

基于时间 Petri 网的装备体系 可靠性建模与仿真

江式伟¹, 吕卫民², 冯浩源¹

(1. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001;

2. 海军航空工程学院七系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对装备体系规模大、层次多、成员彼此分离、不断演化的特点, 以及体系可靠性预计与分配困难的问题, 在充分研究体系内涵的基础上, 结合美国国防部体系结构框架(Department of Defense Architecture Framework, DoDAF)和流程分析研究方法, 提出了一种基于时间 Petri 网流程分析的装备体系可靠性建模与分析方法, 详细分析了体系结构和使用流程的建模过程, 构建了装备体系的可靠性计算模型。以某机场航空保障体系为例, 说明了基于流程的体系可靠性建模分析的详细过程, 通过 ExSpect(Executable Specification Tool)仿真软件, 得出了装备体系流程的执行时间和可靠度仿真结果。

关键词: 系统工程; 可靠性; 时间 Petri 网; 流程

中图分类号: N 945.1

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2013.04.37

Reliability modeling and simulation of equipment system-of-systems based on timing Petri net

JIANG Shi-wei¹, LÜ Wei-min², FENG Hao-yuan¹

(1. *Administrant Brigade of Postgraduate, Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;*

2. *The 7th Department, Navy Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China*)

Abstract: Considering the large-scale, multi-level, separated and evolving characteristics of equipment system-of-systems (SoS), the modeling and analysis method is developed to solve the difficulty of prediction and allocation for equipment SoS reliability. This method, including the Department of Defense Architecture Framework (DoDAF) and process methods, is based on timing Petri net. After detailed analyzing the architecture and service process modeling procedure, the reliability calculation model of equipment SoS is built. A brief example of aviation support SoS in an airport is given to illustrate the process-based procedure of SoS reliability modeling and analyzing. The process execution time and reliability simulation results of equipment SoS are obtained through the Executable Specification Tool (ExSpect) simulation software.

Keywords: systems engineering; reliability; timing Petri net; process

0 引言

由于现代科技技术的发展,人们越来越喜欢将一些独立甚至异质、复杂的系统综合到一起,形成“超级系统”,称之为体系(system of systems, SoS)^[1],现在已成为众多领域的研究热点。SoS 包含以下几个基本要素:体系各成员系统的存在都是为了总体目标的实现;各成员系统是彼此独立、分布的,具有不同的管理主体;各成员系统间的联系是多种多样的,为了持续地执行体系任务而集成在一起。

体系可靠性是体系战斗力生成和保持的重要基础,直接影响着装备系统的作战模式、作战规模以及持续作战能力,影响着战斗力的巩固和提高。能否保持装备体系的高可靠性将直接影响到体系的作战效能。但由于一般装备体系规模大、层次多、组成复杂,各组成部分彼此是分离的,甚至是有地理或空间距离的,隶属于不同部门管理、使用,同时又是不断发展演化的,开展可靠性分析时,要考虑设备的硬件可靠性、软件可靠性和设备间的连接可靠性,还要考虑多时空、不同进程的可靠性等多种因素。传统的产品可靠性分析^[2-8]

和设计方法很难适应这种分布式装备体系的特点和要求。

1 体系的构成

1.1 体系组成

装备体系是由不同装备组成的大系统概念^[9],一般包括为完成指定的体系任务,而组合在一起的异质成员系统,这些单独运行和管理的各成员系统,通过一定的规则综合而成,并为实现共同的目标而联系在一起,形成了一种复杂巨系统,能够完成成员系统无法完成的工作^[10-11]。装备体系能够根据给定体系输入,体系内部的主装备和保障系统等在相关人员操作下,通过一定的协调运行机制,完成任务要求(体系输出);同时,还会与外部系统存在信息和物资等方面的交互。典型的装备体系构成示意图如图 1 所示。

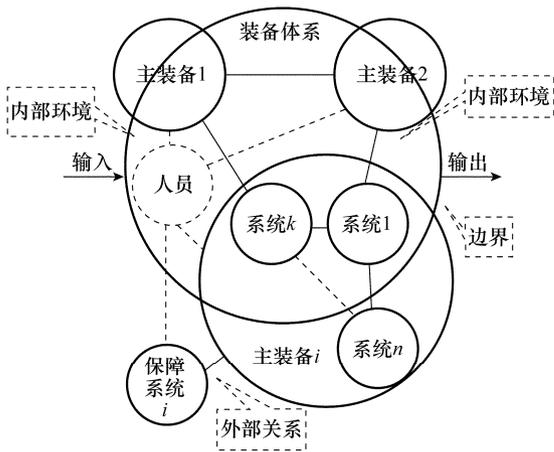


图 1 典型装备体系示意图

1.2 体系成员

为了达成体系的使命任务,使各个成员系统之间能够完美的协调,需要通过体系结构分析,描述各成员系统间复杂的内部关系,规划各成员系统间的合作,使之成为一个整体。美国国防部体系结构框架 DoDAF1.5^[12]为体系结构的描述、表示及作战行动和业务运作过程的集成定义了一种通用的途径,其核心是通过任务分解、流程描述得出体系成员系统间的关系,DoDAF 的本质就是基于活动的体系结构分析。

体系结构建模,首先是分解出作战节点、活动、功能、系统节点、任务、系统、组织、信息和流程等体系要素,通过建立作战视图(operational view, OV)、系统与服 务视图(systems/services view, SV),并以此来建立装备体系的体系结构作战活动模型视图 OV-5 的顶层活动是体系的使命任务,各子活动由体系的业务流程及其子流程构成。

作为系统节点的成员系统装备,通过相应的活动(也就是流程)联系在一起,在相应指挥、使用人员的操作下,构成了体系的流程网络。

1.3 体系流程

流程是指为实现特定目标所采取的一系列有规律的活动和方法,流程具有目标性、动态性、结构性^[13]。流程能够表示任务活动、活动间的时序关系和逻辑关系,同时还能相应地得出结构组成。流程可以打破部门与行业利益,把多平台凝聚在统一的任务下,明确了各平台的地位作用。因此,采用流程分析方法,可以清楚地表示体系成员系统的自主性以及成员系统间的松散耦合关系,对于体系建模和体系评价以及体系突生行为的研究,均具有重要的价值。流程是体系结构建模的关键,通过流程分析可以清晰地描述体系各成员系统间的关系,是体系可靠性评估的基础。

从体系工程的角度来看,流程可以看作一个具有活动及其操作人员、信息流、物流等组成单元,相关资源作为输入,将异构成员系统联系在一起,用以执行规定的使命任务的集合。体系的使命任务决定了流程的环境及其界限等系统结构及属性,在体系结构分析的基础上,通过流程分析,体系成员系统的关系就可被详细地刻画出来。

2 基于时间 Petri 网的流程建模

流程建模方法有很多,如 UML(unified modeling language)、Petri 网、SOA(service oriented architecture)等。Petri 网理论的建模方法是图表述描述与形式化建模交叉领域的典型代表,因为 Petri 网既有严格的形式定义,又有直观的图形表示,具有丰富的系统描述手段和系统行为分析技术,为描述并行、异步、分布式和随机性等特性的复杂系统提供了强有力的手段^[14]。Petri 网区别于其他建模方法的最大特点就是,它可将人员、设备、空间等信息集成在一起进行描述,通过对 Petri 网模型进行仿真,可以分析流程执行时间、流程周转率、资源利用率等相关指标。因此,Petri 网是业务流程描述和分析的主要表达方法。

2.1 时间约束 Petri 网

时间约束 Petri 网(timing constraint Petri net, TCPN)是一类重要的时间 Petri 网系统,在库所和变迁上加入了时间约束信息^[15]。一般时间约束信息包括开始时间、截止时间、持续时间、时间间隔约束等。

定义 1 时间 Petri 网。TCPN 是一个三元组 $TCPN = (N, C, D)$,其中 N 是一个经典的 Petri 网^[14], C 为关联库所 s 和变迁 v 的时间区间实数对 $[t_{min}, t_{max}]$ 的集合, D 为变迁 v 的执行延迟 $t_d(v)$ 的集合。

图 2 是一个典型的 TCPN 基本单元, $[t_{min}(s_i), t_{max}(s_i)]$ 是库所 s_i 上的局部时间约束,表示库所支持后续变迁发生的使能区间, $[t_{min}(v_i), t_{max}(v_i)]$ 是变迁 v_i 的可触发区间,

$t_d(v_i)$ 表示变迁的执行延迟时间。

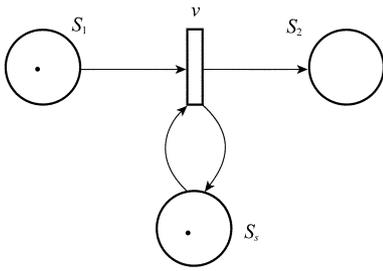


图 2 TCPN 基本单元

2.2 体系流程 TCPN 模型

体系时间约束 Petri 网的构建步骤如下：

步骤 1 根据装备体系任务需求，详细分析其任务剖面，分别建立作战视图 OV 和系统与服务视图 SV，并以此来建立装备体系的体系结构；

步骤 2 根据体系结构，划分各层级的任务模块，建立包含系统节点的任务模块，各模块间要尽量减少耦合；

步骤 3 根据模块内的任务变迁 $v_i (i=1, 2, \dots, m)$ ，确立相应的库所 $s_i (i=1, 2, \dots, n)$ 和库所内的初始 Token，通过有向弧构建 Petri 网；

步骤 4 根据任务需求，按照不同的约束类型，分别加入时间约束信息，区分变迁的逻辑关系和次序关系，以及时间关系；

步骤 5 验证过程模型的正确性以及过程/活动的时序一致性，即验证时间约束与 workflow 模型的一致性以及 workflow 实例执行中的时间约束满足性，若存在时序一致性错误，需要放宽某些约束条件；

步骤 6 根据体系结构，进行模块集成，构建体系的 TCPN 总体模型。

3 体系可靠性评估模型

与通常可靠性的定义类似，本文定义体系可靠性为：在规定的保障条件下，规定的时间 T 内，体系完成规定的连续任务的能力，即完成规定的连续任务所需时间小于 T 的概率。对于装备体系而言，一般是完成规定的作战任务，典型的比如机场体系中可以是规定时间内满足 90% 的出动架次率的保障任务，C¹ISR 系统的任务成功性和战备完好性等。由于要求在规定的时间内完成指定的任务，因此除了体系成员本身的可靠性对体系可靠性具有影响外，体系任务流程对体系可靠性也具有重要的影响。

3.1 基本假设

为处理问题方便，简化建模过程，对装备体系可靠性建模作如下假定：

(1) 将操作人员、设施设备以及场地空间看作流程库所，而作业动作看作变迁。相应的容量、标识、权函数就可依次进行定义分析。在有色 Petri 网中设定资源分别具有几种颜色。

(2) 在评估过程中，认为人的可靠性为 1，因此得出的是体系的固有可靠性，只考虑了各组成员间的关系，以及他们对体系可靠性的影响，其本身工作能力对体系的影响不予考虑。

(3) 体系资源的寿命分布服从任意分布，对于非指数分布的资源，由于其状态具有记忆性的特性，使得部件的累计工作时间对其可靠性产生影响^[8]。

3.2 流程传递概率

流程对于故障有倍增器的作用，完善的流程本身是不会出现故障的，当装备、人员、时间、空间等资源不出现故障的情况下，流程能够保障任务的流畅运行；但当其中任一种资源出现了影响任务正常运行的故障时，流程将会使这种故障逐级得到放大，以致能够产生致命性的问题；另外，还有一种特殊情况，虽然装备、人员没有出现故障，但流程前面单个环节中时间的持续延迟行为，会逐渐累积，从而导致在流程后续环节中出现足以影响任务成功的问题，因此需要研究流程的传递概率模型。图 3 是几种流程基本逻辑类型。

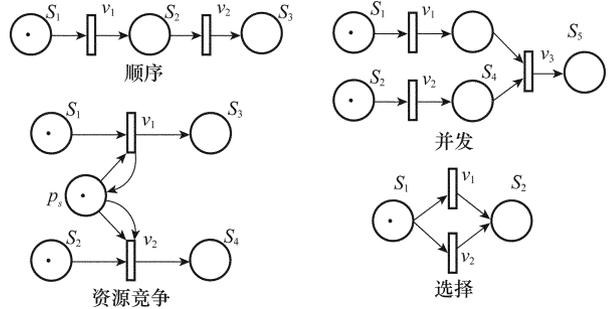


图 3 流程基本逻辑类型

以图 3 中的 TCPN 单元为例，根据流程的顺序、同步、选择、资源共享等结构特性，可相应的构建其传递概率 P 。为简化计算模型假设所有变迁 v_i 的延时时间分别服从正态分布 $N(\mu_i, \sigma_i)$ (相应地可以推出其他分布情况下的流程传递概率)，则顺序关系中传递概率 P 可表示为

$$P_3 \{t \leq T\} = \Phi\left(\frac{T - \mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}\right) \quad (1)$$

并发关系中：

$$P_5 \{t \leq T\} = P_5 \{ \max(t_1, t_2) + t_3 \leq T \} = \Phi\left(\frac{T - \mu_3 - \mu_i}{\sqrt{\sigma_3^2 + \sigma_i^2}}\right) \quad (2)$$

支援竞争关系中， P_3 和 P_4 是对偶关系，若 $t_1 = \min(t_1, t_2)$ ，则

$$P_3 \{t \leq T\} = \Phi\left(\frac{T - \mu_1}{\sigma_1}\right) \quad (3)$$

$$P_4 \{t \leq T\} = P_4 \{t_1 + t_2 \leq T\} = \Phi\left(\frac{T - \mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}\right) \quad (4)$$

选择关系中

$$P_5 \{t \leq T\} = P_5 \{ \min(t_1, t_2) \leq T \} = \Phi\left(\frac{T - \mu_i}{\sigma_i}\right) \quad (5)$$

3.3 体系可靠性

根据任务剖面可以看出,装备体系是一种时变结构的多阶段任务系统^[16-17],完成体系规定任务需要涉及多个阶段,在不同的阶段体系通常由其各级成员系统、单元以不同的功能组合形式构成。

装备、人员、时间、空间等资源作为库所存在一定的失效概率,设库所 s_i 的失效率为 λ_i 。体系通过流程将变迁 v_i 的输入集 v_i 的失效率 $\{\lambda_i\}$ 传递至输出集 v_i' , 经逐级传递至体系任务完成的最终节点 s_{out} , 体系可靠性 $R_{\text{sys}} = \{\lambda_i\} \cdot \{P_j\}$ 。

4 实例应用

ExSpect(executable specification tool)是 Eindhoven 大学开发的基于随机时间有色 Petri 网原理的流程建模、监控和分析仿真软件^[18],在学术界有广泛的影响。

本文利用 ExSpect 对机场航空保障体系的任务流程进行了模拟,首先基于 DoDAF1.5 构建装备体系结构和任务视图,如图 4 所示。

在此基础上针对体系整体任务流程构建 ExSpect 下的 Petri 网仿真模型,定义 Token 的 record types 为 object:

object = [id:num, times:real, timee:real, prob:real]

以 A.0 飞机出库子任务为例,图 5 是某子任务流程封装模块 system 的仿真模型。通过连续多次仿真,根据第 3.3 节的计算模型,可以统计分析得出体系可靠度。

图 6 是经过 200 次运行的体系执行时间分布图,横向坐标代表离散的任务执行区间(步长 10),纵坐标代表单次任务执行时间,根据体系 T 时间内执行 10 次的任务指标要求,经过 200 次仿真后,可计算出体系可靠度平均值趋于稳定为 0.857,符合预期结果。

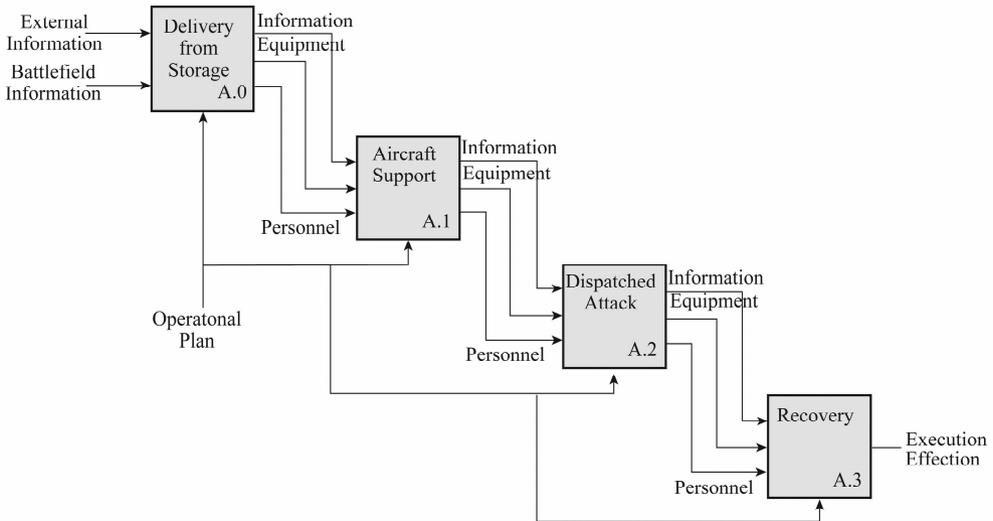


图 4 装备体系结构和任务视图

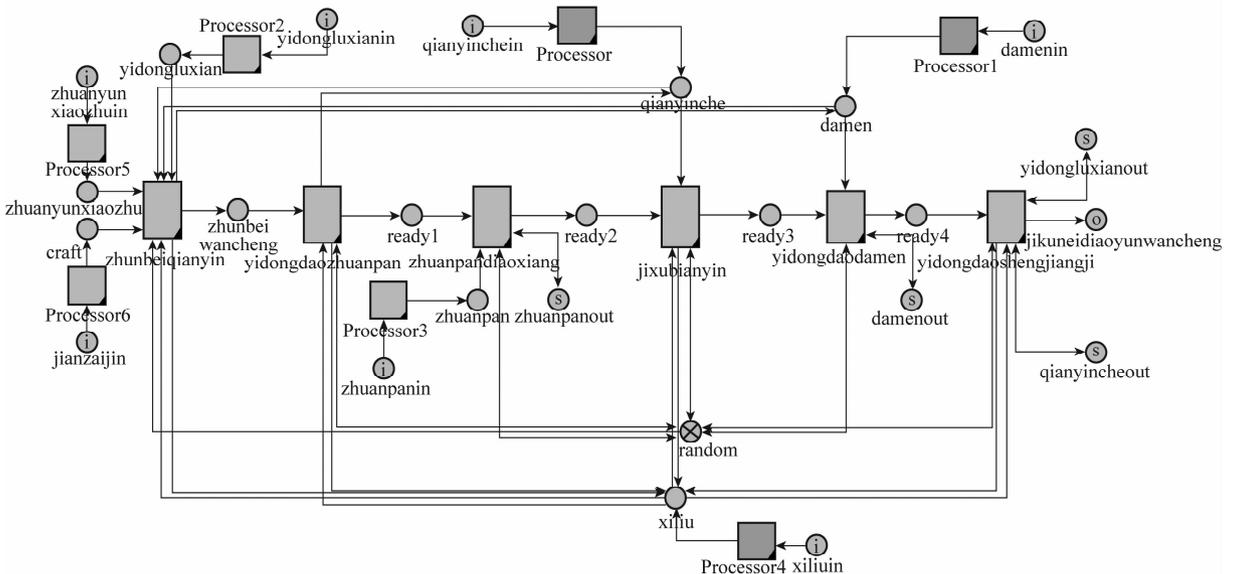


图 5 封装模块 system 仿真模型

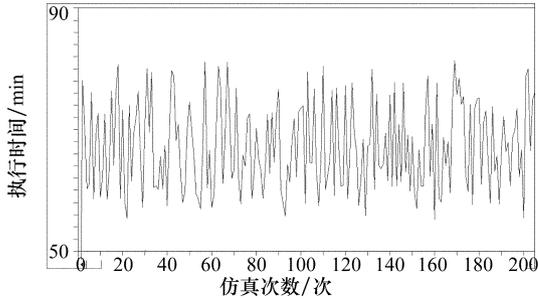


图6 装备体系执行时间分布图

5 结论

可靠性模型的建立是对体系进行可靠性分析和设计的重要环节,是实现精确的可靠性预计和可靠性分配的基础,能为分布式装备体系设计的改进提供有效的辅助支持。本文提出了一种基于时间 Petri 网的装备体系可靠性建模与仿真方法,通过实例验证,该方法具备了技术可行性。但是,还有很多有待改进的方面。例如,如何降低状态空间,分析流程冲突的产生机理,这些都是后续研究工作的重点。

参考文献:

- [1] Keating C, Rogers R, Unal R, et al. System of systems engineering [J]. *Engineering Management Journal*, 2003, 15(3): 36-48.
- [2] Kumar N, Borm J H, Kumar A. Reliability analysis of waste clean-up manipulator using genetic algorithms and fuzzy methodology[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(2): 310-319.
- [3] Wilson A G, Cook C M A, Huzurbazar A V. A case study for quantifying system reliability and uncertainty[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(9): 1076-1084.
- [4] Selvik J T, Aven T. A framework for reliability and risk centered maintenance [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2011, 96(2): 324-331.
- [5] Wei Y, Shen X H. Software reliability estimation and application based on heterogeneous architectures[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(4): 877-880. (魏颖, 沈湘衡. 基于混合体系结构的软件可靠性评估方法与应用[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 877-880.)
- [6] Dou J H, Chen W C, Zhong Z T. Operational reliability evaluation of ship-to-air missile weapon system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2011, 33(4): 954-957. (斗计华, 陈万春, 钟志通. 舰空导弹武器系统使用可靠性评估[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(4): 954-957.)
- [7] Nie C L, Zhang L, Yu Y L, et al. Research to PMS mission sustainability simulating models[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(3): 729-732. (聂成龙, 张柳, 于永利, 等. 多阶段任务系统任务持续能力仿真模型研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 729-732.)
- [8] Yuan J M, Hou C Z, Gao L, et al. Based on color Petri-net modeling and estimate for task reliability of complex weapon system[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(11): 2563-2566. (原菊梅, 侯朝桢, 高琳, 等. 基于有色 Petri 网的复杂武器系统任务可靠性建模及估计[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2563-2566.)
- [9] Song T L. *Equipment support systems engineering* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 3-5. (宋太亮. 装备保障性系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 3-5.)
- [10] Valerdi R, Axelband E. A research agenda for systems of systems architecting [J]. *International Journal of System of Systems Engineering*, 2008, 1(1): 171-188.
- [11] Pan X, Yin B S. Modeling and simulation for SoS based on the DoDAF framework [C]// *Proc. of the 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*, 2011: 1283-1287.
- [12] DoD Architecture Framework Working Group. DoD Architecture Framework Version 1.5 Volume II[R]. 2007.
- [13] Juliano A W, Luis A B, Roben C L, et al. A framework for risk assessment based on analysis of historical information of workflow execution in IT systems[J]. *Computer Networks*, 2011, 55(13): 2954-2975.
- [14] Ben-Arieha D, Kumar R R, Tiwari M K. Analysis of assembly operations' difficulty using enhanced expert high-level colored fuzzy Petri net model[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2004, 20(5): 385-403.
- [15] Tsai J J P, Yang S J, Chang W H. Timing constraint Petri nets and their applications to schedulability analysis of real-time system specifications [J]. *IEEE Trans. on Software Engineering*, 1995, 21(1): 32-49.
- [16] Remenyte-Prescott R, Andrews J D, Chung P W H. An efficient phased mission reliability analysis for autonomous vehicle [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2010, 95(3): 226-235.
- [17] Moa Y C, Siewiorek D, Yang X Z. Mission reliability analysis of fault-tolerant multiple-phased systems[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93(7): 1036-1046.
- [18] Deloitte & Touche Bakkenist. Exspect user manual[EB/OL]. <http://www.exspect.com/ex641usermanual.pdf>.

作者简介:

江式伟(1981-),男,博士研究生,主要研究方向为装备体系工程、可靠性。

E-mail:jsw_81@163.com

吕卫民(1970-),男,教授,博士,主要研究方向为系统工程、可靠性。

E-mail:lwm_yt@sina.com

冯浩源(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为系统优化与仿真。

E-mail:zm87512@163.com