MEMS 和 MOEMS 技术专题

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022090801

MEMS 加速度计在振动环境下的可靠性分析

李明珠，许高斌*，董娜娜，袁　婷，马渊明，冯建国

（合肥工业大学 微电子学院 安徽省微电子机械系统工程技术研究中心，合肥 230009）

摘　要： 以电容式 MEMS 加速度计的悬臂梁结构为研究对象，分析了振动环境下 MEMS 加速度计的典型失效模式及失效机理；在 Miner 理论的基础上，引入了应力-寿命曲线，建立了疲劳可靠性模型；在考虑强度退化前提下，基于应力强度干涉理论建立了塑性形变可靠性模型；运用蒙特卡洛法验证了两种可靠性模型的准确性，并分析了模型关键参数对可靠度的影响。结果显示，振动应力水平和材料的屈服强度对可靠度有显著的影响，减小应力幅值，增大屈服强度，可以提高 MEMS 加速度计的可靠性。

关键词： MEMS 加速度计；悬臂梁；疲劳失效；塑性形变；蒙特卡洛法；可靠性

中图分类号： TN406　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1055－07

Reliability Analysis of MEMS Accelerometer in Vibration Environment

LI Mingzhu, XU Gaobin, DONG Nana, YUAN Ting, MA Yuanming, FENG Jianguo

(Micro Electromechanical System Research Center of Engineering and Technology of Anhui Province, School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN)

Abstract: Taking the cantilever structure of capacitive MEMS accelerometer as the research object, the typical failure mode and failure mechanism of MEMS accelerometer in vibration environment were analyzed. Based on Miner's theory, the stress-life curve was introduced to establish the fatigue reliability model. The reliability model of plastic deformation was established based on stress intensity interference theory considering strength degradation. The Monte Carlo method was used to verify the accuracy of the two reliability models, and the influence of the key parameters of the model on the reliability was analyzed. The results show that the vibration stress level and the yield strength of the material had significant influence on the reliability. Reducing the stress amplitude and increasing the yield strength can improve the reliability of the MEMS accelerometer.

Key words: MEMS accelerometer; cantilever; fatigue failure; plastic deformation; Monte Carlo; reliability

0　引言

基于微机电系统（MEMS）技术的惯性器件因其质量轻、能耗低、成本低、机械强度高、可靠性高及可批量生产等优点，在汽车安全、生物医学、航空航天、军事导弹、消费性电子等行业得到广泛应用[1-2]。MEMS 惯性器件包括微陀螺仪和微加速度计两大类，微陀螺仪用于测量运动载体的角速度或角速率，微加速度计用来测量运动载体的加速度[3-4]。微加速度计在 MEMS 惯性器件中应用最为广泛，根据敏感原理不同，微加速度计可分为电容式、谐振式、压电式、隧穿式和压阻式等结构[5-6]。

MEMS 加速度计不可避免地工作在各种恶劣

收稿日期：2022－09－08.

基金项目：国家重点研发计划项目（2020YFB2008901）；安徽省发改委研发创新项目（JZ2021AFKJ0050）；安徽省工程技术研究中心项目（PA2022AKGY0012）；中央高校基本科研业务费专项项目（JZ2021HGQA0254，JZ2021HGTA0147）.

* 通信作者：许高斌　E-mail：gbxu@hfut.edu.cn

环境中，包括冲击、振动、湿度、辐射、温度循环和ESD及多种环境的综合等[7-8]，这些环境因素会导致器件性能退化，当性能退化到某一临界值，就会使得器件遭到破坏。由于不利的环境因素，MEMS加速度计的主要故障模式有：疲劳、断裂、分层、塑性形变、粒子污染、气密性退化和材料释气等[9-11]。

随着MEMS加速度计广泛应用于各个领域，MEMS加速度计的可靠性显得尤为重要，其中可靠性度量指标有可靠度、失效率、平均失效时间和有效度等。熊兴国等[12]分析了多晶硅MEMS梳状加速度计在材料疲劳失效机理下的可靠性，推导BISR(Built-in Self-repairable)和非BISR多晶硅加速度计的平均失效时间和失效率。结果表明，用多晶硅制作的MEMS加速度计具有良好的疲劳寿命。Lall等[13]通过对ADXL193加速度计进行3 000 g的冲击实验，利用ANSYS得到了电容与行程长度的关系图，并建立了多物理耦合模型，首次提出了利用输入g法分析加速度计的跌落和冲击试验，最终得出加速度计的灵敏度为2.31 pF/g。王威等[14]介绍了一种基于退化量分布的寿命评估方法，对MEMS加速度计进行了在温度应力(90，100，110 ℃)下的加速寿命试验，根据试验数据推导出模型参数随时间的变化规律，从而求出器件的可靠度，相比基于失效数据的评估方法，该方法预测MEMS加速度计的可靠性寿命更准确。国内外对MEMS加速度计可靠性的研究主要是在环境载荷试验结果的观察和分析上，目前还缺乏统一的、标准的、实用的、能够很好描述退化失效行为的可靠性模型。首先，现有的基于Miner理论的疲劳可靠性模型并未考虑造成材料疲劳损伤的应力(外因)及材料的固有属性(内因)；其次，以往运用应力强度干涉理论所建立的可靠性模型认为材料的屈服强度是不变的，实际上屈服强度会随着时间的推移而不断退化，因此上述两种可靠性模型并不能完全准确地预测器件的寿命。

针对以上问题，本文以电容式MEMS加速度计的悬臂梁结构为研究对象，分析在振动环境下MEMS加速度计的疲劳和塑性形变的失效机理。基于Miner理论和应力-寿命(S-N)曲线建立疲劳可靠性模型；在考虑强度退化前提下，基于应力强度干涉理论建立塑性形变可靠性模型；运用蒙特卡洛法对所建立的退化模型进行仿真验证，并分析影响MEMS加速度计可靠度的关键参数。

1 MEMS加速度计的静力学分析

典型的电容式MEMS加速度计结构如图1所示。电容式MEMS加速度计为对称结构，主要包括一个四面带若干梳齿的敏感质量块、四个一面带若干梳齿的固定支柱、四根L型微悬臂梁及四个锚点，质量块上的动齿与固定支柱上的定齿等间距地交错放置，动齿和定齿之间形成差分电容。当有外力作用时，动齿会随着敏感质量块移动，使得电容极板间距或面积发生改变，由检测电路测量电容变化量，从而输出相应的信号。

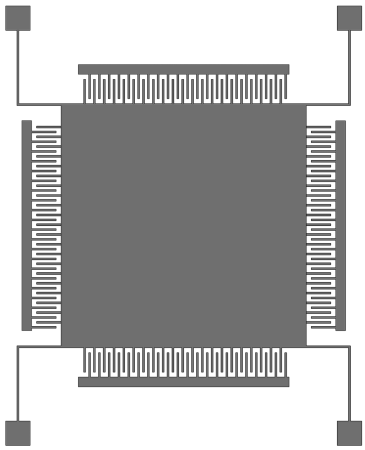


图1 电容式MEMS加速度计的典型结构

振动是造成MEMS加速度计失效的主要因素，主要对器件的结构造成损坏，当器件长期处于振动应力下器件表面会产生微裂纹，造成疲劳累积损伤。本文首先对电容式MEMS加速度计进行了静力学分析，利用ANSYS Workbench有限元仿真软件分析了加速度计的受力状态，确定器件的失效位置，结果如图2所示。由仿真结果可知，微悬臂梁受到的

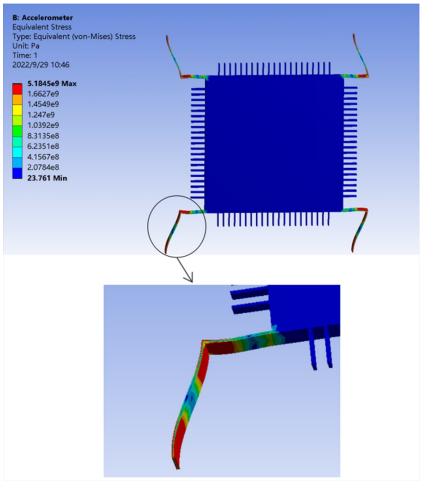


图2 电容式MEMS加速度计的应力分布图

应力最大，相应位置疲劳损伤最大，并且当应力超过材料的屈服强度时，就会发生变形。基于此，本文主要针对电容式 MEMS 加速度计的悬臂梁结构进行疲劳和塑性形变失效分析，并建立相应的可靠性预计模型。

2　可靠性模型

2.1　疲劳可靠性模型

疲劳是导致 MEMS 加速度计性能下降的重要原因。疲劳失效是材料在承受循环载荷时发生的内部损伤，疲劳损伤开始于高应力区域，并缓慢地传播，当累积的损伤达到某一极限值时，结构遭到破坏，从而导致器件的可靠性下降[15-16]。针对电容式 MEMS 加速度计的悬臂梁结构，通过采用 Miner 损伤理论和 S-N 曲线对多晶硅悬臂梁的疲劳退化失效进行建模。

由应力寿命(S-N)曲线的幂函数公式可得：

$$N=\frac{C}{S^{\alpha}} \tag{1}$$

式中，C 和 α 为材料常数，N 为应力 S 条件下的失效循环次数，即疲劳寿命。

根据 Miner 理论，在恒幅载荷下，n 次循环造成的疲劳损伤为

$$D=\frac{n}{N}=\frac{S^{\alpha}}{C}n \tag{2}$$

对于多晶硅材料，疲劳寿命 N 一般指材料或结构在失效之前反复载荷作用的次数或者时间，服从对数正态分布，即 $\ln N\sim N(\mu_{\ln N},\sigma_{\ln N}^2)$，其概率分布为

$$f_N(n)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}n\sigma_{\ln N}}\exp\left(-\frac{(\ln n-\mu_{\ln N})^2}{2\sigma_{\ln N}^2}\right) \tag{3}$$

从而可得出疲劳累积损伤的概率分布为

$$f_D(d)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}d\sigma_{\ln N}}\exp\left(-\frac{(\ln d-\ln n+\mu_{\ln N})^2}{2\sigma_{\ln N}^2}\right) \tag{4}$$

当恒幅振动载荷 S 作用时，依据 Miner 损伤理论，若每次循环造成的损伤 ΔD 的均值和方差分别为 μ_0 和 σ_0^2，当循环 n 次时，MEMS 加速度计的累积损伤 D 的均值和方差分别为 $n\mu_0$ 和 $n\sigma_0^2$。

在给定疲劳寿命 N 条件下疲劳损伤大于 D 的概率等于指定疲劳损伤 D 条件下疲劳寿命大于 N 的概率，可得：

$$\int_0^D f_D(d\mid N)\mathrm{d}d=\int_0^N f_N(n\mid D)\mathrm{d}n \tag{5}$$

当应力幅值为 S 时，其疲劳寿命 $n=N_f$，则疲劳损伤的概率分布为

$$f_D(d\mid N_f)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}d\sigma_{\ln D}}\exp\left(-\frac{(\ln d-\mu_{\ln D})^2}{2\sigma_{\ln D}^2}\right) \tag{6}$$

$$\begin{aligned}\mu_{\ln D}&=0\\ \sigma_{\ln D}&=\sigma_{\ln N}\end{aligned} \tag{7}$$

由式(7)可求得：

$$\mu_0=\frac{\exp(1/2\sigma_{\ln N}^2)}{C/S^{\alpha}} \tag{8}$$

$$\sigma_0=\sqrt{\frac{\exp(\sigma_{\ln N}^2)(\exp(\sigma_{\ln N}^2)-1)}{C/S^{\alpha}}} \tag{9}$$

循环 n 次时，疲劳损伤 D 的对数均值、对数标准差为

$$\mu_{\ln D}=\ln(n\mu_0)-1/2\ln(1+\sigma_0^2/n\mu_0^2) \tag{10}$$

$$\sigma_{\ln D}=\sqrt{\ln(1+\sigma_0^2/n\mu_0^2)} \tag{11}$$

当临界疲劳损伤为 D_f，则电容式 MEMS 加速度计的疲劳可靠度为

$$R(n)=P(D<D_f)=\Phi\left(\frac{\ln D_f-\mu_{\ln D}}{\sigma_{\ln D}}\right)=\Phi\left(\frac{\ln D_f+1/2\ln(1+\sigma_0^2/n\mu_0^2)-\ln(n\mu_0)}{\sqrt{\ln(1+\sigma_0^2/n\mu_0^2)}}\right) \tag{12}$$

故其失效概率密度为

$$\begin{aligned}f(n)&=-\frac{\mathrm{d}R(n)}{\mathrm{d}n}=\\ &-\phi\left(\frac{\ln D_f+1/2\ln(1+\sigma_0^2/(n\mu_0^2))-\ln(n\mu_0)}{\sqrt{\ln(1+\sigma_0^2/(n\mu_0^2))}}\right)\times\\ &\left(\frac{1-3(1+\sigma_0^2/(n\mu_0^2))}{2n\sqrt{\ln(1+\sigma_0^2/(n\mu_0^2))}(1+\sigma_0^2/(n\mu_0^2))}-\right.\\ &\left.\frac{(\ln D_f+1/2\ln(1+\sigma_0^2/(n\mu_0^2))-\ln(n\mu_0))(-\sigma_0^2/(n\mu_0^2))}{2n(1+\sigma_0^2/(n\mu_0^2))(\sqrt{\ln(1+\sigma_0^2/(n\mu_0^2))})^3}\right)\end{aligned} \tag{13}$$

2.2　塑性形变可靠性模型

塑性形变是一种不能自我修复的变形，当结构和材料在荷载作用下超出弹性变形的范围，施加的外力停止作用后，不能恢复原来状态的现象[17]。基于应力强度干涉理论对悬臂梁的塑性形变进行失效分析。可靠度表征为屈服强度 X 大于施加应力 S 的概率，其功能函数为

$$G=X-S \tag{14}$$

当屈服强度 X 和应力 S 均服从正态分布，即 $X\sim N(\mu_X,\sigma_X^2)$，$S\sim N(\mu_S,\sigma_S^2)$，则功能函数的均值和标准差为

$$\mu_G = \mu_X - \mu_S$$
$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_S^2} \tag{15}$$

可靠度可表示为

$$R(t) = P(G > 0) = 1 - P(G \leqslant 0) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_S - \mu_X}{\sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_S^2}}\right) \tag{16}$$

当考虑屈服强度随时间退化时，初始的屈服强度记为 X_0，强度退化量记为 $\Delta X(t)$，$\Delta X(t) \sim N(at, bt)$，则 t 时刻 MEMS 加速度计的屈服强度 $X(t) = X_0 - \Delta X(t)$，其均值和方差分别为

$$\mu_X(t) = X_0 - at$$
$$\sigma_X^2 = bt \tag{17}$$

式中，a 和 b 为常数。

因此，电容式 MEMS 加速度计的塑性形变可靠度为

$$R(t) = P(X(t) - S > 0) = 1 - P(X_0 - \Delta X(t) - S \leqslant 0) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_S - X_0 + at}{\sqrt{bt + \sigma_S^2}}\right) \tag{18}$$

故其失效概率密度函数为

$$f(t) = \phi\left(\frac{\mu_S - X_0 + at}{\sqrt{bt + \sigma_S^2}}\right)\left(\frac{a}{\sqrt{bt + \sigma_S^2}} - \frac{b(\mu_S - X_0 + bt)}{2\sqrt{(bt + \sigma_S^2)^3}}\right) \tag{19}$$

3 可靠性模型分析

3.1 疲劳可靠性模型分析

确定疲劳可靠性模型中所涉及的参数[18]，其中应力幅值 $S = 3.15$ GPa，疲劳寿命 $N_f = 2.32 \times 10^{10}$ 次，S-N 曲线中的参数：$C = 2.1486 \times 10^{12}$，$\alpha = 3.9467$，疲劳损伤极限 $D_f = 1$，多晶硅材料的疲劳寿命分布 $\ln N \sim N(23.6014, 0.2140^2)$。

根据式(12)和(13)，可得疲劳可靠度和失效概率密度随循环次数的变化规律，如图 3 所示。从图中可看出，电容式 MEMS 加速度计在振动应力下工作时，当振动次数超过 1×10^{10} 时，器件的可靠度开始下降，失效概率密度开始上升，当振动次数达到 2.32×10^{10} 时，失效概率密度达到最大，说明器件发生疲劳失效的概率最大。

根据应力寿命曲线，在不同的应力幅值下，MEMS 加速度计的疲劳寿命不同。分析器件在不同振动应力幅值 S 下疲劳可靠度及失效概率密度随循环次数的变化规律，结果如图 4,5 所示，可见应力幅值 S 对 MEMS 加速度计的疲劳可靠度和失效概率密度有显著影响。结果显示，较小 S 的 MEMS 加速度计疲劳可靠度变化得较为缓慢，而较大 S 的 MEMS 加速度计可靠度下降得比较迅速。这表明 S 值越小，疲劳寿命越大，MEMS 加速度计的疲劳可靠性越好。

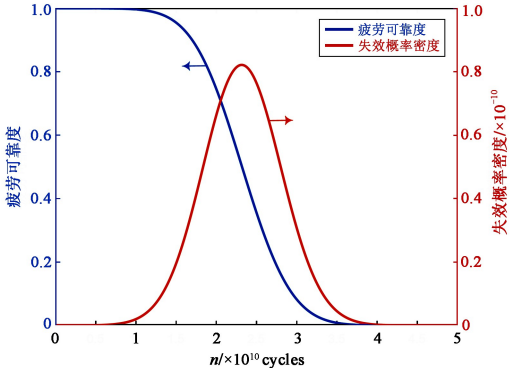


图 3 疲劳可靠度与失效概率密度随循环次数的变化曲线

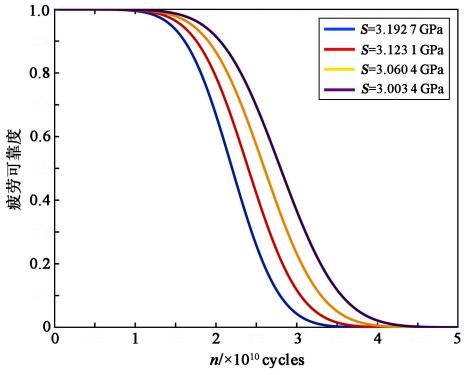


图 4 应力幅值 S 对疲劳可靠度灵敏度分析图

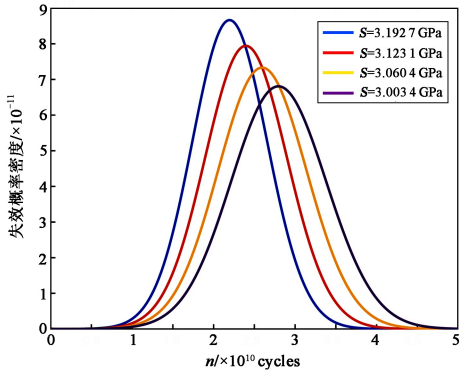


图 5 应力幅值 S 对失效概率密度灵敏度分析图

3.2 塑性形变可靠性模型分析

在塑性形变可靠性模型中，多晶硅材料[19]的屈服强度 $X_0 = 3.0$ GPa，施加的应力 $S \sim N(1.5, 0.15^2)$GPa，强度退化量 $\Delta X(t) \sim N(2.07 \times 10^{-5}t, 5.85 \times 10^{-7}t)$GPa。

由式(18)和(19)可计算出塑性形变可靠度和失

效概率密度随时间的变化规律，如图 6 所示，当 MEMS 加速度计工作 57 775 h 的可靠度为 0.9，超过 57 775 h 时，器件的可靠度迅速下降，此时器件发生了塑性形变，导致器件失效。

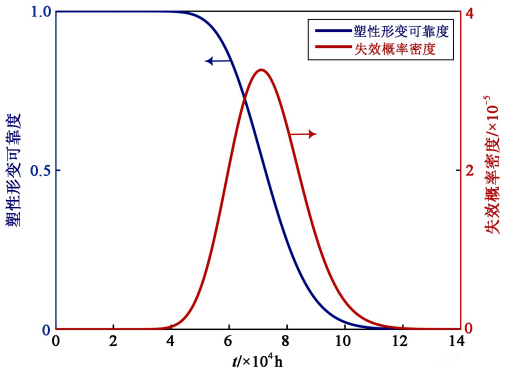


图 6　塑性形变可靠度与失效概率密度随时间的变化曲线

MEMS 加速度计在使用过程中，材料的屈服强度会受到外在环境因素的影响，疲劳失效也会对屈服强度有一定的影响，并且随着使用时间的延长，屈服强度会逐渐退化。针对不同的屈服强度 X_0 对塑性形变可靠度和失效概率密度进行灵敏度分析。如图 7，8 所示，随着屈服强度 X_0 的增加，可靠度和失效概率密度曲线不断右移，换言之，屈服强度越大，MEMS 加速度计越不容易发生塑性形变失效。

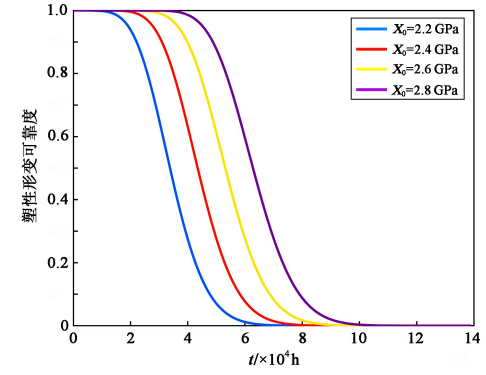


图 7　屈服强度 X_0 对可靠度灵敏度分析图

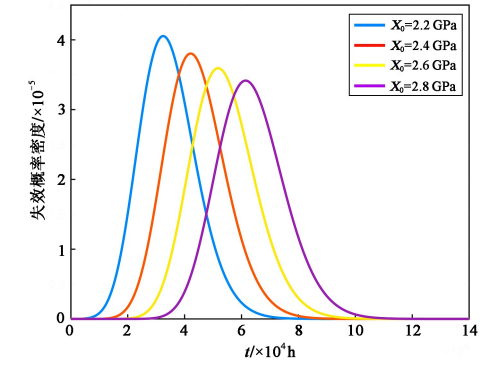


图 8　屈服强度 X_0 对失效概率密度灵敏度分析图

4　模型仿真验证

本文采用蒙特卡洛(Monte Carlo)法验证所建立的两种可靠度模型。蒙特卡洛仿真通常利用简单模型对复杂问题进行建模，在仿真过程中，重复抽样用来获得数值结果，并在分析的每个阶段重新生成模拟中使用的随机变量，从而得到一定的样本值，就可以求解可靠度的近似值[20]。

4.1　疲劳模型仿真验证

利用 Matlab 软件，采用蒙特卡洛方法对所建立的疲劳可靠性模型进行 10 000 次模拟仿真，其中应力幅值 $S=3.15$ GPa，疲劳寿命 $N_f=2.32\times10^{10}$ 次，疲劳寿命分布 $\ln N \sim N(23.601\,4, 0.214\,0^2)$，疲劳损伤极限 $D_f=1$。

随机抽取一些点进行仿真，将模拟仿真结果与数学模型计算结果进行对比，计算出两者之间的相对误差，如图 9 所示，从图中可以看出两者的相对误差主要集中在−1%～1%范围内，将两者进行曲线拟合，如图 10 所示，两者基本吻合，证明了所提出的疲劳可靠性模型的准确性。

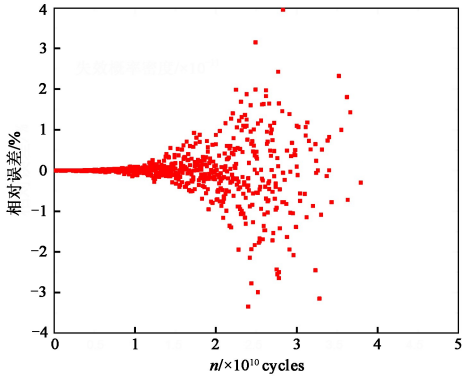


图 9　模型计算值与仿真值之间的相对误差

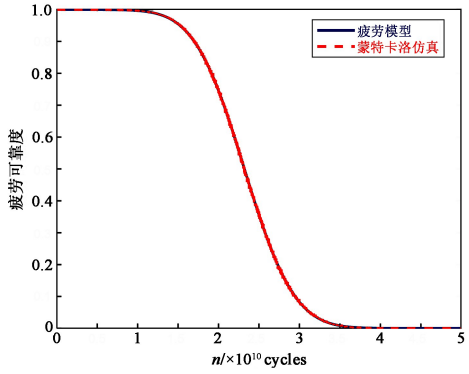


图 10　疲劳可靠度模型与蒙特卡洛仿真对比

4.2　塑性形变模型仿真验证

采用蒙特卡洛方法进行 10 000 次随机模拟仿

真，其中随机施加的应力 $S\sim N(1.5,0.15^2)$GPa，屈服强度 $X(t)\sim N(3-2.07\times10^{-5}t,5.85\times10^{-7}t)$GPa。

同样随机抽取一些点进行仿真，将仿真结果与模型计算结果进行对比，计算出两者之间的相对误差，如图 11 所示，两者的相对误差主要集中在−1%～1%范围内，将两者进行拟合，如图 12 所示，两者基本吻合，验证了所提出的塑性形变可靠性模型的正确性。

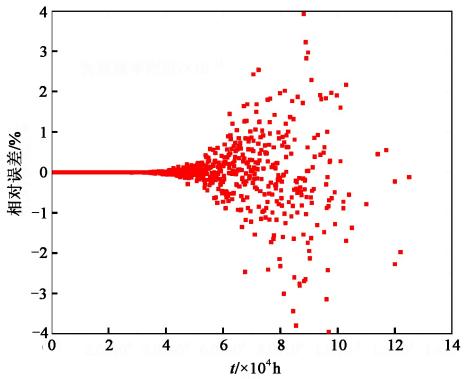


图 11 模型计算值与仿真值之间的相对误差

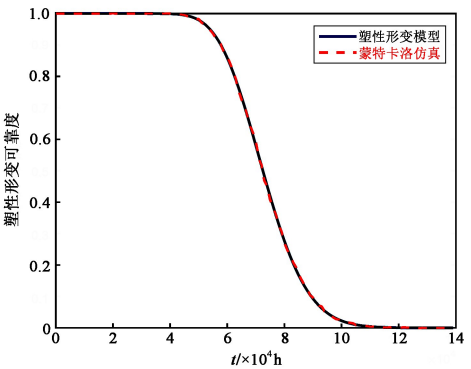


图 12 塑性形变可靠度模型与蒙特卡洛仿真对比

5 结论

本文分析了电容式 MEMS 加速度计的疲劳失效和塑性形变失效，创新性地将 S-N 曲线引入 Miner 理论，并建立了疲劳可靠性模型；同时，在考虑屈服强度退化的条件下，运用应力强度干涉理论建立了塑性形变可靠性模型。利用蒙特卡洛法验证了两种可靠性模型的准确性，模拟仿真结果和数学模型计算结果之间的相对误差主要集中在−1%～1%范围内；分析了振动应力水平和材料的屈服强度对可靠度和失效概率密度的影响。结果表明，振动应力幅值越小、屈服强度越高，器件的可靠性越好。研究结果为 MEMS 加速度计的可靠性评估与改进提供了依据，也为其他 MEMS 器件的可靠性分析提供了参考。

参考文献：

[1] 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.
Chen Junguang，Gu Zhuanyuan，He Chunhua，et al. Study of main failure modes and failure mechanisms of MEMS inertial devices[J]. Transducer and Microsystem Technologies，2017，36(3)：1-5.

[2] 邢朝洋. 高性能 MEMS 惯性器件工程化关键技术研究[D]. 北京：中国航天科技集团公司第一研究院，2017.
Xing Zhaoyang. Research on the key technologies of high performance MEMS inertia sensors engineering[D]. Beijing：The First Research Institute of China Aerospace Science and Technology Corporation，2017.

[3] Shaeffer D K. MEMS inertial sensors：A tutorial overview [J]. Communications Magazine IEEE，2013，51(4)：100-109.

[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 Yan，Zhao Jian，Liu Pengbo，et al. Design and experimental error analysis of the 3-axis accelerometer based on PZT-tube support structure [J]. Chinese J. of Scientific Instrument，2020，41(7)：91-98.

[5] 许高斌，王亚洲，陈 兴，等. 纳米压电梁谐振式加速度计[J]. 电子测量与仪器学报，2020，34(10)：149-155.
Xu Gaobin，Wang Yazhou，Chen Xing，et al. Nano piezoelectric beam resonant accelerometer[J]. J. of Electronic Measurement and Instrumentation，2020，34(10)：149-155.

[6] Yuan F，Chen L G，Chen T，et al. Micromachined tri-axis capacitive accelerometer based on the single mass[C]// Key Engineering Materials. Trans. Tech Publications Ltd，2015，645：630-635.

[7] 高健飞，熊继军，郭 涛，等. 微加速度计在恶劣环境下的可靠性[J]. 微计算机信息，2007，23(35)：227-229.
Gao Jianfei，Xiong Jijun，Guo Tao，et al. The reliability of micro-accelerometer in harsh environment[J]. Microcomputer Information，2007，23(35)：227-229.

[8] 秦立君. 多种单应力环境下 MEMS 高 g 值微加速度计的失效分析研究[D]. 太原：中北大学，2018.
Qin Lijun. Failure analysis of MEMS high-g micro accelerometer under multi-stress environment[D]. Taiyuan：North University of China，2018.

[9] Skogstrm L，Li J，Mattila T T，et al. MEMS Reliability[M]. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (Third Edition)，2020：851-876.

[10] Huang Y，Vasan A，Doraiswami R，et al. MEMS reliability review[J]. IEEE Trans. on Device and Materials Reliability，2012，12(2)：482-493.

[11] Marozau I, Auchlin M, Pejchal V, et al. Reliability assessment and failure mode analysis of MEMS accelerometers for space applications[J]. Microelectronics & Reliability, 2018, 88-90(SEP): 846-854.

[12] Xiong X G, Wu Y L, Jone W B. Material fatigue and reliability of MEMS accelerometers[C]// 2008 IEEE Inter. Symp. on Defect and Fault Tolerance of VLSI Systems. IEEE, 2008: 314-322.

[13] Lall P, Abrol A, Simpson L, et al. Survivability of MEMS accelerometer under sequential thermal and high-g mechanical shock environments [C]// Inter. Electronic Packaging Technical Conf. and Exhibition. American Society of Mechanical Engineers, 2015: V003T07A013.

[14] 马喜宏，王　威，何　程，等. 基于退化量分布的高量程 MEMS 加速度计的可靠性评估[J]. 电子器件，2018，41(4)：991-996.
Ma Xihong, Wang Wei, He Cheng, et al. Reliability evaluation of high range MEMS accelerometer based on degradation distribution[J]. Chinese J. of Electron Devices, 2018, 41(4): 991-996.

[15] 高建雄，安宗文，寇海霞. 随机恒幅载荷下结构疲劳累积损伤的概率模型[J]. 哈尔滨工程大学学报，2017，38(2)：263-268.
Gao Jianxiong, An Zongwen, Kou Haixia. Structural probabilistic model of fatigue cumulative damage under uncertain cyclic load[J]. J. of Harbin Engineering University, 2017, 38(2): 263-268.

[16] Bagdahn J, Sharpe W N. Fatigue of polycrystalline silicon under long-term cyclic loading[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 103(1/2): 9-15.

[17] 徐　铭. 微结构塑性形变及其对压阻式压力传感器的影响[D]. 北京：中国科学院大学，2013.
Xu Ming. Plastic deformation of micro structure and its influence on piezoresistive pressure sensors [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.

[18] Cheng J X, Qian Z Y, Li Z X. A cumulative fatigue damage model of polysilicon films for MEMS resonator under repeated loadings [J]. Inter. J. of Fatigue, 2021, 147: 106186.

[19] Muthusamy S, Soin N. Design of capacitive MEMS microphone for fully implantable cochlear implants [C]// 2020 IEEE Inter. Conf. on Semiconductor Electronics (ICSE). IEEE, 2020: 156-159.

[20] Benson R, Kellne D. Monte Carlo simulation for reliability [C]// 2020 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2020: 1-6.

作者简介：

李明珠(1995—)，女，安徽省萧县人，硕士研究生，主要研究方向为 MEMS 惯性器件可靠性；

许高斌(1970—)，男，安徽省肥东县人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为 CMOS MEMS，MEMS 传感器与微纳系统的设计、制造、封装与可靠性。