

# 基于梯度下降优化的多洞结构声源定位方法

芮小博, 刘嘉成, 牛世帅, 张宇, 曾周末

(天津大学 精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072)

Email: ruixiaobo@tju.edu.cn

**摘要:** 由于兰姆波在舷窗等多孔结构表面的传播路径不再是线性路径, 传统方法难以解决撞击的声源定位问题。本文针对该问题, 提出了一种基于梯度矢量下降策略的定位方法。该方法启发式自适应寻路算法计算兰姆波在复杂带洞结构的最短传播路径, 利用自适应能量阈值方法与 AIC 方法计算信号的实际到达时间差, 通过参数建立目标函数, 使用梯度矢量下降迭代优化策略实现了碰撞定位。通过对 252 组撞击点的定位实验验证了定位方法的可行性, 平均绝对误差为 0.956cm。

**关键词:** 声源定位; 自适应寻路; 梯度矢量下降。

## 1、研究背景

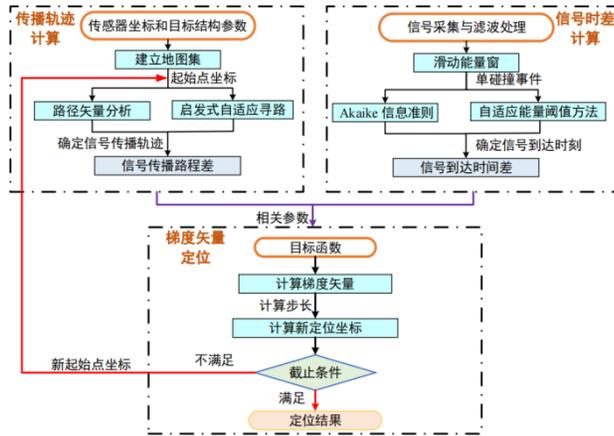
随着各国航天事业的蓬勃发展, 人类航天活动的数量与日增加, 由空间物体碰撞、航天任务抛弃等原因产生的空间碎片也随之增加。碎片与航天器发生的撞击极易使舱壁破损及压力失衡, 造成航天器结构损坏甚至解体, 对在轨航天器的安全运行造成严重威胁<sup>[1]</sup>。因此, 对碰撞的实时监测研究尤为重要。目前通用的结构撞击源定位检测技术主要分为红外成像法、光纤光栅法、电阻薄膜法、声学检测法<sup>[2]</sup>等。

撞击产生的能量将以机械波的形式在材料中传播, 利用传感器将这机械波表面位移转化为电信号进行分析处理可以得到定位结果。针对连续航天器结构, 声达时间差法 (time difference of arrival, TDOA) 在各向同性材料中应用较广, 但是其无法解决不连续结构的碰撞定位问题。对于多孔结构的非线性路径定位问题, 本文提出了基于梯度矢量下降策略的定位方法。该方法通过启发式自适应寻路算法计算兰姆波在复杂带洞结构的最短传播路径, 得到信号传播至各传感器的路程差值。通过滑动能量窗方法进行碰撞识别, 并结合自适应能量阈值方法与 AIC 准则方法 (Akaike information criterion, AIC) 计算信号时差。最后, 根据目标结构特征和传感器位置参数建立目标函数, 使用梯度矢量下降迭代优化策略实现了碰撞定位。

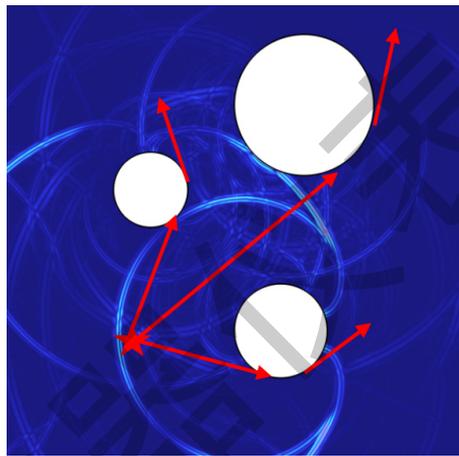
## 2、研究内容

为解决含孔非连续结构中的碰撞定位问题, 本文提出一种基于梯度矢量下降策略的声源定位方法, 该方法利用所构建目标函数的梯度矢量信息进行定位坐标的迭代。

本文提出的定位方法主要可分为四个步骤: 传感网络布设、信号传播轨迹计算、信号时差计算和梯度矢量定位。定位原理如图 1(a) 所示。



(a) 定位流程



(b) 传播仿真结果

图 1 基于梯度矢量下降策略的声源定位方法原理

(1) 传感网络布设：首先根据目标非连续结构的几何特征布设传感器阵列。对于包含多个孔洞的复杂非连续结构，首先在结构的边角结合处布设超声压电传感器，如果目标结构为四边形，则使用四个超声压电传感器分别放置于四边形结构的四个角位置，之后根据孔洞的分布情况，在孔洞密度较大的区域适当增加传感器数量以提升不同区域的信号采集质量。

(2) 信号传播轨迹计算：对含多孔的复杂不连续结构进行有限元仿真，结果如图 1(b) 所示，在传播路径不连续的情况下信号传播轨迹呈现切线-圆弧-切线的特征，如图中红色线所示。根据已知安装的传感器位置和目标结构参数，建立相应的地图集合，并选择合适的信号轨迹求解方法计算信号的传播路径差。对于包含多个孔洞的复杂非连续结构，首先通过计算相关的切点及对应切线，用于建立整个目标结构的地图节点集合，使用启发式自适应寻路算法计算信号传播轨迹得到路径值。

(3) 信号时差计算：对传感器采集阵列所捕获的信号进行滤波处理获得所需频段的兰姆

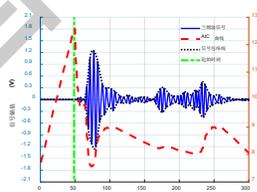
波信号，之后通过滑动能量窗口生成仅包含单个冲击信号的信号片段，结合自适应能量阈值与 Akaike 信息准则计算低频区域基础阶模态兰姆波信号的到达时间，从而获得到达不同通道传感器的信号到达时间差。

(4) 梯度矢量定位：根据梯度矢量下降策略更新声源坐标。在待测结构的目标函数设定完成后，前两步中计算出的信号时间差值和路径差值将作为完善目标函数的参数。利用 Barzilai-Borwein 步长调整方法进行梯度矢量下降循环运算，从而计算出新的坐标结果。计算出的每个坐标结果都被视为撞击事件的新起始点，并通过轨迹计算方法重新计算信号的传播轨迹路径差来修正目标函数以继续定位，直至满足预设的截止条件后终止循环计算，并输出最终的定位结果。该定位方法的主要特点是通过更新传播路径差值来计算复杂结构中的定位结果。

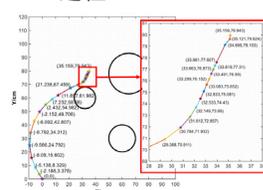
### 3、实验验证

为模拟实际应用环境，设计多孔试样板尺寸为 1000 mm×1200 mm×3 mm，材料为 5A06 镁铝合金，实验设备由计算机、前置放大器、电源及传感器构成，Nano-30 超声压电传感器布置于四个角落，信号放大增益为 40dB，信号采集速率 2.0MHz。实验中的声发射事件通过断铅实验进行模拟，断铅实验将在网格节点进行，多次断铅实验均使用长度约为 3mm 的铅芯进行以保证各次实验的一致性。由于多孔复杂结构不存在对称特性，需要在多位置进行实验以验证定位方法的有效性。

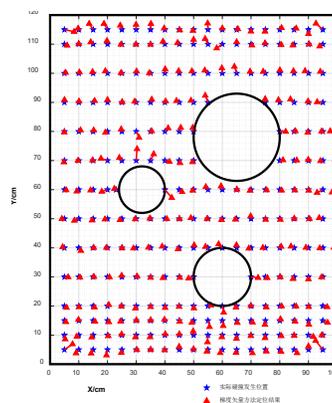
使用自适应能量阈值和 AIC 准则对单个碰撞事件进行处理，结果如图 2(a) 所示。图中蓝色线代表滤波后的兰姆波信号，黑色点线表示信号包络线，红色虚线表示 AIC 曲线，绿色竖线表示信号到达时刻。对该组数据进行定位，迭代情况如图 2(b) 所示，图中五角星表示迭代的坐标点，两坐标点间以直线相连。用梯度矢量值计算迭代步长后根据梯度矢量下降方法计算得到下一个坐标点在第 27 次循环时满足截止条件，即本次实验的最终定位结果为 (35.159, 79.943)，与实际碰撞位置的定位误差为 0.169cm。



(a) 时域图及处理过程



(b) 信号定位过程



(c) 定位结果统计

图 2 声源定位结果

根据本文提出的定位过程，对多孔结构表面进行的共 252 组实验数据进行了处理，并计算了最终结果，如图。所有定位结果的平均误差为 0.956cm，最大定位误差为 3.994cm，最小定位误差为 0.067cm。分析误差可知，本文提出的结合启发式自适应寻路算法和梯度矢量下降定位方法的定位误差集中在 0.15cm 到 1.15cm 之间，靠近结构边界位置的定位结果误差较内部区域稍大，这主要是因为兰姆波与边界发生反射和模态转换导致信号到达时刻的计算存在一定的误差。

## 4、结论

结果表明，梯度矢量下降法的定位精度较高，能够有效实现带孔非连续结构表面碰撞事件的定位，并且在整个结构表面均具备良好的定位稳定性。该方法可以用于解决多孔结构的声发射事件定位问题，具有良好的定位稳定性。该研究为多孔结构的突发碰撞定位提供了可行的解决方案，对保障航天器安全作业具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 龚自正, 赵秋艳, 李明, 等. 空间碎片防护研究前沿问题与展望 [J]. 空间碎片研究, 2019, 19(03): 2-13.
- [2] 芮小博, 李一博, 刘圆圆, 等. 采用幅度谱索引法的航天器密封结构泄漏点定位方法 [J]. 航天器工程, 2019, 28(1): 55-59.