

冲击载荷下 MEMS 弹簧的失效分析与评估

钱康申, 曹云, 王佳立, 王鹤, 席占稳

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对引信用 MEMS 弹簧高过载环境应用需求,开展了冲击载荷下 MEMS 弹簧的失效分析与评估。基于 Johnson-Cook 本构模型,建立了考虑塑性形变的 MEMS 弹簧动力学仿真模型,获得了弹簧质量块系统的冲击载荷脉宽-幅值失效临界曲线,将载荷区域划分为安全载荷与失效载荷区。利用马希特锤冲击系统,对 5 种不同线宽的 MEMS 弹簧样机进行了冲击失效测试,得到不同载荷下 MEMS 弹簧的失效特性,测试结果与仿真结果基本吻合。基于逻辑回归方法,建立了 MEMS 弹簧失效特性的逻辑回归模型,采用十折交叉验证对该模型进行了评估与分析,该模型的准确率达到 0.9,表明该模型能够较好地分析 MEMS 弹簧的失效特性,为不同冲击环境下 MEMS 弹簧的失效分析与评估提供参考依据。

关键词:微机电系统;MEMS 弹簧;失效;有限元分析

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2026)01-0169-08

微机电系统(MEMS)近年来得到了快速发展。为了满足引信机构微型化的需求, MEMS 技术在引信安全系统中得到了广泛应用^[1-3]。作为 MEMS 引信安全系统中的重要元件,微弹簧在系统固有频率调控和能量传递方面具有双重功能^[4-5]。该元件直接关系到引信的勤务安全、发射安全以及可靠解保。相较于传统机械式弹簧, MEMS 弹簧在结构设计、制造工艺和运动特性方面存在显著差异,具有体积小、成本低等特征,可基于微纳米加工工艺进行大批量制造,在军工微系统领域展现出突出的技术优势。

近年来,诸多学者围绕 MEMS 弹簧进行了相关的研究。任艳斐^[6]模拟了冲击环境,借助加速应力试验,得到了失效环境下应力与位移的相互关系,为引信 MEMS 弹簧的设计优化提供了理论支持。中北大学的王钊^[7]对 MEMS 弹簧的可靠性进行了研究,得出了 MEMS 弹簧理论形变范围和形变特性等可靠性指标,并在失效环境下建立其在冲击载荷下的应力及位移响应模型,为 MEMS 弹簧的可靠性研

究提供理论支撑。隋灵禾等^[8]对 MEMS 镍平面微弹簧的非线性进行了研究,讨论了影响非线性的主要因素,为 MEMS 弹簧的设计提供参考。Qin 等^[9]通过卡式第二定律和胡克定律建立了 3 种不同结构 S 型弹簧的弹性系数计算公式,并通过有限元仿真和弹性系数测试系统对其进行了验证。Li 等^[10]制作了不同尺寸 L 形微弹簧,分别进行仿真与理论验证,得出 L 形 MEMS 弹簧受到静载荷和动载荷时变形情况不同的结论,为后续 MEMS 弹簧设计提供参考。孙诚诚等^[11]提出了截面宽度渐变 W 形平面弹簧,并计算其刚度,有效减小了应力集中,满足了抗高过载要求。程建建等^[12-13]基于柔性系数对不同平面微弹簧的力学性能进行了比较,并计算了 MEMS 平面弹簧不同方向上考虑惯性力环境与静态环境下的弹性系数理论公式,为微惯性器件的优化设计提供了一定的理论依据。针对微弹簧在高过载条件下运动过程研究缺乏的现状,北京理工大学的谢雨珊等^[14]求解了微弹簧在高过载条件下运动速度、加速度与运动时间之间的函数关系,并得到微弹簧在高过载条件下的动态响应规律。然而,上述对 MEMS 弹簧的研究主要集中在对微弹簧弹性系数公式的推导、仿真试验验证和弹性系数公式的改进上,但对冲击载荷下 MEMS 平面弹簧的失效特性研究

收稿日期:2025-06-12

基金项目:国家自然科学基金(52475062)资助

作者简介:钱康申(2001—),硕士研究生

通信作者:曹云(1989—),副教授 e-mail:cy1990@njust.edu.cn

较少。

在高过载环境中, MEMS 弹簧易发生塑性变形, 为了研究在何种冲击载荷下 MEMS 弹簧会发生塑性变形从而导致失效, 本文开展了冲击载荷下 MEMS 平面弹簧的失效特性研究。通过有限元对考虑塑性的 MEMS 平面弹簧在冲击载荷下的动力学响应进行分析。得出不同冲击载荷下考虑塑性的弹簧质量块系统的最大位移, 与理论计算得出的弹簧质量块系统的最大位移进行对比分析。基于马希特锤搭建了冲击试验平台, 且在不同幅值不同脉宽下, 对激光加工的不同实际线宽的菱形 MEMS 平面弹簧进行了冲击试验, 记录其失效特性。

通过 MEMS 弹簧的失效特性, 以逻辑回归的方式对微弹簧的失效概率进行了计算, 采用十折交叉验证对模型进行了准确性检测, 并对不同影响因素进行敏感性分析。

1 线弹性范围内 MEMS 弹簧动力学理论建模与分析

为了研究线弹性范围内 MEMS 弹簧在冲击载荷下的动力学响应, 本文建立了冲击载荷下单自由度弹簧质量块系统的理论模型。因冲击载荷作用下, 惯性力相较于阻尼力较大, 故本文中不考虑阻尼对结构动力学响应的影响。该 MEMS 弹簧质量块的动力学方程可表示为

$$m\ddot{x} + kx = ma \quad (1)$$

式中: m 是质量块质量; k 是弹簧刚度; x 是质量块质心处的位移; a 为质量块加速度。冲击载荷可近似为半正弦加速度载荷, 其数学表达式为

$$a(t) = \begin{cases} a_0 \sin \omega_0 t, & t \leq t_0 \\ 0, & t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $t_0 = \pi/\omega_0$, ω_0 为半正弦加速度载荷的角频率。

将(2)式代入(1)式中求解可得

$$x =$$

$$\begin{cases} \frac{a_0}{\omega_n^2 - \omega_0^2} \left(\sin \omega_0 t - \frac{\omega_0}{\omega_n} \sin \omega_n t \right), & t \leq t_0 \\ \frac{\dot{x}(t_0)}{\omega_n} \sin \omega_n (t - t_0) + x(t_0) \cos \omega_n (t - t_0), & t > t_0 \end{cases} \quad (3)$$

图 1 为不同冲击载荷下(幅值为 1 000g ~ 15 000g、脉宽为 100 ~ 500 μ s)通过(3)式计算得出的弹簧质量块系统最大位移理论值(未考虑塑性变形)热力图, 其中, 最大位移为质量块质心处最大位移。由图 1 可知, 随着脉宽或者幅值的增加, 弹簧质量块系统的最大位移不断增大, 且在最大位移超过 1.6 mm 时, 最大位移增幅加剧, 最大位移峰值出现在 15 000g-500 μ s 处, 为 12.08 mm。

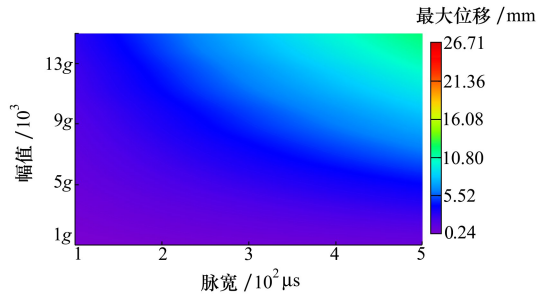


图 1 冲击载荷下弹簧质量块系统最大位移理论值

2 考虑塑性形变的 MEMS 弹簧动力学仿真建模与分析

在弹簧质量块系统受到高冲击载荷后, MEMS 弹簧在其拉伸过程中会经历弹塑性大变形, 材料会达到屈服极限, 进入塑性阶段, 发生永久形变, 从而失效。冲击载荷下弹簧质量块系统的动力学响应受到材料塑性影响较大, 单纯的弹性系统无法准确求得其动力学响应, 但是冲击载荷下考虑塑性的弹簧质量块系统涉及到材料非线性和几何非线性等非线性行为, 其理论模型需做出大量简化假设, 导致计算结果与实际差距较大。因此本文采用有限元仿真对弹簧质量块系统在不同冲击载荷下的动力学响应进行分析。为了探究冲击载荷对弹簧质量块系统的影响, 利用 ABAQUS 有限元仿真软件对其在冲击载荷下的动力学响应进行有限元仿真并求解其最大位移、最大等效应力。

MEMS 弹簧以及质量块关键尺寸和仿真三维模型如图 2 所示。结构参数如表 1 所示, MEMS 弹簧材料采用 TC4 钛合金, 厚度为 0.5 mm。为简化仿真结构, 采用等效质量块进行仿真, 质量块的大小为 4 mm×6 mm×1 mm, 质量为 0.19 g。对整个弹簧质量块系统施加半正弦加速度载荷, 幅值为 1 000g ~ 15 000g, 脉宽为 100 ~ 500 μ s。

表 1 MEMS 弹簧结构尺寸

线宽 <i>b</i> / mm	厚度 <i>h</i> / mm	总长 <i>L</i> / mm	总宽 <i>d</i> / mm	夹角 θ / (°)	<i>a</i> / mm	<i>R</i> / mm	<i>c</i> / mm
0.2	0.5	7.34	7	10	0.2	0.27	0.7

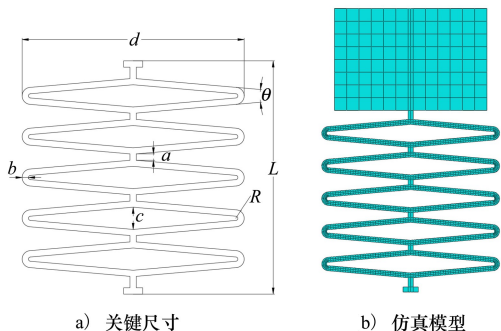


图 2 MEMS 弹簧关键尺寸及仿真模型

Johnson-Cook 塑性及断裂失效模型(以下简称 J-C 本构模型)是冲击动力学中应用较为广泛的本

构模型。J-C 本构模型全方位考虑了流变应力与应变、应变速率以及温度之间的关系,能够满足冲击载荷条件下的仿真材料需求。且 J-C 本构模型具有参数少、试验成本低的优势,既能通过简洁公式描述复杂力学行为,且容易对参数进行标定并通过软件进行实现。因此本文采用 J-C 本构模型对 MEMS 弹簧在冲击载荷下的动力学响应进行分析。将 J-C 本构模型加入仿真,对其塑性行为进行研究。在 J-C 本构模型中,等效应力表示为塑性应变、应变速率和温度的函数,如(4)式所示。

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) (1 - (T^*)^m) \quad (4)$$

式中,TC4 钛合金 MEMS 弹簧的 J-C 参数如表 2 所示, σ 为等效应力; ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p$ 为塑性应变速率; $T^* = (T - T_0)/(T_m - T_0)$, T_m , T_0 为材料熔点和室温。

表 2 仿真模型基本参数

弹性模量 <i>E</i> /GPa	屈服强度 σ_s /MPa	密度 ρ /(kg · m ⁻³)	泊松比 μ	<i>A</i> /MPa	<i>B</i> /MPa	<i>n</i>	<i>C</i>	<i>m</i>
105	800	4 430	0.3	800	450	0.325	0.02	1

图 3 为不同冲击载荷下(脉宽为 100~500 μ s, 幅值为 1 000*g*~15 000*g*)通过有限元仿真得出的弹簧质量块系统最大位移仿真值(考虑塑性变形)热力图。由图 3 可知,其变化情况与最大位移理论值相似,随着脉宽或者幅值的增加,弹簧质量块系统的最大位移不断增大,且在最大位移超过 1.6 mm 时,最大位移增幅加剧,超过最大位移理论值。在冲击载荷为 15 000*g*-500 μ s 时,仿真值最大位移达到峰值为 26.71 mm,最大位移峰值的理论值与仿真值存在明显差距。

通过将弹簧质量块系统最大位移的理论值与仿真值进行对比分析,可将所施加的载荷分为 2 个区域:一个区域中最大位移的理论值与仿真值之间的相对误差超过 5%,而另一区域中该误差小于 5%。基于这 2 个区域的分界线,构建了 1 条脉宽-幅值临界曲线,如图 4 所示。当载荷处于该曲线上方时,弹簧质量块系统在冲击载荷下的最大位移理论值与仿真值相差较大,当载荷处于曲线下方时,弹簧质量块系统在冲击载荷下的最大位移的理论值与仿真值基本一致。其原因在于通过(3)式计算得到的理论值无法考虑到材料在冲击载荷下发生了塑性变形,只考虑到弹性阶段的弹性变形;而仿真中加入了 J-C

本构,考虑了 MEMS 弹簧在发生塑性变形后的非线性行为,其最大位移由塑性变形和弹性变形两部分组成。因此,该曲线可将冲击载荷划分为安全载荷和失效载荷。其中,在该曲线之下对应的载荷为安全载荷,其余区域对应的载荷为失效载荷。当载荷为安全载荷时,可不考虑塑性行为,简化仿真过程,减少工作量;当载荷为失效载荷时,可认定该 MEMS 弹簧发生了塑性变形,进而在仿真时考虑进行塑性仿真。

由图 4 可知,冲击载荷的脉宽从 100 μ s 增加到 450 μ s 时, MEMS 弹簧的安全载荷的幅值上限由 5 000*g* 下降到 1 520*g*,当脉宽为 250 μ s 时,幅值上限为 3 000*g*。

图 5 为不同冲击载荷(脉宽为 100~500 μ s、幅值为 1 000*g*~15 000*g*)下, MEMS 弹簧的最大等效应力热力图。最大等效应力随着冲击载荷幅值和脉宽的增大而逐渐变大,但并非呈现线性增长,在低载荷区域(即幅值小于 2 800*g* 或者脉宽小于 250 μ s), MEMS 弹簧未发生塑性变形时, MEMS 弹簧的最大等效应力随幅值和脉宽的增大而增加较快,在高载荷区域(即幅值大于 2 800*g* 且脉宽大于 250 μ s), MEMS 弹簧已发生塑性变形时,其最大等效应力随

幅值和脉宽的增大而增加较慢。其最大应力出现在 15 000g-500 μs, 达到峰值 1 210 MPa, 表明材料已

发生严重的塑性变形。

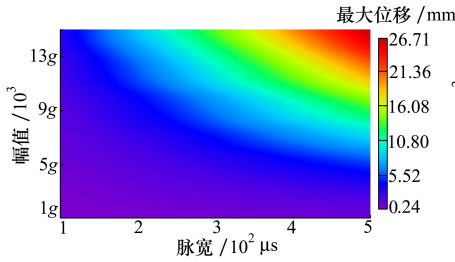


图 3 冲击载荷下弹簧质量块系统最大位移仿真值

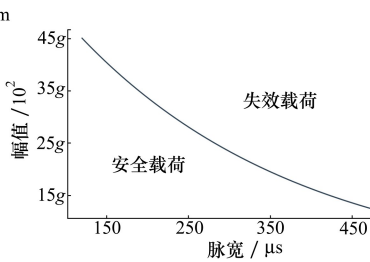


图 4 脉宽-幅值临界曲线

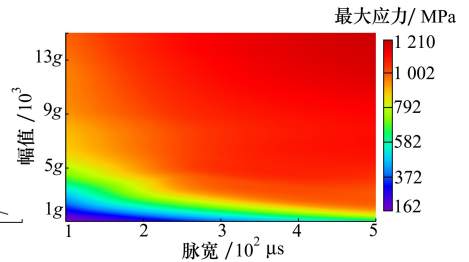


图 5 冲击载荷下 MEMS 弹簧最大应力

以 4 500g-250 μs 的冲击载荷下 MEMS 弹簧应力分布为例,右端为附加质量块的活动端,左端为固定端,其变形情况如图 6 所示。由图 6 可知,冲击载荷导致 MEMS 弹簧发生塑性变形后,其每节弹簧均发生了塑性变形,且每一节弹簧发生的塑性变形大小基本一致,并未出现某一节单独发生大变形的情况。且连接处应力情况复杂,容易出现应力集中,因此主要变形发生在连接处。各个连接处能达到的最大等效应力相同,但应力分布有所不同,在 MEMS 弹簧变形的过程中,由于应力波的传递,各个连接处轮流达到最大应力,且在 MEMS 弹簧到达最大位移时,各个连接处均达到最大应力。

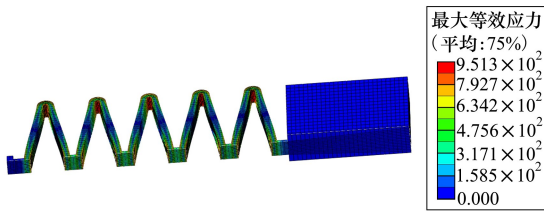


图 6 4 500g-250 μs 冲击载荷下 MEMS 弹簧应力分布

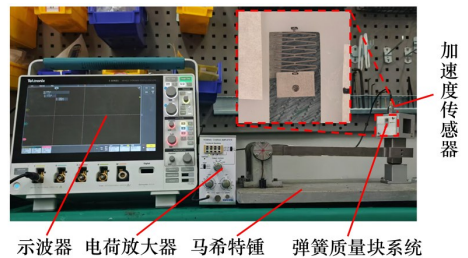


图 7 冲击试验平台

3 不同冲击载荷下 MEMS 弹簧失效试验

为了对 MEMS 弹簧在不同冲击载荷下的失效特性进行研究,采用马希特锤进行了冲击试验。冲击试验平台主要由示波器 (Tektronix 3series mixed domain oscilloscope)、电荷放大器 (YE5854A)、马希特锤、弹簧质量块系统和加速度传感器 (CA-YD-111) 组成,如图 7 所示,此外,需要使用光学显微镜观测 MEMS 弹簧的状态。

在每次冲击试验前,使用显微镜观测并拍照记

录 MEMS 弹簧的初始状态。将弹簧质量块系统以待测试的方向装夹于马希特锤锤头夹具上,以此对冲击载荷进行模拟,冲击载荷的幅值和脉宽可由落锤的初始高度与垫材材料调整。通过安装在锤头上的加速度传感器检测冲击载荷大小,并通过电荷放大器对加速度传感器的信号进行放大,从示波器读取当前冲击的幅值和脉宽,在每次施加冲击载荷后均通过光学显微镜测量并分析 MEMS 弹簧是否发生塑性变形而失效。本文取失效阈值为 1%,即当 MEMS 平面弹簧的总长度变化率超过 1%时,判断该 MEMS 平面弹簧发生失效。在冲击试验中,各样本的试验情况如图 8 所示,由于制造误差影响,实际线宽为 192~228 μm。因本试验所用的 MEMS 平面弹簧均采用激光加工自同一板材,其厚度一致,故而本研究忽略厚度的制造公差,只考虑实际线宽对测试结果产生的影响。图 8 中曲线为脉宽-幅值临界曲线。其中,蓝色三角形表示在该冲击载荷下 MEMS 弹簧未失效,红色圆形表示在该冲击载荷下 MEMS 弹簧已失效。冲击载荷脉宽在 80~100 μs 时其幅值为 2 500g~6 000g;冲击载荷脉宽在 200~230 μs 时其幅值为 1 000g~3 700g;冲击载荷的脉宽在 430~480 μs 时其幅值为 500g~1 600g。

图 8 中的 5 个 MEMS 弹簧的失效特性表明,相同脉宽下,冲击载荷的幅值越大, MEMS 弹簧失效的概率越大;相同幅值下,脉宽越大 MEMS 弹簧失效的概率越大。当冲击载荷的脉宽为 70~100 μs 时,该 MEMS 弹簧在受到幅值大于 4 700g 的冲击载荷时会发生失效;当冲击载荷的脉宽为 200~250 μs 时,该 MEMS 弹簧在受到幅值大于 2 600g 的冲击载荷时会发生失效;当冲击载荷的脉宽为 420~480 μs 时,该 MEMS 弹簧在受到幅值大于 1 400g 的冲击载荷时发生失效。以图 8a) 为例, MEMS 平面弹簧实

际线宽为 192 μm,当冲击载荷脉宽为 70~100 μs,其幅值超过 5 340g 时会发生失效;当冲击载荷脉宽为 200~250 μs 时,其幅值超过 3 140g 时会发生失效;当冲击载荷脉宽为 420~480 μs 时,其幅值超过 1 520g 时会发生失效。将试验得出的 MEMS 弹簧失效特性与上述仿真中得出的幅值-脉宽临界曲线进行对比,发现发生失效的 MEMS 平面弹簧所受冲击载荷均位于幅值-脉宽临界曲线附近,试验与仿真基本符合,相互验证。但受限于线宽制造公差,实际失效点与理论曲线未能完全吻合。

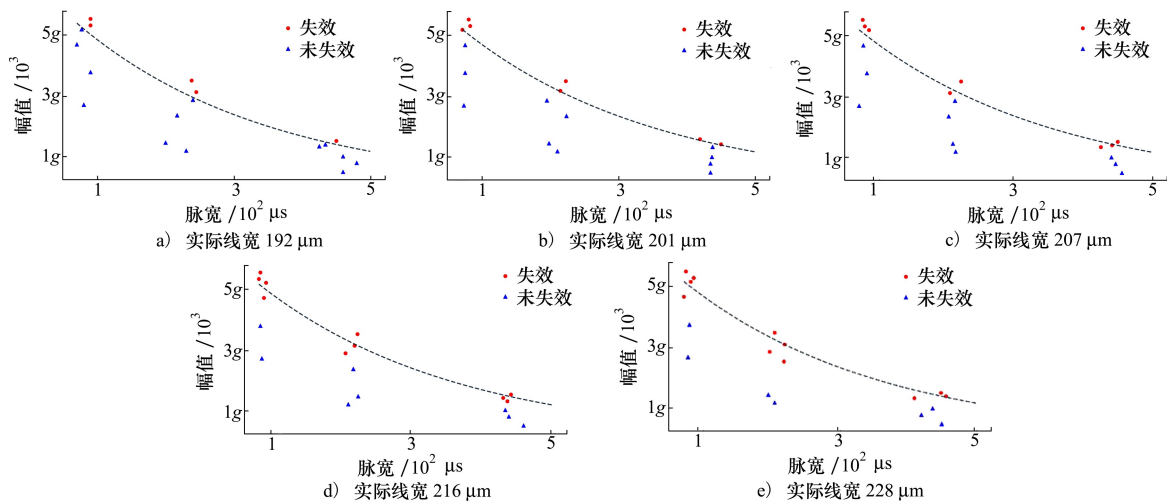


图 8 不同冲击载荷下不同实际线宽 MEMS 弹簧的失效特性

且通过 MEMS 弹簧的失效特性发现随着 MEMS 弹簧的实际加工线宽的增大, MEMS 弹簧几何过渡区域更容易应力集中,且应力集中情况更加显著,因此更易发生失效。

将发生失效的 MEMS 弹簧与未进行冲击试验时进行对比,结果如图 9 所示,具体尺寸如表 3 所示。

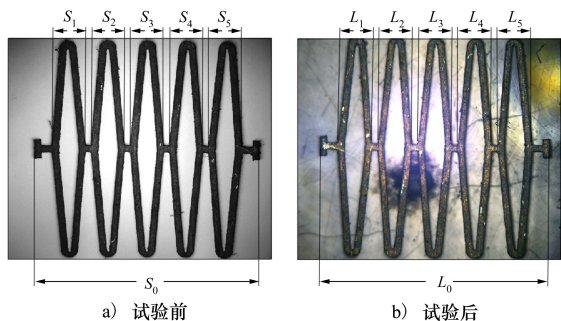


图 9 MEMS 弹簧冲击试验前后对比

由图 9 可知在失效前后, MEMS 弹簧的总长发生了变化,且其每一节发生的塑性变形大小基本保持一致。该 MEMS 弹簧的主要变形区域在其连接处,验证了仿真中连接处出现最大应力且应力集中严重的情况。

表 3 冲击试验前后 MEMS 弹簧结构尺寸对比

序号	长度/mm	序号	长度/mm
S_0	7.267	L_0	7.422
S_1	1.050	L_1	1.084
S_2	1.053	L_2	1.083
S_3	1.056	L_3	1.085
S_4	1.053	L_4	1.085
S_5	1.052	L_5	1.084

4 逻辑回归模型

为了进一步对 MEMS 弹簧的失效进行研究,本文采用逻辑回归的分析方法,通过试验得出的失效特性对不同载荷下 MEMS 弹簧的失效概率进行预

测,以此来解决 MEMS 弹簧失效与未失效的二分类问题。

逻辑回归是一种用于二分类问题的回归模型,通过对输入特征组合来预测事件发生的概率,并将线性回归的结果映射到 0~1 之间,输出该事件发生的概率。逻辑回归模型的形式为

$$P = \frac{1}{1 + e^{-L(P)}} \quad (5)$$

$$L(P) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 \quad (6)$$

式中: P 是 MEMS 弹簧发生失效的概率; β_0 为截距项; $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别为幅值、脉宽和线宽的回归系数; X_1, X_2, X_3 分别表示幅值、脉宽和线宽。

通过最大似然估计的方法计算回归系数,其基本思想是在给定的模型数据下,通过数值优化方法,迭代求解出一组最优的回归系数,使得模型预测的概率与实际情况相符程度最大化。

本研究中,采用了工程常用的默认阈值 0.5^[15], 即当 $P \geq 0.5$ 时,该模型输出 1(失效),当 $P < 0.5$ 时,该模型输出 0(未失效)。本文采用了十折交叉验证的方法评估该逻辑回归模型的性能,即将试验所得的失效模型随机分为 10 个大小相等的子集,进行 10 次训练和测试,每次选择其中 1 个子集作为测试集,其余 9 个子集作为训练集。在完成 10 组训练与测试后,计算 10 组训练与测试的准确率作为该模型的性能评估。每组测试集的准确率以及回归系数如表 4 所示。

表 4 十折交叉验证结果

折数	β_0	β_1	β_2	β_3	准确率
1	-56.17	0.007 3	0.054	0.103	0.89
2	-59.33	0.007 3	0.054	0.118	0.89
3	-78.11	0.011 7	0.081	0.119	0.78
4	-55.44	0.007 1	0.051	0.106	0.89
5	-69.83	0.009 3	0.067	0.126	0.89
6	-58.83	0.007 3	0.053	0.117	1
7	-57.83	0.007 2	0.053	0.115	1
8	-76.45	0.008 3	0.063	0.176	0.78
9	-63.21	0.007 6	0.054	0.135	0.89
10	-55.05	0.007 2	0.052	0.102	1
平均值	-63.03	0.008 0	0.058	0.122	0.9

从表 4 中可以看出十折交叉验证的准确率有所波动,最高为 1,最低为 0.78,其平均准确率达到 0.9,说明逻辑回归模型的性能良好,能够较好地地区分失效与未失效的样本,但模型的性能在不同的训

练集和测试集之间略有变化。

通过十折交叉验证得出该模型的回归系数平均值分别为 $\beta_0 = -63.03, \beta_1 = 0.008, \beta_2 = 0.058, \beta_3 = 0.122$, 可得逻辑回归模型为

$$L(P) = -63.03 + 0.008X_1 + 0.058X_2 + 0.122X_3 \quad (7)$$

式中: $\beta_1 = 0.008$, 表示在单位加速度的作用下,该 MEMS 弹簧失效概率的增长率为 $0.008/g$ (即冲击载荷的幅值每增加一个重力加速度,微弹簧的失效概率增加 0.008); $\beta_2 = 0.058$, 表示在单位脉宽的作用下,该 MEMS 弹簧失效概率的增长率为 $0.058/\mu s$ (即冲击载荷的脉宽每增加 $1 \mu s$,微弹簧的失效概率增加 0.058); $\beta_3 = 0.122$, 表示在单位线宽的作用下,该 MEMS 弹簧失效概率的增长率为 $0.122/\mu m$ (即 MEMS 弹簧的线宽每增加 $1 \mu m$,微弹簧的失效概率增加 0.122)。3 个回归系数中, β_1 最小,因此表示幅值增加一个单位对失效的概率影响最小,而 β_2 和 β_3 的系数在同一量级, β_3 大于 β_2 , 表明线宽增加一个单位对 MEMS 弹簧失效概率的影响最大,且大于脉宽增加一个单位对 MEMS 弹簧失效概率的影响。

5 结 论

本文主要研究了冲击载荷下 MEMS 弹簧的失效特性。通过有限元仿真分析了弹簧质量块系统在冲击载荷下的最大位移以及最大等效应力,并搭建马希特锤冲击试验平台,对弹簧质量块系统在冲击载荷下的失效特性进行了研究,得到以下结论:

1) 通过对比分析冲击载荷下弹簧质量块系统最大位移的理论值与仿真值,得到弹簧质量块系统的冲击载荷脉宽-幅值曲线,并将冲击载荷分为安全载荷和失效载荷,以此减少工作量。且冲击载荷脉宽为 100, 250 以及 450 μs 时,安全载荷幅值上限分别为 5 000g, 3 000g 和 1 520g。通过分析应力分布得出 MEMS 弹簧发生塑性变形时,每一节均存在塑性变形。

2) 通过马希特锤冲击试验,对冲击载荷下 MEMS 弹簧的失效特性以及塑性变形情况进行研究,得到当冲击载荷的脉宽分别为 70~100 μs , 200~250 μs 和 420~480 μs 时,该 MEMS 弹簧在受到幅值大于 4 700g, 2 600g 和 1 400g 的冲击载荷时会发生失效,结果与仿真基本一致。且相同载荷下,随着实际线宽的增大, MEMS 弹簧更易发生失效。

3) 通过逻辑回归模型对 MEMS 弹簧的失效概率进行预测,并且基于试验得出的失效特性对该模型进行了十折交叉验证,得出了该模型的平均准确率为 0.9,且在单位加速度的作用下,该 MEMS 弹簧

失效概率的增长率为 $0.008/g$;在单位脉宽的作用下,该 MEMS 弹簧失效概率的增长率为 $0.058/\mu s$;在单位线宽的作用下,该 MEMS 弹簧失效概率的增长率为 $0.122/\mu m$ 。

参考文献:

- [1] 阚文星,褚恩义,刘卫,等.微起爆系统用 MEMS 安全保险装置研究现状与展望[J].含能材料,2022,30(1):78-94.
Kan Wenxing, Chu Enyi, Liu Wei, et al. A review on MEMS safety and arming devices for micro-initiation system[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2022, 30(1): 78-94. (in Chinese)
- [2] 娄文忠,赵悦岑,冯恒振,等.基于贝叶斯网络的 MEMS 安全系统可靠性分析[J].北京理工大学学报,2021,41(9):952-960.
Lou Wenzhong, Zhao Yueceng, Feng Hengzhen, et al. Reliability analysis on MEMS S & A device based on Bayesian network [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(9): 952-960. (in Chinese)
- [3] 孙毅,娄文忠,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 & arming device design for small-caliber ammunition [J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(5): 501-506. (in Chinese)
- [4] 程建建,聂伟荣,周织建,等.平面 S 型微弹簧多轴向弹性系数分析[J].仪表技术与传感器,2014(4):4-6.
Cheng Jianjian, Nie Weirong, Zhou Zhijian, et al. Multi-axial elastic coefficient analysis of planar S-shaped micro-spring[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(4): 4-6. (in Chinese)
- [5] 王旭建,王新杰,李峰.引信用双工形压电驱动器的设计及其驱动特性[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(8):135-144.
Wang Xujian, Wang Xinjie, Li Feng. Design and driving characteristics of duplex piezoelectric actuator for fuze[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(8): 135-144. (in Chinese)
- [6] 任艳斐.引信 MEMS 微弹簧可靠性研究[J].中北大学学报,2014,35(2):106-110.
Ren Yanfei. Study on reliability of fuzed MEMS micro-spring[J]. Journal of North Central University of China, 2014, 35(2): 106-110. (in Chinese)
- [7] 王钊.典型引信 MEMS 微弹簧可靠性研究[D].太原:中北大学,2012.
Wang Zhao. Reliability study of MEMS microspring for typical fuzes[D]. Taiyuan: North Central University of China, 2012. (in Chinese)
- [8] 隋灵禾,戴旭涵,王佩红,等. MEMS 镍平面弹簧非线性力学性能仿真及研究[J].微纳电子技术,2010,47(12):736-741.
Sui Linghe, Dai Xuhan, Wang Peihong, et al. Simulation and study of nonlinear mechanical properties for MEMS Ni planar springs[J]. MEMS Device & Technology, 2010, 47(12): 736-741. (in Chinese)
- [9] Qin Y, Chen L, Hao Y, et al. A study on the elastic coefficients of setback micro-springs for a MEMS safety and arming device [J]. Microsystem Technologies, 2020, 26(2): 583-593.
- [10] Li H, Guo C, Li Y, et al. Deformation characteristics of MEMS microspring under static and shock loads[J]. Microsystem Technologies, 2016, 22(12): 2949-2960.
- [11] 孙诚诚,吉亚萍,王晓霞,等.截面宽度渐变 W 形平面 MEMS 弹簧刚度研究[J].现代制造技术与装备,2021,57(11):20-22.
Sun Chengcheng, Ji Yaping, Wang Xiaoxia, et al. Study on stiffness of MEMS spring with variable section width in W-type[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(11): 20-22. (in Chinese)
- [12] 程建建,聂伟荣,周织建,等.平面微弹簧性能比较研究[J].机械制造与自动化,2014,43(6):14-17.
Cheng Jianjian, Nie Weirong, Zhou Zhijian, et al. Study of planar micro-spring performance comparison[J]. Machine Building and Automation, 2014, 43(6): 14-17. (in Chinese)
- [13] 程建建,聂伟荣,周织建,等.平面 S 型等线宽与渐变线宽微弹簧弹性系数分析[J].机械制造与自动化,2014,43(6):

69-71.

Cheng Jianjian, Nie Weirong, Zhou Zhijian, et al. Elastic coefficient analysis of planar s-shaped micro equal line-width and gradient line-width spring[J]. *Machine Building and Automation*, 2014, 43(6): 69-71. (in Chinese)

- [14] 谢雨珊, 陈正光, 张英豪, 等. MEMS 微弹簧高过载条件下的动态响应[J]. *探测与控制学报*, 2025, 47(6): 46-55.
Xie Yushan, Chen Zhengguang, Zhang Yinghao, et al. Dynamic response of MEMS micro-spring under the condition of high overload[J]. *Journal of Detection & Control*, 2025, 47(6): 46-55. (in Chinese)
- [15] Hosmer Jr D W, Lemeshow S, Sturdivant R X. *Applied logistic regression* [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

Failure analysis and evaluation of MEMS springs under shock loading

Qian Kangshen, Cao Yun, Wang Jiali, Wang He, Xi Zhanwen

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

Abstract: In view of the application requirements of MEMS springs for fuzes in high overload environments, the failure analysis and evaluation of MEMS springs under shock loads were carried out. Based on the Johnson-Cook intrinsic model, a dynamic simulation model of MEMS springs considering plastic deformation was established, and the pulse-width vs amplitude failure critical curves of the spring mass-block system under impact loads were obtained, and the load region was divided into safe load and failure load zones. Using the Mahit hammer impact system, impact failure tests were carried out on five MEMS spring prototypes with different line widths to obtain the failure characteristics of MEMS springs under different loads, and the test results basically coincided with the simulation results. Based on the logistic regression method, a logistic regression model of the failure characteristics of MEMS springs was established, and the model was evaluated and analyzed by ten-fold cross-validation, and the accuracy of the model reached 0.9, which indicates that the model can well analyze the failure characteristics of MEMS springs, and it provide a reference basis for the failure analysis and evaluation of MEMS springs under different impact environments.

Keywords: micro electro-mechanical systems (MEMS); planar microsprings; failure; finite element analysis

引用格式: 钱康申, 曹云, 王佳立, 等. 冲击载荷下 MEMS 弹簧的失效分析与评估[J]. *西北工业大学学报*, 2026, 44(1): 169-176.

Qian Kangshen, Cao Yun, Wang Jiali, et al. Failure analysis and evaluation of MEMS springs under shock loading[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2026, 44(1): 169-176. (in Chinese)