):1-41.
- [5] Singh G, Sharma A C. Geometrically Continuous Curve and Surface Generation Using Catmull-Rom Splines[C]//IEEE Region 10 International Conference on EC3-Energy, Computer, Communication and Control Systems. New Delhi, India: bezit TU/e Publication,1991:28-32.
- [6] Dodgson N A. Quadratic interpolation for image resampling[J]. IEEE Transactions on Image Processing,1997,6(9):1322-1326.