

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.06.08

# 便携式冲击加速度激励装置研究

何旋, 曹亦庆, 李善明, 商一奇, 赵巍宇

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 冲击加速度测量技术广泛应用于军队科技建设中。针对冲击加速度传感器计量的需求和特点, 遵循军事计量设备国产化趋势, 研制加速度幅值范围为  $2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ 、脉冲持续时间范围为  $0.2 \sim 4 \text{ ms}$  的便携性气动上抛式冲击加速度激励装置, 完善军用冲击加速度动态计量技术体系, 为我国军事冲击计量提供重要技术保障。

**关键词:** 冲击加速度; 激励; 便携; 军事计量; 气动上抛

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)06-0040-06

## Research on Portable Impulse Acceleration Excitation Device

HE Xuan, CAO Yiqing, LI Shanming, SHANG Yiqi, ZHAO Weiyu

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** Impulse acceleration measurement technology is widely used in military science and technology construction. In view of the requirements and characteristics of modern military impact acceleration sensor measurement, following the trend of localization of military measurement equipment, a portable pneumatic up throw shock acceleration excitation device with acceleration amplitude range of  $2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$  and pulse duration range of  $0.2 \sim 4 \text{ ms}$  was developed, and the technical system of dynamic measurement of military impact acceleration is improved to provide important technical support for military impact measurement in China.

**Key words:** impulse acceleration; excitation; portable; military metrology; pneumatic upthrow

## 0 引言

因力、位移、速度和加速度等参量急剧变化而激起的系统瞬态运动均为冲击的表现形式<sup>[1]</sup>。冲击加速度是力学专业中的重要物理量, 冲击加速度的计量是动态力学计量领域的重要组成部分。冲击加速度测量在军事科技、工业设备、武器装备等产品的使用、维护过程中具有重要意义和应用价值。在军用计量体系中, 目前, 国内只有少数军用校准实验室具有冲击加速度计量能力, 且激励装置多为摆锤或落体冲击台形式。此类激励装置采用手动或简单的机械提升方式, 体积大、笨重, 机动性能差, 自动化程度较低, 仅适合在实验室内固定使用。近年来, 随着国家经济实力和国防战略的调整, 尖端武器装备技术得以迅猛发展, 冲击加速度等动态计量技术的发展受到越来越多的军事专家和学者的重视<sup>[2]</sup>。同时, 随着现代战争向大型高新武器装备体系对抗方向发展, 大型综合测试系统应用越来越广泛, 系统测试功能越来越复杂, 测试的参数趋向于多样化, 现场高效率冲击计量校准的需求日益凸显。因此, 需要自主研发便携式冲击加速度激励装

置实现装备保障, 以加强冲击计量设备国产化, 增强自主研发能力, 完善军用冲击加速度动态计量技术体系。

## 1 国内外发展现状

从上世纪 50 年代开始, 我国国家计量院、国防计量中心及 PTB 等国外研究院均开展了冲击加速度传感器比较校准装置研究, 先后建立了冲击摆式、气炮式、落体式冲击激励装置, 最大冲击加速度可达  $1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ 。但此类冲击激励源装置笨重, 便携性差, 自动化程度低。仅适合在实验室内校准使用, 无法满足现场校准的需求。早期国内自行研制的冲击加速度激励装置有: 气炮式、落球式、落体式、摆锤式冲击加速度激励装置, 冲击加速度范围分别为  $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ ,  $1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ,  $1 \times 10^2 \sim 2 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ ,  $5 \times 10 \sim 3 \times 10^3 \text{ m/s}^2$ , 其中落球式和摆锤式如图 1 所示。气炮式的工作原理是通过气体压力推动弹丸与缓冲装置撞击产生冲击激励; 落球式是通过球体自由跌落后与基座相撞产生冲击激励; 落体式是将台体提升到一定高度并释放, 使台体与底座缓冲装置撞击产生冲击激励; 摆锤式是把摆锤转到需要的角度处释放使

与之静止砧体撞击产生冲击激励。此类装置的制造工艺陈旧, 体积笨重, 多为纯机械或手动操作, 工作效率低, 不能满足目前武器装备大范围、便携、快速、在线的计量发展需求。

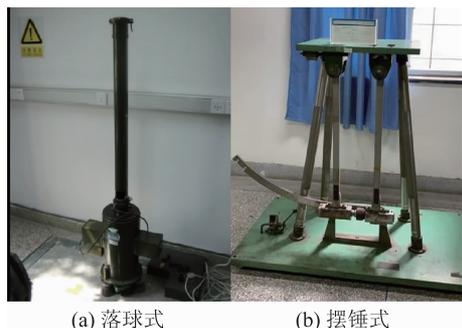


图1 早期国内自行研制的冲击加速度激励装置

近年来, 美、德等发达国家应用气动、压电叠堆等先进驱动技术研制小型冲击激励源, 并建立了自动化程度高、便携性好、校准范围宽的二次冲击校准装置。国外冲击加速度计量校准装置的驱动方式有气动、压电叠堆等, 撞击方式多为上抛式、水平式。其中以压电叠堆作为激励方式的霍普金森杆最大冲击加速度可达  $1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ , 例如德国 SPEKTRA 公司生产的 CS18 MS 型冲击加速度激励装置, 如图 2 所示, 其冲击加速度范围为  $2 \times 10^2 \sim 4 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ , 脉冲持续时间为  $0.02 \sim 0.12 \text{ ms}$ 。



图2 德国 SPEKTRA 公司的 CS18 MS 型冲击加速度激励装置

此类激励装置受到压电陶瓷驱动能力和特性的限制, 不能驱动过大负载, 因此很难实现  $4 \times 10^4 \text{ m/s}^2$  以上量级的冲击加速度激励, 产生的冲击激励脉冲宽度较窄, 约为几十微秒至上百微秒。而工作在  $4 \times 10^4 \text{ m/s}^2$  范围内的冲击加速度计, 实际使用时承受的加速度脉冲宽度在毫秒级别, 与校准环境相差较远, 校准结果缺乏实用性。

气动驱动方式是目前国际上最为常用的激励方式, 加速度范围为  $2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ , 脉冲持续时间为

$0.02 \sim 4 \text{ ms}$ 。其中  $1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$  以上量级的冲击加速度测量多采用高压气体驱动霍普金森杆运动产生冲击激励, 脉冲持续时间为  $0.02 \sim 0.1 \text{ ms}$ 。例如美国 ENDEVCO 公司生产的 2973 型冲击加速度激励装置, 如图 3 所示。



图3 美国 ENDEVCO 公司的 2973 型冲击加速度激励装置

此类激励装置采用的霍普金森杆为长度和直径之比大于 10 的细长棒, 受到高压气推动的弹体撞击后, 在杆的端面产生冲击激励。通过比较冲击激励的峰值与被校加速度计的输出峰值, 实现加速度计的灵敏度校准。受到加速度计生产水平限制, 目前国内外尚无大量级的标准冲击加速度计, 因此只能采用激光干涉仪或是应变传感器对冲击激励进行复现, 实现一次或二次冲击校准。此类装置校准量级较大, 适合大量值冲击加速度计的实验室校准, 无法进行常规范围内的工作加速度计校准。

常规范围内的工作冲击加速度计校准, 多采用高压气体驱动弹丸撞击安装有加速度计的砧体产生冲击激励, 加速度校准范围为  $2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ , 脉冲持续时间为  $0.1 \sim 4 \text{ ms}$ 。目前国际上最为常用的发生方式为气动上抛式。例如美国 ENDEVCO 公司的 2925 型、德国 SPEKTRA 公司的 CS18 LMS 型、美国 PCB 公司的 K9525C 型冲击加速度激励装置, 如图 4 所示。该种装置结构较为简单, 体积相对较小, 便携性强, 自动化程度高, 易于以此激励装置为基础建立集测试、校准、控制于一体的综合自动化校准设备。

本文主要针对军用武器装备常用测试范围的冲击加速度传感器进行校准装置设计, 这些传感器在飞机、舰船、导弹、火工品等武器装备的试验、使用及维修中有着极为广泛的应用。例如: 在装载行军过程中用来监测运输车受到冲击量级的加速度传感器, 一般工作范围为  $5 \times 10^3 \sim 2 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ 。武器系统瞄准装置强度试验中用到的冲击加速度传感器最大工作范围在  $1 \times 10^4 \text{ m/s}^2$  左右。常规火工品爆炸冲击试验中, 在近场环境下, 冲击传感器加速度测量范围在  $5 \times 10^4 \text{ m/s}^2$  以上;

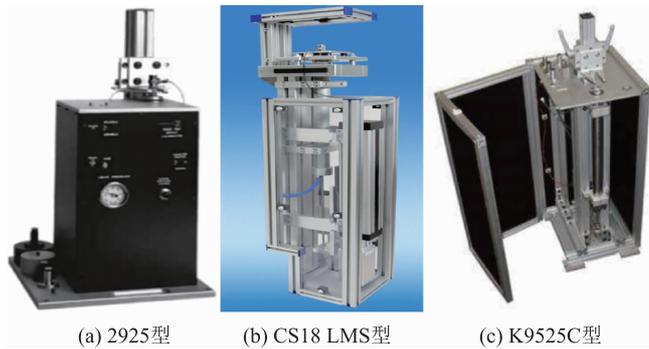


图4 气动上抛式冲击加速度激励装置

在中场环境下，加速度测量范围为  $1 \times 10^4 \sim 5 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ ；远场环境下，加速度测量范围在  $1 \times 10^4 \text{ m/s}^2$  以内。GJB150.18-1986《军用设备环境试验方法冲击试验》中给出了武器装备在作战、使用和装卸、运输、维修过程中承受的冲击加速度测量范围：脉冲的冲击试验量级在  $1 \times 10^3 \text{ m/s}^2$  以内，复杂波形的冲击试验量级在  $2 \times 10^4 \text{ m/s}^2$  以内；GJB360B-2019《电子及电气元件试验方法》中描述元器件运输、搬运及军用操作中受到的冲击量级最大为  $1.5 \times 10^3 \text{ m/s}^2$  [3-5]。结合上述军用武器装备及元器件常用的冲击加速度传感器测量范围，确定本文研究的便携式冲击加速度激励装置实现冲击加速度峰值范围为  $2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$ ，冲击加速度脉冲持续时间校准范围为  $0.2 \sim 4 \text{ ms}$ 。通过国内外冲击加速度激励装置方案对比，选用气动上抛式激励作为总体方案。

## 2 设计方案

军事计量与注重基础研究、侧重高精度的实验室科学计量不同，需要满足武器装备实际使用、维护过程中的溯源需求。基于此，本文研制了机动能力强、自动化程度高的冲击加速度发生装置。校准时，标准传感器与被校传感器背靠背安装在砧体上，使用控制系统控制冲击加速度激励装置对其施加同一激励。安装在砧体上的标准冲击加速度计及其测量系统复现冲击加速度激励峰值，被校冲击加速度计及其测量系统承受激励输出电信号峰值，通过比较两者大小获得被校加速度计的冲击灵敏度。冲击激励中加速度峰值和脉冲持续时间的大小，由压缩空气的压力、撞击时砧体上缓冲垫硬度和厚度来控制。冲击加速度激励装置采用气动上抛的运动原理：用压缩气体推动弹丸在气缸内向上运动，并以撞击砧体的方式产生近似半正弦的冲击脉冲运动。激励装置主要包括底座、弹丸、气

缸、砧体、缓冲垫、限位机构、支架等，其结构原理如图5所示。

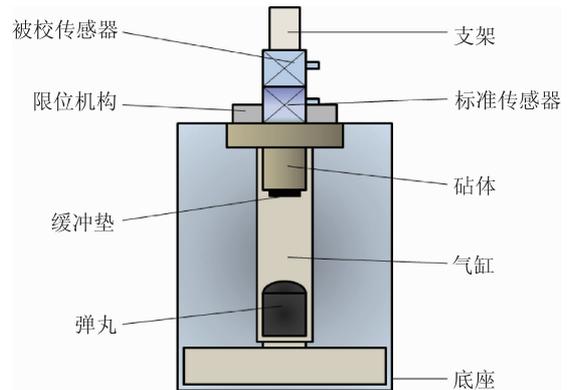


图5 冲击加速度激励装置结构原理

冲击时，空气快速释放进入气缸，驱动弹丸从底部初始位置向上运动，在气缸出口处撞击放置于出口的砧体及加速度计。撞击过程产生近似半正弦的冲击加速度激励脉冲。通过调整压缩空气的压力、砧体的质量、砧体下方缓冲垫的软硬程度及厚度，可以获得不同量级和持续时间的冲击加速度激励。这种气动上抛方式，具有能量损耗小、装置轻便、重复性和稳定性较好等优点，是目前国际上最为常用的冲击加速度计校准用激励发生方式。装置的结构设计图如图6所示。

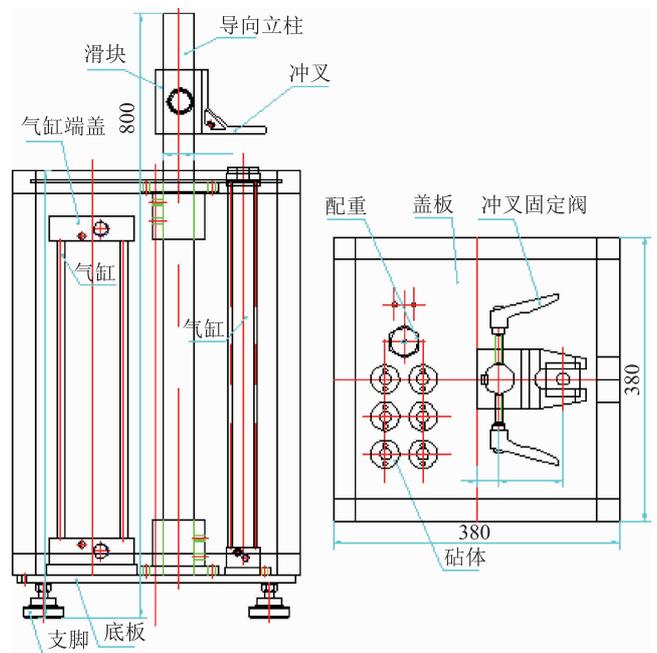


图6 冲击加速度发生装置装配图

为增强装置的便携性，将冲击加速度发生装置的大小设计为  $380 \text{ mm} \times 380 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 。为了减小激励

装置的重量,装置的外层采用铝合金框架式结构,框架间嵌入玻璃。装配图中各主要部分的功能如下:

滑块:用来调整冲叉的高度,以便于安装不同大小的加速度传感器。

砧体:考虑到砧体的频率响应特性等,将砧体设计为变截面的圆柱形,其顶端有 6.35 mm 的螺孔,用于安装加速度传感器,低端有橡胶及毛毡材质的波形发生器,冲击时,弹丸从气缸中向上运动,与砧体低端的波形发生器接触,通过砧体将冲击传至传感器安装面。为方便实现不同幅值的冲击,砧体采用相同的结构尺寸,采用铝合金及不锈钢两种材料设计。

配重:加速度传感器的质量一般为几克至几十克,由牛顿第二定律可知,在进行小加速度冲击实验时,需要的冲击力很小,而气源在出气量过小时会有一些的不稳定性,造成冲击加速度峰值的重复性较差。为避免此类情况的发生,设计了配重块,使用时可将配重块安装在砧体上,再将标准传感器及被校传感器背靠背安装在配重块上,即可用较大力值实现小加速度冲击,提高气源的稳定性。

冲叉:冲叉的作用是在冲击结束后阻止砧体的惯性运动,与一滑块相连,滑块的位置在导向立柱上沿垂直方向可调,可适用于不同大小的传感器。

导向立柱:用于固定冲叉及调整冲叉的高度。

支脚:由于该激励装置需适用于实验室及现场校

准,无法保证适用环境的地面水平,因此将激励装置的四个支脚设计成高度可调节的形式,以此来保证冲击方向竖直向上。

气缸:压缩气体通过气缸推动砧体向上运动。

冲叉固定阀:旋紧后可将冲叉固定在导向立柱上的特定位置。

### 3 砧体频响

冲击时,当激励的脉冲宽度足够窄,接近砧体的谐振周期时,砧体将发生谐振,这将极大影响加速度的测量结果,进而导致校准结果出现较大偏差。因此,针对砧体的谐振频率,对砧体结构进行合理设计是一项重要内容。保持物体的结构外形不变,物体的谐振频率与组成物体的材料密度的算数平方根成反比,即密度较大的材料组成的物体谐振频率较低,密度较小的材料组成的物体谐振频率较高。本文采用铝合金和不锈钢材料设计外形尺寸相同的砧体,由于不锈钢的材料密度大于铝合金,因此只需对不锈钢砧体设计方案的谐振频率进行验证,即可保证设计的砧体达到频响要求。采用有限元分析软件计算砧体谐振频率,实际是计算一个特征值的问题,特征值对应谐振频率,特征向量对应振型<sup>[6]</sup>。建立砧体结构的有限元模型和计算结果如图 7 所示,计算得到砧体的轴向谐振频率为 22727 Hz。

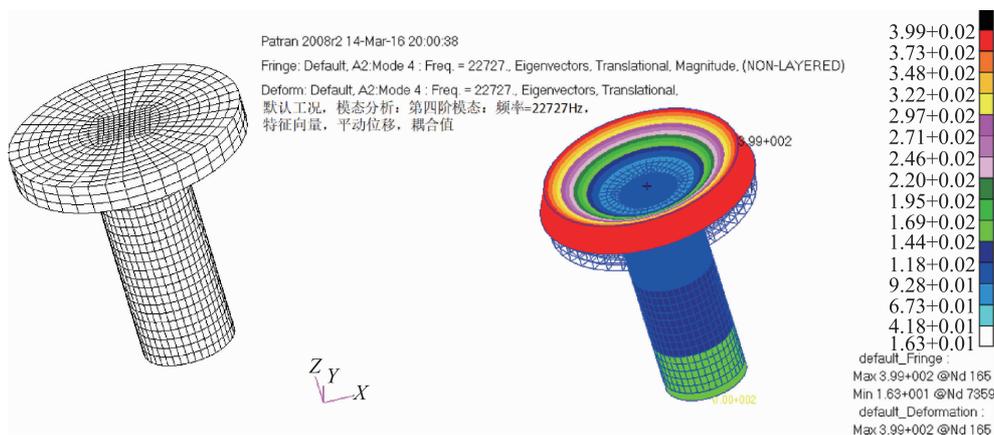


图 7 砧体有限元模型和分析结果

冲击运动的时间历程是一种典型的非周期信号,为了进行冲击过程的频域描述,采用从周期信号援引的方法解决,将冲击信号作为一个周期信号处理,认为其周期极大,在无穷远处重复。周期无限扩大,周期信号频谱谱线间的间隔无限缩小,谱线无限密集,一致离散频谱演变成连续频谱。据此,可将非周期信

号理解为无限多个频率极其接近的频率成分的合成。根据这种思路,可推导出非周期信号的频域表达式

$$|F(f)| = \frac{2AT}{\pi} \left| \frac{\cos \pi f T}{1 - 4f^2 T^2} \right| \quad (1)$$

式中:  $A$  为半正弦脉冲峰值;  $T$  为半正弦脉冲持续时间。

图 8 为典型半正弦冲击时间函数和它的傅里叶变换的频谱图。从图 8 中可以看出, 大于约  $1.5/T$  的频率分量时, 冲击波形趋于平缓, 也就是说, 当砧体的轴向谐振频率大于  $1.5/T$  时, 不易在该方向激发谐振。本文研究的冲击加速度激励装置产生的半正弦波的脉冲持续时间为  $0.2 \sim 4 \text{ ms}$ , 因此, 砧体的轴向谐振频率大于  $7500 \text{ Hz}$  时, 可视为冲击过程中脉冲持续时间的大小对砧体不产生影响。基于以上分析可知, 本文设计的砧体能够满足轴向谐振频率要求。

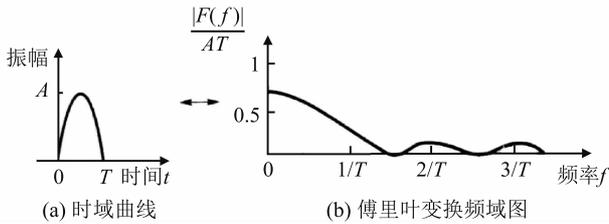


图 8 冲击时域曲线和傅里叶变换频域图

#### 4 摩擦及横向运动

弹丸在气缸内受到压缩空气推动, 向上运动击打砧体, 在运动过程中, 弹丸在气缸内运动时产生的摩擦力、弹丸运动方向与被校冲击加速度传感器敏感轴方向的不同轴度, 均会造成一定的运动能量损失, 影响激励的使用效率, 而且直接影响灵敏度校准的重复性及装置的稳定性。不同轴的冲击激励还会对砧体施加横向运动, 影响加速度传感器灵敏轴的输出信号, 干扰校准结果。为提高气源的利用效率, 气缸内壁附加自润滑轴承, 可有效减小弹丸与气缸内壁的摩擦, 增加气动系统的使用效率, 有效降低装置对气源的要求; 气缸内壁的圆柱度为  $0.01$ , 气缸的两端靠底板和盖板进行固定, 为了保证装配后气缸的垂直度, 底板和盖板上的通孔轴线与底板、盖板的板面间垂直度要求达到  $0.01$ , 从而保证装配后气缸轴线与底面垂直, 装置底板下方配有四个高度可调的支脚, 可在不同使用环境中实现装置水平度的微调。

#### 5 试验验证

对冲击加速度激励装置产生的冲击加速度幅值和脉冲持续时间进行验证, 验证试验结构如图 9 所示。

被校传感器安装结构设计为: 在进行大幅值冲击时, 被校传感器与砧体刚性连接; 在进行小幅值冲击时, 在砧体与被校传感器之间安装一质量块, 砧体与质量块之间、质量块与被校传感器之间均为刚性连接。对气缸充入一定压力的压缩空气后进行释放, 气体推

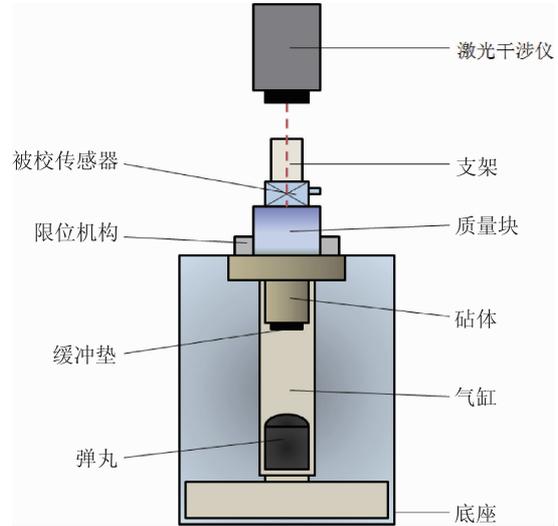


图 9 验证试验结构图

动运动体加速向上运动, 缓冲垫与传感器安装结构发生撞击, 产生冲击运动; 安装于砧体上的传感器与砧体一起发生冲击运动, 产生脉冲激励; 通过激光干涉仪测量砧体上表面靠近传感器安装点的冲击加速度获得时域曲线。冲击加速度幅值和持续时间的变化通过调整不同的砧体、质量块、缓冲垫厚度及材质获得; 采集激光干涉仪输出的速度幅值-时间波形并进行滤波, 读取滤波后的加速度峰值; 对于实测脉冲, 通常取  $10\%$  峰值作为设定值, 读取冲击脉冲的持续时间。测试结果如表 1 所示。

表 1 量程范围

序号	次数	加速度峰值/g	脉宽/ms	砧体/kg	质量块/kg	缓冲垫
1	1	19.93	6.07	0.088	0.505	编号 4170 橡胶 10 mm
	2	20.00	6.07			
	3	19.59	6.07			
2	1	109.18	1.94	0.088	0.505	编号 4170 橡胶 5 mm
	2	105.32	1.92			
	3	104.39	1.91			
3	1	496.56	1.00	0.030	0.505	编号 4170 橡胶 5 mm
	2	499.33	1.06			
	3	505.32	0.99			
4	1	1054.53	0.53	0.030	/	3 mm 纯羊毛毡
	2	1010.31	0.57			
	3	1044.83	0.55			
5	1	5299.27	0.20	0.030	/	2 mm 纯羊毛毡
	2	4961.44	0.20			
	3	4831.62	0.21			
6	1	10372.36	0.19	0.030	/	2 mm 纯羊毛毡
	2	10851.57	0.18			
	3	10651.51	0.18			

从以上结果可以看出,冲击加速度激励装置产生的加速度幅值范围为  $19.59g \sim 10851.57g$ , 即  $192.18 \sim 106453.90 \text{ m/s}^2$ , 满足加速度幅值范围  $2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^5 \text{ m/s}^2$  的要求; 脉冲持续时间范围为  $0.18 \sim 6.07 \text{ ms}$ , 满足脉冲持续时间范围  $0.2 \sim 4 \text{ ms}$  的要求。

## 6 结束语

本文研究的便携式冲击加速度激励装置工作范围基本能够覆盖工作加速度计的常规使用范围,且装置结构较为简单,体积相对较小,整套校准装置具有便携性好、自动化程度高的特点,可在军事冲击计量现场充分发挥计量保障作用,满足武器装备试验、使用及维修过程中的需求,具有重要实际应用价值。

### 参考文献

[1] 杨利芳, 邹经湘. 冲击过载机械式方法测量理论分析与设计[J]. 包装工程, 2004, 21(4): 29-30.

- [2] 毛宏宇, 胡卓林, 冯保民, 等. 军事计量技术现状及发展趋势[J]. 计测技术, 2010, 21(3): 9-11.
- [3] GJB150.18 - 1986 军用设备环境试验方法冲击试验[S]. 1986.
- [4] GJB360B - 2019 电子及电气元件试验方法[S]. 2019.
- [5] GJB548B - 2005 微电子器件试验方法和程序[S]. 2005.
- [6] 何旋. 动态力校准中锤体质量块的结构设计[J]. 科技创新导报, 2016, 13(4): 57-59.

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-08-25

### 作者简介

何旋(1987-), 男, 硕士研究生, 2014年毕业于南京航空航天大学, 获工学硕士学位, 现于航空工业计量所从事航空器产业计量测试研究工作。



## 2019 长沙国际新材料产业检验检测与装备博览会盛大开幕

2019年11月14日,以“构建产学研用大通道”为主题的第二届中国新材料产业发展大会暨2019长沙国际新材料产业检验检测与装备博览会在湖南国际会展中心隆重召开。黄伯云、干勇、李元元等30多位两院院士出席。本次大会设22场专业论坛,博览会现场吸引来自全国的400余家参展商参展。主办单位湖南省检验检测产业创新联盟、湖南省检验检测学会组织中大检测集团、苏轼广博等30余家湖南省检验检测特色产业园区检验检测机构亮相此次大会暨博览会,助力新材料产业发展。

中国科学院院士魏炳波在主题报告中提出,“十三五”以来,各地依托优势特色资源,创新发展,高起点规划,高水平建设,使新材料产业呈现出区域产业集群的良好发展态势,初步形成若干产业群或产业集聚地,加速了产业链在上下游的逐步延伸,带动了相关配套产业的发展。经过不懈努力,我国已成为世界上名副其实的材料大国。除此之外,以企业为主体、市场为导向,产学研用相互融合的新材料创新体系日趋完善。各行各业借助检验检测手段,可以促进创新要素集聚和辐射,给产业发展带来技术外溢效应,提升创新驱动能力,为主动适应和引领新常态提供必要的技术支撑和科学的制度安排。检验检测服务业切合这一时代背景需要,能够为诸多有转型升级需要的企业提供研发阶段的检测服务,助力企业的转型升级。作为新材料产业发展的重要一环,新材料的检验检测对于新材料的研究发展至关重要,相应的,各类新材料的快速发展也对检验检测企业提出了更高的要求。湖南省检验检测产业创新联盟、湖南省检验检测学会作为我省推进检验检测产业转型升级,保证质量基础,推动经济高质量发展,在提升各实验室对新材料检验检测管理能力上发挥着重要作用。本次展会是集中展示当今世界检验检测新技术、认证认可、新装备、新方法、新水平的重要窗口,同时也是检验检测及其产业链机构技术合作、交流和发展的重要平台。

(摘自 计量测控)