

文章编号:1000-582X(2012)03-014-06

热态重轨表面缺陷在线检测方法及关键技术

谢志江,陈 涛,楚红雨,刘 琴

(重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

摘 要:针对热态重轨轧制时表面缺陷检测困难,研制了一种基于机器视觉的热态重轨表面缺陷实时检测系统。根据重轨辐射和光照特性进行了光学选型,利用多个线阵 CCD 相机并行多角度采集得到热态重轨全表面图像,通过图像自适应预处理得到满足缺陷检测要求的图像。针对重轨表面缺陷结构连续性引起的传统图像分割算法难以实现缺陷提取的情况,提出了图像像素线间相关度互检验算法,并利用像素去差异化和方差统计运算提取完整缺陷,此方法在该类问题的识别效果上明显优于传统边缘识别算法。系统在某集团轨梁厂的实际应用中取得了良好的效果。

关键词:热态重轨;表面缺陷;机器视觉;在线检测;像素线间相关度

中图分类号:TH741.3

文献标志码:A

The key technology research of on-line surface inspection for hot heavy rail

XIE Zhi-jiang, CHEN Tao, CHU Hong-yu, LIU Qin

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: To overcome the detection difficulties of the surface defects when milling a hot heavy rail, a suite of detection system for on-line surface defect is developed. To select optical environment according to radiation of heavy rail and characteristics of light, use multi-linear array CCD cameras to parallel multi-angle collect images of whole surface of hot heavy rail, and obtain images through an image adaptive preprocessing to meet requirements of defect detection. For the condition that the defects extracting causing by continuity of the surface defects of hot heavy rail is hard to realize through traditional image segmentation, an examining algorithm of image relevance between pixel lines is proposed, using pixel de-differentiation and statistical variance operations to extract defect. This algorithm is demonstrated to be better than traditional edge detection, and the system has achieved good results in the practical application of a rail beam plant.

Key words: hot heavy rail; surface defect; machine vision; on-line systems; correlation between pixel lines

收稿日期:2011-10-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(0976034)

作者简介:谢志江(1963-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事设备故障诊断与网络化测控理论与技术的研究,
(E-mail) xzj99@vip.sina.com。

中国铁路运输业正朝着高速、重载、提速运输的方向发展。这对铁路重轨的质量提出了更高的要求。重轨的表面质量检测不仅是制约重轨生产速度提高和质量控制的瓶颈,其检测结果也直接关系到铁路运输的安全^[1]。

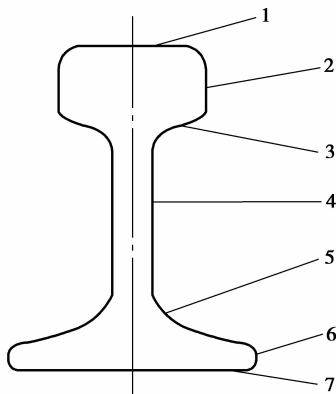
目前,国内外对冷态板钢、带钢表面质量在线检测技术研究较多,也取得了一些成功的实例^[2-4]。与冷态板钢、带钢表面质量检测相比,除恶劣的现场环境对检测设备的安装、保护和稳定性有了更高的要求外,热态重轨表面质量检测具有更大的难度:1)热态重轨的高温强辐射、现场重粉尘和水汽带来了更大的干扰;2)重轨在形状上远比板钢、带钢复杂,被检测面均为不规则曲面;3)检测时需多个面同时采集数据并分析;4)热态重轨表面缺陷形状各异,种类繁多;5)重轨高速连续生产,生产间隔时间短且缺陷一旦出现,容易影响轧辊引起批量缺陷,因此缺陷出现时要求系统快速报警通知生产线进行处理。以上原因都加大了热态重轨表面质量在线检测的难度。

表面无损检测的各种技术中,机器视觉检测比其他技术有着更好的适应性、更低的条件要求和较好的效果。基于线阵 CCD 在高速、高精度检测上对比面阵摄像机的各种优势^[5-7],笔者选择机器视觉技术采用线阵 CCD 对重轨表面缺陷进行检测。下面对系统原理及缺陷检测关键技术进行阐述。

1 系统检测原理

1.1 重轨形态特征及其缺陷高频区域

重轨横截面形状复杂,是由多段平面、曲面圆弧连接。其主要组成部分为踏面、轨头侧面、轨腰上弧面、轨腰下弧面、轨腰侧面、轨底侧面及底面等,见图1。



1. 踏面;2. 轨头侧面;3. 轨腰上弧面;4. 轨腰;
5. 轨腰下弧面;6. 轨底侧面;7. 底面;

图1 重轨横截面示意图

根据实际生产统计数据,质量影响缺陷主要集中在各面间的连接弧面上,尤以轨腰的上下腰面缺陷出现机率最高,其次为平面质量要求较高的踏面和底面。这两类位置的缺陷占被统计总缺陷的80%以上。针对该情况,结合重轨的形状特征,摄像机布置在重轨四周分别对重轨的踏面、底面和4个腰面进行拍摄,各相机分布及其拍摄区域如图2所示。

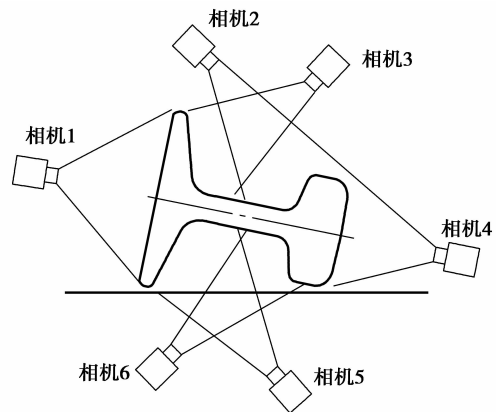


图2 相机分布及拍摄区域

1.2 系统构成

系统硬件主要由线阵 CCD 摄像机、相机控制器、图像处理工作站、服务器等组成,其硬件系统框架如图3所示。6个摄像机对重轨表面信息进行采集,采集线频和其他参数受控于相机控制器,实现图像采集速度和重轨轧制速度相一致。摄像机采集到的图像信息经千兆网络传送给图像处理工作站,在图像处理工作站中完成图像预处理、缺陷识别、缺陷分类等工作后,将原始数据及处理结果送到服务器中进行保存和归档。服务器连入局域网,允许远程计算机读取重轨信息及生成各种生产管理数据。

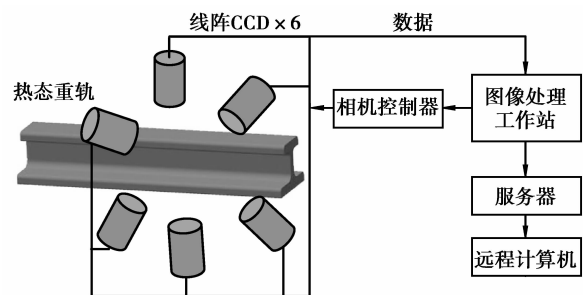


图3 硬件系统框架简图

2 关键技术

降低噪音干扰,提高图像动态范围,得到重轨表面清晰图像,利用快速有效算法辨别缺陷,实现重轨高速生产下缺陷实时监测和报警,是检测系统的难点。下面对系统关键技术,即滤镜与光照,图像去噪、图像增强、缺陷识别、缺陷分类等进行讨论。

2.1 滤镜与光照

热态重轨温度分布由内向外梯度递减,至表面温度约为 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$,红外辐射强烈,其辐射能量大部分来自重轨内部,严重干扰了 CCD 对重轨表面信息的采集。

选用远红外滤镜对 CCD 摄像机入射光进行过滤,保留部分涵盖重轨表面红外辐射波长段的近红外区域,截止远红外区域,以此抑制重轨内部红外干扰。

重轨表面粗糙,漫反射性能好,且重轨表面主要缺陷均属于三维缺陷(具有凹凸形态特征的缺陷),因此暗域照明方式^[8],即摄像机采集的入射光避开光源的直接反射光为最佳选择。

2.2 图像降噪

重轨表面信息采集时干扰源主要为现场粉尘和水雾干扰。粉尘阻挡在光源辐射光路上,在图像中形成点状噪声。水雾引起光线在穿越时产生折射或散射,致使图像模糊^[9-10]。

中值滤波对随机噪音具有较好的处理效果。系统采用改进后的自适应中值滤波算法^[11],在自适应中值滤波的同时,根据噪音与高温主体的图像光谱分布差异^[12]对噪音区域进行判断并分类进行处理,对非噪音区域保留原信息,以此达到抑制噪音并最大化保留图像原有细节的效果。

2.3 图像增强

重轨在轧制过程中存在平行于重轨横截面的水平和竖直方向的跳动,使被拍摄区域在重轨全长上光照特性不断发生变化。重轨表面由多段曲线连接,被拍摄区域有纵向距离,上下腰面圆弧连接处存在阴影,且入射光在部分区域被直接反射进入镜头引起图像局部过曝,图像光照不均现象较严重。为得到满足缺陷识别要求的图像,必须对图像进行增强。

直方图均衡化是在空间域进行图像增强的简单而效果明显的方法,其处理的效果和速度能较好地满足现场复杂光照和系统实时处理的要求。

根据重轨成像特征,对图像直方图进行灰度分段变换。变换模式如图 4,其中 a 、 b 分别为 2% 截断

率的低亮度段的终止点和亮度过曝段的起始点。在直方图中线性拉伸重轨图像表面主要亮度区域,同时反向拉伸过曝区域。原始直方图和变换后的直方图及其对应的图像如图 5、6 所示。

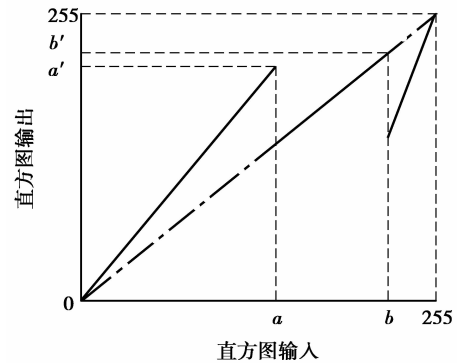
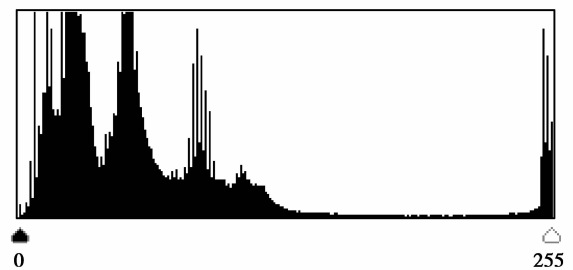
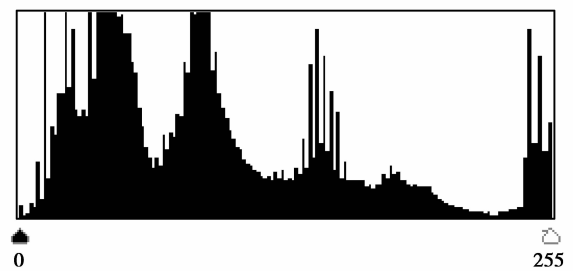


图 4 灰度变换模式

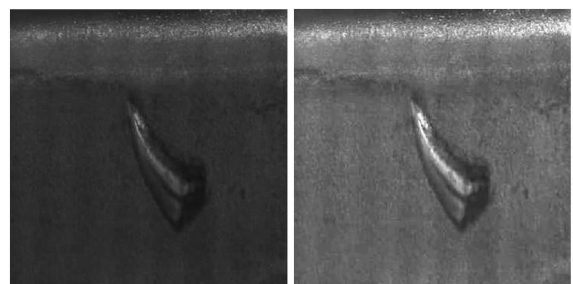


(a)原始直方图



(b)灰度变换后直方图

图 5 灰度变换前后直方图对比



(a)原始图像

(b)灰度变换后的图像

图 6 灰度变换前后图像对比

2.4 缺陷识别

图像分割是缺陷识别与提取的重点,常用的图像分割方法主要有直方图阈值分割、区域生长、边缘检测等方法^[12-13]。

热态重轨表面形态复杂,光照不均,缺陷部分没有相对独立的灰度范围,直方图双峰结构不明显(见图5),不易于使用阈值分割;区域生长方法过于依赖初始种子的选取;边缘检测算法利用求解一阶导数极点和二阶导数过零点来检测边缘,常用的算子有 Sobel 算子、Roberts 算子、LoG (Laplacian of Gaussian 拉普拉斯高斯) 算子等^[12-14]。

热态重轨表面缺陷在结构上为连续变化,在采集图像中除部分直接反射光过曝突变外其余也为连续变化,因此缺陷图像边缘及内部像素一阶导数极点和二阶导数过零点均不明显,所以难以依靠传统边缘识别算法检测热态重轨表面缺陷。图7(a)为相机3(见图2)位置所拍摄的重轨经预处理后送入缺陷识别前的图像,(b)、(c)、(d)分别为图像(a)使用 Sobel 算子、Roberts 算子、LoG 算子进行边缘检测后的结果。

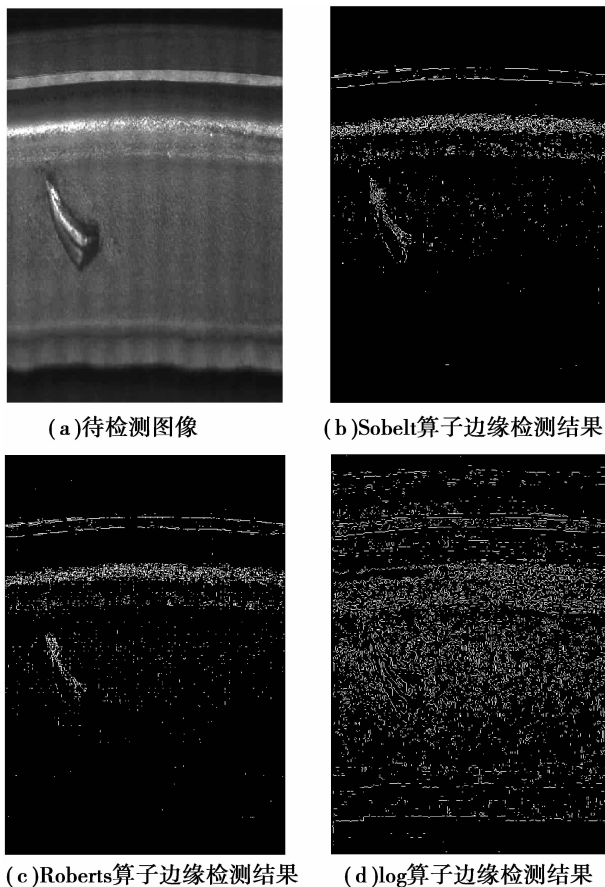


图7 待检测图像及边缘识别算子检测结果

针对传统识别算法不易识别热态重轨表面缺陷的情况,笔者根据热态重轨图像前后像素线间具有相似性的特点,提出了基于图像像素线间相关度互校验算法来检测表面缺陷。

重轨每个横截面在理论上具有一致性,每个被拍摄区域存在形状上的统一性。虽然图像采集时,重轨自身的跳动和转动将引起表面采光情况的不断变化,但被拍摄区域的前后图像仍具有极强的信息相似性。所以可以利用重轨图像前后信息进行互相校验,以此来判断某部分重轨表面是否发生异常变化,以达到快速检测缺陷的目的。

算法步骤如下:

1)对于任意 m 行、 n 列的灰度图像 A_{mm} ,取相关度计算间隔 λ ,得到 $n-\lambda$ 对列像素线向量对 $P_i, P_{i+\lambda}$,其中 $i=1,2,\dots,n-\lambda$ 。

2)计算每对列像素线向量相关度 μ

$$\mu_i = R(P_i, P_{i+\lambda}) = \frac{\sum_{j=1}^m (P_{ij} - \bar{P}_i)(P_{(i+\lambda)j} - \bar{P}_{i+\lambda})}{\sum_{j=1}^m \sqrt{(P_{ij} - \bar{P}_i)^2 (P_{(i+\lambda)j} - \bar{P}_{i+\lambda})^2}} \quad (1)$$

3)检测相关向量 μ ,设置阈值 $\epsilon(0 < \epsilon < 1)$ 和连续像素数 θ 。 μ_i 存在连续 θ 个相关系数值小于 ϵ ,且 $\theta > \theta$ 的区域即为缺陷疑似区域的列像素范围。

4)从原始图 A_{mm} 中提取出疑似区域部分 $F_{m\theta}$,利用矩形结构元素对 $F_{m\theta}$ 进行膨胀处理,得到 $F'_{m\theta}$ 。

5)统计疑似缺陷区域 $F'_{m\theta}$ 每一行像素的方差 S_i ,得出缺陷区域,其中

$$S_i = \sum_{j=1}^{\theta} (F'_{ij} - \bar{F}'_i)^2 \quad (2)$$

待检测图片(图7(a))利用本算法各步骤所得结果如图8-10。

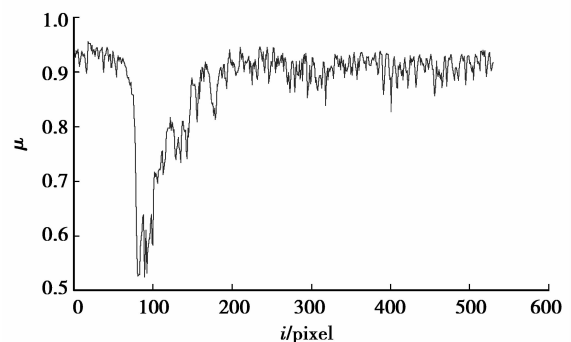
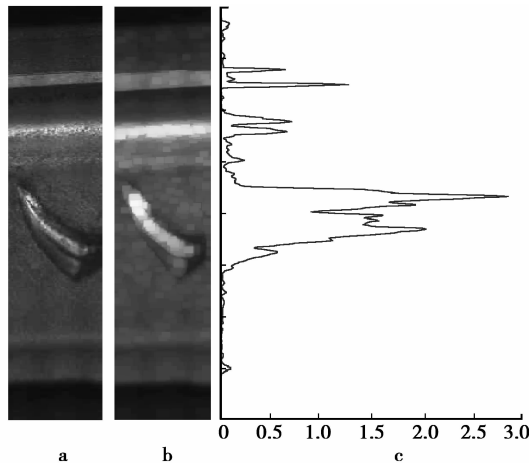


图8 图像像素线线间相关度 μ 计算结果



a. 疑似缺陷列像素区域; b. 膨胀去差异化结果;
c. 去差异化后横向像素线方差统计结果($\times 10^5$)
图 9 疑似缺陷区域去差异化及方差统计



图 10 算法提取出缺陷结果

算法利用像素线间相关度计算首先在纵向上确定疑似缺陷区域,之后在提取的纵向区域里利用矩形结构元素进行膨胀运算,抑制非缺陷因素(重轨跳动等)引起的图像横向像素差异,根据缺陷区域像素值在横向像素线上波动较大的特性,利用方差计算横向截取得到最终缺陷区域。

在该算法中,计算间隔 λ 是决定缺陷筛选度的一个重要参数。由于缺陷的形态变化是连续渐进的,若 λ 过小,可能导致水平直径大于 λ 值的缺陷漏检;若 λ 过大,由于重轨自身变化及轧制跳动等条件的影 响,间隔 λ 值前后的图像自身的相似性下降,使算法的误识别率增大。因此,必须对 λ 值进行合理选值,经实际缺陷统计及多种缺陷实验对比,选定 λ 参考值为

$$\lambda = \frac{\bar{r}}{f} \times \bar{v} \times 1.2, \quad (3)$$

式中, \bar{r} 为历史缺陷样本的平均半径; \bar{v} 为重轨生产时轧制平均速度; f 为 CCD 线扫描摄像机线频。

像素线间相关度互校验算法能快速对缺陷进行判断和定位,对缺陷的类型、大小、形状和位置都具有较大范围的适应性,能较准确得到疑似缺陷区域以供缺陷分类器进行进一步甄别和分类。

2.5 缺陷分类

根据重轨表面各类缺陷的先验知识,系统分别从几何形状、灰度特征、缺陷位置等方面对缺陷统计特征进行了初步设计,利用神经网络^[15]对已有缺陷样本进行训练并基于当前训练结果对缺陷图片进行分类。在各类缺陷样本逐步完备之后,高识别率的缺陷分类器设计将是本系统下一步的重点。

3 结 语

系统通过图像像素线间相关度互校验算法能快速对缺陷区域进行定位,定位速度和准确度都能较好满足现场缺陷实时检测报警的要求。但该算法仍有不足之处,相比其他类型缺陷,算法对于长周期连续性缺陷不敏感,这方面的工作还有待进一步的研究和开展。

参考文献:

- [1] 官鑫,赵智雅,高晓蓉. 图像处理技术在钢轨表面缺陷检测和分类中的应用[J]. 铁路计算机应用, 2009, 18(6):27-29.
GUAN XIN, ZHAO ZHI-YA, GAO XIAO-RONG. Application of image processing in defect detection and classification of rail surface [J]. Railway Computer Application, 2009, 18(6): 27-29.
- [2] TANG B, KONG J Y, WANG X D, et al. Surface inspection system of steel strip based on machine vision [C] // Proceedings of the 2009 1st International Workshop on Database Technology and Applications, April 25-26, 2009, Wuhan, China. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 359-362.
- [3] PERNKOPF F, LEARY P O. Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces [J]. NDT&E International, 2003, 36 (8): 609-617.
- [4] 徐科,杨朝霖,周鹏. 热轧带钢表面缺陷在线检测的方法与工业应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(4): 111-115.
XU KE, YANG CHAO-LIN, ZHOU PENG. Technology of on-line surface inspection for hot-rolled steel strips and its industrial application[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(4): 111-115.
- [5] 刘征,彭小奇,丁剑,等. 国外 CCD 检测技术在工业中的应用与发展[J]. 工业仪表与自动化装置, 2005(4): 65-69.
LIU ZHENG, PENG XIAO-QI, DING JIAN, et al. The application and development of CCD measurement technology in foreign industrial fields [J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2005(4): 65-69.

- [6] GOLNABI H, ASADPOUR A. Design and application of industrial machine vision systems [J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, 23 (6): 630-637.
- [7] THOMAS G H. Overview of nondestructive evaluation technologies [J]. *Nondestructive Evaluation of Aging Bridges and Highways*, 1995, 2456: 5-9.
- [8] 张洪涛,段发阶,丁克勤,等. 带钢表面缺陷视觉检测系统关键技术研究 [J]. *计量学报*, 2007, 28(3): 215-219. ZHANG HONG-TAO, DUAN FA-JIE, DING KE-QIN, et al. Development of key technology on surface defects detection system for steel strip [J]. *ACTA Metrologica Sinica*, 2007, 28(3): 215-219.
- [9] 宋海鹰,彭小奇,刘征,等. 基于非接触式温度测量中的高温熔体识别方法 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2005, 36(3): 426-428. SONG HAI-YING, PENG XIAO-QI, LIU ZHENG, et al. Recognition method in contactless temperature measurement of high temperature melts [J]. *Journal of Central South University of Technology: Science and Technology*, 2005, 36(3): 426-428.
- [10] 王敏,程京,张帆. 一种改进的自适应中值滤波算法 [J]. *微计算机信息*, 2010, 26(10): 109-110. WANG MIN, CHENG JING, ZHANG FAN. An improved method of adaptive median filter [J]. *Microcomputer Information*, 2010, 26(10): 109-110.
- [11] 彭小奇,孙元,王一丁. 基于高温辐射体颜色信息的目标图像识别方法 [J]. *中国图像图形学报*, 2008, 13(2): 238-241. PENG XIAO-QI, SUN YUAN, WANG YI-DING. An object image recognition method based on the color information of a high temperature radiator [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(2): 238-241.
- [12] GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. 数字图像处理 [M]. 阮秋琦,译. MATLAB 版. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [13] PRATIHAR S, BHOWMICK P. A thinning-free algorithm for straight edge detection in a gray-scale image [C] // *Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Pattern Recognition*, February 4-6, 2009, Calcutta, India. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 341-344.
- [14] MA W Y, MANJUNATH B S. EdgeFlow: a technique for boundary detection and image segmentation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2000, 9(8): 1375-1388.
- [15] ROHRMUS D. Invariant texture features for web defect detection and classification [J]. *Proceedings on Machine Vision Systems for Inspection and Metrology*, 1999, 3836 (8): 144-155.

(编辑 张 苹)

~~~~~

(上接第 13 页)

- [13] 李芳,张俊智,王丽芳,等. 电动汽车动力总成系统控制器局域网(CAN)总线通信协议 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(5): 102-107. LI FANG, ZHANG JUN-ZHI, WANG LI-FANG, et al. Controller area network protocol for powertrain system of electric vehicles [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(5): 102-107.
- [14] 冉振亚,周智庆,李越,等. 电动汽车 CAN 总线驱动控制系统设计 [J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(6): 603-609. RAN ZHEN-YA, ZHOU ZHI-QING, LI YUE, et al. A controller area network-based electric vehicle drive system design [J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(6): 603-609.
- [15] JORG S, THOMAS Z. Automotive software engineering: principles, processes, methods, and tools [M]. Warrendale, PA, USA: SAE International, 2005: 325-380.
- [16] CONARD M. A systematic approach to testing automotive control software [J]. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2005, 111(1): 13-26.
- [17] 舒红,蒋勇,高银平. 中度混合动力汽车模型预测控制策略 [J]. *重庆大学学报*, 2010, 33(1): 36-41. SHU HONG, JIANG YONG, GAO YIN-PING. Model predictive control strategy of a medium hybrid electric vehicle [J]. *Journal of Chongqing University*, 2010, 33(1): 36-41.
- [18] 高峰,张强,周晶洁,等. 车身控制器功能逻辑测试技术的研究 [J]. *汽车工程*, 2009, 31(10): 966-970. GAO FENG, ZHANG QIANG, ZHOU JING-JIE, et al. A study on the function logics test techniques for body control module [J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(10): 966-970.

(编辑 张 苹)