

一种用于窄带主动噪声控制系统的 性能优化算法

姜守达, 薄 中, 孙 超

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 针对窄带主动噪声控制(NANC)系统的收敛问题, 提出一种变遗忘因子变步长的滤波-X 加权累加最小均方算法. 本文在滤波-X 加权累加最小均方算法基础上, 利用互相关的误差信号构建变遗忘因子策略, 并通过遗忘因子构造了变步长策略使系统获得更优的参数值, 更好的平衡算法的收敛速度、跟踪能力及稳态误差之间的矛盾, 同时增强了抗干扰能力, 有效提升算法的整体性能. 仿真实验表明本文算法在平稳和非平稳环境下具有更好的性能.

关键词: FXLMS; FXRLS; 窄带主动噪声控制; 变步长; 收敛速度

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)12-2513-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.12.025

A Performance Optimized Algorithm for NANC Systems

JIANG Shou-da, BO Zhong, SUN Chao

(Automatic Test and Control Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, 150001, China)

Abstract: In view of the convergence of narrowband active noise control (NANC) algorithm, a novel adaptive filtered-X weighted accumulated least-mean-square algorithm termed variable forgetting-factor and variable step-size (VFVS-FXWALMS) is proposed for NANC systems. On the basis of FXWALMS algorithm, a scheme using variable forgetting-factor and variable step-size is proposed to obtain better step-size and forgetting-factor values, which can not only better solve the contradiction among convergence, tracking capabilities and steady-state error of the algorithm, but also enhance the anti-interference capability of the system. Thus, the proposed algorithm improves considerably the overall performance of the system. Computer simulations are conducted to demonstrate the superior performance of the proposed algorithm in both stationary and non-stationary scenarios.

Key words: FXLMS; FXRLS; narrowband active noise control (NANC); variable step-size; convergence speed

1 引言

近 20 年来, 对于主动噪声控制(Active Noise Control, ANC)的研究吸引了大量的关注, 并取得许多成功应用^[1-5]. 很多实际的噪声往往由一些旋转机器产生, 具有正弦特性的低频谐波噪声, 如送风机或电机旋转产生的噪声, 采用窄带主动噪声控制(Narrowband Active Noise Control, NANC)系统^[5]能够有效消除这类噪声.

在 NANC 系统中, 自适应算法是决定系统性能的核心部分. 基于有限脉冲响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器的滤波-X 最小均方误差(Filtered-X Least Mean Square, FXLMS)算法^[6], 因结构简单, 计算复杂度低而得到广泛应用, 但存在着收敛速度与稳态性能之间的矛盾. 为缓解此问题, 文献[7]提出了滤波-X 递归最小二

乘法(Filtered-X Recursive Least Square, FXRLS)算法, 提高了系统的收敛速度, 但算法的跟踪能力差, 并引入较大运算量. 文献[8]提出了滤波-X 加权累加最小均方(Filtered-X Weighted Accumulated Least Mean Square, FXWALMS)算法, 从新的角度给出缓解算法的收敛速度、跟踪性能和稳态误差三者之间矛盾的可行方案, 但算法受固定步长的限制, 无法改进稳态性能. 文献[9]提出一种变步长 FXLMS (Variable Step-Size FXLMS, VSS-FXLMS)算法, 较好地平衡了三者之间的矛盾, 但变步长策略造成系统抗干扰能力减弱.

本文在 FXWALMS 算法基础之上, 提出一种用于 NANC 系统的性能优化算法. 首先利用互相关误差信号实现变遗忘因子策略, 增强了系统抗干扰能力, 然后通过遗忘因子构造了变步长策略, 进一步提高了算法的稳

态性能.因此,提出的变遗忘因子变步长的 FXWALMS 算法 (Variable Forgetting-factor and Variable Step-size FXWALMS, VFVS-FXWALMS) 算法能够获得更优的遗忘因子和步长参数值,更好的平衡了收敛速度、跟踪能力及稳态失调之间的矛盾,同时增强了抗干扰能力;从而有效提升 NANC 系统的整体性能.

2 传统窄带主动噪声控制系统

图 1 为传统的 NANC 系统的结构图^[6].初级噪声信号模型 $p(n)$ 可表示成:

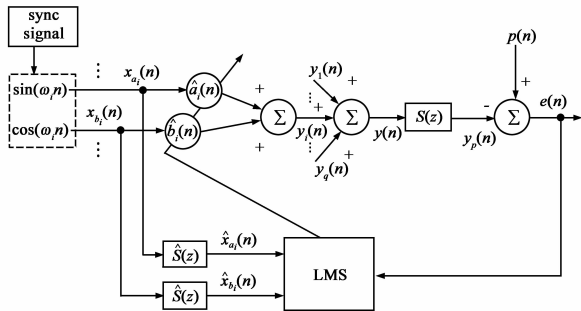


图1 传统的窄带主动噪声控制系统(第*i*通道)

$$p(n) = \sum_{i=1}^q [a_i \cos(\omega_i n) + b_i \sin(\omega_i n)] + v_p(n) \quad (1)$$

其中 q 是初级噪声中的频率个数, ω_i 是第 i 成份的频率, $v_p(n)$ 是均值为零方差为 σ_p^2 的高斯白噪声. $\{a_i, b_i\}_{i=1}^q$ 是 $p(n)$ 中各个频率成分的离散傅里叶系数 (Discrete Fourier Coefficient, DFC). 系统的参考信号可表示为:

$$x_{a_i} = \cos(\omega_i n), x_{b_i} = \sin(\omega_i n) \quad (2)$$

为避免声反馈问题,常利用非声学传感器(如转速计)获取同步信号^[5],再由噪声频率与同步信号之间的线性关系得到参考信号频率,并利用函数发生器产生参考信号. $y(n)$ 为次级声信号,可表示为:

$$y(n) = \sum_{i=1}^q y_i(n) = \sum_{i=1}^q [\hat{a}_i(n) x_{a_i}(n) + \hat{b}_i(n) x_{b_i}(n)] \quad (3)$$

其中 $\{\hat{a}_i, \hat{b}_i\}_{i=1}^q$ 是次级声信号各频率 DFC 的估计,其更新可以通过一些自适应算法.基于 FXLMS 算法的估计迭代公式可表示为如下:

$$\hat{a}_i(n+1) = \hat{a}_i(n) + \mu_i e(n) \hat{x}_{a_i}(n) \quad (4)$$

$$\hat{b}_i(n+1) = \hat{b}_i(n) + \mu_i e(n) \hat{x}_{b_i}(n) \quad (5)$$

其中 μ_i 为步长. $\{\hat{x}_{a_i}, \hat{x}_{b_i}\}_{i=1}^q$ 为滤波参考信号,表示如下:

$$\hat{x}_{a_i}(n) = \sum_{j=0}^{\hat{M}-1} \hat{s}_j x_{a_i}(n-j) \quad (6)$$

$$\hat{x}_{b_i}(n) = \sum_{j=0}^{\hat{M}-1} \hat{s}_j x_{b_i}(n-j) \quad (7)$$

式中 \hat{M} 和 \hat{s}_j 分别是次级通道估计 $\hat{S}(z)$ 的 FIR 滤波器阶数和系数. $e(n)$ 为整个 NANC 系统的误差信号可表示为:

$$e(n) = p(n) - \sum_{j=0}^{M-1} s_j \left[\sum_{i=1}^q y_i(n-j) \right] \quad (8)$$

式中 M 和 s_j 分别表示真实次级通道 $S(z)$ 的 FIR 滤波器阶数和系数.

3 变遗忘因子变步长的 FXWALMS 算法

3.1 滤波-X 加权累加最小均方算法

传统的 FXLMS 算法以瞬时均方误差为代价函数,即 $J(n) = e^2(n)$. 利用加权累加均方误差修改代价函数^[8],定义如下:

$$J(n, \hat{a}_i, \hat{b}_i) = \sum_{j=1}^n \lambda_i^{n-j} e^2(j) \quad (9)$$

式中 λ_i 称为遗忘因子,且满足 $0 \leq \lambda_i < 1$. 利用梯度搜索算法,次级声信号的 DFC 的估计迭代公式可写为

$$\hat{a}_i(n+1) = \hat{a}_i(n) + \mu_i e(n) \hat{x}_{a_i}(n) + \lambda_i [\hat{a}_i(n) - \hat{a}_i(n-1)] \quad (10)$$

$$\hat{b}_i(n+1) = \hat{b}_i(n) + \mu_i e(n) \hat{x}_{b_i}(n) + \lambda_i [\hat{b}_i(n) - \hat{b}_i(n-1)] \quad (11)$$

与 FXLMS 算法相比,FXWALMS 算法通过增加一个附加项,有效的使用了过去的 DFC 的变化量加速系统的收敛.但是,较大的遗忘因子会造成较大的稳态误差^[10].同时,算法的性能也受到固定步长的限制.

3.2 变遗忘因子变步长策略

针对固定遗忘因子和步长存在的不足,通过设定合理的规则对它们进行在线更新.因此,次级声信号的 DFC 的估计迭代可重新写为:

$$\hat{a}_i(n+1) = \hat{a}_i(n) + \mu_i(n) e(n) \hat{x}_{a_i}(n) + \lambda_i(n) [\hat{a}_i(n) - \hat{a}_i(n-1)] \quad (12)$$

$$\hat{b}_i(n+1) = \hat{b}_i(n) + \mu_i(n) e(n) \hat{x}_{b_i}(n) + \lambda_i(n) [\hat{b}_i(n) - \hat{b}_i(n-1)] \quad (13)$$

式中 $\lambda_i(n)$ 和 $\mu_i(n)$ 分别是时变的遗忘因子和步长,其中 $\lambda_i(n)$ 自适应更新公式定义如下:

$$\lambda_i(n) = \alpha_i \lambda_i(n-1) + \beta_i e(n) e(n-1), 0 \leq \lambda_i(n) < 1 \quad (14)$$

式中 $0 < \alpha_i < 1$ 和 $0 < \beta_i$ 以保证算法获得好的性能.其中 β_i 控制着 $\lambda_i(n)$ 的收敛速度,参数 α_i 通常选取为接近 1 的值.利用互相关的误差信号更新 $\lambda_i(n)$ 主要有两个目的:首先, $e(n)e(n-1)$ 能够很好的反应系统收敛的变化情况;其次,它能够减少干扰噪声对 $\lambda_i(n)$ 更新的影响.通过上式可以发现,在自适应早期或误差信号发生突变时误差信号能量较大,造成 $\lambda_i(n)$ 增加,提高系统

的收敛速度和追踪能力;当系统到达稳态阶段时,误差信号收敛到较小的值,会引起 $\lambda_i(n)$ 变小,从而减小增加项对系统稳态性能的影响。

根据 $\lambda_i(n)$ 的取值范围的特征,建立步长因子与遗忘因子之间的函数关系:

$$\mu_i(n) = \lambda_i(n)\mu_{i,\max} + \mu_{i,\min} \quad (15)$$

式中 $\mu_{i,\max}$ 和 $\mu_{i,\min}$ 是通过实验来确定,选择的数值即要保证收敛不能太慢也不能造成系统不稳定.此外, $\mu_i(n)$ 的变化是由 $\lambda_i(n)$ 构成,因此, $\mu_i(n)$ 的变化具有和 $\lambda_i(n)$ 相似的特点,同样能够减少干扰噪声对 $\mu_i(n)$ 的干扰,增强系统的抗噪声能力,有效提升 NANC 系统的整体性能。

4 对比实验与分析

本节通过仿真实验来验证提出算法的性能.并与现有的 FXLMS^[6]、FXRLS^[7] 以及变步长 VSS-FXLMS 算法^[9] 在不同的实验条件进行比较。

仿真中初级噪声信号包含三个频率分量 ($q=3$), 分别为 $\omega_1=0.1\pi$, $\omega_2=0.2\pi$ 和 $\omega_3=0.3\pi$, 它们相应的 DFC 分别设置为 $a_1=2.0$, $b_1=-1.0$, $a_2=0.1$, $b_2=-0.5$, $a_3=0.5$ 以及 $b_3=0.1$. 附加白噪声 $v_p(n)$ 的均值为零方差为 0.1. $\hat{S}(z)$ 是基于 LMS 算法的自适应系统辨识的方法离线获得^[6]. 在每个仿真条件下,仿真结果通过 100 次蒙特卡洛法获得。

4.1 平稳噪声环境

在仿真中, $S(z)$ 是通过 Matlab 函数 (FIR1) 产生的低通滤波器,其截止频率为 0.4π , 滤波器阶数 $M=64$, $\hat{S}(z)$ 阶数 $\hat{M}=60$. 为了在相同稳态误差条件下比较性能,各算法参数配置如下:FXLMS 算法的各频率成分的步长 $\mu_i=0.0025$; FXRLS 算法的遗忘因子 $\lambda_i=0.999$;

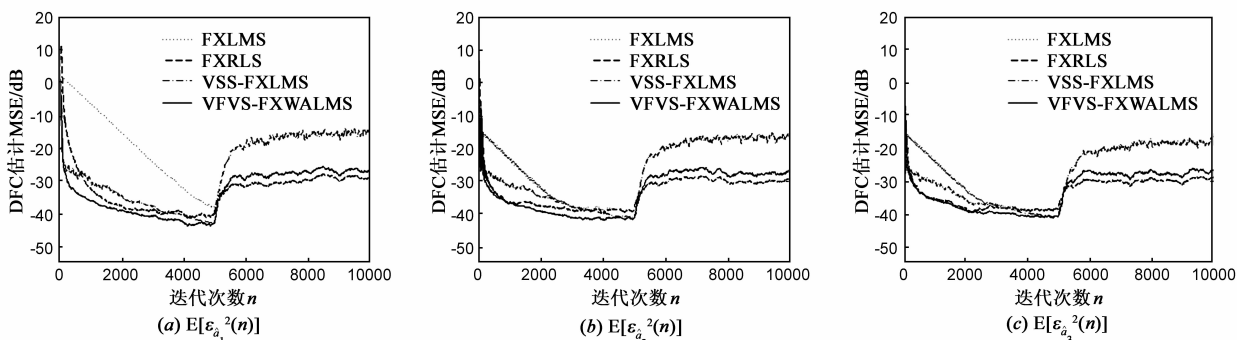


图2 四种算法的DFC的估计MSE收敛曲线比较

4.2 非平稳噪声环境

仿真在非平稳初级噪声环境下比较相关算法性能,并且 $S(z)$ 采用文献[5]提供的真实的实验数据,其滤波器阶数 $M=24$; $\hat{S}(z)$ 的阶数 $\hat{M}=20$. 为了实现一个非平稳初级噪声,在自适应过程的中间时刻重新设置初级噪声中各频率成分的 DFC,使其产生突发跳变从而

VSS-FXLMS 算法的初始步长 $\mu_{a_i}(1) = \mu_{b_i}(1) = 0.02$, 其它相关值为 $\xi_{a_i} = \xi_{b_i} = 0.999$, $\eta_{a_i} = \eta_{b_i} = 0.0002$; 提出算法的初始遗忘因子 $\lambda_i(1) = 0.5$, $\alpha_i = 0.995$, $\beta_i = 0.0015$, $\mu_{i,\max} = 0.02$, $\mu_{i,\min} = 0.0012$. 同时,为比较各算法的抗干扰性能,在系统收敛到稳态后,一个均值为零方差为 1 的高斯白噪声 $v(n)$ 添加到次级声源 $y(n)$ 中,这种情况广泛出现于在线次级通道建模应用中^[11].

图 2 显示各算法的初级噪声中 $\hat{a}_i(n)$ 估计 MSE (Mean Square Error) 之间的性能比较,即 $E[\varepsilon_{\hat{a}_i}^2(n)] = E[(\hat{a}_{i,\text{opt}} - \hat{a}_i(n))^2]$, $\hat{b}_i(n)$ 估计 MSE 的比较 ($E[\varepsilon_{\hat{b}_i}^2(n)] = E[(\hat{b}_{i,\text{opt}} - \hat{b}_i(n))^2]$) 与图 2 非常相似,因此本文省略此部分;其中,常量 $\hat{a}_{i,\text{opt}}$ 和 $\hat{b}_{i,\text{opt}}$ 是目标噪声完美抵消时的最优 DFC 值,可通过文献[6]中的公式(23)求解。

从图 2 中可以看出,在相同的稳态误差下,提出的算法收敛性能最好,FXLMS 算法收敛性能最差.当系统中加入干扰噪声 ($n=5000$),噪声影响了估计 DFC 的迭代,造成各算法的稳态误差都有所增加.此外,干扰噪声对算法中参数优化策略也产生影响.FXLMS 和 FXRLS 算法由于使用的是固定参数策略,不受到干扰噪声的影响,因此,不会进一步增加稳态误差,表现出最好的抗干扰性.与 VSS-FXLMS 算法的步长策略相比,提出算法优化策略受到干扰噪声的影响较小,如图 3(a)和图(b)所示,当加入干扰噪声,遗忘因子和步长曲线仅有微小的增加,造成稳态误差也略微增加;抗干扰性能与 FXLMS 和 FXRLS 算法相似;而 VSS-FXLMS 算法的变步长策略受到干扰噪声影响较大,如图 3(c)所示,造成 VSS-FXLMS 算法产生更大的稳态误差,表现出更差的鲁棒性。

产生非平稳特性,设置如下: $a_1 = -2.0$, $b_1 = 1.0$, $a_2 = -1.0$, $b_2 = 0.5$, $a_3 = -0.5$, $b_3 = -0.1$. 为在相同的稳态误差条件下比较性能,各算法的参数配置如下: FXLMS 算法的各频率成分步长 $\mu_i = 0.0003$; FXRLS 算法的遗忘因子 $\lambda_i = 0.999$; VSS-FXLMS 算法的初始步长 $\mu_{a_i}(1) = \mu_{b_i}(1) = 0.006$, $\xi_{a_i} = \xi_{b_i} = 0.999$, $\eta_{a_i} = \eta_{b_i} =$

0.000004; 提出算法的初始遗忘因子 $\lambda_i(1) = 0.4$, $\alpha_i = 0.995$, $\beta_i = 0.0015$, $\mu_{i,\max} = 0.012$, $\mu_{i,\min} = 0.00016$.

图 4 显示的性能比较与图 2 所示相同. 从图中可以看出, 在迭代的前半部分, 提出的算法和 FXRLS 算法具有相似的收敛性能, 都优于 VSS-FXLMS 算法, 而 FXLMS

算法最差. 当初级噪声信号发生跳变时 ($n = 8000$), 提出的算法能够以更快的速度重新收敛. 因此, 与 VSS-FXLMS 算法相比, 不论在初始收敛速度, 还是在跟踪能力方面, 提出的算法都有所改善.

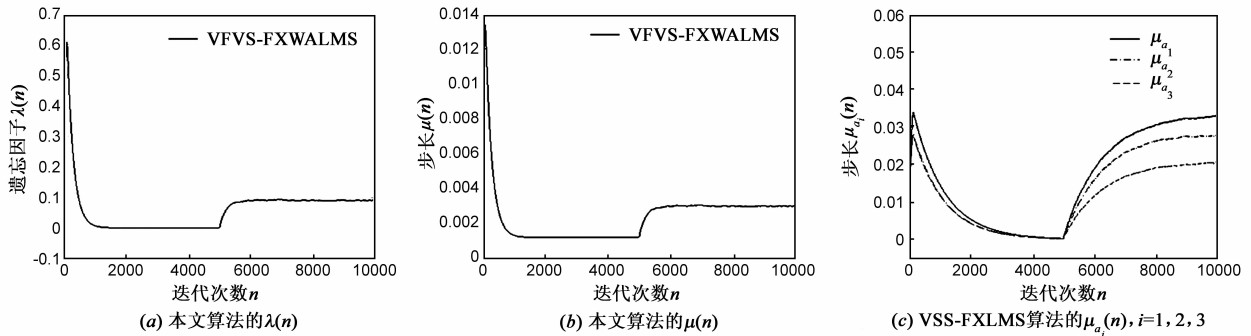


图3 步长因子与遗忘因子变化曲线

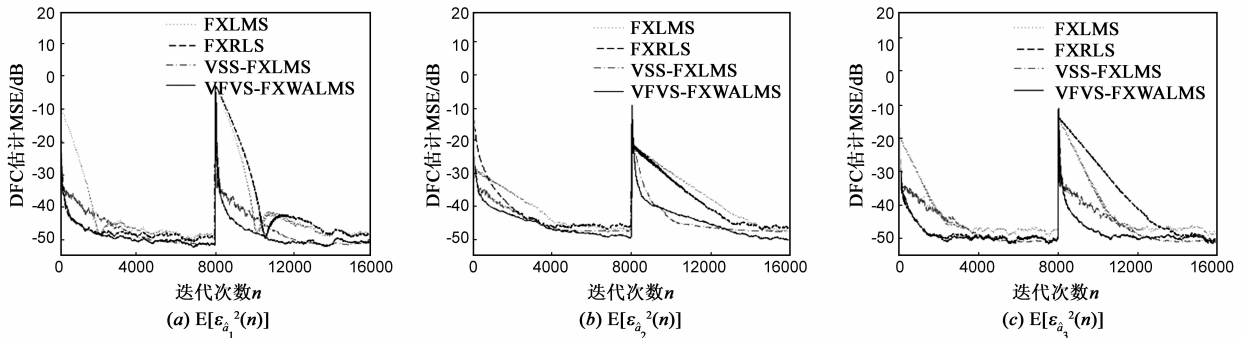


图4 四种算法在非平稳环境下估计DFC的MSE收敛曲线

5 结论

为进一步平衡 NANC 算法的收敛速度、跟踪能力及稳态失调之间的矛盾, 本文提出了一种 VFVS-FXWALMS 算法, 该算法在 FXWALMS 算法的基础之上, 利用互相关误差信号构建了变遗忘因子策略, 并利用遗忘因子取值范围的特点, 通过建立遗忘因子与步长因子之间的函数关系构造了变步长策略, 使系统能够获得更优的参数. 在不同实验条件下的仿真结果表明, 提出的算法有效提升了窄带主动噪声控制系统的整体性能.

参考文献

- [1] A H Lo, B Mc Pherson. Hearing screening for school children: utility of noise-cancelling headphones[J]. BMC Ear, Nose and Throat Disorders, 2013, 13(1): 6.
- [2] 鲍雪山, 徐新盛, 吴英姿. ICA 和 ANC 技术在声脉冲无损检测中的应用[J]. 噪声与振动控制, 2007, 27(2): 86-90.
- [3] D Jena, S Sahoo, S Panigrahi. Gear fault diagnosis using active noise cancellation and adaptive wavelet transform[J]. Measurement, 2014, 47(1): 356-372.
- [4] Y Kajikawa, W S Gan, S M Kuo. Recent advances on active

noise control: open issues and innovative applications[J]. AP-SIPA Transactions on Signal and Information Processing, 2012, 1(1): 1-21.

- [5] S M Kuo. Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations[M]. United Kingdom: John Wiley & Sons, 1996.
- [6] Y Xiao, A Ikuta. Stochastic analysis of the fxlms-based narrowband active noise control system[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2008, 16(5): 1000-1014.
- [7] Y Xiao, L Ma. Fast RLS Fourier analyzers in the presence of frequency mismatch[A]. IEEE Proceeding of the International Symposium on Circuits and Systems[C]. Boston, USA: IEEE, 2004. 497-500.
- [8] Z Bo, C Sun, Y Xu, S Jiang. A variable momentum factor filtered-x weighted accumulated lms algorithm for narrowband active noise control systems[J]. 2014, Measurement, 48(2): 282-291.
- [9] B Huang, Y Xiao, J Sun, G Wei. A variable step-size fxlms algorithm for narrowband active noise control[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2013, 21(2): 301-312.

- [10] Z Bo, J Yang, C Sun, S Jiang. A filtered-x weighted accumulated LMS algorithm: Stochastic analysis and simulations for narrowband active noise control system[J]. Signal Processing, 2014, 104(11): 296 - 310.
- [11] 孙金玮, 孙琳, 刘剑, 于志. 一种含次级通道在线辨识的窄带主动噪声控制系统[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(2): 252 - 257.



薄 中 男, 1983 年出生于江苏连云港, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生. 主要研究方向自适应信号处理, 自动测试技术等.

E-mail: bozhong316@163.com

作者简介



姜守达 男, 1964 年出生黑龙江伊春, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授. 主要研究方向为虚拟试验技术, 数字信号处理等.

E-mail: jsd@hit.edu.cn



孙 超 男, 1978 年出生于哈尔滨, 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系讲师. 主要研究方向为虚拟试验技术, 自动测试技术等.

E-mail: schit@163.com