



基于声发射的光学元件损伤监测方法研究^{*}

洪梦君¹, 张军伟¹, 徐振源¹, 李玉海²

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150000)

摘 要: 光学元件损伤是限制激光通量水平提高的重要因素之一。为快速、准确地检测光学元件损伤是否产生, 支撑光学元件循环修复策略的使用, 研究并提出了基于声发射技术的光学元件损伤检测方法, 通过研究光学元件损伤产生的声发射信号特征, 判断光学元件是否发生损伤, 使用一种基于二次相关和相关峰精确插值(FICP)的时延估计算法, 通过仿真验证了该算法的可行性, 结合时差定位原理建立了损伤位置求解方法, 并通过实验进行了验证。研究表明: 该方法能从监测信号中快速地获得损伤的位置估计, 其平均定位误差为 8.61 mm, 计算时间为 0.143 s/次, 对大口径光学元件的损伤在线监测具有应用潜力。

关键词: 激光光学; 损伤监测; 声发射; 时延估计; 声源定位

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220031

Optical component damage monitoring method based on acoustic emission

Hong Mengjun¹, Zhang Junwei¹, Xu Zhenyuan¹, Li Yuhai²

(1. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. School of Mechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: Optical component damage is one of the important factors that limit the improvement of laser flux level. To quickly and accurately detect whether optical component damage occurs and support the use of optical component cycle repair strategy, we proposed an optical component damage detection method based on acoustic emission technology. Whether the optical component is damaged was judged by studying the characteristics of acoustic emission signals generated by optical component damage. A time delay estimation algorithm based on quadratic correlation and fine interpolation of correlation peak (FICP) was developed. The feasibility of the algorithm was verified by simulation. Combined with the principle of time difference location, a method for solving the damage location was established and verified by experiments. The results show that the method can quickly obtain the damage location estimation from the monitoring signal. The average positioning error is 8.61 mm, and the average calculation time for positioning is 0.143 s. The method has the potential to be applied to on-line damage monitoring of large-aperture optical components.

Key words: laser optics, damage monitoring, acoustic emission, time delay estimation, sound localization

高功率激光装置是激光发展的重要方向之一, 随着激光通量水平的提高, 光学元件在强激光作用下的损伤问题是限制其功率、能量以及长期运行主要因素之一, 为防止高功率激光装置运行过程中, 产生不可承受的后果, 大型激光装置运行中常采用光学元件的循环修复策略, 即在光学元件损伤产生后, 及时下架进行修复, 避免光学元件产生永久性损伤, 因此光学元件及时、准确地在线损伤检测, 是支撑高功率激光装置循环使用策略的重要必备手段。以机器视觉原理为基础^[1]的损伤在线检测技术目前是光学元件损伤检测的主流方法, 该方法检测精度高, 但检测效率低, 同时易受到相机分辨率、照明等环境因素的影响。因此研究新的光学元件损伤检测方法, 快速高效地检测光学元件是否发生损伤并且找出损伤的确切位置对高功率激光装置的运行具有重要的意义。

声发射(AE)技术^[2]具有灵敏有效和实时在线的特点, 广泛应用于金属、岩石、复合材料等材料的无损检测中^[3]。

* 收稿日期: 2022-01-19; 修订日期: 2022-04-24

联系方式: 洪梦君, hong.mj@qq.com。

通信作者: 张军伟, zhangjunwei@caep.cn。

现代声发射技术的研究始于 20 世纪 50 年代德国 Kaiser^[4] 的研究, Tatro^[5] 认为声发射技术可以作为研究工程材料的重要手段; David^[6] 对声发射信号进行时域重采样, 并对频谱进行平均, 实现轴承故障诊断, 焦敬品^[7] 等基于弹性波在金属薄板中传播特性对薄板中损伤破坏进行线性定位; 苏俊宏^[8] 等人提取光声信号的频率特征, 利用曲线相似函数识别薄膜损伤; 易木保^[9] 使用光声幅值法对熔石英与 K9 玻璃的激光诱导损伤进行了损伤判定; 陈柯骏^[10] 利用频谱特征峰分析改良了损伤判据将光声检测精度提升至熔石英损伤早期阶段。声发射技术在金属和复合材料结构的裂纹监测中有着广泛的应用和研究, 但对光学元件进行损伤监测的研究较少, 对其研究还有待深入。

本文通过对光学元件进行声发射监测, 利用参数分析判断损伤的有无, 采用时差定位, 在满足监测效率和精度的前提下, 获取光学元件在激光辐射过程中的声发射信号特征及损伤发生时刻, 为光学元件的损伤检测提供新的高效手段。

1 光学元件损伤声发射检测方法

1.1 声发射检测技术

依据声发射的基本定义, 产生声发射的两个必要条件分别是外部激励和材料发生损伤, 声发射检测属于被动的无损检测方法。图 1 为基于声发射技术的光学元件损伤检测方法的示意图, 光学元件在外部激励作用即激光辐射下, 当材料发生损伤时就会释放弹性波即声发射信号, 利用与光学元件耦合连接的声发射传感器接收该信号并将其转换为电信号, 经放大器放大后传输至采集系统进行记录和处理^[11]。声发射检测具有结构简单、在线无损监测等特点, 并且可以不受被测零件的形状和尺寸的影响。

本文利用声发射技术并基于 TDOA 定位算法^[12] 实现光学元件损伤定位, 具体实现步骤为: 激光辐照待测样品产生声发射信号, 通过传感器接收该信号并经过前置放大器, 由声发射仪锁定记录, 利用编写的 AE 定位算法对信号进行处理, 即可得到样品的损伤状况。时差定位算法的主要流程可分为: (1) 时延估计, 即从声信号中获取声源与传感器之间的时延的过程; (2) 位置解算, 是在获得延时后, 利用传感器坐标获得声源坐标的过程。

1.2 时延估计

时延估计中应用最广泛的算法是广义互相关算法, 为了提高抗噪声性能和相关函数的分辨率, 文献 [13] 基于二次相关算法^[14] 和相关峰的精确插值算法^[15] (FICP), 提出一种改进的广义互相关时延估计算法, 本文将该方法用于光学元件损伤检测中。该算法首先用线性调频 Z 变换 (MCZT) 代替 FFT 计算信号 $X_1(n)$ 、 $X_2(n)$ 的细化谱, 提高频谱精度, 然后计算 $X_1(n)$ 的自功率谱和 $X_1(n)$ 和 $X_2(n)$ 的交叉功率谱, 在此基础上, 通过二次相关以提高抗噪性能, 然后进行相位变换广义加权处理以获得互功率谱, 最后, 对相关峰进行精确插值, 以提高相关函数的分辨率。算法流程图如图 2 所示。

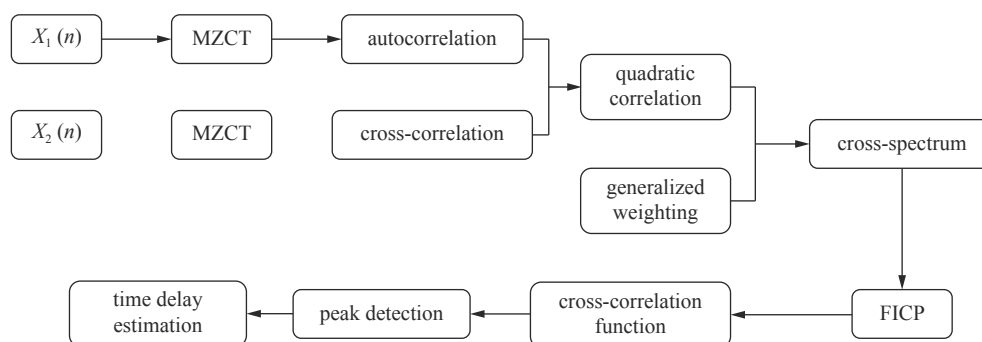


Fig. 2 Improved algorithm process

图 2 改进算法流程

1.3 位置解算

如图 3 所示, 假设声发射源在传感器 1、2、3 之间产生声发射信号, 则该信号到达 1、2 和 1、3 传感器的时差

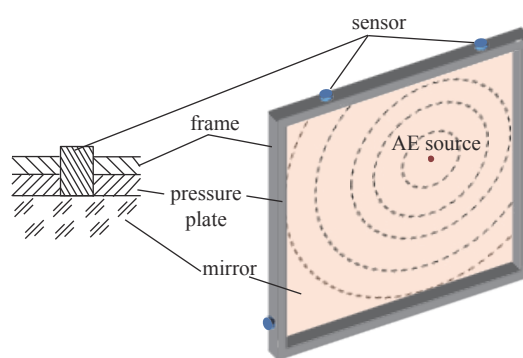


Fig. 1 Acoustic emission testing method

图 1 声发射检测方法

为： $\tau_{12} = t_1 - t_2$ 、 $\tau_{13} = t_1 - t_3$ (t_1 、 t_2 、 t_3 分别为信号到达三个探头所用的时间)。假设 d 代表距离， v 代表试样中的波速，则满足以下计算方程

$$\begin{cases} v\tau_{12} = d_1 - d_2 \\ v\tau_{13} = d_1 - d_3 \\ d_1^2 = (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 \\ d_2^2 = (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 \\ d_3^2 = (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 \end{cases} \quad (1)$$

为了求解上述非线性方程并获得精确解，研究学者们提出了各种求解算法，其中牛顿迭代法^[16]解算得出的声源坐标精度较高，故本文使用该方法求解。

2 MATLAB 仿真与分析

为了验证该时延估计改进算法的性能，进行了仿真实验。仿真环境为真空下，尺寸为 430 mm×430 mm 的熔石英元件，声源为实验采集的一段损伤声发射信号，采样频率为 500 kHz，采样长度 $N=5000$ ，频谱细化 10 倍，其相关函数的分辨率提升 10 倍，并且噪声为高斯白噪声。声源的坐标为 [120,380]，三个传感器的坐标为 [0,0]、[430,0]、[430,430]，仿真比较了改进算法和 GCC-PHAT 在不同信噪比下的时延估计性能。

时延估计性能用均方根误差 (RMSE) 来衡量，均方根误差定义为

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} (\tau_i - \tau_0)^2} \quad (2)$$

式中： τ_0 是真实时延值， τ_i 为第 i 个时延估计值， N_r 为时延估计的总数。

当 SNR 从 25 dB 下降到 -5 dB 时，200 组/dB 的仿真实验得到的 RMSE 如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出，两种算法的时延估计性能都与信噪比成正比，然而改进算法比 GCC-PHAT 的性能更好。图 4(b)显示了当 SNR=25 dB 时两种算法的时延估计绝对误差。从图中可以看出，改进算法的时延估计误差比 GCC-PHAT 算法的更小即更接近真实时延，具有更高的时延估计精度。

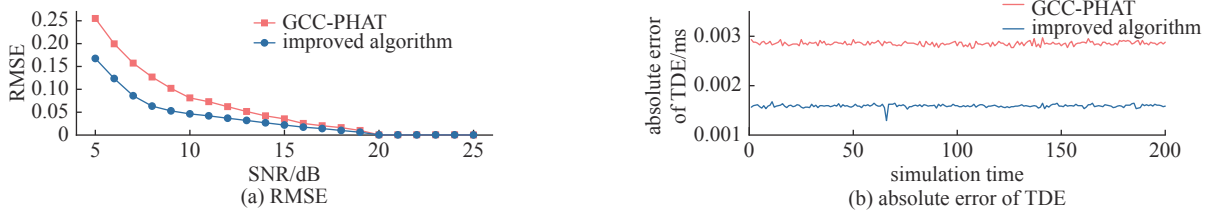


Fig. 4 Comparison of RSME and absolute error of TDE between the two algorithms

图 4 两种算法的 RSME 和时延估计绝对误差比较

3 激光损伤声发射监测系统设计

如图 5 所示，本实验装置为一套光、机、电、算一体化的检测系统，系统设计主要包括 3 个方面：传感器布置、光路设计与算法设计，其总体设计思路为：

(1)激光经实验光路辐照待测样品产生声发射信号；(2)建立传感器阵列，用于接收声发射信号；(3)由声发射仪完成声发射信号的传输及存储工作；(4)在 PC 端借助 MATLAB 数学工具完成声源定位的时延估计与位置解算过程，并输出定位结果。

3.1 传感器布置

声发射信号前沿时间只有几十到几百 ms，且信号强度很弱，AE 信号的收集是声发射成功检损的关键。光学元件初始损伤时，通常后表面出现损伤，因而将传感器粘合在光学元件出射面处以便于检测初始损伤 AE 信号。为接收到完整信号，使用真空脂作为耦合剂将声发射传感器固定在光学元件背面。基于不同的传感器阵列拓扑结构，声源定位系统的定位性能会有较大的差异。目前常用的二维平面声源定位通常将传感器放置为任意三角形，但是根据实践研究^[17]，锐角三角形的顶点附近盲区不明显，故一般推荐采用锐角三角形。根据样品尺寸、传感器

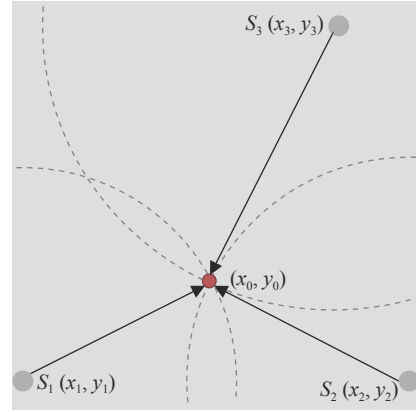


Fig. 3 AE source plane localization of three sensor arrays

图 3 三传感器阵列的 AE 源平面定位

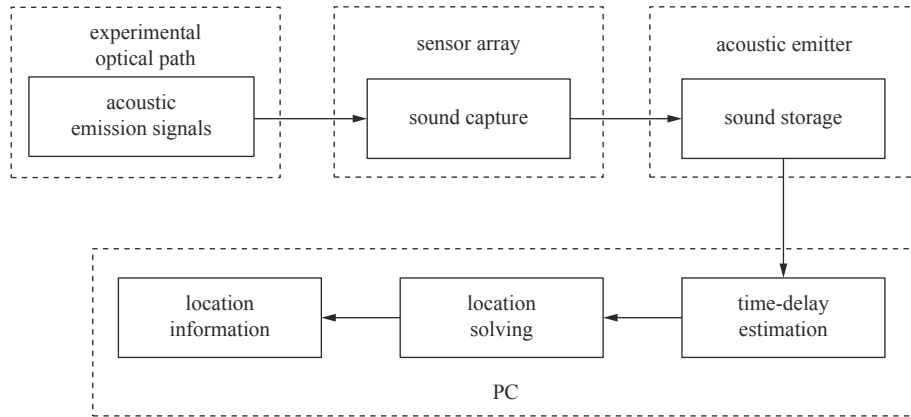


Fig. 5 Design of system
图 5 系统设计思路

直径,关于玻璃样品的传感器布置见图 6。

3.2 光路设计

在光学系统中还附加有监测系统,监控激光光斑和能量,基于声发射的光学元件损伤监测研究实验光路设计如图 7 所示。Nd:YAG 调 Q 激光器的输出波长为 355 nm,能量计探头用于实时监测单发脉冲的脉冲能量; CCD 用于实时监测单发脉冲的光斑强度分布; f 为平凸透镜, HR 为反射镜, PAD 为声发射传感器。样品辐照位置处的光斑面积为 1 mm^2 ,通过调整激光器输出能量大小改变的激光能量密度。

3.3 声发射仪参数设置

采用的声发射设备是北京声华公司生产的 SAEU3H 声发射仪,能够实时采集和显示声发射信号波形和参数。在实验过程中存在噪声干扰,噪声源主要来自于实验室中风机运转和实验设备在运行过程中的机械噪声,幅度较大且频率分布广而使得损伤发生的声发射信号被淹没。为减少噪声的影响,采用滤波的方法减少环境干扰。首先测定背景噪声,确定阈值。设置声发射仪参数如下:采用固定阈值,幅度阈值设置为 30 dB,前放增益 40 dB,声发射时间定义时间 (HDT) 设为 $200 \mu\text{s}$,峰值定义时间 (PDT) 为 $50 \mu\text{s}$,波击闭锁时间 (HLT) 为 $300 \mu\text{s}$ 。设定采集波形,数据采集卡采样频率为 0.5 MHz; 采样长度 2 K。

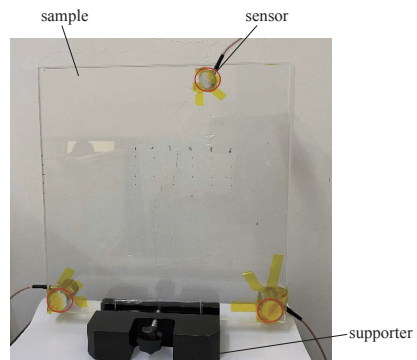


Fig. 6 Sensor placement
图 6 传感器布置

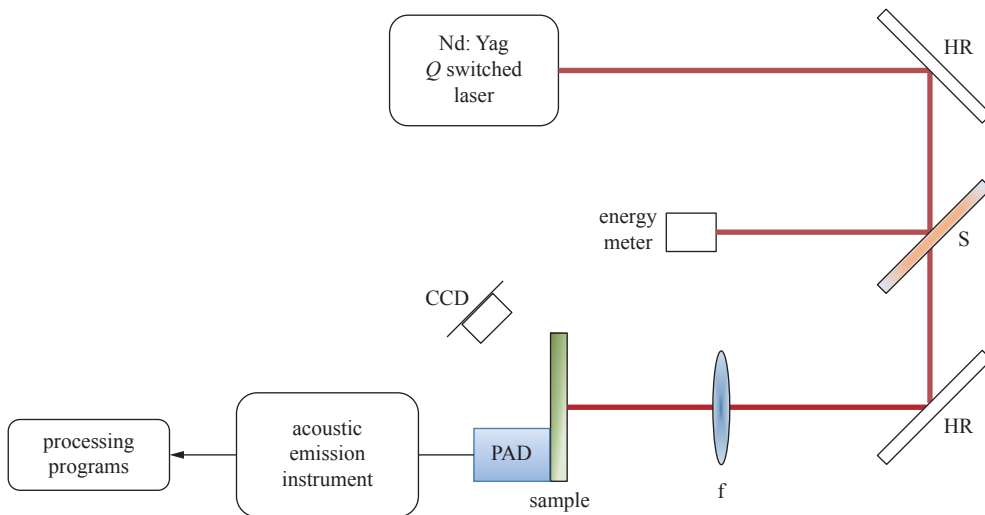


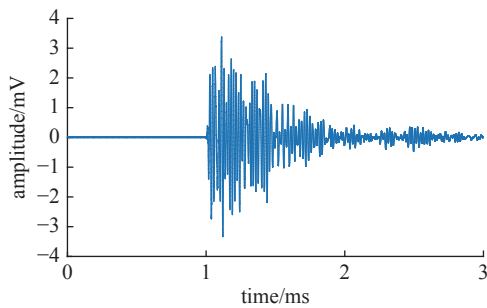
Fig. 7 Design of experimental light path
图 7 实验光路设计

4 实验结果与分析

4.1 损伤判定

声发射信号幅值随激光能量密度变化如图 8 所示, 激光能量密度在 9.76 J/cm^2 处成为一个突变点, 造成突变点的原因是激光诱导光学元件损伤时热爆炸形成的强冲击波, 即声发射信号幅值判断法的原理。熔石英元件在激光能量密度范围为 9.2 J/cm^2 至 12 J/cm^2 辐射 20 次, 分别记录每个测试点显微镜下的损伤情况和声波波形, 表 1 对比了显微镜观察结果与声发射信号幅值判定的结果。

在同一损伤位置处(损伤尺寸大于 $50 \mu\text{m}$), 形貌法即显微镜观察法与 AE 信号幅值判定的结果是一致的, 200 倍率下显微镜下可以清晰的看到损伤的形貌, 图 9 是选取的同一损伤位置处的形貌图与 AE 信号图。从对应的 AE 信号图可以看到, 此时的 AE 信号的幅值和波形都已经发生了突变, 所以可认为 AE 信号幅值判定的结果与形貌观察的结果是一致的, 验证了 AE 信号幅值判定激光损伤的正确性。



(a) AE signal of damage point

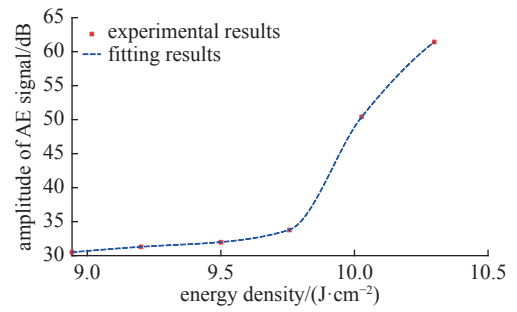


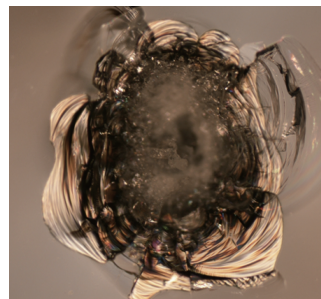
Fig. 8 Variation of AE signal amplitude with laser energy density

图 8 AE 信号幅值随激光能量密度的变化

表 1 不同判据对熔石英损伤判定情况

Table 1 Different criteria for judging fused silica damage

criteria	number of damage points
AE signal amplitude judge	13
microscopic observation	14 (damage size $< 50 \mu\text{m}$ at one of the test points)



(b) morphology of damage point

Fig. 9 AE signal and morphology of damage point

图 9 损伤点的 AE 信号图和形貌图

4.2 损伤定位

图 10 为三个声发射传感器 S1、S2、S3 布置在玻璃样品的背面, 设置 9 个测试点位置 $P_i (i=1,2,\dots,9)$, 每个测试点以激光能量密度为 8.5 J/cm^2 辐射一次, 记录每个测试点的 AE 信号。

利用改进算法得到测试点声发射信号到达各个传感器的时间差, 各测试点的理论时延值和实验时延值如图 11(a) 所示。应用牛顿迭代法解算声源位置, 定位结果如图 11(b) 所示。

时延估计本身就是一种近似运算, 时延估计误差不可避免, 影响下一步的位置解算, 在图 11(a) 中理论时延值与实验值之间差值即时延估计误差越大, 对其位置解算的结果影响也越大。此外, 本计算方法忽略了样品厚度、传感器尺寸等因素, 这些可能是定位误差的主要来源。定位结果与真实损伤位置的偏差在 $6.12 \sim 11.54 \text{ mm}$ 范围内, 平均定位误差为 8.61 mm 。基于声发射的光学元件损伤定位平均计算时间为 0.143 s , 具有很高的检测效率。

5 结论

光学元件损伤检测是激光发展的重要课题, 本文针对光学元件研究声发射信号基于二次相关和 FICP 的时延估计算法, 仿真实验表明改进算法比参考算法具有更好的 TDOA 估计性能。并在光学平台上进行了实验验证, 结

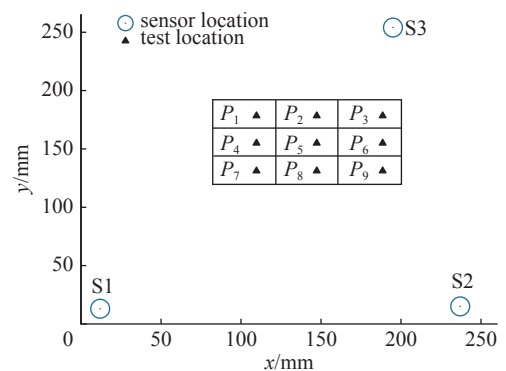


Fig. 10 Sensor layout and test point location of glass samples

图 10 玻璃样品的传感器布置和测试点位置

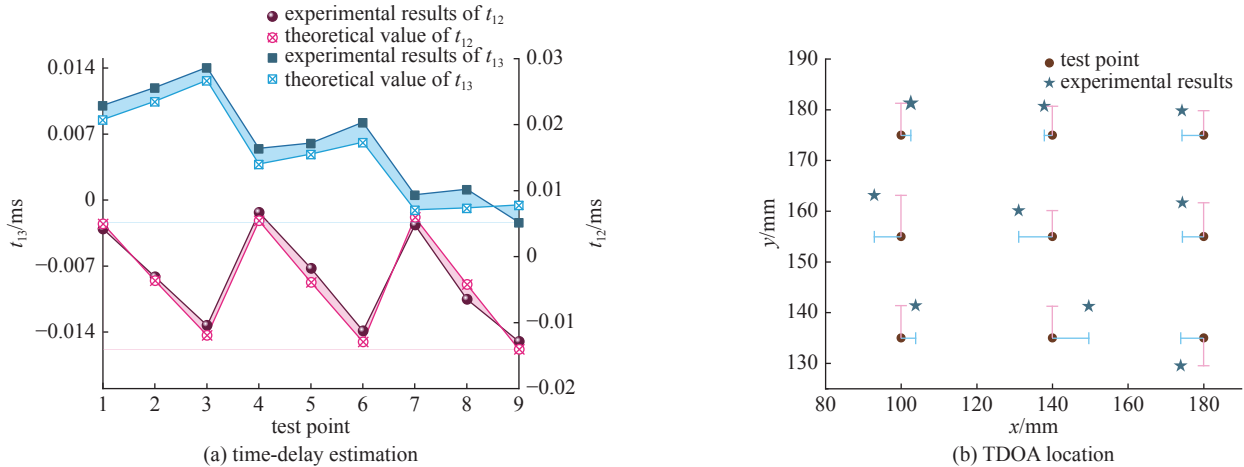


Fig. 11 Calculation results

图 11 计算结果

果表明该方法能够准确定位出损伤在光学元件上的位置。与目前通用的成像检测法相比,本方法具有很高的检测效率,同时能够给出损伤的位置估计,对于大口径光学元件的在线监测具有应用潜力。

参考文献:

- [1] 魏富鹏. 大口径光学元件弱特征损伤智能检测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. (Wei Fupeng. Research on intelligent inspection method of weak feature damage in large aperture final optics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019)
- [2] Kasai N, Utatsu K, Park S, et al. Correlation between corrosion rate and AE signal in an acidic environment for mild steel[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(8): 1679-1684.
- [3] 王宗炼, 任会兰, 宁建国. 基于小波变换降噪的声发射源定位方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 226-232,248. (Wang Zonglian, Ren Huilan, Ning Jianguo. Acoustic emission source location based on wavelet transform de-noising[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(4): 226-232,248)
- [4] Kaiser W. Recent progress in stimulated Raman scattering[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1968, 4: 381.
- [5] Egle D M, Tatro C A. Analysis of acoustic-emission strain waves[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1967, 41(2): 321-327.
- [6] Van Hecke B, He D, Qu Yongzhi. On the use of spectral averaging of acoustic emission signals for bearing fault diagnostics[J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2014, 136: 061009.
- [7] Jiao Jingpin, He Cunfu, Wu Bin, et al. A new acoustic emission source location technique based on wavelet transform and mode analysis[J]. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2006, 1(3): 341-345.
- [8] 苏俊宏, 王坤坤, 梁海峰. 激光薄膜损伤的声频判别方法[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(1): 27-31. (Su Junhong, Wang Kunkun, Liang Haifeng. Acoustic frequency method of detection of optical thin films damage[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(1): 27-31)
- [9] 易木侯. 基于光声法的光学元件损伤特性研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2017. (Yi Muyu. Study on laser-induced damage phenomenon in optical components with photo-acoustic method[D]. Suzhou: Soochow University, 2017)
- [10] 陈珂骏. 激光诱导熔石英损伤的光声频谱分析研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019. (Chen Kejun. Laser-induced damage on fused silica with photo-acoustic spectrum analysis[D]. Suzhou: Soochow University, 2019)
- [11] 王牛俊, 陈莉. 声发射检测技术的原理及应用[J]. 广西轻工业, 2010, 26(3): 49-50. (Wang Niujun, Chen Li. The theory & application of acoustic emission testing technique[J]. *Guangxi Journal of Light Industry*, 2010, 26(3): 49-50)
- [12] 俞一鸣, 姚远, 程学虎. TDOA定位技术和实际应用简介[J]. 中国无线电, 2013(11): 57-58,70. (Yu Yiming, Yao Yuan, Cheng Xuehu. Introduction to TDOA positioning technology and its practical application[J]. *China Radio*, 2013(11): 57-58,70)
- [13] 茅惠达, 张玲华. 声源定位中广义互相关时延估计算法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2016, 55(22): 138-142. (Mao Huida, Zhang Linghua. Research on generalized cross correlation algorithm for time delay estimation in sound source localization[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 55(22): 138-142)
- [14] 唐娟, 行鸿彦. 基于二次相关的时延估计方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(21): 265-267. (Tang Juan, Xing Hongyan. Time delay estimation based on second correlation[J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(21): 265-267)
- [15] 韩洁, 吴长奇. 相关峰插值的二次相关锐化时延估计方法[J]. 信号处理, 2014, 30(10): 1241-1244. (Han Jie, Wu Changqi. Second correlated and sharpen the correlation peak interpolation time delay estimation method[J]. *Journal of Signal Processing*, 2014, 30(10): 1241-1244)
- [16] 雍龙泉. 非线性方程牛顿迭代法研究进展[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(15): 240-249. (Yong Longquan. Advances in Newton's iterative methods for nonlinear equation[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2021, 51(15): 240-249)
- [17] 金钟山, 刘时风, 耿荣生, 等. 曲面和三维结构的声发射源定位方法[J]. 无损检测, 2002, 24(5): 205-211. (Jin Zhongshan, Liu Shifeng, Geng Rongsheng, et al. Location of acoustic emission source on curved surfaces and three-dimension structures[J]. *Nondestructive Testing*, 2002, 24(5): 205-211)