

# 基于 Petri 网的装备战场抢修系统建模研究

翁 辉,徐海珠,陈晓山

(海军工程大学 管理工程系,湖北 武汉 430033)

**摘 要:**为了提高装备战场抢修系统的决策效率和决策科学性,以信息化条件下战场环境和我军装备维修现状为基础,分析了我军装备战场维修能力和维修需求。利用 petri 网进行装备抢修系统建模的特有优势,建立了装备战场抢修决策过程的 petri 网模型,模型主要包括装备战场抢修决策流程、装备损伤评估和野战维修能力评估。最后用 CPN-Tools 工具对一个实例进行仿真,应用模型节约了维修时间,提高了资源利用率,验证了模型实用性和有效性。

**关键词:**petri 网;战场抢修;建模;决策

**中图分类号:**E92

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2010)03-0176-04

## Modeling Research on Equipment Battlefield Repair System Based on Petri Net

WENG Hui, XU Hai-zhu, CHEN Xiao-shan

(Dept. of Management Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency and scientificity of decision-making in equipment battlefield repair system, the capability and request of repairment were analysed based on battlefield circumstance and repair situation in information war. The model of equipment battlefield repair system was built based on Petri net because of its special advantages, which includes the decision flow, damage evaluation and capability evaluation. At last an example was simulated with CPN-Tools, the application of the model saved time and made use of repair resource, which testified the practicability and validity of the model.

**Key words:** petri net; battlefield repair; modeling; decision

### 0 引 言

信息化条件下的局部战争具有的突发性、速决性、高强度、高消耗等特点,对装备的战场抢修能力提出了更高的要求。战场环境的瞬息万变使得缩短维修时间对恢复战斗力有着重要意义。而装备战场抢修系统是一个包含装备、人员、物资、信息、管理等因素的复杂系统<sup>[1]</sup>,需要装备指挥部门对保障力量和资源进行的组织、协调、控制、指挥。文中研究如何提高抢修系统的决策速度和决策质量,以提高装备战场抢修系统的快速反应能力。

### 1 用 Petri 网进行装备抢修系统建模的优势

装备战场抢修系统是随机离散系统,也是分布并行系统<sup>[2]</sup>。对其建模的方法有兰彻斯特方程、蒙特卡罗方法、DFD 数据流图、Petri 网、PERT/CPM 法、ID-

EDF3 法、随机网络方法、事件驱动的过程链方法等<sup>[3]</sup>。Petri 网的优势就在于它图形建模的直观性和理论分析的严谨性,它既能直观地描述系统内部要素的相互作用(顺序、并发、同步、冲突等),又能够详尽地分析系统的动态性质(有界性、安全性、活性、可达性等)<sup>[4]</sup>,Petri 网中的库所、变迁、令牌等概念可以贴切地描述装备抢修系统中的机构、操作、资源<sup>[5]</sup>,因此用 Petri 网研究装备战场抢修系统的决策效率具有重要价值。

### 2 基于 Petri 网的装备战场抢修决策模型

装备战场抢修决策活动主要包括装备战伤评估和维修策略选择,如何根据战伤评估结果选择维修策略,主要取决于各维修单位的维修能力(由维修人员、设备、备件确定)和战场环境。装备战伤评估内容包括故障类型(伴随抢修、野战抢修、基地抢修)、维修方式(换件、拆拼、原件修复、制配、替代等)、维修步骤等。

#### 2.1 装备战场抢修决策流程

维修的决策过程如下:装备战场损伤后,首先经过

收稿日期:2009-03-11;修回日期:2009-08-05

作者简介:翁 辉(1975-),男,湖北咸宁人,硕士,讲师,研究方向为装备保障和装备指挥。

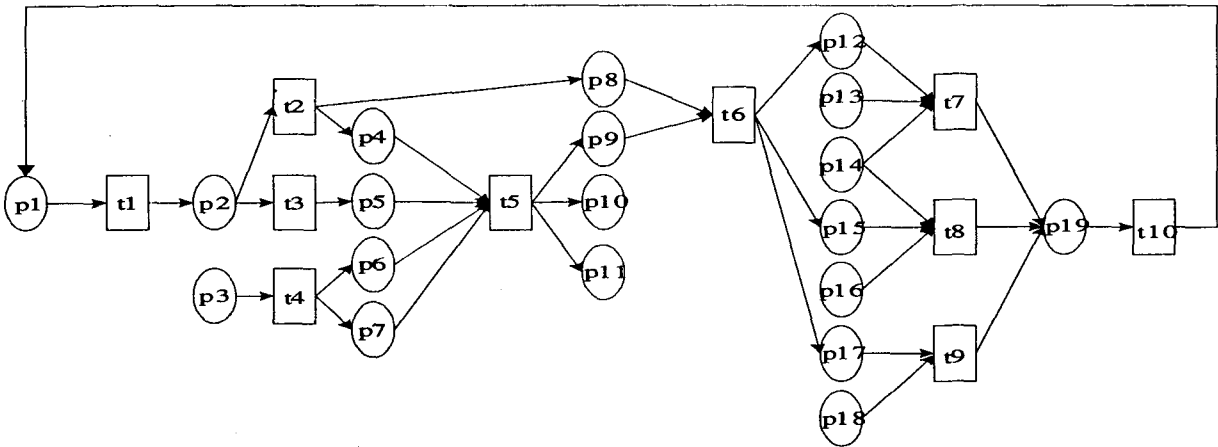


图1 装备战场抢修决策 petri 网模型

损伤评估得到损伤等级、故障类型和损伤影响,结合战场环境进行战伤装备处置,将没有维修价值的装备和战斗结束前无法修复的装备退出战斗,将受伤但未失去基本作战能力的装备降级使用<sup>[6,7]</sup>。影响评估得到损伤装备对战争的影响,对关键装备优先安排维修。装备故障类型主要分为系统故障、模块故障和元件故障。维修方式选择的一般原则是基地负责系统故障的维修,野战抢修力量负责模块故障的维修,伴随力量承担元件故障的维修<sup>[8]</sup>。因为野战抢修和伴随力量比较薄弱,需要分别评估他们的维修能力,确定是否需要远程支援保障。维修力量确定后,再根据损伤类型确定维修方式和维修步骤。装备战场抢修决策 petri 网模型如图1所示,图1中各项标识的意义见表1。

表1 装备战场抢修决策图中标识的意义

库所	意义	库所	意义	变迁	意义
p1	完好的装备	p11	降级使用	t1	战场受损
p2	损伤装备	p12	野战维修决定	t2	损伤评估
p3	战场环境	p13	野战维修能力	t3	影响评估
p4	损伤等级	p14	远程会诊	t4	维修价值评估
p5	损伤影响	p15	伴随维修决定	t5	战伤装备处置
p6	维修时间	p16	伴随维修能力	t6	维修方式选择
p7	维修成本	p17	基地维修决定	t7	野战抢修
p8	故障类型	p18	运送力量	t8	伴随抢修
p9	维修决定	p19	修复的装备	t9	基地抢修
p10	退出战斗			t10	送回战场

图1中 t2,t3,t4, t7,t8,t9 为子网变迁,p13,p16 为复合库所,它们本身包含一些列的操作,下面仅对 t2 和 p13 介绍,其它子网变迁和复合库所与之类似。图2是子网变迁 t<sub>2</sub>(损伤装备的战伤评估)的详细介绍,图2中各项标识的意义见表2。

2.2 装备损伤评估

装备损伤评估采用模糊综合评判的方法<sup>[9]</sup>,具体评估过程为:由内嵌检测仪和工具箱检测出状态信息,然后由决策支持系统进行模式识别,得到故障模糊类

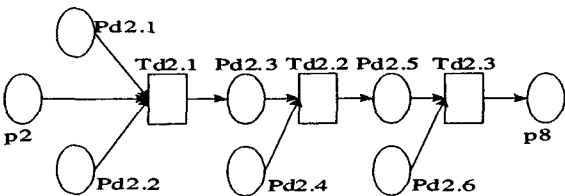


图2 装备损伤评估 petri 网模型

表2 装备损伤评估图中标识的意义

库所	意义	变迁	意义
Pd2.1	内嵌检测仪	Td2.1	状态检测
Pd2.2	检测工具箱	Td2.2	故障模式识别
Pd2.3	状态信息	Td2.3	远程会诊
Pd2.4	决策支持系统		
Pd2.5	故障模糊类型		
Pd2.6	远程支援系统		

型,再由远程会诊确定故障类型。其中决策支持系统采用模糊模式识别方式,具体如下:

将装备战场损伤分成3个等级:系统、模块和元件。将0~1区间等分为3个得分范围,并且取区间内的值作为各等级的量化值,见表3。

表3 评估指标的等级划分

	系统	模块	元件
量化值	0.85	0.5	0.15
得分范围	$0.7 \leq x \leq 1$	$0.3 \leq x < 0.7$	$0 \leq x < 0.3$

设有4位专家对3个待评系统进行评价,第k位专家对第i个系统的第j个指标( $1 \leq j \leq 5$ )的打分记为由此得到综合评判矩阵  $X = [x_{ij}]_{ij}$ 。根据表3的等级划分,定义与各评估等级(灰类)对应的白化权函数为:

第1等级(系统):

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \in [0, 0.3] \\ \frac{x - 0.3}{0.4}, & x \in [0.3, 0.7] \\ 1, & x \in [0.7, 1] \end{cases} \quad (1)$$

第 2 等级(模块):

$$f_2(x) = \begin{cases} \frac{x}{0.3}, x \in [0, 0.3] \\ 1, x \in [0.3, 0.7] \\ \frac{1-x}{0.3}, x \in [0.7, 1] \end{cases} \quad (2)$$

第 3 等级(元件):

$$f_3(x) = \begin{cases} 1, x \in [0, 0.3] \\ \frac{0.7-x}{0.4}, x \in [0.3, 0.7] \\ 0, x \in [0.7, 1] \end{cases} \quad (3)$$

根据上述计算指标的权值,可以确定因素集  $U$  中各因素  $u_i$  的权重  $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5)$ 。对于 3 个待评系统(系统、模块、元件),4 位专家在 1~5 标度(5 类状态信息)上对指标程度打分,给出判断矩阵,进而得到指标权重  $W = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5)$ ,第  $k$  位专家  $(1 \leq k \leq 4)$  对第  $i$  个系统的第  $j$  个指标  $(1 \leq j \leq 5)$  的打分记为由此得到综合评判矩阵  $X = [x_{ij}]_{ij}$ ,利用白化权函数<sup>[10]</sup>,计算出指标隶属度  $y_{ij}^e (1 \leq i \leq 3, 1 \leq j \leq 5, 1 \leq e \leq 5)$ ,则每个系统都可得到一个灰色评估权矩阵  $Y$ ,将其与权重向量相乘得到系数:  $z_i^e (1 \leq e \leq 5, 1 \leq i \leq 3)$ 。则第  $i$  个系统的各状态指标为:

$$Z = W * Y = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5) \cdot \begin{pmatrix} y_{i1}^1 & y_{i1}^2 & \dots & y_{i1}^5 \\ y_{i2}^1 & y_{i2}^2 & \dots & y_{i2}^5 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{i5}^1 & y_{i5}^2 & \dots & y_{i5}^5 \end{pmatrix} = (z_i^1, z_i^2, \dots, z_i^5) \quad (4)$$

根据得到的  $B_i = \sum_{e=1}^5 z_i^e$  (其中  $1 \leq e \leq 5, 1 \leq i \leq 3$ ),就可以判断第  $i$  个系统所属的得分,根据表 1 可以得到其对应等级,从而得到装备战伤的模糊类型。

2.3 野战维修能力评估

野战维修能力评估采用多级综合评判的方法,图 3 是复合库所 p13(野战维修能力)的内部实现过程,图中的各项标识意义见表 4。

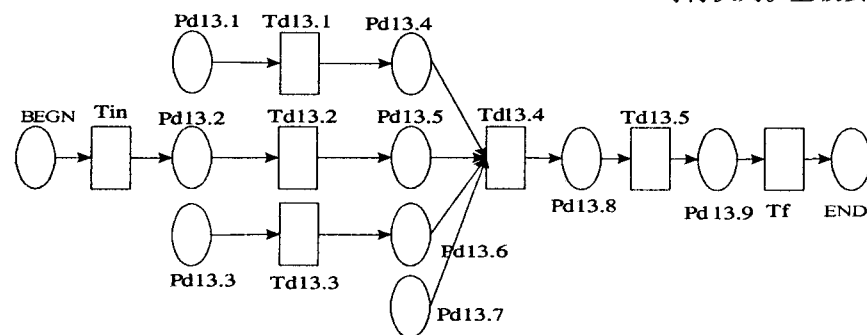


图 3 野战维修能力评估 petri 网模型  
野战维修能力评估过程为:采取专家打分的方法

对各因素分别进行两两比较,并引入 1~9 标度将比较

表 4 野战维修能力评估图中标识的意义

库所	意义	变迁	意义
Pd13.1	维修人员	Td13.1	人员能力评估
Pd13.2	维修设施	Td13.2	设施效能评估
Pd13.3	维修备件	Td13.3	备件效能评估
Pd13.4	维修人员能力	Td13.4	维修效能综合评判
Pd13.5	维修设施效能	Td13.5	维修方案筛选
Pd13.6	维修备件效能		
Pd13.7	机动能力		
Pd13.8	野战维修综合效能评估		
Pd13.9	维修力量配置		

结果用数值表示,构成判断矩阵。为检验判断矩阵的不一致性,定义平均特征值差作为其一致性指标(简记为  $CI$ ),即有:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{-\sum_{i \neq \max} \lambda_i}{n - 1} \quad (5)$$

$CI$  值越大,判断矩阵的完全一致性就越差。一般只要  $CI \leq 0.1$ ,就认为判断矩阵的一致性可接受,否则需重新比较判断。最后根据不同的权重进行综合评判得到维修效能。

战场受损装备的诊断和维修的决策完成后,装备保障部门就可以迅速组织力量和筹措物资实现装备战场迅速抢修,经过检测后,修复的装备又被运送到战场,重新形成战斗力。

3 实例仿真

下面用 CPN - Tools 对一个物资运送流程 petri 网模型进行仿真。

假设某团有三个修理组,每组三个工人。任务到达时间服从  $\lambda$  的指数分布( $\lambda$  的大小随战情变化),每次维修时间服从  $\mu$  的均匀分布。供应请求到达时,任选一个空闲修理组。当三个修理组都忙时,请求进入等待队列。上级要求运输力量繁忙率 80% - 90% 之间,等待队长不超过 4。

调整库所 Pd13. 1, Pd13. 2, Pd13. 3 的 token 数目  $p, q, r$  的大小,给 Td13. 4 赋予点火条件  $repair()$  函数, Td13. 5 点火条件  $judge(P, L)$  函数,用于判断繁忙率和队长是否达标,不达标的方案不予通过,合格的力量配置被输出到下一步仿真,仿真结果如表 5 所示。

表 5 实例部分仿真结果

编号	p	q	r	组数	$\lambda$	$\mu$	繁忙率 p	队长 L
1	9	3	6	3	0.8	0.4	90.8%	2.87
2	10	5	8	3	0.9	0.35	87.7%	2.79
3	11	4	8	3	0.9	0.4	93.1%	3.91
4	9	5	7	3	0.8	0.5	83.5%	3.20
5	12	4	8	4	0.95	0.4	82.8%	3.49
6	11	7	6	3	0.95	0.4	93.4%	8.39

相关变量定义如下:

```
color INT= int;
val p,q,r :INT;
colset E = with e;
colset worker = index w with 1...p declare ran;
colset facility = index f with 1...q declare ran;
colset module = index m with 1...r declare ran;
fun repair(group)= 3'p+ +1'f+ +2'm;
fun judge(P,L)
    if (P>= 80% and P<= 90% and L<= 4)
then 1'e else empty;
```

仿真结果如下:

```
Statistics
-----
Occurrence Graph
Nodes:14
Arcs:13
Secs:1
Status:Full
Boundedness Properties
-----
Home Markings: All
Liveness Properties
-----
Dead Markings: None
Dead Transitions Instances:None
Live Transitions Instances: All
```

由仿真结果可知,模型中不存在死锁,具有安全性和可达性。通过调整  $\lambda$  和  $\mu$  的大小进行仿真后,第 2

组、第 4 组、第 5 组数据符合任务要求,仿真通过。仿真结果也表明,如果供应要求更加频繁或者平均运输时间变长,则需要增加维修力量(见第 5 组数据)。

4 结束语

文中分析了战场装备抢修流程、petri 网在战场抢修流程建模中的优势,建立了基于 petri 网的战场抢修模型,并通过 CPN-Tools 实例仿真,验证了模型的可行性。但模型还不够细致,不少决策还需要人工干预,对于判断条件的细化等工作还有待于下一步的研究。

参考文献:

[1] 齐胜利,武 昌,杨 懿.基于分层着色 Petri 网的装备战场抢修系统建模[J].系统仿真学报,2005,17(10):2327 - 2329.

[2] Donateli S, Sereno M. On the Product Form Solution for Stochastic Petri Nets[C]//In: Proc of IEEE In FOCOM 2004. San Francisco, CA, USA: [s. n. ], 2004.

[3] 陈春良,王岩磊,孙盛坤. HTCPN 在装备保障业务流程建模与优化中的应用[J]. 系统仿真学报,2008,20(10):2746 - 2749.

[4] Peter J H. Estimation Methods for Nonregenerative Stochastic Petri Nets[J]. IEEE Trans Software Engineering, 1999, 25 (3):218 - 236.

[5] 杨美玲,朱建冲.基于 petri 网的装备维修流程通用模型研究[J].系统仿真学报,2005,17(S1):128 - 130.

[6] 曹继平,宋建社,王正元.战时装备维修保障资源优化调度方法研究[J].系统工程与电子技术,2007,29(6):915 - 919.

[7] 封利民,龚传信,高晓利,等.装备保障链中的信息流分析[J].海军航空工程学院学报,2006,21(6):675 - 679.

[8] 王建军,花兴来.基于 petri 网的装备物流管理模型[J].空军雷达学院学报,2002,16(1):27 - 30.

[9] 谭雪花,王华伟.飞机维修方案优化支持系统框架研究[J].计算机技术与发展,2008,18(11):183 - 186.

[10] 原菊梅,侯朝桢,王小艺,等.基于随机 Petri 网的可修系统可用性模糊评价[J].计算机工程,2007,33(8):17 - 19.

(上接第 175 页)

[5] 李 水,武成宾.一种实现主备倒换的装置和方法[M].北京:国家知识产权出版社,2005.

[6] 刘玉倩.高端流量管理中流量整形和标签处理算法的 FP-GA 实现[D].成都:电子科技大学,2005.

[7] Gottlieb Y, Peterson L. A Comparative Study of Extensible Routers[C]// 2002 IEEE. [s. l.]: IEEE Communications Magazine, 2002:51 - 62.

[8] 曹 琼. 高端路由交换机中的路由热备份技术应用研究[D].成都:西南交通大学,2005.

[9] Lundberg J. Routing Security in Ad Hoc Networks. URL: [EB/OL]. 2000. <http://citeseer.ist.psu.edu/lundberg00routing.html>.

[10] 宋 芳. ZXUAS 10800E(V2.8.01)电信级宽带接入服务器用户手册[M].深圳:中兴通讯,2008.