



·前沿技术与交叉科学·

# 基于红外和可见光视频的光学元件故障诊断方法

胡争争, 马留洋, 胡 豪

(中国电子科技集团公司 第二十七研究所 郑州 450000)

**摘 要:** 光学元件的健康状态是激光系统稳定运行的关键, 如何在激光系统工作状态下实现光学元件的实时监测和故障诊断定位是该专业领域亟需解决的问题。针对该问题, 提出了一种基于红外和可见光视频信息的光学元件故障诊断方法。首先, 使用长波红外相机和可见光相机采集光学元件工作过程中的视频信息; 然后, 对采集的视频信息使用异常点检测算法进行处理; 最后, 结合光学元件温升特性对光学元件进行故障诊断及定位。试验结果表明: 相同算法情况下, 该方法相较于单独使用红外视频进行故障诊断的方法在故障诊断准确率、虚警率和漏警率 3 个指标上分别提升 9.70%、3.60% 和 6.10%; 该方法相较于单独使用可见光视频进行故障诊断的方法在故障诊断准确率、虚警率和漏警率 3 个指标上分别提升 18.00%、16.00% 和 2.00%。

**关键词:** 光学元件; 健康状态; 红外视频; 可见光视频; 故障诊断

中图分类号: TN209

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230040

## A fault diagnosis method for optical elements based on infrared and visible light videos

Hu Zhengzheng, Ma Liuyang, Hu Hao

(The 27th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Zhengzhou 450000, china)

**Abstract:** Optical elements are the core components of laser systems, and their health status is the key to the stable operation of laser systems. How to realize real-time monitoring and fault diagnosis of optical elements in the working status of laser systems is a problem that urgently needs to be solved in this professional field. To solve this problem, this paper proposes a fault diagnosis method for optical elements based on infrared and visible light videos. Firstly, a long-wave infrared camera and a visible light camera are used to collect video information during the working process of the optical element. Then, the collected video information is processed using anomaly point detection algorithms. Finally, the fault diagnosis and localization of the optical element are carried out in combination with the thermal rise characteristics of the optical element. The experimental results show that, under the same algorithm, the method proposed in this paper has improved the fault diagnosis precision rate, false alarm rate and missed alarm rate by 9.70%, 3.60% and 6.10%, respectively, compared with the method of fault diagnosis using infrared videos alone; the method proposed in this paper has improved the fault diagnosis precision rate, false alarm rate and missed alarm rate by 18.00%, 16.00% and 2.00%, respectively, compared with the method of fault diagnosis using visible light videos alone.

**Key words:** optical element, health status, infrared video, visible light video, fault diagnosis

激光系统中的光学元件是激光系统的核心部件, 其工作过程中的健康状态对激光系统的稳定运行起到关键作用, 如何在光学元件发生故障的初始阶段就快速诊断出故障并准确定位故障位置, 对避免激光系统发生重大安全事故有着重要的意义。国内外的很多科研机构对光学元件表面的缺陷检测技术进行了研究<sup>[1-9]</sup>, 大部分是激光系统在弱光试验或者照明光源工作时, 对图像采集设备获取的图像进行分析<sup>[10]</sup>, 该方法能够在激光系统工作前确定光学元件的性能状态, 但因非实时性, 不能避免系统工作过程中激光辐照等因素导致光学元件严重受损, 进而影响系统安全性和稳定性的问题。采用热电偶进行接触式测温诊断的方法能够实时采集激光系统工作过程中光学元件

\* 收稿日期: 2023-02-28; 修订日期: 2023-05-09  
联系方式: 胡争争, zhengzheng656369@163.com。  
通信作者: 胡 豪, huhao27@163.com。

部分区域的温度变化信息,从而对光学元件进行实时故障诊断,但是存在温度测量位置有限、测量区域为非激光直接辐射区域等问题。采用长波红外相机或者可见光相机使用非接触式的测量手段对部件进行实时故障诊断的方法在其他行业有着很好的应用基础<sup>[11-13]</sup>,红外和可见光视频在成像上具有不同的特点,可见光视频对比度和分辨率高,视场中细节信息丰富,但是抗干扰能力弱,而红外视频能够反映视场中温度信息,抗干扰能力强,但是分辨率低,可视性差<sup>[14]</sup>。本文使用长波红外和可见光两种类型的相机同时对光学元件进行实时监测,并提出了一种基于红外和可见光视频的光学元件故障诊断方法。与单独使用可见光视频或者红外视频进行故障诊断相比,该方法在故障诊断准确率、虚警率和漏警率等方面有显著的提升,能够达到工业应用的要求。

## 1 光学元件故障诊断方法

本文的方法以光学元件在激光辐照下表面温度变化的故障特征为依据建立故障诊断及定位模型,主要解决由于光学元件表面灰尘、光阑温度异常等原因使光学元件受热不均匀导致膜层损伤(损伤点横向尺寸大于  $280\ \mu\text{m}$ )的问题,适用于工作功率大于  $100\ \text{kW}$  且连续工作时长大于  $40\ \text{s}$  的激光系统。该方法结合两种视频信息的优点,通过图像处理及温度阈值判断等技术手段对激光系统工作过程中光学元件进行故障诊断及定位,并能及时输出预警信号。

### 1.1 视频预处理

#### 1.1.1 滤波处理

基于保护图像边界以及色彩信息的考虑,本文采用双边滤波算法对红外视频进行预处理,以平滑图像抑制图像中的噪点。基于保护图像边界以及去除图像中随机噪点的考虑,本文采用中值滤波的算法对可见光视频进行预处理。

#### 1.1.2 图像掩膜处理

图像掩膜是指对所处理的图像进行部分遮盖处理,以控制图像处理的范围<sup>[11]</sup>。在通过图像信息对光学元件进行故障诊断的过程中,仅需要分析图像中光学元件区域内的信息,通过划分关注区域和非关注区域,可以有效排除杂光干扰。由于每次采集的红外视频和可见光视频的相机位置是固定的,在试验开始前使用圆形或者矩形选择工具选择掩膜形状,对红外和可见光进行掩膜处理能够简单高效的达到需要的效果。经过掩膜处理,关注区域图像信息保留,非关注区域的图像信息被屏蔽。

红外和可见光视频经过滤波和掩膜版处理后的效果图如图 1 和图 2 所示。

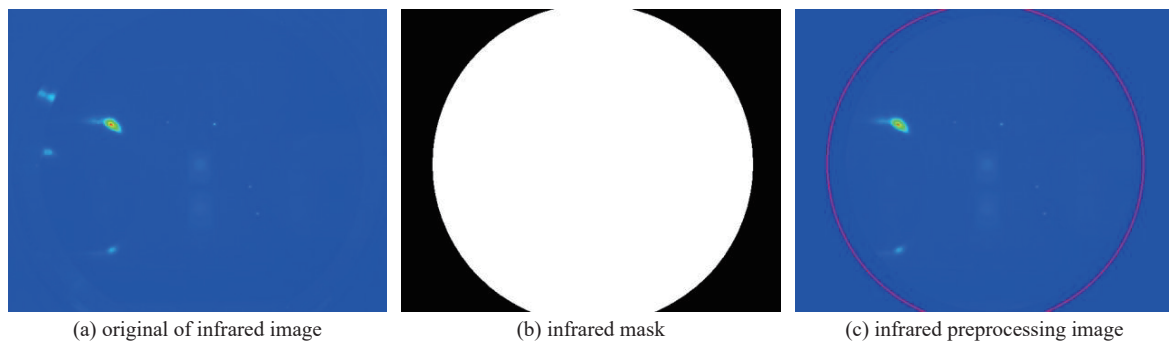


Fig. 1 Infrared image preprocessing process

图 1 红外图像预处理过程示意图

### 1.2 红外和可见光视频异常点检测

#### 1.2.1 基于红外温度的异常点检测算法

激光系统工作过程中被监测光学元件的红外视场中可能会出现很多温度升高的点,但并不是所有的温升点都能造成光学元件的损坏,只有长时间累积且温度明显异常的点才能造成光学元件损坏,故本文采用基于温度的异常点检测算法,具体步骤如下:

(1) 对预处理后的第  $i$  帧图像进行温度解析,计算出最高点温度  $T_{\max}$ 。如果  $T_{\max} < T_{\text{th}}$  ( $T_{\text{th}}$  为高温预警阈值),则第  $i$  帧图像没有异常,继续判断第  $i+1$  帧图像直到出现  $T_{\max} > T_{\text{th}}$ ,进入步骤(2);

(2) 计算出温度最高点的位置  $P_1(I_x, I_y)$  与掩模版的中心位置  $R_1$ , 并计算  $P_1$  与  $R_1$  之间的屏幕坐标距离  $L_1$  以及线段  $P_1R_1$  与水平线的夹角  $\alpha$ ;

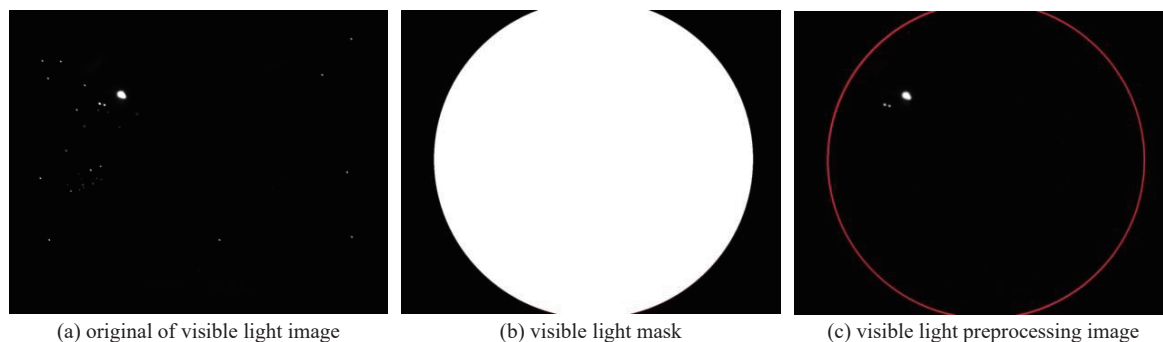


Fig. 2 Visible light image preprocessing process

图2 可见光图像预处理过程示意图

(3)进一步计算出该高温点辐射的高温区域  $S_1$ , 并进行标注。其中, 高温区域的判定条件为: 与该高温点相连的高于该帧图像平均温度的连通域;

(4)连续监测 3 帧图像, 3 帧图像最高温  $T_{\max}$  都异常且最高温度点都在  $S_1$  中, 即该温度异常点有效, 等待后续处理。

基于温度的异常点检测算法处理的红外图像效果图如图 3 所示。

### 1.2.2 基于可见光累积增强的异常点检测算法

理论上, 激光系统工作过程中光学元件处于无光的全黑的暗场环境中, 监测光学元件的可见光视场看不到任何东西。实际情况下, 激光系统工作过程中光学通道中可能会出现很多亮点, 并且大部分亮点都是通道中的灰尘等杂质在空气中燃烧产生的, 该部分亮点都会飘散且是短暂出现的。基于光学元件的工作特性, 长时间固定不动且范围足够大的亮点才有可能造成光学元件损坏, 基于该分析确定了 3 帧累积增强的异常点检测算法, 具体步骤如下:

(1)对预处理后的图像, 进行二值化处理, 二值化的阈值设定为 100;

(2)将二值化后的 3 帧图像进行累积处理, 并确定累积后图像中最亮点的中心位置  $P_L(L_x, L_y)$  与掩模版的中心位置  $R_L$ , 并计算  $P_L$  与  $R_L$  之间的屏幕坐标距离  $L_L$  以及线段  $P_LR_L$  与水平线的夹角  $\beta$ ;

(3)提取图像中最亮点的轮廓信息并进行标注, 计算亮点的面积  $S_L$ ;

(4)如果  $S_L > 2$  则该异常点有效, 等待后续处理。

三帧累积增强的异常点检测算法处理的可见光效果图如图 4 所示。

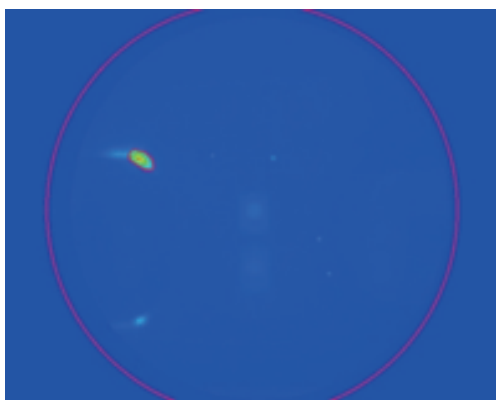


Fig. 3 Infrared image processing result

图3 红外图像处理标注效果图

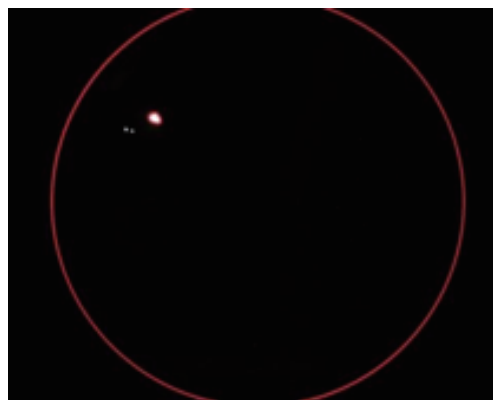


Fig. 4 Visible light image processing result

图4 可见光图像处理标注效果图

可见光累积增强的异常点检测算法中二值化阈值设定的不同, 可见光故障诊断结果也会有较大差异。本文基于 1000 次的试验数据 (其中包含故障数据 155 次), 在利用可见光视频进行故障诊断与预警方法中设置不同的二值化阈值, 统计了故障诊断准确率 (FDPR)、故障定位时间 (FLT)、虚警率 (FAR) 和漏警率 (MAR) 四个指标的变化情况, 如图 5 和图 6 所示。

通过图 5 和图 6 中 4 个故障诊断指标随可见光视频二值化阈值变化结果可得, 二值化阈值越小故障诊断定位

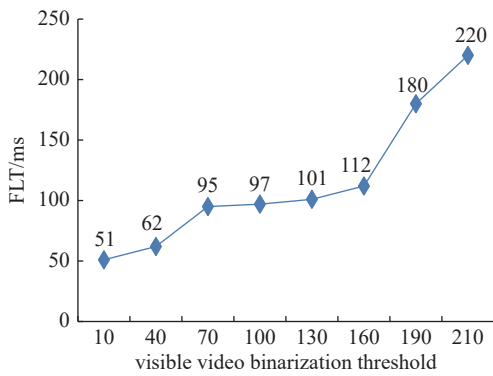


Fig. 5 Visible light FLT under different binarization threshold

图 5 不同二值化阈值下可见光故障定位时间

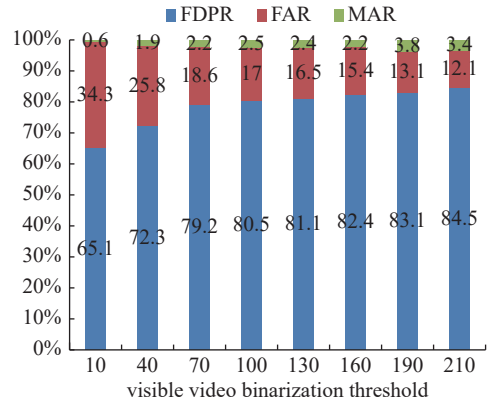


Fig. 6 Visible light FDPDR, FAR and MAR under different binarization threshold

图 6 不同二值化阈值下可见光 FDPDR、FAR、MAR

时间越短,但是故障诊断准确率越低;二值化阈值在 70~130 之间变化时,故障诊断的 4 个指标变化很小。对故障诊断的 FLT 和 FDPDR 两个指标综合考虑,可以选取 70~130 之间的任何一个数值作为可见光视频二值化处理的阈值。基于此分析,本文选取 100 作为可见光视频二值化处理的阈值。

### 1.3 故障诊断定位及预警输出

结合光学元件的故障特征以及实际采集的试验数据,红外视频异常点检测与可见光视频异常点的检测结果可能情况如表 1 所示。具体故障诊断融合判断的流程图如图 7 所示。

表 1 两种视频异常点检测情况说明表

Table 1 Description of two videos' anomaly detection

	infrared video	visible light video	process flow
case1	normal	normal	normal process flow
case2	abnormal	normal	next step, analyze temperature information
case3	abnormal	abnormal	position matching, output fault information directly
case4	normal	abnormal	impossible
case5	abnormal	abnormal	position mismatching, impossible

**情况 1:** 红外和可见光视频均未检测到异常点,即光学元件无故障。

**情况 2:** 红外视频检测到异常点,但是可见光视频未检测到异常点,不能直接输出诊断信息,需要进一步分析红外温度信息。

对红外图像从最高温度  $T_{max}$ 、平均温升  $\Delta T_{avg}$  以及温度的一阶导数  $T'$  三个指标进行进一步的判断,满足以下两个条件中的任何一个即输出预警信号及故障位置

$$\begin{cases} T_{max} > T_{th}, T' > T'_{th} \\ \Delta T_{avg} > \Delta T_{th} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta T_{th}$  为平均温升预警阈值,  $T'_{th}$  为温度的一阶导数阈值。

对试验数据分析发现,光学元件峰值温度、平均温升最大值以及温度的一阶导数最大值都服从正态分布的规律,故采用正态分布的  $3\sigma$  区域确定光学元件的  $T_{th}$ 、 $\Delta T_{th}$  及  $T'_{th}$ 。

以下选取 50 次试验数据作为样本,以峰值温度  $TM$  为例使用经验法对其正态分布规律进行校验。经验法是用样本中位数  $M$  与算数平均值  $X$  的比值和算术平均值  $X$  与标准差  $S$  的关系进行判断,如果  $0.9 < \frac{M}{X} < 1.1$  且  $X > 3S$ , 那么即可认为样本数据符合正态分布。

50 次试验数据光学元件峰值温度  $TM[50]=\{ 25.5, 36.5, 26.7, 25.6, 25.7, 45.4, 41.7, 25.5, 38.3, 22.3, 22.3, 17.2, 28.2, 21.2, 12.4, 20.4, 21.2, 21.8, 18.2, 30.9, 29.9, 20.3, 16.1, 24.0, 29.7, 14.2, 16.8, 22.3, 17.9, 19.4, 21.7, 18.0, 20.7, 18.0, 26.3, 35.9, 42.0, 40.2, 21.8, 17.5, 31.9, 39.9, 35.0, 38.4, 34.8, 30.5, 31.6, 28.6, 35.2, 45.1\}$ , 计算得出:  $M=25.6, X=27.0, S=8.6$ , 故  $0.9 < \frac{M}{X}=0.95 < 1.1$  且  $X=27.0 > 3S=25.8$ , 符合正态分布。

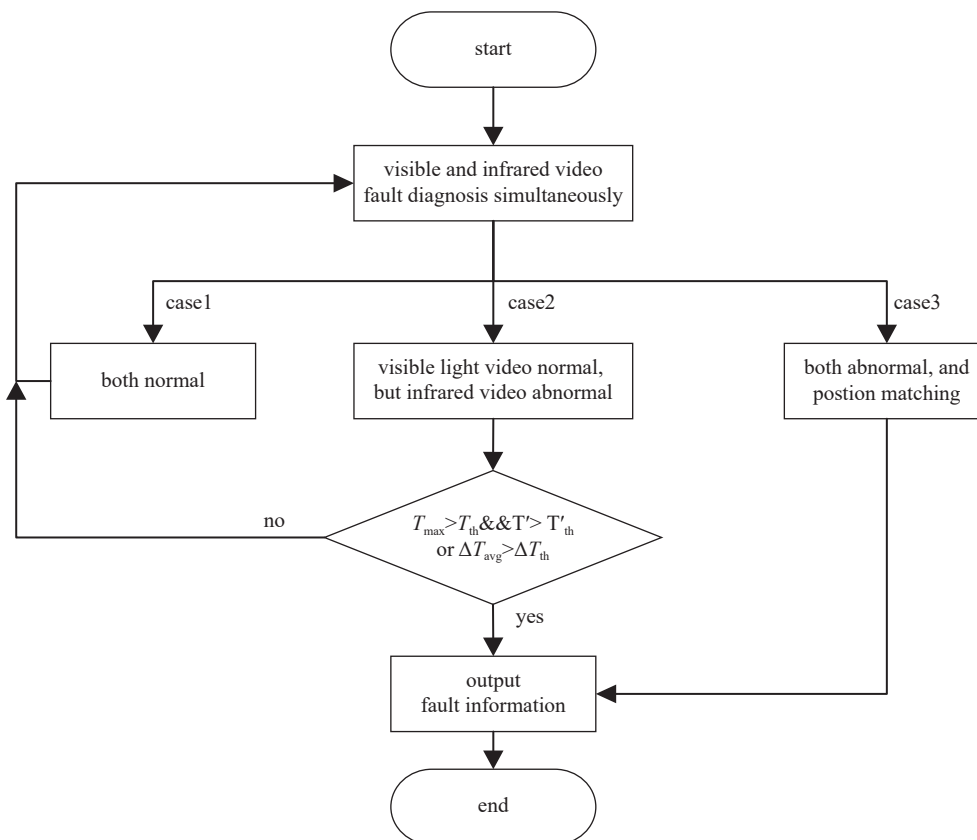


Fig. 7 Flow diagram of fault diagnosis fusion judgment

图 7 故障诊断融合判断流程图

$T_{th}$ 、 $\Delta T_{th}$ 及 $T'_{th}$ 三个数值的求解过程相同,下面以 $T_{th}$ 为例进行计算过程说明。

$n$ 次试验光学元件峰值温度 $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,符合正态分布。采用极大似然估计方法对光学元件峰值温度的正态分布函数 $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ 中的期望均值 $\mu$ 和标准差 $\sigma$ 参数进行无偏估计,峰值温度正态分布的极大释然估计函数 $L(x)$ 为

$$L(x) = L(\mu, \sigma|x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad (2)$$

其中,

$$\ln[L(\mu, \sigma|x_1, \dots, x_n)] = \ln \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x_1-\mu)^2/2\sigma^2} \times \dots \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x_n-\mu)^2/2\sigma^2} \right] \quad (3)$$

求解公式(4)

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \mu} [L(\mu, \sigma|x_1, \dots, x_n)] = 0 \\ \frac{\partial}{\partial \sigma} [L(\mu, \sigma|x_1, \dots, x_n)] = 0 \end{cases} \quad (4)$$

可得

$$\mu = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n}} \quad (6)$$

故

$$T_{th} = \mu + 3\sigma \quad (7)$$

**情况 3:** 红外和可见光视频均检测到异常点,且位置匹配,直接输出预警信号及故障位置信息。其中,红外图



像中最高温度点  $P_I$  与可见光图像中亮度最高点  $P_L$  满足如图 8 所示条件即认为位置匹配

$$\left| \frac{P_I R_I - P_L R_L}{P_I R_I} \right| < 5\% \text{ and } \left| \frac{\alpha - \beta}{\alpha} \right| < 5\% \quad (8)$$

**情况 4:** 红外视频未检测到异常点, 可见光视频检测到异常点。这种情况不可能发生, 这是因为: 光学元件工作在暗场环境, 可见光中检测到的异常点, 是通道中灰尘等燃烧或者光学元件的膜层损伤在可见光视场中形成的亮点。灰尘燃烧的温度高于  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , 光学元件膜层燃烧的温度高于  $277\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[15]</sup>, 一旦亮点足够大(达到可见光异常点的要求)形成的热效应就会很明显, 红外视场中肯定能监测到温度异常点, 故情况 4 不可能发生。对历次试验数据观察确实未发现该情况出现, 也证明了分析的合理性。

**情况 5:** 红外和可见光视频均检测到异常点, 但是位置不匹配。这种情况不可能发生, 原因同情况 4。

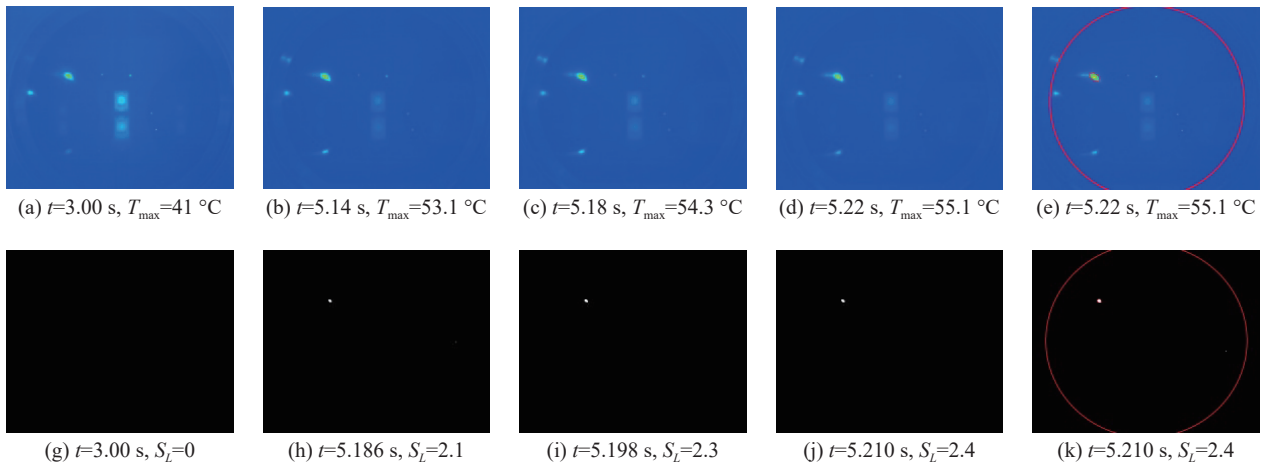


Fig. 8 Optical elements' fault diagnosis examples

图 8 光学元件故障诊断实例图

## 2 试验验证与结果分析

本文设计了硬件采集系统, 用于采集激光系统工作过程中光学元件实时状态, 该硬件采集系统中使用的长波红外相机型号为 HiNet-640OEM, 采集帧率为 25 Hz, 图像分辨率为  $640 \times 512$ , 像元间距  $12\text{ }\mu\text{m}$ , 响应波段  $8 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$ , 测温范围  $0 \sim 600\text{ }^\circ\text{C}$ , 视场角  $61.5^\circ \times 45.7^\circ$ ; 可见光相机型号为 VCXG-13M, 采集帧率为 90 Hz, 图像分辨率为  $1280 \times 1024$ , 视场角  $63^\circ \times 48.1^\circ$ ; 核心处理单元型号为 Jetson Xavier NX。

以 CS-46 次试验(故障试验)中采集的光学元件红外视频和可见光视频为例, 对光学元件的故障诊断定位方法进行说明。红外视频连续三帧( $t=5.14\text{ s}$ 、 $5.18\text{ s}$ 、 $5.22\text{ s}$ )  $T_{\max} > T_{\text{th}}$ , 且位置相同; 可见光视频连续三帧( $t=5.186\text{ s}$ 、 $5.198\text{ s}$ 、 $5.21\text{ s}$ )  $S_L > 2$ , 且位置相同。经过融合判断红外视频中的异常点与可见光视频中异常点位置匹配, 直接输出故障信息。

本文基于 1000 次的试验数据(其中包含故障数据 155 次), 从故障诊断准确率(FDPR)、故障定位时间(FLT)、虚警率(FAR)和漏警率(MAR)4 个指标, 对三种故障诊断及预警方法进行对比, 对比结果如表 2 所示。其中, 方法 1 是基于红外视频的故障诊断及预警方法; 方法 2 是基于可见光视频的故障诊断及预警方法; 方法 3 是基于红外和可见光视频的故障诊断及预警方法, 方法 3 是本论文使用的方法。从表 2 可以看出, 从故障定位准确率、虚警率、漏警率三个指标来看, 本论文使用的方法(方法 3)与方法 1 相比分别提升 9.70%、3.60% 和 6.10%; 与方法 2 相比分别提升 18.00%、16.00% 和 2.00%。说明本论文的方法对于提高故障诊断准确率, 降低虚警率和漏警率有更好的效果。

表 2 三种方法的指标对比结果表

Table 2 Experimental results of indicators of three methods

No.	FDPR /%	FLT/ms	FAR /%	MAR /%
method 1	88.80	228	4.60	6.60
method 2	80.50	97	17.00	2.50
method 3	98.50	135	1.00	0.50

### 3 结 论

本文提出了一种基于红外和可见光双视频信息对激光系统工作过程中光学元件进行故障诊断及定位的方法,试验结果表明,该方法比单独使用红外视频或者可见光视频对激光系统中光学元件进行故障诊断及定位的方法有较明显的优势,能够较好的解决激光系统工作过程中光学元件故障诊断及定位的难题,有较好的工程应用价值。在后续的研究中,还要加强针对红外视频以及可见光视频处理算法的研究,进一步优化算法,减少故障定位时间。

#### 参考文献:

- [1] Conder A, Alger T, Azevedo S, et al. Final optics damage inspection (FODI) for the National Ignition Facility[C]//Proceedings of SPIE 6720. 2008: 672010.
- [2] Deng Hongxiang, Guo Wenli, Gao Huanhuan, et al. A numerical approach for femtosecond laser-induced photoionization in solids and its application[J]. *Journal of Optics*, 2019, 21: 075501.
- [3] Jing Xufeng, Tian Ying, Zhang Junchao, et al. Modeling validity of femtosecond laser breakdown in wide bandgap dielectrics[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(10): 4741-4749.
- [4] 邓燕, 许乔, 柴立群, 等. 光学元件亚表面缺陷的全内反射显微检测[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(6): 835-840. (Deng Yan, Xu Qiao, Chai Liqun, et al. Total internal reflection microscopy: a subsurface defects identification technique in optically transparent components[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(6): 835-840)
- [5] 赵文川, 钟显云, 刘彬. 基于条纹反射的光学表面疵病检测法[J]. *光子学报*, 2014, 43: 0912007. (Zhao Wenchuan, Zhong Xianyun, Liu Bin. The surface flaws inspection of optical components based on the fringe reflection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43: 0912007)
- [6] 任冰强, 黄惠杰, 张维新, 等. 光学元件损伤在线检测装置及实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(4): 465-468. (Ren Bingqiang, Huang Huijie, Zhang Weixin, et al. Online inspection apparatus and experiments on optics damage[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(4): 465-468)
- [7] 解亚平. 高功率固体激光光学元件损伤在线检测装置的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 35-40. (Xie Yaping. Research of online inspection equipment for optic damage of high power solid laser[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006: 35-40)
- [8] 范哲源, 曹剑中, 屈恩世, 等. 一种8倍可见光变焦光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, 39(s1): 101-104. (Fan Zheyuan, Cao Jianzhong, Qu Enshi, et al. Design of an 8 times ratio visible zoom optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(s1): 101-104)
- [9] 彭志涛. 强激光复杂光机组件光学元件激光损伤在线检测技术研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2011: 41-48. (Peng Zhitao. On-line laser damage detection technology for optical components of high-power complex optical-mechanical components[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2011: 41-48)
- [10] 张文学, 王继红, 任戈. 基于相机阵列的光学组件缺陷在线检测方法[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 051001. (Zhang Wenxue, Wang Jihong, Ren Ge. Optical elements defect online detection method based on camera array[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 051001)
- [11] 黄柏, 杨帆, 邓剑平, 等. 基于累积帧间差分法和掩膜的SF<sub>6</sub>红外检漏视频定位算法研究[J]. *电气技术*, 2022, 23(7): 104-108. (Huang Bo, Yang Fan, Deng Jianping, et al. Study of an accumulated interframe difference and mask based SF<sub>6</sub> leakage infrared video location method[J]. *Electrical Engineering*, 2022, 23(7): 104-108)
- [12] 赵高鹏, 薄煜明, 尹明锋. 一种红外和可见光双通道视频目标跟踪方法[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(3): 529-534. (Zhao Gaopeng, Bo Yuming, Yin Mingfeng. An object tracking method based on infrared and visible dual-channel video[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 529-534)
- [13] 尹丽华, 杭娟, 康亮, 等. 基于联合相机路径的红外视频稳像算法[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50: 20200405. (Yin Lihua, Hang Juan, Kang Liang, et al. Infrared video image stabilization algorithm based on joint camera path[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50: 20200405)
- [14] 李向燕, 王肖霞, 杨风暴. 一种基于差异特征驱动的红外与可见光视频拟态融合方法[J]. *电子测量技术*, 2021, 44(22): 114-120. (Li Xiangyan, Wang Xiaoxia, Yang Fengbao. Fusion method of infrared and visible video mimicry based on difference feature driving[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(22): 114-120)
- [15] 赵元安, 邵建达, 刘晓凤, 等. 光学元件的激光损伤问题[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 011004. (Zhao Yuanan, Shao Jianda, Liu Xiaofeng, et al. Tracking and understanding laser damage events in optics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 011004)