· 58 ·

DOI: 10. 13382/j. jemi. B1902844

基于 Copula 函数的光纤陀螺贮存可靠性评估*

袁莉芬 朋张胜 何怡刚

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009)

摘 要:针对光纤陀螺可靠性评估中需考虑多性能退化量间相关性的问题,提出一种基于 Copula 函数的光纤陀螺贮存可靠性 评估方法。首先,采用加速应力退化试验的方式获取光纤陀螺的性能退化数据,并利用 Wiener 过程对各性能退化数据进行建 模,得到它们的退化模型和寿命分布;然后,利用 Copula 函数融合各性能参数的寿命数据,得到可靠性指标;最后,结合光纤陀 螺性能退化数据对该方法进行了验证,贮存条件为 55 ℃,考虑各参数间相关性时,光纤陀螺贮存寿命为 38 795 h,而假定性能 参数相互独立时,光纤陀螺贮存寿命为 17 485 h。结果表明,考虑性能参数相关性时得到的可靠性指标更加合理,同时该方法 有效解决了产品多参数可靠性评估困难的问题,具有较好的实用性和推广性。

关键词:光纤陀螺;Wiener过程;Copula函数;贮存可靠性

中图分类号: TN253 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.3030

Evaluating storage reliability of FOG based on Copula function

Yuan Lifen Peng Zhangsheng He Yigang

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem of correlation among multiple degradation variables in the reliability evaluation of fiber optic gyro (FOG), a storage reliability evaluation method of fog based on Copula function is proposed. Firstly, the performance degradation data of fog is obtained by accelerated stress degradation test, and the Wiener process is used to model the performance degradation data, and their degradation model and life distribution are obtained. Then, the copula function is used to fuse the life data of each performance parameter to get the reliability index. Finally, the method is verified by combining the performance degradation data of fog. In ambient environment of 55 $^{\circ}$ C, the storage life of fog is 38 795 h when considering the correlation between parameters and 17 485 h and assuming the performance parameters are independent. The results show that the reliability index obtained by considering the correlation of performance parameters is more reasonable. At the same time, the method effectively solves the problem of multi parameter reliability evaluation of products, and has better practicability and popularization.

Keywords: fiber optic gyro (FOG); Wiener process; Copula functions; storage reliability

0 引 言

以萨格纳克效应(Sagnac effect)^[1]为基础的光纤陀 螺相较于传统机电陀螺而言无运动和磨损部件、体积小、 质量轻、精度范围广,使得其在惯性测量和制导领域应用 广泛^[2]。光纤陀螺作为惯性导航系统的关键惯性测量元 件,在航空航天、导弹武器系统的应用中显得尤为重要, 这也决定了其可靠性及贮存寿命指标的重要性^[3]。而光 纤陀螺是高可靠性、长寿命产品,采用传统的基于失效寿 命的可靠性评估方法难以得到精确可靠的结果^[4]。通过 对产品失效机理的深入研究,结果表明产品的性能退化 数据中蕴含丰富的产品寿命信息^[56],这为光纤陀螺的可 靠性评估提供了新思路。

收稿日期:2019-12-19 Received Date: 2019-12-19

^{*}基金项目:国家自然科学基金(51977153,51577046)、国家自然科学基金重点项目(51637004)、国家重点研发计划"重大科学仪器设备开发" 项目(2016YFF0102200)、装备预先研究重点项目(41402040301)资助

针对基于性能退化数据的光纤陀螺可靠性评估,相 关学者已经做了一些研究。文献[7]采用正态-泊松过程 对卫星用光纤陀螺的退化过程进行建模分析;文献[8] 在考虑个体差异性的基础上对光纤陀螺进行退化建模。 但上述文献中都仅基于光纤陀螺单一性能退化量进行可 靠性评估,而对于光纤陀螺这种具有多个性能特征量的 产品,仅考虑单一性能参数,必然造成相关可靠性信息的 丢失,降低可靠性评估精度。晁代宏等^[9]采用协方差矩 阵量化分析了光纤陀螺多元性能退化量间的相关性并假 定光纤陀螺各性能退化量均服从正态分布,通过建立多 元正态分布模型利用联合概率密度来估计光纤陀螺的可 靠度:然而协方差是一个有量纲的量,其值会受到两个随 机变量所取单位大小的影响,并且假定边缘分布均符合 正态分布具有很大的局限性,易与实际情况不符,造成评 估结果的偏差,实际情况中大多数情况下很难得到多性 能参数的联合概率密度函数。

针对上述问题,本文从多性能参数层面考虑,在分析 光纤陀螺性能退化特性的基础上,以Wiener过程建立了 光纤陀螺各性能退化模型,同时为充分利用退化试验数 据中的寿命信息量,正确描述各性能退化过程间的相关 性,引入Copula 函数融合由不同性能退化参数得到的可 靠度函数,并最终得到多元性能退化量下的光纤陀螺可 靠度评估模型,进而实现对光纤陀螺贮存可靠性的评估。

1 光纤陀螺的性能退化分析

作为光电一体的精密器件,光纤陀螺内部的光学器 件和电子器件在长期的环境应力作用下会出现累积性损 伤,进而导致光纤陀螺相关性能指标的下降甚至失效。 本文选取零偏和标度因数研究光纤陀螺的性能退化趋 势,以完成光纤陀螺的可靠性评估。

1.1 光纤陀螺零偏退化特性分析

零偏是指光纤陀螺在没有角度输入的情况下,其测 量输出不为0,影响光纤陀螺零偏的关键因素有白噪声、 散粒噪声、光源相对强度噪声、量化噪声、电噪声、热相位 噪声、偏振误差、非线性克尔效应误差、背向反射引起的 误差、电路解调漂移等。随着贮存时间的增长、光源及光 传输通道的劣化、电子元器件性能的退化等,均会造成零 偏出现一定程度的退化。

1.2 光纤陀螺标度因数退化特性分析

标度因数是指光纤陀螺输出的变化与输入的变化的 比值,其与光电器件参数的关系较为简单,标度因数 *K* 具 体为:

$$K = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \frac{2^{N}}{V_{op}K_{fo}}$$
(1)

式中:λ 为光信号波长; L 为光纤敏感环长度; D 为光纤

环有效直径; V_{pp} 为阶梯波的峰峰值电压; K_{fp} 为 Y 波导的 电压调制系数。其中, $V_{pp}K_{fp} = 2\pi$, 光纤陀螺中通过第 2 闭环控制来保证电压的准确性。因此, 光纤陀螺中影响 标度因数的主要因素有光信号平均波长、光纤敏感环长 度和光纤环有效直径的变化等。

2 基于 Wiener 过程的光纤陀螺单个性能退 化量建模

光纤陀螺的性能退化主要受环境应力、内部材料等 因素的影响,其损伤累积、性能退化表现为随机特性。此 外,从光纤陀螺实际试验退化数据可以看出,其主要性能 退化过程在短时间内具有增大或减小的趋势^[10],因此, 具有随机、非单调独立增量的 Wiener 过程可用于对光纤 陀螺各性能进行退化建模,且各性能退化量模型 X_i(t) 表示如下:

 $X_i(t) = \mu_i t + \sigma_i B(t)$ (2) 式中: $X_i(t)$ 代表光纤陀螺在时刻 t 的性能退化量, μ_i 表 示第 i 个性能参数退化量的漂移系数, 描述了光纤陀螺 性能退化量的退化速率; σ_i 分别表示第 i 个性能参数退 化量的扩散系数, 表征了试验过程中随机因素对光纤陀 螺性能的影响; B(t) 为标准 Wiener 过程, 即 $B(t) \sim N(0,t)$ 。

根据 Wiener 过程的定义^[11-12],式(2)所示的退化过程 $X_i(t)$ 具有以下基本性质。

1) $X_i(0) = 0$,并且 $X_i(t)$ 在 t = 0 处连续。

2) $X_i(t)$, $t \ge 0$ 具有平稳独立增量特性,即在任意不 相交的两个时间间隔 $[t_1, t_2]$ 和 $[t_3, t_4]$ 内 $X_i(t_4) - X_i(t_3)$ 和 $X_i(t_2) - X_i(t_1)$ 相互独立。

3) 退化增量 $\Delta X_i(t)$ 服从正态分布,即 $\Delta X_i(t) = X_i(t + \Delta t) - X_i(t) \sim N(\mu_i \Delta t, \sigma_i^2 \Delta t)$,则其对应的概率 密度函数如下:

$$f(\Delta X_i(t)) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{\Delta t}} \Phi\left(\frac{\Delta X_i(t) - \mu_i \Delta t}{\sigma_i \sqrt{\Delta t}}\right)$$
(3)

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数形式。

定义光纤陀螺失效阈值为 w_i ,则基于Wiener退化过程的光纤陀螺的寿命 T_i 可定义为:

 $T_i = \inf\{t \mid X_i(t) \ge w_i\}$ (4)

对应的概率密度函数和累积分布函数分别为:

$$f_i(t) = \frac{w_i}{\sigma_i \sqrt{2\pi t^3}} \Phi\left(-\frac{(w_i - \mu_i t)^2}{2\sigma_i^2 t}\right)$$
(5)

$$F_{i}(t) = \Phi\left(\frac{-w_{i} + \mu_{i}t}{\sigma_{i}\sqrt{t}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu_{i}w_{i}}{\sigma_{i}^{2}}\right)\Phi\left(-\frac{w_{i} + \mu_{i}t}{\sigma_{i}\sqrt{t}}\right)$$
(6)

则光纤陀螺单个性能参数对应的可靠度可表示为:

3 多元性能退化数据融合

3.1 基于 Copula 函数的光纤陀螺多性能退化量建模

Copula 函数是一种有效的多变量分析方法,主要 有如下优点:边缘分布可以服从相同分布或者不同分 布;Copula 函数构造的模型几乎含有所有线性与非线 性相关性信息,更加符合实际情况;建模步骤简单,使 用灵活。常见的几种 Archimedean Copula 函数如表 1 所示,这几种 Copula 函数可以较好的对二元相关性进 行建模^[13-14]。

表 1 常见 Archimedean Copula 函数和参数取值范围 Table 1 Common Archimedean Copula functions

and parameter value ranges

类别	$C(u,v;\alpha)$	α	
Frank Copula	$-\frac{1}{\alpha}\ln(1+\frac{(e^{-\alpha u}+1)(e^{-\alpha v}-1)}{(e^{-\alpha}-1)})$	$\alpha \in (-\infty,\infty) \setminus \{0\}$	
Gumbel Copula	$\exp\{-((-\ln u)^{\alpha} + (-\ln v)^{\alpha})^{1/\alpha}\}$	$\alpha \in [1,\infty)$	
Clayton Copula	$\max((u^{-\alpha} + v^{-\alpha} - 1)^{1/\alpha}, 0)$	$\alpha \in (0, \infty)$	

光纤陀螺的零偏和标度因数有效表征了光纤陀螺及 其关键器件的性能退化特征,在*t*时刻,两性能的退化轨 迹分别为 $X_1(t)$ 、 $X_2(t)$,相应的退化失效阈值分别为 w_1 、 w_2 ,则光纤陀螺的寿命为 $T = \min(T_1, T_2)$,因此光纤陀 螺的可靠度R(t)可表示为:

 $R(t) = P(\min(T_1, T_2) > t) = P(T_1 > t, T_2 > t) =$ $P(X_1(t) < w_1, X_2(t) < w_2)$ (8) 式中: P 表示联合分布函数。如果两个性能参数相互独 立,则产品的可靠度函数为:

$$R(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \tag{9}$$

由实际情况可知,光纤陀螺的性能参数零偏和标度 因数在性能退化过程中存在一定的相关性,并且不是单 纯的线性相关关系。因此,结合式(8),基于 Copula 函数 理论,存在唯一的 Copula 函数 $C(\cdot)$,使光纤陀螺的可靠 度满足式(10)。

$$\begin{split} R(t) &= P(X_1(t) < w_1, X_2(t) < w_2) = C(R_1(t), \\ R_2(t); \alpha) \end{split}$$

式中: α 为 Copula 函数的参数。

3.2 参数估计

结合式(7)、(10)可知,可靠度模型参数包括 θ_1 =

 $(\mu_1,\sigma_1), \theta_2 = (\mu_2,\sigma_2), \alpha$,可以看出,模型中的待估参数 较多,直接采用极大似然估计的方法求解难度较大,并且 估计精度不高。由于 Copula 函数可以有效的分离随机 变量的边缘分布和联合分布,这为我们采用两步参数估 计法对多元性能退化量的可靠性模型进行参数估计提供 了可能性,有效降低了参数估计复杂度,参数估计具体流 程如图 1 所示。首先,结合性能退化数据,采用 Bayes Bootstrap 参数估计^[15-17]的方法得到边缘分布的参数估计 值 $\hat{\theta}_1 = (\hat{\mu}_1, \hat{\sigma}_1), \hat{\theta}_2 = (\hat{\mu}_2, \hat{\sigma}_2), 然后基于边缘分布函数参$ $数的估计值,通过使用极大似然估计法获得未知参数 <math>\alpha$

的估计值 α_{\circ}



Fig. 1 Description of the two-stage estimation method

3.3 Copula 函数选择

为了选择出对原始数据具有最佳拟合效果的 Copula 函数模型,本文基于平方欧氏距离进行了拟合优度检验。 平方欧氏距离越小则表示其对应的 Copula 函数对原始 数据的拟合效果越佳。

定义:设 (x_i, y_i) (i = 1, 2, ..., n) 为取自二维总体 (X, Y) 的样本,记 X, Y 的经验分布函数分别为 H(x) 和 G(y),转化为均匀分布 u, v 后,其样本的经验 Copula 函 数定义为^[18]式(11)。

$$\hat{C}(u,v) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} I[H(x_i) \leq u] \cdot I[G(y_i) \leq v]$$
(11)

式中: $I(\cdot)$ 为示性函数; $u, v \in [0,1]$; 当 $H(x_i) \le u$ 时, $\sum_{i=1}^{n} I[H(x_i) \le u] = 1$, 否则 $\sum_{i=1}^{n} I[H(x_i) \le u] = 0$ 。如果 Copula 联合分布函数值用 $C(u_i, v_i)$ 表示,则平方欧氏距 离可定义为:

$$d^{2} = \sum_{i=1}^{n} |\hat{C}(u_{i}, v_{i}) - C(u_{i}, v_{i})|^{2}$$
(12)

4 试验结果及分析

4.1 光纤陀螺贮存退化试验

光纤陀螺内部的主要薄弱环节^[19](超辐射发光 二极管(SLD)、集成光学调制器和光纤环)的性能退 化影响了光纤陀螺整体性能退化的趋势,而温度应力 是影响这些薄弱环节的一个重要因素^[20-21],因此,对 某惯性平台中光纤陀螺进行基于恒定温度应力的贮 存试验。试验时控制光纤陀螺的温度应力为55℃, 试验选取3个某惯性平台中装备的光纤陀螺,试验过 程中共测试记录25次光纤陀螺各个样本的零偏和标 度因数的性能退化数据,记录时间间隔为168h,试验 总时间为4032h,未出现失效。结束试验后,完成对 现有测试数据的处理,并获得光纤陀螺各性能参数随 时间变化的曲线,如图2所示。







4.2 参数估计

1)采用 Bayes Bootstrap 参数估计法估计边缘分布 函数的参数。由于试验样本为3只光纤陀螺,每只光 纤陀螺的单性能参数退化数据增量均只有 24 个数 据,因此,退化模型中的参数估计属于小子样情况下 的估计问题,采用经典统计方法(均值、方差未知正态 总体参数估计)得到的结果一般可信度较低,因而文 中针对小样本参数估计问题采用 Bayes Bootstrap 参数 估计的方法进行边缘分布函数的参数估计。试验样 本中3只光纤陀螺属于同一批次产品,且是对该批光 纤陀螺整体进行可靠性评估,因此可以认为其漂移和 扩散系数均相同,则可以将3只陀螺仪单性能退化增 量共72个数据形成一个样本,认为其服从正态分布 $N(\mu_i \Delta t, \sigma_i^2 \Delta t)$, 然后分别采用经典统计方法和 Bayes Bootstrap方法进行参数估计。采用经典统计法和 Bayes Bootstrap 方法进行参数估计的结果对比如表 2 所示。由表2可知,在模型各参数估计值接近的情况 下,采用 Bayes Bootstrap 方法相较于采用经典统计法 而言大大缩短了置信区间估计,有效提高了模型评估 精度。

表 2 评估结果比较表 Table 2 Comparison of evaluation results

		1	
方法	模型参数	估计值	95%置信区间
	μ_1	2. 383×10^{-6}	(-2.1977×10 ⁻⁶ ,4.5312×10 ⁻⁶)
经典统	σ_1	2. 481×10^{-4}	(-1.470 8×10 ⁻⁴ ,4.345 4×10 ⁻⁴)
计法	μ_2	1.376×10^{-4}	(-2.470 8×10 ⁻⁴ , 3.445 4×10 ⁻⁴)
	σ_2	1.223 6×10^{-2}	$(1.065 \ 3 \times 10^{-2}, 1.602 \ 5 \times 10^{-2})$
	μ_1	2. 381×10^{-6}	$(1.5469 \times 10^{-6}, 3.5563 \times 10^{-6})$
Bootstrap	σ_1	2. 486×10^{-4}	(2.321 9×10 ⁻⁴ , 2.689 0×10 ⁻⁴)
方法	μ_2	1.381×10^{-4}	(1.031×10 ⁻⁴ ,1.642×10 ⁻⁴)
	σ_2	1.203 6×10^{-2}	(1.184×10 ⁻² ,1.225 9×10 ⁻²)

2)根据已求得的边缘分布函数参数估计结果,应用 极大似然估计法估计各 Archimedean Copula 函数相应的 参数 α,参数估计结果如表 3 所示。

表 3 Copula 函数参数估计结果

Table 3 Parameter estimation results of Copula function

Copula 函数	参数	2.5%	估计值	97.5%
Gumbel	α_G	5.3945	6.3649	7.335 5
Clayton	α_{C}	10.715 8	13.623 1	16.5303
Frank	α_F	23.707 1	28.964 0	34.228 8

3)进行秩相关系数的参数估计。Kendall 秩相关系 数和 Spearman 秩相关系数均衡量了随机变量间变化趋 势的一致性程度,在上述模型参数估计结果的基础上,进 一步计算各 Archimedean Copula 函数以及原始数据的秩 相关系数,计算结果如表 4 所示。

表 4 Copula 模型与原始数据秩相关系数的对比

Table 4 Comparison of rank correlation coefficient

between Copula model and original data

Copula 函数	Kendall 秩相关系数	Spearman 秩相关系数
Gumbel	0.8429	0.963 9
Clayton	0.8697	0.978 8
Frank	0.872 0	0.975 1
原始数据	0.8816	0.972 0

4.3 退化模型检验

首先验证 Wiener 过程对光纤陀螺各性能退化量建 模的有效性。根据 Wiener 过程的性质,性能退化增量 $\Delta X 应满足 \Delta X = X(t + \Delta t) - X(t) ~ N(\mu \Delta t, \sigma^2 \Delta t),则可$ 利用正态概率分布图验证光纤陀螺性能退化模型的有效 性,若性能退化增量数据服从正态分布,则曲线应近似为 一条直线。试验所选 3 只光纤陀螺的性能退化增量正态 分布概率如图 3 所示,可以看出 Wiener 过程可用于对光 纤陀螺零偏和标度因数进行退化建模。此外,利用定量 方法 Lilliefors 检验法进行检验,其结果为 0,同样验证了 Wiener 过程进行退化建模的有效性。



然后进行退化模型拟合优度的检验。为了验证模型的拟合优度,将上述模型估计的光纤陀螺性能退化量均值轨迹与样本退化量均值轨迹进行比较,比较结果如图4所示。可以看出,模型预测均值与样本均值之间的差异较小,此外,通过计算可得零偏和标度因数的模型预测均值与样本均值间的均方误差分别为6.02×10⁻⁴和1.1611×10⁻⁷,以上均说明基于Wiener过程的性能退化建模与数据拟合较好。



4.4 Copula 函数选择

通过样条插值法求得经验分布函数在原始样本 点处的函数值 $\hat{C}(u_i, v_i)$,然后分别计算出在原始样 本点处 Gumbel Copula 函数、Clayton Copula 函数和 Frank Copula 函数的函数值。在此基础上,3种类型 的 Copula 函数与经验 Copula 函数之间的平方欧氏 距离可分别由式(12)计算获得,计算结果如表 5 所示。

	and empirical distribution function
Fable 5	Euclidean distance between Copula function
表 5	Copula 函数与经验分布函数的欧氏距离

类型	Gumbel	Clayton	Frank
距离 d ²	0.088 5	0.094 0	0.074 0

从表 5 可以看出,与其他两类 Copula 函数相比, Frank Copula 函数与经验 Copula 分布函数的平方欧式距 离最小,因此认为 Frank Copula 函数可以更好的拟合原 始数据。

此外,从表4可以看出,3种 Copula 函数中 Frank Copula 函数的 Kendall 秩相关系数和 Spearman 秩相关系 数最接近原始数据的秩相关系数,这也说明 Frank Copula 函数能更好地反映光纤陀螺零偏和标度因数性能退化量 之间的秩相关性。

4.5 可靠性评估结果

结合试验中光纤陀螺的具体应用条件,确定其性能参数失效阈值为零偏≥0.1°/h,标度因数≥5× 10⁻⁴。将模型参数的估计值和两个性能参数的失效 阈值代入式(7)、(9)和(10),则可得到光纤陀螺基 于单性能参数零偏和标度因数的可靠度曲线以及不 考虑参数相关性和考虑参数相关性时的可靠度曲线, 如图5所示。



由图 5 可知,在贮存条件为 55 ℃时,如果考虑性 能参数相关性,则在贮存 2 年后光纤陀螺的可靠度为 0.956,而假定性能参数相互独立时,在贮存 2 年后光 纤陀螺的可靠度为 0.869。此外,根据产品寿命计算 公式 $MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt$,考虑参数相关性时,光纤陀 螺在 55 ℃贮存下的寿命为 38 795 h,不考虑参数相 关性时,贮存寿命为 17 485 h。结合文献[3]的相关 研究结论,在光纤陀螺温度应力加速方程为 Arrhenius 模型且激活能取 0.402 2 eV 时,可以计算出 55 ℃温 度应力相对于 25 ℃温度应力的加速系数为 4.19,则 可得考虑参数相关性时光纤陀螺在 25 ℃时的贮存寿 命约为 1.626×10⁵ h,不考虑参数相关性时在 25 ℃时 的贮存寿命约为 7.326 2×10⁴ h。另外,根据光纤陀 螺可靠性预计结果(国军标),其平均无故障间隔时 间(MTBF)大都为 10⁵ h 以上,这与不考虑参数相关 性时得到的平均寿命存在一个数量级的误差,由此可 以看出当不考虑参数相关性时,会导致过低的估计光 纤陀螺的可靠度。

从图 5 可以看出,基于本文所提方法得到的光 纤陀螺可靠度评估结果要低于基于单参数退化模型 的可靠度评估结果,这表明基于多元性能退化量并 考虑其相关性时的可靠度评估结果比基于单退化变 量下的评估结果更为保守。考虑到实际工程应用 中,光纤陀螺作为惯性平台中的关键传感器,在航空 航天、导弹武器系统中有着至关重要的作用,其失效 会导致严重的后果,因而为了保证光纤陀螺及时有 效的维护,保守可靠的评估结果与实际应用情况更 为吻合。因此,也证实了本文方法的有效性和合 理性。

5 结 论

本文提出了一种基于 Copula 函数的光纤陀螺多 元性能退化量贮存可靠性评估方法;针对多性能参数 下的光纤陀螺可靠性分析中模型复杂问题,将 Copula 函数理论引入到基于 Wiener 过程随机建模的可靠性 评估中,并结合光纤陀螺具体试验数据,给出了多性 能参数独立和相关性下的可靠性评估结果。结果表 明,对于光纤陀螺这种具有多性能参数的高可靠性产 品,若简单的将多参数间的关系按相互独立来处理, 则不符合实际情况,造成严重低估产品的可靠性;本 文提出的方法,科学利用了光纤陀螺多性能参数退化 数据,避免了丢失有效寿命信息,评估结果更符合 实际。

参考文献

[1] 王丽琴. 光纤陀螺仪及其应用[J]. 自动化与仪器仪 表,2013(5):132-133,135.

WANG L Q. Fiber optic gyroscope and its application [J]. Automation & Instrumentation, 2013(5):132-133,135.

 [2] 郑辛,吴衍记,于怀勇.光子晶体光纤在光纤陀螺中的 应用现状及其关键技术[J].导航定位与授时,2017, 4(6):1-8.

ZHENG X, WU Y J, YU H Y. Key technology &

application status of the photonic crystal fiber used in fiber optic gyroscope [J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(6): 1-8.

 [3] 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.

 [4] 佐磊,孙洪凯,何怡刚,等. 无失效数据的 MEMS 传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报,2019, 33(6):69-75.

> ZUO L, SUN H K, HE Y G, et al. Reliability analysis of MEMS sensors with zero-failure data [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6):69-75.

[5] 尹继东. 基于性能退化数据的产品竞争失效可靠 性评估方法及理论研究[D]. 成都:西南交通大 学,2018.

> YI J D. Study on reliability evaluation method and theory of product competitive failure based on performance degradation data [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[6] 钟强晖,张志华,梁胜杰.基于多元退化数据的可靠性 分析方法[J].系统工程理论与实践,2011,31(3): 544-551.

> ZHONG Q H, ZHANG ZH H, LIANG SH J. Reliability analysis approach based on multivariate degradation data[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2011,31(3):544-551.

[7] 晁代宏,马静,陈淑英,等.基于性能退化的卫星用光
 纤陀螺可靠性评估[J].红外与激光工程,2011,40(9):1763-1767.

CHAO D H, MA J, CHEN SH Y, et al. Reliability assessment of FOGs used for satellite from degradation data[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011,40(9): 1763-1767.

[8] 唐圣金,郭晓松,司小胜,等.基于维纳过程的卫星用 光纤陀螺剩余寿命预测[J].红外与激光工程,2013, 42(12):3347-3352.

TAGN SH J, GUO X S, SI X SH, et al. Remaining useful life prediction of FOGs used for satellite based on Wiener process [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013,42(12):3347-3352.

[9] 晁代宏,马静,陈淑英.应用多元性能退化量评估光纤 陀螺贮存可靠性[J].光学精密工程,2011,19(1): 35-40. CHAO D H, MA J, CHEN SH Y. Assessment of storage reliability for FOGs by multivariate degradation data [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 11(1):35-40.

- [10] 袁慧铮,陈林华,陆俊清,等. 光纤陀螺加速退化试验 方法研究[J].导航定位与授时,2015,2(5):63-69.
 YUAN H ZH, CHEN L H, LU J Q, et al. Research on accelerated degradation method for fiber optic gyro[J].
 Navigation Positioning and Timing,2015,2(5):63-69.
- [11] 王书锋,王友仁,姜媛媛. Wiener 过程性能退化电子产品的剩余寿命预测方法[J].电子测量技术,2014, 37(5):17-20,41.
 WANG SH F, WANG Y R, JIANG Y Y. Residual life prediction method of electronic products with Wiener process degradation [J]. Electronic Measurement Technology,2014,37(5):17-20,41.
- [12] 杜党波,司小胜,胡昌华,等. 基于随机退化建模的共载系统寿命预测方法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(8):53-62.
 DU D B,SI X SH,HU CH H, et al. Lifetime prognostic for load-sharing system based on stochastic degradation model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(8):53-62.
- [13] 肖青,周少武. 基于阿基米德 Copula 和拉丁超立方采 样的概率最优潮流计算[J]. 电力自动化设备,2019, 39(11):174-180.
 XIAO Q, ZHOU SH W. Probabilistic optimal flow computation based on Archimedean Copula and Latin hypercube sampling. [J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(11):174-180.
- [14] 刘晓娟,王华伟,徐璇.考虑多退化失效和突发失效之 间竞争失效的可靠性评估方法[J].中国机械工程, 2017,28(1):7-12.
 LIU X J, WANG H W, XU X. Reliability assessment based on competition failure considering multidegradation and catastrophic failure [J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(1):7-12.
- [15] 钱萍,陈文华,李星君,等.产品可靠性的 Bootstrap 回 归统计分析方法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(11): 2549-2554.
 QIAN P, CHEN W H, LI X J, et al. Bootstrap

regression statistical analysis method for product reliability [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010,31(11):2549-2554.

[16] 孙慧玲,胡伟文.小样本条件下参数估计方法比较研究[J].统计与决策,2014(24):4-6.
 SUN H L, HU W W. A comparative study of parameter estimation methods under the condition of small

samples [J]. Statistics & Decision, 2014(24):4-6.

[17] 黄乐,黄兴,梁小凤,等. 基于 Bootstrap 方法的密封 寿命可靠性评估[J]. 润滑与密封,2020,45(3): 132-135.

> HUANG Y, HUANG X, LIANG X F, et al. Reliability assessment of seal life based on bootstrap method [J]. Lubrication Engineering, 2020,45(3):132-135.

[18] 李霞. Archimedean copula 函数模型选择方法的改进[J]. 统计与决策, 2014(13):19-22.

LI X. Improvement of model selection method for Archimedean copula function [J]. Statistics & Decision, 2014(13):19-22.

[19] 林湘云,高军,文武,等.光纤陀螺可靠性工程中 FMEA和FTA应用研究[J].电子测试,2017(12): 8-10.

LIN X Y, GAO J, WEN W, et al. Applied-study of FMEA and FTA in reliability engineering of fiber optic gyros[J]. Electronic Test, 2017(12):8-10.

[20] 姜梦茹,李彦,侯智懿,等.光纤环温度特性对光纤陀 螺零偏稳定性的影响[J].激光杂志,2018,39(11): 39-42.

JIANG M R, LI Y, HOU ZH Y, et al. Influence of temperature characteristics of fiber coil bias stability of FOG[J]. Laser journal, 2018, 39(11): 39-42.

[21] 张婷,薛晨阳,郑永秋,等.谐振式光纤陀螺的温度特性[J].微纳电子技术,2016,53(12):816-821,827.
ZHANG T, XUE CH Y, ZHENG Y Q, et al. Temperature characteristics of a resonator Fiber Optic Gyroscope[J]. Micronanoelectronic Technology, 2016, 53(12):816-821,827.

作者简介



袁莉芬(通信作者),2011年于湖南大 学获得博士学位,现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为射频识别技术,智能电网技 术,测试与故障诊断。

E-mail:yuanlifen_hfut@163.com

Yuan Lifen (Corresponding author) received her Ph. D. degree from Hunan University of Technology in 2011. Now she is a professor at Hefei University of Technology. Her main research interests include RFID technology, smart grid technology and Circuit testing technology.



朋张胜,2017年于安徽理工大学获得 学士学位,现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新型电子元器件的可靠性。 E-mail:542753018@qq.com

Peng Zhangsheng received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and

Technology in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include reliability of new electronic components.



何怡刚,1996年于西安交通大学获得 博士学位,现为合肥工业大学教授,主要研 究方向为混合信号电路与系统测试与诊断、 电子设备可靠性等。

E-mail:18655136887@163.com

He Yigang received his Ph. D. degree

from Xi'an Jiaotong University in 1996. Now he is a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include hybrid signal circuit and system testing and diagnosis, reliability of electronic equipment.