

硅基 MEMS 后坐保险装置失效分析与优化

杨沫¹, 聂伟荣¹, 张越², 王鹤¹, 程宝林¹, 宁卓翔¹, 曹云¹, 席占稳¹, 王灵¹

(1.南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094;
2.中国航发南京航空动力有限责任公司 产品研发中心, 江苏 南京 211111)

摘要:为提升硅基 MEMS 后坐保险装置的载荷识别能力与抗过载性能,基于平行弹轴弹药引信安解装置,开展硅基 MEMS 后坐保险装置研究。基于弹簧-质量块系统理论分析了后坐保险装置位移响应,搭建了马希特锤击与可视化试验平台。针对某后坐保险装置样机开展 3 个典型方向的冲击试验,揭示了其抗过载能力不足的问题。据此,提出一种改进型后坐保险装置,通过引入固定锚点来约束质量块横向位移。基于有限元仿真,对比分析了改进前后装置的位移响应及齿形机构应力分布,结果表明锚点结构有效提升了装置性能。采用深反应离子刻蚀工艺制备改进样机,并进行冲击试验验证。试验结果表明,改进装置的抗过载能力显著增强:在后坐力方向可承受多次高幅值冲击才发生功能失效,而在横向及反后坐方向冲击下,装置未出现明显损伤。研究结果可为同类硅基 MEMS 后坐保险装置的失效分析和优化提供参考。

关键词:硅基;引信;微机电系统;有限元仿真;改进设计;后坐保险装置;冲击试验

中图分类号:TJ430

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2026)02-0288-09

安解装置作为引信的重要安全装置,通常由多种保险组成,其中后坐保险装置作为惯性保险,在识别环境方面起着重要作用^[1]。在多种武器的引信安解装置中,后坐保险装置通常都作为安解装置从保险位置转换为武装位置的第一道保险。因此,其动态响应特性直接决定了安解装置的安全性与可靠性。随着引信朝着小型化、智能化的方向发展,微机电系统(microelectromechanical system, MEMS)技术与引信安解装置的结合与融入越来越密切^[2]。

近年来, MEMS 技术发展迅速,该技术已经广泛应用于消费电子、汽车工业、医疗健康、航空航天等领域,其中国防军事领域的 MEMS 后坐保险装置的应用也越来越广泛^[3-10]。因此,国内外研究人员积极展开了对金属基和硅基 2 类 MEMS 安解装置的相关研究。Robinson 等^[11]提出了一种通过 Z 型齿识别载荷的后坐保险机构,用于中大口径炮弹引信。

孙毅等^[12-13]基于小口径榴弹引信设计了一种硅基 MEMS 安全系统,其中后坐保险机构采用了 C 形弹簧,尺寸占比较小,满足小口径弹药对安全系统批量化、高可靠的需求。Robert^[14]介绍了以边缘擒纵机构为核心的 MEMS 安解装置,后坐弹片在发射过程后坐环境力的作用下可以解除保险。Ni 等^[15]提出了一种硅基微质量弹簧系统的结构设计并进行了优化,该系统可用作火炮引信的后坐保险装置。Wang 等^[16]提出了一种垂直于弹轴布置的金属悬臂梁后坐保险机构,建立了连续动力学模型并进行了相应的分析。Zhu 等^[17]提出了一种具有动态加速度带通特性的新型硅基惯性微开关,可以识别不同的加速度载荷而实现滤波机制,亦可以应用在引信的后坐保险装置中。国外 MEMS 技术领域积淀深厚,国内研究虽起步较晚,但 MEMS 惯性开关研究较为活跃,结构形式多样,广泛应用在后坐保险装置中。目前对金属基器件的研究较多,多采用 UV-LIGA 工艺制造,尽管硅基加工技术已较为成熟,但由于引信工作环境中所承受的冲击通常更为剧烈,针对硅基 MEMS 后坐保险机构的抗过载能力设计与改进研究仍相对有限。

收稿日期:2025-07-04

基金项目:江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX25_0777)与国家自然科学基金(52475062)资助

作者简介:杨沫(1999—),博士研究生

通信作者:聂伟荣(1969—),教授 e-mail:njniewr@njust.edu.cn

近年来,由于硅材料集成性好、易于批量加工等特点,各研究单位加大了对非金属材料硅制成的后坐保险装置的研究。然而,随着装置尺寸微型化至微米级,MEMS 后坐保险装置仍需确保其环境负载识别能力。同时,由于硅断裂韧性低且缺乏塑性变形能力,硅基 MEMS 器件在受到冲击后极易发生脆性断裂和破坏,产生多种失效形式,抗高过载能力较差。因此,开展硅基后坐保险机构的综合研究,着力提升后坐保险装置抗高过载能力始终是该领域的重要研究方向。

本文分析了平行弹轴布置的后坐保险装置基本原理,进行了相应的理论分析,建立了试验平台,针对某后坐保险装置进行了试验和分析,并基于试验结果提出了改进的后坐保险装置,对改进的后坐保险装置进行了仿真分析和试验研究。

1 后坐保险装置分析

1.1 后坐保险装置工作原理

后坐保险装置的功能是保证引信安解装置的工作安全性。某平行弹轴布置的后坐保险装置原理图如图 1 所示,该装置由弹簧-质量块系统、闭锁结构和齿形结构组成。该后坐保险装置主要通过运动过程中质量块齿形结构之间的相互作用实现。在发射环境下,质量块与齿形结构进行多次碰撞后完成闭锁,而在勤务环境下,质量块在碰撞中消耗了大量的能量,使质量块无法达到闭锁位移,进而保证了引信安解装置的安全性。通过调整弹簧-质量块系统固有频率和齿形的结构参数,可以实现相应的设计指标。

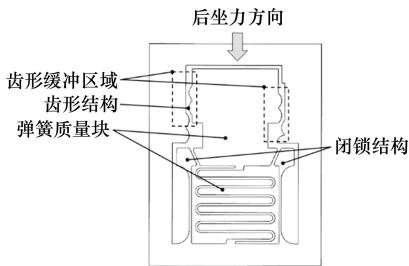


图 1 某后坐保险装置原理图

1.2 弹簧质量块系统理论分析

后坐保险装置可以简化为弹簧质量块系统,一般为单自由度弹簧-质量-阻尼系统^[18]。根据牛顿运动定律可知

$$m_1 \ddot{u} + c \dot{u} + k_1 u = 0 \quad (1)$$

式中: k_1 为弹簧刚度; m_1 为质量块质量。由于空气阻尼、薄膜阻尼等对微结构影响不大,暂不考虑这些阻尼对结构的影响,取 $c = 0$ 。而固有频率 $\omega_n = \sqrt{k_1/m_1}$, 则运动方程可以改写为

$$\ddot{u} + \omega_n^2 u = 0 \quad (2)$$

中大口径榴弹引信 MEMS 后坐保险装置应用环境的冲击加速度可近似为半正弦加速度。半正弦加速度载荷曲线 $a(t)$ 为

$$a(t) = \begin{cases} a_0 \sin\left(\frac{\pi}{T_b} t\right), & 0 \leq t < T_b \\ 0, & t \geq T_b \end{cases} \quad (3)$$

因此,单自由度弹簧质量块系统受到外部激励 $a(t)$ 的扰动时($0 \leq t < T_b$),运动学方程为

$$m_1 \ddot{u}_1(t) + k_1 u_1(t) = m_1 A \sin \omega t \quad (4)$$

式中: $\omega = \pi/T_b$, T_b 为加速度载荷脉宽。

引入初始条件, $u_1(0) = 0, \dot{u}_1(0) = 0$, 可得运动平衡方程的解

$$u_1(t) = \frac{a_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \left(\sin \omega t - \frac{\omega}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \quad (5)$$

当冲击载荷消失后,弹簧质量块系统进入自由振动阶段,即

$$m_1 \ddot{u}_2(t) + k_1 u_2(t) = 0 \quad (6)$$

同理可以确定 $t \geq T_b$ 阶段运动方程的解为

$$u_2(t) = u_1(T_b) \cos \omega_n(t - T_b) + \frac{\dot{u}_1(T_b)}{\omega_n} \sin \omega_n(t - T_b) \quad (7)$$

单自由度弹簧质量块位移响应分析的目的是计算其最大响应位移以及最大位移出现的时刻,进一步,可以确定不同频率对应的最大位移响应,即

$$X_{\max} = \begin{cases} \frac{a_0}{\omega_n^2 - \omega^2} \left(\sin\left(\frac{2\pi n \omega}{\omega_n + \omega}\right) - \frac{\omega}{\omega_n} \sin\left(\frac{2\pi n \omega}{\omega_n + \omega}\right) \right) & \omega_n > \omega \\ \frac{a_0 \omega}{|\omega_n^2 - \omega^2| \omega_n} \sqrt{2 - 2 \cos(\omega_n T_b)} & \omega_n < \omega \end{cases} \quad (8)$$

2 后坐保险装置失效分析

2.1 试验平台的搭建

图 2 为试验平台的图片。试验平台由马希特锤击系统和可视化平台组成。马希特锤击系统可以通

过冲击模拟半正弦加速度信号,然后通过加速度传感器经电荷放大器后显示在示波器上。其中,加速度传感器为 CA-YD-111 型压电加速度传感器,允许的最大加速度为 $5\times10^5\text{ m/s}^2$ 。该平台可以模拟器件在跌落环境中受到的冲击,而可视化系统则可以清晰地观察锤击后的器件状态,并将可视化结果以图片的形式输出,便于进一步分析样机的状态。

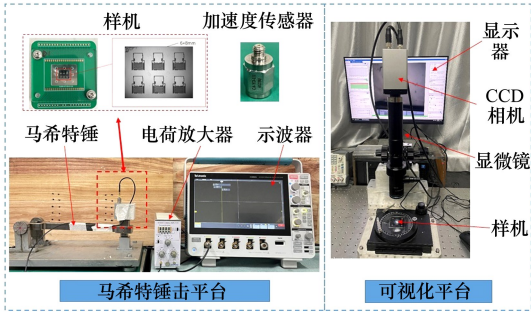


图 2 试验平台

2.2 试验分析

针对第 1.1 节提出的后坐保险机构原理样机进行抗过载试验,试验采用图 2 中所示的样机,每组样机有 6 个器件。为保证试验严谨,进行后坐力方向、横向和后坐力反方向 3 个方向的冲击试验。首先对样机进行了 7 次沿后坐力方向的冲击,载荷幅值和脉宽分别为 $(921\text{g}, 541\text{ }\mu\text{s})$, $(1\text{ }230\text{g}, 536\text{ }\mu\text{s})$, $(1\text{ }610\text{g}, 316\text{ }\mu\text{s})$, $(2\text{ }170\text{g}, 286\text{ }\mu\text{s})$, $(4\text{ }730\text{g}, 79\text{ }\mu\text{s})$, $(5\text{ }860\text{g}, 144\text{ }\mu\text{s})$, $(12\text{ }800\text{g}, 86\text{ }\mu\text{s})$ 。

冲击过程中,所有后坐保险机构均未闭锁,前 6 次冲击结束时,仅有 3 号器件发生了弹簧断裂,4 号器件的质量块与弹簧连接处发生断裂,而在第 7 次冲击后,除了 5 号器件完好,其余器件均被破坏。此时,观察锤击后的器件(见图 3a))可以发现,1~4 号及 6 号器件全部被破坏,且断裂的位置主要发生在质量块与弹簧的连接处。这说明,弹簧根部是失效的重点发生部位,在后续利用高速摄影机拍摄样机锤击过程时发现,当后坐保险装置受到冲击时,弹簧与质量块发生了运动倾斜,质量块的运动幅度较大,且质量块与弹簧反方向倾斜拉扯,造成了连接处的断裂,并且齿形结构由于质量块的大幅度运动撞击而产生了严重的剥落。图 3b)为锤击过程中样机的高速摄影图像。

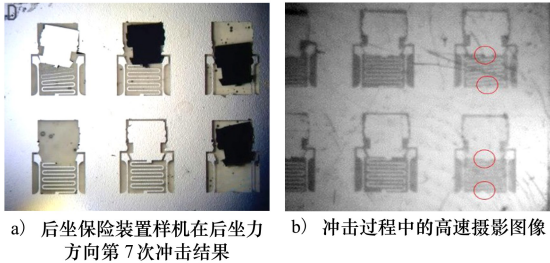


图 3 冲击试验

对 5 号器件进行横向冲击,载荷幅值和脉宽分别为 $(8\text{ }000\text{g}, 100.03\text{ }\mu\text{s})$ 和 $(10\text{ }000\text{g}, 89.29\text{ }\mu\text{s})$,齿形、质量块边缘等位置发生了较为严重的剥落,可能会影响器件的正常功能。横向锤击后的器件如图 4a)所示。

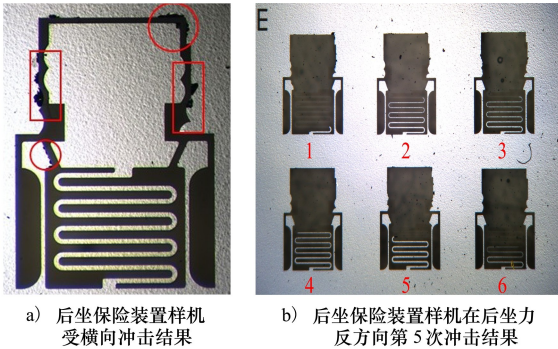


图 4 冲击试验

最后,取 1 组新的样机,对样机进行 5 次后坐力反方向的冲击,载荷幅值和脉宽分别为 $(1\text{ }940\text{g}, 282.7\text{ }\mu\text{s})$, $(9\text{ }540\text{g}, 92.31\text{ }\mu\text{s})$, $(12\text{ }100\text{g}, 86.38\text{ }\mu\text{s})$, $(13\text{ }200\text{g}, 81.68\text{ }\mu\text{s})$, $(12\text{ }100\text{g}, 81.31\text{ }\mu\text{s})$,在第 2 次冲击结束时,4 号和 6 号器件便在弹簧处发生了断裂,观察 5 次冲击后的器件(见图 4b))可以发现,器件全部被破坏,失效全部是由连接质量块的弹簧发生断裂导致。

试验结果表明,该后坐保险装置在运动过程中,质量块的运动不受限制,后坐力方向和后坐力反方向的试验发生了严重的失效行为,在质量块与齿形结构碰撞后,弹簧的强度无法承受质量块较大的横向位移,进而发生严重断裂。横向冲击时尽管未发生完全失效,但齿形结构严重剥落。因此,改进后坐保险装置结构,提升后坐保险装置抗高过载性能是重要的研究方向。

3 后坐保险装置改进与分析

3.1 后坐保险装置结构改进

为了提高后坐保险装置的抗过载能力,改善后坐保险装置的载荷识别能力,在质量块的中心增加了一个固定锚点,限制质量块的横向位移,在保证装置功能的前提下减小了易损坏部件之间的相互碰撞。其中,改进后的后坐保险装置示意图及关键参数分别如图 5 和表 1 所示。作为改进的关键结构,主要考虑了质量块质心变化、深反应离子刻蚀工艺的特征尺寸极限和结构强度、质量块中心的可用空间等问题,对锚点位置、尺寸及运动间隙进行控制,进而确定了锚点外形尺寸。

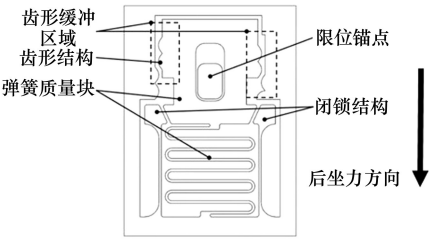


图 5 改进的后坐保险装置原理图

表 1 后坐保险装置关键参数

关键参数	值
齿宽/ μm	170
齿高/ μm	40
弹簧线宽/ μm	28
闭锁梁宽/ μm	26
锚点外形(长,宽,高)/ μm	(370,260,100)

3.2 仿真分析

带有齿形轨道机构的后坐保险装置运动非线性较强,而改进后的结构增加了锚点,进一步复杂化了这一运动,因而通过公式推导的方式很难得出准确的位移响应和强度理论,可以通过有限元分析的方式直观反映这一强非线性运动的动态响应结果和应力分布趋势。采用 LS-DYNA 进行仿真分析,其中,设置硅的材料参数密度、弹性模量、泊松比分别为 $2\,300\text{ kg/m}^3$, 130 GPa , $0.28^{[19-22]}$ 。其中,锚点和框架施加固定约束,弹簧质量块系统和闭锁结构施加面外位移约束。

为了验证改进后的后坐保险装置基本功能,通

过有限元分析方法模拟结构在受到运动方向的发射载荷和跌落载荷时的工作状态。发射载荷采用 $(6\,000\text{g}, 3\text{ ms})$ 半正弦载荷脉宽模拟,跌落载荷采用 $(15\,000\text{g}, 150\text{ }\mu\text{s})$ 半正弦载荷脉宽模拟,判断装置是否达到 $200\text{ }\mu\text{m}$ 的闭锁位移。改进的后坐保险装置仿真位移响应如图 6 所示。后坐保险装置在受到跌落载荷作用时,质量块位移无法达到闭锁位移 $200\text{ }\mu\text{m}$,而后坐保险装置在受到发射载荷作用时,质量块在锚点的引导和约束作用下,沿着加速度方向运动,齿形轨道机构相互碰撞,最后锁钩与闭锁梁互锁,质量块位移达到了 $200\text{ }\mu\text{m}$ 并可靠闭锁。

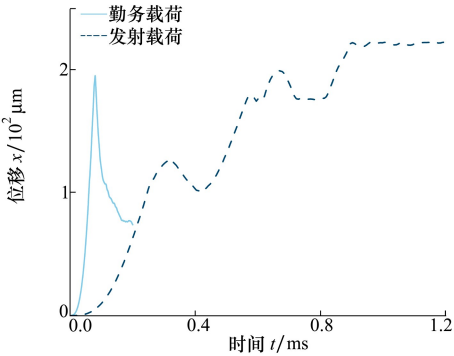


图 6 改进后坐保险装置位移响应

通过动态响应分析验证了改进后的后坐保险装置的可行性,对改进前后的结构进行批量仿真与分析,选择 $0\sim 1\,000\text{ }\mu\text{s}$ 的脉宽范围和 $0\text{g}\sim 15\,000\text{g}$ 的加速度峰值范围形成的半正弦载荷域,均匀取 400 组跌落载荷,并以脉宽的 1.1 倍作为仿真时长,保证运动完整性,并将仿真结果通过插值拟合,得到域范围内的色域图。

首先进行识别能力的分析,图 7 展示了不同的弹丸在不同高度垂直跌落至不同目标时产生的典型载荷分布^[23],如果在跌落载荷下后坐保险装置产生误锁,可能会造成严重的安全问题。对改进前后的结构质量块沿后坐力方向的位移进行分析,提取质量块上端面的位移结果,以端面位移最小位置的最大值为评价目标。通常情况下,此值大于 $185\text{ }\mu\text{m}$ 即代表闭锁,以此在 $0\sim 400\text{ }\mu\text{s}$ 的脉宽范围和 $0\text{g}\sim 7\,000\text{g}$ 的加速度峰值范围的区域内进行对比,结果如图 8 和图 9 所示。由仿真结果可知,改进后的结构对于 0.7 m 高度跌落至不同目标的几种典型载荷的识别提升明显,而这一高度也是较为常见的跌落高度之一。

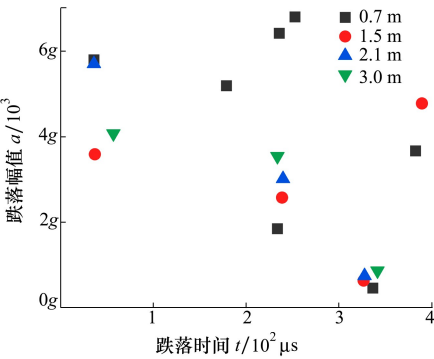


图 7 不同弹丸在不同高度垂直跌落至不同目标时的典型载荷分布

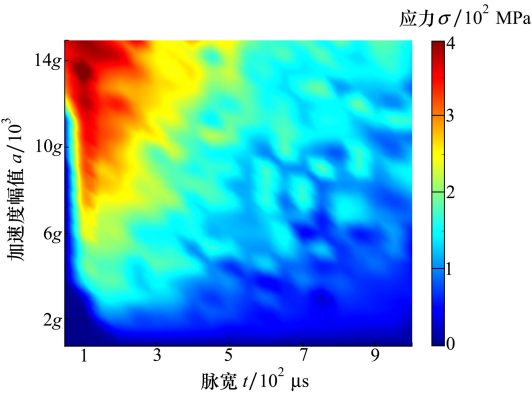


图 10 改进前后坐保险装置的齿形在 0~1 000 μs 脉宽范围和 0g~15 000g 加速度峰值范围的目标位移分布

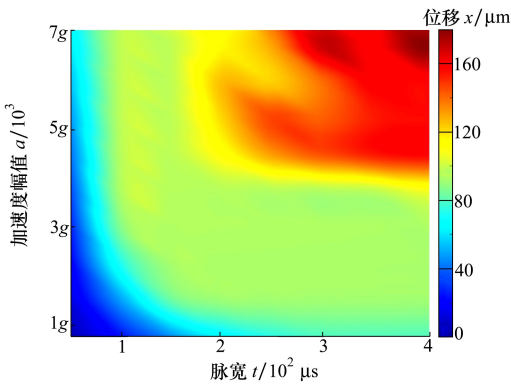


图 8 改进前后坐保险装置在 0~400 μs 脉宽范围和 0g~7 000g 加速度峰值范围的目标位移分布

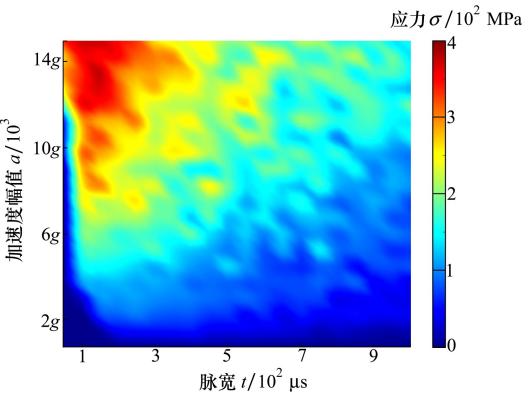


图 11 改进后后坐保险装置的齿形在 0~1 000 μs 脉宽范围和 0g~15 000g 加速度峰值范围的应力分布

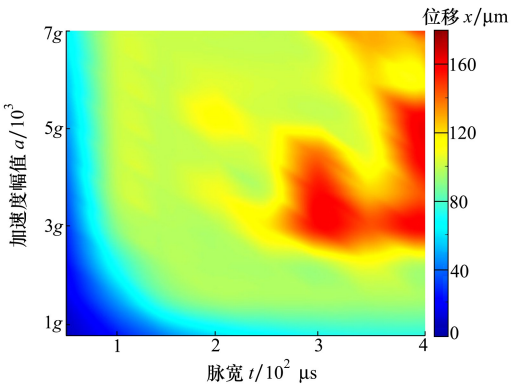


图 9 改进后后坐保险装置在 0~400 μs 脉宽范围和 0g~7 000g 加速度峰值范围的目标位移分布

另外,齿形轨道是后坐保险装置进行载荷区分和识别的重要机构,域分析结果表明(如图 10 和图 11 所示),改进后的结构齿形在高幅值、窄脉宽载荷区域的应力也有明显改善,大于 400 MPa 的应力区域减小。

3.3 试验验证

采用深反应离子刻蚀(deep reactive ion etching, DRIE)工艺加工改进后的样机。工艺流程如图 12 所示。硅基后坐保险装置制备过程为:①备片:选择电阻率为 0.01~0.02 Ω·cm 的 100 晶面硅片;②光刻:涂覆光刻胶并进行光刻,确保图案符合器件结构;③刻蚀:采用 DRIE 刻蚀,使用刻蚀气体进行深刻蚀,形成所需结构;④备片:选择厚度为 500 μm 的 7740 玻璃片作为基底;⑤键合:精确对准并将硅片与玻璃键合,确保良好黏附;⑥减薄:使用 KOH/CMP 工艺将硅片减薄至 110 μm;⑦光刻 M2:进行结构光刻标记 2#;⑧深刻蚀:进行结构释放;⑨划片:涂胶保护并进行划片,分离器件;⑩清洗:使用丙酮等清洗剂去除光刻胶残留,确保清洁。最后将划片后的样机进行封装与固定。

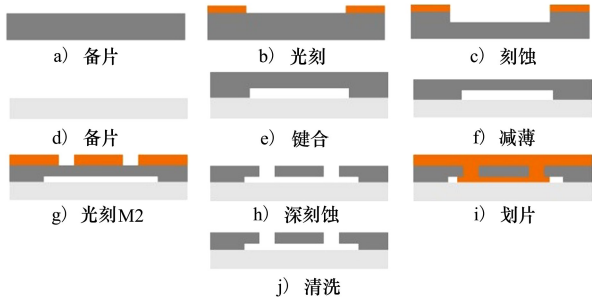


图 12 样机制作工艺过程

有限元仿真的应力结果精度受网格疏密等因素影响,因此难以得到准确的应力值,而冲击试验的结果更加直观和准确,对改进后的样机进行冲击试验并与改进前的试验结果进行对比,结果更为直观。对改进后的样机进行后坐力方向、横向和后坐力反方向 3 个方向的冲击试验。首先进行沿后坐力方向的冲击,对同一后坐保险装置进行了 5 次冲击,其中,冲击结果和载荷大小如图 13 所示。第 1 次冲击后,质量块锁钩表面微剥落,锚点轨道开裂,第 2 次冲击无明显变化,第 3 次冲击时右侧齿形表面微剥落,第 4 次冲击无明显变化,直到第 5 次冲击时,右侧的闭锁结构断裂,后坐保险机构完全失效。对后坐方向进行重复性试验,结果如表 2 所示,被测器件早期均未发生严重结构失效,最终的失效均表现为累计高过载下的破坏,该过载阈值符合抗过载能力需求。试验结果验证了改进后的后坐保险装置具有较好的抗过载能力。

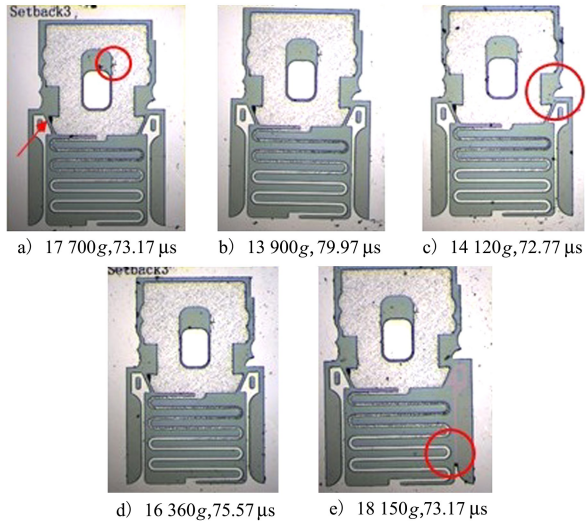


图 13 改进器件在后坐力方向的冲击结果

取 1 组新的样机进行横向冲击研究。3 次冲击载荷的幅值和脉宽分别为 (17 600g, 98.86 μs), (16 200g, 113.3 μs), (19 000g, 92.06 μs), 3 次冲击后,样机没有明显损伤。3 次冲击后的结果如图 14a) 所示。取 1 组新的样机进行后坐力反方向的冲击,3 次冲击载荷的幅值和脉宽分别为 (14 400g, 68.58 μs), (22 000g, 74. 98 μs), (19 200g, 71.38 μs), 3 次冲击后,样机也没有明显损伤。3 次冲击后的结果如图 14b) 所示。额外的横向冲击试验(5 次累计冲击,载荷峰值 20 400g)和后坐力反方向试验(4 次累计冲击,载荷峰值 16 000g)用以验证结果的一致性。结果表明冲击后的器件亦没有明显损伤,验证了结果的一致性。

表 2 后坐力方向的后坐保险装置重复性试验结果

器件	冲击次数	加速度峰值	加速度脉宽/μs	情况说明
1#	1	18 600g	90.05	齿形结构剥落
	2	21 200g	79.25	闭锁钩剥落,齿形结构剥落加重
	3	17 600g	95.25	闭锁钩剥落加重,齿形结构剥落加重,锚点及与锚点撞击的质量块轨道剥落
2#	1	12 800g	112.9	无明显损坏
	2	15 000g	105.8	无明显损坏
3#,4#	1	17 200g	72.98	3#齿形结构剥落,4#无明显损坏
5#,6#	1	13 600g	114.2	5#和 6#无明显损坏
	2	20 000g	101.8	5#齿形结构剥落,6#无明显损坏
	3	11 680g	125.4	5#闭锁钩剥落,6#无明显损坏
	4	15 520g	107.4	5#闭锁钩剥落加重,6#齿形结构剥落
	5	16 960g	94.98	5#损坏无明显加重,6#损坏无明显加重
	6	14 880g	107	5#损坏无明显加重,6#闭锁钩剥落
	7	13 600g	103.8	5#弹簧断裂,6#锚点剥落

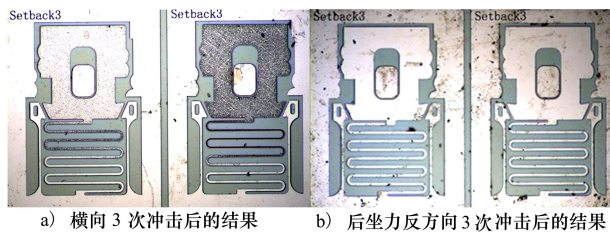


图14 改进器件冲击结果

试验结果表明,改进的后坐保险装置抗过载能力明显提升,沿后坐方向冲击时,多次累计冲击载荷都没有造成质量块与弹簧连接处发生严重结构失效,直到第5次冲击时闭锁结构断裂才导致完全失效。这说明锚点的引入限制了质量块的大幅度运动,降低了质量块与弹簧连接处的应力。而沿横向和后坐力反方向冲击时,由于锚点的限制,质量块的运动被有效限制,进而降低了易损部位的应力,齿形也不再发生较为严重的剥落。

4 结 论

本文针对硅基 MEMS 后坐保险装置载荷识别能力不足和抗过载性能较差的问题,对硅基 MEMS 后坐保险装置进行了失效分析和优化。

参考文献:

- [1] 张笑,谢晋,熊壮,等. 引信微光机电系统安全系统研究现状与发展趋势[J]. 探测与控制学报, 2024, 46(1): 1-11.
ZHANG Xiao, XIE Jin, XIONG Zhuang, et al. The research status and development trend of fuze MOEMS safety system[J]. Journal of Detection and Control, 2024, 46(1): 1-11. (in Chinese)
- [2] 李志鹏,何博,冯恒振,等. 引信 MEMS 安全系统远距离解除保险机构研究现状[J]. 探测与控制学报, 2026, 48(1): 31-37.
LI Zhipeng, HE Bo, FENG Hengzhen, et al. Research status of delay enabling device of MEMS S & A device in fuze applications[J]. Journal of Detection and Control, 2026, 48(1): 31-37. (in Chinese)
- [3] 洪逸飞,武焕臣,汤沛源,等. 变刚度单轴电容式 MEMS 加速度计设计[J]. 传感器与微系统, 2025, 44(4): 70-73.
HONG Yifei, WU Huanchen, TANG Peiyuan, et al. Design of variable stiffness uniaxial capacitive MEMS accelerometer[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2025, 44(4): 70-73. (in Chinese)
- [4] 强甲,赵旭,田中旺,等. 高后坐过载下硅基 MEMS 后坐保险装置响应特性[J]. 探测与控制学报, 2023, 45(6): 38-43.
QIANG Jia, ZHAO Xu, TIAN Zhongwang, et al. Response characteristics of silicon-based MEMS inertial insurance device under high recoil overload[J]. Journal of Detection and Control, 2023, 45(6): 38-43. (in Chinese)
- [5] 赵毅强,寇诗逸,叶茂. MEMS 陀螺仪高精度低噪声检测电路设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(12): 96-104.
ZHAO Yiqiang, KOU Shiyi, YE Mao. Design of high-precision and low-noise detection circuit for MEMS gyroscope[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(12): 96-104. (in Chinese)
- [6] 谢海鹏,曹云,孔啸宇,等. MEMS 电热驱动器多场耦合模型及温度特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(4): 142-150.

1) 对单自由度弹簧质量块系统的位移响应进行分析,并针对典型弹簧质量块系统的后坐保险装置的试验需求建立了马希特锤击平台和可视化平台,进行了冲击试验。针对后坐力方向、横向和后坐力反方向进行了冲击,结果表明,多数器件的质量块与弹簧连接处发生了严重的断裂失效,这是由于质量块在运动过程中,横向位移较大,加重了碰撞,进而导致抗过载能力较弱。

2) 针对原后坐保险装置抗过载能力不足的问题,对后坐保险装置进行改进设计,通过在质量块中心填加固定锚点的方式限制了质量块的横向位移,并通过有限元仿真对比了改进前后后坐保险装置的位移响应和齿形机构的应力。结果表明,改进后的后坐保险装置在 0.7 m 高度跌落的典型勤务载荷的识别能力有明显提升,且齿形机构的最大应力得到改善。

3) 采用深反应离子刻蚀工艺加工了改进后的后坐保险装置样机,并同样在后坐力方向、横向和后坐力反方向进行了冲击试验,试验中进行了多次高幅值的冲击。试验结果表明,与改进前结构相比,并未出现质量块与弹簧连接处断裂的严重失效行为,且齿形表面剥落也减轻,这说明改进后的后坐保险装置抗过载能力明显提升。

- XIE Haipeng, CAO Yun, KONG Xiaoyu, et al. Multi-field coupling model and temperature characteristics of MEMS electrothermal actuators[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(4): 142-150. (in Chinese)
- [7] LI Jin. Applications and prospects of MEMS sensors in automotive[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1884(1): 012010.
- [8] SRINIVASA Rao K, GANESH G V, SAI Lakshmi G, et al. Analysis of PDMS based MEMS device for drug delivery systems[J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(3): 659-664.
- [9] LIU Zhiyong, ZHOU Kaixing, SUN Xiucong. Satellite attitude determination using ADS-B receiver and MEMS gyro[J]. Aerospace, 2023, 10(4): 370.
- [10] HAN Xiangguang, HUANG Mimi, WU Zutang, et al. Advances in high-performance MEMS pressure sensors: design, fabrication, and packaging[J]. Microsystems and Nanoengineering, 2023, 9(1): 1-34.
- [11] ROBINSON C H, WOOD R H, GELAK M R, et al. Ultra-miniature electro-mechanical safety and arming device: US8276515B1 [P/OL]. (2012-10-02) [2025-06-30]. <https://patents.google.com/patent/US8276515B1/en>.
- [12] 孙毅, 姜文忠, 冯恒振, 等. 基于小口径弹的硅基 MEMS 安全系统设计[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(5): 501-506. SUN Yi, LOU Wenzhong, FENG Hengzhen, et al. Silicon based MEMS safety and arming device design for small-caliber ammunition[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(5): 501-506. (in Chinese)
- [13] 畅玉洁, 涂宏茂. 硅基 MEMS 安全系统参数化仿真方法研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(5): 64-70. CHANG Yujie, TU Hongmao. Parametric simulation method of silicon-based MEMS safety and arming device[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(5): 64-70. (in Chinese)
- [14] ROBERT Renz. Kaman MEMS based fuze technology[C]//NDIA 58th Annual Fuze Conference, Baltimore, 2015: 350-367.
- [15] NI Ziyang, LIU Ying, XIE Jin, et al. Investigation on the design method and failure mechanism of silicon-based MEMS setback arming device[C]//International Conference on Mechanical Design, Singapore, 2021.
- [16] WANG He, CAO Yun, LEI Shenghong, et al. Dynamic response of a cantilever-type MEMS setback arming device under impact loads[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(17): 19073-19081.
- [17] ZHU Hengbo, CAO Yun, XI Zhanwen, et al. A novel inertial microswitch with dynamic acceleration bandpass characteristics[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(7): 1049-1052.
- [18] 张义民. 机械振动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 148-152. ZHANG Yimin. Mechanical vibration[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 148-152. (in Chinese)
- [19] 李志强, 李海玲, 陈璇希, 等. 基于 LS-DYNA 水槽式洗碗机运输包装件的跌落仿真分析[J]. 包装学报, 2025, 17(2): 10-17. LI Zhiqiang, LI Hailing, CHEN Xuanxi, et al. Drop simulation analysis of transport packaging for sink dishwasher based on LS-DYNA[J]. Packaging Journal, 2025, 17(2): 10-17. (in Chinese)
- [20] 张璐, 刘海鹏, 刘彦, 等. 椭圆变截面侵爆战斗部破片飞散特性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(3): 137-144. ZHANG Lu, LIU Haipeng, LIU Yan, et al. Study on fragmentation scattering characteristics of elliptical variable-section intrusive warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(3): 137-144. (in Chinese)
- [21] 王雁冰, 李雪, 王兆阳, 等. 围压作用下等离子体的爆破破岩效应[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(4): 136-152. WANG Yanbing, LI Xue, WANG Zhaoyang, et al. Rock breaking effect of plasma blasting under confining pressure[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(4): 136-152. (in Chinese)
- [22] 王喜, 田斌, 王峰, 等. 超聚能射流成型特性数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(7): 253-258. WANG Xi, TIAN Bin, WANG Feng, et al. Numerical simulation study on the characteristics of supercharged jet forming[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(7): 253-258. (in Chinese)
- [23] 倪庆乐. 巡飞弹引信后坐保险机构和惯性开关动态特性研究与设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 24. NI Qingle. Research and design of dynamic characteristics of setback safety device and inertial switch of patrol missile fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017: 24. (in Chinese)

Failure analysis and optimization of silicon-based MEMS setback safety device

YANG Mo¹, NIE Weirong¹, ZHANG Yue², WANG He¹, CHENG Baolin¹,
NING Zhuoxiang¹, CAO Yun¹, XI Zhanwen¹, WANG Jiong¹

(1.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2.Product Development Center, China Aviation Development Nanjing Aviation Power Co., Ltd., Nanjing 211111, China)

Abstract: To enhance the load identification capability and overload resistance of the silicon-based MEMS setback safety device, a silicon-based MEMS setback arming device research is carried out based on the parallel-axis ammunition fuze. Firstly, based on the spring-mass block system theory, the displacement response of the setback safety device was analyzed. A Machette Hammer platform and a visualization test platform were established. Three typical direction impacts were tested on the setback safety device prototype to determine the lack of overload resistance. An improved setback safety device is proposed by introducing a fixed anchor point to constrain the lateral displacement of the mass. A comparative analysis of displacement response and stress distribution in the tooth mechanism between the original and improved devices was conducted by finite element simulation. The results demonstrate that the fixed anchor point configuration effectively enhances device performance. Finally, the enhanced prototype was fabricated using the deep reactive ion etching (DRIE) process, followed by testing for validation. Test results demonstrate significantly enhanced overload resistance in the modified device: Withstood multiple high-intensity shocks along the setback direction before function failure, while exhibiting no significant damage under lateral and reverse setback direction impacts. The results of this paper can provide a reference for the failure analysis and optimization of similar silicon-based MEMS setback safety devices.

Keywords: silicon-based; fuze; microelectromechanical system(MEMS); finite element simulation; improved design; setback safety device; impact test

引用格式: 杨沐, 聂伟荣, 张越, 等. 硅基 MEMS 后坐保险装置失效分析与优化[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44(2): 288-296.

YANG Mo, NIE Weirong, ZHANG Yue, et al. Failure analysis and optimization of silicon-based MEMS setback safety device[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44(2): 288-296. (in Chinese)