水中兵器爆炸自由场压力数据预处理分析

权琳^{1*}, 陈梦英², 陈琦², 郭颖², 程素秋¹

1. 中国人民解放军91439部队, 大连 116041;

2. 中国科学院声学研究所东海研究站, 上海 201800

*联系人, E-mail: quantc11@163.com

收稿日期: 2020-09-25; 接受日期: 2021-01-07; 网络出版日期: 2021-06-01

摘要 水中兵器爆炸试验测量是获得兵器爆炸威力的重要手段, 而数据的预处理是水中兵器毁伤评估的重要环节和基础. 本文针对自由场压力数据中常见的时域曲线趋势项、工频干扰、通道串扰、上升沿误差等干扰, 研究了相关的预处理方法, 并以自由场压力传感器实测数据实例, 分别以串联共轭梯度去除法用于去除工频干扰, 将多项式拟合用于去除低频趋势项, 将动窗稳健中值滤波法用于去除脉冲干扰, 将指数函数拟合用于冲击波脉冲上升沿修正. 设计了对自由场压力测量数据的预处理流程, 并以时频域特性、统计特性等评估了预处理算法的合理性. 其中, 串联共轭梯度法对于固定频率工频干扰去除效率高, 而对其他频率成分影响很小. 对于冲击波上升沿的指数拟合修正, 通过使用牛顿截断法对指数拟合中需要用到参数进行优化, 并以拟合前后的能量误差和峰值误差评价修正效果.

关键词 水下爆炸, 压力, 预处理

PACS: 07.05.Kf, 07.07.Df, 06.30.Ft

1 引言

为客观真实地评价水中兵器爆炸威力和舰船结构的抗冲击特性, 必须开展水中兵器实爆试验及测量以对兵器毁伤能力进行考核, 考核结果可为作战指挥提供更科学的参考, 为后续武器装备改型建设提供可靠依据^[1,2]. 试验数据的预处理是水中兵器毁伤试验评估的重要环节和基础, 其准确性与科学性是进行水中兵器毁伤定量评估、准确考核的基本支撑, 是毁伤评估体系能力建设的必要组成^[3].

自由场压力试验测量是获得水中兵器爆炸威力的

重要途径. 爆炸冲击波本身是一个典型的非平稳信号^[4], 自由场压力及其产生的冲击响应测试环境也十分恶劣, 导致信号叠加了许多干扰和寄生输出. 例如, 随着新型高效能武器装备的研制, 重型鱼雷、高能炸药的实爆试验越来越多, 大当量近场爆炸试验测量环境电磁干扰极强^[5,6]; 在武器装备建设实战化要求背景下, 水中兵器实爆试验考核具有边界条件复杂、电磁环境恶劣等特点, 电磁噪声影响较大. 同时压力传感器在高频段有失真的问题, 会存在上升沿、峰值失真的情况^[7]. 必须对获得的信号曲线进行预处理才可获得接近真值的传感器信号, 涉及的预处理一般包

引用格式: 权琳, 陈梦英, 陈琦, 等. 水中兵器爆炸自由场压力数据预处理分析. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 124609

Quan L., Chen M. Y., Chen Q., et al. Preprocessing analysis of free-field pressure data in explosive power testing of underwater weapons (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 124609, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0356](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0356)

括滤波、直流量和趋势项去除、上升沿拟合等预处理.

目前压制工频干扰的方法主要是采用滤波方法^[8-11]. 常用的方法包括陷波滤波法、自适应滤波法、独立分量分析方法、时间域内提取和压制工频干扰以及共轭梯度法等. 其中, 陷波滤波法是在频率域中实现的, 当信号频谱与工频干扰的频谱混叠, 陷波滤波器在滤除工频干扰的同时也会造成目标信号的损失. 自适应滤波法适用于目标信号和干扰波不相关的情况, 在时间域进行, 其本质与陷波滤波是一致的. 本文采用共轭梯度法消除工频干扰及其谐波, 其本质为在时间域提取单频波, 进行串联提取和压制方法, 在不影响压力峰值的情况下工频干扰可得到明显的抑制.

冲击波压力信号在时域上具有近似脉冲信号的特征, 具有较广泛的频率成分, 但其在低频段的能量成分最大. 而趋势项为测量信号中周期大于测量时长的频率分量, 是典型的低频成分. 因此, 进行趋势项消除, 容易使冲击波峰值中有用的频率成分受到影响. 在冲击数据的处理中, 常用的去除趋势项的方法主要为小波变换和最小二乘法、高斯滤波法、差分法、经验模态、滑动平均等^[12-14]. 本文采用较为常用的多项式拟合法进行趋势项的去除.

采集设备通道串扰、电源干扰等给自由场压力测量信号中带来的脉冲干扰信号具有幅值大、时间短、出现随机、与回波信号类似等特点, 相应的信号滤波方法很多, 如小波滤波、维纳和卡尔曼滤波、形态滤波法、神经网络和HHT变化以及分数阶傅里叶变换等^[15-19]. 这些方法中, 大部分对系统硬件具有较高的要求, 在经济性、实时性方面较差. 对于具有较明显特征的脉冲去除, 需要选用针对性的处理方法, 否则不但达不到滤波效果, 反而会降低系统信息特征, 本文采用动窗稳健中值滤波法对干扰脉冲进行剔除.

针对传感器性能导致的上升沿、峰值失真问题, 目前国内外通常采用多项式拟合及指数拟合的方式对爆炸信号的冲击峰进行拟合. 钟慧婷等人^[20,21]于2006年在“冲击信号峰值检测及修正的研究”一文中提出了采用线性拟合、多项式拟合及指数拟合等多种拟合方式对冲击信号的峰值进行修正, 同时针对测量峰值与真实峰值的偏差给出了测量值与真实误差的估算方法. 本文以兵器爆炸威力测量中自由场压力传感器数据为例, 分析了相关预处理算法的国内外研究现状,

通过分析其干扰及噪声构成, 设计了对自由场压力测量数据的预处理流程.

2 对实测数据的预处理

2.1 数据干扰分析

选取水中爆源实爆测量的自由场压力试验数据为例, 进行相关预处理算法及流程的设计. 选用PCB公司138A型非ICP的水中自由场压力传感器, 最大量程为172 MPa, 传感器灵敏度约为0.03 mV/kPa, 谐振频率大于1000 kHz, 分辨率为3.5 kPa, 上升时间不高于5 μ s, 采集卡采样率 ≥ 1 MS/s, AD转换字长为16位, 连接STYV-2型低噪音电缆.

测量数据如图1所示, 图1(a)为完整时域曲线. 对数据进行初步的观察可以发现, 信号当中存在干扰主要包括趋势项和零漂项、干扰脉冲. 图1(b)为对300 μ s处压力峰值位置附近信号的放大, 自由场下的冲击波压力信号应为单调快速上升的近似脉冲信号, 上升时间在微秒量级, 而由图1(b)的上升沿可以看出, 在到达最大值之前, 信号经历了几次类似锯齿型的回落, 因此, 这里出现了峰值的失真, 需要对信号的上升沿和峰值进行修正. 另外, 从时域波形来看, 在峰值信号外存在明显的周期性干扰, 从图1(c)的信号频域变换来看, 原始信号除了存在较强的直流低频分量外, 存在明显的位于50 Hz及其倍频100 Hz的频率成分, 是工频干扰的典型表现. 因此在进行预处理时要对工频干扰信号进行修正.

由前文分析可知, 该信号主要存在工频干扰、零漂项和趋势项、脉冲干扰剔除、峰值和上升沿误差. 由于工频干扰的存在, 更为低频的干扰会更不容易观察到, 因此可以考虑对信号先进行工频干扰去除. 考虑到零漂项和趋势项可能会对峰值造成影响, 因此对去除工频干扰后信号进行零漂项和趋势项的修正. 最后针对峰值存在的失真问题对峰值和上升沿进行修正.

2.2 工频干扰去除

在工频干扰较强的情况下, 信号中通常会有较强的50 Hz频率成分, 同时也会存在其谐波频率的干扰. 当工频干扰强度增加时, 会逐步掩盖时域曲线中有效信号, 严重影响信号有用频率成分的辨识. 在工频干

图 1 (网络版彩图)原始压力信号. (a) 时域曲线; (b) 冲击波峰值处放大; (c) FFT幅度局部结果(0–400 Hz)

Figure 1 (Color online) Original pressure signal. (a) Time domain curve; (b) magnification of shock wave peak; (c) local result of FFT transformation (0–400 Hz).

扰强的情况下, 使用传统的谐波滤波器不能很好地恢复出信号. 根据以上原因, 采用串联去除信号中工频干扰及其谐波的方法(串联共轭梯度去除法). 该方法采用共轭梯度算法来求解信号与干扰波极小值处的干扰波参数(幅值/频率/相位), 实现了单频干扰波的解算, 并从中减去该单频干扰波, 从而可以实现对工频干扰的消除, 过程如下:

(1) 实际工频干扰包含有 50 Hz 的干扰及其谐波,

列出其表达式为

$$n_e(t) = \sum_{m=1}^M a_m \sin(2\pi f_m t + \theta_m), \quad (1)$$

式中 a_m 为干扰波的幅值, f_m 为其频率, θ_m 为其相位.

设定目标函数为

$$g(a, f, \theta) = \sum_{i=1}^N [r_i - n_e(t)]^2 = \sum_{i=1}^N [r_i - a \sin(2\pi f_{i-1} \Delta t + \theta)]^2, \quad (2)$$

式中 r_i 为原始信号值 $g(a, f, \theta)$ 代表了信号与工频干扰的差值, 在 $g(a, f, \theta)$ 取得极小值处, 对应的 a_m , f_m , θ_m 即为信号中存在的工频干扰的参数.

(2) 对工频干扰在频域进行划定, 范围为 $[F1, F2]$. $F1$ 对应需要处理的起始处理频率、 $F2$ 对应需要处理的终止频率. 图 1(c) 对信号的 FFT 变换表明本信号中包括的工频干扰主要包含 50 Hz 及其谐波 100, 150 Hz, 因此此处: $F1=50$ Hz, $F2=200$ Hz.

(3) 对初始单频干扰波的参数进行定义, 在工频干扰频域范围 $[F1, F2]$ 内以等间隔的方式对初始频率进行设定, 初始相位为 0, 初始振幅设定为记录所有极大值和极小值绝对值的平均值.

(4) 利用共轭梯度算法计算目标函数 $g(a, f, \theta)$ 的极小值, 从而求解出单频干扰波的参数 a_{m+1} (幅值), f_{m+1} (频率) 和 θ_{m+1} (相位), 代入式 (1) 即可求得单频干扰波.

(5) 从记录中减去计算得到的单频干扰波, 得到新的记录(迭代 m 次并减去干扰波后的信号):

$$r_{m+1} = r_m - a_{m+1} \sin(2\pi f_{m+1} t + \theta_{m+1}), \quad (3)$$

式中, r_m 为上次求得的信号, r_{m+1} 为减去此次迭代求解得到干扰波后的新信号.

(6) 当相对误差足够小, 或迭代次数达最大值, 则结束, 否则返回 (3).

本方法主要目的是抑制 50–200 Hz 之间的工频干扰及其谐波中的干扰. 处理后得到的结果如图 2 所示, 由图 2(a) 可见, 经过处理后时域曲线中工频干扰幅度明显降低, 而冲击波压力幅值基本未受到影响, 图 2(b) 为处理前后数据在 0–400 Hz 的频域幅度谱, 可以观察到 50 Hz 工频干扰得到了明显的抑制, 若以处理前后 50 Hz 工频干扰在频域中幅值来评价, 对工频干扰抑制效率约为 67%, 同时其他频率的信号并未明显损失.

图 2 (网络版彩图)串联共轭梯度法去除工频干扰对比图. (a) 时域曲线; (b) 频域曲线

Figure 2 (Color online) Figure of serial conjugate gradient method to remove power frequency interface. (a) Time domain curve; (b) frequency domain curve.

而若采用陷波滤波器, 则会在滤除工频干扰的同时也带来目标信号的损失. 由此可见, 本节所采用的方法对工频干扰的剔除具有较好的针对性, 在滤除特定频率干扰噪声的同时, 不会造成有用信号失真. 而对被处理过的时域曲线进行观察可以更直观地发现信号中的趋势项, 还需进一步修正.

2.3 趋势项去除

为最大限度的保留冲击信号, 使用多项式来拟合信号的低频趋势项, 多项式形式为 $U_n = \sum_{k=0}^K b_k(nh)^k$ ($n=1, 2, 3, \dots, N$), k 即为多项式的阶数. 多项式的阶数以拟合满足精度需求为准则, 本文中取最后 10000 个点处趋势项与信号相应点差值的平方和来表征误差. 趋势项的求解过程为: 列出多项式与信号的差值的平方和

$$E(h) = \sum_{n=1}^K (u_n - U_n)^2 = f(b_1, \dots, b_k),$$

式中 u_n 为原信号值, U_n 为多项式的值, 用矩阵法求解该式的极小值处的 b_k , 即可得出该多项式的表达式, 即求解得到了趋势项. 最后, 用原始信号减去趋势项即可得出有用信号.

当多项式阶数 $k=7$ 时, 信号末尾 10000 个点与多项式的误差的平方和为 0.151, 具备了足够的精度, 通过求解趋势项的系数矩阵 b_k 求解七阶多项式, 趋势项如图 3(a) 所示. 最后用原始信号减去所求得趋势项后的时域曲线如图 3(b) 所示. 图 3(c) 所示为趋势项处理前后的频域幅值曲线, 可见, 七阶多项式较好地时域曲线中的趋势项进行了拟合, 由于趋势项的周期远大于信号中的大部分分量的周期, 可以在处理前后的频域图中看出, 原始数据中的低频分量(趋势项)得到了很明显的抑制, 而其他频率分量并未受到影响.

2.4 脉冲干扰去除

在趋势项去除后, 信号中仍然存在一些脉冲干扰. 可以采用动窗稳健中值滤波法对选定区域进行脉冲干扰去除. 该方法的主要思想是在脉冲干扰区域设定动窗, 并对窗内数据以加权的方式进行滤波输出, 从而实现脉冲干扰的去除^[22]. 处理过程如下.

首先通过时域数据观察, 圈出有脉冲干扰的局部数据范围, 设定一窗宽值为 q (数据点数) 的动态窗, 对窗内原始数据 v 求解其滤波输出 z .

将数据窗中数据定义为一维帧矢量

$$\mathbf{v}_k = [v_{k-q+1}, v_{k-q+2}, \dots, v_k],$$

该矢量 $\mathbf{v}_k$ 的中值定义为 $\text{median}(v_{k-q+1}, v_{k-q+2}, \dots, v_k)$ (取中间值), 残差矢量定义为 $\mathbf{r}_k = \mathbf{v}_k - \text{median}(\mathbf{v}_k)$, 标准偏差 $\sigma_k = 1.3 \text{median}(|\mathbf{r}_k|) + 10^{-12}$, 门限值 $th_k = 4.6\sigma_k$.

通过比较残差矢量绝对值与门限值, 得到权系数矢量 $\mathbf{w}_k$, 从而输出 $z_k = \mathbf{w}_k \mathbf{v}_k' / \text{sum}(\mathbf{w}_k)$, $k=1, 2, 3, \dots, N$, $\text{sum}(\mathbf{w}_k)$ 表示对 $\mathbf{w}_k$ 中元素求和. 权重值 $\mathbf{w}_k$ 取值规律为原始数据点与中值差值(残差矢量绝对值)越小, 则该点的输出权重越大.

处理前后对比如图 4 所示, 通过对比处理前后信号可以发现, 处理后的脉冲干扰基本去除完毕, 而信号的其他细节并未受到明显影响. 从处理过程可以看出该方法在时域上仅对局部的具有较明显特征的脉冲数据进行处理, 最大程度上减小了对有用数据的损失, 具有

图 3 (网络版彩图)趋势项去除. (a) 七阶趋势项; (b) 处理前后时域曲线; (c) 处理前后频域曲线

Figure 3 (Color online) Curves of tendency remove. (a) 7 order tendency; (b) time domain curves before and after process; (c) frequency domain curves before and after process.

较好的针对性,较好地保留了信号的特征;而小波滤波和神经网络均属于全局数据处理,会对冲击波信号带来影响.

2.5 峰值修正

由图1(b)发现峰值信号存在失真的现象,在这里对信号峰值进行修正. 根据Cole水下爆炸理论公式,冲击信号可以采用指数函数进行拟合重构:

图 4 (网络版彩图)脉冲干扰去除结果对比

Figure 4 (Color online) Comparison figure of removal of pulse interference.

$$p_{\text{rec}}(t) = p_{\text{peak}} \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau}\right). \quad (4)$$

Zhou等人^[23]发现,水下爆炸冲击波传感器在采集时具有中间频段一般无损的特性,即测量值的中频段是可信的. 因此若对曲线进行重构应保证中间频段的频域幅值及能量不变,即 $P_{\text{rec}}=P_m$ 及 $E_{\text{rec}}=E_m$,其中 P_{rec} 和 E_{rec} 分别为重构曲线在中频段某点 f_0 的频域幅值及其在中频段(1–10 kHz)能量, P_m 和 E_m 为测量曲线的频域相应幅值及能量,可由傅里叶变换及其积分求得,见式(5)和(6):

$$P = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) \exp^{-j2\pi t f_0} dt, \quad (5)$$

$$E_{\text{rec}} = \int_{f_l}^{f_h} \frac{|P(f)|^2}{\rho_0 c_0} df, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \text{Error}_{P(f_0)} = [P_{\text{rec}}(f_0) - P_m(f_0)] / P_m(f_0), \\ \text{Error}_E = (E_{\text{rec}} - E_m) / E_m. \end{cases} \quad (7)$$

因此,当对冲击波峰值以式(4)的形式进行重构时,应以式(7)取得最小值为判据. 将式(4)–(6)及传感器实测值代入式(7),采用牛顿截断法求解,即可得到式(4)中 p_{peak} 和 τ 的值,即 $p_{\text{rec}}(t)$ 的表达式,从而实现波形的重构.

采用的优化判据为:保证信号在传感器有效频段范围内能量相同(误差用 Error_E 表示,频段为1–10 kHz)的同时最低频率处幅值相同(误差用 $\text{Error}_{P(f_0)}$ 表示,频率点为1 kHz).

在实际修正中,原始信号过长会对指数优化效果产生较大的影响,在这里对信号进行截取,截取的峰

值信号如图5(a)所示. 通过使用牛顿截断法对指数拟合中需要用到的参数进行优化可以得到结果如图5(b). 通过优化参数后得到的拟合曲线的两个误差判别指标分别为 $\text{Error}_E=1.63\%$, $\text{Error}_{P(f_0)}=0.64\%$, 可以观察到上升沿修正满足了传感器在有效频段范围内能量误差尽量小, 同时低频处幅值误差尽量小的要求.

3 结论

本文基于对自由场压力测量数据干扰源的分析, 研究了滤波、趋势项去除、干扰脉冲剔除及上升沿拟合等相关的预处理方法, 并以PCB公司自由场压力传感器实测的压力时程曲线为例, 设计了自由场压力数据的预处理流程, 分别对原始数据中的工频干扰、趋势项、脉冲干扰以及上升沿进行了修正, 以处理前后信号的时域、频域特征对处理效果进行评判, 结论如下.

(1) 以串联共轭梯度去除法对数据中的工频干扰进行了去除. 预处理前后数据的频域特性表明, 50 Hz 工频干扰得到了明显的抑制, 该频率分量幅值降低了67%, 同时在其他频率的信号并未明显损失.

(2) 采用多项式拟合对趋势项进行去除, 修正后信号末尾10000个点的均方差为0.151.

(3) 基于能量不变的判据, 即保证信号在传感器有效频段范围内能量相同的同时最低频率处幅值相同的原则, 对信号峰值进行修正, 参数优化后得到的拟合曲线的能量误差为 $\text{Error}_E=1.63\%$, 峰值误差为 $\text{Error}_{P(f_0)}=$

图5 (网络版彩图)峰值局部放大信号. (a) 原曲线局部放大; (b) 指数拟合峰值曲线

Figure 5 (Color online) Local magnification of peak impulse. (a) Local magnification of original curve; (b) exponent fitting of peak impulse.

0.64%.

这些结果表明, 本文设计的预处理流程及相关的算法针对水中兵器爆炸威力试验中自由场压力数据中常见的干扰项的去除, 具有较高的去除效率, 同时也保留了信号原有特征.

参考文献

- 1 Zhu X, Zhang Z H, Mei Z Y, et al. Damage Mechanics of Warship Structure Subjected to Explosion (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 2009 [朱锡, 张振华, 梅志远, 等. 舰船结构毁伤力学. 北京: 国防工业出版社, 2009]
- 2 Liu J H. Theory and Its Applications of Ship Dynamic Responses to Non-contact Underwater Explosions (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2002 [刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用. 博士学位论文. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2002]
- 3 Yu D P, Wang Y, Du J Y. Choosing filtering frequency of warship shock response data (in Chinese). Vibrat Shock, 2013, 32: 153–158 [于大鹏, 汪玉, 杜俭业. 舰艇冲击响应数据滤波频率选取方法分析. 振动与冲击, 2013, 32: 153–158]
- 4 Cole R H. Underwater Explosions. Princeton: Princeton University Press, 1948
- 5 He Z H. Damage Character of Ship Resultant Intensity Under Short Distance Under-water Explode (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017 [何镇宏. 近距离水下爆炸作用下舰船总强度损伤特性研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉理工大学, 2017]
- 6 Bebb A H, Wallance D R J, Taylor D W. Measurements of Pressure, Momentum and Energy at Very Short Distances from Underwater Exploding

- Charges. Research Report. NCRE (Naval Construction Research Establishment), 1950. 12–25
- 7 Zhang X P. Research on Uncertainty of Underwater Explosion Pressure Measurement (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuxi: China Ship Scientific Research Center, 2014 [张显丕. 水下爆炸压力测量不确定度研究. 博士学位论文. 无锡: 中国舰船研究院, 2014]
- 8 Zhang T T. Research on IIR Digital Filter Design Based on Least Square Method (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2019 [张婷婷. 基于最小二乘法的IIR数字滤波器设计研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2019]
- 9 Wang B F. Design and simulation research on FIR digital filter (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009 [王兵锋. FIR数字滤波器设计与仿真研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009]
- 10 Liu Y. Extraction and removal of strong power interference (in Chinese). Geophys Prospect Petrol, 2003, 42: 154–159 [刘洋. 强工频干扰波的提取与消除方法. 石油物探, 2003, 42: 154–159]
- 11 Lu H H. Digital Filter Design Based on Intelligent Optimization Algorithm (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Harbin: Harbin Engineering University, 2016 [陆慧慧. 基于智能优化算法的数字滤波器设计. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016]
- 12 Chen J, Li J. Methods for signal trends extraction and comparison (in Chinese). J Fuzhou Univ, 2005, 33: 42–45 [陈隽, 李杰. 振动信号趋势项提取的几种方法及其比较. 福州大学学报, 2005, 33: 42–45]
- 13 Chen J, Xu Y L. Application of EMD to signal trend extraction (in Chinese). J Vibrat Measur Diagn, 2005, 25: 101–104 [陈隽, 徐幼麟. 经验模分解在信号趋势项提取中的应用. 振动、测试与诊断, 2005, 25: 101–104]
- 14 Xie Q W. The Analysis and Application of Empirical Mode Decomposition Algorithm (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008 [谢启伟. 经验模式分解算法分析和应用. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2008]
- 15 Zuo J G. Impulse interference and its elimination method in ultrasonic flaw detection (in Chinese). Flaw Detect No Damage, 1998, 12: 8–11 [左建国. 超声探伤中的脉冲干扰噪声及其消除方法. 无损探伤, 1998, 12: 8–11]
- 16 Xu X J, Zhao H C, Guo J L, et al. Noise erasing method in median frequency electro-therapeutic power supplier based on first order recursion clipping filtering (in Chinese). Technol Innovat, 2017, 10: 12–14 [徐肖鲸, 赵宏才, 郭佳乐, 等. 基于一阶递推限幅滤波的中频电疗仪电源干扰解决方法. 科技创新, 2017, 10: 12–14]
- 17 Sun Z H, Tian X M. A novel pretreatment method for elimination of signal's singular points (in Chinese). J Jiangnan Univ (Nat Sci Ed), 2010, 9: 34–37 [孙振华, 田学民. 一种新型信号奇异值预处理方法. 江南大学学报(自然科学版), 2010, 9: 34–37]
- 18 Song W J. Scalping method of strong impulse disturb in continuous wave radar (in Chinese). Electron Technol, 2003, 99: 423–426 [宋文佳. 连续波雷达强脉冲干扰剔除的算法. 电子技术, 2003, 99: 423–426]
- 19 Zuo J G. Elimination of pulse noise from ultrasonic testing signals and by median filtering technique (in Chinese). Flaw Detect No Damage, 1998, 20: 78–81 [左建国. 用中值滤波技术消除超声检测中的脉冲噪声. 无损检测, 1998, 20: 78–81]
- 20 Zhong H T, Liao J B, Liao S P. Study on peak value measurement and its correction (in Chinese). Machinery, 2006, 33: 6–7, 10 [钟慧婷, 廖俊必, 廖世鹏. 冲击信号峰值检测及修正的研究. 机械, 2006, 33: 6–7, 10]
- 21 Dong G X, Du M H, Huang X F. Correction on parameters of calculation formula for shockwave overpressure peak value of one explosive (in Chinese). J Naval Aeronaut Astronaut Univ, 2010, 25: 542–545 [董桂旭, 杜茂华, 黄雪峰. 某型炸药的冲击波超压峰值计算公式参数的修正. 海军航空工程学院学报, 2010, 25: 542–545]
- 22 Zou H, Xiang D W, Jing Y G. Data smoothing methods for DVL (in Chinese). Tech Acoust, 2008, 27: 507–510 [邹洪, 向大威, 景永刚. 多普勒计程仪的数据平滑方法. 声学技术, 2008, 27: 507–510]
- 23 Zhou H, Zhang Y, Han R, et al. Signal analysis and waveform reconstruction of shock waves generated by underwater electrical wire explosions with piezoelectric pressure probes. [Sensors](#), 2016, 16: 573

Preprocessing analysis of free-field pressure data in explosive power testing of underwater weapons

QUAN Lin^{1*}, CHEN MengYing², CHEN Qi², GUO Ying² & CHENG SuQiu¹

¹ Unit 91439 of China PLA, Dalian 116041, China;

² Shanghai Acoustics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Experimental measurements in the explosive testing of underwater weapons are important tactics to obtain the explosive power of a weapon. Preprocessing measurement data in the free-field pressure test is an important basis for approaching and extracting the true values of the measurement signals. By analyzing and calculating characters from the processed data, the explosive power value of weapons can be reasonably assessed. In this paper, we investigated preprocessing methods to eliminate common interference noise in free-field pressure tests, such as time-domain curve tendency, power frequency interference, interference between test channels, and rising edge error of shock wave impulses. The underwater free-field pressure data tested by the pressure sensor obtained in the explosion test was used to study the preprocessing flow design. It was processed by polynomial fitting to remove tendency item, serial conjugate gradient method to remove power frequency interference, moving window medial filtering to reduce pulse interference, and exponential function fitting to correct the rising edge of shock wave impulses. A preprocessing flow was designed for underwater free-field pressure measurement data. Its validity was evaluated by the comparative analysis of time domain and frequency domain characteristics and statistical characteristics of the data before and after preprocessing. The serial conjugate gradient method significantly reduces power frequency interference at certain frequencies and affects signals with other frequencies scarcely. In the exponential fitting of shock wave impulses, the relevant parameters of the fitting curve were optimized by the truncated Newton method. The effect of the exponential fitting of the peak value correction was evaluated by power error and peak value error.

underwater explode, pressure, pre-process

PACS: 07.05.Kf, 07.07.Df, 06.30.Ft

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0356](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0356)