DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0261-06

冲击波超压测试系统二次仪表频域特性*

杜红棉[1,2],何志文[1],马铁华[1,2]

(1. 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室,山西 太原 030051;
2. 中北大学电子测试技术国家重点实验室,山西 太原 030051)

摘要: 从二次仪表对冲击波的峰值、持续时间和比冲量 3 个主要参数的影响出发,首先构建了冲击波信号用以分析冲击波信号特性;搭建了适配器等效电路,对适配器的低频特性进行了实验研究;在 MATLAB 平台上构建了 5 种常用滤波器模型,模拟了不同类型滤波器和不同截止频率下测试系统的输出。模拟和实验结果表明:适配器的低频特性影响冲击波信号的持续时间和比冲量;在 5 种滤波器中贝塞尔滤波器最适合冲击波测试系统;滤波器截止频率对冲击波超压峰值影响明显;小型试验对测试系统的带宽要求高。

关键词: 爆炸力学;频域特性;滤波器;二次仪表;冲击波

中图分类号: O347.5;TN911.6 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

爆炸冲击波具有峰值高、衰减快、持续时间短等不同于其他动力载荷的特点。准确测量爆炸冲击波超压峰值、正压作用时间和比冲量可以为武器研制过程中的爆炸类型判别、威力对比、性能评价提供依据[1]。冲击波测试系统频域特性是准确测量冲击波各个参数的关键,测试系统的有效带宽合适与否很大程度上影响冲击波各参数评估的准确性。

冲击波超压测试系统一般采用的是压力传感器、二次仪表与瞬态波形记录仪(或计算机高速数采系统)组成的测试系统[2-3]。影响系统频域特性的主要有压力传感器自身特性和二次仪表特性。而传感器的频域特性已经被广泛研究[4-5],且只要传感器物理特性确定,传感器的频域特性就基本固定。对于冲击波测试系统的二次仪表频域特性的研究很少,测试系统中的信号二次仪表包括适配器和抗混叠滤波器,本文中,主要研究适配器低频特性和滤波器的高频特性对冲击波超压峰值和持续时间的影响。

1 冲击波信号的分析

1.1 冲击波信号

爆炸产生的高温、高压、高速产物对周围介质做功,因此在爆炸中心周围的介质中产生冲击波。理想的冲击波如图 1 所示:上升沿陡峭;超压峰值高;正压作用时间 τ_+ 短;负压低,负压作用时间长;压力衰减过程呈指数衰减。冲击波的各参数可以按下列方法计算。

(1)可根据金尼-格雷姆公式,计算冲击波超压的峰值 $\Delta p_{\max}$[6]:

$$\frac{\Delta p_{\max}}{p_{\mathrm{air}}}=\frac{808\left[1+\left(\frac{f_{\mathrm{d}}\bar{R}}{4.5}\right)^2\right]}{\sqrt{1+\left(\frac{f_{\mathrm{d}}\bar{R}}{0.048}\right)^2}\sqrt{1+\left(\frac{f_{\mathrm{d}}\bar{R}}{0.032}\right)^2}\sqrt{1+\left(\frac{f_{\mathrm{d}}\bar{R}}{1.35}\right)^2}} \qquad 0.053\leqslant\bar{R}\leqslant 500 \tag{1}$$

$$f_{\mathrm{d}}=\sqrt[3]{\frac{p_{\mathrm{air}}}{p_0}\frac{T_0}{T_{\mathrm{air}}}}$$

* **收稿日期**: 2013-07-20; **修回日期**: 2014-03-06
基金项目: 山西省青年科技研究基金项目(2013021015);
仪器科学与动态测试教育部重点实验室基金项目(9140c20409)
第一作者: 杜红棉(1977—),女,博士,副教授; **通讯作者**: 何志文,hezhiwen6@163.com。

式中：p_{air}为实验现场大气压，98.066 5 kPa；p_0为标准大气压，p_0=101.325 kPa；$\bar{R}$为比例距离，m/kg$^{1/3}$；T_0为标准大气温度，T_0=288.16 K；T_{air}为大气温度。

(2)正压区作用时间为：

$$\tau_+ = 1.5\times10^{-3}\sqrt{r}\sqrt[6]{w} \tag{2}$$

式中：r为爆距，m；wTNT 装药量，kg。

(3)比冲量即正压区压力函数对时间的积分值。

(4)压力衰减部分表示为[7]：

$$\Delta p(t) = \Delta p_{max}\left(1-\frac{t}{\tau_+}\right)\mathrm{e}^{-bt/\tau_+} \tag{3}$$

$$b=\begin{cases}\dfrac{1}{2}+\Delta p_{max}\left[1.1-(0.13+0.20\Delta p_{max})\dfrac{t}{\tau_+}\right] & 1<\Delta p_{max}<3\\ \dfrac{1}{2}+\Delta p_{max} & \Delta p_{max}\leqslant 1\end{cases}$$

式中：Δp_{max}的单位是 101.325 kPa。

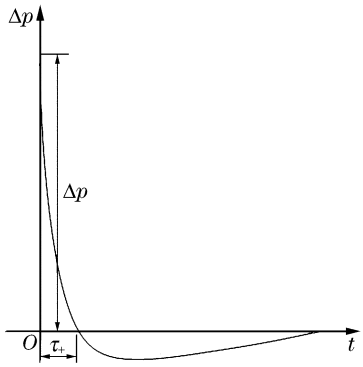


图 1 理想冲击波

Fig. 1 Ideal shock wave

1.2 冲击波信号的构建与分析

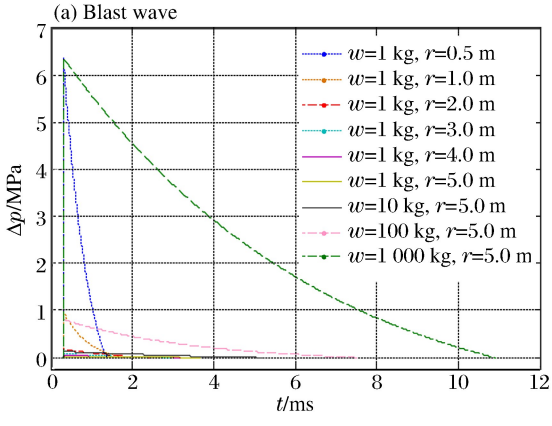
冲击波曲线分两个部分：(1)上升沿部分，上升时间为 2 ns，超压峰值可由式(1)计算；(2)衰减部分，由式(3)计算。

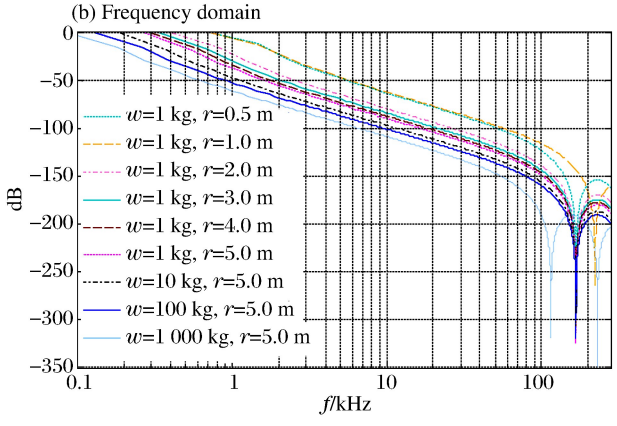
根据上述方法，分别构建 1 kg 装药距爆心 0.5、1、2、3、4、5 m 处和 10、100、1 000 kg 装药 5 m 处共 9 条空中冲击波信号曲线，表 1 为各曲线的超压峰值和正压作用时间，图 2 为冲击波超压和频域，图 3 为比例距离相近的 3 条爆炸实测地面反射冲击波和频域。

表 1 冲击波信号参数表

Table 1 Parameter list of blast wave

w/kg	r/m	Δp_{max}/MPa	t_+/ms
1	0.5	4.007	3.0
1	1	1.030	4.3
1	2	0.215	6.0
1	3	0.085	7.4
1	4	0.046	8.5
1	5	0.029	9.5
10	5	0.152	4.4
100	5	0.880	6.5
1 000	5	4.007	9.5





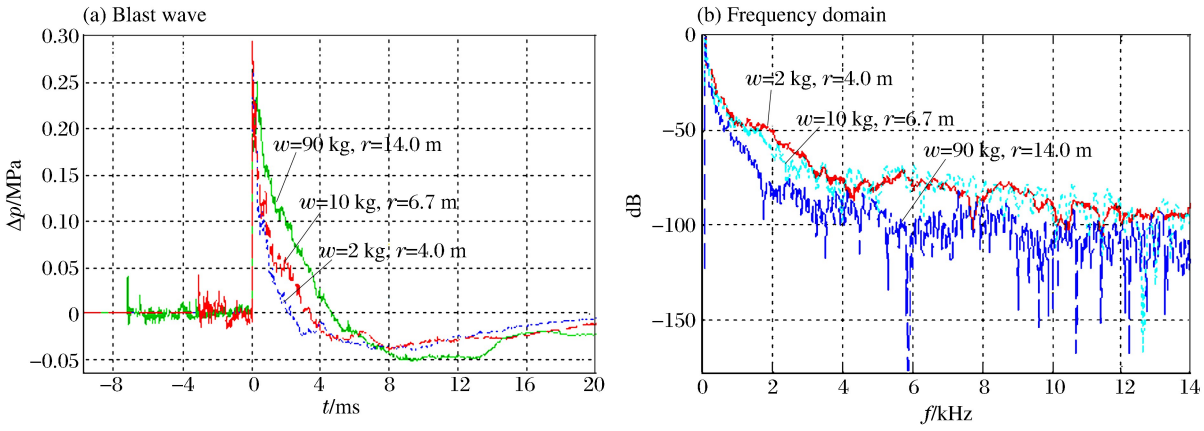


图 3　实测冲击波超压信号

Fig. 3　Measured blast wave

无论是构建的冲击波还是实测冲击波信号，频带差异较大，在频谱图上相同分贝下装药和爆距的增加会使冲击波信号的有效带宽变窄。因此测试系统带宽的设计应考虑：

(1)大型实验利用频响较低的传感器及测试系统，可获得相对较高的精度。

(2)小型实验测试系统的带宽要求较高，对于 1 kg TNT 爆炸源，超过 0.5 m 的距离以后，测试系统的带宽 100 kHz 可满足 120 dB 的信号不失真。

(3)同一次实验中，要想获得相同的测试精度，近距离测试系统的带宽要高于远距离的测试系统。

2　适配器特性

适配器类型由传感器类型所确定，目前常用的冲击波传感器为压阻式、压电式、ICP 型传感器，因此相应的适配器为电压放大器、电荷放大器和 ICP 调理器。电压放大器的频带可以覆盖零频；为防止静电荷和稳态失衡引起的信号漂移和偏移，电荷放大器输出端往往加隔直电容[8]，使其在放电常数较小的情况下低频特性更差；ICP 传感器适配器中加入隔直电容，可以隔掉信号中 10 V 左右的直流分量和稳态噪声。

为了研究适配器低频特性对冲击波信号的影响，构建了由电阻 R 和电容 C 组成的一阶无源高通滤波电路。由 Agilent 信号发生器 33220A 输出仿爆炸冲击波的脉冲信号，通过示波器记录高通滤波器电路的输出。高通滤波器的截止频率为：

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{4}$$

等效高通滤波器电路的输入输出如图 4 所示。由图 4 可知，高通滤波器对冲击波峰值影响很小，对正压作用时间和比冲量影响很大。表 2 给出了不同截止频率高通滤波器对冲击波信号正压作用时间的影响，其中 $R=1$ MΩ，$C=1, 0.1, 0.01$ μF。

表 2　不同截止频率的高通滤波器的输出

Table 2　High-pass filter output characteristic of shock wave with different cutoff frequency

$\tau_{+,\mathrm{in}}$/ms	$f_c=0.159$ Hz		$f_c=1.59$ Hz		$f_c=15.9$ Hz	
	$\tau_{+,\mathrm{out}}$/ms	ε/%	$\tau_{+,\mathrm{out}}$/ms	ε/%	$\tau_{+,\mathrm{out}}$/ms	ε/%
0.1	0.10	0	0.10	0	0.097	3
1.0	1.00	0	1.00	0	0.81	19
10.0	10.00	0	8.31	16.9	4.72	52.8

由表 2 可知：

(1)高通滤波器截止频率相同时，随着正压作用时间变长，截止频率对其影响变大。

(2)冲击波信号正压作用时间相同时，截止频率越高，对正压时间影响越明显。

3 种传感器的适配器选择：压阻式传感器适配器的低频可以覆盖零频，所以其截止频率选择上没有限制。对于压电和 ICP 传感器的适配器，在高精度测试中，为了激活传感器的所有频率特性，其截止频率应小于或等于传感器能响应的最低频率。

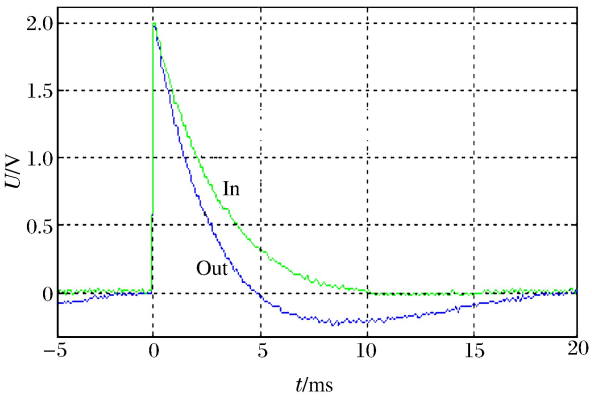


图 4 高通滤波器的输入输出对比

Fig. 4 Input and output contrast of the high-pass filter

3 抗混叠滤波器特性

以巴特沃兹、切比雪夫Ⅰ、切比雪夫Ⅱ、椭圆形、贝塞尔 5 种典型的模拟滤波器为模型研究测试系统的抗混叠滤波函数特性。在 Matlab 平台下建立了以上 5 种滤波器模型，以 1.2 节所述方法构建冲击波信号作为滤波器的输入，模拟各滤波器的输出。图 5 为 5 阶巴特沃兹、切比雪夫Ⅰ、切比雪夫Ⅱ、椭圆形、贝塞尔滤波器输出曲线的对比图。

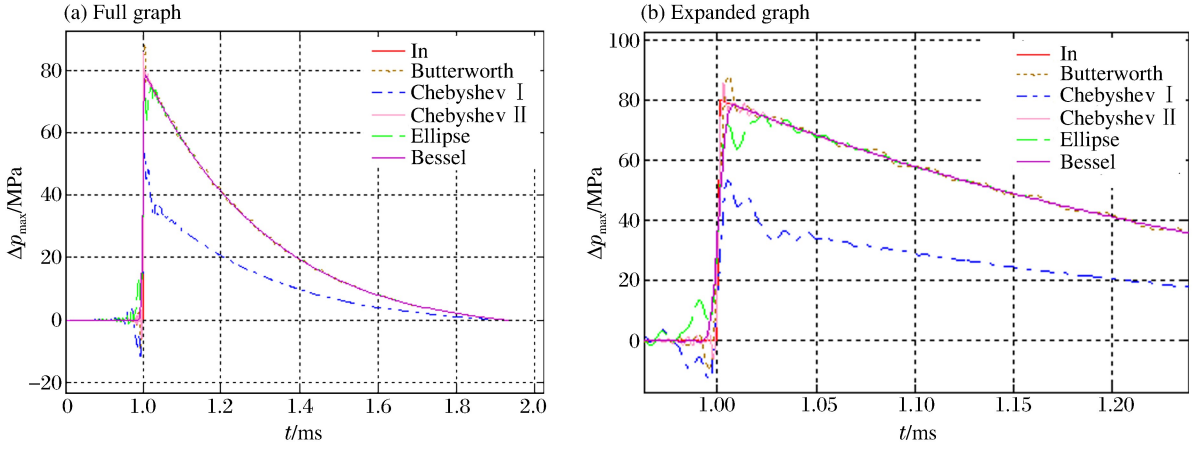


图 5 不同滤波器对冲击波信号的滤波结果

Fig. 5 The shock wave filtering results with different filters

从图 5 可知，5 种滤波器对冲击波信号正压作用时间几乎没有影响，主要影响冲击波信号的峰值和比冲量。表 3 列出了截止频率为 150 kHz 时各低通滤波器输入和输出的误差，表 4 为贝塞尔滤波器在不同截止频率下的输入和输出的误差。

表 3 低通滤波器滤波前后误差

Table 3 The peak error statistics of shock wave through the five kinds of low-pass filter

方法	Δp_{max}/MPa	ε/%
输入	80.600 0	0
巴特沃兹	88.539 4	9.8
切比雪夫Ⅰ	53.473 1	−33.6
切比雪夫Ⅱ	86.068 7	6.8
椭圆形	75.258 6	−6.6
贝塞尔	78.711 7	−2.3

表 4 冲击波超压峰值在不同截止频率下的误差

Table 4 The peak error statistics of shock wave through the Bessel filter

w/kg	r/m	$\Delta p_{max,in}$ /MPa	$f_c=50$ kHz		$f_c=100$ kHz		$f_c=130$ kHz		$f_c=156$ kHz	
			$\Delta p_{max,out}$ /MPa	ε/%	$\Delta p_{max,out}$ /MPa	ε/%	$\Delta p_{max,out}$ /MPa	ε/%	$\Delta p_{max,out}$ /MPa	ε/%
1	0.3	80.60	76.28	5.3	78.47	2.6	78.94	2.1	79.25	1.7
1	1	0.800 0	0.776 0	3.0	0.788 9	1.4	0.792 0	1.1	0.793 0	0.8
1 000	10	0.800 0	0.799 0	1.3	0.800 3	0.4	0.800 1	0.1	0.800 1	0.1
1 000	100	0.001	0.001	0	0.001	0	0.001	0	0.001	0

巴特沃兹、切比雪夫Ⅰ、切比雪夫Ⅱ、椭圆形都是以幅频响应为出发点，幅频特性较好，但波形易失真。贝塞尔滤波器通带内相频特性线性度最高，群时延函数最接近于常量，从而使相频特性引起的相位失真最小，信号无畸变传输，且具有线性相位和较平坦的幅度特性，所以波形保存很好。

4 结　论

分析了冲击波信号频率特性，搭建了与适配器低频特性等效的电路，对该电路进行了实验研究，构建了 5 种常用滤波器模型，模拟了不同类型滤波器和不同截止频率下测试系统的输出。结果表明：(1)适配器的低频特性影响冲击波信号的持续时间和比冲量；(2)在 5 种滤波器中贝塞尔滤波器最适合冲击波测试系统；(3)滤波器截止频率对冲击波超压峰值影响明显；(4)小型试验对测试系统的带宽要求高。这可为冲击波测试系统的设计提供依据，提高测试系统准确度。

参考文献：

[1] 赖富文，王文廉，张志杰. 大当量战斗部爆炸冲击波测试系统设计及应用[J]. 弹箭与制导学报，2009，29(3)：133-136.
Lai Fu-wen, Wang Wen-lian, Zhang Zhi-jie. Design and application of test system for blast wave[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009,29(3):133-136.

[2] 马铁华，祖静. 冲击波超压存储测试技术研究[J]. 仪器仪表报，2004，25(4)：134-136.
Ma Tie-hua, Zu Jing. Memorized testing and measurement technology for shock wave overpressure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrunment, 2004,25(4):134-135.

[3] 丁永红，尤文斌，马铁华. 舰用动爆冲击波记录系统的设计与应用[J]. 爆炸与冲击，2013，33(2)：194-199.
Ding Yong-hong, You Wen-bin, Ma Tie-hua. Design and application of a shock wave recorder used in warship subjected to dynamic explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(2):194-199.

[4] 杜红棉，祖静. 常用冲击波传感器动态特性研究[J]. 弹箭与制导学报，2012，32(2)：214-216.
Du Hong-mian, Zu Jing. The research on dynamic characters of transducers for blast wave measurement[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012,32(2):214-216.

[5] 崔村燕，洪延姬，李修乾，等. PVDF 压力传感器标定及在激光推进实验中的应用[J]. 爆炸与冲击，2012，31(1)：31-35.
Cui Cun-yan, Hong Yan-ji, Li Xiu-qian, et al. Calibration of a PVDF sensor and its application to laser propulsion experiments[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(1):31-35.

[6] GJB 6390.3-2008 面杀伤导弹战斗部静爆威力试验方法，第 3 部分：冲击波超压测试[S]. 总装备部军标出版发行部，2008.

[7] 北京工业学院八系. 爆炸与其作用[M]. 北京：工业出版社，1979.

[8] PCB Piezotronics, Inc. Model 113B03 charge output pressure sensor installation and operating manual[Z/OL]. 2008-08-07. http://www.pcb.com/contentstore/docs/ PCB_Corporate /Pressure/ Products/Manuals/113B03.pdf.

Frequency domain characteristic of secondary instrument in the shock overpressure measurement system

Du Hong-mian[1,2], He Zhi-wen[1], Ma Tie-hua[1,2]

(1. *Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of the Ministry Education, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;
2. *National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*)

Abstract: The frequency domain characteristics of measurement system are determined by transducer and secondary instrument, and the former one has been widely studied. It is shown that peak value, positive phase duration and impulse are affected by secondary instrument. The ideal shock wave signal was constructed for its frequency characteristic analysis. The low frequency characteristic of adapter was also experimentally investigated. Five different filters were modeled, and their output under different cutoff frequencies was simulated with the ideal shock wave as input signal. The simulation and experimental results are summarized as follows: The low frequency characteristic of adapter has the influence to positive phase duration and impulse; Bessel filter is the best one for shock wave measurement system of the five filters; The peak value of shock wave is obviously affected by the filters cutoff frequency; And the shock wave signal with short positive phase duration needs higher system bandwidth.

Key words: mechanics of explosion; frequency characteristics; filter; secondary instrument; shock wave

（责任编辑 丁 峰）

本刊关于稿件、版权等的声明

在投稿、稿件处理、发表等过程中，作者需注意如下问题：

1. 稿件是作者独立取得的原创性研究成果，无抄袭，无一稿多投，未在国内外公开发表过。

2. 稿件无政治错误，不涉及保密和拟申请专利的内容，已经过作者单位保密审查。

3. 作者署名和排序无异议，单位署名和排序无争议，且无知识产权纠纷。在稿件处理过程中，如有作者或单位署名变更，需有全体作者亲笔签名和全部单位盖章同意的书面声明。

4. 稿件由编辑部组织审稿。自收稿之日时，编辑部将在 4 个月内反馈处理结果。若超过 4 个月未答复的，作者有权另行处理稿件，但需事先通知编辑部。

5. 对录用的稿件，在尊重稿件内容的基础上，编辑部有权作必要的修改和删减，按规定进行标准化和规范化。

6. 稿件录用后，稿件的所有出版权归编辑部。

7. 稿件发表后，编辑部赠送样刊，并一次性付给作者稿酬及版权转让费。

爆炸与冲击

2015 年 3 月 25 日