

斜端面 Hopkinson 杆校准多维高 g 值加速度计方法研究*

高 猛, 郭伟国, 李小龙

(西北工业大学航空学院 西安, 710072)

摘要 为了对多维高 g 值加速度计灵敏度系数进行校准, 提出一种斜端面 Hopkinson 杆实现多维加速度计量脉冲方法。首先, 通过 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件分析了斜面角度和激励脉宽对斜面上质点波形的影响, 定义杆端斜面部分沿杆轴向投影 L 与激励脉冲波长 λ 的比值为 δ ; 其次, 利用改进的斜端面 Hopkinson 杆对三轴加速度计中 2 个轴的灵敏度及交叉灵敏度系数进行同步校准, 得到不同气压下灵敏度系数矩阵。研究表明: δ 并不是决定斜面质点加速度波形的唯一参数, 但对相同 L 的校准杆, δ 值越小, 斜面各质点加速度波形越趋于一致; 因轴间耦合作用, 双轴同步校准得到的各主轴灵敏度系数要小于单轴依次校准, 且 z 轴方向激励(安装面法线方向)对 y 向(安装面切向)输出影响较大。

关键词 冲击校准; 灵敏度系数; 横向灵敏度; 多维高 g 值加速度计; 斜端面 Hopkinson 杆

中图分类号 TP212.1; TH824.4

引 言

弹体高速侵彻靶板过程中, 由于靶体宏观或微观呈现复杂结构, 导致弹体在侵彻过程中所受各方向阻力不同, 为多维承载过程^[1]。三轴高 g 值加速度计因能同时感受 3 维加速度过载而被广泛应用于弹靶侵彻中。为了获得三轴加速度计各轴上准确、可靠的数据, 在研发和使用前, 必须对其性能参数进行标定和校准。Hopkinson 杆作为一种动态加载装置, 因其结构简单、操作方便、测量方法巧妙及加载波形易控等优点, 已广泛应用于单轴高 g 值加速度计校准^[2-9], 其最大量程可达 $20 \times 10^4 g$, 脉宽可达 $300 \mu s$ 。

现有三轴高 g 值加速度计主要有 3 组单轴加速度计正交组装、单芯片集成微机电系统 (micro-electro mechanical systems, 简称 MEMS) 等结构形式^[10-11], 但无论哪种结构形式, 因加工工艺及组装误差, 3 个敏感轴之间无法完全解耦, 为了确保加速度计测量数据准确, 必须对其轴间关系进行测试。相比于单轴高 g 值加速度计, 三轴高 g 值加速度

计校准的难点主要在于如何同步产生三轴非耦合高 g 值加速度脉冲, 并且有效施加到传感器敏感区。现有的三轴加速度计同步校准方法如重力场翻滚法^[12]、三轴振动台标定法^[13-14]所能标定的量程有限, 仅为 $1 g$ 至几十 g , 无法实现几万甚至几十万 g 值的高冲击脉冲, 很难应用到三轴高 g 值加速度计校准中。在校准三轴高 g 值加速度计时, 由于缺少能够同时产生多维高冲击加速度脉冲的装置, 大多数学者依然采用传统的 Hopkinson 杆, 将加速度计每个敏感方向作为冲击方向, 依次校准各轴灵敏度系数, 如文献^[15-19]通过空气炮对 3 维加速度传感器的横向灵敏度进行校准。以上校准方法主要通过加速度计横向和主向输出比计算相对横向灵敏度, 无法得到精确的横向灵敏度系数。三轴加速度计在实际应用中, 安装面会同时感受 3 个方向的加速度脉冲, 但单轴依次校准方法仅在单一轴向输入激励脉冲, 通过该输入信号计算的灵敏度系数并没有反映其他 2 个轴与该轴之间的耦合作用, 因此其灵敏度系数校准结果与多轴同步输入激励校准结果的差异性有待研究。

* 国家自然科学基金资助项目(11872051)

收稿日期: 2020-08-01; 修回日期: 2020-09-21

笔者针对多轴高 g 值加速度计校准难点,首先,提出一种斜端面 Hopkinson 杆校准装置,根据 1 维应力波假设,将沿杆轴向的 1 维加速度在斜端面上矢量分解,实现对多轴高 g 值加速度计多维的同步加载;其次,通过 ANSYS/LSDYNA 有限元软件详细分析了斜面角度、冲击加速度脉宽对激励脉冲构型在斜端面上的影响;最后,通过斜端面 Hopkinson 杆对北京大学提供的三轴高 g 值压阻式传感器 CA-YZ-100K-T 中 2 个轴的灵敏度系数同步校准,并与单轴依次校准结果进行对比。

1 三轴高 g 值加速度计性能参数校准原理

三轴高 g 值加速度计过载示意图如图 1 所示,其中 xOz 面为安装面,可通过粘接或螺接与实际结构连接。加速度计 3 个正交轴对应的加速度矢量为 $a_x(t)$, $a_y(t)$ 和 $a_z(t)$,在非正交过载下,假设过载加速度矢量为 $a(t)$,且加载方向不与加速度计任意轴向平行,根据矢量合成原则, $a(t) = a(t) \cos \alpha + a(t) \cos \beta + a(t) \cos \gamma = a_x(t) + a_y(t) + a_z(t)$ 。在高 g 值加速度计研制开发和使用过程中,往往要对加速度计的性能参数(灵敏度、线性度及交叉耦合系数等)进行计量或校准,其方法之一可以借用技术上比较成熟的 Hopkinson 杆校准高 g 值加速度计^[14-17],分别对 x , y 和 z 轴单独测试来获得各正交轴的性能参数。基于垂直端面 Hopkinson 杆进行三轴加速度计灵敏度校准原理如图 2 所示。这里假设 1 个二轴 x 和 y 的加速度计,分别将传感器沿 x 和 y 方向安装加载,就可获得各自方向灵敏度等,同时也能测出对应正交轴的输出。但当沿非正交轴加载(即加速度计倾斜一个角度加载),其灵敏度就涉及加速度计轴间关系变化,以及耦合关系测试等。

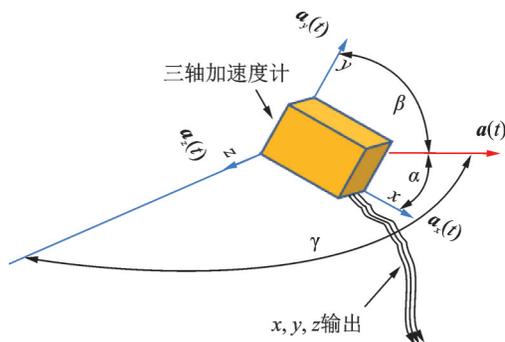
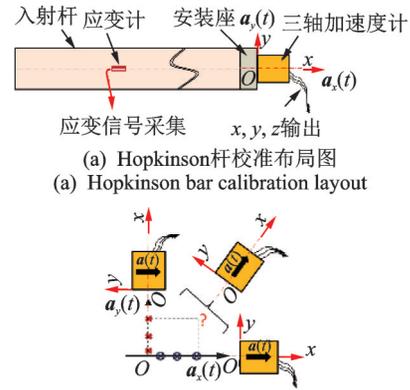


图 1 三轴高 g 值加速度计过载示意图

Fig.1 Schematic diagram of three-axis high g accelerometer under overload



(a) Hopkinson 杆校准布局图
(b) Accelerometer calibration diagram at different axial loading

图 2 基于垂直端面 Hopkinson 杆进行三轴加速度计灵敏度校准原理

Fig.2 Calibration principle of sensitivity of triaxial accelerometer based on vertical end Hopkinson bar

2 斜端面 Hopkinson 杆校准二轴高 g 值加速度计灵敏度系数实现方法

为了对加速度计正交二轴同时施加过载载荷,笔者提出将 Hopkinson 标准杆端部切成斜面,二轴加速度计校准装置示意图如图 3 所示。应变片粘贴于校准杆中间位置,被校加速度计通过胶粘或螺接与杆端固定,保证加载过程中加速度计不与杆端斜面分离且不沿斜面滑动。通过异形子弹与垫块同轴撞击,在撞击端产生一近似半正弦压缩波,当压缩波沿校准杆传播到斜端面时,斜端面质点加速度必然分解到斜面切向 y 及法向 x ,安装在斜面上的加速度计同时感受到 2 个方向的激励脉冲,实现对二轴加速度计同步校准。

假设应力波在波导杆中传播时,波的弥散和衰减可以忽略,则由 1 维应力波理论可知,端面质点沿杆轴向的速度及加速度为

$$\begin{cases} v_x' = 2C\epsilon(t) \\ a_x' = 2C\dot{\epsilon}(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中: C 为波在杆中传播速度, $C = \sqrt{E/\rho}$; $\epsilon(t)$ 为校准杆中间位置的应变信号。

根据质点加速度在斜面上的矢量分解,斜面法向和切向的速度及加速度分别为

$$\begin{cases} v_x(t) = v_x' \cos \alpha \\ v_y(t) = v_x' \sin \alpha \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} a_x(t) = a_x' \cos \alpha \\ a_y(t) = a_x' \sin \alpha \end{cases} \quad (3)$$

定义 2 维加速度计灵敏度系数矩阵为

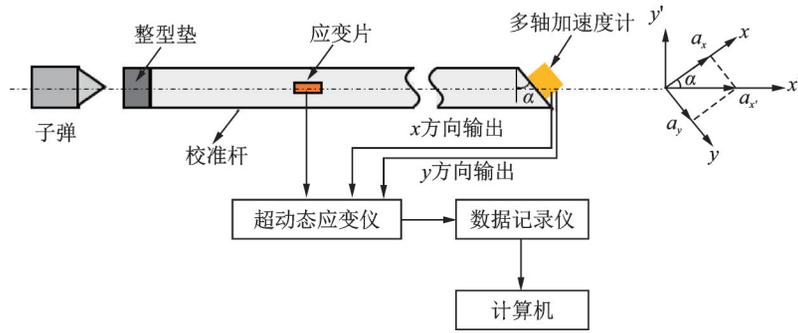


图3 二轴加速度计校准装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of two-axis accelerometer calibration device

$$S = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_x \\ \bar{U}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_x \\ \bar{v}_y \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:第1、第2个下标分别表示加速度计输出和输入方向; S_{xy} 、 S_{yx} 分别为横向灵敏度系数。

加速度计输出和输入关系为

$$\begin{bmatrix} U_x(t) \\ U_y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x(t) \\ a_y(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $U_x(t)$ 、 $U_y(t)$ 分别为加速度计 x 、 y 方向输出电压; $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ 分别为加速度计 x 、 y 方向输入加速度信号。

忽略加速度计质量,校准杆斜面上质点速度及加速度与加速度计感受到的速度及加速度相等。在求解加速度计灵敏度时,既可以采用加速度信号对比(微分法),也可以采用速度对比(积分法)。速度法通过对加速度计输出信号积分,可以有效滤掉信号的震荡,提高光滑时间历程曲线,有助于信号对比。因此,笔者选取积分法求解加速度计灵敏度系数,且认为在每一个 t 值下加速度计灵敏度系数不变。对式(5)两边同时积分有

$$\begin{bmatrix} \int_0^t U_x(t) dt \\ \int_0^t U_y(t) dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int_0^t a_x(t) dt \\ \int_0^t a_y(t) dt \end{bmatrix} \quad (6)$$

为了避免因积分区间不同带来随机误差,选取3个(或更多)不同截至时间 t ,其中 $0 < t \leq T$, T 为加速度脉宽。将积分平均值作为加速度计输入和输出,即

$$\begin{cases} \bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^3 \int_0^{t_i} U(\tau) dt}{3} \\ \bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^3 \int_0^{t_i} a(\tau) dt}{3} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)代入式(6),得

3 斜面角度、激励脉宽对斜面质点加速度脉冲构型的影响

图4为斜端面校准杆质点分布示意图。利用改进斜端面Hopkinson杆对多轴加速度计校准时,认为激励脉冲传到杆端斜面时,斜面上所有质点加速度相同,且斜面上质点加速度为杆中间激励加速度的2倍。对于图4所示的斜端面校准杆,波长为 λ 的加速度脉冲从 $a-d$ 面向 c 点传播时,由于斜面部分截面两侧广义波阻抗不匹配,波在界面上发生反射和透射,斜面不同位置加速度脉冲构型是一个复杂叠加的结果,且与斜面角度及激励脉冲宽度密切相关。因此,需讨论斜面角度与激励脉宽对斜面质点加速度构型的影响。定义 $\delta = L/\lambda$ 描述斜面角度与加速度脉宽的关系。其中: $L = D \tan \alpha$; $\lambda = CT$, C 为波传播速度, T 为加速度激励脉宽。

笔者通过ANSYS/LS-DYNA v15.0有限元软件,对斜面角度分别为 0° 、 30° 、 45° 、 75° 和 85° 的校准杆,一端输入脉宽为20、150和300 μs 、对应波长分别为100、750和1500 mm、幅值为20000g的半正弦加速度脉冲,其表达式为

$$a(t) = 2 \times 10^4 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) g \quad (9)$$

校准杆材料为7075铝合金,直径为14 mm,其参数如表1所示。单元类型为8节点Solid164单元,网格为六面体,采用Lagrange算法,材料本构模型为线弹性。为了得到斜面上的完整信息,建立校准杆整体有限元模型进行分析。

图5为5种不同 L 斜端面校准杆在不同波长加速度脉冲激励下,端面上 a 、 b 、 c 点沿杆轴向的加速度曲线。图6为安装加速度计的斜端面运动规律。

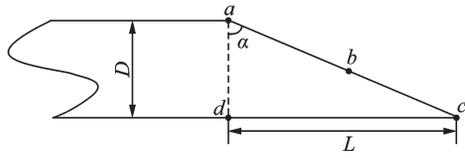


图4 斜端面校准杆质点分布示意图

Fig.4 Schematic diagram of particle distribution on the bevel end of the bar

表1 校准杆材料参数

Tab.1 Material parameters of calibration bar

材料	E/GPa	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	ν
7075 铝合金	70	2 700	0.33

由图5(a,b,c)可知,当 L 为0,8.08和14 mm,即斜面夹角 α 为 $0^\circ, 30^\circ$ 和 45° 时,在不同波长的加速度脉冲激励下,端面上 a, b, c 点加速度曲线基本重合,安装

在端面的加速度计各质点沿杆轴向受到相同的加速度脉冲(见图6(a))。在加载过程中,加速度计只沿杆轴向平动,2个正交方向的敏感元件在加载过程中受到的激励脉冲不变,等于杆轴向激励脉冲在斜面法向和切向的分量。

与激励波长750和1 500 mm相比,当波长为100 mm时, a, b, c 这3点加速度比2倍的输入激励加速度理论结果要小,其主要原因为波在传播过程中的衰减所导致。因此,取 D 为14 mm时,在有限的数值模拟结果中可以得到,当 $0 \leq L \leq 14$ mm时,在 $0 \leq \delta \leq 0.14$ 范围内,斜面对加速度构型影响不大,通过第2节的计算灵敏度系数方法是可行的。只是当激励加速度波长比较小时,不能通过杆中间质点加速度计算斜端面上的激励脉冲,应考虑传播时波的

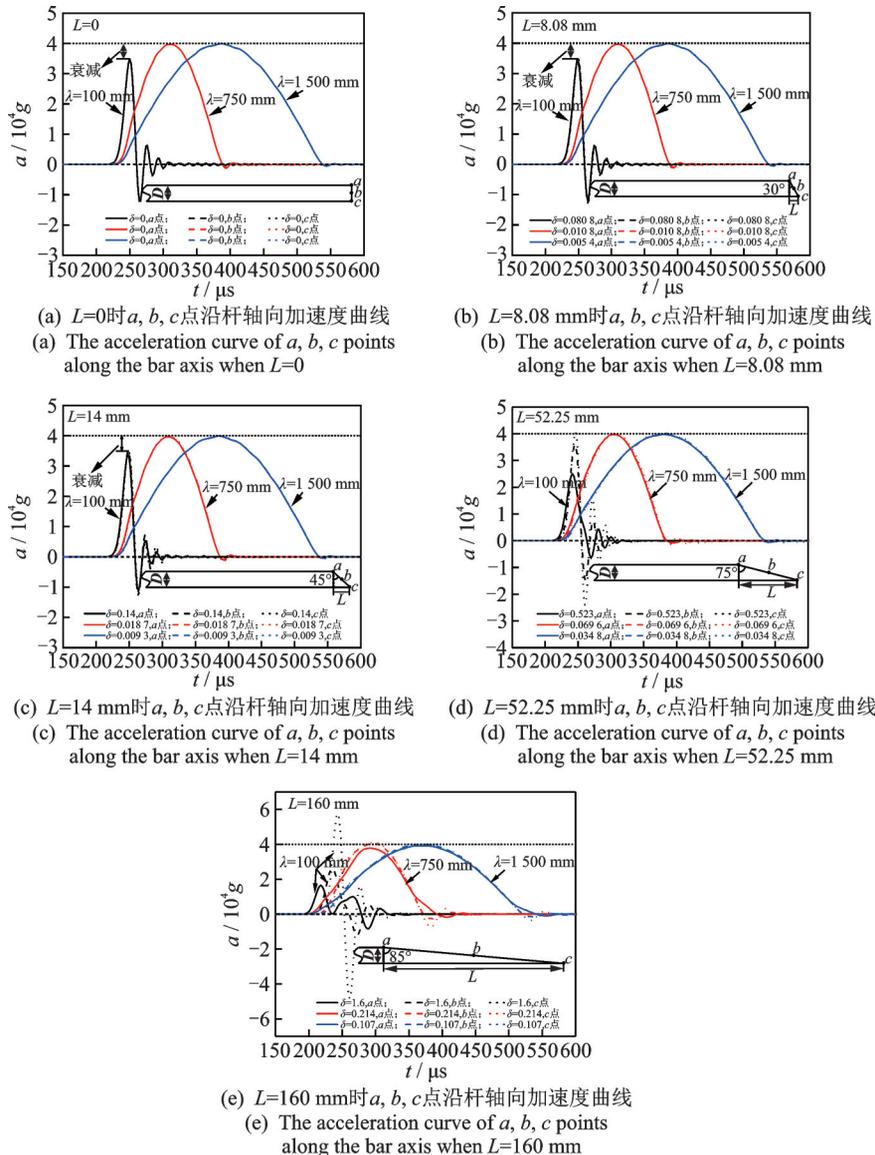


图5 不同 δ 对应 a, b, c 点加速度曲线

Fig.5 Acceleration curve of a, b, c points under different δ

弥散和衰减对加速度构型的影响。

图 5(d,e)分别为 L 在 52.25 和 160 mm 校准杆下,不同波长加速度脉冲激励下 a, b, c 点的加速度曲线。由图可以看出,在 100 mm 波长的加速度脉冲激励下, a, b, c 这 3 点加速度波形相差比较大,且在感受激励信号时间上依次滞后,导致在同一时刻加速度计安装面上不同质点的运动状态不同(见图 6(b))。当加速度计卸载时,斜面角度 α 将发生变化,仍用初始 α 进行加速度矢量分解,将对灵敏度校准结果带来偏差。同时因斜面角度的变化,加速度计发生转动,会将转动所引起的额外加速度施加于加速度计敏感元件上,影响灵敏度系数计算。

在相同 L 下,随着 δ 的减小,斜面上不同质点加速度波形越趋于一致。图 5(e)中当波长增大到 1 500 mm 时,在开始阶段, a, b, c 这 3 点波形相差较大,当波在斜面部分多次反射、透射后,斜面上不同位置的质点加速度趋于均匀。但 δ 值并不是决定斜面加速度波形非均匀的唯一参数,其也与 L 值的大小有关。比如,由图 5(c)中 $\delta=0.14$ 和图 5(e)中 $\delta=0.107$ 对应的曲线可以看出, $\delta=0.107$ 的一致性差于 $\delta=0.14$ 。

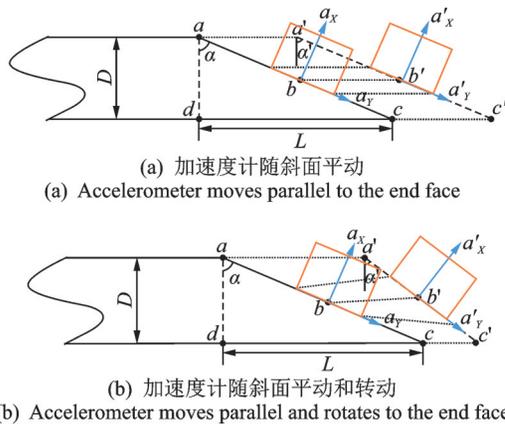


图 6 安装加速度计的斜端面运动规律

Fig.6 Motion law of inclined plane of installing accelerometer

4 试验测试

北京大学提供的 CA-YZ-100K 型压阻式三轴高

g 值加速度计如图 7 所示。其尺寸为 12.4 mm × 12.5 mm × 10.5 mm,基本参数如表 2 所示,试验时电荷放大倍数为 40 倍。针对该型号的三轴高 g 值加速度计,利用传统的 Hopkinson 杆,对 3 个方向依次校准,并利用改进的斜端面 Hopkinson 杆对三轴加速度计中 2 个轴同步校准。加速度计通过 495 瞬干胶粘接于杆的端面,加压固化 30 min。

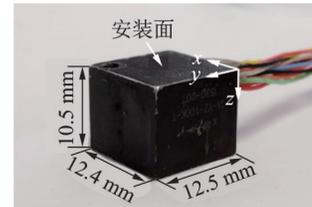


图 7 CA-YZ-100K 压阻式三轴高 g 值加速度计
Fig.7 CA-YZ-100K piezoresistive triaxial high g accelerometer

4.1 三轴加速度计各轴依次校准

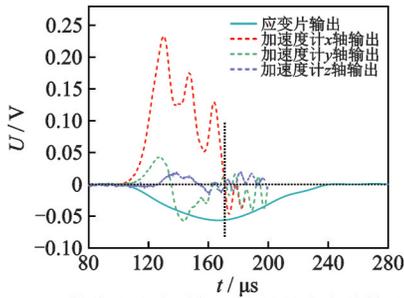
利用传统 Hopkinson 杆校准装置,将三轴加速度计各轴作为主方向(与冲击方向相同),依次对每个轴的灵敏度进行校准(见图 2)。三轴加速度计 3 个方向依次校准图分别如图 8~10 所示。由图可知,将 1 个方向作为主方向时,另外 2 个方向同样有信号输出,即传感器存在横向输出,分析原因可能有:①由于组装误差等原因,被校加速度计 3 个敏感轴非完全正交;②校准试验时,子弹、垫块及校准杆之间不能保证完全共轴撞击;③因横向惯性效应,应力波在杆中传播过程中质点横向存在加速度等。由图可以看出,横向输出信号波形与主方向波形相差较大,可根据 3 个方向的输出信号,粗略估计各轴间的耦合程度。分析得到:加速度计 x, y 轴之间的耦合效应比较明显;而 x, z 轴及 y, z 轴之间的耦合作用相对较弱。在实际使用中应将垂直于 z 轴的面作为安装面,可降低交叉耦合带来的测量误差。

通过积分法求出 3 个轴各自灵敏度如表 3 所示,3 个轴灵敏度校准结果与厂家给出的灵敏度相差不大,最大误差为 3.69%。

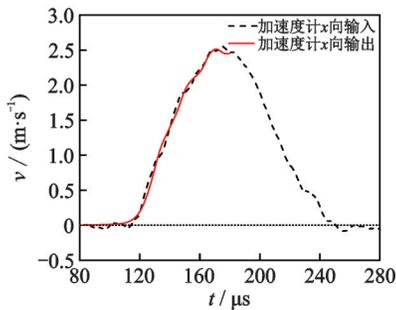
表 2 CA-YZ-100K 型三轴加速度计基本参数

Tab.2 Basic parameters of CA-YZ-100K triaxial accelerometer

量程/ g	零点输出 电压/mV	灵敏度/ (($\mu\text{V}\cdot\text{g}^{-1}$) $\cdot 8\text{V}^{-1}$)	线性度/ %	频率响应/ kHz	抗冲击 g 值/ g	U/V	工作温度/ $^{\circ}\text{C}$
10^5	± 100	0.732	≤ 2	≤ 20	2×10^5	5~15	-40~85



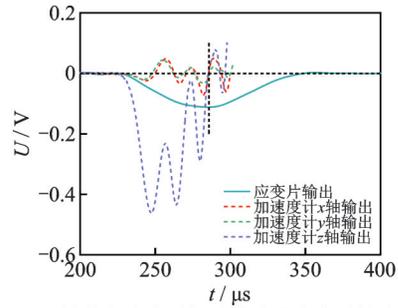
(a) x轴为主方向时加速度计及应变片输出电压
(a) Accelerometer and strain gauge output voltage when x axis is the main direction



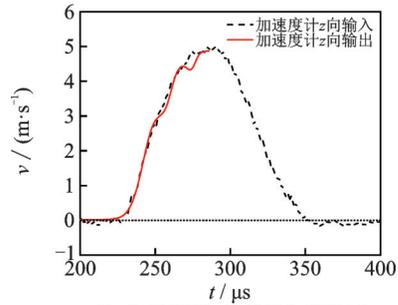
(b) 加速度计x轴的输入和输出
(b) Accelerometer input and output on x axis

图8 x轴为冲击方向

Fig.8 x axis is the impact direction



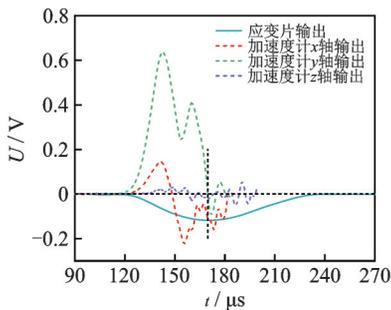
(a) z轴为主方向时加速度计及应变片输出电压
(a) Accelerometer and strain gauge output voltage when z axis is the main direction



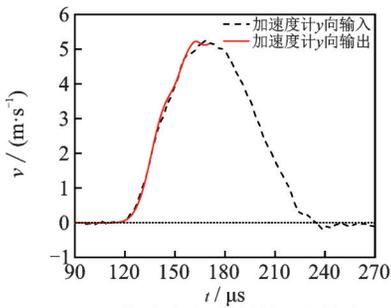
(b) 加速度计z轴的输入和输出
(b) Accelerometer input and output on z axis

图10 z轴为冲击方向

Fig.10 z axis is the impact direction



(a) y轴为主方向时加速度计及应变片输出电压
(a) Accelerometer and strain gauge output voltage when y axis is the main direction



(b) 加速度计y轴的输入和输出
(b) Accelerometer input and output on y axis

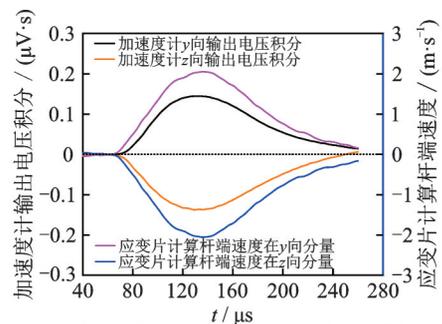
图9 y轴为冲击方向

Fig.9 y axis is the impact direction

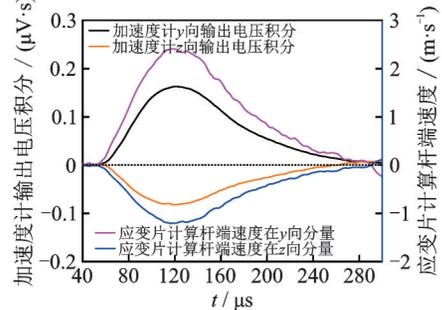
4.2 三轴加速度计中的2个轴同步校准试验

利用改进的斜端面 Hopkinson 杆对三轴加速度计中的2个轴进行同步校准,杆直径为 14 mm,长为

1 200 mm,加速度计安装面法向为 z 轴,y 轴与斜面切向平行。选取斜面夹角 α 为 45° 和 63.4° ,分别在气压为 0.035 和 0.05 MPa 下对加速度计灵敏度系数进行校准。图 11 为气压在 0.035 MPa, α 为 45° 和 63.4°



(a) α 为 45° 时0.035 MPa下输入和输出对比
(a) Input and output comparison at 0.035 MPa when $\alpha=45^\circ$



(b) α 为 63.4° 时0.035 MPa下输入和输出对比
(b) Input and output comparison at 0.035 MPa when $\alpha=63.4^\circ$

图 11 0.035 MPa 气压下输入和输出信号积分对比
Fig.11 Integral comparison of input and output signals at 0.035 MPa pressure

时加速度计输入和输出信号积分对比。可以看出,激励脉宽约为 $200\ \mu\text{s}$, 2 种角度的斜面杆对应 δ 值分别为 0.014 和 0.028, 可忽略斜面角度对加速度计灵敏度系数校准的影响。通过式(8)计算不同气压下加速度计的灵敏度系数及交叉灵敏度系数, 加速度计 y 轴和 z 轴灵敏度同步校准结果如表 4 所示。由表可见, 相比于单轴依次校准, y 和 z 轴同步校准时,

由于 2 轴之间的相互交叉耦合作用, 导致 y, z 轴灵敏度系数比单轴依次校准明显减小, 且 z 向的激励对 y 向输出的影响较大, 具体原因需对加速度计内部结构进行分析。相比于单轴加载, 多轴同步加载更接近于加速度在实际应用中的受载形式, 其标定的灵敏度系数更接近真实的输入输出关系。

表 3 加速度计灵敏度单轴校准结果

Tab.3 Uniaxial calibration results of sensitivity of accelerometer

加载方向	输入加速度 脉宽/ μs	输入加速度 幅值/ g	已知灵敏度/ ($\mu\text{V}\cdot\text{g}^{-1}$)	校准灵敏度/ ($\mu\text{V}\cdot\text{g}^{-1}$)	误差/%
x 轴	62	7 718.2	0.732	0.714	2.45
y 轴	50	20 225.7	0.732	0.723	1.23
z 轴	58	15 082.1	0.732	0.705	3.69

表 4 加速度计 y 轴和 z 轴灵敏度同步校准结果

Tab.4 Synchronous calibration results of y -axis and z -axis sensitivity of accelerometer

气压/ MPa	$\alpha/(\circ)$	$\bar{P}_y/(\text{V}\cdot\text{s})$	$\bar{P}_z/(\text{V}\cdot\text{s})$	$\bar{v}_y/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\bar{v}_z/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	灵敏度/ $(\mu\text{V}\cdot\text{g}^{-1})$			
						S_{yy}	S_{yz}	S_{zy}	S_{zz}
0.035	45	0.143 9	-0.138 4	2.065	-2.065	0.659	-0.038	-0.010	0.660
	63.4	0.162 8	-0.081 7	2.402	-1.201				
0.050	45	0.439 6	-0.425 4	6.185	-6.185	0.645	-0.065	0.009	0.697
	63.4	0.535 9	-0.268 3	7.904	-3.952				

5 结 论

1) 通过对 Hopkinson 杆端部切削, 将沿杆轴向的 1 维加速度脉冲沿斜面分解为 2 个互相正交的加速度脉冲, 实现对二轴加速度计同步冲击校准。

2) 对于直径为 14 mm 校准杆, 当 $0 \leq L \leq 14\ \text{mm}$, 可以满足 $\delta \leq 0.14$ 即加速度脉宽 $T \geq 20\ \mu\text{s}$ 的脉宽校准要求。对于脉宽过窄的激励脉冲, 需考虑波在传播过程中的弥散和衰减, 否则通过杆中间应变片信号推算杆端质点加速度会不准确。

3) L 相同的校准杆, 随着 δ 的减小, 斜面不同位置的质点加速度越趋于一致, 但 δ 并不是决定斜面质点加速度非均匀性的唯一参数, 还与 L 大小有关。

4) 同步校准计算 y, z 轴的灵敏度系数明显比单轴依次校准要小, 且 z 轴方向的冲击激励对 y 向输出影响较大, 初步分析原因, 主要由轴间的耦合作用及加速度计内部结构所导致。

参 考 文 献

[1] FAN J, WANG Y, ZU J, et al. Triaxial acceleration

measurement for oblique penetration into concrete target [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(11):2907-2913.

[2] BROWN G. Accelerometer calibration with the Hopkinson pressure bar[J]. Instrument Society of America Preprint, 1963, 49(3):63-69.

[3] UEDA K, UMEDA A. Characterization of shock accelerometers using davies bar and strain-gages [J]. Experimental Mechanics, 1993, 33(3):228-233.

[4] TOGAMI T C, BAKER W E, FORRESTAL M J. A split Hopkinson bar technique to evaluate the performance of accelerometers [J]. Journal of Applied Mechanics, 1996, 63(2):353-356.

[5] 李玉龙, 郭伟国, 贾德新, 等. 高 g 值加速度传感器校准系统的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(1):90-96.

LI Yulong, GUO Weiguo, JIA Dexin, et al. An equipment for calibration high g shock acceleration sensors [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(1):90-96. (in Chinese)

[6] YUAN K, GUO W, SU Y, et al. Study on several key problems in shock calibration of high- g accelerometers using Hopkinson bar [J]. Sensors and Actuators, A: Physical, 2017, 258:1-13.

- [7] SHI Y, YANG Z, MA Z, et al. The development of a dual-warhead impact system for dynamic linearity measurement of a high- g micro-electro-mechanical-systems (MEMS) accelerometer [J]. *Sensors*, 2016, 16(6):829-840.
- [8] 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.
FAN Jinbiao, WANG Yan, XU Peng, et al. Theory and method for calibration of high- g accelerometers with a narrow shock pulse [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(9):1242-1245. (in Chinese)
- [9] FOSTER J T, FREW D J, FORRESTAL M J, et al. Shock testing accelerometers with a Hopkinson pressure bar[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 46:56-61.
- [10] SHI Y B, ZHAO R, LIU J, et al. Design and analysis of triaxial MEMS high measure range accelerometer [J]. *Advanced Materials Research*, 2012(503/504):735-738.
- [11] YU M, ZHAO L, JIA C, et al. A high- g triaxial piezoresistive accelerometer with sensing beams in pure axial deformation [C]//2019 IEEE 14th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS). Bangkok, Thailand: IEEE, 2019: 176-180.
- [12] WON S H P, GOLNARAGHI F. A triaxial accelerometer calibration method using a mathematical model [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(8):2144-2153.
- [13] UMEDA A, ONOE M, SAKATA K, et al. Calibration of three-axis accelerometers using a three-dimensional vibration generator and three laser interferometers [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2004, 114(1): 93-101.
- [14] 彭孝东, 张铁民, 李继宇, 等. 三轴数字 MEMS 加速度计现场标定方法[J]. *振动、测试与诊断*, 2014, 34(3):544-548.
PENG Xiaodong, ZHANG Tiemin, LI Jiyu, et al. Field calibration of three-axis MEMS digital acceleration [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2014, 34(3):544-548. (in Chinese)
- [15] 董培涛, 黎渊, 吴学忠, 等. 测试压阻式三轴高 g 加速度计的霍普金森杆法(英文)[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6):1473-1478.
DONG Peitao, LI Yuan, WU Xuezhong, et al. Characterization of triaxial piezoresistive high- g accelerometer by Hopkinson bar method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(6):1473-1478. (in Chinese)
- [16] WANG Y, FAN J B, XU P, et al. Shock calibration of the high- g triaxial accelerometer [C]//2008 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Victoria, BC, Canada: IEEE, 2008:741-745.
- [17] 陈宏亮, 马少杰, 张英忠, 等. 三轴高 g 值加速度传感器的测试技术研究[J]. *传感技术学报*, 2018, 31(2): 175-179.
CHEN Hongliang, MA Shaojie, ZHANG Yingzhong, et al. Test technology research on three-axis high- g accelerometer [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(2):175-179. (in Chinese)
- [18] 景鹏, 马铁华, 王燕. 一种压阻式三轴高 g 值加速度传感器的冲击校准[J]. *传感技术学报*, 2008, 21(6): 954-958.
JING Peng, MA Tiehua, WANG Yan. Shock calibration of a piezoresistive three-axis high- g microaccelerometer [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 21(6):954-958. (in Chinese)
- [19] 林然, 张振海, 李科杰, 等. 高冲击三维加速度传感器横向灵敏度校准技术[J]. *振动、测试与诊断*, 2016, 36(5):922-928.
LIN Ran, ZHANG Zhenhai, LI Kejie, et al. New calibration technology of relative transverses sensitivity of high shock tri-axial accelerometer [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2016, 36(5): 922-928. (in Chinese)



第一作者简介:高猛,男,1989年10月生,博士。主要研究方向为多维高 g 值加速度计动态校准方法等。曾发表《高 g 值冲击下泡沫铝填充壳结构抗冲击性能多目标优化》(《应用力学学报》2016年第33卷第5期)等论文。

E-mail:gaomeng891023@163.com

通信作者简介:郭伟国,男,1960年11月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为材料大变形的动态变形、失效/破坏机理、材料本构关系、动态试验技术等。

E-mail:weiguo@nwpu.edu.cn