

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2026.03.09

基于模糊变步长LMS的超声测厚信号时延估计方法

王念¹, 杨定强^{2*}, 郑旨阳²

(1. 蚌埠市特种设备监督检验中心, 安徽 蚌埠 233090;

2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 针对传统超声信号时延估计(Time Delay Estimation, TDE)中固定步长最小均方(Least Mean Square, LMS)算法难以兼顾收敛速度与稳态精度, 以及现有变步长算法依赖瞬时误差和固定函数模型导致在非平稳回波信号下适应性差的问题, 提出一种基于模糊变步长LMS的超声测厚信号TDE方法。分析超声回波信号的时变特性, 摒弃单一误差反馈机制, 提取输出信号与期望信号的局部相关系数误差及其变化量作为模糊控制器的双输入特征; 设计零阶 Sugeno 模糊推理系统, 建立输入特征与步长因子之间的非线性映射规则, 实现步长因子的自适应动态调节。利用模拟回波信号进行不同信噪比下的仿真测试, 结果表明: 相较于定步长LMS算法、双曲正切函数变步长LMS算法以及基于瞬时误差的模糊变步长LMS算法, 所提方法的综合性能更优, 在保证快速收敛的同时显著降低了稳态失调误差, 具有更高的测量精度和抗噪性能。搭建超声测厚平台进行标准量块测量实验, 结果表明: 所提方法对不同厚度量块的测量相对误差均小于其他三种LMS算法, 最大相对误差为0.710%。模糊变步长LMS时延估计方法为高精度超声飞行时间(Time of Flight, TOF)计算提供了重要技术支撑, 有利于促进超声无损检测技术发展, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 超声测厚; TOF; TDE; LMS算法; 模糊控制; 变步长算法; 自适应调节; 无损检测

中图分类号: TB92; O426.9

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0077-12

Time delay estimation method of ultrasonic thickness measurement signal based on fuzzy variable step size LMS

WANG Nian¹, YANG Dingqiang^{2*}, ZHENG Zhiyang²

(1. Bengbu Special Equipment Supervision and Inspection Center, Bengbu 233090, China;

2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In the time delay estimation (TDE) of ultrasonic signals, the traditional fixed step size least mean square (LMS) algorithm struggles to balance convergence speed and steady-state accuracy. Moreover, existing variable step size algorithms often rely on instantaneous errors and fixed function models, leading to poor adaptability under non-stationary echo signals. To address these issues, a TDE method using a fuzzy variable step size LMS algorithm is proposed for ultrasonic thickness measurement in this paper. Based on the time-varying characteristics of ultrasonic echo signals, the conventional single-error feedback mechanism is discarded. Instead, the local correlation coefficient error between the output

收稿日期: 2025-11-20; 修回日期: 2026-01-20; 录用日期: 2026-02-05; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 安徽省市场监督管理局科技计划项目(2022MK051)

引用格式: 王念, 杨定强, 郑旨阳. 基于模糊变步长LMS的超声测厚信号时延估计方法[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 77-88.

Citation: WANG N, YANG D Q, ZHENG Z Y. Time delay estimation method of ultrasonic thickness measurement signal based on fuzzy variable step size LMS[J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 77-88.



and desired signals, along with its variation, are extracted as the dual inputs for a fuzzy controller. A zero-order Sugeno fuzzy inference system is then designed to establish a nonlinear mapping rule between these input features and the step size, enabling adaptive dynamic adjustment of the step size. Numerical simulations are presented using simulated echo signals under different signal-to-noise ratios. The results demonstrate that the proposed method yields better overall performance compared to the fixed step size LMS, the hyperbolic tangent variable step size LMS, and the instantaneous error-based fuzzy variable step size LMS. It significantly reduces the steady-state misadjustment while ensuring fast convergence, thereby offering higher measurement accuracy and noise robustness. This is further verified using measurements made on standard gauge blocks with a laboratory ultrasonic thickness measurement platform. The experimental results show that the relative measurement errors of the proposed method for gauge blocks of varying thicknesses are consistently smaller than those of the other three LMS algorithms, with a maximum relative error of 0.710%. Ultimately, the fuzzy variable step size LMS method for TDE provides vital technical support for high-precision ultrasonic time-of-flight (TOF) calculations. It facilitates the development of ultrasonic non-destructive testing technologies and holds significant practical value in engineering applications.

Key words: ultrasonic thickness measurement; TOF; TDE; LMS algorithm; fuzzy control; variable step size algorithm; adaptive adjustment; non-destructive testing

0 引言

超声无损检测技术凭借其穿透能力强^[1]、检测灵敏度高以及对人体无害等优势^[2],在集成电路制造^[3]、航空航天复合材料检测^[4]以及石油化工管道腐蚀监测^[5]等领域发挥着不可替代的作用。在脉冲反射法、透射法超声测厚应用中,被测工件的厚度解算依赖于对超声回波信号飞行时间(Time of Flight, TOF)的精准估计,TOF的获取精度直接决定最终测量精度^[6]。然而,在实际工业测量环境中,受限于被测材料的晶粒散射^[7]、耦合介质的不均匀性^[8]以及电路噪声的干扰^[9],采集到的超声回波往往存在波形畸变和信噪比下降问题,给高精度时延估计(Time Delay Estimation, TDE)带来挑战。

传统的TOF估计算法主要包括阈值检测法^[10-11]、峰值检测法^[12-13]和互相关法^[14-15]等。阈值法和峰值法结构简单,但对信号幅值波动极其敏感,容易产生误触发^[16];互相关法虽然在抑制高斯白噪声方面表现良好,但其计算量较大,且在面对具有强相关性的周期性干扰时性能显著下降^[17]。为克服传统方法的局限性,自适应滤波技术被引入到超声TDE中,其中,最小均方(Least Mean Square, LMS)算法因其无需信号先验统计特性且结构简单,成为研究热点^[18-19]。LMS算法通过迭代更新权值来最小化预测误差,从而逼近系统

的最佳脉冲响应。

然而,传统的LMS算法采用固定的步长因子,面临着收敛速度与稳态误差之间的固有矛盾:较大的步长能提高算法的收敛速度和跟踪能力,但会产生较大的稳态失调误差;较小的步长虽能降低稳态误差,却会导致收敛速度变慢,影响系统的实时性^[20]。为解决这一冲突,国内外学者提出了多种变步长LMS算法。这类算法通常基于误差信号建立步长调整的函数模型,如基于双曲正切函数^[21]、Sigmoid函数^[20]以及指数函数^[22]的改进算法。尽管上述方法在一定程度上改善了LMS算法的性能,但其步长更新规则多依赖于固定的数学模型和预设参数。在超声回波信号非平稳、动态范围变化大的复杂工况下,这些固定模型的参数适应性较差,难以在保证快速收敛的同时有效消除稳态抖动。

模糊逻辑控制作为一种智能控制策略,不依赖于被控对象的精确数学模型,能够模拟专家经验处理复杂系统中的不确定性和非线性信息,具有极强的鲁棒性^[23]。近年来,将模糊逻辑引入自适应滤波算法已在振动控制^[24-25]、导航误差校正^[26-27]等领域展现出较好的效果。针对现有超声信号TDE方法的不足,本文提出一种基于模糊变步长LMS的超声测厚信号TDE方法,该方法摒弃了单一的误差反馈机制,以输出信号与期望信号的

局部相关系数误差及其变化量作为模糊控制器的双输入,通过模糊推理规则实时输出非线性变化的最优步长因子。开展标准量块测厚实验,验证该方法的应用性能。

1 原理与方法

1.1 超声测厚信号 TOF 计算模型

在超声测厚应用中,超声回波信号可视为发射脉冲经幅度衰减与时间延迟后的线性叠加,如图1所示。

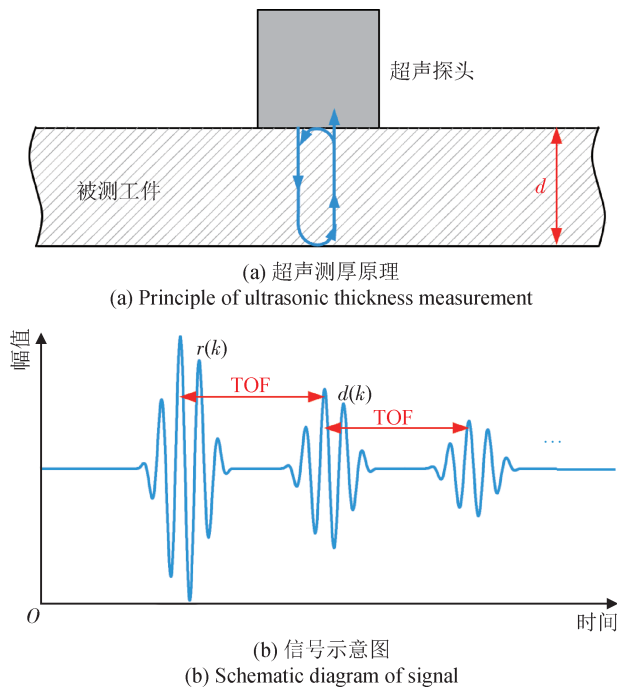


图1 超声测厚原理及其信号示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of ultrasonic thickness measurement and signal

设两相邻回波信号分别为参考信号 $r(k)$ 和目标信号 $d(k)$, 在离散时域内, 二者数学模型可表示为

$$\begin{cases} r(k) = s(k) \\ d(k) = \alpha \cdot s(k - \tau) \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为离散采样时刻; $s(k)$ 为超声源信号; α 为介质引起的幅度衰减因子 ($0 < \alpha < 1$); τ 为待估计的真实 TOF, 对应样本点数的延迟量。

被测工件的厚度 d 与 τ 满足关系

$$d = c \cdot \tau \cdot T_s / 2 \quad (2)$$

式中: c 为超声波在被测介质中的声速, T_s 为系统采样周期。

由式(2)可知, 厚度测量的核心在于精确估计 τ 。基于 LMS 算法的 TDE 本质上是一个系统辨识过程, 将参考信号 $r(k)$ 作为自适应滤波器的输入, 将目标信号 $d(k)$ 作为期望响应。自适应滤波器的权值向量为 $\mathbf{W}(j) = [w_0(j), w_1(j), \dots, w_{M-1}(j)]^T$, 其中, M 为滤波器阶数。在迭代次数为 j 时, 滤波器的输出 $y(j)$ 为

$$y(j) = \mathbf{R}^T(j) \mathbf{W}(j) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}(j)$ 为输入信号向量, $\mathbf{R}(j) = [r(j), r(j+1), \dots, r(j+M-1)]^T$ 。

此时, 预测误差 $e(j)$ 定义为期望信号 $d(j)$ 与滤波器输出 $y(j)$ 之差, 即

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

LMS 算法旨在通过快速下降法寻找最佳权值向量, 使得均方误差代价函数 $J(j) = E[e^2(j)]$ 最小化 (其中, E 为数学期望)。其权值迭代更新公式为

$$\mathbf{W}(j+1) = \mathbf{W}(j) + \mu \cdot e(j) \mathbf{R}(j) \quad (5)$$

式中: μ 为步长因子, 其决定了算法的收敛速度和稳态精度。当算法收敛时, 滤波器的脉冲响应 $\mathbf{W}(j)$ 将逼近两信号间的物理传递函数, 其峰值位置对应 $\tau^{[18]}$ 。然而, 在式(5)中, 固定的 μ 值难以同时满足“初始阶段快速收敛”和“稳态阶段低失调误差”的需求。

1.2 基于模糊逻辑的变步长 LMS 算法

为提高 LMS 算法在超声测厚场景中的收敛速度与稳态精度, 本研究团队将模糊控制思想引入步长调节过程, 提出了一种基于模糊逻辑的变步长 LMS 算法, 其结构如图2所示。 $\mathbf{X}(k)$ 为完整超声回波信号, 由多个超声反射脉冲及噪声组成, $r(j)$ 和 $d(j)$ 是从 $\mathbf{X}(k)$ 中提取的 2 个相邻反射脉冲, $r(j)$ 作为输入信号, $d(j)$ 作为期望信号。

模糊控制算法一般采用误差 e 和误差变化量 Δe 作为系统输入, 但在超声测厚系统中, 回波信号幅度易随耦合条件、传播距离及材料衰减而显著变化, 且超声脉冲的包络具有明显的非平稳性, 其瞬时功率在脉冲主瓣及各次旁瓣之间呈现显著波动, 而 LMS 的瞬时误差直接受输入信号的幅值结构影响。当超声脉冲的瞬时功率发生剧烈变化时, 误差项也会呈现较大波动, 不适合作为模糊控制的输入。针对此问题, 本文选取输出信号与

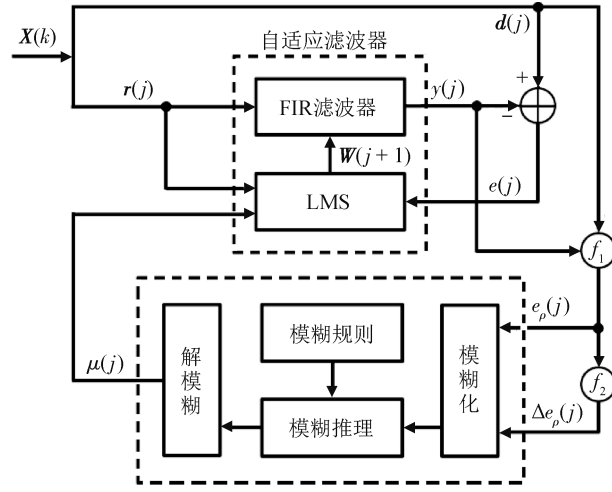


图2 模糊变步长LMS算法结构

Fig.2 Structure of fuzzy variable step size LMS algorithm

期望信号的局部相关系数误差及其变化量作为模糊控制器的输入量，从相关性角度衡量滤波器当前的匹配程度。

在第 $j(j \geq L)$ 次迭代时，定义局部输出向量 $\mathbf{y}_j$ 与局部期望向量 $\mathbf{d}_j$ 为

$$\begin{cases} \mathbf{y}_j = [y(j), y(j-1), \dots, y(j-L+1)]^T \\ \mathbf{d}_j = [d(j), d(j-1), \dots, d(j-L+1)]^T \end{cases} \quad (6)$$

式中： L 为滑动窗口的长度。

局部相关系数 $\rho(j)$ 计算公式为

$$\rho(j) = \frac{\mathbf{y}_j^T \mathbf{d}_j}{\|\mathbf{y}_j\| \|\mathbf{d}_j\| + \varepsilon} \quad (7)$$

式中： ε 为防止分母为零的微小常数。

局部相关系数误差 $e_\rho(j)$ 定义为

$$e_\rho(j) = 1 - |\rho(j)| \quad (8)$$

相关系数具有天然的幅值归一化特性，其取值范围限定在 $[-1, 1]$ ，因此，局部相关系数误差 $e_\rho(j)$ 的取值范围为 $[0, 1]$ ，有效抑制了回波能量变化对控制输入的影响。此外，为反映滤波器收敛过程的动态特性，引入局部相关系数误差的变化量作为模糊控制器的第二输入，但由于局部相关系数误差是在有限长度窗口内计算得到的，其数值可能受到瞬时扰动和测量噪声的影响，若直接对原始局部相关系数误差进行差分运算，容易放大高频波动，导致变化量估计不稳定，影响模糊控制器输入的可靠性。为提高局部相关系数误差变化量估计的鲁棒性，在计算局部相关系数误差

后，首先对其进行指数加权平滑处理，所得结果 $\bar{e}_\rho(j)$ 为

$$\bar{e}_\rho(j) = \lambda \bar{e}_\rho(j-1) + (1-\lambda)e_\rho(j) \quad (9)$$

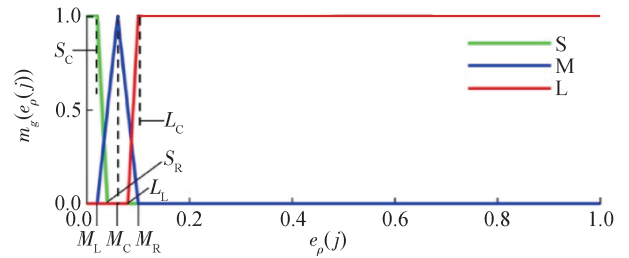
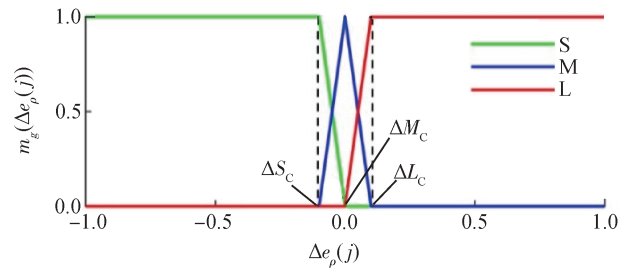
式中： λ 为平滑系数($0 < \lambda < 1$)，用于调节平滑程度与响应速度之间的平衡。

在此基础上，定义局部平滑相关系数误差的变化量 $\Delta e_\rho(j)$ 为

$$\Delta e_\rho(j) = \bar{e}_\rho(j) - \bar{e}_\rho(j-1) \quad (10)$$

本文采用零阶 Sugeno 模糊推理系统，其具有建模透明、参数量少、易于调试的优势，输出仅依赖于固定常值而非复杂的模糊区间，整个推理过程可以极快完成。将局部相关系数误差 $e_\rho(j)$ 和相关系数误差变化量 $\Delta e_\rho(j)$ 各分为小(S)、中(M)、大(L)3个等级，隶属度函数采用梯形和三角形函数，如图3所示。

隶属度函数的参数设计严格遵循输入量的物理特性与控制需求，针对 $e_\rho(j)$ ，其表现出显著的

(a) $e_\rho(j)$ 隶属度函数
(a) Membership function of $e_\rho(j)$ (b) $\Delta e_\rho(j)$ 隶属度函数
(b) Membership function of $\Delta e_\rho(j)$

注： S_C 、 S_R 分别为小等级 $e_\rho(j)$ 的中心、右边界参数； M_L 、 M_C 、 M_R 分别为中等级 $e_\rho(j)$ 的左边界、中心、右边界参数； L_C 、 L_R 分别为大等级 $e_\rho(j)$ 的中心、右边界参数； ΔS_C 、 ΔM_C 、 ΔL_C 分别为小、中、大等级 $\Delta e_\rho(j)$ 的中心参数；纵坐标 $m_S(e_\rho(j))$ 和 $m_S(\Delta e_\rho(j))$ 分别为输入特征 $e_\rho(j)$ 和 $\Delta e_\rho(j)$ 对应于各模糊集合的隶属度。

图3 隶属度函数

Fig.3 Membership functions

非线性精度敏感特性,所以隶属度函数采用非对称分布策略,“小”集合被限制在 $[0, S_r]$ 的狭窄区间内进行高密度细分,这种非线性映射满足了收敛阶段对高精度的需求,确保在波形高度对齐($\rho > 0.96$)时实现精细的步长控制;而宽阔的“大”集合论域则保证了在初始迭代时的快速收敛能力。 $\Delta e_p(j)$ 的隶属度函数呈零对称分布,以区分收敛趋势(负值)和系统漂移(正值),并设置狭窄的“零”区域以抑制由量化噪声引起的稳态抖动。输出变量 $\mu(j)$ 设为极小(VS)、小(S)、中小(MS)、中(M)、中大(ML)、大(L)、极大(VL)7个等级,范围涵盖稳态维持值 $\mu_{\min}$ 到饱和上限 $\mu_{\max}$ 。

结合对输入输出量的分析,构建了如表1所示的模糊推理规则,在相关性误差显著发散时,输出大步长进行快速追踪;在检测到相关性稳定时,输出小步长提高精度。对于模糊规则的前件部分,采用MIN型模糊运算,即每条规则的激活度取两个输入前件在各自模糊集合中隶属度的较小值。此机制使系统即使在误差较大而误差变化量趋于平稳,或误差变化剧烈但误差幅度较小的情况下,均能保持恰当的规则触发强度,从而避免因噪声或瞬态波动导致规则过度放大或误触发。与常见的AND运算相比,MIN运算具有对异常值不敏感、数值波动更温和、计算更简单的特点,特别适用于超声回波这种具有高噪声系数与强非平稳性的信号环境。MIN型前件运算与零阶Sugeno输出结构的结合不仅保证了模糊推理过程的逻辑一致性和数值稳定性,而且在工程实现上具备显著优势,使步长在粗收敛与细收敛两个阶段均能保持准确、平滑、可控的动态调节,从而有效提升LMS算法在多回波、衰减不均或低信噪比条件下的TDE性能。最终模糊控制步长输出曲面如图4所示。

表1 模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rules

$e_p(j)$	$\Delta e_p(j)$		
	S	M	L
S	μ_{VS}	μ_S	μ_{MS}
M	μ_M	μ_{ML}	μ_{ML}
L	μ_L	μ_L	μ_{VL}

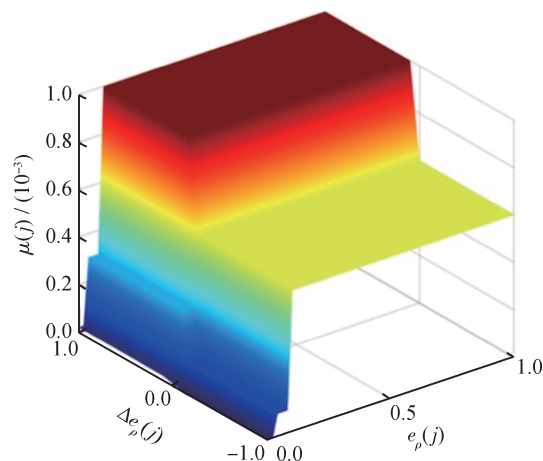


图4 模糊控制步长输出曲面图

Fig.4 Diagram of fuzzy control step size output surface

2 仿真分析

为验证本文所提方法的可行性与有效性,利用该方法和定步长LMS算法、双曲正切函数变步长LMS算法以及基于 e 与 Δe 的模糊变步长LMS算法对同一组模拟信号进行仿真分析,以对比不同算法的性能。原始模拟信号由2个连续的脉冲回波构成,2个回波之间的TOF设定为 $65 \mu s$,其中,一次回波的幅度设为 $1.5 V$,二次回波的幅度设为 $0.9 V$,采样频率设定为 $100 MHz$ 。为更贴近实际测量信号,将信噪比 S_{SNR} 分别为 $30 dB$ 和 $20 dB$ 的高斯白噪声与原始模拟信号进行叠加,对应的模拟信号波形如图5所示。

算法关键参数的选择对TDE性能有直接影响。需要保证滑动窗口长度 L 区域包含足够的波形信息用于计算相似度,又要避免窗口过长导致局部特征被平滑;平滑系数 λ 决定了滤波器的记忆深度,需综合考虑噪声滤除能力和算法收敛过程中动态趋势信息的完整性。为选取合适的参数,对滑动窗口长度 L 和平滑系数 λ 进行灵敏度分析,以 $S_{SNR} = 30 dB$ 的模拟信号为测试信号,采用控制变量法,分别测试 $L \in [400, 600]$ 及 $\lambda \in [0.800, 0.999]$ 的TDE精度。每组参数重复测量10次并取均值作为测量结果,如表2和表3所示,可以看出: L 在 $[500, 560]$ 且 λ 在 $[0.860, 0.900]$ 时,测量相对误差保持在较低水平且稳定。基于此,最终选取 $L = 500$ 、 $\lambda = 0.9$ 。

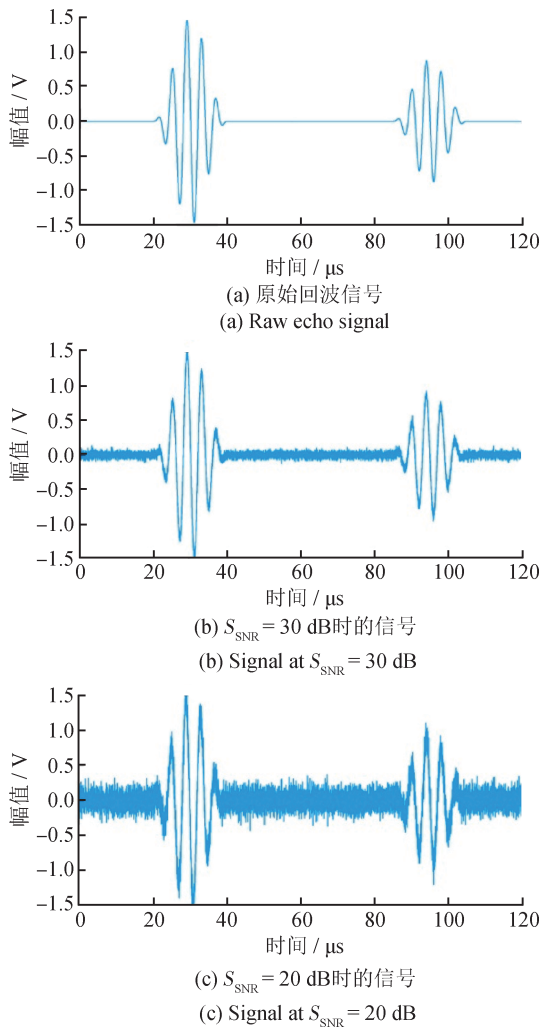


图5 模拟回波信号

Fig.5 Simulated echo signal

在 $S_{\text{SNR}} = 30 \text{ dB}$ 和 $S_{\text{SNR}} = 20 \text{ dB}$ 两种信噪比条件下, 使用本文算法和定步长 LMS 算法 ($\mu_{\text{max}} = 0.001$, $\mu_{\text{min}} = 0.000\ 002$)、双曲正切函数变步长 LMS 算法以及基于 e 与 Δe 的模糊变步长 LMS 算法分别进行 10 次仿真实验。各算法的参数如表 4 所示, 其中, μ_{th} 为双曲正切函数变步长 LMS 的步长因子, A 为控制双曲正切函数形状的常数, S_{Cl} 、 S_{Rl} 、 M_{Ll} 、 M_{Cl} 、 M_{Rl} 、 L_{Ll} 、 L_{Cl} 分别为输入变量 e 对应各模糊集合 (小、中、大) 隶属度函数的顶点与边界参数, ΔS_{Cl} 、 ΔM_{Cl} 、 ΔL_{Cl} 分别为输入变量 Δe 对应各模糊集合隶属度函数的中心与边界参数, S_{C} 、 S_{R} 、 M_{L} 、 M_{C} 、 M_{R} 、 L_{L} 、 L_{C} 分别为输入变量 $e_p(j)$ 对应各模糊集合 (小、中、大) 隶属度函数的顶点与边界参数, ΔS_{C} 、 ΔM_{C} 、 ΔL_{C} 分别为输入变量 $\Delta e_p(j)$ 对应各模糊集合

表2 $\lambda = 0.9$ 时 L 参数灵敏度分析Tab.2 Sensitivity analysis of L when $\lambda = 0.9$

滑动窗口长度 L	相对误差 / %
400	0.010
420	0.013
440	0.006
460	0.005
480	0.008
500	0.002
520	0.003
540	0.004
560	0.003
580	0.011
600	0.012

表3 $L = 500$ 时 λ 参数灵敏度分析Tab.3 Sensitivity analysis of λ at $L = 500$

平滑系数 λ	相对误差 / %
0.800	0.003
0.820	0.010
0.840	0.007
0.860	0.002
0.880	0.004
0.900	0.002
0.920	0.008
0.940	0.007
0.960	0.006
0.980	0.009
0.999	0.015

隶属度函数的中心与边界参数。以上参数下角标 C、R、L 分别表示中心、右边界、左边界。

TOF 计算的平均相对误差如表 5 所示, 可以看出: 本文所提算法在 2 种信噪比条件下的平均相对误差均最小; 当信噪比由 30 dB 降至 20 dB 时, 本文所提算法的平均相对误差增量最小, 证明本文所提方法的精度最高, 且具有优越的抗噪性能。

表 4 算法参数

Tab.4 Algorithm parameters

算法	参数
定步长 LMS	$\mu_{\max} = 0.001, \mu_{\min} = 0.000\ 002$
双曲正切函数变步长 LMS	$\mu_{\text{th}} = \mu_{\max} \cdot \tanh[A \cdot e(j)], A = 90$
基于 e 与 Δe 的模糊变步长 LMS	$S_{\text{Cl}} = 0.2, S_{\text{Rl}} = 0.4, M_{\text{Ll}} = 0.3, M_{\text{Cl}} = 0.5, M_{\text{Rl}} = 0.7, L_{\text{Ll}} = 0.6, L_{\text{Cl}} = 0.8;$ $\Delta S_{\text{Cl}} = -0.1, \Delta M_{\text{Cl}} = 0, \Delta L_{\text{Cl}} = 0.1; \mu_{\text{VS}} = 0.000\ 002, \mu_{\text{S}} = 0.000\ 010, \mu_{\text{MS}} = 0.000\ 020,$ $\mu_{\text{M}} = 0.000\ 100, \mu_{\text{ML}} = 0.000\ 300, \mu_{\text{L}} = 0.000\ 600, \mu_{\text{VL}} = 0.001\ 000$
基于 $e_{\rho}(j)$ 与 $\Delta e_{\rho}(j)$ 的模糊变步长 LMS	$L = 500; \lambda = 0.9; S_{\text{C}} = M_{\text{L}} = 0.02, S_{\text{R}} = 0.04, M_{\text{C}} = 0.06, L_{\text{L}} = 0.08, L_{\text{C}} = M_{\text{R}} = 0.10;$ $\Delta S_{\text{C}} = -0.1, \Delta M_{\text{C}} = 0, \Delta L_{\text{C}} = 0.1; \mu_{\text{VS}} = 0.000\ 002, \mu_{\text{S}} = 0.000\ 010, \mu_{\text{MS}} = 0.000\ 020,$ $\mu_{\text{M}} = 0.000\ 100, \mu_{\text{ML}} = 0.000\ 300, \mu_{\text{L}} = 0.000\ 600, \mu_{\text{VL}} = 0.001\ 000$

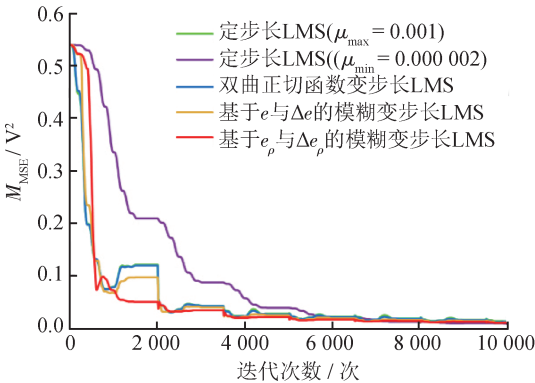
表 5 TOF 计算的平均相对误差

Tab.5 Average relative errors of TOF calculation

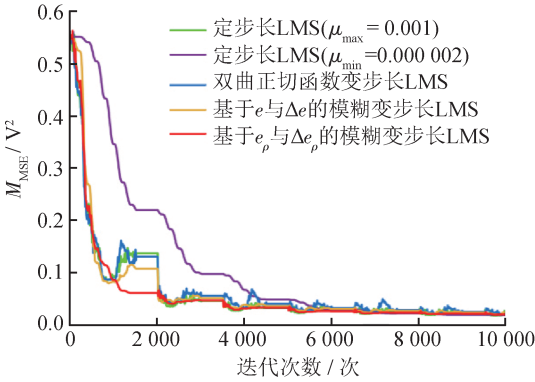
算法	平均相对误差 / %	
	当 $S_{\text{SNR}} = 30\ \text{dB}$ 时	当 $S_{\text{SNR}} = 20\ \text{dB}$ 时
定步长 LMS ($\mu_{\max} = 0.001$)	0.038	2.285
定步长 LMS ($\mu_{\min} = 0.000\ 002$)	0.012	0.035
双曲正切函数 变步长 LMS	0.049	0.270
基于 e 与 Δe 的模糊 变步长 LMS	0.017	0.157
基于 $e_{\rho}(j)$ 与 $\Delta e_{\rho}(j)$ 的模糊变步长 LMS	0.002	0.012

在基于 LMS 的 TDE 方法的 TOF 计算中，最终计算结果由 2 个相邻回波之间脉冲响应序列 $\mathbf{W}(j)$ 的峰值点确定，因此， $\mathbf{W}(j)$ 的计算精度与稳定性是 LMS 算法实现高精度 TOF 计算的根本依托。 $\mathbf{W}(j)$ 的准确性与信号匹配程度密切相关，而信号匹配度可通过 LMS 算法的均方误差 (Mean Squared Error, MSE) M_{MSE} 进行评价。

在无噪声和 $S_{\text{SNR}} = 20\ \text{dB}$ 的信噪比条件下，使用本文所提算法和定步长 LMS 算法 ($\mu_{\max} = 0.001$, $\mu_{\min} = 0.000\ 002$)、双曲正切函数变步长 LMS 算法以及基于 e 与 Δe 的模糊变步长 LMS 算法分别进行仿真实验，得到 MSE 收敛曲线如图 6 所示。根据图 6 可以看出：本文所提方法具有更好的综合性能，其最显著的特点是在保证高精度与稳定性的同时数据曲线收敛速度最快，且具有更好的抗噪性，在超声测厚应用中更具优势。



(a) M_{MSE} 收敛曲线(原始回波信号)
(a) Convergence curves of M_{MSE} (for raw echo signal)



(b) M_{MSE} 收敛曲线($S_{\text{SNR}} = 20\ \text{dB}$)
(b) Convergence curves of M_{MSE} (for $S_{\text{SNR}} = 20\ \text{dB}$)

图 6 M_{MSE} 收敛曲线

Fig.6 Convergence curve of M_{MSE}

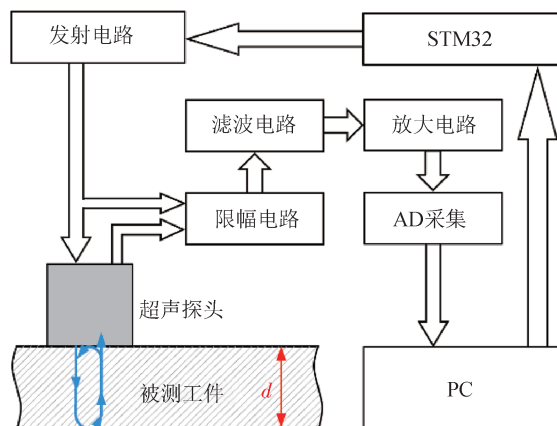
3 实验验证

3.1 实验设置

为验证所提方法在实际测量情况下的有效性，利用自主开发的超声测厚系统对 6 块标称厚度分别为 4、6、8、10、12、14 mm 的 0 级陶瓷标准量块进行测厚实验，其精度符合 ISO 3650 标准(标称长

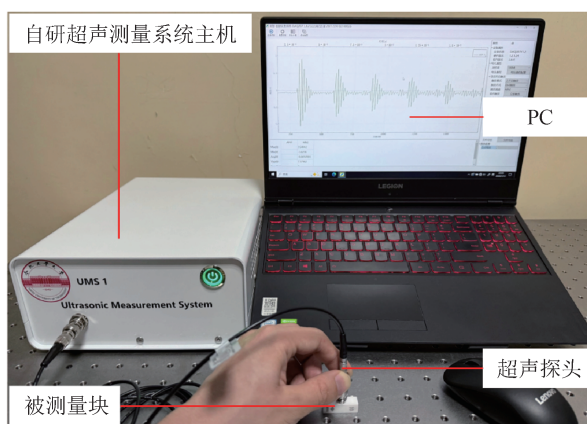
度 $l_n \leq 10$ mm 时, 极限偏差 $t_e = \pm 0.12 \mu\text{m}$; $10 \text{ mm} < l_n \leq 25$ mm 时, $t_e = \pm 0.14 \mu\text{m}$, 其标称值可作为“真值”进行误差评估。超声测厚系统框图及

实物图如图7所示, 超声探头的型号为5N6-T1, 其中心频率为5 MHz、晶片直径为6 mm, 激励脉冲的幅度为300 V、宽度为300 ns, 系统的采样频



(a) 超声测厚系统框图

(a) Block diagram of ultrasonic thickness measurement system

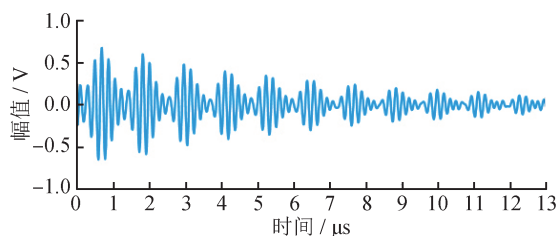


(b) 超声测厚系统实物图

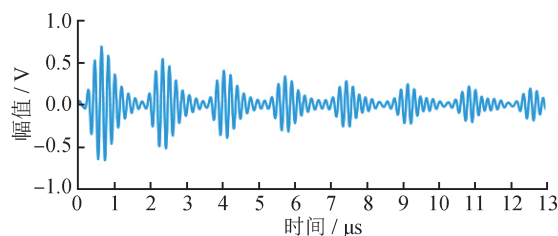
(b) Physical diagram of ultrasonic thickness measurement system

图7 超声测厚系统框图及实物图

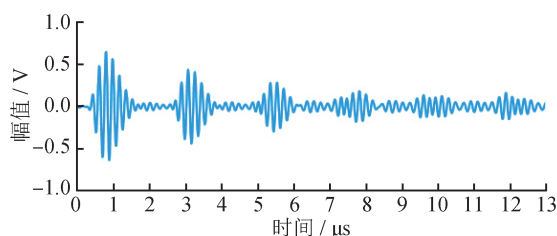
Fig.7 Block diagram and physical diagram of ultrasonic thickness measurement system



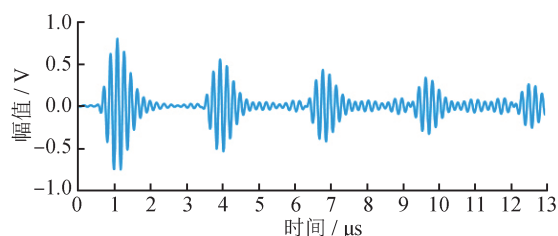
(a) 4 mm量块回波信号
(a) Echo signal of 4 mm gauge block



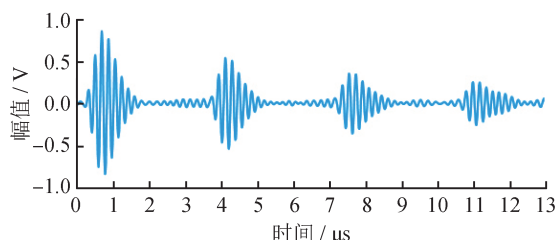
(b) 6 mm量块回波信号
(b) Echo signal of 6 mm gauge block



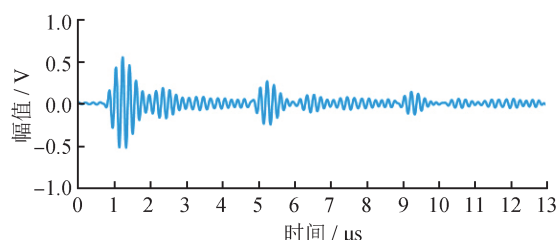
(c) 8 mm量块回波信号
(c) Echo signal of 8 mm gauge block



(d) 10 mm量块回波信号
(d) Echo signal of 10 mm gauge block



(e) 12 mm量块回波信号
(e) Echo signal of 12 mm gauge block



(f) 14 mm量块回波信号
(f) Echo signal of 14 mm gauge block

图8 量块回波信号

Fig.8 Echo signals of gauge block

率设为 100 MHz。信号处理流程与本团队之前工作相同^[18]。

3.2 结果分析

量块超声测厚回波信号如图 8 所示。采用“标准试块标定法”对超声在陶瓷量块中的声速进行标定^[28]，选取标称厚度为 9 mm 的标准量块，采用互相关法^[18]测量其 TOF，重复测量 10 次并取均值，得到陶瓷量块中的声速为 7 005.0 m/s。

由于前部回波信噪比更高，基于前 4 次回波中的每两个相邻回波，分别通过不同算法计算得到 3 个厚度值 d_1 、 d_2 、 d_3 ，并求均值作为各算法最终测量结果 d 。量块厚度测量结果如表 6 至表 10 所示。

量块厚度测量相对误差如图 9 所示，可以看出：利用本文算法对不同厚度的量块进行测量时，所得结果的相对误差均小于其他 3 种 LMS 算法，最大相对误差为 0.710%。

表 6 定步长 LMS($\mu = 0.1$)测量结果
Tab.6 Measurement results of fixed step LMS ($\mu = 0.1$)

量块厚度/mm	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm	d /mm	相对误差/%
4.000	4.104	4.018	3.972	4.031	0.775
6.000	6.020	5.999	6.060	6.026	0.433
8.000	8.050	7.883	7.880	7.938	0.775
10.000	10.054	10.122	10.065	10.080	0.800
12.000	12.070	12.042	12.129	12.080	0.667
14.000	14.081	14.139	14.093	14.104	0.743

表 7 定步长 LMS($\mu = 0.005$)测量结果
Tab.7 Measurement results of fixed step LMS ($\mu = 0.005$)

量块厚度/mm	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm	d /mm	相对误差/%
4.000	4.089	4.000	3.957	4.015	0.375
6.000	6.007	5.983	6.066	6.019	0.317
8.000	8.048	7.901	7.905	7.951	0.613
10.000	10.049	10.110	10.064	10.074	0.740
12.000	12.060	12.035	12.121	12.072	0.600
14.000	14.066	14.115	14.078	14.086	0.614

表 8 双曲正切函数变步长 LMS 测量结果
Tab.8 Measurement results of variable step size LMS based on hyperbolic tangent function

量块厚度/mm	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm	d /mm	相对误差/%
4.000	4.102	4.008	3.955	4.022	0.550
6.000	6.007	5.983	6.064	6.018	0.300
8.000	8.051	7.901	7.905	7.952	0.600
10.000	10.050	10.113	10.066	10.076	0.760
12.000	12.061	12.035	12.124	12.073	0.608
14.000	14.067	14.119	14.080	14.089	0.636

表9 基于 e 与 Δe 的模糊变步长LMS测量结果Tab.9 Measurement results of fuzzy variable step size LMS based on e and Δe

量块厚度/mm	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm	d /mm	相对误差/%
4.000	4.109	3.996	3.955	4.020	0.500
6.000	6.007	5.984	6.066	6.019	0.317
8.000	8.050	7.901	7.904	7.952	0.600
10.000	10.050	10.110	10.065	10.075	0.750
12.000	12.062	12.035	12.123	12.073	0.608
14.000	14.066	14.116	14.074	14.08	0.607

表10 基于 $e_p(j)$ 与 $\Delta e_p(j)$ 的模糊变步长LMS测量结果Tab.10 Measurement results of fuzzy variable step size LMS based on $e_p(j)$ and $\Delta e_p(j)$

量块厚度/mm	d_1 /mm	d_2 /mm	d_3 /mm	d /mm	相对误差/%
4.000	4.085	4.001	3.956	4.014	0.350
6.000	6.007	5.982	6.065	6.018	0.300
8.000	8.055	7.904	7.900	7.953	0.587
10.000	10.050	10.101	10.062	10.071	0.710
12.000	12.061	12.033	12.122	12.072	0.600
14.000	14.065	14.116	14.072	14.084	0.600

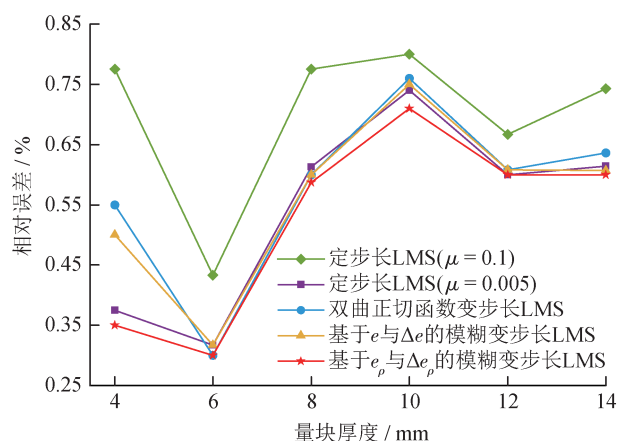


图9 量块厚度测量相对误差

Fig.9 Relative error of gauge block thickness measurement

4 结论

本文提出了一种基于模糊变步长LMS的超声测厚信号TDE方法,构建了双输入模糊控制器,根据输出信号与期望信号的局部相关系数误差及其变化量实时调整步长因子,有效解决了LMS算

法收敛速度与稳态精度难以兼顾的问题,提高了算法的鲁棒性。通过仿真实验对该方法的性能进行测试,结果表明:相较定步长LMS算法、双曲正切函数变步长LMS算法和基于 e 与 Δe 的模糊变步长LMS算法,所提方法具有更快的收敛速度以及更高的TOF计算精度和抗噪性。搭建了基于模糊变步长LMS的TDE方法的超声测量系统,并开展量块测厚实验,结果表明:所提方法的测量精度优于对比算法,最大相对误差为0.710%。未来将探索利用智能优化算法对模糊隶属度函数参数进行自适应寻优,以进一步提升算法的泛化能力。

参考文献

- [1] LIU Y B, LI M, ZHAO Z, et al. Assessment of internal quality of billets using ultrasonic three-dimensional layered characterization[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(11): 2727-2739.
- [2] YANG J J, TIAN C J, ZHAN Q W, et al. Study on non-destructive visualization identification of concrete internal cracks based on SH array ultrasound[J]. Journal of Built

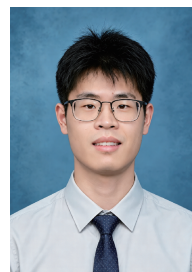
- ding Engineering, 2024, 98: 111076.
- [3] GUO S F, HUANG Y Y, CHEN D, et al. In-situ ultrasonic inspection of thickness and morphology of thermal interface material in multilayer structure using modified minimum entropy deconvolution[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 2006310.
- [4] ZHANG Z, LIU M L, LI Q, et al. Visualized characterization of diversified defects in thick aerospace composites using ultrasonic B-scan[J]. Composites Communications, 2020, 22: 100435.
- [5] SONG J H, GUO D H, JIA J H, et al. A new on-line ultrasonic thickness monitoring system for high temperature pipes[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2022, 199: 104691.
- [6] LIU W Y, LI D X, XIE W G. A novel time-of-flight difference determination method for ultrasonic thickness measurement with ultrasonic echo onset point detection[J]. Applied Acoustics, 2025, 233: 110605.
- [7] GE T X, TIAN X Q, LI J X, et al. A nonlinear least squares guided multiscale adaptive regularized savitzky-golay filtering (MARSG - NLS) for suppressing ultrasonic grain noise[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 6513013.
- [8] ZHU Y H, ZHENG Y, WANG Y B, et al. Couplant-induced stress evaluation errors in ultrasonic measurement: multivariable quantification and differential wedge mitigation[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2025: 1-13.
- [9] 宋寿鹏, 江洲, 王治有, 等. 管道小缺陷超声检测传感器阵列电路设计[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(9): 1076-1082.
- SONG S P, JIANG Z, WANG Z Y, et al. Design of transducer array circuit for pipeline tiny defect ultrasonic testing[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(9): 1076-1082. (in Chinese)
- [10] BARSHAN B. Fast processing techniques for accurate ultrasonic range measurements[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(1): 45-50.
- [11] FANG Z H, HU L, MAO K, et al. Similarity judgment-based double-threshold method for time-of-flight determination in an ultrasonic gas flowmeter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(1): 24-32.
- [12] KIM Y H, SONG S J, LEE J K. Technique for measurements of elastic wave velocities and thickness of solid plate from access on only one side[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(7): 5240.
- [13] 单良, 赵军. 基于FPGA的超声三维坐标测量系统[J]. 计测技术, 2014, 34(2): 14-17.
- SHAN L, ZHAO J. A three-dimensional coordinate measurement using ultrasonic sensors based on FPGA[J]. Metrology & Measurement Technology, 2014, 34(2): 14-17. (in Chinese)
- [14] HERTER S, YOUSSEF S, BECKER M M, et al. Machine learning based preprocessing to ensure validity of cross-correlated ultrasound signals for time-of-flight measurements[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021, 40: 20.
- [15] 常蕾, 赵俭. 超声波测温技术在高温气流温场测量中的应用[J]. 计测技术, 2014, 34(1): 1-4.
- CHANG L, ZHAO J. Application of ultrasonic thermometry in measuring temperature field of high-temperature gas flow[J]. Metrology & Measurement Technology, 2014, 34(1): 1-4. (in Chinese)
- [16] GONG W Q, WANG X Z, YANG Z Y, et al. Ultrasonic thickness measurement method and system implementation based on sampling reconstruction and phase feature extraction[J]. Sensors, 2023, 23(22): 9072.
- [17] COBOS M, ANTONACCIO F, COMANDUCCI L, et al. Frequency-sliding generalized cross-correlation: a sub-band time delay estimation approach[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2020, 28: 1270-1281.
- [18] 杨定强, 刘继兵, 王念, 等. 基于LMS自适应时延估计的高精度超声测厚系统[J]. 计测技术, 2024, 44(4): 79-87.
- YANG D Q, LIU J B, WANG N, et al. High-precision ultrasonic thickness measurement system based on LMS adaptive time delay estimation algorithm[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(4): 79-87. (in Chinese)
- [19] 张延成, 李志刚. 基于LMS自适应时延估计和FPGA的超声波测风系统研究[J]. 应用声学, 2013, 32(1): 51-56.
- ZHANG Y C, LI Z G. The ultrasonic wind measurement system based on LMS adaptive time delay estimation algorithm and FPGA[J]. Applied Acoustics, 2013, 32(1): 51-56. (in Chinese)

- [20] JALAL B, YANG X P, LIU Q H, et al. Fast and robust variable-step-size LMS algorithm for adaptive beamforming [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(7): 1206–1210.
- [21] LI L, ZHAO X S. Variable step-size LMS algorithm based on hyperbolic tangent function [J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2023, 42(7): 4415–4431.
- [22] ZHANG H J, XUE J Q, YUAN H, et al. Synchronous current suppression of active magnetic bearing system based on a nonlinear variable step-size Least Mean Square (LMS) algorithm [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2026, 48(2): 243–252.
- [23] XIANG X B, YU C Y, LAPIERRE L, et al. Survey on fuzzy-logic-based guidance and control of marine surface vehicles and underwater vehicles [J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2018, 20(2): 572–586.
- [24] MA G L, WANG P P, CHEN L Q, et al. Suspension nonlinear analysis and VSS-LMS adaptive filtering control of satellite borne flexible structure [J]. Nonlinear Dynamics, 2024, 112(5): 3679–3693.
- [25] SHI J M, ZHU H Q. Control study for compensating rotor vibration of four-DOF six-pole hybrid magnetic bearings based on variable step size LMS algorithm [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(2): 1616–1626.
- [26] WANG Q Y, ZHANG M H. Inertial navigation system gyroscopic on-line calibration assisted by marine star sensor based on forgetting factor selection of a sage-husa filter [J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2022, 21(1): 1–8.
- [27] 沈强, 刘洁瑜, 李灿, 等. 基于多模型联合滤波的 MIMU/GPS 组合导航方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(3): 314–320.
- SHEN Q, LIU J Y, LI C, et al. MIMU/GPS integrated navigation method based on IMM-based combined filter [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(3): 314–320. (in Chinese)
- [28] 周连杰. 超声测厚中的声时信号处理技术研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- ZHOU L J. Research on time-of-flight processing technology in ultrasonic thickness measurement [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一作者: 王念(1976—), 男, 安徽蚌埠人, 高级工程师, 主要研究方向为承压类特种设备检验检测技术。



通信作者: 杨定强(2000—), 男, 安徽巢湖人, 博士研究生, 主要研究方向为超声测量。