

文章编号 1004-924X(2011)01-0035-06

应用多元性能退化量评估光纤陀螺贮存的可靠性

晁代宏, 马 静, 陈淑英

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:采用基于多元性能退化量的评估方法研究了光纤陀螺贮存可靠性。首先,采用协方差矩阵分析了量化多元性能退化量的相关性并利用联合概率密度函数表征产品失效概率密度,由此给出了基于多元性能退化量的产品可靠性评估的一般方法。接着,在对光纤陀螺进行特性分析的基础上选取零偏、零偏稳定性和标度因数作为性能退化参数,开展贮存试验并获取在一定贮存条件下的性能退化数据。最后,采用基于多元性能退化量的可靠性评估方法对光纤陀螺进行可靠性评估,得到了光纤陀螺贮存可靠性指标。贮存条件为 60 ℃,考虑性能退化参数相关性时,光纤陀螺贮存寿命为 32 800 h;假设性能退化参数间相互独立时,贮存寿命为 13 200 h。结果表明,当产品具有多个性能退化参量时,基于多元性能退化量的评估方法得到的可靠性指标更加合理。

关键词:光纤陀螺;贮存可靠性;多元性能退化量;协方差矩阵;联合概率密度

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111901.0035

Assessment of storage reliability for FOGs by multivariate degradation data

CHAO Dai-hong, MA Jing, CHEN Shu-ying

(*School of Instrument Science & Opto-electronics Engineering,*
Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Storage reliability of Fiber Optical Gyroscopes(FOGs) was studied based on a multivariate degradation data method. Firstly, the dependence of multivariate performance degradation data was analyzed by means of the covariance matrix and the failure probability of products was characterized by a joint probability density function. From that, an universal method to evaluate product reliability via multivariate degradation data was achieved. Based on the characteristics of FOGs, the bias, bias stability and factor change were selected as degradation parameters, and a related storage test was carried out to obtain the performance degradation data. The storage reliability of FOGs was assessed by multivariate degradation data. Obtained results show that, in ambient environment of 60 ℃, the storage life is about 32 800 h and 13 200 h as considering the dependence and independence of FOGs' multivariate degradation data, respectively. These data demonstrate that the reliability evaluating method from multivariate degradation data is more reasonable, and it can be extended to other product assessments with multivariate degradation parameters.

收稿日期:2010-04-12;修订日期:2010-07-14.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. 513090601)

Key words: fiber-optic gyroscope; storage reliability; multivariate performance degradation data; covariance matrix; joint probability density

1 引言

为了克服基于失效数据的传统可靠性评估方法难以有效评估寿命试验过程中长寿命产品可靠性的缺陷,人们正在尝试新的可靠性分析方法。由于大多数情况下产品失效机理都可以追溯其潜在的性能退化过程,因此,产品性能退化数据中包含大量有用的与产品寿命有关的信息,充分挖掘这些信息,有助于产品可靠性状况的有效评估。

针对基于性能退化数据的可靠性评估方法,国内外学者已经做了一些研究工作^[1-2]。Huang^[3]给出了一个退化数据的统计分析模型,并利用该模型对金属表面焊接点的热疲劳情况进行了研究;Crk^[4]利用性能退化模型,采用仿真方法研究了一种电子接口模块的性能变化情况;赵建印^[5]基于容值退化数据评估了神光 III 中的关键元件金属化膜电容器的可靠性指标。上述研究都局限于产品单个性能退化参数的范畴,事实上,更普遍的情形是产品存在多个失效机理,即有多个性能参数同时退化,因此在评估产品可靠性时考虑多个性能参数退化更符合工程实际。Di^[6]和 Peng^[7]对基于多元性能退化量的可靠性评估方法进行了研究,但研究中如退化量间独立性假设等手段虽然简化了问题,但不符合普遍规律。要得到符合工程实际的结果,必须研究产品多个退化量一般模型的建模及评估方法。

“全固态”干涉型光纤陀螺(简称光纤陀螺)是集光、机、电于一体的多元技术产品^[8-10],可靠性高、寿命长、体积小、重量轻,已应用于海陆空天潜等军事、民用领域^[11-12]。经过 20 多年的技术积累,国内光纤陀螺研制水平得到了很大提升,目前,中低精度光纤陀螺已经实现了工程化,具备了批量生产能力,为下一步大规模战略装备打下了基础,目前部分装备已经定型进入批量生产阶段。为适应现代战争的突发性特征,现代武器系统,诸如导弹等皆需具有长期隐蔽待命、快速发射并高精度命中目标的能力,这类“长期贮存,一次使用”的军事应用需求决定了光纤陀螺的贮存寿命指标越来越受用户关注,而有关光纤陀螺贮存寿命方

面的研究在国内尚属空白,亟需开展相关的研究工作。由于光纤陀螺寿命长,不容易获取寿命数据,且具有多个性能退化参数,因而有必要采用基于多元性能退化参数的可靠性评估方法对其可靠性进行评估^[13]。本文首先研究产品多元性能退化量的一般建模及评估方法,并基于所得模型对光纤陀螺的贮存可靠性进行了评估。

2 多元性能退化量的一般模型

下面研究基于多元性能退化量的产品可靠性评估的一般方法。首先提出模型的假设:

假设 1 产品的性能退化是可以累积的;

假设 2 对所有样本,各个退化量的测量时点相同,即所有退化量都在同一时刻测量且测量次数相同;

假设 3 各退化量的均值和方差是时变函数,退化量间的协方差同样是时变函数。

假设试验中随机抽取的产品数量为 m 个,每间隔 Δt 时间对 q 个性能参数进行一次测试,共测试 n 次,于是产品性能退化数据为一个包含 $m \times q \times n$ 个元素的 3 维向量 \mathbf{P} ,向量 \mathbf{P} 中的元素 $P[i][j][k]$ 表示第 i 个产品第 j 个性能退化参数的第 k 次测量结果,则产品可靠度的一般表达式为

$$R(t) = P_r\{P_1(t) \leq c_1, P_2(t) \leq c_2, \dots, P_q(t) \leq c_q\} = \int \dots \int f(p_1(t), p_2(t), \dots, p_q(t)) dp_1 dp_2 \dots dp_q = \int_{\hat{c}_q} \dots \int_{\hat{c}_2 \hat{c}_1} f(p_1(t), p_2(t), \dots, p_q(t)) dp_1 dp_2 \dots dp_q, \quad (1)$$

式中,函数 $f(p_1(t), p_2(t), \dots, p_q(t))$ 表示第 t 次测量时点 q 个性能参数退化量的联合概率密度函数; \hat{c}_i 表示退化量 $P_i(t)$ 的有效取值范围,标量 c_i 表示退化量 $P_i(t)$ 的失效阈值。

由式(1)可知,基于多元性能退化量可靠性评估的核心问题是联合概率密度函数 $f(p_1(t), p_2(t), \dots, p_q(t))$ 的求解问题,一旦利用性能退化数据评估出联合概率密度函数 f ,即可由式(1)方便求出产品的可靠度。

下面分析如何求解联合概率密度函数 f 。首

先研究一种特殊情形,即如果这些性能参数在统计学上是相互独立的,则由统计学的相关理论可知 $f(p_1(t), p_2(t), \dots, p_q(t))$ 等于各参数的概率密度函数之积,即等效于串联系统,此时式(1)将形如式(2):

$$R(t) = P_r\{P_1(t) \leq c_1, P_2(t) \leq c_2, \dots, P_q(t) \leq c_q\} = \int_{c_q} \dots \int_{c_2} \int_{c_1} f(p_1(t), p_2(t), \dots, p_q(t)) dp_1 dp_2 \dots dp_q = \int_{c_1} f(p_1(t)) dp_1 \int_{c_2} f(p_2(t)) dp_2 \dots \int_{c_q} f(p_q(t)) dp_q = \prod_{i=1}^q R_i(t). \quad (2)$$

更一般的情形是这些性能参数相关,此时求

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \text{Var}(p_1(t)) & \text{Cov}(p_1(t), p_2(t)) & \dots & \text{Cov}(p_1(t), p_q(t)) \\ \text{Cov}(p_2(t), p_1(t)) & \text{Var}(p_2(t)) & \dots & \text{Cov}(p_2(t), p_q(t)) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(p_q(t), p_1(t)) & \text{Cov}(p_q(t), p_2(t)) & \dots & \text{Var}(p_q(t)) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

3 光纤陀螺可靠性模型及参数估计方法

3.1 光纤陀螺性能退化参数及失效判据

光纤陀螺中各个器件性能的变化最终会影响到陀螺的输出,陀螺长期贮存状态下性能的变化是陀螺中各个器件性能变化的集中体现。陀螺的关键性能参数包括零偏、零漂和标度因数,本文选择上述3个参数作为光纤陀螺性能退化的特征量进行了测量。试验中选择的样品为某型号弹用中精度光纤陀螺,结合其使用背景要求,确定光纤陀螺上述3个性能参数的失效判据为:零偏变化量 $\geq 1(^{\circ})/\text{h}$;零偏稳定性 $\geq 0.4(^{\circ})/\text{h}$;标度因数变化量 $\geq 5 \times 10^{-4}$ 。

3.2 光纤陀螺可靠性模型及参数估计方法

本文结合光纤陀螺各性能参数退化量分布模型,研究了基于多元性能退化量的光纤陀螺可靠性模型及参数评估方法。

光纤陀螺输出是其内部自身状态及外界噪声、干扰的综合结果,可以表示成随机序列的形式^[12],因此零偏变化量、零偏稳定性和标度因数等性能退化量服从正态分布,故光纤陀螺的可靠性模型为:

解多元性能退化量的联合概率密度函数时,需首先求解多元性能退化量间形如式(3)的方差-协方差矩阵 \mathbf{V} 。该矩阵的作用在于:根据方差-协方差矩阵 \mathbf{V} 中各元素的值判断 q 个产品退化量是否相关,若矩阵中的任意元素 $\text{Cov}(p_i(t), p_j(t)) \equiv 0$ 或接近于0,则认为各退化量是不相关的,可直接用式(2)求解产品的可靠度函数;若 $\text{Cov}(p_i(t), p_j(t)) \neq 0$,则第 i 个性能退化参数与第 j 个性能退化参数是相关的,需结合产品退化量分布形式进一步求解得到联合概率密度函数;此外,还可以根据 \mathbf{V} 中元素即任意两个退化量协方差大小来估计这两个退化量之间相关性的强弱程度,归一化条件下协方差越大则相关性越强。

$$R(t) = P_r\{P_1(t) \leq c_1, P_2(t) \leq c_2, P_3(t) \leq c_3\} = \int_{c_3} \int_{c_2} \int_{c_1} f(p_1(t), p_2(t), p_3(t)) dp_1 dp_2 dp_3 = \int_0^{c_3} \int_0^{c_2} \int_0^{c_1} f(p_1(t), p_2(t), p_3(t)) dp_1 dp_2 dp_3, \quad (4)$$

式中, $p_1(t), p_2(t), p_3(t)$ 分别表示光纤陀螺性能参数零偏变化量、零偏稳定性和标度因数重复性; c_1 表示零偏变化量的阈值,为 $1(^{\circ})/\text{h}$; c_2 表示零偏稳定性的阈值,为 $0.4(^{\circ})/\text{h}$; c_3 表示标度因数变化量的阈值,为 5×10^{-4} ; c_3 表示3个性能退化量的联合概率密度函数,由于各个性能退化量均服从正态分布,则可得^[14]

$$f(p_1(t), p_2(t), p_3(t)) = (2\pi)^{-3/2} |\mathbf{V}|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(\mathbf{p}-\boldsymbol{\mu})^T \mathbf{V}^{-1}(\mathbf{p}-\boldsymbol{\mu})\right\}, \quad (5)$$

式中, $\mathbf{p} = (p_1, p_2, p_3)^T$ 是光纤陀螺性能退化量的列向量; $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)^T$ 是光纤陀螺性能退化量的均值向量, \mathbf{V} 是光纤陀螺性能退化量间的 3×3 方差-协方差矩阵; $|\mathbf{V}|$ 为矩阵 \mathbf{V} 的行列式。

为求光纤陀螺的可靠度函数,需结合试验数据估计出式(5)中的未知参数。假设试验中的产

品数量为 m 个, 每间隔 Δt 时间对 3 个产品性能参数进行一次测试, 共测试 n 次, 则产品性能测试数据可以用三维向量 \mathbf{P} 表示, 其元素 $P[i][j][k]$ 表示第 i 个产品第 j 个性能退化参数的第 k 次测量结果, 对于光纤陀螺产品而言, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, 3, k=1, 2, \dots, n$ 。

下面分析如何通过试验数据估计得到式(5)中的未知参数。 t 时刻性能退化量 $P_i(t)$ 和 $P_j(t)$ 间的协方差估计为

$$\text{Cov}[p_i(t), p_j(t)] = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m [p_{ik}(t) - \overline{p_i(t)}] \cdot [p_{jk}(t) - \overline{p_j(t)}], \quad (6)$$

式中, $i, j=1, 2, 3, \overline{p_i(t)}$ 表示 t 时刻 m 个样本的退化量 $p_i(t)$ 的均值, $\overline{p_j(t)}$ 表示 t 时刻 m 个样本的退化量 $p_j(t)$ 的均值, 可以通过式(7)求得。

$$\begin{cases} \overline{p_i(t)} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m p_{ik}(t) \\ \overline{p_j(t)} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m p_{jk}(t) \end{cases}. \quad (7)$$

由 μ_i 是光纤陀螺第 i 个性能退化量的均值向量, 有

$$\mu_i = \overline{p_i(t)}. \quad (8)$$

利用光纤陀螺性能退化数据由式(6)~(8)评估出式(5)中的未知参数, 根据式(4)即可得到光纤陀螺在各个测量点时的可靠度, 再对其拟合即可得到可靠度函数, 进而能够求出光纤陀螺在任意时刻的可靠性指标。

4 试验研究

4.1 光纤陀螺性能退化试验

对光纤陀螺贮存故障模式影响及危害性分析的结果表明, 光纤陀螺在贮存条件下的薄弱环节是超辐射发光二极管(SLD)、集成光学调制器和光纤环。温度应力是贮存条件下对 SLD、集成光学调制器和光纤环造成影响较大的应力^[15], 因此对光纤陀螺开展了基于温度应力的贮存试验。受试验经费所限, 光纤陀螺贮存试验选用了 3 只中精度光纤陀螺试验样本, 在 60 °C 温度应力水平下进行了贮存试验。试验时, 将 3 只光纤陀螺固定于温箱中的静态基座平台上, 试验开始前测试一次, 以后每间隔 168 h 用光纤陀螺综合测试系统对其进行静态性能测试获取零偏、零偏稳定性和

标度因数指标的退化信息, 共测试 21 次, 因此试验总时间为 3 360 h。图 1 为光纤陀螺贮存试验现场照片。

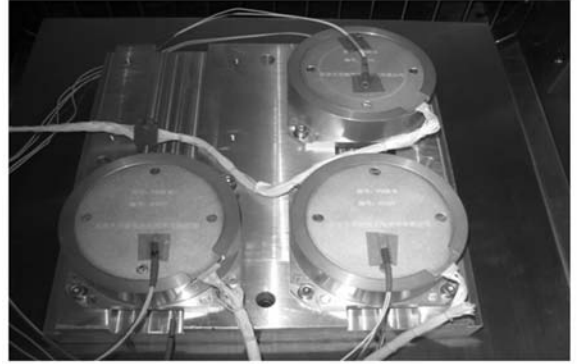
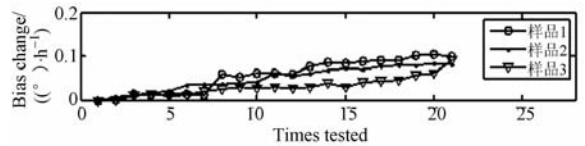


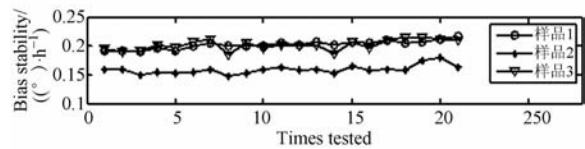
图 1 光纤陀螺贮存试验
Fig. 1 Storage test of FOGs

通过对已有试验数据进行处理, 得到光纤陀螺各性能参数随时间的变化曲线, 如图 2 所示。



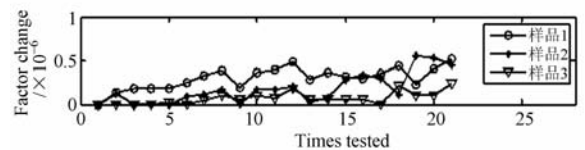
(a) 零偏退化数据

(a) Data from bias degradation



(b) 零偏稳定性退化数据

(b) Data from bias stability degradation



(c) 标度因数退化数据

(c) Data from factor degradation

图 2 光纤陀螺性能退化数据

Fig. 2 Performance degradation data of FOGs

由图 2 可以看出, 3 个光纤陀螺试验样品的零偏、零偏稳定性、标度因数均有一定的退化趋

势,因此,可以应用前文的理论分析评估光纤陀螺多元性能退化量来得到其可靠性指标。

4.2 评估结果及讨论

采用前述参数评估方法对试验数据进行处理,得到了试验中第 2 至第 21 次测试点的基于多元性能退化参数的光纤陀螺可靠度点估计值,见图 3 中“·”表征的坐标点。对 20 个“·”点进行拟合,得到图 3 中的曲线“—”,即为拟合的光纤陀螺在 60 °C 下贮存的 $R-T$ 曲线,由此可以求出光纤陀螺在 60 °C 下贮存任意时间的贮存可靠度。为了进一步论证采用多元性能退化参数对产品可靠性评估时必须考虑相关性的必要性,在图 3 中相应给出了不考虑参数间相关性(即假设各参数相互独立)时相应的点估计值和基于点估计值的 $R-T$ 曲线拟合结果,分别见图 3 中“*”和“—·”代表的点和曲线。

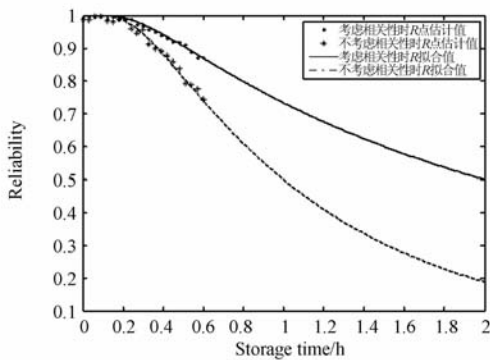


图 3 光纤陀螺可靠性曲线

Fig. 3 Reliability curves of FOGs stored at 60 °C

由图 3 可知,是否考虑参数相关性对于评估结果影响很大,不考虑参数相关时评估得到的可靠性指标要低于考虑相关性时得到的结果,因此,

参考文献:

- [1] CHAO M. Degradation analysis and related topics: some thoughts and a review[C]. *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)*, 1999, 23(5):555-566.
- [2] MEEKER W Q, HAMADA M. Statistical tools for the rapid development & evaluation of high-reliability products[J]. *IEEE Trans. On Rel.*, 1995, 44(2):187-198.
- [3] HUANG W. *Reliability analysis considering product performance degradation* [D]. Arizona: The University of Arizona, 2002.
- [4] CRK V. Reliability assessment from degradation data

参数间的独立性假设会人为低估产品的可靠性。

由产品寿命计算公式 $MTBF = \int_0^{+\infty} R(t) dt$ 可以求得考虑参数相关性时光纤陀螺 60 °C 下的贮存寿命为 32 800 h;而假设参数间相互独立时,光纤陀螺 60 °C 下贮存寿命为 13 200 h,此时的评估结果显然偏于保守。由图 3 和本文前述的相关分析可知:

(1) 当性能退化参数间的协方差矩阵不为零时,假设退化参数间相互独立对产品评估将会人为低估产品可靠性,低估的量值与参数间的相关程度(由协方差矩阵表征)有关;

(2) 本文基于 60 °C 下光纤陀螺多元性能退化量评估得到了光纤陀螺在 60 °C 下贮存时的可靠性指标,其它温度应力水平下的贮存可靠性指标的获取方法本文未进行研究,将另文通过加速退化试验相关理论来研究这一问题。

5 结 论

本文研究了基于多元性能退化量对光纤陀螺贮存可靠性指标进行评估的方法并基于试验数据给出了评估结果。结果表明,采用多元性能退化量并考虑参数相关性时评估得到的光纤陀螺 60 °C 下的贮存寿命为 32 800 h,不考虑参数相关性时,光纤陀螺 60 °C 下贮存寿命为 13 200 h。对于光纤陀螺或类似具有多个性能退化参数的产品而言,任何一个性能参数退化至阈值时产品即发生失效,因此,采用单一性能参数退化数据对产品进行可靠性评估不符合实际情况,采用文中基于多元性能退化量的可靠性评估方法将更加合理。

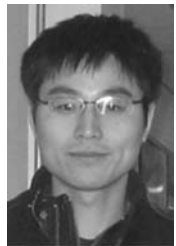
[C]. *Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 2000:155-161.

- [5] ZHAO J Y, LIU F. Reliability assessment of the metallized film capacitors from degradation data[J]. *Microelectronics Reliability*, 2007, 47:434-436.
- [6] DI X, WEN B Z. Reliability prediction using multivariate degradation data [C]. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium, USA, California*, 2005:337-341.
- [7] WANG P, COIT D. Reliability prediction based on degradation modeling for systems with multiple degradation measures[C]. *Proceedings of the Annual*

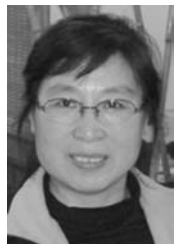
Reliability and Maintainability Symposium, USA, California, 2004:302-307.

- [8] LEFEVRE H C. 光纤陀螺仪[M]. 张桂才, 王巍译, 北京:国防工业出版社, 2002:30-33.
LEFEVRE H C. *The Fiber-Optic Gyroscope* [M]. Zhang Guicai, Wang Wei transl., Beijing: National Defence Industry Press, 2002:30-33.
- [9] 米剑, 张春熹, 李铮, 等. 偏光干涉对光纤陀螺性能的影响[J]. 光学学报, 2006, 26(8):1140-1144.
MI J, ZHANG CH X, LI ZH, et al.. Effect of polarization interference on fiber optic gyro performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(8):1140-1144. (in Chinese)
- [10] 金靖, 张忠钢, 王峥, 等. 基于 RBF 神经网络的数字闭环光纤陀螺温度误差补偿[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):235-240.
JIN J, ZHANG ZH G, WANG ZH, et al.. Temperature error compensation for digital closed-loop fiber optic gyroscope based on RBF neural network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):235-240. (in Chinese)
- [11] 李颖, 陈兴林, 宋申民. 小波神经网络用于光纤陀螺漂移误差辨识[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5):773-778.
LI Y, CHEN X L, SONG SH M. Application of wavelet neural network for identification of drifts errors in fiber optical gyroscope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5):773-778. (in Chinese)
- [12] 张延顺. 干涉式光纤陀螺漂移特性的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2002:2-8.
ZHANG Y SH. *The Research on Drift Characteristics of Interferometric Fiber-Optic Gyro* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2002:2-8. (in Chinese)
- [13] 李晓阳. 多态退化系统加速试验技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2007:81-89.
LI X Y. *Study on accelerated testing of multi-state degraded system* [D]. Beijing: Beijing University of aeronautics and astronautics, 2007: 81-89. (in Chinese)
- [14] 张福渊, 郭绍建. 概率统计及随机过程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2001:155-157.
ZHANG F Y, GUO SH J. *Probability Statistics and Stochastic Processes* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2001: 155-157. (in Chinese)
- [15] 王大海. 光纤陀螺加速贮存寿命模型研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2010:23-29.
WANG D H. *Research on accelerated storage life model of fiber optic gyroscope* [D]. Beijing: Beijing University of aeronautics and astronautics, 2010:23-29. (in Chinese)

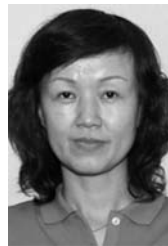
作者简介:



晁代宏(1980—),男,安徽亳州人,讲师,2001年、2007年于北京航空航天大学分别获得学士、博士学位,主要从事光纤陀螺、光纤惯组可靠性方面的研究。E-mail: daihongchao@vip.sina.com



马静(1958—),女,北京人,高级工程师,1982于北京航空航天大学获得学士学位,主要从事光纤陀螺、光电子器件可靠性的研究。E-mail: majing@buaa.edu.cn



陈淑英(1964—),女,江西人,高级工程师,1985于北京化工大学获得学士学位,主要从事光纤陀螺可靠性、标准化等方面的研究。E-mail: chenshuying@buaa.edu.cn