

基于 Extend 的多态 PMS 仿真模型

杨建军, 杨 晶, 刘 锋, 黎 放

(海军工程大学管理工程系, 武汉 430033)

摘 要: 针对现有解决多态多阶段任务系统(PMS)的方法存在过程复杂、缺乏统一排序的问题, 以最小割集为基础, 提出基于 Extend 的多态 PMS 仿真模型。通过结构函数表达各阶段的逻辑关系, 在已知基本设备失效分布函数的情况下, 利用抽样统计思想处理多态 PMS 中的阶段依赖和模式依赖关系。相比 DEP-BDD 解析算法, 应用该模型求解 PMS 能在保证可靠度误差较小、稳定性较好的基础上, 使建模分析过程更简单。

关键词: 可靠性; 多阶段任务系统; Extend 仿真

Multi-mode PMS Simulation Model Based on Extend

YANG Jian-jun, YANG Jing, LIU Feng, LI Fang

(Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

【Abstract】 Aiming at the problems of complex process, lacking unified sort in existing multi-mode Phased Mission System(PMS), based on minimal cut set, this paper presents a multi-mode PMS simulation model based on Extend. Under the condition knowing basic equipment failure distribution function, it expresses logical relation of various phases through structure function, and deals with the relation of phases dependency and modes dependency relation by utilizing the idea of statistical sampling. It can make modeling analytical process more simple based on ensuring small and stable of reliability by using this model to solve PMS than DEP-BDD parse algorithm.

【Key words】 reliability; Phased Mission System(PMS); Extend simulation

1 概述

目前, 对文献[1]提出的多阶段任务系统(Phased Mission System, PMS)的研究主要有 2 类: 基于状态空间的方法^[2]和组合法^[3]。PMS 是指系统中设备存在多种失效模式^[4], 且失效模式之间相互依赖, 增加了问题分析的复杂性。多态多阶段任务系统是指设备带有多模式失效的多阶段任务系统。文献[5]提出一种基于 DEP-BDD 的用于解决多态 PMS 问题的解析算法, 但是该算法在实际应用中还存在以下缺陷: (1)在对 BDD 图编程求解之前需要进行多项预处理; (2)变量顺序对产生的 BDD 规模有较大影响。本文在仿真平台 Extend 上建立图形化仿真模型对多态 PMS 问题进行仿真求解, 为解决该问题提供了一种可行的方法。

2 问题描述

多阶段任务多态系统的应用很广泛, 如航天飞机的离子推进系统是其中一个典型的例子, 离子推进器系统的结构见图 1。

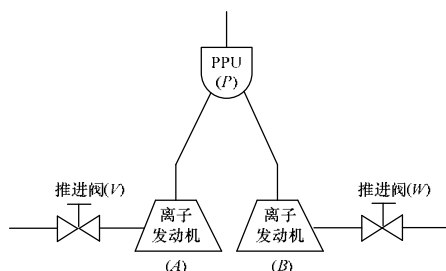


图 1 离子推进器系统结构

在图 1 中, PPU 为外围处理机; A、B 为 2 个离子发动机;

V、W 为 2 个推进阀。

整个离子推进器的工作过程是一个多阶段任务系统, 设备有多种失效模式。离子推进器的前 2 个阶段工作时的系统结构是一样的, 但有不同的失效模式失效率。PPU 有 3 种失效模式: P_1 表示启动失效, P_2 表示运行失效, P_3 表示关闭失效, 每一种失效模式都能导致 PPU 失效。每一个发动机有 2 种失效模式: A_1/B_1 表示启动失效, A_2/B_2 表示运行失效, 每一种失效模式都会导致发动机失效。每一个推进阀有 3 种失效模式: V_1/W_1 表示打开失效, V_2/W_2 表示关闭失效, V_3/W_3 表示外泄漏失效, 其中, 第 1 种失效模式会导致相应的发动机失效; 另外 2 种失效模式会直接导致系统失效。对于推进系统的 PMS, 多模式失效会使建模分析更加复杂, 其原因是在 2 个连续阶段中, 设备的多种状态会导致阶段依赖和失效模式依赖。

本文以最小割集为基础, 基于 Extend 对多态 PMS 进行仿真。假设每个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。用故障树描述每个阶段的逻辑关系, 并通过结构函数进行表达, 引入最小割集到结构函数中, 仿真基于以下假设:

(1) 不同的设备相互独立, 依赖性只产生于阶段之和多模

基金项目: 国家部委基金资助项目

作者简介: 杨建军(1979 -), 男, 讲师、博士研究生, 主研方向: 系统建模与仿真, 舰船保障性工程, 质量管理; 杨 晶, 博士研究生; 刘 锋, 硕士研究生; 黎 放, 教授、博士生导师

收稿日期: 2010-01-23 **E-mail:** xionglifen@163.com

式失效的设备间；

(2)设备从正常状态开始工作，一旦失效不可修复；

(3)多模式失效设备，任何一种模式失效，设备都将失效，并且不可修复；

(4)一个设备不能在同一时刻处于几种状态；

(5)各个阶段的任务持续时间固定；

(6)阶段之间不可跳跃或者不存在阶段或门(phase_OR)。

3 基于 Extend 的多态 PMS 仿真模型

根据故障树表示的系统可靠性模型^[5]，利用结构函数，在已知各个基本设备失效分布函数的情况下，利用 Extend 仿真平台建立带有多模式失效的 PMS 仿真模型，最后进行系统仿真运行对可靠度估计值进行统计。仿真模型具体说明如下：

(1)各阶段任务持续时间规定

T_phase_j ($j=1,2,\dots,m,n$)，其中， j 表示阶段数。

(2)阶段随机数产生

用随机数发生模块设置产生服从[0,1]均匀分布的随机数 η_{ij} ， η_{ij} 是设备在 j 阶段 i 模式下随机抽样的随机数。随机数发生模块如图 2 中 Rand 所示。

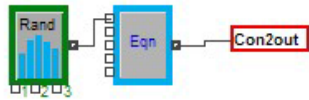


图 2 随机数发生模块

(3)设备失效时间抽样

假设各个阶段故障树有 n 个底事件，涉及到系统中的 n 个设备。假设设备 C 在多阶段任务系统中有 m 种失效模式，用布尔代数表示设备 $C_{i,j}$ 的行为：

1) $C_{i,j}=1$ 表示设备 C 在阶段 j 以 i 模式失效；

2) $C_{i,j}=0$ 表示设备 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。

对于设备 C 在阶段 j 以 i 模式失效的分布函数 $F_{ij}(t)$ 已知。根据设备的 $F_{ij}(t)$ 进行随机抽样，取得每一个设备各故障模式下的故障时间的简单样本。设备 C 在阶段 j 以 i 模式失效的时间抽样值为

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

其中， $F_{ij}(t)$ 是设备 C 的失效分布函数； $F_{ij}^{-1}(t)$ 为其反函数； η_{ij} 是设备 C 在 j 阶段 i 模式下随机抽样的随机数，由图 2 中 Rand 模块产生然后传输给 Eqn 模块，各设备失效时间的抽样值在图 2 的 Eqn 模块中计算求得，并由 Con2out 输出。

(4)依赖性处理

多态多阶段任务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。

根据本文假设，所有设备不可修。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 的各个模式的失效时间抽样值。通过抽样时间的赋值解决了依赖性问题，因为如果设备 C 以任何一种模式失效，从失效时刻起，根据不可修的假设，设备 C 停止工作，则下阶段设备继续保持失效状态。依赖性的处理过程实际上是一个比较分析判断的过程，以上处理可以通过在 Equation 对话框中编程实现。如判断第 3 阶段 B_{13} 设备是否失效，可在 Equation 对话框中输入如

图 3 所示语句进行判断，其中，作为输入各设备失效时间的抽样值由图 2 中各设备对应的 Con2out 提供。

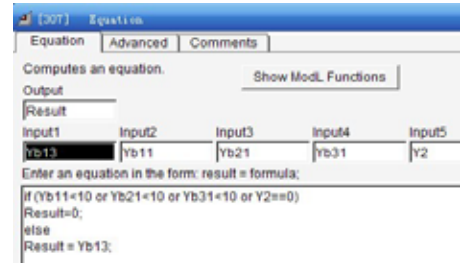


图 3 Equation 对话框

(5)割集失效时间和各阶段系统失效时间统计

通过结构函数得到各个阶段的割集。如某阶段的一个割集为 $\{A_1, B_2, B_3\}$ ，其中， A_1 表示设备 A 的第 1 种失效模式； B_2 表示设备 B 的第 2 种失效模式； B_3 表示设备 B 的第 3 种失效模式。通过比较在一次仿真循环时 3 个变量 $\{A_1, B_2, B_3\}$ 的失效时间抽样值得出其最大值 max_sets 。最大值的含义是割集内的设备都失效时，整个割集失效，割集的失效时间由变量的最大失效时间抽样值决定。在每次仿真循环时，针对每个阶段得到所有割集失效时间 max_sets 的前提下，比较所有 max_sets ，取最小值即为该阶段系统失效时间 min_system 。最小值的含义是某个阶段任务失败取决于最先失效的那个割集。最大值 max_sets 、最小值 min_system 是通过图 4 中的 Max & Min 模块求得，其中，作为输入的相应设备的失效时间是经过依赖性处理后得到的。

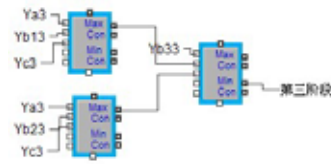


图 4 Max & Min 模块

4 仿真实验

在仿真模型建立后，即建立了系统逻辑结构，按以下步骤进行仿真试验：

(1)设置每个设备对应的随机数发生器产生服从[0,1]均匀分布的随机数；

(2)打开每个设备对应的 Equation 模块对话框输入各设备的失效率和式(1)的具体表达式；

(3)设置仿真总次数和每次仿真循环次数；

(4)开始运行仿真模型；

(5)从仿真结果中统计任务失效的次数 s (s 赋初值为 0)。在一次仿真循环中，依次比较各个阶段系统失效时间：

$$s = \begin{cases} s+1 & \min_system < T_phase_j \\ s & \min_system > T_phase_j \end{cases} \quad (2)$$

通过仿真运行得到最后的任务失败次数 s 。按照式(3)~式(5)计算和分析仿真结果：

整个任务的可靠度为

$$R = 1 - s / N_s \quad (3)$$

相对误差为

$$e = \left(\sum_{i=1}^k \frac{R_i - R}{R} \right) / k \quad (4)$$

方差为

$$\Delta = \left[\sum_{i=1}^k (R_i - \bar{R})^2 \right] / (k-1) \quad (5)$$

其中, R_i 为每次仿真时的整个任务可靠度; R 为任务可靠度的真值(通过解析算法获得); $\bar{R} = (\sum_{i=1}^k R_i) / k$, k 为多次求解整个任务可靠度的仿真次数。

本文借鉴文献[6]的解析算法进行仿真求解, 并进行对比分析。PMS 有 3 个阶段, 每个阶段有 3 个设备 A、B 和 C, 其中, 设备 B 有 3 种失效模式, 3 个阶段系统的故障树结构见图 5。

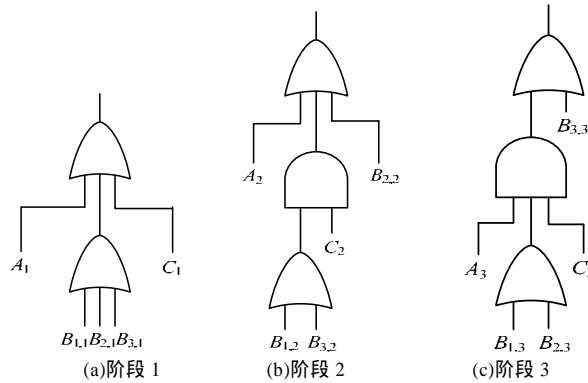


图 5 PMS 3 个阶段故障树的结构

阶段 1 结构函数为: $f_1 = A_1 + B_{1,1} + B_{2,1} + B_{3,1} + C_1$

割集为: $\{A_1\}, \{B_{1,1}\}, \{B_{2,1}\}, \{B_{3,1}\}, \{C_1\}$

阶段 2 结构函数为: $f_2 = A_2 + B_{2,2} + B_{1,2} \times C_2 + B_{3,2} \times C_2$

割集为: $\{A_2\}, \{B_{2,2}\}, \{B_{1,2}, C_2\}, \{B_{3,2}, C_2\}$

阶段 3 结构函数为: $f_3 = A_3 \times B_{1,3} \times C_3 + A_3 \times B_{2,3} \times C_3 + B_{3,3}$

割集为: $\{A_3, B_{1,3}, C_3\}, \{A_3, B_{2,3}, C_3\}, \{B_{3,3}\}$

3 个阶段的阶段持续时间为: $T_{phase_1} = T_{phase_2} = T_{phase_3} = 10$ h。各阶段设备在各模式下的失效时间见表 1。

表 1 各设备在多模式下的失效时间 h

失效模式	阶段 1	阶段 2	阶段 3
A	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}
$B_1 B_2 B_3$	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1×10^{-4}
C	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}

每次仿真循环次数 $N_s = 10\,000$ 对任务可靠度进行 10 次仿真, 仿真环境为奔腾 4、1.86 GHz、内存 2 GB。仿真结果见表 2。

表 2 仿真结果

序号	可靠度	运行时间/s	序号	可靠度	运行时间/s
1	0.989 5	0.191 5	6	0.988 6	0.192 9
2	0.990 6	0.186 2	7	0.990 5	0.185 0
3	0.991 9	0.187 8	8	0.991 1	0.186 9
4	0.990 2	0.189 0	9	0.991 2	0.190 7
5	0.991 8	0.187 5	10	0.988 7	0.191 9

文献[6]的解析算法的计算结果为 0.988, 本文模型与文献[6]算法的可靠度对比如图 6 所示。本文模型所得的相对误差为 2.349%、方差为 $1.374\,33 \times 10^{-6}$, 可见本文结果较稳定, 相对误差较小。

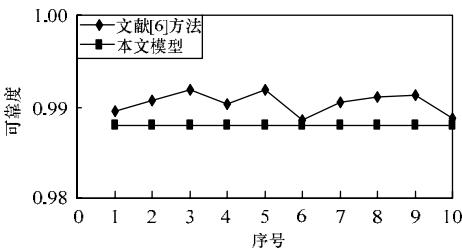


图 6 本文模型与文献[6]算法的可靠度对比

5 结束语

基于 Extend 对带有多模式失效的多阶段任务系统进行仿真求解, 仿真结果验证了该模型的可行性。仿真输入仅为系统的逻辑结构和各设备的失效率, 时间复杂度小, 是基于 DEP-BDD 算法很难做到的。下一步研究方向为考虑故障发生机理、存在共因和非单调关联关系的更为复杂的多阶段任务系统的可靠性仿真。

参考文献

- [1] Esary J D, Ziehms H. Reliability Analysis of Phased Missions[C]// Proc. of Reliability and Fault Tree Analysis Conference. Philadelphia, USA: SIAM Press, 1975.
- [2] Kim K, Park K S. Phased-mission System Reliability Under Markov Environment[J]. IEEE Trans. on Reliability, 1994, 43(2): 301-309.
- [3] Somani A K, Trivedi K S. Phased Mission System Analysis Using Boolean Algebraic Methods[C]//Proc. of Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York, USA: ACM Press, 1994.
- [4] Liu Dongxing. Efficient Analysis of Systems with Multiple States[C]//Proc. of the 21st International Conference on Advanced Networking and Applications. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2007.
- [5] 陈越洲, 谭琳, 邢维艳, 等. 一种新的故障树定性分析方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(13): 67-69.
- [6] Zhihua Tang, Dugan J B. BDD-based Reliability Analysis of Phased Mission Systems with Multimode Failures[J]. IEEE Trans. on Reliability, 2006, 55(2): 350-360.

编辑 陆燕菲

(上接第 229 页)

参考文献

- [1] Newman M E J, Girvan M. Find and Evaluating Community Structure in Networks[J]. Physical Review E, 2004, E69: 026113.
- [2] 王林, 戴冠中. 基于复杂网络社区结构的论坛热点主题发现[J]. 计算机工程, 2008, 34(11): 214-216.
- [3] Donetti L, Munoz M A. Detecting Network Communities: A New Systematic and Efficient Algorithm[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2004, (10): P10012.
- [4] Fortunato S, Latora V, Marchiori M. Method to Find Community Structures Based on Information Centrality[J]. Physical Review E,

2004, E70: 056104.

- [5] Danon L, Duch J, Arenas A, et al. Comparing Community Structure Identification[J]. Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, 2005, (9): P09008.
- [6] Massen C P, Doye J P K. Identifying Communities Within Energy LandscapesPhys[J]. Physical Review E, 2005, E71: 046101.
- [7] Muff S, Rao F, Caflisch A. Local Modularity Measure for Network Clusterizations[J]. Physical Review E, 2007, E72: 056107.
- [8] Fortunato S, Barthelemy M. Resolution Limit in Community Detection [J]. PNAS, 2007, 104(1): 36-41.

编辑 顾姣健

