

doi: 10.7690/bgzd.2021.02.020

基于改进 Petri 网的装备维修资源需求预测

高颖杰, 曹继平, 杨阅兵, 许泽中

(火箭军工程大学作战保障学院, 西安 710025)

摘要: 为解决维修工作分析方法在装备维修资源预测中存在的不足, 提出一种用维修工作 Petri 网 (maintenance task Petri net, MTPN) 来描述装备维修过程的方法。基于 Petri 网理论并结合装备维修过程的特点, 以某装备液压机构的故障维修为例, 建立 MTPN 模型, 并得出所需维修资源的种类和数量。实例结果表明: 该方法对装备维修过程的描述清晰直观, 得出所需装备维修资源的种类和数量准确详细。

关键词: Petri 网; 维修资源; 装备故障; 维修过程; 维修工作 Petri 网

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Forecast of Equipment Maintenance Resource Demand Based on Improved Petri Net

Gao Yingjie, Cao Jiping, Yang Yuebing, Xu Zezhong

(School of Operational Support, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the shortcomings of the maintenance task analysis (MTA) method in equipment maintenance resources forecasting, maintenance task Petri net (MTPN) is proposed to describe the equipment maintenance process. Based on Petri net theory, combining with the equipment maintenance process feature, taking the maintenance of certain type equipment hydraulic mechanism as an example, the MTPN model is established, and the types and quantity of maintenance resources required for maintenance work are obtained. The example shows that the description of the equipment maintenance process is clear and intuitive, and the type and quantity of equipment maintenance resources required are accurate and detailed.

Keywords: Petri net; maintenance resources; equipment failure; maintenance process; maintenance task Petri Net

0 引言

当前部队各级维修机构维修资源配置不足和过剩问题同时存在, 因此, 准确掌握装备维修资源需求, 能够更精准地配置维修资源, 对受损装备性能恢复和装备全寿命周期费用控制影响重大。维修工作分析 (maintenance task analysis, MTA) 可以得出准确的维修资源需求, 避免因采用一般估计资源的臆测性和经验法所引起的资源浪费或短缺^[1-3], 但是分析过程需整合相当数量的文件表格才能得出结果, 不够直观, 且易出错。基于 Petri 网理论对装备维修过程进行仿真, 可以直观清晰地展示维修工作中维修资源的占用与消耗情况, 准确得到维修资源需求, 为维修资源的科学配置提供依据。

1 改进 Petri 网

1.1 基本 Petri 网

1962 年, 德国人 C. A. Petri 在《用自动机通信》中首次提出一种用描述物理进程和物理系统组合的

网状模型, 此后许多学者对其进行了研究, 由此发展起来一类系统模型, 称之为 Petri 网^[4-6]。一个基本的 Petri 网模型如图 1 所示。

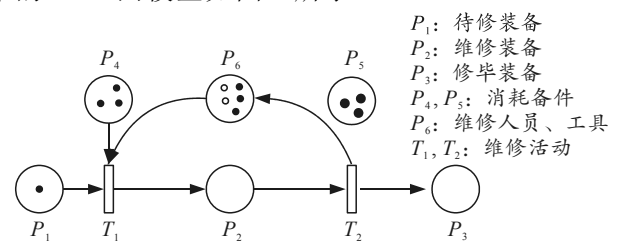


图 1 基本 Petri 网模型

图中的空心圆圈 P_1, \dots, P_6 表示库所, 矩形框 T_1, T_2 表示变迁, 库所和变迁通过带箭头的有向弧连接, 库所中的黑点是其令牌。在 Petri 网模型中, 使用库所来表示资源或工序的状态, 而某个工序事件的开始或结束用变迁表示, 加权有向弧起着连接库所和变迁的作用, 若无权值则默认权值为 1^[7-8]。

1.2 维修工作 Petri 网

MTPN 定义为 $N = \{P, T, F, K, W, M_0\}$, 其中:

收稿日期: 2020-09-30; 修回日期: 2020-11-16

作者简介: 高颖杰(1988—), 男, 陕西人, 学士, 助理工程师, 从事装备维修保障资源配置优化研究。E-mail: 113190318@qq.com。

1) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 是一个库所的有限集, 表示对象的集合。

2) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是一个变迁的有限集, $P \cap T = \emptyset$, $P \cup T \neq \emptyset$ 。

3) $F \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$ 是有向弧集。

4) $K: P \rightarrow N^+ \cup \{\infty\}$ 为库所的容量函数, $N^+ = \{1, 2, 3, \dots\}$ 。

5) $W: F \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ 是一个权函数。

6) $M_0: P \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$ 是网络的初始标识。

说明:

1) 一个 MTPN 模型可以根据以上定义, 描述一个基本的维修过程或活动。

2) 库所用来描述某个待维修部件状态的维修可行性及维修资源准备。

3) MTPN 的状态一般通过包含在各库所里的托肯给出。

4) 一个变迁根据维修手册的规定, 对一项维修任务或者一个维修步骤进行建模, 这个变迁包含表示维修任务和活动执行过程的谓词^[9-10]。

5) 无数值有向弧的默认取值为 1。

使用 MTPN 描述维修工作, 其结构元素与维修工作的对应关系如表 1 所示。

表 1 MTPN 结构元素与维修工作对应关系

序号	元素	维修工作
1	库所	维修对象状态信息
2	托肯	维修所需资源信息
3	变迁	维修操作具体内容
4	弧	维修操作约束信息

2 基于 Petri 网的 MTPN 建模

2.1 MTPN 建模步骤

建立 MTPN 模型的第一步是明确维修过程的目标、维修方式、维修级别以及维修对象等具体信息, 内容包括: 被修部件的安装位置、被修部件的结构特征与物理特征、采用原位修复还是更换的方式、维修可用资源(如人员、设备、工具、备件)等。然后, 对获取的信息进行筛选和处理, 确定维修过程需要执行的基本维修操作集合及相互间的逻辑关系和时序关系。维修对象的装配方式、结构组成、功能关系等内容共同决定了维修操作的步骤顺序。建模过程必须注意以下几点:

1) 确定每个维修操作的具体对象及其所需的维修资源;

2) 根据维修逻辑和原则确定多个维修操作之间的实施序列;

3) 根据需要对维修操作进行模块化、层次化逻辑分解, 直到分解为不能再分解的基本维修操作。具体的建模流程如图 2 所示。

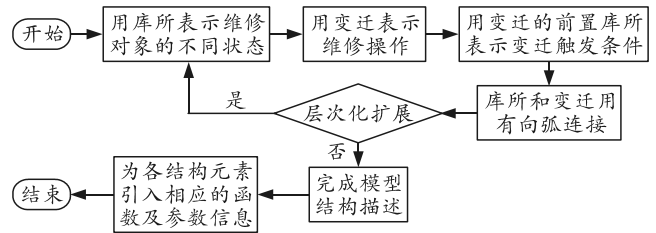


图 2 资源描述模型

2.2 维修保障资源建模

装备维修保障资源, 指可用于维修保障的人力、物力、财力、信息等资源的统称^[11]。在维修活动中维修资源的存在形式, 对于消耗性资源来说就是“有”和“无”2 种状态, 对于非消耗性资源来说就是“空闲”和“占有”2 种状态。在 MTPN 中, 可以用位于变迁前后的输入库所与输出库所分别表示维修资源的 2 种对立状态, 通过判断库所中是否存在所需的令牌(托肯), 从而确定维修资源此刻的状态, 如图 3(a)所示。采用该方式, 如果维修过程需要 n 类维修资源, 则需要采用 n 种不同形式的令牌来分别表示每一类资源; 因此, 会导致令牌种类数量巨大, 增加描述模型的复杂程度。

此外, 还可在维修过程中用一个库所表示需要的资源。如图 3(b)所示, 这个库所是维修任务所需全类型资源的集合。如果维修操作所需资源对应的托肯在这个库所内, 就代表该资源是空闲的, 可以进行维修操作; 反之, 如果库所中缺少维修资源所对应的托肯, 说明该资源处于“占有”状态, 当前不可用, 其维修操作因缺少资源不能进行。2 种描述方式各有侧重点, 从模型的复杂程度来说, 图 3(b)方法更简洁, 但从模型表达的精细程度来看, 图 3(a)方法更细致, 需要根据具体问题的特点选择最合适的表示方法。

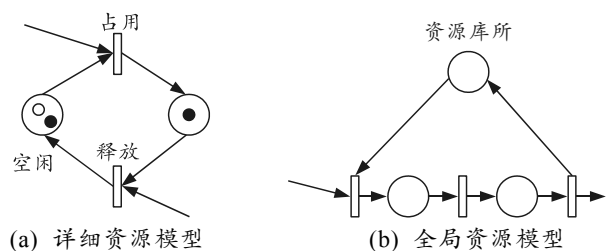


图 3 资源描述模型

2.3 基本维修操作建模

一项维修任务包含若干维修工序, 每个工序又

可以分解为若干个基本维修操作，所有基本维修操作都成功，表明维修任务成功。在 MTPN 中，进行一项不可分解的基本维修操作作用“变迁(transitions)”来表示，基本维修操作可以进行的条件就是该变迁进行的“触发条件”，该条件信息可以表达在变迁的输入弧(arc)上。例如，对于拧下螺母这项维修操作，需要的维修资源(1 名修理工、1 把扳手)用“资源”库所表示，若库所中包含所需资源，即存在代表 1 名修理工和 1 把扳手的“托肯”，那么此项操作就可以完成，即该变迁可触发。

时间也是维修操作需要重点考虑的因素。采用变迁表达维修操作，在引入变迁的“过程特性”后，可以很自然地“变迁”关联一个时间值来反映此类信息。这里的时间是抽象的，既可以是固定的数值，又可以是具有一定密度分布函数的随机变量。

2.4 约束条件建模

某一项维修操作的执行或拒绝，不仅与维修保障资源是否满足有关，还与维修活动的具体内容关系密切。例如，拆卸某顶盖时，必须要等到把所有固定该顶盖的螺栓都卸下后才能执行。这种关系如图 4 所示。图 4 中对于维修操作 a，维修资源库中所需的资源满足，存在托肯，但是触发变迁还要求操作 b 必须完成，否则维修操作 a 依然无法执行。这种约束可作为维修操作间的一种时序约束。

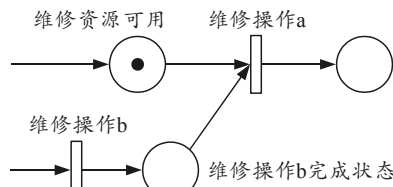


图 4 约束条件模型 1

还有另外一种情况的时序约束。如图 5 所示，在装备表面涂完油漆后，必须等待油漆晾干后方可进行下一步操作。对于这类约束，均可通过建立表示前提条件的库所、联结库所与变迁库所的弧、配置相应的标识以及设定固定时延量来进行描述^[12]。

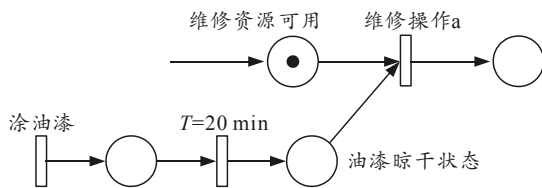


图 5 约束条件模型 2

3 实例应用

以某型装备液压机构为例，停机时发生活塞杆

自行滑出故障的原因可能有：1) 液压系统结构设计不合理；2) 液压缸有缺陷，存在内部泄漏；3) 双向液压锁不能有效锁止。笔者以液压缸内漏，需更换活塞 Y 型密封圈为例进行说明。对液压机构进行维修操作的流程如图 6 所示。

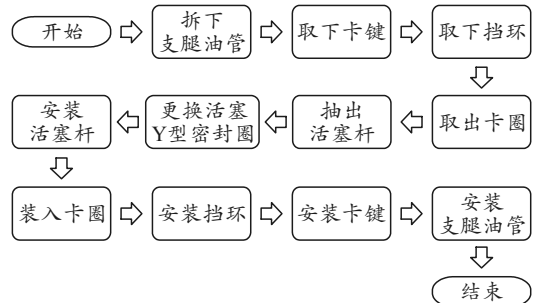


图 6 某装备液压机构油缸故障维修流程

上述装备维修过程的维修工作 Petri 网模型如图 7 所示。

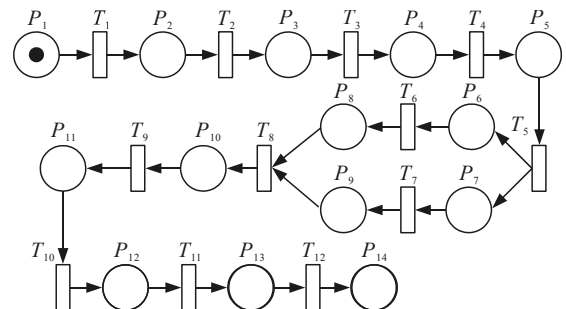


图 7 某装备液压机构油缸维修过程 MTPN 模型

在图中，如果库所 P_1 中存在托肯，则表明装备液压机构油管处于可拆状态，拆卸油管所需的维修资源(人员、工具等)是满足的，可以进行维修操作；库所 P_{14} 代表维修过程的结束；其他库所表示操作可执行的条件与相对应的设备状态。模型中的并行过程表示对活塞上 2 个同型号 Y 型密封圈的更换，因为这 2 个密封圈的更换没有先后顺序的要求，而下一步安装活塞杆必须等 2 个密封圈全部更换完成后才能进行。此实例侧重于维修过程内容及其相互之间的逻辑约束关系表述，故模型做了简化，没有充分考虑时间要素。模型中库所的代号及其意义如表 2 所示。

表 2 库所代号及意义说明

库所	意义	库所	意义
P_1	开始，油管可拆	P_8	活塞杆可装
P_2	卡键可拆	P_9	活塞杆可装
P_3	挡环可拆	P_{10}	卡圈可装
P_4	卡圈可拆	P_{11}	挡环可装
P_5	活塞杆可取	P_{12}	卡键可装
P_6	密封圈可换	P_{13}	油管可装
P_7	密封圈可换	P_{14}	维修结束

模型中变迁的代号、意义和所需维修资源种类数量情况如表 3 所示。

表 3 变迁代号、意义及所需维修资源说明

变迁	意义	工具	工人	备件
T_1	拆下油管	扳手	1	
T_2	取下卡键	卡簧钳	1	
T_3	取下挡环	螺丝刀	1	
T_4	取下卡圈	螺丝刀	1	
T_5	抽出活塞杆		1	
T_6	更换密封圈	螺丝刀	1	密封圈
T_7	更换密封圈	螺丝刀	1	密封圈
T_8	装入活塞杆	尼龙棒	1	
T_9	安装卡圈	螺丝刀	1	
T_{10}	安装挡环	螺丝刀	1	
T_{11}	安装卡键	卡簧钳	1	
T_{12}	安装油管	扳手	1	

根据以上内容，可以画出此维修任务的 MTPN 模型可达图如图 8 所示。

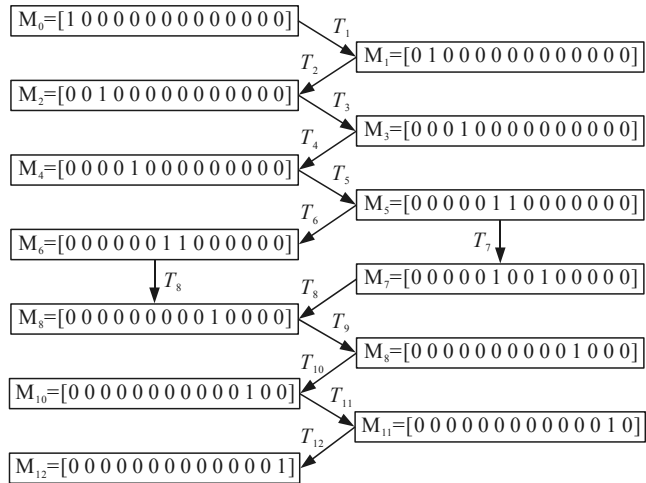


图 8 MTPN 模型可达图

通过对该 MTPN 模型的可达图进行分析，可以知道：

- 1) 图中每个节点的向量都是 0~1 向量，因此，模型是安全的；
- 2) 图中所有节点均未出现 ω ，因此，模型是有界的；
- 3) 图中模型存在末端节点，因此，模型不是活的，存在终止状态；
- 4) 图中从初始标识 M_0 开始，总能达到终止标识 M_{12} ，此模型可达。

综上所述，该模型符合实际维修情况，证明该方法切实可行。对上述维修工作 Petri 网模型进行分

析，得出维修液压机构油缸所需维修资源为工具(扳手、卡簧钳、螺丝刀、尼龙棒各 1 把)、人员(维修工 1 名)和消耗备件(Y 型密封圈 2 个)。

4 结论

笔者基于 MTPN 建立的维修工作模型，直观展示了装备维修过程中对维修资源的占用及消耗情况，为维修资源运用的可视化提供可行的技术途径。MTPN 在处理复杂装备维修资源确定方面极具优势，如果将时间、概率分布等情况作为变迁的约束条件，模型对装备维修过程的表达将更加详细直观，模型得出的所需维修资源种类与数量将更加精确，对维修资源的配置优化和部队装备保障能力的提升有重要意义。

参考文献：

- [1] 甘茂治, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 310-311.
- [2] 张凤林, 吴进煌, 李启明. 海军导弹装备保障设备研究[J]. 飞航导弹, 2000(10): 28-30, 41.
- [3] 郭继周, 郭波, 张涛, 等. 地空导弹维修保障能力评估与备件优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2008(3): 9-12, 19.
- [4] 徐大江. 基于着色 Petri 网的舰艇自防御建模仿真研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2012: 26-27.
- [5] 刘相锋. 智能调度系统中的故障分析与研究[D]. 济南: 山东大学, 2011: 8-10.
- [6] 邵长明. 基于 Petri 网的几个并发问题的建模与分析[D]. 成都: 西华大学, 2011: 10-13.
- [7] 庄秉谚. 基于可达图分析的资源消耗 Petri 网运行控制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 7-12.
- [8] 薛晗. S~3PR 网的同步与控制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018: 7-11.
- [9] 苏群星, 刘鹏远. 大型复杂装备虚拟维修训练系统设计[J]. 兵工学报, 2006, 27(1): 79-83.
- [10] 吴立松, 杨东升. 维修保障中资源调度的 petri 网建模研究[J]. 中国舰船研究, 2007, 2(2): 67-70, 80.
- [11] 杨超, 侯兴明, 廖兴禾, 等. 装备维修保障资源配置文献分析与内容综述[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(7): 170-175.
- [12] 杨军, 高玉水, 杜思祥, 等. Petri 网技术在导弹虚拟维修中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(4): 277-280.