

MEMS 惯性器件高过载测试技术

崔 让, 曹慧亮

(中北大学仪器与电子学院 太原 030051)

Email: cuirang@outlook.com

摘 要: MEMS 惯性器件以其体积小, 易于集成, 可批量化生产, 成本低等特点, 在军事领域应用前景广泛. 在制导炮弹的发射过程中, 为使炮弹有更远的射程, 弹体要经历巨大的后座惯性力和离心力的作用以达到预计的发射初速度, 炮弹引信所经受的膛内冲击强度极大. 为验证 MEMS 惯性器件的抗高过载能力, 本文提出一种 MEMS 惯性器件高过载测试技术, 通过在实验室环境下对器件进行软件模拟仿真, 冲击实验, 拉曼光谱散射实验等, 验证了器件的抗高过载能力.

关键词: MEMS 惯性器件; 陀螺; 角速度计; 抗高过载测试

High overload testing Technology of MEMS Inertial Devices

Cui Rang, Cao Huiliang

(School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Email: cuirang@outlook.com

Abstract: MEMS inertial devices are characterized by their small size, easy integration, mass production, and low cost, making them promising for military applications. In the process of launching a guided missile, to achieve a longer range, the missile body must experience huge recoil inertial forces and centrifugal forces to reach the desired launch initial velocity. The impact strength inside the barrel during the firing process is extremely high, and the MEMS inertial device used in the missile fuse must be able to withstand this high overload. To verify the high overload resistance of MEMS inertial devices, this paper proposes a MEMS inertial device high overload testing technology. Through software simulation, impact experiments, and Raman scattering experiments conducted in a laboratory environment, the anti-overload ability of the device is verified.

Key words: MEMS inertial device; gyroscope; angular velocity meter; high overload testing

1、研究背景

近年来, 制导炮弹等高过载武器朝着智能化、小型化的方向发展, 通过在弹药武器中设置惯导系统的方法可为炮弹弹道进行修正, 可有效提高制导炮弹的打击精度^[1]. MEMS 惯性器件以其体积小、易于集成、可批量化生产、成本低等特点, 在军事领域应用前景广泛. 在制导炮弹的发

射过程中，为使炮弹有更远的射程，弹体要经历巨大的后座惯性力和离心力的作用以达到预计的发射初速度，航空炮弹引信所经受的膛内冲击强度可达 80 000 g 以上（g 为重力加速度）。在弹药发射周期后，冲击主要表现为接触障碍物的冲击，尤其是侵彻类炮弹，冲击的幅值更是可高达 15 000 g 以上^[2]。这对惯导系统的抗高过载性能要求极高，然而，对 MEMS 惯性器件的抗高过载性能及冲击后性能评估的详细验证较少，进一步研究 MEMS 惯性器件的抗高过载能力显得十分必要。

本文提出一种 MEMS 惯性器件抗高过载能力评估方法，通过抗高过载仿真分析、马歇特锤实验、冲击台实验、拉曼光谱测试、火炮测试等多种手段对器件进行抗高过载能力评估。

2、研究内容

以抗高过载能力较强的 MEMS 环形陀螺作为主要研究对象进行分析，陀螺仪是利用科里奥利原理来测量旋转物体角速度的传感器。MEMS 环形陀螺的结构通常由振环、支撑梁、驱动电极和检测电极组成。MEMS 陀螺仪应用在高过载环境中时，考虑陀螺结构受 Z 方向的冲击，冲击可近似为半正弦加速度脉冲，其表达式如下：

$$a = \begin{cases} A \sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right), 0 \leq t \leq \tau \\ 0, t > \tau \end{cases} \quad (1.1)$$

式中， τ 为加速度载荷持续时间；A 为冲击峰值。多数火炮在发射过程中产生的膛内过载特性曲线如图 1 所示，此过程在形状上类似于一个半正弦信号，所以在大多数情况下模拟膛内过载时，采用半正弦脉冲。

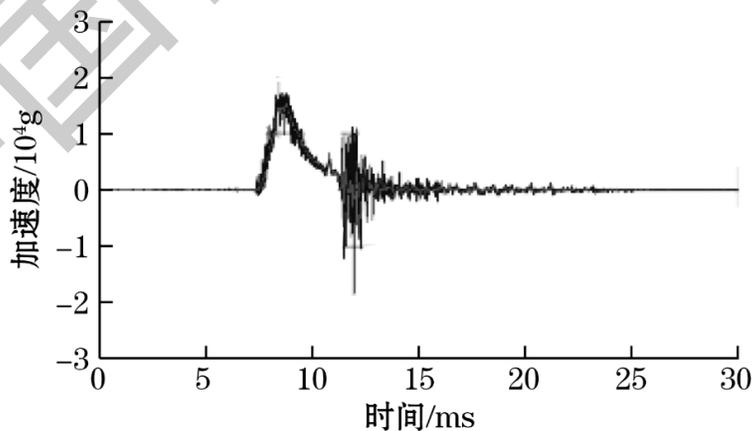


图 1 火炮发射过程过载实测曲线

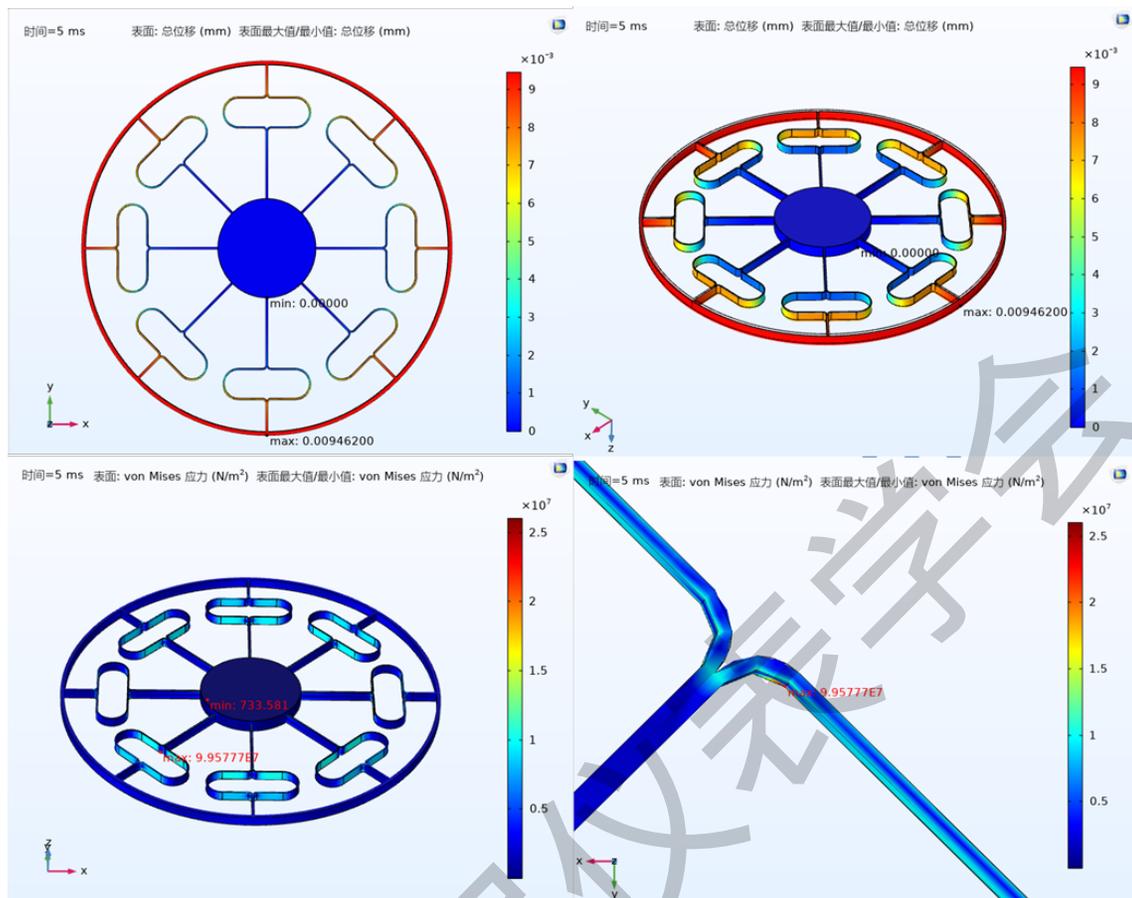


图 2 陀螺结构敏感轴冲击仿真图

以冲击动力学为基础，可利用有限元仿真软件 ANSYS 对陀螺结构进行瞬态动力分析，可以确定在随时间变化的冲击载荷作用下陀螺结构的位移响应及应力。陀螺仪作为惯性制导的核心部件，应用于制导炮弹时需要承受幅值不小于 10 000g 的过载。器件位移和应力仿真如图 2 所示。通过仿真分析可知整个结构在较高冲击幅值时也能保留较小位移和应力，体现了结构具有较好的抗冲击特性。

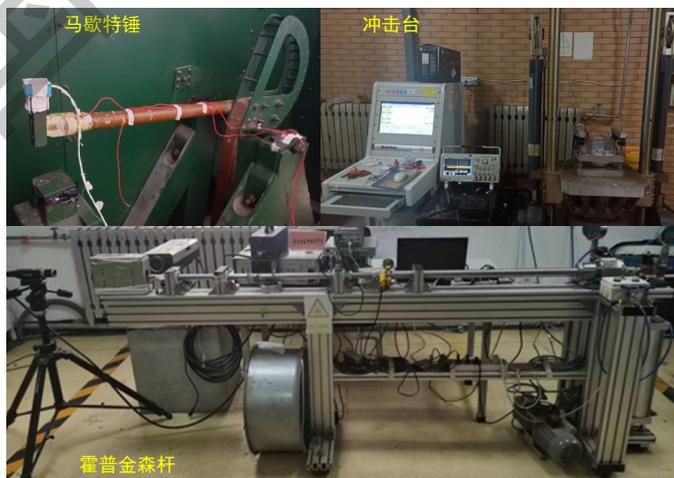


图 3 冲击测试设备

在实验室环境下，使用马歇尔锤、冲击台、霍普金森杆等设备对 MEMS 惯性器件进行冲击试验。将冲击设备设定好固定的冲击幅值及脉宽，将待测试样品安装在实验台上，并安装标准传感器用以测量实际的冲击幅值及脉宽。将待测试器件通电，等待输出稳定后开始试验；施加冲击前后，均进行一段时间的静态测试；冲击试验结束后，对测试器件的外观进行检查，结构应无残余变形，无裂纹和其他机械损伤。实验设备如图 3 所示。

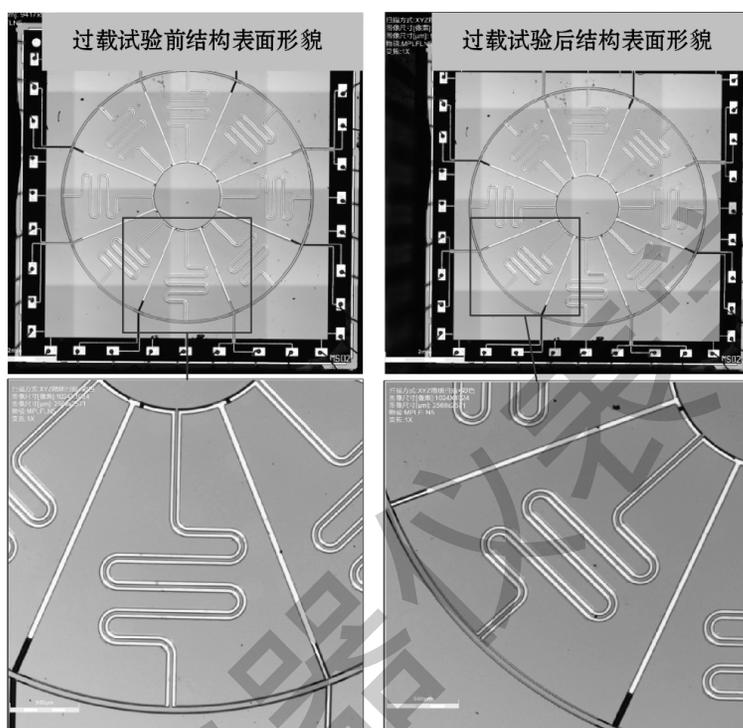


图 4 冲击前后陀螺结构表面形貌

冲击试验后，可使用拉曼光谱仪对冲击样品进行测试。根据硅晶体受内应力时，其晶格会发生形变，固有频率也会随之改变，最终导致散射的拉曼光谱发生频移，利用拉曼散射光谱对此硅基环形陀螺结构进行应力分析。拉曼光谱测试陀螺样品冲击前后结构表面形貌如图 4 所示。对样品表面的试验点进行应力测试，可以判定结构是否发生损坏。

3、结论

本研究提出了一种对 MEMS 惯性器件抗冲击能力的评估方法，通过仿真、实验等手段进行验证。在实验室环境下，先对 MEMS 惯性器件进行软件仿真，查看其抗过载能力；之后通过实验室环境下的冲击试验设备对器件进行冲击试验，通过查看器件外形、输出变化等验证其是否出现损坏；最后可进行拉曼光谱测试，查看结构的应力变化情况验证其抗高过载能力。本文的研究中，只进行了实验室环境下的 MEMS 惯性器件抗高过载能力测试，未涉及靶场实验，与实际弹载情况仍有一定区别，如脉宽较窄等问题。为需准确评估器件的抗高过载能力，可增加靶场实验。

参考文献

- [1] Shkel A M .Precision Navigation and Timing Enabled by Microtechnology: Are We There Yet?[C]// Proceedings of the ION 2013 Pacific PNT Meeting.2013.
- [2] Liu F , Gao S , Niu S ,et al.Optimal design of high-g MEMS piezoresistive accelerometer based on Timoshenko beam theory[J].Microsystem Technologies, 2018.DOI:10. 1007/s00542-017-3585-4.

中国仪器仪表学会