文章编号:1000-5773(2013)06-0921-07

改进的高压传感器准δ函数脉冲压力动态校准方法*

张　瑜[1],祖　静[2,3],张红艳[1]

(1.中北大学计算机与控制工程学院,山西太原　030051;
2.中北大学电子测试技术重点实验室,山西太原　030051;
3.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:针对现有准δ函数脉冲压力校准法存在的缺点,提出了一种预先给压力传感器施加高静压,再利用子弹撞击霍普金森杆产生幅值较小的准δ信号激励传感器,获得压力传感器频响特性的动态校准方法。阐述了准δ函数脉冲压力校准原理,分析了准δ信号的脉宽与频率校准范围、校准精度三者之间的关系,建立了动态校准系统。该校准方法实现了在实际工作压力下校准压力传感器,可校准的下限频率严格地达到零频。就目前的校准技术而言,对传感器施加的最大静压是800 MPa,产生的准δ信号的脉宽为7～10 μs,可校准的频率范围为0～20 kHz,幅频特性校准误差为5%。

关键词:高压传感器;动态校准;频率响应;准δ函数
中图分类号:TP212　　**文献标识码**:A

1　引　言

动态高压测量是兵器测试领域的主要项目之一,例如枪炮射击时膛内火药气体的压力值最大可达700 MPa,上升时间由微秒到毫秒量级,准确地测量这类压力对研究兵器设计理论和分析武器性能都有重要的意义。获得压力传感器在其工作压力下的动态特性是研究高动压测试技术的关键,是保证测试数据准确可靠的前提[1-3]。

只有通过动态校准才能确定压力传感器的动态技术指标或动态数学模型。压力传感器动态校准方法有激波管校准法、落锤法、准δ函数脉冲压力校准法和相对动态校准法[4-6],具备校准能力并形成计量标准的校准装置有高压气体激波管、预应力阀杆式阶跃压力发生器和正弦压力发生器[7]。利用这些校准方法和校准装置获得的高压传感器的动态特性或多或少都有局限。

准δ函数脉冲压力校准法是压力传感器的频域校准方法,基本原理是根据线性系统的冲激响应求出频响函数。如果以近似的冲激脉冲作激励源激励被校准高压传感器,则传感器输出信号的傅里叶变换就是其频响特性。现有的准δ函数脉冲压力发生器是利用垂直飞片打击液面,在液盂里产生压力窄脉冲,脉宽是微秒级的[7],压力可达500 MPa。该方法的缺点是,当压力波反射时会产生幅值很大的拉应力(相对于常压),此拉应力大于压电晶体的预紧力,使压力传感器的垂链膜片被拉出,损坏传感器。

针对现有准δ函数脉冲压力校准法存在的缺点和不足,本研究提出了在高静压下对传感器进行动态校准的方法。该方法是预先给传感器施加高静态压力,再利用子弹撞击霍普金森杆产生小压力值、窄脉宽的半正弦信号,用此信号激励传感器,通过对比激励压力信号和被测传感器对于激励信号的响应,

* **收稿日期**:2012-02-15;**修回日期**:2012-06-07
作者简介:张　瑜(1979－),女,讲师,主要从事动态测试理论及测试技术研究. E-mail:snow-zhang@163.com

即可得到被校传感器的频率响应特性。

2 准 δ 信号的特点及校准原理

按照一般的线性系统理论，如果用理想的冲激函数激励某系统，那么其时域响应就是该系统的脉冲响应，此脉冲响应的傅里叶变换就是该系统的频响特性。

从数学角度讲，冲激函数（δ 函数）的宽度无限小，幅值无穷大，积分面积为 1，它的频谱从 0 频至∞都保持为常数，因此只要任一个窄脉冲的归一化幅相频谱，由零频开始一直到某一上限频率内与常数之差在规定的误差范围内，就可以在这个频率范围内把该窄脉冲近似地看成是冲激函数，或称之为准 δ 函数。上述频率范围也就是该准 δ 函数用于动态校准时的适用频带，在这个频率范围内，传感器输入信号的频谱可以简单地当作常数处理。

严格的冲激函数在物理上是无法实现的，只能用大幅度、窄脉宽的脉冲信号近似代替。在工程上可以通过高压脉冲放电、高速冲击和爆炸等方法得到近似于冲激函数的压力脉冲（准 δ 脉冲）[4]，再用它激励压力传感器，就可获得一定精度的传感器与测试系统的频响分析。从校准的意义上讲，其实质是以近似的冲激脉冲作激励源。

图 1 和图 2 分别是不同波形不同脉宽的准 δ 信号及其频谱，从图 2 可以看出，准 δ 信号的频谱是从零频开始的，其频谱从零频到一定的频率范围都是平直的，信号脉宽越窄，平直段越长，可校准的频率越高，频谱与信号的脉宽有关，信号的形状影响不大。任意时限脉冲都可以作为求取传感器频率响应特性的激励。

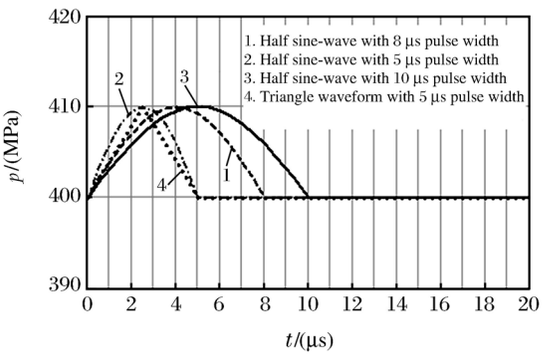


图 1 不同波形、不同脉宽的准 δ 信号

Fig. 1 Quasi-δ pressure signals with different shapes and different pulse widths

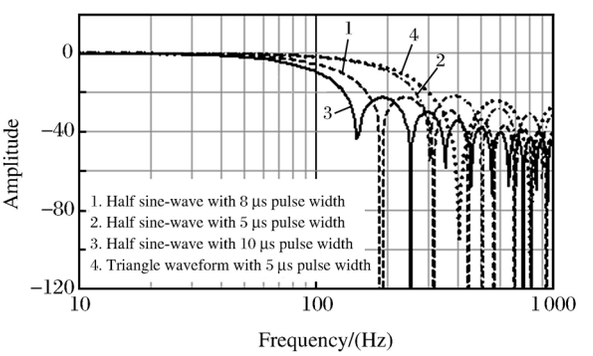


图 2 不同波形、不同脉宽的准 δ 信号的归一化频谱

Fig. 2 Normalized spectrum diagram of quasi-δ pressure signals in Fig. 1

高压传感器的频率响应特性在高压和低压下有相当明显的差异。只有在实际工作压力条件下对传感器进行校准，才能获得真实可靠的频率响应特性。本研究所设计的高压校准系统预先给传感器施加初始高压，使传感器先受到高静压的作用；再利用准 δ 函数发生装置产生小压力值、微秒级脉宽的半正弦激励信号。由响应速度更高的压力传感器测得激励信号 $f(t)$，由被校准的压力传感器测得响应信号 $y(t)$，用双通道瞬态波形记录仪记录这两个信号。设 $H(\omega)$ 为被校准压力传感器的频率响应特性，则有

$$\begin{aligned} F(\omega) &= fft(f(t)) \\ Y(\omega) &= fft(y(t)) \\ H(\omega) &= \left|\frac{Y(\omega)}{F(\omega)}\right| \\ H_{\mathrm{dB}}(f) &= 20\lg\frac{H(f)}{H(0)} \end{aligned} \tag{1}$$

得到在准 δ 信号激励下的压力传感器输出信号及准 δ 信号的脉宽，经过傅里叶变换，可直接求出传感器的频率响应特性。

对于绝大多数动压测量来讲,信号的低频分量占信号能量的绝大部分,高压传感器低频段的频率响应特性在很大程度上决定了测试精度,因此压力传感器可校准的下限频率不能过高。准 δ 函数脉冲压力校准法避开了传统的校准方法中必须精确地已知激励波形的难点,同时使频率响应特性可校准的下限频率严格地达到零频[10]。预先对被校准压力传感器施加高静压,提高被校准传感器的测量零点,保护传感器在校准过程中不被损坏。

3 激励信号的脉宽与频率校准范围和校准精度的关系

不失一般性,假设作为激励信号的准 δ 信号 $f(t)$是矩形单脉冲,其脉宽为 τ,压力幅值为 p_0,波形表达式为

$$f(t)=\begin{cases}p_0 & 0\leqslant t\leqslant\tau\\ 0 & t<0,t>\tau\end{cases} \tag{2}$$

信号 $f(t)$的频谱 $F(\omega)$为

$$F(\omega)=\int_0^{\tau}f(t)\mathrm{e}^{-j\omega t}\,\mathrm{d}t\approx\int_0^{\tau}f(t)(1-j\omega t-\frac{\omega^2t^2}{2}+\frac{j\omega^3t^3}{6})\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

$f(t)$的归一化幅频谱为

$$\frac{|F(\omega)|}{|F(0)|}=\sqrt{(1-\frac{\omega^2\tau^2}{6})^2+(-\frac{\omega\tau}{2}+\frac{\omega^3\tau^3}{24})^2}\approx1-\frac{\omega^2\tau^2}{24} \tag{4}$$

幅频误差为

$$\varepsilon_{\mathrm{A}}\approx\frac{\omega^2\tau^2}{24} \tag{5}$$

如果可校准的频率范围是 0～f,且幅频误差小于 5%[11],则激励信号 $f(t)$的脉宽与最大的校准频率之间应满足

$$\varepsilon_{\mathrm{A}}\approx\frac{\omega^2\tau^2}{24}=\frac{(2\pi f)^2\tau^2}{24}\leqslant0.05 \tag{6}$$

即

$$\tau\leqslant\sqrt{0.05/(1.645f^2)} \tag{7}$$

表 1 激励信号脉宽与频率校准范围的对应关系

Table 1 The relation between pulse width of quasi-δ signal and frequency range calibrated

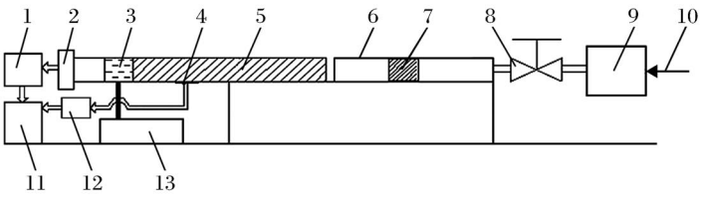
Frequency f/(kHz)	Pulse width τ/(μs)	Frequency f/(kHz)	Pulse width τ/(μs)	Frequency f/(kHz)	Pulse width τ/(μs)	Frequency f/(kHz)	Pulse width τ/(μs)
5	34.87	20	8.72	40	5.78	100	1.74
10	17.34	30	7.71	50	3.49		

从表 1 可知,校准的频率范围越宽,要求准 δ 信号的脉宽越窄。在幅值误差小于 5%的条件下,如果校准的频率范围是 0～20 kHz,则激励信号的脉宽必须小于 8.72 μs。

准 δ 函数脉冲压力校准法仅限制激励脉冲的宽度,而不限制激励的波形,并且校准的频率响应特性采用以零频幅值归一化,因此不需要精确地测量激励脉冲幅值。

4 动态校准系统组成

动态校准系统主要由油腔、应变片、霍普金森杆、气枪管、弹丸、电磁阀、高压气腔、高压气源、电荷放大器、数据采集系统、活塞式压力计等组成,如图 3所示。校准系统工作原理:事先由活塞压力计在封闭式油腔中施加静压,此时传感器感受到高静压。高压气体通过电磁阀推动弹丸高速运动,子弹撞击霍普金森杆,产生幅值较小的准 δ 压力脉冲,通过高精度的数据采集系统,将应变信号和传感器输出信号一起采集,再根据校准原理处理数据,最后得到被校传感器的频响特性。



1. Charge amplifier; 2. Pressure sensor; 3. Oil chamber; 4. Strain gauge; 5. Hopkinson bar; 6. Gas barrel; 7. Bullet; 8. Solenoid valve; 9. High-pressure air cavity; 10. High-pressure gas source; 11. Data acquisition system; 12. Super dynamic strain gauge; 13. Piston gauge

图 3 动态校准系统示意图

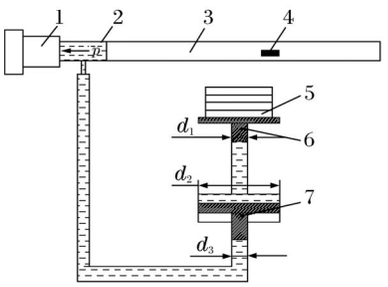
Fig. 3 Block diagram of dynamic calibration system

活塞式压力计通过甘油油腔产生高静压,通过加在托盘上的砝码改变压力值,如图 4 所示。

假设砝码的质量是 m,活塞直径 $d_1=12$ mm,倍压活塞直径 $d_2=170$ mm,活塞直径 $d_3=12$ mm,则通过甘油油腔产生的压力 p 等于

$$p=\frac{\dfrac{m}{(\pi/4)d_1^2}(\pi/4)d_2^2}{(\pi/4)d_3^2} \tag{8}$$

砝码的质量最大可加到 50 kg,根据公式(8)可计算出通过油腔产生的最大压力是 870 MPa。改变砝码的质量,可以产生不同的静压值。



1. Pressure sensor; 2. Oil chamber; 3. Hopkinson bar; 4. Strain gauge; 5. Weigth; 6. Piston; 7. Pressure multiplier piston

图 4 活塞式压力计

Fig. 4 Piston gauge

油腔中添加甘油是因为甘油比一般液体的声速高、波损小,当子弹撞击霍普金森杆时有利于减少应力波的反射,增加应力波的入射,从而增大作用到被校传感器上的压力幅值。

准 δ 信号是通过子弹撞击霍普金森杆来产生的。子弹与霍普金森杆的材料相同,子弹的直径略小于霍普金森杆的直径。根据一维应力波理论[12],撞击时产生的应力波脉冲宽度 τ 与子弹的长度 L 以及弹性纵波在霍普金森杆材料中传播的波速 c 满足

$$\tau=\frac{2L}{c} \tag{9}$$

校准系统中使用的子弹长度为 6 mm,根据(9)式可计算出应力波脉冲宽度的理论值

$$\tau=\frac{2L}{c}=\frac{2\times6\times10^{-3}}{5\,012}\ \text{s}\approx2.4\ \mu\text{s}$$

假设子弹的速度是 v_0,子弹和霍普金森杆的材料密度是 ρ,则应力波的幅值 σ 等于

$$\sigma=\rho c v_0/2 \tag{10}$$

改变子弹的长度可以获得不同脉宽的准 δ 信号,目前利用这种方法产生的准 δ 信号的脉宽是 7～10 μs[13]。

为了测量传感器的激励信号,将应变片贴在霍普金森杆上,杆上的应变变化就是激励信号的变化。

5 校准实验及数据处理

采用校准系统对 Kistler 6215 型压电式压力传感器进行了动态特性校准,该传感器的上升时间小于 1 μs,压力量程是 600 MPa,固有频率大于 240 kHz。该传感器主要用于枪炮膛压信号的测量,枪、炮膛压信号的压力上升时间为 2～6 ms,持续时间在 10～30 ms 范围内,有效带宽为 0～10 kHz。

对被校传感器施加 400 MPa 的静压,保压数分钟,然后利用子弹撞击霍普金森杆产生幅值较小的

准 δ 压力脉冲,同时采集传感器输出信号和应变信号,再根据校准原理对实验数据进行处理,最后得到被校准传感器的频率响应特性。

图 5 是被截断应变片的输出信号,即压力传感器的激励信号,信号脉宽约为 8 μs。图 6 是激励信号的对数频谱。图 7 是被截断的压力传感器的响应信号,图 8 是响应信号的对数频谱。实际上应变片输出信号和传感器的响应信号都是由多个脉冲信号组成的,因为霍普金森杆中反射波的存在,使应变片和传感器产生第二个、甚至更多的响应脉冲,但是只有第一个脉冲才能被作为激励信号或响应信号。

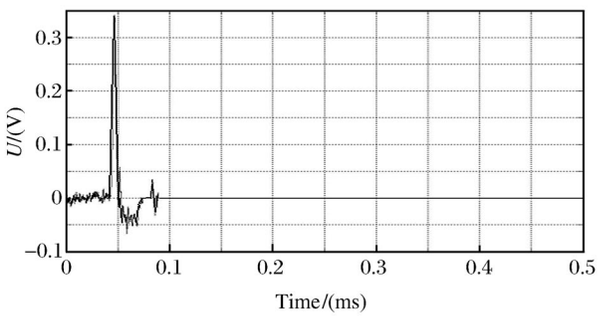


图 5　截断的应变片信号(激励信号)

Fig. 5　Truncated signal of stress wave (excitation signal)

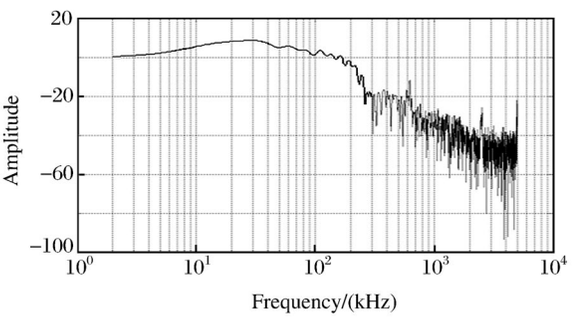


图 6　应变片信号的对数频谱图

Fig. 6　Spectrum diagram of stress wave with signal truncated

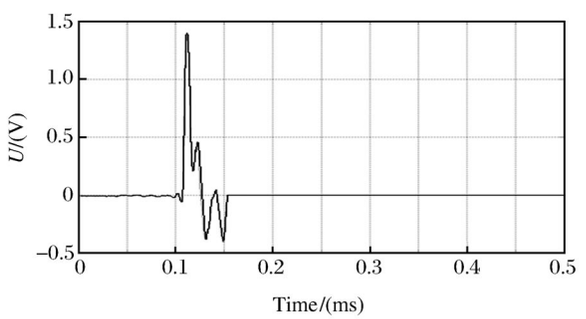


图 7　截断的压力传感器的响应信号

Fig. 7　Truncated response signal of pressure sensor

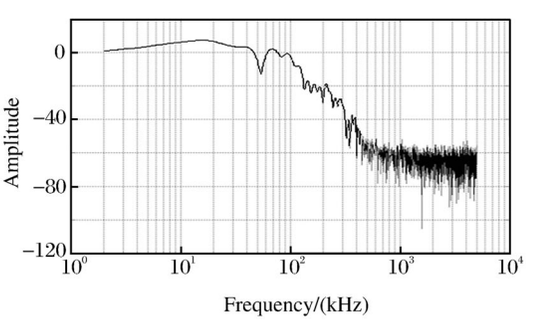


图 8　压力传感器响应信号的对数频谱图

Fig. 8　Spectrum diagram of pressure sensor with signal truncated

图 9 是压力传感器的频率响应曲线(相对于 0 Hz),测试中由于噪声的存在,使得频响曲线的平直段有些不规则。根据频响特性曲线可以获得传感器的频率域动态性能指标。从图 9 可以看出,该传感器的谐振频率约为 252 kHz,其频响特性在 0～20 kHz 是比较平坦的,在 0～20 kHz 范围内的频响特性与理想条件下传感器频响特性的误差小于 0.2 dB。如果该压力传感器应用于枪、炮膛压测试,此传感器的有效带宽能够覆盖被测膛压信号的有效带宽,能够保证压力测试的精度和准确度。

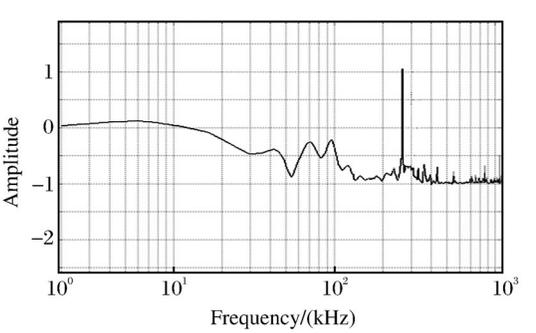


图 9　压力传感器的频率响应曲线

Fig. 9　Frequency response characteristic of pressure sensor

6　结　论

本研究提出的高压传感器准 δ 函数脉冲压力动态校准方法,能够获得高压传感器在其工作压力下的频率响应特性,能够反映传感器实际的工作特性。在动压测试中,压力传感器低频段的传输特性在很

大程度上决定了测试精度，该方法使频率响应特性可校准的下限频率能够严格地达到零频，改进后的校准实验系统不会损坏传感器的压电元件，数据处理过程简单，是频域特性校准的理想方法。就目前的校准技术而言，对传感器施加的最大静压是 800 MPa，利用子弹撞击霍普金森杆产生的窄脉冲信号的脉宽约为 8 μs，可校准的频率范围是 0～20 kHz，幅频特性校准误差是 5%。实验结果表明，改进的高压传感器准 δ 函数脉冲压力动态校准方法是可行的，但校准系统仍然存在一些问题，还需要改进和完善。例如：需要改进高压油腔的密封方法和校准数据的处理方法，需要减小准 δ 信号脉宽，以提高可校准的频率范围。可以通过减小子弹长度或采用电雷管爆炸的方法产生更窄脉宽的准 δ 信号。本研究提出的校准方法同样适用于加速度传感器、瞬态高温传感器等多种传感器频率响应特性的校准，有必要进一步完善，并不断充实。

References:

[1] Guo W, Yu T C, Li Z L, et al. Dynamic calibration of sensitivity of shock wavepressure sensor [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(3): 62-64. (in Chinese)
郭 炜，俞统昌，李正来，等. 冲击波压力传感器灵敏度的动态校准 [J]. 火炸药学报，2006，29(3)：62-64.

[2] Dong B Y, Du H M, Zu J. The blast wave overpressure measuring system based on wireless-control [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(2): 279-281. (in Chinese)
董冰玉，杜红棉，祖 静. 基于无线控制的冲击波超压测试系统 [J]. 传感技术学报，2010，23(2)：279-281.

[3] Li H B. The research on experiments of high pressure dynamic calibration [J]. Experimental Technology and Management, 2007, 24(9): 29-31. (in Chinese)
李红斌. 高压动态校准实验研究 [J]. 实验技术与管理，2007，24(9)：29-31.

[4] Pan D H, Lu H N. An automatic dynamic response calibration system for high-pressure transducers [C]// Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. San Diego, 1988: 43-46.

[5] Gorbunov S F, Tsypin B V. Linearization of calibration characteristics of capacitance pressure sensors [J]. Measurement Techniques, 2010, 53(10): 1113-1117.

[6] Kuznetsov E A. Automatic complex for determining static and dynamic characteristics of pressure transducers over a wide temperature range [J]. Measurement Techniques, 1993, 36(6): 682-686.

[7] Changcheng Institute of Metrology & Measurement. JJG 624－2005 Dynamic pressure transducers [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2005. (in Chinese)
北京长城测试计量研究所. JJG 624－2005 动态压力传感器检定规程 [S]. 北京：中国计量出版社，2005.

[8] Xiao F, Gao D X, Fang X J. The dynamic calibration theory and practice of high-pressure sensor [J]. Journal of Test and Measurement Technique, 1994, 8(2): 69-75. (in Chinese)
肖 峰，高德香，方向君. 高压传感器动态校准的理论分析与实践 [J]. 测试技术学报，1994，8(2)：69-75.

[9] Zhang D Q, Wang Y. Research on dynamic measurement method for pressure transducer [J]. Transducer and Micro System Technologies, 2007, 26(6): 23-25. (in Chinese)
张东青，王 烨. 压力传感器动态测量方法的研究 [J]. 传感器与微系统，2007，26(6)：23-25.

[10] Zu J, Ma T H. Implantation dynamic testing and calibration techniques [C]//Proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology. Canada, 2008: 1663-1666.

[11] Huang J Q. Dynamics of Testing System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996: 32-33.
黄俊钦. 测试系统动力学 [M]. 北京：国防工业出版社，1996：32-33.

[12] Wang L L. Foundation of Stress Wave [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 42-45.
王礼立. 应力波基础 [M]. 2 版. 北京：国防工业出版社，2005：42-45.

[13] Gao P. Quasi-δ function calibration of dynamic characteristic of high-pressure transducer [D]. Taiyuan: North University of China, 2007.
高 萍. 高压传感器准 δ 动态校准系统的研究 [D]. 太原：中北大学，2007.

Improved Quasi-δ Function Pulse Pressure Dynamic Calibration of High-Pressure Transducer

ZHANG Yu[1], ZU Jing[2,3], ZHANG Hong-Yan[1]

(1. *School of Computer and Control Engineering, North University of China, Taiyuan* 030051, *China*;
2. *Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Taiyuan* 030051, *China*;
3. *Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement (Ministry of Education), North University of China, Taiyuan* 030051, *China*)

Abstract: Based on the analysis of shortcomings existed in quasi-δ function calibration method, a dynamic calibration method was proposed. In this method, a pressure sensor was under high static pressure in advance, and then a bullet was used to impact Hopkinson bar for generating a quasi-δ function signal with small amplitude, which excited the sensor being calibrated, and finally a frequency response characteristics of the sensor was obtained. The principle of quasi-δ function dynamic calibration method was introduced. The relation of pulse-width of quasi-δ function signal, calibrated frequency range, and calibration precision was analyzed. The dynamic calibration system was established. This calibration method realized dynamic calibration of high pressure sensor under actual working pressure, and realized the tracing from zero frequency to a certain frequency needed. On the current technical level, the maximum static pressure is 800 MPa, the pulse width of the quasi-δ function signal is within 7 μs to 10 μs, the calibrated frequency range is from 0 to 20 kHz, and calibration error of amplitude-frequency characteristics is 5%.

Key words: high-pressure transducer; dynamic calibration; frequency response; quasi-δ function