

文章编号 1004-924X(2016)02-0381-09

## 高量程加速度计动态线性校准系统

石云波<sup>1,2\*</sup>, 杨志才<sup>1</sup>, 曹慧亮<sup>1,2</sup>, 智丹<sup>1</sup>, 陈艳香<sup>1</sup>, 王艳阳<sup>1</sup>

(1. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 设计了双弹头霍普金森杆用于精确标定高  $g$  值加速度计的动态线性参数。基于一维应力波传播理论和弹性波叠加原理, 分析了双弹头霍普金森杆为不同尺寸时对获取所需激励加速度信号的影响。利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真软件对不同设计条件下双弹头霍普金森杆的冲击效果进行了仿真分析。通过对不同影响因素的对比, 确定了结构参数, 设计了直径为 30 mm, 长度为 1 200 mm 的双弹头霍普金森杆, 即高量程加速度计动态线性校准系统。利用设计的双弹头霍普金森杆对高量程加速度计进行了动态线性校准和试验验证, 结果显示加速度计动态线性误差在 5% 以内, 证明了设计的装置可对高量程加速度计进行动态线性校准, 校准结果基本满足冲击校准的要求。

**关键词:** 加速度计; 霍普金森杆; 双弹头; 动态线性校准; ANSYS/LS-DYNA; 应力波

**中图分类号:** TH824.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0381

## Dynamic linearity calibration system for accelerometers with high measurement range

SHI Yun-bo<sup>1,2\*</sup>, YANG Zhi-cai<sup>1</sup>, CAO Hui-liang<sup>1,2</sup>,

ZHI Dan<sup>1</sup>, CHEN Yan-xiang<sup>1</sup>, WANG Yan-yang<sup>1</sup>

(1. National Defense Science and Technology Key Laboratory of Electronic Test & Measurement, North University of China, Taiyuan, 030051, China;

2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China

\* Corresponding author, E-mail: y. b. shi@163.com

**Abstract:** A dynamic linearity calibration system, dual warhead Hopkinson bar, was designed to calibrate the dynamic linear parameters of a micro accelerometer with high measurement range accurately. On the basis of one-dimension stress wave theory and elastic wave superposition principle, the influences of the dual warhead Hopkinson bar with different sizes on the required acceleration signals were analyzed. The ANSYS/LS-DYNA was employed to simulate the shock effect of the dual warhead Hopkinson bar under different design conditions. According to analysis and simulation on different factors, the design parameters were determined. Then, a dynamic linearity calibration system (dual warhead Hopkinson bar) for accelerometers with the diameter of 30 mm and the length of 1 200 mm was designed. The dual warhead Hopkinson bar was used in the dynamic linearity calibration of an ac-

收稿日期: 2015-07-20; 修订日期: 2015-08-21.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (No. 51225504); 国家安全重大基础研究计划 (973) 资助项目 (No. 2012CB723404)

celerometer with high measurement range. The results indicate that the dynamic linear error of the accelerometer is within 5%, which verifies that the dual warhead Hopkinson bar designed is feasible for dynamic linearity calibration of the accelerometers with higher measurement ranges, and the calibration results satisfy the requirements of shock calibration.

**Key words:** accelerometer; Hopkinson bar; dual warhead; dynamic linearity calibration; ANSYS/LS-DYNA; stress wave

## 1 引言

现代战争中,为了攻击如机场跑道、地面加固目标及地下设施等各种高强度、综合防护的高价值目标,相继出现了一系列智能化的钻地侵彻弹药<sup>[1]</sup>。其在接触到目标时不会立即爆炸,而是继续侵入目标,到达设定后引信才会引爆<sup>[2]</sup>,造成附带损伤很小。钻地武器的侵彻深度直接影响了武器的攻击效果,武器在没有达到一定深度或者超过这个最佳深度时起爆都不能达到预定目的。由此,侵彻深度的测量计算和对引爆信号的适时控制对武器的毁伤性能至关重要。

MEMS(Micro Electro-Mechanical System)高 g 值加速度传感器是引信侵彻过程中惯性测试与控制的关键<sup>[3-5]</sup>。通常钻地武器侵彻目标时,平均加速度为几万 g( $1g=9.8\text{ m/s}^2$ ),最大加速度可达几十万 g。而且在侵彻过程中还需要具有识别目标,判别侵彻深度、层数等信息的能力。这就需要加速度传感器能够抵抗这种高冲击过载的恶劣环境,又能快速响应整个过程的冲击信息。由此,近年来具有很高工作量程、抗过载能力强的 MEMS 高 g 值加速度传感器发展备受关注。

随着 MEMS 设计与工艺的发展<sup>[6]</sup>,高 g 值加速度传感器的研究制造取得了令人瞩目的成果<sup>[7]</sup>。但其相关性能参数的测量、校准,以及通过相关性能参数对传感器产品的质量评定相对滞后。传感器校准包括静态校准和动态校准,对于静态下的校准,经典的评价指标是静态线性度,静态灵敏度等。而高 g 值加速度传感器感受的加速度激励信号多为交变信号,即高 g 值加速度传感器实际使用时大多工作在动态环境下。而加速度传感器的动态特性指标主要包括:动态线性、冲击灵敏度、幅值线性度等。

高 g 值加速度传感器作为测量物体运动状态的一种重要的传感器<sup>[8]</sup>,主要用来测量加速度,是

一种线性传感器。线性是指加速度传感器的输入输出严格满足直线关系的性质,线性度是指加速度传感器校准特性曲线与某一规定直线一致的程度,它也是灵敏度和幅值线性度的基础。线性特别是动态线性是评定高 g 值加速度传感器质量的一项重要性能指标。高 g 值加速度传感器的动态线性描述了输入、输出、频率之间的关系,反映了特定频率下传感器的线性工作区间,描述了在不同量程下传感器的工作频带。动态线性是频率响应的基础,研究动态响应都是在满足一定要求的动态线性范围内进行的。

目前,在国内还没有将动态线性作为衡量高 g 值加速度传感器优劣的一项性能指标<sup>[9]</sup>。国外虽已将动态线性作为衡量高 g 值加速度传感器优劣的一项性能指标,但其实物校准装置未见相关文献的报道。因此,对其动态线性校准技术的研究具有重要意义。所以,若想展开对高 g 值加速度传感器动态线性校准技术的研究,就需要首先设计出高 g 值加速度传感器动态线性校准装置;而后,利用此装置对高量程加速度计进行了动态线性校准。

## 2 双弹头 Hopkinson 杆工作原理

双弹头霍普金森杆冲击加速度发生器包含发射膛、子弹和霍普金森杆,被测的加速度计被安装在杆的后端面。通过控制气阀,使两个同心圆柱的子弹(内弹、外弹)从双发射膛分别单独、同时或以指定时间间隔射出,与杆的前端面相撞,从而产生纵向弹性压缩波,并一直传播到另一端对加速度计施加一冲击加速度。使内、外弹具有相同的长度、相同的材质,通过调节控制阀通断时间、气室压力,内、外弹可获取相同的出膛速度;内、外弹撞击时,加速度计亦可获取等脉宽的冲击加速度。

两子弹分别单独与霍普金森杆相撞,输入信号分别记为  $\alpha_1(t)$ 、 $\alpha_2(t)$ ,测得加速度计对应的输

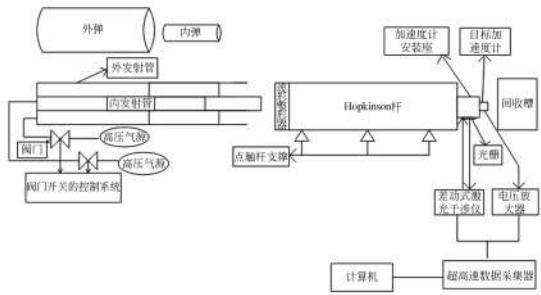


图 1 双弹头 Hopkinson 杆冲击校准系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of dual Warhead Hopkinson bar impact calibration system

出加速度分别为  $a_1(t)$ 、 $a_2(t)$ ；保持同样发射气压，控制两子弹同时与 Hopkinson 相撞，则两子弹作用于杆上的冲击加速度脉冲的频率相同分别为  $\alpha_1(t)$ 、 $\alpha_2(t)$ ，使被测加速度计感知到为  $\alpha_1(t) + \alpha_2(t)$  的冲击加速度脉冲，加速度计输出的加速度峰值为  $a_{1+2}(t)$ 。

当子弹撞击金属杆的一个端面时，生成弹性脉冲，传播到另一端面反射。此过程中位于远离冲击端面的杆中弹性波是平面波，冲击加速度  $\alpha(t)$  在反射过程中产生，可通过式(1)表达：

$$\alpha(t) = 2C\dot{\epsilon}(t), \tag{1}$$

式中： $C$  为到达目标加速度计安装端面时纵向弹性波的速度； $\dot{\epsilon}$  为弹性脉冲随时间变化的应变。

表 1 下标和弹丸发射方式

Tab. 1 Subscript and launching method of projectile

标号	弹丸发射的方式
1	只有外弹通过外发射管发射
2	只有内弹通过内发射管发射
1+2	内、外弹同时撞击杆的端面， 每个弹丸的所有发射条件和单独发射时相同

用符号  $\alpha$  来表示目标加速度计获取的冲击加速度，存在：

$$\alpha_1(t) = 2C\dot{\epsilon}_1(t), \tag{2}$$

$$\alpha_2(t) = 2C\dot{\epsilon}_2(t), \tag{3}$$

$$\alpha_{1+2}(t) = 2C\dot{\epsilon}_{1+2}(t), \tag{4}$$

只要脉冲波的应变没有使杆的材料发生塑性变形，根据弹性波叠加原理有：

$$\epsilon_{1+2}(t) = \epsilon_1(t) + \epsilon_2(t), \tag{5}$$

$$\alpha_{1+2}(t) = \alpha_1(t) + \alpha_2(t), \tag{6}$$

如果用符号  $a$  来表示来自目标加速度计的输

出信号，以  $a_1(t) + a_2(t)$  为加速度传感器的理想输出， $a_{1+2}(t)$  为加速度传感器的实际输出，动态线性(用  $\sigma$  表示)可以通过比较  $a_1(t) + a_2(t)$  和  $a_{1+2}(t)$  的关系来确定<sup>[10]</sup>：

$$\sigma = \frac{(a_1(t) + a_2(t)) - a_{1+2}(t)}{a_{1+2}(t)} \times 100\%. \tag{7}$$

### 3 双弹头 Hopkinson 杆装置设计

#### 3.1 Hopkinson 杆尺寸设计

Hopkinson 杆由一根细长的圆柱形金属杆构成，是整个校准装置的核心构件。为了得到 20 万 g 的加速度激励信号，Hopkinson 杆材料需选用了具有很高屈服强度的钛合金，以保证整个冲击过程中杆发生的形变均为弹性形变，使杆中应力波传播过程满足一维应力波线性叠加理论<sup>[11]</sup>。

Hopkinson 杆技术以一维弹性应力波理论为基础，子弹以一定速度撞击静止杆的一个端面，引起面内质点的运动，将在 Hopkinson 杆中产生向后传播的弹性应力波脉冲信号。

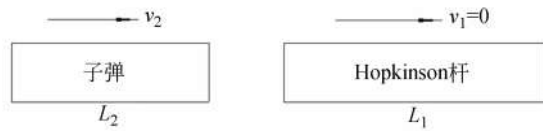


图 2 有限长弹性杆共轴撞击

Fig. 2 Coaxial impact of limited elastic bar

为了得到  $10^5 g$  量级的冲击加速度，碰撞时杆中会产生很高的应变，为了保证在子弹达到屈服极限之前，杆中的形变一直为弹性形变，需要 Hopkinson 杆的材料具有很高的屈服强度。如图 2 所示，若子弹与杆具有相同的截面积，子弹撞击速度  $v^2$  满足以下条件，子弹撞击 Hopkinson 杆时(假设此时时间  $t$  为 0)，在两杆中将产生从撞击端向另一端同时传播的弹性应力：

$$v_2 < \sigma_s / \rho_2 C_2, \tag{8}$$

式中： $\sigma_s$  为子弹材料的屈服强度； $\rho_2$  为子弹材料的密度； $C_2$  为子弹材料的弹性波纵波波速。

经过计算，若以 TC4 钛合金材料为子弹材料，子弹速度最高约为 46 m/s；若以 45# 钢为子弹材料，经过淬火处理，子弹速度最高约为 30 m/s。

假设子弹长度  $L_2$  小于 Hopkinson 杆的长度  $L_1$ ，且两杆材料的波阻抗相同，撞击后时间  $t =$

2L<sub>2</sub>/C<sub>2</sub> 时,子弹中应力波反射卸载,接触面上的质点的速度、应变都为 0,此时撞击结束。可见撞击中产生的应力波脉冲信号的持续时间 *t* 与子弹的长度成正比。因此,可以通过使用不同长度的子弹,来获取不同脉宽的应力波脉冲信号。

同时,为了防止应力波反射受传感器安装的影响,Hopkinson 杆的直径 *D*<sub>1</sub>、长度 *l*<sub>1</sub> 应满足:

$$D_1 \geq \sqrt{\frac{16}{\pi} \frac{m_a C_a}{h_a \rho_1 C_1}}, \quad (9)$$

$$l_1 \geq 15 \times D_1, \quad (10)$$

式中:*m*<sub>a</sub> 为加速度传感器质量;*h*<sub>a</sub> 为加速度传感器高度;*C*<sub>a</sub> 为加速度传感器外壳材料的弹性波纵波波速;*C*<sub>1</sub> 为 Hopkinson 杆材料的弹性波纵波波速;*ρ*<sub>1</sub> 为 Hopkinson 杆材料密度。

以 TC4 钛合金作为杆的材料,经过计算,若以中北大学 NCCJ-15 系列 15 万 g 量程的压阻单轴传感器为测试对象,有 *D*<sub>1</sub> ≥ 24.6 mm,以西安 204 所的 988 系列 10 万 g 量程的压电单轴传感器为测试对象,有 *D*<sub>1</sub> ≥ 25.2 mm。由于 Hopkinson 杆横向效应引起的几何弥散和衰减,与杆的直径成正相关,因此杆的直径也并非越大越好。

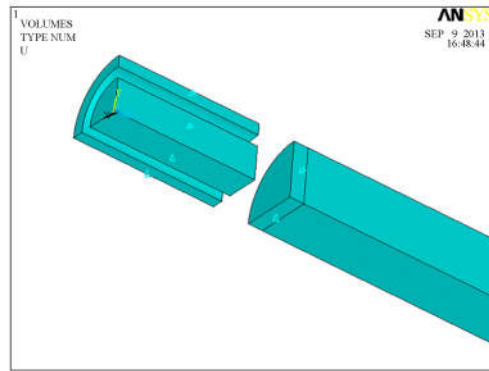
根据以上结论,结合实际中所面临的加工技术难度、装置的整体尺寸等因素,初步确定了 Hopkinson 杆的尺寸直径 *D*<sub>1</sub> 为 25~40 mm,长度 *l*<sub>1</sub> 为 0.8~1.5 m。

### 3.2 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真

通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真软件对双弹头霍普金森杆装置运行时的动态过程进行了有限元仿真,分析了 Hopkinson 杆不同长度、不同直径对霍普金森杆使用效果的影响,为了简化数据处理,主要在时域中对获取的激励加速度信号峰值进行比较,比较了以上两种情况下内外弹单独撞击产生的加速度叠加曲线与两弹同时撞击产生的加速度曲线的一致性。

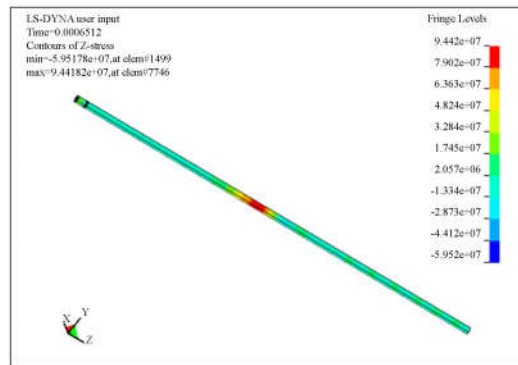
由于子弹、调整垫和霍普金森杆都为轴对称结构,为了简化计算选用整个结构的 1/4 进行分析仿真,各组件都视为均匀体<sup>[12]</sup>。模型采用立体 164 轴对称单元,为使两子弹单独发射时产生相同脉宽的波形,则外弹和内弹的长度相等、材料相同。三维实体模型如图 3(a)、(b)所示,在尺寸选取时,假设内炮管的壁厚为 2 mm。

子弹、Hopkinson 杆模型材料参数为表 2 所示:



(a) 实体模型

(a) Solid model



(b) 仿真后处理效果

(b) Processing effect after simulation

图 3 有限元仿真

Fig. 3 Finite element simulation

表 2 材料属性

Tab. 2 Material properties

结构	子弹	Hopkinson
材料	钛合金	钛合金
模型	线性各向同性	线性各向同性
密度(kg/m <sup>3</sup> )	4 500	4 500
杨氏模量(Pa)	1.08 × 10 <sup>11</sup>	1.08 × 10 <sup>11</sup>
泊松比	0.34	0.34

加速度符号对照如表 3 所示。

表 3 加速度符号对照表

Tab. 3 Comparison table of acceleration symbol

符号	符号说明
α <sub>1</sub>	内弹单独冲击获取的激励加速度峰值
α <sub>2</sub>	外弹单独冲击获取的激励加速度峰值
α <sub>1+2</sub>	外弹和内弹同时冲击获取的激励加速度峰值

(1) Hopkinson 杆长度对比

仿真中, Hopkinson 杆、子弹材料均选用钛合金。模型尺寸如表 4 所示, 只改变 Hopkinson 杆的长度(0.8 m/1.2 m/1.5 m), 在同样的冲击条件下, 子弹冲击速度均为 15 m/s, 比较不同长度下杆末端面中央单元节点处质点获取的激励加速度信号。

表 4 模型尺寸  
Tab. 4 Model size

结构	长度 /m	外径 /mm	内径 /mm	内外弹 比重
内弹	0.03	15.56	—	1 : 1
外弹	0.03	25	19.56	—
Hopkinson 杆	0.8	25	—	—
	1.2			
	1.5			

通过选取各曲线的首个加速度峰值对比, 比较内外弹单独撞击产生的加速度叠加曲线与两弹同时撞击产生的加速度曲线的一致性, 结果如图 4 所示。

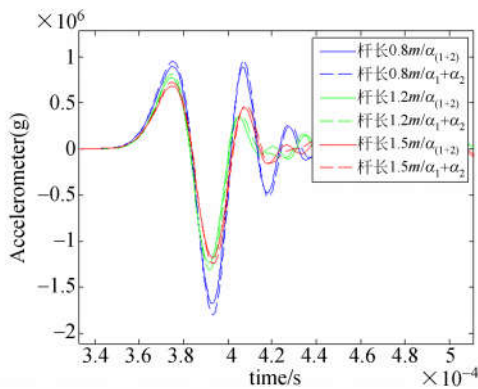


图 4 激励加速度信号  
Fig. 4 Driving acceleration signal

表 5 一致性误差比较

Tab. 5 Consistency error comparison

Hopkinson 杆长度	$\alpha_1 + \alpha_2$ ( $\times 10^4$ g)	$\alpha_1 + \alpha_2$ ( $\times 10^4$ g)	误差
0.8m	8.932	9.497	5.95%
1.2m	7.698	8.127	5.28%
1.5m	6.838	7.206	5.11%

由仿真结果分析可知: 在同样冲击条件下, 随着 Hopkinson 杆长度的增加, 应力波在杆中传播时衰减的越严重, 杆末端面质点获取的激励加速度信号幅值越小, Hopkinson 杆过长不利于获取更高加速度值的冲击装置; 另一方面 Hopkinson 杆长度对内外弹单独撞击产生的加速度叠加曲线与两弹同时撞击产生的加速度曲线的一致性有一定影响, 长度越长误差越大, 但相差不大。

(2) Hopkinson 杆直径对比

仿真中, Hopkinson 杆、子弹材料均选用钛合金。模型尺寸如表 6, 只改变 Hopkinson 杆的直径(25 mm/30 mm/40 mm), 在同样的发射气压下, 子弹的出膛速度只取决于子弹的长度、密度, 与截面积无关, 因此由 Hopkinson 杆直径改变所引起的内外弹截面积的变化不影响子弹的出膛速度。仿真中子弹冲击速度均设置为 15 m/s, 比较不同直径杆末端面中央单元节点处质点获取的激励加速度信号。

表 6 模型尺寸

Tab. 6 Model size

结构	长度/m	外径 /mm	内径 /mm	内外弹 比重
内弹	0.03	15.56	—	1 : 1
		19.2		
外弹	0.03	26.22	19.56	—
		25		
		30		
Hopkinson 杆	1.2	23.12	30.22	—
		25		
		30		
		40		

通过选取各曲线的首个加速度峰值对比, 比较内外弹单独撞击产生的加速度叠加曲线与两弹同时撞击产生的加速度曲线的一致性, 一致性结果如图 5 所示。

表 7 一致性误差比较

Tab. 7 Consistency error comparison

Hopkinson 杆直径	$\alpha_1 + \alpha_2$ ( $\times 10^4$ g)	$\alpha_1 + \alpha_2$ ( $\times 10^4$ g)	误差
25mm	7.229	7.584	4.68%
30mm	7.698	8.127	5.28%
40mm	8.678	9.519	8.83%

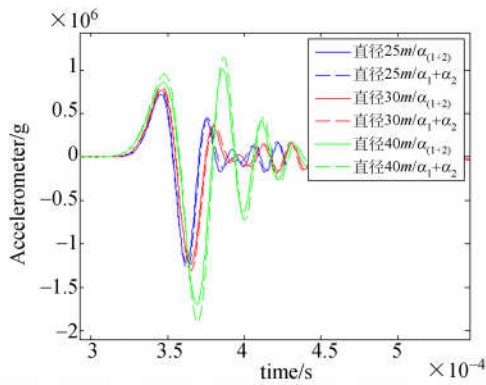


图 5 激励加速度信号  
Fig. 5 Drivng acceleration signal

由仿真结果分析可知:在同样冲击速度下,随着 Hopkinson 杆直径的增加,内外弹单独撞击产生的加速度叠加曲线与两弹同时撞击产生的加速度曲线的一致性变差,在直径为 40 mm 时,误差可达 8.83%,直径为 30 mm 时与 20 mm 直径相比误差有所增大,但变化不是很明显;另一方面 Hopkinson 杆直径的增加,相应的子弹截面积增加,在相同发射气压下,杆末端面质点获取的激励加速度信号幅值增大;再者,随着杆直径的增大,获取的激励信号脉宽有增大趋势,可能是由于应力波的弥散效应导致,应力波变缓激励加速度信号脉宽变宽。

### 3.3 Hopkinson 杆最终设计方案

经过理论计算、有限元仿真,结合实际机械加工难度,Hopkinson 杆最终设计方案设计如表 8 所示。

表 8 Hopkinson 杆设计参数

Tab. 8 Design Parameters of Hopkinson bar

形状	材料	长度/m	直径/mm
圆柱形长杆	TC4 钛合金	1.2	30

## 4 双弹头 Hopkinson 杆冲击校准试验

### 4.1 冲击校准试验系统

### 4.2 冲击校准试验

试验中使用的加速度传感器型号为 988-



图 6 双弹头 Hopkinson 杆校准装置  
Fig. 6 Calibration device of Dual Warhead Hopkinson Bar



图 7 双发射炮管  
Fig. 7 Dual emission barrel



图 8 应变片测量装置  
Fig. 8 Measuring device of strain gauge

1198,为西安 204 所压电加速度传感器主要技术指标:量程为 10 万 g,频响为 25 kHz(0.5 dB),幅值线性度为 10%。对内、外弹单独撞击产生的加速度曲线叠加峰值与两弹同步撞击产生的加速度曲线峰值的一致性进行了比较分析,共进行了 3 组测试,试验结果如图 9~14 所示。

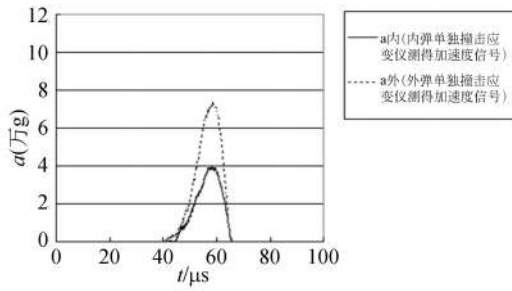


图 9 处理应变信号获取加速度曲线

Fig. 9 Acceleration curves obtained by strain signal processing

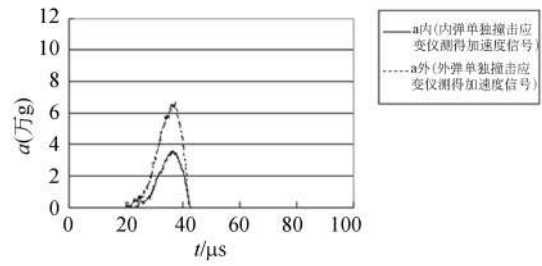


图 11 处理应变信号获取加速度曲线

Fig. 11 Acceleration curves obtained by strain signal processing

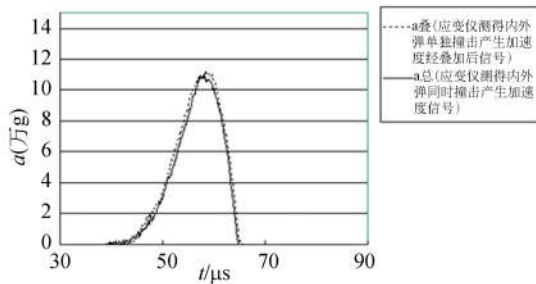


图 10 加速度对比曲线

Fig. 10 Contrast curve of acceleration

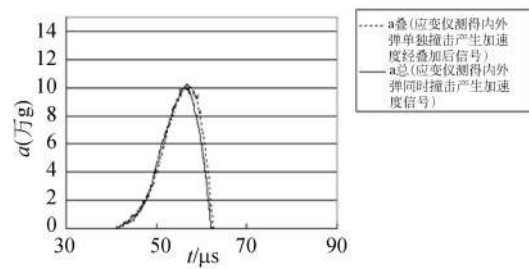


图 12 加速度对比曲线

Fig. 12 Contrast curve of acceleration

表 9 测试结果

Tab. 9 Measured results

试验 序号	$a_{内}$ ( $10^4 g$ )	$a_{外}$ ( $10^4 g$ )	$a_{叠}$ ( $10^4 g$ )	$a_{总}$ ( $10^4 g$ )	$\sigma_i$ ( $i=1,2,3$ )
1	3.725	7.354	11.079	10.814	2.45%
2	3.475	7.072	10.547	10.922	-3.43%
3	3.239	6.854	10.093	9.715	3.89%

其中图 9、10、11、12、13、14 的纵坐标代表冲击加速度峰值,用  $a$  表示,单位为(万  $g$ );横坐标代表冲击加速度的脉宽,用  $t$  表示,单位为( $\mu s$ )。图 9、11、13 中实线和虚线代表内外弹单独撞击时的加速度曲线,分别用  $a_{内}$  和  $a_{外}$  表示;图 10、12、14 中实线和虚线代表内外弹同步撞击时的加速度曲线和二者单独撞击后叠加的加速度曲线,分别用  $a_{总}$  和  $a_{叠}$  表示。

因此,求得加速度计的动态线性平均值为:

$$\sigma_{总} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \times 100\% = 3.26\% \quad (9)$$

所以型号为 988-1198 加速度计的动态线性  $\sigma_{总}$  小于 5%,在要求的精度范围内,因此可以证明

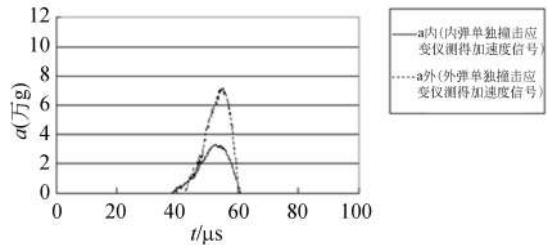


图 13 处理应变信号获取加速度曲线

Fig. 13 Acceleration curves obtained by strain signal processing

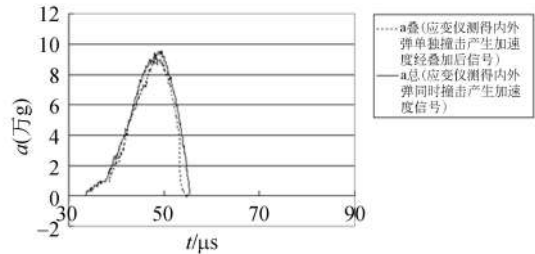


图 14 加速度对比曲线

Fig. 14 Contrast curves of Acceleration

加速度计的动态线性良好。由上述结果可知:内、外弹单独撞击产生的加速度曲线叠加峰值与两弹同步撞击产生的加速度曲线峰值基本一致。

## 5 结 论

本文主要研究了高量程加速度计动态线性校准装置——双弹头霍普金森杆。同时,在应力波传播相关理论基础上,分析了 Hopkinson 杆尺寸

对获取所需激励加速度信号的影响,并利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元仿真软件对不同设计条件下 Hopkinson 杆冲击效果进行了仿真分析,经过分析与仿真,最终确定了 Hopkinson 杆的设计方案并将杆子尺寸设计为( $\Phi 30 \times 1\ 200$ )mm。最后,经过试验表明,利用双弹头 Hopkinson 杆可以对高量程加速度计的动态线性进行标定,标定结果误差精度在 5%以内基本符合我们的预期要求;填补了国内外对加速度传感器动态线性这一性能指标测量方法的空白。

## 参考文献:

- [1] 张立杰,梁增友,马林. 钻地弹战斗部技术特点及发展趋势[J]. 机械,2012,04:1-5.  
ZHANG L J, LIANG Z Y, MA L. Technical characteristics and trends of development of earth penetrator warhead[J]. *Machinery*, 2012, 04: 1-5. (in Chinese)
- [2] 刘好,温志渝. 微加速度传感器的研究现状及发展趋势[J]. 光学 精密工程,2004,3(12):81-86.  
LIU Y, WEN ZH Y. Researching Status and developing tendency of micro accelerometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 3(12): 81-86. (in Chinese)
- [3] ANDREW R, ATWELL, ROBERT S. Simulation, fabrication and testing of bulk micromachined 6H-SiC high-g piezoresistive accelerometers[J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, 104: 11-18.
- [4] CAO H L, LI H SH. Investigation of avacuum packaged MEMS gyroscope architecture's temperature robustness [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2013, 41(4): 495-506.
- [5] 石云波,赵锐,唐军,等. 单片三轴大量程加速度传感器性能测试与分析 [J]. 传感技术学报,2012,25(9):1236-1243.  
SHI Y B, ZHAO R, TANG J, *et al.*. Testing and analysis of single-chip tri-axial high measure range MEMS accelerometer [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(9): 1236-1243. (in Chinese)
- [6] 曹慧亮. 硅微机械陀螺仪静电补偿与控制技术研究和实验 [D]. 南京:东南大学,2014.  
CAO H L. *Research and experiment on the technology of electrostatic compensation and control of silicon micro-machined gyroscope* [D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)
- [7] BRADFORD S D, TIM D, JINBO K. A Monolithic High-g SOI-MEMS Accelerometer for measuring Projectile Launch and Flight Accelerations [C]. *IEEE Sensors conference, Vienna, Autriche*, 2004.
- [8] 刘危,解旭辉,李圣怡. 微机械惯性传感器的技术现状及展望[J]. 光学 精密工程,2003,11(5):425-429.  
LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micro-machined inertial sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 425-429. (in Chinese)
- [9] 李婉蓉,范锦彪,王燕,等. 基于小尺寸 Hopkinson 杆的动态校准系统[J]. 传感技术学报,2013,26(11):1617-1620.  
LI W R, FAN J B, WANG Y, *et al.*. The dynamic calibration system based on micro-hopkinson bar [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2013, 26(11): 1617-1620. (in Chinese)
- [10] IEC/SC47E. IEC 60747-14-4 Semiconductor devices-Part14-4:Semiconductor accelerometers[S]. 2011.
- [11] 赵习金. 分离式霍普金森压杆实验技术的改进和

应用[D].长沙:中国人民解放军国防科学技术大学,2003.

ZHAO X J. *Improvement and Application of SHPB technique* [D]. Changsha:National University of Defense Techn-ology,2003. (in Chinese)

[12] 祁晓瑾. MEMS 高 g 值加速度传感器研究[D].太原:中北大学,2007.

QI X J. *The Research on the MEMS High g Accelerometer*[D]. Taiyuan:North University of China, 2007. (in Chinese)

#### 作者简介:



石云波(1972—),男,汉族,山西人,博士,教授,目前主要从事 MEMS、微惯性器件等方面的研究。E-mail:y. b. shi@163. com



杨志才(1989—),男,汉族,天津人,硕士研究生,主要从事 MEMS 传感器设计,电路设计,传感器测试等方面研究。E-mail:1148744272@qq. com

(版权所有 未经许可 不得转载)