

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.06.014

# 基于自适应滤波的超声 TOFD 的近表面缺陷检测\*

汪俊<sup>1</sup>, 伏喜斌<sup>2\*</sup>, 张金梅<sup>3</sup>, 黄学斌<sup>2</sup>, 钟舜聪<sup>1,4</sup>, 范学腾<sup>1</sup>, 林起本<sup>1</sup>

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院光学/太赫兹及无损检测实验室, 福建 福州 350108; 2. 厦门市特种设备检验检测院, 福建 厦门 361000; 3. 厦门市标准化研究院, 福建 厦门 361004; 4. 上海大学 机电工程及自动化学院, 上海 200444)

**摘要:**为了解决超声衍射时差法图像近表面盲区直通波与缺陷信号混叠的问题,提出了一种基于自适应滤波的近表面缺陷信号处理方法。采用 Comsol 软件建立了 TOFD 近表面缺陷的二维有限元模型,根据超声波传播过程及 A 扫描信号分析了近表面盲区产生的原因;通过 RLS 自适应滤波算法分别对距离上表面 3 mm 和 10 mm 的仿真信号进行了处理,有效分离出了一维混叠信号中的缺陷信号,经过数值计算得到了误差较小的缺陷长度信息;利用自适应滤波技术对 TOFD 图像进行了处理,完整地将隐藏在直通波下的缺陷信号提取了出来。研究表明:RLS 自适应滤波能够有效解决近表面盲区问题,提取混叠在直通波下的近表面缺陷信号。

**关键词:**超声衍射时差法;Comsol;自适应滤波;近表面盲区

中图分类号:TM441;TP391.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)06-0618-05

## Ultrasonic TOFD detection of near surface defects based on adaptive filtering

WANG Jun<sup>1</sup>, FU Xi-bin<sup>2</sup>, ZHANG Jin-mei<sup>3</sup>, HUANG Xue-bin<sup>2</sup>, ZHONG Shun-cong<sup>1,4</sup>,  
FAN Xue-teng<sup>1</sup>, LIN Qi-ben<sup>1</sup>

(1. Laboratory of Optics, Terahertz and Non-destructive Testing, School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Xiamen Special Equipment Inspection Institute, Xiamen 361000, China; 3. Xiamen Institute of Standardization, Xiamen 361004, China; 4. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the mixture of straight wave and defect signal in near surface dead area of time of flight diffraction image, a signal processing method for near surface defects based on adaptive filtering was presented. A two-dimensional finite element model of the near surface defect of TOFD was established by Comsol. According to the propagation process of ultrasonic wave and the A-scan signal, the causes of the near surface dead area were analyzed. The RLS adaptive filtering algorithm was applied to process the simulated signals under the upper surface of 3mm and 10mm respectively, which could effectively separate the defect signals in the one-dimensional mixed signals, and could get the defect length information with less error compared with the simulation data. The adaptive filtering technology was employed to process the TOFD image, and subsequently the defect signal hidden under the direct wave was extracted. The experimental results demonstrate that the RLS adaptive filter can effectively solve the problem of the near surface dead area and extract the near surface defect signal under the direct wave.

**Key words:** time of flight diffraction(TOFD); Comsol; adaptive filtering; near surface detection dead zone

## 0 引言

超声衍射时差法因其具有的优点,在焊缝检测中得到越来越广泛地应用。超声 TOFD 技术对焊缝进行

检测时,由于近表面盲区的存在,往往造成对缺陷的漏检、误检,以至无法对缺陷进行有效地识别<sup>[1]</sup>。实际检测过程中,由于检测过程中诸多的因素导致直通波到达时间的误差,使得 A 扫描信号周围产生杂波、D

收稿日期:2017-12-09

**基金项目:**福建省自然科学基金资助项目(2015J01234);国家自然科学基金资助项目(51675103);福建省杰出青年基金滚动项目(2014J07007);上海市自然科学基金资助项目(18ZR1414200);福建省质量技术监督局科技项目(FJQI2016050)

**作者简介:**汪俊(1991-),男,安徽桐城人,硕士研究生,主要从事超声无损检测及图像处理方面的研究。E-mail:wangjunsina@163.com

**通信联系人:**伏喜斌,男,高级工程师,硕士生导师。E-mail:xibinfu@163.com

扫描图像中直通波并非为直线以及由于直通波脉冲宽度原因如果试件厚度较薄或者缺陷位于盲区范围,缺陷波就容易与直通波发生混叠,从而无法对缺陷进行定量定位<sup>[2]</sup>。

在近表面盲区缺陷检测的研究中的两个主要方向是:提高超声 TOFD 焊缝近表面缺陷的检测能力,增强 TOFD 检测图像。BASKARAN G<sup>[3]</sup>等使用超声波横波衍射信号(而不是纵波)用于缺陷的检测,通过利用信号处理技术(ESIT)对缺陷尖端衍射回波信号的分析,提高近表面缺陷的检测精度,但横波产生的衍射信号能量较低,会淹没在背景噪声之中,影响缺陷横波的识别;迟大钊等<sup>[4]</sup>提出了一种纵波3次反射的 TOFDW 检测模式,有效检测到埋藏深度 1.0mm 的近表面缺陷,但其检测过程较复杂,较难确认缺陷波的位置信息;迟大钊<sup>[5-6]</sup>以及陈伟<sup>[7]</sup>等提出了基于图像能量分布的算法消除直通波,实现了缺陷目标地有效提取,但是该方法要求较高的信噪比,且对阈值的设定受到背景信号的影响,并利用递归最小二乘法自适应滤波技术对图像背景杂波的去,提高近表面缺陷的识别能力;张树潇等<sup>[8]</sup>提出了一种利用频谱分析法从近表面缺陷混叠的信号中提取缺陷位置信息,有效减小了 TOFD 检测技术近表面盲区深度,但该方法具有一定适用范围;SHAKIBIB<sup>[9]</sup>等提出了一种利用自回归谱外推方法提高管道环焊缝超声检测系统时间分辨率的实用算法,该算法使得回波解析信号幅值的最大半宽度平均减少 80%,焊缝根部盲区的减小接近 80%,能有效检测 0.5 mm ~ 5 mm 范围的内部缺陷;杨齐等<sup>[10]</sup>提出了自适应匹配追踪算法,实现了对时域混叠信号地分离,在处理近表面缺陷具有一定的应用价值,但具体的检测效果还需要进一步验证;MOR E<sup>[11]</sup>等提出一种支持匹配追踪(SMP)的方法解决回波在时域上的重叠问题,相较稀疏匹配追踪(MP)和基追踪(BP)能较好的提高信号的分辨率。

针对超声 TOFD 近表面盲区问题,本研究提出一种基于自适应滤波的近表面缺陷信号处理方法。

## 1 TOFD 近表面盲区信号滤波原理

### 1.1 递推最小二乘法(RLS)

RLS 是一种递推的最小二乘法,它所观察的数据长度是可变的<sup>[12]</sup>。此外,在误差测度函数  $J(n)$  中引入遗忘因子  $\lambda$ ,以使自适应滤波器具有对输入过程特性变化的快速反应能力。

RLS 的设计准则是指指数加权平方差累积的最小

化。即:

$$J(n) = \sum_{i=0}^n \lambda^{n-i} |e(i)|^2 \quad (0 < \lambda < 1) \quad (1)$$

RLS 算法步骤:

- (1) 初始化; $\omega = [0 \cdots 0]^T, n = 0, P_{xx}(0) = \sigma^{-1}I$ ;
- (2) 当  $n = n + 1$  时,更新。

$$e(n) = d(n) - \omega^T x(n) \quad (2)$$

$$K(n) = \frac{P_{xx}(n)x(n)}{\lambda + x^T(n)P_{xx}(n-1)x(n)} \quad (3)$$

$$P_{xx}(n) = \frac{1}{\lambda} [P_{xx}(n-1) - K(n)x^T(n)P_{xx}(n-1)] \quad (4)$$

$$\omega(n) = \omega(n-1) + K(n)e(n) \quad (5)$$

式中: $K(n)$ —增益矢量; $e(n)$ —误差估计; $\omega(n)$ —权矢量; $P_{xx}(n)$ —逆矩阵。

### 1.2 TOFD 信号自适应滤波原理

递归最小二乘法受到遗忘因子的影响,一般它作为一个固定值,对算法的追踪性能和稳定误差有较强的控制能力。对于 RLS 算法,较小的遗忘因子会导致更快的收敛速度和跟踪速度,但稳态时的均方误差较差。另一方面,较大的遗忘因子在稳态时会导致相对较小的误差,但收敛速度和跟踪速度很慢<sup>[13]</sup>。因此,固定遗忘因子 RLS 算法很难同时具有较快的跟踪速度和较低的稳定误差。

在本研究中引入随着误差变化不断调整的可变遗忘因子<sup>[14]</sup>:

$$\lambda = \lambda_{\min} + (0.995 - \lambda_{\min})e^{-e^2(n)} \quad (6)$$

其中, $\lambda_{\min} = 0.9$ 。

在利用可变遗忘因子 RLS 滤除 TOFD 近表面盲区直通波的过程中,将带有缺陷的 TOFD 信号作为系统输入,无缺陷的 TOFD 信号作为滤波器输入,滤除后信号即是分离出的缺陷信号。

RLS 自适应滤波原理如图 1 所示。

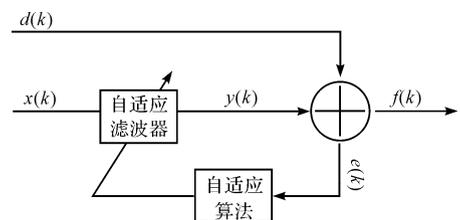


图 1 基于 RLS 自适应滤波原理

$d(k)$ —待处理信号; $x(k)$ —参考信号; $y(k)$ —参数估计信号; $e(k)$ —误差信号; $f(k)$ —输出信号

当算法迭代过程没有遇到混叠的缺陷信号时,即误差靠近 0,遗忘因子靠近 0.995,算法具有较好的对

消能力,可以忽略信号波形的抖动;当算法迭代到混叠的缺陷信号时,即误差较大,遗忘因子随之减小,此时算法将快速追踪信号之间的差异。本研究中将遗忘因子上限选择为 0.995,是因为在实际操作过程中发现若是取 1,将导致在滤波的迭代过程中产生直通波信号的抖动,影响混叠信号的分离。通过对上述遗忘因子的设计能有效实现抑制直通波信号,提取缺陷信号的目标<sup>[15]</sup>。

## 2 基于 COMSOL 的超声 TOFD 仿真

本研究采用 COMSOL 瞬态声学模块进行超声 TOFD 技术二维数值模拟。模型采用钢材料,此材料密度为  $7\ 850\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,纵波在材料中的声速为  $6\ 200\ \text{m}/\text{s}$ 。整个模型的长度为  $90\ \text{mm}$ ,厚度为  $40\ \text{mm}$ ,椭圆形的缺陷上端点距离上表面  $10\ \text{mm}$ ,其长轴为  $4\ \text{mm}$ ,短轴为  $0.2\ \text{mm}$ <sup>[16]</sup>,发射点和接收点与缺陷中轴线的垂直距离为  $19\ \text{mm}$ 。根据惠更斯时间延迟法则<sup>[17]</sup>,采用逐点延迟加载的方式,形成特定入射角度的超声波,本研究选取的入射角为  $45^\circ$ 。超声 TOFD 模型有限元仿真如图 2 所示。

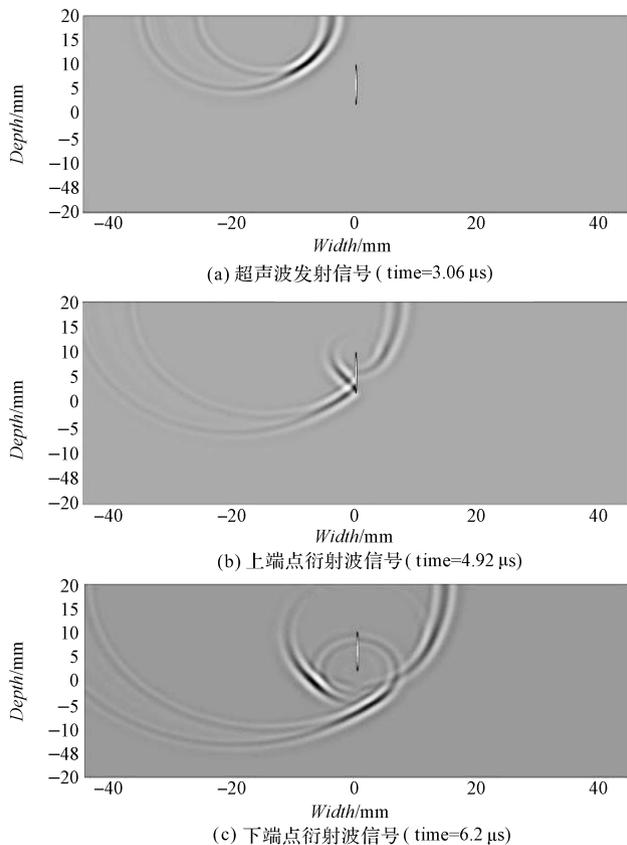


图 2 超声 TOFD 模型有限元仿真

图 2(a) 显示超声波在焊缝内部沿  $45^\circ$  传播。随着声波的传播,当到达缺陷的上端点位置(上端点位置

处于近表面盲区),依旧可见缺陷的上端点产生衍射波信号,在  $4.92\ \mu\text{s}$  时上端点衍射波的声压场分布图如图 2(b) 所示。当声波继续传播至缺陷下端点位置(下端点不处于近表面盲区),同样于下端点处产生衍射波信号,在  $6.2\ \mu\text{s}$  时下端点衍射波的声压场分布图如图 2(c) 所示。通过对超声波传播过程的仿真,可以明确近表面盲区虽然会掩盖缺陷信号,但不影响缺陷尖端位置产生衍射波信号。

超声 TOFD A 扫描信号如图 3 所示。

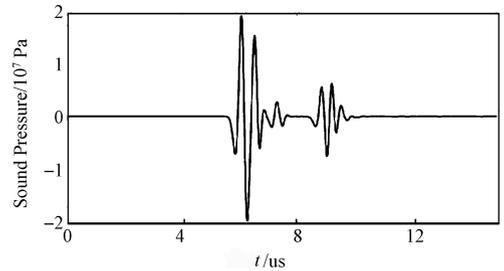


图 3 超声 TOFD A 扫描信号

从图 3 中可以看出:未能得到明显的直通波、上下端衍射波等信号,这是由于上端点进入近表面盲区,直通波和缺陷上端点衍射波相互叠加在一起,使我们不能确定缺陷的位置和长度信息,因此有必要利用信号处理方法在不损坏缺陷信号的前提下将图像中的直通波自动滤除。

## 3 实验结果及分析

### 3.1 RLS 对 A 扫描信号处理

从 COMSOL 中得到的 TOFD 近表面盲区的 A 扫描信号,近表面处的缺陷信号隐藏在直通波信号之下而不能被识别<sup>[18]</sup>。将没有缺陷的 A 扫描信号作为滤波器的输入信号,带有缺陷的参考信号作为输入信号,通过 RLS 自适应滤波器,以实现缺陷信号和直通波信号的分离。

自适应滤波对距离近表面  $10\ \text{mm}$ 、 $3\ \text{mm}$  仿真信号处理分别如图(4,5)所示。

当上端点距离近表面  $10\ \text{mm}$  时,图 4(a) 为近表面盲区仿真得到的 A 扫描信号;图 4(b) 表示经过 RLS 自适应滤波后得到的缺陷信号;图 4(c) 显示了递推最小二乘法在迭代过程中遗忘因子的变化情况。从图 4(b) 可以看出:经过 RLS 自适应滤波后,能够较好的将直通波信号与上端点衍射信号分离,由于上端点缺陷位于近表面盲区的边缘,能够看到上端点缺陷信号与直通波信号混叠的部分不多,得到较好的分离效果。

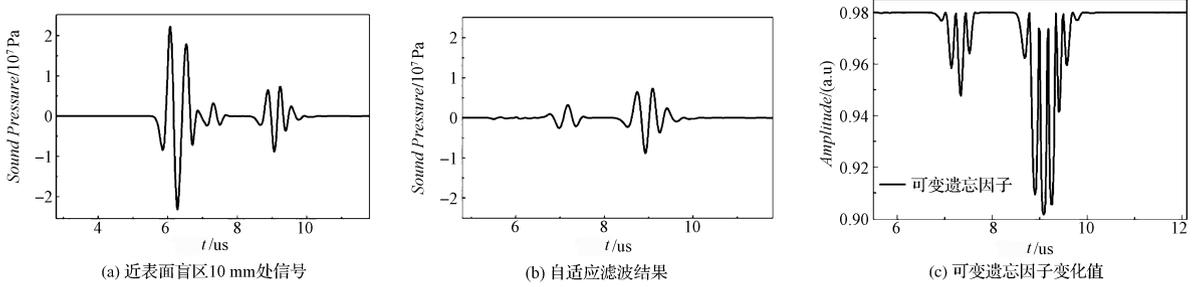


图4 近表面 10 mm 仿真信号处理

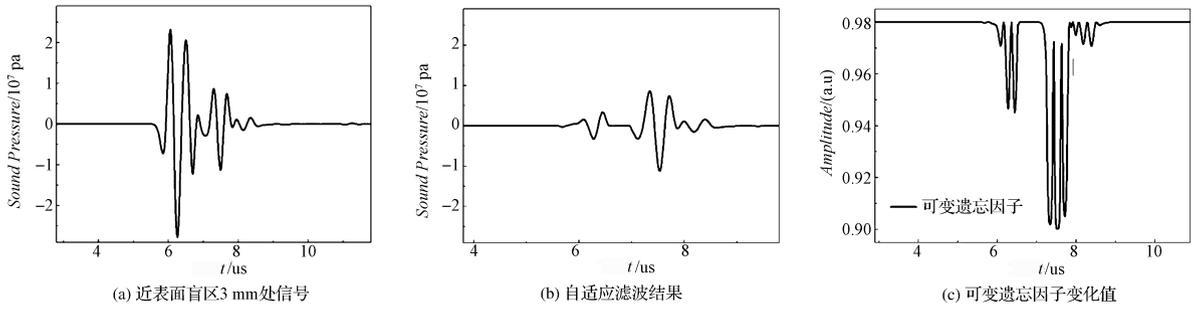


图5 近表面 3 mm 仿真信号处理

当上端点距离近表面距离为 3 mm 时,图 5(a)为近表面盲区仿真得到的 A 扫描信号;图 5(b)表示经过 RLS 自适应滤波后,得到的缺陷信号;图 5(c)显示了递推最小二乘法在迭代过程中遗忘因子的变化情况。从图 5(b)可以看出输出结果仍保留部分直通波的信号特征,这是由于算法较多次的自适应迭代造成的,但仍较好的将上端点缺陷信号从直通波中分离出来。

根据文献[19],选取图 4(b)、图 5(b)中的上下端点缺陷信号的最大幅度位置作为时间点,获取两端点

的时间差。经过计算可知:当上端点距离上表面 3 mm 时,得到缺陷长度为 7.78 mm,与仿真数据的误差为 0.22 mm;当上端点距离上表面 10 mm 时,得到缺陷长度为 8.375 mm,与仿真数据的误差为 0.375 mm。经自适应滤波得到缺陷信号后,尽管得到的计算结果与仿真数据有一定的误差(小于 4.5%),但仍能较为准确的得到缺陷的长度信息。

### 3.2 RLS 对 D 扫描信号的处理

自适应滤波对非近表面、近表面盲区 TOFD 图像处理如图(6,7)所示。

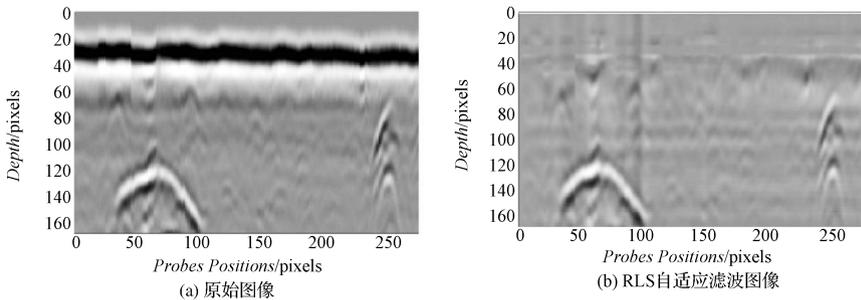


图6 非近表面盲区自适应滤波图像

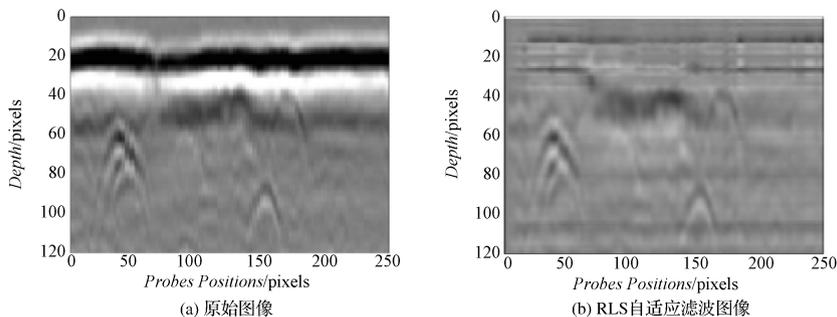


图7 近表面盲区自适应滤波图像

超声 TOFD 成像检测采用接触式测量,当被检工件的表面不平整时,会使检测得到的直通波波达时间不一致,在检测图像上本应平直的直通波会变得扭曲,如图 6(a)所示。因此,在进行自适应滤波前,需要将直通波拉直。图 6 的缺陷不在近表面附近,通过 RLS 自适应滤波算法能够较好的分离直通波和缺陷信号。图 7(a)右侧部分缺陷与直通波相接触,通过 RLS 算法有效去除了图像的直通波信号,避免了直通波信号对缺陷信号的干扰,能有效完成提取缺陷信号的目标。

## 4 结束语

本研究针对超声 TOFD 近表面盲区直通波与缺陷信号混叠的问题,提出了基于 RLS 自适应滤波的解决方法。实验结果表明,该方法能够较好地将近直通波和缺陷波信号分离,提取缺陷信号。

由于近表面盲区的问题很多出现在薄板的 TOFD 检测过程中,研究提高纵向分辨率以有效分离直通波、缺陷上端和下端衍射波以及底面反射波等信号,实现各信号波达时间的精确计算具有重大意义。后续研究工作将围绕提高检测薄板焊缝缺陷的分辨率开展。

### 参考文献 (References):

[1] 周红明. 薄材焊缝自动化超声 TOFD 成像检测关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2014.

[2] 陶京新,卢超,刘松平. 薄板焊缝中超声 TOFD 检测方法浅析[J]. 航空制造技术,2014,464(20):87-90.

[3] BASKARAN G, BALASUBRAMANIAM K, LAKSHMANA R C. Shear-wave time of flight diffraction (S-TOFD) technique[J]. *Ndt & E International*,2006,39(6):458-467.

[4] 迟大钊,刚铁,姚英学,等. 一种基于超声 TOFD 法的近表面缺陷检测模式[J]. 焊接学报,2011,32(2):25-28.

[5] 迟大钊,刚铁. 基于超声杂波抑制的缺陷检测[J]. 焊接学报,2015,36(10):17-20.

[6] 迟大钊,刚铁,孙昌立. 基于自适应滤波的超声杂波抑制方法[J]. 焊接学报,2015,36(11):33-36.

[7] 陈伟,詹红庆,杨贵德,等. 基于直通波抑制的超声 TOFD 图像缺陷检测新方法[J]. 无损检测,2010(6):402-405.

[8] 张树潇,谢雪,刘丽丽,等. 基于频谱分析原理减小 TOFD 检测近表面盲区的方法[J]. 无损探伤,2013,37(6):20-21.

[9] SHAKIBI B, HONARVAR F, MOLES M D C, et al. Resolution enhancement of ultrasonic defect signals for crack sizing[J]. *Ndt & E International*,2012,52(4):37-50.

[10] 杨齐,郑晖,侯金刚,等. TOFD 图像时域解混叠的自适应匹配追踪方法[J]. 应用声学,2016,35(6):487-493.

[11] MOR E, AZOULAY A, ALADJEM M. A matching pursuit method for approximating overlapping ultrasonic echoes[J]. *Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control IEEE Transactions on*,2010,57(9):1996-2004.

[12] PERGOLONI S, BIAGI M, COLONNESE S, et al. A space-time rls algorithm for adaptive equalization; the camera communication case[J]. *Journal of Lightwave Technology*,2017,35(10):1811-1820.

[13] PALEOLOGU C, BENESTY J, CIOCHINA S. A robust variable forgetting factor recursive least-squares algorithm for system identification[J]. *IEEE Signal Processing Letters*,2008(15):597-600.

[14] 陈涵,刘会金,李大路,等. 可变遗忘因子递推最小二乘法对时变参数测量[J]. 高电压技术,2008,34(7):1474-1477.

[15] OYERINDE O O, MNENEY S H. Variable forgetting factor rls algorithm-based channel estimator for mc-idma communication systems[J]. *Wireless Personal Communications*,2015,83(2):1-14.

[16] 宋小春,王亚午,涂君. 基于超声衍射时差法的缺陷检测技术仿真分析[J]. 传感器与微系统,2015,34(5):55-58.

[17] CHEN H, SUN K, KE C, et al. Simulation of ultrasonic testing technique by finite element method[C]. Prognostics and System Health Management Conference, Beijing:IEEE, 2012.

[18] 锥里柯. 衍射时差法 (TOFD) 超声检测表面盲区的不同算法[J]. 无损探伤,2012(5):45-46.

[19] 史俊伟,刘松平. 浅谈超声衍射时差法 (TOFD) 检测技术[J]. 航空制造技术,2009(s1):96-100.

[编辑:张豪]

### 本文引用格式:

汪俊,伏喜斌,张金梅,等. 基于自适应滤波的超声 TOFD 的近表面缺陷检测[J]. 机电工程,2018,35(6):618-622.

WANG Jun, FU Xi-bin, ZHANG Jin-mei, et al. Ultrasonic TOFD detection of near surface defects based on adaptive filtering[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(6):618-622.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>