

12-12-2019

## Concurrent Conflict Control Method of "Multi-rights+Operation Queues" Based on CPN Tools

Zhili Zhang

*State Key Subject Lab of Weapon Launching Theory and Technology, The Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;*

Yunrong Zhang

*State Key Subject Lab of Weapon Launching Theory and Technology, The Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;*

Shixin Ma

*State Key Subject Lab of Weapon Launching Theory and Technology, The Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Concurrent Conflict Control Method of "Multi-rights+Operation Queues" Based on CPN Tools

### Abstract

**Abstract:** There are problems with concurrent control methods such as operation rights + timestamp, for example, the role of each maintenance worker cannot be played. *The concurrent control method of multiple rights and operation queues* can solve this problem. The working principles of the important function modules of this method are discussed, and the operation method of the process flow chart and colored Petri net is given. The data are simulated by the CPN Tools for the entire process. Simulation results show that this method can ensure the operation fairness of the low maintenance personnel, and make every maintenance staff play their full role.

### Keywords

multiple rights, operation queue, concurrency control, colored Petri nets, process simulation

### Recommended Citation

Zhang Zhili, Zhang Yunrong, Ma Shixin. Concurrent Conflict Control Method of "Multi-rights+Operation Queues" Based on CPN Tools[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(6): 1092-1100.

# 基于 CPN Tools 的“多种权限+操作队列” 并发冲突控制方法研究

张志利, 张云荣, 马世欣

(火箭军工程大学兵器发射理论与技术国家重点学科实验室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 为解决“操作权限+时间戳”并发控制法中存在的不能发挥每名维修人员作用的问题, 提出了“多种权限+操作队列”并发控制方法, 讨论了该方法重要功能模块的工作原理, 给出了方法运行过程的流程图, 及着色 Petri 网图。利用 CPN Tools 对整个流程进行过程仿真。得到的仿真数据表明, 该方法可以保证低权限维修人员的操作公平性, 以使每名维修人员的作用得到充分发挥。

**关键词:** 多种权限; 操作队列; 并发控制; 着色 Petri 网; 过程仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 06-1092-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0183

## Concurrent Conflict Control Method of "Multi-rights+Operation Queues" Based on CPN Tools

Zhang Zhili, Zhang Yunrong, Ma Shixin

(State Key Subject Lab of Weapon Launching Theory and Technology, The Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** There are problems with concurrent control methods such as operation rights + timestamp, for example, the role of each maintenance worker cannot be played. *The concurrent control method of multiple rights and operation queues* can solve this problem. The working principles of the important function modules of this method are discussed, and the operation method of the process flow chart and colored Petri net is given. The data are simulated by the CPN Tools for the entire process. Simulation results show that this method can ensure the operation fairness of the low maintenance personnel, and make every maintenance staff play their full role.

**Keywords:** multiple rights; operation queue; concurrency control; colored Petri nets; process simulation

## 引言

在大型复杂装备多人协同虚拟维修过程中, 由于维修过程涉及维修人员多, 零部件复杂, 维修过程繁琐, 并发冲突不可避免的发生<sup>[1]</sup>。而能否正确处理并发冲突是虚拟维修系统能否顺利运行的关

键。当前常用的并发冲突控制方法有单一的权限法、时间戳法、令牌法等, 也有复合控制方法<sup>[2]</sup>, 例如军械工程学院赵超提出的“多种权限+时间戳”法<sup>[3]</sup>以及浙江大学余春艳提出的基于角色的协同虚拟环境并发控制投机策略<sup>[4]</sup>等, 这些方法都在各种大型多人协同虚拟现实系统开发中得到应用。“多种权限+时间戳”法将权限法和时间戳法的优点有机结合起来, 既明确了不同维修人员各自的任务, 又可以表示出操作的次序, 保证时空一致性, 大大缩短了系统响应时间, 有利于交互的进行。但是在应用过程中, 暴露出许多问题, 比如在“多种



收稿日期: 2017-05-02 修回日期: 2017-05-30;  
作者简介: 张志利(1966-), 男, 河南濮阳, 教授, 博导, 研究方向为兵器发射系统仿真与自动检测;  
张云荣(1993-), 男, 山东淄博, 硕士, 研究方向为兵器发射系统仿真与自动检测。

<http://www.china-simulation.com>

• 1092 •

权限+时间戳”策略中, 由于其维修人员对部件的操作权不同, 对零部件具备操作权往往只有一名维修人员, 其他人员只能予以协助, 因此当维修人员出现意外情况时, 难以有人递补, 导致系统运行停滞, 再者, 这也使得在维修人员之间毫无操作公平性可言, 可以说, 这会使得最高权限人员始终处在一种忙碌的状态, 无法充分利用每名维修人员, 系统运行效率低下。

在此提出“多种权限+操作队列”方法, 对维修人员的操作权限进行创新, 使得所有维修人员对零部件具备相同的使用权, 高低权限的区别在于权限高的维修人员可以比权限低的操作人员先操作。并引入令牌回收机制以及公平性维护机制来维护维修人员的操作公平性以保证系统顺利运行。

着色 Petri 网是一种用于构建并发系统模型并分析其性能的离散时间图形建模语言, 系统的 CPN 模型是一个代表着系统状态和事件(变迁)的可执行模型<sup>[5]</sup>。由于层次化结构的建立、托肯值和颜色集的定义、弧上函数的描述以及时间信息的引入等原因, 着色 Petri 网成为一种非常适合对大型复杂系统进行过程仿真与性能评价的形式化方法。本文利用着色 Petri 网对“多种权限+操作队列”并发冲突控制流程进行过程仿真, 并依托 CPN 层次网工具开发了令牌回收模块与公平性维护模块, 这两个模块可直接应用于大型复杂装备虚拟现实维修系统开发, 方便开发且利于系统运行。

## 1 方法描述

### 1.1 操作权限的特点

在军械工程学院赵超提出的“多种权限+时间戳”并发冲突控制方法中, 不同维修人员的操作权限差别是很大的。比如对同一虚拟维修场景中的 0~3 这 4 个级别的操作权限, 权限 0 只能对维修场景进行观察, 而无权操作虚拟场景中的任何物体, 权限 1 可以进行一些诸如拆卸、安装、擦拭等简单操作, 权限 2 可以进行一些安全风险高的操作, 权

限 3 为最高权限, 可在操作所有可操作对象。这种权限划分方法可以很好地明确各个维修人员的任务, 便于管理。但也带来了很多问题, 当拥有权限 3 的维修人员出现诸如掉线等意外情况而不能参与维修时, 整个系统由于某些操作无法完成而处在停滞状态; 且有很多操作只能由高权限维修人员操作, 使得低权限维修人员长期处于空闲状态, 使得系统运行效率低下。而在“多种权限+操作队列”并发冲突控制方法中, 每名维修人员拥有的对场景的操作权是相同的, 即所有维修人员都享有对虚拟场景的诸如观察、安装、擦拭、拆卸、转移等所有权利, 只是当出现并发冲突时, 拥有操作权限高的维修人员可以率先执行操作。这种情况下, 当拥有操作令牌的维修人员出现意外情况时, 较低权限维修人员就可以及时按照程序递补, 以保证系统顺利运行。

### 1.2 操作队列的形成

假定在某多人协同虚拟现实维修系统中, 共有  $k$  名维修人员, 编号为  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_{k-1}, w_k$ , 共有  $n$  种权限, 编号为  $q_1, q_2, q_3, \dots, q_{n-1}, q_n$ , 分别将这  $n$  种权限赋予给  $k$  名维修人员。权限赋予示意图见图 1。

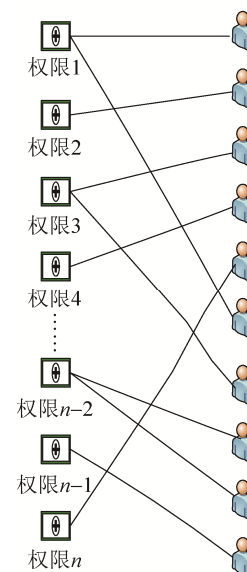


图 1 权限赋予示意图

Fig. 1 Permission granting schematic diagram

在权限分配过程中,可能会出现两名或两名以上维修人员权限相同的情况,但不会出现一名维修人员占据两种操作权限的情况。操作队列的形成过程见图 2。权限赋予完毕后,维修人员便可向系统发送操作申请,系统首先将相同权限的维修人员凑到一起,然后,相同权限的维修人员按照申请时间的早晚进行排队,最后将各个权限分组按照权限大小进行排队,这样操作队列便形成了。

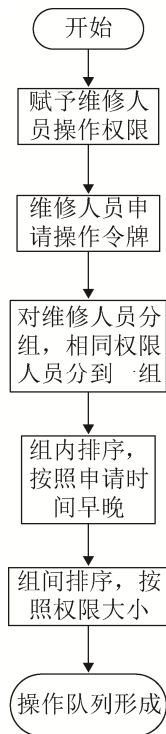


图 2 操作队列形成图

Fig. 2 Operation queue formation diagram

当有维修人员在操作队列形成后向系统发送令牌申请,系统仍会接受申请,并按照其权限大小,将其插队于他所在权限分组的最后一名,插队情况操作队列的形成见图 3。

### 1.3 维修人员的状态

在多人协同虚拟现实维修系统中,维修人员的工作状态可分为空闲状态和忙碌状态<sup>[6]</sup>,用字母 f、b 分别表征这两种状态。当发生特殊情况时,需对维修人员的工作状态进行检测,以提出合适的应对方案,特殊情况处理流程图见图 4。

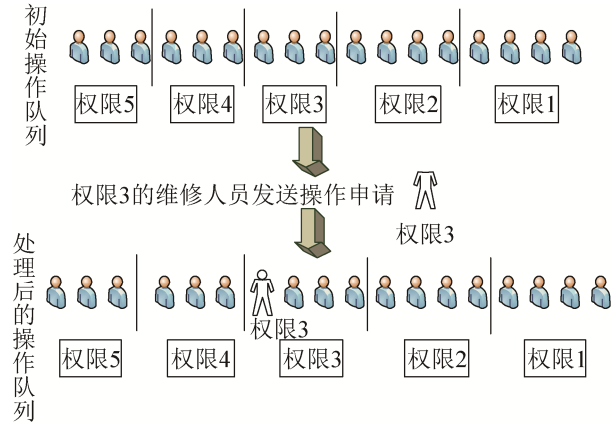


图 3 插队后操作队列形成图

Fig. 3 Operation queue formation diagram after queue insertion

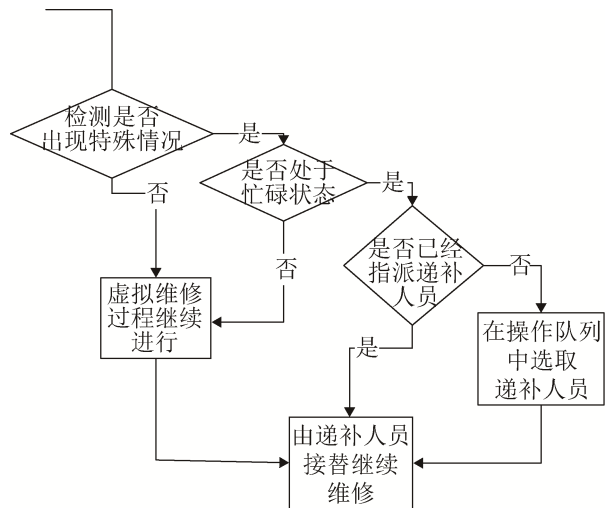


图 4 特殊情况处理流程图

Fig. 4 Special treatment flow chart

在虚拟维修系统运行过程中,系统会一直不断的检测是否有特殊情况出现,以避免因未及时发现而导致系统停滞的情况<sup>[7]</sup>。当检测到特殊情况时,系统会开启特情处置模块,首先判断出现意外情况的维修人员是否处于空闲状态,若其处于空闲状态,说明该意外情况并不影响系统运行,系统可继续进行维修,若其处于忙碌状态,说明该维修人员在进行维修动作时出现了意外情况,且该维修动作还未进行完,这时需要寻找其他维修人员进行递补。首先判断该意外情况维修人员是否指派了专门递补人员,若其已经提前指派,则直接由指派人员进行递补,若未指派,则在操作队列中依据权限递



减次序和时间先后选取递补人员。

## 1.4 令牌的赋予与回收

令牌的赋予是依据操作队列的排序情况进行的, 维修人员向系统发送申请令牌指令后, 会参与到操作队列中, 当排到队列第一名时, 系统会将令牌赋予它, 并向其他维修人员发布令牌已经被赋予的通知。

为避免维修人员获得操作令牌后迟迟不归还的情况, 保证系统顺畅运行, 特开发了令牌回收模块。每名维修人员的令牌持有时间都是固定的, 时间到后, 维修人员有一次申请延长操作时间的权利, 如果维修人员不发送延长申请, 那么时间到后令牌将被强制收回。若维修人员发送延长申请, 则系统允许其延长使用时间, 当延长时间到, 令牌将被强制收回。维修人员的操作令牌持有时间是视其操作权限而定的。最低权限维修人员的令牌持有时间为  $t_b$ , 其他人员的令牌持有时间都在此基础上等间隔递增, 递增时间间隔为  $T$ , 权限  $n$  维修人员的令牌持有时间  $t$  计算公式如下:

$$t = t_b + (n-1)T \quad (1)$$

令牌回收过程示意图见图 5。

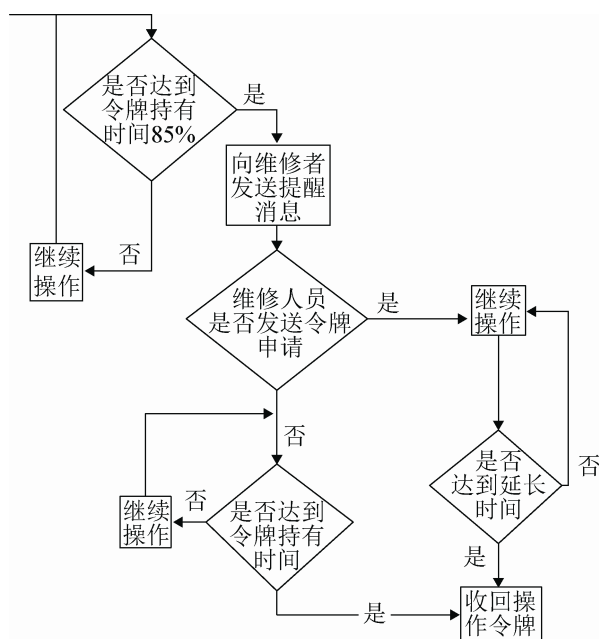


图 5 令牌回收过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of token recovery

从维修人员获得操作令牌起开始计时, 当其维修时间到达其令牌持有时间的 85% 时, 系统会向维修人员发送消息, 提醒维修人员若需要延长操作时间要及时发送延长申请。直到维修人员的令牌持有时间全部用完, 系统会再次发送消息提醒, 若无反应, 系统会立即收回维修人员的操作令牌。若维修人员在规定时间内发送延长申请, 系统会给予相应的延长时限, 延长时间到, 系统会收回其操作令牌。维修人员的令牌延长也视其操作权限而定。最低权限维修人员的令牌延长时间为  $s_b$ , 其他人员的令牌延长在此基础上等间隔递增, 递增时间间隔为  $H$ , 权限  $n$  维修人员的令牌延长时间  $s$  计算公式如下:

$$s = s_b + (n-1) \cdot H \quad (2)$$

## 1.5 公平性的维护

在操作队列形成后, 当有维修人员再申请操作时, 系统会根据其操作权限将其插入到操作队列的相应位置。显然, 如果较高权限维修人员后期申请操作次数过多, 会不断地插入操作队列, 这使得操作权限较低的维修人员始终不能获得操作令牌, 严重的话, 将会影响系统正常运行。为保证维修过程顺利进行, 对低权限维修人员进行操作公平性维护很有必要。在此, 给予所有维修人员提高自身操作权限的权利。假设一维修人员为  $w_x$ , 操作权限为  $q_x$ , 当其被插队  $x-1$  次后, 他将自动获得一次提升自身操作权限的权利, 且其插队次数将被清零。这种提升自身操作权限的权利可累积使用, 且该权限在使用后, 维修人员的操作权限提升, 在其获得操作令牌后将回复其最初的状态, 即这种权限的提升不是永久的。这就使得低权限维修人员获得了暂时在操作队列中晋升位置的权利, 当低权限维修人员非常需要操作令牌时, 便可通过此权利来保证自己的令牌使用权。

“提高权限权次数”统计模块的流程图见图 6, 图中表明, 当维修人员被插队次数达到其提升权限次数上限时, 他的提升权限权次数将+1, 并且清零其被插队次数, 整个模块将再次从头开始运

行。在每名维修人员上都绑定这个模块，以避免与其他维修人员的统计情况发生混淆。维修人员权限提升处理模块流程图见图 7，图中表明，当维修人员使用权限提升权后，系统会安排其提升队列位置，并在其获得操作令牌后，将其权限回复到原始状态。

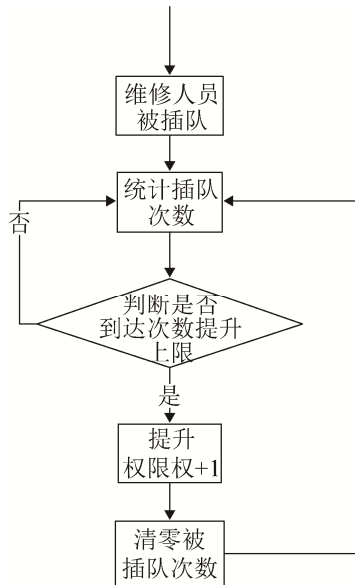


图 6 “提高权限次数”统计模块的流程图  
Fig. 6 Flow chart of improving access rights number statistics module

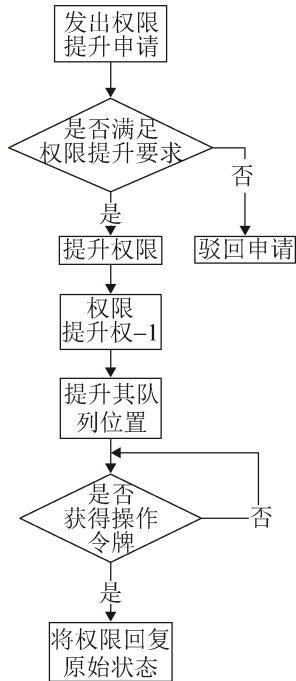


图 7 维修人员权限提升处理模块流程图  
Fig. 7 Flow chart of the maintenance personnel's authorization processing module

## 2 模型假设与流程设定

### 2.1 模型假设

- (1) 为方便问题的研究，假设有 5 名维修人员，3 种不同的权限。
- (2) 维修人员的工作状态只有空闲和忙碌两种，且所有维修人员都不会出现思想懈怠的情况。
- (3) 假设整个维修过程包含 8 个工步。
- (4) 假设整个模拟维修过程中，5 名维修人员对 8 个维修工步及其顺序都是熟悉的。
- (5) 在这里讨论的并发冲突主要是针对维修过程所用工具和零部件而言的。
- (6) 假设每个工步只有 1 个维修动作，每个维修动作在不出现意外情况下需要进行的时间都是相同的。

### 2.2 流程设定

整个模拟维修流程共有 8 个工步，其流程关系如图 8 所示。维修人员可以从维修工步①和维修工步⑧分头开始维修，按照串行过程进行维修任务，其中，维修工步②③以及维修工步⑥⑦可以同时展开维修。并将 5 名维修人员分配权限如图 9 所示。

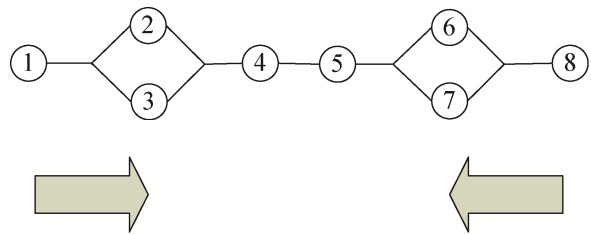


图 8 模拟维修过程示意图  
Fig. 8 Schematic diagram of simulation maintenance process

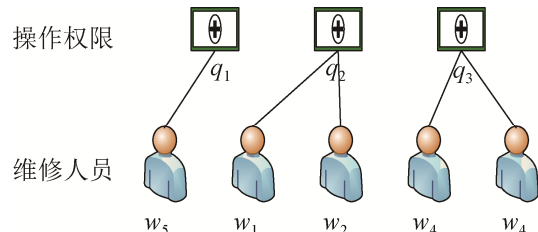


图 9 权限分配示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of authority assignment

将操作权限 1 分配给维修人员 5, 将操作权限 2 分配给维修人员 1 和 2, 将操作权限 3 分配给维修人员 3 和 4。5 名维修人员可以两侧分头进行维修, 有些步骤也需要两名或以上维修人员进行协作维修, 这就使得同一时间内, 可能会有多名维修人员用到同一维修工具或零部件, 这就发生了并发冲突。假设某一维修时刻, 维修人员 1 和 2 在进行工步②, 维修人员 3 在进行工步③, 维修人员 4 在进行工步⑥, 维修人员 5 在进行工步⑦, 且维修人员 1, 2, 3, 4, 5 同时需要工具  $t$ , 且维修人员 5 在进行工步⑦时会经常用到工具  $t$ 。整个维修过程的详细操作流程如图 10 所示。

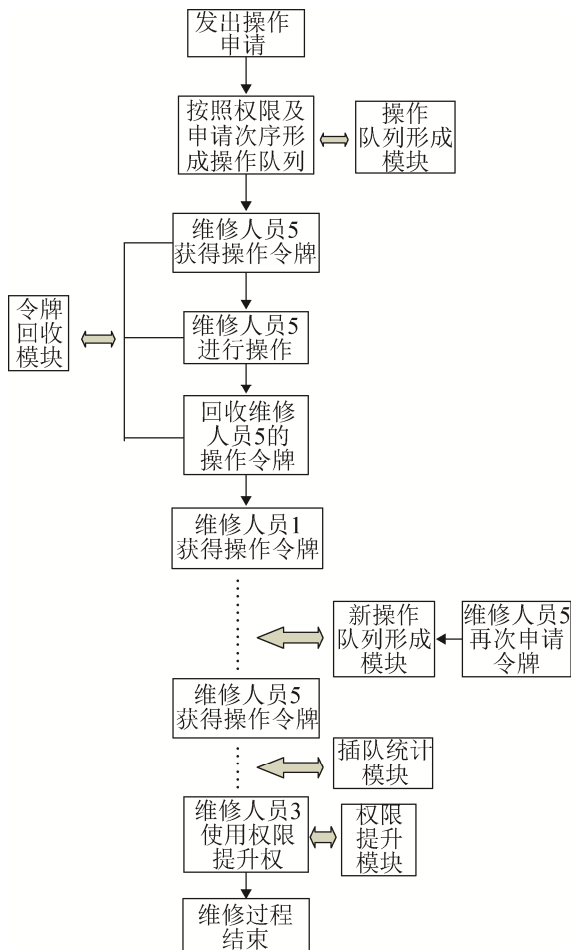


图 10 模拟维修过程操作流程图

Fig. 10 Flow chart of simulation maintenance process

图 10 是整个模拟维修过程的操作流程图, 从

维修人员发出操作申请到操作队列的形成, 再到维修人员进行操作, 以及过程中操作队列的变化, 到最后维修过程的结束, 进行了详细的阐述。在以上操作流程中加入了模块的调用, 方便了系统开发及运行。模块与操作主线使用双向箭头连接, 表示在模块调用过程中, 信息的交流是双向的。

### 3 系统建模

以“多种权限+操作队列”为并发冲突控制方案的多人协同虚拟现实维修系统是典型的离散事件动态系统, 采用着色 Petri 网对维修过程进行仿真模拟, 并依托着色 Petri 网层次化结构, 对特情处置模块和令牌回收模块进行了过程模拟。

图 11 为整体维修过程的着色 Petri 图,  $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5$  为 5 个维修人员库所,  $q_1, q_2, q_3$  为 3 个操作权限库所, 经过 Give permissions 变迁后, 5 名维修人员被赋予操作权限, 其状态也变为  $W_1, W_2, W_3, W_4, W_5$ 。经过 Queues form module(队列形成模块)变迁后, 形成操作队列。依托于着色 Petri 网的层次化结构, 整体维修过程图调用了很多功能模块, 例如操作队列形成模块、令牌回收模块等, 使得整体维修过程图结构清晰, 一目了然。

图 12 左侧为特情处置模块着色 Petri 网图, 图 13 为令牌回收模块着色 Petri 网图。在其他维修过程的着色 Petri 网创建过程中, 可以直接调用这 2 个子模块。

### 4 仿真结果分析

在依托着色 Petri 网进行维修过程仿真时, 着色 Petri 网中的 Monitor 会进行实时的数据采集, 这些数据反应系统性能的各个方面, 比如运行时间、每名维修人员的运行步数等<sup>[5]</sup>。这些数据被自动保存成 HTML 格式, 可以提供给我们一个对性能评价更抽象的查看, 模拟停止时产生性能报告见表 1。



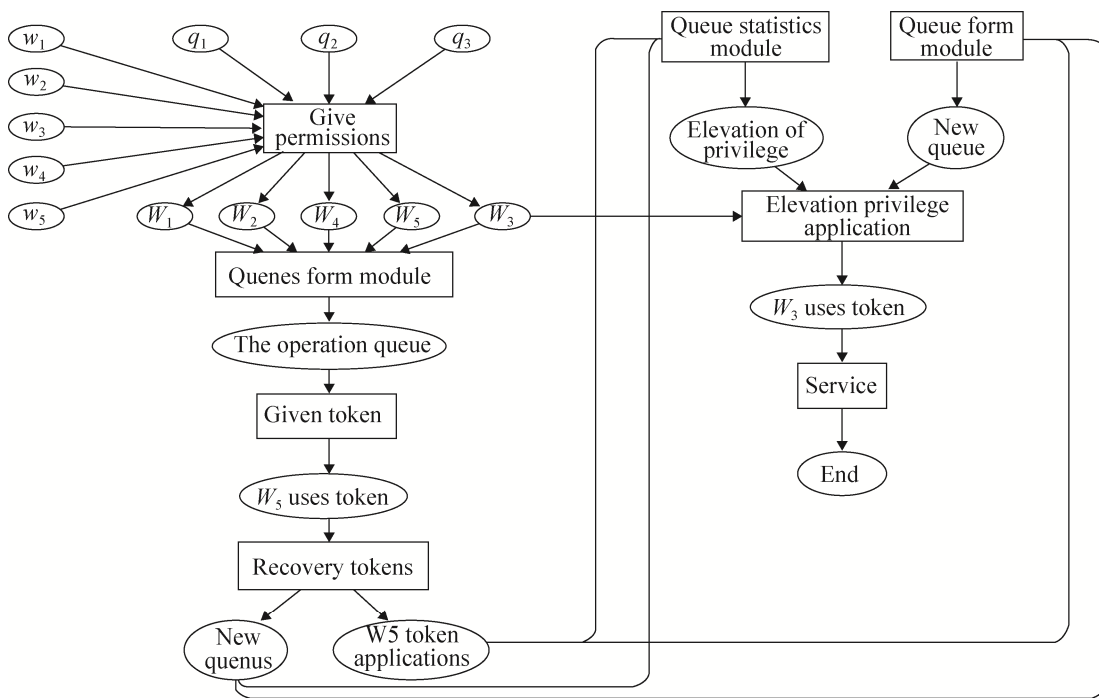


图 11 整体维修过程着色 Petri 图

Fig. 11 Coloring Petri diagram of overall maintenance process

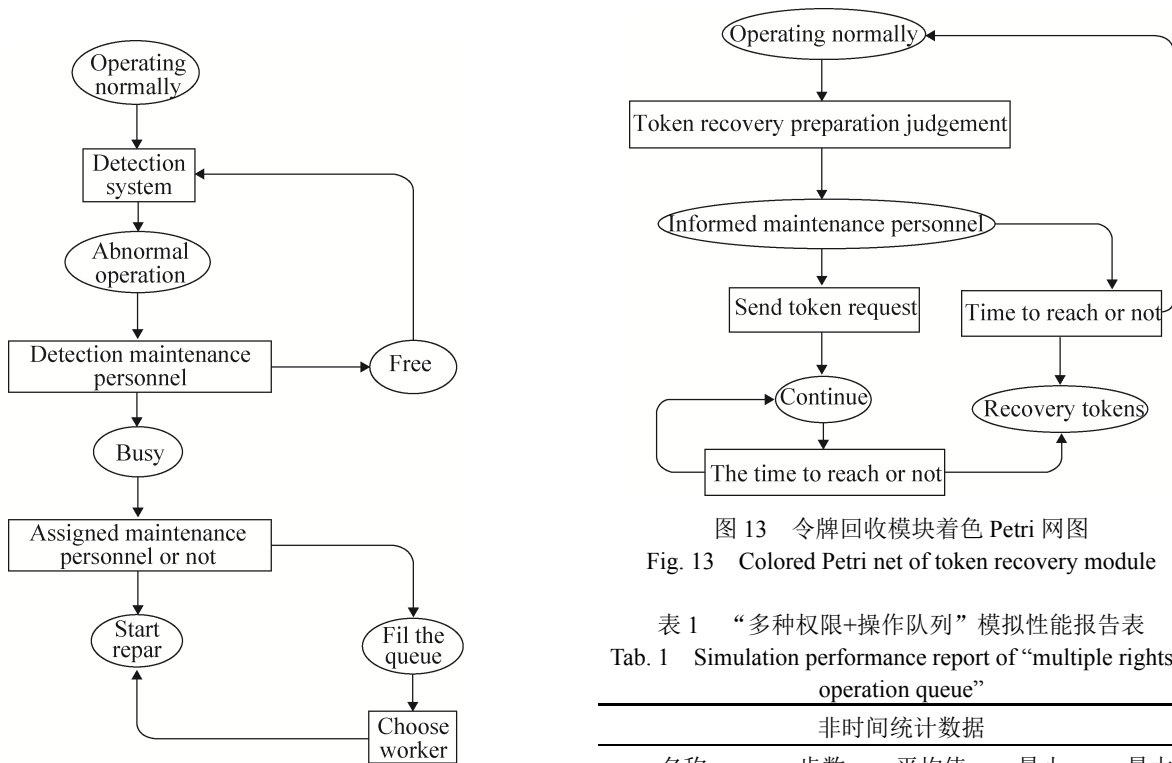


图 12 特情处置模块着色 Petri 网图

Fig. 12 Colored Petri net diagram of special disposal module

图 13 令牌回收模块着色 Petri 网图

Fig. 13 Colored Petri net of token recovery module

表 1 “多种权限+操作队列”模拟性能报告表  
Tab. 1 Simulation performance report of “multiple rights + operation queue”

非时间统计数据				
名称	步数	平均值	最小	最大
Time-Delay	8	1.6	1	3
各维修人员的步数统计				
$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$
2	1	1	1	3

表 1 给出了在着色 Petri 网仿真模拟过程中, 系统的运行时间以及运行步数, 同时给出了每名维修人员的运行步数。由表可得, 系统共运行了 8 步, 也就对应于整个虚拟维修系统的 8 个维修工步, 系统运行时间为 40 s 而不是 80 s, 说明在系统运行过程中, 是多个维修工步同时开展的。在各维修人员的运行步数统计中,  $w_1$  运行了 2 步,  $w_2$  运行了 1 步,  $w_3$  运行了 1 步,  $w_4$  运行了 1 步,  $w_5$  运行了 3 步, 分析可知, 随着操作权限的变大, 运行步数也会增加。由于  $w_5$  拥有最高操作权限, 他的优先操作权及插队权使其获得了最多的操作步数。而由于维修过程是双向进行的, 使得其他维修人员也相应可以获得一定步数, 而正式由于公平性维护机制的运作, 才使得  $w_3$  获得一次操作令牌, 也就有了一次步数。由此可知系统对高操作权限维修人员的凸显以及低操作权限维修人员的操作权维护都得到了实现。采用“操作权限+时间戳”并发冲突控制方法报告见表 2。

表 2 “操作权限+时间戳”模拟性能报告表  
Tab. 2 Simulation performance report of “operation rights + timestamp”

非时间统计数据				
名称	步数	平均值	最小	最大
Time-Delay	8	1.6	0	8
各维修人员的步数统计				
$w_1$	$w_2$	$w_3$	$w_4$	$w_5$
0	0	0	0	8

由表 2 可知, 系统仍会运行 8 步, 但是这 8 步将全部集中于最高权限者, 且运行时间为 80 s。相较于“操作权限+时间戳”并发冲突控制方法而言, “多种权限+操作队列”并发冲突控制方法充分发挥了每名维修人员的作用, 大大缩短了系统运行时间, 提高了工作效率。

## 5 结论

针对“操作权限+时间戳”并发控制方法中存在的不能充分发挥每名维修人员作用的问题, 提出

了“多种权限+操作队列”并发控制方法, 分析了方法中重要模块的工作原理, 例如令牌回收模块, 权限提升模块以及特情处置模块等, 并给出了方法的操作流程图及着色 Petri 网图。最后, 利用 CPN Tools 对该方法的运行流程进行了过程仿真, 得到了仿真数据。对比两种方法的仿真数据知, “多种权限+操作队列”方法充分发挥了每名维修人员的作用, 大大缩短了系统运行时间, 提高了工作效率, 该方法可以应用于各类大型复杂装备多人协同虚拟现实维修系统的开发中。

## 参考文献:

- [1] 周思杭, 刘振宇, 谭建荣. 面向协同维修拆装仿真的并发操作控制方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(12): 2133-2140.  
Zhou Sihang, Liu Zhenyu, Tan Jianrong. Control Method of Concurrent Operation in Collaborative Maintenance Disassembly and Assembly Simulation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2012, 46(12): 2133-2140.
- [2] 赵超, 李星新, 夏空, 等. 面向协同虚拟维修的并发操作控制方法[J]. 计算机系统应用, 2014, 23(10): 198-201.  
Zhao Chao, Li Xingxin, Xia Kong, et al. Concurrent operation control method for collaborative virtual maintenance[J]. Computer system application, 2014, 23(10): 198-201.
- [3] 欧立铭, 徐晓刚, 王建国, 等. 协同虚拟维修及其关键技术[J]. 舰船科学技术, 2010, 32(11): 122-125.  
Ou Liming, Xu Xiaogang, Wang Jianguo, et al. Research on Collaborative Virtual Maintenance and Its Key Technologies [J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(11): 122-125.
- [4] 余春艳, 庄越挺, 潘云鹤. 基于角色的协同虚拟环境并发控制投机策略[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 4(6): 7-13.  
Yu Chunyan, Zhuang Yueting, Pan Yunhe. Role-based speculative concurrency control scheme for collaborative virtual environment [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2004, 4(6): 7-13.
- [5] 李彬, 崔汉国, 李正民, 等. 基于共享子网合成 Petri 网的协同虚拟维修系统[J]. 中国修船, 2015, 28(5): 45-49.  
Li Bin, Cui Hanguo, Li Zhengmin, et al. Collaborative Virtual Maintenance System Based on Shared Subnet

- Composite Petri Net [J]. China Shipbuilding, 2015, 28 (5): 45-49.
- [6] 马艳芳. 虚拟协同实验的研究与设计[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.  
Ma Yanfang. Research and design of virtual collaborative experiment[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2011.
- [7] 张志利, 李向阳, 高钦和, 等. 基于资源竞争的协同式维修操作过程建模[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(1): 82-92.  
Zhang Zhili, Li Xiangyang, Gao Qinhe, et al. Modeling of Collaborative Maintenance Operation Process Based on Resource Competition [J]. Journal of Systems Simulation, 2015, 27(1): 82-92.
- [8] 李世其, 冯雅清, 王峻峰, 等. 网络环境下协同虚拟拆卸训练平台[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(4): 82-86.  
Li Shiqi, Feng Yaqing, Wang Junfeng, et al. Collaborative virtual disassembly training platform under network environment [J]. Computer Aided Engineering, 2013, 22(4): 82-86.
- [9] 杜彪. 分布式虚拟现实平台关键技术研究实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.  
Du Biao. Research and implementation of key technologies of distributed virtual reality platform[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [10] 甄希金, 武殿梁, 范秀敏, 等. 复杂产品分布式并行协同虚拟装配系统研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 3(10): 1990-1995.  
Zhen Xijin, Wu Dianliang, Fan Xiumin, et al. Distributed parallel collaborative virtual assembly system for complex products[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2008, 3(10): 1990-1995.
- [11] 陈学文, 刘玉庆, 朱秀庆, 等. 航天员太空协同操作虚拟训练仿真系统研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(10): 2348-2354.  
Chen Xuewen, Liu Yuqing, Zhu Xiuqing, et al. Research on Virtual Training Simulation System of Astronaut Cooperative Operation in Space [J]. Journal of Systems Simulation, 2013, 25(10): 2348-2354.