

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.04.02

高冲击传感器、极端环境试验测试与计量校准

张振海¹, 张振山², 胡红波³, 李科杰¹, 崔占忠¹, 蒋宇强²

(1. 北京理工大学机电学院, 北京 100081; 2. 北京海泰微纳科技发展有限公司, 北京 102200;

3. 中国计量科学研究院, 北京 100029)

摘要: 侵彻弹药可用于攻击敌方地下工事、大型舰船、重要桥梁等高价值目标, 具有重要的战术价值, 高冲击传感器作为各类高速侵彻弹药的核心器件, 是实现精确炸点控制、达到最佳毁伤效能的关键。极端高冲击环境试验测试与计量校准重大仪器装备是支撑军工产品、核心器件研制、可靠性验证和评估评价的重要手段, 西方国家对中国实行严格禁运与技术封锁。本文综述了高冲击传感器、极端恶劣环境试验测试与计量校准技术的国内外研究进展与发展趋势, 分析了我国此类技术存在的难点与核心问题, 指出了可行的解决途径、突破方向和研究趋势, 为高冲击传感器、极端高冲击环境试验测试与计量校准技术的发展提供参考和依据。

关键词: 试验测试; 计量校准; 极端恶劣环境; 高冲击传感器

中图分类号: TB936; TP206

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)04-0012-12

Testing and Calibration Technology of High-g Accelerometer and Extreme Harsh Environment Test

ZHANG Zhenhai¹, ZHANG Zhenshan², HU Hongbo³, LI Kejie¹, CUI Zhanzhong¹, JIANG Yuqiang²

(1. School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Beijing High-tech Micro & Nano Technology Development Co., Ltd, Beijing 102200, China;

3. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Penetrating ammunition can be used to attack enemy underground works, large ships, important bridges and other high-value targets, which has important tactical value. As the core component of all kinds of high-speed penetrating ammunition, high-g accelerometer is the key to achieve accurate explosion point and to reach optimal damage efficiency. Testing and calibration equipment for extreme adverse environment test is an important means to support the development of military products, core devices, reliability verification and evaluation. Western countries impose strict embargo and technical blockaded on our country. This paper summarized the research progress and development trend of high-g accelerometer and extreme environment test equipment at home and abroad, analyzed the difficulties and core problems of this technology in Chinese, pointed out feasible solutions, breakthroughs and research trends, provided reference and basis for the development of high-g accelerometer, extreme environment test and measurement calibration technology.

Key words: test; measurement and calibration; extreme harsh environment; high-g accelerometer

0 引言

侵彻弹药可用于精确打击地下指挥中心、核设施、发射井、坑道等地下工事, 航母等大型舰船, 机库、机场跑道、大型桥梁等高价值目标, 具有重要的战术和战略意义, 在近三十年内得到了快速发展。随着战场攻防对抗的加剧, 以及平台技术、突防技术的进步, 高速侵彻弹药由于具备高效毁伤加强防护的深埋地下的硬目标和海上大型水面舰船目标的能力, 日益受到军事强国的重视。美国陆、海、空军都启动了高速侵彻弹药方面研究工作, 我国也已结合制导炸弹、弹道

导弹、高超音速导弹、新型超高速武器等领域基础, 对侵彻弹药所需相关技术开展全面研究。

高冲击加速度传感器作为各类侵彻弹药的关键核心器件, 可实现精确炸点起爆控制, 这种高冲击传感器具备超高量程、高可靠性和高瞬态响应的特性, 同时具有体积小、重量轻、可靠性高和易于批量制造的优点, 是实现武器装备轻量化、小型化、微型化、智能化和集成化的关键。利用高冲击加速度传感器, 识别出侵彻过程中的土壤、岩石、混凝土或者空穴等介质目标, 计算出侵彻深度、侵彻建筑的层数, 根据预编好的最佳起爆点来引爆战斗部, 对预定目标实施精

确高效毁伤。在攻击复杂结构目标时,还要计算弹药与目标的侵彻角,以保证最佳的毁伤效果。我国武器装备智能化改造、各类导弹炮弹等智能武器研制需要大量高冲击加速度传感器,而这类高端军用传感器被西方国家严格禁运和技术封锁,传统的惯性传感器由于体积、重量、成本和可靠性的限制,无法满足制导炮弹和制导航弹等武器装备的要求,高冲击加速度传感器已成为制约我国特种武器发展的瓶颈之一。

极端高冲击传感器使用环境恶劣,典型应用场景包括:智能灵巧引信、侵彻武器试验、近场与远场爆炸试验、引信与安全系统试验、多种高冲击试验、高冲击数据记录与冲击波形监测等。极端条件非常规参数测试的实验方法和装备,已成为一项基础性、战略性、前瞻性的高新技术,指标很高,难度很大^[1-11]。

1 高冲击传感器研究进展

西方国家尤其是美国在高冲击加速度传感器技术领域处于世界领先水平。国外一些著名大学与研究机构,如 Draper 实验室、喷气推进实验室(JPL)、Litton、BEI 公司,都在高冲击加速度传感器方向开展了大量研究工作,成效显著。根据工作原理的不同,高冲击加速度传感器主要包括压阻式、压电式、热对流式和电容式。压电式高冲击加速度传感器虽然量程较大,一般可达 $10 \times 10^4 g$,但是其致命缺点是高冲击后短时间内零点不能回复,或者零点回复较慢,难以应用于打击多层硬目标。相比较而言,压阻式高冲击加速度传感器可靠性高、测试精度高、性能稳定、一致性好、易于大批量生产,更适合在恶劣的测试环境中使用。

美国 Endevco 公司、PCB 公司、丹麦 B&K 公司、瑞士 KISTLER 公司、美国 ADI 公司、Honeywell 公司、加州大学 Berkeley 分校、德国 Dresden 大学、日本 Toyohashi(丰桥)大学等科研院所都开展了各种原理、结构的高冲击加速度传感器的研究,成果已经被成功应用到军事领域中。由于高冲击加速度传感器的特殊应用背景,美国等西方国家对中国实行严格的技术封锁和禁运,公开资料较少,参考资料有限。因此研制具有自主知识产权的高冲击传感器正式产品,对实现自主可控、解决进口替代具有重要的现实意义。

1.1 单轴高冲击加速度传感器

美国 Endevco 公司(已经被美国 Meggitt PLC 公司收购,成为其传感器系统事业部)在高冲击传感器与极端高冲击试验测试方面具有长期技术积累。其研发的 727 系列产品是一款重量只有 0.3 g 的压阻式 MEMS 加速度

传感器,如图 1 所示,最高量程 $6 \times 10^4 g$,频响 100 kHz,10 V 电压激励,典型冲击灵敏度为 $0.3 \mu V/g$,粘接方式安装。7270A 系列产品有 $2 \times 10^4 g$, $6 \times 10^4 g$, $20 \times 10^4 g$ 等多个量程,如图 2 所示,双螺钉硬连接安装方式,标称谐振频率 1.2 MHz,频响 150 kHz,重量 1.5 g,外型尺寸 14 mm × 7 mm × 2.8 mm,价格非常昂贵。7270AM4 与 7270A 参数完全相同,它采用单螺柱结构硬连接安装方式。 $6 \times 10^4 g$ 以上量程产品对中国实行严格的出口限制。2255B 系列压电式冲击传感器,如图 3(a)所示,采用 IEPE 技术,电压输出,螺纹硬连接方式安装,重量 2 g,2255B-01 型号量程是 $5 \times 10^4 g$,标称谐振频率 300 kHz,频响 20 ~ 30 kHz,典型灵敏度为 $0.1 mV/g$ 。2225M5A 系列压电式冲击传感器,如图 3(b)所示,电荷输出方式,量程为 $10 \times 10^4 g$,采用螺纹硬连接安装方式,重量 13 g,电荷灵敏度 $0.025 pC/g$ 。



图1 Endevco 公司 727 系列高冲击传感器



图2 Endevco 公司 7270A 系列高冲击传感器



(a) 2255B型



(b) 2225M5A型

图3 Endevco 公司压电系列冲击传感器

美国 PCB 公司(已被美国 MTS 公司收购,成为其传感器事业部)在极端高冲击、振动、力学参数测试领域优势明显。3501B 系列压阻式 MEMS 加速度传感器产品,如图 4(a)所示,采用螺纹硬连接安装方式,重量 2.5 g, $2 \times 10^4 g$ 量程产品频响为 10 kHz,标称谐振频率 60 kHz,灵敏度为 $1 \mu V/g$; $6 \times 10^4 g$ 量程产品的频响为 20 kHz,标称谐振频率 120 kHz,灵敏度为 $0.3 \mu V/g$ 。350 系列压电式冲击传感器,如图 4(b)所

示,采用 ICP 技术,电压输出,有 $1 \times 10^4 g$, $5 \times 10^4 g$, $10 \times 10^4 g$ 三个量程,螺纹硬连接方式安装,重量 4.5 ~ 5.5 g,标称谐振频率 100 kHz,频响 10 kHz。价格昂贵。

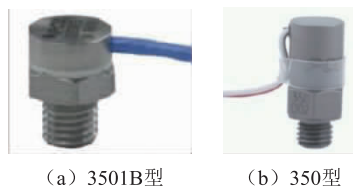


图 4 PCB 公司高冲击加速度传感器

丹麦 B&K 公司是声学、振动、冲击测量与分析领域著名传感器制造商。8339 系列压电式冲击传感器,如图 5(a)所示,采用 IEPE 技术,电压输出,有 $2 \times 10^4 g$, $5 \times 10^4 g$, $8 \times 10^4 g$ 三个量程,螺纹硬连接安装,重量 5.8 g,标称谐振频率 130 kHz,频响 20 kHz 左右。8309 系列压电式冲击传感器,如图 5(b)所示,电荷输出,量程为 $10 \times 10^4 g$,M5 螺纹硬连接安装,重量 3 g,标称谐振频率 180 kHz,频响 28 kHz。价格昂贵。

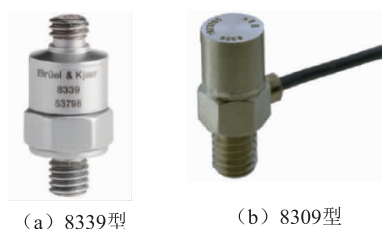


图 5 B&K 公司压电系列冲击传感器

瑞士 KISTLER 公司研制的 8742A 系列压电式冲击传感器,如图 6 所示,采用 IEPE 技术,电压输出,有 $0.5 \times 10^4 g$, $1 \times 10^4 g$, $2 \times 10^4 g$, $5 \times 10^4 g$ 四个量程,采用螺纹硬连接方式安装,重量 4.5 g,标称谐振频率 100 kHz,频响 10 kHz, $5 \times 10^4 g$ 量程传感器冲击灵敏度为 0.1 mV/g。

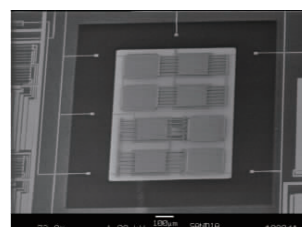
基于 MEMS 微加工技术,美国德雷伯试验室研制了电容式 MEMS 高冲击加速度传感器,文献资料显示,量程为 $20 \times 10^4 g$,具有体积小、成本低、响应频率高、温度系数小、回零快和准确度高的特点。

美国 Sandia 国家实验室基于 MEMS 微机械加工技术研制出一种侵彻武器用高冲击加速度传感器,如图 7 所示,量程 $5 \times 10^4 g$ 。加速度传感器主要由参考电容、检测电容和支撑梁组成。图中检测电容和参考电容形状大小完全一致。检测电容材料为多晶硅,结构由两

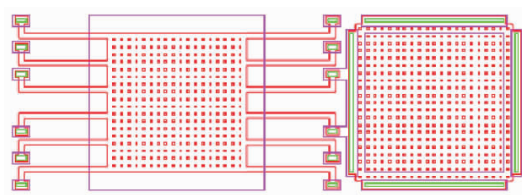


图 6 KISTLER 公司压电系列冲击传感器

部分组成,一部分是固定极板,另一部分是可动极板。固定极板直接粘在衬底上,可动极板在梁的支撑下正对固定极板。图 7 中,左边为检测电容,采用 L 形梁连接;右边为参考电容,直接连接在基座上,由于刚度较大,确保满量程时电容变化较小,有效减少测量误差。检测电容没有直接通过直梁连到基座上而是通过 L 形梁连到基座上,使检测电容的可动电极在水平和垂直方向上都有一定的余量,减少安装时的应力影响。检测电容和参考电容都采用打孔方式增加阻尼,以改善动态特性。



(a) 微结构扫描电镜照片



(b) 微结构示意图

图 7 Sandia 实验室高冲击加速度传感器

基于 SOI-MEMS 加工工艺,美国 ADI 公司设计了单片集成高冲击加速度传感器,其结构和封装图如图 8 所示。该传感器量程达 $10 \times 10^4 g$,应用时直接将传感器焊接在电路板上。

基于 CMOS-MEMS 技术,伊朗 Sahand 大学设计了双梳齿结构的高冲击加速度传感器,如图 9 所示,文献描述该结构器件可测到 $12 \times 10^4 g$ 的冲击加速度。

Dytran 公司研制的 3086A 型号高冲击加速度传感器, 外形结构如图 10 所示, 量程 $7 \times 10^4 g$, 抗 $10 \times 10^4 g$ 瞬时冲击, 灵敏度为 0.05 mV/g , 采用螺纹硬连接方式安装, 其质量为 3.5 g 。

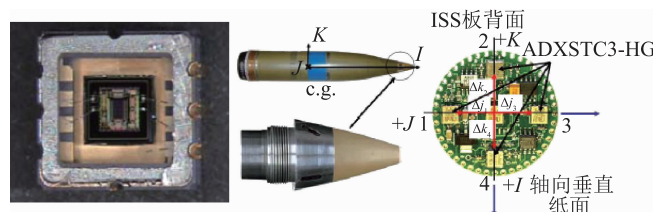


图 8 SOI-MEMS 加速度计结构简图与封装图

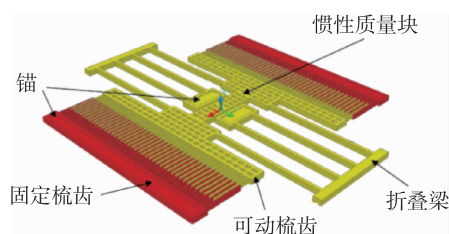


图 9 双梳齿的高 g 传感器 3D 结构



图 10 Dytran 公司高冲击加速度传感器

高冲击 MEMS 加速度传感器属于高端传感器, 主要应用于国防武器装备和民防重大工程, 使用环境极端恶劣, 可靠性要求高, 研发难度大, 资金投入多, 用量少, 仅凭市场行为的拉动效应, 很难研制出可用产品, 需要国家持续的支撑和投入。我国 20 世纪 90 年代开始进军 MEMS 产业, 几十家科研机构 and 高校开展高冲击加速度传感器研究, 但是整体水平还有待提高, 许多成果停留在实验室原理样机阶段, 能达到工程化应用的产品很少。

兵器工业集团第二一四研究所和中科院上海微系统所合作, 基于 MEMS 技术研制出悬臂梁结构的高冲击加速度传感器, 有 $2 \times 10^4 g$ 和 $6 \times 10^4 g$ 两种量程, 封装采用 TO263 - 5L 塑封形式, 将传感器焊接到电路

板上使用, 外形图和安装示意图如图 11 所示。

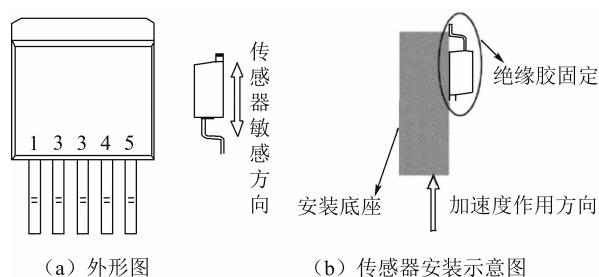


图 11 兵器工业第二一四所塑封加速度传感器

“十五”~“十二五”期间, 北京理工大学李科杰教授、张振海副教授开展了硬目标侵彻高冲击试验、单轴和三轴高冲击传感器关键技术攻关, 包括: 压电薄膜压缩型、压电石英型、MEMS 压阻型等多种高冲击加速度传感器研究, 进行了近百发实弹打靶硬目标侵彻试验, 获取到 $18 \times 10^4 g$ 、脉冲持续时间大于 1 ms 典型实弹数据, 传感器样机如图 12 所示。

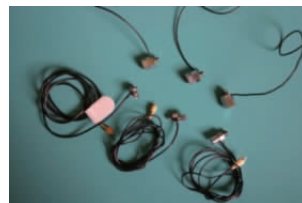


图 12 北理工压电薄膜和压阻式高冲击传感器

中国工程物理研究院电子工程研究所程永生团队开展压阻式 MEMS 加速度传感器研究, 传感器最高量程达 $15 \times 10^4 g$ 。

中北大学张文栋团队研制的单轴压阻式高 g 值加速度传感器, 结构如图 13 所示, 量程为 $15 \times 10^4 g$, 自然谐振频率 300 kHz [12-21]。

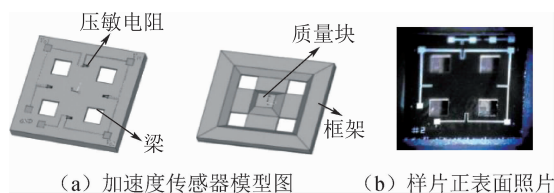


图 13 中北大学单轴压阻式高冲击加速度计

西安交通大学赵玉龙教授、蒋庄德院士在 MEMS 压力传感器、MEMS 加速度传感器领域实力雄厚、成果丰硕。高动态 MEMS 压阻式特种传感器及系列产品获得 2017 年国家技术发明奖二等奖, 该团队研制出 $10 \times 10^4 g$ 量程的单轴高冲击 MEMS 加速度传感器, 打

靶试验结果优良,有很好的产业化前景。

扬州科动电子技术研究所 KD 系列小型、微型压电加速度传感器与电荷放大器配合用于冲击加速度的测量,1001B 型号的最大量程为 $5 \times 10^4 g$,电荷灵敏度为 0.2 pC/g ,频响 10 kHz ,自然谐振频率 50 kHz ,重量 10 g ,尺寸为 $\phi 11 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$ 。

中国兵器工业第二零四研究所苏建军团队研制的 988 型压电石英冲击传感器,如图 14 所示,量程 $10 \times 10^4 g$,频响 25 kHz ,电荷灵敏度 $0.4 \sim 0.7 \text{ pC/g}$ 。



图 14 988 压电式加速度计

1.2 三轴高冲击加速度传感器

美国 Endevco 公司研制的 7274 系列压阻式三轴加速度传感器,如图 15(a)所示,该系列产品有 $0.2 \times 10^4 g$, $0.6 \times 10^4 g$, $2 \times 10^4 g$, $6 \times 10^4 g$ 四个量程,采用双螺钉硬连接方式安装,重量 2.9 g 。7284 系列压阻式三轴加速度传感器,如图 15(b)所示,该系列产品有 $2 \times 10^4 g$, $6 \times 10^4 g$ 两个量程,抗过载能力分别是 $6 \times 10^4 g$, $18 \times 10^4 g$,同样采用双螺钉硬连接方式安装,重量 3.6 g 。7274 和 7284 系列三轴冲击传感器都是组合三轴结构,采用三个 MEMS 芯片立体微装配形式,分别敏感三轴向加速度测量。



图 15 Endevco 公司三轴冲击传感器

美国陆军实验室高冲击试验测试装置,采用 Endevco 公司生产的 73 系列表面贴装结构高冲击三轴加速度传感器,将三个表面贴装结构的单轴加速度传感器正交安装于一个立方体表面,构成贴装方式的三维加速度传感器。如图 16 所示。

美国 PCB 公司研制的 3503A 系列压阻式三轴加速度传感器如图 17(a)所示,采用三角形结构设计,外

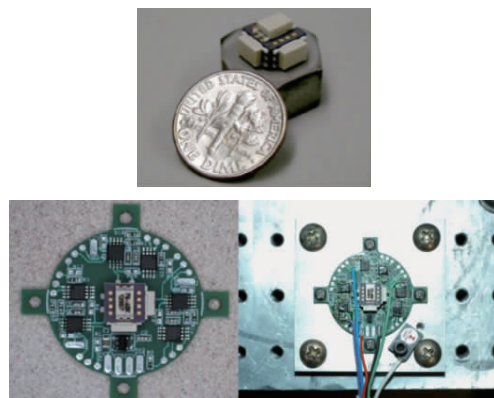
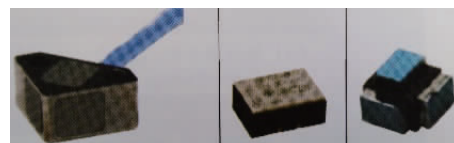


图 16 美国陆军实验室应用 73 表面贴装传感器

型尺寸为 $6.35 \text{ mm} \times 11.8 \text{ mm} \times 11.8 \text{ mm}$,该系列产品有 $2 \times 10^4 g$ 和 $6 \times 10^4 g$ 两个量程,抗过载能力分别是 $6 \times 10^4 g$ 和 $8 \times 10^4 g$,采用通孔螺钉硬连接方式安装,重量 2.83 g 。 $6 \times 10^4 g$ 量程 3503A1160KG 型号产品的频响为 10 kHz ,标称谐振频响 120 kHz ,灵敏度 $0.3 \mu\text{V/g}$ 。3503C 系列压阻式三轴加速度传感器如图 17(b)所示,外型尺寸 $3.8 \text{ mm} \times 9.6 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$,该系列产品有 $2 \times 10^4 g$ 和 $6 \times 10^4 g$ 两个量程,抗过载能力分别是 $6 \times 10^4 g$ 和 $8 \times 10^4 g$,采用陶瓷封装,表面安装焊接到电路板上,重量 0.82 g 。3503A 和 3503C 两个系列三轴冲击传感器都是组合三轴结构,采用三个单轴 MEMS 芯片或者单轴传感器立体装配在一起构成三轴传感器。



(a) 3503A 系列 (b) 3503C 系列

图 17 PCB 公司三轴高冲击传感器

Endevco 公司和 PCB 公司三轴高冲击传感器代表性产品表明,国外利用三个单轴传感器组合成三轴冲击加速度传感器是主要方式,最高量程 $6 \times 10^4 g$,它的优点是三轴向交叉耦合小。 $2 \times 10^4 g$ 以上量程产品对中国实行严格出口限制。

中科院上海微系统所研制了单片集成的三轴压阻式高冲击加速度传感器,如图 18 所示,量程 $6 \times 10^4 g$,X, Y 轴方向为带过载保护曲面的悬臂梁结构,Z 轴方向为三梁双岛式结构,在同一个平面上集成了两种不同形式硅梁结构,分别敏感 3 个轴向加速度,但工程并不容易真正解决横向耦合效应过大的问题。

中北大学石云波教授设计了一种 RTD 三轴 MEMS 高冲击加速度传感器,敏感芯片位于两层玻璃板中间,其上有两个双端固支的梁-质量块结构,用于测量 X 和 Y 轴加速度,四端固支的结构用作 Z 轴方向加速度测试,如图 19 所示。

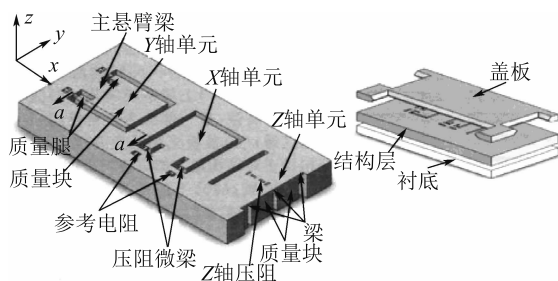


图 18 上海微系统所高冲击三轴加速度传感器

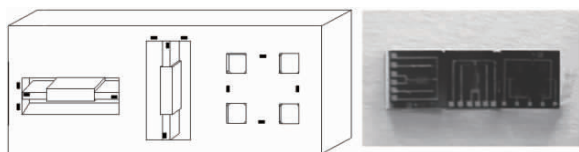


图 19 中北大学三轴高冲击传感器

组合方式高冲击三轴加速度传感器成熟度较高,各个敏感单元之间相互独立,互不干扰,而这种结构也存在耦合,耦合主要来源于支撑体的形变以及高冲击下的振荡,但解耦方式相对简单。在三个正交安装面上贴装三个敏感单元的方式保证了三个测量轴向交汇于一点,芯片级立体微装配是技术关键^[22-31]。

2 高冲击试验测试与计量校准进展

高冲击试验往往与高速、瞬变、高低温、巨能瞬间释放联系在一起,高冲击环境试验与校准技术,对我国武器装备和国防科技的发展有着十分重要的意义,侵彻弹药、制导导弹、制导炮弹、制导炸弹等制导武器不仅要求命中精度高、而且要求能有效摧毁目标,弹药战斗部对目标的击穿和毁伤是典型高冲击问题;开展极端高冲击实验装置、实验方法、测试与计量校准系统研究,可以有力支撑硬目标侵彻新型武器研制和武器性能实验指标的的实现;在硬目标侵彻武器的研制、定型、交验及生产中,必须有高冲击环境实验、测试方法和测试系统来检测武器系统的质量和效能;检查炸点控制系统是否符合战术技术要求,其新型炸药能否满足装药结构抗高过载、大脉宽、高低温和安全性、可靠性的要求,都需要极端高冲击环境实验、

测试与计量校准作为依据。新型高性能武器装备研制、国防科技的发展离不开高冲击试验、测试与计量校准技术研究,而高冲击试验理论、校准规范及试验计量技术的深入研究必将有力地促进武器装备和国防科技的发展。

ISO16063-13 是在国际计量局的官方网站已经正式发布的冲击绝对法校准的国际标准,该国际标准规定的校准设备与方法已经很成熟,但到目前为止还没有相关的区域组织或者其它国际组织进行高量程冲击比对,国外已经有相关的专家学者开始此方面的工作。ISO16063-13 绝对法冲击校准的国际标准,规定了两种典型的冲击激励系统,一是基于应力波原理的 Hopkinson 杆冲击激励系统,二是基于砧体碰撞的冲击激励系统^[32]。

我国已制定了一系列与冲击相关的校准规范和校准方法,包括:中华人民共和国国家标准 GB/T 20485.13-2007 第 13 部分:激光干涉法冲击绝对校准、GB/T 20485.22-2008 第 22 部分:冲击比较校准、GB/T 33029-2017 MEMS 高冲击加速度传感器性能试验方法、GB/T 13823.9-1994 横向冲击灵敏度测试、GB/T 13823.15-1995 瞬变温度灵敏度测试法、中华人民共和国国家军用标准 GJB 3236-98 振动与冲击传感器的校准和测试方法、GJB 5439-2005 压阻式加速度传感器通用规范、GJB 150.3A-2009 军用装备实验环境试验方法第 3 部分:高温试验、GJB 150.4A-2009 军用装备实验环境试验方法第 4 部分:低温试验、GJB 546 电子元器件质量保证大纲、GJB 360B-2009 电子及电气元件试验方法等。这些国家标准和国家军用标准,与常温条件下高冲击加速度计、陀螺、电子及电气元件的冲击性能试验相关,在高低温环境下仅有热零点漂移指标,并不能满足高冲击、大脉宽、高低温极端复合原位条件校准的国家重大工程实际需求,因此需要制定和完善国家标准和国家军用标准。

国内外针对高冲击试验测试、校准实验的典型装置包括:霍普金森杆、空气炮、落球或落锤冲击实验台、马歇特击锤、冲击落杆、气体炮等。冲击计量校准技术越来越向着同时满足高冲击和毫秒量级大脉宽两个关键指标的高能量强冲击方向发展,并对极端恶劣环境高冲击高低温复合条件下的试验测试与计量校准有着迫切的需求。

航空工业北京长城计量测试技术研究所作为国防科工局第一计量测试研究中心在高冲击测试与校准具有一定领先优势,研究所的李新良、张大治、曾吾和

孙浩林等研究人员,长期从事传感器的冲击计量校准工作,利用霍普金森杆作为激励加载手段,采用激光干涉法冲击绝对校准方式,进行传感器冲击灵敏度校准,常规校准量程可达 $10 \times 10^4 g$ 。

中国计量科学研究院胡红波、于梅、孙桥等研究人员,长期从事冲击传感器计量校准工作,建立起 $20 \times 10^4 g$ 冲击加速度国家基准装置,采用德国 SPEKTRA 公司高精度冲击激励器,以激光干涉法冲击绝对校准方式,开展加速度传感器冲击灵敏度校准工作,常规校准量程 $10 \times 10^4 g$ 。

中国兵器工业第二零四研究所苏建军主任,以空气炮为激励加载手段,采用双通道激光多普勒原理开展灵敏度绝对校准工作,常规校准量程 $10 \times 10^4 g$,最高量程 $20 \times 10^4 g$,脉宽也较霍普金森杆加载装置宽。

北京航天计量测试技术研究所杨晓伟主任,以霍普金森杆为激励加载手段,采用激光干涉法冲击绝对校准方式,开展传感器冲击灵敏度校准,常规校准量程 $10 \times 10^4 g$ [33-34]。

北京海泰微纳科技发展有限公司是一家专注于 MEMS 芯片、特种传感器与极端环境试验测试装备的高技术企业,以极端恶劣环境原位试验测试技术为产业特色。公司采用高低温原位复合空气炮激励加载、激光干涉法冲击绝对校准方式,开展了高冲击加速度传感器、大质量部件的复合高冲击试验测试研究工作,可实现超高冲击、大脉宽、超大负载、高低温等极端复合环境下的高能量的冲击加载,技术指标较国内外同类大型特种实验装备高一个数量级左右。

从国内外高冲击实验设备与高冲击实验技术来看,基本是能保证单一加速度峰值指标加载激励。被激励的试件的质量一般只有几克、几十克,最多不超过 100 g,无法实现几千克量级的超大质量被测试件的高量程峰值的激励加载,且激励脉宽太窄,一般只有十几或者几十微秒,无法实现大质量试件毫秒量级脉宽激励;国内外高冲击实验设备与高冲击实验技术,一般是在常温环境下进行冲击实验测试,无法实现高低温环境下对大质量试件的大脉宽、高量程的复合冲击激励加载(带高低温功能的霍普金森杆试验装置激励的脉宽太窄,且大质量加载激励加速度峰值低),这种极端高冲击高低温复合环境,恰恰是真实需求的环境情况。因此迫切需要开展对于接近于实际工况的大质量、高冲击、大脉宽、高低温的极端恶劣环境复合加载的实验测试与计量校准大型仪器装备的相关研制工作,突破多场加载技术与多维运动参数检测技术瓶颈,促进我

国装备制造业特别是特种实验装备的发展,满足武器装备核心部件与民用产品的参数在位试验测试需求。

3 发展趋势与建议

3.1 需求分析

从武器装备研制需求来看,为适应信息战、网络中心战的需求,特种传感器正向微型化、集成化、智能化、无线化、系统化、网络化方向发展。

从武器装备研制、生产到未来网络中心战,特种传感器应用极为广泛,遍及整个作战系统及战争全过程,可以说无处不在,无时不用。美国国防部副部长 Jeffrey L. Paul 在战争咨文中提到,下一代战争是“传感器战争”,传感器就是战斗力。现代战争越来越依赖传感器,在战场上“发现就意味着摧毁”。特种传感器必将在未来高技术战争中扩大作战的时域、空域和频域,大幅度提高武器的威力和作战指挥管理能力。

1999 年 5 月 8 日,美国悍然袭击我驻南联盟大使馆,造成我驻南使馆人员重大伤亡和财产损失。这次精确轰炸行动中,美国使用了 5 枚精确打击侵略武器——杰达姆,从不同方位击中我驻南使馆建筑物的不同部位,并穿入内部和地下爆炸,使我驻南使馆遭到严重破坏。海湾战争中美军使用基于高冲击加速度传感器的灵巧引信,具有识别层数功能,钻地弹击中“阿米里亚”地下多层防空洞,里面 422 名人员中 408 名当场被炸死。

航弹、炮弹的灵巧化改造,也需要大量低成本高冲击传感器、高精度 MEMS 惯导传感器,据美国国防部透露,美军使用的精确制导武器数量所占比例从 1991 年海湾战争的 7.6% (精确打击弹药共 3080 万发) 提高到 2003 年伊拉克战争的 68.3%。精确制导武器的使用比例增加了近 9 倍。

高冲击传感器与特种试验测试需求表现在如下几个方面:

1) 弹药升级、新一代武器装备跨越式发展对高冲击传感器有迫切需求

高冲击传感器的创新驱动,往往能够推动跨越式重大新型武器装备研制,如精确打击弹药、灵巧弹药等。目前我国库存的大批量“笨”弹急需使用大批量低成本的 MEMS 传感器进行升级换代,满足“能打仗、打胜仗”的要求,目前国内传感器研究现状满足不了大批量低成本升级换代的需求。

2) 传感器技术落后已成为制约高新武器装备测试和定型的瓶颈

精确打击弹药因缺乏特种传感器,靶场威力评估时采用昂贵的爆炸模拟建筑物的方法验证,十分落后,导致试验成本高、周期长、重复差、可控性差。

3)高冲击传感器遭到西方国家严密技术封锁和禁运,自主可控、创新研发、国产替代是必由之路

高冲击加速度传感器、MEMS 高精度陀螺、超高温传感器、硅谐振高温压力传感器、声表面波传感器、军用微型无线传感器网络等,都是美国等西方国家对我国严密技术封锁和禁运的高端传感器。研制生产自主可控、国产替代的特种传感器(特别是高冲击传感器)迫在眉睫,同时也是我国武器装备自主创新驱动发展的需要。

4)高新工程对高冲击试验测试技术的迫切需求

目前很多方面的环境构建不满足实战需求,许多参数还存在不可测、测不到、测不准问题,对于试验测试的评价和评估不足,复杂环境适应性试验验证没有充分满足需求。

5)孪生模拟试验与联合试验技术的迫切需求

实弹试验成本高、周期长、重复差、可控性差,平衡炮试验、火箭橇试验,可能需要几百万元、上千万元费用或者更高。实验室条件下的模拟试验和原位计量校准试验,可控性强、可重复,可以有效进行定量的试验验证,对于发展和完善孪生试验、数字孪生试验显得尤为重要和必要。

6)面向实战化需求的复杂环境、极端恶劣环境适应性试验测试技术

针对重点军工产品研制中复杂环境条件下难验证、测不准的需求,首先要解决实战化环境模拟逼真度不高,复杂环境真实数据获取困难、复杂环境试验效应评估标准不明确、试验测试数据积累与利用不足等问题,其次要花大力气解决极端恶劣环境试验测试重大装备、试验计量方法、测试技术手段不足的问题。

3.2 存在的突出问题

我国传感器研发和保障能力严重不足,武器装备所需的高端特种传感器产品绝大部分依赖进口,同时面临西方国家严密的封锁和技术禁运。面临的突出问题主要体现在四个方面:

1)我国没有将特种传感器研制真正列入国家、国防的重点技术专项计划

特种高端传感器研制周期长,需要长期的技术积累^[35]。由于特种传感器是国防必需的,但需求量少,传感器企业仅仅依靠市场无法独立生存。我国传感器基础能力和核心技术薄弱,长期以来缺少总体规划和

专门计划,目前仅作为型号配套器件或某专业组一个方向来开展研制。临渴掘井,投资少且分散,低水平且重复,因此军工特种传感器领域,像高冲击传感器这样的高端产品发展一直滞后于国外,国内尽管有几十家研究所和高校开展高冲击传感器科研工作,却基本停留在科研样机阶段,工程化和产业化艰难,没有走向真正产品,满足不了武器装备研制中关键核心传感器的国产化、低成本、自主可控的需求,有些方面甚至落后于民用传感器领域。

2)特种传感器基础研究与自主创新不足,与发达国家差距很大

高冲击传感器等特种传感器研究落后于西方国家,已经成为我国侵彻武器技术发展的瓶颈,难以满足高新武器装备研制生产所需,新一代装备只能使用落后的传感器,不能满足先进武器装备相适应的配套和测试要求。

3)特种传感器研制能力条件差、技术水平低

工艺技术和设备条件是传感器研制的关键和瓶颈,我国生产工艺装备与国际水平有很大差距,由于受配套级别低的限制,特种传感器的条件保障投入严重不足,没有成体系建设。不但要持续投入科研经费,而且要投入条件建设经费和能力保障经费才能进入良性循环。只投入一点点科研经费搞搞样机,研制条件差、技术水平低,很难与条件好、设备好,走持续发展规模经营道路的国外传感器巨头抗衡。

4)特种传感器的试验测试、计量校准与验证平台缺乏

武器装备一般使用环境都很复杂,要有工程化测试试验、环境适应性和可靠性试验考核。目前我国的实验条件缺乏新型特种传感器试验测试、计量校准特种试验装备系统,导致传感器的工程化进程缓慢,科研成果走向成熟和产业化应用面临重重困难。

3.3 我国特种传感器发展方向思考

我国高冲击传感器技术起步较晚,主要集中在高校和有相关背景的研究所。随着高冲击传感器技术在武器装备中的应用需求越来越迫切,各研究单位相继投入力量攻关,虽然在设计、制造、封装、测试等关键技术方面取得一定进展,但高冲击传感器研制技术指标、工程化能力与国外先进水平以及武器装备需求还存在较大差距,主要体现在两个方面:

1)技术指标存在差距

美国的 ENDEVCO 公司、PCB 公司,丹麦 B&K 公司,瑞士 KISLTER 公司,这四家公司几乎垄断着高端

高冲击传感器大部分市场, 相关配套的部件、组件、高冲击试验与计量校准装置也很完善, 形成了完整的特种测试测量解决方案。特别是美国的 ENDEVCO 和 PCB 公司都有系列化的单轴、三轴高冲击传感器产品, 包括压电系列、压阻系列以及不同封装结构系列产品, 技术指标高、价格昂贵, 并且高量程指标的传感器仍然对中国严格禁运和技术封锁, 我国高冲击传感器总体上技术指标与国外成熟产品差距很大。

2) 工程化能力存在差距

中国有几十家高校和研究所开展高冲击传感器研究, 但基本上处于实验室科研样机阶段, 抗高过载能力不足, 成品率、可靠性都不高, 产品样机一致性较差、不能批量制造, 工程化能力与国际先进水平存在较大差距, 无法形成自主可控、国产替代的保障能力。高冲击传感器的年需求量不多, 仅依靠市场, 传感器企业无法生存。高冲击传感器严重制约着我国精确打击武器的发展, 已经成为制约各类精确打击武器发展和常规武器制导化改造的瓶颈。基于高冲击传感器的智能灵巧引信, 由于传感器读出电路仍采用分立器件, 体积和重量较大, 无法满足武器装备对系统的微型化和低成本要求。

我国的高冲击传感器虽然与国外产品存在不少的差距, 但特殊渠道采购国外传感器实测结果表明, 国外的高冲击传感器产品, 也没有真正解决高量程、大脉宽、极端恶劣条件的抗高能量冲击的难题, 传感器应用于弹载环境可靠性也存在很多问题, 这给我们带来了突破机会。广大科研人员应该摒弃盲目跟踪和仿制国外高冲击传感器产品的套路, 从我国武器装备实际出发, 结合实战化要求, 研制具有自主知识产权的高冲击传感器产品。高冲击加速度传感器目前已经形成商业化系列产品并正式推向市场的主要有两家单位: 中国兵器工业第二一四研究所、北京海泰微纳科技发展有限公司, 应该在行业内大力推广应用国产高端传感器, 发现不足, 不断改进提高, 解决自主可控、国产替代问题。

以需求为牵引, 建议重点开展高冲击传感器研究工作包括: ①抗高能量冲击的高冲击传感器研制, 以适应高过载、大脉宽(ms 量级)的实际工况环境; ②高频响高冲击传感器研制, 尽可能获取频率成份丰富的真实信号, 在此基础上开展算法研究, 以适应更高更恶劣的环境感知需求; ③复合量程高冲击传感器研制, 以适应不同集成应用环境场景的需求; ④低成本高冲击传感器研制, 以适应低成本航弹、智能化炮弹及传

统弹药智能化改造的需求。

3.4 我国极端环境试验测试发展方向思考

军用试验测试是在真实、模拟和虚拟条件下对于军工产品系统、关键核心部件的功能、性能的测量、验证与评价的过程和技术^[36]。除了常规的测量手段以外, 更需要研究极端恶劣环境条件下的特种测试技术。我国极端环境特种试验测试发展, 应该遵循理论与工程实践相结合, 试验测试前沿技术与基础理论相结合, 定性试验与定量试验相结合, 虚拟试验与联合试验技术, 孪生模拟试验与数字孪生技术相结合, 军工专有的基础试验技术与通用试验技术相结合, 实验室条件下的模拟试验与实战条件下实弹试验相结合。此种试验测试研究主要包括: ①开展特种试验测试基础理论与方法研究; ②从实战和工程实践出发, 开展试验设计、目标和环境构建技术研究; ③从实际出发开展极端恶劣环境特种试验装备的研究; ④开展虚拟/仿真试验技术研究; ⑤开展试验评估及试验数据挖掘技术研究, 包括毁伤效能试验与评估, 以及联合试验技术研究。

目前极端高冲击环境试验测试领域, 主要实验手段是应力波原理的霍普金森杆高冲击试验装置, 它虽然可以产生 $10 \times 10^4 g$, $20 \times 10^4 g$ (美国 ENDEVCO 公司生产的霍普金森杆校准装置), 甚至最高 $50 \times 10^4 g$ (德国 SPEKTRA 公司的 CS18 XVHS 型校准装置) 的高量程冲击, 但脉宽极窄, 只有十几或几微秒, 相比实际工况小一两个数量级, 试验指标存在致命缺陷, 并且只能激励小质量的传感器无法激励公斤数量级的大质量部件、试验组件, 激励加载的能量有限。我们应该摒弃盲目跟踪国外试验与测试技术模式, 从我国武器装备实际出发, 以实战化要求, 提升试验与测试的核心能力。建议重点开展的研究工作包括: ①极端高冲击高低温复合环境在位试验测试特种重大装备研制, 以产生高低温、大脉宽、高冲击的在位复合试验工况环境(负载质量数公斤, 低温至 -45°C 或者更低, 高温至 85°C 或者更高); ②局部高温极端恶劣高冲击环境复合试验测试重大装备研制, 以产生局部高温、大脉宽、高过载在位高冲击试验实际工况环境(无低温要求, 高温至数百摄氏度, 负载质量数公斤); ③连续多次极端高能量冲击环境复合试验测试重大仪器装备研制, 模拟侵彻多层硬目标的实际工况, 验证识别控制算法, 最终达到精确炸点控制的目的; ④数字孪生技术与孪生模拟试验高冲击特种重大装备研制, 以满足武器装备关键器件、部件、组件特种环境条件下的可控、可重复加载的高冲击定量分析需求, 配合靶场试

验,切实降低武器装备研究实弹成本高的弊端;⑤高冲击传感器的高频响参数校准装置研制。高量程($10 \times 10^4 g$, $20 \times 10^4 g$ 量程或更高)、高频响(200 kHz 或更高)的冲击传感器的频响校准,由于冲击灵敏度极小,小量程扫频振动台的激励下(几个 g),高冲击传感器输出信号微弱,频响指标无法校准,作为高频响高冲击传感器研制的相匹配的设备,高冲击频响校准装置研制需求迫切^[35-39]。

3.5 小结

应以国家持续投入为主,加强军民融合,产、学、研、用相结合,重点加强条件建设和能力保障建设,建立国家级特种传感器研究中心、试验测试中心和应用验证平台,攻克高端传感器产品、极端高冲击复合环境试验测试装备和仪器,实现我国军用传感器的自主可控、自主保障,提高信息化复杂装备系统的总装集成、试验验证和基础试验能力。

参考文献

- [1] 吴三灵,李科杰,张振海,等. 强冲击试验与测试技术[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [2] 王树山. 终点效应学[M]. 2版. 北京:科学出版社,2019.
- [3] 何唐甫,陈贵堂,候素燕. 国外常规钻地武器发展分析[J]. 防护工程,2002(1): 22-25.
- [4] 杨力. 美国2005~2009财年坚固型核钻地弹研制预算计划[J]. 国外核新闻,2004(4): 11-12.
- [5] 程开玉. 国外钻地武器型号[C]//2001年材料侵彻学术专题研讨会. 海南三亚:中国力学学会,2001.
- [6] 张国伟,徐立新,张秀艳,等. 终点效应及靶场试验[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
- [7] 殷大虎,孙大力. 地面防空武器的新挑战—钻地弹[J]. 中国航天,1998(8): 52-54.
- [8] 周义. 美军钻地弹现状与发展趋势[J]. 中国航天,2002(8): 43-46.
- [9] 王涛,余文力,王少龙. 钻地武器采用的关键技术及实现途径[J]. 飞航导弹,2005(8): 47-49.
- [10] 洪元军. 外军侵彻弹药及引信技术的最新进展[J]. 探测与控制学报,2000,22(2): 8-13.
- [11] 张守保. 工程材料中侵彻效应的实验研究综述[J]. 防护工程,2000,(4): 14-16.
- [12] 董健,李昕欣,王跃林,等. 曲面过载保护的新型高 g 值冲击硅微机械加速度传感器的设计[J]. 机械强度,2003,25(2): 148-150.
- [13] 何洪涛,杨拥军,徐永青,等. 引信用高 g 加速度计研究[J]. 微纳电子技术,2002,39(6): 28-31.
- [14] 范波,熊继军,郭涛,等. 八梁硅微加速度传感器横向灵敏度的研究[J]. 微计算机信息,2008,24(1): 138-140.
- [15] 石云波. 高 g 值加速度计的设计与冲击特性分析[J]. 爆炸与冲击,2010,30(3): 329-332.
- [16] 林然,张振海,李科杰,等. 高 g 值加速度计高冲击校准技术综述[J]. 探测与控制学报,2015,37(4): 106-112.
- [17] 李科杰,何响,张振海,等. 高冲击加速度传感器发展现状及趋势[J]. 探测与控制学报,2013,35(4): 6-12.
- [18] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [19] 余尚江,李科杰. 高 g 值高频响微机械加速度计研究[J]. 探测与控制学报,2005,27(5): 30-33.
- [20] 石云波. MEMS 高 g 值传感器技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [21] 范锦彪,李玉玺,徐鹏,等. 高 g 值加速度校准激励脉冲的横向激光干涉测量方法[J]. 红外与激光工程,2015,44(2): 497-502.
- [22] 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): 1236-1241.
- [23] 石云波,李平,朱正强,等. MEMS 高 g 加速度传感器高过载能力的优化研究[J]. 振动与冲击,2011,30(7): 271-274.
- [24] 李仁锋,文贵印,程永生. MEMS 高 g 值加速度计力学分析[J]. 传感器技术,2005,24(7): 35-37.
- [25] 李祥,石云波,董胜飞,等. 基于微梁的面内高 g 值加速度计设计[J]. 传感技术学报,2014(10): 1310-1314.
- [26] 刘宗林,李圣怡,吴学忠. 新型三轴微加速度计设计[J]. 传感技术学报,2004,17(3): 488-591.
- [27] 董培涛,李昕欣,张鲲,等. 单片集成的高性能压阻式三轴高 g 加速度计的设计、制造和测试[J]. 半导体学报,2007,28(9): 1482-1487.
- [28] 张新. 应变式三维加速度传感器设计及相关理论研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2008.
- [29] 温廷敦,张文栋. 介观压阻效应[J]. 微纳电子技术,2003,40(8): 41-43.
- [30] 杨尊先,李昕欣,于映. 曲面保护高量程加速度传感器阻尼特性研究[J]. 光电工程,2006,33(9): 139-144.
- [31] 王钻开,宗登刚,陆德仁. 高量程加速度计的力学性能分析[J]. 机械强度,2002,24(4): 515-517.
- [32] ISO 16063 - 13: 2001. International Standard 16063 - 13 Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 13: Primary shock calibration using laser interferometry [S].

- [33] 胡红波, 孙桥, 黄宇中. 不同冲击激励系统绝对法冲击校准比对可行性的研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 27-31.
- [34] 胡红波, 于梅. 激光干涉法冲击绝对校准的研究[J]. 计量学报, 2015, 36(4): 397-402.
- [35] 李科杰. "特种传感器与微系统"发展动向及对策[C]//全国敏感元件与传感器学术团体联合组织委员. 第十三届全国敏感元件与传感器学术会议论文集. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [36] 潘安君. 试验与测试技术“十四五”重点发展方向思考与建议[C]//第七届国防科技工业试验与测试技术发展战略高层论坛. 北京: 中国计算机自动测量与控制技术协会, 2018.
- [37] 耿卫国. 液体火箭发动机试验复杂环境下的特种测试技术报告[C]//第七届国防科技工业试验与测试技术发展战略高层论坛. 北京: 中国计算机自动测量与控制技术协会, 2018.
- [38] 袁震宇. 电子信息装备电磁环境效应机理研究报告[C]//第七届国防科技工业试验与测试技术发展战略高层论坛. 北京: 中国计算机自动测量与控制技术协会, 2018.
- [39] 王鑫. 复杂战场模拟环境下装备适应性试验测试技术发展趋势[C]//第七届国防科技工业试验与测试技术发展战略高层论坛. 北京: 中国计算机自动测量与控制技术协会, 2018.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61773059); 国防基础科研重点项目

作者简介



张振海, 男, 北京理工大学工学博士、日本名古屋大学博士后, 副教授, 博士生导师。15 年专注于特种军用芯片、超高冲击 MEMS 传感器、极端恶劣环境实验测试与计量校准的基础理论、工程应用研究。主持国家自然科学基金面上项目 2 项, 参与国防基础科研重大项目与重点项目等多项。

作为第一发明人申请并受理国防专利 40 项, 已获得授权发明专利 26 项。参与编写并出版学术著作: 强冲击试验与测试技术 1 部。发表论文 50 余篇, 其中 EI 收录 20 余篇, 另有 20 余篇 SCI 论文发表在 Applied Physics Letters、Nanotechnology、IEEE/ASME trans mechatronics、SENSORS AND ACTUATORS B、Journal of Applied Physics 和 Biomed Microdevices 等国际著名期刊上。担任中国仪器仪表学会传感器分会常务理事, 全国振动冲击转速计量技术委员会委员, 国家自然科学基金重大研究计划项目、面上项目评审专家, 北京市自然科学基金重点项目、面上项目

评审专家, 教育部学位与研究生教育学位论文评审专家, 中国仪器仪表学会仪表元件分会理事, 中国微米纳米技术学会理事, 中国微米纳米技术学会微纳机器人分会理事, 中国宇航学会光电技术专业委员会委员, 中国计算机自动测量与控制技术协会理事, 以及国际著名 SCI 期刊 Nanotechnology、APL、JAP、SMS、MST、JMM 审稿人, 北京理工大学学报、探测与控制学报审稿人。



张振山, 男, 北京海泰微纳科技发展有限公司副总经理, 新产品研发中心主任, 东北大学控制理论与控制工程专业博士, 具有多年自适应控制、复杂工业过程建模、仿真及优化设定控制多个重大工程项目研究经验, 以及多年的硬件软件结合产品, 高端仪器、仪表和实验装备项目开发和大型项目管理经验, 担任中国仪器仪表学会传感器分会理事。



胡红波, 男, 中国计量科学研究院力学与声学计量科学研究所副研究员, 工学硕士, 一级注册计量师, 国家计量标准一级考评员, 主要从事冲击加速度计量技术、基标准装置的研究与建立和测量数据分析处理工作。作为子任务负责人参与完成科技部国家重大科学仪器专项、国家质检总局质量安全与量值传递专项等科研项目。2018 年获中国计量测试学会科学技术进步奖二等奖(排名第一)。科研团队建立了新一代冲击加速度基准装置, 实现冲击加速度范围从 $2\text{ g} \sim 20 \times 10^4\text{ g}$ 绝对法校准, 并主导了国际上首次低峰值冲击加速度量值关键比对。



李科杰, 男, 北京理工大学教授, 博士生导师。曾任机电工程国家重点学科首席教授, 北京理工大学学术委员会委员, 院教授委员会主任; 兼任国务院学科评议组成员, 国家科技奖评审专家, 科技部创新基金光机电一体化评审组组长, 国防科工委试验测试技术专家组专家, 中国兵器测试技术专家组组长, 中国仪器仪表学会传感器学会副理事长和传感器协会副理事长, 中国计算机自动测量与控制技术协会常务理事等二十余个学术职务, 国际刊物“International Journal of Information Acquisition”、“传感器技术与微系统”、“仪表技术与传感器”等 7 个核心刊物编委。被评为全国优秀教师、有突出贡献中青年专家并享受国务院政府特殊津贴, 获各种荣誉奖励十余项。主持的项目获部级科技奖十余项、专利十余项。主编了国家重点图书《现代光机电一体化技术丛书》、《新编传感器技术手册》、《现代传感技术》等著作。发表论文被 SCI、EI 收录百余篇。为我国的传感器与测试技术领域的发展做出了重要贡献。



崔占忠，男，北京理工大学教授，博士生导师。2001 年获国家有突出贡献中青年专家称号。主要从事目标探测与毁伤控制方向研究，在引信近场目标探测、引信目标精确识别，静电探测技术等方面取得了系列成果。发表学术论文一百余篇，获授权国家发明专利十余项。承担了数十项国家

级科研项目，曾获国家发明三等奖 1 项、部科技进步一等奖 1 项、二等奖 3 项、三等奖 3 项；获光华科技基金三等奖 1 次，兵器科技进步奖三等奖 1 次。获政府特殊津贴。编著教材《近炸引信原理》被评为北京市精品教材。曾任北京理工大学兵器科学与技术一级学科带头人，武器系统与运用工程国家重点学科首席教

授，校学位评定委员会副主席，宇航力学学位分会主席。曾兼任总装引信技术专业组副组长、顾问，中国宇航学会特种装备技术委员会副主任委员，中国兵工学会引信技术分会副主任委员，中国航天第一情报网副网长，《探测与控制》学报编委会主任委员，引信动态特性国防科技重点实验室学术委员会主任委员。

蒋宇强，男，北京海泰微纳科技发展有限公司技术部主任，工学硕士，主要负责测控软件开发工作。2017 年毕业于长春工业大学，计算机科学与技术专业。主要从事云计算、大数据、推荐系统架构与算法研究，具有多年 Hadoop、MapReduce 项目开发经验。曾参与某大数据分析项目、AIS 大数据分析与研究项目，主要负责算法开发、软件编程与实验实现。