

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.01.013

基于 Petri 网的虚拟维修过程建模

黄东坡, 曹继平, 宋建社, 杨檬
(西安高技术研究所 科研部, 陕西 西安 710025)

摘要: 针对维修过程中复杂的活动关系, 提出一种基于状态机 Petri 网的虚拟维修过程建模方法。对维修过程中的约束关系进行描述分析, 建立了维修过程逻辑网模型, 表达出整个维修操作过程, 并结合示例验证模型的合理性。该方法解决了装备复杂维修过程的建模问题, 可为实际维修提供技术支持。

关键词: 维修过程; 过程建模; 状态机 Petri 网

中图分类号: TP391.9; N945.12 **文献标志码:** B

Process-Modeling in Virtual Maintenance Based on Petri Net

Huang Dongpo, Cao Jiping, Song Jianshe, Yang Meng
(Dept. of Scientific & Research, Xi'an Institute of High-Technology, Xi'an 710025, China)

Abstract: Aiming at the complicated relationships in the maintenance process, proposed a virtual maintenance process modeling method based on State Petri net. The paper analyzed the constrained relationships between the maintenance processes, and constructed the maintenance process logical model. The model could express the maintenance process; finally the paper verified the rationality of the model with an example. This method solved the problem of complex maintenance process modeling and provided technical support for the real maintenance.

Keywords: maintenance process; process modeling; state Petri net

0 引言

虚拟维修仿真是实际维修过程在虚拟环境下的再现或预演, 必须对维修过程有一个合理的描述来指导仿真^[1]。然而由于维修过程中维修资源繁多, 维修过程构成复杂, 难以准确、详细、全面地描述维修过程, 特别是维修活动中复杂的行为关系。目前, 常见的过程建模方法有: CPM / PERT 方法、IDEF3 方法、Petri 网方法、基于活动的随机网络方法等。其中, Petri 网是一种可用图形表示的组合模型, 具有直观、易懂和易用的优点, 对描述和分析有其独到之处。同时, Petri 网又是严格定义的数学对象, 具有灵活的建模和强大的系统性能分析能力。基于 Petri 网的建模技术可用于模拟带有并发性、异步性、分布式、非确定性、并行性等特性的系统^[2-4], 已成为最有前途的建模工具, 被越来越多的应用领域所广泛采用。故采用状态机 Petri 网进行建模, 为实际维修提供技术支持。

1 基于 Petri 网理论的维修过程建模

1.1 Petri 网理论知识

Petri 网理论^[5]起源于 1962 年德国的 C. A. Petri 先生的博士论文《用自动机通信》, 他首次用网状结构模拟通信系统, 继而提出的一种基于形式化建模与分析方法的网络理论。Petri 网形式化定义为: $N =$

$\{S, T; F\}$, 其中, $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_m\}$, 表示库所集合, 用于描述可能的系统局部条件或状态; $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$, 表示变迁集合, 用于描述修改系统的事件或变化; 流关系 $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$ 定义了库所和变迁之间的有向弧, 是 Petri 网中一个 S 元素和一个 T 元素形成的有序偶集合, 表示两者之间的联系。

目前, 随着 Petri 网建模技术的发展, 颜色 Petri 网建模方法得到广泛的应用, 但这也对模型的理解增加了困难。因此, 针对维修操作中的一些实际问题, 提出了一种特殊结构 Petri 网—状态机 Petri 网, 以简化模型, 便于理解。这里先给出 Petri 网的前集, 后集定义如下:

定义: 设 $N = (P, T; F)$ 为一个网, 对于 $x \in X$, $X = P \cup T$, 则:

$\bullet x = \{y | (y, x) \in F\}$ 称为 x 的前集或者输入集;

$x^\bullet = \{z | (x, z) \in F\}$ 称为 x 的后集或者输出集。

1.2 维修过程及其逻辑约束关系描述

维修过程是使产品保持或恢复到规定状态所进行的全部活动^[6]。维修过程一般是有维修人员参与的、按照一定的关系组成的、涉及多种维修保障资源的维修活动集合。完整的维修过程由一系列有序的维修活动所组成, 每个维修活动都需要一个或多个

收稿日期: 2010-07-18; 修回日期: 2010-09-08

作者简介: 黄东坡 (1986-), 男, 福建人, 硕士, 从事装备维修、系统最优化研究。

个维修资源去执行。维修活动之间的逻辑关系可以是顺序关系，也可以是并行、选择或循环关系等。除了活动间的逻辑关系，活动还包含规则，即表示活动在何种条件下触发。

由于维修活动间关系的复杂性，对维修活动间关系的清晰描述是维修过程建模的一个重要问题。下面针对维修过程的逻辑关系，运用 Petri 网模型进行表达并分析研究。

1.2.1 “串联”关系

串联关系描述了维修活动的顺序关系。其中，前一维修活动的执行结果会影响后面与其直接相连维修活动的执行，即前一行为的完成是后一行为执行的必要条件。此关系的模型描述如图 1。其中， t_1 与 t_2 表达了 2 个具有前后串联关系的行为。

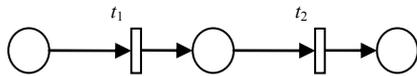


图 1 “串联”关系

1.2.2 “与”关系

“与”关系在维修过程逻辑模型中主要表现为维修活动同时需要多个“前提条件”。在图 2 的模型中，变迁的可触发需要其所有前置库所中均有托肯。因为笔者在这里研究维修活动之间的逻辑关系，这里提出的在库所中的托肯，其代表的含义是某一维修活动准备就绪，而不是资源，除特殊说明外，文章其它部分的托肯也均为此含义。

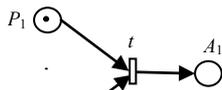


图 2 “与”关系

1.2.3 “或”关系

“或”关系在维修过程逻辑模型中存在着 2 种表现形式：

1) 任意一条均可执行。如图 3(a) 中所示，从 P_1 到 P_n 任何一个库所中存在托肯，即该库所所表达的条件得到满足，均可以触发变迁而获得所需要的结果状态。

2) 为了实现某一维修目标，有多个供选择的维修活动，执行其中任意一项维修活动均可。如图 3(b) 中所示，库所 C 起控制作用，用于限定只能有一个变迁触发；任何一个变迁触发，库所 C 都将失去托肯。只要从 P_1 到 P_n 任何一个库所中存在托肯，均可以触发相应的变迁而获得所需要的结果状态。但

在库所 C 的作用下，不可能发生多个变迁同时触发的情况。

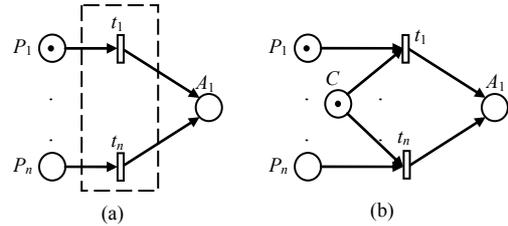


图 3 “或”关系

1.3 维修过程逻辑模型

为了分析清楚维修过程中有哪些维修活动，以及维修活动之间的逻辑约束关系，同时从理论上验证所建立的过程模型具有可达性、无死锁等问题，以维修过程的流程为依据建立维修过程逻辑模型。流程与 Petri 网逻辑模型的转换过程如下：

- 1) 起点的选择。在维修流程中直接面向对象的活动或资源就是 Petri 网逻辑模型的起点；
- 2) Petri 网逻辑模型中的箭头与方向。按发生活动的条件将它们联系在一起，就是 Petri 网逻辑模型中的箭头和方向；
- 3) 扩展。对流程中的每一个活动进行扩展，将活动及其表现方式体现出来，从而形成该活动的后续活动选择方式；
- 4) 转换。(1) 确定起点；(2) 将流程中的活动扩展；(3) 根据流程的关系，在 Petri 网逻辑模型中添加箭头和方向；(4) 遍历整个流程图，即可得到转换模型。

由于维修流程中给与的信息均与操作相关，笔者采取以“维修操作”为中心的建模方式^[7]。这种方法主要的关注点为“维修操作”，先给出用变迁描述的各个“维修操作”，然后用库所来表示使“操作”可执行的前提条件及相应的状态。另外，在维修操作中，常有这样一种基本操作，操作时既不产生多余的资源或者产生的多余资源被下面的操作消耗，也不需要新的资源的加入。映射到 Petri 网中，就是后触发的变迁所需资源和状态条件等必须由先前触发的变迁的执行产生出来，即变迁触发产生的资源和状态条件等也将在结束之前被变迁触发消耗，这样，既不会因为资源和状态条件的流失而造成过程死锁，也不会因为产生未处理的资源和状态条件而造成冗余。故笔者引入状态机 Petri 网的概念。

定义：状态机 Petri 网是一种 Petri 网，其中每个变迁都只有唯一的输入弧和输出弧，即：

$$\forall t \in T, | \bullet t | = | t \bullet | = 1$$

显然，状态机 Petri 网的结构是串行的，而对

于并行的子网可将其简化成状态机 Petri 网结构。

2 实例建模与分析

以某型止动器油缸为例, 止动器油缸发生故障不能正常工作的原因有 2 个: 一是弹簧损坏; 二是活塞密封圈损坏。这里默认引起故障的原因是第二个, 则对止动器油缸进行维修操作的流程如图 4。

根据上述维修流程, 建立维修过程逻辑网模型见图 5。在该模型中, 变迁的含义如下: T_1 : 拔出开口销; T_2 : 拧出螺母; T_3 、 T'_3 : 取出垫圈; T_4 : 取出轴销; T_5 : 取出杠杆; T_6 : 拧出油管接嘴; T_7 : 拧出底盖; T_8 : 取出弹簧; T_9 : 取出活塞; T_{10} : 取出活塞密封圈; T_{11} : 检测活塞密封圈; T_{12} : 更换活

塞密封圈; T_{13} : 安装活塞; T_{14} : 安装弹簧; T_{15} : 安装底盖; T_{16} : 安装油管接嘴; T_{17} : 安装杠杆; T_{18} : 安装轴销; T_{19} : 安装垫圈; T_{20} 、 T'_{20} : 安装螺母; T_{21} : 安装开口销。

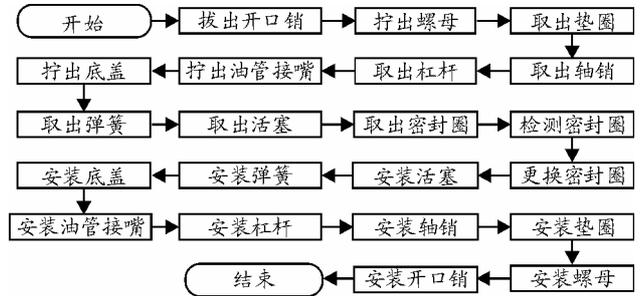


图 4 某型止动器油缸典型故障维修过程流程图

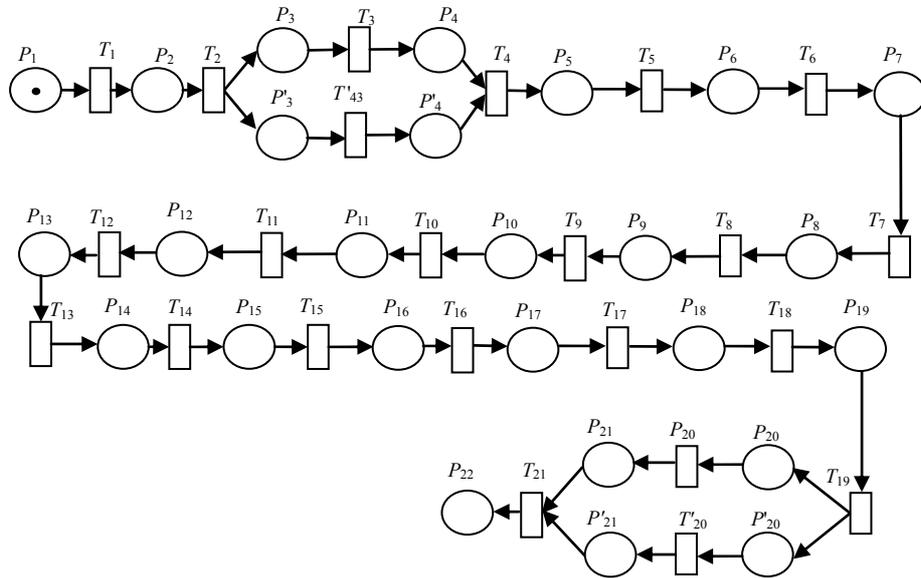


图 5 某型止动器油缸典型故障维修过程的 Petri 网模型

在这个模型中, 2 个库所 P_1 和 P_{22} 分别表示维修过程的开始和结束状态。其它库所表示操作可执行的条件与相对应的状态。其中的并行过程是因为在对两组螺母和垫圈进行拆卸安装操作时没有先后操作顺序的要求, 而下一个操作必须等对两组螺母和垫圈的操作都完成后才可以进行, 因此可采取并行操作来提高系统工作效率。由于这两组操作所需的资源和状态条件及操作后产生的资源和状态条件都是一样的, 紧前操作和紧后操作都是相同的, 故可将其简化成一类操作, 其简化后不会影响系统运行, 如图 6。

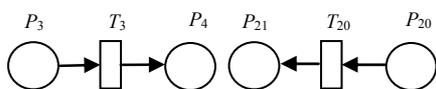


图 6 模型简化部分

上述简化后的模型中每个变迁都只有唯一的输

入和输出, 表示每个操作都只有唯一的紧前操作和紧后操作, 反映出维修活动间的逻辑约束关系, 也保证模型在给定初始状态的情况下, 整个过程不会因资源或状态条件的过多或缺乏而造成死锁现象。系统的初始标识 $M_0=(10000000000000000000000000000000)^T$, 任意一个操作 T_i 都可以由相应的触发变迁序列 $T_1 \cdots T_i$ 触发, 触发后继标识是把前一个标识中的数往后移一位, 有 $M_1=(01000000000000000000000000000000)^T$, $M_2=(00100000000000000000000000000000)^T$ 以此类推 \cdots , 则 $\exists M_0[T_1 >, M_1[T_2 >, \cdots, M_k[T_{k+1} >$, 其中 k 为 0 到 20 之间的整数, 因此系统中 T 是活的。

另外, 在模型中存在唯一的起始点和结束点, 不含自环, 即不会产生循环现象, 可以从初始状态合理到达结束状态, 符合现实维修过程的情况。

(下转第 65 页)

IEICE TRANS. INF. & SYST, 2000, E83-D(7): 1583-1591.

[2] 张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997: 121.

[3] 张红源, 陈自力. 图像匹配经典算法及其改进方法研究[J]. 兵工自动化, 2008, 27(9): 91-94.

[4] Shi J. and Tomasi C. Good features to track[C]. In Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1994: 593-600.

[5] Hiroki Sugano, Ryusuke Miyamoto. Parallel Implementation of Good Feature Extraction for Tracking

on the Cell Processor with OpenCV Interface[C]. In Proc. of Fifth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal, 2009: 1326-1329.

[6] D. I. Barnea, H F Silverman. A Class of Algorithms for Fast Digital Registration[J]. IEEE Transactions on Computers C-21, 1972: 179-186.

[7] 沈晓芳, 向建勇, 董维科. 基于图像边缘特征的SSDA算法[J]. 电子科技, 2009, 22(3): 16-18.

[8] 孙立功, 饶文碧, 阎保定. 基于改进SSDA的彩色目标识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(28): 73-74.

(上接第 43 页)

3 结论

综上所述, 维修过程逻辑网是一个有唯一起始点和结束点的状态机 Petri 网, 其中任意的状态都是可达的, 不会发生死锁现象, 从而保证了维修过程模型的合理性。当建立了维修过程逻辑网模型, 并已证明其正确性之后, 就可以把维修过程逻辑网模型转换为维修过程 Petri 网模型。

主要过程为:

- 1) 按照维修过程逻辑网模型的结构建立有色 Petri 网的基本结构;
- 2) 分析应该设置哪些颜色和函数;
- 3) 进行仿真分析。主要借用相关的 Petri 网仿真工具进行仿真分析。

参考文献:

[1] 郝建平, 等. 虚拟维修仿真实理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[2] 蒋双双, 刘鹏远, 张锡恩. 一种基于 Petri 网的虚拟维修过程建模方法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2488-2491.

[3] 曲长征, 陶凤和, 张柳, 等. 基于赋时有色 Petri 网的维修过程模型[J]. 计算机仿真, 2006, 23(4): 8-10.

[4] 曲长征, 郝建平, 刘继民. 考虑资源约束的复杂维修任务时间预计模型[J]. 军械工程学院学报, 2009, 21(3): 6-10.

[5] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

[6] 王胜德, 黄进. 基于优先级时间有色 Petri 网的装备维修过程模型研究[J]. 国防技术基础, 2006(9): 32-35.

[7] 马麟, 吕川. Petri 网在维修工作分析中的应用研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(3): 249-253.

[8] 赵吉昌, 李星新, 田成龙, 等. 基于 NGRain 的装备虚拟维修训练研究与实现[J]. 四川兵工学报, 2009(9): 25-27.

(上接第 59 页)

表 1 2 种控制策略下跟踪效果

输入位置 (X轴输入/°, Y轴输入/°)		输入位置1 (12, 6)	输入位置2 (15, 15)	输入位置3 (20, 25)	输入位置4 (32, 36)
单轴跟踪稳态误差	X轴输出/°	-0.003 5	-0.045 1	-0.064 5	-0.330 1
	Y轴输出/°	-0.014 2	-0.066 7	-0.162	-0.480 2
耦合跟踪稳态误差	X轴输出/°	-0.001 1	-0.022 1	-0.048 3	-0.399 7
	Y轴输出/°	-0.000 9	-0.044 7	-0.140 8	-0.279 5
跟踪稳态轮廓误差 ϵ	单轴跟踪/°	-0.001 2	-0.077	-0.174 1	-0.125 3
	CCC跟踪/°	-0.000 8	-0.005 3	-0.144 7	-0.111 5

4 结论

在对雷达伺服数学建模的仿真的基础上, 运用运动轮廓误差的分析方法对跟踪效果进行比较。在试验中应用变增益交叉耦合情况下的轮廓误差比单轴跟踪时明显要小, 表明变增益交叉耦合控制能有效提高雷达伺服系统的精度, 减小系统误差。

参考文献:

[1] Feng.L, Koren.Y, Borenstein.J. Cross-coupling motion controller for mobile robots [J]. Control Systems Magazine, IEEE, 1993, 13(6): 35-43.

[2] Srinivasan.K, Fosdick.R. Multivariable analysis and controller design for coordinated multi-axial motion

control[R]. Proceedings of the American Control Conference, 1988, 88(3): 95-101.

[3] Hsu, Pau-Lo, Yeh, Syh-Shiuh. Precision control and compensation of servomotors and machine tools via the disturbance observer[J]. Mechatronic/IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 420-429.

[4] Su.Ke-Han, Cheng.Ming-Yang. Contouring accuracy improvement using cross-coupled control and position error compensator[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 10(48): 1444-1453.

[5] Zhao, Guo-Yong, et.al. High-precision cross-coupled control approach based on NURBS curve interpolator[J]. Dalian Ligong Daxue Xuebao/Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(2): 210-214.

[6] 张今朝, 刘国海. 多电机同步系统的多模型辨识[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 138-142.