

文章编号 1004-924X(2007)03-0434-06

基于小波包分解的阈值消噪在 车载 CAN 总线上的应用

高印寒¹, 马喜来², 何丽桥³, 杨开宇¹, 周晓华²

(1. 吉林大学 测试科学实验中心, 吉林 长春 130025;

2. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130025; 3. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130025)

摘要:为了实现在车载 CAN 总线控制器故障产生不可预知干扰信号的情况下正确读出 CAN 总线上的故障码, 提出了一种基于小波包分解的阈值消噪方法。将信号进行基于最小 Shannon 熵原理的最佳树小波包分解后, 针对 CAN 总线传输信号特点, 对高频和低频系数采取不同阈值处理的混合阈值消噪处理。对于高频系数, 采用基于 Stein 无偏似然估计原理的自适应阈值; 在干扰信号的统计特性未知的情况下, 对低频系数阈值的选取采取保持频率单一和能量损耗小的双重标准。最后, 由阈值处理后的系数重构信号, 得到正确的传输码。实验结果表明, 该混合阈值消噪处理方法对消除这种由 CAN 总线上的控制器故障引起的干扰, 较传统的消噪技术提高 1/3 以上的信噪比, 增加了后期读取 CAN 总线故障码的准确率。

关键词:小波包分解; 最佳树; 混合阈值; 风险函数; CAN 总线

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A

Application of threshold denoising based on wavelet packet decomposition to vehicular CAN-bus

GAO Yin-han¹, MA Xi-lai², HE Li-qiao³, YANG Kai-yu¹, ZHOU Xiao-hua²

(1. Centre of Test Science, Jilin University, Chanchun 130025, China;

2. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Chanchun 130025, China;

3. College of Physics, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In order to identify the correct failure code in a vehicular CAN-bus disturbed by the unforeseen damage of the controllers, application of threshold denoising based on wavelet packet decomposition was proposed here. The disturbed signal was decomposed into the multiscale wavelet domain by minimal Shannon entropy criteria. Then, the threshold based on Stein's unbiased risk estimation was used to eliminate the noise in the high frequency coefficients and the double criteria, and holding frequency singleness and little energy losses were used to set the threshold of the low frequency coefficients. Finally, the denoised signal was achieved by the invert WPD. Experimental results show that the S/N ratio of the denoising technique in proposed method has been increased 1/3 over that of tran-

收稿日期: 2006-10-19; 修订日期: 2007-01-18.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20050183019); 吉林省科技发展计划(No. 20030527)

ditional method, which can effectively get the correct fault-code while the some controller is damaged in CAN bus.

Key words: WPD; best tree; mixed threshold; risk function; CAN bus

1 引言

控制器局域网 CAN(Controllor Area Network)是国际上应用最为广泛的现场总线之一,20世纪80年代末由德国 Bosh 公司最先提出。由于 CAN 总线可以将车上的控制单元连成网络,从而可以扩展车上控制单元和自诊断方面的功能,并且具有抗干扰强和使用可靠等优点,目前广泛应用于汽车工业中^[1]。CAN 被设计作为汽车环境中的微控制器通讯,在车载电子控制装置 ECU 之间交换信息,形成汽车电子控制网络。如:发动机管理系统、变速箱控制器、仪表装备、电子主干系统中均嵌入 CAN 控制装置。一个由 CAN 总线构成的单一网络中,理论上可以挂接无数个节点。车载 CAN 总线采用双绞线传输信号,每次读取两根 CAN 总线的差值数据,所以抗干扰能力十分强。但是,由于控制器故障,也就是相当于改变了两条 CAN 线间的阻值的时候,CAN 总线上的干扰十分严重,而且连接在 CAN 线上的控制单元多达几十个,其中任何一个发生故障都可以带来干扰,且这种干扰是不可预知的。此时 CAN 线上产生为专用的故障诊断仪器读取的故障码存储在存储器中。所以当存在这种不可预知干扰时,去除干扰得到正确的故障码以便确定相应故障的原因和范围是十分重要的。

本文在对于干扰信号进行基于最小 Shannon 熵原理的最佳树小波包分解后^[2-5],对不同频带内的小波系数采取不同的阈值处理方法。对存在主要干扰的高频系数采用基于史坦(Stein)无偏似然估计原理的最小风险自适应阈值;而对于低频系数,由于其保留了 CAN 总线正常信号主要能量和产生干扰的不可预知性,一般对它的阈值处理是用已知干扰噪声的统计特性来估计阈值^[6-13],本文采取保持频率单一和能量损耗小的双重阈值选择。结果表明,本文提出的消噪算法对于频率单一的矩形波 CAN 线信号,处理效果较其他常见的全局阈值算法好。

2 信号的小波包分解

2.1 离散小波变换(DWT)

图1为当变速箱控制器内部电路故障时,CAN线上所传输的携带干扰的信号。这种干扰就会影响后期读取故障码的准确率,所以采用相应的变换消噪措施是很必要的。

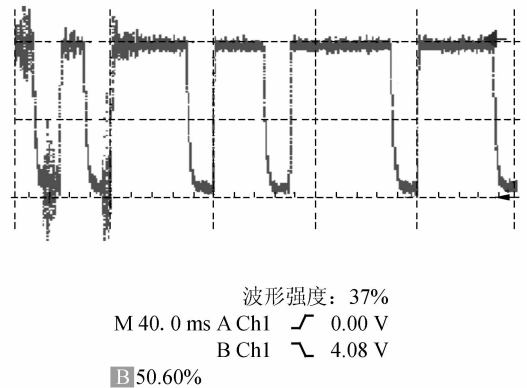


图1 控制单元损坏时 CAN 总线上的信号

Fig.1 Disturbed signal in CAN-bus

由离散小波变换(DWT)可知:任何信号 $s(t) \in L^2(R)$ 都可以被分解为:

$$s(t) = \sum_k c_{j_{\max}}(k) \phi_{j_{\max},k}(t) + \sum_{j=1}^{j_{\max}} d_j(k) \Psi_{j,k}(t), \quad (1)$$

其中: j 为尺度因子, k 为时间平移因子, $\phi(t)$ 和 $\Psi(t)$ 分别为尺度函数和小波函数,并满足:

$$\begin{cases} \phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k) \\ \Psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \Psi(2^{-j}t - k), \end{cases} \quad (2)$$

其递归定义为:

$$\begin{cases} \phi(t) = \sum_{n=1}^N h(n) \sqrt{2} \phi(2t - n) \\ \Psi(t) = \sum_{n=1}^N g(n) \sqrt{2} \Psi(2t - n), \end{cases} \quad (3)$$

N 为信号采样点数, $g(n)$ 和 $h(n)$ 分别为尺度和小波函数滤波器,通常在信号处理中把 $g(n)$ 和 $h(n)$ 叫做二次镜像滤波器。由于小波系统是标准正交的, $g(n)$ 和 $h(n)$ 有如下关系:

$$g(n) = (-1)^n h(N-1-n), \quad (4)$$

式(1)中变换系数递归定义为:

$$\begin{cases} c_j(k) = \sum_m h(m-2k)c_{j-1}(m) \\ d_j(k) = \sum_m g(m-2k)c_{j-1}(m) \end{cases}, \quad (5)$$

式(5)为多分辨率分解的 Mallat 塔式算法。其分解形式如图 2 所示,离散小波变换只是对低频部分进行进一步分解,而高频部分则不予考虑。分解关系为: $s(t) = s_{c_2}(t) + s_{d_2}(t) + s_{d_1}(t)$ 。

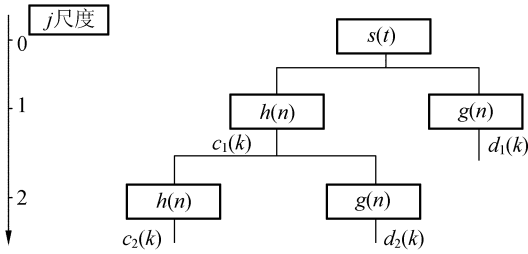


图 2 $j_{max}=2$ 离散小波分解

Fig. 2 Discrete wavelet transform, $j_{max}=2$

2.2 小波包变换 (WPD)

由于离散小波变换的尺度是二进制变化的,所以在高频频段,其频率分辨率差;而在低频频段其时间分辨率差。而小波包分解(WPD)能够为信号提供一种更加精细的分解方法,它将频带进行多层次划分,对离散小波变换没有细分的高频部分进一步分解(如图 3),并能够根据被分析信号的特征,自适应选择相应的频带,使之与信号匹配,从而提高了时间-频率分辨率。

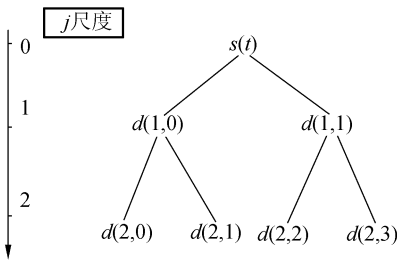


图 3 $j_{max}=2$ 小波包分解

Fig. 3 Wavelet packet decomposition, $j_{max}=2$

如图 3 所示,完全小波包分解树中的节点由分解系数 $d(j,i)$ 来确定。分解关系为:

$$s(t) = s_{d(2,0)}(t) + s_{d(2,1)}(t) + s_{d(2,2)}(t) + s_{d(2,3)}(t)$$

2.3 最小熵原理

由小波包分解的定义可以知道,给定分解层

数 j_{max} 一共有 $2^{j_{max}}$ 个分解数,如何确定具体使用哪个分解数来对信号进行分解是至关重要的。传统的基于熵的标准可以完成这项工作,它可以对给定信号进行信息相关的性能描述。熵的概念在许多领域中是一个普遍的概念,特别是在信号处理中。本文采用的是最小 Shannon 熵原理, Shannon 熵定义如下:

$$E(d_{j,i}) = - \sum_k d_{j,i}^2(k) \log(d_{j,i}^2(k)), \quad (6)$$

$$E(s(t)) = - \sum_{j=1}^{j_{max}} \sum_i E(d_{j,i}). \quad (7)$$

规定 $0 \log 0 = 0$, 所采用的最佳分解树即为使式(6)~(7)最小的最优分解树。对图 1 CAN 总线上带干扰的信号采用最小 Shannon 熵,coif 小波的 4 层分解最佳分解树如图 4。

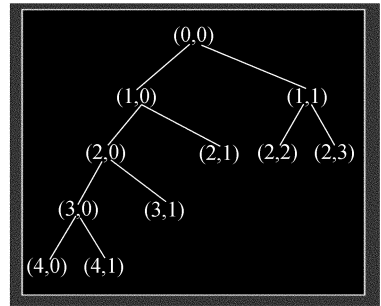


图 4 $j_{max}=4$ 的原始信号最佳分解树

Fig. 4 Best tree of disturbed signal, $j_{max}=4$

3 混合阈值消噪

3.1 阈值消噪的基本原理

对信号 $s(t)$ 做最优小波包分解之后,寻找一个和数的 λ 数作为阈值,把低于 λ 的系数设为 0,而对高于 λ 的系数则予以保留,从而得到新的系数 $\bar{d}(j,i)$,然后对 $\bar{d}(j,i)$ 进行重购,就得到了消噪后的信号。

常见的阈值消噪方法主要有两种:硬阈值去噪和软阈值去噪,其中硬阈值消噪方法定义为:

$$\begin{cases} d(j,i) & |d(j,i)| \geq \lambda \\ 0 & |d(j,i)| < \lambda \end{cases}, \quad (8)$$

软阈值消噪方法定义为:

$$\begin{cases} \text{sign}(d(j,i)) \cdot (|d(j,i)| - \lambda) & |d(j,i)| \geq \lambda \\ 0 & |d(j,i)| < \lambda \end{cases}, \quad (9)$$

硬阈值消噪方法可以较好地保留原始信号的一些尖锐特性,但它的平滑性差;而软阈值在视觉上有较好的平滑性,但是比原始信号失真大。

3.2 混合阈值消噪算法

由于常用的阈值消噪算法都是对信号分解后的各个子频带采用相同的阈值,小波包分解系数在不同频带反映信号的不同特征,很难找到一个统一的阈值对各个频带进行处理,因此用同一个阈值对各个子频带进行处理不能达到好的消噪效果。本文对小波包分解在不同频带上的系数采用不同的阈值消噪算法。

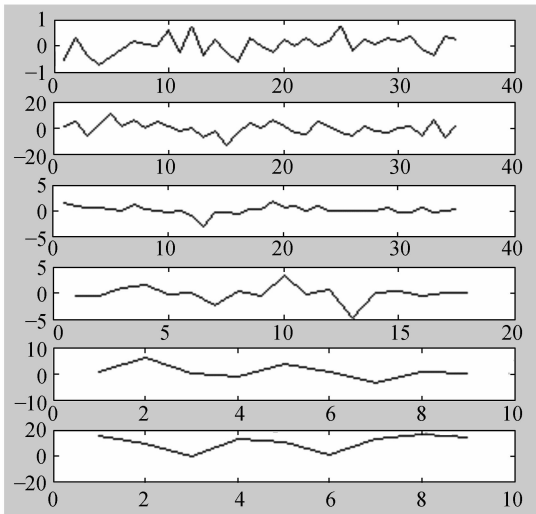


图 5 小波包分解系数 $d(1,1) \sim d(4,0)$
Fig. 5 Coefficients of WPD $d(1,1) \sim d(4,0)$

图 5 为 CAN 线干扰信号最佳树小波包分解系数值,从高频系数($d(1,1) \sim d(4,1)$)中可以看出其含有很强的高频干扰,是 CAN 总线上干扰的主要部分;而低频系数($d(4,0)$)基本保留了原始 CAN 总线信号的波形,但并不是无干扰情况下的正规矩形波,而是在信号跳变点过于平滑,也存在一定的干扰。但是这与高频系数中的干扰是完全不同的。

对于高频系数,采用基于 Stein 无偏似然估计原理的自适应阈值。对应每一个所选取的阈值,构造与之对应的风险函数并求其值,使风险值最小的就是所要选取的阈值。其具体过程为:

(1)把高频系数中的元素取绝对值,由小到大排列,然后各个元素平方,得到向量 $\mathbf{D} = [d_1, d_2, \dots, d_n]$,其长度 $n = (\frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \frac{1}{16})N$ 。

其中 N 为信号采样点数,本文中 $N = 303, n = 285$;

(2)对应向量 \mathbf{D} 的每一个元素 d_j 建立其风险函数:

$$R_k = [n - 2k - (n - k)d_k + \sum_{i=1}^k d_i] / n, \quad (10)$$

其中 $k = 1, 2, \dots, n, R_k$ 为矢量 \mathbf{D} 第 k 个元素的风险值;

(3)根据式(10),画出对应于不同 k 值的风险曲线(图 6),找出最小风险值与之对应的 k 值,则其阈值 λ 为:

$$\lambda = \sqrt{d_k}.$$

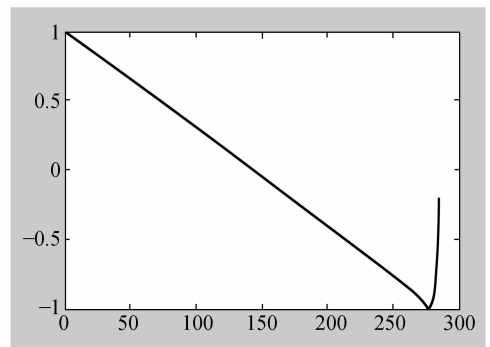


图 6 高频系数对应风险曲线
Fig. 6 Risk plot of high frequency coefficients

对于低频系数,传统的方法都是用已知噪声的统计特性来估计阈值^[6-16]。但是本文中 CAN 总线上的干扰是由控制器损坏引起的改变 CAN 总线间阻值引起的干扰,不同的控制单元故障引起的阻值改变是不同的。所以对这种干扰噪声是无法预知的,也就难以得到噪声的统计特性。

从图 5 小波低频系数 $d(4,0)$ 可以看出,干扰引起的主要变化是对波形斜率的改变,也就是系数中存在过小的值。本文提出采用低频系数单一频率和保持能量的双重考虑方法。基本过程如下:

- (1)把低频系数提取出来建立向量 \mathbf{A} ;
- (2)把向量 \mathbf{A} 中的每一个元素作为低频系数的阈值,并进行处理后,用低频系数重构信号并做 FFT(快速傅里叶变换);
- (3)画出阈值、频率和能量三维图(图 7),找出频率单一、能量损耗少的阈值点作为低频系数的阈值。

从图 7 中可以看出:当阈值超过 5 时,信号能量开始减少;阈值在 7-10 之间,频带开始变宽;阈

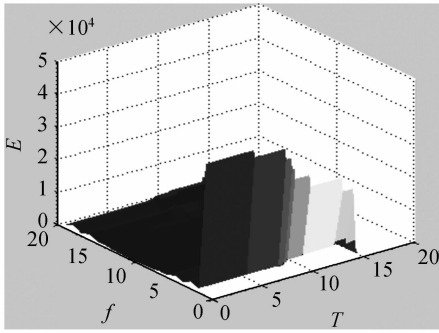


图 7 低频系数的阈值-频率-能量三维图

Fig. 7 Threshold-frequency-energy 3-D picture of low frequency coefficients

值在 10-15 之间能量集聚减少,频带加宽,干扰信号并未消除。因为正常 CAN 线上的信号应该是单一频率的矩形波,其频带应该是一条线而不是混叠在一起。

4 实验结果及分析

实验在轿车 CAN 总线间 (CAN-high 和 CAN-low) 接入已知内部电路故障 (节点间电阻 $\approx 200 \Omega$) 的变速箱控制单元。测试采用汽车诊断、测试和信息系统 VAS5051 读取 CAN 总线信号,利用泰克 TDS3012B 数字示波器 (采样速率 2.5 MS/s) 采集由于控制单元故障的带干扰信号,如图 1。对图 1 中的干扰信号 *coif* 小波 4 层分解,图 8~10 为采用不同方法消噪的对比图,其中跳变脉冲为原始 CAN 线上带干扰信号,平坦矩形波为消噪后的信号。

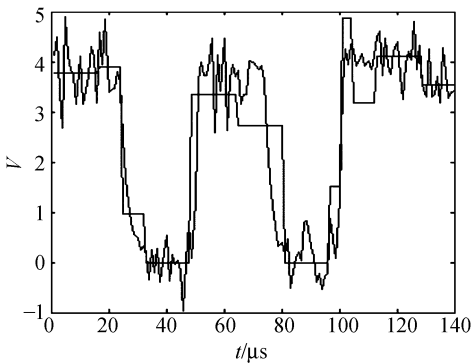


图 8 采用全局硬阈值消噪后的信号与原始信号
Fig. 8 Denoised signal of full hard threshold and original disturbed signal

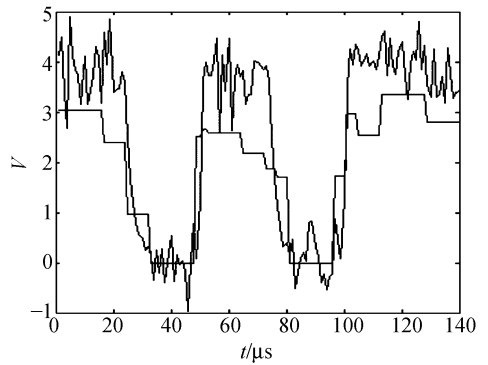


图 9 采用全局软阈值消噪后的信号与原始信号
Fig. 9 Denoised signal of full soft threshold and original disturbed signal

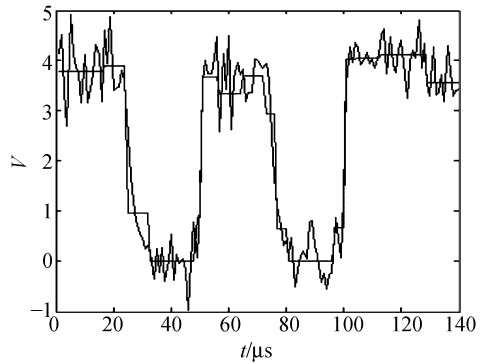


图 10 采用混合硬阈值消噪后的信号与原始信号
Fig. 10 Denoised signal of different thresholds and original disturbed signal

图 8~10 其信噪比分别为 25.3 dB、18.6 dB 和 34.6 dB。采用全局硬阈值消噪可以消除高频干扰成分,但是其低频系数信号失真大;软阈值方法趋于平滑,而 CAN 总线正常信号为矩形波,能量、波形失真大;图 10 中本文采取的混合阈值方法,很好地消除了高频系数中的高频干扰,而且保持了信号的低频波形和能量,失真小,信噪比较传统的方法提高了 36.7%,可以很好地读出 CAN 线上在控制单元故障情况下传输的信号。

5 结论

在采取最小 Shannon 熵的最佳树小波包对信号分解的基础上,对不同频带的系数采用不同的阈值算法,既保持了原始信号的特征又能将噪声消除,以便在控制器故障的情况下读取其产生的准确的故障码。尤其对于 CAN 线上产生干扰

的不可预知性,无法得到低频系数噪声的统计特性,针对CAN线上传输信号的特点,提出频率单一和能量保持的双重阈值选择方法,消噪结果表

明,该方法较传统的阈值消噪处理方法有效得多(信噪比提高1/3以上)。

参考文献:

- [1] 张禾,梅树才. 基于CAN总线的电动汽车实验平台[J]. 汽车电子,2005,(5):76-78.
ZHANG H,MEI SH C. The CAN bus based platform for electric vehicle experiments[J]. *Auto. Electron.*, 2005,(5):76-78. (in Chinese)
- [2] COPPOLA L,BUSO S. Application of Fourier and wavelet transforms to the identification of EMI noise sources in SMPs[J]. *IEEE Trans. Electromagn. Comp.*, 2003,47(7):160-168.
- [3] ANTONINI G. Wavelet packet-based EMI signal processing and source identification[J]. *IEEE Trans. Electromagn. Comp.*, 2001,43(2):140-148.
- [4] 赵未莲. 基于小波变换的阈值语音信号去噪[J]. 重庆科技学院学报,2005,(4):73-75.
ZHAO W L. Speech signal denoising of threshold based on wavelet transformation[J]. *J. Chongqing Tech. Coll.*, 2005,(4):73-75. (in Chinese)
- [5] 孙涛,黄天茂,李明. 小波包消噪提高小波网络故障识别性能[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,(4):561-564.
SUN T, HUANG T SH, LI M. Fault detection and isolation capability improvement of wavelet neural network basing on wavelet packet transform denoising[J]. *J. Harbin Inst. Technol.*, 2005,(4):561-564. (in Chinese)
- [6] MENG J L,QUAN P,ZHANG H C. Optimal threshold determination for multiscale product in wavelet denoising [C]. *Proceeding of ISCIT*,2005:570-573.
- [7] 杨亚青,钟丽萍. 去噪小波包能量法在水声信号识别中的应用[J]. 湛江海洋大学学报,2005,(2):69-72.
YANG Y Q, ZHONG L P. Application of the denoising wavelet-packet energy method to the recognition of underwater acoustic signal[J]. *J. Zhanjiang Ocean Univ.*, 2005,(2):69-72. (in Chinese)
- [8] 戎历霞. 基于最优小波包基的信号去噪算法[J]. 德州学院学报,2005,(4):72-75.
RONG L X. Signal denoising algorithm based on best wavelet packet groups[J]. *J. Dezhou Univ.*, 2005,(4):72-75. (in Chinese)
- [9] ZHAO ZH D. *Wavelet shrinkage denoising by generalized threshold function*[C]. 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC 2005:5501-5506.
- [10] HITTON M L,OGDEN R T. Data analytic wavelet threshold selection in 2-D signal denoising[J]. *IEEE Trans. Signal Process.*, 1997,45(2):496-500.
- [11] 李会方,俞卞章. 基于小波的多重分形图像去噪新算法[J]. 光学精密工程,2002,12(3):305-310.
LI H F, YU B Z. New wavelet-based algorithm for denoising of multifractal images[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,12(3):305-310. (in Chinese)
- [12] 孙俊喜,陈亚珠. 一种具有边缘保持特性的超声图像小波域阈值去噪新方法[J]. 光学精密工程,2002,10(5):429-433.
SUN J X, CHEN Y ZH. Novel speckle reduction for medical ultrasound images based on edge preservation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002,10(5):429-433. (in Chinese)
- [13] 林晓梅,李琳娜,牛刚. 基于小波边缘检测的图像去噪方法[J]. 光学精密工程,2004,12(1):88-93.
LIN X M, LI L N, NIU G. Image denoising based on wavelete detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1):88-93. (in Chinese)
- [14] 王欣,于晓,隋永新,等. 基于小波的图象处理在电晕检测中的应用[J]. 光学精密工程,2006,14(4):714-719.
WANG X, YU X, SUI YX, et al.. Application of multiwavelet based image processing to corona detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(4):714-719. (in Chinese)
- [15] 刘红,翟林培,高鹰,等. 提升小波变换在图像压缩中的应用[J]. 光学精密工程,2005,13(增):201-205.
LIU H, ZHAI P L, GAO Y, et al.. Lifting wavelet transform and its application in image compression[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(supp.):201-205. (in Chinese)
- [16] 陈升来,黄廉卿,郭静寰. 基于整型提升小波变换的图像处理及DSP实现[J]. 光学精密工程,2006,14(13):498-502.
CHEN SH L, HUANG L Q, GUO J H. Image processing based on integral lifting scheme and its implementation by DSP[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(3):498-502. (in Chinese)

作者简介:高印寒(1951—),男,吉林大学测试科学实验中心,教授,博士生导师,主要研究方向为先进制造技术及装备、测控技术及仪器和汽车电磁兼容性分析,发表论文60余篇。E-mail: gaoyinhan@sohu.com

(本栏目编辑 黄廉卿)