

高冲击下加速度计需测频率上限研究

卢玉斌^{1,2},程永生¹,孙远程¹

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所,四川 绵阳 621900;

2. 西南科技大学 制造过程测试技术教育部重点实验室,四川 绵阳 621010)

摘要:为了使爆炸、金属碰撞等高冲击环境中使用的加速度计不会发生谐振,应使其谐振频率足够高,如 Endevco 公司设计的 MEMS 硅基压阻式加速度计(7270A-200K)的谐振频率可达 1.2 MHz(幅值可达 20 万 G);然而在这些强动载荷作用下,由于这种加速度计的阻尼很低,超量程和加速度计敏感元件的破坏仍时有发生;鉴于高 G 值冲击测量中输入信号的频率上限常常在 100 kHz 以上,研究加速度计测量结果的频率响应,从不同方面进行论证给出加速度计需要测量的频率上限,研究结果对开发更可靠的 MEMS 加速度计具有重要意义。

关键词:高冲击;加速度计;频率响应

本文引用格式:卢玉斌,程永生,孙远程. 高冲击下加速度计需测频率上限研究[J]. 四川兵工学报,2014(1):138-140.

中图分类号:034

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2014)01-0138-03

Upper Limit of Frequency in Accelerometer Measurements with High Impact

LU Yu-bin^{1,2}, CHENG Yong-sheng¹, SUN Yuan-cheng¹

(1. Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Ministry of Education Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Endevco Corporation designed a type of MEMS silicon-based piezoresistive accelerometers (Model 7270A-200K) enabled sensor resonances of 1.2 MHz. The original intent of this design was to create an accelerometer with a resonant frequency high enough that it would not be excited in metal-to-metal impact or explosive environments. In spite of the advantages provided by the high resonant frequency of this type of accelerometer, the extremely low intrinsic damping of silicon acts as a counterbalance. The result of this low damping is often over-ranging and breakage of the accelerometers when they are subjected to pyroshock. To support the development of a series of more robust MEMS accelerometers, upper limit of frequency in accelerometer measurements is studied in this paper.

Key words: high impact; accelerometer; frequency response

Citation format: LU Yu-bin, CHENG Yong-sheng, SUN Yuan-cheng. Upper Limit of Frequency in Accelerometer Measurements with High Impact[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014(1): 138-140.

关于高冲击试验,近年来有数个标准对其进行了定义^[1]。包括(1) IEST-RP-DTE032. 1, (2) MIL-STD-810F 和 (3) NASA HDBK-7003。对于加速度幅值和频率范围,这些标准的定义分别为(1)加速度幅值未定义、频率高于 10 kHz; (2)和(3)加速度幅值高于 5 000 G、频率高于 100 kHz。这些

标准指出频率高于 10 kHz 的冲击信号应当且能够通过加速度计测量到。然而鉴于有关标准中对加速度计校准和性能评估的频率上限规定为 20 kHz;被测目标的高频结构响应模拟结果缺乏相应的试验结果进行验证;加速度计测得的被测目标高频结构响应是其物理尺寸范围内的平均值;极高频率

收稿日期:2013-07-22

基金项目:中国博士后基金(2012M511943);科技部重大专项(2012ZX04007-021)。

作者简介:卢玉斌(1980—),男,博士,副研究员,主要从事材料与结构动力学响应研究。

下加速度计的存在会改变被测目标的结构响应这四方面的考虑,本文提出高冲击环境下加速度计需测响应的频率上限应为 20 kHz 左右,并从这几个方面逐一进行论证。

1 论证

图 1 所示为 PCB 3991 型加速度计(几何尺寸与 Endevco7270A-200K 相同^[2])置于一便士美国硬币上,加速度计的质量为 1.28 g。硬币的直径为 19 mm、厚度为 1.27 mm,其质量约为 2.57 g。当把硬币设置为自由边界时,可计算出其一阶模态频率为 12.47 kHz。若将加速度计与硬币刚性连接,可预见由于加速度计的存在硬币的一阶模态频率将下降。因此,通过该示例说明加速度计需要测量的被测目标结构响应的频率存在上限,超过这一上限后加速度计输出结果将无法真实反映被测目标的结构响应。

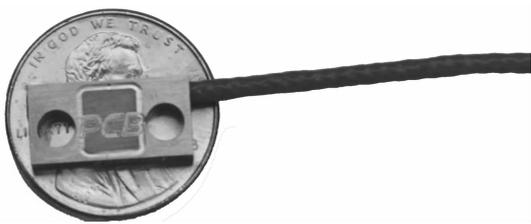


图 1 PCB 3991 型加速度计与一便士美国硬币比较

首先,对于加速度计的校准,以美国国家标准和技术研究院(NIST)为例。NIST 所能提供的加速度计校准服务的频率上限为 20 kHz^[3]。在加速度幅值为 4 G、频率为 3 kHz 到加速度幅值为 200 G、频率为 20 kHz 范围内可进行准确测量,不确定度在 1%~3% 之间。

当在 20 kHz 以上频率校准时,可考虑使用能进行直线运动的空气轴承振荡仪^[4]。由于干涉仪的测量结果连同独立方法确定频率,作为加速度计校准的基础。然而在恒定 G 值下,随着振动频率的提高,相应的位移将减小,这样基于激光干涉仪的测量精度将会下降。因此,加速度计校准的频率上限为 20 kHz。

就加速度计校准进一步而言,MEMS 压阻式加速度计通常满量程输出为 100~200 mV。这样,对于一个 2 万 G 的冲击测量加速度计而言,加速度为 4 G 时输出的信号为 0.02~0.04 mV,而加速度为 200 G 时输出的信号为 1~2 mV。由于输出信号的低幅值,将会增加确定加速度计频率响应的不确定性。如图 2 所示,红线为 PCB3991 型加速度计理想状态下的灵敏度结果,蓝线为包含了低输出信号导致的不确定性的实测灵敏度数据。因此,加速度计的低输出信号致使频率响应的确定变得更为复杂。这也就进一步说明了需要把加速度计校准的频率上限设置为 20 kHz。频率超出该上限时,不希望出现的加速度计敏感元件内部的扭转或侧向共振、加速度计外壳的共振、引线接头的共振等均会叠加到被测目标的结构响应中,且不易区分^[5]。同时,安装不当也会成为一个误差源。

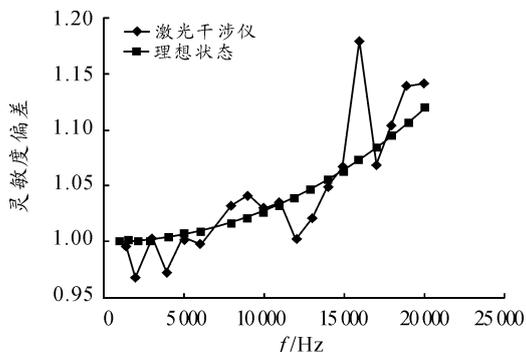


图 2 PCB3991 型加速度计振动测试结果

其次,在高冲击试验中,要基于数值模拟获得被测目标的高频结构响应时,需要将被测结构离散为大量尺寸很小的网格。即使被测结构本身的尺寸不大,由于加速度计测量的响应是其安装部位单元响应,当想要获得结构高频响应的实验数据对数值模拟结果进行校核时,就会成为如图 1 所示的一个两难问题。

再次,根据奈奎斯特采样定律,对于一个正弦波,如果要测量获得其峰值,则在一个时间周期内至少需要平均间隔采集 10 个数据,这一采样密度可以保证误差控制在 5% 以内。这样,对于获得高冲击信号的高频响应部分的数据,弹性应力波的波长对于确定加速度计的空间最小安装间距便很重要。基于弹性应力波波长,可进一步确定需要测量的冲击相应的频率上限。

固体中弹性波的波速取决于拉姆常数 λ 和 μ ^[6]。对于各向同性、无限固体介质来说,其纵波波速为 $\sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$ 、横波波速为 $\sqrt{\mu/\rho}$ 。拉姆常数可由杨氏模量 E 和泊松比 ν 确定。本文以钢为例,其杨氏模量为 207 GPa、泊松比为 0.33。这样钢的纵波波速经计算为 6 223 m/s,横波波速为 3 124.2 m/s。根据波长与频率的乘积为波速这一关系,可以获得钢在 20 kHz 时纵波和横波的波长分别为 304.8 mm 和 152.4 mm。25.4 mm 通常为被测结构上最小的安装空间间距。基于前述采样要求,以 25.4 mm 为间距,每个时间周期采集 10 个数据可以准确重构波长为 254 mm 的应力波。表明 20 kHz 是加速度计应当测量的结构响应的频率上限。

最后,分析加速度计对被测目标结构响应的影响。加速度计的机械阻抗可按下式计算:

$$Z_{\text{accel}} = -j\omega m \quad (1)$$

式(1)中 ω 为角频率, $j = (-1)^{0.5}$, m 为加速度计的质量。可见加速度计的机械阻抗随着频率的增加而增加。假定加速度计连同安装螺钉等的质量为 2 g,加速度计的机械阻抗在频率为 100 Hz 和 20 kHz 时经计算分别为 0.13 和 25.6 kg·s/m。那么,加速度计不同频率下的机械阻抗将会对被测目标的结构响应产生不同的影响,这种影响随着频率的提高而增加。

文献[7]给出了一个细长杆端部安装加速度计,这一结构的机械阻抗计算公式:

$$Z_{\text{structure}} = -j \sqrt{E\rho} A \sin(\omega L / \sqrt{E\rho}) \quad (2)$$

其中 A 为杆的横截面积, L 为杆的长度, ρ 为杆材料的密度。

以一个长度为 249.4 mm、直径为 25.4 mm 的铝杆为例,纵向弹性波速为 4 988.6 m/s。频率为 20 kHz 时,其波阻抗经计算为 $600.6 \text{ kg} \cdot \text{s}/\text{m}$ 。这样在 20 kHz 时加速度计的机械阻抗对整个结构机械阻抗的贡献约为 4.3%。随着加速度计质量的增加(如三轴加速度计),这种影响也会更大。因此,基于这一计算再次表明加速度计应测冲击响应的频率上限为 20 kHz 左右。

如图 3 所示曲线为 988 型高 g 值压电加速度传感器测得的 70 mm 射弹以 556 m/s 的速度侵彻素混凝土圆筒靶的侵彻加速度频谱^[8]。从图 3 中可以看出,加速度信号包含有较高的频率分量,频谱曲线在 20 kHz 附近有谐振峰。

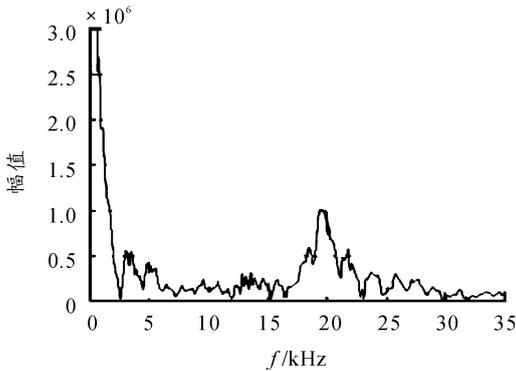


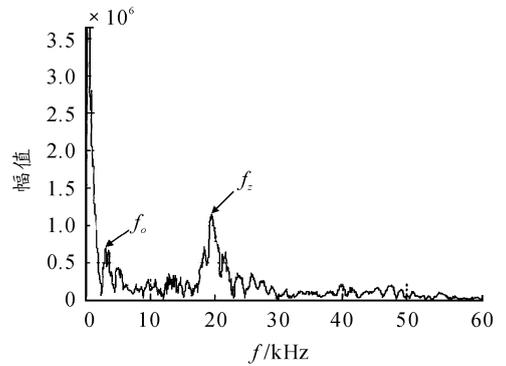
图 3 加速度曲线频谱

图 4(a)和(b)分别为质量 8 kg 的弹丸以 550 m/s 的速度侵彻均质混凝土靶和多层介质靶过载信号的频谱图。由图 4 可以看出,虽然侵彻介质不同,但整个弹丸的一阶结构响应频率 f_0 基本相同,几乎都为 3 kHz 左右,且两个频谱图中在 20 kHz 频率 f_z 处都有明显的突变,此处是由弹体振动产生的信号^[9]。

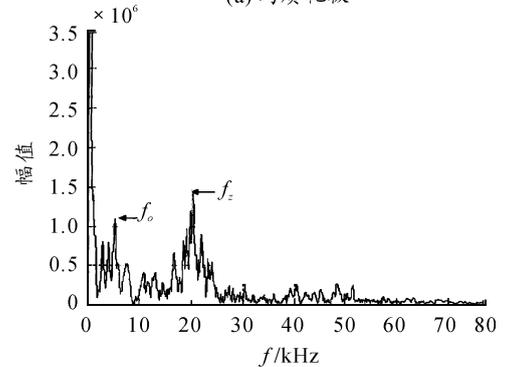
因此,综合上述讨论,对于 20 kHz 以上的高频信号,可采用机械滤波器将输入信号的高频分量大幅衰减后再传到加速度计。这样机械滤波器将降低加速度计的工作频带范围,由于钻地武器的基频都较低,所以安装了机械滤波器的加速度计被用来测试弹体侵彻过程的刚体加速度是可行的。

2 结束语

加速度计测量的目的是要获得被测目标的结构响应,同时又不会对被测目标的结构响应产生影响。当频率较高时,结构的真实响应和由加速度计测量的响应之间将产生偏差。这些偏差可归结于高频时的谐振或加速度计安装异常、加速度计物理尺寸产生的频响结果的空间平均,以及加速度计对被测目标施加载荷等。此外,对于被测目标结构响应的数值模拟,随着网格尺寸的减小,欲获得相应的试验数据进行验证将变得困难。本文基于四个方面的论证表明加速度计需要测量的冲击响应的频率上限为 20 kHz。这一上限对于确定更为实际的测试目标和更为恰当地定义高冲击等均具有重要意义。



(a) 均质靶板



(b) 多层介质靶板

图 4 侵彻过载频谱

参考文献:

- [1] BATEMAN V. Use pyroshock definitions as guidelines-analyze your data first[J]. Test, 2008(6-7): 10-12.
- [2] SILL R. Testing techniques involved with the development of high shock acceleration sensors[R]. Endevco Technique Paper, TP284, 1983.
- [3] Vibration Measurements[EB/OL]. http://www.nist.gov/calibrations/vibration_measurements.cfm, 2010-01-07/2013-07-23.
- [4] DIMOFF T. Electrodynamical vibration standard with a ceramic moving element[J]. Journal of Acoustic Society of America, 1966, 40(3): 671-676.
- [5] LIU B. Transducers for sound and vibration - the finite element method based design[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2001.
- [6] BEDFORD A, DRUMHELLER DS. Introduction to elastic wave propagation [M]. New York: John Wiley and Sons, 1994.
- [7] WALTER P. Limitations and corrections in measuring dynamic characteristics of structural systems[D]. Arizona: Arizona State University, 1978, 121-124.
- [8] 范锦彪, 祖静, 徐鹏, 等. 弹丸侵彻混凝土目标减加速度信号的处理原则[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(4): 1-5, 9.
- [9] 冯琳娜. 硬目标侵彻引信仿真测试系统信号重构方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.