

文章编号 1004-924X(2019)01-0101-09

高阈值长脉宽响应的微流体惯性开关

李嘉杰, 聂伟荣*, 刘国伟

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了实现智能武器电源管理, 针对正常发射和勤务跌落两种典型的加速度信号, 提出了一种高阈值长脉宽响应的微流体惯性开关。该开关主要由环形微通道和三级毛细阀组成, 具有识别两种典型加速度的能力, 并在正常发射后坐加速度的作用下实现可靠接通。首先, 介绍了开关的设计概念及工作原理。然后, 采用湿法刻蚀和磁控溅射金属技术制作了样机。最后, 结合有限元仿真和样机实验验证了开关的功能。有限元仿真分析表明: 该开关在幅值为 12 000 g, 脉宽为 300 μ s 的勤务跌落载荷下保持断开, 在幅值为 20 000 g, 脉宽为 4 ms 的后坐载荷下可靠接通, 开关阈值为 3 300 g。实验结果表明: 该开关在幅值为 12 800 g, 脉宽为 219 μ s 的勤务跌落载荷下保持断开, 开关的静态阈值为 3 257.2 g~3 317.3 g, 开关的理论阈值为 3 590.9 g, 理论公式能较好地预测开关的阈值。

关键词: 微流体惯性开关; 毛细阀; 高阈值; 长脉宽

中图分类号: TM564; TH824.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192701.0101

Microfluidic inertial switch with high threshold and long pulse-width response

LI Jia-jie, NIE Wei-rong*, LIU Guo-wei

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: niewrhappy@163.com

Abstract: In order to realize the power management of intelligent weapons, a microfluidic inertial switch with a high threshold and long pulse width response was proposed for two typical acceleration signals of launch and drop. The switch is mainly composed of a circular microchannel and a three-stage capillary valve that has the ability to identify the two typical accelerations and can be reliably connected under the action of the normal launching acceleration. First, the design concept of the switch was introduced, and the working principle of the switch was analyzed. Next, the prototype was fabricated by wet etching and magnetron sputtering. Finally, the function of the switch was verified by finite element simulation and prototype experiments. The finite element simulation analysis shows that the switch remains disconnected under the drop load (amplitude: 12 000 g, pulse width: 300 μ s) and is reliably connected under the rear load (amplitude: 20 000 g, pulse width: 4 ms). The threshold of the switch is 3 300 g. The experimental results show that the switch remains disconnected under the serv-

收稿日期: 2018-06-07; 修订日期: 2018-08-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51475245)

ice drop load (amplitude: 12 800g, pulse width: 219 μ s). The static threshold of the switch is 3 257.2~3 317.3g. The theoretical threshold of the switch is 3 590.9g, and the theoretical formula can predict the threshold of the switch with a higher accuracy. The results show that the designed switch can identify two typical accelerations and realize reliable connections.

Key words: microfluidic inertial switch; capillary valve; high threshold; long pulse-width

1 引言

微惯性开关是用于探测加速度信号的惯性器件,当加速度大于其设计的阈值时,接通电极并发电信号。传统的微惯性开关主要由悬臂梁和质量块-弹簧系统组成,开关导通是基于“固-固”接触^[1-4],所以此类开关接触电极时存在弹跳、弹簧自身振动等导致接触不稳定的可靠性问题^[5]。

与传统的微惯性开关不同,微流体惯性开关主要由微通道、微阀、金属液滴和固定电极组成,开关的导通是基于“固-液”接触,利用固定电极探测金属液滴的位置来识别加速度信号,能克服“固-固”接触存在的弹跳现象和接触不稳定。Yoo 等^[6-7]提出了一种基于水银液滴的 MEMS 惯性开关,在一定的惯性力作用下,水银液滴突破毛细阀导通固定电极。开关的阈值可以通过改变毛细阀喉部的宽度来获得,但阈值仅为几十个 g。Park 等^[8]设计了一种新型的水银加速度计,采用阵列电极来检测水银液滴的位移输出相应的加速度值,该加速度计的量程为 40g。Shen T 等^[9]提出了基于镓铟金属液滴的可自恢复惯性开关,镓铟金属液滴在一定的惯性力作用下接通固定电极,当惯性力消失后,镓铟金属液滴又回到初始位置。Huang Y 等^[10]研制了可应用于武器安全系统的惯性延时接电开关,延时导通时间可达 4.1~10.9 s。Kuo J C 等^[11-12]提出了基于多壁碳纳米管复合水凝胶的惯性开关,该开关采用水作为工作流体,微水滴在一定的惯性力作用下突破毛细被动阀与水凝胶作用,使水凝胶膨胀,改变下层的 L-C 谐振器的电容。黄刘等^[13]基于连通式结构,设计了以盐水作为工作流体的抗高过载惯性开关。该开关在幅值为 30 000g 的阶跃加速度信号的作用下,工作流体并未发生分离,静态阈值为 134.6g~152.3g。

但上述设计的微流体惯性开关都属于幅值敏感型加速度开关,响应的加速度阈值小且无法区分幅值和脉宽都不同的加速度信号。本文针对武器电源管理系统对开关在(幅值:12 000g,脉宽:300 μ s)半正弦加速度载荷(勤务跌落载荷)作用下保持断开,在(幅值:20 000g,脉宽:4 ms)半正弦加速度载荷(定义为后坐载荷)作用下可靠接通的设计要求,基于环形微通道和三级毛细阀,设计了高阈值长脉宽响应的微流体惯性开关。

2 设计概念

微流体惯性开关的整体结构如图 1(a)所示,开关主要由硅基底、玻璃盖板、金属电极和水银液滴组成。在硅基底上,刻蚀出密封槽 1、密封槽 2、矩形截面的微通道,在玻璃盖板上镀有铬电极。如图 1(b)所示,微通道主要由导气通道、二级毛细阀、J 形通道和三级毛细阀组成,其中二级毛细阀包括一个收缩形毛细阀和一个扩张形毛细阀,三级毛细阀包括两个收缩形毛细阀和一个扩张形毛细阀。将一定体积的水银液滴放到微通道内,先对准电极与硅片的位置,再压紧硅片和玻璃片使水银充满左右侧的收缩形毛细阀。硅基板和玻璃盖板通过紫外线固化胶粘合,紫外线固化胶放置在密封槽 1 中。密封槽 2 用来防止过量的紫外线固化胶从密封槽 1 中溢出进入微通道。

在初始状态,由于两个收缩形毛细阀的作用,水银始终保持在图 1(b)的位置,开关保持在断开状态。开关受到一定的惯性力作用,由于两侧液面在敏感加速度方向存在高度差,水银开始突破右侧的三级毛细阀的扩张形毛细阀,当惯性力的作用时间足够长时,水银能完全突破扩张阀。基于连通器原理,左右侧液面差为零,右侧的水银液面位于三级毛细阀的第二个收缩毛细阀内。当惯

力消失后, 由于两侧毛细力的作用, 右侧水银能完全充满收缩形毛细阀, 一直保持在图 1(c) 的位置, 开关保持导通状态, 可靠接通。

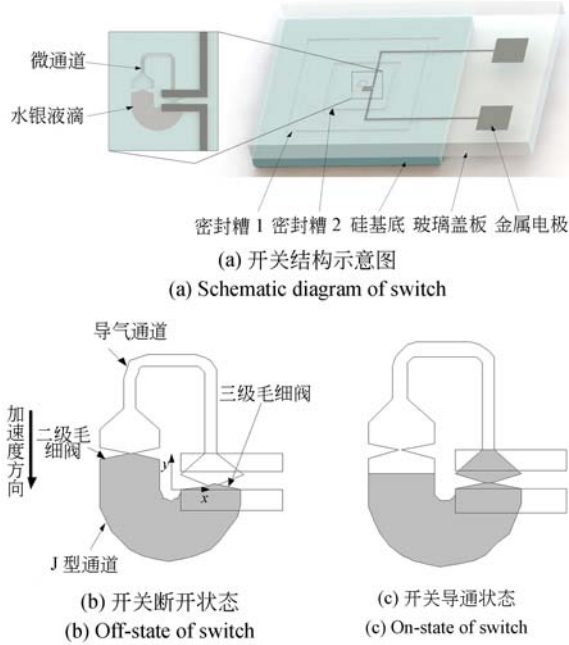


图 1 惯性开关的工作原理

Fig. 1 Operational principle of inertial switch

3 工作原理

3.1 理论分析

由于液气分界面的存在, 流体在微通道内的流动会受到由表面张力产生的毛细力的作用。通过改变微通道的尺寸和接触角来改变毛细力的大小, 改变壁面的张角来改变毛细力的方向。对于矩形截面的微通道, Cho 等^[14]给出了分界面毛细压强的近似表达式:

$$P_{\text{cap}} = -\frac{4\sigma\cos\theta}{d}, \quad (1)$$

其中: σ 为表面张力, θ 为固-液接触角, d 为水力直径, 矩形截面的水力直径为 $2wh/(\omega+h)$ 。

图 2 所示为水银在后坐载荷的作用下, 红线表示各个阶段的液气分界面的位置。第 1 阶段, 由于水银与硅的接触角大于 90° , 呈疏水特性。左右侧流体的毛细压强 P_1 和 P_2 可以表示为:

$$P_1 = -2\sigma\left[\frac{\cos(\theta_R + \alpha_1)}{\omega_1} + \frac{\cos\theta_R}{h}\right], \quad (2)$$

$$P_2 = -2\sigma\left[\frac{\cos\theta_L}{\omega_1} + \frac{\cos\theta_A}{h}\right], \quad (3)$$

其中: σ 为水银的表面张力; θ_A 为水银在硅上的前进接触角; θ_R 为水银在硅上的后退接触角; ω_1 为左右侧收缩形毛细阀的喉部宽度; α_1 为左侧收缩形毛细阀的壁面角; h 为微通道的深度; $\theta_L = \min\{\theta_A + \alpha_2, 180^\circ\}$, α_2 为右侧扩张形毛细阀的壁面角。对于收缩形壁面 $\alpha < 0$, 扩张形壁面 $\alpha > 0$, 直通通道 $\alpha = 0$ 。此时液面两侧的毛细压差可以表示为:

$$\Delta P_1 = P_2 - P_1 = -2\sigma\left[\frac{\cos\theta_L - \cos(\theta_R + \alpha_1)}{\omega_1} + \frac{\cos\theta_A - \cos\theta_R}{h}\right]. \quad (4)$$

在第 1 阶段, $\Delta P_1 > 0$, 开关不受外力作用, 在左右两个收缩形毛细阀的作用下, 两侧的液气分界面始终保持在阶段 1 的位置。

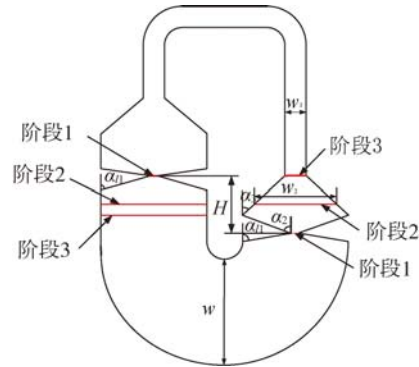


图 2 后坐载荷下液气分界面位置

Fig. 2 Positions of liquid-gas interface under recoil load

第 2 阶段, 在后坐载荷的作用下, 右侧的水银开始突破毛细阀, 经过一段时间后, 左右两侧液面高度相同, 处于平衡状态。左右两侧流体的毛细压强 P_1 和 P_2 可以表示为:

$$P_1 = -2\sigma\left[\frac{\cos\theta_R}{\omega} + \frac{\cos\theta_R}{h}\right], \quad (5)$$

$$P_2 = -2\sigma\left[\frac{\cos(\theta_A + \alpha_2)}{\omega_2} + \frac{\cos\theta_A}{h}\right]. \quad (6)$$

此时液面两侧的毛细压差可以表示为:

$$\Delta P_2 = P_2 - P_1 = -2\sigma\left[\frac{\cos(\theta_A + \alpha_2)}{\omega_2} - \frac{\cos\theta_R}{\omega} + \frac{\cos\theta_A - \cos\theta_R}{h}\right]. \quad (7)$$

α_3 为右侧第二个收缩形毛细阀的壁面角,处于阶段 2 的右侧的液气分界面处于收缩形毛细阀内, $\Delta P_2 < 0$ 。当后坐载荷消失后, 两侧液面会在毛细力的作用下, 到达阶段 3 的位置, 此时左右两侧流体的毛细压强 P_1 和 P_2 可以表示为:

$$P_1 = -2\sigma \left[\frac{\cos \theta_R}{\omega} + \frac{\cos \theta_R}{h} \right], \quad (8)$$

$$P_2 = -2\sigma \left[\frac{\cos \theta_A}{\omega_3} + \frac{\cos \theta_A}{h} \right]. \quad (9)$$

液面两侧的毛细压差可以表示为:

$$\Delta P_3 = P_2 - P_1 = -2\sigma \left[\frac{\cos \theta_A}{\omega_3} - \frac{\cos \theta_R}{\omega} + \frac{\cos \theta_A - \cos \theta_R}{h} \right]. \quad (10)$$

在阶段 3, 液面两侧的毛细压强 $\Delta P_3 > 0$, 在没有外力的作用下, 两侧液面始终保持在阶段 3 的位置, 水银接通固定电极。

3.2 仿真分析

为了验证开关区分这两种载荷的能力, 采用 Gambit 建立了开关的三维模型并划分网格, 采用 Fluent 的 VOF 模型进行求解, 使用 Tecplot 进行后处理并提取开关两侧液气分界面的高度。模型的主要几何参数如表 1 所示, 材料属性如表 2 所示。图 3(a) 所示为水银液滴在后坐载荷下的运动状态, 在惯性力的作用下, 水银经过 1 ms 后能完全突破右侧扩张毛细阀, 在惯性力的持续作用下, 两侧的液面高度相同。4 ms 后惯性力消失, 水银在毛细力的作用下, 经过 4 ms 完全充满右侧第二个收缩形毛细阀。图 3(b) 所示为水银液滴在勤务跌落载荷下的运动状态。由于勤务跌落载

表 1 模型的主要几何参数

Tab. 1 Main geometric parameters of model

参数	值
J 形通道宽 $\omega/\mu\text{m}$	300
毛细阀喉部宽 $\omega_2/\mu\text{m}$	20
导气通道宽 $\omega_3/\mu\text{m}$	60
微通道深度 $h/\mu\text{m}$	50
左侧收缩形毛细阀的壁面角 $\alpha_1/(\circ)$	-70
右侧扩张形毛细阀的壁面角 $\alpha_2/(\circ)$	70
右侧第二个收缩形毛细阀的壁面角 $\alpha_3/(\circ)$	-40

表 2 模型材料参数

Tab. 2 Material parameters of models

参数	值
水银密度 $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	13 550
空气密度 $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1. 225
水银黏度 $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$1. 52 \times 10^{-3}$
空气黏度 $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	2×10^{-5}
水银表面张力 $\sigma/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0. 484
前进接触角 $\theta_A/(\circ)$	140
后退接触角 $\theta_R/(\circ)$	130

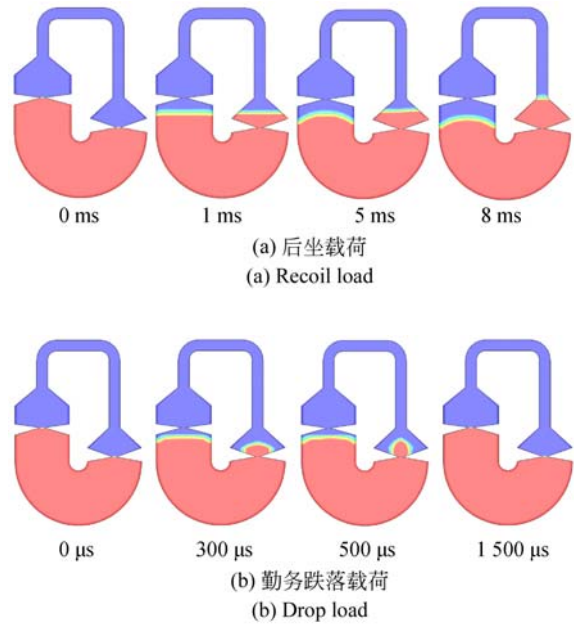


图 3 水银在不同加速度激励下的运动状态

Fig. 3 Motion states of mercury under different accelerations

荷脉宽小, 水银不能完全突破毛细阀, 当惯性力消失后, 在毛细力的作用下, 水银液滴恢复到初始状态。

在不同的加速度载荷作用下, 左右两侧液气分界面的高度-时间曲线如图 4 所示。如图 4(a) 所示, 后坐载荷消失后, 右侧液气分界面会继续上升一定的高度后稳定不变。如图 4(b) 所示, 当勤务跌落载荷消失后, 水银会上升一段高度后再慢

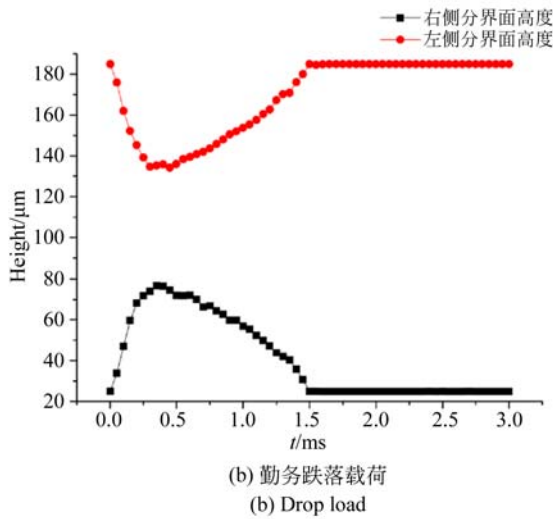
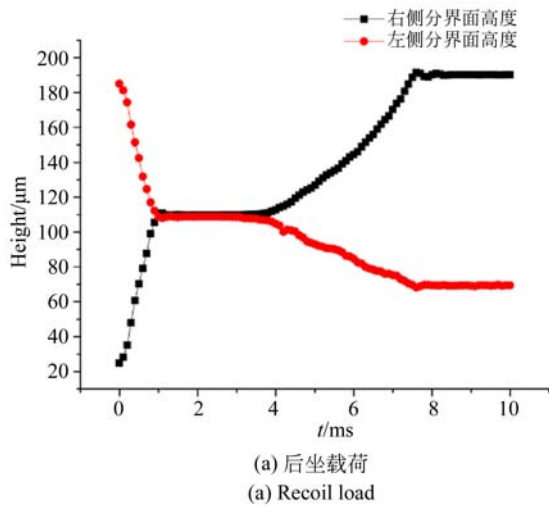


图 4 左右侧液气分界面高度变化

Fig. 4 Height change of left and right liquid-gas interface

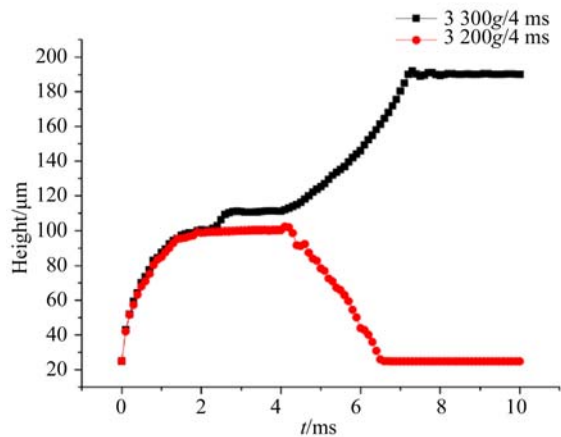


图 5 开关阈值

Fig. 5 Switch threshold

慢恢复到初始的状态。图 5 所示为有限元仿真得出的开关阈值。对开关施加 3 300 g/4 ms 的半正弦加速度, 右侧液面在载荷消失后充满右侧第二个收缩形毛细阀, 导通开关。对开关施加 3 200 g/4 ms 的半正弦加速度, 右侧液面不能充分接触毛细阀的壁面, 载荷消失后, 在毛细力的作用下恢复到初始状态。

4 样机制作

采用湿法刻蚀和磁控溅射金属技术加工样机的流程如图 6 所示。首先将掩模版与涂好光刻胶的硅片对准标记进行套准后, 使用紫外光刻机进行曝光(图 6(a))。曝光后的硅片放入显影液中溶解去除光照后的部分(图 6(b))。然后使用湿法刻蚀工艺刻蚀硅片, 刻蚀深度为 50 μm (图 6(c))。最后去除硅片上的光刻胶(图 6(d))。玻璃上电镀铬电极的加工流程如图 6(e)~6(f)所示, 首先在肖特 B270 玻璃上镀上一层 250 nm 厚的铬后涂上光刻胶, 对准掩模版后曝光, 然后显影去除光照后的部分, 放入去铬液将铬层去除干净, 最后去除玻璃上的光刻胶。硅基上刻蚀微流道的 SEM 图像如图 7 所示。

估算好能充满左右侧收缩性毛细阀的水银体积后, 采用注射泵(TJ-2A)和进样器(规格为 5 μL)产生 12 nL 的水银液滴。将水银液滴放到 J 形通道内, 盖上玻璃后压紧, 在光学显微镜(Nikon

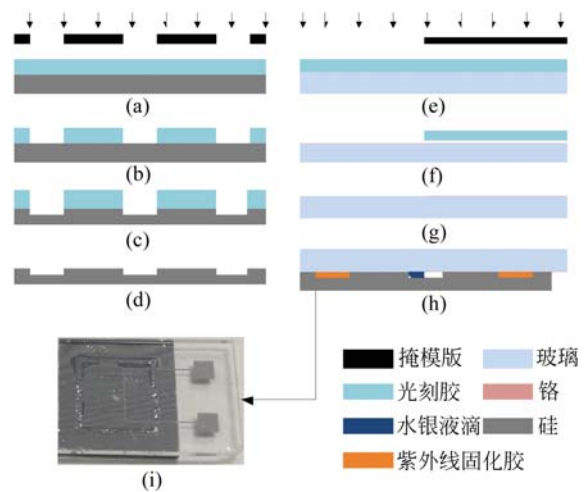


图 6 样机加工流程

Fig. 6 Fabrication processes of prototype

SMZ1000)下观察,保证水银液滴能完全充满收缩性毛细阀。准备好水银液滴后,使用注射泵产生适量的紫外线固化胶液滴充满密封槽 1。盖上玻璃后,在显微镜下微调电极与微通道的相对位置,如图 6(h)所示。使用紫外线灯照射密封槽 1 内的紫外线固化胶,进行固化。密封好的开关如图 6(i)所示,其外形尺寸为 15 mm×10 mm×1.55 mm。

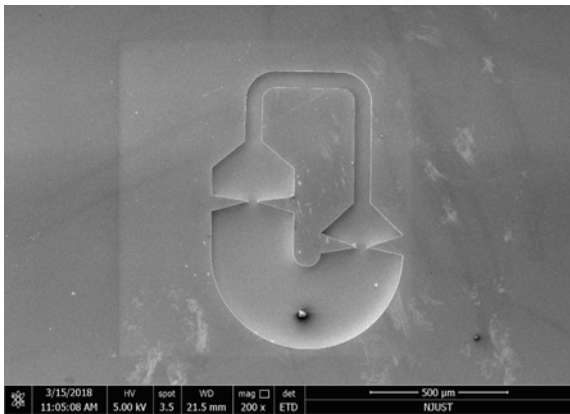


图 7 微流道 SEM 图像

Fig. 7 SEM image of microchannel

5 样机实验

5.1 马希特落锤冲击实验

对于幅值为 12 000 g,脉宽为 300 μs 的加速度信号,实际上是弹丸勤务意外跌落受到的冲击加速度。采用马希特落锤系统来模拟勤务跌落加速度载荷,实验采用的仪器设备如图 8(a)所示,实验原理如图 8(b)所示。实验主要包括信号采集系统和马希特落锤系统。微流体惯性开关和加速度传感器固定在锤头上,通过调节锤头下落的高度和落点的缓冲垫片来改变冲击加速度的幅值和脉宽。加速度传感器的型号为 CA-YD-111,量程为 50 000 g,灵敏度为 0.03 pc/g。锤头自由下落后碰撞底座产生加速度信号,计算机记录数据采集卡传入的加速度信号(采样频率为 32 kHz)。开关电极的信号由数据采集卡通过信号电路采集,信号电路包括直流电源,200 Ω 电阻和 LED 灯。调节电荷放大器增益和灵敏度,使得电荷放大器的输出电压为 0.1 mV/g。

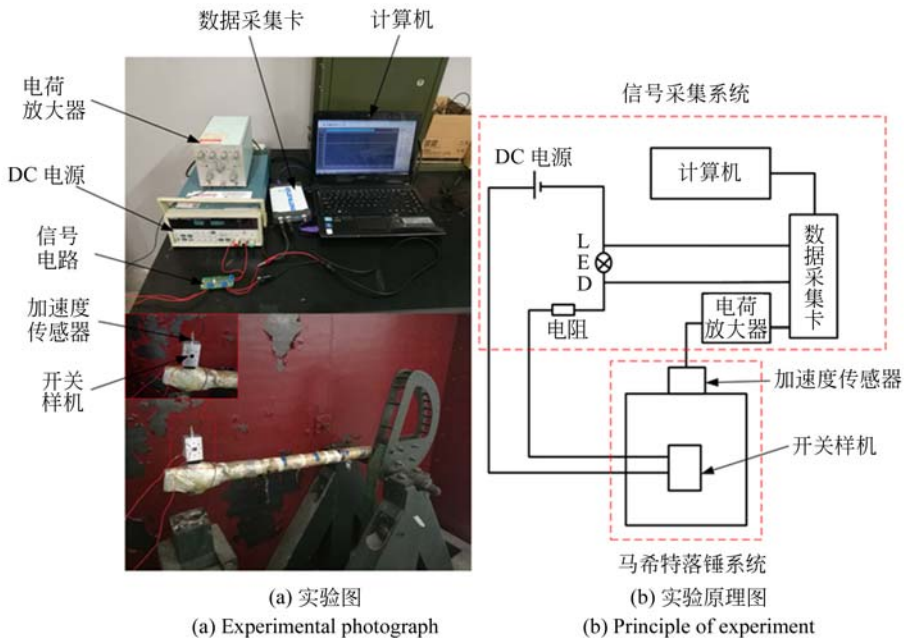


图 8 马希特落锤冲击系统

Fig. 8 Machete drop hammer impact system

测出的加速度信号和开关信号如图 9 所示。测出的冲击加速度信号幅值为 12 800 g,其脉宽

为 219 μs,在勤务跌落载荷作用的过程中,开关始终处于断开状态。

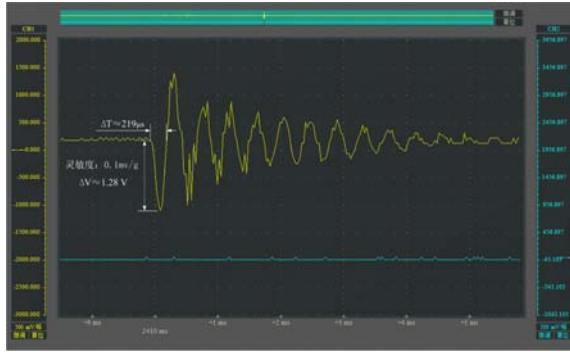


图 9 加速度信号和开关信号

Fig. 9 Acceleration and switching signals

5.2 离心实验

对于幅值为 20 000 g,脉宽为 4 ms 的加速度信号,实际上是弹丸发射时受膛内压力产生的后坐加速度,实验室条件很难获得。通过离心实验来测试开关导通的静态阈值。离心实验如图 10 所示,旋转台的电机采用直流无刷电机控制器(WS55-180)控制,转速由 Arduino 输出的 PWM 进行调节。旋转台上安装有磁铁,霍尔传感器每接近一次磁铁都会产生一个低电平信号发送到 Arduino。通过计算两次低电平信号的时间差,就能计算出旋转台的转速,Arduino 通过串口将实时转速上传到计算机。开关受到的离心加速度可以表示为:

$$T = r \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 \quad (10)$$

其中: n 为旋转台的转速, r 为开关与旋转台圆心



图 10 离心实验

Fig. 10 Centrifugal experiment

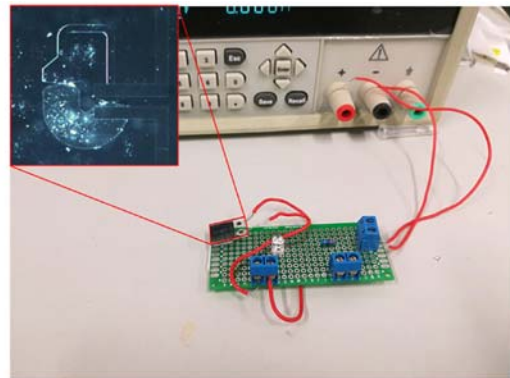
的距离。

开关的理论静态阈值可以表示为:

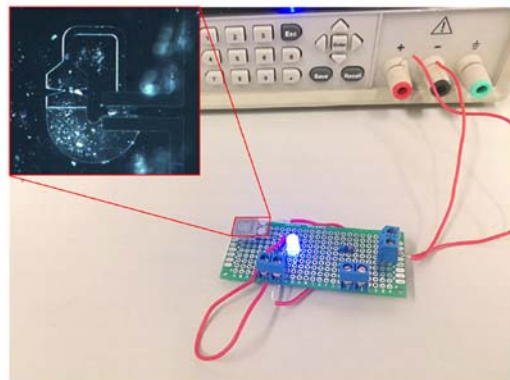
$$a = \frac{\Delta P_1}{\rho H}, \quad (11)$$

其中: ρ 为水银密度, H 为初始状态左右侧液面的高度差。

离心实验结果表明,当转速低于或等于 5 400 r/min 时,即离心加速度小于或等于 3 257.2 g 时,开关一直处于断开状态;当转速达到 5 450 r/min 时,即离心加速度为 3 317.3 g 时,开关导通。开关的静态加速度阈值为 3 257.2 g ~ 3 317.3 g。通过式(11)计算开关的理论阈值为 3 590.9 g,与实验结果吻合得较好,能合理预测开关的阈值。开关实验前后如图 11 所示。离心前水银液滴位于初始状态,不能导通固定电极,LED 灯不亮。加载离心加速度载荷后,水银液滴突破毛细阀后,载荷消失后一直处于突破毛细阀的状态,接通固定电极,可靠接通 LED 灯。



离心前



离心后

图 11 离心实验前后开关的状态

Fig. 11 Switch states before and after centrifugal experiment

6 结 论

本文提出了一种高阈值长脉宽响应的微流体惯性开关。该开关采用水银作为工作流体,采用环形微通道,水银突破毛细阀的方向与敏感加速度方向相反,在高阈值作用下水银不会发生液滴分离现象。基于毛细阀原理设计了三级毛细阀,用于区分两种典型的加速度。分析了开关的工作原理,采用湿法刻蚀和磁控溅射金属技术制作了硅基底和玻璃电极,使用紫外线固化胶进行密封。最后,采用仿真分析和样机实验相结合的方式,验证了开关的功能。仿真分析得出,开关在幅值为

12 000 g,脉宽为 300 μ s 的勤务跌落载荷下始终保持断开,在幅值为 20 000 g,脉宽为 4 ms 的后坐载荷下,左侧液面逐渐降低,右侧液面逐渐升高,1 ms后左右侧液面的高度差为 0,载荷消失后水银在毛细力作用下可靠接通固定电极。仿真得出开关的阈值为 3 300 g。实验得出,开关在(幅值:12 800 g,脉宽:219 μ s)冲击加速度作用下,开关始终保持断开。离心实验得出开关的静态阈值为 3 257.2 g~3 317.3 g,开关的理论阈值为 3 590.9 g,三者吻合得较好。与传统的微流体惯性开关相比,开关设计了三级毛细阀,能识别不同脉宽的高 g 值加速度信号,并在高 g 值长脉宽的加速度信号作用下可靠接通。

参考文献:

- [1] 步超, 聂伟荣, 罗乔, 等. 齿形结构的长脉冲敏感型微加速度开关[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(11): 2730-2737.
- BU CH, NIE W R, LUO Q, *et al.*. Micro acceleration switch with tooth-shaped structure for long pulse sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11):2730-2737. (in Chinese)
- [2] CAO Y, XI Z W, YU P X, *et al.*. A MEMS inertial switch with a single circular mass for universal sensitivity [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2015, 25(10): 105005.
- [3] CHEN W G, WANG Y, DING G F, *et al.*. Simulation, fabrication and characterization of an all-metal contact-enhanced triaxial inertial microswitch with low axial disturbance [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2014, 220(4636):194-203.
- [4] GERSON Y, SCHREIBER D, GRAU H, *et al.*. Meso scale MEMS inertial switch fabricated using an electroplated metal-on-insulator process [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2014, 24(2): 025008.
- [5] ALMEIDA L, RAMADOSS R, JACKSON R, *et al.*. Study of the electrical contact resistance of multi-contact MEMS relays fabricated using the MetalMUMPs process [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2006, 16(7): 1189-1194.
- [6] YOO K, KIM J. A novel configurable MEMS inertial switch using microscale liquid-metal droplet [C]. *International Conference on Micro Electro Mechanical Systems IEEE*, 2009:793-796.
- [7] YOO K, PARK U, KIM J. Development and characterization of a novel configurable MEMS inertial switch using a microscale liquid-metal droplet in a microstructured channel [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2011, 166(2):234-240.
- [8] USUNG P, KWANGHYUN Y, JOONWON K. Development of a MEMS digital accelerometer (MDA) using a microscale liquid metal droplet in a microstructured photosensitive glass channel [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2010, 159(1): 51-57.
- [9] SHEN T, ZHANG D, HUANG L, *et al.*. An automatic-recovery inertial switch based on a gallium-indium metal droplet [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2016, 26(11): 115016.
- [10] HUANG Y, SUNG W, LAI W, *et al.*. Design and implementation of time-delay switch triggered by inertia load [C]. *International Conference on MICRO Electro Mechanical Systems IEEE*, 2013:729-732.
- [11] KUO J C, YANG Y J. A passive hydrogel-based inertial switch integrated with micromachined L-C resonator [C]. *International Conference on Micro Electro Mechanical Systems IEEE*, 2012:515-518.
- [12] KUO J C, KUO P H, LAI Y T, *et al.*. A passive inertial switch using MWCNT-hydrogel composite with wireless interrogation capability [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, 22(3): 646-654.
- [13] 黄刘, 聂伟荣, 王晓锋, 等. 抗高过载微流体惯性

开关[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3):526-532.
HUANG L, NIE W R, WANG X F, *et al.*. A microfluidic inertial switch with response characteristics to high acceleration [J]. *Opt. Precision Eng.*,

2016, 24(3):526-532. (in Chinese)

[14] CHO H, KIM H Y, KANG J Y, *et al.*. How the capillary burst microvalve works [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2007, 306(2):379-385.

作者简介:



李嘉杰(1993—),男,广东江门人,博士研究生,2016年于广州大学获得学士学位,研究方向为智能探测与控制。E-mail:jiajieli_1993@sina.com

通讯作者:



聂伟荣(1969—),女,山西原平人,博士,副教授,2002年于南京理工大学获得博士学位,主要从事 MEMS 器件的设计与工艺研究。E-mail: niewrhappy@163.com