

引文格式: 杜立群, 杨晓臣, 于洋, 等. 基于微电铸工艺的摩擦接触式微型惯性开关 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(6): 66-72, 81.
DU Liqun, YANG Xiaochen, YU Yang, et al. A frictional contact MEMS inertial switch based on micro electroforming technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(6): 66-72, 81.

基于微电铸工艺的摩擦接触式微型惯性开关*

杜立群^{1,2}, 杨晓臣², 于洋², 王胜羿², 刘蓬勃³, 赵剑³

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024;
2. 大连理工大学辽宁省微纳米及系统重点实验室, 大连 116024;
3. 大连理工大学汽车工程学院, 大连 116024)

[摘要] 针对微型惯性开关闭合时间短、接触弹跳问题, 设计了增强接触效果的摩擦接触式微型惯性开关。基于 MEMS 惯性开关工作原理, 建立了开关物理模型, 研究了不同类型惯性开关的闭合性能, 提出了增强接触的摩擦接触方法, 设计了摩擦接触式微型惯性开关的结构。为了对比接触性能, 基于 UV-LIGA 叠层光刻和精密微电铸工艺, 研制了 3 种不同类型的惯性开关。最后, 进行落锤试验, 测试结果显示: 施加 400g 外载加速度时, 刚性、柔性、摩擦接触式微型惯性开关的闭合时间分别为 10 μ s、80 μ s、620 μ s; 在惯性开关中引入摩擦电极, 既能延长闭合时间, 又能解决弹跳问题。研究表明, 摩擦接触式微型惯性开关在增强接触效果方面具有很大的优越性。

关键词: MEMS 惯性开关; 弹跳; 闭合时间; 摩擦接触; 微电铸工艺

A Frictional Contact MEMS Inertial Switch Based on Micro Electroforming Technology

DU Liqun^{1,2}, YANG Xiaochen², YU Yang², WANG Shengyi², LIU Pengbo³, ZHAO Jian³

(1. Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

[ABSTRACT] This paper presents a frictional contact MEMS inertial switch to solve the problem of short contact duration and bounce effect of inertial switch. The closing principle of the switch was theoretically analyzed and modeled. A method of enhancing the contact effect by frictional contact was proposed and the switch was designed based on that method. In order to compare the contact performance between frictional contact MEMS inertial switch and other switches, three kinds of inertia switches were fabricated by using UV-LIGA multilayer photolithography and precision micro electroforming. Finally, switches were tested by a standard dropping hammer system and the contact duration of the three switches were obtained. The tested results show that the contact duration of rigid, flexible and frictional contact MEMS inertial switches is 10 μ s, 80 μ s and 620 μ s respectively when applied 400g external acceleration. Both rigid and flexible contact MEMS switches have contact bounce, while frictional contact switches close stably without bounce. The frictional contact MEMS inertial switch has great advantages in enhancing the contact effect.

Keywords: MEMS inertial switch; Bounce effect; Contact duration; Frictional contact; Micro electroforming technology

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2021.06.066

MEMS (Micro-electro-mechanical systems, 微机电系统) 惯性开关是一种微型惯性器件, 具有体积小、成本

低、抗电磁干扰性强等特点, 在航空、航天、军事等领域有着广泛的应用前景^[1-3]。

* 基金项目: 国家自然科学基金(51975103, 61874019)。

传统 MEMS 惯性开关的闭合时间短暂,不利于集成系统的信号处理,为了提高系统可靠性,需要通过增加成本提高信号电路的分辨率。另外,开关闭合时往往伴随着弹跳现象,引起电气磨损和碰撞破损,影响开关的使用寿命。

为增强接触效果,常采用的方法有静电力辅助^[4]、引入压膜阻尼^[5]、电极柔性化^[6-9]等。静电力辅助虽然能够有效地增强接触效果,但是静电力的引入,失去了纯机械开关抗电磁干扰的优势,所以在实际应用中很少采用该方法^[10]。引入压膜阻尼需要制作悬空的大面积无孔质量块,制作工艺难度较大,且开关的敏感方向只能为 Z 向,应用环境受限。对比而言,电极柔性化是较优方法。在本研究之前的设计中,采用柔性电极有效延长了闭合时间,降低了接触弹跳^[2,11]。但在新设计的应用于飞机安全监测的惯性开关中,受限于设备加工能力、开关结构尺寸等,要进一步降低接触刚度存在很大的困难。本文提出一种新的接触增强方法,在设备加工能力和开关的结构尺寸等因素受限时,仍然能够有效地延长开关的闭合时间,解决弹跳问题。

为增强接触效果,本文建立了 MEMS 惯性开关的物理模型,研究了不同接触类型惯性开关的闭合性能,设计了一种新的摩擦接触式 MEMS 惯性开关。为了对比接触性能,采用 UV-LIGA 叠层光刻和精密微电铸工艺,制作了刚性接触式、柔性接触式、摩擦接触式 3 种 MEMS 惯性开关,并进行落锤试验测试。

1 开关物理模型及闭合性能

1.1 MEMS 惯性开关的物理模型

惯性开关原理如图 1 所示。锚区固定;支撑弹簧支撑质量块;质量块可移动;电极间隙为 x_0 。开关初始断开,如图 1 (a) 所示。当有 x 负方向加速度时,质量块受力如图 1 (b) 所示, F_G 为惯性力, F_k 为弹簧弹性力。开关接通如图 1 (c) 所示,此时质量块除了受到惯性力、

弹簧弹性力之外,还受到固定电极的反作用力 F_N ,受力分析见图 1 (d) 所示。

在开关闭合之前,外载惯性力作用下质量块的动力学方程为:

$$mx'' + cx' + F_k = F_G \quad (1)$$

其中, c 为阻尼系数, m 为开关质量。

外载加速度为: $a_0 \sin(\frac{\pi}{t_0}t)$ 。其中, t_0 为脉宽; a_0 为幅值,则:

$$F_G = \begin{cases} ma_0 \sin(\frac{\pi}{t_0}t), & 0 < t < t_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

当支撑弹簧的刚度为 k 时,质量块受到的弹簧弹性力为:

$$F_k = kx \quad (3)$$

开关闭合时,根据图 1 (d),质量块的动力学方程为:

$$mx'' + cx' + F_k + F_N = F_G \quad (4)$$

其中,固定电极对质量块的反作用力 F_N 与接触刚度 K 呈线性关系:

$$F_N = K(x - x_0) \quad (5)$$

其中, x_0 为电极间隙,根据式 (1) 和式 (4) 进行数值计算,可得到质量块的时间 - 位移曲线。

1.2 不同接触类型惯性开关的闭合性能分析

为研究 MEMS 惯性开关的闭合性能,预设开关质量 $m=8.858\text{mg}$, 阻尼系数 $c=0.0175$, 弹簧刚度 $k=249\text{N/m}$, 电极间隙 $x_0=130\mu\text{m}$, 求得开关阈值为 370g , 施加幅值 $a_0=400\text{g}$ 的外载加速度。

传统 MEMS 惯性开关的固定电极为刚性电极,如图 2 (a) 所示,因为接触刚度较大,故预设接触刚度 $K=70\text{kN/m}$, 利用数值解法求出质量块的时间 - 位移曲线如图 2 (b) 所示。质量块接触刚性电极后被迅速弹开,开关的闭合时间非常短暂,只有几 μs , 质量块弹开之后再次碰撞刚性电极,共发生了 3 次碰撞,开关存在接触弹跳问题。

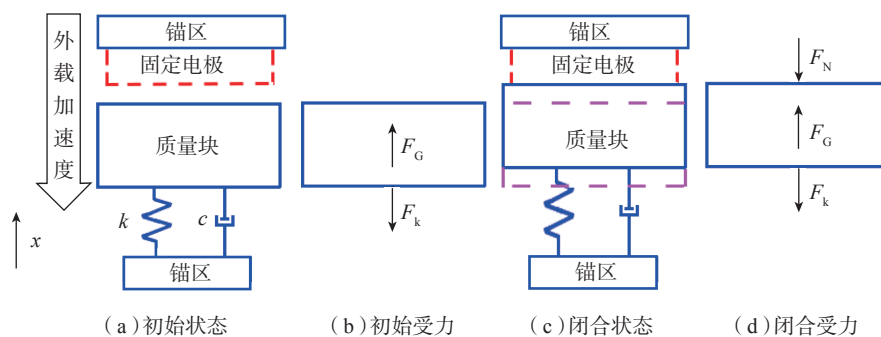


图1 MEMS惯性开关原理图

Fig.1 Schematic diagram of MEMS inertial switch

通常,为了增强接触,将图 2 (a) 所示刚性电极置换为图 3 (a) 所示柔性电极,降低接触刚度。假设接触刚度为 $K=7\text{kN/m}$,利用数值解法求出质量块的时间-位移曲线如图 3 (b) 所示。对比图 2 (b) 与图 3 (b) 可知,柔性接触将开关闭合时间延长至 $80\mu\text{s}$,但作用效果较小,且同样存在弹跳问题。

为进一步增强接触效果,降低接触刚度 K 为 0.7kN/m ,质量块时间-位移曲线如图 4 (a) 所示,可以看出,开关的闭合时间相对于图 3 (b) 再次延长,达到 $200\mu\text{s}$,但

是开关闭合过程中仍然存在弹跳问题。值得注意的是,开关两次闭合之间的时间差较短,故考虑在电极接触时引入接触阻尼。设定接触时阻尼系数 $c_c=0.0875$,得到开关时间-位移曲线如图 4 (b) 所示,引入接触阻尼后,开关闭合时间大幅度延长,闭合时间接近 1ms ,且不存在弹跳问题。

综上所述,刚度越低,开关闭合时间越长;引入适当的接触阻尼可以解决弹跳问题。所以,为了增强接触效果,在设计新型惯性开关时,需要同时降低接触刚度和

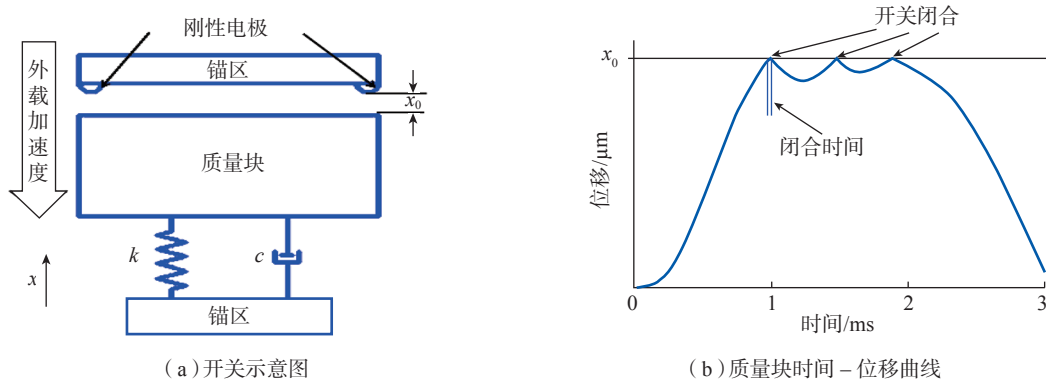


图2 刚性接触式惯性开关及闭合性能

Fig.2 Schematic diagram and contact performance of rigid contact switch

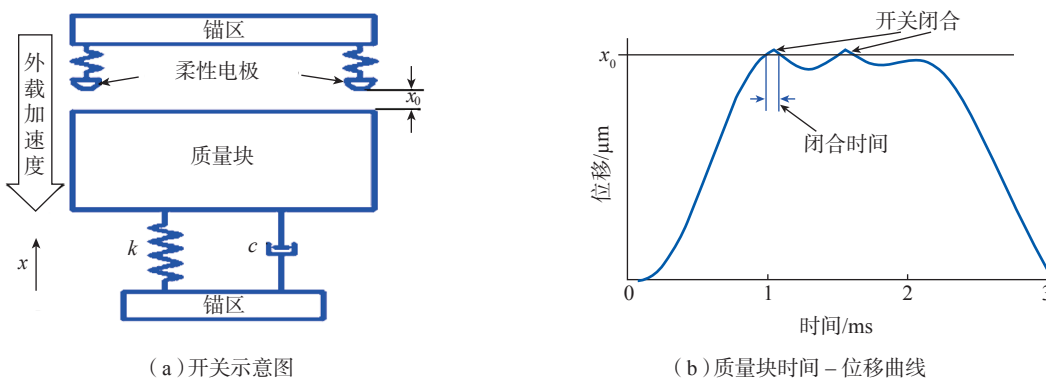


图3 柔性接触式惯性开关及闭合性能

Fig.3 Schematic diagram and contact performance of flexible contact switch

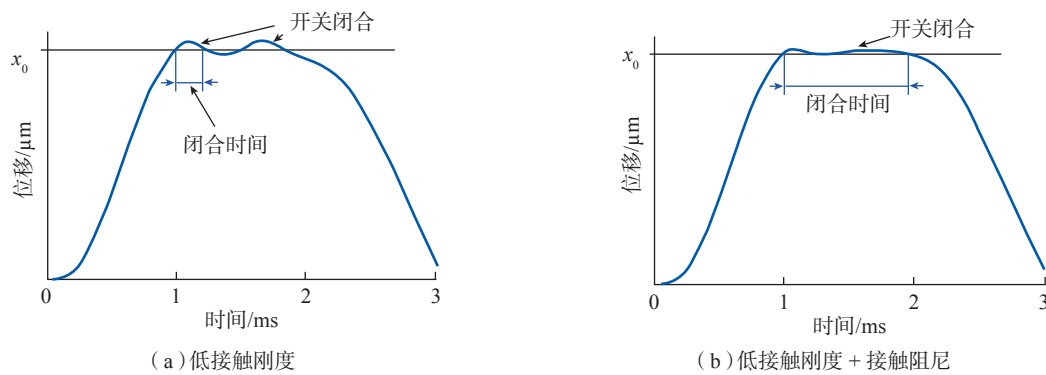


图4 增强接触开关的闭合性能

Fig.4 Contact performance of enhancing contact switches

提高接触阻尼。

2 结构设计

刚性电极与柔性电极分别如图 5 (a) 和 (b) 所示, 柔性电极虽然在一定程度上增强了接触效果, 但有时受限于设备加工能力与开关结构尺寸等, 进一步降低接触刚度存在很大困难, 故在外形尺寸和线宽不变的情况下, 设计了如图 5 (c) 所示的摩擦电极。由上文可知, 为了增强接触效果, 在设计新型惯性开关时, 需要同时降低接触刚度和提高接触阻尼。摩擦电极能够同时具有这两种作用, 质量块接触摩擦电极时的受力分析如图 6 所示, 其中 $f=\mu N$ 为切向摩擦力, μ 为摩擦系数, N 为法向作用力。

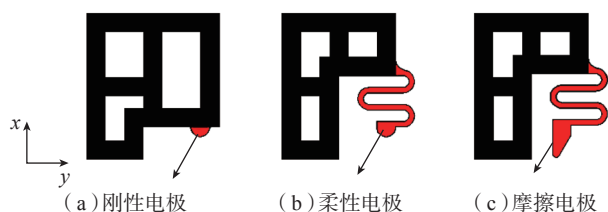


图5 3种不同的固定电极
Fig.5 Three kinds of fixed electrodes

假定摩擦电极在 y 方向的刚度为 k_1 , 求得电极在 x 方向对质量块的作用力为:

$$F_N = \frac{2(\sin \theta \pm \mu \cos \theta) \tan \theta}{(\cos \theta \pm \mu \sin \theta)} \cdot k_1 x \quad (6)$$

令 $\mu=0$ 可得接触刚度: $K=2\tan^2\theta \times k_1$ 。剩余项为接触阻尼 $c_c=F_N/x-K$ 。

通过计算可知, 相对于刚性、柔性电极, 摩擦电极通过调整接触角 θ , 能够在不改变最大外形尺寸及弹簧线宽的情况下降低接触刚度, 并引入了适当的摩擦阻尼, 起到了接触增强的作用。另外, 摩擦接触式开关具有抗过载与自清洁能力, 如图 7 所示, 摩擦电极与质量块的接触部位可划分为 3 个区域: 低负载接触区、过渡摩擦区、过载止动区。当较大的过载加速度作用时, 质量块划过渡摩擦区, 与过载止动区接触。柔性的过载止动区能够防止剧烈碰撞损坏电极。质量块与摩擦电极在接触时一直处于滑动摩擦状态, 可以将电弧损伤所产生的氧化层去除, 降低接触电阻。

摩擦电极为摩擦接触式开关的重要结构, 另外, 开关选用两侧弹簧支撑的结构提高系统稳定性, 质量块均匀开孔以防止残余应力引起结构翘曲变形, 固定电极为摩擦电极。摩擦接触式 MEMS 惯性开关的三维模型如图 8 所示, 主要尺寸见表 1。

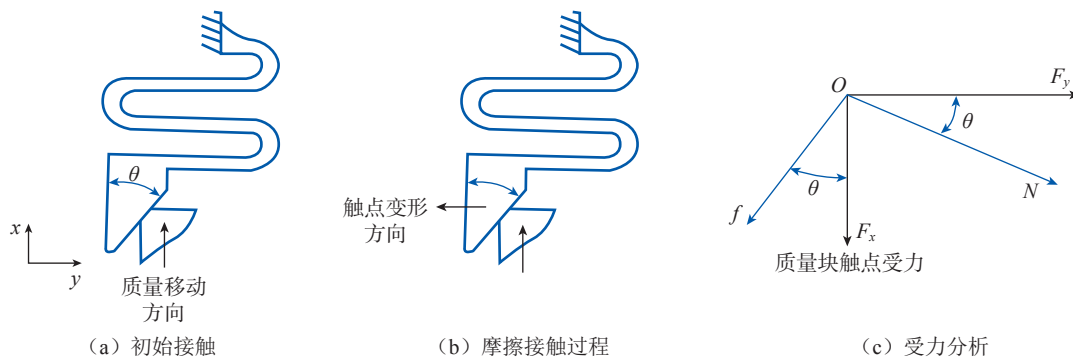


图6 摩擦接触时受力分析
Fig.6 Analysis of forces on frictional contact

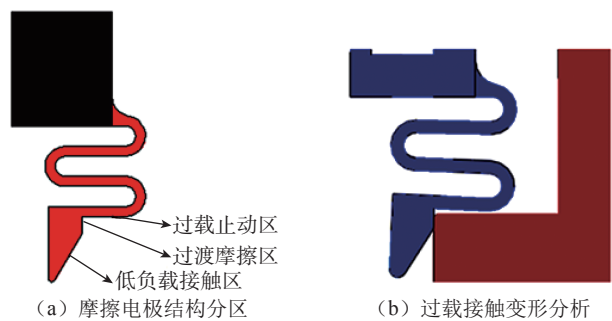


图7 过载时的接触分析
Fig.7 Analysis of overload contact

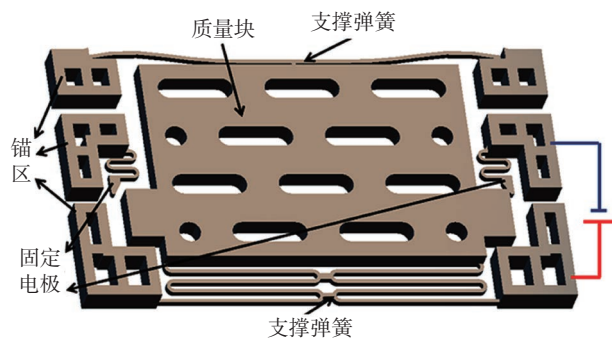


图8 MEMS惯性开关三维模型
Fig.8 3D model of designed MEMS inertial switch

3 开关制作

通过第2节分析可知,3种开关的接触效果对比为:摩擦接触式优于柔性接触式,刚性接触式开关最差。对刚性、柔性、摩擦接触式MEMS惯性开关均进行制作,在制作过程中,保持关键尺寸不变,开关的重要结构及布局不变,与开关阈值相关的参数不变,只改变固定电极的结构,3种不同开关的三维模型如图9所示。

3种MEMS惯性开关只有固定电极的区别,且固定电极均处于第2层,故可以采用UV-LIGA工艺在金属基底上一批制作完成。开关一共分为3层,第1层为支撑辅助层,起支撑质量块与悬空弹簧的作用。第2层是悬空结构的制作,主要完成弹簧的制作。为了获得较大质量的质量块并保证开关的阈值精度,通过第3层进行质量补偿^[10]。

开关制作工艺见图10,使用负性光刻胶SU-8作为电铸用母模具,选用添加氯化镍、硼酸等添加剂的氨基磺酸镍溶液作为电铸液,采用铜作为导电种子层,进行3次光刻、电铸。

主要工艺流程如下:

(1)基板预处理。首先对金属基板进行研磨抛光至镜面,然后用丙酮、乙醇依次进行清洗,最终用去离子

水冲洗、氮气吹干。

(2)SU-8胶光刻。使用匀胶机将SU-8胶均匀旋涂,3层胶膜厚度分别为70 μm 、80 μm 、150 μm 。然后置于85 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中适当时间烘干。将完全冷却的胶膜进行曝光,紫外曝光剂量分别为:300 mJ/cm^2 、400 mJ/cm^2 、600 mJ/cm^2 。再次烘焙少许时间,随后将其置入显影液中低频搅拌3min,最终得到所需的光刻胶母模具。

(3)电铸。电铸液由 $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (550 g/L)、 NiCl_2 (10 g/L)、 H_3BO_3 (35 g/L)组成。电铸液温度50 $^{\circ}\text{C}$ 、 $\text{pH}=3.8\sim 4.2$,电铸电流密度1 A/dm^2 。3次电铸的时间分别为10h、10h、20h。

(4)溅射。使用溅射仪在第1层结构的表面溅射薄薄的一层铜。

(5)去胶释放结构。使用无机酸将SU-8胶等去除干净,制得的3种不同接触类型的开关局部图见图11。

最后连接外部电路,完成封装,为下一步的动态性能测试做准备。

4 开关动态性能测试

设计开关的静态阈值为370g,根据参考文献[10]中的阈值公式(3)计算可知,开关的动态阈值在200~400g之间浮动。故为了测试开关动态性能,在200~400g范围内施加外载加速度。当加速度低于200g时,3种开关均没有闭合,在大于210g加速度时开关闭合。

当外载加速度为210g时,刚性、柔性、摩擦接触式开关的测试结果分别如图12(a)、(b)、(c)所示。图12中上方信号显示了外载加速度的变化规律,下方信号为惯性开关的通、断信号。低电平为断开,高电平为闭合,高电平持续的时间为闭合时间。

3种不同类型开关的闭合时间的对比如图12(d)所示。在210g、3ms半正弦加速度下,刚性、柔性、摩擦接触式微型惯性开关的闭合时间分别为13 μs 、80 μs 、200 μs 。摩擦接触式惯性开关的闭合时间最长。

表1 MEMS惯性开关关键参数

Table 1 Key parameters of MEMS inertial switch

结构	参量	数值
质量块	面积/ mm^2	4.86
	厚度/ mm	0.2
弹簧	圆角半径/ mm	0.1
	线宽/ μm	38
	梁长/ mm	1.45
间隙	电极间隙/ mm	0.13
	质量块-底座间隙/ μm	60

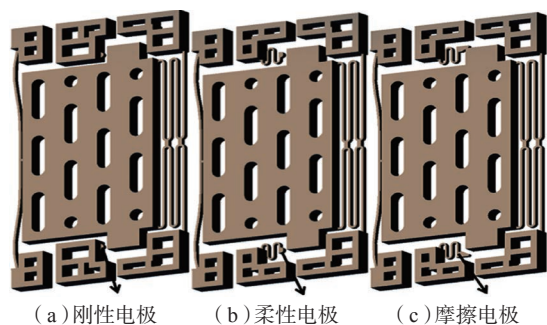


图9 3种MEMS惯性开关三维模型

Fig.9 3D model of three kinds of MEMS inertial switch

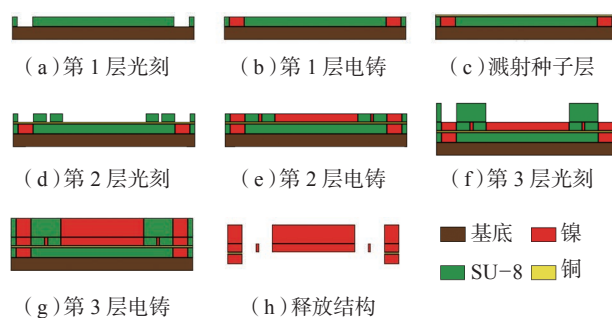


图10 开关的制作工艺

Fig.10 MEMS inertial switch manufacturing process

施加 400g 的外载加速度,刚性、柔性、摩擦接触式开关的测试结果分别如图 13 (a)、(b)、(c)所示。

从测试结果可知,刚性、柔性、摩擦接触式 MEMS 惯性开关的闭合时间分别为 10 μ s、80 μ s、620 μ s,摩擦接触式惯性开关明显优于其他两种开关。闭合时间对比如图 13 (d)所示。当外载惯性加速度相同时,刚性接触式开关闭合了 4 次,柔性接触式开关闭合了两次,均存在弹跳问题。而具有摩擦电极的摩擦接触式开关只闭合了一次,没出现弹跳问题。摩擦电极能够有效解决

接触弹跳问题,摩擦接触式微型惯性开关在增强接触效果方面具有很大的优越性。

将摩擦接触的方式引入惯性开关设计,一方面提升了开关的闭合性能,另一方面也会影响开关的使用寿命。电极间的摩擦可能会引起结构磨损,导致开关寿命降低,但摩擦也可能会提升开关的使用寿命。这是因为摩擦电极降低了碰撞时的相互作用力,防止了剧烈碰撞而导致的电极损坏。由于刚性或柔性开关电极间的接触多为点接触,较大的瞬间电流容易导致电弧损伤,电

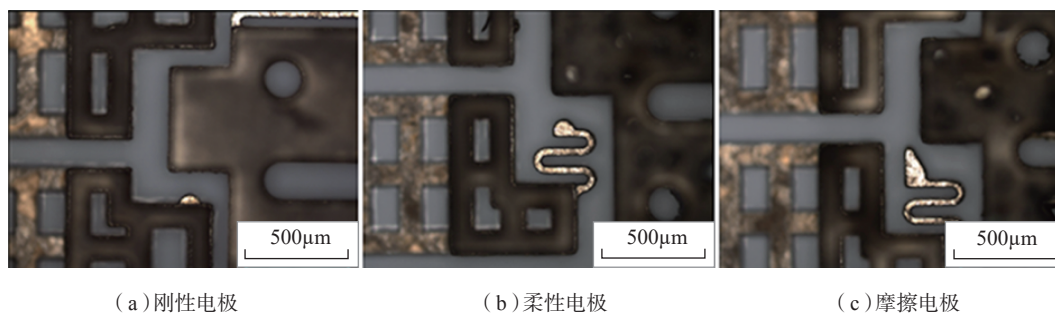


图11 3种不同接触类型惯性开关局部图

Fig.11 Three kinds of fixed electrodes of manufactured inertial switches

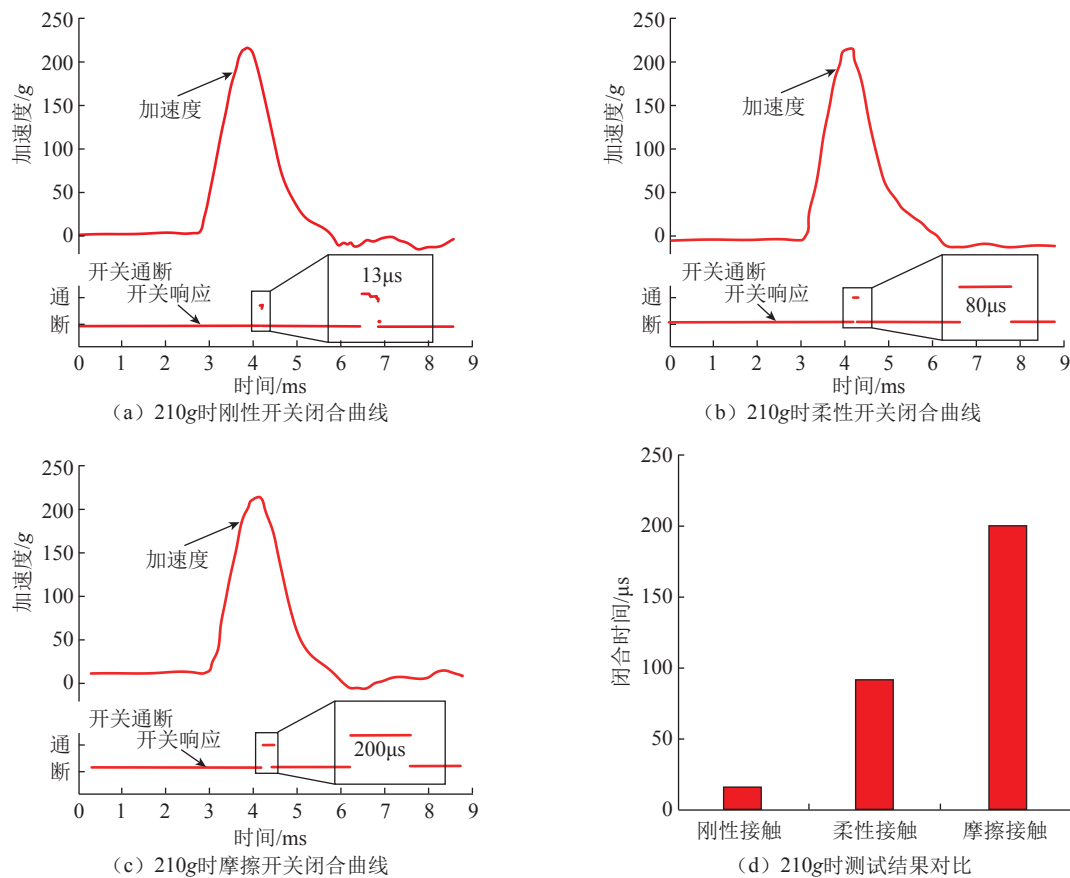


图12 210g加速度的测试结果

Fig.12 Tested results under 210g acceleration

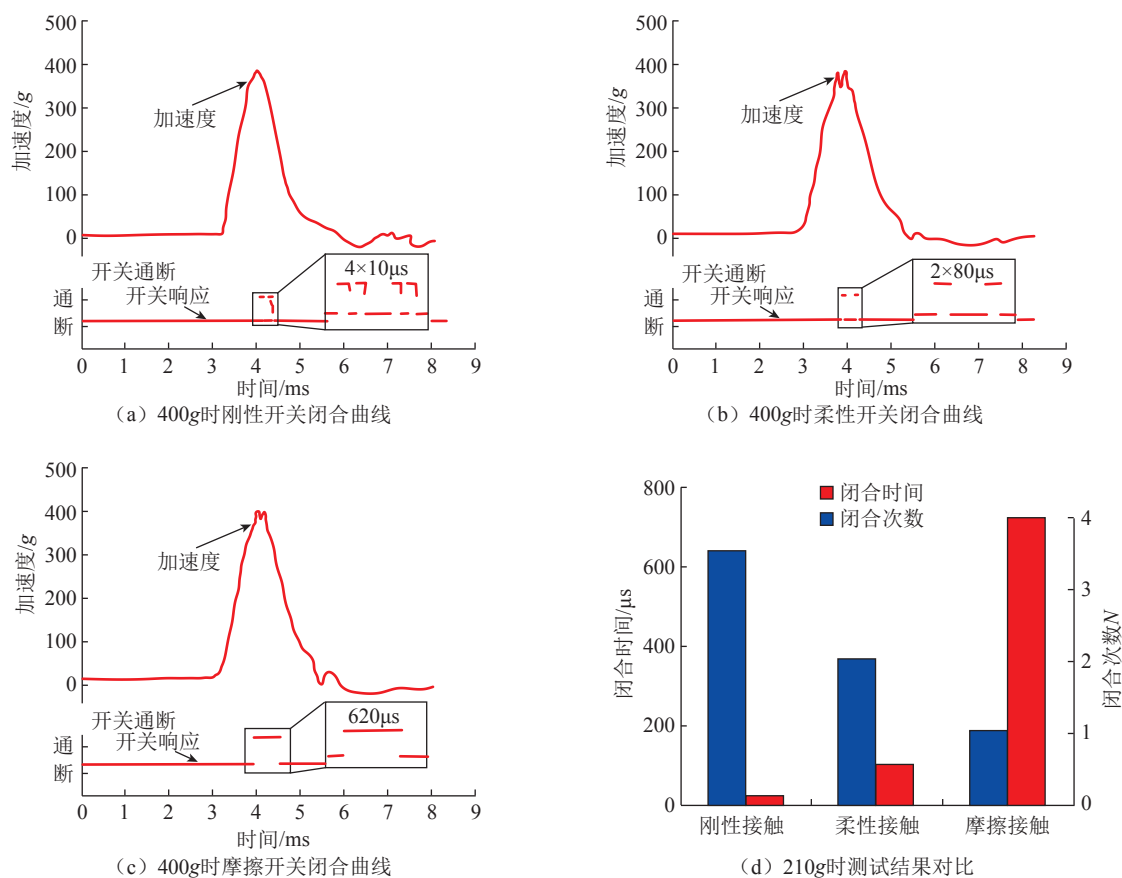


图13 400g加速度的测试结果
Fig.13 Tested results under 400g acceleration

极接触表面的氧化层加厚,闭合电阻逐渐提高,直至开关失去工作能力。而摩擦接触本身具有自清洁作用,可将氧化层去除,从这方面考虑,摩擦接触又有助于提高开关寿命。

5 结论

基于微电铸工艺,本文提出了带有摩擦电极的摩擦接触式 MEMS 惯性开关。采用理论分析与试验验证相结合的方法,对比了摩擦接触式惯性开关与其他接触类型开关之间的区别。试验结果表明,刚性、柔性、摩擦接触式微型惯性开关的闭合时间分别为 $10\mu\text{s}$ 、 $80\mu\text{s}$ 、 $620\mu\text{s}$;在惯性开关中引入摩擦电极,既能延长闭合时间,又能解决弹跳问题。研究结果表明,摩擦接触式微型惯性开关在增强接触效果方面显示出了很大的优越性。

参考文献

[1] 杜立群,陶友胜,李爱琪,等.基于电化学沉积的高深宽比

无源 MEMS 惯性开关的研制[J].航空制造技术,2017,60(14):24-29.

DU Liqun, TAO Yousheng, LI Yuanqi, et al. Development of high-aspect ratio passive MEMS inertial switch based on electrochemical deposition technique[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(14): 24-29.

[2] 李保发, 聂伟荣, 席占稳. 平面万向双阈值 MEMS 惯性开关[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(1): 66-70, 75.

LI Baofa, NIE Weirong, XI Zhanwen. Planar universal MEMS inertial switch with double threshold[J]. Journal of Detection & Control, 2016, 38(1): 66-70, 75.

[3] DU L Q, LI Y, ZHAO J, et al. A low-g MEMS inertial switch with a novel radial electrode for uniform omnidirectional sensitivity[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2018, 270: 214-222.

[4] JIA M J, LI X X, SONG Z H, et al. Micro-cantilever shocking-acceleration switches with threshold adjusting and 'on'-state latching functions[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(3): 567-575.

[5] PENG Y C, WEN Z Y, LI D L, et al. A low-G silicon inertial micro-switch with enhanced contact effect using squeeze-film damping[J]. Sensors, 2017, 17(2): 387.

(下转第 81 页)

of surface integrity in high speed milling of gamma titanium aluminide under dry and minimum quantity lubricant conditions[J]. Procedia CIRP, 2015, 26: 367–372.

[5] PERVAIZ S, ANWAR S, QURESHI S, et al. Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (MQL) based techniques[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2019, 6(1): 133–145.

[6] BENJAMIN D M, SABARISH V N, HARIHARAN M V, et al. On the benefits of sub-zero air supplemented minimum quantity lubrication systems: An experimental and mechanistic investigation on end milling of Ti–6–Al–4–V alloy[J]. Tribology International, 2018, 119: 464–473.

[7] 陈博川, 袁松梅, 朱光远, 等. 钛合金铣削加工中冷却润滑方式的作用效果研究 [J]. 航空制造技术, 2019, 62(21): 83–93.

CHEN Bochuan, YUAN Songmei, ZHU Guangyuan, et al. Effects of different cooling and lubrication methods on milling of titanium alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(21): 83–93.

[8] MIA M, BASHIR M A, KHAN M A, et al. Optimization of MQL flow rate for minimum cutting force and surface roughness in end milling of hardened steel (HRC 40)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(1–4): 675–690.

[9] DO T V, HSU Q C. Optimization of minimum quantity lubricant conditions and cutting parameters in hard milling of AISI H13 steel[J]. Applied Sciences, 2016, 6(3): 83.

[10] 李强, 巩亚东, 梁彩霞, 等. 基于水基 MQL 的 DD5 单晶合金铣削表面粗糙度研究 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2018, 39(9): 1293–1298.

LI Qiang, GONG Yadong, LIANG Caixia, et al. Research on milled surface roughness of DD5 single crystal superalloy based on water-based MQL method[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(9): 1293–1298.

[11] 李志山, 史耀耀, 辛红敏, 等. 灰色关联度优化钛合金盘铣开槽工艺参数 [J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(1): 139–148.

LI Zhishan, SHI Yaoyao, XIN Hongmin, et al. Grey relation grade optimizing process parameters of disk milling grooving for titanium alloy[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(1): 139–148.

[12] 李体仁, 胡晓强. 高速铣削钛合金 TC4 切削力试验研究及切削参数优化 [J]. 机床与液压, 2019, 47(1): 45–48.

LI Tiren, HU Xiaoqiang. Experimental research on cutting force of high speed milling titanium alloy TC4 and optimization of cutting parameters[J]. Hydromechanics Engineering, 2019, 47(1): 45–48.

[13] TOSUN N, PIHTILI H. Gray relational analysis of performance characteristics in MQL milling of 7075 Al alloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 46(5–8): 509–515.

[14] KHAN A M, JAMIL M, UL HAQ A, et al. Sustainable machining. Modeling and optimization of temperature and surface roughness in the milling of AISI D2 steel[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2019, 71(2): 267–277.

[15] ISKANDAR Y, TENDOLKAR A, ATTIA M H, et al. Flow visualization and characterization for optimized MQL machining of composites[J]. CIRP Annals, 2014, 63(1): 77–80.

[16] ZHUG Y, YUANS M, CHEN B C. Numerical and experimental optimizations of nozzle distance in minimum quantity lubrication (MQL) milling process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101(1–4): 565–578.

[17] LIUZ Q, CAIX J, CHEN M, et al. Investigation of cutting force and temperature of end-milling Ti–6Al–4V with different minimum quantity lubrication (MQL) parameters[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(8): 1273–1279.

通讯作者: 袁松梅, 教授, 博士生导师, 工学博士, 研究领域为先进制造, E-mail: yuansm@buaa.edu.cn。

(责编 阳光)

(上接第 72 页)

[6] XI Z W, ZHANG P, NIE W R, et al. A novel MEMS omnidirectional inertial switch with flexible electrodes[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 212: 93–101.

[7] YANG Z Q, ZHU B, CHEN W G, et al. Fabrication and characterization of a multidirectional-sensitive contact-enhanced inertial microswitch with a electrophoretic flexible composite fixed electrode[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2012, 22(4): 045006.

[8] CAI H G, YANG Z Q, DING G F, et al. Development of a novel MEMS inertial switch with a compliant stationary electrode[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(7): 801–808.

[9] LEE J I, SONG Y, JUNG H, et al. Deformable carbon nanotube-contact pads for inertial microswitch to extend contact time[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(12): 4914–4920.

[10] 陈光焱, 王超. 微惯性开关设计技术综述 [J]. 信息与电子工程, 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.

[11] 杜立群, 王伟泰, 杜成权, 等. 基于微电铸工艺的镍微型惯性开关的研制 [J]. 电加工与模具, 2019(2): 47–51.

DU Liqun, WANG Weitai, DU Chengquan, et al. Development of nickel micro inertial-switch based on micro electroforming technology[J]. Electromachining & Mould, 2019(2): 47–51.

通讯作者: 杜立群, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为微器件 UV-LIGA 加工技术、微模具制造、超声在微纳加工中的应用等, E-mail: duliqun@dlut.edu.cn。

(责编 阳光)