

装备基本任务单元可用度 Petri 网仿真模型及应用

曲长征, 于永利

(军械工程学院装备指挥与管理系维修工程实验中心, 河北 石家庄 050003)

摘要: 提出了装备基本任务单元可用度建模方法, 建立了基于使能延迟机制的 Petri 网理论模型。基于 ExSpect(executable specification tool) 仿真语言的托肯时间戳延迟机制, 通过模型转换建立了基本任务单元可用度分析仿真模型。应用模型研究了作战任务要求和维修力量配置对基本任务单元可用度的影响, 分析了基本任务单元与单装可用度分析的差异, 揭示了导致不同层次可用度综合差异的内在机理。结果表明, 模型形象、直观, 物理意义明确, 具有通用性和可拓展性, 是装备基本任务单元可用度分析的有力工具。

关键词: 可用度; 仿真; 作战单元; Petri 网

中图分类号: O 213.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.06.14

Petri net simulation model of basic equipment task unit availability and its application

QU Chang-zheng, YU Yong-li

(Maintenance Engineering Institute, Department of Equipment Command and Management, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: A modeling method is proposed to analyze the availability of the basic equipment task unit, and a timed Petri net model is constructed with enabling delay timing mechanism. By transforming the theory model, the simulation model is constructed based on the timing mechanism of the token with timestamp in executable specification tool (ExSpect). Applying the model, the effect of task request and maintenance force deployment on availability are researched. The difference and mechanism between basic equipment task unit and single equipment availability are analyzed. The results indicate that the model is a powerful tool to analyze the availability of the basic equipment task unit, by reason of its characters such as visualization, formalization, generalization and expandability.

Keywords: availability; simulation; combat unit; Petri net

0 引言

可用度是衡量装备可靠性、维修性、保障性(reliability, maintainability, supportability, RMS)水平的重要综合性参数, 将装备 RMS 问题从单一装备层次向作战单元层次拓展, 更有现实意义^[1-4]。系统可用度计算包括基于马尔科夫、非马尔科夫过程的解析方法和基于仿真的统计方法等, 解析方法一般适用于系统组件数量较少的情况^[5-14], 而多组件复杂系统可采用仿真统计方法^[15-16]。两种方法基于不同的机理, 界限分明, 难以相互重用。

文献[17]应用 Petri 网建立了反映单装和作战单元整体状态的模型, 并研究了将模型应用马尔科夫过程分析作战单元可用度的解析分析方法。由于 Petri 技术具有严格的数学定义和基于状态的图形化描述方法, 其模型侧重于系统状态的描述, 可作为解析分析和仿真的基础, 成为沟通

解析分析和仿真分析的桥梁^[18]。本文在此基础上提出了基于 Petri 网的基本任务单元可用度建模方法和理论模型, 以 ExSpect(executable specification tool) 为仿真支撑环境建立基本任务单元可用度仿真模型, 应用模型分析基本任务单元可用度的有关特性。

1 建模方法与理论模型

作战单元执行任务时, 任务要求和各装备之间的配套关系, 共同约束着装备按照一定的逻辑关系或配置来执行任务, 形成一定的任务可靠性关系。本文将研究对象限定在装备间影响关系紧密的较低层次作战单元, 称为装备基本任务单元, 简称基本任务单元。对由 n 个装备组成的基本任务单元, 按照任务要求, 当要求所有装备都必须完好才能执行任务时, 各装备形成串联关系; 当要求必须 k 个完好时, 形成 n 中取 k 关系; 当要求其中之一完好即可执行任务

时,形成并联关系。可以认为并联与串联是 n 中取 k 关系的特例($k=1$ 和 $k=n$)。

由多个装备按一定的逻辑关系组成的作战单元与由多个部件组成的装备运行过程有所不同。后者在部件故障后,要由任务可靠性关系判定装备是否故障,如装备故障则停机,产生修理任务。此时的修理任务可能是由多个部件故障引发的,可根据任务需要决定全部修复或部分修复,然后装备继续工作。而作战单元中,单个装备故障即可进行修理,而此时作战单元是否能继续工作,要多装备的可靠性关系判定,如故障则所有装备停止工作,反之则可继续工作。为分析作战单元的可用性,既要建立单个装备的状态模型,又要根据系统可靠性关系的表示作战单元的可用状态和不可用状态。

按照以上建模思路,应用带抑制弧的时间 Petri 网构建不同基本任务可靠性关系下的系统状态模型。Petri 网建模时,分别显示单个装备状态和作战单元的状态。作战单元状态转化由装备故障数和完好数控制,其控制逻辑由系统可靠性关系确定。对于 n 个相同装备构成, n 中取 k 系统模型如图 1 所示^[17]。

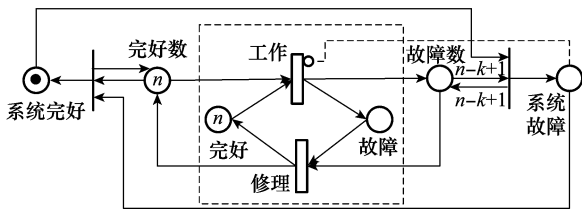


图 1 n 中取 k 系统模型

模型中虚线框内表示了装备完好状态与故障状态的转化过程(下同),装备工作与修理变迁为时间变迁(图 1 中用方框表示),根据装备的故障和修复规律可设置为定值或概率分布。虚线框外部分表示了作战单元状态,包括故障数、完好数和系统故障与系统完好状态及转化,变迁为瞬时变迁(图 1 中用竖线表示)。模型中,末端带圆圈的虚线(工作变迁与系统故障库所间)为抑制弧。

系统初始状态为完好状态,库所“系统完好”标识为 1,库所“完好”、“完好数”标识为 n ,其余库所为 0。

模型中工作和修理变迁为延时变迁,采用使能延迟机制,即变迁在一定的延迟区间内保存使能,在此期间如一直使能,则在延迟时间到达后触发并瞬间完成,输出托肯。如在此期间的某一时刻不再使能,则不能触发。该机制下,当系统故障时,抑制弧发生作用,“工作”变迁不再处于使能状态,这样保证了处于完好状态的装备不再发生故障。

以上模型具有一定的通用性,在 n 中取 k 模型中, $k=n$ 则为串联模型, $k=1$ 则为并联模型。

2 仿真模型

Petri 网基本任务单元状态模型提供了数学分析与仿真分析基础蓝本,对系统进行仿真就是要实现数学模型描述的系统运行逻辑。理想的方式是能直接对上文建立的数

学模型进行仿真。笔者选择了可执行的规格说明工具 ExSpect 作为仿真工具。ExSpect 是基于赋时有色 Petri 网的建模和分析语言及软件工具,该语言采用的时间延迟机制是一种时间戳机制,即变迁使能即可触发并在瞬间完成,其时间延迟体现在输出的托肯携带一个时间戳,只有仿真时刻推进到该时间戳时,该托肯才有效,可以进一步触发变迁。在此机制下,必须对使能延迟的 Petri 网模型进行转换。

2.1 系统总体模型

ExSpect 支持层次化建模,系统模型分为三个分系统:系统运行分系统 sysrun、维修分系统 maintain 和系统状态 sysstate,如图 2 所示。系统运行分系统描述单一装备的运行状态,输出故障装备到 torepair 通道,并适时更新装备故障数量信息到 realbadnum 库所。故障装备经维修分系统维修后经 repaired 通道返回运行分系统。系统状态分析分系统根据 realbadnum 库所的故障装备数量进行系统状态改变并计算可用度。

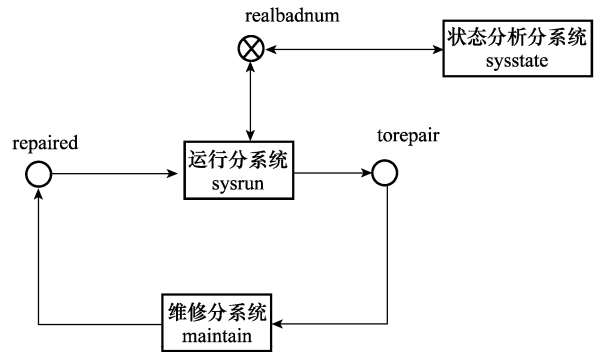


图 2 ExSpect 总体模型

2.2 系统运行分系统

系统运行分系统 sysrun 实现装备运行的控制,由于 ExSpect 的时间机制,需对上文建立的 Petri 网进行一定的转换,其内部模型如图 3 所示。

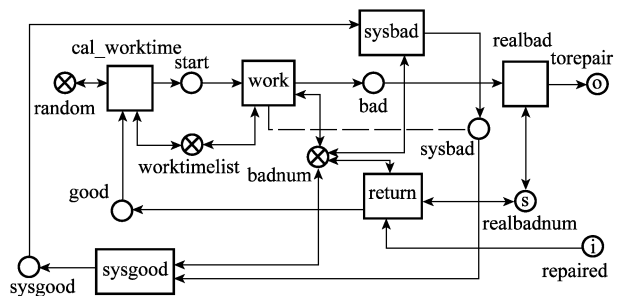


图 3 系统运行分系统模型

图 3 中, \bigcirc 为一般通道, $\textcircled{1}$ 、 $\textcircled{2}$ 为输入、输出通道,用于表示系统状态; sysgood 为系统完好; sysbad 为系统故障; good 为装备完好; bad 为装备故障; start 为开始工作; torepair 为送修; repaired 为修竣返回; \otimes 为库所,用于记录信息或产生随机数; $\textcircled{3}$ 为上层系统中的库所。

系统初始状态为系统完好状态,system 通道有一个托肯,good 通道有 n 个托肯,badnum 库所托肯值为 0。模型运行规则为:good 库所中的完好装备经 cal_worktime 变迁进行可工作时间抽样,将信息计入 worktimelist 库所。working 变迁使能时,选取最小可工作时间的装备瞬间触发,输出携带时间戳为故障时间的故障装备到 bad 库所,并将 badnum 库所值加 1。该功能确保了 working 变迁按装备可工作时间从小到达依次选取装备进入故障状态,此时时间并不推进。

当 badnum 库所托肯值为 $n-k+1$ 时,sysbad 变迁使能并触发,sysgod 库所中托肯流向 sysbad 库所,表示系统故障。

系统故障后,sysbad 库所有托肯,working 变迁上的抑制弧发生作用,抑制 start 通道中的其他装备(可工作时间长的装备)向故障状态转换,即装备停止工作。这样,在系统时间不推进状态,实现了基本任务单元故障对其余完好装备向故障状态转换的抑制。

当仿真时间推进到 bad 通道中故障装备的时间戳时,其托肯变为有效托肯,触发 realbad 变迁输出故障装备到输出通道 torepair 中,代表实际故障装备的产生,同时向 realbadnum 输出库所更新故障装备信息,该信息的更新时间为实际的装备故障时间。

外界修复装备由 repaired 通道返回,经 return 变迁返回 good 通道,并将 badnum 库所托肯减 1。sysgood 变迁根据 badnum 库所数值完成触发,sysbad 库所托肯流向 sysgood 库所,系统状态完好。此时,抑制弧失去作用,系统继续工作。

上述功能的实现通过变迁的定义完成,以 sysbad 变迁为例,其定义在 processor 定义界面中完成,如图 4 所示。

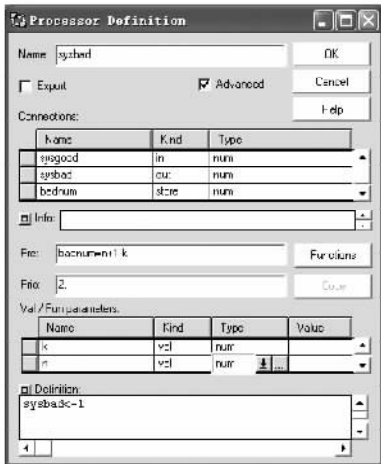


图 4 sysbad 变迁定义界面

图 4 中,connection 项目定义了变迁的连接状态,即

- (1) 输入通道 in:sysgood;
- (2) 输出通道 out:sysbad;
- (3) 库所 store:badnum;
- (4) Pre 项目:badnum= $n+1-k$ 定义了变迁的前置条

件,即只有满足该条件,变迁才能使能;

(5) Val/Fun parameter 项目定义了变迁的参数和函数,其中 n,k 为变迁的参数,其值在变迁安装时赋值,这样实现较好的通用性;

(6) Prio 项目定义了变迁的触发优先级为 2,变迁默认优先级为 1,高优先级保证了在变迁触发冲突时该变迁可优先触发;

(7) Definition 项目定义变迁触发的状态改变,即向 sysbad 通道输出托肯 1。按 Petri 网触发机制,该变迁触发要消耗输入通道 sysgood 中的一个托肯。

时间延迟也在 Definition 项目中通过 delay 关键词定义,如 working 变迁延迟时间服从速率为 0.3 指数分布,其定义为

$$bad \leftarrow 1 \text{ delay } \text{nexp}(0.3, \text{random})$$

式中,nexp 指数分布函数;random 为随机数。该变迁向 bad 库所输出托肯值为 1,其时间戳为当前仿真时间与指数分布随机抽样之和,即输出托肯在抽样值时间后有效。

2.3 系统状态分析分系统

系统状态分析分系统按照系统状态改变的实际时间进行相关信息统计,内部结构如图 5 所示。

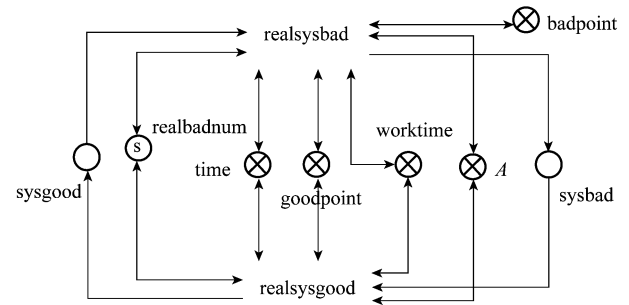


图 5 系统状态分析分系统模型

图 5 中,sysgood 为系统完好;sysbad 为系统故障;变迁 realsysbad、realysgood 与系统运行分系统的 sysbad、sysgood 变迁触发机制类似,根据 realbadnum 库所中故障装备数量进行触发,并记录系统故障时间点 badpoint 和系统完好时间点 goodpoint,计算系统工作时间 worktime,进而得出系统可用度 A 。

维修子系统实现维修保障过程建模,可依据分析需要建立不同详尽程度的模型,如考虑维修力量的配置数量、备件供应及资源调度策略等因素,参见文献[19-20],本文略。

3 模型应用

3.1 仿真示例

假设某飞机编队共有 24 架同型号飞机,飞机故障率 $\lambda=0.01/h$,飞机修复率 $\mu=0.2/h$,编队配 4 个修理小组。任务要求 18 架飞机完好即可执行任务,该情况下系统形成 24 中取 18 的可靠性关系。将参数代入模型对系统进行仿真,系统运行过程直观反映了单架飞机及编队的状态,如图 6 所示。

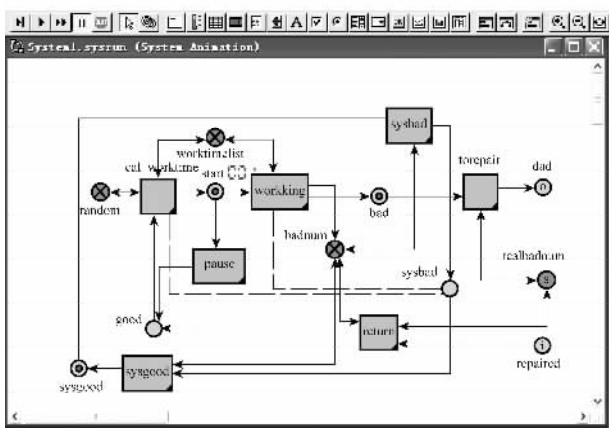


图 6 ExSpect 仿真运行截图

仿真结果为 $A=98.4\%$ 。

改变任务要求的完好飞机数量, k 值相应变化, 仿真分析可得到相应的编队可用度, 如图 7 所示。

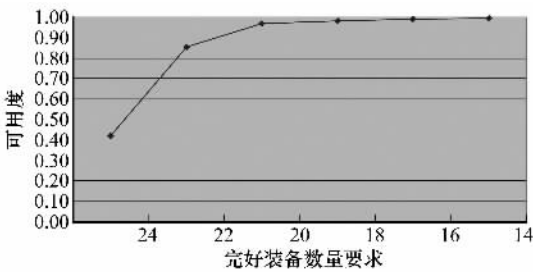


图 7 完好数量要求与可用度关系曲线

改变修理小组数量可分析其对基本任务单元可用度的影响, 在任务要求 18 架飞机时, 配置 1~5 个维修小组时的可用度变化情况如图 8 所示。

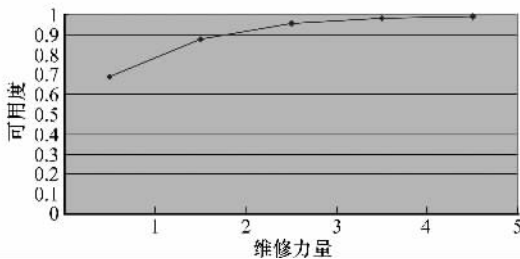


图 8 维修力量配置与可用度关系曲线

依据修理小组对基本任务单元可用度的影响, 可以按任务要求配置维修力量。

3.2 基本任务单元与单装可用度综合的对比分析

由多个装备特性分析基本任务单元的可用度是一种向上综合, 由多个部件分析装备可用度也是一种向上综合, 两种系统及组元的层次不同, 前者处于较高的层次, 这两种综合的机理和结果是有差异的。

采用式(1)分析单装可用度, 即

$$A = \frac{T_{MTTR}}{T_{MTTR} + T_{MTBF}} \quad (1)$$

式中, T_{MTTR} 为装备的平均修复时间 (mean time to repair, MTTR); T_{MTBF} 为装备的平均故障间隔时间 (mean time between failure, MTBF)。考虑当各部件服从同一指数分布的情况, 以 n 中取 k 可靠性关系组成装备, 则装备的 T_{MTTR} 为

$$T_{MTTR} = \sum_{i=k}^n \frac{1}{i\lambda} \quad (2)$$

当组成串联系统时 ($k=n$), 有

$$T_{MTTR} = \frac{1}{n\lambda} \quad (3)$$

当各部件组成并联系统时 ($k=1$), 有

$$T_{MTTR} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i\lambda} \quad (4)$$

假设备故障时, 故障部件可以并行维修, 则装备平均修复时间可采用部件的平均修复时间。

为对比基本任务单元可用度与装备可用度计算的差异, 采用两组类似数据:

(1) 基本任务单元: 包括 4 个相同装备, 装备故障率服从指数分布, $\lambda=0.3/h$, 装备故障修复率服从指数分布, $\mu=0.2/h$;

(2) 装备: 包括 4 个相同部件, 部件故障率服从指数分布, $\lambda=0.3/h$, 部件故障修复率服从指数分布, $\mu=0.2/h$ 。

假设维修力量充足, 无维修等待延误。分别将以上数据代入仿真模型和相关公式, 得到的可用度情况, 如表 1 所示。

表 1 基本任务单元与单装可用度对比分析表

系统可靠性关系	基本任务单元可用度 A	单装可用度 A	差异/(%)
4 中取 4(串联)	0.143 7	0.142 8	0.63
4 中取 3	0.331 1	0.28	15.43
4 中取 2	0.580 0	0.419	27.76
4 中取 1(并联)	0.870 7	0.58	33.39

从结果可知, 串联时 ($n=k$), 单装可用度与基本任务单元可用度一致 (较小误差由仿真精度造成); $k \neq n$ 时, 单装可用度较基本任务单元可用度小, 并且随着 k 的减小, 两者的差异在逐渐扩大。

产生这种差异的原因是: n 中取 k 系统中 ($k \neq n$), 对于单装, 部件故障并不导致单装故障时, 装备处于工作状态, 部件是不能进行维修的; 而对于基本任务单元, 任一装备故障即可进行维修, 修复后即可返回工作, 从而使基本任务单元故障前可能有修复装备补充。随着 k 的减少, 有机会修理的装备增多, 基本任务单元可用时间增加量也越多, 两者的差异也变大。显而易见, 随着 n 的增加, 两者差异也是增加的趋势。综上所述, 在单装层次, 由于组元 (部件) 维修时机受系统 (装备) 状态影响, 可用度较低; 在基本任务单元 (以上) 层次, 由于组元 (装备) 维修时机不受系统 (基本任务单元及以上层次) 影响, 其可用度较高, 正是这种组元维修时机的差异造成了两种层次上综合结果的差异。

4 结 论

基于 Petri 网形式化方法建立的基本任务单元可用度仿真模型形象、直观,物理意义明确。模型功能强大,可分析在一定的任务要求和不同的维修力量配置条件下的可用度,从而进行分析评价和管理决策。模型具有通用性和可拓展性,将模型中的托肯赋予不同信息,可将模型扩展,实现不同类装备组成的基本任务单元的可用度分析。

基本任务单元与单装可用度综合的对比分析表明,在相同数据情况下,前者由于组元维修不受系统状态影响,具有较高的可用度。

参考文献:

- [1] 郭继周,郭波,黄卓,等.面向作战单元任务的可用性建模与分析[J].系统管理学报,2007,16(2):160-164. (Guo J Z, Guo B, Huang Z, et al. Availability model and its analysis for combat unit during the mission[J]. *Journal of Systems & Management*, 2007, 16(2):160-164.)
- [2] 郭霖瀚,康锐.装备基本作战单元任务持续性度量参数研究[J].航空学报,2009,30(3):456-461. (Guo L H, Kang R. Equipment individual operational unit sustainability parameters research[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(3):456-461.)
- [3] 郭霖瀚,康锐.基本作战单元任务持续性仿真度量模型研究[J].系统仿真学报,2009,21(2):325-330. (Guo L H, Kang R. Individual operational unit sustainability simulation measure model research[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(2):325-330.)
- [4] 刘芳,赵建印,郭波.基于 EOOPN 的作战单元任务成功性评估仿真模型[J].兵工学报,2007,28(4):481-487. (Liu F, Zhao J Y, Guo B. Mission success evaluation model based on EOOPN for the division-brigade combat units[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(4):481-487.)
- [5] Claasen S J, Joubert J W, Yadavalli V S S. Interval estimation of the availability of a two-unit standby system with non-instantaneous switch-over and 'dead time'[J]. *Pakistan Journal of Statistics*, 2004, 20(1):115-122.
- [6] Mi J. Limiting availability of system with non-identical lifetime distributions and non-identical repair time distributions[J]. *Statistics & Probability Letters*, 2006, 76(7):729-736.
- [7] Sarkar J, Li F. Limiting average availability of a system supported by several spares and several repair facilities[J]. *Statistics & Probability Letters*, 2006, 76(18):1965-1974.
- [8] Wang K H, Chiu L W. Cost benefit analysis of availability systems with warm standby units and imperfect coverage[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2006, 172(2):1239-1256.
- [9] Karin S, de Smidt-Destombesa, Matthieu C, et al. On the availability of a k-out-of-N system given limited spares and repair capacity under a condition based maintenance strategy[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2004, 83(3):287-300.
- [10] Frostig E, Levikson B. On the availability of R out of N repairable

- systems[J]. *Naval Research Logistics*, 2002, 49(5):483-498.
- [11] Zhang T, Horigome M. Reliability theory and its applications; availability of 3-out-of-4; G warm standby system[J]. *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2000, E83-A(5):857-862.
- [12] Cui L R, Xie M. Availability of a periodically inspected system with random repair or replacement times[J]. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 2005, 131(1):89-100.
- [13] 杨继坤,徐廷学,闫群章.导弹武器系统战备完好性仿真模型研究[J].舰船电子工程,2009,29(7):168-172. (Yang J K, Xu T X, Yan Q Z. Research on readiness simulation model of missile weapon system[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2009, 29(7):168-172.)
- [14] 杨懿,王立超,邹云.考虑预防性维修的离散时间单部件系统的可用度模型[J].航空学报,2009,30(1):68-72. (Yang Y, Wang L C, Zou Y. Availability model of one-unit discrete time system with preventive maintenance[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(1):68-72.)
- [15] 毕红葵,王红,黄树军.雷达系统使用可用度计算机仿真计算[J].现代雷达,2004,26(2):4-7. (Bi H K, Wang H, Huang S J. Computer simulation of radar system availability [J]. *Modern Radar*, 2004, 26(2):4-7.)
- [16] 高文,祝明发,徐志伟.基于维修时间约束的机群系统可用度的仿真算法[J].计算机学报,2001,24(8):876-880. (Gao W, Zhu M F, Xu Z W. A simulation algorithm of cluster systems availability within repair time constrains[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2001, 24(8):876-880.)
- [17] 曲长征,于永利,张柳,等.基于 Petri 网的作战单元状态模型及可用性分析[J].系统仿真学报,2010,22(8):1970-1973. (Qu C Z, Yu Y L, Zhang L, et al. Combat unit state model based on Petri net and availability analysis[J]. *Journal of System Simulation*, 2010, 22(8):1970-1973.)
- [18] Girault C. 系统工程 Petri 网——建模、验证与应用指南[M].王生原,余鹏,霍金键,译.北京:电子工业出版社,2005:30-33. (Girault C. *Petri nets for system engineering——a guide to modeling, verification, and applications* [M]. Wang S Y, Yu P, Huo J J, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005:30-33.)
- [19] 曲长征,于永利,郝建平,等.面向非计划维修停机时间分析的装备维修过程有色 Petri 网模型[J].兵工学报,2009,30(9):1271-1275. (Qu C Z, Yu Y L, Hao J P, et al. Equipment maintenance colored Petri net model for unscheduled maintenance downtime analysis[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9):1271-1275.)
- [20] 曲长征,张柳,于永利,等.基于 ExSpect 领域模型库的装备维修机构仿真环境构建[J].系统仿真学报,2009,21(9):2772-2775. (Qu C Z, Zhang L, Yu Y L, et al. Development of material maintenance organization modeling and simulation environment based on ExSpect domain library[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(9):2772-2775.)