

文章编号: 2095-4980(2024)04-0459-08

基于螺旋弹簧的引信用低 g 值 MEMS 惯性开关

秦 浩, 蒋小华

(中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 微机电系统(MEMS)惯性开关在引信领域有广阔的应用前景, 但可用于引信工作环境的低 g 值型 MEMS 惯性开关较少。对此, 为低发射过载的弹药引信提出一种低闭合阈值的 MEMS 惯性开关设计方案, 满足引信识别低 g 值冲击信号的功能需求, 实现稳定接通引信电源的功能, 同时具备抵抗引信工作环境中高过载的能力, 提高引信可靠性。依据触发信号特征和引信工作环境提出设计要求, 对惯性开关的振荡模型进行理论分析, 阐明惯性开关结构尺寸对开关性能的影响规律, 给出开关整体设计方案, 并应用 ANSYS 有限元软件对设计结果进行仿真验证。仿真结果表明, 所设计的惯性开关能够监测幅值为 $20g$ 、脉宽为 1 ms 的冲击信号, 开关响应时间小于 1 ms , 电极接触时间长于 $30\text{ }\mu\text{s}$, 抗过载性能达到 $12\text{ }000g$, 满足性能指标要求。

关键词: 低 g 值; 微机电系统; 惯性开关; 螺旋弹簧

中图分类号: TM564

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022105

Low- g MEMS inertial switch with spiral spring for fuze

QIN Hao, JIANG Xiaohua

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Micro-Electro-Mechanical System(MEMS) inertial switch has broad application prospects in the field of fuze, but there are few low- g MEMS inertial switches that can be used in the working environment of fuze. A design of MEMS inertial switch with low closing threshold is proposed for the fuse of ammunition with low launch overload, to meet the functional requirements of the fuze to identify the low- g value impact signal, and to realize the function of stable connecting the fuze power supply. At the same time, the designed MEMS inertial switch has the ability to resist high overload in the fuze's working environment and improve the reliability of the fuze. The design requirements are put forward according to the characteristics of the trigger signal and the working environment of the fuze. The oscillation model of the inertial switch is theoretically analyzed. The influence law of the structural size of the inertial switch on the switch performance is clarified. The overall design scheme of the switch is given, and the design results are simulated and verified by ANSYS finite element analysis software. The simulation results show that the designed inertial switch can monitor the impact signal with amplitude of $20g$ and pulse width of 1 ms , the response time is less than 1 ms , the electrode contact time is longer than $30\text{ }\mu\text{s}$ and anti-overload performance reaches $12\text{ }000g$, meeting the proposed performance index requirements.

Keywords: low- g ; Micro-Electro-Mechanical System; inertial switch; spiral spring

引信是武器系统的关键子系统, 其性能的好坏直接影响武器系统的毁伤能力^[1]。传统引信的设计存在体积难以缩小、功能难以复合、可靠性难以提高及智能化难以实现的难点^[2-3]。微机电系统(MEMS)技术的出现, 克服了传统引信的设计困难。MEMS 加工技术生产出的 MEMS 器件体积小, 质量轻, 功耗低, 精确度高, 批量生产成本低^[4]。

惯性开关又称冲击传感器、加速度开关、振动阈值传感器或 G 开关^[5]。通过结构本身感知冲击惯性载荷信号并转化为系统的位移、变形等响应, 进而执行开关闭合动作^[6]。MEMS 惯性开关既是一种传感器也是一种执行

收稿日期: 2022-05-23; 修回日期: 2022-07-13

器^[7],在现代引信系统中应用最为广泛。引信系统在工作环境中为正常执行作战任务,需要引信电源供电,但当弹药处于后勤环境中,为便于弹药的长期存放,弹上电源不供电,MEMS 惯性开关能够满足这样的工作要求。目前已知的低 g 值 MEMS 惯性开关多用于汽车安全气囊、工业安全控制和航空航天等领域^[8],在引信领域中的应用极为有限,用于引信领域的 MEMS 惯性开关多为高 g 值型。许多低发射过载的弹药迫切需要能够检测低 g 值脉冲信号的 MEMS 惯性开关,低 g 值 MEMS 惯性在引信领域有良好的应用前景。

彭迎春等^[9]提出一种利用质量块运动产生的压膜阻尼效应增强开关闭合接触稳定性的低 g 值惯性开关。这种开关能够监测低 g 值冲击信号,但由于采用大面积质量块和蛇型弹簧结构,开关整体尺寸较大。张凤田等^[10]设计了一种敏感方向为垂直于开关平面方向的低 g 值惯性开关,但该开关主要用于监测低 g 值的线性加速度信号,而非引信工作环境中的低 g 值冲击信号。本文提出一种用于引信工作环境中的低闭合阈值 MEMS 惯性开关设计方案:将具有低幅值窄脉宽特征的弹药发射冲击信号作为开关监测的目标信号,以垂直于开关平面方向作为开关的敏感方向;采用低刚度的螺旋弹簧结构,降低惯性开关敏感阈值,并减小开关设计面积;使用柔性电极作为固定电极,延长惯性开关的电极接触时间,并设计中心止挡结构提高惯性开关的抗过载能力。最后采用 ANSYS 有限元软件对设计方案进行仿真验证。

1 器件原理和设计方案

1.1 确定设计

引信在整个生命周期中,要经受运输环境中的振动、碰撞、意外跌落,发射环境的腔内后坐力、离心力载荷,飞行环境中的空气阻力等各种复杂的环境力^[11]。根据引信的使用环境,提出惯性开关的总体设计目标:

1) 单向敏感且闭合阈值低。惯性开关主要感受轴向冲击加速度信号,对径向加速度不敏感。为避免惯性开关在正常环境中的误触发,提高引信的安全性,设定 MEMS 惯性开关的闭合阈值指标为 $20g$ 。

2) 武器弹药发射所造成的冲击信号脉宽一般在 1 ms 左右,为使 MEMS 惯性开关能够满足快速响应需求,设定其响应时间小于 1 ms 。

3) 开关外部信号处理电路至少需要 $15\text{ }\mu\text{s}$ 才能准确识别开关的导通信号^[12],为增强惯性开关导通信号的可靠性,设定 MEMS 惯性开关电极接触时间大于 $30\text{ }\mu\text{s}$ 。

4) 引信在意外跌落中所受到的冲击加载可能达到上万 g ,为避免 MEMS 惯性开关在这些情况下损坏失效,设定惯性开关的抗过载能力指标为 $12\text{ }000g$ 。

1.2 惯性开关基本模型

MEMS 惯性开关通常可简化为由一个质量块-弹簧-阻尼系统^[13]构成的基本模型,如图 1 所示。其中: d 为惯性开关质量块与固定电极之间的电极间隙, $a(t)$ 为质量块的加速度, m 为质量块质量, $x(t)$ 为质量块的位移, k 为弹簧的弹性系数, c 为阻尼系数, t 为质量块运动的时间。

当惯性开关感受到敏感方向上超过闭合阈值的加速度信号时,质量块向固定电极方向移动,直至发生接触,开关闭合。这一过程可用开关的动力学平衡方程^[14]表示为:

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = ma(t) \quad (1)$$

作用于惯性开关上且使其正常工作的引信环境力通常可近似为一个半正弦冲击加速信号,该信号为最常见的冲击加速度形式^[15],其表达式为:

$$a(t) = \begin{cases} a_0 \sin \omega_0 t, & t \leq t_0 \\ 0, & t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: a_0 为半正弦冲击信号的幅值; ω_0 为半正弦冲击信号的角频率; t_0 为半正弦冲击信号的脉宽,且有 $t_0 = \pi\omega_0^{-1}$ 。

为简化设计与计算过程,忽略开关系统中阻尼的影响,即 $c=0$,将式(2)代入式(1),可得开关质量块的位移时间关系:

$$x(t) = \frac{a_0}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \left(\sin \omega_0 t - \frac{\omega_0}{\omega_n} \sin \omega_n t \right), \quad t < t_0 \quad (3)$$

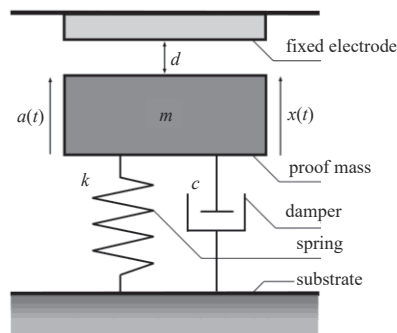


Fig.1 Basic model of MEMS inertial switch
图 1 MEMS 惯性开关基本模型

式中 $\omega_n = (km^{-1})^{0.5}$ 为惯性开关中弹簧-质量块系统的固有频率。

将惯性开关的闭合阈值设为 a_{th} ，当惯性开关受到半正弦冲击加速信号作用时，质量块感受到开关敏感方向上的加速度，在惯性力的作用下朝固定电极运动。惯性开关若要完成开关闭合动作，则质量块的最大位移要大于或等于电极间隙，因此可推导出惯性开关闭合阈值的表达式：

$$a_{th} = d \times \frac{\omega_n^2 - \omega_0^2}{\sin \frac{2\pi\omega_0}{\omega_0 + \omega_n} - \frac{\omega_0}{\omega_n} \sin \frac{2\pi\omega_n}{\omega_0 + \omega_n}} \quad (4)$$

1.3 惯性开关性能分析

MEMS 惯性开关的主要性能特征包括开关固有频率、闭合阈值、响应时间、电极接触时间等，这些性能特征受 MEMS 惯性开关的关键结构尺寸的影响。探明关键结构尺寸对惯性开关性能特征的影响规律，可为惯性开关的结构参数设计提供参考。

1) 对开关的固有频率特性进行分析。对式(1)进行标准形式改写，并进行拉氏变换^[16]，可推导出弹簧-质量块系统的传递函数；再对传递函数进行简单的变量替换，可推导出传递函数的幅频特性，对幅频特性归一化处理再取对数，最终得到式(5)：

$$L(\omega) = -20 \lg \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(\frac{2\omega}{\omega_n} \zeta\right)^2} \quad (5)$$

式中： ω 为系统输入信号的角频率； ζ 为系统的阻尼比， $\zeta = c(2m\omega_n)^{-1}$ 。根据式(5)可以得出 MEMS 惯性开关幅频特性的伯德图，如图2所示，反映了 MEMS 惯性开关对不同频率输入信号的响应特性。

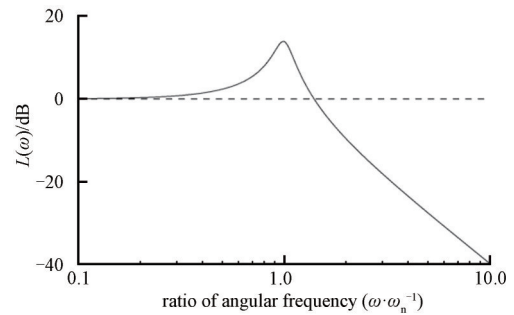


Fig.2 Bode plot of MEMS inertial switch
图2 MEMS 惯性开关伯德图

由伯德图可以看出，惯性开关的弹簧-质量块系统为典型的二阶振荡系统。根据系统对不同频率输入信号的响应特性，可将 MEMS 惯性开关固有频率的取值范围分成3个频段^[17]： $0 < \omega \cdot \omega_n^{-1} < 1$ 为低频段区，开关的响应近似为静态响应，系统处于准静态^[18]，此频段适用于准静态开关的设计，与本文设计目标不符合； $\omega \cdot \omega_n^{-1} \gg 1$ 为高频段区，开关的响应不明显，也不适合本文所设计的惯性开关的功能需求； $\omega \cdot \omega_n^{-1} \approx 1$ 为中频段区，开关对输入信号起放大作用，响应明显，适合监测引信环境中的窄脉宽冲击信号，因此 MEMS 惯性开关的固有频率应设计在中频段区。记 MEMS 惯性开关固有频率为 f_n ，以幅值为 20g，脉宽为 1 ms 的半正弦冲击信号作为惯性开关的输入信号，分别假设惯性开关的固有频率 $f_n = 800$ Hz、1 200 Hz、1 500 Hz、2 000 Hz、3 000 Hz 和 4 000 Hz，由式(3)得出惯性开关的质量块-位移时间曲线，如图3所示。

从图中可以看出，在中频段区，随着惯性开关的固有频率不断增加，质量块的最大位移不断减小且质量块运动到最大位移处所需时间也不断减少。随着惯性开关固有频率继续增加，质量块的位移开始出现多个峰值，不利于惯性开关的稳定闭合。综合考虑，选定惯性开关的固有频率在 1 500 Hz 附近。

2) 对 MEMS 惯性开关的闭合阈值特性进行分析。由式(4)可知，当惯性开关监测目标输入信号的频率确定且惯性开关本身固有频率大致确定时，即给定 ω_0 和 ω_n 时，惯性开关的闭合阈值 a_{th} 与电极间隙 d 成正比。因此在设计惯性开关时，可通过调整开关电极间隙的大小，对开关闭合阈值进行调整。

3) 对 MEMS 惯性开关的响应时间特性进行分析。响应时间是指惯性开关从受到冲击加速信号作用的起始时刻开始，到质量块恰好接触到固定电极的那一刻为止所经历的时间，记为 t_r 。根据响应时间的涵义有 $x(t_r) = d$ ，代入式(3)得

$$\frac{a_0}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \left(\sin \omega_0 t_r - \frac{\omega_0}{\omega_n} \sin \omega_n t_r \right) = d \quad (6)$$

由式(6)可知，在惯性开关的输入信号特征已知，且惯性开关本身固有频率确定的情况下，响应时间

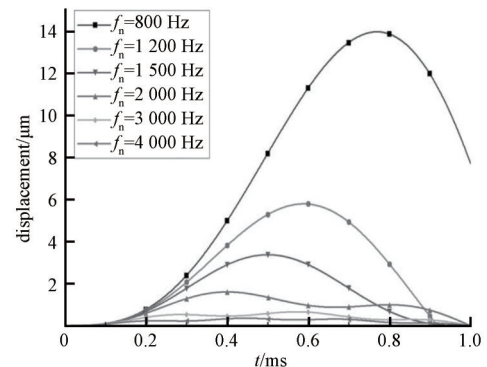


Fig.3 Displacement-time plots of proof mass
图3 质量块位移-时间关系图

与电极间隙有关。惯性开关响应时间与电极间隙的关系曲线如图 4 所示, 可得出惯性开关的响应时间随电极间隙的增大而单调递增。

4) 对 MEMS 惯性开关的电极接触时间性能进行分析。惯性开关的电极接触时间是指从质量块第一次恰好与固定电极接触的时刻开始, 到质量块第一次与固定电极分离的时刻为止, 期间所经过的时间。为延长惯性开关的电极接触时间, 增强惯性开关的闭合效果, 可将开关的固定电极设计成柔性结构。当开关闭合时, 柔性固定电极在质量块的压力作用下产生形变, 能够与质量块一同运动一定的时间, 惯性开关的电极接触时间得到延长。当给定输入信号特征、惯性开关固有频率和电极间隙, 电极接触时间主要受柔性固定电极的固有频率影响^[19]。在开关设计时, 可通过调整柔性固定电极的结构尺寸, 改变其刚度, 使其固有频率达到一个合适的值, 使电极接触时间达到设计要求。

1.4 惯性开关整体设计方案

依照惯性开关动态性能分析, 开关的固有频率选定在 1 500 Hz 附近。在设计惯性开关时, 首先对主要敏感结构进行选型。基于质量块运动稳定性和减小设计面积, 采用外部弹簧支撑中心质量块的结构, 支撑弹簧选择阿基米德螺旋梁结构。为使开关在敏感方向上具有良好的一致性, 质量块采用圆盘结构, 留出中心限位孔; 围绕圆盘中心, 质量块上均匀分布有阻尼孔, 以减小压膜阻尼效应对质量块运动的影响, 有利于释放质量块本身残余应力。

影响开关固有频率的关键参数有质量块厚度(决定质量块质量)和支撑弹簧的线宽与厚度(决定弹簧刚度)。建立弹簧-质量块系统的初步模型, 导入 ANSYS 有限元软件中。当固定弹簧厚度, 采用不同质量块厚度和弹簧线宽时; 以及固定弹簧线宽, 采用不同质量块厚度和弹簧厚度时, 分别对响应固有频率进行求解, 综合考虑加工难度, 选择最合适的一组数据作为关键尺寸。

影响开关响应时间的关键尺寸是电极间隙。参考质量块运动的位移-时间曲线, 给定输入信号脉宽, 设定不同大小电极间隙, 求解对应的闭合阈值与响应时间, 从而选择最合适的电极间隙尺寸。

轴向固定电极采用十字梁连接中心圆环的柔性结构, 其十字梁的长度、线宽和厚度是影响固定电极刚度的关键尺寸, 进而影响开关的电极接触时间。在弹簧-质量块模型的基础上加入固定电极模型, 分别只改变十字梁长度、线宽或厚度, 求解电极接触时间, 选出最合适的一组数据作为关键尺寸。

MEMS 惯性开关中, 支撑质量块的支撑弹簧和柔性电极是最容易在过载中损坏的结构。为保护惯性开关不在意外跌落等高冲击加载作用下损坏失效, 添加十字形中心止挡柱的限位结构, 限制质量块位移和旋转, 使弹簧或固定电极中产生的应力不超过材料的屈服极限。

综上所述, 本文设计的 MEMS 惯性开关结构如图 5 所示, 表 1 为所设计 MEMS 惯性开关的关键尺寸。

表 1 MEMS 惯性开关的关键尺寸(μm)
Table 1 Key dimensions of MEMS inertial switch(μm)

component	geometric parameter	value
proof mass	diameter R_1	900
	thickness T_1	120
support spring	width w_1	65
	thickness t_1	25
fixed electrode	outer diameter R_2	900
	inner diameter r_1	780
	thickness t_2	20
	cross beam length l_1	500
	cross beam width w_2	100
gaps	gap between proof mass and fixed electrode d_1	3
	gap between proof mass and substrate d_2	30
	gap between proof mass and barrier d_3	20(min)/28(max)

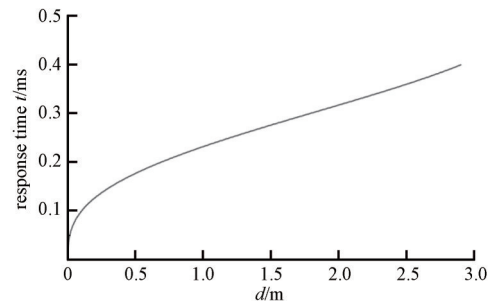


Fig.4 Relation curve between response time and electrode gap
图 4 响应时间与电极间隙关系曲线

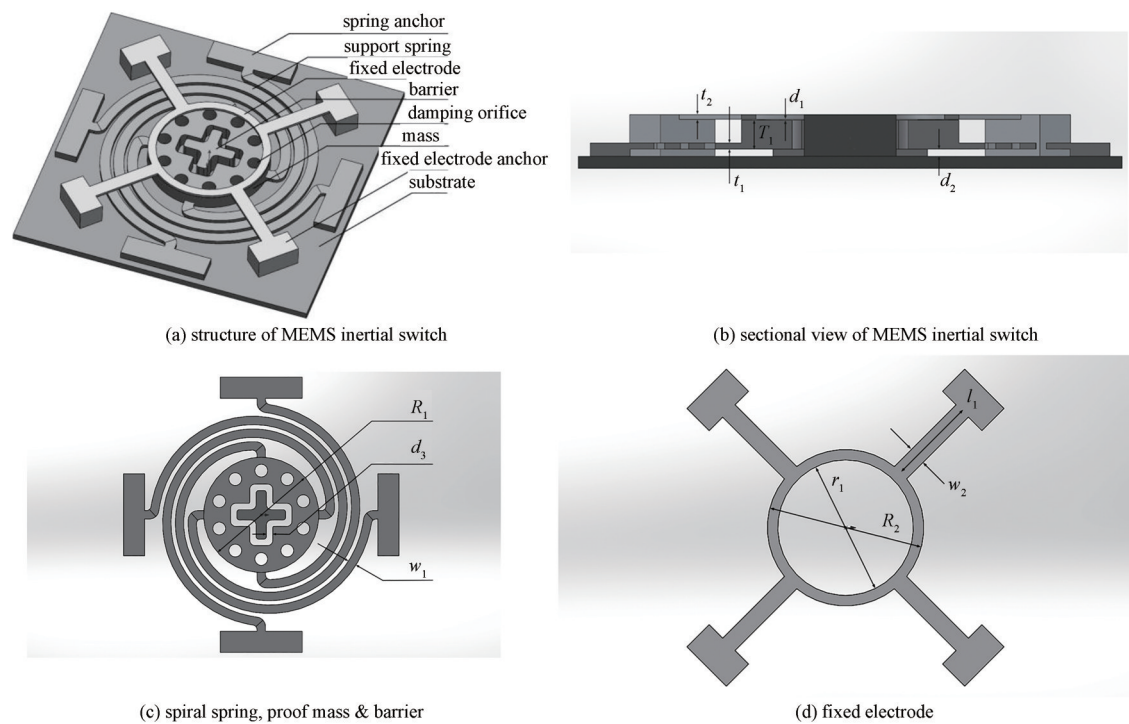


Fig.5 Overall and partial structure of MEMS inertial switch
图 5 MEMS 惯性开关整体与部分结构

2 有限元仿真

MEMS 开关的研究是当前 MEMS 技术的热点，开关的仿真在 MEMS 技术中显得尤为重要^[20]。对给出的 MEMS 惯性开关设计方案进行建模，利用 ANSYS 有限元软件对模型进行动力学仿真分析，检验所设计的 MEMS 惯性开关的动态特性，判断其主要性能是否满足设计要求，对设计方案作出评估。仿真计算中，开关结构材料为电铸镍，其密度 $\rho=8\,910\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，弹性模量 $E=180\text{ GPa}$ ，泊松比 $\nu=0.312$ ，屈服极限 $\sigma_s=1\,600\text{ MPa}$ 。

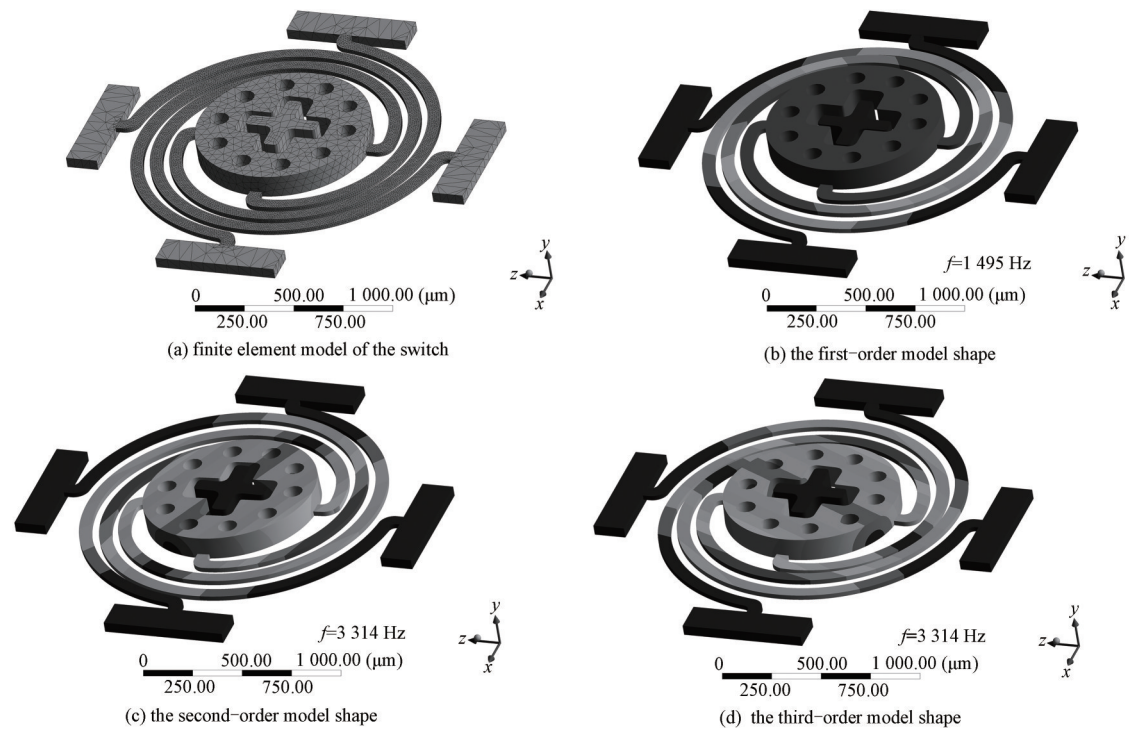


Fig.6 Modal analysis results of MEMS inertial switch
图 6 MEMS 惯性开关模态分析结果

2.1 模态仿真

使用四面体方法对弹簧-质量块模型进行网格划分,在止挡柱底部和弹簧锚点底部施加全约束。对于弹簧-质量块系统,其每一阶模态都具有特定振动频率和模态振型。惯性开关的有限元模型和一至三阶模态仿真结果如图6所示,图中 f 表示惯性开关各阶模态对应的振动频率。从图中可知,惯性开关一阶模态振动方向为垂直于开关平面方向,也是所设计惯性开关的敏感方向,振动频率为1 495 Hz。一阶模态为惯性开关的工作模态,固有频率与设计值相符合。惯性开关的二、三阶模态振动方向为开关平面内方向,振动频率都为3 314 Hz,与一阶模态振动频率相差较大,说明惯性开关能减少非敏感方向上的输入信号的干扰,具有比较好的单向性。

2.2 响应时间性能仿真

将2组半正弦加速度信号作为惯性开关输入信号:a)冲击信号脉宽为1 ms,幅值分别为18g、20g、25g、30g、35g、40g;b)冲击信号的幅值为20g,脉宽分别为0.3 ms、0.5 ms、0.8 ms、1 ms、1.2 ms。使用ANSYS有限元软件的瞬态动力学模块对惯性开关进行仿真,评估所设计的MEMS惯性开关在不同幅值和脉宽的冲击加速度信号下的响应时间性能,结果如图7所示。

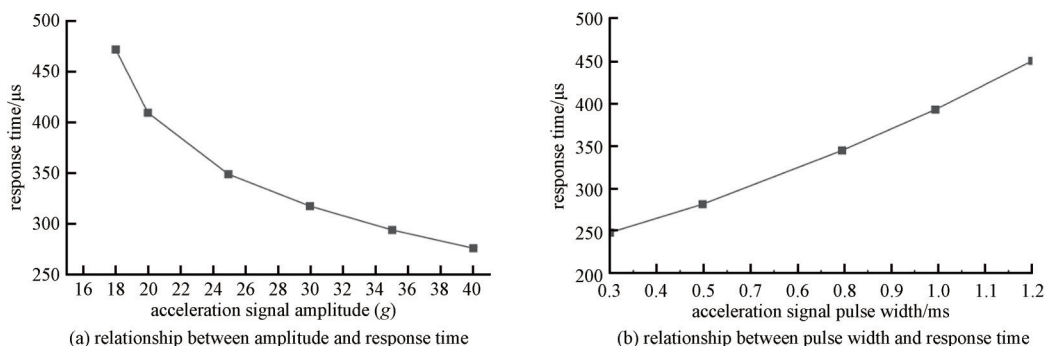


Fig.7 Change of response time with amplitude and pulse width of acceleration signal

图7 响应时间随加速度信号幅值和脉宽的变化

从图中可以看出,在2组输入信号的作用下,所设计的MEMS惯性开关的响应时间都在1 ms以内,达到了设计要求;并且,惯性开关的响应时间随输入信号幅值的增大而减少,随输入信号脉宽的增加而增加,符合性能分析得出的规律。特别地,为保证惯性开关在20g的阈值加速度下有足够长的电极接触时间,使开关电极恰好能够接触的加速度信号幅值应该小于20g。因此,当加速度信号幅值为18g时,开关也存在响应时间,此时电极接触时间无法满足要求。

2.3 电极接触时间性能仿真

设定一组脉宽为1 ms,幅值分别为20g、25g、30g、35g、40g的半正弦冲击信号作为惯性开关的输入信号,对惯性开关进行瞬态动力学仿真,评估惯性开关在不同幅值输入信号作用下电极接触时间的性能表现。输入信号的波形和仿真结果如图8所示。从图中可知,在该组加速度信号作用下,电极接触时间都超过了30 μ s,满足设计要求;并且随着冲击信号幅值的增大,电极接触时间先迅速增加再缓慢增加,且增幅不明显。主要原因是,接触过程中,质量块运动速度随冲击信号幅值的增大而增大,固定电极的形变程度有限,导致其接触时间无法

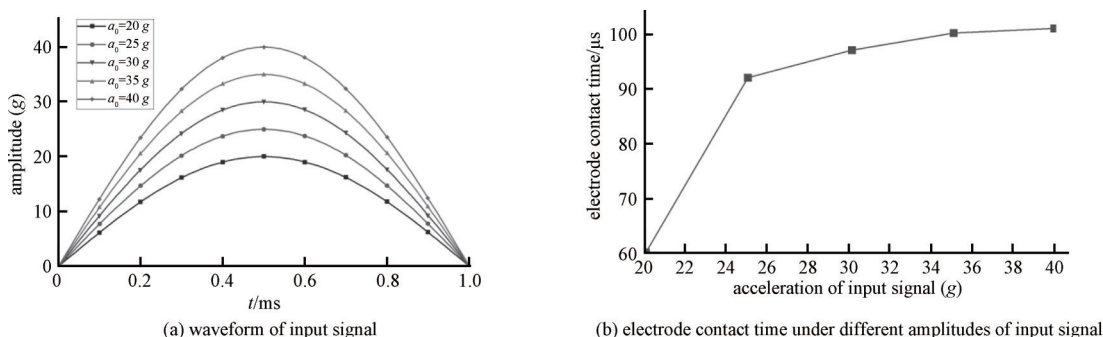


Fig.8 Electrode contact time corresponding to different amplitudes of input signal

图8 不同幅值的输入信号对应的电极接触时间

快速增长。因此，冲击信号幅值的增加对电极接触时间的延长作用是有极限的。

2.4 抗过载性能仿真

在勤务环境中，弹药引信安全保险装置并未解保，即使惯性开关受到外力作用而闭合也不会造成引信误触发，因此设计惯性开关时主要考虑防止其在高过载下结构损坏而失效。在对惯性开关的瞬态动力学仿真中，对惯性开关平面内方向上施加幅值为12 000 g ，脉宽为1 ms的冲击加载信号，得到开关质量块的位移-时间曲线和最大应力分布，如图9所示。从图中可以看出，在高冲击加载下，中心止挡柱将质量块的最大位移限制在20 μm ，防止质量块产生过位移或转动过大角度而造成支撑弹簧发生剧烈形变，导致结构损坏。惯性开关在支撑弹簧与弹簧锚点结合处产生了最大应力，最大应力的值为1 126 MPa，小于开关结构材料电铸镍的屈服极限1 600 MPa，因此惯性开关在12 000 g ，1 ms的侧向冲击加载下不会发生损坏，抗过载能力达到设计要求。在开关敏感方向上，质量块的位移范围取决于质量块与基底间的间隙以及开关的封装结构。通过设计合适的质量块与封装之间的间隙、封装结构，能够加强惯性开关在敏感方向上的抗过载性能。

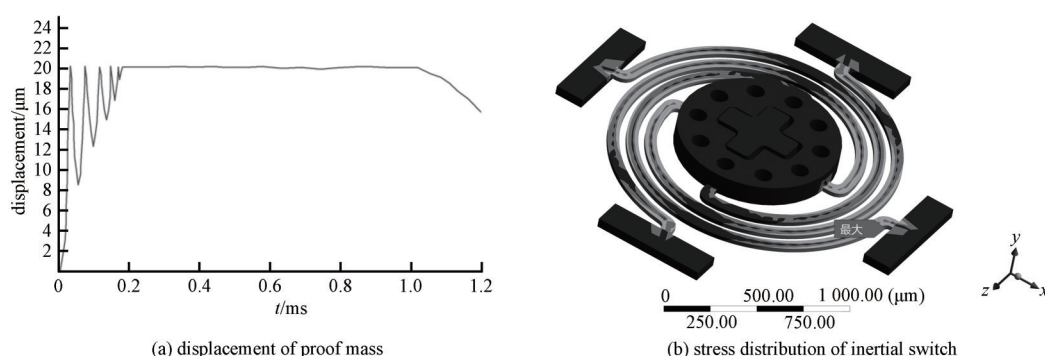


Fig.9 Mass displacement and stress distribution of inertial switch under high impact

图9 高冲击下质量块位移和惯性开关应力分布

3 结论

本文提出了一种用于引信环境的低 g 值MEMS惯性开关的设计方案，设计的惯性开关在垂直方向上对低幅值短脉宽的冲击加速信号敏感。采用低刚度的阿基米德螺旋梁结构的支撑弹簧，实现了惯性开关20 g 的低闭合阈值需求；选择合适的惯性开关固有频率，使开关响应时间保持在1 ms以内；设计了柔性的固定电极结构，将惯性开关在幅值超过闭合阈值的冲击信号作用下的电极接触时间延长至30 μs 以上，开关能够稳定闭合；添加了限制质量块最大位移的中心止挡柱结构，有效提高了惯性开关的抗过载能力，使其能够在侧向12 000 g 的冲击过载下保持结构完好。使用ANSYS有限元软件对设计结果进行仿真验证，仿真结果表明所设计的惯性开关能够满足功能需求，达到设计目标，且对非敏感方向的加速度信号有一定的抗干扰能力，为低发射后坐武器的引信惯性开关设计提供了一定参考。

参考文献：

- [1] 施坤林,黄峥,马宝华,等. 国外引信技术发展趋势分析与加速发展我国引信技术的必要性[J]. 探测与控制学报, 2005,27(3): 1-5. (SHI Kunlin,HUANG Zheng,MA Baohua,et al. The analysis of the characteristics and trend of the foreign fuze technology and the necessary of the rapid developing of our fuze technology[J]. Journal of Detection & Control, 2005,27(3):1-5.) doi:10.3969/j.issn.1008-1194.2005.03.001.
- [2] 席占稳. 微机电引信发展模式探讨[J]. 弹道学报, 1999(1):97-100. (XI Zhanwen. The development pattern of micro electro mechanical fuze[J]. Journal of Ballistics, 1999(1):97-100.)
- [3] 刘加凯,齐杏林. MEMS安全系统的解除保险方式[J]. 探测与控制学报, 2012,34(6):21-25. (LIU Jiakai,QI Xinglin. Arming methods of MEMS S&A[J]. Journal of Detection & Control, 2012,34(6):21-25.)
- [4] 牛兰杰,施坤林,赵旭,等. 微机电技术在引信中的应用[J]. 探测与控制学报, 2008,30(6):54-59. (NIU Lanjie,SHI Kunlin,ZHAO Xu,et al. Application of MEMS on fuzes[J]. Journal of Detection & Control, 2008,30(6):54-59.) doi:10.3969/j.issn.1008-1194.2008.06.014.
- [5] 任超,刘峰华,付博,等. MEMS惯性开关的原理及研究进展[J]. 测控技术, 2021,40(11):16-32. (REN Chao,LIU Fenghua,FU Bo, et al. Principle and recent progress of MEMS inertial switch[J]. Measurement & Control Technology, 2021,40(11):16-32.) doi:10.

19708/j.ckjs.2021.02.219.

- [6] CAO Yun, XI Zhanwen, YU Pingxin, et al. A MEMS inertial switch with a single circular mass for universal sensitivity[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(10):105005. doi:10.1088/0960-1317/25/10/105005.
- [7] DU Liqun, ZHAO Ming, WANG Aoan, et al. Fabrication of novel MEMS inertial switch with six layers on a metal substrate[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(9):2025-2032. doi:10.1007/s00542-014-2323-4.
- [8] 陈光焱, 王超. 微惯性开关设计技术综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2009, 7(5):439-442. (CHEN Guangyan, WANG Chao. Review of the design of micro inertial switch[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2009, 7(5):439-442.) doi:10.3969/j.issn.1672-2892.2009.05.015.
- [9] PENG Yingchun, WEN Zhiyu, LI Dongling, et al. A low- g silicon inertial micro-switch with enhanced contact effect using squeeze-film damping[J]. Sensors, 2017, 17(2):387. doi:10.3390/s17020387.
- [10] 张凤田, 熊壮, 金伟锋, 等. 低 g 值微惯性开关中阿基米德平面螺旋梁的设计[J]. 传感技术学报, 2017, 2017(1):39-43. (ZHANG Fengtian, XIONG Zhuang, JIN Weifeng, et al. Design of Archimedes planar micro-springs used in low- g micro inertia switch[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(1):39-43.) doi:10.3969/j.issn.1004-1699.2017.01.008.
- [11] 安晓红, 张亚, 顾强. 引信设计与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2006:20. (AN Xiaohong, ZHANG Ya, GU Qiang. Fuze design and application[M]. Beijing, China: National Defense Industry Press, 2006:20.)
- [12] GREYWALL D S. MEMS-based inertial switch:US2006/0033598 A1[P]. 2004-08-16.
- [13] 胡海岩. 机械振动基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005. (HU Haiyan. Introduction to mechanical vibration[M]. Beijing, China: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.)
- [14] 徐秋. MEMS 惯性开关接触增强方法和抗过载机制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2017. (XU Qiu. Study on the contact enhancement method and shock-resistibility mechanism of a MEMS inertia switch[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiaotong University, 2017.)
- [15] SRIKAR V T, SENTURIA S D. The reliability of Micro Electro Mechanical Systems(MEMS) in shock environments[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2002, 11(3):206-214. doi:10.1109/JMEMS.2002.1007399.
- [16] 董景新, 赵长德. 控制工程基础[M]. 北京:清华大学出版社, 1992:22. (DONG Jingxin, ZHAO Changde. Introduction to control engineering[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 1992:22.)
- [17] THOMSON W T, DAHLEH M D. Theory of vibration with application[M]. 5th ed. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2005.
- [18] YOUNIS M I, ALSALEEM F M, MILES R, et al. Characterization for the performance of capacitive switches activated by mechanical shock[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(7):1360-1370. doi:10.1088/0960-1317/17/7/019.
- [19] 曹云. 非硅 MEMS 万向惯性开关设计与动态可视化测试方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2017. (CAO Yun. Research on design and dynamic visual test method of non-silicon MEMS omnidirectional inertial switch[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2017.)
- [20] 刘若林, 鲍景富, 黄裕霖, 等. 基于微机电系统开关的四位移相器设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(1):127-130. (LIU Ruolin, BAO Jingfu, HUANG Yulin, et al. Design of a 4-bit phase shifter based on the MEMS switches[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(1):127-130.) doi:10.11805/TKYDA201601.0127.

作者简介:

秦 浩(1994-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 惯性器件的设计 .email:jjqh1994@sina.com.

蒋小华(1965-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为爆炸丝雷管、冲击片雷管、电爆管研制、微机电火工系统和激光火工品研制.