

DOI: 10.13957/j.cnki.tcx.2019.05.020

铁氧体湿压磁材缺陷检测方法的研究

梁 栋, 顾杰宁, 丁 力, 张 陈

(江苏理工学院 机械工程学院, 江苏 常州 213001)

摘要:为实现自动检测铁氧体湿压磁瓦外观缺陷,设计一种基于机器视觉的铁氧体湿压磁体外观检测设备。首先介绍系统结构和电气控制部分,接着根据铁氧体湿压磁体表面裂纹噪点多特点,采用多尺度灰度变换增强特征域对比度,并采用快速离散傅里叶变换准确定位缺陷位置,最后利用硬阈值分割图像,并比较灰度形态滤波和软形态混合滤波准确度。实验表明,软形态混合滤波更适用于多纹理的氧体湿压材料缺陷识别。

关键词:铁氧体湿压磁体;多尺度灰度变化;离散傅里叶变换;软形态混合滤波

中图分类号:TQ174.6

文献标志码:A

文章编号:1000-2278(2019)05-0675-06

Defect Detection Method for Wet-pressed Ferrite Magnets

LIANG Dong, Gu Jiening, DING Li, ZHANG Chen

(College of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, Jiangsu, China)

Abstract: A machine vision-based appearance detection system is proposed for automatically detecting the appearance defects of wet-pressed ferrite magnets. Firstly, the system structure and electrical control part are introduced. Then, according to the characteristics of crack noise on the surface of wet-pressed ferrite magnets, multi-scale gray transform is used to enhance the contrast of feature domain, and fast discrete Fourier transform is used to locate the defect accurately. Finally, the image is segmented by hard threshold, and the accuracies of gray morphological filtering and soft morphological hybrid filtering are compared. Experiments show that the soft morphological hybrid filter is more suitable for multi-texture defect recognition of wet-pressed ferrite magnets.

Key words: wet-pressed ferrite magnet; multiscale gray level change; discrete Fourier transform; soft morphological hybrid filter

0 引言

永磁铁氧体湿压磁体材料是磁材行业中重要的一类产品,也是永磁铁氧体行业中市场前景最好,发展空间最大的功能材料广泛应用于汽车,移动电话,家电等领域,也可作为永磁直流电机的核心功能部件,其在性能和尺寸公差上都有很严格的产品一致性。目前,国内各主要磁片生产商普遍采用明场 45 度光人工观察法,判断磁片材料上的裂纹,脱角,凹坑等,其检测劳动强度大,主观性意识强,检测效率低,漏检较大,国外,如日本 TDK,韩国 SK 等公司已经投入大量人力物力开发立方体形磁片自动检测设备,并取得

成效,但对于磁片表面划伤缺陷的研发检测设备很少。国内一些磁片大户,如横店东磁集团,江粉磁材集团也开始研制这种表检设备,但至今无正式推广设备,面对日益增长的磁片需求,急需研制自动化检测设备,代替人工检测,并提高检测效率和准确率。

基于机器视觉的永磁铁氧体湿压检测系统涉及多学科领域,包括数字图像处理技术,光学成像技术,机电一体化控制技术,数字信号采集与处理技术,机械设计等,为实现磁体材料的六面检测,系统采用多相机结构,具有检测效率高,稳定性好的特点,根据每批次产品差异(CPK>1.3),其综合检测效率可达 2 片/秒,远远超过人

收稿日期:2019-05-12。

修订日期:2019-06-25。

基金项目:江苏省基础研究计划项目(BK20170135)。

通信联系人:梁栋(1989-),男,硕士,助理实验师。

Received date: 2019-05-12.

Revised date: 2019-06-25.

Correspondent author: LIANG dong(1989-), male, master assistant engineer.

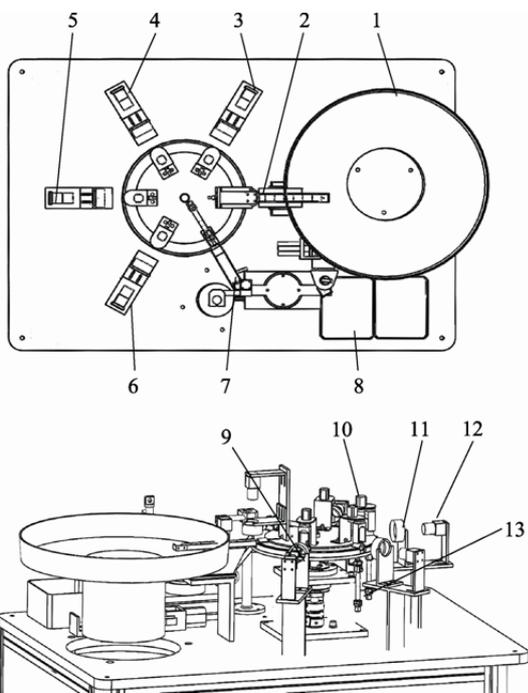
E-mail: 709170090@qq.com

工检测效率。

1 系统硬件设计

1.1 机械结构设计

基于机器视觉的永磁铁氧体湿压检测系统采用振动盘排料，多工位圆盘取料结构设计，系统三维结构图如图 1 所示，若干磁体片被倒入振动盘，通过振动力和分选，磁体被推进第一检测工位。为实现磁体的上下面和外侧弧面的缺陷分析，系统采用回转工作台的方式检测，利用六组 Basler ace2 130WG 工业级 CCD 面阵相机均布在回转工作台外侧采集表面图像。采用三菱 MR-J3 伺服电机加双杆气缸的组合方式，既保证的磁体在各检测方位上的分度精度也避免了转盘产生震动对采集图像的影响。



1. Vibration plate 2. The first test station 3. The second test station 4. The third test station 5. The fourth test station 6. The fifth test station 7. The sixth test station 8. Magnetic tile collecting disc 9. Rotary table 10. Stepper motor 11. Light source 12. CCD 13. Single rod

图 1 检测系统三维结构图

Fig.1 The 3d structure of the testing system

1.2 电气系统设计

基于机器视觉的永磁铁氧体湿压检测系统采用工业电脑研华 IPC-610，三菱 JE-400W 伺服电机，步进电机，数据采集卡和相机的方案，其中工业电脑是检测系统的核心，负责图像数据处理和下位机通信；伺服电机负责控制回转工作台的

定位，步进电机负责磁体侧面检测，数据采集卡负责与各传感器的采集通信，其检测系统硬件布置图如图 2 所示。

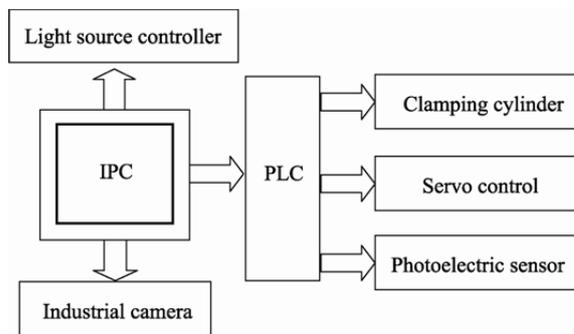
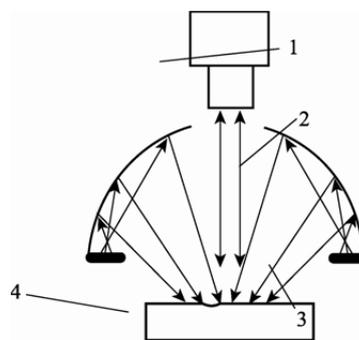


图 2 检测系统硬件布置图

Fig.2 Testing system hardware layout diagram

1.3 光源结构设计

铁氧体磁材表面未经打磨时，其纹理和细小裂纹比较相似，用普通结构光难以区分缺陷和纹理。通过多样品的对比发现，纹理的边缘有一定的方向性，呈凸起状；缺陷边缘呈无序性且有凹陷特征。经过多次试验发现，半球形积分光，如图 3 所示，具有朗博特性，并能 360 度反射光线叠加效果，将缺陷边界全部打亮，形成封闭的区域。



1. CCD 2. Diffuse reflector 3. LED 4. Defect surface

图 3 检测系统光源示意图

Fig.3 The light source illustration of the testing system

2 系统软件设计

2.1 图像处理算子流程

通过数字相机 CCD 采集到图像后，利用 Halcon 视觉处理工具对磁体表面裂纹，凹坑，划痕等缺陷识别，其算法处理流程为：读取图像，灰度转换，图像时频转换，频域卷积运算，图像频时转换，图像形态学计算。首先将相机采集到的图像灰度变换，图像的灰度变换处理是图像增

强处理技术中的一种非常基础、直接的空间域图像处理方法，其目的是为了改善画质，使图像的显示效果更加清晰^[1]。其次对图像进行时频转换，由于铁氧体湿压磁体表面缺陷的特征与背景相差并不明显，采用快速傅里叶变换，将离散的时域信号变换到频域分析，并在频域使用 3×3 的卷积核(算子)与其进行卷积运算凸显磁体缺陷特征，再其次利用傅里叶逆变换转换到时域，最后利用灰度形态学找到期望区域特征。

2.2 多尺度灰度转换

图像灰度变换是指根据某种目标条件按一定变换关系逐点改变源图像中每一个像素灰度值的方法^[2]。传统的灰度变换无法有效拉大原始图像的明暗对比，导致不能有效增强计算后的对比度，这样图像特征有效信息较少。多尺度分析源于计算机视觉中人眼感知的模拟，基本方法是用由小到大的尺度对图像进行累进滤波^[3]。本文利用梯度域递归双边滤波算子来增强图像的对比度。

图像可看做二维离散信号，图 4 所示的原图高 680pix，宽 480pix 个矩阵组成，对于一维离散信号可通过一阶递归滤波因子计算非保边缘滤波，表示为

$$L_i = (1-a)x_i + ax_{i-1} \quad (1)$$

其中， $a \in [0,1]$ 为反馈系数， L_i 滤波后的结果。将梯度域保特征权以一维形式引入公式(1)，则保边缘的递归双边缘滤波算子表示为

$$L_i = (1 - R_{i,i-1}a)x_i + R_{i,i-1}ax_{i-1} \quad (2)$$

其中， $R_{i,i-1} = \exp(-\frac{|x_i - x_{i-1}|}{2\sigma_r^2})$ 为一维线性梯度保特征权， $\sigma_r \in [0,1]$ 为范围参数。

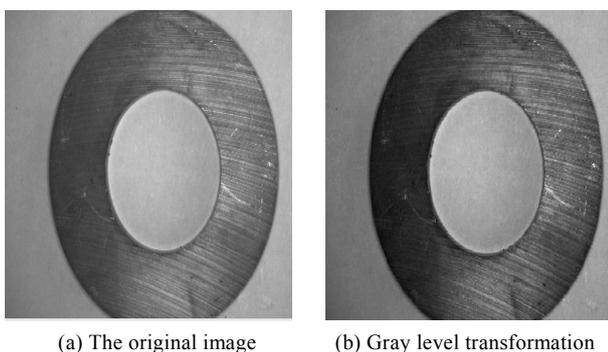


图 4 多尺度灰度转换

Fig.4 Multiscale gray level conversion

公式 2 的响应取决之前的输入参数 $R_{i,i-1}$ ，所以它是非对称的，即对一维信号，要从上到下执行公式 2，在左到右执行公式 2。对于一幅图像信

号来说，需要对行列两个方向执行滤波算子，滤波后的结果称为分解层。若对输入图像进行多次累进滤波，可解出多尺度分解层 $I_i(i=1, \dots, k)$ 。为了有效分图像的细节部分，这里的参数 $R_{i,i+1}$ 不能设置统一值^[4-6]。最后利用 $I_e = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k I_i$ 可重构出增强后的图像 I_e 。图 4 中的 b 图增强了特征区域的信息量。

2.3 快速傅里叶变换

在数字图像中，一张图片可以看成是二维离散的时域信号，为便于分析磁片表面裂纹，将其转换到频域信号^[7]。图像的频域是表征图像中灰度变化剧烈程度的指标，也就是图像灰度的变化速度，也就是图像的梯度大小。图像中的低频部分指梯度低的点，高频部分相反^[7]。即梯度大则该点的亮度强，否则该点亮度弱。观察频谱图我们就可以直观地看出图像的能量分布：如果频谱图中暗的点数更多，那么实际图像是比较柔和(即梯度相对较小)，反之，如果频谱图中亮的点数多，那么实际图像一定是尖锐的、边界分明且图像中像素差异较大的。也就是说，傅立叶变换提供另外一个角度来观察图像，可以将图像从灰度分布转化到频率分布上来观察图像的特征。假设图像的大小为 $M \times N$ ，则其离散的傅里叶变换公式为：

$$F(u,v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x,y) e^{-f2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (3)$$

式中 u, v 分别为图像像素 x, y 方向上频率，频域系统是由空间域 $f(x,y)$ 所张成的坐标系，其转换后的效果如图 5 所示。

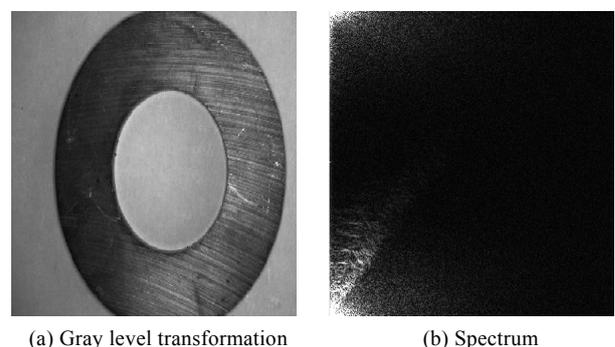


图 5 图像快速傅里叶变换

Fig. 5 Fast Fourier image transform

2.4 卷积计算

通过 DFT 计算，图像信息从空间域转换频率域，利用卷积运算可使目标与背景之间的差值变

得更大, 便于后期特征量提取^[8]。卷积运算是指从图像的左上角开始, 找一个与模板同样大小的活动窗口, 窗口图像与模板像元对应起来相乘再相加, 并用计算结果代替窗口中心的像元亮度值。以此类推, 从左到右、从上到下, 即可得到一幅新图像。其具体步骤如下:

(1) 设计模板图像, 本文选用巴特沃斯高通滤波器, 高通滤波是对低频信号有抑制作用, 得以体现图像中的高频成分, 这个过程是图像锐化的过程。其目的是突出图像的边缘信息, 加强图像的轮廓特征。 N 阶具有 D_0 截止频率的巴特沃斯高通滤波器的传递函数为:

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + [D_0 / D(u,v)]^{2n}} \quad (4)$$

这里分别选用 $n1=3.0$, $n2=8.0$ 的高斯滤波器的差集作为模板, 那么图 6-c 等于 $n1-n2$ 如图 6 所示的;

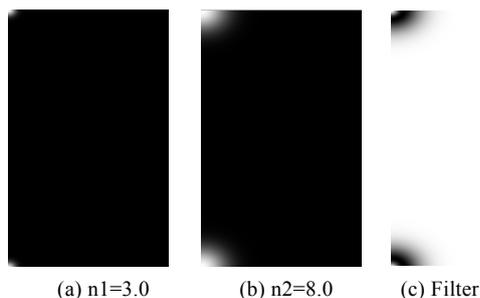


图 6 高斯滤波器
Fig. 6 Gaussian filter

(2) 确定模板在原图的移动方向, 采用从左往右, 从下往上遍历原图;

(3) 设 $f(x, y)$ 为原图像素函数, $h(k, l)$ 为滤波器核, 利用公式(5), 则得输出图像 $g(x, y)$, 如图 7-a 所示:

$$g(i, j) = \sum_{k,l} f(i+k, j+l)h(k, l) \quad (5)$$

经过卷积计算后, 可直观地看出图像的能量分布: 若频谱图中暗点数更多, 即图像是比较柔和。反之, 如果频谱图中亮点数多, 那么原图一定是尖锐的、边界分明且边界两边像素差异较大的^[9,10]。图中可见明暗相接部分, 表示图上某一点与邻域点差异较大, 即梯度的大小, 也即该点的频率的大小。一般来讲, 梯度大则该点的亮度强, 否则该点亮度弱。但频谱图不便于量化, 为便于分析缺陷特征, 利用 IDFT 变换, 将图像信号转换时域分析, 如图 7-b 所示。

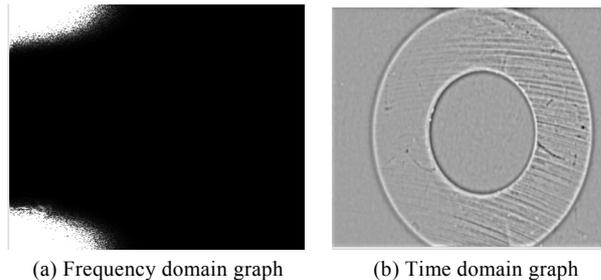


图 7 离散傅里叶逆变换
Fig. 7 Inverse Discrete Fourier Transform

2.5 灰度数字形态学分析

图像形态学是基于数学形态学的集合论, 因此具有完备的数学基础, 图像形态学运算是由一组形态学的代数运算符组成, 其基本思想是用具有一定形态的结构元素找到图像中的对应形状以达到图像分割识别的目的^[11-12], 基本的操作有膨胀、腐蚀、开运算和闭运算。设输入图像为 $f(x, y)$, 结构元素为 $b(x, y)$, 则用结构元素 b 对输入图像 f 灰度膨胀记为 $f \oplus b$, 定义为

$$(f \oplus b)(s, t) = \max\{f(x, y) + b(s - x, t - y) \mid (x, y) \in D_f \ \& \ [(s - x), (t - y)] \in D_b\} \quad (6)$$

其中, D_f 和 D_b 分别是 f 和 b 的定义域, $(s-x)$ 和 $(t-y)$ 在 b 的定义域中。膨胀灰度图像的结果是, 比背景亮的区域得到扩大, 比背景暗的区域受到压缩。则用结构元素 b 对输入图像 f 灰度腐蚀记为 $f \ominus b$, 定义为

$$(f \ominus b)(s, t) = \min\{f(x, y) - b(s + x, t + y) \mid (x, y) \in D_f \ \& \ [(s + x), (t + y)] \in D_b\} \quad (7)$$

其中, D_f 和 D_b 分别是 f 和 b 的定义域, $(s+x)$ 和 $(t+y)$ 在 b 的定义域中。腐蚀灰度图像的结果是, 比背景暗的区域得到扩大, 比背景亮的区域受到压缩。

因铁氧体湿压磁体材料的特性, 磁体外表面没有打磨, 经时频转换后特征域信号如图 7-b 所示, 纹理特征较明显, 干扰缺陷的检测, 并影响设备的检测精度, 本文采用软形态滤波器, 它对性噪声比较不敏感, 对需要滤波目标的形状变换敏感。其算法流程如图 8 所示。将标准形态学中的结构元素 b 用结构系统 $[B, C, r]$ 代替。 B 为结构集合, C 为集合硬中心, 即 $B-C$ 为软轮廓, r 是中心的阶数。

用结构系统 $[B, C, r]$ 在 $f(x, y)$ 任意位置上移动进行软膨胀软腐蚀操作, 并根据移动后的集合构成复合集。其中硬中心 C 要重复执行 r 次, 软膨胀取复合集中第 r 个最大值, 软腐蚀取复合集中第 r 个最小值。

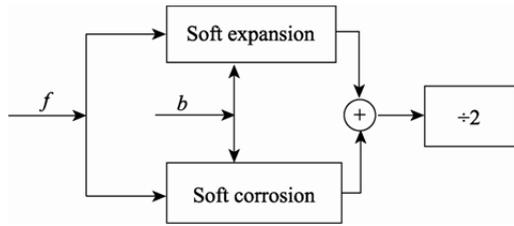


图 8 软膨胀和软腐蚀结合的混合滤波器
Fig.8 Hybrid filter combining soft expansion and soft corrosion

3 实验结果与分析

时域图进行二值化后使用区域的几何特征筛除裂纹区域，并统计区域像素如表 1 所示。几何特征筛选后图片中的区域大大减少，缩短了匹配缺陷算法处理时间。

表 1 铁氧体湿压磁体几何特征筛选像素统计表

Tab.1 Pixel statistical table for geometric feature screening of ferrite wet pressure magnets

Picture number	Pixel size of original image	Pixel size of binarization	Screened pixel Size	Percentage after screening
Fig.8-a	326400	301500	31140	10.3%
Fig.8-b	326400	229264	38900	16.9%
Fig.8-c	326400	219264	24150	11.1%
Fig.8-d	326400	219264	24150	11.1%

对图像采用硬阈值分割后，铁氧体磁瓦表面的纹理也被分割出来，本文采用灰度形态学滤波和软形态学混合滤波比较算法准确度，从图 9 观

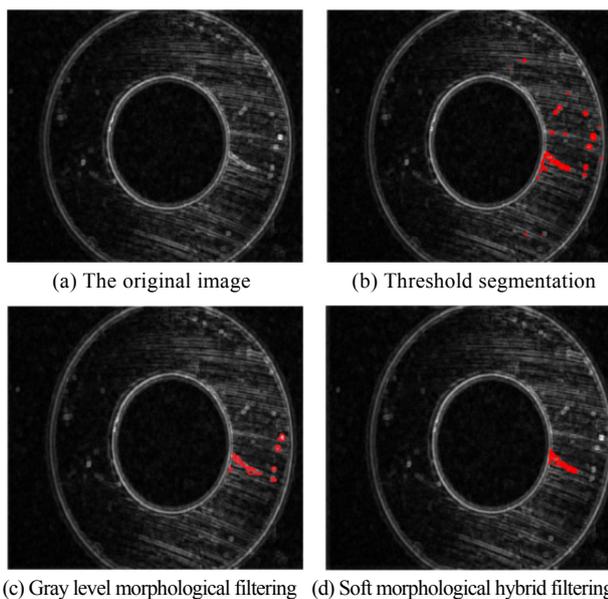


图 9 算法测试分析
Fig.9 Test and analysis of algorithms

察中发现，灰度形态学滤波不能完全去除纹路的干扰，软形态学混合滤波可以适应铁氧体磁体这类多纹理特体缺陷分析。

4 结 论

本文根据永磁铁氧体湿压磁体材料表面裂纹不易提取的特点，设计一套成像检测系统，解决了湿压磁体表面缺陷不易提取的难题。算法上使用多尺度灰度变换增强原图的对比度，并采用快速傅里叶变换将准确定位缺陷，最后通过二值化和硬阈值处理分割图像，通过比较灰度形态滤波和软形态混合滤波准确度。经过测试，本文所提出的方案提高了缺陷识别的准确率，并优化了算法识别的速度。不足处在于对微小缺陷识别精度，缺陷面积在 10-15pix，识别精度为 58.2%，缺陷面积在 15pix 以上，识别精度达 96.3%。满足企业对铁氧体湿压材料品控要求。

参考文献：

- [1] 张少军, 李庆利, 李忠富. 基于 CCD 的数字图像处理技术在机械测量领域的研究与应用 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 25(增刊): 132-135.
ZHANG S J, LI Q L, LI Z F. Journal of Beijing University of Science and Technology, 2013, 25(s): 132-135.
- [2] LAO W, HAN J, De WITH P H N. Automatic video-based human motion analyzer for consumer surveillance system [J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2017, 55(2): 591-598.
- [3] 缪斌, 刘苑苑. 基于多尺度灰度变换的图像增强研究 [J]. 量子电子学报, 2015, 32(5): 550-554.
MIAO B, LIU Y Y. Journal of Quantum Electronics, 2015, 32(5): 550-554.
- [4] 唐燕妮. 基于机器视觉的陶瓷大花瓶内表面裂纹自动检测系统研究 [J]. 陶瓷学报, 2016, 37(4): 417-421.
TANG Y N. Journal of Ceramics, 2016, 37(4): 417-421.
- [5] POPPE R. A survey on vision-based human action recognition [J]. Image & Vision Computing, 2010, 28(6): 976-990.
- [6] CAMPBELL L W, BECKER D A, AZARBAYEJANI A. Invariant features for 3-d gesture recognition [C]. Proceedings of the International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, 2006: 157-162.
- [7] TURAGA P, CHELLAPPA R, SUBRAHMANIAN S,

- et al. Machine recognition of human activities: A survey [C] IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2008, 18(11): 1473-1488.
- [8] DAVIS J W, BOBICK A F. The representation and recognition of action using temporal templates [C] Proc. of CVPR, 2000, 23(3): 928-934.
- [9] STAUFFER C, GRIMSON W E L. Learning patterns of activity using real time tracking [C] IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 22(8): 747-757.
- [10] LAPTEV I. On space-time interest points [J]. International Journal of Computer Vision, 2015, 64(2): 107-123.
- [11] 崔帅, 刘波, 丁德红. 基于傅里叶变换的森林红外图像增强算法研究 [J]. 红外技术, 2015, 1(37): 29-35.
CHUI S, LIU B. Infrared Technology, 2015, 1(37): 29-35.
- [12] 曹风云, 李东兴, 张华强. 自适应多方向灰度形态学图像边缘检测算法 [J]. 光学技术, 2018, 1(42): 324-330.
CAO F Y, LI D X. Optical Technology, 2018, 1(42): 324-330.