

# 面向任务的备件携行量仿真优化方法

高大化<sup>1</sup>, 马月娜<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>, 郭波<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学, 陕西 西安 710051;

2. 国防科技大学信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)



**摘要:** 在多阶段任务系统中, 可修部件的寿命服从一般分布、维修时间也服从一般分布的备件携行量优化问题很难利用解析方法来解决。采用仿真的方法, 建立可修部件寿命和维修时间均服从一般分布的多阶段任务系统的仿真模型, 给出了最优备件携行量的仿真计算方法, 讨论了如何确定维修组的数量。并且通过实例检验了这种仿真方法的适用性。最后利用一个指数分布实例对解析方法和仿真方法计算出的结果进行比较, 从而对所提出的仿真方法进行了检验。

**关键词:** 备件携行量; 仿真; 一般分布; 多阶段任务

**中图分类号:** TP 391.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-5468 (2005) 03-0010-05

## Simulation-based method of optimization quantity of spare parts in oriented-mission

GAO Da-Hua<sup>1</sup>, MA Yue-na<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, GUO Bo<sup>2</sup>

(1. Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In some phased-mission system the life of working units and their repairing time follow general distribution. It is difficult to calculate the optimization quantity of spare parts with analysable method. A simulation-based model is applied to describing the phased-mission system with multi-repairer. Algorithms for calculation of the optimization quantity of spare parts are provided. To examine the applicability of the method, some examples are presented in this paper. Finally, the optimization quantity of spare parts following exponential distribution are calculated with both this method and analysable method. The two results fit well.

**Key words:** quantity of spare parts; simulation; general distribution; phased-mission

### 1 引言

备件是综合保障资源中不可缺少的组成部分, 是影响装备在任务期间维修保障能力的重要因素, 在任务执行之前, 如何确定备件携行量是一个关

键的问题。近年来, 许多学者在这方面进行研究, 如文献 [1] 介绍了单阶段任务条件下部件寿命服从指数分布的备件携行量计算方法; 文献 [2] 给出了其它几种特殊分布的计算方法, 但都是针对单阶段任务条件下部件不可修情况的; 文献 [3]

收稿日期: 2004-12-03      修回日期: 2005-04-25

作者简介: 高大化 (1979-), 男, 河南开封人, 空军工程大学理学院讲师, 硕士, 从事系统集成、复杂系统建模与仿真的教学与研究。

给出了一种基于 BDD 的多阶段任务备件携行量计算方法，但仍是仅研究了指数分布、且任务期间部件不可修的情况。不难发现，现有的研究还不是系统，没有建立全面的、针对多阶段任务的备件携行量优化模型。

由于部件故障后是否维修取决于是否影响任务进程，所以必须描述装备任务与部件之间的关系，而任务过程在不同的阶段所对应的部件可能也不同，可以将装备任务分成多个连续的阶段任务，称为多阶段任务。在多阶段任务中，可修部件的寿命服从一般分布、维修时间也服从一般分布的备件携行量优化问题大量存在。解决这类问题，仿真方法是一种重要的手段，在某些情况下，甚至是唯一有效的方法。这是因为，对于部件寿命、维修时间服从非指数分布的非马尔科夫可修系统，其在任意  $T$  时刻后的概率规律均与  $T$  时刻前的系统历史有关，不能使用马尔科夫过程的相关工具进行分析，只能采用仿真方法来解决。

本文给出了求解这类问题的 Monte Carlo 计算方法，该方法通过仿真系统的工作过程，然后对仿真结果进行统计分析，从而获得备件的最优携行量。该方法具有普遍的适用性。

## 2 系统模型描述

多阶段任务条件下的最优备件携行量问题可以作如下描述：某复杂任务可以划分为  $L$  个阶段，各个阶段的任务时间为  $T_1, T_2, \dots, T_l, \dots, T_L$ ，其中表示第  $l$  阶段的任务时间。任务期间一共使用  $N$  个同种可修部件，它们之间可以互相更换。任务过程在不同阶段对应的部件可能有所不同，设在第  $l$  个阶段任务中有  $n_l$  个部件工作，它们是  $\{i_1^{(l)}, i_2^{(l)}, \dots, i_{n_l}^{(l)}\}$ 。在整个任务期间共有  $M$  个维修组（包括维修工具、检测设备、维修人员等）对故障部件进行维修。当那些正在工作的部件出现故障时，它们立刻被可用备件替换下来，由维修组进行维修。这些用于替换故障部件的可用备件有两个来源：1) 由维修工修复的部件；2) 在任务前就确定的携行备件。由于部件的寿命并不服从指

数分布，并不是“修复如新”，因此，维修组只修复那些值得修的故障件。

问题：在满足确定的任务期间备件保障率条件下，如何得到最优的备件携行量  $X$ 。

这里，任务期间备件保障率是指在装备执行任务期间，当部件失效后，维修过程需要备件更换时能够获得相应数量的备件的概率。上述系统模型如图 1 所示。

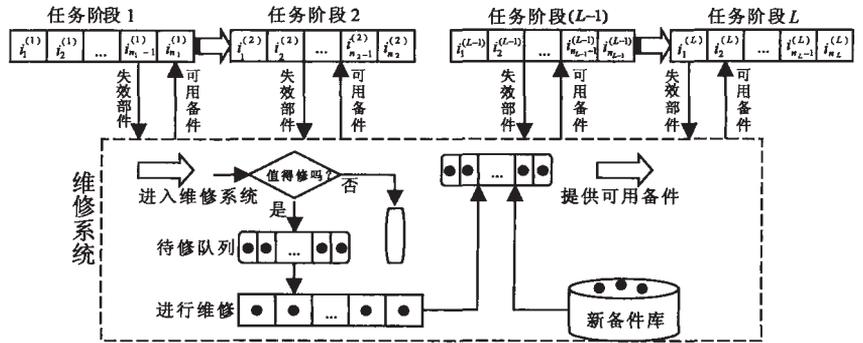


图 1 系统模型

为了便于求解，可以假设：备件在存放期内无失效；多个部件失效为独立事件；在同一时刻不会发生多个事件（故障事件、修复事件）。

## 3 模型的仿真与分析

### 3.1 剩余分布抽样

实际情况中，假设工作部件的寿命服从非指数分布，故障部件的维修时间也服从非指数分布是合理的，因此，被修复的故障件并不是“修复如新”的，在仿真中面临着剩余分布抽样的问题：设部件已使用  $t_1$  时间，则在下一次使用中其剩余寿命  $t_2$ ，按如下分布进行抽样<sup>[4-5]</sup>：

$$F_{t_2}(t+t_1) = \frac{F(t+t_1) - F(t_1)}{1 - F(t_1)}$$

剩余分布抽样时一般分两种情况，第一种是  $F_{t_2}(t+t_1)$  有解析表达式时，可以直接用抽样方法进行；第二种是  $F_{t_2}(t+t_1)$ ，没有解析表达式，这时必须求解非线性代数方程<sup>[4]</sup>。

### 3.2 仿真算法

采用事件调度法对系统进行仿真，其步骤如下：

```
FOR 仿真次数 k=1 TO 仿真总次数 DO
    任务总时间  $T = \sum_{i=1}^L T_i$  ;
```

```

任务阶段数  $l=1$ ；
对第  $l$  阶段工作的部件进行随机抽样，得出它们各自的故障时间，将故障事件加入事件表；
第  $k$  次仿真所用的备件数  $X_k=0$ ；
仿真时钟  $t=0$ ；
WHILE ( $t \leq T$ ) 执行：
    操作事件表：
        取出最早事件的发生时间  $t^*$ ，
        IF ( $t^* > \sum_{i=1}^l T_i$ )
            设置其事件类型为 1；
             $t = \sum_{i=1}^l T_i$ ；
        ELSE
            IF (事件为工作部件故障)
                设置其事件类型为 2；
            ELSE
                事件必为故障部件修复，设置其事件类型为 3；
            ENDIF
             $t = t + t^*$ ；
        ENDIF
    CASE：事件类型
        事件类型为 1：
             $l = l + 1$ ；
            设置  $l$  阶段的初始状态；
            更新事件表；
            事件类型为 2：
                对故障部件进行剩余分布随机抽样得剩余寿命，判断其是否值得修；
                IF (值得修)
                    IF (存在空闲维修组)
                        直接进行维修，并对其修复时间进行随机抽样；
                    ELSE
                        更新事件表
                    ENDIF
                    加入待修队列等待；
                ENDIF
            ELSE
                丢弃该部件；
        ENDIF

```

```

IF (可用备件队列不为空)
    将可用备件队列的第一个备件换上开始工作，对其进行剩余分布随机抽样
    得下次故障时间；
ELSE
    从新备件池中取出新备件换上开始工作，对其进行随机抽样得故障时间；
    第  $k$  次仿真所用的备件数  $X_k = X_{k+1}$ ；
ENDIF
更新事件表；
事件类型为 3：
    将修复备件加入可用备件队列，给出其剩余分布；
    IF (待修队列非空)
        将第一个待修备件进行维修；并对其修复时间进行随机抽样；
        更新事件表；
    ENDIF
ENDIF
END CASE
END WHILE
ENDFOR

```



### 3.3 结果分析

#### 3.3.1 计算最优携行量的 Monte Carlo 方法

由于部件故障时间和维修时间都是随机的，因而最优储备量也是一个随机变量。对于第  $k$  次仿真，在完成的情况下都对一个备件携行量  $X_k$ 。于是得到一组最优携行量的样本观察量。删除这组样本中的重复值，然后按照从小到大的顺序排列得  $X_{i_1}, X_{i_2}, \dots, X_{i_{k-1}}, X_{i_k}$ ，如表 1 所示。

表 1 排列后的观察量

样本观察量	仿真中出现的次数
$X_{i_1}$	$S_1$
$X_{i_2}$	$S_2$
...	...
$X_{i_{k-1}}$	$S_{k-1}$
$X_{i_k}$	$S_k$

其估计分布函数为：

$$F(X) = \begin{cases} 0, & X < X_{i_1} \\ \sum_{i=1}^j S_i / \sum_{i=1}^K S_i, & X_{i_j} \leq X < X_{i_{j+1}} \\ 1, & X_{i_k} \leq X \end{cases}$$

当给定备件保障率  $P$  时，所求的最优备件携行量为：

$$S^* = S_j, \left( \sum_{i=1}^j S_i / \sum_{i=1}^k S_i \leq P < \sum_{i=1}^{j+1} S_i / \sum_{i=1}^k S_i \right)$$

### 3.3.2 维修组数量分析

此处维修组是个广泛的概念，包括维修人员、维修工具、检测工具等。显然，维修组的数量与备件携行量有着紧密的联系，一般来讲，维修组越多，最优备件携行量越少；维修组越少，最优备件携行量就越多。因此，在执行任务前确定维修组的数量也具有相当重要的意义。通过上述的仿真方法，可以给出维修组数量与最优备件携行量之间的关系，进而确定出维修组的数量。

当给定不同维修组数量的时候，可以用上述方法分别确定最优备件携行量，如得表 2 所示。

表 2 维修组数量与最优备件携行量之间的关系

维修工数量	最优备件携行量
1	$S^*_1$
2	$S^*_2$
...	...
$m-1$	$S^*_{m-1}$
$m$	$S^*_m$

当维修组的数量增加却不能显著地减少最优备件携行量时，就可以确定当前维修工数量为最佳维修组数量。即维修组数量为：

$$m^* = j, (S^*_{j+1} - S^*_j < e, e \text{ 为确定值})$$

## 4 计算实例

某石油勘探船用到某部件 15 个，有 2 个维修组。部件寿命服从 Weibull 分布，分布参数  $a=1.0$ 、 $\lambda=0.004/h$ ，维修时间服从  $h$  分布，分布参数  $a=2.5$ 、 $\lambda=0.006/h$ 。该舰艇执行某 3 阶段任务，第 1 阶段出海 720h，15 个部件中前 12 个必须正常工作；第 2 阶段海上作业 2 160h，15 个部件必须全部正常工作；第 3 阶段返航，耗时 1 080h，只需前 12 个部件正常工作。确定在备件保障率不低于 0.60、0.70、0.80、0.90、0.95 条件下，这种部件的最优

备件携行量。利用本文的方法可以得到如表 3 所示的关系。

表 3 备件保障率与最优备件携行量之间的关系

备件保障率 / %	最优备件携行量
0.60	126
0.70	132
0.80	136
0.90	145
0.95	151
0.99	182

接下来需要对维修组的数量进行分析，在备件保障率为 0.80 的条件下，取定维修组数量与最优备件携行量之间的关系，如表 4 所示。

表 4 维修组数量与最优备件携行量关系

维修组数量	最优备件携行量
0	299
1	189
2	136
3	121
4	118
5	115

可以看出在维修组为 3、4、5 时，最优备件携行量并没有明显地减少，因此，维修组数量以 3 组为好，此时的最优备件携行量为 121。

## 5 模型与算法的检验

对于单阶段任务中部件寿命和维修时间均为指数分布的系统，其最优备件携行量可以用解析方法计算<sup>[6]</sup>。可将单阶段任务人为地划分为多阶段任务，此时用本文的仿真算法计算指数分布系统的最优备件携行量，然后与利用解析法计算的结果进行比较，即可验证本文方法的正确性。

文献 [6] 给出了用解析方法计算最优备件携行量的结果，可以利用这个算例来检验本文仿真模型的适用性。

某计算机系统配置了 100 台终端和一个维修组，终端寿命服从  $\lambda=0.000 2 h$  的指数分布，维修组的修复率为  $\mu=0.025 h$ ，某任务要求该系统连续工作 6 000 h，求在备件保障率不低于 0.50、0.60、0.70、0.80、0.90、0.99 时的最优备件携行量。将

这 6 000 h 的任务人为地分为 3 个阶段，每个阶段 2 000 h，各阶段均有 100 台终端全工作。通过计算得到如下对比结果，如表 5 所示。

表 5 两种方法计算结果对比

备件保障率 / %	解析方法	仿真方法
0.05	10	10
0.60	11	12
0.70	13	13
0.80	15	14
0.90	18	38
0.99	38	37

如图 2 所示，可以看出这两种方法符合的比较好，从而验证了本文仿真模型的适用性。

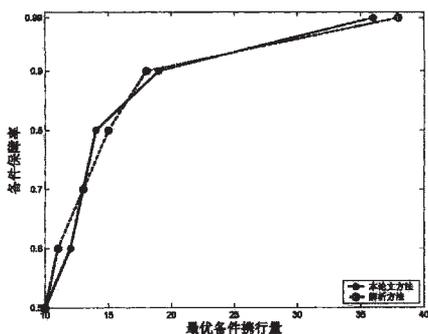


图 2 验证本文仿真模型的适用性

## 6 结束语

在多阶段任务系统中，可修部件的寿命服从一般分布、维修时间也服从一般分布的备件携行量优化问题很难利用解析方法来求解，为了解决这类问题，本文采用了仿真方法进行计算，并且通过与解析方法的计算结果进行比较验证了该方法的适用性。这种方法对于研究更加复杂的任务（如任务之间有串并联关系）的备件携行量问题也有一定的借鉴作用。

### 参考文献：

- [1] 郭波, 武小悦. 系统可靠性分析 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [2] 李金国, 丁红兵. 备件需求量计算模型分析 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2000, 6 (3): 11-14.
- [3] 张涛, 郭波, 谭跃进. 基于 BDD 的面向任务备件需求量预测算法 [J]. 系统工程, 2004 (增刊).
- [4] 肖刚, 吴俊. 剩余分布抽样及其在非马尔可夫可修系统可靠性数字仿真中的应用 [J]. 强度与环境, 1997, 3: 58-65.
- [5] 周江华, 胡峰, 孙国基. 剩余寿命抽样的罗比塔方法及其在可靠性数字仿真中的应用 [J]. 航空学报, 2001, 11 (6): 513-516.
- [6] 肖刚, 何斌. 求解非指数分布可修备件最优储备量的随机模拟方法 [J]. 系统工程理论与实践, 1998, 5: 64-67.



信息与动态

## 联想亮出中国安全“第一芯”

联想集团对外发布了中国第一款自主研发的安全芯片“恒智”。其重大价值在于能为个人计算机提供从软件到硬件级的、全方位的单机安全保护。预装该安全芯片的电脑，在系统遭受破坏时，能通过软件的配合自动修复、赋予唯一主机平台身份识别，使之类似于人的指纹识别、能防止加密使用的密钥被破译或黑客攻击。预测到 2007 年，全球超过 70 % 的 PC 产品将配备安全芯片，它甚至有可能成为未来计算机的标准配置之一。

但目前国际上能够设计安全芯片的企业屈指可数，而在仅有的几个供应商中，只有联想能提供全套技术和产品，这标志着联想已经拥有了芯片级的核心研发实力。

据悉，联想将在今年内正式推出预装“恒智”安全芯片的 PC 机，可以为我国政府、军队、科研技术机构等信息安全敏感部门，提供由中国人自主研发与控制、完全可信的 PC 计算终端。

(本刊讯)