

水下爆炸船体结构壁压信号时频特征分析

谢耀国*, 郭君, 李新飞, 崔洪斌, 姚熊亮

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了研究水下爆炸条件下船体结构壁压信号时频特征, 基于某船体结构模型水下爆炸实验壁压数据, 利用小波变换良好的时频局部化性质, 对壁压信号进行时频特征分析, 得到壁压信号在不同频带上的压力时程曲线和能量分布。结果表明, 利用小波变换可以方便地获得壁压信号强度、频率和持续时间等时频细节信息。能量统计表明, 壁压信号频带分布很广, 超过 80% 的能量主要集中在 20 kHz 以下, 5 kHz 以下频带能量最大。

关键词: 水下爆炸; 小波分析; 时频特征; 壁压

中图分类号: U661.44

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201505007

0 引言

在舰船结构抗爆抗冲击研究中, 作用在船体结构壁面的压力荷载是反映舰船在水下爆炸时所受外荷载的重要数据, 也是进行抗爆抗冲击数值计算的重要输入参数^[1-2]。为了提高舰船抗爆抗冲击能力, 世界各国进行了大量的实船及模型水下爆炸实验^[3-5], 由于实验的特殊性, 公开的壁压测试分析文献较少。近年来, 我国也开展了很多相关实验, 获得了一些船体结构壁压信号实验数据, 并进行了基本原理与现象的解释^[6-7], 但并未对壁压信号时频特性以及激励能量的频率分布特征进行深入的分析。

要认识舰船结构水下爆炸的特性, 最有效的方法之一就是对其水下爆炸压力响应信号进行分析。小波分析是近几十年来才提出并开始发展起来的一种新的时频分析方法, 已经在电子信息技术领域得到了充分的利用, 其在非稳定信号的分析处理上具有很大的优势^[8]。水下爆炸船体结构壁压信号具有短时、非平稳的特点, 信号的结构和频谱都是时刻变化的, 传统的傅里叶时域分析方法已经不能适用。近年来, 一些研究者在处理非平

稳随机信号上使用了小波变换, 并在处理工程爆破振动信号以及水下爆炸压力声信号方面取得了一些研究成果^[9-10]。本文针对水下爆炸船体结构壁压信号特点, 采用小波变换方法进行多分辨率多层分解, 并对小波重构信号能量分布进行研究, 以期有效分析水下爆炸船体结构壁压信号特性, 获得相关的时频特征。

1 基本理论

1.1 小波分析

设任意信号 $f(t) \in L^2(R)$, $L^2(R)$ 称为能量有限的信号空间, 则称 $f(t)$ 为能量有限的信号^[11-12], 即

$$f(t) \in L^2(R) \Leftrightarrow \int_R |f(t)|^2 dt < +\infty \quad (1)$$

如果 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足容许性条件

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < +\infty \quad (2)$$

即 C_ψ 有界, 则称 ψ 为一个基小波或母小波。将基小波伸缩和平移后, 就可以得到一个小波序列

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{3}$$

其中 $a, b \in \mathbf{R}$, 且 $a \neq 0$. 称 a 为伸缩因子, b 为平移因子. 定义下式

$$(W_{\psi}f)(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \tag{4}$$

为关于基小波的连续小波变换. 其中 $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ 为 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的共轭运算. 变换后的函数是二维的, 即小波变换后把原来的一维信号变换为二维信号, 这样就便于分析信号的时频特征. 小波变换将一维时域函数映射到二维“时间 - 尺度”域上, 因此信号 $f(t)$ 在小波基上的展开具有多分辨率的特性. 通过调整伸缩因子 a 和平移因子 b , 可以得到具有不同时频宽度的小波以匹配原始信号的任意位置, 达到对信号的时频局部化分析的目的.

实际应用时, 为了方便计算, 对连续小波变换进行离散化, 把参数 a 或 b , 或同时, 进行离散化, 就得到离散小波变换. 通常取

$$a = a_0^m, b = nb_0a_0^m; m, n \in \mathbf{Z}$$

取 $a_0 = 2, b_0 = 1$, 即可得到二进小波.

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \tag{5}$$

每当 m 增加 1 时, 伸缩因子 a 增加一倍, 对应的信号频率减小一半, 适合进行高效计算, 也便于分析.

1.2 小波变换后各频带能量统计

经过小波变换后, 得到了由高到低各分析频带的小波重构信号, 各分层重构信号仍然为时程信号. 如果将信号分析到了第 n 层, 各层对应的能量

$$E_i = \int |f_i(t)|^2 dt = \sum_{j=1}^m |y_{ij}|^2 \tag{6}$$

$$E = \sum_{i=1}^{n+1} E_i \tag{7}$$

式中: E_i 为第 i 频带信号包含的能量; $f_i(t)$ 为分解后的第 i 频带信号; y_{ij} 为第 i 频带信号的离散点幅值; E 为分析信号的能量和. 其中, $i = 1, 2, \dots, n + 1, j = 1, 2, \dots, m, m$ 为信号的离散采样点数.

各小波分解频带能量在分析信号总能量中的

占比

$$k_i = E_i/E \tag{8}$$

2 水下爆炸压力实验

实验在大型水下爆炸实验水池中进行, 实验水池水深 20 m, 目的是考察实验船体结构在水下爆炸荷载作用下的毁伤效果. 船体结构模型包括外底板、纵桁、肋板和内底板等主要典型结构. 如图 1 所示, 实验时, 船体外底板没于水面线以下, 在外底板安装一处壁压测点. 壁压传感器压力感应面与外底板外表面平齐, 如图 2 所示. 实验测试采用 PCB 压力传感器以及 Taktronix 示波器进行数据采集.

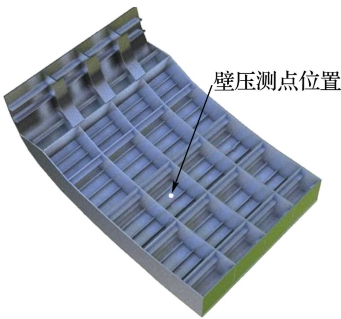


图 1 实验舱段底部结构

Fig. 1 Structure of experimental tank bottom

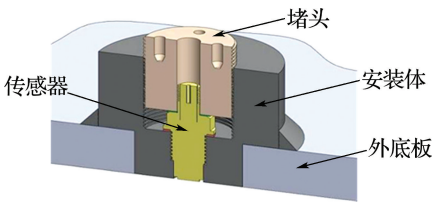


图 2 壁压测量装置

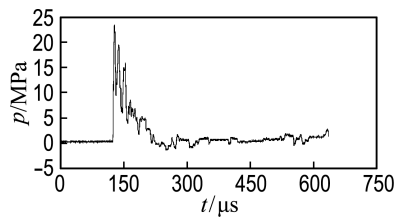
Fig. 2 Measuring device of wall pressure

根据水下爆炸理论和实际工程经验^[1], 认为影响船体结构表面入射压力的主要因素有 TNT 药包质量 W 、水深 H 、爆炸距离 L 、测点处冲击波入射方向角 θ 等参数, 其中 θ 为入射方向与入射面法线的夹角. 在改变参数条件下分别进行了 3 次水下爆炸实验, 实验所用的为 T/R 炸药. 相关实验工况参数见表 1. 实验测得压力曲线如图 3 所示.

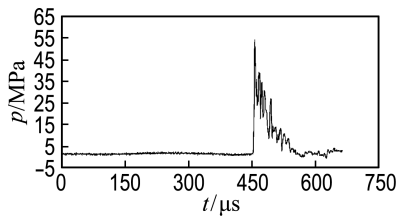
表 1 各工况布置参数

Tab.1 Layout parameters of each case

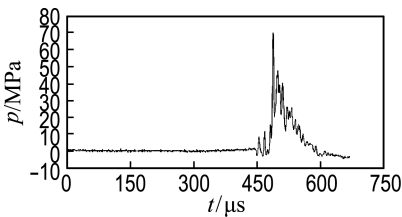
工况	W/kg	H/m	L/m	$\theta/(^{\circ})$
1	6.0	10.86	10.00	12.5
2	8.0	5.43	4.42	27.0
3	8.0	3.64	3.21	42.0



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 3 各工况壁压时程曲线

Fig. 3 Wall pressure-time curve of each case

3 壁面压力信号小波分析及各频带能量统计

利用小波变换具有多层多分辨率的特性,分析和提取水下爆炸外底板壁面压力信号的有效时频信息.对实验测试得到的 3 种工况下信号数据进行分析,下面以工况 1 船体壁压信号为例进行分析,其他信号的分析类似.

3.1 壁压信号小波分解

在实际对信号进行小波变换的过程中,小波基的选取是信号小波分析成败的关键问题.对信号进行小波变换时,采用不同的小波基常常会得出不同的结果^[12].在非稳定信号分析中, Daubechies

小波基函数是最常用的, Daubechies 小波系列具有较好的紧支撑性、光滑性和近似对称性^[13],在分析爆炸、地震等在内的非平稳信号问题上已得到成功的应用^[14].在非平稳信号分析中运用较多的是 db8 小波基函数,本文也采用 db8 小波基函数对壁压信号进行分解.

工况 1 实验中,壁压信号采样频率设置为 5 MHz,则其奈奎斯特(Nyquist)频率为 2.5 MHz.利用小波分析理论,采用 db8 小波基函数对实验工况 1 中水下爆炸壁压信号进行小波变换,将壁压信号进行 9 层分解,可获得 10 个频带的小波分解信号,对应的各分解频带见表 2.

表 2 壁压信号各频带参数

Tab.2 Frequency band parameters for wall pressure signals

i	f_i/kHz	$p_{\text{max}}/\text{MPa}$	$k_i/\%$
d1	1 250~2 500	0.47	0.05
d2	625~1 250	0.49	0.04
d3	312.5~625	1.42	0.26
d4	156.25~312.5	3.49	1.57
d5	78.125~156.25	4.49	3.59
d6	39.062 5~78.125	7.03	8.77
d7	19.531 25~39.062 5	3.15	3.52
d8	9.765 625~19.531 25	6.42	16.78
d9	4.882 812 5~9.765 625	3.10	12.24
a9	0~4.882 812 5	6.70	53.18

在进行壁压信号小波分解后,为验证分解后的信号是否真实反映实测的压力信号,对小波分解后的信号进行重构,与实测信号进行对比.图 4 为相对误差分布.通过对比实测信号与重构信号可以看出,二者相对误差非常小,量级在 10^{-10} 级别.这说明选取的小波基对分解水下爆炸壁压信号是合适的,在信号分解过程中能量的损失是可

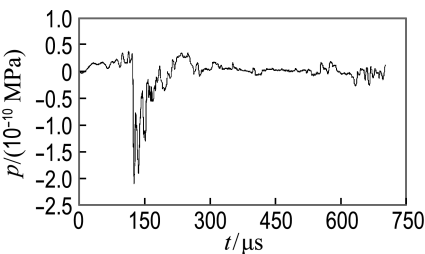


图 4 相对误差分布

Fig. 4 Distribution of relative error

以忽略的,能真实反映测试信号的情况. 分层重构信号见图 5,共 10 个频带与表 2 相对应,图中 a9 为低频分量,d1~d9 为高频分量.

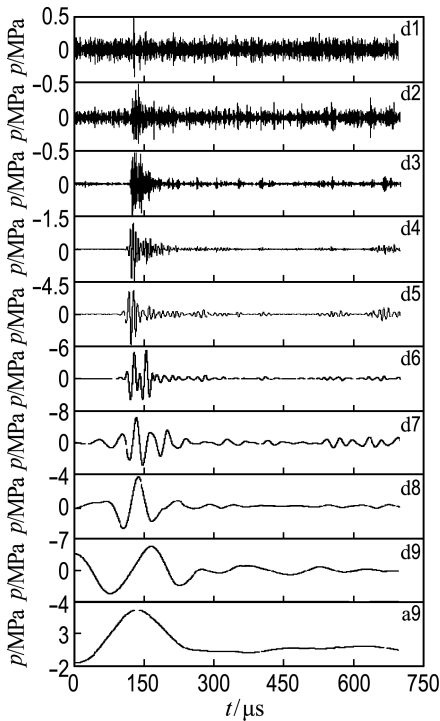


图 5 工况 1 壁压信号小波分解后的分层重构信号
Fig. 5 Reconstructed signals of wall pressure signals in Case 1 undergoing wavelet decomposition at different levels

3.2 壁压信号在各频带能量统计

为了对水下爆炸船体外底板壁面压力信号各频带能量分布情况进一步分析,利用式(6)~(8),根据小波变换分层重构信号,可以得到在不同频带(f_i)上壁压信号相对能量的分布情况,各频带信号在总能量中的占比 k_i ,以及各频带信号压力幅值 $p_{i\max}$,统计见表 2.

4 壁压信号时频特征分析

利用小波分析具有多分辨率多层分解以及在时域和频域都有表征信号局部信息的能力,将壁压原始信号分解为多频带的时间-压力信号细节信息,通过图 5 可以发现,船体壁压信号包含丰富的频率成分,作用于船体的冲击荷载频带较宽. 经过对各个频带上的压力信息能量统计,得到壁压信号在各频带上的能量分布情况,各频带能量大

小可以直接表征相应频带冲击信号分量的强度. 可见,经过小波分析壁压信号,可以得到水下爆炸条件下作用于船体压力荷载的有效频率信息.

通过表 2 可以发现,频带 a9(0~4. 882 812 5 kHz)壁压信号能量占比最大,超过总能量的一半,达到 53. 18%,并且压力幅值也很大. 频带 d8、d9 和 a9(0~19. 531 25 kHz)压力幅值较大,能量占比也比较大,占总能量的 82. 20%,可见壁压信号能量主要集中在 20 kHz 以下. 在 d1 和 d2 两个高频带(625~2 500 kHz)不但能量占比极小而且压力幅值也很小,再结合 d1 和 d2 压力时程曲线发现其基本未出现压力突变,可认为在这两个频带上主要是噪声信息. 可见,经过小波分析后的各频带能量,可以反映水下爆炸条件下作用于船体压力荷载在各频带上的强度信息.

由表 2 可知,相对能量分布较大的频带其压力幅值都较大,再结合图 5 可见,在压力幅值较大的情况下,如果冲击作用持续时间长,则相应小波频带上的相对能量就较大. 进一步分析,壁压信号分解后所有频带上压力幅值最大的是 d6(39. 062 5~78. 125 kHz),但与 a9(0~4. 882 812 5 kHz)相比能量小很多,通过对比 d6 和 a9 的小波频带压力时程曲线即可看出,d6 频带虽然幅值最大,但其冲击压力信号衰减较快,持续作用时间较短,所以其相对能量较小. 因此,通过小波分析后的各层重构信号,可以反映水下爆炸条件下作用于船体压力荷载在各频带上的衰减及持续时间信息.

另外,利用相同的小波分析对工况 2 及工况 3 采集到的壁压信号进行了分析. 工况 2 和工况 3 采样频率设为 2 MHz,其奈奎斯特频率为 1 MHz. 利用 db8 小波基函数对水下爆炸壁压信号进行小波变换,进行 9 层分解,可获得 d1~d9 及 a9 共 10 个频带的小波分解系数,分别为 500~1 000、250~500、125~250、62. 5~125、31. 25~62. 5、15. 625~31. 25、7. 812 5~15. 625、3. 906 25~7. 812 5、1. 953 125~3. 906 25 和 0~1. 953 125 kHz. 对工况 2 及工况 3 壁压信号分解后的各小波频带信号能量进行统计,各频带信号能量占各自工况总能量的比例见图 6. 同工况 1 相似,工况 2 及工况 3 壁压信号包含的频率成分

也非常丰富,包含能量的频带较宽.在 15.625 kHz 频率以内,工况 2 及工况 3 相对能量占比分别达到 82.91% 和 84.58%,能量主要集中在相对低频带.

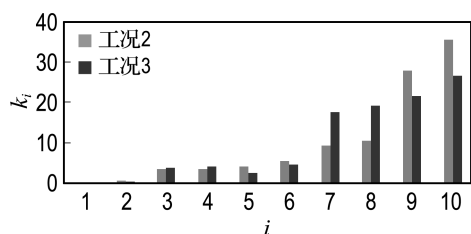


图 6 工况 2 和工况 3 各频带能量分布情况

Fig. 6 Band energy distributions of Case 2 and Case 3

通过图 3 可以发现,工况 1 及工况 2 峰值显得十分突兀,最大峰值到来前曲线比较稳定,无动态压力输入迹象,而在工况 3 中,最大峰值前曲线出现了短暂的小幅振荡.工况 3 爆点位置距离船体外底板较近,测点入射角较大,因此测点与爆点的直线距离与爆距之差相对较大,基于球面波假设,一部分冲击波在到达测点之前就已经到达船体外底板,已知冲击波在水中传播速度为 1 500 m/s,而其在结构中的传播速度为 5 000 m/s 左右,远大于水中传播速度,所以先到达船体的压力波经过船体结构传播先于水中冲击波到达测点位置,从而产生了先于水中冲击波到达测点的应力波,称之为前驱波.工况 3 测点位置在前驱波的辐射压力作用下,产生了如图 3 所示最大峰值前的压力振荡.通过对工况 2 及工况 3 壁压信号小波变换后各层重构信号的对比分析,由图 6 可见,压力前驱波对壁压荷载在主要能量频带区上的分布并未产生明显影响,主要集中在 20 kHz 以下,这说明压力前驱波与水中冲击波在主要能量频带区上相似,二者能量相互叠加.可见,入射角度及前驱波对作用于船体压力荷载的影响不可忽略.

5 结 论

(1)小波分析可以有效地对短时非平稳水下爆炸条件下船体结构壁压信号进行时频特征分析,能方便地得到壁压信号强度、频率和持续时间等时频细节信息.

(2)利用小波分析可以得到壁压信号在各频带上的时程变化曲线,获得壁压在各频带上的分布和衰减信息.

(3)小波变换结合能量统计方法可以清晰地得到作用于船体的冲击荷载在不同频带上的能量分布,结果表明,壁压信号频带分布很广,但超过 80% 的能量主要集中在 20 kHz 以下,5 kHz 以下频带能量最大.水中冲击波入射角度及结构前驱波对作用于船体压力荷载的影响也不可忽视.

(4)相关分析方法及结果对水下爆炸作用于船体的冲击荷载分析具有实际意义,也对舰船抗爆抗冲击防护及设计具有参考价值.

参考文献:

- [1] Cole R H. **Underwater Explosion** [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948.
- [2] 汪 玉, 华宏星. 舰船现代冲击理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
WANG Yu, HUA Hong-xing. **Ships Impact Modern Theory and Application** [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)
- [3] Mair H U, Reese R M, Hartsough K. Simulated ship shock tests/trials? [EB/OL]. [2013-02-09]. http://www.researchgate.net/publication/2825129_Simulated_Ship_Shock_TestsTrials.
- [4] Pusey H C. A survey of the information needs of industry in designing to meet navy shipboard requirements [J]. **Shock and Vibration Bulletin**, 1969, **40**:132-139.
- [5] Miller R D, Moyer E T. Shock analysis of ship structures due to underwater explosions using HULLCAV3/DYNA3D with DAA [C] // **Proceedings of the 62th Shock and Vibration Symposium**. Rome:[s. n.], 1991:449-457.
- [6] 金 辉, 张庆明, 张姝红, 等. 水下爆炸中压力载荷测量与分析 [J]. **爆破**, 2009, **26**(2):18-22.
JIN Hui, ZHANG Qing-ming, ZHANG Shu-hong, et al. Measurement and analysis of underwater explosion pressure load [J]. **Blasting**, 2009, **26**(2):18-22. (in Chinese)
- [7] 樊宝顺, 程素秋, 韩 峰. 舰船舱段模型在水下爆炸作用下的壁压分析 [J]. **中国舰船研究**, 2009,

- 4(5):20-22.
- FAN Bao-shun, CHENG Su-qiu, HAN Feng. Wall pressure analysis of cabin model subjected to underwater explosion [J]. **Chinese Journal of Ship Research**, 2009, 4(5):20-22. (in Chinese)
- [8] 高 成. Matlab 小波分析与应用[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2007.
- GAO Cheng. **Matlab Wavelet Analysis and Application** [M]. 2nd ed. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [9] 温华兵, 张 健, 尹 群, 等. 水下爆炸船舱冲击响应时频特征的小波包分析[J]. 工程力学, 2008, 25(6):199-203.
- WEN Hua-bing, ZHANG Jian, YIN Qun, *et al.* Wavelet packet analysis of time-frequency characteristic of cabin shock response due to underwater explosion [J]. **Engineering Mechanics**, 2008, 25(6):199-203. (in Chinese)
- [10] 李夕兵, 张义平, 刘志祥, 等. 爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6):528-535.
- LI Xi-bing, ZHANG Yi-ping, LIU Zhi-xiang, *et al.* Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal [J]. **Explosion and Shock Waves**, 2005, 25(6):528-535. (in Chinese)
- [11] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2012.
- ZHANG De-feng. **MATLAB Wavelet Analysis** [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2012. (in Chinese)
- [12] Daubechies I. Wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis [J]. **IEEE Transactions on Information Theory**, 1990, 36(5):961-1005.
- [13] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets [J]. **Communications on Pure and Applied Mathematics**, 1988, 41(7):909-996.
- [14] 林大超, 施惠基, 白春华, 等. 爆炸地震效应的时频分析[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1):31-36.
- LIN Da-chao, SHI Hui-ji, BAI Chun-hua, *et al.* Time-frequency analysis of explosion seismic effects [J]. **Explosion and Shock Waves**, 2003, 23(1):31-36. (in Chinese)

Analysis of time-frequency characteristics of wall pressure signals of hull structure subjected to underwater explosion

XIE Yao-guo*, GUO Jun, LI Xin-fei, CUI Hong-bin, YAO Xiong-liang

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: With a view to obtaining the time-frequency characteristics of wall pressure signals of hull structure subjected to underwater explosion, based on the experimental wall pressure data of a hull structure model subjected to underwater explosion, the time-frequency characteristics of the wall pressure signals were studied by means of wavelet transform characterized with good time-frequency localization. By using these wall pressure signals, the pressure-time curves and the energy distributions in different frequency bands were obtained. The experimental results show that it is easy to get the time-frequency information details of the wall pressure signals by the wavelet transform, such as intensity, frequency and duration, etc.. Energy statistics show that frequency bands of the wall pressure signals have a wide distribution, more than 80% of the energy of the wall pressure signals is mainly concentrated in the area of less than 20 kHz and the highest level of energy is below the frequency of 5 kHz.

Key words: underwater explosion; wavelet analysis; time-frequency characteristics; wall pressure