第 36 卷 第 4 期 计 算 机 工 程 2010 年 2 月
Vol.36 No.4 Computer Engineering February 2010
·开发研究与设计技术· 文章编号：1000—3428(2010)04—0253—03 文献标识码：A 中图分类号：E917

基于备件方案的多态 PMS 可靠性仿真模型

刘 锋，姚 路，钟小军
(海军工程大学管理工程系，武汉 430033)

摘 要：针对多阶段任务系统(PMS)的备件问题，构建基于 Monte Carlo 方法的仿真模型，给出具体的算法流程。该模型以多态结构函数为基本输入，产生等价于基本设备寿命实现值的随机数，代入仿真模型，经过逻辑运算和统计分析得到系统的可靠度，为多态 PMS 的备件决策提供依据。应用 Matlab 软件进行仿真实验分析，结果表明该方法具有较高的仿真精度。
关键词：多阶段任务系统；备件；蒙特卡罗方法

Reliability Simulation Model for Multi-mode Phased Mission Systems Based on Spare Parts Scheme

LIU Feng, YAO Lu, ZHONG Xiao-jun
(Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

【Abstract】Aiming at the spare parts of Phased Mission Systems(PMS), the simulation model is established based on the Monte Carlo method, and the detailed algorithm process is presented. The model is input with multi-mode structure function, generates the random sequence corresponding to the basic component life implementation value by using Monte Carlo method, and puts this sequence to the system stimulation model to get system reliability through logic operation and statistical analysis. Using the model, it can make a decision on the quantity of spare parts for PMS. An example by Matlab software shows the model is of highly simulation precision.
【Key words】Phased Mission Systems(PMS); spare parts; Monte Carlo method

1 概述

多阶段任务系统(Phased Mission Systems, PMS)是指系统在连续完成多个阶段任务过程中，任务成功与设备的关系不断变化的系统。如执行远太空飞船任务的离子推进器系统，其典型的任务阶段包括发射、升空、轨道运行、再入、下降和着陆。由于在不同的阶段系统需要的推进力不同，因此设备行为、阶段成功准则和系统运行配置也不一样。多态 PMS 是指系统设备带有多模式失效的 PMS，也称为多阶段任务多态系统。离子推进器系统就是一个典型的多阶段任务多态系统，其典型结构包括一个推进能量单元、2 个离子发动机和 2 个推进阀。推进能量单元有 3 种失效模式：启动失效，运行失效和关闭失效；每个发动机有 2 种失效模式：启动失效和运行失效；每个推进阀有 2 种失效模式：启动失效和关闭失效。

目前，多阶段任务多态系统方面主要有文献[1]提出的一种基于 DEP-BDD 的用于解决多阶段任务多态系统的解析方法，但没有考虑备件问题。在备件决策方面，文献[2]给出了存在冷备份冗余的 k/N 系统的多阶段任务可靠度模型；文献[3]研究了一种通用的在给定备件组合方案下的多阶段任务成功性评估模型；文献[4]给出了任意任务结构函数变化的多阶段系统的备件保障度模型。然而，这些研究都没有综合考虑设备多模式失效和备件对 PMS 进行可靠性建模和分析。本文对多阶段任务多态系统的备件问题进行研究，从而为系统的备件决策提供依据和支持。

2 问题描述

参考系统结构函数的概念，本文引入多态结构函数和最小割集的概念，把每个阶段任务失败与设备关系定义为多态结构函数 f。设备有多种失效模式，用 C_{ij} 表示，其中，C 表示设备；i 表示失效模式；j 表示阶段。举例说明，假设某系统有 3 个设备 A, B, C，每个设备都有 2 种失效模式，j 阶段的多态结构函数为 $f_j = A_{1j}B_{2j} + A_{2j}C_{1j} + B_{1j}C_{2j}$，$j$ 阶段的最小割集为 $\{A_1, B_2\}$, $\{A_2, C_1\}$, $\{B_2, C_1\}$，任何割集的失效都会导致阶段任务失败。

问题描述：系统执行多个阶段任务，阶段任务之间不可跳跃，在任务期间所有设备都工作，当设备失效后影响任务顺利进行时才更换备件。设备有多种失效模式，同一时刻设备不能处于失效、工作或多种失效模式状态；设备从正常状态开始工作，一旦失效，不可修复。不同失效模式有不同的失效分布函数，不同阶段设备的失效分布函数也不一样。设备失效分布函数可为指数分布以外的其他分布。备件可进行热更换，即系统不需要停止工作就可以更换备件，更换时间忽略。系统需要连续完成 n 个阶段任务，各阶段任务的工作时间分别为 $T\_phase\_1, T\_phase\_2, \cdots, T\_phase\_n$，任务结构函数分别为 $f_1, f_1, \cdots, f_n$，求解在给定初始备件数 m 的情况下系统完成这次多阶段任务时的可靠度。

3 仿真模型的建立及算法的实现

3.1 基于 Monte Carlo 的可靠性仿真方法

Monte Carlo 方法[5]称为概率模拟方法，也称为随机抽样技术或统计试验方法。它是通过随机变量的统计试验、随机

基金项目：国家部委“十一五”预研基金资助项目
作者简介：刘 锋(1985－)，男，硕士研究生，主研方向：装备可靠性管理；姚 路，讲师、硕士；钟小军，副教授、硕士
收稿日期：2009-08-12 **E-mail：**haigongliufeng@163.com

模拟求解工程技术问题的一个近似解。该方法解决问题的基本思想是：(1)建立一个与所求解有关的概率模型，使所求解就是所建立模型的概率分布或数学期望；(2)对该模型进行随机变量抽样观察，即产生随机变量；(3)用算术均值作为所求解的近似估计值。

本文采用基于 Monte Carlo 法的可靠性仿真，当其中包括寿命为非指数分布或任意分布的设备或系统故障树规模很大时，用可靠性仿真求解系统可靠性十分有效。尤其是形成系列化的故障树可靠性仿真软件之后，一般性的问题都可以很方便地利用这些软件分析其可靠性。下文介绍如何用 Monte Carlo 法对多阶段任务多态系统备件问题进行可靠性分析。

3.2　备件方案下的多态 PMS 仿真算法流程

根据多态结构函数，运用 Monte Carlo 法[5]进行系统仿真运行，最后对可靠度估计值进行统计，这是编制计算机仿真算法流程图的基本思路，其基本算法流程见图 1。

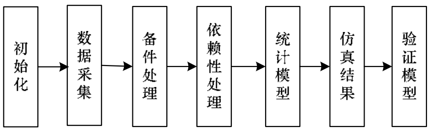

图 1　基本算法流程

该算法模型将问题描述与定义、系统结构函数确定、仿真初始值设置、仿真策略制定等步骤整合在初始化模块中，将随机数产生和随机变量抽样整合在数据采集模块中，同时，增加了误差和算法验证，对仿真结果进行误差分析，对仿真算法进行精度和效率分析。

变量说明如下：

N_s：最大仿真次数；

j_s：阶段数；

m：设备 C 的备件数；

C_{ij}=1：设备 C 在阶段 j 以 i 模式失效；

C_{ij}=0：设备 C 在阶段 j 没有以 i 模式失效，可能以其他模式失效或者正常工作；

$F_{ij}(t)$：设备在阶段 j 以 i 模式失效的分布函数；

t_{ij}：设备在阶段 j 以 i 模式失效下的时间抽样值序列；

η_{ij}：设备在阶段 j 以 i 模式失效下的随机数序列；

T_phase_j：j 阶段的持续时间；

f_j：j 阶段系统多态结构函数；

$\boldsymbol{T}_j$：j 阶段设备各单元各模式失效时间抽样值矩阵；

max_sets：第 N 次仿真时割集最大的失效时间序列；

min_system：第 N 次仿真时系统失效时间；

s：任务失败次数。

输入 $N_s, j_s, f_j, F_{ij}(t), m_C$

输出 系统可靠度

(1)初始化

系统初始化主要完成对输入参数的赋值。

(2)数据采集

1)根据设备和模式的不同，产生服从[0, 1]均匀分布阶段随机数序列 η_{ij}。

2)设备失效时间抽样

$$t_{ij}=F_{ij}^{-1}(\eta_{ij}) \tag{1}$$

其中，$F_{ij}(t)$是设备 C 在阶段 j 以 i 模式失效的失效分布函数；$F_{ij}^{-1}(t)$ 为其反函数，则抽样值为 $t_{ij}^{(1)},t_{ij}^{(2)},\cdots,t_{ij}^{(N_s)}$。

在 j 阶段，所有设备各模式的抽样值构成了抽样值矩阵 $\boldsymbol{T}_j$。

(3)备件处理

备件处理模块的基本思想是：在第 N 次仿真循环过程中，当设备 C 在 j 阶段内失效时，用备件在各模式下的失效时间叠加到设备 C 各模式下的原始失效时间体现备件消耗过程，表示为 $t_{ij}=t_{ij}+t_{ij}^{'}$ (i 为模式数)。一次仿真中止的条件是设备 C 的失效时间 t_{ij} 大于阶段持续时间或备件用完，仿真全部结束的判断条件为仿真达到最大仿真次数。备件处理流程见图 2。

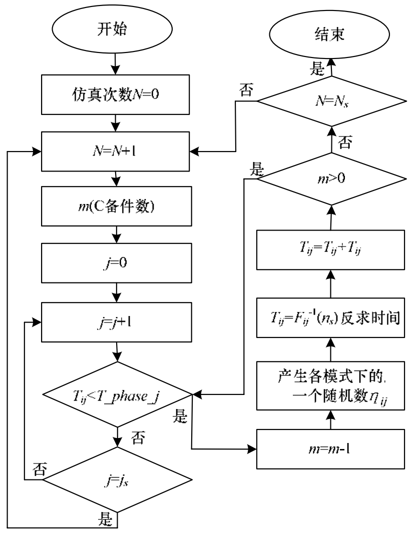

图 2　备件处理流程

(4)依赖性处理

多阶段任务多态系统的依赖性主要包括 2 个方面：多模式失效依赖和阶段依赖。依赖性处理的流程如图 3 所示。

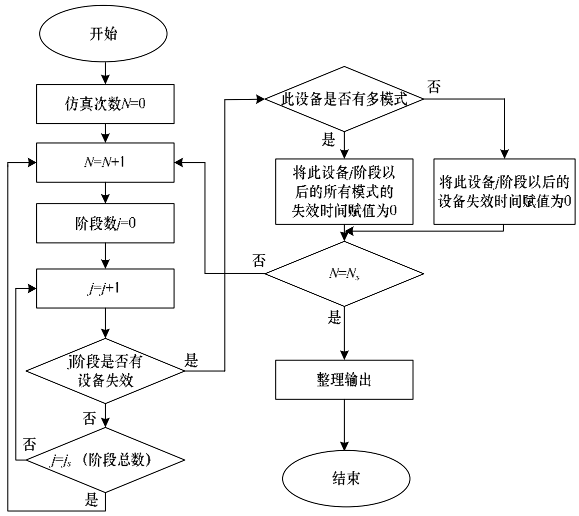

图 3　依赖性处理流程

根据本文的假设，所有设备不可修复。因此，如果带有多模式失效的设备 C 以任何一种模式在 j 阶段失效，即 t_{ij}<T_phase_j,则设备 C 在 j+1 阶段之后的所有阶段(包括 j 阶段)的失效时间抽样值赋值为 0，包括设备 C 各个模式的失效时间抽样值。通过抽样时间的赋值解决了阶段依赖性和模式依赖性，因为如果设备 C 以任何一种模式失效，从失效时刻起，设备 C 停止工作，下阶段设备继续保持失效状态。

(5)统计模型

1)统计割集失效时间

假设在第 N 次仿真第 j 阶段,系统内部有 k 个最小割集,每个割集中有 q 个基本部件。取 t_q 个抽样时间代入第 i 个割集中，得

$$max\_sets(i)=\max(t_1,t_1,\cdots,t_q),\ i=1,2,\cdots,k \tag{2}$$

2)统计各阶段系统失效时间

在第 N 次仿真第 j 阶段时,在得到阶段割集失效时间序列 max_sets 的前提下，比较所有割集失效时间，取最小值即为此阶段系统失效时间：

$$min\_system=\min(max\_sets) \tag{3}$$

3)统计任务失败次数 s(s 赋初值为 0)

在第 N 次仿真时，依次比较各个阶段系统失效时间：

$$s=\begin{cases} s+1 & min\_system \leq T\_phase\_j \\ s & min\_system > T\_phase\_j \end{cases} \tag{4}$$

通过仿真运行，得到最后的任务失败次数 s。

统计模型算法流程如图 4 所示。

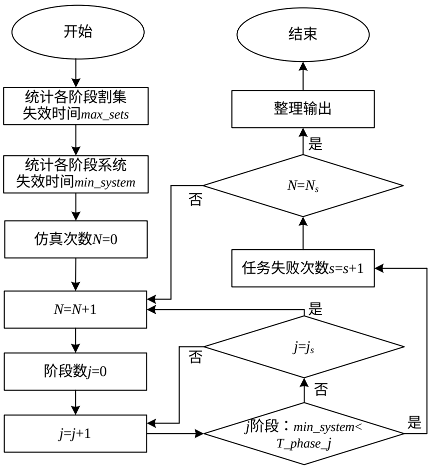

图 4　统计模型算法流程

(6)仿真结果

在给定备件数的情况下，计算系统执行整个任务的可靠度 R：

$$R=1-s/N_S \tag{5}$$

(7)验证模型

多阶段问题由于阶段之间的依赖性，其可靠性分析比较困难，并且这种依赖性也影响了仿真结果精度。在对 PMS 文献中的相关案例进行仿真求解的基础上，提出了阶段随机数的产生原则，该原则能够有效提高仿真结果精度。阶段随机数产生原则：随机数与阶段结构有关，如果存在阶段系统结构一样，表现为多态结构函数相同，则各个阶段随机数矩阵 $\boldsymbol{T}_j$ 一样，否则，阶段不同，需要按阶段重新产生随机数。验证模型主要考虑算法有效性和复杂度。算法有效性是通过调整仿真时的输入参数实现的，基本过程如下：

1)将备件数取足够大从而使仿真结果趋于稳定，仿真结果为 R。

2)进行统计处理时，认为带有备件的设备永不失效，即不考虑用割集中带有备件的设备来求解 min_system，仿真结果为 R^*。

3)对比 R 与 R^*，如果吻合，则仿真模型合理可行。

算法复杂度主要考虑状态空间爆炸问题，由于仿真中的状态变量为系统各设备数的所有模式数，因此不存在状态变量呈指数规模增长的问题。

4　案例分析

本文对文献[1]中的离子推进器系统案例进行仿真分析，仿真环境为 2.8 GHz 奔腾 4，内存 2 GB。根据可靠性仿真模型的算法步骤，利用 Matlab 软件编译仿真程序并仿真运行。

仿真输入为

N_s=10 000, j_s=2

$f_1 = P_{1,1} \pm P_{2,1} \pm P_{3,1} \pm A_{1,1} * B_{1,1} \pm A_{1,1} * B_{2,1} \pm A_{1,1} * W_{1,1} \pm A_{2,1} * B_{1,1} + A_{2,1} * B_{2,1} + A_{2,1} * W_{1,1} + V_{1,1} * B_{1,1} + V_{1,1} * B_{2,1} + V_{1,1} * W_{1,1} + V_{2,1} + V_{3,1} + W_{2,1} + W_{3,1}$

$f_2 = P_{1,2} + P_{2,2} + P_{3,2} + A_{1,2} * B_{1,2} + A_{1,2} * B_{2,2} + A_{1,2} * W_{1,2} + A_{2,2} * B_{1,2} + A_{2,2} * B_{2,2} + A_{2,2} * W_{1,2} + V_{1,2} * B_{1,2} + V_{1,2} * B_{2,2} + V_{1,2} * W_{1,2} + V_{2,2} + V_{3,2} + W_{2,2} + W_{3,2}$

T_phase_1=100 h, T_phase_2=50 h

系统各设备多模式的失效时间服从负指数分布，失效率如表 1 所示。

表 1　设备在多模式下的失效率

模式	失效率	
	阶段 1	阶段 2
P_1	1×10^{-4}	2×10^{-4}
P_2	1×10^{-6}	2×10^{-6}
P_3	1×10^{-5}	2×10^{-5}
A_1, B_1	5×10^{-5}	4×10^{-5}
A_2, B_2	2×10^{-5}	3×10^{-5}
V_1, W_1	3×10^{-4}	4×10^{-4}
V_2, W_2	3×10^{-4}	4×10^{-4}
V_3, W_3	5×10^{-5}	6×10^{-5}

设备 V 的备件数为 m_V，设备 W 的备件数为 m_W，假设 $m_V=m_W$，仿真结果如表 2 所示。

表 2　备件数与系统可靠度关系

$M_v(m_w)$	0	1	2	3	4	5	6
R	0.866	0.941	0.988	0.989	0.990	0.989	0.989

根据表 2 中的数据绘出可靠度与备件数关系曲线，见图 5。

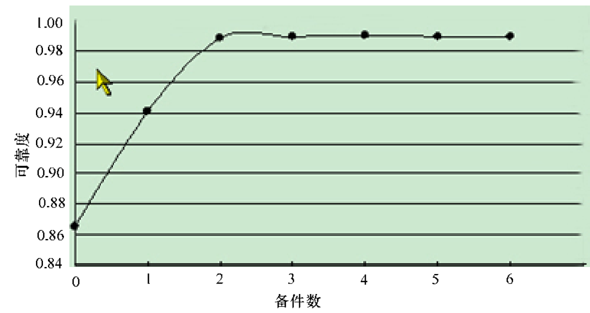

图 5　系统可靠度与备件数仿真关系

通过分析可以得出 4 点结论：

(1)当设备 V 和 W 的备件数为 0 时，仿真结果为 0.866；文献[5]中的解析算法的结果为 0.867 061 995 4。相对误差为 0.068 8%，可知，仿真结果吻合良好。

(2)在设备 V 和 W 的备件数超过 2 时，曲线趋于稳定，说明各携带 2 套设备的 V 和 W,基本上可以保证任务的完成。

(3)在不考虑备件即，假设 $m_V=m_W$=0 同时认为 V 和 W 无失效的情况下，对离子推进器系统进行仿真，仿真可靠度结果为 0.988。考虑设备 V 和 W 的备件且备件数足够大时，仿真结果趋于 0.989。可以看出，两者的仿真结果非常接近，而 2 种情况对于任务来说，意义相同，说明仿真过程是合理有效的。

(下转第 258 页)