

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.04.017

基于蒙特卡罗法的防化装备维修器材消耗预测

张良华¹, 顾进², 吴明飞¹, 唐业军¹, 孙牧¹

(1. 防化指挥工程学院 1系, 北京 102205; 2. 防化指挥工程学院 研究生管理大队, 北京 102205)

摘要: 从影响维修器材数量的主要因素分析入手, 在构建的防化维修器材需求量预测模型的基础上, 以蒙特卡罗仿真方法对某防化装备某系统的维修器材消耗进行了预测。预测结果表明: 该方法为准确预测防化装备维修器材消耗量提供了一种较为可行的科学方法。

关键词: 蒙特卡罗法; 防化装备; 维修器材; 消耗; 预测

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

Chemical Defense Equipment Maintenance Material Consumption Prediction Based on Monte-Carlo Method

ZHANG Liang-hua¹, GU Jin², WU Ming-fei¹, TANG Ye-jun¹, SUN Mu¹

(1. No. 1 Department, Command & Engineering Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China;

2. Administrant Brigade of Postgraduate, Command & Engineering Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

Abstract: Starting with the analysis main factors of affect the amount of maintenance material, create a prediction model of demand in chemical defense maintenance material, and then use the Monte-Carlo method to predict the consumption of chemical defense maintenance material. The result shows the method provide an accurate and rational method to predict consumption of chemical defense maintenance material.

Keywords: Monte-Carlo method; Chemical defense equipment; Maintenance material; Consumption; Prediction

0 引言^[1-3]

装备维修器材是装备技术保障的核心, 装备维修器材的消耗规律是进行装备维修器材科学保障、评估等的基础。防化装备维修器材消耗量预测是装备保障工程的一个重点、难点问题。传统的方法只根据历史消耗数据进行建模, 预测防化维修器材消耗量, 具有一定的局限性。而蒙特卡罗方法以概率统计理论为其主要理论基础, 以随机抽样为主要手段, 利用各种不同分布随机变量的抽样序列仿真实际系统中的概率模型, 给出问题数值解的渐近统计值计算, 可以有效地解决防化装备维修器材消耗问题。故对其进行研究。

1 维修器材数量的计算模型

1.1 影响维修器材消耗量的主要因素分析^[4]

维修器材消耗率反映了装备的可更换单位对维修器材的需求程度。引起维修器材消耗的因素是多方面的, 不仅与可更换单元的故障率有关, 而且与维修策略、使用管理、零件对损坏的敏感性等多种因素相关。在预测维修器材消耗率时, 主要应考虑下述因素的影响。

1) 可更换单元的故障率

可更换单元的故障率对维修器材消耗率有直接的影响。故障率从可更换单元本身的固有可靠性反映出使用过程中需要维修器材的趋势。提高可更换单元的固有可靠性是降低维修器材消耗率的根本措施, 但可更换的故障率并不等于维修器材消耗率。

2) 环境影响因素

装备所处的环境不同, 其可更换的维修器材消耗率可能大不相同。参考可靠性预计方法和外军的研究, 将装备的使用环境分为好、中、差等三类, 不同结构属性的部件受环境影响的程度也不同; 对于电子元器件, 由于温度、湿度、风沙和振动等环境因素影响, 其维修器材消耗率会较大; 非电子产品中的非金属件次之, 而金属件受环境影响最小。

3) 零部件对损坏的敏感性

在装备搬运、装配与维修中, 可能因人为差错, 不按操作规程和严酷使用等而使维修器材遭受损坏。在装配时, 可能因安装工具而损坏维修器材, 在维修时, 也可能因调整不当等损坏维修器材, 这是由人为差错造成的, 与其本身的故障率并无关系, 与零部件对损坏的敏感度有关。

收稿日期: 2009-10-29; 修回日期: 2009-12-04

作者简介: 张良华 (1970-), 男, 四川人, 防化指挥工程学院硕士毕业, 讲师, 从事作战与装备仿真研究。

4) 使用频率

预计维修器材消耗率时, 必须考虑可更换单元的使用频率。正常使用与非正常使用对维修器材消耗率也有较大影响。非正常使用一方面表现为使用时间过长或应力应变状况超出原设计规定的使用条件; 另一方面则表现为使用过少或没有使用, 造成某此零部件变质或性能下降。

5) 修复性影响因素

故障单元修复后, 仍可作为维修器材继续使用, 修复性影响考虑的就是单元故障后, 可修复比例对维修器材消耗的影响。决策时, 可根据 FMEA 和相似场频的数据直接给出修复比例。另外, 也可以对修复性进行分类, 分为可修、部分可修和不可修等 3 类。

6) 装备使用和维修人员素质

装备使用和维修人员的素质对可更换单元的维修器材消耗率也有很大影响, 装备使用和维修人员的素质高, 装备就能进行有效的维修和保养, 使用过程中差错率小, 零件的损坏率就低, 反之就会有相反的结果。根据目前使用人员状况, 可分为优秀、良好、及格、不及格等 4 类。

1.2 维修器材需求量预测模型的建立

根据对维修器材需求量的影响因素的分析结果, 可建立如下 2 种维修器材需求量预测模型: 乘法模型: $S = \pi_1 \pi_2 \pi_3 \pi_4 \pi_5 n F(t)$, 其中: S 表示可更换单元的维修器材数的预测值; π_1 表示环境影响系数; π_2 表示敏感性影响系数; π_3 表示使用频率影响系数; π_4 表示修复性因素影响系数; π_5 表示装备使用和维修人员素质影响系数; t 表示保障时效期内装备累积工作时数; n 表示装备中可更换单元的数量; $F(t)$ 表示可更换单元的故障概率。

线性模型为:

$$S = (\pi_1 x_1 + \pi_2 x_2 + \pi_3 x_3 + \pi_4 x_4 + \pi_5 x_5) \cdot n \cdot F(t)$$

其中: x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 分别为环境因素敏感性因素、使用频率因素、修复性因素和装备使用和维修人员素质因素的变量取值等级, 可采用连续型变量, 也可采用离散型变量, 在离散型变量中经常使用的有好、中、差标度法和 1~9 标度法。

1.3 因素系数的确定^[4]

2 种模型各有特色, 但预测的准确程度只取决于各因素系数的准确与否。确定因素系数的方法有

很多: 层次分析法、因素分析法、多元线性回归分析法、人工神经网络法、粗糙集法等。以上各种方法各有优点和适用范围, 如层次分析法利用专家组打分来决策各因素的系数, 优点是简单易行, 不足之处是受专家组水平的限制较大; 因素分析法和多元线性回归法有计算简单规范的优点, 但准确程度又受数据量的影响; 人工神经网络法确定系数应用范围广、适应性强。但网络的训练需要较多的数据和大量的训练时间。防化装备种类、型号较多, 每种装备都有大量的零部件, 确定每一个零部件的模型必然带来很大的工作量, 行之有效的方法是将各种零部件按期属性分类, 在分类后取一个有代表性的确定因素系数。利用层次分析法确定乘法模型 $S = \pi_1 \pi_2 \pi_3 \pi_4 \pi_5 n F(t)$, 各因素系数, 如表 1~表 5。

表 1 环境影响系数

不同属性的配件	好	中	差
电子元器件	1	3	5
非电子元器件	1	1.5	2
金属件	1	1.2	1.5

表 2 敏感性系数

极易损坏	易损坏	不易损坏
1.5	1.2	1

表 3 使用频率系数

非正常使用	正常使用
2.0	1.0

表 4 使用频率系数

可修复零件	部分可修复零件	不可修复零件
0.2	0.5	1.0

表 5 使用人员素质影响系数

优秀	良好	及格	不及格
0.8	1.0	1.2	2.0

1.4 常用分布函数^[5]

基于蒙特卡罗法的防化装备维修器材消耗预测, 需要找出可更换单元零件的寿命分布。在可靠性分析中, 常用指数分布、正态分布和威布尔分布等作为可更换单元零件的寿命分布。

1.4.1 指数分布

设随机变量 T 服从指数分布, 故障概率密度函数为:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, t \geq 0, \lambda > 0$$

可靠度、不可靠度、故障率分别为:

$$R(t) = e^{-\lambda t}, F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \lambda(t) = \lambda (\text{常数})$$

$$\text{平均寿命为: } MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} d(-\lambda t) = \frac{1}{\lambda}.$$

指数分布的一个重要特性是无记忆性, 即产品工作 T_0 时刻后, 仍同新产品一样, 不影响未来工作寿命的长短。大部分的电子元器件都服从指数分布。用条件概率可以表示为:

$$R(t_0 + t | t_0) = \frac{e^{-\lambda(t_0+t)}}{e^{-\lambda t_0}} = e^{-\lambda t} = R(t)$$

1.4.2 正态分布

随机变量 T 的概率密度函数为:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right], \quad -\infty < t < +\infty$$

式中, $\mu, \sigma > 0$ 为常数, 则称 T 服从均值为 μ , 标准差为 σ 的正态分布或高斯分布, 记为 $T \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。正态分布的分布函数为:

$$F(t) = p(T \leq t) = p\left(\frac{T-\mu}{\sigma} \leq \frac{t-\mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right).$$

式中, $\phi(t)$ 为标准正态分布函数, 其值可在数学手册中查找, 也可利用数值计算得到。正态分布的可靠度、故障率、平均寿命分别为:

$$T(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right)$$

$$\lambda(t) = \phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right) / \varphi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$$

$$\text{其中, } \phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}; \text{ MTTF} = \mu.$$

正态分布的元器件故障产生的原因由许多微小差异量积累叠加而成, 一般适用于非金属的磨损型零件。

1.4.3 威布尔分布

两参数威布尔分布的概率密度函数为:

$$F(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}, \quad t \geq 0$$

$$\text{分布函数为: } F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m} \quad t \geq 0.$$

$$\text{其均值 } \mu \text{ 和方差 } \sigma^2 \text{ 分别为: } \mu = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right),$$

$$\sigma^2 = \eta^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right].$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为 Γ 函数, $m > 0$ 为形状参数, $\eta > 0$

为尺度参数。

一般形状参数 m 取不同的值, 概率密度函数曲线的形状不同, 所以威布尔函数有较好的拟合能力。例如 $m=1$ 时为指数分布, $m=3.43954$ 时密度函数图形对称, 十分接近正态分布等。尺度参数 η 越大, 则分布的分散程度越大。一般适用于故障原因由个别因素积累快速增加的金属类零件。其可靠度为:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$$

故障率为:

$$\lambda(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1}$$

显然, 在 $m < 1$ 时, 故障率递减; $m=1$ 时, 故障率为常数, 就是指数分布; $m > 1$ 时, 故障率递增, 说明随着时间的推移。由于一些微小的个别因素使得故障率快速增加, 平均寿命为:

$$MTTF = \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)$$

2 蒙特卡罗仿真

蒙特卡罗仿真方法模拟系统的运行状态和随时间变化的过程, 并通过对仿真运行过程的观察与统计, 得到被仿真系统的输出参数和基本特征, 以估计和推断系统的参数和特征。实施蒙特卡罗方法主要有 3 个步骤: 构造或描述概率过程; 实现从已知概率抽样; 建立各种估计量。

2.1 确定参数^[6]

确定各零、备件寿命的随机变量分布类型及其参数的方法可由同类备件寿命的历史数据经统计方法得到, 部分没有历史数据的零件可参照零件出厂说明, 环境、敏感性、使用频率和人员素质等。

2.2 确定仿真流程

某装备某系统 n 台在用装备 T 小时备件需求仿真流程如图 1。

3 实例分析

某防化装备某系统 8 640 h 零件需求仿真。某系统有水箱、铜管、阀门离心泵、水环泵和引水胶管 6 类零部件串联而成, 各部件故障模式分为可修复和不可修复 2 种, 都服从指数分布, 其参数如表 6。

为简化计算, 仿真系统的参照输入确定为 12 项, 仿真结果如表 7、表 8。

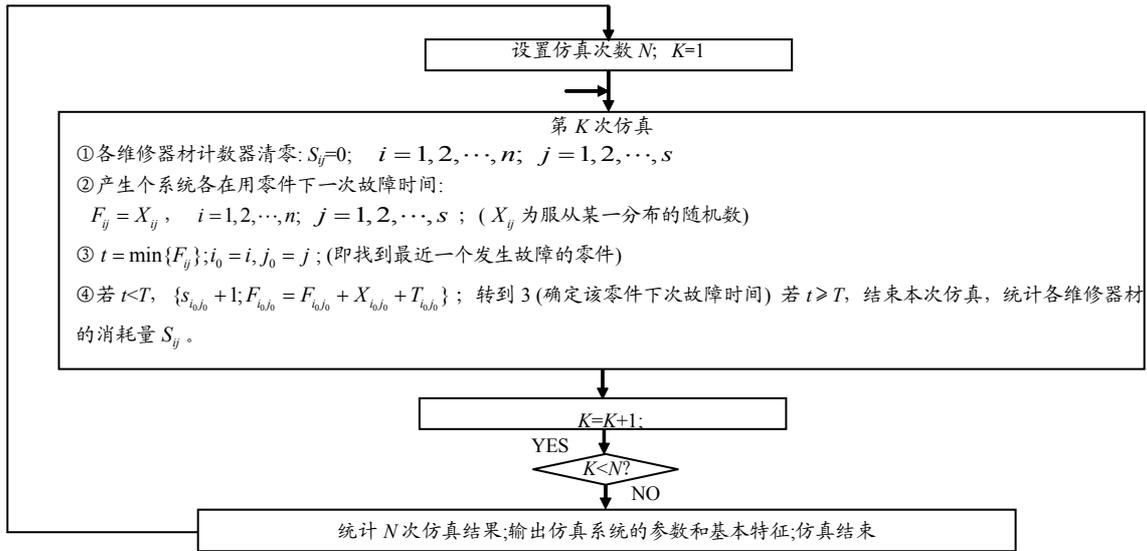


图 1 T 小时维修器材需求仿真流程图

表 6 某防化装备某系统零部件参数

名称	是否可修	故障分布参数指数 1/λ (h)	维修与换件时间 (h)	技工人数
水箱	不可修	4 000	0.33	1
铜管	可修	500	0.167	1
	不可修	1 000	0.33	1
阀门	可修	800	0.4	1
	不可修	1 600	0.33	1
离心泵	可修	100	2	2
	不可修	500	0.33	2
水环泵	可修	250	2	2
	不可修	500	0.33	2
胶管	不可修	1 000	0.33	1

表 7 维修次数、概率与累积概率的仿真结果

总维修时间平均值=87.9			
	维修次数	概率	累积概率
1	40~50	0.005 4	0.005 4
2	50~60	0.024 1	0.029 5
...
12	150~160	0.000 1	0.999 9
13	160~170	0.000 1	1.000 0

仿真结果表明: 基于蒙特卡罗法的防化装备维修器材的预测消耗量与历史消耗数据比较接近。

4 结束语

该方法对探索防化装备维修器材消耗的规律, 准确预测防化装备维修器材消耗量提供了一种较为有效的科学方法。对防化装备维修器材消耗进行预测, 对提高防化装备器材消耗量的预测水平, 为防化装备维修器材管理和决策人员提供更加科学、准确的辅助决策信息, 具有重要的实用价值。

参考文献:

表 8 各零件需求量、概率与累积概率的仿真结果

零件	需求量	概率 p	累积概率 F(x)
水箱	0	0.612 9	0.612 9
	1	0.298 4	0.911 3

铜管	5	0.000 2	0.612 9
	0	0.093 0	0.093 0
	1	0.358 6	0.452 6
阀门	7	0.000 1	1.000 0
	0	0.306 3	0.306 3
	1	0.460 6	0.766 9
离心泵	4	0.003 6	1.000 0
	1	0.005 2	0.005 2
	2	0.112 7	0.117 9
水环泵	7	0.000 8	1.000 0
	0	0.003 9	0.003 9
	1	0.047 6	0.051 5
胶管	9	0.000 8	1.000 0
	1	0.368 1	0.740 0
	2	0.183 7	0.923 7
	7	0.000 1	1.000 0

- [1] 曹小平, 路广安. 装备维修器材保障[M]. 北京: 国防大学出版社, 2005.
- [2] 田保社. 武器维修器材供应效果评估方法研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2003.
- [3] 梁海斌, 高崎. 军械维修器材管理学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 甄伟, 徐廷学, 王志坤. 军用飞机随行备件量需求分析[J]. 军用标准化, 2005, 98(1): 46-48.
- [5] 齐欢, 王小平. 系统建模与仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 王亚彬, 贾希胜, 康建设. 仿真技术在维修资源预测中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2005, 22(2): 28-29.