

DOI: 10.11883/bzycj-2019-0233

冲击波测试系统低频特性与补偿方法研究*

徐浩, 杜红棉, 范锦彪, 祖静, 王凌宇

(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)

摘要: 为提高冲击波超压峰值的测量精度, 多数学者把重点集中在系统高频特性研究上, 以拓宽带宽的方式提高峰值测试的准确性。冲击波另外两个主要参数正压作用时间、比冲量却和测试系统的低频特性息息相关。针对实爆中出现的不同传感器正压作用时间差异较大的问题, 对冲击波信号进行了边际谱分析, 获得了信号的低频特性。建立了一阶参数模型来表征低频特性, 通过激波管试验数据获取了 7 种系统的低频模型参数。采用零极点配置法设计了低频补偿模型。结果表明: 冲击波测试系统低频特性严重影响冲击波信号正压作用时间测试准确性, 基于低频特性补偿的数据处理方法可以有效的提高冲击波信号正压作用时间、比冲量地测试精度。

关键词: 冲击波测试系统; 低频特性; 正压作用时间; 激波管实验

中图分类号: O384 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

爆炸冲击波作为武器威力以及目标毁伤评估的重要考核指标, 一直受到国内外研究者的广泛重视。冲击波超压峰值、正压作用时间、比冲量是评估的 3 个重要参数。多数学者研究了冲击波测试系统高频特性, 通过补偿高频段来拓宽带宽的方式提高冲击波超压峰值的测量精度^[1-8]。而测试系统的低频特性与正压作用时间、比冲量息息相关, 常用的爆炸冲击波毁伤准则中超压-冲量准则因考虑全面和评价准确而被广泛认可^[9-10]。因而, 测试系统的低频特性对毁伤评估有着重要的现实意义。

本文中针对静爆试验冲击波测试中实测信号的差异性, 分析了实测冲击波信号的 Hilbert 边际谱特性, 建立了测试系统低频特性的数学模型和补偿模型, 可以有效地提高冲击波信号正压作用时间、比冲量的测试精度。

1 信号谱分析

1.1 现象描述

在某战斗部静爆试验中, 相同记录仪不同传感器, 获取同一爆距下数据, 峰值压力相差较小, 但正压作用时间差异明显, 如图 1 所示, 图 1 信号为表 1 中第一次试验 10 m 处所测信号。图中传感器分别为国产 ICP 型 Y1001E-3 和美国 PCB 公司的 ICP 型 113B26 系列传感器。此现象多次出现。表 1 详细对比了两种传感器在两次试验中在爆距 R 为 10 m 和 12 m 处测得的冲击波信号的超压峰值 Δp 、正压作用时间 t_+ 、比冲量 i 的差异。

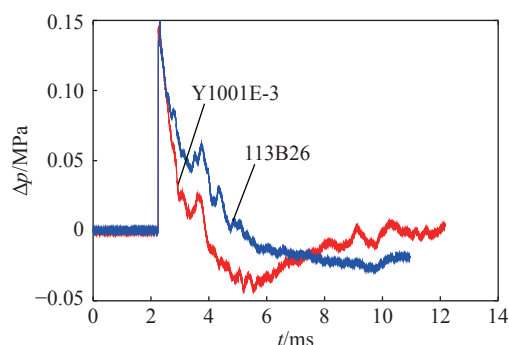


图 1 两种传感器实测冲击波压力信号
Fig. 1 Pressure signals of shock wave measured by two sensors

* 收稿日期: 2019-06-10; 修回日期: 2019-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61701445)

第一作者: 徐浩(1993—), 男, 硕士研究生, 1210422071@qq.com;

通信作者: 杜红棉(1977—), 女, 博士, 副教授, duhongmian@nuc.edu.cn。

表 1 实测冲击波信号参数对比表

Table 1 Parameter comparison of measured shock wave signals

| 试验次数 | 爆距 R/m | $\Delta p/MPa$ | | | t_r/ms | | | $i/(MPa \cdot ms)$ | | |
|------|----------|----------------|--------|--------------------|----------|--------|--------------------|--------------------|--------|--------------------|
| | | Y1001E-3 | 113B26 | $\varepsilon_p/\%$ | Y1001E-3 | 113B26 | $\varepsilon_r/\%$ | Y1001E-3 | 113B26 | $\varepsilon_i/\%$ |
| 第一次 | 10 | 0.147 | 0.150 | 2.0 | 1.637 | 2.924 | 44.0 | 0.077 | 0.144 | 46.5 |
| | 12 | 0.099 | 0.097 | 2.1 | 1.755 | 3.273 | 46.4 | 0.049 | 0.109 | 55.0 |
| 第二次 | 10 | 0.149 | 0.145 | 2.7 | 1.603 | 2.935 | 45.4 | 0.082 | 0.150 | 45.3 |
| | 12 | 0.101 | 0.103 | 1.9 | 1.739 | 3.214 | 45.9 | 0.051 | 0.105 | 51.4 |

4 组数据中超压峰值的差异性较小,最大相差 2.7%,这与同款传感器相同爆距时差异一致。正压作用时间的差异较为明显,每组数据相差均在约 45%。正压作用时间较大的差异性必然导致比冲量的差异性也较大,每组数据相差均在 45% 以上。

1.2 冲击波信号 Hilbert 边际谱分析

爆炸冲击波具有上升沿陡峭、衰减快、持续时间短的特点,是典型的非平稳信号,而 HHT(Hilbert-Huang transform)是一种针对瞬态非平稳信号进行平稳化处理的方法,主要包括 EMD(empirical mode decomposition)和 Hilbert 变换两部分^[11-12]。为了直观地反映信号的频率成分和能量变化,提出对冲击波信号做 Hilbert 边际谱分析的方法。对实测冲击波信号进行 EMD 分解,将得到的 IMF 分量通过相关系数法筛选掉高频噪声的干扰,剩余的各阶 IMF 分量进行 Hilbert 变换得到的 Hilbert 谱对时间积分后即 Hilbert 边际谱。图 2 为图 1 中的 Y1001E-3 和 113B26 所测冲击波信号对应的边际谱图。

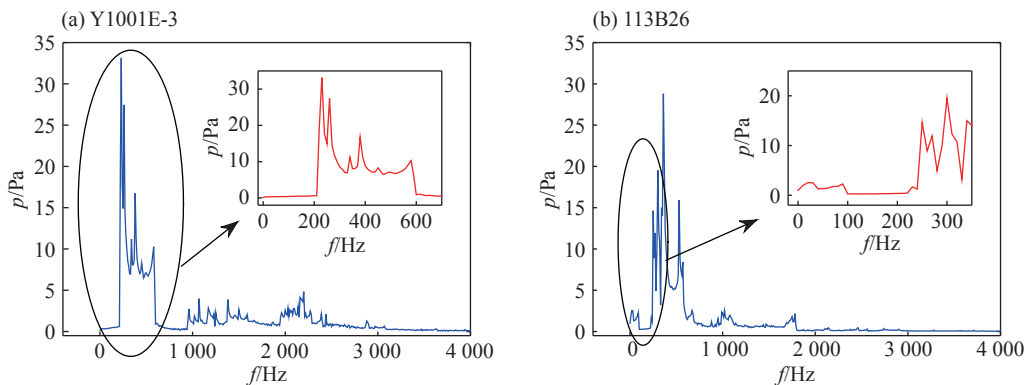


图 2 实测信号边际谱图

Fig. 2 Marginal spectra of measured signals

从图 2 中可以看出, Y1001E-3 与 113B26 的低频段信号相比, Y1001E-3 在 100 Hz 以下的低频信号幅值能量很低,说明了该频率段下的信号能量衰减严重。

2 测试系统低频特性研究

2.1 测试系统低频特性数学模型

冲击波测试系统是一个由压力传感器和适配器、采集系统组成的多阶复杂系统。常用的 ICP 型、高阻抗压电式传感器受其工作原理的限制,其低频特性要高于某一频率,无法覆盖零频^[1]。测试系统的低频特性取决于传感器与适配器和采集系统耦合后等效的一阶 RC 高通滤波器的下限频率。不考虑测试系统的高频特性,只针对低频特性建立一阶数学模型,采用理想微分法求一阶高通滤波器的参数模型,其传递函数为:

$$H(s) \approx \hat{H}(s) = T_C s / (T_C s + 1) \quad (1)$$

式中: 系数 T_c 为总耦合放电时间常数, s 为 Laplace 变量, 在辨识模型 $\hat{H}(s)$ 中 T_c 为需要辨识的未知参数。

对于一阶高通系统, 其放电时间常数可以通过阶跃响应法来求取。系统输入一个理想阶跃信号后, 其电容上所产生的电荷将会通过电阻耗散尽, 其衰减规律遵循 RC 网络的基本放电指数模型:

$$q = Qe^{-t/T_c} \tag{2}$$

式中: q 为瞬时值, Q 为初始值, T_c 为总耦合放电时间常数, 即瞬时值衰减到初始值的 37% 所对应的时间。

冲击波测试所用的 ICP 型及压电式传感器其压电晶体所产生的均为电荷信号, 在理想阶跃信号输入下, 其响应输出均适用该指数模型的衰减规律。

2.2 模型辨识实验

激波管作为理想的激励信号源, 是冲击波测试系统公认的动态标定装置, 用于产生理想阶跃信号。以激波管的理想阶跃信号作为测试系统输入信号, 通过对系统输出信号的激波平台衰减规律进行指数模型拟合来辨识系统耦合放电时间常数。

本次实验一共选用 8 组冲击波测试系统作为测试对象, 具体组成如表 2 所示。

表 2 实验状态表

Table 2 Experimental conditions

| 系统编号 | 传感器类型 | 适配器 | 采集系统 |
|------|-------------------------|---|-----------------|
| 1 | ENDEVCO 8530B 系列压阻传感器 | ENDEVCO136 型直流放大器 | Agilent 瞬态波形记录仪 |
| 2 | PCB 113B03 系列压电传感器 | Kistler 5011 型电荷放大器放电时间常数 $T=long$ | Agilent 瞬态波形记录仪 |
| 3 | PCB 113B03 系列压电传感器 | Kistler 5011 型电荷放大器放电时间常数 $T=10\text{ s}$ | Agilent 瞬态波形记录仪 |
| 4 | PCB 113B03 系列压电传感器 | Kistler 5011 型电荷放大器放电时间常数 $T=1\text{ s}$ | Agilent 瞬态波形记录仪 |
| 5 | PCB 113B03 系列压电传感器 | Kistler 5011 型电荷放大器放电时间常数 $T=0.1\text{ s}$ | Agilent 瞬态波形记录仪 |
| 6 | PCB 113B03 系列压电传感器 | Kistler 5011 型电荷放大器放电时间常数 $T=0.01\text{ s}$ | Agilent 瞬态波形记录仪 |
| 7 | PCB 113B26 系列 ICP 型传感器 | 带隔直电容调理电路 | 自制存储式记录仪 |
| 8 | 国产 Y1001E-3 系列 ICP 型传感器 | 带隔直电容调理电路 | 自制存储式记录仪 |

压阻传感器受到压力时将压力信号转化为对应的电压信号, 其适配的电压放大器的频带可以覆盖零频, 因此本次实验选用压阻传感器测试系统作为对照实验。其中 Kistler 电荷放大器时间常数可调, 选用不同的放电时间常数 T 进行多组对比实验。将采集信号滤除其高频干扰后并以其激波平台初始数据为标准进行归一化处理, 其压力曲线如图 3 所示。

由图 3 可知, 系统 2 在 Kistler 电荷放大器的放电时间常数选为 long 的情况下, 与系统 1 压阻传感器相比在激波管的作用下仍存在激波平台衰减情况; 系统 5 为 Kistler 电荷放大器的放电时间常数 $T=0.1\text{ s}$ 时的衰减曲线, 可以看出 $T>0.1\text{ s}$ 时各系统衰减差别不明显。

对归一化后压力信号的激波平台衰减情况利用指数模型辨识, 衰减为初始值 37% 对应的的时间即为 T_c 。所求 T_c 如表 3 所示。

通过激波管系统辨识实验, 系统 2~8 的低频模型建立完成。其中系统 2 的 T_c 最大, 对应的激波平台衰减最慢, 系统 8 的 T_c 最小, 对应的激波平台衰减最快。系统 3~6 实际所求 T_c 均比 Kistler 电荷放大

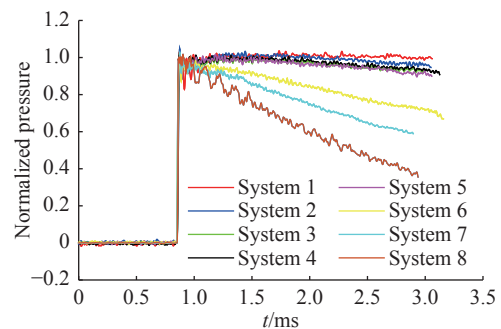


图 3 激波管实验压力信号

Fig. 3 Pressure signals of shock tube experiments

表 3 不同测试系统对应的总耦合放电时间常数 T_C
Table 3 Total coupled discharge time constant T_C for different test systems

| 系统编号 | 总耦合放电时间常数 T_C/s | 对应低频截止频率/Hz |
|------|-------------------|-------------|
| 1 | — | — |
| 2 | 0.110 8 | 1.44 |
| 3 | 0.043 3 | 3.68 |
| 4 | 0.038 0 | 4.19 |
| 5 | 0.030 6 | 5.20 |
| 6 | 0.006 5 | 24.49 |
| 7 | 0.004 0 | 39.79 |
| 8 | 0.002 1 | 75.79 |

模型,其传递函数形式为:

$$H_b(s) = \frac{1}{H(s)} \quad (3)$$

对实测冲击波压力曲线 $y(t)$ 进行低频补偿与修正,得到修正后的冲击波信号为:

$$y_b(t) = F^{-1} [Y(j\omega)H_b(j\omega)] \quad (4)$$

3.2 补偿模型验证

补偿模型建立后,通过对系统 2~8 归一化后的激波管测试数据补偿验证,将补偿后的数据同系统 1 (压阻传感器系统)所测信号归一化后做对比,各系统补偿后数据的激波平台与系统 1 对比吻合程度较好,如图 4 所示,其中图 4(a)为压阻传感器与理想阶跃信号做对比。

本文通过检验相关系数来进一步验证各系统补偿模型的好坏,若相关系数接近于 1,则证明所建模型较好。所求相关系数如表 4 所示,其中系数 1 为系统 1 与理想阶跃信号所求相关系数,系数 2~8 为系统 2~8 补偿后结果分别与系统 1 所求相关系数。

由表 4 可知,系统 1 可以作为对参照系统,系统 2~8 经过补偿后的结果较好,说明所建低频补偿模型有实用效果。

表 4 相关系数表

Table 4 Correlation coefficient

| 系统 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 相关系数 | 0.999 7 | 0.999 3 | 0.999 3 | 0.999 6 | 0.999 5 | 0.999 3 | 0.999 4 | 0.999 0 |

3.3 实测数据对比补偿

利用对比补偿的思路:选用同一实测条件下的不同测试系统,将所建低频补偿模型应用到实测数据中进一步分析。对表 1 中第一次试验 10 m 处的 Y1001E-3 和 113B26 实测信号,即图 1 所示信号进行补偿,其对应为系统 7 与系统 8 所建低频补偿模型,其传递函数分别为:

$$H_{b7} = \frac{0.004 0s + 1}{0.004 0s} \quad (5)$$

$$H_{b8} = \frac{0.002 1s + 1}{0.002 1s} \quad (6)$$

其补偿结果如图 5 所示,同补偿前相比,两者的超压峰值基本变化不明显,但补偿后的冲击波信号曲线在衰减规律上发生了明显变化。由表 5 可知,补偿后的冲击波信号两者的正压作用时间和比冲量

器理论对应放电时间常数 T 要小但规律性一致。整体激波平台衰减规律取决于总耦合放电时间常数 T_C , T_C 越大,系统低频特性越好,衰减越慢。

3 低频补偿方法的实现

3.1 低频补偿模型

测试系统低频特性的传递函数 $H(s)$ 确定后,为消除其低频特性对测试系统的影响,采用零极点配置法^[13-14],通过串接一个补偿环节 $H_b(s)$,消去影响系统特性的零极点,从而达到补偿的目的。因此设计该补偿模型为低频特性模型的逆

均有所提高, 正压作用时间的差异由补偿前 44.0% 降为 7.95%, 比冲量差异由补偿前 46.5% 降为 14.94%。由此说明, 该补偿方法可以有效地补偿由系统低频特性不佳而带来的正压作用时间和比冲量误差。

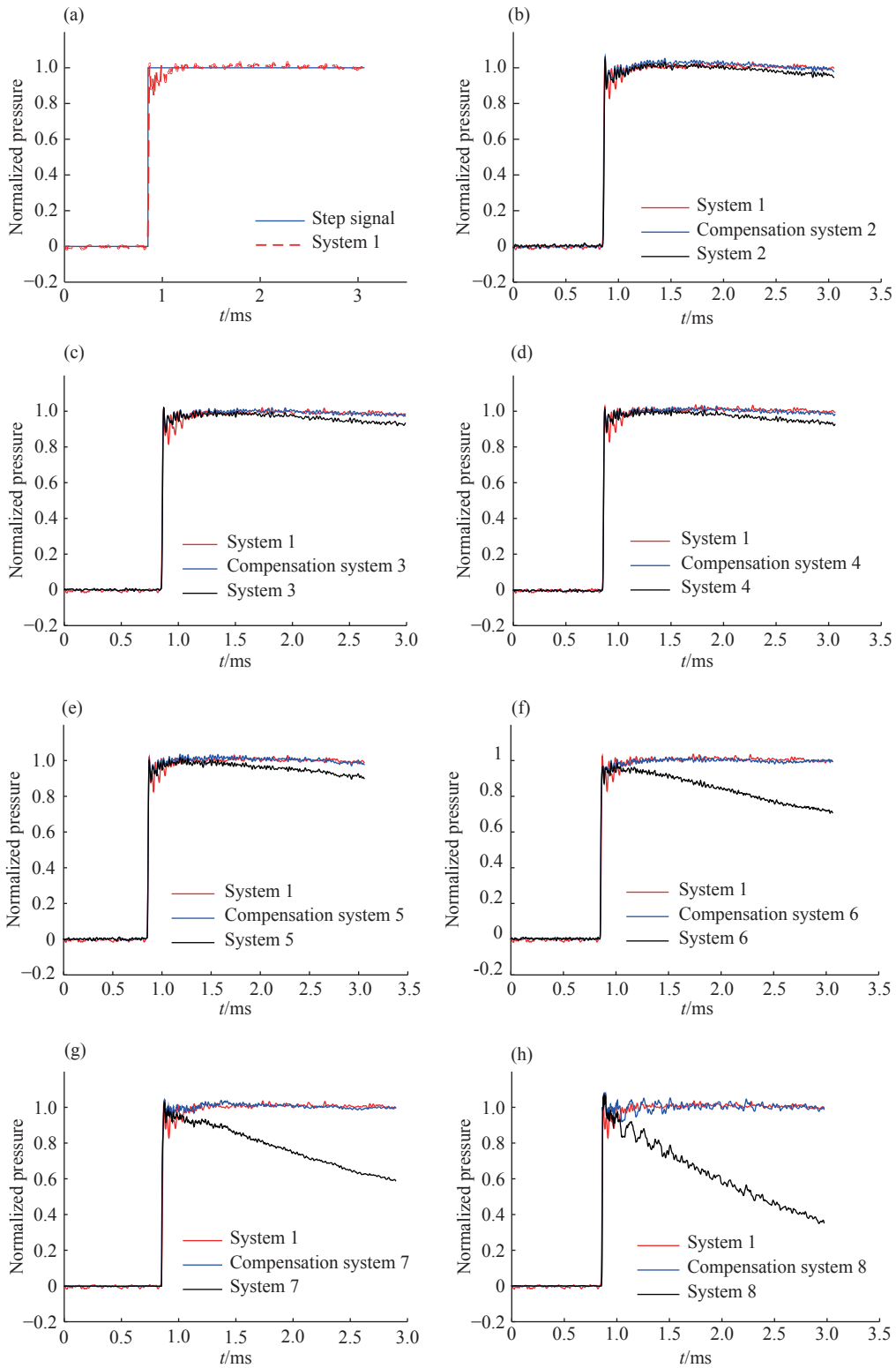


图 4 系统补偿验证

Fig. 4 System compensation verification

表 5 补偿冲击波信号参数

Table 5 Parameters for compensating shock wave signals

| 传感器类型 | $\Delta p/\text{MPa}$ | $\varepsilon_p/\%$ | t_+/ms | $\varepsilon_t/\%$ | $i/(\text{MPa}\cdot\text{ms})$ | $\varepsilon_i/\%$ |
|----------|-----------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|
| Y1001E-3 | 0.154 2 | | 5.67 | | 0.218 0 | |
| 113B26 | 0.152 2 | 1.31 | 6.16 | 7.95 | 0.256 3 | 14.94 |

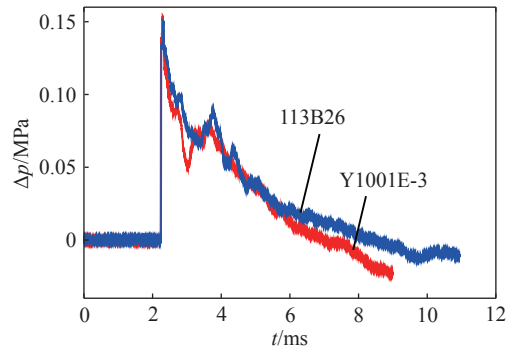


图 5 实测曲线补偿结果

Fig. 5 Compensation results of measured curves

3.4 实测补偿曲线谱分析

将图 5 中补偿后的实测冲击波信号进行边际谱分析,其低频段边际谱如图 6 所示。从图 6 中可以看出,补偿后的边际谱低频段幅值能量明显提高。从而进一步说明,低频段信号衰减严重是造成正压作用时间变短的重要原因。

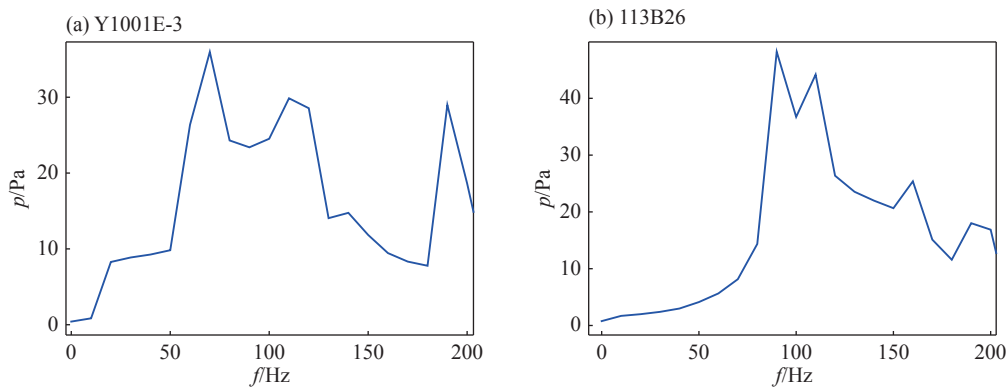


图 6 补偿曲线的边际谱

Fig. 6 Marginal spectra of compensation curves

4 结 论

本文通过实爆试验中相同试验条件 Y1001E-3 和 113B26 所测冲击波信号的 Hilbert 边际谱分析,获取了传感器低频特性。通过低频模型和补偿模型的研究得出以下结论:

- (1) 冲击波测试系统低频特性的影响因素主要取决于传感器和采集系统本身的总耦合放电时间常数 T_C , T_C 越大,低频特性越好,对冲击波信号正压作用时间和比冲量影响越小。
- (2) 通过激波管实验辨识建立的低频特性数学模型,表明测试系统低频模型的建立方法有效。
- (3) 采用此方法,提高了正压时间的测试精度,为减少冲击波动态参数测试误差提供思路。

参考文献:

- [1] 祖静, 马铁华, 裴东兴, 范锦彪. 新概念动态测试 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 286–295.
- [2] 郭士旭, 余尚江, 陈晋央, 等. 压电式压力传感器动态特性补偿技术研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 136–140.
GUO Shixu, YU Shangjiang, CHEN Jinyang, et al. Research on dynamic characteristics compensation technology of piezoelectric pressure sensor [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2): 136–140.
- [3] 孔霖, 苏健军, 杨凡. 冲击波反射压测量曲线的动态修正与补偿方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(6): 1051–1056. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1051-06.
KONG Lin, SU Jianjun, YANG Fan. Dynamic correction and compensation method of shock wave reflection pressure measurement curve [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(6): 1051–1056. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1051-06.
- [4] 魏娟, 张志杰, 赵晨阳, 等. 冲击波测试系统中压力传感器的实时动态补偿实现 [J]. *传感技术学报*, 2018, 31(4): 545–550. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2018.04.026.
WEI Juan, ZHANG Zhijie, ZHAO Chenyang, et al. Real-time dynamic compensation implementation of pressure sensor in shock wave test system [J]. *Journal of Transduction Technology*, 2018, 31(4): 545–550. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2018.04.026.
- [5] 刘一江, 孟立凡, 张志杰, 等. 冲击波测试系统中传感器动态补偿装置 [J]. *传感技术学报*, 2012, 25(11): 1516–1521. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.011.010.
LIU Yijiang, MENG Lifan, ZHANG Zhijie, et al. Sensor dynamic compensation device in shock wave test system [J]. *Journal of Transduction Technology*, 2012, 25(11): 1516–1521. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.011.010.
- [6] 王啸, 韩太林, 张恩奎, 等. 基于烟花算法的压阻式压力传感器动态补偿方法 [J]. *兵工学报*, 2017, 38(11): 149–156.
WANG Xiao, HAN Tailin, ZHANG Enkui, et al. Dynamic compensation method of piezoresistive pressure sensor based on fireworks algorithm [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(11): 149–156.
- [7] 刘浩. 冲击波测试系统与动态特性补偿研究 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [8] 赖富文, 张志杰, 张天宇, 等. 基于动态特性补偿的冲击波测试数据处理方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 871–875. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0871-05.
LAI Fuwen, ZHANG Zhijie, ZHANG Jianyu, et al. Data processing method of shock wave test based on dynamic characteristic compensation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 871–875. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0871-05.
- [9] 杜红棉, 何志文, 马铁华. 冲击波超压测试系统二次仪表频域特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 261–266. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0261-06.
DU Hongmian, HE Zhiwen, MA Tiehua. Frequency domain characteristics of secondary instrument in shock wave overpressure test system [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(2): 261–266. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0261-06.
- [10] 王新颖, 王树山, 卢熹, 等. 空中爆炸冲击波对生物目标的超压-冲量准则 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 106–121. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0031.
WANG Xinxin, WANG Shushan, LU Wei, et al. Overpressure-impulse criterion of airborne shock waves on biological targets [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 106–121. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0031.
- [11] LI L, WANG F, SHANG F, et al. Energy spectrum analysis of blast waves based on an improved Hilbert–Huang transform [J]. *Shock Waves*, 2017, 27(3): 487–494. DOI: 10.1007/s00193-016-0667-7.
- [12] 李丽萍, 孔德仁, 苏建军, 等. 基于能量谱的爆炸冲击波毁伤特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(21): 71–75.
LI Liping, KONG Deren, SU Jianjun, et al. Study on damage characteristics of explosion shock wave based on energy spectrum [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(21): 71–75.

- [13] 张文娜. 压力传感器的辨识建模及动态补偿技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.
- [14] 杨文杰, 张志杰, 赵晨阳, 等. 基于零极点配置理论的压力传感器动态特性补偿 [J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(2): 78–82. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.02.015.
- YANG Wenjie, ZHANG Zhijie, ZHAO Chenyang, et al. Dynamic characteristics compensation of pressure sensor based on zero pole placement theory [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(2): 78–82. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.02.015.

Research on low frequency characteristics and compensation method of a shock wave test system

XU Hao, DU Hongmian, FAN Jinbiao, ZU Jing, WANG Lingyu

(*Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China*)

Abstract: In order to improve the measurement accuracy of shock wave overpressure peak, most scholars focus on the study of high-frequency characteristics of the system for improving the accuracy of peak value measurement by broadening the bandwidth. The other two main parameters of the shock wave, positive pressure action time and specific impulse, are closely related to the low frequency characteristics of the test system. Aimed at the problem that the positive pressure action time of different sensors varies greatly in real explosion, the marginal spectrum analysis of the shock wave signal was carried out, and the low frequency characteristics of the signals were obtained. A first-order parametric model was established to characterize the low-frequency characteristics, and the low-frequency model parameters of seven systems were obtained from the experimental data of shock tube. The low-frequency compensation model was designed by the zero pole configuration method. The results show that the low-frequency characteristics of shock wave testing systems seriously affect the accuracy of positive pressure action time measurement of shock wave signals. The data processing method based on the low-frequency characteristic compensation can effectively improve the measurement accuracy of positive pressure action time and specific impulse of shock wave signals.

Keywords: shock wave test system; low frequency characteristics; positive pressure action time; shock tube experiment

(责任编辑 王易难)