DOI: 10.11883/1001-1455(2017)06-1051-06

冲击波反射压测量曲线的动态修正与补偿方法*

孔 霖[1],苏健军[1],杨 凡[2]
(1.西安近代化学研究所,陕西 西安 710065
2.南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:为准确获取爆炸冲击波反射压测量曲线,分析了影响其峰值的三个因素:测压系统的带宽、压力测量方式和信号传输线长度;使用激波管对冲击波测压系统进行动态校准,获取其动态特性;采用改进的 levy 法对其动态特性进行参数化建模,设计巴特沃斯滤波器作为补偿后的系统,计算出动态补偿环节,拓宽了测压系统的工作频带,且降低了测压系统谐振频率处的幅值;对冲击波反射压测量曲线进行动态修正与补偿,发现该方法能够修正冲击波反射超压峰值,明显降低由于测压系统的动态特性不够带来的峰值误差。该研究成果能够显著提高冲击波反射压测量峰值的准确度,为武器毁伤威力评价提供技术支持。

关键词:冲击波反射压;峰值;参数化模型;修正与补偿
中图分类号:O389;TJ55 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

爆炸冲击波是高效毁伤武器工作过程中特有的物理量,表征着武器的威力和工作状态。冲击波压力是高效毁伤武器威力评价、目标毁伤效果评估的重要参量。

冲击波超压峰值是评价冲击波强弱的主要特征参量。它依据冲击波压力随时间变化的曲线,经数据处理得到。在不考虑其他影响因素的情况下,将采集到的电压信号峰值除以传感器的灵敏度即可得到冲击波超压峰值。

冲击波超压测量有以下几种情形:(1)开阔空间,如靶场。试验时一般测量地面反射压和自由场压力,这两种测量均为冲击波掠过传感器端面,相当于测量冲击波入射压。(2)密闭容器,如爆炸罐和爆炸塔,测量时冲击波波阵面法线垂直于传感器端面,相当于冲击波拍在传感器端面上,测量的是反射压。(3)半密闭空间,如爆炸坑道,试验时将传感器安装在坑道壁上,冲击波也是掠过传感器端面,测量的是入射压。

实际毁伤工况下测量时,冲击波测压系统的动态特性、压力测量方式、信号线的长度等都会对超压峰值产生影响。邹虹等[1]针对压杆测试系统在冲击波测试中动态响应不足的问题,设计了一种动态补偿滤波器,改善了压杆测试系统的动态特性,展宽了频带。

本文中针对密闭容器中爆炸冲击波反射压测量情况,分析冲击波反射压峰值的影响因素,研究反射压测量曲线的动态修正和补偿方法,从而修正冲击波反射压峰值。

1 峰值影响因素分析

冲击波峰值到达传感器端面时,爆炸热作用和冲击振动作用还没到达传感器端面,峰值不受热和振动的影响。分析影响峰值的因素为冲击波测压系统的带宽、压力测量方式、信号传输线长度三个方面。

选用 PCB 公司生产的 113 型压力传感器,结合 482C05 型适配器和 GENESIS 数采进行冲击波超压的测量,组成冲击波测压系统。压力传感器的谐振频率为 500 kHz,适配器的带宽为 1 MHz,GENESIS 数采使用通道的带宽为 1 MHz。

冲击波测压系统的带宽为各组成部分的带宽的最小值,即 500 kHz。

* **收稿日期**:2016-04-12;**修回日期**:2016-09-10
第一作者:孔 霖(1987—),女,硕士,工程师,konglinkl@163.com。

冲击波入射压测量时,传感器端面直径为 5.6 mm,冲击波掠过端面的时间约 7～12 μs,此时间内传感器敏感元件已产生了 3～6 个周期的信号,敏感元件谐振引起的超调量已大幅降低,因此可认为测出的冲击波超压峰值即为真实值。

并且,毁伤工况下冲击波测压系统往往需要较长的信号传输线,以连接到放置于安全区域的数据采集仪。靶场测量和半密闭空间测量冲击波入射压时信号传输线长度约 170 m。实验表明,200 m 长的信号传输线对应的动态校准曲线上升时间为 4.7 μs,在冲击波掠过时间以内,可以认为,入射压测量时,信号传输线对超压峰值无影响。

冲击波反射压测量时,冲击波波头直接全部作用在传感器端面,作用时间极短,一般在 ns 量级,而压力传感器的谐振频率为 500 kHz,自振周期为 2 μs,必然会输出较大的超调量,测量值与真值相差较大,加上传感器相频特性的影响,测量值超调量值不稳定。

而且,密闭空间测量冲击波反射压时信号传输线长度约 50 m,对应的动态校准曲线上升时间约 1.0 μs,压力传感器敏感元件刚输出半个周期信号,引起的超调量不可忽略。

2 反射压测量曲线动态修正与补偿方法

从第 1 节分析可以看出,冲击波入射压测量峰值可视为真值,反射压测量峰值与真值相差较大,需要进行动态修正和补偿。

将冲击波反射压测试系统(包括传感器安装结构和 50 m 的信号传输线)放置于激波管[2]末端,获取动态校准曲线,如图 1 所示。利用动态校准曲线求取冲击波测压系统的非参数化模型和参数化模型,设计动态补偿滤波器,根据参数化模型求取动态补偿环节,将测量到的冲击波信号进行傅里叶变换后与动态补偿环节相乘,然后求解傅里叶逆变换,即可得到动态修正后的冲击波信号。

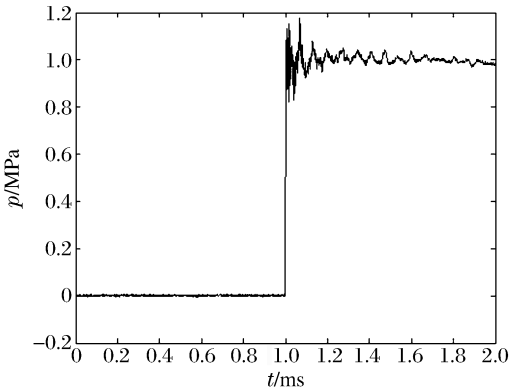

图 1 PCB 冲击波反射压测试系统的动态校准曲线

Fig. 1 Dynamic calibration curve of the PCB shockwave reflected pressure measuring system

2.1 建立模型

通过理想微分法[3]建立冲击波测压系统的非参数化模型。如图 2 中所示原始幅频响应曲线,PCB 传感器测压系统的谐振频率约为 450 kHz,并且谐振频率处其幅值为 1 000 Hz(频率处幅值的 6 倍)。

线性时不变测量系统的传递函数通常可取为

$$H(s) \approx \hat{H}(s) = \frac{\sum_{m=1}^{M} b_m s^{r_m}}{1 + \sum_{n=1}^{N} a_n s^{p_n}} \tag{1}$$

式中:多项式幂数 p_1～p_N 和 r_1～r_M 为互不相同的正整数,一般根据经验事先取定。系数 a_1～a_N 及 b_1～b_M 则是需要“辨识”的未知参数。$\hat{H}(s)$称为 $H(s)$的辨识模型。相应于 $\hat{H}(s)$的频响函数

$$\hat{H}(\mathrm{j}\omega) = \frac{\sum_{m=1}^{M} b_m \cdot (\mathrm{j}\omega)^{r_m}}{1 + \sum_{n=1}^{N} a_n \cdot (\mathrm{j}\omega)^{p_n}} \tag{2}$$

即为系统频响函数的辨识模型[4]。

根据最小二乘法,系数 a_1～a_N 及 b_1～b_M 的值使得频响函数的辨识模型取值 $\hat{H}(\mathrm{j}\omega_i)$相对于实验值

$H(\mathrm{j}\omega_i)$的误差平方和 $S=\sum_{i=1}^{L}|\varepsilon(\mathrm{j}\omega_i)|^2=\sum_{i=1}^{L}\varepsilon(\mathrm{j}\omega_i)\cdot\varepsilon^*(\mathrm{j}\omega_i)$最小，其中

$$\varepsilon(\mathrm{j}\omega_i)=H(\mathrm{j}\omega_i)-\hat{H}(\mathrm{j}\omega_i)=H(\mathrm{j}\omega_i)-\frac{B(\mathrm{j}\omega_i)}{A(\mathrm{j}\omega_i)}$$

$$A(\mathrm{j}\omega_i)=1+\sum_{n=1}^{N}a_n\cdot(\mathrm{j}\omega_i)p_n,\qquad B(\mathrm{j}\omega_i)=\sum_{m=1}^{M}b_m\cdot(\mathrm{j}\omega_i)r_m$$

在获得 $a_1\sim a_N$ 参数的一组粗估值 $a_{1(q)}\sim a_{N(q)}$ 的基础上，定义另一种修正拟合误差

$$\tilde{\varepsilon}(\mathrm{j}\omega_i)=\frac{A(\mathrm{j}\omega_i)}{A_{(q)}(\mathrm{j}\omega_i)}H(\mathrm{j}\omega_i)-\frac{B(\mathrm{j}\omega_i)}{A_{(q)}(\mathrm{j}\omega_i)}\tag{3}$$

式中：$i=1,2,3,\cdots,L$，$A_{(q)}(\mathrm{j}\omega_i)=1+\sum_{n=1}^{N}a_{n(q)}(\mathrm{j}\omega_i)p_n$ 是已知量。

由于 $a_{1(q)}\sim a_{N(q)}$ 是一组接近 $a_1\sim a_N$ 的“最佳”参数值，因此，可以期望 $A_{(q)}(\mathrm{j}\omega_i)$ 接近 $A(\mathrm{j}\omega_i)$，相应地，式(3)所示的修正拟合误差 $\tilde{\varepsilon}(\mathrm{j}\omega_i)$ 接近频响函数拟合误差 $\varepsilon(\mathrm{j}\omega_i)$。于是，定义

$$\tilde{S}=\sum_{i=1}^{L}|\tilde{\varepsilon}(\mathrm{j}\omega_i)|^2=\sum_{i=1}^{L}\tilde{\varepsilon}(\mathrm{j}\omega_i)\cdot\tilde{\varepsilon}^*(\mathrm{j}\omega_i)\tag{4}$$

与最小二乘法同理，将此 $\tilde{S}$ 分别对参数 $a_1\sim a_N$ 及 $b_1\sim b_M$ 求偏导数，并令 $\frac{\partial\tilde{S}}{\partial a_n}=0(n=1,\cdots,N)$、$\frac{\partial\tilde{S}}{\partial b_m}=0(m=1,\cdots,M)$，可求得一组使 $\tilde{S}$ 取极小的参数 $a_1\sim a_N$ 及 $b_1\sim b_M$。

由此可计算出

$$A_{(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)=1+\sum_{n=1}^{N}a_{n(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)p_n,\qquad B_{(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)=\sum_{l=1}^{M}b_{l(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)r_l$$

$$\varepsilon_{(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)=H(\mathrm{j}\omega_i)-\frac{B_{(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)}{A_{(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)},\qquad S_{(q+1)}=\sum_{i=1}^{L}\varepsilon_{(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)\cdot\varepsilon^*_{(q+1)}(\mathrm{j}\omega_i)$$

再由 $a_{1(q+1)}\sim a_{N(q+1)}$ 取代 $a_{1(q)}\sim a_{N(q)}$，如此迭代下去，直到 $S_{(q+Q)}$ 趋于最小。若是迭代过程收敛，则迭代足够多次(Q 次)所得的结果 $\{a_{1(q+Q)}\sim a_{N(q+Q)}、b_{1(q+Q)}\sim b_{M(q+Q)}\}$ 将足够精确地逼近使 $S=\sum_{i=1}^{L}|\varepsilon(\mathrm{j}\omega_i)|^2$ 达到最小的结果 $\{a_1\sim a_N、b_1\sim b_M\}$。迭代过程所需的初始值可取为 $a_{1(0)}=a_{2(0)}=\cdots=a_{N(0)}=0$[5]。此方法称为改进的 levy 法。

设定测压系统频率响应函数分子分母阶数，使用 MATLAB 编制程序，获取冲击波测压系统的参数化辨识模型，同时可计算出参数化辨识模型与非参数化模型之间的误差。

此方法将冲击波测压系统进行激波管动态校准，通过单自由度二阶测压系统的理想微分法建立其动态特性的非参数化模型，对非参数化模型进行 levy 法辨识，通过迭代使得定义的误差值最小，因此对于任何单自由度二阶测压系统皆可适用。

针对本文中建立的 PCB 冲击波测压系统，设定测压系统频率响应函数分子分母阶数都为 20，计算出的参数化辨识模型与非参数化模型之间的误差为 0.074 8。PCB 冲击波测压系统参数化模型如图 2 所示。

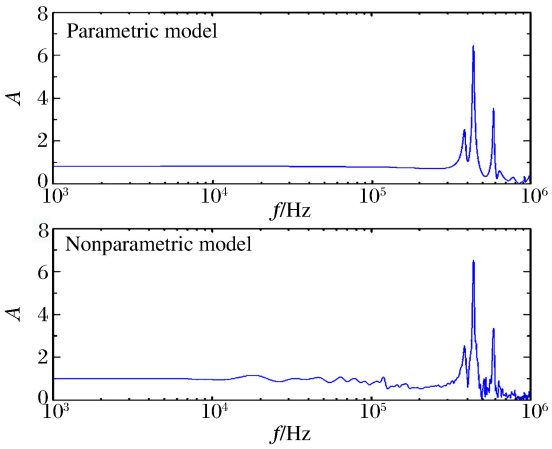

图 2 非参数化和参数化模型图

Fig. 2 Nonparametric and parametric model diagram

2.2 动态修正与补偿

对于一个线性时不变动态测量系统，若其传递函数为 $H(s)$，对其进行动态补偿的一般方法即串联一个动态特性补偿环节 $H_C(s)$，从而使得动态测量系统成为一个全通测量系统 $H_e(s)\equiv k_{☆}$。

实际上，全通测量系统无法实现，设计带通滤波器 $H_B(s)$作为补偿后的动态测量系统，使得系统的工作频带上限由 $w1$ 拓宽到 $w2$，补偿前后的效果示意图如图 3 所示，动态补偿滤波器

$$H_C(s)=H_B(s)/H(s) \tag{5}$$

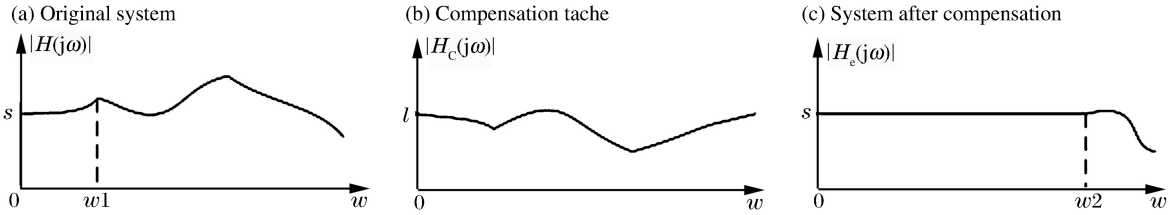

图 3 补偿前后系统幅频特性示意图

Fig. 3 Amplitude frequency characteristics of the system before and after the compensation

设计巴特沃斯滤波器作为补偿后的动态测量系统，对于任何参数化辨识模型，都有一个参数化补偿环节与其对应，使得补偿后的系统达到要求的频宽。

针对本文建立的 PCB 冲击波测压系统，设定补偿后的系统频宽为 900 kHz，根据冲击波测压系统的参数化模型，求取相应的动态补偿环节。补偿环节和补偿后的系统波特图如图 4～5 所示。

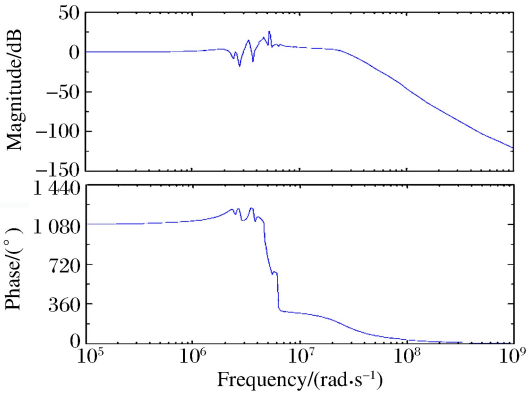

图 4 补偿环节波特图

Fig. 4 Bode diagram of the compensation tache

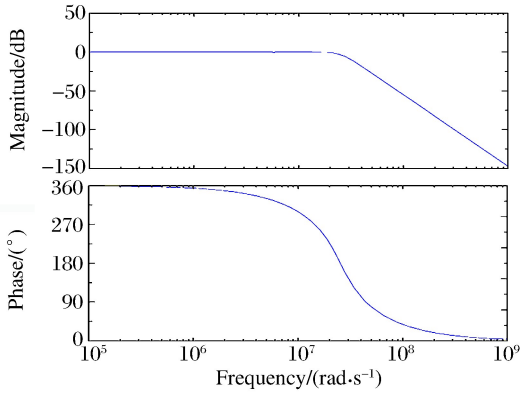

图 5 补偿后的系统波特图

Fig. 5 Bode diagram of the system after the compensation

2.3 峰值修正

对冲击波测压系统的反射压测量曲线 y(t)进行动态补偿与修正，得到修正后的信号

$$y_b(t)=F^{-1}[Y(j\omega)\ H_B(j\omega)] \tag{6}$$

选取 PCB 测压系统测量的三种典型冲击波反射压信号进行补偿，发现整体曲线形状不变，但是超压峰值变化较大。图 6 中蓝色是原始冲击波反射压曲线，红色是补偿后的冲击波反射压曲线。直观上可以看出补偿效果较好，原始信号中测压系统幅频特性引起的超调量和相频特性引起的超调量反向都能够得到修正。峰值的变化值见表 1。

表 1 PCB 测压系统原始冲击波反射压峰值和补偿后峰值对比

Table 1 Contrast of peak value from the original shockwave reflected pressure and the one after the compensation from the PCB measuring system

序号	原始冲击波曲线峰值/MPa	补偿后冲击波曲线峰值/MPa	与原始曲线峰值的偏差/%
1	1.496 9	1.567 5	4.7
2	8.771 2	9.213 8	5.0
3	0.924 8	0.855 8	−7.5

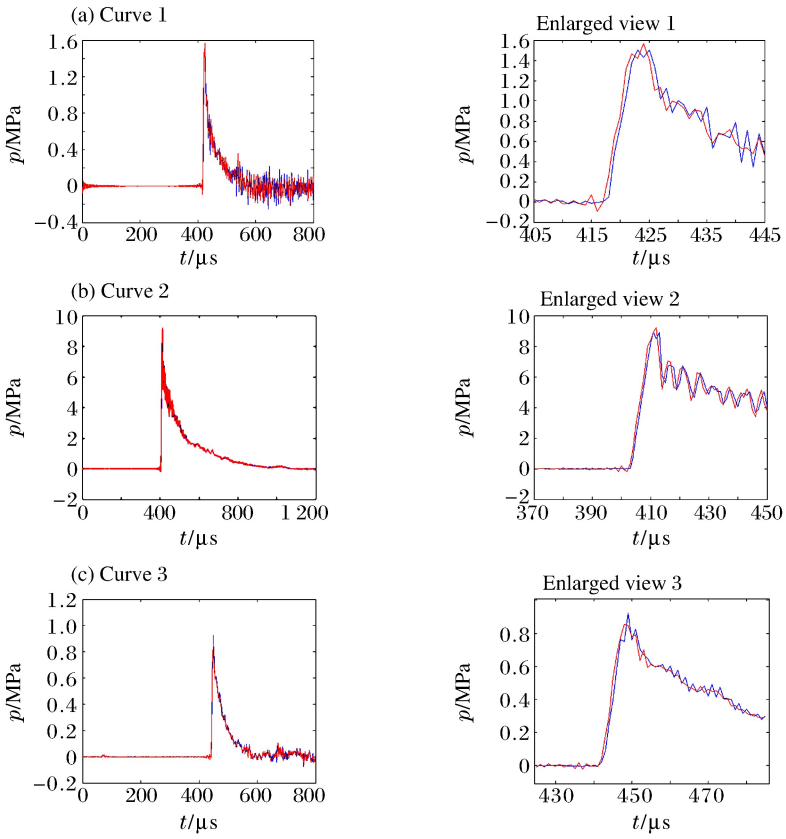

图 6　PCB 测压系统冲击波反射压曲线和补偿后的曲线

Fig. 6　Shockwave reflected pressure curve and the curve after the compensation from the PCB measuring system

可以看出，此动态修正与补偿方法能够很好地对冲击波反射压曲线进行补偿修正，尤其在峰值上修正得极为明显。该方法能够降低由于测压系统的动态特性不够带来的峰值误差，修正冲击波反射超压峰值。

3　结　论

(1)影响冲击波反射压峰值的因素为冲击波测压系统的带宽、压力测量方式、信号传输线长度三个方面。

(2)冲击波的入射压测量峰值可视为真值，反射压测量峰值与真值相差较大，需要进行动态修正和补偿。

(3)串联动态补偿环节的动态补偿方法拓宽了冲击波测压系统的工作频带，且降低了测压系统谐振频率处的幅值，改善了测压系统的动态特性；

(4)对使用的冲击波测压系统的反射压测量曲线进行动态修正与补偿，该方法能够明显降低由于测压系统的动态特性不够带来的误差，修正冲击波反射超压峰值。

(5)此动态修正与补偿方法根据冲击波测压系统的激波管动态校准曲线进行动态特性补偿，并对实际冲击波测量曲线进行修正，适用于任何单自由度二阶测压系统。

参考文献：

[1]　邹虹，胡永乐，刑园丁，等. 基于动态校准数据的压杆测试系统动态特性校正技术[J]. 爆炸与冲击，2011，31(2)：210-214.

Zou Hong, Hu Yongle, Xing Yuanding, et al. A correction technique on dynamic characteristics of a pressure bar

test system based on dynamic calibration data[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(2):210-214.
[2] 张大有.激波管在压力传感器动态性能校准和实验上的应用[J].宇航计测技术,2004,24(4):24-27.
Zhang Dayou. The application of shock tube in testing and calibrating the performance of pressure sensor[J]. Journal of Astronautic Metmlogy and Measurement, 2004,24(4):24-27.
[3] 刘金琨,沈晓蓉,赵龙.系统辨识理论及 MATLAB 仿真[M].北京:电子工业出版社,2013:258-269.
[4] 王跃钢.动态数学模型测试建模方法[M].西安:西安电子科技大学出版社,2012:38-39.
[5] 李鹏波,胡德文,张纪阳,等.系统辨识[M].北京:中国水利水电出版社,2010:27-30.

Dynamic correction and compensation method about the measuring curve of shockwave reflected pressure

Kong Lin[1], Su Jianjun[1], Yang Fan[2]
(1. *Xi'an Modern Chemistry Research Institute*, *Xi'an* 710065, *Shaanxi*, *China*;
2. *School of Mechanical Engineering*, *Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: In the present work, to obtain the accurate measuring curve of explosive shockwave reflected pressure, we analyzed the three factors that influence the peak value, i. e. the band width of the pressure test system, the pressure test method, and the length of the signal transfer wire, adjusted the dynamic calibration on the shockwave pressure measuring system using the shock tube, and obtained the dynamic characteristics of the system using the ideal method of differential. With the improved version of the levy method, the parameter model about the dynamic characteristics was built. The Butterworth filter was designed as the system after the compensation for the calculation of the dynamic compensation tache. This method can expand the work frequency segment of the pressure test system and reduce the amplitude of the inherent frequency point so that the shock wave reflected pressure curve was rectified. It was found that this rectification and compensation method can correct the peak value of the shockwave reflected pressure and reduce the error from the dynamic characteristics of the shockwave pressure measuring system. This study can significantly raise the peak value accuracy of the shockwave reflected pressure and provide technical support for weapon damage assessment.

Keywords: shockwave reflected pressure; peak value; parameter model; correction and compensation

(责任编辑 曾月蓉)