

文章编号: 1004-924X(2016)03-0526-07

抗高过载微流体惯性开关

黄 刘, 聂伟荣*, 王晓锋, 沈 腾
(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于微连通器结构, 提出了一种使用盐水(NaCl溶液)作为工作流体且具有高的抗过载能力的微流体惯性开关。分析了液滴的分离机理, 设计了开关的流道结构。然后, 对开关进行了理论分析, 建立了开关模型。最后, 利用流体动力学仿真和样机实验相结合的方法, 对开关结构和功能进行了验证。验证结果显示: 在幅值为30 000 g阶跃型加速度作用下, 开关的工作流体仍未发生分离, 加速度的幅值与开关响应时间相关。另外, 开关样机能够使盐水液面形成高度差, 样机的静态加速度阈值为134.6 g~152.3 g, 非常接近其理论计算的加速度阈值142.7 g。得到的结果表明, 采用的微连通器结构能够极大地增强微流体惯性开关的抗液体分离能力, 能够对加速度幅值进行区分, 并实现闭锁功能, 同时显示了高的抗过载能力。

关键词: 微流体惯性开关; 微加速度开关; 微连通器; 抗高过载

中图分类号: TM564; TH824.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162403.0526

A microfluidic inertial switch with response characteristics to high acceleration

HUANG Liu, NIE Wei-rong*, WANG Xiao-feng, SHEN Teng

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

* Corresponding author, E-mail: njniewr@hotmail.com

Abstract: On the basis of micro communicating vessels, a novel microfluidic inertial switch with excellent response characteristics to a high acceleration over 30 000 g was proposed. Brine was selected as the working-fluid due to its conductivity and non-toxicity. The mechanism of droplet separation was discussed, and the channel structure of the switch was designed. Then, the working principle of the switch was theoretically analyzed and modeled. Finally, by the combination of Computational Fluid Dynamics(CFD) simulation technology and a prototype experiment, the structure and functions of the switch were verified. The results show that fluid dispersion problem has been avoided even under the 30 000 g high step acceleration, and the bigger acceleration amplitude leads to the shorter response time. By the review of the experiment results, the height difference of the two liquid-gas interfaces of the brine can be realized at the initial state and the static acceleration threshold of the prototype is between 134.6 g to 152.3 g, which is agreed well with its theoretical counting acceleration threshold 142.7 g. The experiments indicate that the micro communicating vessels efficiently improve the anti-dispersion ability of the microfluidic inertial switch. It separates the acceleration amplitude and shows good latching function and higher response characteristics to the high acceleration.

Key words: microfluidic inertial switch; micro acceleration switch; micro communicating vessel; anti high acceleration

1 引言

微加速度开关是一种当探测物体所受的加速度值超过开关阈值时使外部电路导通的元器件,也称为微惯性开关。微惯性开关广泛应用于航空航天、工业自动化、仪器仪表、武器系统等领域^[1-2]。微流体惯性开关是一种较新型的微加速度开关,利用液滴受加速度作用在微通道中的位置变化来探测和区分加速度。相对于传统的微机械式惯性开关,微流体惯性开关具有接触稳定无弹跳、接触电阻小、可通过电流大等优点。

Kwanghyun Yoo等^[3-4]基于液态金属汞高表面张力、高密度和良好的导电性的优点,使用汞金属液滴代替微机械式惯性开关中的质量块,设计了一种微流体惯性开关。通过在通道壁面加工微细结构产生荷叶效应,成功地减小了液滴的接触角滞后效应,提高了开关的响应速度。Liu Tingting等^[5-6]利用电润湿特性设计了一种阈值方便可调的微流体惯性开关,研究了电场电压和加工误差对开关加速度阈值的影响。施加的电压越高,开关的加速度阈值越大,并且开关的性能极易受其敏感方向上的碰撞信号的影响。Joonwon Kim和C-J Kim^[7]研究了纳米结构壁面对液滴运动的影响,推导了粗糙壁面液滴接触角的表达式。得到纳米结构壁面能够极大地提高液滴的接触角,减小液滴的运动阻力,最高能使运动阻力降低95%以上。Feng Yanying等^[8]分别利用改变通道几何形状和改变壁面润湿特性的方法,设计了两种毛细阀结构。两种阀均对液-气分界面的移动具有明显的阻碍作用。Hansan Cho等^[9]和Jerry M. Chen等^[10]分别从表面能和Young-Laplace方程出发,推导了扩张型毛细阀突破压力的表达式。杜新等^[11]使用Surface Evolver算法对不同体积下,由玻璃和聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)材料制作的毛细阀扩张段入口处的液面进行了仿真,指出毛细阀的通道和壁面材料的接触角之和大于 90° 时,毛细阀才能控制微流体的流动。

传统的微流体惯性开关使用扩张型毛细阀来实现对液滴运动位置的控制^[3-6]。当液滴通过毛细阀时,在毛细阀的入口段(收缩段)压力较大,液滴所受的阻力大;而出口段(扩张段)压力较小,液滴所受的阻力小。如果惯性力方向与液滴运动方向相同,则液滴入口段部分液体的运动加速度将小于出口段部分,液滴会发生拉伸。由于液滴除表面

张力以外不具有抗拉能力,当表面张力不足以抵消前后段加速度差产生的拉力时,液滴就会发生分离。如果惯性力方向与液体运动方向相反,液滴在运动过程中将始终处于受压状态,就不会发生分离。传统的微流体惯性开关^[3-6]由于采用直线式通道结构,惯性力方向与液滴运动方向相同,必须使用表面张力大的液体(汞)来实现抗高过载能力。但是,汞属于重金属,有毒,且极易污染环境,开关在制造、存储和使用过程中存在较高的安全风险。

本文基于微连通器结构,采用改变液体运动方向的方法,使液体运动方向与惯性载荷方向相反,采用无毒的低表面张力液体(盐水)作为工作流体实现抗高过载能力。设计了开关的通道结构,并建立了开关的理论模型。最后,采用流体动力学仿真和样机实验相结合的方法,对开关的结构和功能进行了验证。

2 结构原理

微流体惯性开关的结构主要由PDMS基板、玻璃盖板、盐水和金电极组成,如图1所示。PDMS基板在与玻璃盖板键合的一面上制作有矩形的微沟槽,玻璃盖板在与PDMS基板键合的一面上沉积有金电极。PDMS基板与玻璃盖板通过热键合工艺形成封闭的环形微通道。环形微通道由两个J形微通道和两个毛细阀组成(见图2),通道1和通道2的结构尺寸相同,毛细阀1和毛细阀2通道的结构尺寸亦相同。通道1和通道2通过毛细阀1和毛细阀2首尾相连形成环形的封闭微通道。当基板和盖板键合完成后,盐水通过在基板上打孔注入通道1中。由于毛细阀1和毛细阀2的阻碍作用,注入过程中可以保证盐水只能位于通道1中,不能进入通道2中。封闭的环形微通道和盐水构成了微连通

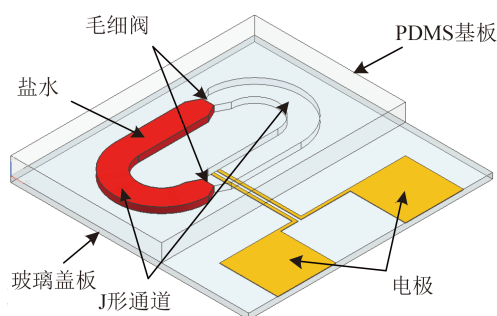


图1 微流体惯性开关的结构原理图

Fig. 1 Schematic diagram of micro fluidic inertial switch

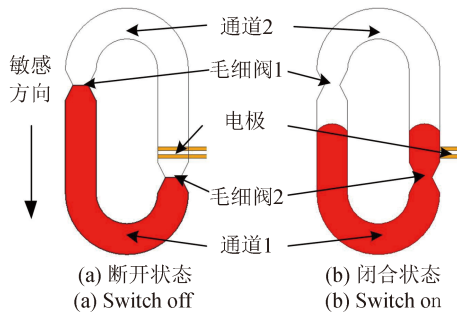


图2 微流体惯性开关的工作原理图

Fig. 2 Working principle of microfluidic inertial switch

器,当开关受敏感方向惯性力作用时,无论盐水的运动方向如何,盐水总是处于受压状态,所以不会发生分离。接触电极位于通道2中毛细阀2的出口处,盐水一旦突破毛细阀2就会和电极发生接触使开关导通。

开关的工作原理如图2所示。初始状态时,盐水只位于通道1中,开关处于断开状态,如图2(a)所示。由于毛细阀1在开关敏感方向上的高度大于毛细阀2,通道1中的盐水两端液面会自然形成高度差。当受加速度载荷作用时,盐水便具有了突破毛细阀2进入通道2的趋势。如果作用的加速度载荷较小,盐水不能突破毛细阀2,当载荷消失后盐水又会恢复到初始状态,开关不导通。如果作用的加速度载荷足够大,盐水会突破毛细阀2进入通道2中,并与电极接触使开关导通。当盐水突破毛细阀2后,由于通道1和通道2的结构尺寸相同,两端液面产生的毛细力相互抵消,经过一段时间后两端液面的高度差会变为0,盐水将不能回到初始状态,开关保持导通。

2 理论分析

由于空气的密度与黏度相对于盐水极小,忽略空气的影响,盐水在微连通器中的运动可等效为一弹簧阻尼系统,如图3所示。盐水的质量等效为

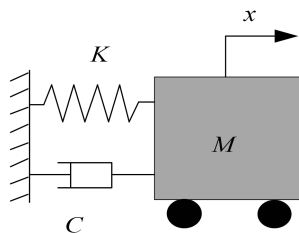


图3 弹簧阻尼系统

Fig. 3 Spring resistance system

质量块的质量 M ,盐水所受的体积力和左右液面的毛细力差值等效为弹簧刚度 K ,由盐水黏性引起的运动阻尼等效为阻尼器 C ,左右液面的高度差等效为质量块的位移 x ,初始液面高度差等效为系统的初始激励。系统的运动方程可表示为:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = 0. \quad (1)$$

阻尼器的阻尼 C 与盐水的动力黏度有关,可表示为:

$$C = \eta \int_1^2 \mu ds, \quad (2)$$

其中: μ 为液体的动力黏度, η 为修正系数。弹簧刚度 K 可表示为:

$$K = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{x} + \rho a, \quad (3)$$

其中: $\Delta p_1, \Delta p_2$ 分别为左右液面的毛细力, ρ 为盐水密度, a 为敏感方向的加速度。

液面的毛细力可表示为^[11]:

$$\Delta p = \sigma \frac{l_i \cos(\theta_i + \alpha_i)}{A}, \quad (4)$$

其中: σ 为盐水的表面张力系数, l_i 为第 i 壁面上的接触线在通道横截面上的投影长度, θ_i 为液体与第 i 壁面的接触角, α_i 为第 i 壁面与通道横截面法向的夹角, A 为液面处通道的横截面积,毛细力正方向为空气方向。

当 $\theta + \alpha < 90^\circ$ 时, $\Delta p > 0$,毛细力方向指向空气方向,表现为疏水性;当 $\theta + \alpha > 90^\circ$, $\Delta p < 0$,毛细力方向指向盐水方向,表现为亲水性。在接触角和壁面夹角一定的情况下,通道横截面积越小,毛细力越大。

当液面位于毛细阀的喉部时,液面的毛细力最大,开关的静态阈值可表示为:

$$a_{th} = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\rho x_0}, \quad (5)$$

其中 x_0 为液面的初始高度差。

3 数值仿真

为了验证微连通器结构是否能使采用低表面张力液体的微流体惯性开关仍能实现抗过载能力,使用GAMBIT建立了开关的三维仿真模型,使用FLUENT对模型在其敏感方向(y 方向)受阶跃型加速度作用时的动态响应进行了流体动力学仿真^[12-13]。不考虑接触角滞后的影响,其控制方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \\ \frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + \rho a_x \\ \frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + \rho a_y \\ \frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} w) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + \rho a_z \end{cases} \quad (6)$$

其中： ρ 为流体密度， t 为时间， u ， v ， w 分别为 x ， y ， z 方向上的速度分量， \mathbf{V} 为速度矢量， p 为压力， μ 为流体动力黏度， a_x ， a_y ， a_z 分别为 x ， y ， z 方向上作用的加速度。

盐水与空气分界面的运动采用VOF模型描述，其方程为：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{V} F = 0, \quad (7)$$

其中 F 为盐水的体积分数。

则式(6)中的密度和黏度可表示为：

$$\begin{cases} \rho = F\rho_b + (1-F)\rho_a \\ \mu = F\mu_b + (1-F)\mu_a \end{cases} \quad (8)$$

其中： ρ_b 和 ρ_a 分别为盐水和空气的密度， μ_b 和 μ_a 分别为盐水和空气的黏度。

在微尺度下，液气分界面表面张力的作用不可忽略，采用CSF模型描述了分界面张力的影响，其方程为：

$$\int \Delta p ds = \int \sigma \mathbf{n} \times d\mathbf{y} = \nabla F, \quad (9)$$

其中： σ 为表面张力系数， ds 为分界面面积元， \mathbf{n} 为分界面法向， $d\mathbf{y}$ 为 y 方向线元(敏感方向)。

对3组具有不同结构尺寸的仿真模型在阶跃型加速度载荷作用下的动态响应进行了仿真，模型的材料参数如表1所示。模型的结构参数如表2所示。使用TECPLOT对仿真结果进行了后处理。结果显示，盐水在整个运动过程中均未发生分离。加速度幅值为30 000 g时模型1的运动过程如图4所示。

表1 模型材料参数

Tab. 1 Material parameters of models

参数名称	值
盐水密度/(kg·m ⁻³)	1 300
盐水黏度	0.001
空气密度/(kg·m ⁻³)	1.225
空气黏度	0.000 02
表面张力系数	0.072 1
接触角/(°)	120

表2 模型结构参数

Tab. 2 Structure parameters of models

	(μm)		
	1	2	3
毛细阀喉部宽度	50	100	200
毛细阀进口长度	50	100	200
毛细阀出口长度	50	100	200
通道深度	50	100	100
通道宽度	100	200	400
通道圆弧半径	150	300	600
初始液面高度差	300	600	1 200

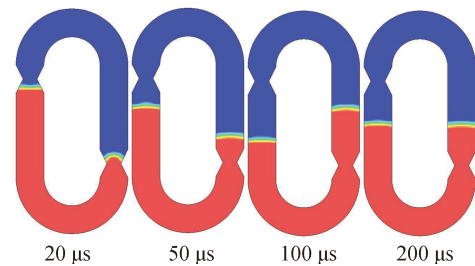


图4 加速度幅值为30 000 g时模型1的运动过程
Fig. 4 Movement process of model 1 under 30 000 g acceleration

在不同幅值的加速度载荷作用下，右侧液面的位移-时间曲线如图5所示。

4 样机实验

4.1 加工工艺

为了验证开关结构的可行性，利用微流控加工工艺制作了开关的原理样机。其工艺流程为：首先，采用DRIE技术制作样机的硅模板。然后，将PDMS预聚物覆盖到硅模板上，待PDMS预聚物凝固后，从模板上揭下PDMS并按图样切割，得到样机基板。采用热键合工艺将PDMS基板和玻璃盖板进行键合。最后，使用打孔器在PDMS基板的对应位置打好注入孔和排气孔，即得到了开关的原理样机。原理样机的主要尺寸如表3所示。

4.2 盐水注入实验

使用无水NaCl晶体(分析纯)和去离子水(分析纯)配制了浓度为0.2 g/mL的盐水。为了便于观察，使用市售蓝黑墨水对盐水进行染色处理，混合比例为1:1。使用图6所示实验装置进行了注入实验，注入盐水后的样机如图7所示。

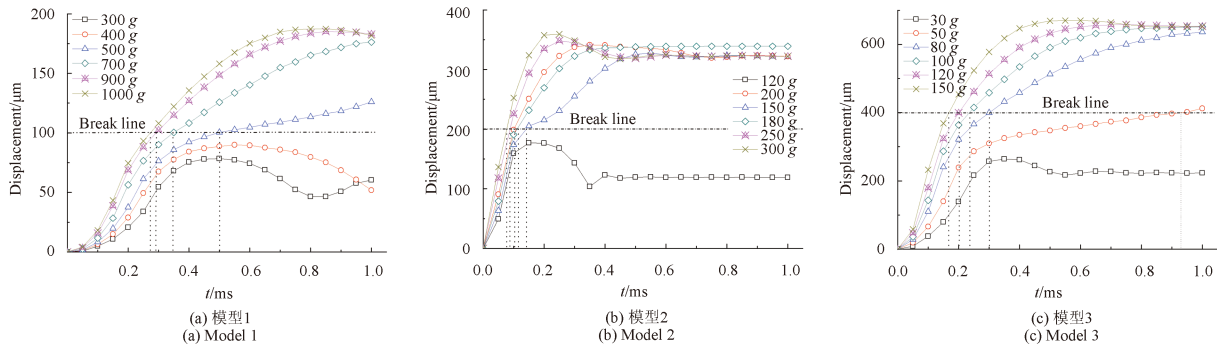


图 5 右侧液面的位移-时间曲线

Fig. 5 Displacement-time curves of right interface

表 3 样机主要尺寸

Tab. 3 Main structure parameters of switch prototype

参数	值
毛细阀喉部宽度	50
毛细阀入口长度	200
毛细阀出口长度	200
通道宽度	400
通道深度	50
通道圆弧半径	600
初始液面高度差	1 200

4.3 离心加载实验

使用图8所示实验装置对注入盐水后的样机进行了离心加载实验。实验得到当加速度小于134.6 g时，盐水不能突破毛细阀，载荷消失后盐水又回到了初始位置。当加速度大于152.3 g时，盐水突破了毛细阀，载荷消失后盐水保持在平衡位置，如图9所示。

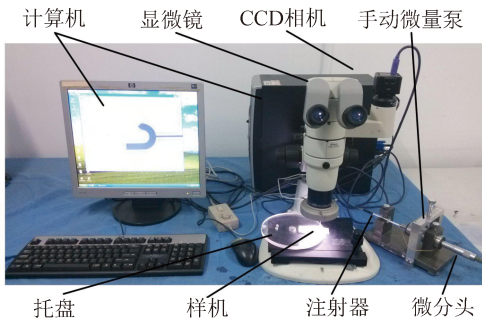


图 6 盐水注入装置
Fig. 6 Brine injection setup

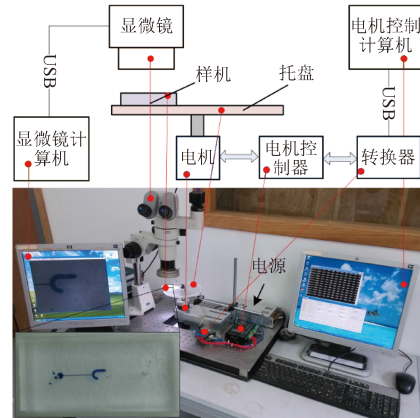


图 8 离心实验装置
Fig. 8 Centrifugal experiment setup

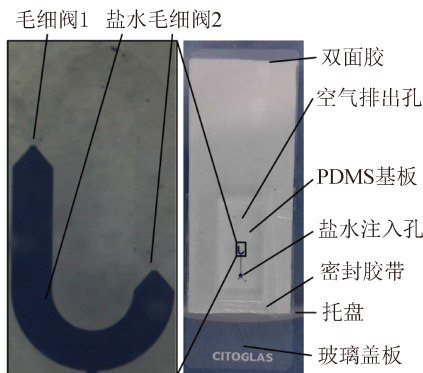


图 7 注入盐水后的开关样机
Fig. 7 Switch prototype injected with brine

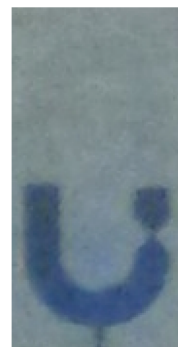


图 9 加载后的样机
Fig. 9 Prototype after loaded

5 实验结果与讨论

由仿真结果可知,仿真模型即使在幅值为30 000 g的阶跃型加速度作用下,盐水仍未发生分离。由此说明基于微连通器通过改变液体运动方向使液体运动方向与惯性力方向相反的方法,可极大地增强微流体惯性开关抗工作流体分离的能力,使采用低表面张力工作流体的微流体惯性开关依然具有抗高过载的能力。

由图5可知,当加速度幅值小于80 g时,稳定点位于突破线以下;当加速度幅值大于100 g时,稳定点位于突破线以上。说明开关具有双稳定点,能实现一定的阈值,具有区分加速度幅值的能力。毛细阀的喉部宽度越小,加速度阈值越大;而加速度幅值越大,曲线上升越快,开关响应越快。由式(3)和式(4)可知,当右侧液面位于毛细阀扩张段时,盐水左侧液面处的通道宽度小于右侧液面处,导致右侧液面产生的毛细力大于左侧液面,等效刚度 K 较大。当右侧液面位于通道2中时,左右液面处通道宽度相等,左右液面产生的毛细力相互抵消,等效刚度 K 较小。由于系统的等效刚度不同,所以系统具有双稳定点。当加速度幅值小于开关阈值时,载荷消失后盐水能回到初始位置,开关保持断开。当加速度幅值大于开关阈值时,盐水会稳定在平衡位置而不能回到初始位置,开关保存导通,实现了闭锁功能。

由图4和图5可知,右侧液面位移在达到最大值后会逐渐衰减的振荡。若加速度幅值小于开

关阈值,液面会在突破线以下振荡;若加速度幅值大于开关阈值,液面会在突破线以上振荡并最终稳定在平衡位置(液面高度差为0的位置)。这是由于盐水的动力黏度较小,使等效阻尼器 C 的阻尼较小,系统为欠阻尼系统,系统激励后的动态响应为逐渐衰减的振荡过程。由于系统具有双稳定点,所以对不同的加速度值,其动态响应曲线在不同的稳定点附近振荡。

由图7和图9可知,盐水注入样机后,只位于通道1,其两端液面在开关敏感方向上形成了高度差。当加速度幅值大于152.3 g时,盐水突破了毛细阀,并且在加速度消失后,盐水依然保持在平衡位置。由此证明开关能对加速度幅值进行区分,并具有闭锁功能。

6 结论

本文采用改变液体运动方向的方法,使液体运动方向与惯性载荷方向相反,基于微连通器结构设计了一种新型的微流体惯性开关。利用流体动力学仿真和样机实验相结合的方法,对开关功能进行了验证。仿真得到,开关在30 000 g的阶跃型加速度作用下盐水仍未发生分离。实验得到,样机加速度阈值在134.6 g~152.3 g,非常接近其理论计算的加速度阈值142.7 g。相对于传统的微流体惯性开关,本文所述的微流体惯性开关使用低表面张力液体(盐水)实现了抗高过载能力。开关能够区分加速度幅值,并具有闭锁功能。

参考文献:

- [1] KIM J W, SHEN W J, KIM CH J, *et al.*. A micromechanical switch with electrostatically driven liquid-metal droplet[J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, (97-98): 672-679.
- [2] SIMON J, SAFFER S, KIM CH J. A liquid-filled microrelay with a moving mercury microdrop[J]. *Journal of Micro-electro-mechanical Systems*, 1997 (6): 208-216.
- [3] YOO K H, KIM J W. A novel configurable mems inertial switch using microscale liquid-metal droplet[C]. *IEEE*, 2009: 793-796.
- [4] YOO K H, PARK U, KIM J W. Development and characterization of a novel configurable MEMS inertial switch using a microscale liquid-metal droplet in a microstructured channel[J]. *Sensors and Actuators A*, 2011, 166: 234-240.
- [5] LIU T T, SU W, YANG T, *et al.*. Evaluation of the threshold trimming method for micro inertial fluidic switch based on electrowetting technology[J]. *AIP Advances*, 2014, 4: 03712.
- [6] LIU T T, SU W, YANG T, *et al.*. Vibration interference analysis and verification of micro-fluidic inertial switch[J]. *AIP Advances*, 2014, 4: 031313.
- [7] KIM J-W, KIM CH-J. Nanostructured surfaces for dramatic reduction of flow resistance in droplet-based microfluidics[C]. *IEEE*, 2002: 479-482.
- [8] FENG Y Y, ZHOU ZH Y, YE X Y, *et al.*. Passive valves based on hydrophobic microfluidics[J]. *Sensors and*

- Actuators A*, 2003, 108: 138-143.
- [9] CHO H S, KIM H-Y, KANG J Y, *et al.*. How the capillary burst microvalve works[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 306: 379-385.
- [10] CHEN J M, HUANG P-C, LIN M-G. Analysis and experiment of capillary valves for microfluidics on a rotating disk[J]. *Microfluid Nanofluid*, 2008, 4(5): 427-437.
- [11] 杜新, 张平, 刘永顺, 等. 基于PDMS和玻璃材料的毛细管被动阀临界压力分析[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(8): 1852-1858.
- DU X, ZHANG P, LIU Y SH, *et al.*. Burst pressure of capillary burst valve base on glass and PDMS[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8): 1852-1858. (in Chinese)
- [12] 陈花卫, 杨涛, 蔺怡, 等. 基于毛细管阀的微流体惯性开关建模与仿真[J]. *微纳电子技术*, 2010, 47(12): 742-747.
- CHENG H W, YANG T, LIN Y, *et al.*. Modeling and simulation of micro-fluid inertial switches based on the capillary valve[J]. *MEMS Device & Technology*, 2010, 47(12): 742-747. (in Chinese)
- [13] 蔺怡, 杨涛, 刘婷婷, 等. 惯性微流体开关阈值特性与响应历程的数值仿真[J]. *机械设计与研究*, 2012, 28(1): 90-94.
- LIN Y, YANG T, LIU T T, *et al.*. Numerical simulation on threshold characteristics and response process of micro-fluidic inertial switch[J]. *Machine Design and Research*, 2012, 28(1): 90-94. (in Chinese)

作者简介:



黄刘(1990-), 男, 四川资阳人, 博士研究生, 2012年于沈阳工业大学获得学士学位, 研究方向为智能探测与控制。E-mail: 112010201@njust.edu.cn

导师简介:



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器件的设计与工艺的研究。E-mail: njniewr@hotmail.com