

# 基于能量聚焦自适应扫描的冲击波 波阵面高精度提取方法

倪明月<sup>1,2</sup>, 李 剑<sup>1,2</sup>, 展勇忠<sup>3</sup>, 邢晋超<sup>1,2</sup>, 胡福弟<sup>1,2</sup>

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051;

2. 智能探测技术与装备山西省重点实验室, 太原 030051;

3. 湖南云箭集团有限公司, 长沙 410100)

**摘要:** 针对冲击波波阵面特征参数提取中存在精度低、抗噪性差等问题, 提出一种基于能量聚焦自适应扫描的冲击波波阵面高精度提取方法; 该方法创新性地结合最近邻帧减法与互相关分析, 协同抑制背景噪声及火球云团噪声, 实现冲击波波阵面轮廓信息的初步提取; 在此基础上, 依据冲击波能量聚集特性, 通过构建搜索框并对搜索框内相同半径像素亮度进行积分, 结合逆向差分精确定位梯度极值, 从而精确捕捉冲击波波阵面位置; 结果表明, 该方法可实现冲击波特征点的自动检测, 有效克服噪声与不对称性干扰; 与常规算法相比, 提取结果在空间均匀性上提升 28%, 距离标准差降低 94%, 具有较高的可靠性和工程适用性。

**关键词:** 冲击波; 能量聚焦; 冲击波波阵面; 自适应扫描; 特征点提取

## High-precision Extraction Method for Shock Wave Wavefronts Based on Energy-focused Adaptive Scanning

NI Mingyue<sup>1,2</sup>, LI Jian<sup>1,2</sup>, ZHAN Yongzhong<sup>3</sup>, XING Jinchao<sup>1,2</sup>, HU Fudi<sup>1,2</sup>

(1. College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Province Key Laboratory of Intelligent Detection Technology and Equipment,  
North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Hunan Vanguard Group Co., Ltd, Changsha 410100, China)

**Abstract:** To address issues such as low accuracy and poor noise resistance in extracting the characteristic parameters of shock wave wavefronts, a high-precision extraction method based on energy-focused adaptive scanning is proposed, which innovatively combines the nearest neighbor frame subtraction with cross-correlation analysis, and collaboratively suppresses the background noise and fireball cloud noise, thus achieving the preliminary extraction of the shock wavefront contour information. Based on this, according to the energy concentration characteristics of shock waves, the shock wavefront position is accurately captured by constructing a search box, integrating bright pixels with the same radius within the search frame, and combining inverse difference to precisely locate the gradient peak. Results demonstrate that this method automatically detects shock wave feature points, effectively overcoming noise and asymmetry interference. Compared with conventional algorithms, this method improves the spatial uniformity by 28%, and reduces the distance standard deviation by 94%, exhibiting high reliability and engineering applicability.

**Keywords:** shock wave; energy focusing; shock wave wavefront; adaptive scanning; feature point extraction

收稿日期: 2025-09-28; 修回日期: 2025-10-27。

基金项目: 国家自然科学基金面上科学基金(62271453); 中央支持地方项目(YDZJSX2024D031); 山西省专利转化专项计划资助项目(202405004)。

作者简介: 倪明月(2001-), 女, 硕士研究生。

通讯作者: 李 剑(1985-), 男, 教授, 博士研究生导师。

引用格式: 倪明月, 李 剑, 展勇忠, 等. 基于能量聚焦自适应扫描的冲击波波阵面高精度提取方法[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(1): 227-234.

## 0 引言

当战斗部在空气中引爆时,其化学能量会在微秒级内迅速释放并转化为其他形式能量,根据不同能量转化机制,爆炸毁伤效应主要表现为冲击波和破片两种形式<sup>[1-2]</sup>。在典型空中爆炸场景中,冲击波是导致爆炸对周围目标造成破坏性影响的关键因素<sup>[3-5]</sup>。目前常采用分布式冲击波传感器阵列进行测量<sup>[6]</sup>,但设备易损、数据稀疏<sup>[7]</sup>,难以完整反映冲击波时空变化特性,且无法直观呈现冲击波形态<sup>[8]</sup>。近年来,利用高速摄像机拍摄爆炸过程,捕获冲击波传播轨迹与形态演变,是冲击波传播过程的重要测量方法<sup>[9-10]</sup>。

文献 [11] 提出了一种基于高速摄影图像的冲击波参数提取方法,在试样背面布设条纹背景布,通过对高速摄影机拍摄冲击波图像,进行数字图像处理 and 特征提取,获得了冲击波波阵面传播轨迹。文献 [12] 基于高速激光背景纹影成像技术,对弹药战斗部静爆和动爆产生的冲击波进行了可视化研究,捕捉波阵面的瞬时形态和位置。文献 [13] 及文献 [14] 将高速摄影及背景导向纹影技术应用于爆炸冲击波的动态测量,利用时间分辨的可视化图像分析了冲击波的传播特性,但测量精度不够好,需要进一步提高;文献 [15] 提出的方法突破了实验室限制,采用不同的自然景观作为背景图案,为实验室外大规模爆炸测试的流场成像提供了可行性分析。文献 [16] 利用光学测量方法,对 C4 炸药爆炸产生的激波传播过程进行实验测量和可视化,需要根据具体测试场景选择最合适的分析方法。文献 [17] 进一步利用背景导向纹影技术,结合检测算法及立体相机标定体系,对微小当量炸药装药进行试验,实现了球形爆炸冲击波的三维点云重建。

上述方法多针对于微小当量的爆炸试验,且通常依赖于高对比度人工背景图案或强激光等外部辅助光源,在实际爆炸环境中部署困难,适应性差,成本较高,导致在面向实战条件下冲击波测量的适用性不足。

针对上述问题,本文提出了一种基于能量聚焦自适应扫描的冲击波波阵面高精度提取方法。其核心创新在于利用冲击波能量聚焦特性及多技术协同,系统性地解决了传统方法在强噪声干扰下面临的挑战,实现冲击波波阵面的高精度提取。通过最近邻帧减法有效去除静态环境背景噪声,进一步利用序列图像中火球云团图像的相关特性,通过互相关识别并抑制此类动态干扰;创新性的利用冲击波在图像中表现为高梯度能量聚集的物理特性,设计了冲击波波阵面特征点扫描定位方法,实现波阵面的关键特征点识别,并对方法的可行性进行了试验验证。

## 1 冲击波折射成像原理

冲击波波阵面通过前、后,介质的各个物理参量都

会发生突跃变化,由于波速很高,可以认为冲击波的传播过程为绝热过程。因此,利用质量守恒、能量守恒、动量守恒 3 个守恒定律,将波阵面通过前介质的初态参量与通过后介质的终态参量联系起来。假设冲击波以速度  $V$  向右稳定传播,质量守恒、动量守恒及能量守恒关系式为:

$$\rho_0(V - u_0) = \rho_1(V - u_1) \quad (1)$$

$$p_1 - p_0 = p_0(V - u_0)(u_1 - u_0) \quad (2)$$

$$(e_1 - e_0) + \frac{1}{2}(u_1^2 - u_0^2) = \frac{p_1 u_1 - p_0 u_0}{\rho_0(V - u_0)} \quad (3)$$

其中: $\rho_0, p_0, e_0(T_0), u_0$  为波前介质参量; $\rho_1, p_1, e_1(T_1), u_1$  为波后介质参量。

在通常情况下,空气近似为理想气体。结合空气中冲击波的质量守恒、动量守恒、能量守恒关系式,以及理想气体的状态方程  $e = \frac{p}{(\gamma - 1)\rho}$ ,可以推导出空气中冲击波的密度比的关系式:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)p_1 + (\gamma - 1)p_0}{(\gamma - 1)p_1 + (\gamma + 1)p_0} \quad (4)$$

其中: $\gamma$  为绝热指数,当冲击波压力不超过 50 个大气压时, $\gamma = 1.4$ 。进一步化简有:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)\frac{p_1}{p_0} + (\gamma - 1)}{(\gamma - 1)\frac{p_1}{p_0} + (\gamma + 1)} \quad (5)$$

当光线穿过非均匀流场介质时,会发生偏折现象。介质折射率  $n$  与流体密度  $\rho$  存在依存关系,该关系可通过 Gladstone-Dale 方程来描述<sup>[18]</sup>:

$$n = 1 + K\rho \quad (6)$$

其中: $n$  是折射率, $\rho$  是密度, $K$  是 Gladstone-Dale 常数(气体组分和波长的函数)。可知气体折射率与空气密度有关。

根据 Gladstone-Dale 方程,将密度比关系式表示为:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{n - 1}{n_0 - 1} \quad (7)$$

其中: $n_0$  为大气折射率,则:

$$\frac{n - 1}{n_0 - 1} = \frac{(\gamma + 1)\frac{p_1}{p_0} + (\gamma - 1)}{(\gamma - 1)\frac{p_1}{p_0} + (\gamma + 1)} \quad (8)$$

由公式 (5)、(7) 及 (8) 可知,冲击波引起的折射率增加与其引起的密度增加成正比,从而与冲击波压力有关<sup>[19]</sup>。冲击波通过后,折射率会因为冲击波压力的增大而增加,冲击波波阵面前后会出现明显的对比,在图像上表现为像素位移。通过计算图像位移可以实现冲击波波阵面定位提取。

冲击波通过后,流场中折射率变化导致光线传播路径产生偏折效应,使冲击波通过前后记录的背景特征图

案之间形成微小位移, 利用光线偏折效应可以进行图像位移的测量计算<sup>[20]</sup>。光线偏折与背景位移关系如图 1 所示。

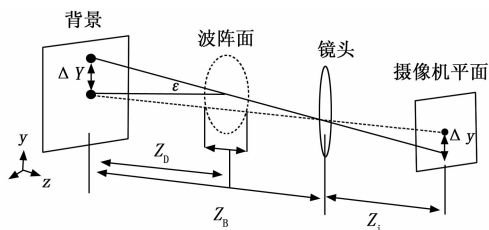


图 1 原理示意图

光束偏折角  $\epsilon$  为沿着光线传播路径上对折射率梯度的积分。沿着轴向路径, 定义偏折角为<sup>[21]</sup>:

$$\epsilon = \frac{1}{n_0} \int_{Z_0 - \Delta Z_0}^{Z_0 + \Delta Z_0} \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad (9)$$

从几何上(如图 1)看, 位移  $\Delta Y$  与图像位移  $\Delta y$  相关, 该图像位移是由距背景的透镜距离  $Z_b$  和距透镜的图像距离  $Z_i$  得出的, 在大物距条件  $Z_b \gg f$  下, 傍轴近似成立, 此时图像距离  $Z_i$  可以由透镜的焦距  $f$  代替:

$$\frac{\Delta Y}{Z_b} = \frac{\Delta y}{Z_i} = \frac{\Delta y}{f} \quad (10)$$

对于较小的偏转角  $\epsilon$ :

$$\Delta y = Z_b M \epsilon \quad (11)$$

公式 (11) 中  $M = \frac{Z_i}{Z_b} = \frac{f}{Z_b}$ , 因此可近似建立偏折角与背景图案位移之间的关系为:

$$\Delta y = \frac{Z_b f \epsilon}{Z_b} \quad (12)$$

从而实现偏折角与图像位移的转换。通过分析具有光学对比度与结构特征的背景在冲击波作用下的序列图像, 实现冲击波结构可视化。

## 2 冲击波波阵面处理

本节针对高速摄像系统采集的时序图像, 分析连续帧间的光路畸变特征差异, 实现对冲击波波阵面检测。首先通过最近邻帧法去除环境背景噪声; 进一步利用互相关图像处理, 消除火球云团噪声; 基于冲击波波阵面能量聚集特性, 构建冲击波波阵面特征点扫描定位方法提取冲击波波阵面离散特征点。

### 2.1 最近邻帧减法

为实现冲击波跟踪, 需要仔细选择参考图像, 对图像减法进行优化。传统方法将需要处理的爆炸图像减去未爆炸前拍摄的原始背景图像, 进行背景去除处理, 由于爆炸时产生巨大火光, 爆炸中心亮度远超背景亮度, 直接差分方法获取的特征信息对比度较低, 冲击波仅有部分可见很难被检测。

为减小火光等因素的影响, 最大程度的保留冲击波波阵面的边缘特征, 本文采用最近邻帧减法通过识别图

像之间像素强度变化的位置识别冲击波边缘。在传统差分运算基础上, 引入平方运算以增强特征差异, 同时采用平均值归一化处理以消除图像整体亮度变化带来的偏差, 其数学表达式为:

$$I_{\text{new}}(x, y) = \frac{[I_{\text{tar}}(x, y) - I_{\text{pre}}(x, y)]^2}{\frac{I_{\text{tar}}(x, y) + I_{\text{pre}}(x, y)}{2} + 1} \quad (13)$$

其中:  $I_{\text{tar}}(x, y)$  为爆炸目标图像中  $x, y$  位置的像素值,  $I_{\text{pre}}(x, y)$  为目标图像前一帧爆炸图像中相同位置的像素值。最终生成一个反映两幅图像局部对比度的新像素值  $I_{\text{new}}(x, y)$ , 每一个像素点的变化反映了该位置的动态信息, 若某一位置的像素产生了显著的变化, 表明该区域存在高速的运动或物理现象。这些动态的部分能被结果中的亮度变化清晰地显示, 那些保持不变的部分则表现为背景, 通常不会被突出显示。

### 2.2 互相关图像处理

由于最近邻帧减法得到的结果显示了帧间高速变化特征, 不仅包含了爆炸冲击波, 也混杂了火球云团等爆炸产物。为了进一步抑制图像噪声, 本文创新性地结合互相关分析方法, 构建针对性的噪声抑制模块。

对于采集到的图像, 本文将爆炸前的参考背景图像与爆炸目标图像进行互相关处理, 检测和量化两个图像之间的背景偏移<sup>[22]</sup>。由于冲击波的波阵面为透明折射介质, 冲击波通过背景后对背景造成的折射现象不明显, 远远低于火球部分引起的背景变化, 利用互相关算法计算两幅图像(参考图像与冲击波导致的背景畸变图像)之间的局部位移场, 根据局部位移场, 将多帧图像与图像序列中的运动信息精确对齐, 通过统计融合去除爆炸引起的较慢物理运动产生的噪声。

在互相关算法中, 每张图像被分成部分重叠的小子图像。从参考图像中选取的子图像表示为  $I_{\text{ref}}$ , 从目标图像中选取的子图像表示为  $I_{\text{tar}}$ 。该算法本质上通过统计图像匹配方法, 计算参考图像子图像  $I_{\text{ref}}$  到目标图像子图像  $I_{\text{tar}}$  的背景图案偏转。

滑窗大小的设定会影响位移测量的精度和可靠性, 互相关窗口的最优设定并非一个固定的数值, 而是一个基于背景特性、流场物理和测量目标的系统化决策过程。本文进行了系统的背景相关性分析与结构特征尺度确定, 量化互相关信噪比与背景特征尺度, 为窗口尺寸的选择提供客观依据。

为得到背景图像相关性质量趋势, 采用归一化互相关函数计算两个图像的窗口相似度, 其公式为:

$$C(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [I_{\text{ref}}(x, y) - u_{\text{ref}}][I_{\text{tar}}(x - u, y - v) - u_{\text{tar}}]}{\sqrt{\sum_{x,y} [I_{\text{ref}}(x, y) - u_{\text{ref}}]^2 \sum_{x,y} [I_{\text{tar}}(x - u, y - v) - u_{\text{tar}}]^2}} \quad (14)$$

其中： $C(u, v)$  为互相关值； $I_{ref}(x, y)$  参考图像在位置  $(x, y)$  处的像素值， $I_{tar}(x - u, y - v)$  为目标分析图像在偏移位置处的像素值； $x, y$  分别表示  $X$  和  $Y$  方向上的图像平面坐标； $u_{ref}$  和  $u_{tar}$  分别为  $I_{ref}$  和  $I_{tar}$  的平均值。

本文随机选取了 700 个不同位置的相关窗口，窗口边长从 3 像素系统变化至 99 像素。对于每个窗口尺寸，计算所有窗口的归一化互相关值，并取其标准差  $\sigma$ ，定义标准差平方的倒数作为衡量背景相关性的量化指标， $snr = \frac{1}{\sigma^2}$ 。信噪比随窗口尺寸变化的趋势如图 2 所示，随着窗口的增大，数据显示出越来越强的相关性。

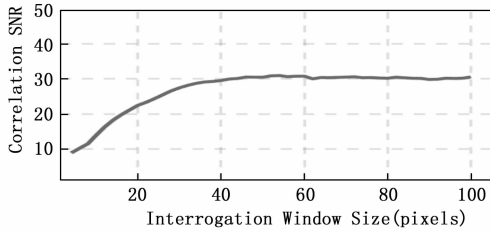


图 2 信噪比与窗口尺寸关系

为得到背景图像的特征尺度，本文基于分水岭算法对图像结构尺度进行估计，首先对原始背景图像进行高斯滤波预处理：

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-x^2+y^2/2\sigma^2} \quad (15)$$

通过二维高斯核函数卷积操作抑制噪声，继而计算图像的梯度幅值场：

$$I(x, y) = \|\nabla I\| = \sqrt{g_x^2 + g_y^2} \quad (16)$$

$g_x$  为图像在水平方向的梯度， $g_y$  为图像在垂直方向的梯度。

经分水岭变换后，算法计算了图像中不同区域的数量，并勾勒出了它们之间由“分水岭像素”构成的边界。这一过程将图像划分为  $N$  个连续的、封闭的“结构”区域。由此，可以确定每个不同区域内的平均像素数，即图像中“结构”的平均面积  $A$ （单位：像素）：

$$A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (17)$$

本文通过算法计算得到的平均结构面积  $A$  为 19.6 像素。窗口尺寸的优化与选择需权衡特征尺度与信噪比结果，最终选用  $30 \times 30$  像素长度的互相关窗口。

在设定的最优互相关窗口下，通过在爆炸图像中寻找与背景图像窗口的最匹配区域，可确定每个像素点的偏移量，该结果为整像素级别，由于图像要求的偏移量一般为亚像素精度，因此可以通过高斯拟合的方法，取峰值点及其左右两个点（共 3 个点），进行一维高斯拟合，提升至亚像素级别，得到相关峰值位置：

$$\Delta x_{sub} =$$

$$x_{peak} + \frac{\log c(x-1, y) - \log c(x+1, y)}{2\log c(x-1, y) + 2\log c(x+1, y) - 4\log c(x, y)} \quad (18)$$

$$\Delta y_{sub} =$$

$$y_{peak} + \frac{\log c(x, y-1) - \log c(x, y+1)}{2\log c(x, y-1) + 2\log c(x, y+1) - 4\log c(x, y)} \quad (19)$$

在获得相关峰  $(x_{sub}, y_{sub})$  的准确位置后，通过减去窗口的中心位置，从而得到亚像素位移偏移量。

根据互相关得到的图像偏移，对最近邻帧减法得到的结果作进一步处理，去噪增强，不仅应对烟雾、碎片等宏观背景干扰，也能有效抑制图像热噪声等微观随机噪声所带来的误差。

### 2.3 冲击波波阵面特征点扫描定位

在爆炸冲击波图像分析中，波阵面为一个以爆心为中心的环形区域，其像素在某个半径范围内有较高的密度或特征点，导致该半径的像素数量较多，从而在直方图中出现峰值。因此，可通过周向窗口划分和径向能量聚焦实现冲击波波阵面的定位检测。

自适应扫描原理的核心在于：首先，需要获取爆炸中心（爆心）的位置以及冲击波的初始半径；以此为基础，构建相应的初始搜索区域；在该搜索区域内通过自适应扫描提取每个区域中冲击波波阵面的特征点（亮度突变位置），流程示意图如图 3 所示。

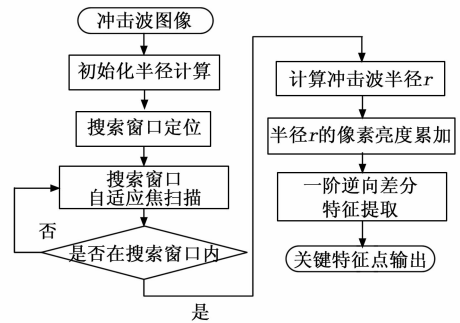


图 3 算法流程图

假设图像矩阵为  $I$ ，其大小为  $W \times H$  ( $W$  为行数， $H$  为列数)。通过人工图像标记的方式获取爆心位置  $O(x_0, y_0)$ ，对图像中的每个像素坐标  $(x, y)$ ，计算其到中心点  $(x_0, y_0)$  的欧氏距离：

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (20)$$

最小距离为 0（爆心自身），最大距离  $D_{max}$  为图像边角到爆心的最大距离：

$$D_{max} = \max(\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}) \quad (21)$$

由于距离是连续值，需将距离进行离散化（分箱）以统计频率。选择分箱步长  $\Delta r = 1$ ，区间边界为：

$$edges = \left[ \min(r) - \frac{\Delta r}{2}, \max(r) + \frac{\Delta r}{2} \right] \quad (22)$$

第  $k$  个区间范围为:  $[e_k, e_{k+1})$ , 其中:

$$e_k = \min(r) - \frac{\Delta r}{2} + k \quad (23)$$

统计距离值的出现次数  $\text{count}[k]$ :

$$\text{count}[k] = \sum_{x=0}^{H-1} \sum_{y=0}^{W-1} 1_{[e_k \leq r < e_{k+1}]} \quad (24)$$

其中:  $1$  是指示函数 (当条件满足时为 1, 否则为 0)。

得到每个距离值的出现概率:

$$P[k] = \frac{\text{count}[k]}{I}, I = W \times H \quad (25)$$

基于计算得到的概率分布, 为获取出现概率最高的距离值, 通过寻找使概率  $P[k]$  最大的分箱索引  $k^*$  来实现:

$$k^* = \arg \max_k P(k) \quad (26)$$

进而得到冲击波波阵面的初始半径  $r_0$ :

$$r_0 = e_{k^*} + \frac{1}{2} \Delta r \quad (27)$$

基于爆心  $(x_0, y_0)$  和初始半径  $r_0$ , 建立图像平面的极坐标映射, 将冲击波波阵面进行角度离散, 划分为  $n$  个等间距区域, 定义第  $a$  个窗口的中心角度为:

$$\varphi_a = a \frac{2\pi}{n} \quad (28)$$

则第  $a$  个窗口的中心坐标为:

$$(x_a, y_a) = (x_0 + r_0 \cos \varphi_a, y_0 + r_0 \sin \varphi_a) \quad (29)$$

以中心点  $(x_a, y_a)$  为基准, 构建边长为  $L$  的矩形搜索区域:

$$W_a = \left\{ (x, y) \mid \left| x - x_a \right| \leq \frac{L}{2}, \left| y - y_a \right| \leq \frac{L}{2} \right\} \quad (30)$$

对每个窗口  $W_a$  内所有的像素, 计算距离爆心的半径  $r$ , 累加灰度值:

$$E_a(r) = \sum_{(x,y) \in W_a, \|(x,y)-O\|=r} I(x,y) \quad (31)$$

将径向能量  $E_a$  与冲击波半径  $r$  作直方图, 表现出峰值能量聚焦效果。通过一阶逆向差分运算提取冲击波位置对应梯度极大值, 绘制成梯度幅值直方图, 通过梯度直方图分析, 寻找梯度突变点 (即冲击波波阵面):

$$\nabla E_a(r) = E_a(r) - E_a(r-1) \quad (32)$$

式中,  $E_a(r)$  为半径  $r$  处的冲击波亮度累积, 梯度序列  $\nabla E_a(r)$  的极值点蕴含冲击波边缘特征。

由于冲击波通过后, 在冲击波波阵面位置, 冲击波波阵面与未扰动介质之间存在显著的物理差异, 此处, 强度由亮急剧转暗, 差分值表现为显著的负极性峰值, 因此以全局最大负峰值  $\arg \min_r \nabla E_a(r)$  标识冲击波波阵面位置。

### 3 实验结果与分析

为验证本文所提算法的准确性和有效性, 设计以下

实验进行验证。爆炸试验采用 150 kg TNT 当量炸药, 爆炸方式为自由场 (空中) 爆炸。采用灰度高速摄像机拍摄爆炸过程, 高速摄像机的性能指标为: 采样频率为 2 500 帧每秒, 存储长度可以记录从起爆到冲击波传播的整个爆炸过程, 像素分辨率为  $1\,024 \times 1\,280$ 。

首先对于采集到的高速摄影图像进行最近邻帧减法处理, 得到爆炸产物基本轮廓如图 4 所示。图中显示了帧间时间变化内的高速特征, 包括冲击波及破片。

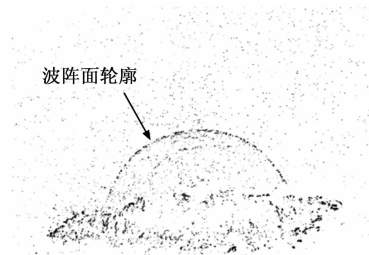


图 4 最近邻帧减法处理结果

为进一步去除烟雾、破片等背景噪声, 本文采用 2.2 节归一化互相关算法提取参考图像与爆炸目标图像之间的相对图像偏移, 实现图像偏移量的亚像素级估计。在此基础上, 对背景噪声进行进一步处理。处理结果如图 5 所示, 冲击波的边缘轮廓更为清晰, 波阵面关键形态特征得以更好保留 (方框中区域相比图 4 的下方区域噪声较好的被滤除)。

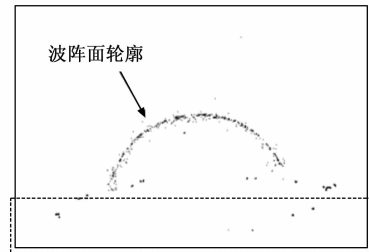


图 5 互相关去噪结果图

通过对图 5 结果中冲击波波阵面的像素分布特征进行分析, 绘制冲击波传播距离的分布直方图, 如图 6 所示。通过对距离分布进行定量分析, 发现冲击波波阵面的半径数据呈现明显的集中分布特征。基于该统计特征, 得到冲击波初始半径。

基于冲击波初始半径, 以爆心为原点构建极坐标系, 沿周向划分  $n$  个检测扇区, 每个扇区对应一个矩形径向搜索窗口。针对每个搜索窗口, 计算每个像素点到原点的欧氏距离, 对其像素强度进行径向累加, 得到亮度分布图, 对像素亮度分布进行逆向差分得到梯度直方图, 结果如图 7 所示。

冲击波波阵面在图像上表现为亮度的突变, 即波阵面由亮到暗的跳变, 以差分最小负峰值对应波阵面位置, 可表征波阵面在传播方向上的突变特性。本文算法

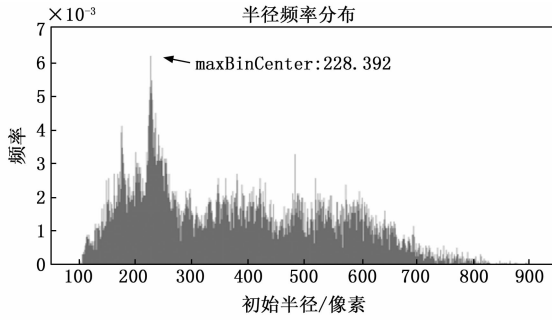


图 6 距离分布直方图

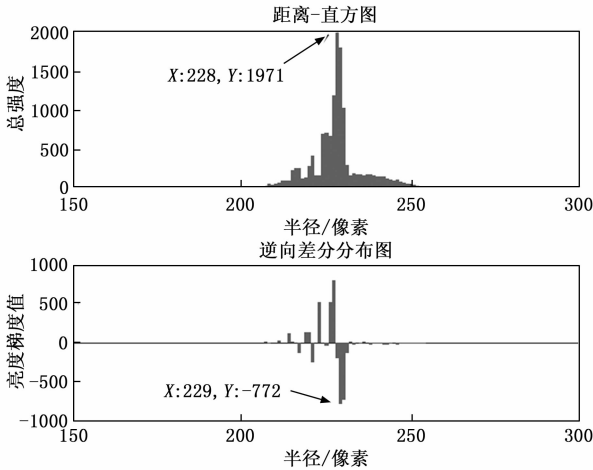


图 7 统计特征分布图

在原始图像叠加星标标记波阵面关键点以及爆心位置，实现测量结果的可视化，如图 8 所示，为 35 个搜索窗口自动检测得到的波阵面特征点位置。

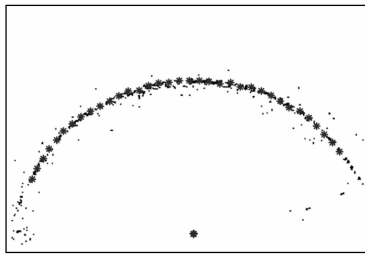


图 8 冲击波阵面检测结果

本文选取了 Sobel、Prewitt、Canny、Laplacian、Log 五种不同的算子进行边缘检测，基于上述边缘检测获取冲击波波阵面的 35 个关键特征点。如图 9 所示，显示了不同方法的波阵面关键离散特征点提取结果。上述方法对图像噪声较为敏感，容易导致特征点误检，如图 9 矩形框标注；其次，检测到的离散特征点在空间分布上呈现显著的非均匀性，难以形成对波阵面的完整覆盖，存在明显的检测盲区。本文提出的算法能够克服噪声问题，稳定提取冲击波波阵面特征点。

本文通过 3 个关键指标（最近邻平均距离、最近邻

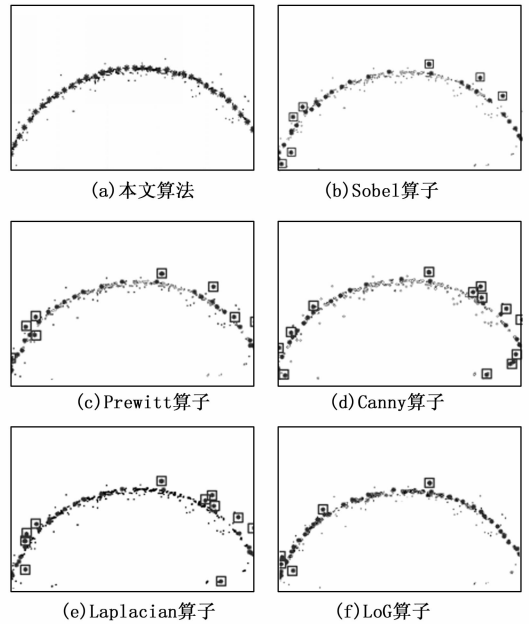


图 9 边缘检测结果对比

距离标准差、空间密度分布标准差)对冲击波波阵面提取结果进行系统性评估。不同边缘检测结果得到的性能指标如表 1 所示，图 10 为评价指标结果分布直方图。

表 1 不同算法特征点分布性能指标对比

方法	最近邻平均距离	最近邻距离标准差	空间密度分布标准差
Sobel	15.33	9.54	2.464
Prewitt	16.60	9.76	2.396
Canny	16.60	11.60	2.236
Laplacian	15.03	11.03	2.430
LoG	14.76	9.39	2.378
本文算法	15.45	0.55	1.609

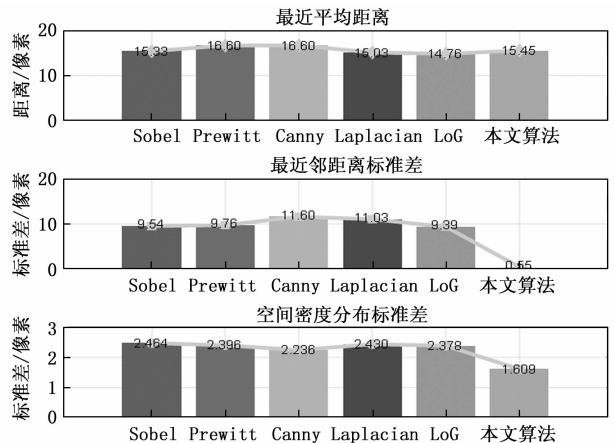


图 10 不同算法特征点分布性能指标对比

为评估本文的计算效率，在统一的实验环境下对算法的运行时间进行了分析，每种边缘检测算法的平均单帧处理时间如表 2 所示。

表 2 不同算法平均单帧处理时间

方法	平均处理时间(秒/帧)
Sobel	5.754 6
Prewitt	5.737 8
Canny	5.856 8
Laplacian	5.754 1
LoG	5.778 2
本文算法	4.567 8

结果表明, 本文提出的自动检测算法在冲击波特征点提取方面展现出较大优势。算法实现具有极低的最近邻距离标准差 (0.55 像素), 确保提取的特征点能准确捕捉完整的冲击波波阵面, 避免局部聚集或稀疏区域。在空间分布均匀性方面, 本文提出的自动算法取得了最低的标准差值 (1.609), 显著优于常规边缘检测方法。在计算效率方面, 本方法的平均单帧处理时间为 4.567 8 秒/帧, 在保证检测性能的情况下, 具有较好的运算速率。

#### 4 结束语

本文针对冲击波波阵面动态特征解析问题, 提出了一种基于能量聚焦自适应扫描的冲击波波阵面高精度提取方法, 针对高速摄像机采集到的爆炸冲击波图像, 利用最近邻帧减法进行图像预处理获取冲击波轮廓信息, 结合互相关方法量化分析参考图像和分析图像之间背景图案的图像差异, 进一步去噪增强; 在此基础上对冲击波波阵面进行精细化处理, 利用冲击波波阵面自适应扫描定位方法, 将波阵面空间分布转化为可解析的统计特征, 提取波阵面关键特征点。与常规边缘检测方法相比, 本文提出的自动检测算法在复杂背景噪声下仍能保持稳定的特征点提取质量, 克服了常规边缘检测方法对参数敏感的缺陷, 特征点分布符合冲击波传播的物理特性, 避免传统方法产生的异常离群点, 能够有效确定图像中冲击波的位置, 速度更快, 效率更高。

本文提出的算法核心在于识别图像中的几何偏折, 因此对于彩色图像数据同样具备良好的适用性。针对于低对比度图像, 当前流程利用直方图拉伸和图像增强算法提高图像对比度, 具有良好的处理效果。目前, 自动检测算法的初始化需要人工预先标记爆心位置, 是实现全流程自动化的一个主要瓶颈。后续研究将聚焦于多视图几何爆心定位, 利用已标定的多相机系统建立坐标转换关系, 对爆炸中心进行立体匹配, 直接计算出爆心坐标, 摆脱对人工标记的依赖。

#### 参考文献:

- [1] LI R, HU M, SUN R, et al. Triple point path prediction for height of burst explosion in high-altitude environment [J]. Defence Technology, 2025, 42: 109 - 119.
- [2] GUO Q D, XIAO Y. Numerical study on the case effect of a bomb air explosion [J]. Defence Technology, 2021, 17 (4): 1461 - 1470.
- [3] XU W L, WANG C, YUAN J M, et al. Investigation on energy output structure of explosives near-ground explosion [J]. Defence Technology, 2020, 16 (2): 290 - 298.
- [4] 余雯君, 陈胜云, 邓树新, 等. 爆炸冲击波在变向通道中传播规律数值模拟 [J]. 兵工学报, 2023, 44 (s1): 180 - 188.
- [5] ZHANG H Y, XU Y X, XIAO L H, et al. Physics-informed machine learning model for prediction of ground reflected wave peak overpressure [J]. Defence Technology, 2024, 41 (11): 119 - 133.
- [6] 郭 晶. 基于图像法的冲击波场参数测试技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2020.
- [7] 王海锋, 禄晓飞, 涂国勇, 等. 冲击波超压测量数据处理方法研究 [J]. 现代防御技术, 2020, 48 (2): 69 - 73.
- [8] 郑 星, 黄海莹, 毛勇建, 等. 基于高速纹影技术的爆炸冲击波图像测量研究 [J]. 光学精密工程, 2022, 30 (18): 2187 - 2194.
- [9] 杜亮亮, 钱伟新, 刘寿先, 等. 冲击波与爆轰实验瞬态光电测试技术研究进展 [J]. 兵工学报, 2023, 44 (12): 3622 - 3640.
- [10] 李 斌, 王 雨, 周志强, 等. 爆炸冲击波威力高速纹影测量方法 [J]. 光学与光电技术, 2018, 16 (2): 43 - 49.
- [11] 叶希洋, 苏健军, 姬建荣, 等. 一种基于图像的冲击波波阵面参数计算方法 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41 (1): 87 - 90.
- [12] 武江鹏, 贺 翮, 闫振纲, 等. 基于背景纹影技术的战斗部静动爆冲击波关联性研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (7): 62 - 67.
- [13] MIZUKAKI T, TSUKADA H, WAKABAYASHI K, et al. Quantitative visualization of open-air explosions by using background-oriented schlieren with natural background [J]. 28th International Symposium on Shock Waves, 2012.
- [14] MIZUKAKI T, ODAGIRI T, MATSUMURA T, et al. Quantitative flow visualization of a blast wave from an underground magazine model using background-oriented schlieren [J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2020, 81 (5): 128 - 136.
- [15] HARGATHER M J, SETTLES G S. Natural-background-oriented schlieren imaging [J]. Exp Fluids, 2010, 48, 59 - 68.
- [16] HARGATHER M J. Background-oriented schlieren diagnostics for large-scale explosive testing [J]. Shock Waves, 2013, 23, 529 - 536.
- [17] WINTER K O, HARGATHER M J. Three-dimensional shock wave reconstruction using multiple high-speed digit-

al cameras and background-oriented schlieren imaging [J]. *Exp Fluids*, 2019, 60, 93.

[18] AMJAD S, KARAMI S, SORIA J, et al. Assessment of three-dimensional density measurements from tomographic background-oriented schlieren (BOS) [J]. *Meas Sci, Technol*, 2020, 31 (11): 4002.

[19] GERASIMOV S I, TREPALOV N A. Background oriented schlieren method as an optical method to study shock waves [J]. *Tech. Phys*, 2017, 62, 1799 - 1804.

(上接第 226 页)

## 5 结束语

针对三维电磁态势中多雷达威力包络的高保真融合需求, 本文提出了面向三维电磁态势的多雷达威力包络融合方法, 通过“精准建模—非相干融合—梯度驱动平滑”可有效构建高质量多雷达探测概率场: 非相干融合提升了重叠区域的探测概率, 梯度驱动平滑在消除边界锯齿的同时保持了特征锐度, GPU 加速与自适应八叉树实现了效率与精度的平衡。仿真验证表明, 相比传统卡尔曼滤波和高斯滤波等算法, 其独特的、基于物理的非相干概率场融合思路、GCDM 对平滑与保边矛盾的精巧平衡, 以及八叉树与 GPU 加速带来的卓越实时性能, 特别适合于需要高鲁棒性、高实时性、物理可解释性且环境复杂的应用场景, 在电磁态势反应作战对抗的场景中显著提升视觉感和融合度。

## 参考文献:

- [1] 刘彦君, 廖若彤, 乔士东. 基于投影网格的三维雷达包络融合方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49 (2): 177 - 178.
- [2] 丁宇, 冉华明. 地形遮蔽下雷达网的融合探测包络计算 [J]. *计算机仿真*, 2021, 38 (9): 14 - 18.
- [3] 李明, 张伟. 透明度叠加法在三维体数据可视化中的应用研究 [J]. *计算机图形学学报*, 2021, 45 (2): 120 - 125.
- [4] 陈华, 刘强. 等值面提取法的高效算法优化与实现 [J]. *软件学报*, 2020, 31 (6): 1800 - 1808.
- [5] JIANG H. Research on regional environmental information perception and prediction method [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [6] WANG D, ZHANG Q, CHEN X. Fusion of radar and optical sensor data for 3D target detection [J]. *Sensors*, 2021, 21 (15): 5120.
- [7] LEE S H, PARK J H, KIM Y S. Voxel-based rendering with adaptive transparency control for surgical planning [J]. *Medical Image Analysis*, 2018, 48: 168 - 180.
- [8] 王芳, 赵磊. 体素着色法在医学影像渲染中的关键技术研究 [J]. *生物医学工程杂志*, 2019, 36 (4): 500

[20] 蔡华俊, 宋畅, 曹政, 等. 基于背景纹影技术的三维瞬态密度场重建 [J]. *气动研究与试验*, 2023, 1 (6): 79 - 91.

[21] 熊渊. 背景纹影测量技术研究与应用进展 [J]. *实验流体力学*, 2022, 36 (2): 30 - 48.

[22] LIU X L, GUO T X, ZHANG P F, et al. Extraction of a weak flow field for a Multi-Rotor unmanned aerial vehicle (UAV) using High-Speed Background-Oriented schlieren (BOS) technology [J]. *Sensors*, 2022, 22, 43.

[9] WANG Y, ZHANG L, CHEN G. A hybrid rendering algorithm combining ray casting and marching cubes for 3D medical imaging [J]. *Computers in Biology and Medicine*, 2018, 95: 203 - 212.

[10] 周杰, 吴敏. 梯度控制扩散法在流体动力学模拟中的应用分析 [J]. *计算物理*, 2022, 39 (1): 60 - 65.

[11] CHEN L, WANG Q, XU Y. Real-time volume rendering acceleration using GPU-based octree partitioning [J]. *The Visual Computer*, 2019, 35 (7): 1159 - 1172.

[12] 钱多多, 孙小美. 透明度叠加法与等值面提取法的融合可视化技术 [J]. *系统仿真学报*, 2020, 32 (5): 700 - 708.

[13] ZHAO Y, LIU M, CHEN B. Hybrid visualization techniques for environmental data analysis [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2022, 151: 105 - 224.

[14] 郑成功, 黄飞鸿. 体素着色法与梯度控制扩散法在科学计算中的综合应用 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33 (3): 450 - 456.

[15] LI X R, JILKOV V P. Survey of maneuvering target tracking. Part I. Dynamic models [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39 (4): 1333 - 1364.

[16] ZHANG W, LIU J, ZHAO Y. Multi-source radar data fusion based on adaptive weighted least squares [J]. *Digital Signal Processing*, 2020, 104: 102 - 105.

[17] SMITH A J, JOHNSON M K, BROWN T L. Advanced algorithms for isosurface extraction in large-scale scientific datasets [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2021, 27 (2): 1034 - 1048.

[18] ZHANG H, DONG L, XU F. Terrain-adaptive radar coverage prediction using machine learning [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1 - 5.

[19] WANG S, ZHOU J, LIU C. Gradient-based diffusion simulation for multi-phase flow in porous media [J]. *Journal of Computational Physics*, 2020, 409: 109 - 112.

[20] WILSON R P, DAVIDSON C J, TAYLOR G W. Dynamic model adaptation in target tracking: a bayesian approach [J]. *Automatica*, 2019, 109: 108 - 110.