

doi: 10.7690/bgzd.2015.03.006

冲击载荷作用下压阻式微加速度计的动态力学响应研究

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 502 室, 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防护结构响应与设计研究室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 针对目前判断器件的可靠性实验中存在成本高、周期长的问题, 对微型压阻式加速度计在冲击载荷作用下的动态力学响应特性进行研究, 获得微加速度计在冲击载荷作用下的动态力学响应规律。以锥形头部弹体为例构建动力学模型, 对典型的微加速度计和冲击载荷工况进行理论研究, 分析压阻式微加速度计在冲击载荷作用下的动态力学响应特性。结果表明: 压阻式微加速度计在冲击载荷下的响应由应力波的渡越时间、结构的本征振动周期及脉冲的持续时间这 3 个时间常数及其关系决定, 可准确反应弹体所受冲击载荷的特性。

关键词: 压阻式微加速度计; 冲击载荷; 力学响应; 可靠性

中图分类号: TP203 **文献标志码:** A

Study on Dynamic Mechanical Behavior of Piezoresistive Accelerometers Under Shock Loading

Lu Yubin^{1,2}, Cheng Yongsheng¹, Sun Yuancheng¹

(1. Department of 502, Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Group of Protective Structures Response & Design, Ministry of Education Key Laboratory of Testing Technology for Manufacturing Process, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Aiming at high cost and long duration problems of tests to analyze the reliability of devices, the dynamic response of piezoresistive accelerometers under impact loadings is investigated, and the nature of the mechanical responses of shock-loaded piezoresistive accelerometers could thus be obtained. Taking projectiles with conical head shape as examples for creating dynamic models, theoretical studies on typical piezoresistive accelerometers and shock loads are conducted, and the response of the piezoresistive accelerometers are analyzed. Results show that the response of the shock-loaded piezoresistive accelerometers is determined by three constants, viz. the acoustic transit time, the time period of vibrations and the duration of the applied shock load, and the relationship among these constants, which can accurately show the characteristics of impact loadings subjected by the projectiles.

Keywords: piezoresistive accelerometers; shock loading; mechanical response; reliability

0 引言

高 g 值加速度计已在很多场合得到了应用, 尤其是在军事上, 如控制侵彻弹药引信在预定层数起爆, 监测核爆破的冲击过程, 武器研制过程中的冲击过载测试等。近几年来, 随着硬目标侵彻武器研究的大范围发展, 测量冲击现象的需求变得尤为重要^[1-3]。目前, 国内外主要使用基于压阻原理的加速度计来实现高冲击的测量^[4]。

微型压阻式加速度计由于其优良的频率特性和动态性能受到了各国的广泛关注, 研究表明微型压阻式加速度计测量高冲击时通常的失效方式有缺乏阻尼(测试时引起传感器共振)、封装有缺陷(造成加速度计内部有尘粒)、质量块破碎(质量块材料和结构设计不合理)、连接电缆接头受损等几种^[5]。因此, 加速度计在使用之前需进行冲击振动测试。目前主要是通过试验测试加速度计在冲击下是否失效来判

断器件的可靠性, 但其成本高、周期长。如文献[6]利用跌落实验对一种折叠梁式微加速度计在冲击载荷作用下的失效模式进行了研究; 文献[7]基于冲击设备试验研究了梳齿电容微加速度计器件在大过载冲击下的失效模式, 而对加速度计在冲击下力学响应的分析尚较为缺乏; 文献[8]综述了 MEMS 器件的冲击测试和理论分析方法; 文献[9]分析了微加速度计冲击载荷下的破坏以及由于尺寸效应引起的部件间的粘附现象。笔者研究微型压阻式加速度计在冲击载荷作用下的动态力学响应特性, 为加速度计的可靠性设计提供依据。

1 动力学模型

以锥形头部弹体为例, 当冲击载荷作用于其头部时, 产生的冲击应力波传递到压阻式微加速度计基座上, 引起基座振动, 进而使悬臂梁产生振动, 从而引起压敏电阻的变化, 通过测量压敏电阻阻值

收稿日期: 2014-10-09; 修回日期: 2014-11-18

基金项目: NSAF 联合基金(U1430110); 中国博士后基金(2012M511943)

作者简介: 卢玉斌(1980—), 男, 陕西人, 博士, 副研究员, 从事冲击动力学研究。

的变化来测量冲击载荷的变化情况^[10]。

压阻式微加速度计中使用的基本结构厚度一般在几微米到几百微米之间，长度不超过毫米量级。基座的厚度一般不超过 1 mm，长度和宽度都在厘米量级。因此基座无论在尺寸和质量上都远大于微结构。可以假定基座对微结构的影响是单向的，即基座影响微结构而不受微结构振动的影响。同时认为在封装时只有基座与封装的外壳接触，微结构与外界没有直接的力学接触，如图 1 所示。加速度计封装后，冲击载荷首先作用在外壳上，然后通过基座作用到加速度计微结构上，由于封装的外壳使作用到微结构上的冲击有所减小，作为极限估计，冲击没有损耗地作用在器件上^[8]。

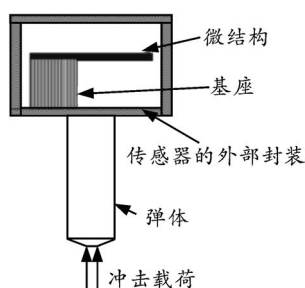


图 1 压阻式微加速度计动力学模型^[10]

2 理论分析

首先分析由冲击载荷引起压阻式微加速度计基座振动的情况。如图 2，锥形头部弹体长度为 L ，并且可近似为一维、各向同性的杆状弹性体，将坐标原点固结于尖形弹体头部，杆的方向为 x 轴，建立 Lagrange 坐标系。假设冲击载荷为半正弦波，即

$$\begin{cases} a_0(t) = a_0 \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) & 0 < t \leq \tau \\ a_0(t) = 0 & t > \tau \end{cases} \quad (1)$$

分析在顶端的冲击加速度 $a_0(t)$ 的作用下弹体末端的加速度响应 $a_L(t)$ 的情况，杆的纵向自由振动方程可由以下偏微分方程表示

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

式中： $u(x,t)$ 为杆上某点在某时刻的位移； c 为纵向弹性波在杆中的传递速度， $c = \sqrt{E/\rho}$ ； E 为杨氏模量； ρ 为密度。

在 Lagrange 坐标中，弹体冲击过程中可认为杆两端是自由无约束的，因此边界条件可表示为

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \quad (3)$$

在 Lagrange 坐标中认为杆的初位移和初速度均为零，即初始条件为

$$u(x,0) = \frac{\partial u(x,0)}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

根据边界条件和初始条件，可得到自由振动的偏微分方程的解为

$$u(x,t) = X(x)[A_1 \cos(\omega_n t) + A_2 \sin(\omega_n t)] \quad (5)$$

这里 $\omega_n = n\pi c/L (n=0,1,2,3,\dots)$ 为杆纵向振动的角频率； $n=0$ 表示刚体的平动。自由振动的各阶模态周期可表示为

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2L}{nc} \quad (6)$$

式 (6) 表明纵向振动一阶模态 ($n=1$) 的周期与波在弹体中传播一次的时间在同一个数量级上。

最终解得：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_0(t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2a_0 \tau^2 T_n^2}{\pi^2 (4\tau^2 - T_n^2)} \left[\frac{2\pi^2}{\tau T_n} \sin\left(\frac{2\pi t}{T_n}\right) - \frac{\pi^2}{\tau^2} \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) \right] \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (7)$$

当 τ 为正值时，式 (7) 均有效。由式 (7) 可见，弹体中的加速度为刚体运动加速度与纵向振动的叠加。当冲击载荷的时间 $\tau \leq L/c$ 时，杆的运动方程为冲击载荷引起的弹性波在杆中的传播方程；当冲击载荷的时间 $\tau \approx T_1$ 时，杆的运动方程为杆纵向振动第一模态方程；而当冲击载荷的时间 $\tau \geq 2.5T_1$ 时，杆的运动方程即为冲击加速度方程。

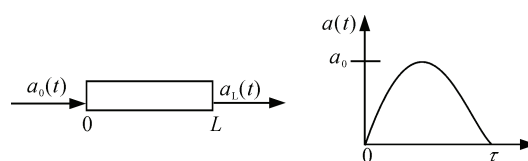


图 2 弹体受冲击载荷时的一维力学模型

因此，若冲击载荷的时间与杆纵向振动第一模态周期相比足够长 ($\tau \geq 2.5T_1$)，可认为作用于弹体头部的冲击加速度与传感器芯片基座的加速度大小相等、频率相同。压阻式微加速度计在使用过程中，弹体的纵向振动第一模态周期一般为几微秒至几十微秒，而冲击过程一般要持续几百微秒以上，因此可认为是类似静态的问题。

加速度计要通过一定的方式安装在弹体上，安装影响响应波形的形状^[11]。安装部分对应的固有频率 (安装频率) 可用来衡量器件安装的牢固程度。当安装频率远大于被测信号的频率时 (即刚性连接)，

外界的冲击可以不失真的传递到悬臂梁质量块结构。如果在器件和被测面之间加一层软的过渡材料,将会使安装频率降低,软材料来不及响应高频输入,这样加速度计所测得的加速度其实是软材料和加速度计界面的加速度,要小于被测加速度,同时应力波传播到器件敏感电阻的时间将变长,使加速度计的输出脉宽变长。

加速度计基座的应变^[12]为

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=L/2} = \frac{a_0 L}{2c^2} \quad (8)$$

由式可知,假定 a_0 取 106 m/s^2 , 长度为 1 mm 的硅基座中的应变大约为 10^{-5} , 比室温时硅的破坏应变大约低两个数量级^[13]。因此,基底受封装外壳处而来的冲击载荷的响应可近似为刚体运动^[14]。

其次分析由加速度计基座振动引起悬臂梁根部固结处振动的情况,采用基础振动模型,加速度计基座相当于一弹簧,悬臂梁相当于一质量块,悬臂梁的振动可简化为弹簧质量块振动模型,如图 3。

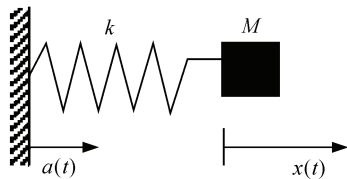


图 3 加速度计基座振动引起悬臂梁振动的基础振动模型

质量块的运动方程可由下式表示:

$$\frac{M}{k} \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{d^2 x}{dt^2} \right) + \frac{d^2 x}{dt^2} = a(t) \quad (9)$$

弹簧质量块振动模型的周期为

$$T = 2\pi\sqrt{M/k} = 2\pi/\omega \quad (10)$$

同样假设基础的加速度为半正弦波即式 (1), 通过解上述微分方程, 可得到如下结果^[15]:

1) 当 $\tau \leq 0.25T$ 时, 可认为弹簧质量块系统受到脉冲力的作用, 获得初速度, 在此初速度下, 弹簧质量块系统作自由振动, 因此质量块的绝对加速度为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \omega \left[\int_0^\tau a(t) dt \right] \sin(\omega t) \quad (11)$$

2) 当 $0.25T \leq \tau \leq 2.5T$ 时, 可认为弹簧质量块系统在交变载荷的作用下作强迫振动, 因此质量块的绝对加速度为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{4\tau^2 a_0}{4\tau^2 - T^2} \left[\sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) - \frac{T}{2\tau} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \right] & 0 \leq t \leq \tau \\ \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{4\tau T a_0}{T^2 - 4\tau^2} \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right) \sin\left[\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{\tau}{2}\right)\right] & 0 \leq t \leq \tau \end{cases} \quad (12)$$

能预测出质量块的加速度可超过施加的最大加速度。

3) 当 $\tau \geq 2.5T$ 时, 可认为弹簧质量块系统类似于静态系统, 质量块的绝对加速度等于冲击加速度, 即:

$$\begin{cases} \frac{d^2 x}{dt^2} = a_0 \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right) & 0 \leq t \leq \tau \\ \frac{d^2 x}{dt^2} = 0 & t > \tau \end{cases} \quad (13)$$

只要加速度计基座的加速度频率(即弹体头部的冲击加速度的频率)与基座和悬臂梁构成的弹簧质量块系统的固有频率相比足够低, 可认为基座的加速度(即弹体头部的冲击加速度)与悬臂梁运动的加速度大小相等、频率相同。对于加速度计, 假定基座和悬臂梁构成的弹簧质量块系统的固有频率为几百千赫兹, 当测量的冲击加速度频率为几十千赫兹时, 可认为是静态的问题。

最后分析悬臂梁的振动情况, 悬臂梁根部固结处以与冲击加速度 a 大小相等频率相同的绝对加速度作上下运动, 取悬臂梁根部固结处作为参照系, 在此参照系中, 相当于悬臂梁受到了变化的均布惯性力载荷 ma 的作用, 如图 4 所示。分析此模型中悬臂梁的受力及挠曲振动情况, 即可得出冲击加速度 a 与悬臂梁上压敏电阻阻值变化的关系。

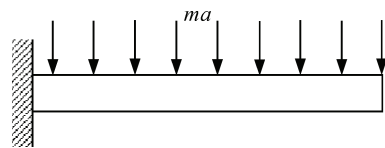


图 4 悬臂梁受变化的均布惯性力作用示意图

梁的运动方程为

$$EI \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} = \rho b h a(t) \quad (14)$$

同样假设加速度为半正弦波即式 (1), 解此偏微分方程较为复杂, 但在一些特殊条件下, 可得到一些定性结果:

1) $\tau \ll T_1$, T_1 为悬臂梁自由振动的第一模态周期, 这种条件下可认为悬臂梁受到脉冲激励后作自由振动;

2) $0.25T_1 \leq \tau \leq 2.5T_1$, 这种条件下可认为悬臂梁在惯性力 ma 的作用下作强迫振动;

3) $\tau \geq 2.5T_1$, 悬臂梁在惯性力 ma 的作用下, 其变形、位移都是类似静态的。

假定梁的第一模态频率为 83.6 kHz, 当冲击加速度的频率 $f \leq 83.6/2.5 = 33.4$ kHz 时, 梁的变形、位移都是类似静态的, 静态条件下分析得出的灵敏度公式在瞬态测量过程有效。这样, 该加速度计能正确测量加速度的频率范围至少为 0~33.4 kHz。

文献[15]分析指出微结构在冲击下的响应由 3 个时间常数及其关系来决定, 即应力波的渡越时间 τ_A ; 结构的本征振动周期 T ; 脉冲的持续时间 τ 。当 $\tau < \tau_A$ 时, 需要用应力波理论来分析器件的响应; τ 和 T 数值相当时, 器件将发生振动; τ 大于 τ_A 和 T 时, 可用准静态理论来分析。

应力波的渡越时间 τ_A 为应力波从基座传到加速度计自由端的时间, $\tau_A = L_A/c$, 式中 L_A 为冲击的作用点到器件自由端的最大距离, 一般 $L_A < 1$ mm。对于单晶硅, 杨氏模量 E 为 170 GPa, 密度 ρ 为 2 330 kg/m³, 得到 c 为 8 542 m/s, 由此可知 τ_A 小于 0.1 μ s。常用的压阻式微加速度计的本征振动周期为 0.1 μ s 到 10 ms 之间。冲击的持续时间一般为 50 μ s 至 10 ms 之间^[15]。此外根据国家半导体集成电路测试标准, 冲击的持续时间大于 0.5 ms^[8], 因此多数压阻式微加速度计在冲击下为准静态响应, 少数器件出现振动, 一般不会出现因应力波的传播而导致的损坏。

为防止加速度计在共振时产生激振, 第 1 种方法是采用机械滤波器, 如把具有低通特性的材料放置在加速度计和待测面之间。另一种方法是采用电子滤波技术, 但与使用机械滤波器相比, 这种方法要求加速度计具有更高的动态范围。或者也可以使用计算机软件滤波, 但这要求记录比待测信号更高幅值的噪音信号, 这会导致待测信号的分辨率降低。此外, 由于噪音信号的幅值无法预测, 很有可能导致记录仪器记录的信号不完整。由于所丢失的信号可能也包含待测信号的频率成分, 因此无法对这样的信号进行滤波, 待测信号也无法完全恢复。

3 结论

笔者分析了压阻式微加速度计在冲击载荷作用下的动态力学响应特性, 得到的结论如下:

1) 加速度计在冲击载荷下的响应由应力波的渡越时间、结构的本征振动周期及脉冲的持续时间 3 个时间常数及其关系决定;

2) 对于典型的压阻式微加速度计和冲击载荷, 在冲击下为准静态响应, 可以准确反应弹体所受冲击载荷的特征, 一般不会出现因应力波传播而导致的器件损坏, 与文献中相关实验结果符合;

3) 为了保证压阻式微加速度计能准确反映输入加速度脉冲, 应采用机械滤波器消除高频结构响应信号。

此外, 材料在冲击载荷下的强度与静态载荷下的强度不同, 因此需要研究和测试压阻式微加速度计材料的冲击强度。

参考文献:

- [1] 宋萍, 李科杰, 石庚辰, 等. 高 g 值 MEMS 加速度传感器敏感元件的结构分析[J]. 探测与控制学报, 2002, 24(4): 14-16.
- [2] 陈凯, 房立清, 张磊. 基于 MEMS 和静电探测技术的新型复合引信[J]. 兵工自动化, 2013, 31(8): 1-2.
- [3] 雷凌毅, 唐恭富, 姚毅. 基于 MEMS 加速度计的倾斜姿态角传感器设计[J]. 兵工自动化, 2014, 33(6): 71-73.
- [4] 石云波, 祁晓瑾, 刘俊, 等. 微型高过载加速度传感器的加工与测试[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 200-204.
- [5] Tanner DM, Walraven JA, Helgesen K, et al. MEMS reliability in shock environments[C]. San Jose: IEEE International Reliability Physics Symposium, 2000: 129-138.
- [6] 王立森, 胡宇群, 李志宏, 等. 微加速度计在冲击载荷作用下的失效分析[J]. 机械强度, 2001, 23(4): 516-522.
- [7] 王世涛, 贾玉斌, 张斌珍, 等. 微加速度计冲击可靠性及防护[J]. 传感技术学报, 2010, 23(12): 1690-1694.
- [8] 方绪文, 唐洁影, 黄庆安. MEMS 器件在冲击下的可靠性[J]. 微纳电子技术, 2004, 41(7): 31-34.
- [9] 徐鹏, 祖静, 林祖森. 微加速度计的力学分析[J]. 传感器技术, 2002, 21(6): 62-64.
- [10] 董建. 曲面贴合过载保护的硅微加速度传感器设计与制造[D]. 杭州: 浙江大学, 2003: 26-40.
- [11] 王钻开. 微机械压阻式冲击加速度传感器研究[D]. 上海: 中国科学院研究生院, 2003: 54-64.
- [12] Weaver W, Timoshenko SP, Young DH. Vibration problems in engineering (5th edition)[M]. Chichester: John Wiley & Sons Limited, 1990: 537-538.
- [13] Hu SM. Critical stress in silicon brittle fracture, and effect of ion implantation and other surface treatments[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(5): 3576-3580.
- [14] Srikar VT, Senturia SD. The reliability of microelectromechanical systems (MEMS) in shock environments[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(3): 206-214.
- [15] Ayre RS. Transient response to step and pulse functions[M]. Shock and Vibration Handbook. New York: McGraw-Hill, 1996: 8.