

# 自然贮存环境下某型控制舱贮存寿命评估

牛跃听<sup>1</sup>, 穆希辉<sup>1</sup>, 杨振海<sup>2</sup>

(1. 总装备部军械技术研究所, 石家庄 050000; 2. 北京工业大学, 北京 100022)

**摘要:** **目的** 评估自然贮存环境下某型控制舱贮存寿命。**方法** 针对历年统计的控制舱成败型、不完全故障数据, 假设其服从指数分布族、Weibull 分布族、极值分布族、对数正态分布族, 结合工程实际处理异常数据、“倒挂”数据, 采用极小  $x^2$  估计对分布函数的参数进行估计, 采用极小  $x^2$  检验对各分布函数的合理性进行验证, 计算“服从不同自由度下的  $x^2$  分布随机变量”检验的拟合优度。**结果** 得到了控制舱贮存可靠性分布函数。**结论** 通过统计的故障数据, 验证了所提出数学模型评估方法的适用性和正确性, 得到了在置信度为 0.90、可靠度为 0.95 条件下控制舱的自然贮存寿命。

**关键词:** 控制舱; 自然贮存; 贮存寿命; 评估

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2014.04.002

**中图分类号:** TJ415      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2014)04-0007-05

## Storage Life Assessment for a Certain Type of Control Cabin Accelerometer in Natural Storage Environment

NIU Yue-ting<sup>1</sup>, MU Xi-hui<sup>1</sup>, YANG Zhen-hai<sup>2</sup>

(1. General Armament Ordnance Technology Institute, Shijiazhuang 050000, China;

2. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**ABSTRACT: Objective** To assess the storage life of a certain type of control cabin accelerometer in natural storage environment. **Methods** The historical statistics of the accelerometer's success or failure and incomplete failure data was investigated, assuming it was subject to exponential distribution, Weibull distribution, extreme value distribution and logarithmic normal distribution, in combination with the engineering data handling exceptions and "upside down" data, minimum  $x^2$  estimation was used to estimate the parameters of the distribution function, minimal  $x^2$  test was used to verify the rationality of the distribution function, and the goodness of fit of the "obeying distributed random variables under different degrees of freedom  $x^2$ " test was calculated. **Results** Reliability distribution function for accelerometer storage was obtained.

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-03-15

Received: 2014-03-05; Revised: 2014-03-15

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2013M532181)

Fund: Supported by China Postdoctoral Science Foundation Projects(2013M532181)

作者简介: 牛跃听(1978—), 男, 河北人, 博士, 主要研究方向为信息化弹药寿命评估与延寿技术。

Biography: NIU Yue-ting(1978—), Male, from Hebei, Ph. D., Research focus: information technology and life extension technology and life assessment of ammunition.

**Conclusion** Through statistics of the fault data, the applicability and validity of the proposed mathematical model assessment methods were verified and the natural storage life of accelerometer was obtained with confidence and reliability of 0.90 and 0.95, respectively.

**KEY WORDS:** control cabin; natural storage; storage life; assessment

控制舱是火箭弹的“大脑和中枢神经”,其显著特点是长期贮存、一次使用。围绕高可靠性武器系统部件贮存寿命的评估问题是近年来研究的热点之一<sup>[1-2]</sup>。如果没有长期贮存期间的武器系统部件检测数据,通常是在一些假设条件下,采用加速寿命试验的方法,预估其寿命<sup>[3-9]</sup>。

某控制舱贮存于我国亚湿热、亚干热、温和、干燥等4个典型气候区,至今已经自然贮存接近10年时间,期间积累了大量的检测数据。从出厂到最终使用,控制舱在不同贮存环境中历经数年时间,其质量必然发生变化。自然贮存使控制舱受到各种环境因素的综合作用,可以真实、直观地反映其在多环境因素作用下的性能变化规律<sup>[10]</sup>。那么,在确保控制舱制导精度的前提下,其贮存寿命到底有多长,这是决策部门十分关注的问题<sup>[11]</sup>。文中旨在准确评估控制舱的可靠寿命指标,为决策部门提供控制舱及其部件订购生产、储备布局、使用维护的决策依据。

### 1 自然贮存控制舱部组件故障统计

分别抽取自然环境中贮存9,8,7,6,5,4,3年的控制舱样本进行性能检测,检测结果见表1。

表1 控制舱故障统计

Table 1 Control cabin fault statistics

贮存年限/年	9	8	7	6	5	4	3
样本总量	$X_9$	$X_8$	$X_7$	$X_6$	$X_5$	$X_4$	$X_3$
故障数量	11	24	9	26	6	8	5

控制舱的检测数据为不同年份的多批次、成败型数据,并且不知道控制舱在检测周期内出现故障的具体时间。因此,控制舱抽样检测数据又具有不完全数据的特征。

### 2 贮存可靠性分布函数

为了合理地评估控制舱在自然贮存环境下的寿

命,首先需要研究其贮存可靠性的变化规律,确定贮存可靠性分布函数。

下面给出问题的统计模型:设控制舱的贮存寿命为 $X$ , $X$ 的分布函数为 $F(x, \theta)$ 。在时刻 $t_i$ 对 $X$ 作了 $n_i$ 次观察,其中有 $Y_i$ 次观察值大于或等于 $t_i$ , $(n_i - Y_i)$ 次小于 $t_i$ ,但未观察到 $X$ 的准确值。将 $X \geq t_i$ 视为成功, $X < t_i$ 视为失败,对连续变量 $X$ ,观察数据 $(n_i, Y_i, t_i)$ 是成败型不完全数据,易见:

$$Y_i \sim B(n_i, p_i), p_i = 1 - F(t_i) \quad (1 \leq i \leq m)$$

贮存可靠性分布函数的确定归结为以下两个基本问题。

#### 2.1 类型的选择

即检验假设 $H_0: F \in p_0, p_0 = \{F(\cdot; \theta), \theta \in \Theta\}$ 是分布族, $\Theta$ 是参数空间。产品贮存可靠性常见的分布族有指数分布族、威布尔分布族、极值分布族、对数正态分布族等,这一问题称为模型检验。

指数分布族:  $\{F(t; \lambda) = 1 - e^{-\lambda t}; \lambda \in R\}$ ;

威布尔分布族:  $\{F(t; \lambda) = 1 - e^{-\alpha t^\beta}; \alpha, \beta \in R\}$ ;

极值分布族:  $\{F(t; \lambda) = e^{-e^{-\frac{t-\alpha}{\beta}}}; \alpha, \beta \in R\}$ ;

对数正态分布族:

$$\left\{ F(t; \lambda) = \int_{-\infty}^t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-\frac{(x-\ln\mu)^2}{2\sigma^2}}; \mu > 0 \right\}.$$

#### 2.2 参数的确定

在 $F \in p_0$ 的假设下,基于成败型不完全数据 $(n_i, Y_i, t_i), 1 \leq i \leq m$ ,估计 $F(x, \theta)$ 中的未知参数 $\theta$ 。

记时刻 $t_i$ 的第 $j$ 个样品的贮存寿命为 $X_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n_i), X_{ij}$ 独立同分布,其共同的分布函数为 $F(\cdot; \theta), \theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s)' \in \Theta \subset R^s, \theta$ 为参数, $\Theta$ 为参数空间。令:

$$X_{ij}^* = \begin{cases} 1 & X_{ij} \geq t_i \\ 0 & X_{ij} < t_i \end{cases}$$

$$Y_i = \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij}^*, 1 \leq i \leq m$$

则:  $Y_i \sim B(n_i, p_i), p_i = p_i(\theta) = 1 - F(t_i, \theta)$ ,

$1 \leq i \leq m$ 。

记:  $\hat{p}_1 = Y_i/n_i$

则  $\hat{p}_1$  是  $p_i$  的强相合估计。

1) 构造  $X^2$  统计量。因为:  $Y_i \sim B(n_i, p_i)$ , 故

$$E\hat{p}_1 = p_i, D\hat{p}_1 = \frac{p_i(1-p_i)}{n_i}。$$

由中心极限定理可得:

$$\frac{\hat{p}_1 - p_i}{\sqrt{\frac{p_i(1-p_i)}{n_i}}} \sim N(0, 1)$$

$$\text{故: } \sum_{i=1}^m \left( \frac{\hat{p}_1 - p_i}{\sqrt{\frac{p_i(1-p_i)}{n_i}}} \right)^2 \sim X^2$$

$$\text{即: } \sum_{i=1}^m \frac{n_i(\hat{p}_1 - p_i(\hat{\theta}))^2}{p_i(\hat{\theta})(1-p_i(\hat{\theta}))} \sim X^2(\hat{\theta}) \quad (1)$$

假定贮存寿命  $X$  的分布函数  $F(t, \theta)$  为某一分布族, 基于数据  $(n_i, Y_i, t_i)$ ,  $1 \leq i \leq m$ , 可以得到:

在  $t_i$  时刻,  $\hat{p}_1 = Y_i/n_i, p_i(\theta) = 1 - F(t_i, \theta), 1 - p_i(\theta) = F(t_i, \theta)$ 。

将以上诸式代入式(1), 即可算得  $X^2$  统计量。

2) 分布函数中参数的估计。若真实参数为  $\theta_0$ , 当  $n_i \rightarrow \infty, 1 \leq i \leq m, X^2(\theta_0)$  渐近于自由度为  $m$  的  $X^2$  分布。若  $\hat{\theta}_n$  满足  $X^2(\hat{\theta}_n) = \inf_{\theta \in \Theta} X^2(\theta)$ , 则称  $\hat{\theta}_n$  是  $\theta$  的极小  $X^2$  估计。

3) 关于估计量  $\hat{\theta}_n$  的定理<sup>[12]</sup>。

a)  $\hat{\theta}_n$  是  $\theta$  的强相合估计, 且  $\|\hat{\theta}_n - \theta_0\| = o(\sqrt{\ln n/n})$  a. s.。

b) 当  $n \rightarrow \infty$  时,  $\sqrt{n}(\hat{\theta}_n - \theta_0) \xrightarrow{L} N(0, (M^T(\theta_0)A(\theta_0)M(\theta_0))^{-1})$ 。

c)  $X^2(\hat{\theta}_n)$  的极限分布 ( $n \rightarrow \infty$ ) 是自由度为  $(m-s)$  的  $X^2$  分布, 其中  $m$  是观测样本的次数,  $s$  是分布函数中未知参数的个数。

利用上述定理就可以选择较为合适的贮存可靠度分布类型, 并对其中的未知参数进行估计。

4)  $X^2$  统计量的最小值  $X^2(\hat{\theta}_n)$  及检验。对上述  $X^2$  统计量关于  $\theta$  求最小值, 得到极小  $X^2$  估计  $\hat{\theta}_n$ , 以及极小  $X^2$  统计量  $X^2(\hat{\theta}_n)$ 。利用定理的第三条结论进行极小  $X^2$  检验, 对于给定的检验水平  $\alpha$ , 确定拒绝域为:  $(X_{1-\alpha}^2(m-s), +\infty)$ 。

为明确检验的置信度, 可以在作出拒绝或接受

原假设结论的基础上, 进一步计算检验的  $p$  值。记服从自由度为  $(m-s)$  的  $X^2$  分布的随机变量为  $X^2(m-s)$ , 则:  $p = P(X^2(m-s) > X^2(\hat{\theta}_n))$ ,  $p$  为检验的拟合优度, 衡量了假定的分布与数据的拟合程度。一般说来,  $p$  值越大, 拟合程度越好。

对于贮存可靠性中的 4 种常见分布族: 指数分布族、威布尔分布族、极值分布族和对数正态分布族, 可以逐一按上述方法进行检验, 从中选择一种最为合适的分布类型。

### 3 贮存寿命评估的理论与方法

记  $R(t)$  为控制舱的贮存可靠度,  $R_L$  为给定的可靠度下限,  $1-\alpha$  为置信度, 欲求贮存年限  $T$ , 使得  $P(R(T) \geq R_L) = 1-\alpha$ 。

易见:  $n\hat{R}(t) \sim B(n, R(t))$

式中  $\hat{R}(t) = Y_i/n_i, n\hat{R}(t)$  表示成功的个数, 它服从二项分布  $B(n, R(t))$ , 根据棣莫弗-拉普拉斯中心极限定理得:

$$\frac{\hat{R}(t) - R(t)}{\sqrt{\frac{R(t)(1-R(t))}{n}}} \sim N(0, 1) \quad (n \rightarrow \infty)$$

式中:  $N(0, 1)$  是均值为 0、方差为 1 的标准正态分布。由于  $\frac{\hat{R}(t) - R(t)}{\sqrt{\frac{R(t)(1-R(t))}{n}}}$  满足正态分布, 则可

以推出:

$$P\left(\frac{\hat{R}(t) - R(t)}{\sqrt{\frac{R(t)(1-R(t))}{n}}} \geq U_{1-\alpha}\right) = 1-\alpha$$

$U_{1-\alpha}$  为标准正态分布的  $\alpha$  上分位数, 可以从标准正态分布的  $\alpha$  分位数表中获得。再通过求解不等式  $\frac{\hat{R}(t) - R(t)}{\sqrt{\frac{R(t)(1-R(t))}{n}}} \geq U_{1-\alpha}$ , 便可以得到  $R(t)$  的

下限:

$$R_L = R(t) - U_{1-\alpha} \sqrt{\frac{R(t)(1-R(t))}{n}}$$

上面的式子中假定  $n_i$  全相等。在本问题中, 由于  $n_i$  不全相等,  $R(t)$  的下限可用式(2)求得<sup>[13]</sup>:

$$R_L = R(t) - U_{1-\alpha} \sqrt{\frac{R(t)(1-R(t))}{\min_{1 \leq i \leq m} n_i}} \quad (2)$$

从式(2)中解出  $R(t)$ , 即可得到所要的  $T$ 。

### 4 故障统计数据预处理

#### 4.1 异常的统计数据

分析表 1 发现, 由于抽样误差、检测误差、控制舱批次质量等方面的原因, 现有的性能检测数据存在一些问题。主要表现在: 某些年份的故障数偏高或偏低, 较为异常, 导致数据中出现一些“倒挂”现象。当  $t_i < t_{i+1}$  时,  $\hat{p}_i < \hat{p}_{i+1}$ 。即贮存时间短的反而比贮存时间长的可靠度的点估计值小, 如图 1 所示。

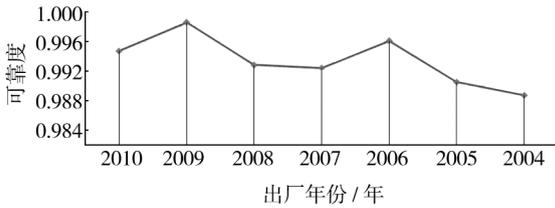


图 1 控制舱可靠度分布

Fig.1 Reliability distribution of control cabin

#### 4.2 异常的统计数据的处理

1) 剔除某些异常值。个别年份的故障数过高或过低会给分布的选择、确定及寿命预测带来严重影响。对明显的异常数据, 能确定产生原因的应予以剔除<sup>[14]</sup>。贮存 6 年的控制舱的故障数量为 26。通过对贮存 6 年不同批次的控制舱故障进行统计(见表 2)。发现第 g, i 批次控制舱的故障数量明显高于其他批次, 说明该批次质量存在问题, 处理数据时应剔除该故障数据。同时, 也要在贮存 6 年的检测样本总量中去除这两个批次数。

2) 尽量不采用数据倒挂年份数据。尽管有的文献建议对“倒挂”现象作如下处理: 若  $\hat{p}_i < \hat{p}_{i+1}$ , 令  $\hat{p}_i = \hat{p}_{i+1} = (\hat{p}_i + \hat{p}_{i+1})/2$ 。如果数据过高或过低, 即使采取这种措施效果也不大。经过对现场的工程实际

表 2 贮存 6 年的不同批次部件 A 故障统计表

Table 2 Fault statistics for parts from different batches after 6-year storage

批次	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
故障数量/个	1	2	1	1	1	1	3	1	4	2

表 3 剔除异常值后的控制舱故障统计表

Table 3 Fault statistics of control cabin after eliminating outliers

贮存年限/年	9	8	7	6	5	4	3
样本总量	$X_9$	$X_8$	$X_7$	$X_6$	$X_5$	$X_4$	$X_3$
故障数量	11	24	9	19	6	8	5

情况进行分析, 在计算过程中, 对这些数据进行剔除。

### 5 计算结果及验证

假设的分布类型、假设检验、拟合优度、贮存寿命评估结果见表 4。

表 4 控制舱计算结果

Table 4 The control cabin calculation results

备选分布类型			
指数分布	威布尔分布	极值分布	对数正态分布
$X^2_{0.95}(6) = 12.59$	$X^2_{0.95}(5) = 11.07$	$X^2_{0.95}(5) = 11.07$	$X^2_{0.95}(5) = 11.07$
$X^2$ 统计量: 1.8334	$X^2$ 统计量: 0.7797	$X^2$ 统计量: 0.6949	$X^2$ 统计量: 4.831
$p$ 值: 0.934	$p$ 值: 0.978	$p$ 值: 0.983	$p$ 值: 0.437
$\hat{\lambda} = 0.001052$	$\hat{\alpha} = 0.000211$	$\hat{\alpha} = 36.6137$	$\hat{\mu} = 42.097$
	$\hat{\beta} = 1.801$	$\hat{\beta} = 18.438$	$\hat{\sigma} = 16.432$
预测寿命: 43.99 年	预测寿命: 14.76 年	预测寿命: 15.78 年	预测寿命: 1 588 046.6 年
分布类型: 极值分布, 参数估计: $\hat{\alpha} = 36.6137, \hat{\beta} = 18.438$ ; 预测寿命: 15.78 年			

比较表 4 计算结果可知: 极值分布的  $X^2$  统计量最小(0.6949),  $p$  值最高, 拟合得比较好<sup>[15]</sup>, 并且极小  $X^2$  检验结果为接收, 所以判定控制舱符合极值分布。取置信度  $1 - \alpha = 0.90, R_L = 0.95$ , 利用(2)式算得控制舱的贮存寿命为 15.78 年。

以贮存 3 年的控制舱为例, 其年度统计数据可靠度为:

$$\hat{p}_1 = Y_i/n_i = 0.9947$$

控制舱服从极值分布, 由其可靠度分布函数计算得到贮存 3 年时的可靠度为:

极值分布族:  $p_i(\hat{\theta}) = 1 - e^{-e^{\frac{t-\alpha}{\beta}}} = 0.9980$

两者的相对误差为:

$$\left| \frac{p_i(\hat{\theta}) - \hat{p}_i}{\hat{p}_i} \right| \times 100\% = 0.3318\%$$

同理,可求得控制舱的年度统计数据可靠度、控制舱可靠度分布函数年度可靠度,以及两者的相对误差,见表 5。可知两者相对误差较小,预测精度较高。

表 5 控制舱各年份可靠度预测值与估计值的比较

Table 5 Comparison of the predicted values and estimated values of reliability of the control cabin each year

贮存年限/年	3	4	5	6
相对误差/%	0.3318	0.1421	0.3381	0.2464
贮存年限/年	7	8	9	
相对误差/%	0.2919	0.0647	0.0000	

## 6 结语

采用极小  $X^2$  估计方法对多批次、成败型数据类型的控制舱进行贮存寿命评估,通过极小  $X^2$  检验以及检验的拟合优度评价,确定控制舱自然贮存寿命函数服从极值分布。得到了置信度为 0.90、可靠度为 0.95 条件下控制舱自然贮存寿命为 15.78 年的评估结果。

### 参考文献:

- [1] PECHT A, JOSEPH M. Effect of Long-Term Storage on Electronic Devices[R]. US: Army Armament Research, Development and Engineering Center, 1995.
- [2] 周堃,罗天元. 弹箭储存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 6—11.  
ZHOU Kun, LUO Tian-yuan. Missiles and Storage Life Prediction Technology were Reviewed[J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(2): 6—11.
- [3] 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 Hong-jie, LI Lou-de, DUAN Gang, 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.
- [3] 张涛,汪波. 水雷装备橡胶密封件贮存寿命预测方法

研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2010, 31(5): 448—451.

ZHANG Tao, WANG Bo. Research on Predict Method of the Storage Life about Mine Rubber Seal[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2010, 31(5): 448—451.

- [5] JINSUK L, RONG P. Analyzing Step-stress Accelerated Life Testing Data Using Generalized Linear Models [J]. IIE Transactions, 2010, 42(8): 589—598.
- [6] BAE J S, KIM S-J, PARK I J, et al. Lifetime Prediction Through Accelerated Degradation Testing of Membrane Electrode Assemblies in Direct Methanol Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35: 9166—9167.
- [7] 上官芝,付桂翠,万博. 基于加速性能退化的元器件贮存寿命预测[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(5): 32—36.  
SHANG-GUAN Zhi, FU Gui-cui, WAN Bo. Component Storage Life Prediction Based on Accelerated Performance Degradation[J]. Electronic Product Reliability and Environment Testing, 2009, 27(5): 32—36.
- [8] 张春华,温熙森,徐循. 加速寿命试验技术综述[J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 485—490.  
ZHANG Chun-hua, WEN Xi-sen, XU Xun, et al. Survey of Accelerated Life Test [J]. Ordnance Journal, 2004, 25(4): 485—490.
- [9] 葛广平,刘立喜. 竞争失效产品恒定应力加速寿命试验的优化设计[J]. 应用概率统计, 2002, 18(3): 260—268.  
GE Guang-ping, LIU Li-xi. Competition for the Optimization Design of the Constant Stress Accelerated Life Test Failure Products [J]. Applied Probability and Statistics, 2002, 18(3): 260—268.
- [10] 宣卫芳,胥泽奇,肖敏. 装备与自然环境试验[M]. 北京:航空工业出版社, 2009.  
XUAN Wei-fang, XU Ze-qi, XIAO Min. Equipment and Natural Environmental Test [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2009.
- [11] 罗天元. 建立弹箭储存寿命评价技术的构想[J]. 四川兵工学报, 2003, 24(6): 40—42.  
LUO Tian-yuan. The Idea of Build Missiles and Storage Life Evaluation Technology [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2003, 24(6): 40—42.
- [12] 杨振海,安保社. 基于成败型不完全数据的参数估计[J]. 应用概率统计, 1994, 10(2): 142—147.

## 参考文献:

- [1] 李久祥. 装备贮存延寿技术[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2007.
- LI Jiu-xiang. Technology of Equipment storage and life extension [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2007.
- [2] 杨立峰, 王亮, 冯佳晨. 基于 PHM 技术的导弹维修保障[J]. 海军航空工程学院学报, 2010(4): 447—450.
- YANG Li-feng, WANG Liang, FENG Jia-chen. Maintenance Support of Missile Based on PHM Technology[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010(4): 447—450.
- [3] 何献武, 曾振建, 贾慧, 等. PHM 技术在反舰导弹维修保障中的传感器网络应用研究[J]. 仪器仪表用户, 2007(2): 11—12.
- HE Xian-wu, ZENG Zhen-jian, JIA Hui, et al. Research on PHM Technology Application in Sensor Networks of Anti-ship Missile's Maintenance [J]. Electronic Instrumentation Customer, 2007(2): 11—12.
- [4] 张泽奇, 刘晓方, 陈曦, 等. 基于 PHM 的导弹状态管理研究[J]. 信息技术, 2010(7): 107—109.
- ZHANG Ze-qi, LIU Xiao-fang, CHEN Xi, et al. Research on Missile State Management Based on PHM [J]. Information Technology, 2010(7): 107—109.
- [5] 胡冬, 谢劲松, 吕卫民. 故障预测与健康管理技术在导弹武器系统中的应用[J]. 导弹与航天运载技术, 2010(4): 24—30.
- HU Dong, XIE Jin-song, LYU Wei-min. Applications of PHM Technology in Missile Weapon Systems [J]. Missiles and Space Vehicles, 2010(4): 24—30.
- [6] 王亮, 吕卫民, 冯佳晨. 导弹 PHM 系统中的传感器应用研究[J]. 战术导弹技术, 2011(2): 110—114.
- WANG Liang, LYU Wei-min, FENG Jia-chen. Application of Sensors in Prognostic and Health Management System of Missile [J]. Tactical Missile Technology, 2011(2): 110—114.
- [7] 王春健, 马亮, 范红军. 潜射导弹发射装置故障预测与健康研究[J]. 机械设计与制造, 2012(3): 259—261.
- WANG Chun-jian, MA Liang, FAN Hong-jun. Research of PHM for Launcher of Submarine Launched Missile [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(3): 259—261.
- [8] 洪晟, 陶文辉, 路君里, 等. 基于综合 PHM 方法的导弹维修保障综述[J]. 计算机测量与控制, 2012(4): 862—864.
- HONG Sheng, TAO Wen-hui, LU Jun-li, et al. Maintenance and Supportability of the Missile Weapon Systems Based on Prognostic and Health Management [J]. Computer Measurement & Control, 2012(4): 862—864.
- [9] 孙博, 康锐, 谢劲松, 故障预测与健康管理系统研究和应用现状综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007(10): 1762—1767.
- SUN Bo, KANG Rui, XIE Jin-song. Research and Application of the Prognostic and Health Management System [J]. Systems Engineering and Electronics, 2007(10): 1762—1767.
- [10] ANDREW HESS, LEO FILA. The Joint Strike Fighter (JSF) PHM Concept: Potential Impact on Aging Aircraft Problems [C]//IEEEAC. 2001. (余不详)
- [11] PARIS E DEUDRE, TREVINO C LUIS, WATSON D Mike. A Framework for Integrated of IVHM Technologies for Integration for Vehicle Management [C]//IEEEAC. 2004. (余不详)
- [12] YANG Zhen-hai, AN Bao-she. Parameter Estimation Based on Binary Date [J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 1994, 10(2): 142—147.
- [13] 刘礼宾, 程维虎. 阵地弹药贮存可靠性分析及试验数据处理[J]. 数理统计与应用概率, 1998, 13(4): 374—379.
- LIU Li-bin, CHENG Wei-hu. Positions of Ammunition Storage Reliability Analysis and Test Data Processing [J]. Mathematical Statistics and Applied Probability, 1998, 13(4): 374—379.
- [14] 李东阳. 弹药储存可靠性分析与试验评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- LI Dong-yang. Ammunition Storage Reliability Analysis Design and Test Assessment [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2013.
- [15] 杨振海, 程维虎, 张军舰. 拟合优度检验[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- YANG Zhen-hai, CHENG Wei-hu, ZHANG Jun-jian. Goodness of Fit [M]. Beijing: Science Press, 2011.

(上接第 11 页)