

# 基于储存寿命的战储器材轮换方法研究

张作刚, 胡新涛, 周伟, 刘俊瀛

(海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 针对传统轮换方法在战储器材轮换上的缺陷和不足, 结合长储器材失效数据较少、无法实时检测等特点, 提出了一种利用定期检测数据分析小子样储存可靠度, 并估计其储存寿命来确定轮换期的方法。在求解寿命分布参数时, 为克服迭代法运算时间较长、初始值选取对迭代结果收敛性影响较大等不足, 利用粒子群算法求解。通过实例分析表明, 该方法得到的结果与工程实际相吻合, 能为战储器材的轮换提供有效的决策支持。

**关键词:** 战储器材; 储存可靠度; 储存寿命; 粒子群优化算法

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2013.04.025

**中图分类号:** TJ089      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2013)04-0106-04

## Research on Alternation Methods of Readiness Reserve Material Based on Storage Life

ZHANG Zuo-gang, HU Xin-tao, ZHOU Wei, LIU Jun-ying

(Qingdao Branch of Naval Academy of Aeronautical Engineering, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** Aiming at the shortage of traditional alternation method in combat readiness reserve material, combining with less failure data of long storage material and unable real-time monitoring, a method of analyzing storage reliability of small sample with periodic testing data was put forward, which was used to estimate storage life for determination of alternation period. Particle swarm optimization was used to overcome the shortages of iterative method, which is long operation time and significant influence of selected initial value on convergence. It was proved that the method can get identical result with engineering practice. The purpose was to provide effective decision support for alternation of readiness reserve material.

**Key words:** readiness reserve material; storage reliability; storage life; particle swarm optimization

在储存期间, 由于战储器材自身固有特性及储存环境条件等影响, 部分战储器材功能会失效, 如果在此之前不能及时将它们轮换, 将极大降低该类器材的战备完好率。决定器材储存寿命的主要因素是

器材腐蚀和老化, 而器材腐蚀和老化主要取决于器材的储存可靠性<sup>[1]</sup>。对战储器材进行可靠性预测时, 关键是由实测数据确定其所服从的概率分布形式, 并计算出各分布的参数。由于试验受到多种因素的

收稿日期: 2013-02-22

作者简介: 张作刚(1961—), 男, 山东青岛人, 教授, 主要研究方向为航空装备、器材勤务技术。

限制,不可能对其作完整的寿命试验<sup>[2]</sup>。此外,器材长期处于储存状态,器材失效数据较少,其特点为小子样,在储存期对其作连续不间断的检测比较困难。因次,文中利用定期检测数据分析小子样储存可靠度,并估计其储存寿命,依据储存寿命确定轮换期轮换。

### 1 战储器材储存可靠性分析

战储器材的储存寿命与其储存可靠度变化紧密相关。器材储存可靠度即为器材在储存状态下,在规定时间和规定条件下,器材保持规定功能的概率<sup>[3]</sup>。

器材在储存过程中,可以得到的数据有两类:有故障数据和无故障数据。有故障数据的确切故障时间是无法观测到的,所观测到的数据处于某个时间区间内,即区间型数据。

区间型数据是指在时刻 $t_0$ 开始,随机抽取储存的器材 $n$ 个,并定期对它们检测,在某一时间区间内获取器材的故障数据。即时间间隔为 $0 \leq t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_m$ 时,在 $[t_{i-1}, t_i]$ 内故障的个数为 $r_i (i=1, 2, \dots, m)$ 。此外,由于战储器材在演习、护航中的使用,在区间数据中还有一种随机截尾数据,即器材中途随机退出试验,由于检测的不连续性,所观测到的数据也是在某个时间区间内的截尾数。在 $[t_{i-1}, t_i]$ 内截尾的个数为 $c_i (i=1, 2, \dots, m)$ ,见表1。

表1 区间型数据  
Table 1 Interval data

时间间隔	$[0, t_1]$	$[t_1, t_2]$	$[t_{m-1}, t_m]$	$[t_m, \infty)$
故障数	$r_1$	$r_2$	$r_i$	$n - \sum_{i=1}^m r_i$
截尾数	$c_1$	$c_2$	$c_i$	

假设每个器材寿命为 $t$ ,截尾时间为 $t_L$ ,且 $t$ 和 $t_L$ 是相互独立连续的随机变量,其累积故障分布函数分别为 $F(t)$ 和 $V(t)$ ,则器材在 $[t_{i-1}, t_i]$ 内故障的概率为:

$$p_i = p\{t_{i-1} \leq t \leq t_i\} = F(t_i) - F(t_{i-1}) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (1)$$

器材到 $t_m$ 未故障,在 $[t_m, \infty)$ 内故障的概率为:

$$p_m = p\{t > t_m\} = 1 - F(t_m) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (2)$$

同理,器材在 $[t_{i-1}, t_i]$ 内截尾的概率为:

$$p'_i = p'\{t_{i-1} \leq t \leq t_i\} = V(t_i) - V(t_{i-1}) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

器材到 $t_m$ 未截尾,在 $[t_m, \infty)$ 内截尾的概率为:

$$p'_m = p'\{t > t_m\} = 1 - V(t_m) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

因此,在储存期间内故障 $r_i$ 个器材的概率为 $(p_i)^{r_i}$ ,截尾 $c_i$ 个的概率为 $(p'_i)^{c_i}$ ,到 $t_m$ 时刻 $s_i$ 个器材未故障的概率为 $(p_m)^{s_i}$ ,未截尾的概率为 $(p'_m)^{s_i}$ 。则极大似然函数<sup>[4]</sup>为:

$$t_L = \left\{ \frac{n!}{(n-r)! \prod_{i=1}^m r_i!} \prod_{i=1}^m (p_i)^{r_i} (p_m)^{s_i} \right\} \left\{ \frac{n!}{(n-c)! \prod_{i=1}^m c_i!} \prod_{i=1}^m (p'_i)^{c_i} (p'_m)^{s_i} \right\} = \left\{ \frac{n!}{(n-r)! \prod_{i=1}^m r_i!} \prod_{i=1}^m [F(t_i) - F(t_{i-1})]^{r_i} [1 - F(t_m)]^{s_i} \right\} \left\{ \frac{n!}{(n-c)! \prod_{i=1}^m c_i!} \prod_{i=1}^m [V(t_i) - V(t_{i-1})]^{c_i} [1 - V(t_m)]^{s_i} \right\} \quad (5)$$

这里取器材寿命的相关参数,可以认为 $V(t)$ 不含任何未知参数,所以式(5)可改为:

$$t_L = \frac{n!}{(n-r)! \prod_{i=1}^m r_i!} \prod_{i=1}^m [F(t_i) - F(t_{i-1})]^{r_i} [1 - F(t_m)]^{s_i} \quad (6)$$

令 $\frac{n!}{(n-r)! \prod_{i=1}^m r_i!} = A$ ,两边取对数,得:

$$\ln t_L = \ln A + \sum_{i=1}^m r_i \ln [F(t_i) - F(t_{i-1})] + \sum_{i=1}^m s_i \cdot \ln [1 - F(t_m)] \quad (7)$$

对式(7) $F(t)$ 中的参数求偏导数,并使其等于0,即可求出寿命分布参数的估计值。

### 2 粒子群优化算法

粒子群优化算法模拟鸟集群飞行觅食的行为,通过集体的协作使群体达到最优,是一种群体智能启发式全局搜索算法<sup>[5]</sup>。为改善基本粒子群优化算法的收敛性能,采用带惯性权重的粒子群优化算法。该算法是在基本粒子群优化算法的速度更新公式上引入惯性权重进行优化,使粒子保持运动惯性,使其有扩展搜索空间的趋势,有能力探索新的区域<sup>[6]</sup>。

在粒子群优化算法中,每个粒子表示  $D$  维空间中的一个解,则第  $i$  个粒子的位置记作  $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ ,第  $i$  个粒子的速度记作  $V_i=(v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ ;每个粒子经历过的个体极值点位置记作  $P_i=(p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ ,种群经历过的全局极值点位置记作  $P_g=(p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 。粒子群优化算法的速度更新见式(8)。

$$V_i^{n+1} = w \cdot V_i^n + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_i - X_i^n) + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_g - X_i^n) \tag{8}$$

$$X_i^{n+1} = X_i^n + V_i^{n+1} \tag{9}$$

式中: $c_1, c_2$ 为学习因子,调节学习最大步长; $r_1, r_2$ 为两个随机数,取值范围为(0,1),增加搜索随机性; $n$ 为迭代次数。

式(8)中第一部分为粒子先前速度,表示粒子当前自身运动状态的信任;第二部分为“认知”部分,表示粒子本身的思考;第三部分为“社会”部分,表示粒子的信息共享与相互合作<sup>[6]</sup>。

此外,惯性权重  $w$  对粒子群优化算法的收敛起到至关重要的作用, $w$  值越大有利于全局搜索,收敛速度快,但是不易得到精确解; $w$  值越小有利于局部搜索和得到更加准确的解,但是收敛速度慢且易陷入局部极值。因此,通过大量试验得出,惯性权重不应设为定值,而应设为一个随时间线性减少的函数,惯性权重的函数见式(10)。

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{n_{\max}} \cdot n \tag{10}$$

式中: $w_{\max}$ 为初始权重; $w_{\min}$ 为最终权重; $n_{\max}$ 为最大迭代次数。算法流程如下。

1) 对每一个粒子初始化,每个粒子的位置及其速度通常是在允许范围内随机产生的,并设置粒子群的惯性权值  $w$ ,种群数  $n'$ ,维数  $D$ ,学习因子  $c_1$  与  $c_2$ ,迭代次数  $n$  等。

2) 评价每个粒子,计算粒子的适应度值,如果优于粒子当前的个体极值,则将标记设置为该粒子的位置,且更新个体极值;如果某个粒子的个体极值优于当前的全局极值,则将标记设置为该粒子的位置。

3) 对种群中的各个粒子,利用式(8)和式(9)更新其速度和位置。

4) 如果未达到算法的结束条件,转到2);否则结束算法。

### 3 实例分析

仓库某型战储器材 2005 年入库,入库数量为 14 个。由于重大演习任务需动用战储器材,所以实验数据中存在中途退出试验的随机截尾数。该器材的储存检测数据见表 2。

表 2 某型器材的储存检测数据

Table 2 Testing data of someone material during storage

检测时间	2006年	2008年	2010年	2011年
储存年限/a	2	4	6	7
故障数	0	0	1	1
截尾数	1	3	5	3

已知该器材的储存寿命服从指数分布,其故障分布函数  $F(t)$  为:

$$F(t)=1-e^{-\lambda t} \quad (t \geq 0) \tag{11}$$

式中: $\lambda$  为待求参数。将式(11)代入式(7):

$$\ln t_L = \ln C + \sum_{i=1}^m r_i \ln [e^{-\lambda t_{i-1}} - e^{-\lambda t_i}] + \sum_{i=1}^m s_i [-\lambda t_m] \tag{12}$$

则  $\lambda$  的极大似然方程见式(13)。

$$\frac{\partial \ln t_L}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^m \frac{t_i e^{-\lambda t_i} - t_{i-1} e^{-\lambda t_{i-1}}}{e^{-\lambda t_{i-1}} - e^{-\lambda t_i}} + \sum_{i=1}^m s_i (-t_m) = 0 \tag{13}$$

以极大似然方程非零段的绝对值为优化目标,所求参数  $\lambda$  的取值范围为约束条件,进行优化求解。

取粒子数目  $N=40$ ,最大迭代次数  $n_{\max}=40$ ,学习因子  $c_1=c_2=2$ ,最大权重  $w_{\max}=0.8$ ,最小权值  $w_{\min}=0.3$ ,参数  $\lambda$  的取值范围为(0,1)。运行结果如图 1 所示,算法运行中收敛速度很快,迭代次数在 50 步内就达到要求。

算法得到了参数估计值,器材对应的故障分布函数及可靠度函数分别为:

$$F(t)=1-e^{-0.008672t} \quad R(t)=e^{-0.008672t}$$

寿命曲线如图 2 所示。

根据规定,当该器材  $R < 0.9$  时寿命到期。由图 2 可知,点(12.15, 0.90)为临界点,即储存状态下该器材的寿命为 12 a。根据战储器材定期轮换的要求,

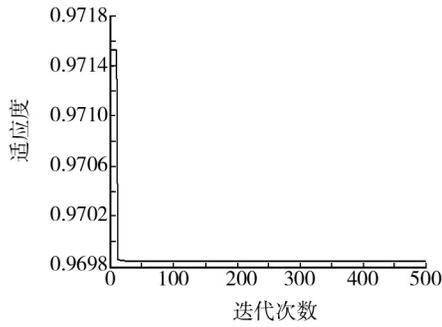


图1 粒子群算法迭代

Fig. 1 Iteration of particle swarm optimization

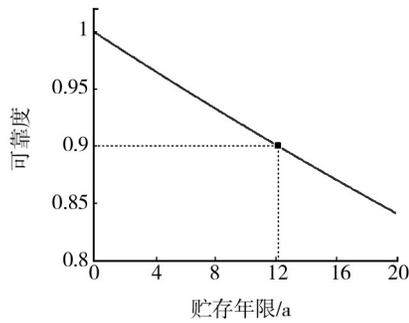


图2 寿命曲线

Fig. 2 Life curve

该批次该型器材轮换时间节点为第8年。

## 4 结论

通过建立模型并根据定期检测数据能较好地预测出战储器材的储存可靠度,并依此推导出储存寿命来确定轮换时机,该方法形式简单,容易实现,预测结果与工程实际相吻合,能为战储器材的轮换提供有效的决策支持。

### 参考文献:

- [1] 吴进煌,戴邵武,徐胜红. 基于可靠度预测模型的导弹贮存寿命分析方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(4):477—479.
- [2] 李正,童小燕,吕胜利. 小子样装备贮存可靠性评定方法[J]. 机械设计与制造, 2006, 12(1):75—77.
- [3] 黄瑞松. 飞航导弹贮存可靠性分析[M]. 北京:中国航天科工集团第三研究院, 2002:23.
- [4] 吴翊,李永乐,胡庆军. 应用数理统计[M]. 长沙:国防科技大学, 2008:33—37.
- [5] 甄彤,郭嘉,吴建军,等. 粒子群算法求解粮堆温度模型参数优化问题[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(12): 206—208.
- [6] 李明. 智能信息处理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2010:124—133.