惯性器件贮存寿命评估方法研究进展

要彦清,张舒楠,汤一,廖兴才

(北京晨晶电子有限公司,北京 100015)

摘要:针对惯性器件贮存寿命评估方法,总结了自然贮存试验评估方法其贮存数据应具备的特点、寿命分 布,分析了加速贮存试验评估方法通过预实验确定加速应力类型与范围的必要性,介绍了建立惯性器件寿 命分布模型、加速寿命模型、性能退化模型的常用方法,总结探讨了现阶段贮存寿命评估的失效判据、试 验时间、测试周期等具体试验方案。调研结果表明,惯性传感器贮存寿命评估多采用加速贮存试验评估, 其寿命多符合威布尔分布,采用温度作为加速应力时多采用阿伦尼斯模型作为加速模型,开展试验时多采 用步加温度应力、定时截尾方式,对开展惯性器件贮存寿命试验具有一定参考意义。

关键词:惯性器件;传感器;贮存寿命;评估方法;加速贮存;自然贮存

中图分类号: TH824.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2025)03-0080-14 **DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.010

Research Progress on Evaluation Methods for Storage Life of Inertial Devices

YAO Yanqing, *ZHANG Shunan*, *TANG Yi*, *LIAO Xingcai* (Beijing Chenjing Electronics Co., Ltd., Beijing 100015, China)

ABSTRACT: The characteristics and lifespan distribution of storage data that should be possessed by natural storage test evaluation methods were summarized. The necessity of determining the type and range of accelerated stress by pre-experiment and the common methods of establishing the life distribution model, accelerated life model and performance degradation model of inertial devices was analyzed. Specific experimental schemes such as failure criteria, test time, and test cycle for current storage life evaluation were summarized and discussed. The results indicated that the evaluation of the storage life of inertial sensors was usually carried out through accelerated storage testing, which usually followed a Weibull distribution. When using temperature as the acceleration stress, the Arrhenius model was usually used as the acceleration model. When conducting experiments, the stepwise temperature stress and timed truncation method were usually used, which had certain reference significance for conducting storage life tests of inertial devices.

KEY WORDS: inertial device; sensor; storage life; evaluation method; accelerated storage; natural storage

惯性器件作为载体姿态的测量与控制、导航与控制系统中的关键信息来源,广泛应用于航空航天、智能装备等领域,其性能优劣对快速机动与精确制导等 有着重要意义。然而,在贮存时间与贮存环境的作用 下,惯性器件的关键性能参数,如零偏、标度因数等, 会发生漂移,因此需确定其贮存寿命这一重要指标, 即产品在贮存环境下保持性能满足预定要求的寿命, 以保障航天器、智能装备等效能发挥的稳定性^[1]。如

收稿日期: 2024-12-06; 修订日期: 2025-01-22

Received: 2024-12-06; Revised: 2025-01-22

引文格式:要彦清,张舒楠,汤一,等.惯性器件贮存寿命评估方法研究进展[J].装备环境工程,2025,22(3):80-93.

YAO Yanqing, ZHANG Shunan, TANG Yi, et al. Research Progress on Evaluation Methods for Storage Life of Inertial Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 80-93.

我国对航天器上连续运动的惯性器件提出 5 a 以上、 甚至 8~15 a 的寿命要求^[2]。随着惯性器件的设计与制 造不断优化,产品的精度、可靠性、易于批产性、小 体积等方面,尤其是可靠性与贮存寿命大大提高,采 用自然老化获取贮存寿命的方式因时间成本巨大而 不可行^[3]。

目前, 贮存寿命的评估方法主要为自然贮存试验 评估和加速贮存试验评估 2 种方法^[4]:

1)自然贮存试验评估方法,即将试验样本置于 正常应力水平中,记录较长时间内试验样本的性能变 化,建立产品失效或性能退化关于时间的统计分布^[5], 进而推断寿命特征。该方法试验周期长,但数据可靠 度高。

2)加速贮存试验评估方法,即将试验样本置于 高应力水平下,根据试验样本特性确定其失效模型, 从而推断试验样本在正常应力条件下的贮存寿命,可 以大大缩短试验时间、降低试验成本,使用较为广泛。

北京晨晶电子有限公司已具备覆盖全流程的 QMEMS 敏感元件生产线和 MEMS 惯性产品生产线。 2020—2021 年,组织开展了石英 MEMS 陀螺仪及其 组合系列产品的贮存寿命加速评估试验,依托第三方 技术平台西南技术工程研究所完成了试验^[6],积累了 丰富的经验。近年来,随着 MEMS 惯性器件的应用 推广,惯性器件贮存寿命的重视程度日益提升,试验 成果被越来越多的客户认可。

同类惯性器件的主要构成基本类似,各类惯性器件作为惯性传感器件的底层工作机理类似,因此其各自的贮存寿命评估方法、评估结论对于同类和其他惯性器件的研制、生产、应用均有极大的参考意义。本文针对惯性器件贮存寿命评估方法进行综述,分别对自然贮存试验评估方法数据特点、评估结果等的研究进展,以及加速贮存试验评估方法的预实验、加速模型、正式加速贮存试验、寿命评估结果等的研究进展进行综述。

1 惯性器件贮存寿命分析

1.1 惯性器件分类

惯性器件,也称为惯性传感器,是测量物体惯性运动状态的传感器。根据敏感物理量的不同,可分为 陀螺仪(即角速度传感器)、加速度计(即线加速度 传感器)以及二者组合构成的惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)、惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)等。根据敏感轴向及轴数, 也可分为单轴、双轴、三轴惯性传感器,单轴与多轴 器件在组成上类似,均主要由敏感模块、电源模块、 数据处理模块、通信模块等构成,多轴惯性器件轴间 关系正交。根据工作原理的不同,惯性器件由起初的 机械式发展而来,现已形成机械式、谐振式、光学式、 电容式以及基于石英或硅 MEMS 技术等多种技术共 存的阶段。

1.2 贮存失效机理

分析惯性器件在贮存状态下的可靠性与寿命特征,须先分析其在贮存状态下的失效机理与失效模式。表1列出了基于不同工作原理的惯性器件在贮存过程中的失效机理与失效模式,并由此得到其敏感环境因素。由表1可知,惯性器件的敏感环境因素大多为温度。

1.3 贮存寿命评估试验的检测参数

惯性器件在不同应用场景下着重关注的性能指标存在差异,需要结合传感器的应用背景、工作原理,确定贮存寿命评估试验中重点检测的性能指标。惯性器件在贮存寿命评估试验中检测的参数及选取依据见表 2。

选取性能指标时,根据使用需求或性能参数随应 力的变化趋势,多选择零偏、标度因数或与二者相关 的性能指标,如零偏稳定性、标度因数稳定性。其中, 陀螺仪多选择零偏相关参数,加速度计多选择标度因 数相关参数。

1.4 贮存寿命评估试验的失效判据

进行贮存寿命评估试验前,需要根据使用需求确 定惯性器件的失效判据。GB 2689.1—81 中要求^[24], 试验的失效标准可以是元器件的失效,也可以是所选 性能参数一定程度的劣变,即退化。实际操作中,一 般根据惯性器件实际应用要求来确定其失效判据。部 分惯性器件的失效判据见表 3,但大部分研究的公开 报道未明确提及详细的失效判据。

相较于陀螺与加速度计,惯性导航系统内部元器 件及算法复杂度较高,其失效判据也相对较多。惯性 导航系统在进行加速贮存试验时,可将以下情况视为 失效:通电后不输出正确版本号或自检报错;输出温 度发生跳变或与试验环境实际温度相差较大;陀螺输 出数据异常,如发生阶跃性跳变^[3]。

1.5 常见寿命分布模型

为合理评估惯性器件在贮存环境中的贮存寿命, 需根据其贮存可靠性的变化规律来确定寿命分布函数。常用寿命分布主要有以下4种^[25]。

指数分布,适用于某些电子元器件的寿命描述。该类产品连续工作一段时间后,其剩余寿命与新产品寿命遵循同样的分布规律^[4]。其分布函数如式(1)所示。

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right) \tag{1}$$

	Tab.1 Failure mechanism of inertial devices and analysis of sensitive environmental factors							
试验对象 工作原理 贮存失效机理分析 贮存失效模式 敏感环								
	MEMS 陀螺	使用振动机械元件感知 旋转	电气参数、结构参数、残余应力 等随温度发生变化	零偏差、零偏稳定性差、 输出精度差和性能退化	温度 ^[6-8]			
陀 螺 仪	光纤陀螺	基于 Sagnac 效应	发光二极管等核心部件对温度 敏感	未报道	温度 ^[9-10]			
	液浮陀螺	将陀螺组件用高密度液 体悬浮	温度分布不均会引起浮液流动, 产生干扰力矩	未报道	温度[11]			
	石英挠性 加速度计	摆片因惯性力偏离平衡 位置,产生差动电容	发生粘接老化、磁性退化和电路 漂移	未报道	温度 ^[1,12-14]			
	摆式 加速度计	惯性摆根据加速度大小 表现出相对位移	内部材料特性随温度变化	未报道	温度[15]			
加速 度计	某型 加速度计	未报道	温度影响内部加速度计输出的 准确性	未报道	温度[16]			
	某型 加速度计	未报道	磁性能组件在温度补偿不够时 输出会产生较大漂移 内部胶体的拉伸剪切强度会因 温度而老化,导致磁钢组件位移	放大器电路失效、振荡器 电路失效、磁性能组件 失效	温度 ^[17-18]			
IMU	MEMS IMU	由三轴陀螺、三轴加速度 计提供信息	微机电系统、集成电路随温度变 化发生老化	未报道	温度[19]			
INS	光纤惯导	将内部陀螺仪与加速度	光电器件、电子器件的性能参数 具有温度灵敏性 温度会引起器件的老化	未报道	温度 ^[3]			
	激光惯导	11 佰息积快力守机参数	温度是贮存条件下失效的主要 原因	输出光强降低、 测量精度降低	温度 ^[5,20]			

表 1 惯性器件失效机理与敏感环境因素分析

表 2 惯性器件贮存寿命评估试验中的检测参数及选取依据

	Tab.2 Detection parameters and selection basis in storage life evaluation test of inertial devices						
	试验对象	检测指标选取依据	检测指标	试验机构			
	谐振陀螺	多参数的性能退化预测结果较单 一退化量准确	零偏、标度因数	北京信息科技大学[21]			
		根据使用需求	零偏	中北大学电子测试技术重点实验室[7]			
陀螺仪	MEMS 陀螺	零偏稳定性随温度升高呈退化 趋势	零偏稳定性	国防科技大学[8]			
		标度因数随时间呈递减趋势, 其他指标呈随机波动	标度因数	西南技术工程研究所 ^[6]			
	光纤陀螺	主要精度指标,能反映性能退化	零偏稳定性	北京航空航天大学 ^[9]			
		根据使用需求	零位漂移、零偏稳定性	中国航天时代电子公司惯导中心 ^[2]			
		根据使用需求	零偏、标度因数	合肥工业大学[22]			
		零漂与核心器件功率成正比, 且零漂有明显退化趋势	零位漂移	南京航空航天大学[10]			
	摆式加速度计	最主要的性能参数	标度因数	中航工业北京长城计量测试技术 研究所 ^[15]			
加速 度计	某型加速度计	根据使用需求	标度因数	中国电子科技集团第二十六研究所[16]			
	某型加速度计	根据使用需求	标度因数稳定性、零偏 稳定性	北京航空航天大学[23]			
INS	光纤惯导	根据使用需求	零偏	电子科技大学[3]			

• 83 ·	•
--------	---

	表 5 順注語件大双列病 Tab.3 Inertial device failure criteria							
试验对象		失效判据	计应用力					
		指标要求	判据来源	以初时				
陀螺仪	光纤陀螺	零偏稳定性数值超过 0.4 (°)/h	正常时零偏稳定性为 0.1 (°)/h,结合应用要求	北京航空航天大学[9]				
		零偏超过 0.1 (°)/h,标度因数超过 5×10 ⁻⁴	结合应用要求	合肥工业大学[22]				
	谐振陀螺	零位变化量超过 8×10 ⁻³ (°)/s,标度因数 变化量超过 5×10 ⁻⁴ V/[(°)/s]	结合应用要求	北京信息科技大学[21]				
	MEMS 陀螺	标度因数超过 0.95~1.05	结合应用要求	西南技术工程研究所[6]				
加速 度计	摆式加速度计	标度因数变化量超过 0.3%	结合应用要求	中航工业北京长城计量 测试技术研究所 ^[15]				

2)威布尔分布,是可靠性领域常用的连续性分布,适用于诸如疲劳失效、真空管失效以及轴承失效等描述^[4]。其分布函数如式(2)所示。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m\right]$$
(2)

3)对数正态分布,符合绝缘体、二极管等器件 寿命的分布规律。其分布函数如式(3)所示。

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)\right]$$
(3)

4)极值分布,失效率随时间按指数增长,其分 布函数如式(4)所示。

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\exp\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right]$$
(4)

其中,I型极大值分布的分布函数如式(5)所示。

$$F(t) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{t-\mu}{\sigma}\right)\right]$$
(5)

II 型极大值分布的分布函数如式(6)所示。

$$F(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\sigma}\right)^{-m}\right]$$
(6)

式(1)~(6)中, F(t)为寿命分布函数; θ 为指数分布中的平均寿命; η 为威布尔分布中的特征寿命; σ 为尺度参数;m为形状参数; μ 为位置参数。

2 自然贮存试验评估方法

自然贮存环境下惯性器件的性能变化数据可

真实地反映贮存期间各种环境因素综合作用的结 果^[26]。自然贮存环境下的性能测试数据足够时,通 过分析贮存数据中的性能参数变化规律、失效趋势 等,可更加有效地预测惯性器件在实际贮存环境中 的寿命。

2.1 自然贮存数据要求

基于自然贮存分析惯性器件的贮存寿命时,所采 用的贮存数据应具有一定代表性、普遍性,如贮存时 间较长、贮存温度覆盖范围较广。自然贮存试验所采 用的数据分析见表 4。由表 4 可知,自然贮存试验评 估方法中,自然贮存数据至少需要 2 a 及以上,时间 越长,越具有代表性。

2.2 寿命分布模型评估方法

在自然贮存试验评估方法中,通常运用极小卡方 估计和拟合优度检验融合算法来确定试验样本的寿 命分布函数,即通过对比各函数的 χ^2 统计量值以及拟 合优度 p 值,来检验其对自然贮存数据的拟合度^[30], χ^2 越小、p 越大,说明该分布函数越符合试验样本的寿 命分布;或采用线性回归分析的相关系数进行比较^[32]。 在比较拟合优度结果时,也可不采用最大拟合优度对 应的寿命分布模型,而采用预测寿命最小的分布模 型,以获取最保守、最可靠的寿命评估^[29]。惯性器件 寿命分布函数拟合优度评估结果见表 5,可知,惯性 器件的寿命分布多为威布尔分布或极值分布,拟合优 度 p 值一般大于 0.8。

表 4	自然贮存试验评估方法的数据
Tab.4 Data on e	valuation methods for natural storage tests

		U	
试验对象	贮存环境温度	贮存时间/a	研究机构
某型陀螺	我国亚湿热、亚干热、温和、干燥、寒冷5个典型气候环境	>9	中国白城兵器试验中心 ^[26]
某型陀螺	不同国际空间站的室温环境	6	西安高新技术学院[27]
某型加速度计	未报道	2	北京自动化控制设备研究所[28]
某型加速度计	我国亚湿热、亚干热、温和、干燥、寒冷 5 个典型气候环境	>2	军械工程学院[29]
某型加速度计	我国亚湿热、亚干热、温和、干燥4个典型气候环境	>9	军械技术研究所[30]
某型加速度计	22、25、30 °C	25	军械工程学院[31]

Tab.5 Evaluation results of goodness of fit of life distribution function						
试验对象	寿命分布类型	χ^2 统计量值	拟合优度 p	最佳寿命分布	试验机构	
	指数分布	10.954 6	0.052 3			
某型陀螺	威布尔分布	3.983 3	0.408 3	威布尔分布	中国白城兵器试验中心 ^[26]	
	I型极大值分布	5.292 4	0.258 6			
	指数分布	9.143 1	0.690 7			
甘刑加冲库计	威布尔分布	5.529 8	0.902 8	I刑招十估公右	宏 斌工 <u></u> 29]	
木玺加还反归	I型极大值分布	5.794 0	0.886 7	1 至极八直万重	干悈工性子阮	
	II 型极大值分布	5.583 0	0.899 7			
	指数分布	3.611 9	0.307 0			
甘刑加声庙升	威布尔分布	1.319 0	0.517 0	极值分布	军械技术研究所 ^[30]	
术至加还反归	极值分布	0.256 9	0.880 0			
	对数正态分布	0.292 3	0.864 0			
	指数分布	33.186 4	0.000 1	极值分布	军械工程学院 ^[31]	
甘刑加声庙升	威布尔分布	7.620 5	0.471 0			
术至加还反归	极值分布	0.382 4	0.999 9			
	对数正态分布	14.572 8	0.070 0			
	指数分布	未报道	0.690 7			
基刑加速度计	威布尔分布	未报道	0.902 8	威布尔公布	陆军工程十受[13]	
术至加还反归	I型极大值分布	未报道	0.899 7	41×17×11×41×22	阳平工住八子	
	II 型极大值分布	未报道	0.886 7			
	指数分布	7.100 0	0.970 0			
甘刑加冲库计	威布尔分布	5.500 0	0.988 0	咸东尔公东	由国化阳丘界过於由心[33]	
不至加还反归	极值分布	7.300 0	0.967 0	ወዲሳኮ /ፓ/ ፓ/ ባኮ	丁酉千仍六 位风烈干心。	
	对数正态分布	50.900 0	0.000 0			

表 5 寿命分布函数拟合优度评估结果

2.3 评估结果

按照惯性器件分布模型及分布模型评估方法,根据评估得到的最佳寿命分布函数,推算惯性器件在自然贮存环境中的贮存寿命。基于惯性器件自然贮存数据得到的贮存寿命见表 6^[26-27,29-31]。

3 加速贮存试验评估方法

加速贮存试验评估方法是在不改变试验样本失 效机理的前提下,加大应力(如温度、电压、振动等) 以缩短其失效时间,得到一组包含失效时间的数据 集,并以此推断试验样本处于正常应力水平时的贮存 寿命、可靠性、故障率等信息^[6,19],是高可靠、长寿 命产品寿命评估的有效手段。

3.1 预试验

3.1.1 预实验的必要性

根据 GB 2689.1—81 要求^[24], 需选择促进失效的 应力来加速失效进程, 同时试验样本的失效机理须与 贮存过程中的失效机理相同, 若应力水平过大导致失 效机理改变, 则试验结果不具有参考性。故开展正式 加速贮存试验前通常进行预试验, 获取以下信息^[34]:

	Tab.o Life evaluation results of natural storage test					
试验对象	寿命分布	寿命分布模型评估方法	贮存寿命/a	可靠度	试验机构	
某型陀螺	威布尔分布	极小卡方估计和 拟合优度检验相结合	22.30	0.95	中国白城兵器试验中心 ^[26]	
某型陀螺	未报道	未报道	5.48	未报道	西安高新技术学院 ^[8]	
某型加速度计	I型极大值分布	极小卡方估计和	15.75	未报道	军械工程学院[29]	
某型加速度计	极值分布	拟合优度检验相结合	12.94	0.95	军械技术研究所[30]	
某型加速度计	极值分布	未报道	16.80	0.90	军械工程学院[31]	

表 6 自然贮存试验寿命评估结果

1)分析试验样本的失效机理或薄弱环节,确定 试验样本贮存过程的加速应力类型。

2)分析试验样本的性能参数试验结果,确定其 是否存在退化规律。

3)对试验样本的加速应力范围进行摸底,以保 障试验期间不改变其失效机理。

3.1.2 确定加速应力类型

通过分析传感器在贮存过程中的薄弱环节或失效原因来确定加速贮存试验中的加速应力类型。由表 1可知,由于贮存环境主要考虑温度和湿度要求,多 数传感器电气、结构参数随温度上升存在一定程度变 化,且部分器件对湿度不敏感或为密封结构,大多均 选择温度作为惯性器件的加速应力。

3.1.3 确定检测参数

惯性器件在不同应用场景下着重关注的性能指标存在差异,同时,利用加速贮存试验评估贮存寿命时,各性能参数随时间或加速应力增加而呈现的变化趋势不同,或随机波动,或呈一定比例变化。故需要结合传感器的应用背景、工作原理,并辅以性能参数变化趋势的摸底试验,确定加速贮存试验中重点检测的性能指标。在摸底试验中,可选取多个性能参数进行观测,以便选择最能代表性能退化特征的指标。

由表 2 可知,选取性能指标时,根据使用需求或 性能参数随应力的变化趋势,多选择零偏、标度因数 或与二者相关的性能指标,如零偏稳定性、标度因数 稳定性。其中,陀螺仪多选择零偏相关参数,加速度 计多选择标度因数相关参数。确定监测指标的个数 时,可根据使用需求,重点关注单一性能的变化趋势, 也可同时监测多元参数的性能退化,以避免相关可靠 性信息的丢失、降低评价精度。

3.1.4 确定加速应力范围

根据 GB 2689.1—81 规定^[24],最高应力与最低应 力之间应存在一定间隔,以提高加速贮存试验的准确 度。最低应力应接近或高于试验样本的正常工作环境 应力,以对寿命评估起到加速作用。同时,加速应力 上限不能超过试验样本的结构材料、制造工艺等所能 承受的最大值^[2],以免改变其失效机理或引入新的失 效原因。该上限通常通过预实验摸底得到,即不断增 大加速应力,观察试验样本的性能变化趋势,直至到 达试验样本的工作极限,在该工作极限的基础上保留 一定裕度,获得加速应力最大值。

3.2 确定加速应力施加方案

加速应力施加方法包括恒定应力加速、步加应力 加速、步降应力加速和序进应力加速等。按照加速应 力施加形式的不同,加速贮存试验可分为恒定应力加 速贮存试验、步加应力加速贮存试验、步降应力加速 贮存试验和序进应力加速贮存试验。各加速贮存试验 类型的优缺点见表 7。

表 7 各加速贮存试验类型特点对比 Tab.7 Comparison of characteristics of each accelerated test type

	····· · · · · · · · · · · · · · · · ·	
加速贮存试验类型	优点	缺点
恒定应力加速贮存试验	方法简单,发展较为成熟,准确度高	所需样本数量较多
步加应力加速贮存试验	对样本数量要求较低,降低试验成本,适合高价值、长寿 命器件的贮存寿命评估,在军品试验方面应用广泛	计算方法复杂、计算量大
步降应力加速贮存试验	有效解决步加应力试验中试验样本在低应力水平下不失效 的问题,进一步降低试验时间与经费成本	计算方法复杂; 成熟度欠缺
序进应力加速贮存试验	未报道	使用较少

恒定应力加速贮存试验是将所有样本分为若干 组,通常为平均分配,设置一组高于正常应力水平的 恒定应力值,对每组样本施加一个恒定水平应力。经 过一段时间,每个应力水平下都会有一定数量的试验 样本发生失效。步加应力加速贮存试验,亦称步进应 力加速贮存试验,采用累积应力的方式加速样本失 效。选择一组高于正常应力水平的加速应力,试验开 始后,逐渐提高应力水平,当某级应力水平下出现试 验样本失效或达到预期试验时间后,将未发生失效的 样本转入下一级应力水平中继续试验,以此类推。步 降应力加速贮存试验与步加应力试验类似,差异在于 步降应力加速贮存试验为应力水平由高向低开展试 验,可有效解决步加应力试验中试验样本在低应力水 平下不失效的问题^[35],进一步降低试验时间与经费成本。序进应力加速贮存试验是以序进应力的形式累计退化量,一般只针对特殊产品,使用较少。

确定加速应力施加方式后,需进一步确定应力水 平数量,结合预实验阶段获取的加速应力范围,即可 制定加速应力试验的应力水平实施方案。GB 2689.1—81要求^[24],应力水平通常不少于4个。惯性 器件加速应力范围,即通过正常贮存温度上限与预实 验结果确定加速贮存试验中的应力范围见表8。

在此范围的基础上,确定加速应力施加方式与应力 水平数量,形成加速贮存试验的应力实施方案,见表9。 根据已开展的加速贮存试验可知,加速应力施加方式以 步加应力与恒定应力为主,应力水平多为4个及以上。

	Tab.8 Accelerated stress range of inertial devices					
t	式验对象	步长/℃	合格判据	预实验结果	确定的应力范围/℃	
		10	未报道	最高温度应力为 110 ℃ ^[6]	80~110	
陀螺仪	MEMS 陀螺	10	零偏不发生突变	120 ℃时零偏发生阶跃性变化,降至 110 ℃后零偏仍异常 ^[7]	50~110	
加速	石英挠性 加速度计	未报道	未报道	储存问题极限为 95 ℃ ^[13]	85	
度计	某型加速度计	10	标度因数不发生突变	110℃时标度因数发生跳变 ^[16]	70~100	
	某型加速度计	10	未报道	110℃时加速度计损坏 ^[25]	70~100	
INC	光纤惯导	未报道	未报道	破坏极限在 170 ℃左右 ^[3]	100~160	
1113	激光惯导	未报道	未报道	极限温度为 70 ℃ ^[20]	20~60	

表 8 惯性器件加速应力范围

表 9 惯性器件加速贮存试验中加速应力实施方案

	lab.9 Implementation plan for accelerated stress in inertial device acceleration test							
	试验对象 应力施加方式 应力水平 试验机构							
		恒定应力	75、85、95 ℃	中北大学电子测试技术重点实验室[7]				
	MEMS 陀螺	恒定应力	45、60 ℃	国防科技大学[8]				
		步加应力	80、90、100、110 °C	西南技术工程研究所 ^[6]				
陀	激光陀螺	恒定应力	8 mA	工业和信息化部电子第五研究所[36]				
螺	业红陀岬	恒定应力	50、60、70、80°C	中国航天时代电子公司惯导中心[2]				
仪	儿们陀琢	步加应力	55、70、85、95 ℃	北京航空航天大学[9]				
	液浮陀螺	步加应力	343、348、353、358 K	中北大学[11]				
	动力调谐陀螺	步降应力	80、66.7、52.5、40 °C	北京航空航天大学[37]				
	某型陀螺	步降应力	100、80、60、40 °C	北京航天测控公司[35]				
	福马和浑卑计	恒定应力	65 ∖ 75 ∖ 85 °C	第二炮兵工程大学[17]				
	法八加还反归	步加应力	65、75、85、95、100 ℃	中航工业北京长城计量测试技术研究所[15]				
t	石英挠性	恒定应力	85 °C	中国电子产品可靠性与环境试验研究所[14]				
加	加速度计	步加应力	70、 80、 90、 100 ℃	工业和信息化部电子第五研究所[38]				
还	石英加速度计	恒定应力	70、 80、 90、 100 ℃	中国航天科技集团九院十六所 ^[39]				
及计	某型加速度计	步加应力	70、 80、 90、 100 ℃	中国电子科技集团第二十六研究所[16]				
	某型加速度计	步加应力	65 、75 、85 ℃	北京航空航天大学[18]				
	某型加速度计	步加应力	70、 80、 90、 100 ℃	陆军工程大学石家庄校区[25]				
	某型加速度计	步降应力	110、93.9、76.7、60 ℃	中国华阴兵器试验中心 ^[40]				
INC	光纤惯导	步加应力	100、118、138、160 ℃	电子科技大学[3]				
INS	激光惯导	步加应力	20、30、40、50、60 °C	北京理工大学[20]				

3.3 确定寿命分布模型

加速贮存试验中通常确定样本寿命分布函数的 方法为:

1) 从文献记录中获取寿命分布。大量文献表明, 激光陀螺中的环形激光器^[36]、加速度计^[40]、陀螺仪 转子^[32]、液浮陀螺^[11]、制导部件中的陀螺^[41]、动力 调谐陀螺^[37]、光纤陀螺^[2]、惯性导航^[3,5]的寿命分布 服从或近似服从威布尔分布。

2)利用试验数据拟合寿命分布。为避免单独依据加速贮存试验的局限性^[25],可通过自然贮存数据进 行拟合,如1.2节所述,确定拟合优度最高的寿命分 布,实现自然贮存试验数据与后续加速贮存试验数据 的结合。若不具备自然贮存数据,拟合时可选择预 试验数据。如利用微陀螺仪高温步加应力预试验数 据进行寿命分布拟合度检验,可知正态分布的拟合 优度较高^[7]。

3.4 加速模型

3.4.1 概述

利用加速贮存试验评估方法评估贮存寿命时,根 据试验需要试样失效还是性能退化,分为2种方案, 即加速寿命试验和加速退化试验。加速寿命试验是通 过加速应力试验获取试验样本的实际失效寿命数据, 分析其寿命特征与应力水平之间的关系,实现对试验 样本正常应力水平下的贮存寿命评估。加速退化试验 是依据试验样本在高应力水平下的性能退化数据进 行建模,结合失效判据,从而外推得到贮存寿命,无 需真正发生失效,相较于加速寿命试验,可节约试验 时间与经费成本。2种试验方法在高可靠、长寿命产 品的寿命评估中均有广泛应用。2种方案对应的加速 模型分别称之为加速寿命模型与加速退化模型。

3.4.2 加速寿命模型

加速寿命试验的核心在于根据样本在高应力环 境下的寿命特性,推测其在常规贮存条件下的寿命分 布。试验的关键点是样本寿命特性与试验应力条件 之间的关联模型,即加速寿命模型,也称之为加速 模型。加速应力不同时,加速模型随之变化,需要 根据试验样本贮存寿命的敏感应力来确定其适用的 加速模型^[42]。

1)阿伦尼斯模型。由 3.1.2 节可知,加速贮存试 验中常使用温度作为加速应力。阿伦尼斯模型是有效 描述温度加速样本(如电子元件、绝缘材料等)化学 反应、促使其提前失效这一过程的经典加速模型^[3], 其表达式如式(7)所示。

 $\xi = A \mathrm{e}^{-E/KT} \tag{7}$

式中: *č* 为寿命特征; *A* 为常数; *E* 为激活能; *K* 为玻尔兹曼常数; *T* 为热力学温度。随着温度升高, 寿命特征符合阿伦尼斯模型的产品寿命会表现出指 数式下降的趋势。

大量文献表明, MEMS 陀螺^[7-8]、MEMS 惯性 测量单元^[19]、光纤陀螺及其内部光学元器件^[2,9]、 激光惯导^[5,20]、液浮陀螺^[11]、动力调谐陀螺^[37]、摆 式加速度计^[15]、石英挠性加速度计^[13-14]、某型加速 度计^[16-18,23,25,40,43]等惯性器件采用温度加速应力时 均服从阿伦尼斯模型。

2)其他模型。以温度作为加速应力时,除阿伦 尼斯模型外,当寿命特征为热力学温度的函数时,可 使用单应力 Eyring 模型。当热力学温度在较小范围内 变化时,单应力 Eyring 模型近似于阿伦尼斯模型^[42]。 将多个应力视作加速应力时,可使用多应力广义 Eyring 模型^[42]。对于其他加速应力,如浓度等,目前无适用 的加速模型,可利用加速贮存试验数据拟合适当的回 归模型^[42]。

3.4.3 加速退化模型

加速退化试验的基本思想是根据样本在高应力 条件下的性能退化特征与试验应力条件之间的关系, 推断出正常应力下的性能退化特征,并结合失效判据 进行贮存寿命评估。建模时可基于试验样本的失效机 理,也可采用数据拟合方法

加速退化试验的基本思想是根据样本在高应力 条件下的性能退化特征与试验应力条件之间的关系, 推断出正常应力下的性能退化特征,并结合失效判据 进行贮存寿命评估。建模时可基于试验样本的失效机 理,也可采用数据拟合方法进行建模^[44]。

1)基于随机过程。随机过程可以有效描述产品 性能退化的不确定性,如 Winener 过程、逆 Gaussian 过程、布朗漂移运动等广泛应用于基于退化数据拟合 的产品性能退化建模。

Wiener 过程早期多用于描述典型产品(如接触器、继电器、航空发动机等)的性能参数退化建模与分析^[38,45],现已验证可基于 Wiener 过程对 MEMS 陀螺仪的标度因数^[6]、光纤陀螺的零偏和标度因数^[22]、高精度石英挠性加速度计的标度因数^[38]的疲劳累计与性能退化进行建模,效果良好。其表达式如式(8)所示。

$$X(t) = x_0 + \lambda t + \sigma_w W(t)$$
(8)

式中: X(t)为试验样本在 t 时刻的性能指标; x_0 为性能参数的初值; λ 为漂移系数,表示性能退化速率; σ_w 为扩散系数,为标准 Wiener 过程。

相较于 Wiener 过程、Gamma 过程,逆 Gaussian 过程对 MEMS 加速度计零位电压具有最优的拟合效 果^[44]。其表达式如式(9)所示。

$$Y(t) \sim IG\left[\mu\Lambda(t), \lambda\Lambda(t)^{2}\right]$$
(9)

式中: Y(t)为试验样本在t时刻的性能指标相对于 初始时刻的增量; μ 为均值; λ 为尺度系数; $\Lambda(t) = t^{\Lambda}$; $IG(\cdot)$ 为逆 Gaussian 分布。

产品内部在贮存过程中会发生缓慢的物理化学 变化,产品性能参数随该变化程度增大而逐渐退化, 该性能退化趋势符合布朗漂移运动规律。常用对数非 线性漂移布朗运动描述光纤陀螺、摆式加速度计的性 能退化规律^[8,15]。其表达式如式(10)所示。

 $Y(t) = \sigma B(t) + d(s)t + y_0 \tag{10}$

式中: Y(t)为试验样本在t时刻的性能; y_0 为产 品在初始时刻的性能; B(t)为标准布朗运动; d(s)为 漂移系数,是仅与应力相关的确定性函数; σ 为扩散 系数。

2)基于灰色系统理论。概率论、模糊数学及数 理统计等常规方法难以有效解决具有小样本、贫信息 等特点的数据,而灰色系统理论通过挖掘系统变化规 律并建模,可以增强原始数据的规律性,减少其随机 性。其中,灰色预测模型是广泛使用的序列预测外推 模型。针对陀螺仪的零位电压与灵敏度,可采用单序 列一阶线性灰色预测模型实现建模与预测^[46]。灰色模 型也可与其他模型结合使用,同时兼具多个模型的优 点。可将灰色预测模型与最小二乘支持向量机结合, 对石英挠性加速度计的零偏和标度因数随时间的漂 移进行建模^[28],其预测精度高于仅使用最小二乘支持 向量机进行预测。结合灰色模型与马氏链模型能够对 某型导弹速率陀螺仪的零位电压及灵敏度进行有效 预测^[47],可充分发挥灰色模型动态建模的特点,并根 据参数总体变化趋势进行马氏链的状态划分,对样本 小、随机波动性大的数据预测具有一定优势。

3)基于支持向量机。支持向量机在非线性数据 处理方面具有良好效果,具有无需求解二次规划即可 得到模型参数的优点,可实现石英挠性加速度计的标 度因数与标度因数稳定性、谐振陀螺的零偏与标度因 数的退化趋势预测^[21,48]。

各加速退化模型的适用场景见表 10。以上模型 的部分已有研究存在侧重模型优化、弱化模型检验的 问题,可采用留一法、均方根误差 RMSE、判定系数 等量化指标检验模型效果^[6]。

表 10 各加速退化模型的适用场景

Tab.10 Applicable scenarios of accelerated degradation models

加速退化模型	适用场景
其王随机过程	惯性器件性能退化具有
坐了随机过住	不确定性特点
其干龙岛玄统理论	试验数据具有小样本、
坐1 从已示现 生比	贫信息等特点
基于支持向量机	性能退化模型具有非线性特点

3.5 正式加速贮存试验

3.5.1 前提假设条件

完成 2.1 节~2.4 节的工作后,即可正式开展加速 贮存试验。正式加速贮存试验的开展基于以下假设前 提条件^[3]:试验样本在正常应力水平与加速应力水平 下的寿命分布一致;试验样本的失效机理不因应力水 平变化而改变;试验样本的寿命特征与所施加的不同 加速应力水平之间符合已选取的加速模型;试验样本 的失效与累计失效方式无关,仅取决于已累计的失效 和当前时刻的应力水平。

3.5.2 参数估计方法

早期国内惯性器件加速贮存试验相关研究较少, 尝试通过威布尔概率纸描点对符合两参数威布尔分 布的光纤陀螺寿命分布进行参数估计^[2]。随着惯性器 件贮存寿命试验研究的进一步深入,通常采用最小二 乘估计、极大似然估计、Bayes估计等方法对惯性器 件加速贮存试验数据进行分析,估计出加速模型或性 能退化模型中的未知参数,见表 11。

表 11 各参数估计方法特点对比 Tab.11 Comparison of characteristics of parameter estimation methods

参数估计方法	优点	缺点
最小二乘估计	计算简单	拟合结果可能呈现单一性 ^[20]
极大似然估计	可有效整合数据中的各类特征;运算简单, 精确度良好且较为可靠	存在多个未知参数时实际操作性差
Bayes 估计	适于小样本、易产生无失效数据的特点的数据处理	计算复杂

1)最小二乘估计。最小二乘估计是最常用的参数 估计方法,是通过最小化误差平方和来寻找数据的最 佳函数匹配。可通过最小二乘估计阿伦尼斯模型^[18]、 漂移布朗运动模型、灰色预测模型^[9]中的未知参数。

2)极大似然估计。极大似然估计是通过最大化 似然函数实现参数求解,广泛应用于统计模型的参数 估计中。在加速贮存试验数据处理中,可直接使用极 大似然估计对阿伦尼斯模型、Wiener 过程退化模型的 参数进行求解^[6,11]。若使用极大似然估计进行参数辨 识时存在多个未知参数,实际操作性差,通常将极大 似然估计与最小二乘估计相结合,先利用极大似然法估 算试验样本在各应力水平下的退化模型参数,如对数非 线性漂移布朗运动中的漂移系数、漂移布朗运动中的产 品退化率、Wiener 过程中的扩散系数等,然后利用最 小二乘估计加速模型或性能退化模型中的常数^[15-16]。

3) Bayes 估计。当惯性器件加速贮存试验中未 产生失效数据,或期望弥补恒定应力加速贮存试验精 度高但周期长的不足,试验数据具有小样本、无失效 数据的特点,利用经典统计算法得到的估计结果可信 度较低。Bayes 估计能够较好综合各种主、客观的先 验信息以及多种环境下的试验数据,缩短置信区间估 计,有效提高模型估算精度^[36],可以节省试验经费, 缩短试验周期,具有一定的工程意义和使用价值。

3.5.3 受试品数量

GB 2689.1—1981 要求^[24],每个应力水平下的样本数量不少于 10 只,特殊产品不少于 5 只。惯性器件加速贮存试验中受试品数量见表 12。由于惯性器件成本较高,因此受试品数量一般不少于 5 只。

3.5.4 试验时间与测试周期

加速寿命试验按试验结束条件可分为完全寿命 试验与截尾寿命试验^[34]。完全寿命试验是所有试验样 本均失效时停止试验,此时数据为完全样本,基于此 获得的可靠性指标更加准确。但由于惯性器件可靠性 高、贮存寿命长的特点,该方法的试验时间过长,常 不被采用。截尾寿命试验是试验样本部分失效时停止 失效,包括定时截尾试验,即达到指定时间后停止试 验,此时试验样本失效数量为随机;定数截尾试验, 即达到指定失效数量后停止试验,此时试验停止时间 为随机。如 GB 2689.1—81 要求^[24],加速寿命试验在 每一应力水平下有 50%以上的样品失效可终止失效, 若存在困难,至少满足 30%以上的样品失效。

Tab.12 Number of test samples in inertial device accelerated test				
试验对象		样本数量	试验机构	
		每个应力水平下 6 只	中国航天时代电子公司惯导中心[2]	
	光纤陀螺	3 只	北京航空航天大学[9]	
		3 只	合肥工业大学[22]	
		24 只	西南技术工程研究所 ^[6]	
阳	MEMS 陀紫	每个应力水平下 5 只	中北大学电子测试技术重点实验室[7]	
紫仪	液浮陀螺	7 只	中北大学[11]	
K	激光陀螺	每个应力水平下 5 只	工业和信息化部电子第五研究所[36]	
	动力调谐陀螺	5 只	北京航空航天大学[37]	
	谐振陀螺	2 只	北京信息科技大学[21]	
	某型陀螺	5 只	北京航天测控公司 ^[35]	
	一一十十二十十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十二十	每个应力水平下 6 只	第二炮兵工程大学[17]	
加	法八加还反归	15 只	中航工业北京长城计量测试技术研究所[15]	
速	石英加速度计	每个应力水平下 5 只	中国航天科技集团九院十六所 ^[39]	
度	某型加速度计	7 只	陆军工程大学[25]	
计	某型加速度计	5 只	北京航空航天大学[18]	
	某型加速度计	40 只	中国华阴兵器试验中心 ^[40]	
IMU	MEMSIMU	25 只	萨勒诺大学[19]	
INS	光纤惯导	每个应力水平下 6 只	电子科技大学[3]	
	激光惯导	10 只激光陀螺仪*	北京理工大学 ^[20]	

表 12 惯性器件加速贮存试验中受试品数量

*激光惯导价格昂贵,无法提供,激光陀螺仪是其重要部件和薄弱环节。

为避免试验时间过长或过短,可将定时截尾试验 与定数截尾试验结合,优先考虑定数截尾试验,若实 际试验超过一定时间,按定时截尾试验处理^[3]。试验 期间,测试周期的选择直接影响产品贮存寿命的估计 精度。确定测试周期的原则是,在不过多地增加检查 和测试工作量的前提下,清楚掌握试验样本的失效分 布情况,各应力水平下一般要有5个以上的测试点^[24]。 测试数据前需将应力水平调整至与正常应力水平一 致后再进行测试,同时应尽量缩短测试时间,以减少 试验误差。惯性器件试验时间与测试周期见表13, 可以看出,定时截尾试验可以人为控制试验时间,使 用较为广泛。

Tab.13 Test time and cycle of inertial devices					
试验对象		结束条件	试验时间	测试周期	试验机构
陀螺仪	光纤陀螺	最好为 完全寿命	未报道	每隔7d	中国航天时代电子公司 惯导中心 ^[2]
		定时截尾	总时长 4 032 h	每隔6d	北京航空航天大学 ^[9]
	液浮陀螺	定时截尾	随应力水平增加,4个应力下的测试时间依 次为5、3、2、1d	每隔1d	中北大学[11]
	MEMS 陀螺	定时截尾	4个应力下的测试时长依次为 55、41、28、14 d	每个应力下等 时间间隔	西南技术工程研究所[6]
		定时截尾	每个应力水平下测试 23 d	未报道	国防科技大学[8]
	谐振陀螺	定时截尾	总时长 762 h	每隔2d	北京信息科技大学[21]
	某型陀螺	定时截尾	随应力水平降低,4个应力下的测试时间依 次为1、1.5、3、3.5周	未报道	北京航天测控公司 ^[35]
加速 度计	摆式 加速度计	定时截尾	随应力水平增加,5个应力下的测试时间依 次为1200、840、720、600、360 h	每隔 4 h	中航工业北京长城计量 测试技术研究所 ^[15]

表 13 惯性器件试验时间与测试周期

Tab.13 Test time and cycle of inertial devices					
	试验对象	结束条件	试验时间	测试周期	试验机构
加速 度计	某型 加速度计	定时截尾	随应力水平增加,4个应力下的测试时间依 次为17、93、55、22d	每隔 2 d	陆军工程大学[25]
	某型 加速度计	定时截尾	总时长 4 500 h	每隔3d	中国电子科技集团第二 十六研究所 ^[16]
IMU	战术级、控制 级 IMU	定时截尾	总时长 161 d	每隔 23 d	火箭导弹工业公司 ^[49]
INS	光纤惯导	定时截尾	随应力水平增加,4个应力下的测试时间依 次为45、30、15、10 d	每隔 5 d	电子科技大学[3]
		定数截尾	失效数量超过样本数量的 2/3		

续表 13 惯性器件试验时间与测试周期

3.6 评估结果

惯性器件贮存寿命评估过程中,通过加速贮存试 验获取试验样本在高应力水平下的失效寿命数据或 性能退化数据,依据试验样本适合的加速模型或性能 退化模型进行建模,从而对试验样本在正常贮存环境 下的贮存寿命与可靠度进行评估。惯性器件加速贮存 试验寿命评估结果见表 14。

Tab.14 Life evaluation results of inertial device accelerated test					
	试验对象	贮存温度/℃	贮存寿命/a	可靠度	试验机构
	N/ ムイ IN-27 由田	25	5	0.998 0	
			10	0.969 7	北京航空航天大学 ^[9]
	元纤陀绦		20	0.879 4	
		55	4.43	未报道	合肥工业大学[22]
r -	海台山口で大市田	20	31.20	0.990 0	北方
陀螺	微兀陀烁	四季	6.20	0.990 0	北京理工人子
	液浮陀螺	63	4.24	未报道	中北大学[11]
		25	4.35	未报道	国防科技大学[8]
	MEMS 陀螺	25	34.24	0.950 0	中北大学电子测试技术重点实验室[7]
		25	50.02	0.950 0	西南技术工程研究所[6]
	谐振陀螺	20	6.16	未报道	北京信息科技大学[21]
	某型陀螺	室温	26.90	0.800 0	军械工程学院[41]
	石苗均州加油亩计	未报道	16.98	0.900 0	工业和信息化部电子第五研究所 ^[38]
	石 央 宛 住 加 巫 反 月	未报道	1.34	未报道	中国电子产品可靠性与环境试验研究所[14]
t.,	挥式加速度计	20	16	0.999 5	由韓工业业宣长博计量测试技术研究所[15]
加	运八加还反开	20	18	0.998 9	于加工业北东区级计重例低较不研究所
达 宦	其刑加浑座计	25	10.05	0.950 0	阵宏工程十 씓 ^[25]
设计	米望加速度日		14.92	0.900 0	面手工性八子
	某型加速度计	21	33.51	未报道	中国电子科技集团第二十六研究所[16]
	某型加速度计	20	7.19	0.950 0	第二炮兵工程大学[17]
	某型加速度计	20	16	0.988 0	北京航空航天大学[18]
INS	光纤惯导	未报道	11.13	未报道	电子科技大学[3]

表 14 惯性器件加速贮存试验寿命评估结果

然而已有研究中大多侧重于通过寿命趋势建模 预测器件寿命,弱化了失效机理模型的支持。后续可 结合结构仿真分析与相关机理试验,并合理辅以预试 验结果分析,明确惯性器件各关键部件或构成的失效 机理。同时,可预先基于仿真与统计分析,探讨确定 试验品数量、应力水平、失效截尾数等参数最佳数值 的方法,以合理优化试验方案,进一步降低贮存寿命 试验的费效比。

4 结语

针对惯性器件贮存寿命试验方法,本文介绍了自 然贮存试验与加速贮存试验2种评估方法。对于自然 贮存试验,基于足够多的自然贮存数据,可拟合产品 的寿命分布,以评估其贮存寿命。对于加速贮存试验, 通常以温度作为加速应力,辅以预实验确定加速应力 的类型与范围,采取以步加应力、定时截尾方式为主 的试验方案开展寿命试验或退化试验。对进一步开展 惯性器件贮存寿命评估具有一定参考意义。

参考文献:

 许丹,林坤松,陈云霞.基于故障行为的惯导产品贮存 寿命试验设计[J].北京航空航天大学学报,2018,44(3): 437-443.

> XU D, LIN K S, CHEN Y X. Failure Behavior Based Storage Life Test Design for Inertial Navigation Products[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(3): 437-443.

[2] 丁东发,于海成,王巍.光纤陀螺仪及光学元器件寿命评估方法研究[C]//提高全民科学素质、建设创新型国家——2006中国科协年会论文集(下册).北京:中国科学技术协会,2006.

DING D F, YU H C, WANG W. Study on Life Evaluation Methods of Fiber Optic Gyroscopes and Optical Components[C]// Collected Papers of 2006 Annual Meeting of China Association for Science and Technology: Improve the Scientific Literacy of All People and Build an Innovation-oriented Country (Volume II). Beijing: China Association for Science and Technology, 2006.

- [3] 李天航. 惯性导航系统设备加速寿命试验和寿命预测 方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
 LI T H. Research on Accelerated Life Testing and Life Prediction Methods for Inertial Navigation System Equipment [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [4] 黄琛,穆希辉,牛跃听,等.基于加速寿命试验的陀螺 仪贮存寿命评估概述[J].飞航导弹,2017(10): 62-66.
 HUANG C, MU X H, NIU Y T, et al. Overview of Gyroscope Storage Life Evaluation Based on Accelerated Life Test[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(10): 62-66.
- [5] LUO K, HAN L M, FANG H Z, et al. Research on Storage Life Prediction Method for Strapdown Inertial Navigation System[C]// Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing). Beijing: IEEE, 2012.
- [6] 谭甜甜,张世艳,杨昊雨,等.基于维纳过程的 MEMS 陀螺仪贮存寿命评估[J].装备环境工程,2024,21(2):59-64.
 TAN T T, ZHANG S Y, YANG H Y, et al. Storage Life

Evaluation of MEMS Gyroscope Based on Wiener Process[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(2): 59-64.

- [7] 于丽霞,秦丽,王淑英,等. 温度应力下微陀螺仪的加速寿命评估[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(3): 78-81.
 YU L X, QIN L, WANG S Y, et al. Accelerated Life Evaluation of Micro-Gyro under Temperature Stress[J]. Journal of Detection & Control, 2015, 37(3): 78-81.
- [8] LIU Y, WANG Y S, FAN Z W, et al. Lifetime Prediction Method for MEMS Gyroscope Based on Accelerated Degradation Test and Acceleration Factor Model[J]. Eksploatacja I Niezawodność–Maintenance and Reliability, 2020, 22(2): 221-231.
- [9] 马静, 苑丹丹, 晁代宏, 等. 基于漂移布朗运动的光纤 陀螺加速贮存寿命评估[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(6): 756-760.
 MA J, YUAN D D, CHAO D H, et al. Accelerated Storage Life Evaluation of FOG Based on Drift Brownian Movement[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(6): 756-760.
- [10] ZHANG X Q, CHENG Y H, LU N Y, et al. Life Prediction Model of Fiber Optic Gyroscopes Considering Competitive Failure[C]// 2021 CAA Symposium on Fault Detection, Supervision, and Safety for Technical Processes (SAFEPROCESS). Chengdu: IEEE, 2021: 1-6.
- [11] 彭志凌,杨晋伟,邵轶群,等.基于加速寿命试验的液 浮陀螺仪寿命预测[J].中北大学学报(自然科学版), 2014, 35(6): 662-665.
 PENG Z L, YANG J W, SHAO Y Q, et al. Research on Working Life Prediction of Liquid Floated Gyroscope Based on Accelerated Life Tests[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2014, 35(6): 662-665.
- [12] 潘广泽,黄创绵,李小兵,等.石英挠性加速度计贮存 寿命评价方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(1): 11-15.
 PAN G Z, HUANG C M, LI X B, et al. Research on Storage Life Evaluation Method of Quartz Flexible Accelerometer[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2016, 34(1): 11-15.
- [13] PAN G Z, LUO Q, WANG Y H, et al. Research on an Acceleration Factor Estimation Method for Accelerated Life Testing of High Precision Quartz Flexible Accelerometer[C]// 2018 9th International Conference on Information Technology in Medicine and Education (ITME). Hangzhou: IEEE, 2018.
- [14] PAN G Z, LI Y Q, LI X B, et al. A PoF-Based Storage Lifetime Evaluation Method for High Precision Quartz Flexible Accelerometers[C]// 2018 12th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS). Shanghai: IEEE, 2018.
- [15] 赵君辙,欧阳恒,张朋好,等. 摆式加速度计贮存寿命 评估[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(3):230-232.
 ZHAO J Z, OUYANG H, ZHANG P H, et al. Storage Life Evaluation of Pendulous Accelerometer[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(3):

230-232.

- [16] 王勇,夏昌福,郭茂. 基于加速退化模型的加速度开关 贮存寿命评估[J]. 压电与声光, 2023, 45(3): 484-488.
 WANG Y, XIA C F, GUO M. Evaluation of Storage Life of Acceleration Switch Based on Accelerated Degradation Model[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2023, 45(3): 484-488.
- [17] 李瑞, 汪立新, 刘刚, 等. 基于加速退化模型的加速度 计非线性特征分析及贮存寿命预测[J]. 中国惯性技术 学报, 2014, 22(1): 125-130.
 LI R, WANG L X, LIU G, et al. Nonlinear Characteristic Analysis and Storage Life Forecast for Accelerometer Based on Accelerate Degradation Model[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 125-130.
- [18] 袁宏杰,李楼德,段刚,等.加速度计贮存寿命与可靠 性的步进应力加速退化试验评估方法[J].中国惯性技 术学报,2012,20(1):113-116. YUAN H J, LI L D, DUAN G, et al. Storage Life and Reliability Evaluation of Accelerometer by Step Stress Accelerated Degradation Testing[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(1): 113-116.
- [19] CARRATÙ M, CATELANI M, CIANI L, et al. Reliability Estimation of Inertial Measurement Units Using Accelerated Life Test[C]// Proceedings of the 18th IMEKO TC10 Conference on Measurement for Diagnostics, Optimisation and Control. Poland: EUROLAB Aisbl, 2022.
- [20] TENG F, LIU Y Y, HUANG B S. A Study on the Storage Reliability of LSINS Based on Step-Stress Accelerated Life Test[J]. MATEC Web of Conferences, 2015, 22: 02031.
- [21] 穆阳阳,李擎,田少欣. 热应力试验预测谐振陀螺寿命的研究[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(9): 25-27.
 MU Y Y, LI Q, TIAN S X. Research on Thermal Stress Test for Prediction Life of Resonant Gyro[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(9): 25-27.
- [22] 袁莉芬, 朋张胜, 何怡刚. 基于 Copula 函数的光纤陀螺 贮存可靠性评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 58-65.

YUAN L F, PENG Z S, HE Y G. Evaluating Storage Reliability of FOG Based on Copula Function[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 58-65.

- [23] 王前程,陈云霞,康锐.加速度计加速退化机理模型建模方法[J].北京航空航天大学学报,2012,38(10):1405-1409.
 WANG Q C, CHEN Y X, KANG R. Accelerated Degradation Mechanism Modeling Method for Accelerometers[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(10): 1405-1409.
- [24] 国家标准总局. 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方 法总则: GB 2689.1—1981[S]. 北京: 中国标准出版社, 1981.

National Bureau of Standards of the People's Republic of China. Constant Stress Life Tests and Acceleration Life tests;General Rules: GB 2689.1—1981[S]. Beijing: Standards Press of China, 1981.

- [25] 赵晓东,穆希辉.加速度计贮存试验及寿命评估方法 研究[J]. 兵工学报,2020,41(6):1227-1235.
 ZHAO X D, MU X H. Storage Life Evaluation of Accelerometer Based on Accelerator Factor Coefficient of Variation[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(6): 1227-1235.
- [26] 王长安,牛跃听,穆希辉,等. 某型陀螺仪自然贮存寿 命评估与加速寿命试验时间预估[J]. 中国惯性技术学 报,2016,24(5):683-687.
 WANG C A, NIU Y T, MU X H, et al. Prediction of Storage Life and Accelerated-Life-Testing Time for Gyroscope[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(5):683-687.
- [27] WANG Z Q, HU C H, WANG W B, et al. A Case Study of Remaining Storage Life Prediction Using Stochastic Filtering with the Influence of Condition Monitoring[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 132: 186-195.
- [28] 于湘涛,董卫华,张兰,等.基于灰色最小二乘支持向量机的加速度计参数预测[J].中国惯性技术学报,2013,21(6):813-816.
 YU X T, DONG W H, ZHANG L, et al. Prediction of Accelerometer Parameters Based on Grey Least Squares Support Vector Machine[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(6): 813-816.
- [29] 王永南,穆希辉,牛跃听,等. 某型加速度计变环境检测数据修正与寿命评估[J]. 中国测试, 2016, 42(4): 125-131.
 WANG Y N, MU X H, NIU Y T, et al. Varied Environment Data Amendment and Life Assessment of a Certain Type of Accelerometer[J]. China Measurement & Test, 2016, 42(4): 125-131.
- [30] 牛跃听,穆希辉,姜志保,等.自然贮存环境下某型加速度计贮存寿命评估[J].中国惯性技术学报,2014,22(4):552-556.
 NIU Y T, MU X H, JIANG Z B, et al. Storage Life Assessment of an Accelerometer under Natural Storage Environment[J]. Journal of Chinese Inertial Technology,2014,22(4):552-556.
- [31] 罗赓,穆希辉,杨振海,等.温度应力下的加速度计贮 存寿命评定[J].装甲兵工程学院学报,2014(3):27-30. LUO G, MU X H, YANG Z H, et al. Storage Life Evaluation of Accelerometer under Temperature Stress[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014(3): 27-30.
- [32] 蒋文民, 冯林平, 郭力强. 某型导弹陀螺仪转子可靠性 评估[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(5): 114-118.
 JIANG W M, FENG L P, GUO L Q. Reliability Evaluation of a Missile Gyroscope Rotor[J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(5): 114-118.
- [33] 罗赓, 张畔, 唐平建, 等. 某型加速度计可靠性寿命试验抽样方法[J]. 电光与控制, 2023, 30(3): 101-106.
 LUO G, ZHANG P, TANG P J, et al. Sampling of a Cer-

tain Accelerometer in Reliability Life Testing[J]. Electronics Optics & Control, 2023, 30(3): 101-106.

- [34] 段勇军. 液浮积分陀螺仪寿命试验系统[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 11-13.
 DUAN Y J. Life Testing System for the Liquid Integral Gyro[D]. Xi'an: Xidian University, 2008: 11-13.
- [35] MA H D, LI R, LUO K, et al. Research on Life Prediction Method for Gyroscope Based on PACE[C]// Proceedings of 2012 National Conference on Information Technology and Computer Science. France: Atlantis Press, 2012.
- [36] 李锴, 邢媛, 唐庆云, 等. 基于 Bayes 方法的激光陀螺 加速寿命试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试 验, 2019, 37(3): 8-14.
 LI K, XING Y, TANG Q Y, et al. Research on Accelerated Life Testing Method of Laser Gyro Based on Bayes Method[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2019, 37(3): 8-14.
- [37] PAN Y X, LI Q D, REN Z. Research on Prognostics of Dynamically Tuned Gyroscope Storage Life[C]// Proceedings of 2013 Chinese Intelligent Automation Conference. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013: 325-332.
- [38] 潘广泽,罗琴,李小兵,等. 基于 Wiener 过程的高精度 石英挠性加速度计贮存可靠性评估[J].环境技术, 2018, 36(S1): 5-8.
 PAN G Z, LUO Q, LI X B, et al. Storage Reliability Estimation of High Precision Quartz Flexible Accelerometer Based on Wiener Process[J]. Environmental Technology, 2018, 36(S1): 5-8.
- [39] 张阳, 杜剑. 石英加速度计贮存延寿试验薄弱环节的 辨识[J]. 空间电子技术, 2021, 18(1): 80-86.
 ZHANG Y, DU J. Identification for Weak Links on Storage Life of Quartz Accelerometer[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(1): 80-86.
- [40] 罗赓,穆希辉,牛跃听,等.加速度计步降应力加速寿 命试验优化设计[J]. 机械设计,2016,33(4):78-83.
 LUO G, MU X H, NIU Y T, et al. Accelerated Life Testing Optimal Design of Step-down-Stress Accelerometer[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(4): 78-83.
- [41] XU J X, WANG J Z, FAN Z F. Research on the Sample Size Calculation Method of the Inertial Gyro Based on the Step-Stress Accelerated Life-Test[C]// Proceedings of the 2016 4th International Conference on Mechanical Materials and Manufacturing Engineering. Wuhan: Atlantis Press, 2016.

- [42] 茆诗松. 加速寿命试验的加速模型[J]. 质量与可靠性, 2003(2): 15-17.
 MAO S S. Acceleration Model for Accelerated Life
- Test[J]. Quality and Reliability, 2003(2): 15-17.
 [43] 许丹, 廖寻, 陈云霞, 等. 加速度计贮存稳定期分析[J].
- 北京航空航天大学学报, 2013, 39(2): 173-177. XU D, LIAO X, CHEN Y X, et al. Analysis of Storage Stability of Accelerometers[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(2): 173-177.
- [44] 周源, 吕卫民, 孙媛. 基于逆 Gaussian 过程的 MEMS 加速度计寿命融合预测方法[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(6): 834-841.
 ZHOU Y, LYU W M, SUN Y. Fusion Prediction Method for the Life of MEMS Accelerometer Based on Inverse Gaussian Process[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(6): 834-841.
- [45] ZHANG Z X, ZHANG J X, DU D B, et al. A Lifetime Estimation Method for Multi-Component Degrading Systems with Deteriorating Spare Parts[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 238: 109427.
- [46] 钱峰,原清. 某飞行器惯性器件贮存可靠性评估和预 测方法研究[J]. 中国惯性技术学报, 1994, 2(3): 33-38. QIAN F, YUAN Q. The Research of the Storage Reliability Evaluation and Forecasting for Some Vehicle's Inertial Device[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1994, 2(3): 33-38.
- [47] 钱峰,田蔚风,金志华,等.惯性器件长期贮存性能可 靠性灰色马氏链预测[J].上海交通大学学报,2004, 38(10):1761-1763.
 QIAN F, TIAN W F, JIN Z H, et al. Grey Markov Chain Based Reliability Forecasting Approach for Inertial Device in Long-Term Storage[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2004, 38(10): 1761-1763.
- [48] 付红坡. 石英挠性加速度计参数稳定性分析与建模预测[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2020.
 FU H P. Parameter Stability Analysis and Modeling Prediction of QuartzFlexible Accelerometer[D]. Beijing: The First Academy of China Aerospace Science and Technology Corporation, 2020.
- [49] ÖNEN A S, GÜNHAN Y. Accelerated Aging Test for MEMS Inertial Measurement Units Using Temperature Cycling[C]// 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Monterey: IEEE, 2018: 546-551.