

微型电子测压器校准系统的合理性论证

注：国家重点实验室基金资助项目(项目编号：9140C120704070C12)

摘要：为确保微型电子测压器在高温、高压、高冲击的实测环境中的测试精度，微型电子测压器应用于实际测试前，都要在模拟应用环境下被校准，为了证明微型电子测压器校准系统的合理性，介绍了标准测试系统的时域静态校准，标准测试系统的动态响应特性，标准测试系统的误差要求 3 方面的内容。分析结果表明，使用该校准系统能保证被校准后的微型电子测压器的可靠性和测试精度，满足测试要求。

关键词：测试计量仪器；动态校准；动态响应；合理性

中图分类号：TM930.12 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2011)07-0022-04

袁月华 裴东兴 张瑜

一、引言

火炮膛内动态压力参数是火炮在研发、设计和验收时的重要参数之一，对于炮膛强度的检验、炮弹外弹道初速的预测和发射药性能的验证都有十分重要的意义^[1-3]。微型电子测压器作为火炮膛压测试的理想仪器，其校准精度的高低与测试精度的高低有直接关系^[4-5]。为保证较高的测试精度，在模拟应用环境下使用了校准系统对其进行了准动态校准。使用该校准系统校准后的电子测压器，应用于实测试验后得到的测试数据表明，被校准后的电子测压器的可靠性和测试精度均能满足测试要求。但是该校准系统的合理性尚未论证，基于此从标准测试系统的时域静态校准、标准测试系统的动态响应特性、标准测试系统的误差要求 3 方面对其合理性进行了分析。

二、校准系统的组成及工作原理

模拟应用环境下的准动态校准系统主要由能承受 800 MPa 高压和 2000 高温的模拟膛压发生器、标准压力传感器、电荷放大器、多通道数据采集系统和数据处理系统组成，其系统组成如图 1 所示，标准压力传感器与微型电子测压器前端的相对位置如图 2 所示。

在模拟膛压发生器端部与微型电子测压器相对的端盖上安装 3 个已校准的标准压力传感器。校准时把模拟膛压发生器中的发射药点燃，产生的模拟膛压同时作用在标准压力传感器和被校准的微型电子测压器上，标准压力传感器与微型电子测压器同时采集此信号，信号记录完毕后由计算机读出微型电子测压器内的数据，把微型电子测压器数据和标准系统数据一起

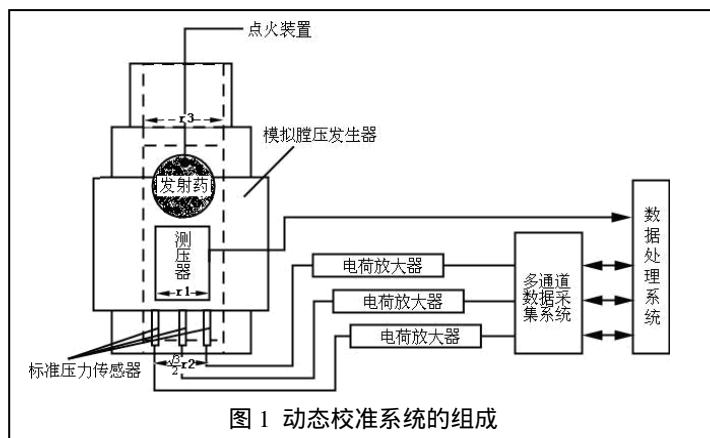


图 1 动态校准系统的组成

进行数据处理,即得被校准微型电子测压器准动态灵敏度系数^[6]。

三、标准测试系统的合理性

1、标准测试系统的时域静态校准

3套标准测试系统由Kistler6213BK型标准1000MPa压电式压力传感器、Kistler5011型电荷放大器和纵横JV52118型数据采集卡通道一一对应组成,其配套关系如图3。

为了考察压力传感器的静态特性,需要对其进行时域静态校准。这3套标准测试系统定期都会在兵器204所进行静态溯源性校准,其最近的时域静态校准结果如表1所示。

表1 标准测试系统静态性能指标

传感器序号	电荷放大器序号	工作特性方程	重复性误差	线性误差	基本误差
1501745	1450384	y=12.0x-4.5	0.28%	0.07%	0.35%
1501749	1450385	y=11.9x-5.2	0.29%	0.07%	0.36%
1501735	1450383	y=12.4x-8.5	0.26%	0.17%	0.43%

2、标准测试系统的动态响应特性

由于静态校准后得到的是零频时的灵敏度,能否在模拟膛压发生器内进行准动态校准还需研究其动态响应特性。由于标准压力传感器是标准测试系统中动态性能特性最差的部件,因此这里只研究标准压力传感器的动态性能特性,若其能满足校准要求,其余二者皆可。目前常用的方法是利用高压气体激波管来粗略地测定其动态特性^[7-9],从而了解其固有频率、阻尼比系数和频率响应。

现假设高压气体激波管的反射压为带斜坡的阶跃信号 $P_{sr}(t)$:

$$P_{sr}(t) = \begin{cases} P_{sr0} \frac{t}{t_1} & 0 \leq t \leq t_1 \\ P_{sr0} & t > t_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中, t_1 —上升时间;

P_{sr0} —平台压力值。

再假设所用的压力传感器为二阶系统,其等效质量块的运动微分方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = AP_{sr}(t) \quad (1.2)$$

式中, m —等效质量;

k —等效弹簧刚度;

c —等效阻尼系数;

A —等效受压面积。

式(2)可变形得到:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{AP_{sr}(t)}{m} \quad (3)$$

式中, $2n = \frac{c}{m}$, $\omega_n^2 = \frac{k}{m}$ 。

压力传感器的输出信号 $u(t)$ 与其等效质量的位移 $x(t)$ 有如下关系:

$$u(t) = k \cdot x(t) \quad (4)$$

$u(t)$ 满足微分方程:

$$\ddot{u} + 2n\dot{u} + \omega_n^2 u = \frac{kA}{m} p_{sr}(t) \quad (5)$$

由于压力传感器的阻尼很小,假设信号 $u(t)$ 在 t_{max} 时刻达到最大值 u_{max} ,则 $t_{max} > t_1$ 。

若把时刻 t_{max} 作为记时起点,输出信号的下降段满足如下微分方程和初始条件:

$$\ddot{u} + 2n\dot{u} + \omega_n^2 u = \frac{kA}{m} p_{sr0} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u|_{t=0} = u_{max} \\ \dot{u}|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可求得:

$$u(t) = u_p + A \cdot e^{-nt} \cdot \cos(\omega_d t - \varphi) \quad (8)$$

式中, $\omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - n^2}$, $A = \frac{\omega_n(u_m - u_p)}{\omega_d}$, $\varphi = \arctan \frac{n}{\omega_d}$ 。

其对应的包络线方程为:

$$u(t) = u_p \pm A \cdot e^{-nt} \quad (9)$$

由式(8)和式(9)即可求得所用压力传感器的模态参数 n 和 f_d ,其中 $f_d = \frac{\omega_d}{2\pi}$ 。

求得 n 的方法:求 $|u - u_p|$,则其各极大值点将落在 $u = Ae^{-nt}$ 附近。假设其各极大值点横坐标为 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$,对应的纵坐标为 $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ 。根据 $u = Ae^{-nt}$,对此极大值点数据进行非线性拟合,亦即求解式(10)的最优化问题,

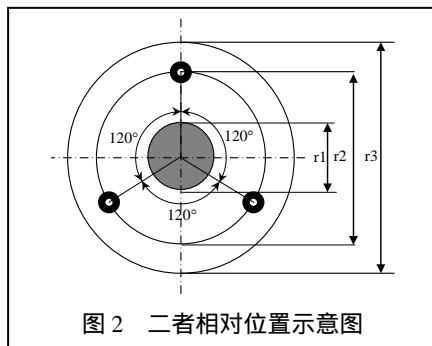


图2 二者相对位置示意图

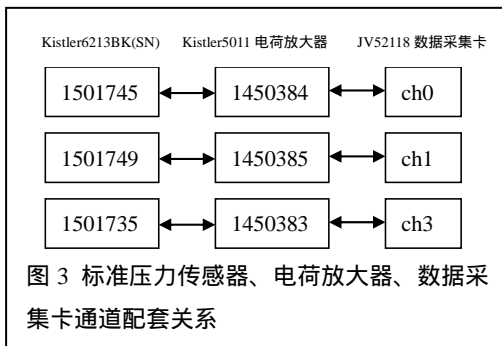


图3 标准压力传感器、电荷放大器、数据采集卡通道配套关系

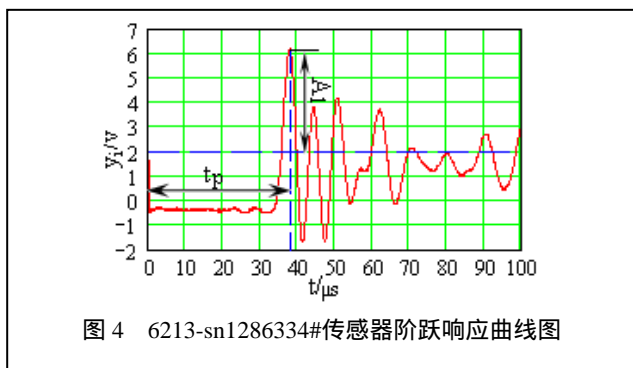


图4 6213-sn1286334#传感器阶跃响应曲线图

从而求得 A 和 n 。

$$\min_{(A,n)} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (A \cdot e^{-nt} - u_i)^2 \quad (10)$$

求得 f_d 的方法：对实测曲线的下降段做 FFT 变换。所用压力传感器的频率特性如下：

$$\begin{cases} \omega_d = 2\pi \cdot f_d \\ \omega_n = \sqrt{\omega_d^2 + n^2} \\ \xi = n / \omega_n \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{其幅频特性为：} A(\omega) = \left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right]^2 + \left(2\xi \cdot \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (12)$$

$$\text{其相频特性为：} \varphi(\omega) = -\arctan \frac{2\xi\omega / \omega_n}{1 - (\omega / \omega_n)^2} \quad (13)$$

式中， ω_n —传感器的固有频率；

ξ —传感器的阻尼比系数。

假设标准压力传感器是一个二阶系统，其归一化阶跃响应为：

$$y(t) = 1 - \frac{1}{\sqrt{1-\xi_n^2}} e^{-\xi_n \omega_n t} \cos(\omega_d t - \varphi) \quad (14)$$

式中， ω_d —传感器阻尼振荡角频率， $\omega_d = \sqrt{1-\xi_n^2} \omega_n$ ；

φ —传感器相位延迟， $\varphi = \arctan\left(\frac{\xi_n}{\sqrt{1-\xi_n^2}}\right)$ 。

图4是其中一套标准压力传感器的阶跃响应曲线图。

超调量 A_1 、峰值时间 t_p 与 ω_n 、 ξ_n 的关系为：

$$A_1 = e^{-\frac{\pi\xi_n}{\sqrt{1-\xi_n^2}}} \quad (15)$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi_n^2}} \quad (16)$$

由式(15)和式(16)可计算得到标准压力传感器固有频率 ω_n 和阻尼比系数 ξ_n 。依次可测定3个标准压力传感器固有频率 ω_n 和阻尼比系数 ξ_n ，其值见表2。

表2 标准测试系统中3个压力传感器固有频率和阻尼比系数

项目	传感器序号	固有频率/kHz	阻尼比系数
通道0	6213-sn1286328	168.663	0.079
通道1	6213-sn1286334	167.926	0.071
通道3	6213-sn1286341	165.521	0.065

把表2中的固有频率和阻尼比系数代入式(12)和式(13)，可得3个标准压力传感器的幅频特性和相频特性。对动态激励信号的要求是其频谱要能充分覆盖被校系统的全部模态频率，而无失真动态测试的条件是：系统的频率特性曲线是与横坐标平行的直线^[10-11]。经过大量的校准试验和实测试验可知，模拟膛压发生器产生的压力信号和实膛压信号的频带宽度均在5kHz以下。由分析得在0~10kHz范围内，其幅频和相频响应特性的平直度很好，幅频响应特性中最大幅值偏差仅为0.04dB，相频响应特性中最大相移仅为-0.42°，完全符合动态激励信号的要求和无失真动态测试的条件。

综上所述，对微型电子测压器进行应用环境下准动态校准的标准测试系统的动态响应特性是满足要求的。

3、标准测试系统的误差要求

按国军标 GJB 2870-1997 嵌入式电子测压器规范的要求，标准测试系统的不确定度应不超过被校准嵌入式电子测压器不确定度的 $1/3$ ^[12]。由于微型电子测压器的系统误差要求小于2% F.S.，因此标准测试系统的误差应小于0.67% F.S.，其中F.S.代表满量程，其值为600MPa。

表3 最近对标准测试系统进行溯源性校准的检定结果

误差类别	标准测试系统1	标准测试系统2	标准测试系统3
重复性误差 δ_1 (%F.S.)	0.2800	0.2900	0.2600
线性误差 δ_2 (%F.S.)	0.0700	0.0700	0.1700
基本误差 δ_3 (%F.S.)	0.3500	0.3600	0.4300
数据采集卡误差 δ_4 (%F.S.)	0.1000	0.1000	0.1000
随机误差 δ_5 (%F.S.)	0.8000	0.8000	0.8000
传感器温漂误差 δ_6 (%F.S.)	0.1200	0.1200	0.1200
传感器加速度灵敏度误差 δ_7 (%F.S.)	0.2040	0.2040	0.2040
单套系统总误差 (%F.S.)	0.9102	0.9141	0.9439
$\delta(i), i=1,2,3$			

3套标准测试系统最近经校准后得到的检定结果如表3所示，其中单套系统的总误差由式(17)给出。

$$\delta_i = \sqrt{\sum_{j=3}^7 (\delta_j)^2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

按等精度处理，以误差最大的系统进行误差估计，则其总误差为：

$$\bar{\delta} = \frac{\delta(3)}{\sqrt{3}} = 0.5450 \% \text{ FS} \quad (18)$$

由式(18)可知，标准测试系统的误差完全满足国军标 GJB 2870-1997 嵌入式电子测压器规范的要求。

四、结束语

该校准系统已应用于微型电子测压器的准动态校准，被校准后的微型电子测压器在某靶场进行了多炮(弹)种实炮膛压测试。实测数据表明，使用该校准系统校准后的微型电子测压器的可靠性和测试精度均能满足测试要求。准确可靠的测试数据为常规兵器的研制和生产验收提供了重要依据。

参考文献

- [1] 张相炎. 火炮设计理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005, 1: 153-161.
- [2] 黄俊钦. 测试系统动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 43-48.
- [3] Hai-han Zhuang, Shang C. Fan, Zhan Sheguo, et al. Dynamic characteristics analysis of vibrating cylinder pressure transducers[J]. Sensors and Actuators A, 2010, 157(2): 219-227.
- [4] Yan-bo Huang, Yu-bin Lan, W.C. Hoffmann, et al. Multi-sensor data fusion for high quality data analysis and process-ing in measurement and instrumentation[J]. Journal of Bionic Engineering, 2007, 4(1): 53-62.
- [5] 王卿, 祖静, 张瑜. 基于加权数据融合和相关性的微型电子测压器改进的动态校准方法[J]. 传感技术学报, 2010, 23(9): 1289 ~ 1292.
- [6] 杨平平, 晋小莉, 薄玉成. 枪弹空间运动姿态存储测试系统. 四川兵工学报[J]. 四川. 2008. 10.
- [7] 中国计量测试学会. 动态计量检测技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 98-301.
- [8] 何闻. 标准动态力发生装置国内外研究现状[J]. 机电工程, 1999, 2: 49 ~ 53.
- [9] 丁敏, 王选择, 杨练根, 等. 提高电感传感器测量精度的方法[J]. 中国测试技术, 2008, 34(3): 17-19.
- [10] 王德兵, 黄进, 王庆云, 唐泉. 采用新型测控技术的动态压力试验装置[A]. 2007 年航空试验测试技术学术交流会论文集[C]. 2007.
- [11] 朱明武, 李永新. 动态测量原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [12] 国防科学技术工业委员会. GJB 2870-1997 嵌入式电子测压器规范[S].

Rationality analysis of calibration system for micro electronic piezo gauge

YUAN Yue Hua¹, PEI Dong Xing^{1,2}, ZHANG Yu¹

(1. National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China
2. Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To guarantee high precision of micro electronic piezo-gauge in high temperature, high pressure and high impact environments, micro electronic piezo-gauge must be calibrated in the simulation application environments before they are used in the actual measuring application. In order to prove the rationality of calibration system for micro electronic piezo gauge, The discussion in three aspects of the standard measuring system—static time-domain calibration, dynamic response characteristics and error requirements are provided. The results show that the use of this calibration system can guarantee the reliability and precision of micro electronic piezo gauge to meet the measurement requirements.

作者简介

袁月华: 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 硕士研究生, 研究方向: 动态测试与智能仪器

地址: 山西省太原市中北大学 407 信箱 邮编: 030051

邮箱地址: yyh1sl2006@163.com

裴东兴: 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 副教授, 研究方向: 动态测试与智能仪器

张瑜: 中北大学电子测试技术国家重点实验室, 讲师, 研究方向: 动态测试与智能仪器

读者服务卡编号 004