文章编号：1000-5773(2012)05-0537-08

水下爆炸毁伤水下目标的能量分布特征*

李　万[1]，张志华[1]，陈沧海[2]，刘天华[1]

（1.海军工程大学兵器工程系，湖北武汉　430033；
2.海军工程大学船舶与动力学院，湖北武汉　430033）

摘要：针对某水下目标的抗水下爆炸实验数据，利用小波包良好的时频局部化性质，对被监测水下目标内部装置的冲击加速度信号进行了能量分析，得到了冲击信号的时频分布和不同频带上的能量分布。冲击信号的频带能量分布与目标毁伤的关系密切，选用冲击信号峰值、冲击信号主振频带能量、水下目标内部装置自振频率所在频带能量作为判别因子，建立距离判别模型，对水下目标毁伤情况进行了预测；利用回代估计法对模型的合理性进行了检验。研究结果表明，预测结果与实际结果相符，证明将频带能量作为水下爆炸毁伤水下目标的特征指标是合理的。

关键词：水下爆炸；小波包；冲击波；距离判别分析
中图分类号：O383；TJ363　　**文献标识码**：A

1　引　言

水下爆炸毁伤水下目标是一个极其复杂的过程，包括炸药的水下爆炸、水下爆炸冲击波与气泡脉动的形成和传播、水下爆炸流体和目标结构的流固耦合作用，以及水下目标结构在水下爆炸冲击波载荷作用下的弹塑性动力响应几个方面。水下目标结构在水下爆炸载荷作用下的弹塑性动力响应是一个高度结构的非线性问题，该类问题的主要研究方法是数值模拟与实验相结合。Ergin[1]对冲击载荷作用下的圆柱壳体进行了实验研究，并利用二阶双重渐近近似法（Doubly Asymptotic Approximations，DAA）对实验模型进行了数值模拟；贾宪振等人[2]利用通用有限元程序 ABAQUS，对深水环境中的圆柱壳在水下爆炸作用下的毁伤效应进行了数值模拟研究。在以往的研究中，一般研究水下目标外壳结构的毁伤效果，而有关水下目标内部装置毁伤效应的研究则不多。

水下目标内部装置由精细的电子功能元件组成，属于电子类产品，抗冲击能力较差，容易因遭受冲击而损坏。所以要毁伤目标，并不一定要使目标外壳破裂，如果能使目标受到足够大的冲击，造成目标内部装置产生振动从而导致其损坏，也可以毁伤目标。因此，利用有限元程序从力学角度分析水下目标在水下爆炸冲击波作用下的毁伤效应，难以揭示内部装置元件的毁伤机制，需要通过结合水下爆炸实验以及电子产品的固有特性进行研究。

在水下爆炸作用下，目标内部装置的冲击加速度信号具有突变快、持续时间短的特点，是典型的非平稳随机信号，要求信号分析系统具有较高的频率分辨率和时间分辨率。近年来，一些研究者用小波变换处理非平稳随机信号，并应用小波变换处理工程爆破的振动信号，取得了一定的应用成果[3]。本研究运用小波包分析技术，从冲击信号小波包各个频带的能量和目标内部装置的固有频率特性出发，综合考

* **收稿日期**：2011-01-27；**修回日期**：2011-08-24
基金项目：国家自然科学基金(50775218)；海军工程大学博士生创新基金(HGBSJJ2011009)
作者简介：李　万(1986—)，男，博士研究生，主要从事武器系统总体技术、高维数据处理、水下爆炸等研究.
E-mail：liwan3525083@163.com

虑冲击振动的强度、主振频带能量和自振频率所在频带能量等因素，建立距离判别法模型，对水下目标的毁伤情况进行综合评判，并结合实验结果进行验证。

2 小波包分析与能量分析基础理论

2.1 小波包分析的基本理论

设 $\psi(t)\in L^2(R)$($L^2(R)$为能量有限的信号空间)是平方可积函数，若其傅立叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$(ω 为频率)满足允许条件[4-6]

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

则称 $\psi(t)$为一个基本小波或小波函数(即小波基)。将小波函数 $\psi(t)$通过伸缩和平移后，得到一个小波序列。对于连续的情况，小波序列为

$$\psi_{a,b}(t)=|a|^{-\frac{1}{2}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)\quad(a,b\in R,\ a\neq 0) \tag{2}$$

式中：a 为伸缩因子，b 为平移因子。

小波变换的实质是将一个任意信号 $f(t)$以小波函数为基底进行展开，即将信号 $f(t)$表示为小波函数的线性组合。将任意能量有限的信号 $f(t)\in L^2(R)$关于 $\psi(t)$的连续小波变换定义如下

$$w_f(a,b)=\langle f,\psi_{a,b}\rangle=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)\mathrm{d}t \tag{3}$$

式中：$\langle f,\psi_{a,b}\rangle$为 $f(t)$与 $\psi_{a,b}$的内积，$\psi^*[(t-b)/a]$为 $\psi[(t-b)/a]$的共轭函数。

小波分析中将信号分解成“粗糙”和“细节”两部分。“粗糙”部分为信号的低频部分，“细节”部分为信号的高频部分。“粗糙”部分可进一步分解成“粗糙”和“细节”两部分，这样的分解能无穷地进行下去。从小波分解的结构可以看出，小波变换的频率分辨率随频率升高而降低。小波包分解不仅可以对低频部分进行分解，也可以对高频部分实施分解。小波包分解方法能根据信号特征和分析要求自适应地选择相应频带与信号频谱相匹配，有严密的数学理论和数值计算方法支持，是一种比小波分解更为精细的分解方法[7-8]，因此，小波包分析获得更为广泛的应用。

设 $y_0(t)$表示实测信号，$y_r(t)$表示小波包分解后的完全重构信号，则它们之间的相对误差为

$$\eta=\frac{y_0(t)-y_r(t)}{y_0(t)} \tag{4}$$

由于小波基函数存在多种可能的选择，因此小波包分解的实际效果以及它与实测爆破振动的符合程度，可以根据(4)式进行判定。

2.2 频带能量表征

对信号进行小波包分析时，分解的层数视具体信号及采用的信号分析仪的工作频带而定，对于给定的信号，若进行 n 层小波包分解，则在该层分解中可以得到 2^n 个子频带，并可以由这些等宽的子频带完全重构原信号。若该信号的最低频率为零，最高频率为 ν，则每个子频带宽为 $\nu/2^n$。同样，可以通过考察子频带的细则情况来分析原始信号的不同频率成分的特点，如各频率成分的能量分布情况、主振频带(能量最大的频带)所在位置等。

将被分析信号分解到第 n 层，设与重构信号 $S_{n,j}$对应的能量为 $E_{n,j}$，则[6]

$$E_{n,j}=\int|S_{n,j}(t)|^2\mathrm{d}t=\sum_{k=1}^{m}|x_{j,k}|^2 \tag{5}$$

式中：$x_{j,k}$为重构信号$S_{n,j}$的离散点幅值；$j=0,1,2,\cdots,2^n-1$；$k=1,2,3,\cdots,m$；m为信号的离散采样点数。

设被分析信号的总能量为 E_0，则

$$E_0=\sum_{j=0}^{2^n-1}E_{n,j} \tag{6}$$

各频带的能量占被分析信号总能量的比例为

$$e_j = \frac{E_{n,j}}{E_0} \tag{7}$$

由(7)式可以得到信号经小波包分解后不同频带的能量比。

3 水下目标的冲击响应实验

实验在大型水下爆炸实验水池中进行,水池水面直径为 85 m,池底直径为 10 m,水深为 15 m,呈倒圆台型。将目标固定在水下 8 m 处,以考察小药量炸药在水下爆炸对某水下目标的毁伤效果。考虑到工程实际情况,以2 kg 球铸装 TNT 药包作为标准药包,水下目标与炸药放置在同一深度。由于本实验为小药量炸药爆炸,因此自由表面和水底的影响可忽略,近似认为炸药在无限、均匀、静止的水介质中爆炸,实验测试点的设置如图 1 所示。

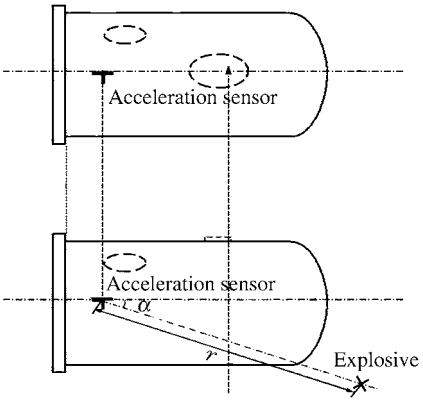


图 1 实验测点布置示意图

Fig. 1 Configuration of underwater explosion experiment

根据爆炸理论和实际经验,可认为影响目标的主要因素是 TNT 炸药的质量、水深、爆炸距离 r 和方向角 α 等。实验时在目标内部装置的元件底板上布设一个安装块,在相互垂直的轴向和周向各安装一个加速度传感器。在 TNT 炸药质量、水深不变的条件下,分别改变爆炸距离和方向角,共进行了 11 次实验,仅以第 3 工况下水下目标内部装置轴向冲击加速度信号(3-a 装置)为例进行分析,其它信号的分析与之类似。

4 水下爆炸冲击加速度信号小波包分解及各频带能量表征

4.1 冲击加速信号响应

实验时考虑到水下爆炸冲击波持续时间短暂,设置水下爆炸加速度信号分析仪的采样时间为 0.01 ms。图 2 为水下目标内部装置 3-a 的冲击加速度曲线,图 2 中,a 为加速度,g 为重力加速度。

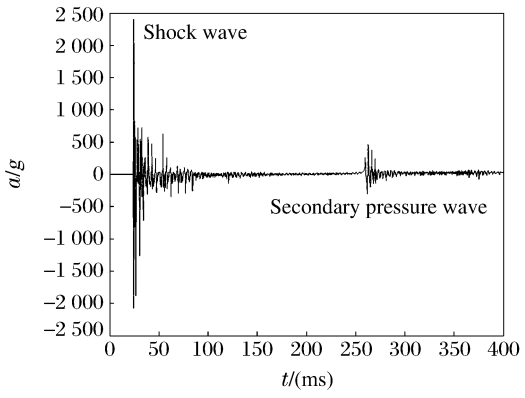


图 2 水下目标内部装置 3-a 的冲击加速度曲线

Fig. 2 Acceleration signal of the 3-a interior device

炸药在水下爆炸时,通常产生冲击波、气泡和压力波。炸药爆炸形成的爆轰波传到药包边界后,瞬态压力波立刻转化为水内的强压力和介质的运动,以冲击波的形式向外辐射。冲击波传播的同时伴随有气泡的脉动作用,并产生二次压力波,对水下目标造成破坏作用。冲击波引起的加速度幅值为 2 404g,二次压力波引起的加速度幅值为465.3g,但是冲击波作用时间较短、频率高,而二次压力波的作用时间较长、频率低。

根据 Cole 水下爆炸理论[9],气泡脉动周期 T(单位 s)、药量 W(单位 kg)、深度H(单位 m)之间满足

$$T = 2.11W^{1/3}/(H+10.3)^{5/6} \tag{8}$$

由(8)式计算得到的气泡脉动周期为 0.235 s,实验中测得的气泡脉动周期为 0.238 s。实验结果与 Cole 水下爆炸理论结果非常接近,说明实验是可靠的。

4.2 冲击信号小波包分解

4.2.1 小波基选择

选择最优小波基对信号进行分析十分重要，因为用不同的小波基分析同一信号会产生不同的结果[5]。Daubechies 小波系列具有较好的紧支撑性、光滑性及近似对称性[5,10]，已成功地应用于分析包括爆破地震在内的非平稳信号问题[11]。而目前在非平稳振动信号处理中用得最多的是小波基 db4 和 db8。

4.2.2 分解层数选择

利用 db4 和 db8 对信号进行小波包分解时，采样频率较高(100 kHz)，根据 Shannon 采样定理，信号的奈奎斯特(Nyquist)频率为 50 kHz。由于内部装置的自振频率范围为 200～300 Hz，故采用 db8 小波对信号进行层数为 9 的小波包分解，可获得 512 个频带的小波分解系数，对应的最低频带为 0～97.66 Hz，自振频率所在的频带大约在第 3 个频带。为验证小波包分解后的信号能否真实地反映原始信号，对分解后的信号进行完全重构，根据(4)式计算得到的完全重构信号与原信号的相对误差均小于 10^{-11}，完全满足工程计算和分析的要求。根据计算，选择小波 db4 比 db8 的相对误差要大，故本研究采用 db8。在用小波包分解方法对冲击信号进行分解的过程中，信号的能量损失可忽略不计，表明本研究所用的方法是可靠的。

4.3 冲击信号的时频分布和各频带的能量分布

根据(4)式～(6)式，使用 MATLAB 语言编制计算程序。图 3 为计算得到的 3-a 装置加速度信号的时频分布图。图 3 中，$\varepsilon=a^2$，为表征冲击加速度信号能量的信号强度参数。由图 3 可以看出：能量峰值对应的时刻与加速度响应曲线峰值时刻相同；冲击波能量分布处于较宽的频率范围，在 4～5 kHz 之间还有较强能量(图中频率只取到 6 kHz)，二次压力波的能量主要处于 100～400 Hz 的频率范围。图 4 为 3-a 装置加速度信号的能量在各频带的分布。由图 4 可以看出，能量分布处于较宽的频率范围，大部分能量分布在0～6 kHz 之间(图中频率只取到 6 kHz)。

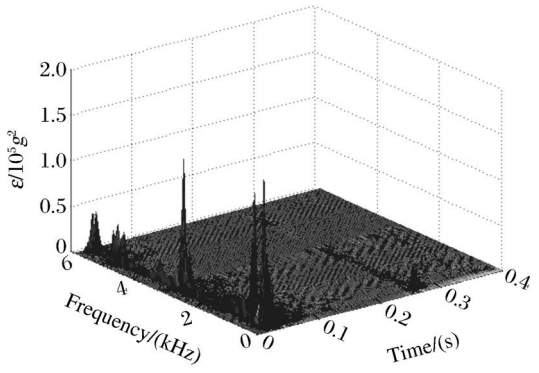


图 3 3-a 装置冲击加速度信号的时频分布

Fig. 3 Time-frequency distribution of acceleration signal for the 3-a interior device

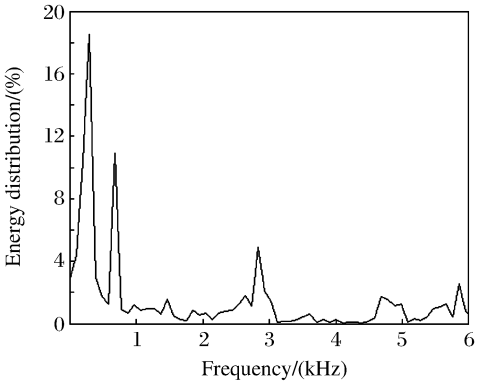


图 4 3-a 装置冲击加速度信号频带能量分布

Fig. 4 Energy distribution of acceleration signal for the 3-a interior device

通过计算得到，装置 1-a、1-b、2-a、2-b、3-a、3-b、6-a、6-b、7-a、7-b 的冲击信号强度分别为9 687.9g^2、2 452g^2、11 918g^2、952.2g^2、11 558g^2、1 619.6g^2、8 629g^2、3 309.1g^2、6 609.7g^2、1 558.6g^2(1-a 和 1-b 分别表示第 1 工况下水下目标内部装置轴向和周向的冲击加速度信号，其它信号表示方法类似)。根据计算结果可知，轴向总能量远远大于周向总能量。表 1 给出了各信号能量在各频带的分布。由表 1 可知，轴向能量较大的频带是频带 3～4、5～6 和 7～8，即 195.3～781.2 Hz；周向能量较大的频带是频带 1～2、3～4 和 7～8，即0～390.6 Hz 和 585.9～781.2 Hz。在水下爆炸的冲击效应中，主振频带能量对内部装置的影响较大，因此，在评定水下爆炸冲击波对目标的毁伤时，从各频带的能量分布进行研究是非常必要的。

表 1　不同工况下冲击信号各频带的能量分布

Table 1　Energy distributions of the signal in different frequency bands

Band No.	Frequency band /(Hz)	Energy distribution/(%)									
		1-a	1-b	2-a	2-b	3-a	3-b	6-a	6-b	7-a	7-b
1～2	0～195.3	5.45	1.87	2.59	7.14	7.14	14.33	0.43	7.04	2.65	19.79*
3～4	195.3～390.6	21.08*	37.26*	19.35*	27.87*	28.87*	20.01*	0.67	43.84*	1.46	13.03*
5～6	390.6～585.9	4.89	1.40	1.05	11.94	4.69	3.20	22.97*	7.02	36.15*	2.70
7～8	585.9～781.2	3.49	14.08*	5.48	27.49*	12.12*	9.97	16.44*	18.05*	9.83	10.35*
9～10	781.2～976.5	6.62	3.87	1.10	6.07	1.58	4.51	11.78	1.63	2.40	4.17
11～12	976.5～1171.8	4.90	13.12	3.12	1.27	2.08	3.81	12.40	3.08	4.84	4.80
13～14	1171.8～1367.1	1.55	2.24	2.34	2.21	1.92	10.08	1.66	6.83	3.72	12.20
15～16	1367.1～1562.5	3.16	4.59	6.45	5.07	2.14	8.39	3.28	3.71	3.23	5.28
17～18	1562.5～1757.8	3.74	0.15	1.57	0.26	0.73	0.71	0.78	0.77	4.65	1.22
19～20	1757.8～1953.1	3.94	1.44	6.24	0.28	1.09	4.05	2.34	0.20	0.72	0.24
21～512	1953.1～50000	41.19	20.07	50.66	10.34	37.63	20.94	27.19	7.77	30.30	26.17

Note:The data with * is larger

5　距离判别分析

根据小波包分析获得的各频带能量,利用距离判别分析方法,进一步探讨从频带能量的角度研究水下爆炸对目标毁伤效果的合理性。

距离判别分析方法建立在马氏距离的基础上[12]。设 m 维总体 $\boldsymbol{G}=(F_1,F_2,\cdots,F_m)^{\mathrm{T}}$,样本 $\boldsymbol{X}=(f_1,f_2,\cdots,f_m)^{\mathrm{T}}$。其中:$F_i$ 为第 i 个随机变量,f_i 为 F_i 的取值,$i=1,2,\cdots,m$。令 $\mu_i=E(F_i)$,($E(F_i)$为 F_i 的期望),则总体均值向量为 $\boldsymbol{\mu}=(\mu_1,\mu_2,\cdots,\mu_m)^{\mathrm{T}}$,总体 $\boldsymbol{G}$ 的协方差矩阵为

$$\boldsymbol{\Sigma}=\mathrm{Cov}(\boldsymbol{G})=E[(\boldsymbol{G}-\boldsymbol{\mu})(\boldsymbol{G}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}}] \tag{9}$$

样本 $\boldsymbol{X}$ 与总体 $\boldsymbol{G}$ 的马氏距离的平方定义为

$$[d(\boldsymbol{X},\boldsymbol{G})]^2=(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{\mu})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{\mu}) \tag{10}$$

根据(10)式,可以计算得到样品到每个总体的马氏距离,并将样品判归到马氏距离最小的总体。

5.1　判别指标的选择

水下目标内部装置的损坏可能在瞬间发生,与冲击波压力峰值大小关系紧密,冲击波加速度峰值与冲击波压力峰值密切相关,而冲击波加速度峰值能够直接反映冲击振动的强度,故选用加速度峰值作为判别指标之一。

表 2 给出了各信号的轴向加速度峰值 a_a、轴向主振频带强度 ε_{1a}、轴向自振频带强度 ε_{2a}。由表 2 可知,虽然工况5和工况9的加速度峰值比工况8的加速度峰值小,但工况5和工况9的目标受到了毁

表 2　轴向判别指标

Table 2　Axial discrimination indices

Exp. No.	a_a	ε_{1a}	ε_{2a}	Exp. No.	a_a	ε_{1a}	ε_{2a}
1	1989	1509.68	532.79	7	2287	1555.09	33.17
2	3693	1509.27	768.85	8	3359	1706.15	65.79
3	2404	2136.00	1201.31	9	3191	846.74	78.70
4	2347	1925.29	585.00	10	2054	534.00	88.25
5	2979	741.07	129.81	11	3589	546.18	227.75
6	2490	1300.98	42.53				

伤,而工况 8 的目标却未遭受毁伤,其原因是未考虑冲击振动持续时间的影响。由(4)式～(6)式可知,频带能量反映了该频带冲击振动持续时间。而主振频带能量对内部装置的影响较大,故选用表征主振频带能量的主振频带信号强度作为判别指标之一。

内部装置的自振频率范围为 200～300 Hz,根据动力学理论,当冲击信号的频率等于或接近目标内部装置的自振频率时,将产生共振,容易导致内部装置损坏。因此从频率角度出发,这一频带范围内的信号能量值得关注,故选用表征自振频带能量的自振频带信号强度作为判别指标之一。

在上述基础上建立的水下目标毁伤距离判别模型综合考虑了冲击振动的强度、持续时间、主振频带以及内部装置固有特性等因素,能准确和全面地描述冲击振动对水下目标的毁伤情况。

5.2 目标毁伤距离判别模型

经综合分析后,确定轴向加速度峰值 a_a、轴向主振频带强度 ε_{1a}、轴向自振频带强度 ε_{2a}、周向加速度峰值 a_b、周向主振频带强度 ε_{1b}、周向自振频带强度 ε_{2b}这 6 个指标作为距离判别模型的判别因子。为反映水下爆炸对目标的破坏程度,用“未毁伤”表示目标还可以正常工作;用“毁伤”表示目标不可以正常工作。取全部 11 组数据为学习样本,建立水下目标毁伤判别模型

$$W_1 = 5.4297 - 9.4852a'_a + 13.9665\varepsilon'_{1a} + 22.7041\varepsilon'_{2a} - 15.6148a'_b - 10.4501\varepsilon'_{1b} + 12.7876\varepsilon'_{2b} \tag{11}$$

式中:a'_a、ε'_{1a}、ε'_{2a}、a'_b、ε'_{1b}、ε'_{2b}分别为 a_a、ε_{1a}、ε_{2a}、a_b、ε_{1b}、ε_{2b}的标准化数据。采用回代估计法进行判别,将 11 次实验的指标值回代入模型W_1中进行判别,若$W_1>0$,则归入未毁伤类(Ⅰ);若$W_1<0$,则归入毁伤类(Ⅱ)。

为了加强对此方法有效性的检验,取后 8 个样本为学习样本,建立水下目标毁伤判别模型

$$W_2 = 7.6458 - 7.7867a'_a - 25.4032\varepsilon'_{1a} + 35.7382\varepsilon'_{2a} - 41.7230a'_b - 17.7412\varepsilon'_{1b} + 37.8174\varepsilon'_{2b} \tag{12}$$

再将11次实验的指标值回代入模型W_2中。若$W_2>0$,则归入未毁伤类(Ⅰ);若$W_2<0$,则归入毁伤类(Ⅱ)。

表 3 给出了采用 W_1 和 W_2 模型对 11 次信号的判别结果以及相应的实验结果。结果显示,2 个判别模型的判别结果均与实验吻合,说明从频带能量的角度研究水下爆炸对目标的毁伤效果是合理的。

表 3 判别结果和实验结果

Table 3 Discrimination and experemental results

Exp. No.	r /(m)	α /(°)	W_1	Discrimination result by W_1	W_2	Discrimination result by W_2	Experimental result
1	3.5	45	28.3964	Ⅰ	42.0952	Ⅰ	Ⅰ
2	2.5	45	−19.3077	Ⅱ	−19.4095	Ⅱ	Ⅱ
3	3.0	45	14.9862	Ⅰ	6.4776	Ⅰ	Ⅰ
4	2.8	45	23.9579	Ⅰ	29.3691	Ⅰ	Ⅰ
5	2.5	0	−26.4677	Ⅱ	−38.2050	Ⅱ	Ⅱ
6	2.5	135	18.2663	Ⅰ	30.5085	Ⅰ	Ⅰ
7	2.5	90	28.5327	Ⅰ	32.9617	Ⅰ	Ⅰ
8	2.2	135	12.6877	Ⅰ	21.0392	Ⅰ	Ⅰ
9	2.0	135	−16.2245	Ⅱ	−16.7886	Ⅱ	Ⅱ
10	2.0	135	12.5356	Ⅰ	23.4751	Ⅰ	Ⅰ
11	2.0	90	−17.6361	Ⅱ	−27.4186	Ⅱ	Ⅱ

6 结　论

(1) 通过对水下目标内部装置的冲击加速度信号进行 db8 小波包分析可知,冲击信号能量分布处于较宽的频率范围,二次压力波的主要频率分布在 100～400 Hz 频率段,由于内部装置的自振频率范围为 200～300 Hz,故二次压力波的作用效果不能忽视;轴向总能量远远大于周向总能量,轴向能量较大的频带为 195.3～781.2 Hz,周向能量较大的频带为 0～390.6 Hz 和 585.9～781.2 Hz。

(2) 在考虑冲击振动强度、持续时间以及内部装置固有特性的基础上,选用冲击信号加速度峰值、主振频带能量和自振频带能量作为判别因子,通过学习样本进行训练以及回代估计检验,建立了水下目标毁伤判别模型,判别结果与实验结果相符,证明将频带能量作为水下爆炸毁伤水下目标的特征指标是合理的。

References:

[1] Ergin A. The response behavior of a submerged cylindrical shell using the doubly asymptotic approximation method (DAA) [J]. Comput Struct, 1997, 62(6): 1025-1034.

[2] Jia X Z, Hu Y T, Dong M R, et al. Numerical study on influencing factors of dynamic response of cylindrical shell subjected to deep water blast wave [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(2): 208-214. (in Chinese)
贾宪振,胡毅亭,董明荣,等. 深水爆炸冲击波作用下圆柱壳动态响应影响因素的数值模拟研究 [J]. 高压物理学报,2008,22(2):208-214.

[3] Lin X B, Zhang Y P, Liu Z X, et al. Wavelet analysis and hilbert-huang transform of blasting bibration signal [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 528-535. (in Chinese)
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.

[4] Mallat S G. A theory for multi-dimension signal decomposition: The wavelet models [J]. IEEE Trans Pattern Analysis Machine Intell, 1989, 11: 674-693.

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

[6] Hu C H, Zhang J B, Xia J, et al. System Analysis and Processing Based on MATLAB－Wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1999: 210-232. (in Chinese)
胡昌华,张军波,夏　军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与统计——小波分析 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999:210-232.

[7] Ma G W, Hao H, Zhou Y X. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions [J]. Eng Struct, 2000, 22(10): 1378-1389.

[8] Charles K C. An Introduction to Wavelets [M]. New York: Academic Press, 1992: 297-333.

[9] Cole R H. Underwater Explosions [M]. New Jersy: Princeton University Press, 1948: 10-50.

[10] Daubechies I. Orthonormal bases of compactly supported wavelet [J]. Commun Pur Appl Math, 1988, 41(7): 909-996.

[11] Lin D C, Shi H J, Bai C H, et al. Time-frequency analysis of explosion seismic effects [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 31-35. (in Chinese)
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):31-35.

[12] Gao H X. Applied Multivariate Statistical Analysis [M]. Beijing: Peking University Press, 2005: 1-100. (in Chinese)
高惠璇. 应用多元统计分析 [M]. 北京:北京大学出版社,2005:1-100.

Features of Energy Distribution of Underwater Target by Underwater Explosion

LI Wan[1], ZHANG Zhi-Hua[1], CHEN Cang-Hai[2], LIU Tian-Hua[1]

(1. *Weapon Engineering Department, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *China*;
2. *College of Naval Architecture and Power, Naval University of Engineering, Wuhan* 430033, *China*)

Abstract: Based on the experimental data of an underwater target bombed by underwater explosion, the energy was studied by means of monitoring interior acceleration signals and wavelet packet analysis with high resolvability and localization. By using the monitored signals, the time-frequency distributions and the energy distributions in blasting frequency bands were obtained. Considering the close relation between energy distribution for different frequency bands and the damaged target effect, the peak acceleration, the energy on dominant frequency bands and natural frequency bands of interior device were taken into account as discrimination factors. A discrimination model was proposed and the resubstitution method was used to verify the stability of model. The results show that the predicted results are consistent with actual values, and prove that the choice of bands energy as an damage index is reasonable.

Key words: underwater explosion; wavelet packet; shock wave; distance discrimination analysis