

# 非平稳背景噪声下声音信号增强技术\*

米建伟,方晓莉,仇原鹰

(西安电子科技大学 电子装备结构设计教育部重点实验室 西安 710071)

**摘要:**在电力电缆故障精确定位中声磁同步法由于具有精度高与抗干扰能力强的优点而得到广泛的应用,但放电声音信号的有效检测是其难点。由于小波包变换在检测正常信号中是否含有瞬态异常现象方面具有独特的优势,自适应滤波器具有对信号和噪声的先验知识需求少的特性以及遗传算法具有不依赖于具体问题的优点,提出了一种基于小波包变换分解信号、自适应滤波估计噪声与遗传算法寻优重构相结合的声音信号增强算法。实验研究表明,该算法精确性高、鲁棒性强,尤其适用于电缆故障点放电声不明显时声音信号提取的情况,从而解决了电缆故障精确定位中对背景噪声要求高、识别范围小的问题。

**关键词:**声音增强;小波包变换;自适应滤波;遗传算法;故障测距

**中图分类号:** TN912 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Enhancement technology for the audio signal with nonstationary background noise

Mi Jianwei, Fang Xiaoli, Qiu Yuanying

(Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** There are two advantages including high accuracy and strong free-interference for the magneto-acoustic synchronous method, which is a fine location method and is widely used. However, it is difficult to effectively detect the audio signal. Because the wavelet packet transform in detecting whether the normal signal contains a anomaly transient or not, an audio signal enhancement algorithm based on wavelet packet transform decomposing signal, adaptive filter estimating noise and genetic algorithm optimizing signal combined reconstructing signal is presented. The adaptive filter needs less for prior knowledge of the signal and noise, and genetic algorithm does not depend on the specific problems. Experimental results validate its high accuracy and strong robustness. In particular, it can be applied to the extracting audio signal under the condition that the cable fault discharge is weak. Therefore, it is a potential eligible solution to strict constraint of the background noise and narrow recognition range in pinpointing of cable failure location.

**Keywords:** audio enhancement; wavelet packet transform; adaptive filtering; genetic algorithm; fault location

## 1 引言

由于采用埋地电缆供电具有安全、可靠、不影响城市美观等诸多优点,所以其在配电系统中得到了广泛的应用。然而,随着铺设数量的增多与运行时间的增长,电缆故障发生概率也越来越高,并且因其埋在地下而难以快速确定故障点的准确位置,如果故障不能被及时修复,将会造成人民生活的极大不便和工业生产的巨大经济损

失。因此,精确的定位电力电缆故障点对快速修复电缆故障、保障人民生活方便与经济稳定增长具有重要意义。

目前的电缆故障定位方法中,声磁同步法是一种有效的方法<sup>[1]</sup>。声磁同步法的原理是利用磁场信号与声音信号的传播速度不同而产生的检测时间差来定位故障点的位置,其中磁场信号可利用电磁感应原理获得,不易被干扰,容易检测,而声音信号是由振动产生,且对于低阻型的故障其放电能量不能有效转化为机械振动,产生的声音信号小,加上电缆路径大多接近公路、轨道等,易受

周围环境噪声的影响,放电声音信号被淹没,性噪比低,所以声音信号的有效检测是声磁同步法中的难点。20世纪70~80年代随着声音信号数字化处理技术的迅猛发展,声音信号增强技术也迎来第一个研究热潮,产生了很多方法可以对声音信号进行降噪以达到增强与提取的目的,如谱减法<sup>[2]</sup>、维纳滤波法<sup>[3]</sup>。随后,从20世纪90年代至今,大量新算法及其改进算法不断涌现,如利用人工神经网络实现声音增强算法<sup>[4]</sup>、基于信号子空间的声音增强算法、噪声估计器、多通道声音增强算法等<sup>[5-9]</sup>,但大多数算法中都认为带噪声声音中噪声是零均值的平稳高斯白噪声,而实际工程中的各种噪声并不是平稳的白噪声那么简单,来源不尽相同,噪声特性各有差异<sup>[10]</sup>,要找到一种能完全解决实际工程中各种问题的算法是难以实现的。在深入分析了电力电缆故障点放电声特点的基础上,提出了一种基于小波包变换分解信号、自适应滤波估计噪声与遗传算法寻优重构相结合的声音信号增强算法来有效检测声音信号,并用该技术在工程实际中的应用效果证明了其有效性。

## 2 小波包变换和自适应滤波

近年来,小波技术日渐成熟,由于小波变换对奇异点的搜索具有独特的优势,已越来越多地应用在故障测距中<sup>[11]</sup>。自适应滤波器因能够自动调节自身参数,对信号和噪声的先验知识需求较少,在如信号增强、噪声消除和系统辨识等很多领域获得了广泛的应用<sup>[12]</sup>。

小波分析属于时频分析的一种。小波变换提出了变化的时间窗,解决了传统信号分析方法无法表示出信号局部时域特性的问题,其采用多分辨率分析<sup>[13]</sup>,在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力。对信号进行小波分解可以得到低通滤波信号与高通滤波信号,计算公式如式(1)和(2)所示,式(1)为低通滤波信号计算公式,式(2)表示高通滤波信号计算公式。

$$a_n^j = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h_{k-2n} a_k^{j-1} \quad (1)$$

$$d_n^j = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} g_{k-2n} a_k^{j-1} \quad (2)$$

式中: $h_k$ 和 $g_k$ 为多分辨率分析中的滤波器系数, $j$ 为分解尺度参数。

小波包分析是从小波分析延伸出的更加细致的信号分析方法,是对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解<sup>[14]</sup>。利用小波包变换的时频定位特性,可以在任意细节上分解信号,实现信号的时变谱分析,而且其对噪声不敏感,所以利用小波包变换进行声音信号的检测具有良好的效果。

自适应滤波方法是在卡尔曼滤波的基础上提出来的,其可以使自适应滤波系统的参数依据某种最优准则自动调整从而实现最优滤波。自适应滤波主要有两种基本的算法:递推最小二乘(recursive least square, RLS)算法和最小均方误差(least mean square, LMS)算法,LMS算法具有计算量小、易于实现的优点,因而在实践中被广泛应用<sup>[15]</sup>。本文提出的算法中所用到的自适应滤波器正是基于LMS算法,LMS算法的基本思想是按照滤波器输出信号与期望输出信号之间均方误差最小的原则,以最陡下降方法作为基本方法,自动调整滤波器自身参数,以适应信号和噪声未知的或随机变化的统计特性,从而使系统输出为有用信号的最佳估计,其迭代公式如式(3)~(5)所示。

$$y(k) = \sum_{i=1}^{M-1} W_i(k)x(k-i) \quad (3)$$

$$e(k) = d(k) - y(k) \quad (4)$$

$$W_i(k+1) = W_i(k) + 2\mu e(k)x(k-i) \quad (5)$$

式中: $x(k)$ 为自适应滤波器的输入, $y(k)$ 为自适应滤波器的输出, $d(k)$ 为参考信号, $e(k)$ 为误差, $W_i$ 为滤波器的权重系数, $\mu$ 为步长, $M$ 为滤波器阶数。

## 3 基于小波包变换、自适应滤波与遗传算法的声音信号增强算法

在对声音信号进行小波包分解时,分辨率为 $2^j$ ( $j$ 为整数), $2^0$ 表示原始信号,即原始信号在分解尺度参数为0时的分解变换为 $W_1^0$ ,然后对 $W_1^0$ 进行尺度参数为1的小波包分解,得到低通滤波信号 $W_2^1$ 和高通滤波信号 $W_3^1$ ,即小波包分解将原始信号分解为2个互不重叠的低频段和高频段信号。继续进行尺度参数为2的小波包分解,即可得到 $W_4^2$ 、 $W_5^2$ 、 $W_6^2$ 、 $W_7^2$ 这4个信号,其中 $W_4^2$ 、 $W_5^2$ 分别是信号 $W_2^1$ 再次分解的相对低频段信号和高频段信号, $W_6^2$ 、 $W_7^2$ 分别是信号 $W_3^1$ 再次分解的相对低频段信号和高频段信号,依次类推,原始信号进行 $k$ 尺度参数的小波包分解得到信号 $W_{2^k}^k$ 、 $W_{2^k+1}^k$ 、 $W_{2^k+2}^k$ 、 $\dots$ 、 $W_{2^{k+1}-1}^k$ 。随着分解尺度的递增,频带被分解为更窄的组成部分,分辨率依次提高,从而在任意细节上分析信号。为使分解得到的子信号能反映出原始信号的基本特征,以及考虑所采集的电缆故障放电声音信号点的密度,分解尺度参数一般选为3~7。

利用小波包分解的这一特性对采集到的电缆故障点放电声音混合信号(以下简称混合信号)进行分解。由于紧支撑正交小波具有很好的消噪效果,其中应用较广泛的是Daubechies小波,简称为“dbN”, $N$ 是小波的阶数。本文采用Daubechies小波对混合信号进行小波包分解,但小波的阶数越低,分解信号中调制干扰信号就越

多,而阶数越高,计算越复杂,所以应选取合适阶数的小波,一般选择阶数是15~25。本文中选择的为“db16”,即阶数是16的Daubechies小波对混合信号进行 $k$ 尺度参数分解,可以将其分解为 $2^k$ 个子信号,将这 $2^k$ 个子信号进行重构得到信号 $x_0^k, x_1^k, x_2^k, \dots, x_{2^k-1}^k$ ,然后对这 $2^k$ 个重构信号随机进行组合,从而可以得到 $2^{2^k}$ 个组合信号,将每个组合信号与混合信号的背景噪声进行比较,判断哪一个更接近于背景噪声;接着将混合信号与最接近其背景噪声的组合信号相减即可分离出混合信号中的冲击放电声。因此为了较准较快地判断出经小波变换和随机组合得到的 $2^{2^k}$ 个组合信号中与混合信号的背景噪声最接近的组合信号,需要采用工程优化设计方法。传统的优化方法主要有目标加权法、约束法和枚举法,但面对规模较大与复杂难解问题时,传统优化方法收敛速度慢,且极易陷入局部最优解,而现代优化算法中遗传算法是对整个搜索空间进行并行搜索,在搜索过程中可对搜索空间的指示进行自动地获取与累积,并自适应地调控搜索过程,不同于传统的依赖梯度信息的优化设计方法,它具有适用范围广、搜索速度快、对问题的连续性和导数信息无要求的优点,是一种模拟生物界中的自然进化的全局随机搜索算法。由于本文优化对象为 $2^k$ 个信号的随机排列信号,所以采用二进制数据串对优化对象进行描述,遗传算法的二进制编码正符合这一描述方式,并且二进制编码实现技术与运算规则简单,可以简化计算机内部结构,可靠性高,抗干扰能力强,适于在嵌入式系统中应用,鉴于此,本文采用遗传算法作为选择最优随机组合信号的方法。

遗传算法的优化过程是采用一系列编码位串来描述问题的候选解,然后根据“适者生存”原则寻找最优解,具体包括编码、产生初始种群、适应度计算、选择、交叉和变异这5个步骤<sup>[16]</sup>。

1) 编码:本文设定的编码方式是二进制编码,即候选解的形式是一个0、1数据串,也称为染色体或个体。信号经过小波包分解并重构得到 $2^k$ 个重构信号,所以染色体的长度是 $2^k$ 位,第 $\lambda$ 位数据如果是1,则代表 $2^k$ 个重构信号随机进行组合后的组合信号中包含信号 $x_\lambda^k$ ,为0则代表不包含该信号,这样 $2^k$ 位染色体就可以完全表示出 $2^k$ 个信号的随机组合。

2) 产生初始种群:随机产生 $N$ 个 $2^k$ 位的染色体构成遗传算法的初始种群,其种群规模为 $N$ 。种群数目影响遗传算法的最终结果和迭代效率,当种群数目太少时,算法优化性能不高;种群数目过多则意味着复杂度增加、收敛较慢,将显著削弱算法的实时性,一般取10~160<sup>[17]</sup>。

3) 适应度计算:遗传算法采用适应度值评价个体的优劣程度。本算法中适应度值基于每个个体所表示的重构信号与混合信号背景噪声的2范数的平方所构造,量

化了它们之间的相似程度。

4) 选择:依据适应度值按照一定的选择规则,从当前种群中选出可以进入下一代的个体。选择规则通常有轮盘赌、锦标赛等<sup>[18]</sup>。由于算法中采用二进制编码,为了提高算法效率,本文采用锦标赛法。

5) 交叉和变异:对进入下一代的个体在保留最优个体的情况下需要进行交叉和变异操作,以提高种群的多样性产生适应度更强的个体。交叉是在种群中随机选择两个个体交换部分数据位,变异是随机地改变染色体中的某一位的值,具体为根据特定随机函数的取值,使该数位由0变为1或由1变为0。

在遗传算法适应度计算中要用到混合信号的背景噪声,但其是未知信号。实际工程应用中的背景噪声并不是像理论上零均值的平稳高斯白噪声那么简单,而是来源众多、特性各异,且是随周围环境变化的非平稳信号,因而混合信号的背景噪声不能由平稳噪声所代替。但由于在相同环境下,相近时间段内的背景噪声变化较小,具有较强的相关性,所以可将混合信号与其前一时间刻背景噪声分别作为自适应滤波器的参考信号与输入信号,基于误差最小原则经过自适应滤波后得到混合信号的背景噪声,然后将其运用到适应度计算中。

本文提出的基于小波包变换分解信号、自适应滤波估计噪声与遗传算法寻优重构相结合的声音信号增强算法,其步骤可简述为采集混合信号 $x(t)$ 与前一时间刻噪声 $d(t-1)$ ,将两者通过自适应滤波器得到与 $x(t)$ 中噪声最相似的信号作为遗传算法适应度计算中要用到的 $x(t)$ 的背景噪声,并对 $x(t)$ 进行初步消噪, $k$ 层小波包分解,然后重构得到 $2^k$ 个子信号,将其进行组合,最后经过遗传算法得到与 $x(t)$ 中背景噪声最接近的组合信号,将 $x(t)$ 与最接近其背景噪声的组合信号相减即可分离出 $x(t)$ 中的冲击放电声。

## 4 算法实验验证

在实验现场用15~30 kV直流负高压对电缆故障点完全击穿,使故障点产生冲击放电。由于采样点距离故障点越近,放电声信噪比越高,为了验证信噪比较低情况下算法的有效性,在离电缆故障点约4 m远处以8 kHz采样频率对混合信号进行了采集,其波形如图1所示,从图中可以看出冲击放电声完全淹没在噪声中。

首先对混合信号进行初步消噪,本文采用的消噪方法是用母小波“sym8”(Symlets小波系中的一种小波)对信号进行3层分解的软阈值消噪,消噪后的混合信号波形如图2所示。

之后用母小波“db16”对混合信号进行小波包分解,分解尺度参数选用5层,分解并重构后形成32个重构信

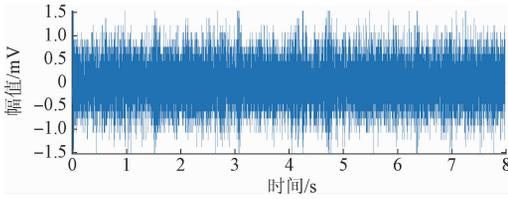


图1 混合信号

Fig. 1 The mixed signal

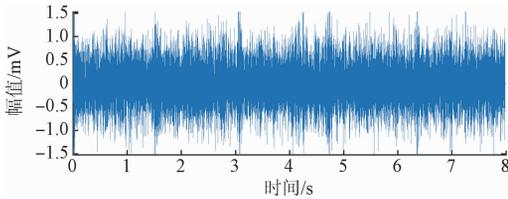


图2 消噪后的混合信号

Fig. 2 The mixed signal after noise elimination

号,接着针对这些重构信号进行遗传算法编码,定义染色体长度为32位,每一位对应着一个重构信号,如果包含这一重构信号,则这一位为1,反之为0。完成遗传算法编码之后按照本文算法流程继续操作直到达到最大迭代次数。生成的初始种群大小为20,交叉概率为0.90,变异概率为0.08,最大迭代次数为200。

根据所提出的算法对实际工程中电缆故障放电声音混合信号进行检测,分离出冲击放电声音信号,得到的结果如图3、4所示。本例中采集的混合信号中的放电声几乎全部被环境噪声所掩盖,信噪比低,此时用传统方法将很难准确定位故障点。利用所提出的算法对其进行处理,从图4可以看出,得到一个周期为1.6s,幅值为噪声平均幅值2倍的信号,符合冲击放电声的周期性与瞬间高能量性,从而说明冲击放电声被很清晰地分离出来。

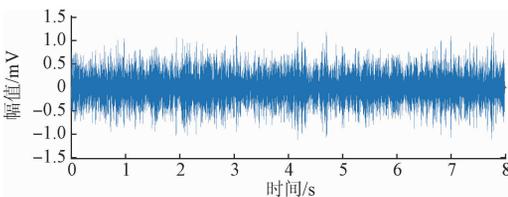


图3 重构出的混合信号的背景噪声

Fig. 3 The reconstructed background noise of the mixed signal

为了验证算法的有效性,分别在工厂附近约50m处和马路边人行道上、离电缆故障点约4~6m远处对电缆

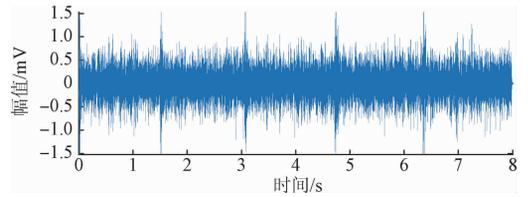


图4 分离出的冲击放电声音信号

Fig. 4 The separated impulse discharge sound signal

故障放电混合声音进行了采集与处理(采样率对实验结果影响不大可忽略讨论),每种工况下取10组处理结果的均值,表1为具体实验结果,其中倍数代表分离出的冲击放电声幅值为噪声平均幅值的倍数。从表1中可以看出,冲击放电声音幅值均为噪声平均幅值的2倍左右,说明即使在工厂附近或马路边等恶劣的环境中,冲击放电声也可以被很清晰地分离出来,其中采集点离电缆故障点距离越近和采集混合信号与采集其前一时刻噪声的周围环境状况越相似,冲击放电声音幅值为噪声平均幅值的倍数越大。实验结果证明本文提出的算法在检测实际工程中电缆故障放电声信号方面具有较好的效果,基本解决了过去算法无法有效提取低信噪比或含有复杂环境噪声信号中的放电声的问题<sup>[19]</sup>。

表1 实验结果

Table 1 the experimental results

地点	工厂附近约50m处					马路边人行道上				
距故障点 距离/m	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0
倍数	2.2	2.1	2.0	1.8	1.7	2.3	2.2	2.0	1.9	1.7

## 5 结论

在深入分析了故障点放电声特点的基础上,本文采用基于小波包变换分解信号、自适应滤波估计噪声与遗传算法寻优重构相结合的声音信号增强算法来有效检测声音信号。实验结果证明所提出的算法具有如下优点。

- 1) 精确性高。由于算法中小波包变换可以灵敏地检测信号中的异常现象从而对放电声的估计精确度更高;
- 2) 鲁棒性强。算法利用自适应滤波的自适应特性与遗传算法不依赖于具体问题的优点,减少了对环境的依赖性。

所提算法不仅可以应用于电缆故障点放电声明显的情况,还可以应用于放电声不明显的情况,基本解决了过去算法无法有效提取信噪比低或含有复杂环境噪声信号中的放电声的问题,进而结合声磁同步法可以

解决电缆故障精确定位中对背景噪声要求高、识别范围小的问题。

## 参考文献

- [1] 鹿洪刚,覃剑,陈祥训,等. 电力电缆故障测距综述[J]. 电网技术, 2004, 28(20): 58-63.  
LU H G, QIN J, CHEN X X, et al. Overview of power cable fault location [J]. Power System Technology, 2004, 28(20): 58-63.
- [2] BOUCHIKHI E H E, CHOQUEUSE V, BENBOUZID M E H. Current frequency spectral subtraction and its contribution to induction machines' bearings condition monitoring [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 135-144.
- [3] EI-FATTAH M A A, DESSOUKY M I, ABBAS A M, et al. Speech enhancement with an adaptive Wiener filter[J]. International Journal of Speech Technology, 2014, 17(1): 53-64.
- [4] POTAMITIS I, FAKOTAKIS N D, KOKKINAKIS G. Impulsive noise suppression using neural networks[C]. IEEE International Conference on Acoustics, 2000: 1871-1874.
- [5] 蔡宇,原建平,侯朝焕. 基于两级梳状滤波的语音谐波增强[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(1): 26-31.  
CAI Y, YUAN J P, HOU CH H. Harmonic enhancement of speech signal using comb filtering[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(1): 26-31.
- [6] MARTIN R. Noise power spectral density estimation based on optimal smoothing and minimum statistics[J]. IEEE Transactions on Speech Audio Processing, 2011, 9(5): 504-512.
- [7] COHEN I. Noise spectrum estimation in adverse environments: improved minima controlled recursive averaging [J]. IEEE Transactions on Speech Audio Processing, 2003, 11(5): 466-475.
- [8] HU Y, LOIZOU P C. Speech enhancement based on wavelet thresholding and multitaper spectrum[J]. Speech and Audio Processing, 2004, 12(1): 59-67.
- [9] TAGHIA J, MOHAMMADIHA N, SANG J, et al. An evaluation of noise power spectral density estimation algorithms in adverse acoustic environments[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2011: 4640-4643.
- [10] WEI J Q, DU L M, YAN ZH L, et al. Improved Kalman filter-based speech enhancement with perceptual post-filtering [J]. Chinese Journal of Electronics, 2004, 13(2): 300-304.
- [11] ASSAF Y. Multi-resolution wavelets analysis approach for the recognition of concurrent control chart patterns [J]. Quality Engineering, 2005, 17(1): 11-21.
- [12] RATHGEB C, BREITINGER F, BUSCH C. Alignment-free cancelable iris biometric templates based on adaptive bloom filters [C]. IEEE International Conference on Biometrics Compendium, 2013: 1-8.
- [13] SHETA E, FRENDI A. Wavelet-based adaptive multiresolution methodology for airframe noise prediction [C]. 11th Aiaa/ceas Aeroacoustics Conference (26<sup>th</sup> Aiaa Aeroacoustics Conference), 2005: 23-25.
- [14] 王那,郑德忠. 结点阈值小波包变换语音增强新算法[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(5): 952-955.  
WANG N, ZHENG D ZH. New algorithm for speech enhancement using node threshold wavelet packet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(5): 952-955.
- [15] 宁小玲,刘忠,冯成旭,等. 快速收敛变换域自适应滤波算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(3): 240-245.  
NI X L, LIU ZH, FENG CH X, et al. Fast convergence transform domain adaptive filter algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(3): 240-245.
- [16] YAO R, WANG Y R, YU SH L, et al. Online evolution of the algorithm level digital hardware system using evolvable core [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2009, 30(1): 188-192.
- [17] PONNAMBALAM S G, JAWAHAR N, KUMAR B. Estimation of optimum genetic control parameters for job shop scheduling [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 19(3): 224-234.
- [18] TANG K Z, SUN T K, YANG J Y. An improved genetic algorithm based on a novel selection strategy for nonlinear programming problems [J]. Computers and Chemical Engineering, 2011, 35(4): 615-621.
- [19] 卢志茂,孙美玲,张春祥,等. 基于极值域均值模式分解的语音增强方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(7): 1680-1684.  
LU ZH M, SUN M L, ZHANG CH X, et al. Speech enhancement method based on extremum field mean mode decomposition [J]. Systems Engineering and Electronic, 2011, 33(7): 1680-1684.

## 作者简介



米建伟,分别在 1998 年和 2005 年于西安电子科技大学获得学士学位和硕士学位,现为西安电子科技大学副教授,主要研究方向为数字信号处理、智能检测与控制。

E-mail:jwmi@xidian.edu.cn

**Mi Jianwei** received his B. Sc. degree in 1998 and his M. Sc. degree in 2005 from Xidian University, respectively. Now he is associate professor in Xidian University. His main research interests include digital signal processing, intelligent detection and control.



方晓莉,2015 年于西安电子科技大学获得学士学位,现为西安电子科技大学硕士生,主要研究方向为嵌入式控制与检测技术。

E-mail:xiaoli\_fang@yeah.net

**Fang Xiaoli** received her B. Sc. degree in 2015 from Xidian University. Now she is degree master student in Xidian University. Her main research interests include embedded control and detection technology.



仇原鹰,分别在 1985 年和 1987 年于西北工业大学获得学士学位和硕士学位,2002 年于西安电子科技大学获得博士学位,现为西安电子科技大学教授,主要研究方向为机械 CAD/CAE/CAM 和机电一体化。

E-mail:yyqiu@mail.xidian.edu.cn

**Qiu Yuanying** received his B. Sc. degree in 1985 from and his M. Sc. degree in 1987 from Northwestern Polytechnical University, respectively, and his Ph. D. degree in 2002 from Xidian University. Now he is a Professor in Xidian University. His main research interests include mechanical CAD / CAE / CAM and mechatronics.