

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306378

复杂应力条件下 MEMS 加速度传感器可靠性分析*

关存贺^{1,2} 许高斌^{1,2} 王焕章^{1,2} 张宇^{1,2} 马渊明^{1,2}
(1. 合肥工业大学微电子学院 合肥 230009; 2. 安徽省 MEMS 工程技术研究中心 合肥 230009)

摘要:针对 MEMS 加速度传感器在复杂应力条件下潜在的疲劳失效与断裂失效问题,提出了一种基于全概率公式的可靠性评估模型,完成了器件在振动环境、冲击环境以及振动-冲击耦合环境下的可靠性建模。模型包含 Wiener 过程和齐次泊松随机过程,分别描述器件在振动环境中的疲劳损伤以及器件遭受的随机冲击,进一步考虑了随机冲击的幅值大小对器件退化率的影响。通过器件在冲击应力下产生的疲劳损伤突增量,反映多失效模式间的相关性。对比分析了振动-冲击相互独立与相互耦合作用的可靠性模型,结果表明,振动-冲击相互耦合作用的可靠性模型评估结果更具有指导意义。

关键词: MEMS 加速度传感器;多环境应力;可靠性;全概率公式

中图分类号: TN406 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Reliability analysis of MEMS acceleration sensors under complex stress conditions

Guan Cunhe^{1,2} Xu Gaobin^{1,2} Wang Huanzhang^{1,2} Zhang Yu^{1,2} Ma Yuanming^{1,2}
(1. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Micro Electromechanical System Research Center of Engineering and Technology of Anhui Province, Hefei 230009, China)

Abstract: A reliability assessment model based on the total probability formula is proposed to address the potential fatigue failure and fracture failure of MEMS acceleration sensors under complex stress conditions. The model accomplishes reliability modeling of the device in vibration, impact, and vibration-impact coupled environments. The model includes the Wiener processes and the homogeneous poisson random processes, which describe the fatigue damage of the device in the vibration environment and the random impact of the device, respectively. Furthermore, the influence of the amplitude of random impacts on the device degradation rate is considered. The correlation between multiple failure modes is reflected by the sudden increase in fatigue damage generated by the device under impact stress. A comparative analysis was conducted to compare the reliability models considering the independent and coupled effects of vibration and impact. The results demonstrate that the reliability model considering the coupled effects of vibration and impact provides more meaningful guidance in the evaluation.

Keywords: MEMS accelerometer; multi-environmental stress; reliability; full probability formulation

0 引言

微电子机械系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 是一种采用微加工制造以及半导体批量工艺技术,在芯片上集成制造和封装多个模块的微型集成系统,其模块包括微型感知器件、相关处理电路以及微型执行器件等^[1-3]。通常情况下,这些模块的尺寸在几微米到几

毫米之间,具备微小化、高精度、高可靠性和低功耗等特点^[4-5]。MEMS 惯性器件广泛应用于汽车、医疗、军事、航空航天等领域,具有重要的应用价值^[6]。MEMS 惯性器件在各种应用场景中扮演着关键角色,它们必须应对各种复杂环境,如制造、运输和安装过程中的应力等,其整个寿命周期内会遭受温度、湿度、振动、冲击、辐射等环境应力的独立或耦合影响。例如在汽车交通领域,器件会承受加速冲击、振动等环境应力;在航天航空领域,器件

在工作时通常会处在剧烈的高低温差以及粒子辐射等环境中,这些环境应力会对器件的性能产生很大的影响,导致 MEMS 器件的一些特性发生变化,所引发的失效模式包括断裂、分层、粘附、疲劳、腐蚀、微粒污染等^[7-9]。因此对器件的可靠性提出了很高的要求。

随着 MEMS 器件在各个领域发挥着不可替代的作用,可靠性问题越来越受重视。何程等^[10]将 Copula 函数理论引入 MEMS 加速度计的可靠性评估,在考虑零偏和标度因数之间相关性的基础上实现了 MEMS 加速度计在振动环境下的可靠性预测。陈员娥等^[11]在对高量程加速度传感器进行温/湿度综合环境应力试验的基础上,利用加速度计的失效寿命,采用威布尔分布对其进行可靠性评估。董金龙等^[12]利用漂移 Wiener 过程建立加速度传感器性能退化模型,用随机变量描述其漂移参数和扩散参数,提出了一种寿命预测方法。上述研究大都是对器件进行破坏性实验,并通过处理退化数据或失效数据完成对某种器件的可靠性分析。可靠性预测结果受数据处理方法的影响,缺乏能够准确反映器件在复杂环境应力中的可靠度模型。

针对以上问题,本文提出了一种退化失效(软失效)与突发失效(硬失效)相关联的可靠性评估模型,分析了 MEMS 加速度传感器在复杂环境应力下的断裂失效及疲劳失效。利用 Wiener 过程和齐次泊松随机过程分别建立了振动环境、冲击环境以及振动-冲击耦合环境的可靠性模型,选取全概率公式将器件的疲劳失效与断裂失效融合,进一步研究了环境敏感参数对可靠度的影响,最后采用 MC 方法验证了模型的可行性。

1 失效分析

MEMS 压阻式加速度传感器作为一种惯性器件,具有结构简单、工艺成熟、信号处理电路简单等优点,应用范围十分广泛。为了使得研究更加具体,本文将该传感器类型作为研究对象。梁-质量块结构是压阻式加速度传感器的典型结构,该结构是利用敏感梁上的压敏电阻,当有外部载荷作用于质量块并产生位移时,由于硅材料的压阻效应会导致梁上的压敏电阻阻值发生变化,通过测量阻值的变化,可以确定待测加速度的大小^[13]。

MEMS 器件的疲劳是指在材料受到循环载荷时会出现局部结构的损伤,这些损伤可能引发裂纹的形成,在外部应力的作用下,裂纹会逐渐扩展到整个结构,最终导致器件失效。振动应力是导致 MEMS 器件疲劳失效的主要因素之一,会对器件结构造成破坏^[14]。当施加在器件结构上的载荷超出材料所能承受的极限应力时,将导致断裂或缺陷的产生,冲击应力引起的最主要的失效现象是 MEMS 结构断裂^[15]。对于具有悬臂梁等敏感结构的

MEMS 加速度传感器来说,器件在承受振动、冲击等复杂应力时,可靠性逐渐下降,存在潜在的疲劳失效、断裂失效等风险。

为了分析 MEMS 压阻式加速度传感器在复杂应力条件下的应力分布情况,采用 COMSOL 有限元分析软件对一个典型的梁-质量块结构^[16]进行应力分析,如图 1 所示,可以明显看出应力主要集中在梁根部,可判断当有外部环境应力作用时,疲劳失效和断裂失效易发生在梁根部。

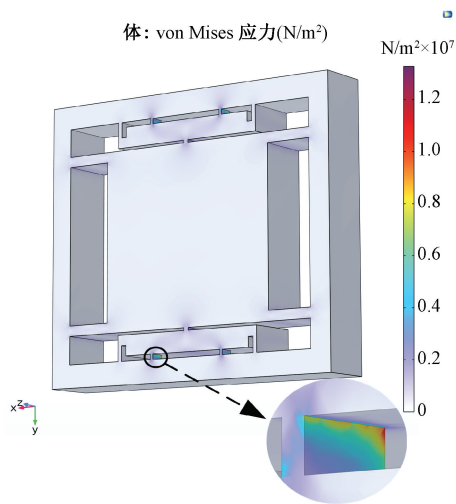


图 1 结构应力分析

Fig. 1 Structural stress analysis

2 可靠性模型

2.1 可靠性模型的描述与假设

为了更好的研究 MEMS 加速度传感器的失效机理,做出如下描述与假设:

1) 器件在工作环境中,同时受到振动载荷与随机冲击载荷的作用,随机冲击载荷会对退化过程造成影响。故假设 MEMS 加速度传感器的梁结构在任意时刻 t 的总的疲劳累积损伤量 $X_s(t)$ 包括振动载荷作用下的疲劳累积损伤量 $X(t)$ 和非致命冲击造成的累积损伤量 $S(t)$ 。

2) 器件的失效过程分为两类:当梁结构总的疲劳累积损伤量 $X_s(t)$ 达到失效阈值 H 时,发生软失效;当作用在器件上的某次随机冲击幅值 Y_i 超过预设阈值 D 时,发生硬失效。

3) 随机冲击分为 3 类:当冲击强度大于硬失效阈值 D 时属于致命冲击,直接导致器件的失效;当冲击强度介于 D_0 与 D 之间时,此时器件软失效的退化率为 α_2 ;当冲击强度小于 D_0 时,软失效的退化率为 α_1 。

2.2 振动载荷下退化失效模型

基于 Wiener 过程^[17]的退化模型能够描述多种典型

产品的性能退化过程,且具有良好的计算性质。选用 Wiener 过程来描述微加速度计在振动载荷作用下的疲劳损伤,其表达式为:

$$X(t) = X(0) + \alpha t + \beta B(t) \quad (1)$$

式中: $X(t)$ 是 MEMS 加速度传感器的梁结构在振动载荷作用下的疲劳累积损伤量, $X(0)$ 表示器件的初始损伤。Wiener 过程是独立增量过程,根据独立增量的定义, $X(0) = 0$; α 表示器件在退化过程中的漂移系数,反映器件的退化速率; β 表示退化时的扩散系数,反映退化过程的波动程度; $B(t)$ 是标准的布朗运动,反映退化过程的时变不确定性, $B(t)$ 服从 $N(0, t)$ 的正态分布。因此, $X(t)$ 也服从正态分布。

如图 2 所示, H 是表面裂纹深度,用来表征 MEMS 加速度传感器疲劳累积损伤的临界值。当某 t 时刻的损伤量 $X(t)$ 达到失效阈值 H 时,器件发生软失效,器件在振动载荷下的可靠度可表示为:

$$P(X(t) < H) = \Phi\left(\frac{H - \alpha t}{\sqrt{\beta^2 t}}\right) \quad (2)$$

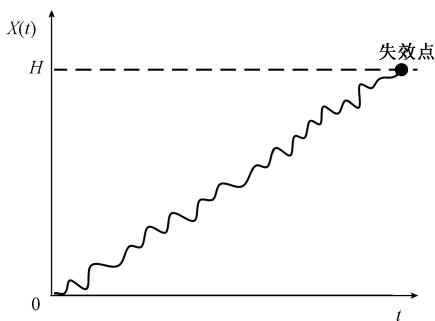


图 2 振动载荷下软失效示意图

Fig. 2 Schematic diagram of soft failure under vibration load

2.3 随机冲击载荷下退化失效模型

齐次泊松随机过程是描述随机过程的经典模型,可以描述某个事件在某段时间内发生某次的概率。由于器件遭受的随机冲击并不受初始时刻的影响,假设在 t 时刻器件遭受的随机冲击次数 $N(t)$ 服从参数为 $\lambda(t)$ 的齐次泊松分布^[18],在 t 时刻随机冲击载荷作用次数 $N(t) = i$ 的概率可表示为:

$$P(N(t) = i) = \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t}, i = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

如图 3 所示, D 是器件材料断裂强度的阈值,当 t 时刻的某次随机冲击的冲击幅值大于 D 时,器件发生硬失效。MEMS 加速度传感器在工作环境中会面临不同幅值的冲击载荷,假设第 i 次的随机冲击幅值为 Y_i ,且 Y_i 服从 $N(\mu_Y, \sigma_Y^2)$ 的正态分布,在 t 时间内随机冲击载荷发生 $N(t)$ 次的可靠度可表示为:

$$P(Y_1 < D, Y_2 < D, \dots, Y_{N(t)} < D) = \prod_{i=1}^{N(t)} \Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right) \quad (4)$$

W_i 是第 i 次随机冲击 Y_i 造成的疲劳损伤突增量,二者服从线性关系,引入冲击损伤系数 a , $W_i = aY_i$ 。 W_i 服从 $N(\mu_W, \sigma_W^2)$ 的正态分布, $\mu_W = a\mu_Y$, $\sigma_W = a\sigma_Y$ 。 $S(t)$ 可表示为:

$$S(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} W_i, N(t) > 0 \quad (5)$$

式中: $S(t)$ 表示 MEMS 加速度传感器遭受非致命冲击时造成的损伤量,当 $S(t)$ 达到疲劳累积损伤临界值 H 时,器件也会发生失效。

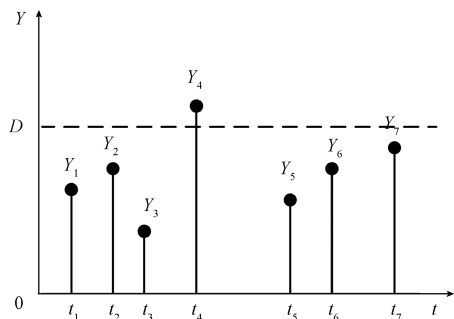


图 3 冲击载荷下硬失效示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hard failure under shock load

2.4 振动-冲击相互独立的可靠性模型

MEMS 加速度传感器处于振动与冲击的环境时,可能会发生疲劳失效,也有可能发生断裂失效。振动、冲击应力相互独立作用,即分别分析器件处于振动环境下的退化失效以及器件处于冲击环境下的突发失效。

根据上文对振动载荷下退化失效模型和随机冲击载荷下突发失效模型的理论研究,可知:

当 MEMS 加速度传感器的梁结构在振动载荷作用下的疲劳累积损伤量 $X(t)$ 达到失效阈值 H 时,器件发生失效,可靠度可用式(6)描述:

$$P(X(t) < H) = \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t)}{\sqrt{\beta^2 t}}\right) \quad (6)$$

当作用在器件上的某次随机冲击幅值 Y_i 超过预设阈值 D 以及冲击造成的损伤量 $S(t)$ 达到失效阈值 H 时,器件发生失效,此时器件的可靠度可用式(7)描述:

$$P(S(t) < H, Y_1 < D, Y_2 < D, \dots, Y_{N(t)} < D) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{H - i\mu_W}{\sqrt{i\sigma_W^2}}\right) \times \left(\Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^i \quad (7)$$

选用全概率公式来建立 MEMS 加速度传感器的多失效模式可靠性模型,在此环境中的可靠性模型 $R(t)$ 为:

$$R(t) = P(X(t) < H, S(t) < H) = P(X(t) < H | N(t) = 0) \times P(N(t) = 0) + P(X(t) < H, S(t) < H,$$

$$\begin{aligned} & \cap_{k=1}^i (Y_k < D) \mid N(t) = i) \times P(N(t) = i) = \\ & \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t)}{\sqrt{\beta^2 t}}\right) \times e^{-\lambda t} + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{H - i\mu_w}{\sqrt{i\sigma_w^2}}\right) \times \left(\Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^i \times \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad (8) \end{aligned}$$

2.5 振动-冲击相互耦合的可靠性模型

MEMS 加速度传感器在冲击载荷的作用下不仅会发生断裂失效,也会由于遭受冲击导致疲劳损伤突增量的产生,在振动载荷作用时也会产生疲劳损伤量,两者便有了关联性。

冲击过程的建模大致可以分为 4 种:极端冲击模型、累积冲击模型、连续冲击模型以及 δ -冲击模型。本文重点研究了极端冲击模型,并在器件的失效分析中引入广义的极端冲击模型,考虑了冲击过程对退化率的影响,如图 4 所示,当记录到第 1 个高于临界值 D_0 的冲击时,退化率会从 α_1 变化至 α_2 。

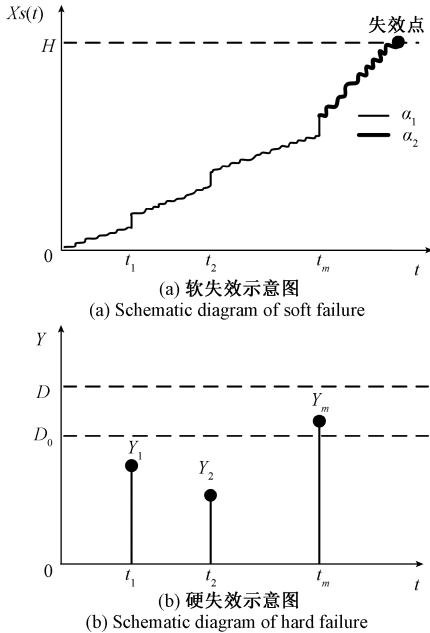


图 4 广义极端冲击模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a generalized extreme impact model

定义引发退化率变化的第 1 个冲击为触发冲击,且发生在第 m 次冲击, m 是一个随机变量,把第 m 次冲击发生的时间定义为过渡时间 τ 。触发冲击在时间 t 内可能发生也可能不发生, Wiener 退化过程可重新表示为:

$$X(t) = \begin{cases} X(0) + \alpha_1 \tau + \alpha_2(t - \tau) + \\ BB(t), m \leq N(t) \\ X(0) + \alpha_1 \tau + \beta B(t), m > N(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: β 表征的是退化过程的波动程度,本文假设在退化率变化的过程中 β 值不变。

基于此,本文将系统的分析 MEMS 加速度传感器在振动应力和冲击应力耦合作用下的可靠性模型。

1) 在时间 t 内没发生随机冲击,即 $N(t) = 0$,此时模型为:

$$R(t) = P(X_s(t) < H \mid N(t) = 0) = P(X(t) < H) \times P(N(t) = 0) = \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t)}{\sqrt{\beta^2 t}}\right) \times e^{-\lambda t} \quad (10)$$

2) 在时间 t 内有随机冲击的存在,即 $N(t) > 0$,假设所有冲击的幅值 Y_i 全部小于 D_0 ,有 $m > N(t)$,此时退化率为 α_1 ,可靠性模型为:

$$R(t) = P(X_s(t) < H \mid m > N(t) = i) = P(X(t) + S(t) < H, \cap_{k=1}^i (Y_k < D_0)) \times P(m > N(t) = i) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t + i\mu_w)}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}}\right) \times \left(\Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^i \times \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad (11)$$

3) 在时间 t 内有随机冲击的存在,即 $N(t) > 0$,假设第 m 次随机冲击的幅值 $Y_m > D_0$, m 的取值有 $N(t) = i$ 种可能, $m \leq N(t)$, $m = \min(i; Y_i > D_0)$,过渡时间 τ 之前的退化率为 α_1 ,时间 $t - \tau$ 内的退化率为 α_2 ,可靠性模型为:

$$R(t) = \sum_{m=1}^i P(X_s(t) < H \mid m \leq N(t) = i) = \sum_{m=1}^i P(X(t) + S(t) < H, \cap_{k=m+1}^i (Y_k < D_0), D_0 < Y_m < D, \cap_{k=m+1}^i (Y_k < D)) \quad (12)$$

因为采用泊松分布来描述随机冲击过程,泊松过程的等待时间满足伽马分布,所以过渡时间 τ 服从伽马分布,分别选取 m 和 λ 作为伽马分布的形状参数和尺度参数,过渡时间 τ 的概率密度函数为:

$$f(\tau, \lambda, m) = \frac{\lambda^m}{(m-1)!} \tau^{m-1} e^{-\lambda \tau} \quad (13)$$

模型可进一步表示为:

$$R(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=1}^i \left(\int_0^t \frac{\lambda^m}{(m-1)!} \tau^{m-1} e^{-\lambda \tau} \times \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 \tau + \alpha_2(t - \tau) + i\mu_w)}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}}\right) d\tau \right) \times \left(\Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^{m-1} \times \left(\Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right) - \Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right) \times \left(\Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^{i-m} \times \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \quad (14)$$

综上, MEMS 加速度传感器在振动-冲击耦合环境应力下的可靠度模型为:

$$R(t) = P(X_s(t) < H \mid N(t) = 0) + P(X_s(t) < H \mid m > N(t) = i) + \sum_{m=1}^i P(X_s(t) < H \mid m \leq N(t) = i) =$$

$$\begin{aligned} & \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t)}{\sqrt{\beta^2 t}}\right) \times e^{-\lambda t} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \times \\ & \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t + i\mu_w)}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}}\right) \times \left(\Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^i + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=1}^i \left(\int_0^t \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 \tau + \alpha_2(t - \tau) + i\mu_w)}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}}\right) \times \right. \\ & \left. \frac{\lambda^m}{(m-1)!} \tau^{m-1} e^{-\lambda \tau} d\tau \right) \times \left(\Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^{m-1} \times \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} \times \\ & \left(\Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right) - \Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right) \times \left(\Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^{i-m} \quad (15) \end{aligned}$$

$F(t)$ 是累积失效分布函数,与可靠度函数 $R(t)$ 的关系是: $F(t) = 1 - R(t)$, 所以得到的失效概率密度函数 $f(t)$ 是 $F(t)$ 的导数:

$$\begin{aligned} f(t) = & e^{-\lambda t} \times \left(\Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t)}{\sqrt{\beta^2 t}}\right) \times \left(\frac{\alpha_1}{\sqrt{\beta^2 t}} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\beta^2(H - (X(0) + \alpha_1 t))}{2(\beta^2 t)^{\frac{3}{2}}}\right) + \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t)}{\sqrt{\beta^2 t}}\right) \times \lambda\right) + \\ & \sum_{i=1}^{\infty} \left(\Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^i \times \left(\Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t + i\mu_w)}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}}\right) \times \right. \\ & \left. \left(\frac{\alpha_1}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}} + \frac{\beta^2(H - (X(0) + \alpha_1 t + i\mu_w))}{2(\beta^2 t + i\sigma_w^2)^{\frac{3}{2}}}\right) \times \right. \\ & \left. \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} + \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t + i\mu_w)}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}}\right) \times \left(\frac{\lambda \times (\lambda t)^i}{i!} - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{i \times \lambda \times (\lambda t)^{i-1}}{i!}\right) \times e^{-\lambda t}\right) - \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{m=1}^i \left(\left(\Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^{m-1} \times \right. \\ & \left. \left(\Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right) - \Phi\left(\frac{D_0 - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right) \times \left(\Phi\left(\frac{D - \mu_Y}{\sigma_Y}\right)\right)^{i-m} \times \right. \\ & \left. \left(\Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 t + i\mu_w)}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}}\right) \times \frac{\lambda^m}{(m-1)!} t^{m-1} \times e^{-\lambda t} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{(\lambda t)^i}{i!} e^{-\lambda t} + \left(\frac{i \times \lambda \times (\lambda t)^{i-1}}{i!} - \frac{\lambda \times (\lambda t)^i}{i!}\right) \times e^{-\lambda t} \times \right. \right. \\ & \left. \left. \int_0^t \Phi\left(\frac{H - (X(0) + \alpha_1 \tau + \alpha_2(t - \tau) + i\mu_w)}{\sqrt{\beta^2 t + i\sigma_w^2}}\right) \times \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\lambda^m}{(m-1)!} \tau^{m-1} e^{-\lambda \tau} d\tau \right) \right) \quad (16) \end{aligned}$$

3 可靠性模型分析

3.1 可靠性模型对比分析

基于上文可靠性模型的理论研究,将 MEMS 压阻式加速度传感器在振动-冲击相互耦合与相互独立两种复杂环境应力条件下的可靠度曲线进行对比分析,根据式(8)描述的器件在振动-冲击相互独立作用时的可靠性模

型以及式(15)描述的器件在振动-冲击相互耦合作用时的可靠性模型,确定可靠性分析计算所需要的参数,如表1所示。

表1 可靠性模型计算参数

Table 1 Reliability model calculation parameters		
参数	数值	来源
H	0.02 μm^3	文献[19]
D	1.5 GPa	文献[20]
D_0	1.2 GPa	文献[21]
α_1	$8.482 \times 10^{-9} \mu\text{m}^3$	文献[20]
α_2	$1.048 \times 10^{-8} \mu\text{m}^3$	假设
β	$6.001 \times 10^{-10} \mu\text{m}^3$	文献[20]
μ_Y	1.2 GPa	文献[21]
σ_Y	0.2 GPa	文献[21]
a	$4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3/\text{GPa}$	假设
λ	5×10^{-5}	文献[21]

由式(8)和(15)可得到器件在两种复杂环境应力下的可靠度随时间变化曲线。如图5所示,在初始阶段,两条可靠度曲线下降的趋势较为缓慢,此阶段发生的失效以断裂失效为主,而相互耦合的曲线比相互独立的曲线下降趋势要快。在50 000 h以后,两条可靠度曲线都有一个迅速下降的趋势,此阶段是由于器件的材料在应力的作用下达疲劳极限,以疲劳失效为主。振动-冲击相互独立作用的预测结果明显高于相互耦合的预测结果,可靠性预估结果趋于理想化。相反,振动-冲击相互耦合时的模型预测值更符合实际,两者预测值的最大差距约15%,恰好说明振动-冲击相互耦合模型引入的疲劳突增量会对可靠度评估有较大影响。

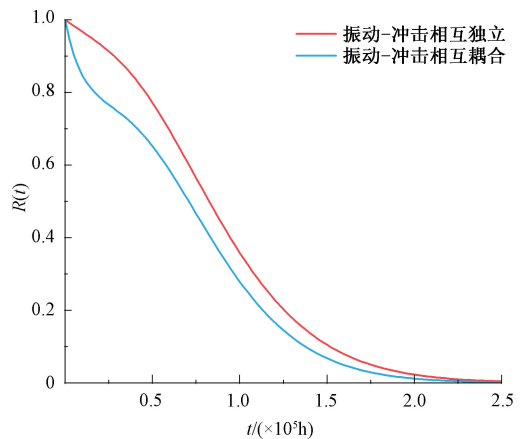


图5 加速度传感器可靠度随时间变化对比分析

Fig. 5 Comparative analysis of accelerometer reliability over time

图6是器件在两种复杂环境应力下的失效率随时间变化曲线。对比可明显的看出相互耦合作用的曲线变化趋势较为剧烈,在70 000 h左右,失效率都达到峰值,可靠度下降最快。

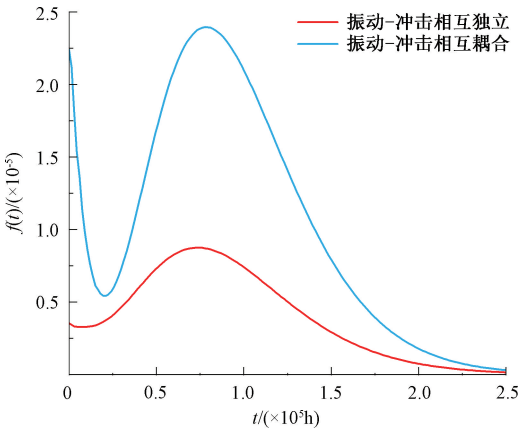


图 6 加速度传感器失效率随时间变化对比分析
Fig. 6 Comparative analysis plot of accelerometer failure rate over time

3.2 参数敏感性分析

分析不同参数对可靠度的影响,有利于 MEMS 加速度传感器的设计优化以及可靠度的提高。分别对软失效阈值 H 、硬失效阈值 D 、冲击临界值 D_0 、泊松随机参数 λ 以及冲击损伤系数 a 进行参数敏感性分析。

如图 7~11 所示,当软失效阈值 H 增大,器件承受疲劳损伤的能力会提升,发生疲劳失效的概率会出现一定程度的降低,可靠度会增大;硬失效阈值 D 增大时,器件承受冲击的能力会提升,发生过应力断裂失效的概率会降低,可靠度也相应增大;随着冲击临界值 D_0 的增大,冲击导致退化率发生变化的概率降低,疲劳损伤累积量上升趋势变缓,发生疲劳失效的可能性变小,可靠度增大;泊松随机参数 λ 增大时,器件遭受的冲击次数会变多,更容易发生断裂失效,也会因为疲劳突增量的增加导致疲劳失效的概率增加,引起可靠度的减小;当冲击损伤系数 a 增大时,器件遭受冲击后会产生更多的疲劳突增量,发生疲劳失效的可能性变大,可靠度随之减小。

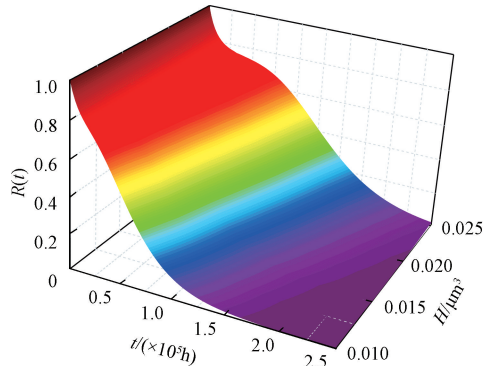


图 7 可靠度对软失效阈值 H 的敏感性三维曲面
Fig. 7 Reliability sensitivity to soft failure threshold H 3D surface

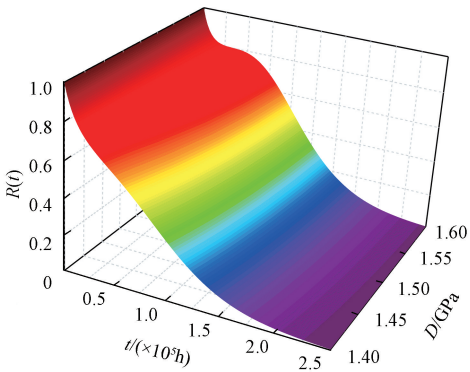


图 8 可靠度对硬失效阈值 D 的敏感性三维曲面
Fig. 8 Reliability sensitivity to hard failure threshold D 3D surface

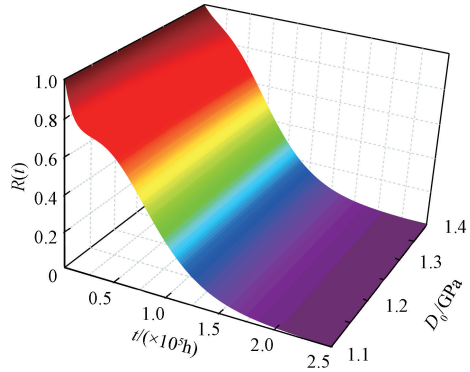


图 9 可靠度对冲击临界值 D_0 的敏感性三维曲面
Fig. 9 Reliability sensitivity to impact critical value D_0 3D surface

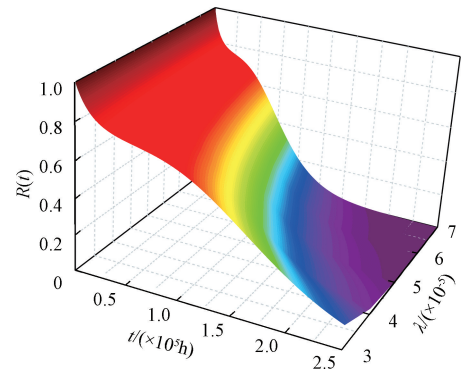


图 10 可靠度对泊松随机参数 λ 的敏感性三维曲面
Fig. 10 Reliability sensitivity to poisson random parameter λ 3D surface

为了提升 MEMS 加速度传感器的可靠性,可以适当减小器件在使用环境中的受冲击概率,也可以在器件结构设计的初期提升其抗冲击能力以及应力释放能力。

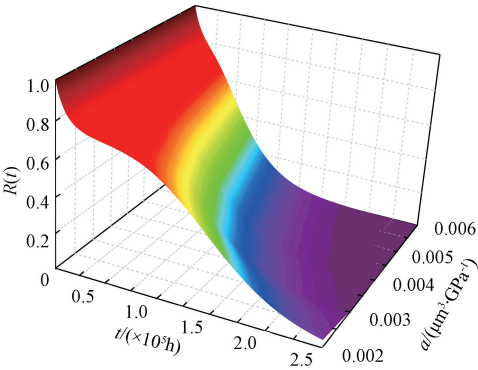


图 11 可靠度对冲击损伤系数 a 的敏感性三维曲面
Fig. 11 Reliability sensitivity to impact damage factor a 3D surface

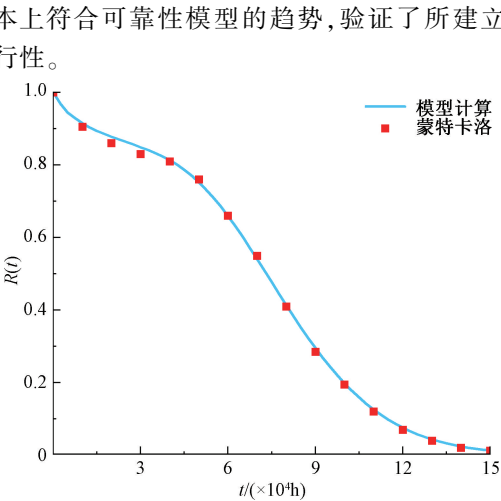


图 12 MC 方法抽样实验
Fig. 12 Monte Carlo method sampling experiment

4 MC 方法验证

蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 方法,也称为计算机随机模拟方法,在用于评估可靠性的方法中,MC 方法非常方便和高效,被广泛应用于可靠性分析中^[22]。它是一种利用随机抽样计算得到近似结果的数学方法,随着抽样次数的增加,预测结果越接近真实结果。

选取 MC 方法对建立的可靠性模型进行仿真验证,为了不失一般性,假定进行蒙特卡洛抽样实验的参数值如表 2 所示。

表 2 蒙特卡洛抽样实验参数表	
Table 2 Monte Carlo sampling experiment parameter table	
参数	数值
H	0.01 μm^3
D	1.6 GPa
D_0	1.4 GPa
α_1	$8.482\ 3\times10^{-9}\ \mu\text{m}^3$
α_2	$1.048\ 23\times10^{-8}\ \mu\text{m}^3$
β	$6.001\ 6\times10^{-10}\ \mu\text{m}^3$
μ_Y	1.2 GPa
σ_Y	0.2 GPa
a	$1\times10^{-3}\ \mu\text{m}^3/\text{GPa}$
λ	1×10^{-4}
$X(0)$	0

利用 MATLAB 软件结合 MC 方法,从 0 时刻开始每隔 10 000 h 进行 5 000 次抽样实验,每次抽样实验根据数据服从的分布函数随机生成输入量,在确定失效判据的基础上分别对每个输入量进行系统计算,然后统计计算输出量的概率分布。通过比较 MC 方法模拟实验的结果与所建立模型的计算结果,判断可靠性模型的准确性。如图 12 所示,可以看出 MC 方法的实验结

果基本上符合可靠性模型的趋势,验证了所建立模型的可行性。

5 结 论

本文对 MEMS 压阻式加速度传感器进行了可靠性分析,着重研究了器件的疲劳失效、断裂失效及两者间的关联性。创新性地结合 Wiener 过程、泊松随机过程及全概率公式,引入广义的极端冲击模型,建立了器件在复杂环境应力条件下的可靠性模型,对比分析了振动、冲击两种环境应力相互耦合作用与相互独立作用时器件的可靠度曲线与失效率曲线。相比于振动、冲击相互独立的可靠性模型,相互耦合模型预测出的可靠性数据更能反映器件的实际情况,两者预测值最大相差 15% 左右,后者的可靠性预测结果更具有指导意义。根据参数敏感性分析得出的结果,发现器件遭受的随机冲击次数会对可靠度有着较大的影响,因此在进行器件结构设计时增强抗冲击能力会大幅提升可靠性。

参考文献

[1] HARI K, VERMA S K, PRAVEEN KRISHNA I R, et al. Out-of-plane dual flexure MEMS piezoresistive accelerometer with low cross axis sensitivity [J]. Microsystem Technologies, 2018, 24(5) : 2437-2444.

[2] ZHU J, LIU X, SHI Q, et al. Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS [J]. Micromachines, 2019, 11(1) : 7.

[3] 杨雨君,王鹏,陈曼龙,等. 高 g 值压阻式加速度传感器仿真设计 [J]. 传感器与微系统, 2022, 41(6) : 78-81, 85.

YANG Y J, WANG P, CHEN M L, et al. Simulation design of high g value piezoresistive accelerometer [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(6) :

- 78-81,85.
- [4] 王岩,赵剑,刘蓬勃,等. 基于 PZT 管支撑结构的三轴加速度计设计及实验误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7):91-98.
- WANG Y, ZHAO J, LIU P B, et al. Design and experimental error analysis of triaxial accelerometer based on PZT tube support structure[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7):91-98.
- [5] 李开富,蒋婷,郭小伟,等. 三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10):193-201.
- LI K F, JIANG T, GUO X W, et al. Design of three-mass MEMS triaxial capacitive accelerometer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(10):193-201.
- [6] 邢朝洋. 高性能 MEMS 惯性器件工程化关键技术研究[D]. 北京:中国运载火箭技术研究院, 2017.
- XING CH Y. Research on key technologies for engineering high-performance MEMS inertial devices [D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2017.
- [7] HUANG Y, VASAN A S S, DORAISWAMI R, et al. MEMS reliability review [J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2012, 12(2):482-493.
- [8] 陈俊光,谷专元,何春华,等. MEMS 惯性器件的主要失效模式和失效机理研究[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(3):1-5, 13.
- CHEN J G, GU ZH Y, HE CH H, et al. Study on main failure modes and failure mechanism of MEMS inertial devices[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(3):1-5, 13.
- [9] 刘俊作. MEMS 加速度传感器性能退化研究与可靠性分析[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
- LIU J Z. Research on performance degradation and reliability analysis of MEMS accelerometer [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [10] 何程,秦丽,于丽霞,等. 基于 Copula 的 MEMS 加速度计在振动环境下的可靠性评估[J]. 仪表技术与传感器, 2018(4):46-50, 54.
- HE CH, QIN L, YU L X, et al. Reliability evaluation of MEMS accelerometer based on Copula in vibration environment [J]. Instrument Technique and Sensor, 2018(4):46-50, 54.
- [11] 陈员娥,刘晴晴,马喜宏,等. 温湿度环境下高量程加速度计可靠性研究[J]. 传感技术学报, 2013, 26(6):830-833.
- CHEN Y E, LIU Q Q, MA X H, et al. Reliability study of high range accelerometer under temperature and humidity environment [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2013, 26(6):830-833.
- [12] 董金龙,汪立新,盛立昊,等. 一种基于 Wiener 过程加速度计寿命预测自助方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(29):8729-8733.
- DONG J L, WANG L X, SHENG L H, et al. A self-help method for life prediction based on Wiener process accelerometer[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(29):8729-8733.
- [13] JIA C, MAO Q, LUO G, et al. Novel high-performance piezoresistive shock accelerometer for ultra-high-g measurement utilizing self-support sensing beams [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(8):085001.
- [14] 李明珠,许高斌,董娜娜,等. MEMS 加速度计在振动环境下的可靠性分析[J]. 半导体光电, 2022, 43(6):1055-1061.
- LI M ZH, XU G B, DONG N N, et al. Reliability analysis of MEMS accelerometer in vibration environment [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(6):1055-1061.
- [15] PENG T, YOU Z. Reliability of MEMS in shock environments: 2000-2020 [J]. Micromachines, 2021, 12(11):1275.
- [16] 许高斌,花翔,杜林云,等. 新型高 g 值压阻式加速度计设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(10):42-46, 83.
- XU G B, HUA X, DU L Y, et al. Design of novel high g value piezoresistive accelerometer [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(10):42-46, 83.
- [17] CAI B, FAN H, SHAO X, et al. Remaining useful life re-prediction methodology based on Wiener process: Subsea Christmas tree system as a case study [J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 151:106983.
- [18] CHA J H, FINKELSTEIN M. Point processes for reliability analysis[J]. Shocks and Repairable Systems, 2018, DOI:10.1007/978-3-319-73540-5.
- [19] 许高斌,余智,徐礼建,等. 复杂环境电容式微加速度计传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8):154-159.
- XU G B, YU ZH, XU L J, et al. Reliability analysis of capacitive microaccelerometer in complex environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8):154-159.
- [20] RAFIEE K, FENG Q, COIT D W. Reliability assessment of competing risks with generalized mixed shock models [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 159:1-11.
- [21] RAFIEE K, FENG Q, COIT D W. Reliability modeling

for dependent competing failure processes with changing degradation rate[J]. IIE Transactions, 2014, 46(5): 483-496.

[22] SHADAB FAR M, WANG Y. Approximation of the Monte Carlo sampling method for reliability analysis of structures[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016, 2016.

作者简介



关存贺, 2020 年于池州学院获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 器件可靠性。
E-mail: guancunhe@Outlook.com

Guan Cunhe received his B. Sc. degree from Chizhou University in 2020. Now he is a M.Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interest includes MEMS device reliability.



许高斌 (通信作者), 1993 年于合肥工业大学获得学士学位, 2001 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2004 年于东南大学获得博士学位, 现为合肥工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为 MEMS 传感器的设计、制造、封装与可靠性, 多传感模块集成与信息融合技术。
E-mail: gbxu@huft.edu.cn

Xu Gaobin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1993, M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2001 and Ph. D. degree from Southeast University in 2004. Now he is a professor and Ph. D. supervisor at Hefei University of Technology. His main research interests include MEMS sensor design, manufacturing, packaging and reliability, multi-sensor module integration and information fusion technology.