

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.04.05

# 基于LMS自适应时延估计的高精度超声测厚系统

杨定强<sup>1</sup>, 刘继兵<sup>2</sup>, 王念<sup>2</sup>, 李瑞君<sup>1\*</sup>

(1.合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009;

2.蚌埠市特种设备监督检验中心, 安徽 蚌埠 233090)

**摘要:** 针对现有超声测厚系统精度较低的问题, 研制基于最小均方(Least Mean Square, LMS)自适应时间延迟估计的高精度超声测厚系统。设计超声发射及接收电路, 研发基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的高速数据采集及传输系统, 开发基于MATLAB的上位机信号处理软件, 通过LMS自适应时间延迟估计算法准确、高效地计算超声飞行时间(Time of Flight, TOF), 从而实现高精度厚度测量。开展模拟回波仿真实验, 结果显示: 相较峰值法、包络法和相关法, LMS法在时间延迟估计方面更具优势。搭建基于LMS自适应时延估计的超声测厚系统, 以量块为对象进行测厚实验, 结果表明: 该系统测厚相对误差小于3.77%, 重复实验标准差不高于0.2  $\mu\text{m}$ , 最大相对不确定度为1.4%。基于LMS自适应时延估计的超声测厚系统可应用于板材厚度测量等领域, 有利于推动高精度超声测厚技术发展, 具有重要技术借鉴价值。

**关键词:** 超声; 测厚; 飞行时间; 最小均方自适应时延估计**中图分类号:** TB92; TB551; O426.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 04-0079-09

## High-precision ultrasonic thickness measurement system based on LMS adaptive time delay estimation algorithm

YANG Dingqiang<sup>1</sup>, LIU Jibing<sup>2</sup>, WANG Nian<sup>2</sup>, LI Ruijun<sup>1\*</sup>

(1.Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, School of Instrument Science and

Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2.Bengbu Special Equipment Supervision and Inspection Center, Bengbu 233090, China)

**Abstract:** A high-precision ultrasonic thickness measurement system based on the least mean square (LMS) adaptive time delay estimation algorithm was developed, addressing the issue of low accuracy of the existing ultrasonic thickness measurement systems. The ultrasonic transmitting and receiving circuits were designed. The high-speed data acquisition and transmission system based on field programmable gate array (FPGA) was developed. The host computer signal processing software based on MATLAB was developed. The ultrasonic time of flight (TOF) was calculated accurately and efficiently by LMS adaptive time delay estimation algorithm, so as to realize high-precision thickness measurement. The simulated echo simulation experiments were conducted. The results show that the LMS method has more advantages in time delay estimation than the peak method, envelope method and correlation method. An ultrasonic thickness measurement system based on LMS adaptive time delay estimation algorithm was built, and the thickness measurement experi-

**收稿日期:** 2024-06-13; **修回日期:** 2024-07-14**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52175506); 安徽省市场监督管理局科技计划项目(2022MK051)**引用格式:** 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.**Citation:** 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.

ments were performed on gauge blocks. The results show that the relative error of thickness measurement is less than 3.77%, the standard deviation of repeated experiment is not higher than 0.2  $\mu\text{m}$ , and the maximum relative measurement uncertainty is 1.4%. The ultrasonic thickness measurement system based on LMS adaptive time delay estimation algorithm can be applied in the fields such as plate thickness measurement, which is conducive to promoting the development of high-precision ultrasonic thickness measurement technology and has important technical reference value.

**Key words:** ultrasonic; thickness measurement; TOF; LMS adaptive time delay estimation algorithm

## 0 引言

超声测厚技术广泛应用于航空航天、钢铁冶金、石油化工等领域<sup>[1-2]</sup>。相较光学测厚法<sup>[3]</sup>、X射线测厚法<sup>[4]</sup>、电涡流测厚法<sup>[5]</sup>和电容测厚法<sup>[6]</sup>等其他测厚方法, 超声测厚具有成本低、测量速度快、适用范围广、无污染危害等优点<sup>[1]</sup>。超声测厚按原理可分为声时法、共振法和Lamb波法<sup>[7]</sup>, 其中声时法由于原理简单、操作方便, 应用最为广泛。声时法根据超声波在被测件中的传播时间及速度进行测量, 超声TOF计算的准确性直接影响超声测厚的精度<sup>[8]</sup>。

国内外学者针对超声TOF的计算进行了大量研究。文献[9]利用FPGA计算系统时钟脉冲数从而得到TOF, 文献[10]利用计时芯片搭建硬件计时电路进行TOF计算, 上述方法简单、技术成熟, 但受限于电路的响应时间, 难以获得准确的起止时刻, 测量精度较低, 且成本较高。文献[11-12]提出阈值法, 根据回波幅值首次超过预设阈值水平的时刻得到TOF, 该算法简单易实现, 但测量精度较低。文献[13-14]提出峰值法, 通过计算两个相邻回波峰值点的距离得到TOF。相较阈值法, 峰值法测量精度有所提升, 但受噪声影响, 峰值点会发生偏移。文献[15-16]提出包络法, 通过Hilbert变换或Kalman滤波等算法提取回波信号的包络, 利用两个相邻包络峰值点的距离计算得到TOF。与峰值法相比, 包络法测量精度更高, 但测量结果依然受噪声影响较大。文献[17-19]提出相关法, 将一个回波信号沿时间轴平移, 然后将平移后的信号与相邻回波做相关运算, 根据相关函数的最大值点得到TOF。相关法可在一定程度上抑制随机噪声的影响, 但对于相关性较强的周期性干扰, 抑制效果较差。LMS自适应时间延迟估计算法在迭代过程中不断修正自身结构和参数, 无

需掌握输入信号和噪声的统计先验知识即可有效抑制随机噪声和周期性干扰的影响, 且算法结构较为简单, 计算量较小<sup>[20]</sup>。

为解决现有超声测厚系统精度较低的问题, 本文研发了基于LMS自适应时间延迟估计的高精度超声测厚系统。首先分析透射式超声测厚的原理, 然后编写LMS自适应时间延迟估计算法, 之后设计超声测厚系统的发射电路、放大电路、AD采集等模块, 并开发基于MATLAB的上位机信号处理软件。利用所搭建的超声测厚系统开展仿真测试和量块厚度测量实验, 验证该系统的有效性。

## 1 测量原理

### 1.1 透射式超声测厚原理

透射式超声测厚原理如图1所示。超声发射探头和接收探头对称放置在被测工件的两侧, 发射探头受到高压脉冲激励后产生超声波, 超声波穿透被测工件, 并在被测工件的上下界面多次反射, 直至衰减消失。

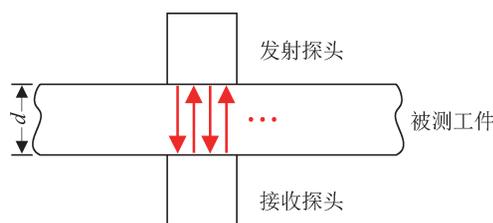


图1 透射式超声测厚原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the principle of transmission ultrasonic thickness measurement

被测工件厚度 $d$ 计算公式为

$$d = \frac{cT}{2} \quad (1)$$

式中:  $c$ 为超声波在被测工件内的传播速度,  $T$ 为相邻回波之间的TOF。

### 1.2 LMS自适应时延估计算法原理

两相邻回波信号分别表示为

$$\begin{cases} x_1(n) = s(n) \\ x_2(n) = \lambda \cdot s(n - T) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $s$ 为第一回波信号， $n$ 为采样点序号， $\lambda$ 为回波幅值的衰减系数。

对式(2)进行 Fourier 变换，得到

$$\begin{cases} X_1(e^{j\omega}) = S(e^{j\omega}) \\ X_2(e^{j\omega}) = \lambda e^{-j\omega T} \cdot S(e^{j\omega}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： $S$ 为 $s$ 的 Fourier 变换。

令  $W(e^{j\omega}) = \lambda e^{-j\omega T}$ ，可得

$$X_2(e^{j\omega}) = W(e^{j\omega}) \cdot X_1(e^{j\omega}) \quad (4)$$

对式(4)进行 Fourier 逆变换，得到

$$x_2(n) = w(n) * x_1(n) \quad (5)$$

式中： $w(n)$ 为两相邻回波之间的脉冲响应，可通过式(6)计算得到。

$$\begin{aligned} w(n) &= \mathcal{F}^{-1}[W(e^{j\omega})] \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \lambda e^{-j\omega T} e^{j\omega n} d\omega \\ &= \lambda \operatorname{sinc}[\pi(n - T)] \end{aligned} \quad (6)$$

其中，

$$\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x} \quad (7)$$

sinc 函数是以其最大值点为对称轴的偶函数，故可根据  $w(n)$  的最大值点直接得出相邻两回波之间的 TOF。LMS 自适应算法通过不断自适应迭代实现对  $w(n)$  的模拟，即

$$\begin{cases} y(k) = \mathbf{X}_1^T(k) \mathbf{W}(k) \\ e(k) = x_2(k) - y(k) \\ \mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) + \mu \cdot e(k) \mathbf{X}_1(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中： $y(k)$ 为迭代算法的实际输出； $\mathbf{X}_1(k)$ 为迭代次数为  $k$  时从  $x_1(n)$  截取的一段信号，作为迭代算法的输入， $\mathbf{X}_1(k) = [x_1(k), x_1(k+1), \dots, x_1(k+M-1)]^T$ ，其中， $M$ 为截取信号的长度； $e(k)$ 为误差； $x_2(k)$ 为期望输出； $\mathbf{W}(k)$ 为脉冲响应序列， $\mathbf{W}(k) = [w_0(k), w_1(k), \dots, w_{M-1}(k)]^T$ ，其初始值为  $\mathbf{W}(1) = [0, 0, \dots, 0]^T$ ； $\mu$ 为迭代步长；

当误差的均方值最小时，获得最优的脉冲响应序列，通过求取其最大值点即可得到 TOF。

## 2 超声测厚系统设计

### 2.1 系统总体设计

透射式超声测厚系统功能框图如图2所示，该系统主要包括以下部分：①超声换能器，由1个超

声发射探头和1个超声接收探头构成；②发射电路模块，用于输出高压窄脉冲，激励发射探头产生超声；③放大电路模块，对回波信号进行放大处理；④AD采集模块，对放大电路模块的输出信号进行采样，并将数据传输至FPGA进行处理；⑤FPGA，用于控制发射电路模块和AD采集模块，并将数据传送至个人计算机(Personal Computer, PC)；⑥PC，对回波信号进行运算，得到被测工件的厚度值。

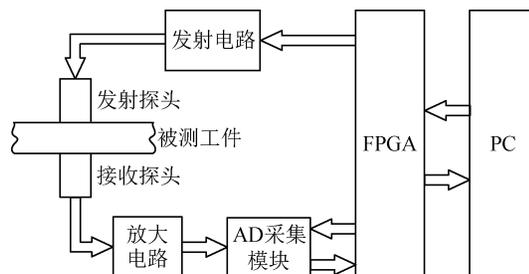


图2 透射式超声测厚系统功能框图

Fig.2 Functional block diagram of transmission ultrasonic thickness measurement system

### 2.2 超声发射及接收电路设计

综合考虑信号质量和压电晶片的使用寿命，采用幅度为300V的激励脉冲。脉宽 $t_0$ 与超声探头频率 $f_0$ 满足式(9)时，探头达到最佳输出状态<sup>[21]</sup>。

$$\frac{3\pi}{t_0} = 2\pi f_0 \quad (9)$$

综合考虑分辨力和能量衰减，系统使用的探头频率为5MHz，根据式(9)计算得出最佳脉宽为300ns。

超声发射电路通过金属-氧化物-半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)控制电容的充电和放电，进而产生高压窄脉冲。由于MOSFET管为大功率管，通过专用的栅极驱动芯片UCC27517对其进行驱动，并利用FPGA的I/O口控制栅极驱动芯片的通断。

接收探头接收到的回波信号微弱，需进行放大处理。超声探头的输出阻抗极高<sup>[22]</sup>，故采用具有高输入阻抗的同相放大电路，以达到阻抗匹配效果。放大电路的放大倍数可调，以适应不同厚度工件的测量需求。

### 2.3 高速数据采集及传输系统设计

超声回波信号的频率为5MHz，根据 Nyquist

采样定理，采样频率至少为分析信号频率的2倍，为尽量提高信号完整性，采样频率设为信号最高分析频率的10倍，即50 MHz。基于FPGA开发了高速数据采集及传输系统，FPGA芯片型号为XC7A35T，高速AD转换芯片型号为3PA1030。

AD转换后的数据需发送至PC端，通过上位机软件进一步处理。由于数据传输速度小于AD转换速度，数据在发送至PC端之前需缓存。存储器选择FPGA内部的先入先出(First Input First Output, FIFO)模块，其具有先进先出、无需寻址的特性<sup>[23]</sup>，FIFO的宽度设置为10位，深度设置为32 768。通过通用异步收发器(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter, UART)串行数据总线传输方式将存储在FIFO中的数据发送至PC端。AD转换后的数据为10位，而UART每次只能发送8位数据，故将数据分2次发送，先发送数据的低8位，再发送数据的高2位，并在高2位前补6位二进制0，使其长度扩展为8位。PC端上位机软件接收到数据低8位和数据高2位后，还原得到10位的原始数据。数据采集及传输流程如图3所示。

### 2.4 信号处理软件设计

基于MATLAB开发了上位机信号处理软件，信号处理流程如图4所示。首先对回波信号进行Hilbert变换，以提取回波的包络，然后采用MATLAB中的findpeaks函数提取包络的峰值点，findpeaks函数的参数包括最小峰值点间距MinPeakDistance和最小峰突出度MinPeakProminence，根据被测物体的厚度对其进行调整，以达到最佳效果。从峰值点开始向左右两侧扩展一定长度截取回波片段，峰值点相对脉冲回波位置固定，且扩展长度相同，所以无论扩展长度大小，截取的两段信号相似。在实际测量过程中，从峰值点向左右两

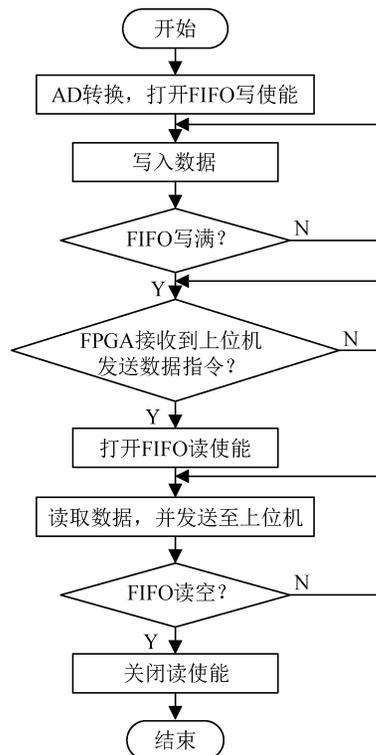


图3 数据采集及传输流程图

Fig.3 Flow chart of data acquisition and transmission

侧扩展的长度约为峰值点间距的1/2。之后对回波片段进行补零，补零的目的是使截取后的两回波片段满足式(2)，前波在后面补零，后波在前面补零。当相邻回波间的噪声信号被替换为零后，其与输入信号的相似度仍然小于期望信号与输入信号的相似度，故相邻回波间的噪声信号被替换为零只会对迭代过程中的中间变量产生影响，不会对最终结果造成影响。通过LMS自适应迭代，得到最佳脉冲响应序列 $\mathbf{W}_{opt}$ ，并计算其最大值点。

由于采集的超声回波信号是离散量，其计算精度受采样频率制约，对 $\mathbf{W}_{opt}$ 进行三次样条拟合，以提高TOF的计算精度，即

$$\hat{\mathbf{W}}_{opt} = \begin{bmatrix} w_0(t) = a_0t^3 + b_0t^2 + c_0t + d_0, t \in [T_s, 2T_s) \\ \vdots \\ w_n(t) = a_nt^3 + b_nt^2 + c_nt + d_n, t \in [(n+1)T_s, (n+2)T_s) \\ \vdots \\ w_{M-1}(t) = a_{M-1}t^3 + b_{M-1}t^2 + c_{M-1}t + d_{M-1}, t \in [M \cdot T_s, (M+1) \cdot T_s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： $\hat{\mathbf{W}}_{opt}$ 为最佳脉冲响应序列 $\mathbf{W}_{opt}$ 的分段三次样条拟合曲线， $t$ 为时间， $a_n$ 、 $b_n$ 、 $c_n$ 、 $d_n$ 为第 $n$ 段样条曲线的系数， $T_s$ 为采样周期， $M$ 为截取信号的长度。

在得到 $\mathbf{W}_{opt}$ 的最大值点后，通过求取其对应三次样条拟合曲线 $w_m(t)$ 的一阶导数的零点 $x_0$ ，进一步获得更为准确的TOF。TOF计算示意图如图5所示，其中 $U$ 为幅值。

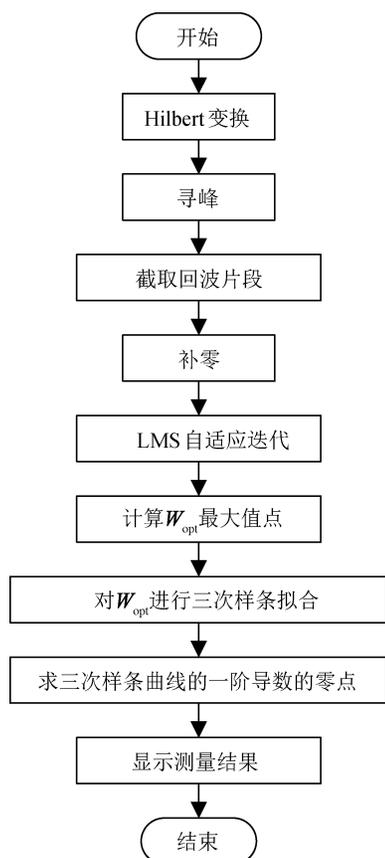


图4 信号处理流程图

Fig.4 Flow chart of signal processing

TOF 表达式为

$$T = x_0 - L + D \quad (11)$$

式中： $T$ 为超声飞行时间， $L$ 为截取的回波片段长度， $D$ 为两回波片段之间的时间间隔， $L$ 为补零长度的1/2。

为进一步提高测量精度，利用前4个回波中的每2个相邻回波计算得到3个TOF，并求均值作为一次测量的TOF值。

### 3 仿真与实验验证

#### 3.1 算法仿真实验

利用LMS法、峰值法、包络法和相关法进行仿真实验，以比较不同TOF算法的测量精度。原始模拟信号为两个连续的脉冲回波，两者之间的TOF设为110  $\mu$ s，采样频率为50 MHz，第一回波的幅值设为1.5 V，第二回波的幅值设为0.9 V。在原始模拟信号基础上，叠加信噪比  $S_{NR} = 20$  dB 和  $S_{NR} = 30$  dB 的两种高斯白噪声，以更好地模拟实际测量信号，如图6所示。

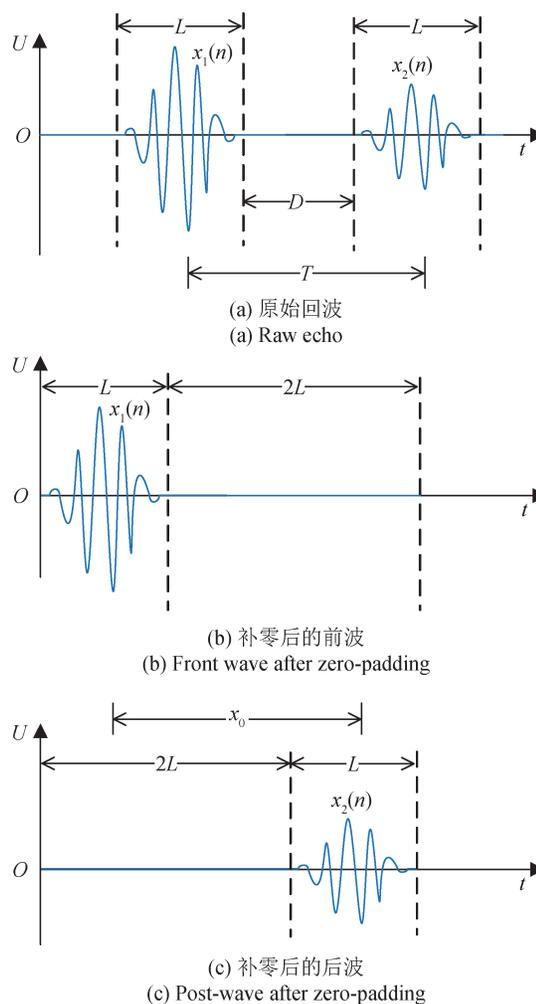


图5 TOF 计算示意图

Fig.5 Schematic diagram of TOF calculation

在  $S_{NR} = 20$  dB 和  $S_{NR} = 30$  dB 两种条件下，使用LMS法、峰值法、包络法和相关法分别进行30次仿真实验，得到测厚相对误差如图7所示。从图7中可以看出：LMS法的误差总体上小于其他3种TOF算法的误差；峰值法相对误差的极差最大，其次为包络法，相关法与LMS法相对误差的极差基本相同；当信噪比由30 dB降低至20 dB时，所有方法相对误差的极差都会增大，峰值法和包络法相对误差的极差增加量基本相同，相关法和LMS法相对误差的极差增加量也基本相同，但增加量小于峰值法和包络法。综上所述，LMS法相较于其他3种算法更具优势。

#### 3.2 测厚实验

为验证系统在实际测量情况下的有效性，以哈尔滨量具刃具公司生产的0级量块为对象进行测厚实验，根据JJG 146-2011《量块检定规程》<sup>[24]</sup>，

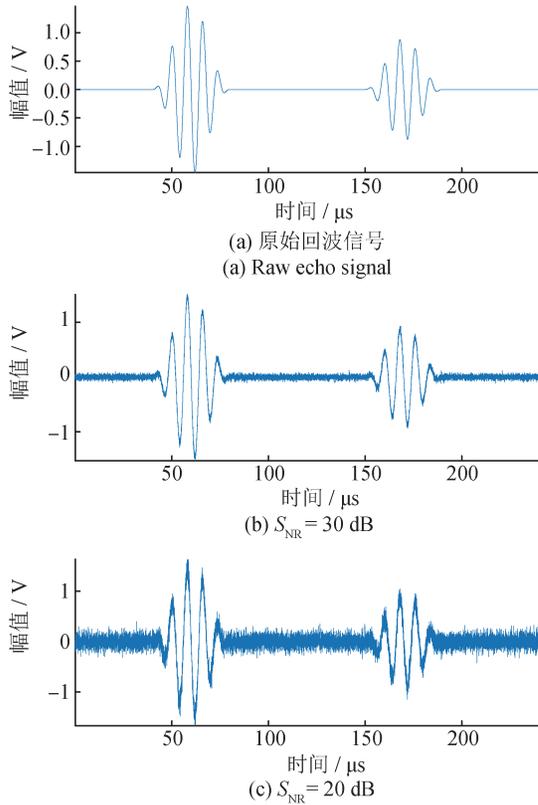


图6 模拟回波信号  
Fig.6 Simulated echo signal

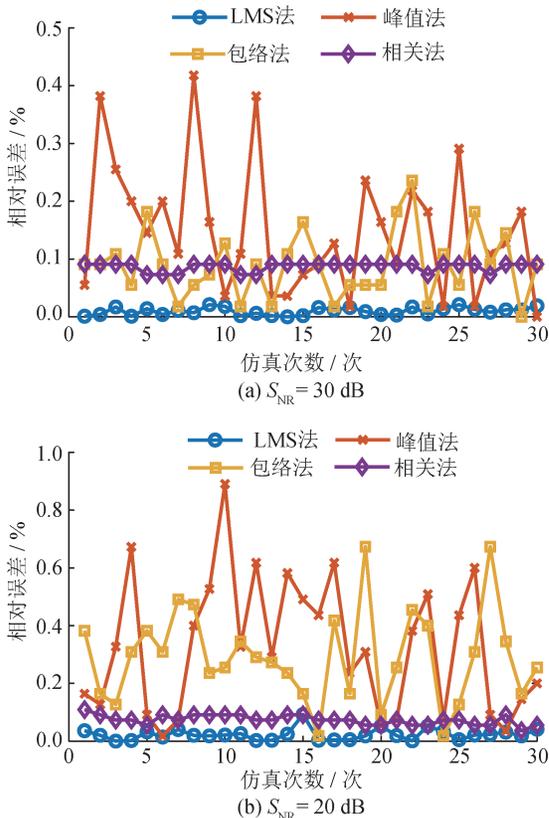


图7 测厚相对误差

Fig.7 Relative error of thickness measurement

标称长度小于等于 10 mm 的 0 级量块测量面上任意点的长度极限偏差  $t_e = \pm 0.12 \mu\text{m}$ 。采用中心频率为 5 MHz、晶片直径为 6 mm 的超声探头发射和接收超声信号，使用基于 FPGA 开发的高速数据采集及传输系统进行采样，采样频率设为 50 MHz。不同厚度量块的测量参数如表 1 所示。

表 1 不同厚度量块的测量参数

Tab.1 Measurement parameters of gauge blocks with different thickness

量块厚度 /mm	最小峰突出度 /V	最小峰值点间距 / $\mu\text{s}$	脉冲回波宽度 / $\mu\text{s}$
10.000	0.30	1.60	3.20
9.000	0.30	1.40	2.80
7.000	0.30	1.00	2.00
4.000	0.50	0.60	1.20
3.000	0.32	0.40	0.80
1.300	0.60	0.20	0.40
1.200	0.50	0.20	0.40

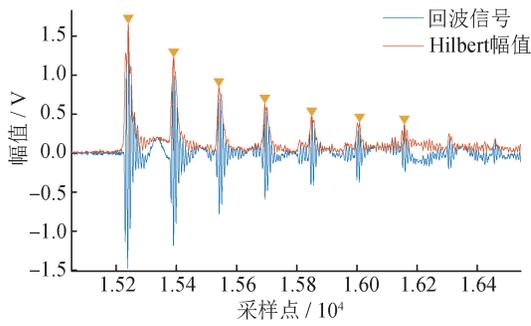
在测厚实验之前，需对量块声速进行标定测试。标称厚度 10.000 mm 量块的 10 次 TOF 测量结果平均值为 3.41  $\mu\text{s}$ ，根据式(12)计算可得量块的声速为 5 865.1 m/s。

$$c = \frac{2d}{T} \quad (12)$$

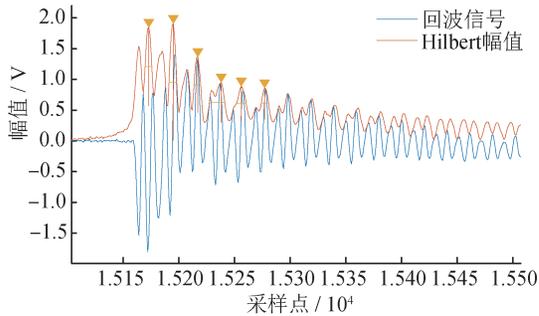
利用设计的超声测厚系统对 6 个不同厚度的量块进行测厚实验，采集得到 9.000 mm 量块和 1.200 mm 量块的超声回波信号如图 8 所示。

每个量块重复测量 10 次，TOF 测量结果平均值  $\bar{T}$ 、厚度测量结果平均值  $\bar{d}$ 、测厚相对误差及重复实验标准差  $\sigma_{\bar{d}}$  如表 2 所示。从表 2 中可以看出，最大测厚相对误差为 3.77%，重复实验标准差不高于 0.2  $\mu\text{m}$ 。

为保证测量结果的可靠性，对测量结果进行不确定度评定。经分析，厚度测量不确定度的主要来源包括 TOF 测量分辨力引入的不确定度  $u_{T\delta}$ 、量块标称长度引入的不确定度  $u_{d_n}$ 、厚度测量重复性引入的不确定度  $u_{d_r}$ 、声速标定引入的不确定度  $u_c$  ( $u_c$  的主要来源包括量块标称长度引入的不确定度  $u_{d_n}$ 、TOF 测量分辨力引入的不确定度  $u_{T\delta}$ 、TOF 测量重复性引入的不确定度  $u_{T_r}$ )，此外还有耦合剂引



(a) 9.000 mm量块的超声回波信号  
(a) Ultrasonic echo signal of 9.000 mm gauge block



(b) 1.200 mm量块的超声回波信号  
(b) Ultrasonic echo signal of 1.200 mm gauge block

图8 9.000 mm量块和1.200 mm量块的超声回波信号  
Fig.8 Ultrasonic echo signals of 9.000 mm gauge block and 1.200 mm gauge block

表2 量块厚度测量结果

Tab.2 Measurement results of gauge block thickness

量块厚度 / mm	$\bar{T} / \mu\text{s}$	$\bar{d} / \text{mm}$	相对误差 / %	$\sigma_{\bar{d}} / \mu\text{m}$	$u_d / \%$
9.000	3.07	8.99	-0.11	0.1	0.3
7.000	2.39	7.01	0.13	0.1	0.3
4.000	1.38	4.04	1.00	0.1	0.4
3.000	1.04	3.04	1.30	0.1	0.6
1.300	0.46	1.35	3.77	0.2	1.3
1.200	0.42	1.24	3.58	0.1	1.4

人的不确定度、测量时施加力引入的不确定度、测量环境温度引入的不确定度，但其影响可以忽略不计<sup>[25]</sup>。

1) TOF测量分辨力引入的不确定度  $u_{T8}$

TOF测量分辨力  $\delta_T = 0.02 \mu\text{s}$ ，TOF测量分辨力引入的不确定度  $u_{T8}$ 采用B类评定方法，区间半宽  $a = \delta_T/2$ ，假设估计值在区间内服从均匀分布，则  $u_{T8} = \frac{\delta_T}{2\sqrt{3}}$ 。

2) 量块标称长度引入的不确定度  $u_{dn}$

量块标称长度的不确定度  $u_{dn}$ 采用B类评定方法计算，假设估计值在区间内服从均匀分布，则  $u_{dn} = \frac{0.12}{\sqrt{3}} \mu\text{m}$ 。

3) 厚度测量重复性引入的不确定度  $u_{dr}$

厚度测量重复性引入的不确定度  $u_{dr}$ 采用A类评定方法， $u_{dr} = \sigma_{\bar{d}}$ 。

4) 声速标定引入的不确定度  $u_c$

TOF测量重复性引入的不确定度  $u_{Tr}$ 采用A类评定方法， $u_{Tr} = \sigma_T = 0.00003 \mu\text{s}$ ，则

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial d_n}\right)^2 u_{dn}^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial T}\right)^2 u_{Tr}^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial T}\right)^2 u_T^2} \quad (13)$$

式中： $\frac{\partial c}{\partial d_n} = \frac{2}{T}$ ， $\frac{\partial c}{\partial T} = -\frac{2d_n}{T^2}$ 。

计算得到  $u_c = 9.9 \text{ m/s}$ 。

量块厚度测量的相对不确定度  $u_d$ 为

$$u_d = \frac{1}{d} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial T}\right)^2 u_{Tr}^2 + u_{dn}^2 + u_{dr}^2 + \left(\frac{\partial d}{\partial c}\right)^2 u_c^2} \quad (14)$$

式中： $\frac{\partial d}{\partial c} = \frac{T}{2}$ ， $\frac{\partial d}{\partial T} = \frac{c}{2}$ 。

量块厚度测量的相对不确定度计算结果如表2所示，量块厚度测量的最大相对不确定度为1.4%，证明基于LMS自适应时间延迟估计的超声测厚方法测量准确性较高。

#### 4 结论

提出了基于LMS自适应时间延迟估计的高精度超声测厚方法，利用LMS算法对超声回波进行处理，无需掌握输入信号和噪声的统计先验知识即可有效抑制噪声影响，得到更准确的TOF。为减小采样频率对TOF计算精度的影响，对LMS算法中的脉冲响应序列进行三次样条拟合，进一步提高了测量精度。通过仿真实验对TOF算法的性能进行测试，结果表明：相较峰值法、包络法和相关法，LMS法精度更高，且受噪声影响较小。设计了基于LMS自适应时间延迟估计的高精度超声测厚系统，并开展量块测厚实验，结果表明：该系统测厚相对误差不高于3.77%，重复实验标准差不高于0.2  $\mu\text{m}$ ，最大相对不确定度为1.4%。该系统具有精度高、成本低廉、抗噪声性能好等优点。

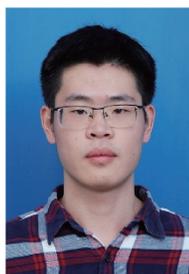
点,可应用于板材厚度测量等领域。目前,在利用回波包络的峰值点截取回波片段时,需根据被测物体的厚度手动调节寻峰参数,后续将研究自动参数调节方法,以提高测量简便性。

### 参考文献

- [1] 蔡怀阳,朱绪胜,陈代鑫,等.小管径壁厚超声测量方法及测量不确定度分析[J].中国测试,2023,49(增刊1):79-85.  
CAI H Y, ZHU X S, CHEN D X, et al. Ultrasonic measurement method of small diameter tube wall thickness and analysis of measurement uncertainty[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(supplement 1): 79-85. (in Chinese)
- [2] 杨慧泉,伍剑波,夏慧,等.压电超声SH导波管道测厚方法优化及系统设计[J/OL].应用声学:1-15 [2024-06-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2121.04.20240423.1646.002>.  
YANG H Q, WU J B, XIA H, et al. Optimization and system design of piezoelectric ultrasonic SH guided wave method in pipeline wall thickness measurement[J/OL]. Journal of Applied Acoustics: 1-15 [2024-06-05]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2121.04.20240423.1646.002>. (in Chinese)
- [3] 张金旭,陈家扬,吴冠豪.基于光谱干涉椭圆法的薄膜厚度测量[J].计测技术,2023,43(1):122-127.  
ZHANG J X, CHEN J Y, WU G H. Thickness measurement of thin films based on spectral interference ellipsometry [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(1): 122-127. (in Chinese)
- [4] PARK J, CHOIS Y, KIM J, et al. Calibration-free real-time organic film thickness monitoring technique by reflected X-ray fluorescence and Compton scattering measurement[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2020, 53(4): 1297-1303.
- [5] SARDELLITTI A, MILANO F, LARACCA M, et al. An eddy-current testing method for measuring the thickness of metallic plates[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.
- [6] VOLKER S, NORBERT B, LIU H C, et al. Method for in situ film thickness measurement of ball bearings under combined loading using capacitance measurements [J]. Tribology International, 2022, 171. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107524.
- [7] 张敏婧,赵英亮,王黎明,等.基于改进STA/LTA的高精度超声测厚方法研究[J].国外电子测量技术,2021,40(10):117-122.  
ZHANG M J, ZHAO Y L, WANG L M, et al. Research on high precision ultrasonic thickness measurement method based on improved STA/LTA[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(10): 117-122. (in Chinese)
- [8] 王选择,张瑜灿,王爱辉,等.等效采样与移动拟合结合的超声测厚方法[J].仪表技术与传感器,2022,36(9):101-107,113.  
WANG X Z, ZHANG Y C, WANG A H, et al. Ultrasonic thickness measurement method combining equivalent sampling with moving fitting[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022, 36(9): 101-107, 113. (in Chinese)
- [9] 李鑫武.微压力标准装置研制[J].计测技术,2021,41(2):178-182.  
LI X W. Design development of micro pressure standard device[J]. Metrology & Measurement Technology, 2021, 41(2): 178-182. (in Chinese)
- [10] 董力纲,王红亮,刘涛.基于时差法的外夹式超声波流量检测系统的设计与实现[J].计算机测量与控制,2020,28(11):59-65,70.  
DONG L G, WANG H L, LIU T. Design and realization of external clamping ultrasonic flow detection system based on time difference method[J]. Computer Measurement & Control, 2020, 28(11): 59-65, 70. (in Chinese)
- [11] BARSHAN B. Fast processing techniques for accurate ultrasonic range measurements [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(1): 45-50.
- [12] 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.
- [13] KIM H Y, SONG S, LEE J. 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(7A): 5240-5243.
- [14] 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)

- [15] EGANA A, SECO F, CERES R. Processing of ultrasonic echo envelopes for object location with nearby receivers [J]. IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, 2008, 57(12): 2751–2755.
- [16] LU Z, YANG C, WEI G. Hilbert transform based time-of-flight estimation of multi-echo ultrasonic signals and its resolution analysis [J]. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 2014, E97-A(9): 1962–1965.
- [17] SIMON H, SARGON Y, MICHAEL M B, 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(1): 1–9.
- [18] QUEIROS R, ALEGRIA C A F, GIRA O S P, et al. Cross-correlation and sine-fitting techniques for high-resolution ultrasonic ranging [J]. IEEE Transactions Instrumentation and Measurement, 2010, 59(12): 3227–3236.
- [19] 常蕾, 赵俭. 超声波测温技术的高温气流温场测量中的应用 [J]. 计测技术, 2014, 34(1): 1–4, 9.  
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, 9. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] 王飞宇, 雷志鹏, 李杰, 等. 基于储能电感的超声波发射电路本安化方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 182–189.  
WANG F Y, LEI Z P, LI J, et al. Research on intrinsic safety design of ultrasonic transmitting circuit based on energy storage inductance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 182–189. (in Chinese)
- [22] 孙凌逸, 高钦和, 蔡伟, 等. 低压电源驱动的超声波发射接收电路设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2010, 24(10): 77–79.  
SUN L Y, GAO Q H, CAI W, et al. Ultrasonic transmitting and receiving circuit based on DC low voltage [J]. Instrument Technique and Sensor, 2010, 24(10): 77–79. (in Chinese)
- [23] 毛园园. 基于FPGA的TCP协议的设计与验证 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.  
MAO Y Y. The FPGA design & verification of TCP protocol [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [24] 国家质量监督检验检疫总局. 量块检定规程: JJG 146–2011 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.  
State Administration for Market Regulation. Verification regulation of gauge blocks: JJG 146–2011 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2011. (in Chinese)
- [25] 吴国安, 李跃伟. 超声波测厚仪检测灭火器筒体壁厚影响因素 [J]. 消防科学与技术, 2015, 34(12): 1649–1652.  
WU G A, LI Y W. The influencing factors of measuring wall thickness of fire extinguishing cylinder with ultrasonic thickness instrument [J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(12): 1649–1652. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨)



**第一作者:** 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。



**通信作者:** 李瑞君(1976—), 男, 内蒙古和林格尔人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微纳测量技术与系统、光电检测技术与系统、精密控制技术与系统。主持国家自然科学基金项目3项、国家重点研发计划课题1项, 主要参与重大国际合作项目1项、国家863计划重点项目1项, 完成省部级及企业项目20余项。发表学术论文100余篇, 获授权发明专利30余项(含美国发明专利2项)。国际光学工程学会(SPIE)会员、中国计量测试学会委员、中国仪器仪表学会精密工程分会委员、中国机械工程学会生产工程分会测试技术专业委员会委员。