

融合失效物理与虚拟试验的MEMS传感器寿命预测方法

于紫玄*

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对高可靠MEMS传感器整机寿命验证中存在的加速试验成本高、现有虚拟方法缺乏系统性建模与不确定性量化等问题, 提出一种基于失效物理(Physics of Failure, PoF)的虚拟评估框架。通过多尺度数字样机与热-振耦合仿真获取局部应力, 并构建模块化PoF模型库以预测关键器件关键失效模式的寿命。为量化制造工艺与服役环境中的不确定性, 引入一种物理来源驱动的混合概率分布建模策略。在此基础上, 建立“器件内多模式融合”与“器件间首次失效”两级竞争失效模型, 以预测整机首次故障时间(Time-to-Failure, TTF)。以MPU9250为例进行验证, 自主开展的热-振联合物理试验表明: 数字样机精度良好(壳温偏差 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, 模态误差 $< 5\%$), 预测整机TTF为12 721 h, 并准确识别出薄弱环节。该方法能有效减少对物理试验的依赖, 提升寿命评估的效率与可信度。

关键词: 失效物理; 虚拟试验; 微机电系统; 参数不确定性; 寿命评估; 多物理场仿真; 多模式融合; 竞争失效机制

中图分类号: TB9; TP212

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0042-10

Life prediction method for MEMS sensors integrating physics of failure and virtual testing

YU Zixuan*

(AVIC Changcheng Institute of Metrology Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Aiming at the problems of high acceleration test cost and the lack of systematic modeling and uncertainty quantification in existing virtual methods for the life verification of high-reliability MEMS sensor complete machines, this paper proposes a virtual assessment framework based on Physics of Failure (PoF). This method obtains local stress through multi-scale digital prototyping and thermal-vibration coupling simulation, and constructs a modular PoF model library to predict the life of key failure modes of critical devices. To quantify the uncertainty in manufacturing processes and service environments, a physical source-driven hybrid probability distribution modeling strategy is introduced. On this basis, a two-level competitive failure model consisting of "intra-device multi-mode fusion" and "inter-device first-passage failure" is established to realize the prediction of the Time-to-Failure (TTF) of the complete machine. Taking the MPU9250 as an example for verification, the independently conducted thermal-vibration combined physical test shows that the digital prototype has satisfactory accuracy (case temperature deviation shall not exceed $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$, modal error $<$

收稿日期: 2026-02-15; 修回日期: 2026-04-26; 录用日期: 2026-05-27; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 航空工业计量所创新基金项目(ZC02302200)

引用格式: 于紫玄. 融合失效物理与虚拟试验的MEMS传感器寿命预测方法[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 42-51.

Citation: YU Z X. A life prediction method for MEMS sensors integrating physics of failure and virtual testing [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 42-51.



5%), the predicted TTF of the complete machine is 12 721 h, and the weak link is accurately identified. The results show that the proposed method can effectively reduce the dependence on physical tests and improve the efficiency and credibility of life assessment.

Key words: PoF; virtual testing; micro-electro-mechanical systems; parameter uncertainty; life assessment; multi-physics simulation; multi-mode fusion; competing failure mechanism

0 引言

MEMS传感器作为高端装备的核心感知单元,其在航空航天等严苛场景下的高可靠寿命验证(如平均无故障工作时间大于 10^4 h)面临巨大挑战。传统加速寿命试验(通过施加高于正常使用水平的应力在短期内诱发失效)周期长、成本高,且难以复现复杂多应力工况,已无法满足快速研制需求。

基于失效物理(Physics of Failure, PoF)的虚拟评估方法,即通过建立产品失效的根本物理、化学或机械机理模型来预测其可靠性,通过多物理场仿真预测局部损伤,为可靠性评估提供了新途径^[1-3]。然而,现有PoF方法仍存在三大瓶颈:其一,相关研究多聚焦于单一焊点或器件^[4-6],缺乏对MEMS传感器整机复杂结构的系统级建模^[7-9];其二,在参数处理上常采用确定性假设,忽略了制造与环境载荷的固有随机性^[10],导致寿命预测准确度偏低;其三,在整机寿命融合时,往往简化多失效模式间的竞争关系^[11],难以准确反映“首达失效”的真实机制^[12]。

针对上述技术缺口,本文提出一种系统性、机理驱动的整机级虚拟寿命验证方法。该方法以多尺度数字样机为核心,融合热-振耦合多物理场仿真、模块化PoF模型库与物理来源驱动的不确定性量化策略,并通过“器件内多模式融合”与“器件间首达失效”的两级机制,实现整机首达故障时间(Time-to-Failure, TTF)预测,在不依赖大量物理试验的前提下,为高可靠MEMS传感器提供一套高效、精准的可靠性评估工具。

1 融合失效物理与虚拟试验的整机寿命预测方法

为实现高可靠MEMS传感器的整机级寿命高精度预测,本文构建了一套融合多尺度建模、多物理场仿真、失效物理分析与不确定性量化的虚拟

试验技术路线,如图1所示。该方法包含5个关键环节:①多尺度数字样机的构建与试验验证;②热-振动耦合多物理场应力仿真;③基于模块化PoF模型的单点寿命评估;④基于物理来源的参数不确定性量化;⑤基于两级竞争失效机制的系统级寿命融合。

该方法以多尺度数字样机及试验验证为基石,通过热-振动耦合仿真获取应力状态,驱动PoF模型完成单点寿命评估;进一步引入参数不确定性量化修正单点局部寿命分布,最终基于两级竞争失效机制融合实现系统整体寿命预测。

1.1 多尺度数字样机建模与多物理场仿真

为精准获取MEMS传感器整机内部关键互连结构(如焊点)在复杂服役环境下的局部载荷,本文构建了面向可靠性评估的多尺度(板级-器件级-互连级)高保真数字样机。该样机以可靠性分析需求为导向,完整集成了印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)、典型元器件及微米级互连结构,并对焊点等失效敏感区域实施局部网格细化,以确保应力/应变结果的精度符合要求。其中,典型元器件为采用球栅阵列(Ball Grid Array, BGA)/四侧引脚扁平(Quad Flat Package, QFP)/无引线芯片载体(Leadless Chip Carrier, LCC)技术封装的芯片。

在仿真平台配置方面,本研究基于ANSYS Workbench协同仿真环境构建了热-振耦合分析流程。热仿真采用ANSYS Icepak模块进行稳态热场求解,通过导入实测功耗与材料热阻参数,计算芯片结温及PCB温度分布;结构动力学仿真则基于ANSYS Mechanical模块实现,依据标准MIL-STD-810H^[13]施加随机振动与机械冲击载荷。通过模态叠加法与时程分析技术,精确计算焊点等关键部位的最大等效应力与塑性应变。

为确保模型的物理保真度,采用双维度验证策略对样机进行校准。1)热响应验证:利用红外热像仪测量关键器件在稳态工况下的壳温,并与

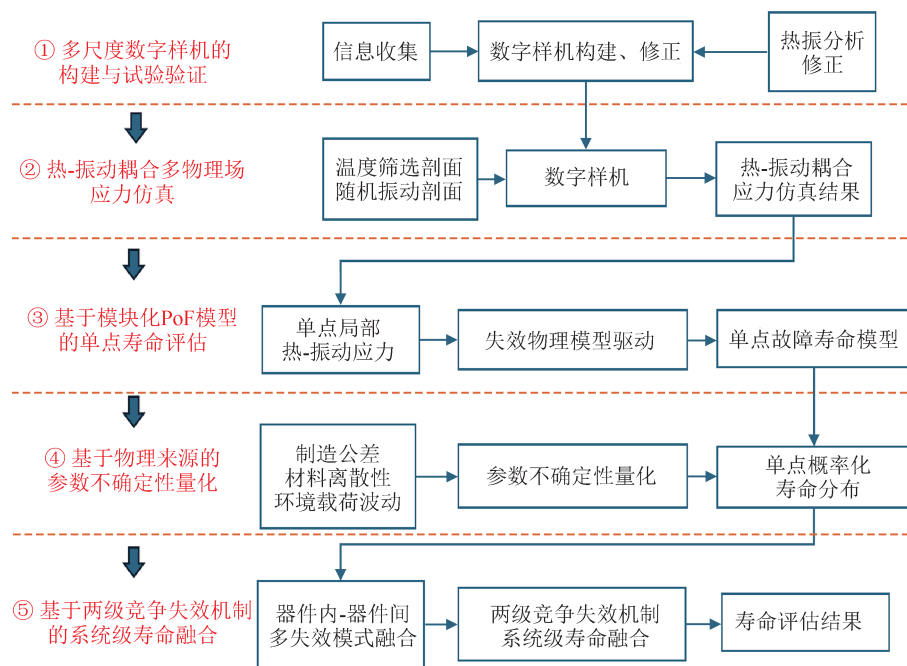


图1 研究方法技术路径

Fig.1 Research methods and technical approaches

仿真结果对比。2) 结构动力学验证：通过试验模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)获取前六阶固有频率，并与仿真模态进行比对。

经迭代修正后的高保真数字样机可准确反映实际产品的多物理场响应特性，为后续局部应力/位移提取提供可靠基础。

1.2 模块化失效物理建模与不确定性量化

首先，开展失效机理分析，从2个维度对MPU9250九轴传感器进行全面的系统级故障机理分析：一是元器件类型(如BGA封装芯片、LCC封装磁力计等)，二是封装结构要素(如焊点、镀通孔等)。针对MPU9250的实际服役剖面(主要为温度循环和振动)，筛选出最相关的三类主导失效模式：热疲劳、振动疲劳和重复冲击。之后，基于上述失效机理分析结果，针对不同类型的元器件和互连结构匹配相应的经过工程验证的PoF模型，形成了一个结构化、模块化模型库^[4-7]。

为了量化制造与环境不确定性对寿命的非线性影响，采用“参数驱动”的蒙特卡洛(Monte Carlo)仿真策略。具体实施流程如下：

1) 输入参数的差异化概率建模

依据不确定性产生的物理根源，对关键输入参数实施差异化概率建模^[10]。几何与工艺参数(如

器件尺寸、焊点高度)受制造过程控制，其波动范围有限且以标称值为中心，故采用三角分布建模；环境载荷参数(如壳体温度极值、材料热膨胀系数)在任务剖面内随机波动，无特定偏好，故采用均匀分布建模。

2) 不确定性传递与联合抽样

通过 Monte Carlo 方法，对上述输入参数进行 1 000 次联合抽样。将生成的随机参数集作为驱动变量，输入至多尺度数字样机与 PoF 模型中，实现从“参数”到“寿命”的不确定性映射。

3) 局部应力提取与寿命计算

基于上述抽样生成的参数集，开展热-振耦合仿真，提取每个模型所需的关键局部应力/应变参数。对于热疲劳模型，输入是焊点的等效剪切应变幅($\Delta\gamma$)。基于仿真获得的元器件与 PCB 基板间的热膨胀失配、器件尺寸、焊点高度等参数，根据相应的应变公式计算得出 $\Delta\gamma$ 。对于振动和冲击模型，其核心输入是器件的面外位移(Z)，该参数由随机振动或冲击载荷下的结构动力学仿真直接输出，反映了焊点所承受的动态弯曲应力。

所有模型参数依据 MIL-HDBK-338B(某电子设备可靠性设计手册)^[14]、IPC-9701A(业界广泛采用的焊点热疲劳可靠性测试与建模标准)^[15]、

JEDEC JEP122H(固态技术协会发布的半导体器件失效机理标准)^[16]等标准确定,无需依赖历史故障数据。各潜在故障点独立调用对应模型,生成单点寿命样本,为后续不确定性量化与系统级寿命融合提供初始输入。

最终,各潜在故障点基于 PoF 模型独立计算,生成包含随机性的寿命样本集。避免了传统确定性分析的偏差,更真实地反映了产品的寿命不确定特征,为后续系统级寿命融合奠定了坚实基础。

1.3 基于“器件内多失效模式融合”与“器件间首达失效”的系统级寿命预测

高集成 MEMS 传感器的整机失效由层级化竞争机制主导,难以通过将各单点故障的失效率叠加准确评估。单个器件常受热、振等多失效模式耦合作用,而系统失效由所有关键器件中最先失效者决定。针对上述问题,本文建立两级独立竞争失效融合机制:第一级为器件内多失效模式融合,多应力作用器件(如 BGA 芯片兼具热循环与机械冲击损伤)的等效寿命取各失效模式寿命样本的最小值;第二级为器件间首达失效,整机 TTF^[13]由所有关键器件等效寿命的最小值确定,这符合工程上经典的“短板效应”或“weakest-link 准则”。

为提升尾部统计稳健性(如 B10 寿命估计),对各器件等效寿命样本进行概率分布重构(如威布尔、对数正态),并基于拟合分布重抽样用于系统融合,该策略可有效抑制 Monte Carlo 噪声对早期失效概率的干扰。

相较传统失效率叠加方法,本文通过显式建模器件内多模式竞争与器件间首达失效,避免了因忽略失效物理的竞争本质而导致的寿命高估,为高可靠 MEMS 传感器提供了物理一致、统计稳健的整机寿命评估框架。

2 MPU9250 九轴传感器整机寿命虚拟试验验证

为验证本文方法在高集成度、多物理场耦合场景下的适用性,选取典型九轴 MEMS 传感器 MPU9250 作为验证对象。其服役的典型环境剖面涵盖极端温度循环($-55 \sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$)、高强度随机振动(功率谱密度峰值 $0.04\text{ g}^2/\text{Hz}$)及高幅值半正弦冲击($1\,500\text{ g}$, 0.5 ms),可同时激发热疲劳、振动疲

劳与重复冲击三类主导失效机理,满足对单点建模、不确定性量化与系统级融合的全链条验证需求。

2.1 多尺度数字样机构建与物理试验验证

为支撑精准寿命预测,本文基于 MPU9250 实际物料清单构建了板级-器件级-互连级耦合的多尺度有限元数字样机^[17]。该模型严格依据器件真实布局与封装尺寸进行精细化建模,旨在准确捕捉焊点等微小结构的局部力学响应。在建模策略上,采用了分级网格划分技术。板级:PCB 基板采用 1.0 mm 网格;器件级:主芯片(QFP/BGA/LCC 封装)本体采用 0.2 mm 网格;互连级:所有焊点区域统一加密至 0.03 mm 网格。

该配置确保了 PoF 模型关键输入量 $\Delta\gamma$ 与 Z 的计算精度。基于实测物料清单的多尺度有限元建模参数及网格细化方案见表 1。经统计,该多尺度数字样机的整机自由度约为 280 万。

为确保环境载荷施加的工程合理性,依据 MIL-STD-810H, Method 514.8, Category A-1(机载挂飞设备)^[13]定义的随机振动剖面及热循环条件构建外部激励。在多尺度数字样机中,该标准通过以下方式实现物理映射:振动载荷以功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)形式施加于 PCB 四角的安装孔中心(共 4 处),该位置对应整机级振动试验中夹具对电路板的约束与激励接口;结构约束在上述安装孔处设置为全自由度固定(Fixed Support),以等效模拟螺栓刚性安装状态;热边界采用对流换热模型,综合考虑标准附录中高空巡航工况(空速 $\approx 60\text{ m/s}$,环境温度 $= -55\text{ }^{\circ}\text{C}$),取外表面综合对流换热系数为 $25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,内部热源功率依据器件手册及实测功耗设定。

仿真结果可视化方面,热仿真云图如图 2(a)所示,可见热量由核心区域向四周扩散的梯度分布,焊点区域呈现出明显的温度梯度;随机振动载荷下 PCB 板级的变形模态如图 2(b)所示,可见板边及大质量器件存在显著的位移放大效应,最大应力集中出现在焊点根部。

在此基础上,为验证模型的物理保真度,开展了热-振联合试验校准。MPU9250 关键器件壳温仿真与实测对比如表 2 所示,MPU9250 传感器前六阶固有频率对比如表 3 所示。

表1 基于实测物料清单的多尺度有限元建模参数及网格细化方案

Tab. 1 Multi-scale finite element modeling parameters and mesh refinement strategy based on the measured bill of materials

序号	器件标识	器件功能	封装类型	尺寸/mm	建模层级	网格单元尺寸/mm	局部自由度估算	PoF 关联失效模式
1	ATMEGA328P-AU	微控制器	QFP	7.0 × 7.0 × 1.0	器件级 + 互连级	0.2 (体)/0.03 (焊点)	320 000	热疲劳、振动疲劳
2	ADXL345	加速度计	BGA	3.0 × 5.0 × 1.0	器件级 + 互连级	0.2/0.03	280 000	热疲劳、重复冲击
3	ITG3200 / 3205	陀螺仪	LCC	4.0 × 4.0 × 1.0	器件级 + 互连级	0.2/0.03	260 000	振动疲劳、热疲劳
4	HMC5883L	磁力计	LCC	3.0 × 3.0 × 1.0	器件级 + 互连级	0.2/0.03	220 000	振动疲劳
5	KB33	开关二极管	SOT-23-5	3.0 × 1.75 × 1.3	器件级	0.10	50 000	振动疲劳、重复冲击
6	C1-C10 等	电容/电阻	Chip/LCC	(0.6 ~ 2.0) × (0.3 ~ 1.6) × (0.3 ~ 0.8)	器件级	0.1	180 000	
7	PCB 基板	印制电路板主体		30 × 25 × 1.6	板级	1.00	1 540 000	

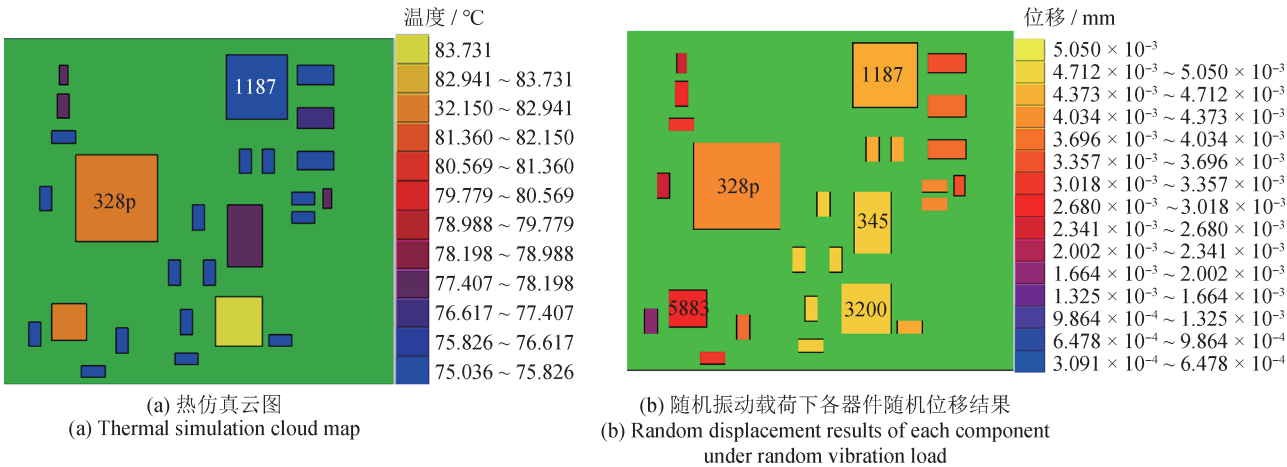


图2 仿真结果
Fig.2 Simulation results

在 26 °C 与 75 °C 稳态工况下，采用红外热像仪测量 U1 ~ U4 芯片壳温。经基于实测功耗的参数修正，仿真与实测偏差均不超过 ±0.2 °C (平均绝对误差 0.14 °C)，优于国际标准 IPC-7351B^[18] 推荐的误差 不超过 ±1 °C 要求。

2.2 单点寿命概率化建模与不确定性量化

基于通过物理试验验证的高保真数字样机，以典型服役剖面(热循环：-15 °C→35 °C；随机振

动：PSD 为 0.04 g²/Hz) 为标称工况，对 MPU9250 的 5 类高风险器件(ADXL345、ITG3200、ATMEGA 328P-AU、HMC5883L、KB33)开展单点 PoF 寿命建模。

针对各器件的封装形式与载荷响应特征，分别提取热循环引起的焊点 Δγ 与随机振动下的 Z 作为 PoF 模型输入，并引入物理来源驱动的混合概率分布，显式量化制造与环境不确定性对寿命分散

表2 MPU9250关键器件壳温仿真与实测对比

Tab.2 Comparison of simulated and measured shell temperatures of key components of MPU9250

单位: °C

器件型号	封装类型	环境温度	实测壳温	初始仿真温度	修正后仿真温度	修正后偏差
ATMEGA328P-AU	QFP	26	32.7	34.4	32.9	+0.2
ITG3200/3205	LCC	26	31.6	35.7	31.8	+0.2
HMC5883L	LCC	26	30.8	34.6	31.0	+0.2
ADXL345	BGA	26	30.3	30.0	30.2	-0.1
KB33	SOT	26	28.8	29.3	28.9	+0.1
ATMEGA328P-AU	QFP	75	83.3	82.4	83.1	-0.2
ITG3200/3205	LCC	75	83.6	83.7	83.5	-0.1
HMC5883L	LCC	75	81.6	82.6	81.8	+0.2
ADXL345	BGA	75	77.2	78.0	77.3	+0.1
KB33	SOT-23-5	75	76.9	77.3	77.0	+0.1
最大初始偏差				+4.1		
修正后平均绝对误差						0.14

表3 MPU9250传感器前六阶固有频率对比

Tab.3 Comparison of the first six natural frequencies of the MP9250 sensor

阶数	模态振型特征	实测频率/Hz	初始仿真频率/Hz	修正后仿真频率/Hz	初始误差/%	修正后误差/%
1	整体弯曲	218	192	216	-12.0	-0.9
2	对角翘曲	342	301	338	-12.0	-1.2
3	局部板扭曲	485	427	462	-12.0	-4.7
4	芯片局部振动	620	546	608	-12.0	-1.9
5	高阶弯曲	780	686	765	-12.0	-1.9
6	复合扭转	910	801	895	-12.0	-1.6
最大误差					-12.0	-4.7

性的影响。

2.2.1 PoF模型实施与输入映射

基于高保真数字样机,首先识别出5类高风险器件。针对每类器件的封装形式和载荷响应特征,遵循模型匹配原则调用相应的PoF子模型:

ADXL345(BGA):调用球栅阵列封装一阶热疲劳模型,输入参数为 $\Delta\gamma$ 。

HMC5883L(LCC):调用无铅封装一阶热疲劳模型,输入参数为 $\Delta\gamma$ 。

ATMEGA328P-AU(QFP):因其同时承受热循环和高强度振动/冲击,需并行调用有铅焊料热疲劳模型和Steinberg随机振动位移-寿命模型,输入

参数为 $\Delta\gamma$ 和 Z 。

ITG3200/3205 & KB33:因多应力耦合,需并行调用有铅焊料热疲劳模型、Steinberg随机振动模型、一阶重复冲击失效模型,输入参数为 $\Delta\gamma$ 和 Z 。

上述所有输入参数($\Delta\gamma$ 和 Z)均由所构建的高保真数字样机直接输出,确保了从物理仿真到寿命预测的数据链路完整且一致。

2.2.2 不确定性量化

为实现“基于物理来源不确定性的单点PoF寿命建模”,依据制造与服役过程中不确定性产生的物理机制,对关键输入参数实施差异化概率建模。输入波动参数如表4所示。

表4 输入波动参数
Tab.4 Input fluctuation parameters

参数类型	考虑波动的输入参数	参数分布	参数量值/%
器件尺寸	长、宽、高	三角分布	±5
封装参数	焊点最大截面积、焊点高度	三角分布	±8
环境载荷应力	器件最大/最小壳体温度、印制板最大/最小温度、热膨胀系数、弯曲因子	均匀分布	±5

1) 几何与工艺参数(如器件尺寸、焊点高度及截面积)受贴片精度、回流焊工艺等制造公差限制,其实际值以标称值为中心、在有限区间内离散分布。此类参数采用三角分布建模;

2) 环境载荷参数(如热循环中的壳体/PCB温度极值、材料热膨胀系数、振动弯曲因子)在任务剖面内无先验偏好,且在给定使用场景下等可能波动,故采用均匀分布建模,避免引入主观先验假设。

本文所提出的方法突破了传统方法“全参数同一分布”的简化处理限制,更真实反映MEMS传

感器从制造到服役全过程的综合变异性。

2.2.3 单点寿命结果与薄弱器件筛选

针对MPU9250中5类高风险器件,分别识别出风险最高的前2种失效模式,共计10种单点失效场景。对每种场景独立开展 $N=1\,000$ 次Monte Carlo抽样,每次生成一组 $\Delta\gamma$ 与 Z 值并代入对应PoF模型,最终形成10组寿命样本集,用于量化寿命分散性并支撑薄弱环节识别。选取1 000组仿真样本中寿命最短的前10组数据,展示5类关键器件由2种主导失效模式产生的原始寿命样本,如表5所示。

表5 前5薄弱器件单点故障时间样本(仅列前10组)
Tab.5 Single-point failure time samples of five high-risk components (first 10 Monte Carlo samples shown)
单位: h

ITG3200/3205 三轴陀螺仪		ADXL345 三轴加速度计		ATMEGA 328P-AU		HMC5883L 三轴磁力计		KB33 稳压器	
一阶互连 重复冲击 失效模型	一阶随机 振动互连 失效模型	一阶互连 重复冲击 失效模型	球栅阵列封 装一阶热疲 劳模型	一阶互连 重复冲击 失效模型	有铅焊料互 连一阶热疲 劳模型	一阶互连 重复冲击 失效模型	无铅封装 一阶热疲 劳模型	一阶互连 重复冲击 失效模型	一阶随机 振动互连 失效模型
11 018	25 632	17 524	26 849	41 161	53 497	167 883	172 356	173 491	212 660
11 066	26 686	17 804	27 077	42 382	54 009	168 606	181 661	179 944	242 687
11 092	26 788	17 940	27 347	42 760	54 226	169 017	192 809	188 288	243 581
11 115	26 870	17 983	27 488	42 786	54 812	174 506	193 262	200 947	248 095
11 167	27 193	17 995	27 882	42 846	55 184	175 272	193 423	205 117	252 654
11 176	27 288	18 024	27 918	42 876	56 662	177 177	197 516	208 573	254 778
11 177	27 390	18 025	27 950	43 298	56 829	177 816	197 666	208 699	261 794
11 180	27 762	18 028	27 994	43 353	56 925	178 339	201 062	209 061	268 045
11 197	27 803	18 043	28 031	43 599	57 830	179 905	202 438	210 957	273 258
11 220	27 857	18 070	28 099	44 130	57 890	181 042	204 313	211 847	274 844

针对单一器件同时承受多种独立失效机理(如热疲劳与振动疲劳)的情况,其失效遵循“首达失效”原则,即任一失效模式率先达到其寿命极限,

即导致器件功能丧失。

对于Monte Carlo仿真生成的每一组样本 j ,器件的等效故障时间 $t_{eq,j}$ 由该组内各失效模式寿命的

最小值确定，即

$$t_{eq,j} = \min(t_{mod1,j}, t_{mod2,j}) \tag{1}$$

式中： $t_{mod1,j}$ 为样本 j 在第1种主导失效模式下的寿命， $t_{mod2,j}$ 为样本 j 在第2种主导失效模式下的寿命。

基于上述逻辑，对表5中生成的1 000组单点故障时间样本进行重构，经过该竞争融合处理，将原始的2种失效模式的寿命样本映射为器件级的等效寿命样本。表6展示了寿命最短的前10组

数据。

器件级等效寿命之间存在显著差异：ITG3200/3205陀螺仪为最薄弱环节，受振动与热疲劳双重作用，寿命中位数仅为12 700 h；ADXL345加速度计薄弱程度排第二(寿命中位数为20 900 h)，其寿命降低由BGA焊点热疲劳主导；其余器件(ATMEGA328P-AU、HMC5883L、KB33)寿命中位数均超过58 000 h。

表6 前5薄弱器件等效寿命样本(仅列前10组)

Tab.6 Equivalent life samples of five high-risk components (first 10 Monte Carlo samples shown)

单位：h

ITG3200/3205 三轴陀螺仪	ADXL345 三轴加速计	ATMEGA 328P-AU	HMC5883L 三轴磁力计	KB33 稳压器
11 018	17 524	41 161	167 880	173 490
11 066	17 804	42 382	168 610	179 940
11 092	17 940	42 760	169 020	188 290
11 115	17 983	42 786	174 510	200 950
11 167	17 995	42 846	175 270	205 120
11 176	18 024	42 876	177 180	208 570
11 177	18 025	43 298	177 820	208 700
11 180	18 028	43 353	178 340	209 060
11 197	18 043	43 599	179 910	210 960
11 220	18 070	44 130	181 040	211 850

2.3 不确定性量化整机寿命评估

2.3.1 单点寿命分布识别

根据5个薄弱器件等效寿命样本(5×1 000维寿命样本)，采用极大似然估计法拟合指数、正态、对数正态、二参数/三参数威布尔共5种候选分布，并通过Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验(显著性水平 $\alpha = 0.05$)选择最优分布。

单点失效分布拟合结果如表7所示，器件(ADXL345、ITG3200、HMC5883L、ATMEGA328P、KB33)单点失效分布均服从对数正态分布，其中， μ 为对数变换后的均值， σ 为对数变换后的标准差。

2.3.2 整机TTF评估

基于前文确定的各组成器件服从对数正态分

表7 单点失效分布拟合结果

Tab.7 Fitting results of single-point failure distribution

设备	失效分布类型和参数	K-S检验概率 p 值
ADXL345 三轴加速计	对数正态分布(μ, σ) = (9.45, 0.06)	0.99
ITG3200/3205 三轴陀螺仪	对数正态分布(μ, σ) = (9.95, 0.07)	0.49
HMC5883L 三轴磁力计	对数正态分布(μ, σ) = (10.98, 0.13)	0.33
atmega328p 处理器	对数正态分布(μ, σ) = (12.39, 0.13)	0.62
KB33 稳压器	对数正态分布(μ, σ) = (12.64, 0.18)	0.13

布且构成串联系统,其系统可靠性模型具有高度非线性特征,难以通过解析法直接求解整机寿命的显式表达。为此,本文采用 Monte Carlo 数值模拟方法对整机失效时间进行预测。

依据各器件的寿命分布参数(见表4),生成1 000组随机寿命样本,根据串联系统失效机理,取各器件寿命样本的最小值为整机的寿命。对生成的1 000组整机寿命样本数据进行描述性统计分析,计算其算术平均值,预测得 MPU9250 九轴传感器平均寿命为12 721 h

2.4 方法验证与工程一致性分析

为增强本方法可信度构建了三级验证链:

1) 输入保真度验证

多尺度数字样机在热(壳温偏差不超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$)与结构(模态误差 $< 5\%$)响应上均通过物理试验校准,确保 PoF 模型输入参数 $\Delta\gamma$ 与 Z 的高准确性。

2) 模型权威性验证

所有 PoF 模型严格遵循 IPC-9701A、MIL-HDBK-338B 与 JEDEC JEP122 等国际标准。

3) Monte Carlo 抽样收敛性验证

为严谨论证本文采用1 000次 Monte Carlo 抽样的充分性与统计稳健性,对整机 TTF 的仿真过程进行了收敛性分析。如图3所示,随着抽样次数 N 的增加,整机 TTF 的累积估计值迅速收敛,并在抽样次数超过400次后趋于稳定,该结果有力证明1 000次抽样足以保证 Monte Carlo 仿真结果的可靠性与精度。

4) 基于历史产品服役表现一致性验证

除自主开展的热-振联合物理试验外,为进一

步在真实服役场景下检验本方法的预测能力,本文引入历史产品 MPU-6050 的现场失效数据进行交叉验证。选择 MPU-6050 的核心依据在于:其与 MPU9250 共用相同的 ITG-3200 系列陀螺仪芯片及 LCC 封装形式,二者最关键的焊点互连结构及其主导失效物理机制(热-振耦合疲劳)完全一致。

根据 LI 等人对1 200余台商用无人机的现场故障统计研究^[11],MPU-6050 的主要失效模式为陀螺仪焊点热疲劳开裂。在典型任务剖面(日均飞行6 h,环境温度为 $-10 \sim 50^{\circ}\text{C}$,机体振动 PSD 约为 $0.02\text{ g}^2/\text{Hz}$)下,其中位寿命约为4.1年(约9 000 h 工作时间)。

将上述工况参数输入本文数字样机(调整温度幅值为 60°C ,PSD 为 $0.02\text{ g}^2/\text{Hz}$),对 MPU-6050 关键器件(ITG-3200 陀螺仪等效型号)进行 Monte Carlo 寿命预测。结果显示,整机 TTF 中位数为9 300 h(等效4.2年,按日均6 h计)。本文模型的预测结果与 LI 等人报道的中位寿命(4.1年)高度吻合(误差 $< 3\%$)。

通过三级验证,本文方法在物理基础、模型规范性与工程适用性维度均获得充分支撑。

3 结论

针对高可靠 MEMS 传感器整机寿命验证中存在的加速试验成本高、现有虚拟方法缺乏系统建模与不确定性量化等瓶颈问题,本文提出并构建了一种基于 PoF 的整机级虚拟评估框架。建立多尺度数字样机,结合热-振耦合多物理场仿真获取关键互连结构的局部应力响应,构建模块化 PoF 模型库以实现单点故障时间的机理预测;在此基础上,引入物理来源驱动的混合概率分布策略对制造与环境不确定性进行量化,并基于“器件内多模式融合”与“器件间首达失效”两级机制完成整机 TTF 的预测。以 MPU9250 九轴传感器为案例的研究结果表明:该方法能够有效识别出 ITG3200 陀螺仪等薄弱环节,预测的整机 MTTF 为12 721 h,且预测结果与历史产品(MPU-6050)的现场服役数据吻合良好,自主开展的热-振联合物理试验亦验证了数字样机的精度(壳温偏差不超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,模态误差 $< 5\%$)。综上所述,该方法在减少对物理试验

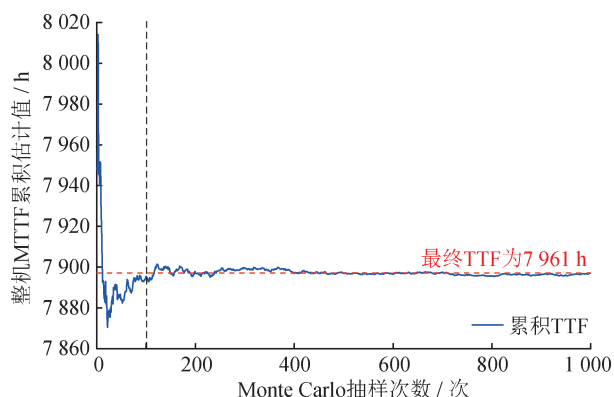


图3 收敛性验证分析结果

Fig.3 Convergence verification analysis results

依赖的前提下,能够有效提升MEMS传感器寿命评估的效率与可信度,为复杂多应力耦合环境下工作的高可靠器件提供了一种可行的虚拟寿命评估途径。

参考文献

- [1] ENGELMAIER W. Fatigue life of leadless chip carrier solder joints during power cycling[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 1983, 6(3): 232-237.
- [2] MANSON S S. Fatigue: a complex subject — some simple approximations [J]. Experimental Mechanics, 1965, 5 (7): 193-226.
- [3] STEINBERG D S. Vibration analysis for electronic equipment[M]. 3rd ed. Hoboken: Wiley, 2000.
- [4] DASGUPTA A, PECHT M. Material failure mechanisms and damage models[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1991, 40(5): 531-536.
- [5] LIU S, LIU Y. Modeling and simulation for microelectronic packaging assembly: manufacturing, reliability and testing[M]. Singapore: Wiley, 2011.
- [6] IANNACCI J. Reliability of MEMS: a perspective on failure mechanisms, improvement solutions and best practices at development level [J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(9/10): 1658-1664.
- [7] HARTZELL A L, DA SILVA M G, SHEA H R. MEMS reliability[M]. New York: Springer, 2011.
- [8] SRIKAR V T, SPEARING S M. A critical review of microscale mechanical testing methods used in the design of microelectromechanical systems [J]. Experimental Mechanics, 2003, 43(3): 238-247.
- [9] VAN SPENGEN W M. MEMS reliability from a failure mechanisms perspective[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(7): 1049-1060.
- [10] CHEN S, GUPTA A, LIU J. Uncertainty quantification in PoF-based lifetime prediction using Bayesian calibration and stochastic modeling[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 189: 109987.
- [11] LI H, ZHOU T, AZIZ M H, et al. Competing failure modes analysis for multi-component systems using physics-informed survival models [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 235: 109215.
- [12] WANG Y, CHEN S, GUPTA A, et al. System-level digital twin framework for reliability evaluation of heterogeneous electronic assemblies [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 241: 109587.
- [13] U. S. Department of Defense. Consideration of military equipment environmental engineering and laboratory testing methods: MIL-STD-810H[S]. 2019.
- [14] Electronic reliability design handbook: MIL-HDBK-338B [S]. U. S. Department of Defense, 1998.
- [15] Performance test methods and qualification requirements for surface mount solder attachments: IPC-9701A [S]. IPC, 2006.
- [16] Failure mechanisms and models for semiconductor devices: JEDEC JEP122H[S]. JEDEC Solid State Technology Association, 2016.
- [17] 任占勇. 数字化研制环境下的可靠性工程技术: 基于产品数字样机的可靠性设计与分析[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.
- REN Z Y. Reliability engineering technology in digital development environment: reliability design and analysis based on product digital prototype[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [18] 国际电子工业联接协会. 表面贴装设计及连接盘图形标准通用要求: IPC-7351B CN-2010[S]. 2010.
- IPC. General requirements for surface mount design and land pattern standards: IPC-7351B CN-2010[S]. 2010. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨 李成成)



第一/通信作者: 于紫玄(1993—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向包括复杂系统的可靠性建模与寿命预测、传感器综合评价理论与方法。