DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0871-05

基于动态特性补偿的冲击波测试数据处理方法*

赖富文[1,2],张志杰[1],张建宇[2],李　冬[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.中国白城兵器试验中心,吉林 白城 137001)

摘要:利用激波管对传感器进行动态标定,采用特殊白化滤波器广义最小二乘迭代法建立冲击波测试传感器的数学模型并对其动态特性进行分析,提出采用基于零极点相消原理补偿法来对传感器动态特性进行补偿。实际试验的测试数据处理应用表明,基于动态特性补偿的数据处理方法能够提高传感器动态特性和冲击波测试数据的准确度。

关键词:爆炸力学;数据处理;零极点相消原理;动态特性补偿;冲击波;压力传感器

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

测试冲击波信号不失真的条件是测试系统幅频特性的平直段是否覆盖被测信号的频谱,如果传感器的幅频特性平直段不能覆盖冲击波信号频谱,则被测信号的波形就会发生畸变,会造成较大的动态测试误差[1]。因此分析冲击波测试传感器的动态特性是测试冲击波的前提,是评价和分析测试精度的基础。当前,多数冲击波测试传感器只是按照理论设计给出传感器的固有频率,假设其为二阶系统,根据固有频率作为动态响应的依据。对传感器进行动态校准的也是当作二阶系统,从动态校准曲线直接求取阻尼和固有频率等参数,进而得到幅、相频特性。事实上,多数冲击波传感器的数学模型并不是典型的二阶系统,按照二阶系统得到的传感器动态特性就不准确,采用传统的低通滤波方法处理测试数据就会带来较大的误差。以压阻式压力传感器为例,选用模型辨识方法来获取冲击波测试传感器的传递函数和动态特性指标,并判断是否满足冲击波的测试要求。当传感器动态特性不满足测试要求时,提出采用动态特性补偿方法进行数据处理来提高测试精度。

对于传感器的动态特性补偿,国外相应的方法有单参数滤波法和反卷积补偿法[2-3]。在国内,有频率域修正法、数值微分法、叠加积分法、零极点相消原理补偿法和基于数学反演算法的多参数模型反滤波方法[1,4-5]。单参数反卷积方法、反卷积补偿法和多参数模型反滤波方法不能采用递归实现,运算量较大。频率域修正法、数值微分法和叠加积分法均没有考虑误差对处理结果的稳定性问题,对实测信号是难于适用的,因此本文中选用零极点相消原理的补偿法。

1　冲击波传感器的指标分析方法

1.1　传感器动态标定

冲击波信号的频率高达 100 kHz,传感器在使用中会受到具有微秒级的冲击波压力上升前沿的激励,要求用于标定的激励信号频谱分量高于冲击波信号。激波管可产生上升沿小于 1 μs、平台保持时间大于 5 ms 的阶跃压力信号,是理想的激励信号源[6],选用激波管作为系统的动态标定装置,如图 1 所示。图 2 为美国 ENDEVCO 公司生产的某支 8510C-50 型压阻式压力传感器的动态标定曲线。

1.2　传感器模型辨识

选用 K. Steiglitz 等[7]提出的一种迭代方法(GLS(SM)),即特殊白化滤波器广义最小二乘迭代法,它具有收敛速度快、辨识精度高等特点。选取 6 阶进行辨识,建立压力传感器的动态数学模型,得出其

* **收稿日期**:2014-05-07;**修回日期**:2014-08-11

第一作者:赖富文(1973—　),男,博士,高级工程师,lfw2003@sohu.com。

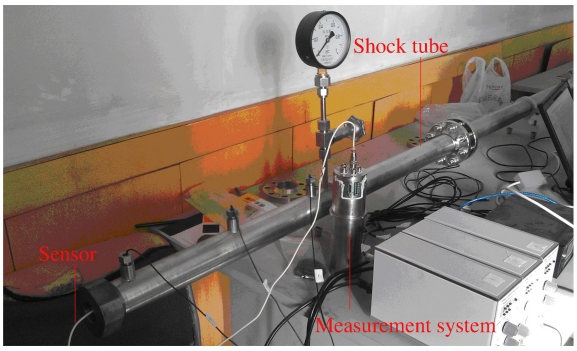

图 1 激波管实验装置

Fig. 1 Calibration experiment of shock tube

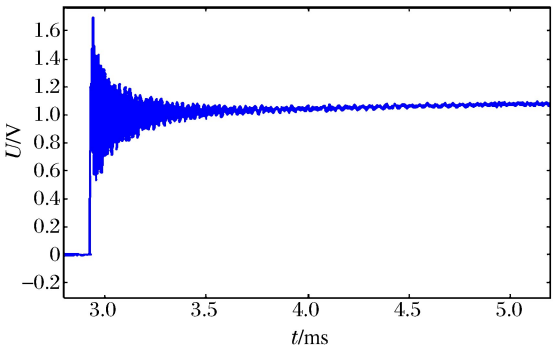

图 2 传感器动态标定曲线

Fig. 2 Dynamic calibration curve of sensor

离散传递函数形式为：

$$G(z)=\frac{b_0+b_1Z^{-1}+b_2Z^{-2}+b_3Z^{-3}+b_4Z^{-4}+b_5Z^{-5}+b_6Z^{-6}}{1+a_1Z^{-1}+a_2Z^{-2}+a_3Z^{-3}+a_4Z^{-4}+a_5Z^{-5}+a_6Z^{-6}}$$

传递函数各系数值分别为：$b_0=0.219\ 545$，$b_1=-0.704\ 395$，$b_2=0.943\ 348$，$b_3=-0.997\ 469$，$b_4=1.116\ 571$，$b_5=-0.807\ 486$，$b_6=0.230\ 211$，$a_1=-4.896\ 553$，$a_2=10.618\ 130$，$a_3=-13.357\ 093$，$a_4=10.368\ 354$，$a_5=-4.653\ 092$，$a_6=0.920\ 576$。

对所建模型输入阶跃信号进行仿真计算，得到仿真输出。仿真输出与原始输出对比如图 3 所示，从图中可以看出，二者吻合较好。

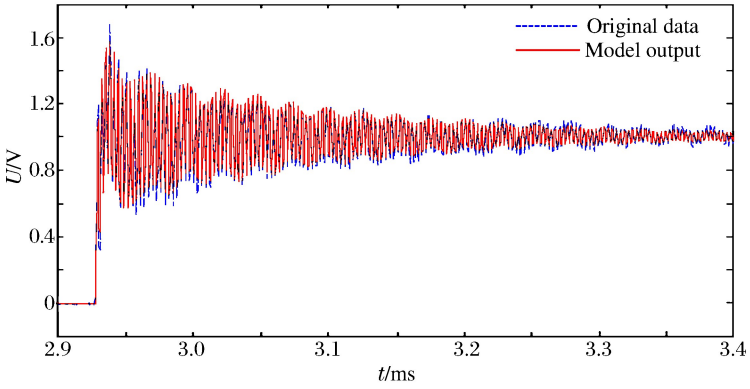

图 3 传感器的仿真输出和实际输出比较

Fig. 3 Simulation output of sensor model and original data

模型在实际应用之前，需要进行模型检验。本文中通过检验系统模型输出与原始输出残差的白噪性来判定模型的好坏。思路为求取并判断残差，如果残差是(或近似是)零均值序列，则认为所获取的模型是较好的模型，否则可能是不好的。上述模型的残差均值为 $-0.000\ 14$，其值较小，说明残差具有白噪性，辨识的数学模型是实用的。

1.3 传感器指标分析

1.3.1 频率域性能指标

在传递函数中，令 $z=e^{j\omega}$，可得到传感器的频率特性和相频特性，并得出工作频带指标。传感器的幅频特性见图 4，从图中可以看出，主谐振频率为 332 kHz，在低频段还有小的谐振峰，受其影响，系统幅频特性显著降低，幅值误差为±2%时的工作频带为 10 kHz；幅值误差为±5%时的工作频带为16 kHz；幅值误差为±10%时的工作频带为 21.5 kHz；幅值误差为±3 dB 时的工作频带为 34.5 kHz，不能满足冲击波信号有效带宽 100 kHz(±3 dB)的要求[8]，如果直接采用低通滤波器的数据处理方法会带来较大误差。

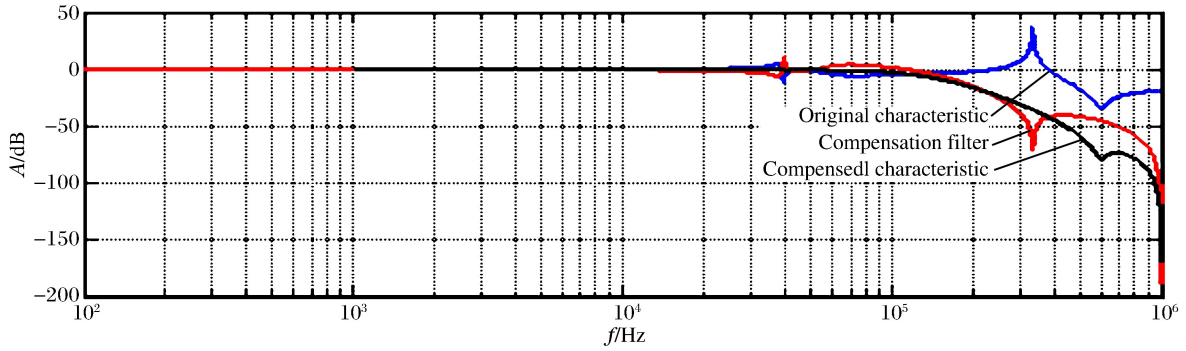

图 4 补偿前后传感器的幅频特性

Fig. 4 Original characteristic, compensation filter and compensated characteristic

1.3.2 时间域性能指标

从图 3 中仿真响应曲线可以求出传感器的时间域指标：超调量为 57.0%，上升时间为 3.5 μs，峰值时间为 11.0 μs，稳态响应时间为 382.0 μs(±5%)，可见传感器的稳态响应时间较长。

从指标分析可知，需要对传感器动态特性进行补偿，以使其工作频带能够满足冲击波测试要求。

2 冲击波传感器的动态特性补偿方法

测试系统的动态特性与其传递函数的极点位置密切相关，对传递函数的零极点进行分析，考察它们对动态性能的影响，然后采用零极点相消补偿原理方法，即串接一个补偿环节，重新调节加入的极点位置，而将原来不符合要求的极点消去，使系统动态特性得以改善，这就是零极点相消补偿法补偿测试系统动态特性的基本思路[4]。

按零极点相消补偿原理方法设计步骤[1,4]，设计了补偿滤波器补偿 $G_C(z)$，补偿后等效系统形式为：

$$H(z)=G(z)G_C(z)=\frac{b_0z^4+b_1z^3+b_2z^2+b_3z+b_4}{z^4+a_1z^3+a_2z^2+a_3z+a_4}$$

式中各系数分别为：$b_0=0.001\ 925$，$b_1=0.005\ 086$，$b_2=0.006\ 639$，$b_3=0.005\ 723$，$b_4=0.002\ 244$，$a_1=-2.754\ 480$，$a_2=2.946\ 422$，$a_3=-1.447\ 633$，$a_4=0.005\ 723$。

该传感器补偿前后幅频特性对比如图 4 所示。从图中可知，补偿后系统工作频带由 34.5 kHz(±3 dB)提高到 100 kHz(±3 dB)。传感器补偿前后阶跃响应曲线对比如图 5 所示，从图中可以看出，补偿后时间域指标为：超调量为 6.1%，上升时间为 3.5 μs，峰值时间为 7.0 μs，稳态响应时间为 8.0 μs(±5%)。可见，传感器动态特性补偿后频域和时域指标得到显著提高。

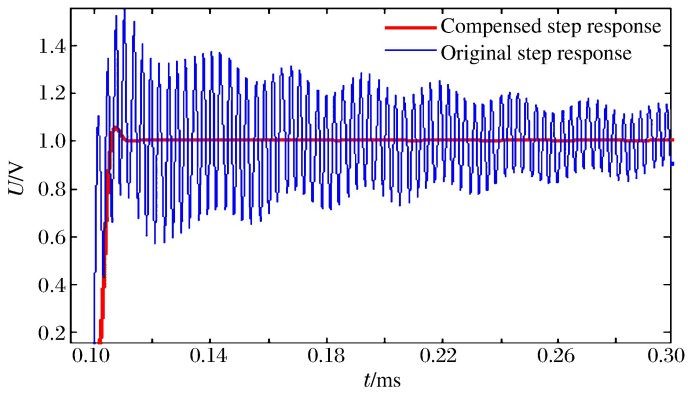

图 5 补偿前后阶跃响应输出对比

Fig. 5 Step response before and after compensation

使用上面设计的补偿滤波器对校准曲线进行修正，得到修正后的校准曲线，如图 6 所示。从图中可以看出，修正后的校准曲线由原来过冲 64.5%变为 4.3%。直接采用截止频率为 100 kHz 的二阶巴特沃斯低通滤波器对传感器的动态校准曲线进行处理，处理结果如图 7 所示。从图中可以看出，处理后传感器过冲从 64.5%变为 21.3%，可见，直接采用低通滤波数据处理方法误差较大。

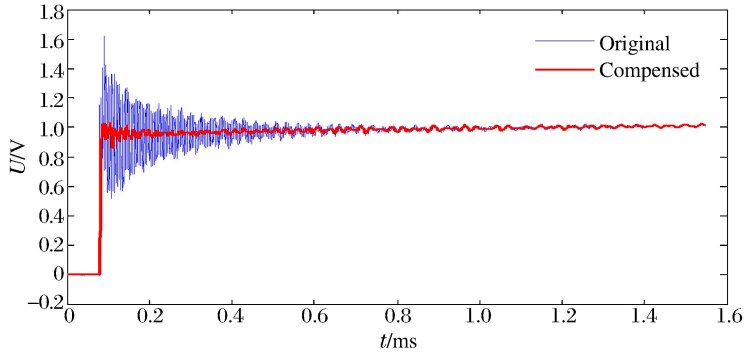

图 6 动态校准曲线修正前后对比

Fig. 6 Dynamic calibration curve before and after correction

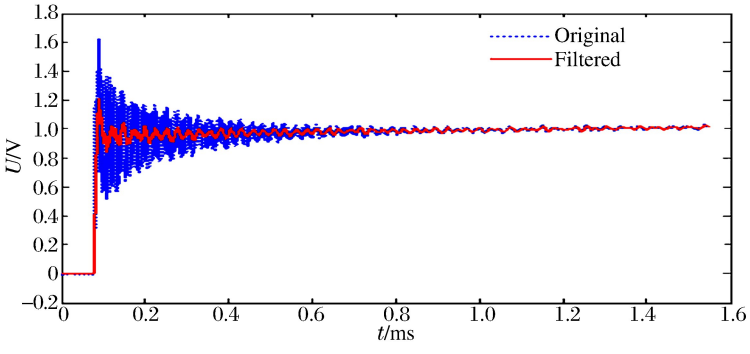

图 7 校准曲线直接低通滤波前后对比

Fig. 7 Dynamic calibration curve before and after filtering

3 补偿滤波器在实验测试数据处理中的应用

测试系统建立时，需对每支冲击波测试传感器进行动态标定，并设计相应的补偿滤波器。图 8 为某型战斗部静爆威力某点位实测冲击波超压曲线，采用上述方法对数据进行修正处理，结果如图 8 所示。从图中可以看出，原始压力峰值为 80.3 kPa，修正后值为 63.3 kPa，更加接近真实值。

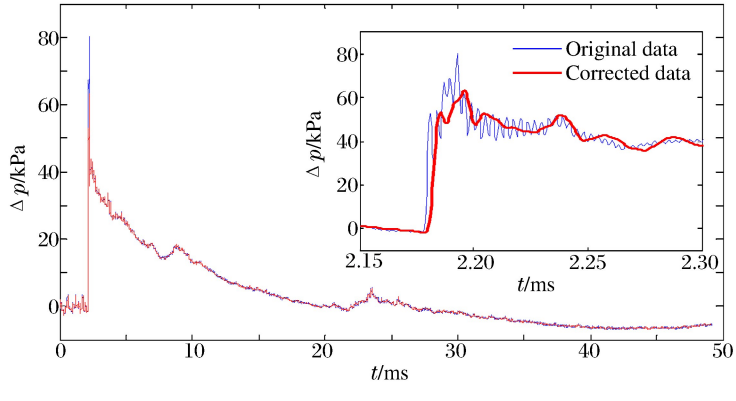

图 8 实际测试曲线修正前后对比

Fig. 8 Testing data before and after correction

4 结 论

(1)用于冲击波测试的压力传感器不能简单地看作二阶系统，应当进行动态标定，然后通过模型辨

识方法来建立数学模型，分析动态特性。

(2)对测试系统和实测数据的成果应用表明，动态特性补偿方法可以拓宽测试系统的工作频带，提高冲击波测试数据的准确度。

参考文献：

[1] 王跃科，叶湘滨，黄芝平，等. 现代动态测试技术[M]. 北京：国防工业出版社，2003：250-266.

[2] Nahman N S, Guillaume M E. Deconvolution of time domain waveforms in the presence of noise[R]. National Bureau of Standards Technical Note 1047. NBS, Boulder, CO, 1981.

[3] Raid S M, Stafford R B. Impulse response evaluation using frequency domain optimal compensation deconvolution [C]// Proc 23rd Midwest Symp on Circuits and Systems. Toledo, OH, 1980：521-525.

[4] 黄俊钦. 测试系统动力学[M]. 北京：国防工业出版社，1996：342-351.

[5] 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.
Zhang Zhi-jie, Zu Jing, Zhang Ai-ping. Research on inverse filtering with multiparameter model[J]. Acta Metrologica Sinica, 1999, 20(2)：143-150.

[6] 刘迎春，叶湘滨. 传感器原理设计与应用[M]. 长沙：国防科技大学出版社，1998：348-354.

[7] Steiglitz K, Mcbride L E. A technique for the identification of linear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Contral, 1965(10)：461-464.

[8] 孙忠良，胡成，史德民，等. 对国内外一些压力标定系统的对比研究[J]. 兵器试验，2002(2)：15-23.
Sun Zhong-liang, Hu Chen, Shi De-ming, et al. Comparative of the domestic and international pressure calibration system[J]. Ordnance Test, 2002(2)：15-23.

Processing method of shock wave test data based on dynamic characteristic compensation

Lai Fu-wen[1,2], Zhang Zhi-jie[1], Zhang Jian-yu[2], Li Dong[2]

(1. *Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, North University of China, Taiyuan* 030051, *Shanxi, China*;
2. *Baicheng Ordnance Test Center of China, Baicheng* 137001, *Jilin, China*)

Abstract: First, the pressure transducer is calibrated using the shock tube. Second, the mathematical model of the pressure transducer is established through the system identification with Generalized Least Square Iterative Method with Special Whitening Filter. According to the model the dynamic characteristics can be obtained. Finally, the dynamic characteristics compensation method based on the zero pole cancellation method is proposed and applied to data processing. Practical application shows that data processing method based on dynamic compensation can improve the dynamic characteristics of the sensor and the accuracy of the test data.

Key words: mechanics of explosion; data processing; zero pole cancellation method; dynamic characteristics compensate; blast wave; pressure transducer

(责任编辑　曾月蓉)