

# 基于灰度均衡模型联合 Gabor 滤波器的 钢轨表面缺陷检测方法

刘琴琴<sup>1</sup>, 周慧云<sup>2</sup>, 王兴洲<sup>1</sup>

(1.南通理工学院 计算机与信息工程学院, 江苏 南通 226000; 2.南昌广播电视大学, 南昌 330046)

**摘 要:** **目的** 设计一种钢轨表面缺陷检测方法, 对钢轨表面存在的缺陷进行快速、准确地检测。**方法** 首先, 利用图像的灰度均值构造灰度均衡模型, 对钢轨表面图像中像素点的灰度值进行修正, 以克服光照不均的影响。然后, 利用图像的谱残差模型与相位谱增强钢轨表面图像中的缺陷部分, 引入 ostu 阈值分割法对增强后的图像进行二值化, 对图像中的缺陷区域进行准确地分割提取。最后, 利用 Gabor 滤波器, 将二值化图像中的噪声进行滤除, 并保留缺陷区域的边缘等细节特征。**结果** 与对照组方法相比, 所提方法的检测效果较好, 精确率以及召回率都有所提高。直观测试结果显示, 所提方法能够较为完整地检测出钢轨表面缺陷。客观测试实验结果显示, 所提方法的精确率为 90.11%, 召回率为 93.41%, 且平均耗时为 45.17 ms, 相对对照组方法而言, 耗时最少。**结论** 所提钢轨表面缺陷方法不仅能够准确地对钢轨表面缺陷进行检测, 而且还具有较高的检测效率。

**关键词:** 钢轨表面缺陷; 灰度均衡模型; 相位谱; 谱残差; ostu 阈值分割; Gabor 滤波器

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)11-0290-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.11.041

## Research on Rail Surface Defect Detection Method Based on Gray Equalization Model Combined with Gabor Filter

LIU Qin-qin<sup>1</sup>, ZHOU Hui-yun<sup>2</sup>, WANG Xing-zhou<sup>1</sup>

(1.School of Computer and Information Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226000, China;

2.Nanchang Open University, Nanchang 330046, China)

**ABSTRACT:** The work aims to design a detection method to detect the defects on the rail surface quickly and accurately. Firstly, the gray-level equalization model was constructed by the gray-level mean of the image, and the gray-level value of the pixels in the rail surface image was corrected to overcome the influence of uneven illumination. Then, the spectral residual model of the image and phase spectrum were used to enhance the defects in the rail surface image. Secondly, threshold segmentation method was introduced to binarize the enhanced image, and the defective areas in the image were segmented and extracted accurately. Finally, the noise in the binary image was filtered by the filter, and the edge of the defect area and other details were preserved. Compared with the control group, the proposed method had better detection effect and higher precision and recall rate. The intuitive test results showed that the method proposed in this paper could detect the surface defects of the rail more

收稿日期: 2018-09-01; 修订日期: 2018-10-21

**Received:** 2018-09-01; **Revised:** 2018-10-21

**基金项目:** 南通理工学院科技创新与服务地方团队; 江苏省高校自然科学基金项目(16KJB520039); 江苏省现代教育技术研究课题(2017-R-54624)

**Fund:** Supported by Nantong Institute of Technology Innovation and Services Local Team, Natural Science Foundation Projects of Jiangsu Province (16KJB520039); Research Topic of Modern Education Technology of Jiangsu Province (2017-R-54624)

**作者简介:** 刘琴琴(1983—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为计算机图像检测。邮箱: vg456324@163.com

**Biography:** LIU Qin-qin (1983—), Female, Master, Lecturer, Research focus: computer image detection. E-mail: vg456324@163.com

more completely. From the objective test results, the accuracy rate of the proposed method was 90.11% and the recall rate was 93.41%. At the same time, the objective test results also showed that the average time-consuming method was 45.17 ms. Compared with the control group method, the time-consuming was the least. Therefore, the method proposed in this paper could detect rail surface defects more accurately and rapidly. Therefore, the rail surface defect method proposed in this paper can not only accurately detect the rail surface defect, but also has high detection efficiency.

**KEY WORDS:** detection of rail surface defect; gray scale equilibrium model; phase spectrum; spectral residual; Ostu threshold segmentation; Gabor filter

随着经济的不断发展,人们的生活水平越来越高,同时人们对交通出行也提出了越来越高的要求。近些年高铁以及地铁等轨道交通工具得到了迅速发展,成为了人们出行不可或缺的交通工具。由于轨道交通工具越来越广泛的使用,就对钢轨的质量提出了越来越高的要求。钢轨表面存在缺陷时,不仅会对乘车舒适度造成影响,甚至有可能使钢轨损坏,造成安全事故。因此,如何实现对钢轨表面缺陷进行准确检测具有重要的研究意义。传统的钢轨缺陷检测方法是通过人工“看”、“敲”等方式来实现,这些方法不仅效率低下,而且还具有一定的危险性。为了克服传统检测方法的弊端,目前已出现了超声波检测、电涡流检测以及机器视觉检测等无损检测技术。其中,机器视觉检测技术具有直观效果好、速度较快以及操作便捷等特点,被广泛应用于钢轨表面缺陷的检测<sup>[1]</sup>。

当下具有较多用于机器视觉检测钢轨表面缺陷的方法,如 Tian 等人<sup>[2]</sup>通过添加模板法,对 Sobel 算法进行改进,以对钢轨表面缺陷进行检测。虽然该方法克服了 Sobel 算法对方向的敏感性,但该方法缺少光照度处理过程,使得检测准确度不佳。He 等人<sup>[3]</sup>通过对钢轨表面图像的灰度值进行比较,利用直方图方法提取钢轨区域,然后对钢轨表面图像进行背景模型建立,再利用背景差分法对缺陷区域与背景区域实施分离,用 Niback 对图像进行阈值分割,利用形态学滤波方法去除分割后的图像噪声,实现钢轨表面缺陷检测。虽然该方法能够对缺陷区域进行检测,但由于背景差分法难以适应图像中阴影等因素的干扰,使得检测结果中存在较大误差。如王姁等人<sup>[4]</sup>将 PCA 方法与图块的颜色特征进行结合,用于钢轨表面缺陷检测,通过 PCA 方法获取图像的显著区域,再通过构造图块的颜色特征函数对颜色进行度量,进而实现缺陷检测。该方法能够对缺陷区域进行检测,而且不受光照度变化的影响,但该方法没有采用去噪处理,使得检测的缺陷区域效果不理想。

为了对钢轨表面缺陷进行快速、准确地检测,本文在 Gabor 滤波器的基础上设计了一种钢轨表面缺陷检测方法。通过钢轨表面图像的灰度特征构造灰度均衡模型,用于对图像中像素点的不同灰度值进行优化修正。通过图像的谱残差模型与相位谱特性,增强缺陷区域的显著性。利用 ostu 阈值分割法对图像进行

二值化,提取缺陷区域图像。通过 Gabor 滤波器对缺陷区域的图像去噪,使得检测更准确。

## 1 方法设计

### 1.1 灰度均衡化

由于列车的碾压以及钢轨形状结构特征等因素的影响,采集到的钢轨表面图像难免会存在光照度不均的现象。由于光照度不均引起的明暗交替带会对钢轨表面缺陷检测带来较大的干扰,因此需要对采集到的钢轨表面图像进行灰度均衡处理,对钢轨表面图像中的高灰度值进行修正。在钢轨表面图像中,光照度均匀部分像素点的灰度值较为相近,而强光照度部分像素点的灰度值则远高于平均灰度值<sup>[5-6]</sup>。因此,可通过对图像的灰度特征进行判断,对钢轨表面图像进行灰度均衡化处理。

对于一幅尺寸为  $M \times N$  的图像  $I(x)$ ,令该图像中坐标为  $(i, j)$  处的像素点对应的灰度值为  $H(i, j)$ ,则第  $i$  行像素点对应的灰度均值  $M_i$  为:

$$M_i = \sum_{j=1}^N \frac{H(i, j)}{N} \quad (1)$$

通过灰度均值  $M_i$  构造灰度均衡模型  $G_i$ :

$$G_i = M_i + \frac{H_{\max} - M_i}{H_{\max}} \quad (2)$$

式中:  $H_{\max}$  为第  $i$  行中最大灰度值。将第  $i$  行中所有像素点的灰度值  $H(i, j)$  与  $G_i$  进行比较,并根据比较结果进行如下修正:

$$H_i = \begin{cases} H(i, j), & H(i, j) < G_i \\ G_m, & H(i, j) \geq G_i \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $G_m$  为第  $i$  行中正常光照区域的灰度平均值,当该区域中像素点个数为  $k$  时,其表述如下:

$$G_m = \sum_{j=1}^k \frac{I(i, j)}{k}, I(i, j) < G_i \quad (4)$$

式中:  $I(i, j)$  为正常光照区域像素点的灰度值。

通过式 (3) 对像素点  $(i, j)$  对应的行灰度值进行修正后,可得其行灰度值为  $H_i$ 。类似地,也可对其列灰度值进行修正,得到其修正后的列灰度值  $H_j$ 。

通过  $H_i$  与  $H_j$  便可对像素点  $(i, j)$  对应的灰度值

进行修正,得到新的灰度值  $\bar{H}(i,j)$ :

$$\bar{H}(i,j) = \frac{H_i + H_j}{2} \quad (5)$$

## 1.2 缺陷区域显著化

在对钢轨表面图像进行灰度均衡化处理后,需要对钢轨表面图像的背景进行弱化处理,而对缺陷区域进行显著化处理。利用图像的谱残差信息来获取图像中的显著区域,是一种使用较多且快速有效的方法<sup>[7-8]</sup>。对此,本文将通过图像的谱残差模型与相位谱特性来对缺陷区域进行显著化处理。

谱残差模型  $P(f)$  由图像  $f$  的 log 谱  $L(f)$  及 log 谱的平滑结果  $W(f)$  表示<sup>[9-10]</sup>:

$$P(f) = L(f) - W(f) \quad (6)$$

通过对源图像  $I(x)$  进行傅里叶变换,可得到其对应的幅值  $V(f)$  及相位谱  $X(f)$ :

$$\begin{aligned} V(f) &= |F[I(x)]| \\ X(f) &= \delta[F[I(x)]] \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $F$  为傅里叶变换;  $|\cdot|$  及  $\delta$  分别为傅里叶变换对应的幅值及相位。

通过对  $V(f)$  进行对数运算可得到图像  $f$  的 log 谱  $L(f)$ , 再利用尺寸为  $n$  的均值滤波器  $Q_n(f)$  对  $L(f)$  进行平滑处理,便可得到  $W(f)$ :

$$W(f) = L(f) * Q_n(f) \quad (8)$$

图像  $f$  的 log 谱  $L(f)$  代表了图像  $f$  的所有频域信息,  $W(f)$  代表了图像  $f$  频域中的背景信息,因此通过谱残差模型式(6)便可得到缺陷区域的显著信息。

通过将图像的谱残差模型  $P(f)$  与相位谱  $X(f)$  进行傅里叶反变换,便可得到钢轨表面图像中缺陷区域在空间域中的显著化图  $J(x)$ 。

$$J(x) = \left| F^{-1}[\exp\{P(f) + iX(f)\}] \right|^2 \quad (9)$$

## 1.3 图像二值化

对钢轨表面图像进行缺陷区域显著化处理后,需要对图像进行分割,实现图像的二值化。在此,将采用 ostu 阈值分割法对图像进行二值化,提取缺陷区域图像。ostu 阈值分割法通过计算类间方差的最大值来获取最佳分割阈值,是一种自适应的阈值分割方法,具有简单、稳定、快速等特点,其具体过程如下。

首先,在灰度级为  $T$  的图像  $f$  中,求取灰度值为  $i$  的像素点  $p_i$  出现的概率  $g_i$ <sup>[11-12]</sup>:

$$g_i = \frac{p_i}{m} \quad (10)$$

式中:  $m$  为图像  $f$  中的像素点总数。

然后设定一个分割阈值  $F_g$ , 将灰度值位于  $[0, F_g-1]$  的像素点归为 a 类,将灰度值位于  $[F_g, T-1]$  的像

素点归为 b 类,分别计算 a 类与 b 类对应的概率  $g_a$  与  $g_b$ , 以及均值  $m_a$  与  $m_b$ 。

$$g_a = \sum_{i=0}^{F_g-1} p_i \quad (11)$$

$$g_b = \sum_{i=F_g}^{T-1} p_i$$

$$m_a = \sum_{i=0}^{F_g-1} \frac{ip_i}{g_a} \quad (12)$$

$$m_b = \sum_{i=F_g}^{T-1} \frac{ip_i}{g_b}$$

最后,求取图像  $f$  的灰度均值  $m_f$ , 并根据  $m_f$  建立类间方差模型  $E^2$ 。

$$m_f = g_a \times m_a + g_b \times m_b \quad (13)$$

$$E^2 = g_a(m_a - m_f)^2 + g_b(m_b - m_f)^2 \quad (14)$$

在  $[0, T-1]$  范围内以 1 为单位增加  $F_g$  的值,直到  $E^2$  最大为止<sup>[13-14]</sup>, 此时  $F_g$  即为最优分割阈值,以该阈值对图像进行二值化,提取缺陷区域。

## 1.4 图像去噪

为了进一步提高所提取缺陷区域的准确度以及清晰度,需要对二值化后的图像进行去噪处理。Gabor 滤波器的尺度以及方向特征都较好,其不仅具有较强的去噪能力,而且还能较好地保护缺陷区域的边缘等细节特征<sup>[15]</sup>。在此,将采用 Gabor 滤波器对二值化图像去噪,使得检测更为准确。

在图像  $f$  中像素点  $p(x,y)$  处,尺度以及方向个数分别为  $c$ 、 $d$  的二维 Gabor 滤波器  $Ga_{c,d}(p)$  可表示为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{aligned} Ga_{c,d}(p) &= \frac{\|S_{c,d}\|^2}{\theta^2} \exp \left[ -\frac{\|S_{c,d}\|^2 \|p\|^2}{2\theta^2} \right] \times \\ &\quad \left[ \exp(ipS_{c,d}) - \exp \left( -\frac{\theta^2}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

式中:  $\|\cdot\|$  为欧式范数;  $S_{c,d}$  为高斯窗口特性调节变量;  $\theta$  为空间频率。

利用  $Ga_{c,d}(p)$  与图像  $f$  进行卷积运算,便可得到去噪后的图像  $G_f$ 。

$$G_f = Ga_{c,d}(p) * f \quad (16)$$

## 1.5 方法实现

综上所述,本文方法对钢轨表面缺陷检测的过程为:首先,通过式(5)对采集到的钢轨表面图像中像素点的灰度值进行修正,以实现图像进行灰度均衡化处理;然后,利用式(9)获取钢轨表面图像的显著化图,对缺陷区域进行显著化处理,并利用式

(14) 求取最优分割阈值, 对图像进行二值化处理; 最后, 通过式 (16) 对图像进行去噪, 完成钢轨表面缺陷的检测。

## 2 实验结果

在 Intel Core-i5 处理器、Windows7 操作系统的 PC 机上, 采用 Visual C++6.0 作为编程环境进行实验。将文献[17]与文献[18]中所用方法设立为对照组, 对本文所提方法的检测性能进行对比验证。实验分为直观测试和客观测试两个阶段进行。

### 2.1 直观测试

不同方法对钢轨表面剥落缺陷图像以及裂纹缺陷图像的检测结果分别如图 1 和图 2 所示。从图 1 可见, 对照组方法与本文方法都能检测到钢轨表面剥落的缺陷区域。但通过仔细观察可见, 在文献[17]方法的检测结果 (图 1b) 中, 存在较为严重的错误检测。文献[18]方法的检测结果 (图 1c) 中, 存在些许错误检测以及检测不完全。本文方法的检测结果 (图 1d) 中, 不存在错误检测现象, 而且剥落缺陷区域检测也较为完整。在图 2 中, 将不同方法的检测结果进行对比可见, 文献[17]方法的检测结果 (图 2b) 中, 左上角存在错误检测, 裂纹缺陷区域也存在错误检测; 文献[18]方法的检测结果 (图 2c) 中, 裂纹缺陷区域存在少许错误检测以及漏检测; 与图 2b、图 2c 的检测检测结果相比, 本文方法的检测结果 (图 2d) 中, 裂纹缺陷区域的检测更完整, 非缺陷区域不存在错误检测情况。由此可见, 本文所提方法能够对钢轨表面缺陷区域进行较准确地检测。

### 2.2 客观测试

客观测试过程中, 利用 300 幅不同光照度下的钢轨表面图像进行实验, 其中 200 幅为不含缺陷的图像, 100 幅为包含了裂纹、剥落、锈斑等在内的缺陷图像。利用常用的精确率  $P_r$ 、召回率  $R_e$  以及平均耗时作为测试指标。精确率  $P_r$  以及召回率  $R_e$  的表述为<sup>[19]</sup>:

$$P_r = \frac{W_p}{W_p + Y_p} \quad (17)$$

$$R_e = \frac{W_p}{W_p + Y_n}$$

式中:  $W_p$  为正确检测图像个数;  $Y_p$  为错误检测缺陷图像个数;  $Y_n$  为漏检测图像个数。通过式 (17) 可见, 精确率  $P_r$  以及召回率  $R_e$  的值越大, 表示检测准确度越高。不同方法的客观测试结果如表 1 所示。从表 1 可见, 较对照组方法而言, 本文方法的精确率以及召回率最高, 分别为 90.11% 以及 93.41%, 平均耗时最少, 为 45.17 ms。由此可见, 本文方法的检测准确度以及检测效率较对照组而言, 都最高。



图 1 剥落缺陷检测结果

Fig.1 Detection result of exfoliation defect: a) exfoliation defect image; b) detection result of method in document [17]; c) detection result of method in document [18]; d) detection result of method in this paper

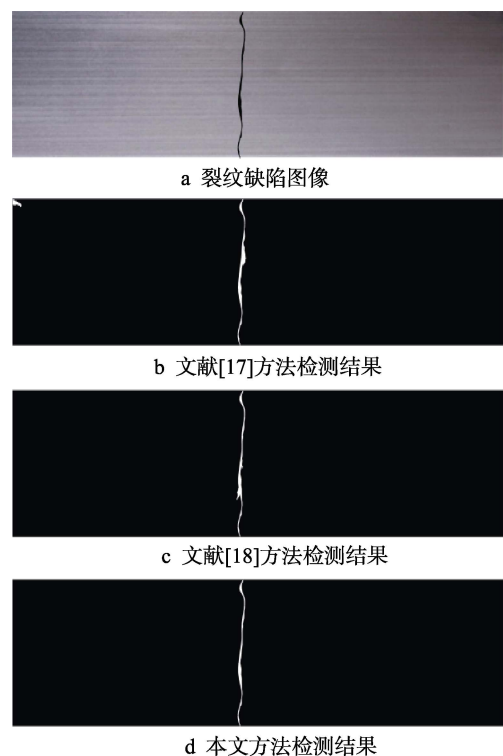


图 2 裂纹缺陷检测结果

Fig.2 Detection result of crack defect: a) crack defect image; b) detection result of method in document [17]; c) detection result of method in document [18]; d) detection result in this paper

表 1 不同方法客观测试结果  
Tab.1 Objective test results of different methods

| Methods                | $W_p$ | $Y_p$ | $Y_n$ | Accuracy rate/% | Recall rate/% | The average time/ms |
|------------------------|-------|-------|-------|-----------------|---------------|---------------------|
| Literature [17] method | 206   | 51    | 43    | 80.16           | 82.73         | 58.43               |
| Literature [18] method | 236   | 37    | 27    | 86.45           | 89.73         | 51.74               |
| This paper method      | 255   | 28    | 17    | 90.11           | 93.41         | 45.17               |

### 3 结论

1) 利用图像像素点的灰度平均值构造灰度均衡模型,对图像中像素点的灰度值进行修正,克服缺陷检测过程中光照度不均的影响。

2) 通过图像的谱残差模型与相位谱对缺陷区域进行显著化处理,降低了背景信息对缺陷区域检测的干扰,同时提高了检测速度。

3) 利用 ostu 阈值分割法实现图像二值化,对缺陷区域进行精确检测。通过 Gabor 滤波器对检测结果进行去噪的同时,还保护了缺陷区域的细节信息,提高了缺陷区域的检测准确度。

### 参考文献:

- [1] 孙明健,程星振,王艳.基于光声信号的高铁钢轨表面缺陷检测方法[J].物理学报,2016,65(3):351-360.  
SUN Ming-jian, CHENG Xing-zhen, WANG Yan. Method for detecting high-speed rail surface defects by photo-acoustic signal[J]. Acta physica sinica, 2016, 65(3): 351-360.
- [2] TIAN Shi, KONG Jian-yi, WANG Xing-dong. Improved Sobel algorithm for defect detection of rail surfaces with enhanced efficiency and accuracy[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(11): 2867-2875.
- [3] HE Zhen-dong, WANG Yao-nan, LIU Jie. Background differencing-based high-speed rail surface defect image segmentation[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2016, 37(3): 640-649.
- [4] 王姮,王曼,张华.基于PCA模式和颜色特征的钢轨表面缺陷视觉显著性检测[J].自动化仪表,2017,38(1): 73-76.  
WANG Heng, WANG Man, ZHANG Hua. Vision saliency detection of rail surface defects based on PCA model and color features[J]. Process automation instrumentation, 2017, 38(1): 73-76.
- [5] MIN Yong-zhi, XIAO Ben-yu, DANG Jian-wu. Real time detection system for rail surface defects based on machine vision[J]. Journal of image and video processing, 2018, 2018(1): 1-11.
- [6] XIONG Zhi-min, LI Qing-quan, MAO Qing-zhou. A 3D laser profiling system for rail surface defect detection[J]. Sensors (Basel), 2017, 17(8): 1-19.
- [7] UMANG A, MARIA T, COUDOUX F X. An HVS- inspired video deinterlacer based on visual saliency[J]. Vietnam journal of computer science, 2017, 4(1): 61-69.
- [8] HE Fu-liang, GUO Yong-cai, GAO Chao. An improved pulse coupled neural network with spectral residual for infrared pedestrian segmentation[J]. Infrared physics and technology, 2017, 87(1): 22-30.
- [9] 熊伟,徐永力,姚力波.基于频谱残差视觉显著计算的高分辨SAR图像舰船检测算法[J].电光与控制,2018,25(4): 7-11.  
XIONG Wei, XU Yong-li, YAO Li-bo. A new ship target detection algorithm based on visual salience calculation of spectral residuals in high-resolution SAR images[J]. Electronics optics & control, 2018, 25(4): 7-11.
- [10] ASHIRBANI S, GAURAV B, JONATHAN Q M. Mutual spectral residual approach for multifocus image fusion[J]. Digital signal processing, 2013, 23(4): 1121-1135.
- [11] XIN Liu, LU Xie, ZHONG Bi-neng. Automatic facial flaw detection and retouching via discriminative structure tensor[J]. IET image processing, 2017, 11(11): 1068-1076.
- [12] WANG Yu-lin, DING Wen-jia, CHEN Yi-xin. Positioning corners of human mouth based on local gradient operator[J]. Multimedia tools and applications, 2016, 75(19): 11815-11829.
- [13] 刘昆,刘卫东.基于加权融合特征与Ostu分割的红外弱小目标检测算法[J].计算机工程,2017,43(7): 253-260.  
LIU Kun, LIU Wei-dong. Detection algorithm for infrared dim small targets based on weighted fusion feature and Ostu segmentation[J]. Computer engineering, 2017, 43(7): 253-260.
- [14] 于洋,孔琳,虞闯.自适应粒子群集优化二维OSTU的图像阈值分割算法[J].电子测量与仪器学报,2017,31(6): 827-832.  
YU Yang, KONG Lin, YU Chuang. Image threshold segmentation algorithm based on adaptive particle swarm optimization of two-dimensional OSTU[J]. Journal of electronic measurement and instrumentation, 2017, 31(6): 827-832.
- [15] SHI Y, YANG X, GUO Y. Translation invariant directional framelet transform combined with gabor filters for image denoising[J]. IEEE transactions on image processing, 2014, 23(1): 44-55.
- [16] ISRA A, ABDUL-AMEER A J. Face image enhancement using wavelet denoising and gabor filters[J]. Iraqi journal of computers, communication and control & systems engineering, 2016, 16(1): 104-117.
- [17] 闵永智,岳彪,马宏锋.钢轨表面缺陷图像自适应分割算法[J].北京工业大学学报,2017,43(10): 1472-1479.  
MIN Yong-zhi, YUE Biao, MA Hong-feng. Adaptive segmentation algorithm for rail surface defects image[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(10): 1472-1479.
- [18] CHOI W Y, KIM J Y, YANG I D. Rail surface defect detection system of next-generation high speed train[J]. The transactions of the Korean institute of electrical engineers, 2017, 66(5): 870-876.
- [19] 贺振东,王耀南,刘洁.基于背景差分的高铁钢轨表面缺陷图像分割[J].仪器仪表学报,2016,37(3): 640-649.  
HE Zhen-dong, WANG Yao-nan, LIU Jie. Background differencing-based high-speed rail surface defect image segmentation[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2016, 37(3): 640-649.