

文章编号: 2095-4980(2024)10-1161-07

## 具有阈值可调功能的磁自锁 MEMS 惯性开关

王欣玥, 李严军, 屈明山, 熊 壮

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘 要:** 设计了一种阈值为  $5g$  的低  $g$  值磁自锁微机电系统(MEMS)惯性开关, 具有阈值可调和自回复功能。该惯性开关的惯性敏感单元由 1 个方形质量块、1 块固定在质量块下的方形棋盘状磁铁和 4 根支撑它的方形阿基米德螺旋梁组成。磁铁和 4 块位于移动电极下方的铁磁性固定电极、双层平面线圈一起共同实现磁自锁和阈值调节功能。通过有限元仿真软件 ANSYS 对其进行仿真分析, 利用激光加工和 PCB 工艺制造样片机, 并通过离心机对样品进行性能测试。测试结果显示, 制作的 MEMS 惯性开关在垂直敏感方向上的阈值加速度为  $5.27g$ , 通过施加  $-0.5 \sim 0.5$  A 范围的电流, 阈值的调整范围为  $6g \sim 3.75g$ 。结果表明此结构能够在实现闭锁功能的同时, 在无外力作用的情况下实现自回复, 且在一定范围内阈值可调。

**关键词:** 微惯性开关; 低  $g$  值开关; 阈值可调; 电磁执行器

中图分类号: TN914.42

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023058

## Design and analysis of micro inertial switch with magnetic latch and adjustable threshold

WANG Xinyue, LI Yanjun, QU Mingshan, XIONG Zhuang

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

**Abstract:** A low- $g$ -value magnetic self-locking Micro-Electro-Mechanical Systems(MEMS) inertial switch with a threshold of  $5g$ , featuring adjustable threshold and self-recovery capabilities, has been designed. The inertia sensitive unit of this inertial switch consists of a square mass block, a square chessboard-shaped magnet fixed beneath the mass block, and four square Archimedean spiral beams supporting it. The magnet, along with four ferromagnetic fixed electrodes located beneath the moving electrodes and a double-layer planar coil, jointly achieve the functions of magnetic self-locking and threshold adjustment. Simulation analysis is conducted using the finite element simulation software ANSYS. The prototype is manufactured by using laser processing and PCB technology, and the performance of the sample is tested by using a centrifuge. The test results show that the fabricated MEMS inertial switch has a threshold acceleration of  $5.27g$  in the vertical sensitive direction. By applying a current in the range of  $-0.5$  to  $0.5$  A, the threshold adjustment range is from  $6g$  to  $3.75g$ . The results indicate that this structure can achieve the locking function while enabling self-recovery without external force and allowing threshold adjustment within a certain range.

**Keywords:** Micro-Electro Mechanical System inertial switch; low- $g$  switch; adjustable threshold; electromagnetic actuator

MEMS 惯性开关, 即微惯性开关, 又称为冲击传感器或  $G$  值开关。惯性开关既是传感器, 也是执行器, 通常利用弹簧-质量块结构感知环境中的加速度变化。与传统的传感器-执行器相比, 惯性开关的能耗更低。按照阈值大小, 惯性开关可分为高  $g$  值和低  $g$  值 2 种, 其中低  $g$  值惯性开关一般指闭合阈值范围为  $1g \sim 30g$  的惯性开关。对于低  $g$  值惯性开关, 需要响应的信号是准静态的, 频率接近于零, 在实验中一般由离心机产生<sup>[1]</sup>。只有当外部加速度超过开关的阈值加速度时, 移动电极才会向敏感方向移动, 与固定电极相接触, 使惯性开关完成触发, 并通过外部电路输出一个可被识别的脉冲信号<sup>[2]</sup>。与传统的加速度计相比, MEMS 惯性开关具有能耗低、体积

收稿日期: 2023-03-06; 修回日期: 2023-04-30

小、质量轻、能够批量化生产、成本低等优点，因此在汽车工业、医疗保健设备等行业作为无源器件得到广泛应用，并逐渐向多元化、个性化的方向发展。定制化的发展趋势对惯性开关的阈值可调功能及多阈值检测功能提出了要求<sup>[3-5]</sup>。

机械闭锁结构、静电自锁结构和永磁自锁结构被用于冲击消失后仍需保持惯性开关闭合状态的场景中。其中机械闭锁结构发展较为成熟，Selvakumar 等<sup>[6]</sup>提出的多悬臂梁-质量块结构提供了多阈值测量的方案，能够抵抗电磁干扰，但阈值不能连续调节，也无法实现自锁功能。NIE Weirong 等<sup>[7]</sup>设计了一款双阈值的机械自锁加速度开关，阈值分别为 15 000g 和 3 000g，不能满足低 g 值的要求。赵剑等<sup>[8-9]</sup>基于磁场分析设计出的磁自锁惯性开关体积较大，尽管通过设计多个悬臂梁也实现了多阈值的功能，但阈值同样不能连续调节。JIA Mengjun 等<sup>[10]</sup>提出一种使用静电力实现自锁的 MEMS 惯性开关，其阈值连续可调，但其加速度阈值较高，静电力所需的电压较大，不易集成在电压为 5 V 的集成电路上。同时，静电自锁对电极表面洁净度的要求较高，给封装和后续使用带来了一些困难。此外，以上 3 种自锁结构均无法在没有外部惯性力的作用下实现自回复，这限制了所设计的惯性开关在部分场景中的测试和重复使用的可能。

本文提出了一种结构简单的磁自锁 MEMS 惯性开关，可感知垂直方向上的加速度。相较永磁自锁，所设计的器件体积较小，且通过引入电磁力作用，能够使开关在无外力作用下实现自回复，并在规避高电压的情况下实现阈值的连续可调。使用离心机对简单的微加工工艺制作所得的样机进行功能测试，实验结果证明该 MEMS 惯性开关具有磁自锁、连续阈值可调和自回复的功能。

## 1 结构设计

基于方形阿基米德螺旋梁结构的低 g 值微惯性开关结构如图 1 所示，由柔性弹簧、质量块、棋盘状磁铁、固定电极和嵌有双层平面线圈的基底 5 个部分组成。质量块和磁铁块作为惯性敏感单元，由 4 根方形阿基米德螺旋梁支撑，组成低频的弹簧-质量块结构。4 个固定电极成对连接，放置于移动电极下方，固定电极使用铁磁性材料制作。根据电磁感应定律可知，嵌在衬底内的双层平面线圈通电后会产生方向向上或向下的电磁力，其大小、方向与电流的大小和方向有关，可用于实现自回复功能及连续调节 MEMS 惯性开关的加速度阈值。当大于阈值的惯性力被施加于敏感单元上时，移动电极克服弹簧回复力向下运动，并最终与固定电极相接触。器件的主要结构参数及数值如表 1 所示。

表 1 MEMS 惯性开关器件的主要结构参数

Table1 Main structural parameters and specifications of the MEMS inertial switch device

| component        | material  | structural parameter   | value/ mm |
|------------------|-----------|------------------------|-----------|
| switch           | /         | length                 | 25.00     |
|                  |           | width                  | 18.00     |
|                  |           | thickness              | 2.00      |
| spring           | Mo        | thickness              | 0.20      |
|                  |           | interval               | 0.40      |
|                  |           | mass length            | 10.00     |
| permanent magnet | NdFeB44UH | side length (one side) | 1.80      |
| fixed electrodes | Ni        | length                 | 1.80      |
| coils            | Cu        | width                  | 0.05      |

惯性开关的受力分析如图 1(d)所示，惯性敏感单元受到磁吸引力( $F_m$ )、弹簧回复力( $F_k$ )、重力、电磁力( $F_{em}$ )及惯性力( $F_i$ )作用，其中重力与部分弹簧回复力相抵消。图 2 为开关在不同状态下磁吸引力、弹簧回复力、重力、电磁力及惯性力之间的大小关系。其中，图 2(a)为开关的导通与断开 2 种状态，由于磁吸引力在移动电极与固定电极之间的距离减小时大幅上升，当质量块位于闭合状态的位置时，磁吸引力大于此刻的弹簧回复力，因此在外惯性力消失后，移动电极仍能与固定电极保持接触状态。向线圈中通入一定大小的反向电流，线圈会产生一个向上的电磁力，该电磁力与弹簧回复力共同作用，使移动电极克服磁吸引力向上运动，开关在无外部作用力的情况下自动断开。当超过阈值的外惯性力作用于敏感加速度单元时，惯性力、磁吸引力和弹簧回复力的关系如图 2(b)所示。磁吸引力与惯性力的合力大于弹簧回复力，迫使移动电极克服弹簧回复力向下运动，并与固定电极相接触，开关闭合。图 2(c)展示了电磁力调节加速度阈值的原理。通电线圈会产生相应的磁场，该磁场对磁铁施加一个电磁力调整移动电极的位置和开关的阻尼。当电磁力、惯性力、移动电极重力和磁吸引力的合力大于弹簧回复力时，移动电极向下移动，开关闭合。由于电磁力的改变，闭合所需的惯性力也会发生相应的改变，惯性开关的阈值因此发生变化。

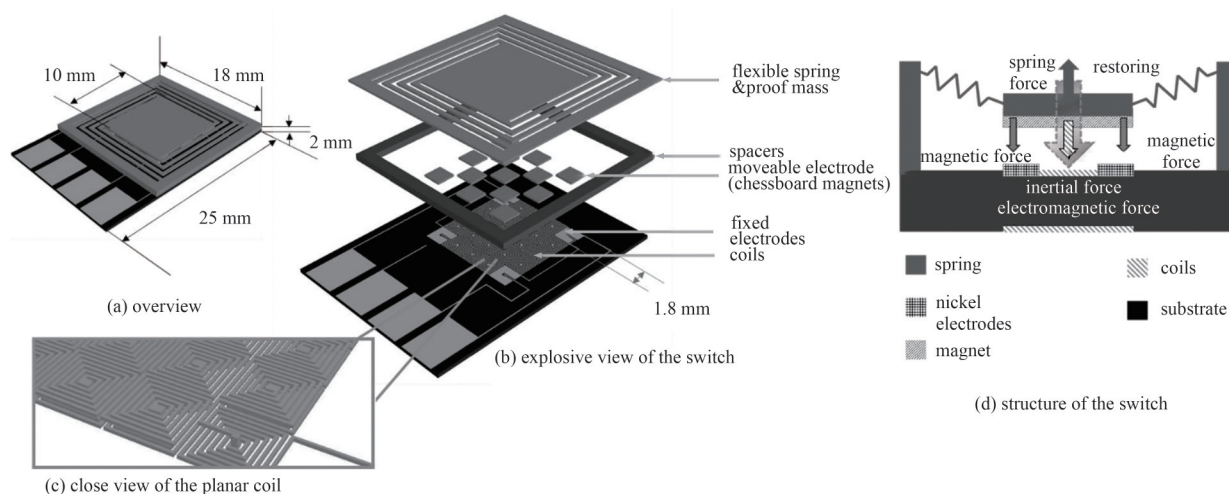


Fig.1 Schematic diagram of micro inertial switch with magnetic latch and adjustable threshold

图 1 阈值可调的磁自锁 MEMS 惯性开关结构示意图

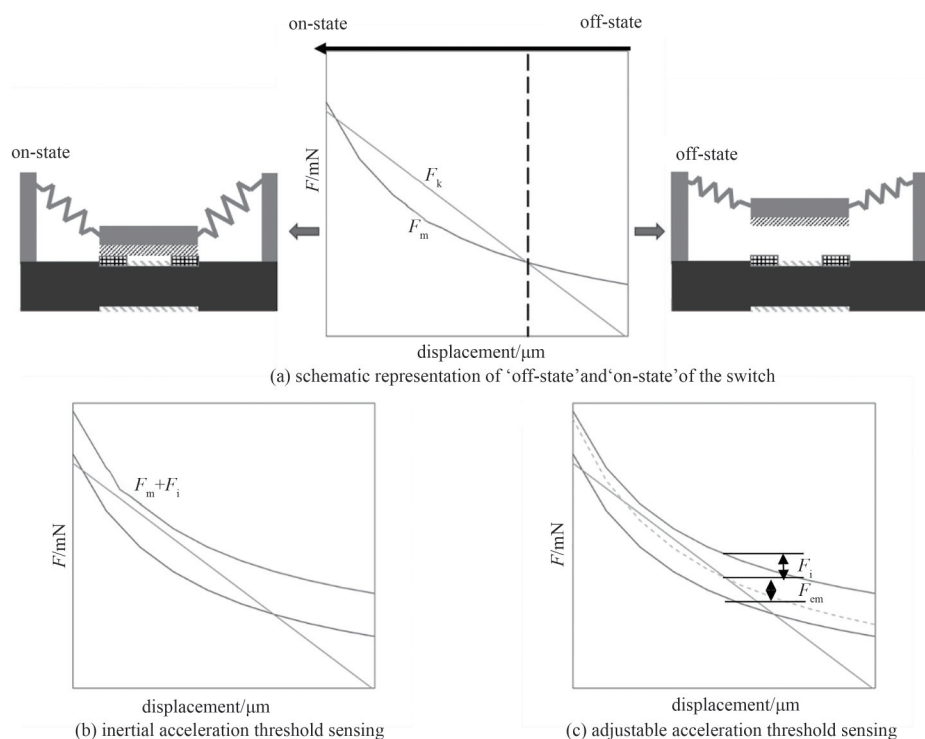


Fig.2 The force analysis of mass block of various positions

图 2 对不同位置下质量块的受力分析

WANG Yue 等<sup>[11]</sup>证明了棋盘状磁铁对增强电磁力的作用，本文采用同样的棋盘状构型，以在使用较小体积磁铁的同时增大通电平面双层线圈与磁铁之间的吸引力。

## 2 仿真分析

为验证磁吸引力、电磁力、弹簧回复力和重力之间的关系，更好地掌握所设计的惯性开关的特性，评估其阈值加速度，优化其结构参数，使用有限元仿真对开关建立模型并划分网络。其中，弹簧的端部设置为固定约束，结构材料为金属钼，其杨氏模量为 324.8 GPa，密度为 10 200 kg/m<sup>3</sup>，泊松比为 0.293，在 Z 轴方向上施加 1 mN 的作用力，结果如图 3 所示。质量块位移 5.62 μm，由胡克定律可知弹簧的刚度为 177.9 N/m。

对弹簧进行模态分析，结果如图 4 所示。一阶模态的固有频率为 133.87 Hz，振型为沿 Z 轴运动；二阶模态的固有频率为 276.89 Hz，振型为绕 Y 轴运动；三阶模态的固有频率为 276.89 Hz，振型为绕 X 轴运动，理论上具有较好的机械滤波性能，避免高频振动信号的干扰。

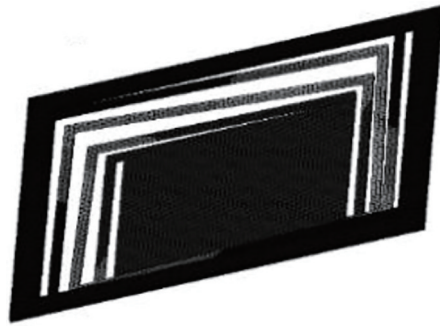


Fig.3 Static analysis of the switch when subjected to 1 mN force  
图3 施加 1 mN 作用力时的弹簧静态分析

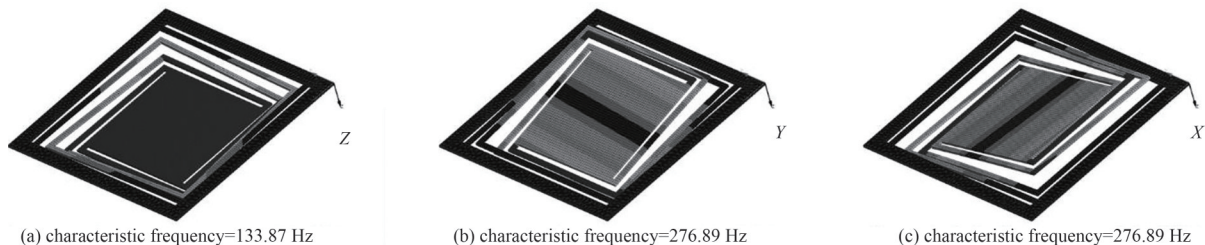


Fig.4 ANSYS modal analysis of low-g inertial switch spring  
图4 低g值微惯性开关弹簧结构ANSYS模态分析

利用有限元仿真对磁铁与固定电极之间的磁吸引力进行模拟计算。磁铁的材料为NdFeB44UH，其磁矫顽力为1 910 kA/m，固定电极材料为金属镍。计算结果如图5所示，其中 $F_i$ 为外部加速度为5g时的惯性力。仿真结果表明，在移动电极与固定电极距离为496  $\mu\text{m}$ 时，惯性力与磁吸引力的合力曲线恰好与弹簧回复力曲线相切，此时施加5g的外部加速度，移动电极恰好能够克服弹簧回复力向下运动，与固定电极相碰撞。说明此时惯性开关的阈值为5g。当固定电极与移动电极相接触时，磁吸引力大于弹簧回复力，移动电极不会向上移动，在没有外界惯性力作用的情况下，惯性开关仍将保持闭合状态。当开关处于断开状态时，弹簧回复力大于或等于磁吸引力，移动电极不会在磁力作用下向下移动，开关保持断开状态。

当开关闭合时，由于导电层的存在，磁铁距离固定电极约50  $\mu\text{m}$ ，此时磁吸引力与弹簧回复力之差约为2 mN，磁吸引力略大于弹簧回复力，迫使移动电极与固定电极保持接触状态。图6为利用有限元仿真得到的电磁力仿真结果。电磁力与电流大小成反比，随线圈与磁铁间距离的增大而减小。当固定电极与移动电极相接触时，0.1 A电流产生的电磁力为3.12 mN，与弹簧回复力之和大于磁吸引力。因此，反向通入0.1 A电流产生的电磁力能够使移动电极克服磁吸引力向上移动，开关在无外力干涉条件下自动断开。图7为不同电流条件下电磁力对开关阈值的影响。由于电磁力改变，闭合所需的惯性作用力随之改变，结果显示电磁力同样具有调节惯性开关阈值的作用。

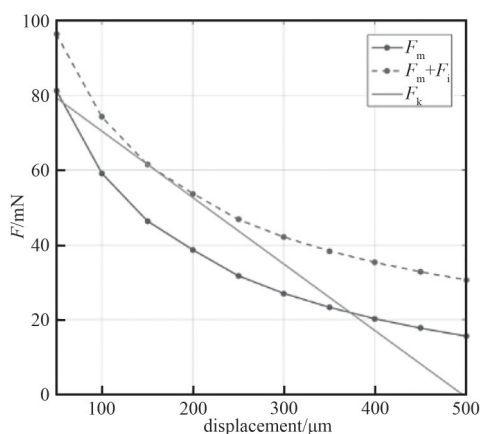


Fig.5 Force-displacement curves of  $F_m$ ,  $F_k$ , and  $F_m + F_i$ .  $F_i$  is assumed to be the inertial threshold value of the switch(5g)

图5 磁力、惯性力(5g)、弹簧回复力的仿真结果

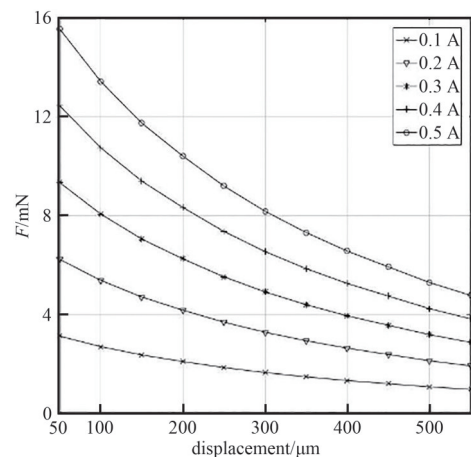


Fig.6 Calculated electromagnetic force with different applied currents  
图6 不同通电电流产生的电磁作用力

3 实验结果

3.1 器件工艺制作

文献[11]提供了一种基于 MEMS 工艺制造加工微型棋盘状磁铁的方法，具体过程包括磨削、切割和磁化。棋盘状磁铁如图 8(a)所示。使用激光切割技术加工所设计的柔性弹簧和质量块，由于主要使用垫片控制移动电极与固定电极间的空隙大小，移动电极厚度对开关影响较小。因此可用胶水将磁铁和质量块粘合在一起，在磁铁下方覆盖一层铜金属导电胶带以构成移动电极，所得的移动电极部分照片如图 8(b)所示。与静电开关不同，磁吸引力的大小受电极表面洁净度的影响较小，因此对封装要求较低。

图 8(c)为使用有双层线圈的 PCB 作为基板，其上固定有 4 块用作固定电极的镍片。最终的模型机如图 8(d)所示，尺寸大小为 18 mm×25 mm×2 mm。通过控制相同厚度垫片的数量控制空隙大小。图 9 为设计的惯性开关的闭合状态和断开状态。

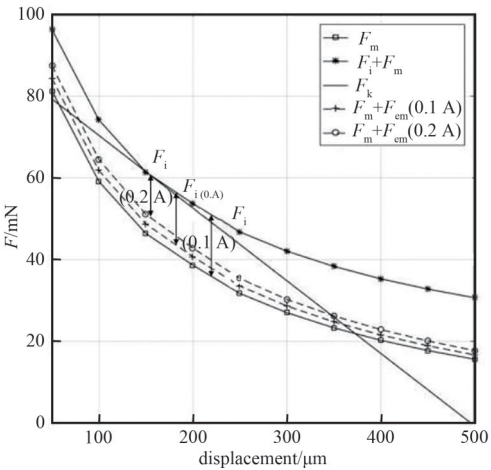


Fig.7 Impact of different electrical currents on the threshold  
图 7 不同通电电流对阈值的影响

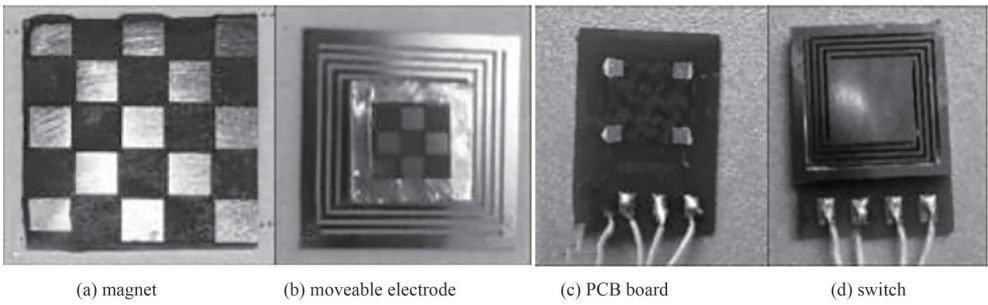


Fig.8 Photos of MEMS inertial switch components  
图 8 MEMS 惯性开关各部件的实物照片

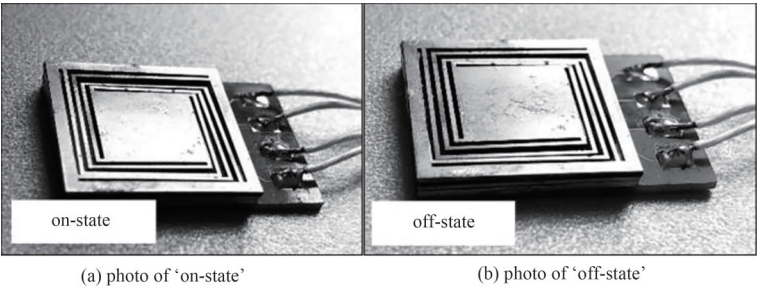


Fig.9 Photos of MEMS switch in on-state and off-state  
图 9 MEMS 惯性开关在“on”状态下及“off”状态下的照片

3.2 器件测试

基于离心原理，对制作的惯性开关模型机进行了离心实验测试，以获得闭合加速度阈值。设离心加速度经 60 s 从 0g 增加至 10g，保持 10g 加速度 10 s，然后在 20 s 内线性递减到 0g。数据采集系统(采样周期为 0.02 s)同时记录离心加速度和开关电信号，通过 2 条曲线的对比能够得到惯性开关的闭合阈值。图 10 为模型机的测试结果和用于测试的离心机的结构示意图。测试结果为 5.27g，与 5g 设计标准相比，相对误差为 5.4%。向线圈中通入 0.1 A 的电流，移动电极在电磁力作用下离开固定电极向上移动，开关自动断开。

向线圈中通入不同的电流以调节开关的阈值加速度，其结果如图 11 所示。向线圈中分别通入 -0.5~0.5 A 的电流，惯性开关的阈值从 6g 变化到 3.75g。

接触电阻是衡量低 g 值 MEMS 惯性开关导通性能的一项重要指标，在离心实验过程中采用示波器监测微惯性开关状态，得到惯性开关的导通电阻为 0.088 25 Ω。

制作的样机阈值相对误差均在 10% 以内，拥有较好的一致性。

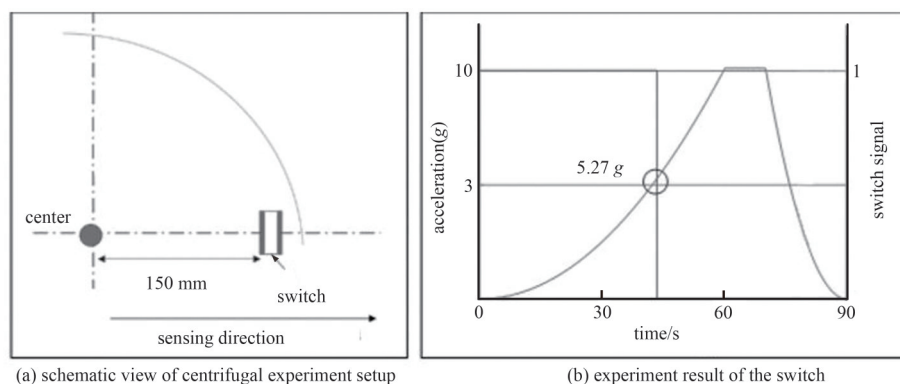


Fig.10 Schematic view of centrifugal experiment setup and experiment result  
图 10 阈值测试实验示意图和测试结果

#### 4 结论

本文基于电磁感应原理,提出一种阈值连续可调的 MEMS 磁自锁惯性开关。采用有限元仿真与样机实验相结合的方式对开关功能进行了验证,仿真结果表明,该开关在无外部惯性力作用下能够长期保持在导通状态和断开状态,且通电线圈产生的电磁力能够起到连续调节惯性开关阈值及自回复的作用。最终的样机尺寸为  $18\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。实验结果表明,加工弹簧的刚度为  $177.9\text{ N/m}$ ,在无电磁力干扰的情况下,所设计的惯性开关阈值为  $5.27\text{ g}$ ,与所设计的阈值相对误差为  $5.4\%$ ,接触电阻为  $0.088\ 25\ \Omega$ ;当线圈中的电流从  $-0.5\text{ A}$  变化至  $0.5\text{ A}$  时,惯性开关的阈值从  $6\text{ g}$  变为  $3.75\text{ g}$ 。相比于静电锁定开关、机械自锁开关和现有的磁自锁开关,该磁自锁 MEMS 惯性开关具有阈值连续可调、可集成于集成电路、可在无外力干涉的情况下自回复等优点。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 任超,武强,付博,等. 一种具有高抗侧向过载的垂直敏感弹载 MEMS 惯性开关[J]. 无人系统技术, 2021,4(5):23–30. (REN Chao,WU Qiang,FU Bo,et al. A vertical sensitive missile-borne MEMS inertial switch with high shock-resistibility to lateral overload[J]. Unmanned Systems Technology, 2021,4(5):23–30.) doi:10.19942/j.issn.2096–5915.2021.5.044.
- [3] 赵忠海,焦志刚,李木,等. 基于 MEMS 传感器与惯性开关的目标识别技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021,42(2):23–28. (ZHAO Zhonghai,JIAO Zhigang,LI Mu,et al. Research on target recognition technology based on MEMS sensor and inertial switch[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021,42(2):23–28.) doi:10.11809/bqzbgcxb2021.02.004.
- [4] 范晨阳,刘剑霏,田中旺. 基于动电极翻转的 MEMS 万向惯性开关[J]. 探测与控制学报, 2019,41(3):76–80. (FAN Chenyang, LIU Jianfei, TIAN Zhongwang. MEMS omnidirectional inertial switch based on moving electrode overturning[J]. Journal of Detection & Control, 2019,41(3):76–80.)
- [5] 郑玮,李亚辉,刘扬,等. SiC 晶须和 SU-8 复合增强的 MEMS 惯性开关研究[J]. 测控技术, 2021,40(11):57–63. (ZHENG Wei,LI Yahui,LIU Yang,et al. MEMS inertial switch with SiC whisker reinforced SU-8 composite structure[J]. Measurement & Control Technology, 2021,40(11):57–63.) doi:10.19708/j.ckjs.2021.06.250.
- [6] SELVAKUMAR A,YAZDI N,KHALIL N. A wide-range micromachined threshold accelerometer array and interface circuit[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2001,11(2):118. doi:10.1088/0960–1317/11/2/306.
- [7] NIE Weirong,ZHOU Zhijian,XI Zhanwen A novel dual-threshold MEMS acceleration latching switch[C]// 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. Kauai,HI:IEEE, 2017:54–57. doi:10.1109/ISISS.2017.7935667.
- [8] ZHAO Jian,GAO Renjing,CHEN Guoxi,et al. Nonlinear coupling mechanical model for large stroke magnetic-based multistable

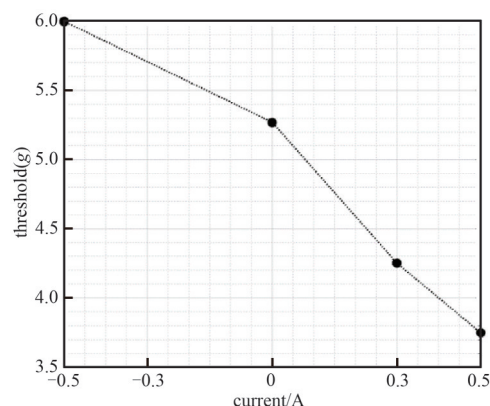


Fig.11 Threshold value change under different applied currents  
图 11 不同电流下的加速度阈值

- mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015(83):56–68. doi:10.1016/j.mechmachtheory.2014.09.004.
- [9] ZHAO Jian, HUANG Yu, GAO Renjing, et al. Dynamics of a bistable mechanism with parallel beams and permanent magnets[J]. Advanced Materials Research, 2011(308/310):508–512. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.308–310.508.
- [10] JIA Mengjun, LI Xinxin, SONG Zhaohui. Micro-cantilever shocking-acceleration switches with threshold adjusting and 'on'-state latching functions[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017, 17(3):567. doi:10.1088/0960-1317/17/3/020.
- [11] WANG Yue, ZHI Chao, TANG Bin, et al. A micro electromagnetic actuator with high force density[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021(331):112771. doi:10.1016/j.sna.2021.112771.

#### 作者简介：

王欣玥(1999-), 女, 硕士, 主要研究方向为 MEMS 惯性开关 .email:mibribon@163.com.

屈明山(1985-), 男, 本科, 技师, 主要研究方向为惯性 MEMS 器件工艺制造.

李严军(1986-), 男, 本科, 高级工, 主要研究方向为惯性 MEMS 器件工艺制造.

熊 壮(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为惯性 MEMS 器件设计与工艺技术.

(上接第 1153 页)

#### 作者简介：

张 坤(1992-), 男, 硕士, 主要研究方向为智能信息处理平台技术 .email:1030197938@qq.com.

谢宗甫(1993-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为可重构异构信息平台.

高 博(1972-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为平台技术.

高 飞(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为图像与智能信息处理.

冀亚玮(1994-), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为可重构异构信息平台.

李宇东(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为异构平台信号处理与调度管理.