DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0099-08

基于小波分析的实船水下爆炸船体响应特征*

谢耀国,姚熊亮,崔洪斌,李新飞
(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冲击振动响应时频特征,针对某实船非接触水下爆炸实验冲击响应测试实验数据,基于小波分析及能量统计方法对响应信号进行时频特性分析,得到了实船非接触水下爆炸冲击振动响应的时频分布和能量分布。分析结果表明,采用基于小波变换的时频分析方法,可以成功获得船体冲击响应信号不同频率段下的强度、能量和作用时间等时频细节信息,包括响应信号各频段冲击峰值、衰减过程、振动能量及其在全频率段上所占的分数。通过对小波频段能量统计以及冲击强度分析发现,冲击响应能量频段分布较广,主甲板及以下甲板全频段振动能量的 80%以上在 312.5 Hz 以上,上层建筑甲板平台各频段冲击振动能量分数向低频段转移。

关键词:爆炸力学;时频特征;小波分析;实船;水下爆炸;冲击响应
中图分类号:O381;U661.44 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

水下非接触爆炸产生的冲击往往会造成舰船设备和人员的损伤,从而影响舰船的生命力和战斗力,对以船体结构冲击响应为输入条件的舰船冲击环境的研究受到了广泛重视[1-4]。目前研究舰船结构在水下爆炸载荷作用下的动态响应机理很大程度上以实验为基础,而实船海上爆炸实验最具针对性,结果最准确,但此种实验耗费巨大,实验中不确定因素多,实施较困难。要认识舰船结构水下爆炸特性,最有效的方法之一就是对其水下爆炸结构响应信号进行分析。水下爆炸船体冲击响应信号是典型的非平稳、非线性信号,信号的结构和频谱都是时刻变化的,对于其时频特征细节的研究,传统傅里叶分析方法已能不满足要求。小波分析是一种较新的时频分析方法,适合分析脉冲信号或突变信号,在处理非平稳、非线性信号上已经取得了一些成果[5-7]。在水下爆炸领域,温华兵等[8]对实验水池环境下的水下爆炸压力进行了小波包分析,得到了相关压力信号的能量分布。李万等[9-10]对水下目标模型振动信号进行了时频分析,讨论了不同振动时段对水下目标毁伤的影响。计晨等[11]对柴油机抗冲击性能进行了实船水下爆炸实验研究,得到了相关冲击振动数据。本文中,针对水下爆炸船体结构冲击响应信号的特点,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特征进行分析,以期获得相关的时频特征,研究非接触水下爆炸载荷作用下的船体结构冲击振动响应规律。

1 基本理论

1.1 小波分析

任意信号 $f(t)\in L^2(\mathbf{R})$,$L^2(\mathbf{R})$ 称为能量有限的信号空间,则称 $f(t)$ 为能量有限的信号[12-13],即:

$$f(t)\in L^2(\mathbf{R})\Leftrightarrow\int_{\mathbf{R}}|f(t)|^2\mathrm{d}t<+\infty \tag{1}$$

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

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

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

* **收稿日期**:2015-07-01;**修回日期**:2015-12-18
基金项目:国家自然科学基金项目(51279038);国家安全重大基础研究项目(613157)
第一作者:谢耀国(1982—),男,博士,讲师,xieyaoguo@hrbeu.edu.cn。

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

其中，$a,b\in\mathbf{R}$，且 $a\neq0$。称 a 为伸缩因子，b 为平移因子。定义下式：

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

其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。显然，变换后的函数是二维的，即小波变换把原来的一维信号变换为二维信号，便于分析信号的时-频特性。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。

对于实际计算，通常将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：

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

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

经过小波分解后，得到了由高到低各分析频带内的小波分量，各频带分量仍然为关于时间变化的信号。如果将信号分析到了第 n 层，各层对应的能量为：

$$E_i=\int|f_i(t)|^2\mathrm{d}t=\sum_{j=1}^{m}|y_{ij}|^2,\qquad E=\sum_{j=1}^{n+1}E_i \tag{6}$$

式中：E_i 为第 i 频带信号对应的能量和，$f_i(t)$ 为第 i 频带的小波分解信号，y_{ij} 为第 i 频带信号 $f_i(t)$ 的离散点幅值，E 为分析信号的总能量，其中，$i=1,2,\cdots,n+1$；$j=1,2,\cdots,m$；m 为信号的离散采样点。

各小波分解频带能量在分析信号总能量中的分数为：

$$k_i=E_i/E\times100\% \tag{7}$$

2 实船水下爆炸船体冲击响应实验

本文中分析的数据是在我国某水面舰船实船水下爆炸实验条件下测试得到的船体冲击响应数据。该实船水下爆炸实验是非接触水下爆炸实验，在某开阔海域进行，船体在水面处于自由状态。对于水面舰船，在水下爆炸条件下，冲击振动造成的船体冲击响应在船体各部位各方向上是不同的，其中船体垂向冲击速度是主要的，是导致船上人员以及仪器、设备、装置等技术装备在水下爆炸冲击载荷作用下毁伤的主要因素。为获得实船水下爆炸典型船体冲击响应时频特征，在某一工况下选取了 3 处典型船体部位冲击响应数据进行分析，且 3 处测点数据均为垂向冲击响应。

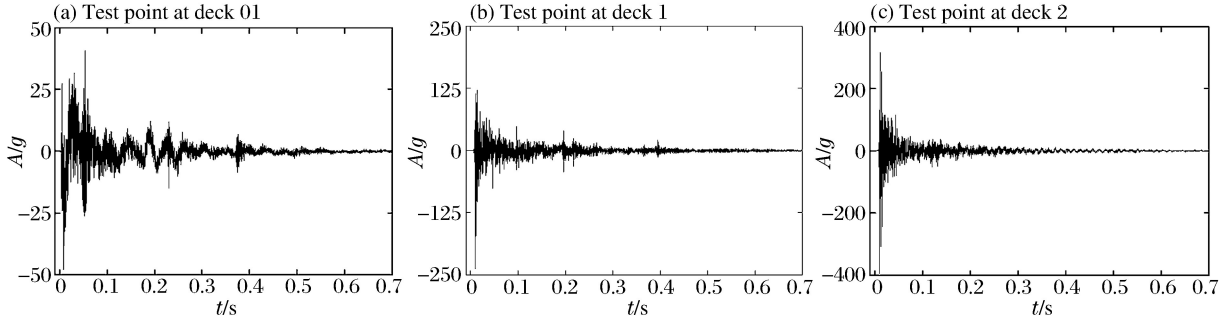

图 1 实船水下爆炸冲击响应加速度测试信号

Fig. 1 Shock response acceleration test signal of each deck of real ship subjected to underwater explosion shock

测点位置信息描述如下：3 处测点分别在相邻的 3 层甲板平台上，分别为甲板 1（主甲板）、甲板 01（上层建筑甲板，主甲板向上一层）和甲板 2（主甲板向下一层）；3 处测点在同一肋位船体横剖面内；3 处测点在船体中纵剖面内，即在各自相应甲板船体中纵桁上；测试方向为垂向。船体冲击响应加速度传感器通过螺纹安装在加速度安装座上，安装座焊接在船体中纵桁上，数据采集仪设置采样频率为 20 kHz。某工况下上述测点冲击响应数据如图 1 所示。

3　船体冲击响应时频特征分析

小波变换具有时间分辨率的特性，可以分析出不同频带成分上的信号分量的时间衰减规律，这就为分析和提取水下爆炸船体冲击响应信号的有效时频信息提供了帮助，也为后续分析信号在不同频段上能量的分布特征打下基础。

3.1　冲击响应信号小波变换

对实验测试得到的 3 种典型信号数据进行小波分析，下面以甲板 1（主甲板）中纵桁的冲击响应信号为例进行分析，其他 2 个信号的分析类似，这里不做详细叙述。在实际进行小波分析的过程中，小波基的选取是非常重要的问题，因为利用不同的小波基分析同一信号会得到不同的结果[13]。目前在非平稳振动信号分析中运用较多的是 Daubechies 小波基函数，Daubechies 小波系列具有较好的紧支撑性、光滑性和近似对称性[14]。在非平稳信号分析中运用较多的是 db4 和 db8 小波基函数。

实验设置的冲击响应信号采样频率为 20 kHz，根据采样定理，则其 Nyquist 频率为 10 kHz。利用实船水下爆炸实验得出的 1 甲板中纵桁冲击响应信号曲线，根据小波分析原理，采用 Daubechies 小波基函数对水下爆炸冲击响应信号进行小波变换，将响应信号进行 9 层分解，可获得 10 个频段的小波分解系数，对应的各分解频段见表 1。

表 1　小波分解频段

Table 1　Corresponding frequency bands of wavelet decomposition

小波系数	d1	d2	d3	d4	d5
f_i/Hz	5 000～10 000	2 500～5 000	1 250～2 500	625～1 250	312.5～625
小波系数	d6	d7	d8	d9	a9
f_i/Hz	156.25～312.5	78.125～156.25	39.062 5～78.125	19.531 25～39.062 5	0～19.531 25

在进行冲击响应信号小波分解后，为验证分解后的信号是否真实地反映实测的响应信号，对小波分解后的信号进行完全重构，与实测信号进行对比。本文中分别进行了基于 db4 和 db8 小波基函数的小波变换，结果发现基于 db8 小波基函数的变换误差较小。图 2 为甲板 1 水下爆炸冲击响应重构信号及

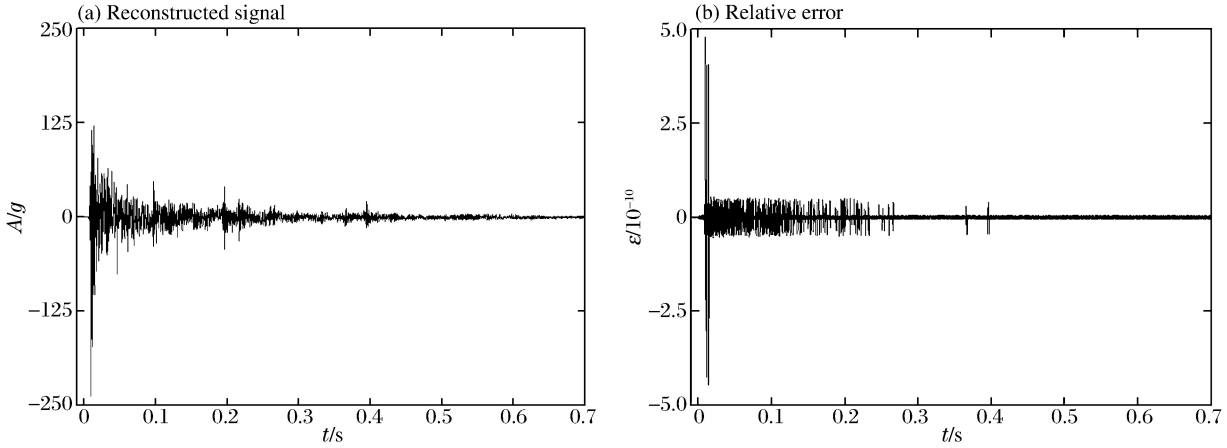

图 2　甲板 1 冲击响应重构信号及重构信号与原始信号的相对误差分布

Fig. 2　Distribution of shock response reconstructed signal of main deck and the relative error between the reconstructed signal and the original signal

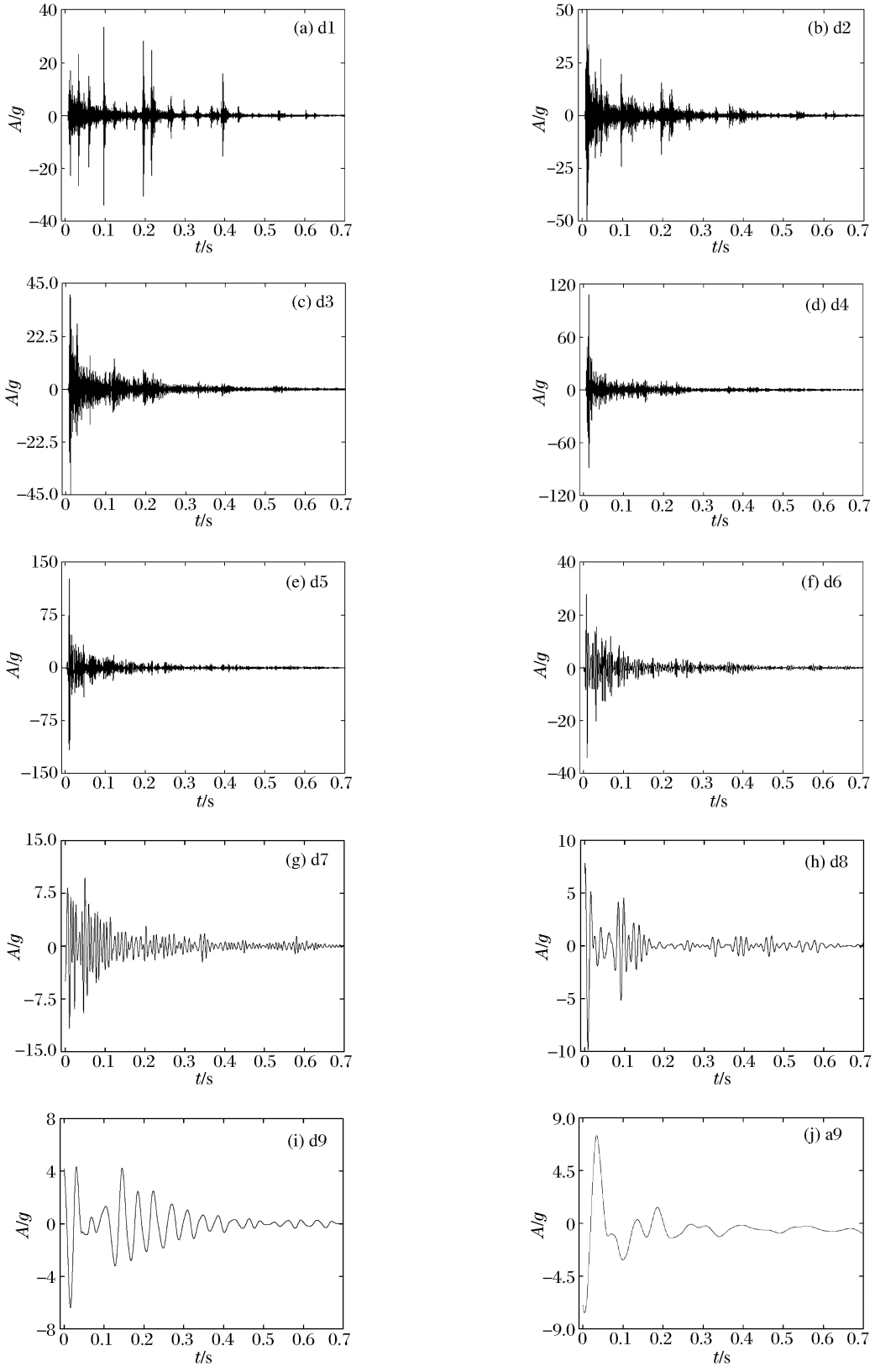

图 3 甲板 1 冲击响应信号小波分解后的分层重构信号

Fig. 3 Shock response signals of main deck undergoing wavelet decomposition at different levels

相对误差分布图。通过对比实测信号与重构信号可以看出，两者几乎一致，相对误差非常小，量级在10^{-10}级别。这说明选取的小波基用于分解实船水下爆炸冲击响应信号是合适的，在信号分解过程中能量的损失可以忽略，能真实地反映测试信号的情况。

基于 db8 小波基的小波重构分层信号见图 3，分别对应表 1 中 10 个频带。

通过以上分析可见，冲击响应信号经过小波变换后，可以得到船体冲击响应各分层重构信号的时历曲线，也可以清晰地知道各频段信号的作用时间及衰减过程，是对冲击响应信号的时频特征进一步分析的基础。

3.2　冲击响应能量分布特征

为了分析实船水下爆炸冲击响应信号在各频带能量分布情况，利用公式(6)～(7)，根据小波变换分层重构信号，可以得到测试信号在不同频段(f_i)上信号相对能量的分布情况。下面分别根据甲板 01、甲板 1 和甲板 2 测点冲击响应小波变换分层重构信号，对各测点响应信号各自的能量分布特征进行统计。各频段信号响应幅值 $A_{i,\max}$，各频段所包含的能量 E_i，以及各频段信号能量在总能量中的分数 k_i，见表 2。

3.3　结果讨论

3.3.1　小波频段能量能反映冲击振动强度

利用小波变换各分层重构信号，可以得到相应频段的可以表征冲击振动强度的响应峰值。由表 2 可知，甲板 01 各小波频带冲击响应峰值出现在 d4(625～1 250 Hz)，甲板 1 和甲板 2 各小波频带冲击响应峰值出现在 d5(312.5～625 Hz)小波频带，通过分析表 2 发现，各层甲板能量最大的小波频带也在上述频带内，与响应峰值出现的频带吻合。

另外，结合能量统计方法，对各小波频段进行统计，可以得出各频带内所蕴含的能量，以及各自频段能量在其整体信号能量所占的比重。例如，由表 2 可知，甲板 01 冲击振动能量较分散，最大小波频段(625～1 250 Hz)振动能量也不超过 20%；而甲板 1 和甲板 2 则不同，有近一半的振动能量集中在312.5～625 Hz 小波频带。可见，小波频段能量在一定程度上可以表征冲击振动强度。

表 2 各甲板测点冲击响应信号小波分解信号各频带能量信息

Table 2 Band parameters for shock response signals of decks

i	f_i/Hz	$A_{i,\max}/g$			E_i/g^2			k_i/%		
		甲板 01	甲板 1	甲板 2	甲板 01	甲板 1	甲板 2	甲板 01	甲板 1	甲板 2
d1	5 000～10 000	11.51	33.36	111.36	7 307.46	53 917.82	518 888.60	3.02	3.14	11.28
d2	2 500～5 000	8.70	50.27	95.15	7 600.98	115 947.60	384 515.90	3.14	6.76	8.36
d3	1 250～2 500	15.43	40.09	107.17	22 028.13	85 816.75	260 952.60	9.10	5.01	5.67
d4	625～1 250	31.28	107.97	132.08	46 007.65	397 562.20	668 500.30	19.01	23.20	14.50
d5	312.5～625	12.98	126.22	184.77	42 606.12	791 057.50	2 184 242.00	17.61	46.20	47.50
d6	156.25～312.5	7.67	27.83	41.02	10 172.70	112 680.40	291 414.80	4.20	6.58	6.33
d7	78.125～156.25	2.85	9.75	13.79	3 641.01	43 371.17	111 032.10	1.50	2.53	2.41
d8	39.062 5～78.125	8.09	7.82	9.74	26 572.24	31 322.22	107 088.90	10.98	1.83	2.33
d9	19.531 25～39.062 5	5.98	4.33	5.23	37842.86	40 194.21	46 575.54	15.64	2.35	0.58
a9	0～19.531 25	8.20	7.48	8.73	38 223.99	41357.92	48 494.98	15.80	2.41	1.00

3.3.2　小波频段信息可以反映舰船水下爆炸各阶段冲击振动特性

根据水下爆炸理论，水下爆炸过程中主要有 3 种现象：冲击波、气泡运动和二次压力波。水下爆炸发生后，首先作用于船体的是冲击波，紧跟着的是由于气泡膨胀速度小于水中声速推动水质点作径向运动形成的扩散流(滞后流)压力，接下来是由于气泡脉动所形成的二次压力波，由于本次实验是远场非接触水下爆炸实验，二次压力波是次要的。利用小波变换得到各频段小波分层重构信号时间历程曲线，如图 3 所示，可以清晰地得到各频段冲击振动衰减及作用时间信息。通过分析可以发现一个现象，从图 3 中的 d8、d9 及 a9 等 3 条振动时历曲线可以明显地看出其振动分为 2 个阶段：刚开始振动幅值很快达到

最大,经过几次振荡迅速衰减;而后振动幅值又增大然后衰减。通过水下爆炸理论分析可知,前一个峰值是由冲击波引起的,后一段则主要是由滞后流带来的。甲板 01 和甲板 2 的小波频段时历曲线也有这种现象。现将甲板 01 和甲板 2 的 a9 小波频段时历曲线给出,如图 4 所示。由此可见,除冲击波包含巨大的能量应予以重视,滞后流对舰船损伤的贡献也应予以重视,尤其是在几十赫兹的低频段包含很大的能量,滞后流应该是固有频率或安装频率为几十赫兹的舰船设备产生冲击振动的主要能量来源。

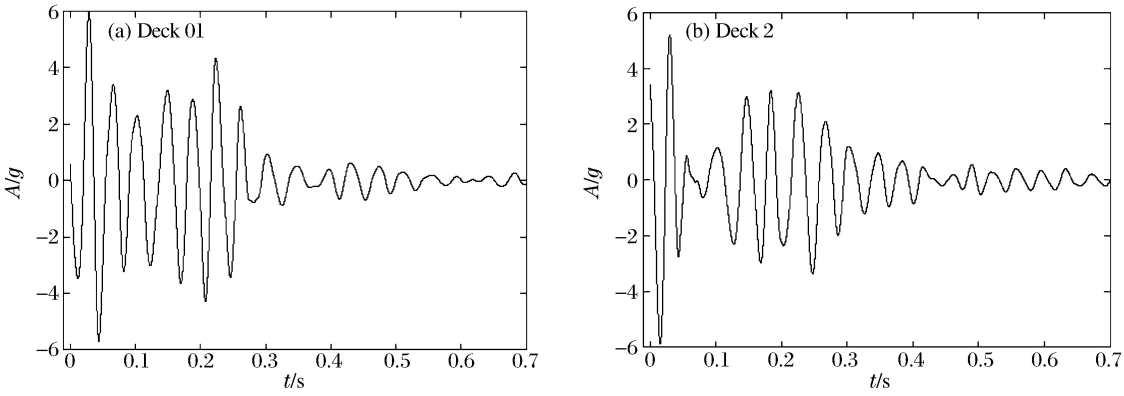

图 4 甲板 01 及甲板 2 在 a9 小波频段上的冲击加速度响应

Fig. 4 Shock acceleration responses of decks 01 and 2 at a9 wavelet spectrum

3.3.3 不同甲板层的冲击响应特性

水面舰船在遭受水下爆炸时,水面以下船体外板首先承受冲击载荷作用,进而船体的冲击运动通过板壳、肋板和舱壁等船体垂向构件逐层向上传递。本文通过在船体典型甲板平台上布置测点并获取相应的冲击振动响应数据,然后利用小波分析处理得到船体各层甲板冲击响应时频特征细节信息。对于不同甲板层,通过对表 2 的分析可见,其能量分布特征是不同的,甲板 2 在前 5 个小波频带(312.5～10 000 Hz)能量分数达到 87.31%,甲板 1 在前 5 个小波频带能量分数为 84.29%,甲板 01 在前 5 个小波频段能量只占到 51.88%,而甲板 01 在后 3 个小波频段(0～78.125 Hz)能量分数却很大(42.42%)。为了进一步分析不同甲板层冲击振动时频特征,绘制各层甲板测点冲击加速度谱,如图 5 所示。另外,定义 2 个冲击响应能量变化比例因子 k_1 和 k_2,k_1 为甲板 1 相对于甲板 2 的冲击响应能量变化比,k_2 为甲板 01 相对于甲板 1 的冲击响应能量变化比,各小波频段冲击响应能量变化计算结果如图 6 所示。

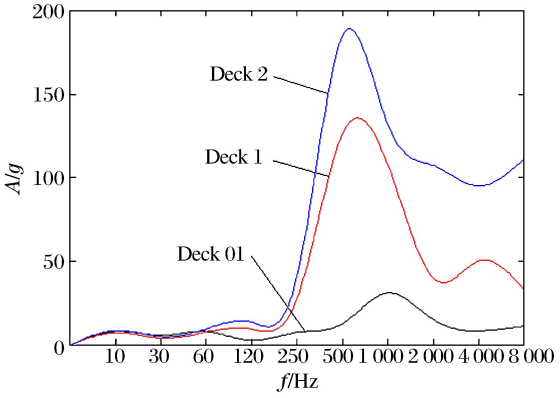

图 5 各层甲板冲击加速度谱

Fig. 5 Acceleration spectra of different decks

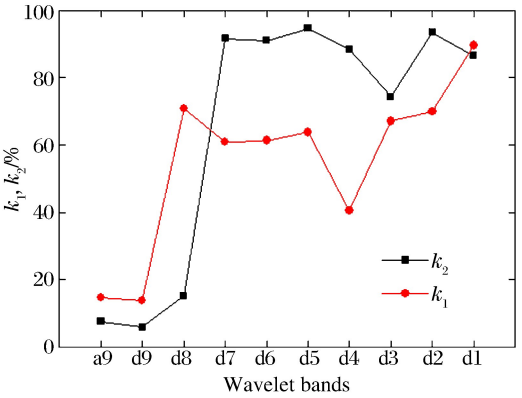

图 6 甲板间小波频段能量变化

Fig. 6 Band energy changes between decks

结合表 2 和图 5 可以发现,船体冲击运动在向上传递时,在几十赫兹的低频段振动幅值变化极小,而中高频运动分量衰减很大。船体运动在向上传递过程中,由于船体结构的缓冲作用,使得各层甲板和平台所承受的冲击响应随着层级的提高,一层比一层小,高频振动分量逐渐衰减,从不同甲板层冲击振

动运动分量变换规律这个意义上来说，可以将船体结构可以看做是一个低通滤波器。那么，越上层建筑甲板的设备和人员承受的加速度越低，且主要承受低频冲击振动。

结合表 2 和图 6 可以发现，不同甲板间，在不同频段下的能量组成以及甲板间的能量变化是不同的。通过分析可知，水下爆炸冲击载荷作用下的船体结构振动，就某一位置而言，其冲击振动是由船体总振动与结构局部振动互相耦合而成。当船体结构在遭受水下爆炸载荷时，冲击载荷首先作用于船底板，当冲击波沿船体各构件向上层船体结构传递时，冲击波能量也随之损耗。舰船船体结构大，阻尼大，但水下爆炸载荷包含巨大能量以及丰富的频率成分，可以引起全船性的船体总振动，这主要集中在低频段，甲板 01、甲板 1 以及甲板 2 冲击振动包含这部分低频的船体总振动。同时，冲击波通过船体结构传递到各层甲板，引起各层甲板的局部振动，局部振动频率相对较高，而振动频率越高，阻尼越大，所需能量也越大，由于冲击能量的损耗，层级越往上能量越小，所以引起的高频冲击振动也将会越小。因此，出现了在不同甲板间几十赫兹低频段振动幅值和振动能量的变化很小，而中高频运动分量以及能量变化很大的现象。

4　结　论

利用小波分析结合能量统计的方法，通过对实船水下爆炸典型船体冲击响应的时频特征分析，得出以下结论：

(1)利用小波变换对实船水下爆炸冲击振动响应的时频特征进行分析，可以得到响应信号在不同频段上的强度、能量和作用时间等时频信息，可以了解水下爆炸冲击振动对水面舰船损伤效果的影响，可以看出冲击波和滞后流引起冲击振动响应在作用频率和作用时间上的差异，可以为水下爆炸冲击振动响应规律研究提供基础。

(2)从实船水下爆炸冲击振动响应时频分析结果中，可以清晰地看出冲击响应信号在不同频率段上的能量以及信号强度衰减信息。结果表明，主甲板以下平台冲击振动能量及冲击加速度峰值集中在 312.5Hz 以上的中高频段；而上层甲板相对能量分数会逐层向低频段转移。此结果可以为水下爆炸条件下的舰船结构、设备和人员抗冲击防护提供依据。

(3)相关分析方法及结果比传统的频域分析方法更能反映冲击振动响应信号的内部规律及信息，为进一步认识水下爆炸载荷作用下的船体结构冲击振动响应机理提供了一种手段。

参考文献：

[1] Stettler J W. Damping mechanisms and their effects on the whipping response of a submerged submarine subjected to an underwater explosion: A347892[R]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1995:48-94

[2] Boyd S D. Acceleration of a plate subject to explosive blast loading: Trial results: A324873[R]. Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2000:2-8.

[3] Hart D T. Ship shock trial simulation of USS winston S. churchill (DDG81): Surrounding fluid effect: A919414 [R]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2003:15-30.

[4] 张玮，崔立，杜志鹏. 舰艇抗冲击试验仿真技术[J]. 科技导报，2009，27(14)：38-41.
Zhang Wei, Cui Li, Du Zhipeng. Ship shock trials simulation techniques[J]. Science & Technology, 2009,27(14): 38-41.

[5] 李夕兵，张义平，刘志祥. 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 Xibing, Zhang Yiping, Liu Zhixiang. Wavelet analysts and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal [J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(6):528-535.

[6] 凌同华，廖艳程，张胜. 冲击荷载下岩石声发射信号能量特征的小波包分析[J]. 振动与冲击，2010，29(10)：127-132.
Ling Tonghua, Liao Yancheng, Zhang Sheng. Application of wavelet packet method in frequency band energy distribution of rock acoustic emission signals under impact loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010,29(10): 127-132.

[7] 林大超,施惠基,白春华.爆炸地震效应的时频分析[J].爆炸与冲击,2003,23(1):31-35.
Lin Dachao, Shi Huiji, Bai Chunhua. Time-frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(1):31-35.

[8] 温华兵,张健,尹群.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 Huabing, Zhang Jian, Yin Qun. Wavelet packet analysis of time-frequency characteristic of cabin shock response due to underwater explosion[J]. Engineering Mechanics, 2008,25(6):19-203.

[9] 李万,张志华,李庆民,等.水下爆炸下水下目标振动信号的时频分析[J].船舶力学,2013,17(7):800-806.
Li Wan, Zhang Zhihua, Li Qingmin, et al. Research on features of time-frequency of underwater target by underwater explosion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013,17(7):800-806.

[10] 李万,张志华,周峰,等.水下目标在水下爆炸作用下冲击响应的时频特征[J].爆炸与冲击,2012,32(5):309-315.
Li Wan, Zhang Zhihua, Zhou Feng, et al. Time-frequency characteristics of shock responses of underwater target to underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(5):309-315.

[11] 计晨,王志刚,汪玉,等.柴油机抗冲击性能实船水下爆炸冲击试验研究[J].舰船科学技术,2010,32(5):27-30.
Ji Chen, Wang Zhigang, Wang Yu, et al. Anti-shock capability of marine diesel in ship shock trial[J]. Ship Science and Technology, 2010,32(5):27-30.

[12] 张德丰.Matlab-小波分析[M].2 版.北京:机械工业出版社,2012:49-76.

[13] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990,36(5):961-1005.

[14] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 1988,41(7):909-996.

Wavelet analysis on shock response of a real ship subjected to non-contact underwater explosion

Xie Yaoguo, Yao Xiongliang, Cui Hongbin, Li Xinfei

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

Abstract: With a view to obtaining the characterisstic of shock response of the hull to underwater explosion, based on the experimental impact vibration data subjected to underwater explosion trial of ship, the time-frequency characteristics of the monitored impact vibration signals were studied by wavelet analysis. By using these signals, the acceleration-time curves and the energy distributions in different blasting frequency bands were obtained. The result show that the time-frequency characteristics of impact vibration can be obtained by the wavelet analysis, it is easy to get the time-frequency information details of the impact vibration signal intensity, frequency and duration, including the peak values and attenuation and vibration energy of impact vibration signals. Based on the analysis of the energy statistics and impact strength of the wavelet frequency band, found that has a wide distribution of shock response spectrum energy, more than 80% of vibration energy distributed above 312.5Hz at the main deck and below deck, and more vibration energy in low frequency at superstructure deck platform.

Keywords: mechanics of explosion; time-frequency characteristic; wavelet analysis; real ship; underwater explosion; shock response

(责任编辑 张凌云)