

doi: 10.7690/bgzd.2013.07.013

一种基于 Petri 网的全覆盖想定生成算法

张媛, 王明哲, 纪光友

(华中科技大学控制科学与工程系, 武汉 430074)

摘要: 想定是作战仿真系统的重要组成部分, 是复杂作战序列仿真运行的初始态势, 是获取可信仿真分析结果的前提。在全覆盖想定概念的基础上, 提出一种力图遍历所有可能作战事件和事件序列的全覆盖初始标识(想定)的生成算法。应用 Petri 网的网结构理论, 通过对视为被仿真系统可能想定的 Petri 网初始标识与该标识下的网事件进程行为的输入/输出分析, 并以实例进行验证。实例结果表明: 该算法操作性强, 能很容易获取系统的全覆盖想定。

关键词: 全覆盖想定; 初始标识; Petri 网; 进程网

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

A Full Coverage Scenario Generating Algorithm Based on Petri Nets

Zhang Yuan, Wang Mingzhe, Ji Guangyou

(Department of Control Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Scenario play is an important part in military simulation system. It provides initial state for the running of complex operational sequences and it's the precondition to obtain the simulation analysis results. Based on the concept of full coverage scenario, an algorithm is proposed to construct the full coverage initial marking or scenario trying to cover all the possible operational events and event sequences. Apply structure theory of Petri nets, take initial marking as the input and the corresponding process net unfolded as the output and analyze the input and the output. Then validate it through a case. The results show that the proposed algorithm is feasible and it's easy to obtain the full coverage scenario of system.

Key words: full coverage scenario; initial marking; Petri nets; process net

0 引言

想定是按照训练课题对作战双方的企图、态势以及作战发展情况的设想和假定^[1]。任何一个军事仿真系统都是在一定的想定下开始运行的, 想定是军事仿真系统设计不可或缺的重要组成部分, 是取得仿真可信运行结果、结论的必要条件。随着仿真技术在军事领域的广泛应用和不断发展, 想定的描述已成为仿真需求描述的主要手段。

国外的军事仿真想定研究一直处于领先地位, 已经开发出一些以想定和态势显示为核心的商业化软件产品。比较典型的是加拿大 Virtual Prototypes 公司推出的想定工具集与生成环境(scenario toolkit and generation environment, STAGE), STAGE 可用于军事对抗的实时仿真训练环境。国内一些高校和科研院所也开展了相关研究, 例如, 北京航空航天大学进行了基于 Web 的仿真想定管理工具研究^[2], 北京系统工程研究所开发了基于仿真想定标记语言的想定管理系统等^[3]。

目前国内外对想定的研究主要集中在想定描述的格式、想定的可读性等方面^[4], 尽管也有不少针对网络、气象、军事、卫生、医药仿真分析论文,

如文献[5]和文献[6]在研究无线传感器网络节点的一般切换和全局调度算法仿真和射频识别(radio frequency IDentification, RFID)读写器和电子标签的放置问题以及文献[7]的国家医保费用预测中都讨论或使用了“全覆盖想定”的概念和要求, 但是对于如何设计和获得一个全覆盖想定则很少提出, 更少研究。笔者从 2 个层面将“全覆盖想定”定义为: 能触发所有仿真事件(作战事件)的想定和能遍历所有仿真序列(作战序列)的想定。

全覆盖想定是衡量想定设计完备性的标准。为了衡量和获得能遍历所有可能的作战事件和状态的想定, 笔者从 Petri 网^[8]的角度提出全覆盖想定设计标准和渐进辨识^[9]的全覆盖想定生成算法。通过将系统初始标识作为系统的想定(即输入样本)与该初始标识下系统事件触发过程展示的进程网为输出样本的对应关联分析, 采用步进地寻优的全覆盖方法, 从某一给定的初始标识集合开始, 分析、判断和逐步获得不断优化的初始标识(想定), 使结果满足全覆盖定义的仿真想定方案。

1 基本概念与定义

定义 1 普通 Petri 网系统由六元组 $\Sigma=(P, T, I,$

收稿日期: 2013-01-30; 修回日期: 2013-02-14

基金项目: 基于行为的 SoS 体系结构评价研究(61273207)

作者简介: 张媛(1989—), 女, 湖北人, 工学硕士, 从事体系结构建模与仿真分析。

O, W, M_0)组成, 其中: P 是有限库所(Place)集合; T 是有限变迁(Transition)集合, $P \cap T = \emptyset$; I 是库所到变迁的有向弧(Arc)集合, $I \subseteq P \times T$; O 是变迁到库所的有向弧集合, $O \subseteq T \times P$; W 是有向弧上的权函数, 对 $\forall(x, y) \in I \cup O$, 有 $W(x, y) \in \{0, 1\}$; 前四元 (P, T, I, O) 构成网 PN 的基本结构, M_0 为初始标识, 由令牌在 P 中的分布表示。方便起见, 笔者仅应用基础网(Basic Nets)即满足如下条件的 Petri 网:

- 1) $\forall t \in T, \exists p, q \in P$, 使 (p, t) 和 $(t, p) \in I \cup O$;
- 2) $\forall t \in T, \exists p, q \in P$, 若 $\exists(p, t)$ 和 $(t, q) \in I \cup O$,

则 $p \neq q$ 。

这里, 变迁 t_j 的前(后)集 ${}^*t_j(t_j^*)$ 表示满足 $I(p_i, t_j) \neq 0$ ($O(t_j, p_i) \neq 0$) 的库所集合。同理, 库所 p_i 的前(后)集 ${}^*p_i(p_i^*)$ 表示满足 $O(t_j, p_i) \neq 0$ ($I(p_i, t_j) \neq 0$) 的变迁集合。若 ${}^*p_i(p_i^*) = \emptyset$, 则称 p_i 为源(汇)库所。PN 的关联矩阵 $(|P| \times |T|$ 维)表示为 $C = C^+ - C^-$ 。其中 $C^+ = [c_{ij}^+]$, $c_{ij}^+ = O(t_j, p_i)$; $C^- = [c_{ij}^-]$, $c_{ij}^- = I(p_i, t_j)$ 。

定义 2 若 X 为 $|P|$ 维非负整数列向量, 非零, 并且满足 $X^T C = 0$, 则称 X 为 PN 的一个 S 不变量。 X 中的非零元素对应的库所构成 X 的 S 不变量支撑, 记为 $\langle X \rangle$, $\langle X \rangle$ 以及与 $\langle X \rangle$ 直接相连的弧和变迁构成 X 的组成, 记为 $[X]$ 。若 PN 中某一个 $\langle X \rangle$ 除了包含自身和空集外, 不包含 PN 的任何其他 S 不变量支撑, 则称 $\langle X \rangle$ 为 PN 的一个最小 S 不变量支撑。

定义 3 若从 PN 的某一个初始标识 M_0 出发, 网中所有的变迁都可以触发, 则称该初始标识 M_0 为全覆盖的初始标识。

定义 4 若某初始标识集合 $M_0 = \{M_{01}, M_{02}, \dots, M_{0n}\}$ 为所有全覆盖初始标识组成的集合, 假如该集合中某个初始标识 M_{0i} 中含有令牌的库所总数最小, 则称该初始标识 M_{0i} 为最优的全覆盖初始标识。

定义 5 若网 $N=(B, E, F)$ 与原 Petri 网系统 (PN, M_0) , 存在映射 $\rho: N \rightarrow (PN, M_0)$, 满足:

- 1) $\rho(B) \subseteq P \wedge \rho(E) \subseteq T \wedge \forall(x, y) \in F: \rho(x, y) = (\rho(x), \rho(y)) \in F$;
- 2) $\forall e \in E: \rho^*(e) = {}^* \rho(e) \wedge \rho(e^*) = \rho(e)^*$;
- 3) $\forall b_1, b_2 \in B: b_1 \neq b_2 \wedge \rho(b_1) = \rho(b_2) \Rightarrow {}^* b_1 \neq {}^* b_2 \wedge b_1^* \neq b_2^*$;
- 4) $\forall p \in P: |\{b \mid {}^* b = \Phi \wedge \rho(b) = p\}| \leq M_0(p)$ 。

则称 (N, ρ) 为 (PN, M_0) 的进程网, 记为 $N(PN, M_0)$ 。

2 基于 Petri 网的想定生成算法

根据被仿真系统结构是否已知, 不失一般性地分以下 2 种情况讨论全覆盖想定生成问题:

- 1) 未知被仿真系统结构。

大多情况下, 人们不可能确切掌握被仿真系统的事件逻辑结构关系, 但凭先验知识, 在不考虑被仿真系统内部状态的前提下, 假设已知被仿真系统中可能与想定相关的事件前置条件以及被仿真事件数目。据此, 选用有 m 个库所和 n 个变迁的 Petri 网来分析想定生成算法。

将相应仿真系统的 Petri 网初始标识作为系统输入样本(I), 由此展现的进程网为输出样本(O)。通过分析不同的输入/输出样本生成关系, 创建仿真系统 PN 模型, 确定最优全覆盖的初始标识, 由此生成系统的全覆盖想定。

为方便起见, 约定: $M_{0_init}, M_{0_cur}, M_{0_upd}, M_{0_end}$ 为初始标识集合; $N_{cur}, N_{upd}, N_{end}$ 为 $M_{0_cur}, M_{0_upd}, M_{0_end}$ 下相应的进程网集合; P_z 为部分库所集合。

在阐述全覆盖想定生成算法之前, 先引入 2 个判据和一条规则:

- 判据 1(判断是否有新的事件发生):

探测到某一变迁 t_j 触发, 若不存在 t_i (t_i 为已经出现的任意变迁), 同时满足 ${}^*t_i = {}^*t_j$ 和 $t_i^* = t_j^*$, 则判定变迁 t_j 为新的事件。

- 判据 2(判断是否为最优全覆盖的初始标识):

给定某一个全覆盖的初始标识 M_0 , P_m 为 M_0 中含有令牌的库所集合, 若任意剔除 P_m 中某一元素, P_m 中剩余元素作为含有令牌的库所形成的初始标识都不是全覆盖的初始标识, 则称 M_0 为最优的全覆盖的初始标识。

- 将算法中采用的规则用形式化的语言描述为:

规则 1:

If 探测到新的变迁 t_j 触发;

Then 观察库所 *t_j 和 t_j^* , ${}^*t_j = p_k, t_j^* = p_s$, 计算向量 $V_j = [v_1 \dots v_k \dots v_s \dots v_m]^T$, 其中 $v_k = -1, v_s = 1, v_x = 0 \forall x \neq k, s$, 将 V_j 作为第 j 个列向量加入到关联矩阵 C 中。

以系统的初始标识作为输入信号(I), 系统的进程网作为输出信号(O), 寻找最优的全覆盖初始标

识,生成系统的全覆盖想定算法可以分为5个步骤。

Step1 初始化输入。

已知库所集合 $P=\{p_1,p_2,\dots,p_m\}$,依次对每个库所赋予一个令牌,给定最初的初始标识集合 $M_{0_init}=\{M_{0_init1},M_{0_init2},\dots,M_{0_initm}\}$, M_{0_init} 第 i 个分量为1,其余分量为0。令 $M_{0_cur}=\{M_{0_cur1},M_{0_cur2},\dots,M_{0_curm}\}=M_{0_init}$ 。

Step2 记录对应的进程网。

以 M_{0_cur} 集合中初始标识为输入,观察并记录相应的进程网 N_{cur} 。

Step3 遍历进程网,更新系统关联矩阵。

遍历 N_{cur} 集合中每一个进程网 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$, $i=1,\dots,m$:采用判据1判断进程网 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$ 是否有新的变迁触发,如有,则应用规则1更新关联矩阵 C ,并将初始标识 M_{0_curi} 和进程网 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$ 记录下来,分别添加到集合 M_{0_upd} 和集合 N_{upd} 中;若初始标识 M_{0_curi} 对应的进程网 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$ 中所有的变迁都已触发,将对应的初始标识 M_{0_curi} 添加到集合 M_{0_end} ,对应的进程网 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$ 添加到集合 N_{end} 。

遍历结束后,检查 M_{0_end} ,更新 M_{0_upd} 集合:

If M_{0_end} 集合不为空; Then 转 Step5。

Else 转 Step4。

Step4 重置初始标识

For($y=2$; $y<m$; $y++$):

任意 $M_{0_updk}, M_{0_updr} \in M_{0_upd}$:

If $N_{updk}(PN, M_{0_updk}) \subseteq N_{updr}(PN, M_{0_updr})$; Then 将 M_{0_updk} 从集合 M_{0_upd} 中删去,将 $N_{updk}(PN, M_{0_updk})$ 从集合 N_{upd} 中删去。

Else;

将集合 N_{upd} 剩余的每个进程网 $N_{updi}(PN, M_{0_updi})$ 的源库所添加到 P_z ,将同时满足 $p_i \in P$ 和 $p_i \notin N_{upd}$ 的库所也添加到 P_z 。将 P_z 中的任意 y 个库所组合赋予令牌形成新的初始标识集 M_{0_cur} (显然, M_{0_cur} 集合中初始标识的个数为 $C_{|P_z|}^y$),观察 M_{0_cur} 下相应进程网集合 N_{cur} 中每一个进程网 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$:采用判据1判断进程网 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$ 是否有新的变迁触发,如有,则应用规则1,更新关联矩阵 C ,并将 M_{0_curi} 和 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$ 记录下来,分别添加到集合 M_{0_upd} 和集合 N_{upd} 中;若 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$ 中所有的事件都已触发,将 M_{0_curi} 添加到集合 M_{0_end} ,对应的进程网 $N_{curi}(PN, M_{0_curi})$ 添加到集合 N_{end} ,跳出循环,转 Step5;否则置 $P_z = \emptyset$ 继续循环。

Step5 获取最优的全覆盖初始标识。

集合 M_{0_end} 中的初始标识 M_{0_end1} 即为所求的最优的全覆盖初始标识,依据 M_{0_end1} 中各令牌相应的物理含义,将其映射为系统的仿真相定。

2) 已知仿真系统逻辑结构。

假设通过系统活动模型和规则模型已经建立被仿真系统的逻辑结构模型,那么全覆盖想定生成问题求解就变得更为简单,并且可获得覆盖所有仿真事件和遍历所有事件序列的想定方案。

当然,在第1种情况下获得确切的被仿真系统逻辑结构(关联矩阵)后,同样可以由以下算法获得能遍历系统所有的事件序列的想定。从 Petri 网的角度考虑,即采用 Petri 网的结构化方法,寻找系统的源节点到汇节点之间的完全事件路径。

具体的算法步骤为:

Step1 求解 PN 系统的 S 不变量 x ,最小 S 不变量支撑 $\langle x_i \rangle$ 和组成 $[x_i]$;

Step2 选定某一汇库所;

Step3 选取所有包含此汇库所的最小 S 不变量组成 $[x_i]$,构成 PN 的一个子网 $[x]=\cup [x_i]$;

Step4 检查 $[x]$ 中 ${}^*t_j \in \langle x \rangle$ 是否包含了所有的 *t_j ,是则该汇库所吸收了所有流入事件,算法终止, $[x]$ 为其完全事件路径;否则转 Step5;

Step5 选定 $p_k \notin \langle x \rangle$ 但 $p_k \in {}^*t_j$,找出包含 p_k 的最小 S 不变量组成 $[x_k]$,构成新的 $[x]'=[x] \cup [x_k]$;若 PN 中存在库所 p_x 没有被所有的 S 不变量支撑所覆盖,则找出源库所到 p_x 的全部路径,加入到 $[x]$;返回 Step4。

按照上述算法步骤依次求出源节点(库所)到各汇节点(库所)的完全事件路径,解析成事件序列,PN 中的变迁对应事件,PN 中的库所对应事件触发后的状态,生成遍历 PN 系统所有事件序列的全覆盖想定。

3 算法示例

考虑作战仿真系统中一部预警雷达的搜索过程。已知其 Petri 网模型为基础网,库所集合 $P=\{p_1,p_2,p_3,p_4,p_5,p_6,p_7,p_8\}$,变迁的数目为6。求解该模型的全覆盖想定。

显然,系统的逻辑结构未知,按第2部分中第1种情况下全覆盖想定生成算法,可进行如下操作:

Step1 初始化输入,依次对每个库所赋予一个令牌。

Step2 记录对应的进程网。

篇幅有限，以下只列出有新的变迁触发的初始标识下的进程网：

1) 初始标识 $[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 对应的进程网如图 1 所示。

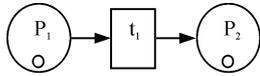


图 1 初始标识 $[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 对应的进程网

2) 初始标识 $[0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 对应的进程网(有 3 个进程)如图 2 所示。

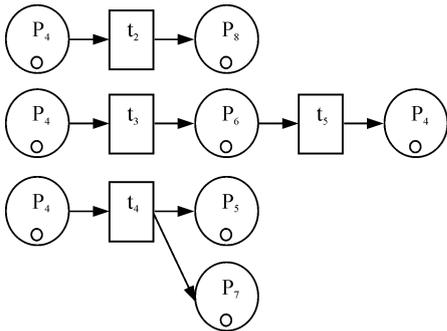


图 2 初始标识 $[0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 对应的进程网

Step3 遍历进程网，更新系统关联矩阵。

通过观察 Step2 中的进程网集合，应用规则 1 计算关联矩阵 C，发现关联矩阵 C 中已有 5 列，还有 1 个变迁未触发。

Step4 重置初始标识。

将初始标识 $[1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 和 $[0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 下的进程网的源库所 p_1 、 p_4 ，以及进程网中未出现

的库所 p_3 加入集合 P_z 中，即 $P_z=\{p_1,p_4,p_3\}$ ，对 P_z 中任意 2 个库所赋予令牌，形成新的初始标识集合 $M_{0_cur}=\{[1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T,[1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T,[0\ 0\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]^T\}$ ，发现初始标识 $[1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 对应的进程网中有新变迁 t_6 触发，更新关联矩阵 C，至此，关联矩阵 C 中已有 6 列，所有的变迁均已触发，将初始标识 $[1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 添加到集合 M_{0_end} ，转 Step5。初始标识 $[1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 对应的进程网如图 3。

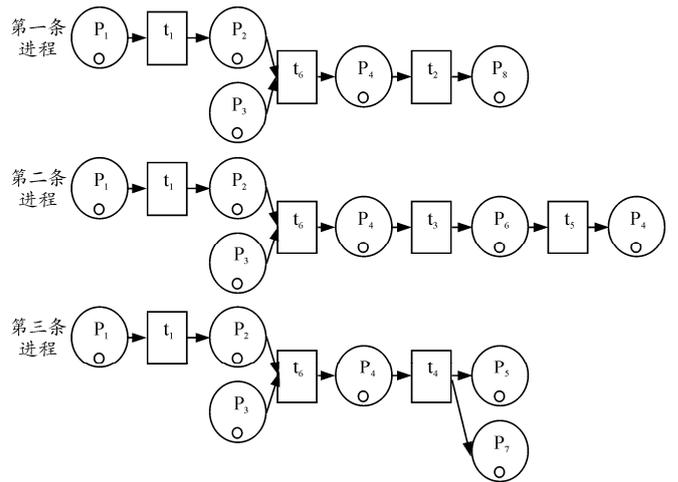


图 3 初始标识 $[1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 对应的进程网

Step5 获取最优的全覆盖初始标识

算法终止，采用判据 2 可判定集合 M_{0_end} 中初始标识 $[1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 为所求的最优的全覆盖初始标识，完整的 Petri 网模型如图 4 所示。

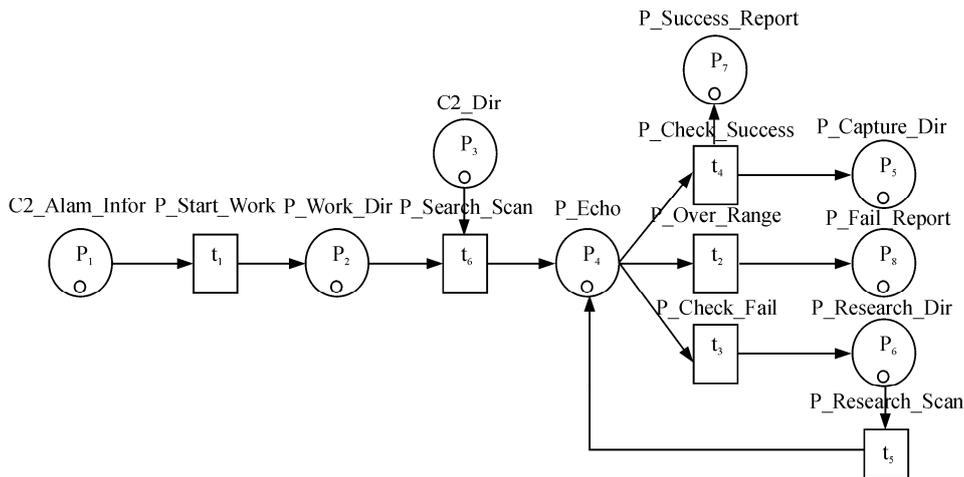


图 4 系统 Petri 网模型

最优全覆盖初始标识 $[1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ 中含有令牌的库所为 p_1 和 p_3 ，其中库所 p_1 代表 C2BMC 传送的预警信息，库所 p_3 代表 C2BMC 传送的引导指示。

不难看出，预警雷达搜索过程中最优的全覆盖想定为：C2BMC 接收预警卫星传送的数据，判定

目标的威胁等级，若目标确实为威胁，则向全系统发布预警，指定参战雷达，C2BMC 根据目标的运动信息、初始作战任务链以及预警雷达的威力范围形成预警雷达引导指示，参战的预警雷达根据引导指示信息在指定的空域内完成对目标的搜索。

4 结束语

笔者以 Petri 网的网结构理论为基础，提出了一种基于 Petri 网的全覆盖想定生成算法。算法的主要思想是将逻辑结构未知的仿真系统的 Petri 网初始标识作为输入样本，由此展现的进程网为输出样本，分析不同的输入输出样本生成关系，创建仿真系统 PN 模型，确定最优全覆盖的初始标识，生成系统的全覆盖想定。此外笔者还研究了已知仿真系统逻辑结构，获取能遍历系统所有作战序列的全覆盖想定算法。该算法步骤清晰具体，操作性强，可以很容易地获取系统的全覆盖想定。

但是笔者仅讨论了一类弧的重数为 1 的基础网，并且已知网中库所及变迁数目。后续的工作是研究如何将该算法进行推广以适用于其他更复杂的网，譬如弧的重数大于等于 1 的情况，以更好地指导作战仿真系统中全覆盖想定的设计。

参考文献：

[1] 军事科学院. 中国人民解放军军语[M]. 北京：军事科学出版社，1997：179.
 [2] 胡亚海，彭晓源，王行仁. 基于 WEB 的仿真中的想定管理[J]. 系统仿真学报，2002，14(3)：403-405.
 [3] 陈欣，胡晓惠，付勇，等. 基于 XML 的仿真想定标记语

(上接第 41 页)

E_3 的所有子集包括 $\{E_{S21}\}$ 、 $\{E_{S22}\}$ 、 $\{E_{S23}\}$ 、 $\{E_{S21}, E_{S22}\}$ 、 $\{E_{S21}, E_{S23}\}$ 、 $\{E_{S22}, E_{S23}\}$ 、 $\{E_{S21}, E_{S22}, E_{S23}\}$ 。
 S_2 中所有元素 (L_2^1, L_2^2) 与这些集合进行并集运算，所得新集合判断其能完成的保障功能 (P) 是否满足 R_3 的要求，能满足 R_3 的集合包括：

$$\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S13}, E_{S21}, E_{S22}, E_{S23}\}$$

$$\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S12}, E_{S13}, E_{S21}, E_{S22}\}$$

$$\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S12}, E_{S13}, E_{S21}, E_{S22}, E_{S23}\}$$

因为第 3 阶段是最后一个阶段，因此在该阶段可通过式 (4) 确定最优解。

经计算， $\{E_{P1}, E_{P2}, E_{P3}, E_{S12}, E_{S13}, E_{S21}, E_{S22}\}$ 为最低累计平均单位工作小时保障设备使用费用 (MCPM=660) 的集合，即最优保障设备种类清单。

5 结论

实例结果表明：笔者提出的方法优化目标明确、计算方法简单，优化结果合理，为解决装备研制阶段保障设备种类归并优化问题提供了理论支撑。

言 SSML[J]. 系统仿真学报，2004，16(9)：1928-1930.

[4] 李伟波，史扬. 基于 XML 的潜艇作战仿真想定开发[J]. 计算机仿真，2007，24(3)：15-17.
 [5] Yu Gu, Joengmin Hwang, Tian He, et al. Usense: A Unified Asymmetric Sensing Coverage Architecture for Wireless Sensor Networks[C]//Proc of the 27th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, Toronto: IEEE Computer Society, 2007: 536-545.
 [6] Al Fagih A E, Al Turjman F M, Hassanein H S, et al. Coverage-Based Placement in RFID Networks: An Overview[C]//Proc of 2012 Third FTRA International Conference on Mobile, Ubiquitous, and Intelligent Computing, Vancouver: Conference Publishing Services, 2012: 220-224.
 [7] Roehrig C, Miller G, Lake C. National Health Expenditure Forecasts Through 2030: A Full Coverage Scenario[J]. Announcement, 2008: 133-136.
 [8] Dotoli M, Fanti M P, Mangini A M, et al. On-Line Identification of Petri Nets with Unobservable Transitions[C]//Proc of the 9th International Workshop on Discrete Event Systems, Goteborg: IEEE Conference Publications, 2008: 449-454.
 [9] Meda-Campana M, Ramirez-Trevino A, Lopez-Mellado E. Asymptotic Identification of Discrete Event Systems[C]//Proc of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney: IEEE Conference Publications, 2000: 2266-2271.

参考文献：

[1] 陈军，陈永革，王程. 基于神经网络的装备保障资源评估[J]. 军事交通学院学报，2008，10(4)：46-48.
 [2] 陈永龙，王玉泉，李世英. 使用保障资源的确定方法探讨[J]. 装甲兵工程学院学报，2003，17(3)：59-62.
 [3] 郭彩芬，王宁生. 基于排队理论优选工作站设备数量[J]. 工业技术经济，2004，23(3)：101-102.
 [4] 郭红芬，刘福胜. 利用排队模型优化保障设备数量[J]. 装甲兵工程学院学报，2005，19(1)29-31.
 [5] 文佳，康锐，刘瑞，等. 基于保障活动流程的保障设备需求量计算模型[J]. 系统工程与电子技术，2010(9)：1903-1906.
 [6] 王乃超，康锐，王禹. 基于产品维修策略的保障设备需求量计算模型研究[J]. 系统工程与电子技术，2009(5)：1266-1269.
 [7] Alfredsson, Patrik. Optimization of multi echelon repairable item inventory systems with simultaneous location of repair facilities[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 99(3): 584-595.
 [8] Green L, Kolesar P. The point wise stationary approximation for queues with non stationary arrivals[J]. Management Science, 1991, 37(1): 84-97.
 [9] James V.J. Integrated Logistics Support Handbook[M]. SOLE LOGISTICS PRESS, 2006: 13.1-13.2; 17.1-17.5.
 [10] 康锐，康晓明，王乃超. 保障设备种类归并优化方法研究(尚待正式发表).