

# 大冲击测量中高频能量的影响分析

何 勤, 张也弛, 张永强, 陈玉叶  
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

**摘要:** 大冲击测量时, 高  $g$  值激励中存在远高于测量频率之上的分量, 会造成加速度计数据零漂、非线性甚至损坏; 系统分析了高频能量对加速度计的影响以及产生影响的机理, 试验验证了机械滤波器可有效滤除高频能量, 改善压电加速度计零漂问题, 并根据分析和试验结果提出相应的解决措施。

**关键词:** 大冲击测量; 高频能量; 机械滤波器; 零漂

中图分类号: TP212.9 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2020)04-0062-06

## Analysis of ultra-high frequency (UHF) components in the high-shock measurement

HE Qin, ZHANG Yechi, ZHANG Yongqiang, CHEN Yuye  
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

**Abstract:** This paper focuses on the ultra-high frequency (UHF) components during high-shock measurement. The UHF signal cause zero-drift, non-linearity or damage to accelerometer. How the UHF power affects to the accelerometer is discussed in this paper. Mechanical filters are proved to be useful to separate the UHF with the others. According to the analysis and experiment results, solutions are put forward to the zero-drift problem of piezoelectric accelerometer.

**Key words:** High-shock measurement; Ultra-high frequency (UHF); Mechanical filter; Zero-drift

## 引 言

航天飞行器使用大量的火工品以实现特定的动作, 如火箭级间分离、弹道发射等, 这些火工品动作会引起航天器结构的高频冲击响应, 对电子设备、脆性结构等会产生破坏作用。因此, 对大冲击动态参数进行测试和有效评估, 以便提供飞行器结构设计的依据和仪器设备试验的条件, 具有十分重要的意义。在近距离测量爆炸冲击和机械碰撞的过程中, 往往出现高  $g$  值激励中存在远高于测量频率之上的分量。在高频分量的作用下, 测试加速度计的敏感机理会发生变化, 往往成为测量系统中最薄弱的环节, 经常出现零漂甚至损坏。

## 1 高频能量带来的问题

在冲击测试中, 很容易把测试加速度计的最大工作带宽与所测得的冲击响应谱带宽混淆。大多数冲击响应谱只到 10kHz 或 20kHz, 根据无阻尼加速度计的最高工作频率通常规定为共振频率的五分之一的原则<sup>[1]</sup>, 据此就认为对高  $g$  值冲击测量来说, 加速度计的共振频率在 100kHz 附近就能满足测量要求, 但事实上忽略了在 20kHz 以上还存在着很大的能量。10kHz 以上的冲击能量很少损坏设备, 冲击测量和数据分析过程中对它也常常忽略, 但它却严重地影响着所有惯性加速度传感器的线性工作段。

实验表明, 大多数高  $g$  值冲击测量的输入谱中包含着 100kHz 以上的频率分量<sup>[2]</sup>。通用数据采集设备一般只能扑捉 100kHz 以内的时域信号, 对通频带外的信号进行衰减, 除非数据采集时发生了混叠, 否则这些高频分量是不被注意的。

这种超高频分量主要在以下两种冲击激励中产生：

①近距离的爆炸冲击

由于爆炸冲击造成了瞬间的速度变化，与爆炸区靠近的结构体的响应中存在大量的高频分量。传感器所感受到的高频能量的大小与爆炸点和测量点之间的距离成反比。在远距离测量时，冲击波通过不同结构，不同材料的衰减，高频分量将会急剧减小。

②近距离的机械碰撞

当触点只产生很小的形变时，结构的加速度响应中存在大量的高频分量，同样与距离密切相关。

## 2 高频能量对测量传感器的影响

高 g 值冲击测量中的高频能量对测量系统提出了挑战，其中，测量传感器是最薄弱的环节。目前，国内外常用测量大冲击的加速度计传感器主要有压电式和压阻式两种。压电式冲击传感器线性度好，频率范围较宽，坚固耐用，应用广泛，但在高 g 值加速度的测量中经常出现零漂现象<sup>[3]</sup>；压阻式大冲击传感器具有良好的低频响应特性和较高的共振频率，但在测试过程中常出现应变机构断裂的现象<sup>[4]</sup>。这两类传感器对于高频能量的反应是不同的。

①传感器的损坏

在超高频分量作用下，传感器的敏感元件会产生较高频率的共振，压阻式加速度计的应变机构是无阻尼的，在共振时敏感元件的位移是失控的，容易造成应变元件的永久性破坏。同样条件下，压电式加速度计的敏感元件要坚固得多，但也会受到其他形式的影响。

②零漂

除非应变结构被破坏，一般压阻式加速度计不会产生零漂，大多数零漂问题都是由于压电式加速度计引起的。压电式加速度计处于共振时，会发生零漂现象，如图 1 所示。

时域上的零漂使数据处理时得不到真实的速度和位移，明显的零漂数据可以通过滤波剔除<sup>[5]</sup>，但少量肉眼看不到的零漂经常会被当做正常的测试结果而被采纳，带来额外的风险。就零漂的机理进行分析，可以分为以下几种情况：

共振时敏感元件的相对位移会远远超出输入值，从而使压电元件分子间的内应力非常高，这种过应力状态将会由于晶畴的取向而产生乱真的电荷输出，因此，在时域上会出现零漂。这是多晶压电材料中常会出现的现象，具有单晶结构的压电元件（如石英）不存在该类问题。

压缩式加速度计所有元件由预紧螺钉组装在一起，为了消除非线性误差，并保证加速度传感器的交变力的作用下正常工作，装配时需要对压电元件施加预载荷。当传感器处于共振时，元件之间的相对位移会使它们离开初始位置。敏感元件的位移会使预载荷发生突变，从而表现为滞后性质的影响，使输出出现零漂。剪切式加速度传感器无需预载荷，可以有效减小零漂<sup>[6]</sup>。

晶体材料未承受过应力，元件也未移位，仅由于敏感元件共振也会输出大量的电荷，会使后续的信号适调仪饱和，造成数据丢失或时域上的直流漂移。

③非线性

传感器共振时输出有时是非线性的，饱和的电荷转换器的响应也是非线性的，而且这种非线性不可重复，这种形式的失效会使冲击响应谱的重复性很差，致使错误地确定了冲击环境。

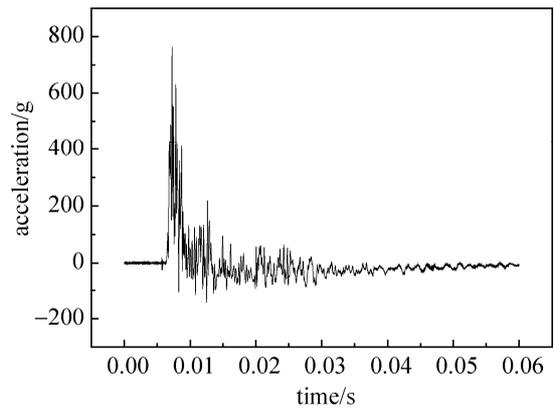


图 1 加速度—时间曲线  
Fig. 1 Acceleration-time curve

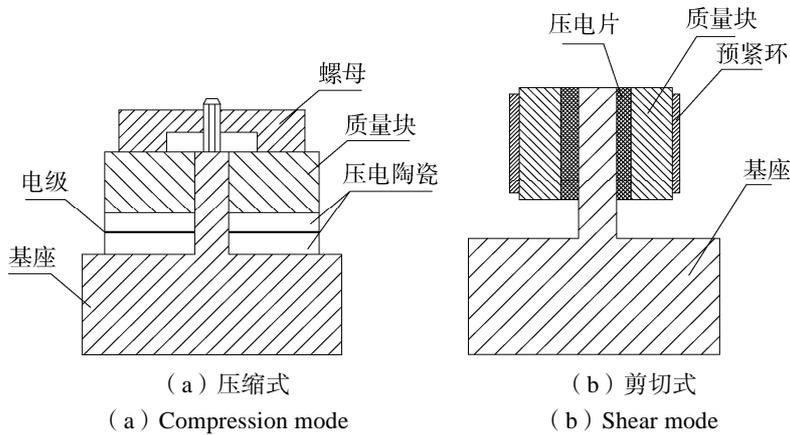


图 2 压电式加速度计结构示意图

Fig. 2 Sketch of piezoelectric accelerometer

### 3 机械滤波器的应用

高  $g$  值冲击测量中的高频能量对测量系统的影响主要体现在对测量传感器的破坏, 采用机械滤波器将敏感元件与高频输入量隔开是解决加速度计共振问题的有效方法。将机械滤波器置于安装面和传感器之间, 构成一个机械的低通滤波器, 其-3dB 拐点远低于加速度计的共振频率, 对高频信号进行衰减, 如图 3 所示。

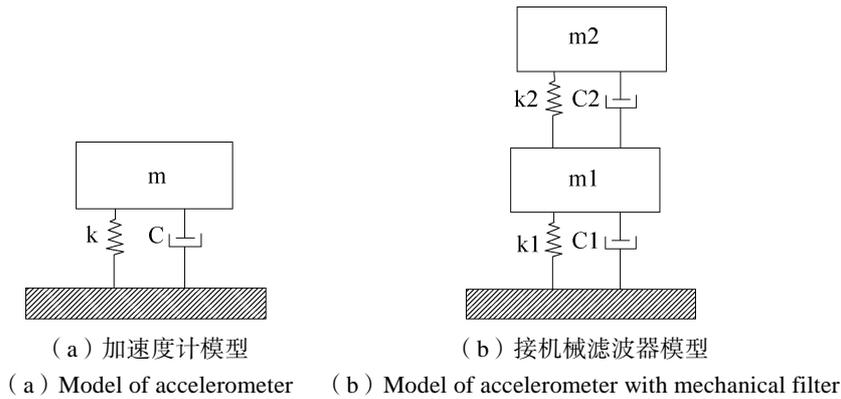


图 3 加速度计理论模型

Fig. 3 Theoretical model of accelerometer

如图 4 所示, 对一只压电加速度计进行了频率响应测试, 实线为压电加速度计的频率响应曲线, 虚线为加机械滤波器后的频率响应曲线。从图 4 中可以看出, 机械滤波器从 10kHz 开始衰减, 斜率约为-13dB/oct, 20kHz 时衰减达到-12dB, 从而可以有效地对高频输入量进行衰减。

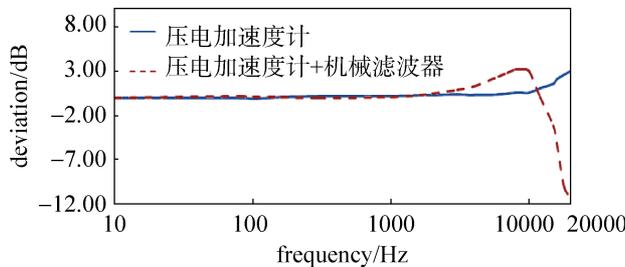


图 4 压电加速度计频率响应曲线

Fig. 4 Amplitude response of the piezoelectric acceleration sensor

取四只相同的压电加速度计，三只安装机械滤波器，一只不安装机械滤波器进行冲击对比试验，并采用一只内置机械滤波器的传感器进行监测。四只传感器同时安装在冲击工装上，安装位对称分布，受到的冲击加速度相同。不安装机械滤波器的压电加速度计（4#）输出波形出现明显的零漂，三只安装机械滤波器的压电加速度计（1#、2#、3#）输出波形正常，如图5所示。

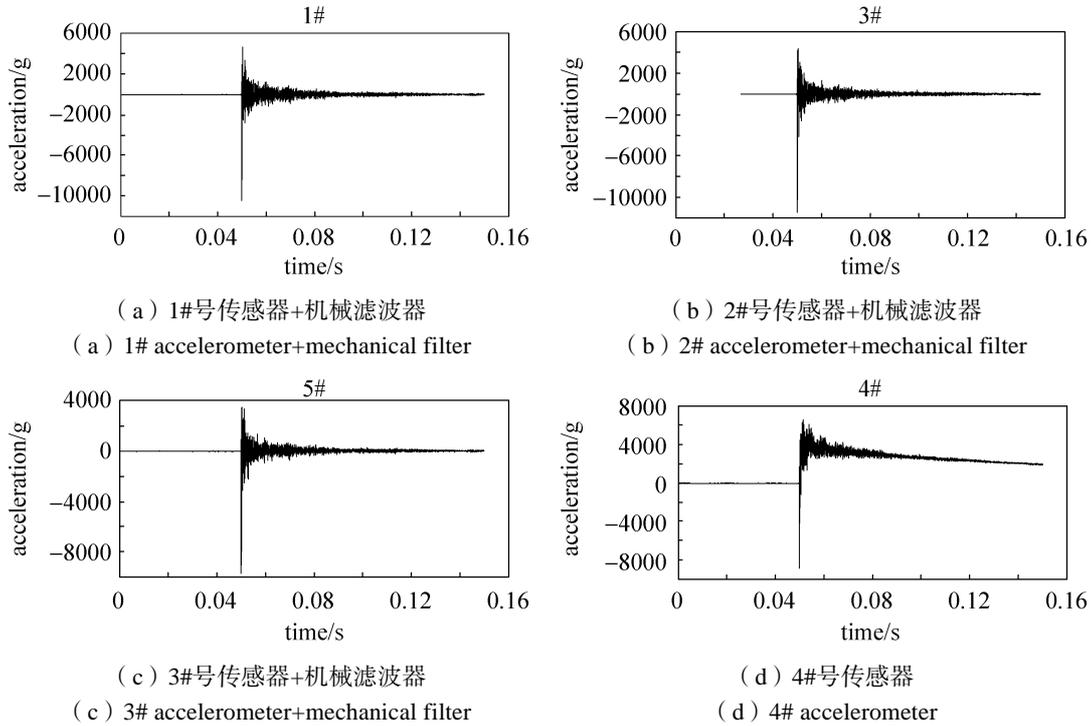


图5 冲击试验压电加速度计时域波形

Fig. 5 Response of the piezoelectric acceleration sensor in time domain

对采集的冲击波形分别进行计算冲击响应谱，不安装机械滤波器的压电加速度计（4#）输出零漂，计算出的冲击响应谱低频部分明显上翘，如图6所示。零漂现象给冲击响应谱的计算带来较大误差，严重影响冲击测量评估。

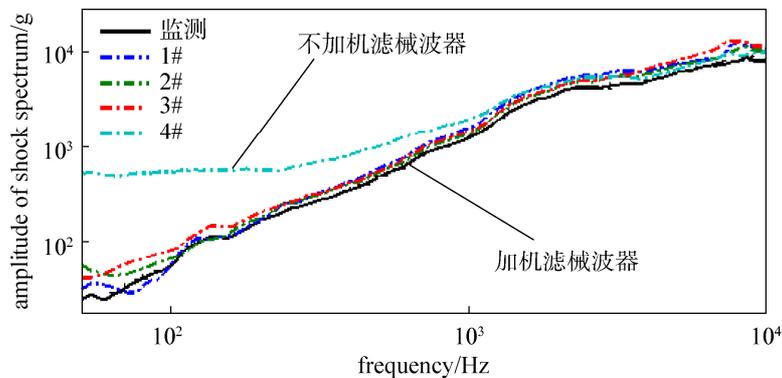


图6 冲击试验的冲击响应谱

Fig. 6 Shock response spectrum

上述试验结果表明，高频能量是造成冲击试验中压电加速度计零漂的主要因素，采用机械滤波器可以有效地滤除高频能量，改善测量传感器的零漂问题。

### 4 理想的高 g 值冲击传感器

#### 4.1 内置机械滤波器的压电加速度计

外接机械滤波器面临一个共同的问题就是滤波器本身的共振,即使严格选用弹性材料和阻尼材料,也很难获得临界阻尼。在阻尼特性不好的滤波器中,任何小量的放大系数(Q)都会造成很大的幅值失真,这种失真表现为叠加在传感器输出信号上、频率为机械滤波器拐角频率的振铃。另一个问题就是,机械滤波器的拐角频率和放大系数与附在它上面的传感器质量密切相关,传感器重量的变化会使其频率响应发生变化。

理想的大冲击测量用压电加速度计应带有隔离敏感元件的内装机械滤波器,并使其与内装的电子低通滤波器匹配,消除不需要的残余振铃,如图 7 所示。

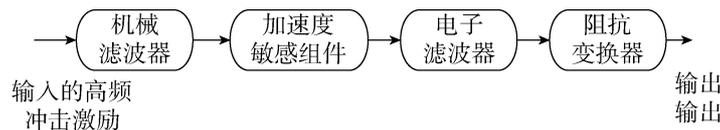


图 7 内置机械滤波器和电子滤波器的加速计

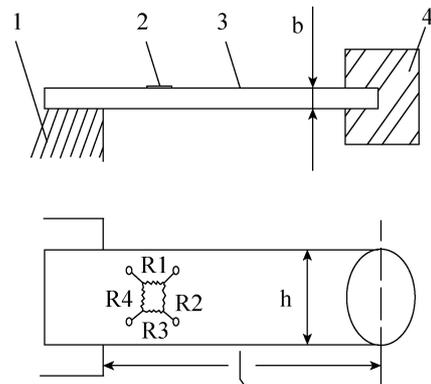
Fig. 7 Block diagram of accelerometer with mechanical filter and electronic filter built-in

合理选择弹性材料和阻尼材料,与传感器的惯性质量匹配,使敏感元件在各个方向都有机械隔离,在敏感方向和横向上的高频能量均被隔离材料滤除,只接受通频带内的信号;将电子低通滤波器的拐角频率设置在机械滤波器共振频率之前,补偿消除掉机械滤波器产生的共振峰。内置机械滤波器和电子滤波器的共同作用可以有效将压电元件和二次电路与高频瞬态信号完全隔开。美国 PCB 公司的 350 系列冲击传感器内置机械滤波器共振频率为 35kHz,电子低通滤波器(-3dB)拐角频率为 21kHz,可实现 4kHz~10kHz 冲击信号监测,可用于近场爆炸冲击测试。

#### 4.2 高共振频率的压阻式加速度计

压阻式加速度计以硅压阻效应为理论基础,采用 MEMS 工艺制成,通过力敏电阻构成的惠斯通电桥测加速度变化<sup>[7]</sup>,如图 8 所示。此类传感器结构和信号处理电路简单,线性度好,抗冲击能力强。通过合理设计,使压阻式加速度计达到很高的共振频率,防止应变结构在共振时失效,也是大冲击测量的一种理想选择。

美国 ENDEVCO 公司生产的 7270A 系列压阻式加速度传感器专为测量冲击设计,国外多用其进行弹体侵彻冲击测量。其中,7270A-200K 量程达到 20 万 g,谐振频率 1.2MHz,如图 9 所示<sup>[8]</sup>。该系列传感器两侧采用单端悬臂梁的整体式结构,利用微机械加工技术,在 1mm×1mm 尺寸的单晶硅片上制作梁与质量块,并在单晶硅表面制作压阻力敏电阻,构成惠斯通全桥电路,进行加速度值测量。该加速度计的高共振频率使得它能承受富有高频分量的冲击脉冲,再加上阻尼为零,可精确地响应前沿陡、持续时间短的冲击。低频响应到零使其可能测量持续时间长的瞬态运动。



1—硅梁基座; 2—压阻元件; 3—硅梁; 4—质量块  
 1— silicon beam base; 2—piezoresistive element;  
 3—silicon beam; 4—mass block

图 8 硅悬臂梁结构

Fig. 8 Silicon cantilever structure

### 5 结 论

通过分析和试验验证可知:①近距离冲击测量时,爆炸冲击和机械碰撞产生的高 g 值激励中存在远高于测量频率之上的分量,超高频分量会使测量传感器共振,造成传感器损坏、数据零漂和非线性;

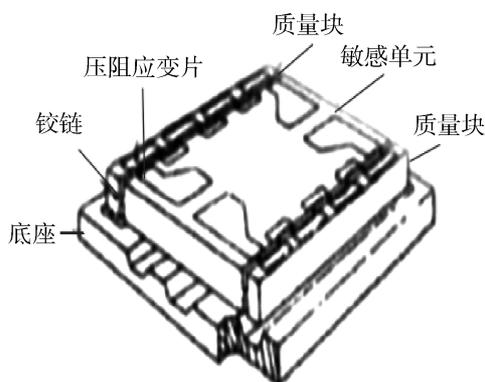


图9 7270A系列压阻式加速度传感器  
Fig. 9 7270A piezoresistive acceleration

②在高  $g$  值冲击测量时应对加速度计进行保护, 以防超高频信号引起敏感元件共振。采用机械滤波器将敏感元件与高频输入量隔开是解决加速度计共振问题的有效方法; ③通过在压电式加速度计中内装机械滤波器和电子低通滤波器, 可实现较好的大冲击测量; ④压阻式加速度计通过提高共振频率, 防止应变结构在共振时失效, 可适用于大冲击测量。

#### 参考文献

- [1] 陈洪娟. 矢量传感器[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006.
- [2] ANTHONY S C. 高  $g$  值冲击测量中的若干问题[R]. ENDEVCO 简报, 1993(2): 1.  
ANTHONY S C. Problems in the high-shock measurement[R]. ENDEVCO TP, 1993(2): 1.
- [3] 夏伟强, 马铁华, 范锦彪, 等. 压电式加速度传感器在高冲击环境下的零漂分析[J]. 传感技术学报, 2007, 20(7): 1522–1527.  
XIA Weiqiang, MA Tiehua, FAN Jinbiao, et al. Analysis of zero-drift of the piezoelectric acceleration sensor in high-impact testing[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(7): 1522–1527.
- [4] 赵小龙, 马铁华, 范锦彪. 高  $g$  值加速度计在高冲击下的失效特性的研究[J]. 传感技术学报, 2012, 25(12): 1668–1672.  
ZHAO Xiaolong, MA Tihua, FAN Jinbiao. The study of failure characteristic of high  $g$  acceleration in high shock[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(12): 1668–1672.
- [5] 李海广, 潘宏侠, 任海锋. 冲击信号零漂修正的冲击响应谱互相关系数分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(16): 219–224.  
LI Haiguang, PAN Hongxia, REN Haifeng. Baseline correction of impact signals using the cross-correlation coefficient of shock response spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(16): 219–224.
- [6] 菅在河, 李艳萍. 压电式加速度传感器在高冲击环境下的零漂分析[J]. 山西师范大学学报, 2009, 23(3): 40–42.  
JIAN Zhaihe, LI Yanping. Analysis of zero-drift of the piezoelectric acceleration sensor in high-impact testing[J]. Journal of Shanxi Normal University Natural Science Edition, 2009, 23(3): 40–42.
- [7] 李科杰. 新编传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [8] 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): 6–10.  
LI Kejie, HE Xu, ZHANG Zhenhai, et al. Developing status and trend of high impact accelerometer[J]. Journal of Detection & Control, 2013, 35(4): 6–10.

#### [作者简介]

- 何勤 1985年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为振动冲击传感器设计。  
张也弛 1987年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为振动冲击传感器设计。  
张永强 1983年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为振动冲击测试。  
陈玉叶 1992年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为振动冲击测试。