

Calibrating Technology for High Shock at $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ Based on Laser Doppler*

LI Zhirong*, WANG Shengqiang, PAN Wen

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 71065, China)

Abstract: It is the urgent task to achieve wide range and wide bandwidth of impulse excitation in dynamic performance calibration of high shock sensor. The established high shock calibration device was based on velocity variation calibrating method, using air guns as excitation sources. The method for adjusting and controlling the system stiffness was presented through analyzing the principles of the excitation testing system. Velocity variations of sensor were measured by the calibration devices through laser-Doppler technology. The velocity accuracy has been improved. Experimental results show that the range of the calibration devices is $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$, the bandwidth is $\geq 100 \mu\text{s}$ in the range of $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ and extended uncertainty for shock sensitivity calibration is 5% ($k=2$).

Key words: calibration of high shock; velocity increment; impact machine using air gun; laser-doppler

EEACC:7320E

doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2012.12.010

基于激光多普勒测速法的 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 高冲击校准技术*

李芝绒*, 王胜强, 潘文

(中国兵器工业第二〇四研究所, 西安 710065)

摘要: 在高冲击传感器动态性能校准中, 实现高量程、宽脉冲激励是目前高冲击校准急需解决的问题。采用速度改变法校准原理, 以气炮为激励源, 利用激光多普勒测速方法测量砧体运动速度, 建立高冲击校准系统。分析碰撞系统的作用原理, 提出调整和控制激励脉宽的方法; 分析测速误差, 提出双光束差动侧向测速方法。实验结果表明: 高冲击校准系统校准量程为 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$, 激励脉宽在 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 时大于 $100 \mu\text{s}$, 校准冲击灵敏度的扩展不确定度小于 5% ($k=2$)。

关键词: 高冲击校准; 速度改变; 气炮冲击机; 激光多普勒

中图分类号: TP212.6; TP217

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)12-1673-05

高冲击加速度是武器系统研制、试验中普遍存在的物理量, 已提出高达 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 加速度的计量需求。目前高冲击校准最高量程为 $1.5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$, 是基于激光干涉校准原理的霍普金森杆激励方法^[1], 以霍普金森杆冲击机作为冲击加载装置, 利用激光干涉仪测量激励加速度信号, 实现对加速度计动态性能的绝对校准。如中北大学电子测试技术国家重点实验室赵晓东^[2]等, 利用霍普金森杆校准装置, 采用差动激光干涉仪对 988 型压电式加速度计在 $18\ 371 g_n \sim 86\ 806 g_n$ 范围内校准冲击灵敏度。仪器科学与动态测试教育部重点实验室范锦彪^[3]等, 通过雷管产生的爆炸冲击波作用到霍普金森杆, 校准丹麦 B&K 公司的 8309 型压电加速度的频率响

应特性。霍普金森杆激励校准方法的优点是设备小巧, 具有良好的激励波形, 其缺点是受材料强度等性能限制, 在 $1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 以上时的激励脉宽很窄 (小于 $30 \mu\text{s}$), 对被校传感器的频响^[4] 提出苛刻要求。另外一种方法是基于速度改变法原理^[1] 的气炮冲击激励方法, 采用高压气体推动主动弹, 撞击安装有被校加速度计的砧体, 测量运动砧体的速度改变量, 实现对加速度计的动态性能的绝对校准。中北大学电子测试技术国家重点实验室李艳^[5], 采用气炮冲击装置, 对装有加速度存储电路的模拟装置进行动态性能校准。气炮冲击校准方法的优点是冲击加速度范围大, 脉冲持续时间长。但目前达到的最高量程约 $1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$, 在 $1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 时脉冲宽度小于

项目来源: 国防计量项目 (A14310105)

收稿日期: 2012-08-14 修改日期: 2012-11-18

50 μs , 不能满足目前武器系统高冲击计量需求。因此, 研究量程为 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 的高冲击校准系统, 对于硬目标武器研制、生产、验收具有重要的意义。

1 校准原理和校准系统组成

1.1 校准原理

超高冲击校准系统采用速度改变法绝对校准原理, 被校加速度计受到冲击激励时, 其响应输出随速度的改变率而变化。将冲击脉冲持续时间内被校加速度计的输出信号对时间积分, 获得加速度计响应的速度改变量, 同时测量安装有被校加速度计的砧体的速度改变量, 加速度计输出信号积分值与测量得到的砧体速度改变量之比, 得到被校加速度计的冲击灵敏度^[6-7]。被校加速度计冲击灵敏度计算式如式(1)所示。

$$S_u = k \frac{\int_{t_0}^{t_1} a dt}{\Delta V} \quad (1)$$

式中: S_u 为被校加速度计与幅值有关的冲击灵敏度; a 为被校传感器输出的加速度响应信号; t_0 、 t_1 为被校传感器速度改变的起止时间; ΔV 为测量获取的传感器速度改变量; k 为与组成测试系统所用仪器有关的系数。

校准系统工作原理如图1所示, 其工作过程是: 被校加速度传感器安装到砧体上, 砧体装配到安装板的锥形中心孔中, 安装板安装到炮管出口处。气炮发射装置中的压缩气体推动主动弹在炮管内高速运动, 撞击砧体。被撞击后的砧体脱离安装板自由飞行一段距离, 被冲击回收装置回收。数据采集系统采集存储被校传感器输出的激励信号, 测速系统测量的砧体速度改变量信号。经过数据处理, 得到被校传感器的冲击灵敏度。

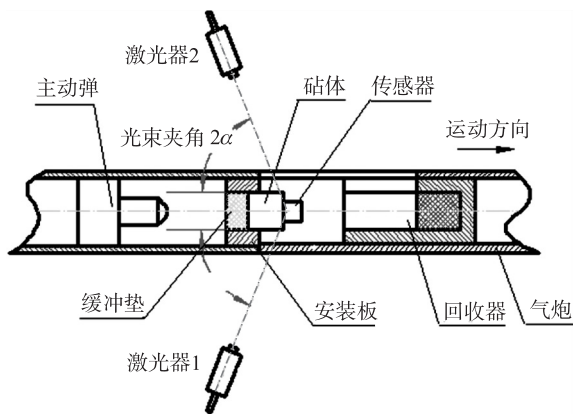


图1 校准系统工作原理

1.2 校准系统组成

高冲击校准系统主要包括气炮发射系统、激励

碰撞系统、冲击回收系统、测速系统、数据采集处理系统等。

1.2.1 气炮发射系统

气炮发射系统由压缩机、快排阀、压缩气室、气动阀、主动弹、炮管等组成。它是以压缩气体作为工作介质, 将压缩气体的压力势能转化为主动弹的运动动能, 并通过压缩气体的压力控制主动弹的运动速度。压缩气室中的压缩气体通过快排阀释放到炮管, 推动炮管内的主动弹高速飞行。

1.2.2 激励碰撞系统

激励碰撞系统^[8]是由砧体、缓冲垫、安装板、被校传感器等组成。安装被校传感器的砧体装配到安装板的锥形中心孔中, 砧体与主动弹撞击面装配缓冲垫。当砧体受到主动弹撞击后, 获得动能自由加速飞行, 到达冲击回收系统后被回收。

主动弹撞击砧体时, 碰撞过程组成如图2所示的振动系统。系统的运动方程为:

$$\frac{m \cdot M}{M+m} \ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2)$$

式中: x 为弹体与砧体的相对位移; M 为弹体质量; m 为砧体质量; c 为阻尼系数; k 为系统刚度; $mM/(m+M)$ 为系统的有效质量。

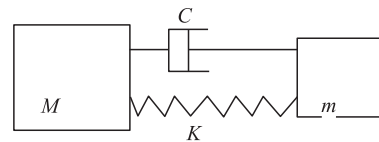


图2 碰撞过程的振动系统

根据式(2), 激励碰撞系统的振动周期 τ 为

$$\tau = \pi \sqrt{\frac{mM}{k(m+M)}} \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 系统刚度越小碰撞系统的振动周期越大, 振动脉冲宽度越大。而系统刚度主要由缓冲材料决定。本激励碰撞系统选取了一种羊毛毡材料作缓冲垫, 通过调整羊毛毡的厚度和形状, 实现了上述要求。

1.2.3 冲击回收系统

冲击回收系统的作用是将高速飞行的砧体阻挡, 使其速度逐渐降低, 最后停止运动, 同时保护被校传感器及引线。在高冲击校准中, 传感器引线是传感器结构中最薄弱的环节, 保护传感器引线是高冲击校准的关键技术。本校准系统设计了双滑动阻尼回收器, 结构原理如图3所示。

双滑动阻尼回收器主要包括滑动导筒4、缓冲材料2和5、回收管6。滑动导筒是C型环结构, 中间空腔中装配的缓冲材料2为橡皮泥。当砧体自由

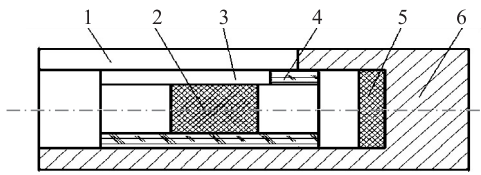


图3 双滑动阻尼回收器结构示意图

飞行进入滑动导筒后,与其中的缓冲材料碰撞,缓冲材料被挤压,向四周滑移,使砧体在滑动导筒中作有阻尼运动。同时滑动导筒获得一部分动能,与砧体、缓冲材料一起在回收管内作有阻尼运动。砧体的动能逐渐被消耗,速度逐渐降低直到为零。

2 测速系统

2.1 激光多普勒测速方法

本校准系统采用激光多普勒测速方法^[9-10],测量砧体速度改变量。这种方法的优点是测量误差小,冲击运动结束后砧体的运动状态不影响速度改变量的测量,同时测量了全冲击速度-时间历程,信息量比较大。激光多普勒测速原理如图4所示。

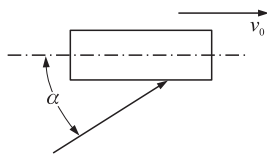


图4 激光测速原理

激光多普勒频移与运动瞬时速度 v 的关系为:

$$v = \frac{\lambda \Delta f_D}{2 \cos \alpha} \quad (4)$$

式中: λ 为激光波长; Δf_D 为激光多普勒信号频移; α 为光束与砧体运动方向的夹角。

2.2 双光束差动测速方法

在测速系统中,使用了德国 POLTIC 公司的激光测振仪,量程为 30 m/s (目前国际测速精度最高量程最大)。而加速度激励峰值为 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 时,砧体的末速度最高可达 130 m/s 以上。因此使用此激光测振仪,激光束与砧体运动方向夹角 α 比较大。

在校准过程中,如果砧体受冲击后运动方向与炮管轴线有动态偏差角 δ ,按照图4所示测速方法,当激光束的静态夹角 α 很小(理想情况下为 0°)时,即使动态偏差 δ 很大, $\cos \alpha$ 的改变量仍然很小,由动态偏差角 δ 产生的砧体速度测量误差也很小。如果 α 很大,比如 α 等于 70° ,动态偏差 δ 即使为 0.5° ,砧体速度测量误差将达到 2% 。因此在 α 角度较大时,动态偏差角 δ 将给砧体速度测量带来大的测量误差。

为了减小砧体速度测量误差,采用双光束差动侧面测速方法,即测速激光对称分布到炮管轴向的

两侧,两光束之间夹角为 2α 。其测速原理如图5所示,砧体运动速度为 v_0 ,两激光束在光束方向测量的

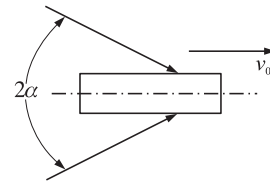


图5 双光束差动激光多普勒测速原理

砧体分速度分别为 v_1 、 v_2 。对两激光束测量的砧体运动速度求平均值,以平均速度作为砧体运动速度值。砧体运动速度计算公式如下:

$$\bar{v} = -\frac{1}{2 \cos \alpha} (v_1 + v_2) \quad (5)$$

假设砧体的动态偏差为 δ ,则两激光束与砧体运动方向的夹角分别是 $(\alpha + \delta)$ 和 $(\alpha - \delta)$,两激光束测量的砧体速度分别为:

$$v_1 = -v_0 \cos(\alpha + \delta) \quad (6)$$

$$v_2 = -v_0 \cos(\alpha - \delta) \quad (7)$$

将式(6)和式(7)代入式(5),得到式(8)

$$v_0 = -\bar{v} / (\cos \alpha \cos \delta) \quad (8)$$

如果 δ 的控制 2° 范围,则 $1 \geq \cos \delta \geq 0.999$,砧体速度测量误差小于 0.1% ,能够满足测速系统速度测量误差指标要求。

3 校准实践

3.1 高冲击校准系统稳定性试验

对建立的 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 高冲击校准系统,进行了重复性性能^[10]测试实验。选取 B&K 公司的 8309 型加速度传感器和 204 所研制的 T 型加速度传感器作为被测对象。B&K 公司 8309 型加速度传感器是大家公认的性能稳定的加速度传感器,量程为 $1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 。204 所的 T 型加速度传感器是石英压电型加速度传感器,量程为 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 。这两种传感器的加速度量程范围覆盖了校准装置的量程范围。表1是传感器在5个加速度幅值处的冲击灵敏度测量数据。表2是传感器在5个加速度幅值处的测试曲线脉冲宽度测量数据。

图6是8309型加速度传感器在 $9.1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ 幅值点的激光多普勒解调速度信号曲线,其中下面两条曲线是两激光束的多普勒信号解调速度曲线,上面曲线是下面两条速度曲线合成后得到的砧体运动速度曲线。图7是8309型传感器加速度幅值为 $9.1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ 的加速度信号曲线,脉冲宽度为 $191 \mu\text{s}$ 。图8是T型传感器加速度幅值为 $2.04 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ 的加速度信号曲线,脉冲宽度为 $111 \mu\text{s}$ 。

表 1 传感器冲击灵敏度测试数据

加速度幅值/(m·s ⁻²)	冲击灵敏度/(pC·g ⁻¹)						标准偏差/%
1×10 ⁵	0.05201	0.05239	0.05244	0.05264	0.05256	0.05213	0.48
5×10 ⁵	0.05259	0.05273	0.05233	0.05196	0.05244	0.05226	0.51
1×10 ⁶	0.05209	0.05214	0.05293	0.05189	0.05165	0.05121	1.30
1.6×10 ⁶	0.01218	0.01213	0.01222	0.01236	0.01217	0.01221	0.65
2×10 ⁶	0.01123	0.01091	0.01085	0.01103	0.01086	0.01104	1.48

表 2 传感器测试曲线脉冲宽度测试数据

加速度幅值/(m·s ⁻²)	脉冲宽度/μs					
1×10 ⁵	430	508	420	457	480	453
5×10 ⁵	200	222	195	257	230	215
1×10 ⁶	142	172	191	170	134	144
1.6×10 ⁶	121	114	118	106	126	119
2×10 ⁶	111	102	115	113	118	113

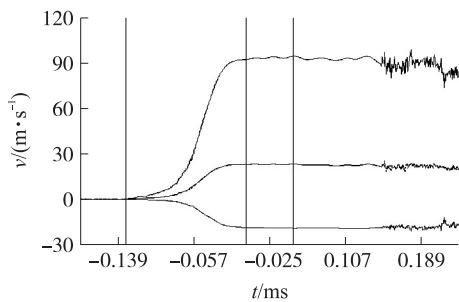


图 6 8309 传感器 9.1×10⁵ m/s² 幅值速度信号曲线

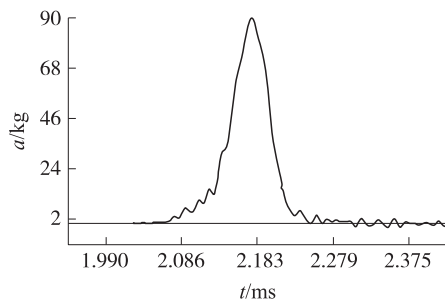


图 7 8309 传感器输出的加速度信号曲线

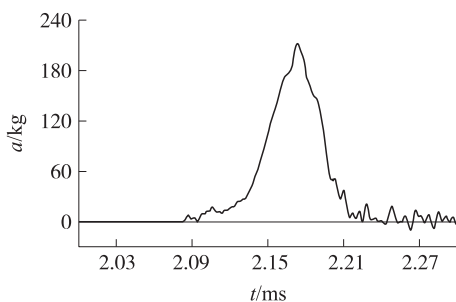


图 8 T 型加速度传感器输出的加速度信号曲线

3.2 高冲击校准装置不确定度评定

由于高冲击校准装置工作时是以单次测量的数据作为校准结果的,因此选取校准装置重复性实验

中各组冲击灵敏度测量值中较大标准偏差值,作为校准系统的标准偏差。其最大值为 1.5%,那么校准系统的重复性为 1.5%。

对校准装置的测量不确定来源进行分析^[11],主要来源于 8 个方面。表 3 列举了不确定度主要来源及不确定度值。

表 3 高冲击校准装置不确定度一览表

不确定度来源	标准不确定度量值
重复性测量引入的标准不确定度	1.5%
测速激光波长的不确定度	0.0004%
两激光束夹角定位偏差产生的标准不确定度	0.32%
传感器信号调理仪的相对标准不确定度	1.2%
瞬态记录仪产生的相对标准不确定度	0.29%
数字示波器的时间测量产生的相对标准不确定度	0.058%
多普勒信号的频率解调处理产生的不确定度	1.0%
加速度信号积分处理的相对标准不确定度	0.6%

校准系统的 A 类不确定评定结果为:

$$u_a = 1.5\%$$

校准系统的 B 类不确定评定结果为:

$$u_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} = 1.7\%$$

校准系统的合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} = 2.3\%$$

校准系统的扩展不确定度:

$$U = k_p u_c = 4.6\%$$

3.3 校准结果分析

从表 3 可以看出,校准装置的不确定度主要来源于重复性测量、传感器信号调理仪、多普勒信号的频率解调处理、加速度传感器输出信号积分处理 4 个方面,其中后 3 个是由 B 类方法评定的不确定度。

在本校准系统中,传感器信号调理仪选取的是 B&K 公司生产的 2525 型电荷放大器,其精度为 2%。为提高校准的精度,可选用更高精度的信号调理仪。

在多普勒信号的频率解调处理中,本校准系统采用了基于周期计数法的时域处理原理,通过分析各时间段内每个周期的时间值分布,取其中最频繁的时间值作为该时间段内的周期长度。相对于过零点法和相位求导法^[2]解算多普勒信号,基于周期计数法的时域处理多普勒信号解算方法,可以提高多普勒频移信号处理的计算精度,有效减小散射光不稳定带来的多普勒频移信号周期变宽或变窄、信号局部丢失和噪声对速度测量结果的影响。

在对加速度传感器输出信号积分处理中,对加速度传感器的频响要求不高,即使传感器输出信号上叠加了高频信号,或者对信号曲线进行滤波处理,也对加速度信号积分结果影响很小。但是如果加速度传感器的输出信号出现零点漂移或不回零现象,则对积分结果产生大的误差。因此在数据积分处理时,先对信号进行归零处理,然后确定积分起止点,最后进行积分处理。如果出现曲线不回零现象时,先确定信号零点漂移线,以信号线与零点漂移线的交点为积分终止点,然后将积分起点与终止点连线,最后以起点与终点连线与信号线之间的包络面积为加速度信号的积分面积。

此外,按照式(1),基于速度改变法的加速度传感器灵敏度的校准,是假定被校准的加速度传感器

的冲击灵敏度在校准范围内是线性,但实际上加速度传感器的冲击灵敏度并不完全是线性变化的,因此,传感器的非线性也会给校准结果带来一定的误差。

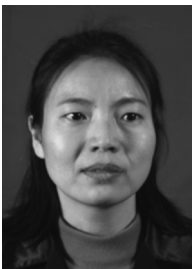
4 结束语

(1)以气炮冲击机为激励源的高冲击校准装置,能够实现高量程、宽脉冲激励。校准量程为 $2 \times 10^6 \text{ m/s}^2$,激励脉宽 $\geq 100 \mu\text{s}$,满足目前硬目标侵彻武器高过载传感器的计量需求。

(2)采用双光束差动侧面测速方法,解决了砧体动态角度偏差带来的测速误差的问题,提高了测量砧体运动速度的精度。

参考文献:

- [1] 国防科工委科技与质量司. 力学计量:下册[M]. 北京:原子能出版社,2002.
- [2] 赵晓东,裴东兴,范锦彪. 高 g 值加速度计激光干涉校准及信号解算方法[J]. 传感技术学报,2009,22(11):1602-1605.
- [3] 范锦彪,王燕,徐鹏等. 高 g 值加速度传感器的窄脉冲校准理论与方法[J]. 传感技术学报,2012,25(9):1242-1245.
- [4] 李庆丰,祖静,徐鹏. 激励脉冲宽度对加速度计冲击校准误差的影响[J]. 仪表技术与传感器,2009(增刊):44-48.
- [5] 李艳. 高冲击测试实验技术研究[D]. 太原:中北大学,2008.
- [6] GB/T 13823.1—2005 振动与冲击传感器的校准方法第 1 部分:基本概念[S].
- [7] ISO 5347-12:1993 Methods for the Calibration of Vibration and Shock Pick-ups-Part 12: Testing of Transverse Shock Sensitivity [S].
- [8] 苏健军,殷俊兰. 超高冲击校准激励机[C]//计量与测试学术交流论文集,2007:255-258.
- [9] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用. 北京:清华大学出版社,2003.
- [10] GJB/J2749—96 建立测量标准技术报告的编写要求[S].
- [11] 中国合格评定国家认可委员会编. 校准领域测量不确定度评估指南[S]. 北京:中国计量,2009.



李芝绒(1968-),女,高工,主要研究方向为爆炸毁伤效应测试与评估技术,高温、高压、高冲击测试与校准技术, lzt204@163.com。