

# 冲击波测试系统的动态建模及应用<sup>\*</sup>

尤文斌<sup>1</sup>, 马铁华<sup>1</sup>, 丁永红<sup>1</sup>, 崔 敏<sup>1</sup>, 张晋业<sup>2</sup>

(1. 中北大学电子测试技术重点实验室, 山西太原 030051;

2. 晋西工业集团有限责任公司技术中心, 山西太原 030027)

**摘要:** 若测试系统的带宽不能完全覆盖冲击波信号的有效带宽, 就会存在较大的动态误差。根据冲击波测试系统的激波管动态校准实验数据, 建立了冲击波测试系统动态数学模型, 设计了动态校正数字滤波器。仿真结果表明, 动态校正滤波器明显提高了系统动态响应的快速性, 展宽了工作频带。实弹测试结果显示, 校正滤波器能提高冲击波测试的精度和可靠性。该方法能有效消除动态误差, 提高测试数据的准确性。

**关键词:** 动态建模; 补偿滤波; 冲击波测试; 带宽

**中图分类号:** O521.3; O384 **文献标志码:** A

**doi:** 10.11858/gywlx.2014.04.007

## 1 引 言

炸药爆炸时的冲击波超压是考核炸药爆炸威力、评估爆炸对周围物体损伤程度的一个关键指标<sup>[1-3]</sup>。爆炸产生的冲击波信号上升时间一般为几微秒, 且持续时间在几十毫秒以内, 国内外现有传感器的工作频带不能完全覆盖冲击波信号的有效带宽<sup>[4]</sup>, 所以由传感器组成的冲击波超压测试系统的幅频特性不平直, 相频特性不是理想的直线, 测试系统的输入与输出之间存在着畸变, 动态误差很大<sup>[5]</sup>。在实际测量中表现为测试信号有较大的过冲, 若以实测数据的最大值作为被测冲击波峰值, 将会带来很大的误差<sup>[6]</sup>。因此, 有必要对测试系统的动态特性进行研究, 当测试系统不满足被测冲击波信号的测试要求时, 可对系统的动态性能进行改进。考虑到冲击波在不同距离上的信号频宽不同<sup>[7]</sup>, 如果采用巴特沃斯或切比雪夫数字滤波器进行滤波, 会造成波形上升段变缓, 且固定的滤波器截止频率也不满足不同测试距离测量的数据处理要求。为此, 本研究利用动态校准实验, 建立冲击波测试系统的动态模型, 并由此设计一种动态补偿滤波器, 以校正测试数据, 提高整个测试系统的可靠性和准确度。

## 2 系统辨识理论

### 2.1 系统建模

处理动态校准实验数据时, 最重要的一步是建立全面描述被校压力测试系统的动态数学模型。本研究采用辨识效果较好的特殊白化滤波器的广义最小二乘法, 带噪声的模型为<sup>[6]</sup>

$$A(d^{-1})\tilde{y}(k) = B(d^{-1})\tilde{u}(k) + e(k) \quad (1)$$

式中:  $\tilde{u}(k) = u(k)/A(d^{-1})$ ,  $\tilde{y}(k) = y(k)/A(d^{-1})$ ,  $u(k)$  为系统第  $k$  个输入观测量,  $y(k)$  为系统第  $k$  个输出观测量;  $k = 1, 2, \dots, N$ ;  $e(k)$  为残差;  $d^{-1}$  为后移位算符;  $A(d^{-1}) = 1 + a_1d^{-1} + a_2d^{-2} + \dots + a_nd^{-n}$ ,

\* 收稿日期: 2012-07-19; 修回日期: 2012-09-29

基金项目: 山西省青年科技研究基金(2013021015-1); 国防科技重点实验室基金(9140C120409)

作者简介: 尤文斌(1981-), 男, 博士, 讲师, 主要从事动态测试与智能仪器研究. E-mail: youwenbin@nuc.edu.cn

$B(d^{-1}) = b_0 + b_1 d^{-1} + b_2 d^{-2} + \dots + b_n d^{-n}$ , 其中  $a_1, a_2, \dots, a_n, b_0, b_1, \dots, b_n$  为待定参数,  $n$  为模型阶次。

采用迭代法对模型进行求解, 具体步骤如下:

(1) 由实验观测数据  $u(k)$  和  $y(k)$ , 计算参数  $a_i$  和  $b_i (i=0, 1, \dots, n)$  的最小二乘估计  $\hat{a}_{LS}$  和  $\hat{b}_{LS}$ , 将其作为迭代运算的初值, 即令  $\hat{a}^{(0)} = \hat{a}_{LS}$ ;

(2) 设迭代第  $l$  次时,  $\hat{a}^{(l)} = (\hat{a}_1^{(l)}, \hat{a}_2^{(l)}, \dots, \hat{a}_n^{(l)})^T, \hat{b}^{(l)} = (\hat{b}_0^{(l)}, \hat{b}_1^{(l)}, \dots, \hat{b}_n^{(l)})^T$ , 由  $\tilde{y}^{(l)}(k) = y(k)/\hat{A}^{(l)}(d^{-1})$ ,  $\tilde{u}^{(l)}(k) = u(k)/\hat{A}^{(l)}(d^{-1})$ , 可计算  $\tilde{y}^{(l)}(k)$  和  $\tilde{u}^{(l)}(k)$ ;

(3) 由  $\{\tilde{u}^{(l)}(k), \tilde{y}^{(l)}(k), k=0, 1, \dots, N\}$  序列, 对  $A(d^{-1})\tilde{y}^{(l)}(k) = B(d^{-1})\tilde{u}^{(l)}(k) + e(k)$  进行最小二乘估计, 得到  $\hat{a}^{(l+1)}$  和  $\hat{b}^{(l+1)}$ ;

(4) 令  $l=l+1$ , 回到第 2 步, 直到迭代收敛或达到最大迭代次数为止。

## 2.2 模型校正

将数字滤波器设计问题转换成系统离散传递函数的辨识问题, 给定数字滤波器的输入序列  $u(k)$  及相应的输出序列  $y(k)$  后, 就能确定所需的数字滤波器结构, 并估计其最佳参数。将差分方程改写成如下形式

$$b_n u(k-n) - a_n y(k-n) + b_{n-1} u(k-n+1) - a_{n-1} y(k-n+1) + \dots + b_1 u(k-1) - a_1 y(k-1) + b_0 u(k) - y(k) = e(k) \quad (2)$$

根据系统的因果性, 有  $y(k-n)=0, k < n$ 。输入和输出序列的长度为  $N$ , 对应的输入和输出相间排列成  $N \times (2v+2)$  维信息阵

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & u(1) & -y(1) \\ 0 & 0 & \dots & u(1) & -y(1) & u(2) & -y(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u(1) & -y(1) & \dots & u(v) & -y(v) & u(v+1) & -y(v+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u(N-v) & -y(N-v) & \dots & u(N-1) & -y(N-1) & u(N) & -y(N) \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:  $v$  为希望考察的阶次,  $v$  应略大于估计的阶次  $n$ 。

差分方程的  $n$  阶参数向量为

$$\theta_n = (b_n, a_n, b_{n-1}, a_{n-1}, \dots, b_1, a_1, b_0)^T \quad (4)$$

将差分方程写成矩阵方程

$$D\theta^* = E \quad (5)$$

式中:  $\theta^* = (b_n, a_n, b_{n-1}, a_{n-1}, \dots, b_1, a_1, b_0, 1, 0, \dots, 0)^T$ , 为  $2v+2$  维向量;  $E = (e(1), e(2), \dots, e(N))^T$ 。

对(3)式进行 Householder 变换(镜像映射变换), 得到上三角矩阵; 其对角元的平方是相应阶次的残差平方和, 由阶次判定准则, 可求出阶次; 再将上三角矩阵代入(5)式, 便得到模型参数。

## 3 测试系统建模

传感器与测试电路连接后, 其动态特性将会发生变化, 需要对测试系统进行整体的动态特性校准, 即获取测试系统的动态数学模型和动态性能指标。动态特性校准的首要问题是要有频带能充分覆盖被校压力测试系统模态的动态激励信号发生器, 使被校测试系统的主要模态激发出来。激波管可产生上升沿小于  $0.1 \mu\text{s}$ 、平台保持时间大于  $5 \text{ms}$  的阶跃压力信号, 是超压测试系统动态校准的理想激励源<sup>[6]</sup>; 此外, 激波管产生的信号与爆炸冲击波同属激波信号, 有利于校准与实测保持一致。因此, 本研究选择激波管作为动态激励信号发生器。

冲击波场超压测试需要使用多个冲击波记录仪, 本研究以 1 个量程为  $250 \text{kPa}$  的冲击波记录仪为例进行动态校准。

### 3.1 激波管动态校准方法

激波管<sup>[8]</sup>(见图 1)是一根内壁光滑、两端封闭的直管, 中间以一层膜片隔开, 左端充以高压气体, 形

成高压室,右端不充气或充以较低压力的气体,形成低压室。在低压室的右端侧壁上安装两个压力传感器,其中心间距  $s_0=0.55\text{ m}$ ,通过两个传感器的压力上升沿可获得时间间隔  $\Delta t$ ,进而求得激波速度,再根据激波管压力计算公式,得到理论激波标准压力<sup>[9]</sup>。被校测试系统传感器安装在低压室端面。

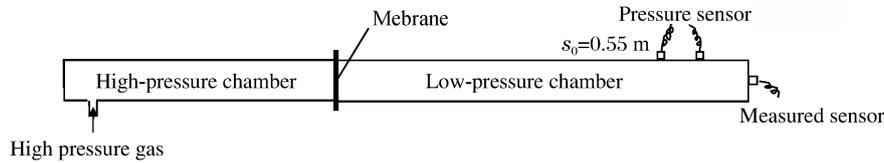


图 1 激波管示意图

Fig. 1 Schematic of shock tube

### 3.2 冲击波记录仪的动态校准

利用激波管作为激励源,对所设计的冲击波记录仪进行动态标定。激波管的低压室压力为 100 kPa,高压破膜压力为 280 kPa。被校测试系统的采样频率为 1 MHz,传感器采用奇石缘 YD8055 压力传感器,在激波管阶跃压力作用下传感器的响应曲线如图 2 所示。从图 2 可以得到响应曲线的时域动态性能指标:超调量  $\sigma=87.6\%$ ,上升时间  $t_r=2.4\ \mu\text{s}$ ,峰值时间  $t_p=5.0\ \mu\text{s}$ 。响应曲线的频域动态特性如图 3 所示,可见,在 10 kHz 以内,曲线平直。

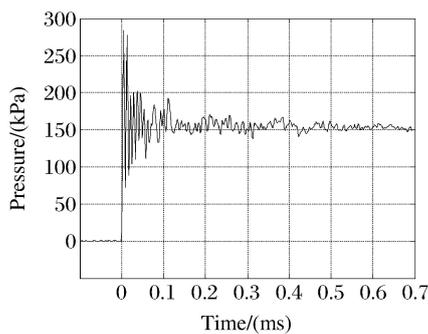


图 2 标定曲线

Fig. 2 Calibration curve

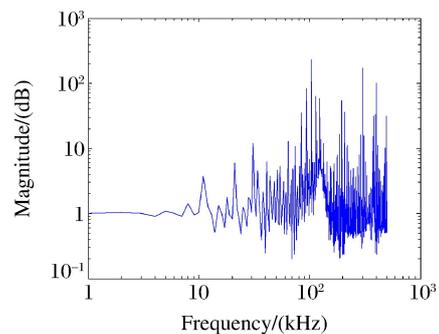


图 3 标定曲线的幅频特性

Fig. 3 Amplitude frequency characteristic of calibration curve

在进行辨识前,须对实验数据进行归一化处理。辨识出线性差分方程的模型阶次和参数后,将系统的采样频率设为 1 MHz。采用双线性变换,将差分方程转化为连续的传递函数,建立的 5 阶模型传递函数为

$$G(s) = (0.442 \times 10^{-1} s^5 - 1.568 \times 10^6 s^4 + 2.602 \times 10^{12} s^3 - 4.215 \times 10^{17} s^2 + 1.511 \times 10^{25} s + 5.477 \times 10^{29}) / (s^5 + 1.311 \times 10^6 s^4 + 2.402 \times 10^{13} s^3 + 3.932 \times 10^{18} s^2 + 1.439 \times 10^{25} s + 5.376 \times 10^{29}) \quad (6)$$

式中: $s$  为拉普拉斯算子。

对此模型输入阶跃信号,通过仿真得到理论输出曲线与实际响应曲线的对比,如图 4 所示。可以看出,仿真结果与实际响应结果吻合,说明模型可信。由该模型可进一步得到频率特性曲线,如图 5 所示。可见,幅值误差为  $\pm 10\%$  时的工作频带  $\omega_{gl}=4.133 \times 10^5\text{ rad/s}=65.8\text{ kHz}$ 。

测试系统的工作频带应大于被测信号的有效带宽,从而保证无失真地测出动态参数的变化规律。由阶跃响应曲线及其性能指标可以看出,时域振荡次数较多,到达稳定的时间较长,且幅频特性的平直段(工作频带)不能满足冲击波有效带宽(100 kHz)的要求。这些问题都将使测得的输出信号与被测信号之间存在畸变,所以该压力测试系统的动态性能不能满足要求,需要进行补偿改进,以减小动态误差。

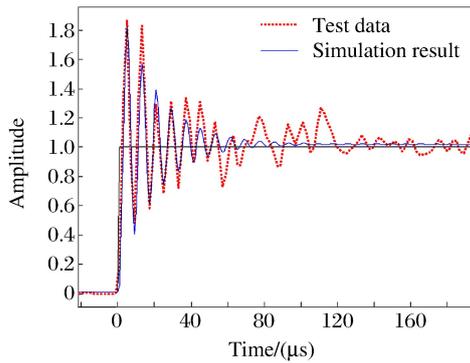


图 4 仿真结果与实测数据的对比

Fig. 4 Comparison between the simulation results and measured data

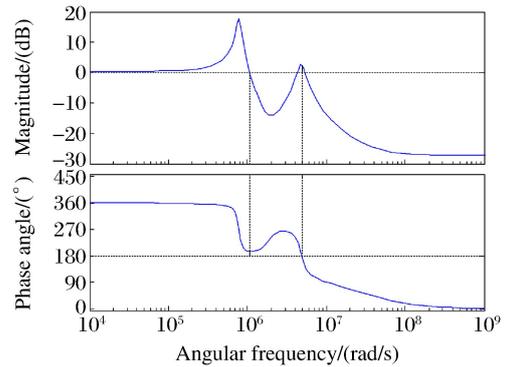


图 5 仿真模型的频率特性

Fig. 5 Frequency response of the simulation model

### 3.3 模型补偿校正

若使校正后的系统特性接近二阶系统,则转折频率前的低频段需具有不变或变化极小的幅频特性,故阻尼系数选择 0.71;由于冲击波信号的有效带宽在 100 kHz 以内,因此选择滤波截止频率为 150 kHz (即自然振荡角频率为  $9.42 \times 10^5$  rad/s),此时既能保证幅频特性在  $0 \sim 100$  kHz 内平直,又不至于因选取的频率过高造成校正函数的阶次太高而增加计算量。由此求出理想校正后系统的输出观测数据。以测试系统模型的阶跃输出作为校正模型的输入观测数据,由模型校正计算方法求得 3 阶校正差分模型,系统采样频率设为 1 MHz。采用双线性变换,将差分方程转化为连续的传递函数,建立的 3 阶模型的连续传递函数为

$$G(s) = \frac{0.108s^3 - 1.643 \times 10^6 s^2 + 2.612 \times 10^{11} s + 1.163 \times 10^{18}}{s^3 + 9.392 \times 10^5 s^2 + 2.344 \times 10^{12} s + 1.186 \times 10^{18}} \quad (7)$$

系统模型与校正模型串联后输入阶跃信号,仿真曲线与实际响应曲线的对比如图 6 所示。从图 6 可以看出,校正后响应信号的上升时间为  $5.3 \mu\text{s}$ ,峰值时间为  $7.6 \mu\text{s}$ ,超调量为 6.9%。与校正前相比,校正后的信号上升时间增加了  $2.9 \mu\text{s}$ ,峰值时间增加了  $2.6 \mu\text{s}$ ,超调量减少了 12.7 倍。经动态补偿数字滤波器校正后的系统频率特性如图 7 所示,幅值误差为  $\pm 10\%$  的工作频带为  $\omega'_{g1} = 6.32 \times 10^5$  rad/s = 100.6 kHz。 $\omega'_{g1}/\omega_{g1} = 1.53$ ,即幅值误差为  $\pm 10\%$  的工作频带展宽 1.53 倍。校正后的测试系统满足冲击超压测试的要求。

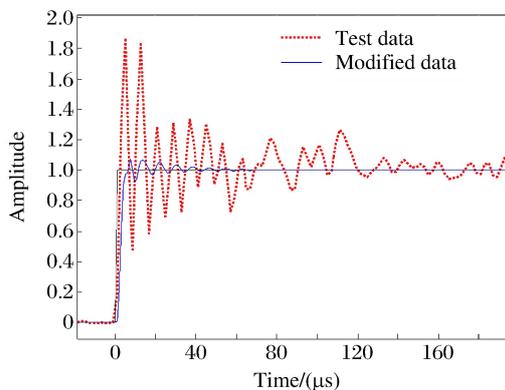


图 6 校正前、后的阶跃响应

Fig. 6 Step response before and after correction

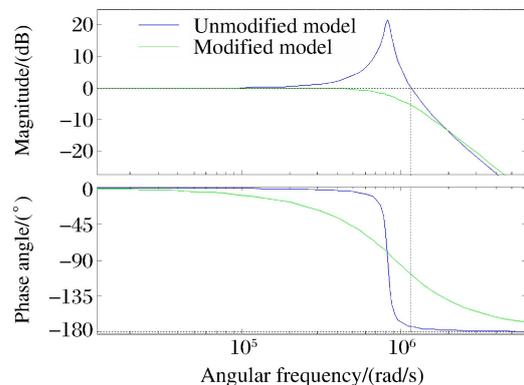


图 7 校正前、后测试系统的幅频特性

Fig. 7 Frequency response of test system before and after correction

## 4 数据处理

利用本系统测量某弹体(TNT装药当量为100 kg)爆炸时距爆心15 m处的冲击波信号,校正前、后的压力信号对比如图8所示,其上升沿的局部放大图见图9。从图8和图9可以看出,校正前的冲击波峰值压力为153.1 kPa,校正后则为144.3 kPa,峰值压力减小6.1%,校正后的峰值时间延迟3.0  $\mu\text{s}$ 。

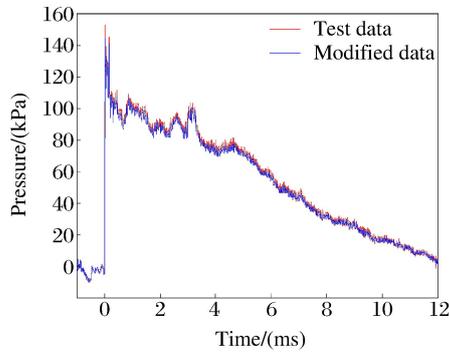


图8 校正后的测试数据

Fig. 8 Modified test data

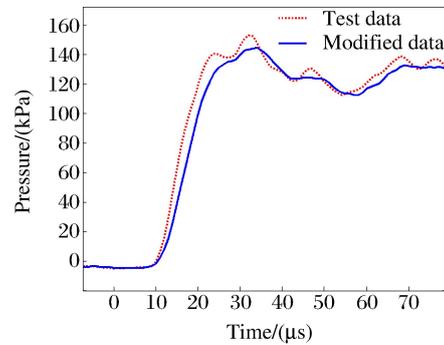


图9 校正后测试数据的局部放大

Fig. 9 Partial enlarged detail of modified test data

对以爆心为原点的同一径向上的超压峰值进行统计,并根据萨多夫斯基公式,由超压峰值反推 TNT 爆炸当量,结果列于如表1,其中  $S$  为测点距爆心的距离,  $p_{\max, \text{or}}$  和  $p_{\max, \text{cor}}$  分别为校正前、后的超压峰值,  $w_{\text{TNT, or}}$  和  $w_{\text{TNT, cor}}$  分别为校正前、后的 TNT 爆炸当量。由表1可知:校正前 TNT 爆炸当量均值为107.4 kg,标准方差为3.6;而校正后 TNT 爆炸当量均值为101.9 kg,标准方差为0.5。可见,通过激波管建立的系统模型和补偿校正模型有效地提高了测试系统的测量精度和稳定性。

表1 冲击超压结果统计

Table 1 Statistical table of shock overpressure

$S/(\text{m})$	$p_{\max, \text{or}}/(\text{kPa})$	$p_{\max, \text{cor}}/(\text{kPa})$	$w_{\text{TNT, or}}/(\text{kg})$	$w_{\text{TNT, cor}}/(\text{kg})$
15.0	153.1	144.3	112.0	102.2
22.9	70.3	67.5	110.3	102.6
27.5	51.0	49.8	106.0	101.4
29.6	45.3	44.5	105.2	101.9
34.3	35.9	34.9	103.3	101.6

## 5 结论

运用特殊白化滤波器的广义最小二乘法,针对激波管压力测试系统的动态校准问题,建立了测试系统的动态模型,采用补偿滤波对系统模型进行了校正。仿真结果表明:采用系统辨识方法和动态补偿方法建立的模型,适用于传感器带宽不够的冲击波压力测试系统,补偿滤波后冲击波压力测试系统的工作频带满足大于100 kHz的要求,从而提高了测试系统的测量精度和稳定性。此研究方法还可用于解决其它传感器或测量系统的动态测量问题。

## References:

- [1] Xiong Z Z, Bai C H, Liu C L. Measurement study of FAE weapon blast field pressure [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(1): 41-44. (in Chinese)

熊祖钊,白春华,刘长林. FAE武器爆炸状态场压力场测试方法研究 [J]. 火炸药学报, 2002, 25(1): 41-44.

- [2] Wang F, Feng S S. Experimental research on damage-power evaluation of FAE warhead [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(2):179-182. (in Chinese)  
王 芳, 冯顺山. FAE 战斗部毁伤威力评价的试验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(2):179-182.
- [3] Shen X J, Miao Q S, Wang X M. Study on the damage of blast wave to the main battle tank [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(1):224-226. (in Chinese)  
沈晓军, 苗勤书, 王晓鸣. 爆炸冲击波对主战坦克的毁伤研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2006, 26(1):224-226.
- [4] Ye X B, Zhang W N. Analysis and improvement for dynamic performance of pressure sensor [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2002, 21(2):11-14. (in Chinese)  
叶湘滨, 张文娜. 压力传感器动态性能分析及改进 [J]. *传感器技术*, 2002, 21(2):11-14.
- [5] Zhang Z J, Zu J, Zhang A P. Research on inverse filtering with multiparameter model [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1999, 20(2):143-150. (in Chinese)  
张志杰, 祖 静, 张爱萍. 多参数模型的反滤波方法研究 [J]. *计量学报*, 1999, 20(2):143-150.
- [6] Huang J Q. *Test System Dynamics* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996. (in Chinese)  
黄俊钦. *测试系统动力学* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [7] Huang Z P. *Explosion and Shock Measuring Technique* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)  
黄正平. *爆炸与冲击电测技术* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [8] Meng L F, Zheng B. *The Principle and Technology of Sensor* [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2000. (in Chinese)  
孟立凡, 郑 宾. *传感器原理及技术* [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000.
- [9] Ding Y H, You W B, Ma T H. 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. (in Chinese)  
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.

## Dynamic Modeling and Application of Shock Wave Testing System

YOU Wen-Bin<sup>1</sup>, MA Tie-Hua<sup>1</sup>, DING Yong-Hong<sup>1</sup>, CUI Min<sup>1</sup>, ZHANG Jin-Ye<sup>2</sup>

(1. *Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;*

2. *Technology Center, Jinxi Industries Group Co., Ltd, Taiyuan 030027, China)*

**Abstract:** If the bandwidth of measurement system can not cover completely the effective bandwidth of a blast wave signal, a dynamic error is inevitably introduced. By using the shock-tube based dynamic calibrated data, a dynamic mathematical model of measurement system is established, and a dynamic compensated digital filter is designed, which shortens the dynamic response time of test system and widens the work bandwidth significantly. The experimental data processing by the correction filter improves the reliability of the uncertainty. The simulation results show that this method can effectively eliminate the dynamic error and increase the accuracy of test data.

**Key words:** dynamic modeling; compensation filter; shock wave test; bandwidth