

9-2-2020

Modeling of Collaborative Maintenance Operation Process Based on Resource Competition

Zhili Zhang

1. Military Key Lab for Missile Launching & Orientation Aiming Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;;

Xiangyang Li

1. Military Key Lab for Missile Launching & Orientation Aiming Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;;

Qinhe Gao

1. Military Key Lab for Missile Launching & Orientation Aiming Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;;

Liang Feng

1. Military Key Lab for Missile Launching & Orientation Aiming Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;;

See next page for additional authors

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.

Modeling of Collaborative Maintenance Operation Process Based on Resource Competition

Abstract

Abstract: The maintenance process of large-scale complex equipment usually requires the collaborative operations of multi operators, which makes the monopolistic maintenance resources become certain competition when allocated and utilized by operators. *Based on the analysis of the characteristics and collaborative modes of collaborative maintenance operation process (CMOP), the behavior analysis and state change description of related maintenance objects, operators and resources were performed with colored Petri net. Then considering the consumption of maintenance time, the collaborative maintenance operation process model of large-scale complex equipment was established based on resources competition mechanism. The relevant strategies to avoid resources competition and concurrent conflict were analyzed and described and the general CMOP simulation platform of the large complex equipment were developed, which provided the techniques supporting for modeling and realization of the collaborative virtual maintenance of complex equipment.*

Keywords

resource competition, collaborative maintenance, operation process, concurrent conflict, colored Petri net

Authors

Zhili Zhang, Xiangyang Li, Qinhe Gao, Liang Feng, and Ma Chao

Recommended Citation

Zhang Zhili, Li Xiangyang, Gao Qinhe, Liang Feng, Ma Chao. Modeling of Collaborative Maintenance Operation Process Based on Resource Competition[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(1): 82-92.

基于资源竞争的协同式维修操作过程建模

张志利¹, 李向阳¹, 高钦和¹, 梁丰¹, 马超²

(1. 第二炮兵工程大学导弹发射与定向瞄准技术军队重点实验室, 西安 710025; 2. 第二炮兵驻 519 厂军代室, 山西长治 046012)

摘要: 大型复杂装备的维修过程通常需要多个维修人员的协同配合操作, 使得具有独占性的维修资源在分配和使用时存在一定的竞争性。对协同式维修操作过程特点及其协同模式进行分析的基础上, 基于颜色 Petri 网对其相关的维修对象、维修人员和维修资源等要素进行行为分析和状态变换描述。在考虑维修操作时间开支的基础上, 基于资源竞争机制建立了大型复杂装备的协同式维修操作过程模型。对避免资源竞争和并发冲突的相关策略进行了分析和论述, 开发了大型复杂装备通用化 CMOP 仿真平台, 为大型复杂装备协同式虚拟维修过程建模和仿真实现提供技术支持。

关键词: 资源竞争; 协同式维修; 操作过程; 并发冲突; 颜色 Petri 网

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 01-0082-11

Modeling of Collaborative Maintenance Operation Process Based on Resource Competition

Zhang Zhili¹, Li Xiangyang¹, Gao Qinhe¹, Liang Feng¹, Ma Chao²

(1. Military Key Lab for Missile Launching & Orientation Aiming Technology, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. Military Representative Office of The Second Artillery in No. 519 Factory, Changzhi 046012, China)

Abstract: The maintenance process of large-scale complex equipment usually requires the collaborative operations of multi operators, which makes the monopolistic maintenance resources become certain competition when allocated and utilized by operators. Based on the analysis of the characteristics and collaborative modes of collaborative maintenance operation process (CMOP), the behavior analysis and state change description of related maintenance objects, operators and resources were performed with colored Petri net. Then considering the consumption of maintenance time, the collaborative maintenance operation process model of large-scale complex equipment was established based on resources competition mechanism. The relevant strategies to avoid resources competition and concurrent conflict were analyzed and described and the general CMOP simulation platform of the large complex equipment were developed, which provided the techniques supporting for modeling and realization of the collaborative virtual maintenance of complex equipment.

Keywords: resource competition; collaborative maintenance; operation process; concurrent conflict; colored Petri net

引言

大型复杂装备的维修过程较为复杂, 通常需要多个部门以及维修人员的协同配合才能顺利完成。



作者简介: 张志利(1966-), 男, 河南濮阳人, 教授, 博导, 研究方向为导弹发射系统总体与仿真; 李向阳(1984-), 男, 河南汝州人, 博士, 讲师, 研究方向为导弹发射系统总体与仿真; 高钦和(1968-), 男, 山东沂南人, 教授, 博导, 研究方向为导弹发射系统总体与仿真;
收稿日期: 2013-10-15 修回日期: 2013-12-26
基金项目: 装备预研基金重点项目(9140A27040112JB4 7081)

在维修实施过程中, 多个维修人员需要相互配合来完成故障零部件的拆卸、更换/修复、装配等具体维修操作, 这就需要有相应的备件、设施、工具、检测设备作为必不可少的维修资源。然而, 由于协同式维修过程具有层次化、并发性和随机性等特点^[1], 某些维修资源所具有的独占性, 使其在被维修人员使用时存在较强的竞争性。为此, 在对大型复杂装备的协同式维修操作过程(Collaborative

Maintenance Operation Process, CMOP) 进行建模时, 必须充分考虑资源的合理规划和分配, 避免多个维修人员并行操作时的冲突。

目前, 用于协同工作过程的建模技术主要有 IDEF(ICAM DEfinition Method)^[2-3], UML(Unified Modeling Language)^[4-5], PERT(Project Evaluation and Review Technique)图^[6]、遗传算法^[7]以及 Petri 网^[8-9]等, 这些建模技术能够对系统行为、软件开发、项目管理以及实施进度进行过程描述。相对而言, Petri 网能够模拟各类复杂系统的动态行为与并发活动, 是描述和分析具有分布、并发、异步特征系统的有效模型工具, 非常适合于研究协同任务与过程建模中的“资源共享”、“竞争”等问题^[10-11]。由于复杂系统中的节点数目众多、规模庞大、关联复杂, 利用传统的 Petri 网进行建模及特性分析就变得较为困难。针对不同领域的应用需求, 研究人员对 Petri 网进行了一系列的改进, 提出了双 Petri 网(Dual Petri Nets, DPN)^[12]、面向对象 Petri 网(Object Oriented Petri Net, OOPN)^[13]、增广 Petri 网(Augmented Petri Net, APN)^[14]、模糊 Petri 网(Fuzzy Petri Net, FPN)^[15]、颜色 Petri 网(Colored Petri Net, CPN)^[16-17]和合成 Petri 网(Synthetic Petri Nets, SPN)^[18]等一系列新的 Petri 网模型。

在构建大型复杂装备 CMOP 模型时, 既需要考虑维修操作工序之间存在的逻辑关系, 同时也要分析由于维修时间要求、多人协同模式、维修资源限制及竞争所带来的影响。从而, 探索并建立高效可靠的 CMOP 模型, 对大型复杂装备协同维修过程中各类要素的行为特性进行分析和描述, 为协同式维修过程的仿真实现、动态控制和智能化管理提供参考依据。进而基于合理的维修资源分配, 确保多个维修人员按照正确合理的逻辑和时间顺序对 CMOP 进行协同执行。

1 CMOP 建模分析

1.1 CMOP 特点分析

协同式维修过程中多个维修人员根据分配的

维修任务, 使用检测设备、维修工具、维修设施以及所需的其他资源, 通过相互之间的协同配合操作, 使装备的结构和功能保持或恢复到规定技术状态。如同真实维修过程一样, 在对 CMOP 进行建模时, 要充分考虑维修对象、维修人员、维修资源和维修操作过程信息等要素的行为方式和配合模式。进而, 通过对这些要素的知识表达和行为描述, 建立 CMOP 模型, 真实地反映大型复杂装备的协同式维修过程的本质。

在 CMOP 中, 单个维修操作可以看作是某个零部件的拆卸/装配活动, 而维修操作过程则是由一个个离散的拆卸/装配活动所组成。这些离散的拆卸/装配活动在某些时候是通过串行方式进行组合的, 而在另外一些时候则是通过并行方式进行组合, 此外还可能通过串行和并行的混合方式进行组合^[1]。与以往的协作活动相比, CMOP 中多个维修人员的协同配合关系没有固定的形式, 具有更高的随机性和并发性, 从而导致其对维修资源的需求也存在不确定的冲突。从维修操作实施者——维修人员的角度出发, CMOP 主要具有以下特点: 操作过程协同化、操作模式多样化、维修资源共享化和操作过程的不确定性。

1.1.1 操作过程协同化

大型复杂装备结构复杂, 集成度高。某些零部件体积较大, 质量较重, 从而造成了其维修操作较为复杂, 需要采用多种手段来完成各种操作过程。在其维修操作过程中, 某些环节由单个维修人员就能够完成; 而另外一些环节则需要多个维修人员相互配合才能够共同完成, 如图 1 所示。对于多个人员的维修操作, 其相互之间是一种实时协作关系, 需要相互之间的协同操作与协同感知。

1.1.2 操作模式多样化

协同式维修操作实施过程中, 某些维修操作必须按照特定的先后顺序才能够顺利进行; 而另外一些维修操作则可以同时并行实施, 如图 2 所示。对于有多个维修人员协作的操作过程, 某些零部件需要多个维修人员按照一先一后的顺序进行协同操

作, 而另外一些则需要多个维修人员并行协同操作, 或者是一起共同操作。

1.1.3 维修资源共享化

如图 3 所示, 为了协同完成某项维修任务, 尤其是进行并行协同操作时, 多个维修人员同时需要

有相应的维修资源作为支持。然而, 某些维修资源具有空间或者时间上的独一性, 多个维修人员需要共同使用这些维修资源。为了避免可能出现的并发访问冲突, 需要对维修资源进行共享, 保证能够满足各个维修人员的维修操作需求。

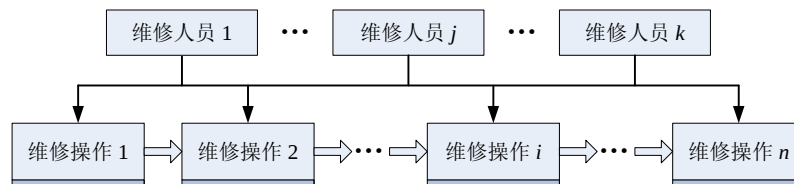


图 1 多个维修人员配合操作

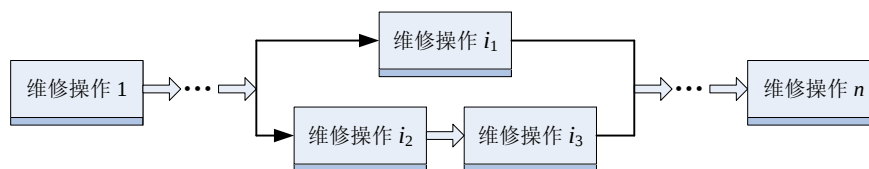


图 2 具有并行操作的维修过程

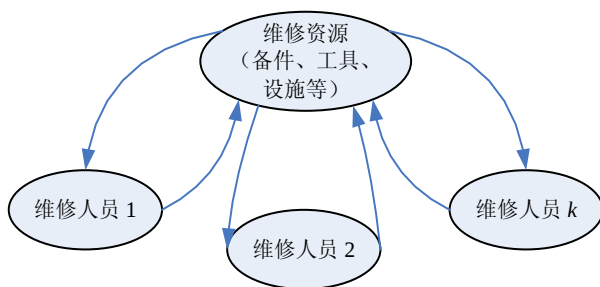


图 3 维修操作中维修资源需求示意图

1.2 CMOP 协同模式

通过对 CMOP 及其特点的研究分析, 可知 CMOP 的系统模式主要取决于实际维修过程中多个维修人员之间的协作关系和配合操作。针对不同维修任务过程的结构形式和内部逻辑关系, 需要根据各维修人员所承担的维修任务, 对其协同操作模式进行归类和分析。正如前面所述, 对于多个维修人员的协同模式, 需要根据 CMOP 的特点进行确定, 取决于其相应的维修任务规划和分配, 即是由各维修人员所承担的具体维修操作所决定的。

CMOP 的协同模式是由多个维修人员在不同维修工步序列中的协同操作模式所决定的, 主要包

括 3 种不同的类型: 串行协同(Serial Collaboration, SC)、并行协同(Concurrent Collaboration, CC)和串一并混合协同(Mixed Collaboration, MC)。

1.2.1 串行协同维修操作过程

在 SC 模式下的协同维修操作过程中, 多个维修人员按照既定的操作顺序对某些零部件进行协同拆卸或装配, 通过相互之间的协作配合来共同完成某个维修子任务。串行协同维修操作过程强调的是维修操作顺序的不可逆性, 即对应零部件的拆卸或装配操作顺序是不能够改变的。其维修操作对象通常为具有不同拆装顺序的零部件。由于具有严格的操作顺序, 多个维修人员共用的维修资源, 能够利用时间上的先后顺序进行分配。

图 4 所示为 SC 模式下的某一维修操作过程。不同的维修人员需要根据自身的任务分工, 选用相应的备件、工具、设施等维修资源, 按照特定的顺序进行串行维修操作。由于其维修操作具有不可逆性和特定的时序性, 为此, 在 SC 模式下多个维修人员进行协同维修操作时, 对维修资源的需求不会产生冲突和竞争。

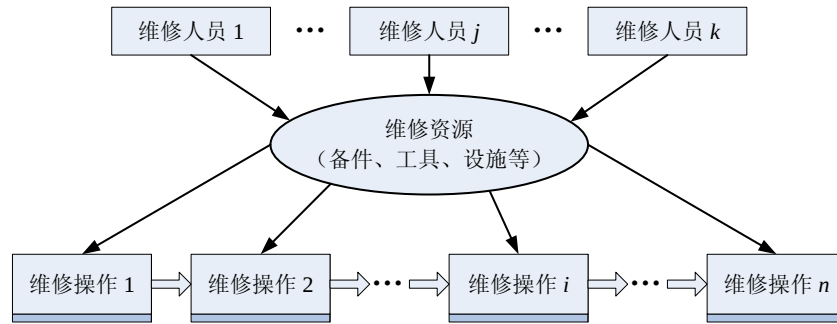


图 4 串行协同维修操作过程示意图

1.2.2 并行协同维修操作过程

在 CC 模式下的协同维修操作过程中, 多个维修人员需要对某些零部件进行协同拆卸或装配, 通过相互之间的协作配合来共同完成某个维修子任务。并行协同维修操作过程强调的是维修操作的互不干涉性, 即对应零部件的拆卸或装配操作可以同时进行。其维修操作对象可以是同一个零部件, 也可以是不同的零部件。对于多个维修人员共用的维修资源, 需要通过合理的共享方式进行分配。

图 5 所示为某一个具有 CC 模式的维修操作过程。多个维修人员需要根据自身的任务分工, 选用所需的备件、工具、设施等维修资源, 并行地进行相应的维修操作。由于其维修操作具有同步性和并发性, 维修资源又具有独占性, 为此, 在 CC 模式下多个维修人员进行协同维修操作时, 对维修资源的需求就会产生并发冲突和竞争。

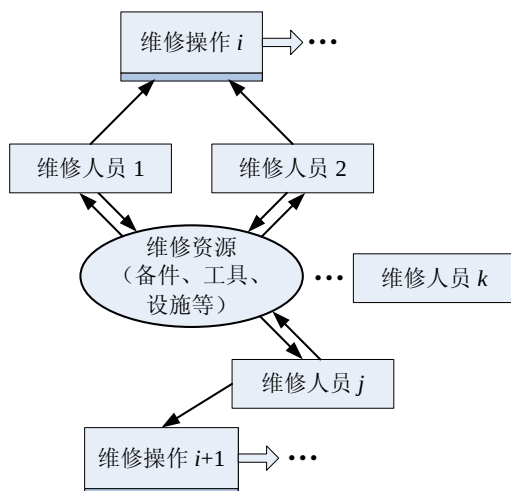


图 5 并行协同维修操作过程示意图

1.2.3 串一并混合协同维修操作过程

在 MC 模式下的协同维修操作过程中, 多个维修人员不仅需要按照既定的顺序对某些零部件进行协同拆卸或装配, 而且还要并发地对另外一些零部件进行协同拆卸或装配, 通过相互之间的协作配合来共同完成某个维修子任务。串一并混合协同维修操作过程是以上 2 种模式的有机组合, 大型复杂装备的大多数维修操作通常为该种类型的协同过程。

图 6 所示为某一个具有 MC 模式的维修操作过程。多个维修人员的协同过程及模式较为复杂, 各维修人员对备件、工具、设施等维修资源的需求模式也较为复杂。由于同时具有时序性、同步性和并发性, 在 MC 模式下多个维修人员进行协同维修操作时, 需要对多个维修人员所需的维修资源进行合理的分配。

2 基于 CPN 的 CMOP 行为描述

CPN 作为传统 Petri 网的一种扩展, 它不仅形象地描述具有分布、顺序、并发、冲突、同步、异步、不确定性和资源共享的复杂系统的动态行为^[8,19], 而且结合了基本 Petri 网和高级语言的特点, 通过对网系统中令牌进行分类或解析, 使 Petri 网系统中的基本元素减少, 从而达到缩小 Petri 网系统规模的目的^[20-21]。同时, CPN 的层次性还能保证被描述系统或过程的微小变化不会完全改变模型的结构, 从而大大简化了对复杂系统及过程的建模^[22]。

通过对以上几种不同 CMOP 协同模式及其相关的维修人员、维修对象、维修资源等方面的分析, 可知在对 CMOP 进行行为描述时, 不仅需要考虑

维修任务的层次结构和多个维修人员的协同模式, 而且需要考虑维修过程中维修资源、维修对象以及多个维修人员的工作状态及其动态演化。下面分别从 CMOP 中所涉及的维修对象、维修人员、维修资源等要素, 对其基于 CPN 的行为描述进行研究和分析。

2.1 维修对象

维修对象包括需要被修复或者更换的故障零部件, 以及在对其更换过程中所需要拆卸和装配的零部件。由于装备中的零部件通常都是以装配体的形式存在, 其组成结构、装配关系和维修特征, 直接决定了不同维修人员的任务以及维修操作的具体实施过程。

然而, 基于 CPN 对复杂装备的 CMOP 进行行为描述时, 为了优化模型的逻辑结构, 可以将维修

对象隐含于整个维修操作过程中, 如图 7(a)和(b)所示。即通过维修操作过程模型中对应的库所来描述, 如图 7(a)和(b)中的 O_1 , O_2 , O_3 和 O_4 , 不同的维修步骤便可以反映其对应的维修操作对象信息。而其它相关要素则看作是为其服务的先决条件, 通过对 CMOP 中维修人员 H 、维修资源 R 等要素以及相关信息的描述, 便可以反映出对当前维修对象的行为过程。

2.2 维修人员

维修人员作为维修任务的承担者和维修操作的执行者, 是 CMOP 中各操作环节的先决条件。维修人员所要执行的维修操作是由维修任务过程模型所分配好的^[23-24], 在 CMOP 建模过程中需要考虑的是对所承担维修操作任务的执行过程, 即对应于维修任务模型中最底层的维修操作序列。

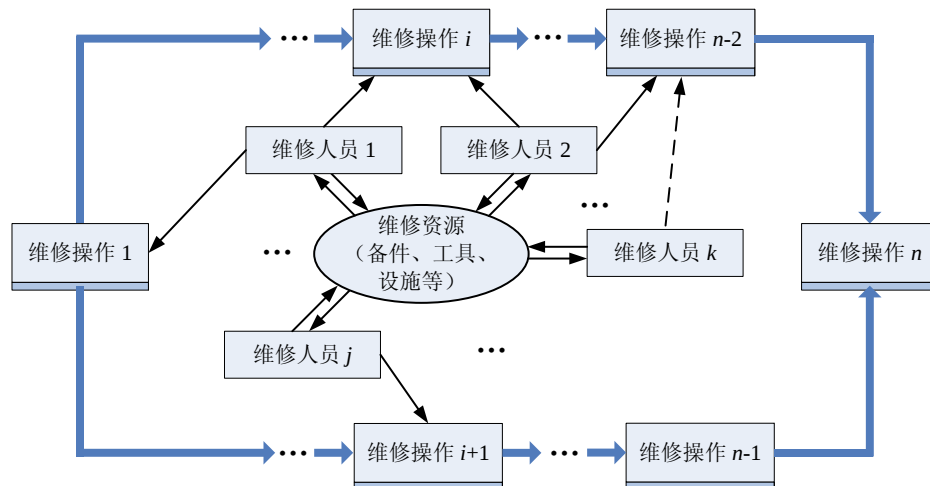
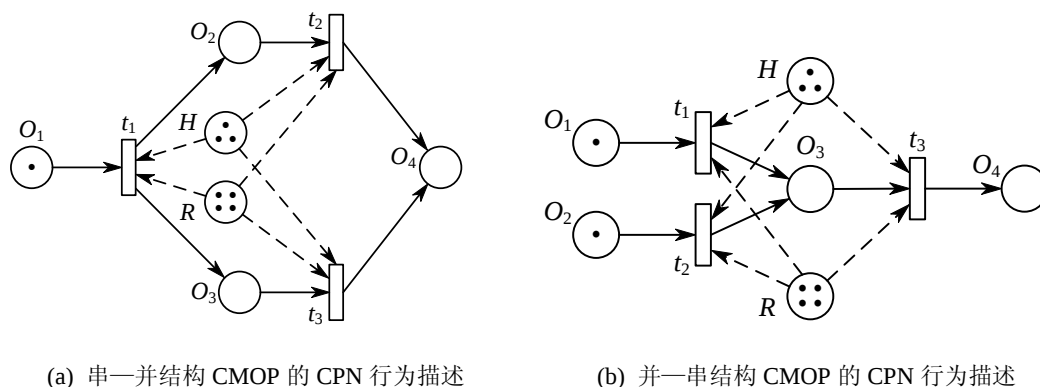


图 6 串—并混合协同维修操作过程示意图



(a) 串—并结构 CMOP 的 CPN 行为描述

(b) 并—串结构 CMOP 的 CPN 行为描述

图 7 CMOP 的 CPN 行为描述

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

维修人员的状态主要有“空闲”和“忙碌”2种, 其中, “空闲”状态表示实际工作中维修人员已经就位进入待工状态, 等待维修任务的操作执行; “忙碌”状态表示维修人员正在进行某个维修操作, 不能再同时执行其他的任何维修操作。通过“空闲”和“忙碌”2种状态转换, 便能够描述维修人员在 CMOP 中的独占性和动态演化。

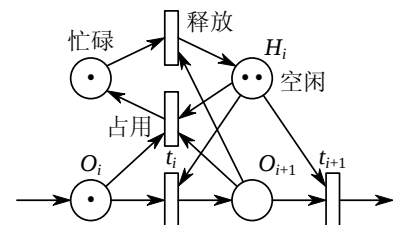
图 8 为某维修操作过程中维修人员的行为状态描述。在图 8(a)中, 使用 2 个表示状态的库所来描述维修人员 H_i 的“空闲”和“忙碌”状态, 从而通过判断 2 个库所中是否存在对应的令牌来判定维修人员 H_i 能否进行相应的任务分配和维修操作执行。对于正在执行某个维修操作的维修人员而言, 由于该维修人员被“占用”, 其状态由“空闲”变为“忙碌”。当完成当前维修对象 O_i 的维修操作 t_i 后, 由于其状态为“忙碌”, 此时维修对象 O_{i+1} 不能再次“占有”该维修人员, 需要先进行“释放”使其由“忙碌”变为“空闲”, 才能进行相应的维修操作 t_{i+1} 。由此可见, 在该 CMOP 模型中, 维修人员的状态同时也影响到维修任务的分配和执行进程, 从而真实地描述了实际维修过程中维修任务分配及其操作执行的行为过程。

采用图 8(a)的描述方式, 用于表示维修人员状态库所中的多个令牌代表不同的维修人员(只需一个维修人员的维修操作则只有一个令牌), 用不同的颜色令牌来描述。同时将承担不同维修对象序列 $O_i, O_{i+1}, \dots$ 具体操作的维修人员 H_i 的状态变换过程, 通过“占用”和“释放”2种变迁进行描述。

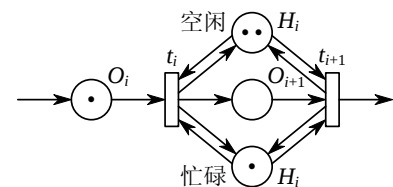
考虑到对维修人员的“占用”和“释放”是由所需执行的维修操作序列 $t_i, t_{i+1}, \dots$ 所引起的, 即当要执行某个维修操作时, 所需的维修人员状态由“空闲”变为“忙碌”, 而当执行完相应维修操作后, 对应的维修人员状态又由“忙碌”变为“空闲”。为此, 可以通过图 8(b)中的方法来建立相应的描述模型。当执行维修操作变迁 t_i 时, 根据设定的条件表达式, 如果所需的维修人员处于“空闲”状态, 则转换为“忙碌”状态; 如果不再需要的维修人员

处于“忙碌”状态, 则转换为“空闲”状态。当执行维修操作变迁 t_{i+1} 时, 如果需要仍处于“忙碌”状态的维修人员, 则根据设定的条件表达式, 使其仍然处于“忙碌”状态。

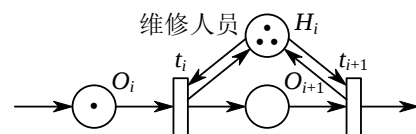
此外, 由于对应于不同维修操作过程的维修人员是相对固定的, 为此也可以通过建立全局或是局部的“维修人员”库所。利用不同颜色的令牌来表示不同的维修人员, 而相应令牌的存在与否则描述了对应的维修人员的“空闲”和“忙碌”状态, 同时通过定义条件表达式控制不同颜色令牌的增加和减少, 进而描述维修人员的状态变化, 如图 8(c)所示。对于并行的维修操作则可以通过图 8(d)中的方法来建立相应的过程模型。



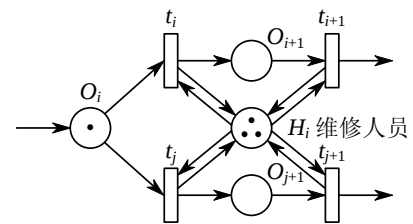
(a) 采用状态库所及其操作进行描述



(b) 采用简化状态库所进行描述



(c) 采用维修人员库所进行描述(串行)

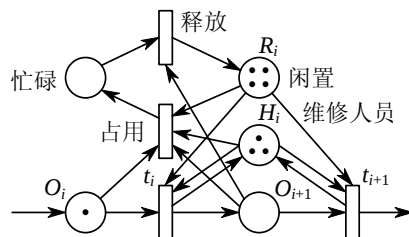


(d) 采用维修人员库所进行描述(并行)

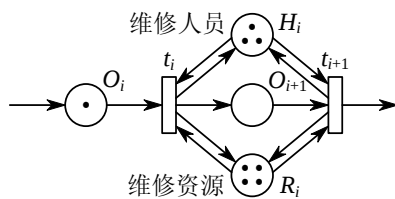
图 8 CMOP 中维修人员的行为状态描述

2.3 维修资源

维修资源包括维修人员在操作过程中所需要的维修工具、测试设备、维修设备、保障设施、备用零部件等。维修人员能否完成某项维修操作在多数情况下是受到这些维修资源制约的。从作为资源的角度来看,这些元素可以用两个基本的状态进行描述:“闲置”状态和“忙碌”状态。对于维修资源 R_i 而言,也可以通过使用 2 个表示状态的库所“闲置”和“忙碌”来描述其相应的状态变化过程,用不同颜色的令牌来代表不同类型的维修资源。通过判断不同状态库所中是否有对应的令牌来判断维修资源是否可用,从而判断相应的维修操作能否被执行和完成。如图 9(a)所示。



(a) 采用状态库所及其操作进行描述



(b) 采用维修资源库所进行描述

图 9 CMOP 中维修资源的行为状态描述

在实际的维修操作过程中,维修资源是服务于相应的维修人员来完成其承担的维修操作任务,且某些维修资源只能被单个维修人员使用,具有独占性。为此,对应于图 9(a)中所示的 CMOP 模型中,维修资源的状态不仅受控于维修人员及其承担的维修操作任务,而且还影响到维修操作的执行进程。即是只有当某些维修资源是当前维修操作所需要的,同时维修资源处于“闲置”状态且承担当前任务的维修人员处于“就位”状态,才能进入该维修操作任务的执行操作过程,从而真实地描述了实

际维修过程中维修任务及其操作执行与维修资源之间的行为过程。

由于对维修资源的“占用”和“释放”也是由所需执行的维修操作 $t_i, t_{i+1}, \dots$ 引起的,而且通常情况下维修资源为共享资源,为此可以通过建立全局的“维修资源”库所的方法来描述其状态变化过程,如图 9(b)所示。库所中不同颜色的令牌表示不同的维修资源,只有含有相应的令牌才能表明对应的维修资源可用。一般说来,采用图 9(b)中的方法建立的模型要简单一些,但在刻画行为的细节程度上不如图 9(a)中的方法详尽。在解决实际应用时,可以根据具体的研究问题需要选择有效的描述方法。

3 基于时间 CPN 的 CMOP 建模

基于 CPN 对 CMOP 进行建模时,不仅要考虑不同维修任务的组成结构、逻辑关系和状态演化过程,而且要考虑各维修任务操作实施过程中所相关的维修人员、维修对象和维修资源。从而根据装备的结构特点和维修操作规程,对不同维修任务所对应的 CMOP 进行建模,对不同维修操作过程的组成结构、逻辑关系和状态演变过程进行描述。然而 CPN 中的变迁表达的只是“瞬变”处理内容,而 CMOP 模型中的变迁需要描述具体的维修操作动作,对于不同的维修操作需要相应的维修时间来保证。为此,需要采用含有时间因素的 CPN 模型^[25]对相应的 CMOP 进行描述,从而较为真实地反映其“满足变迁条件→触发变迁→状态改变”的行为过程。

基于时间 CPN 对 CMOP 进行建模时,各维修操作是由“变迁”来进行描述的,变迁对应的“可触发”条件反映的是不同维修操作的对象,以及其执行时所需的前提条件。这些前提条件通过相应的库所来描述,主要有维修对象、维修人员和维修资源等。变迁对这些库所的具体需求信息,一般通过指向变迁的条件表达式在(弧)进行标明。只有当库所中存在所需求的令牌并满足相应条件时,变迁才能处于可触发状态,意味着当前维修操作所需要的保障资源得到满足,能够进入执行阶段。

图 10 所示为采用时间 CPN 模型描述的某个设备的 CMOP 模型, 变迁为完成该维修任务所需要进行的维修操作动作序列。与一般 CPN 模型不同的是这些变迁除了标注相应符号外, 还标注了对变迁所赋予的时间区间值, 进而反映了完成该变迁对应的维修操作动作所需的最短时间和最长时间。其状态演化过程将会更加符合实际的维修操作过程, 即对于并行维修操作 t_2 和 t_3 , 其对应的时间区间为 $[20, 30]$ 和 $[25, 40]$ 。考虑到实际维修过程中维修操作的随机性和不确定性, 则 t_2 和 t_3 的先后完成顺序具有一定的不确定性, 但是只有两者都完成后才能进行 t_4 所对应的维修操作。

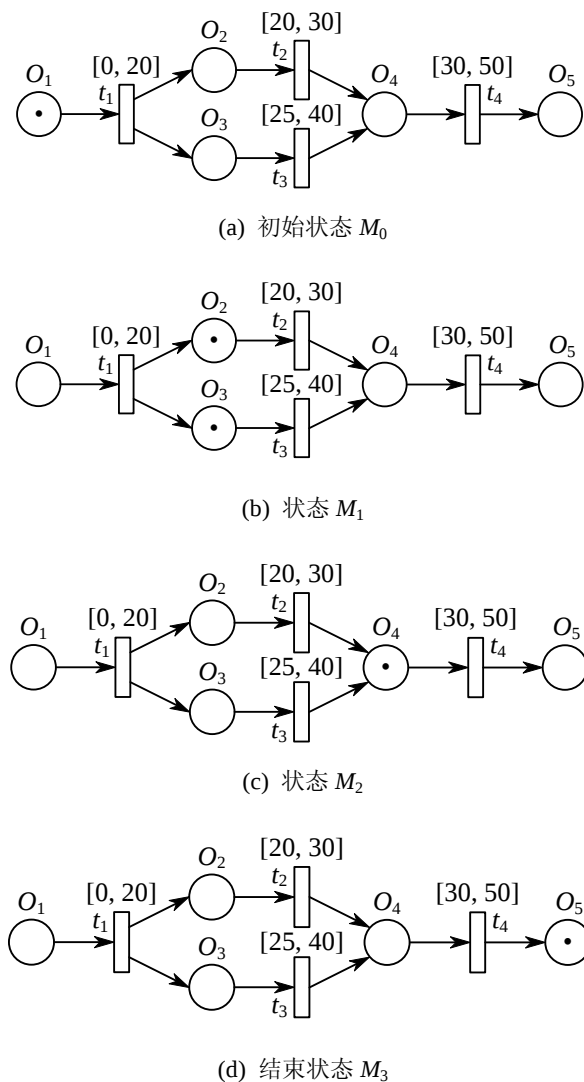


图 10 基于时间 CPN 描述的某维修操作过程模型

此外, CMOP 中多个维修人员的协同操作具有一定的不确定性和更高的并发性, 但是维修人员和维修资源具有一定的独占性, 可能会引起相应维修资源的竞争冲突。对于维修人员的独占性问题, CMOP 模型是根据维修任务层次化的逻辑结构来解决的, 即只有完成当前维修操作动作时, 维修人员才能承担下一个维修操作的处理过程。而当多个维修人员同时使用具有独占性的维修资源时, 就需要采用相应的措施来避免可能引起的资源竞争冲突。

如图 11 中所示的维修操作过程中, 当执行两个并行的维修操作 t_2 和 t_3 都需要资源库所 R 中的同一对象时, 则 t_2 和 t_3 的操作执行将会引起资源竞争冲突, 只有其中一个能够最终被触发。为了避免由资源竞争引起的并发冲突, 可以通过建立相应的竞争策略来解决:

- (1) 基于优先级机制, 确定变迁触发的优先次序。当有并发冲突发生时, 具有高优先级的变迁可以被触发, 而具有低优先级的变迁不被触发。
- (2) 为变迁定义不同的触发条件谓词。当发生并发冲突时, 满足触发条件谓词的变迁可以被触发, 不满足触发条件谓词的变迁不被触发。
- (3) 基于变迁实施时间。当 CMOP 模型处于某一状态时, 如果同时有几个可以触发的时间变迁, 并且每一个变迁都有可能被触发。但是某个变迁的触发将使得其他冲突的变迁不可被触发, 那么此时让具有最短实施时间的变迁获得最大的触发可能性。

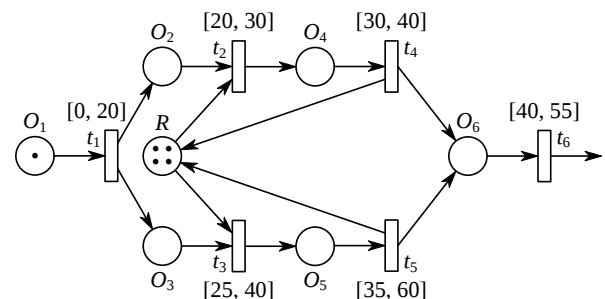


图 11 维修操作过程模型中的资源竞争并发冲突

4 实例仿真分析

大型复杂装备中某一液压执行装置,其维修操作信息如表 1 所述。该液压执行装置常出现的故障为:由于内部密封圈、垫圈的变形、磨损、破损或是各缸筒的配合面出现划伤、磨损而引起的液压油

泄露,导致该执行装置的工作压力不足而无法正常工作。采用的维修措施为拆下各零部件进行检查,并对故障零部件进行修复(打磨、抛光、清洗等)或更换处理,在该维修实施过程中需要多个维修人员相互协同进行配合操作。

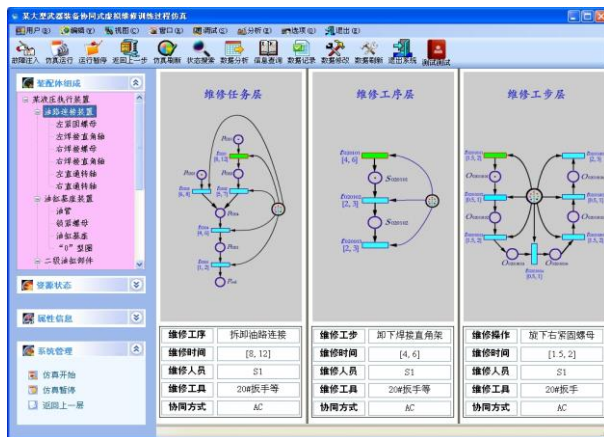
表 1 某液压执行装置维修操作信息信息

维修工序		维修工步		维修操作		维修工具	维修人员	协同方式
序号	内容	序号	内容	序号	内容			
0201	拆卸油路连接	020101	卸下焊接直角轴	02010101	旋下左紧固螺母	20#扳手	S ₁	AC
				02010102	旋下左焊接直角轴	28#扳手	S ₁	AC
				02010103	旋下右紧固螺母	20#扳手	S ₁	AC
				02010104	旋下右焊接直角轴	28#扳手	S ₁	AC
		020102	卸下直通转轴	02010201	旋下左直通转轴	专用扳手	S ₁	AC
				02010202	旋下右直通转轴	专用扳手	S ₁	AC
		020103	卸下油管	02010301	卸下油管	18#扳手	S ₁	AC
0202	拆卸油缸基座	020201	松开锁紧螺母	02020101	旋开锁紧螺母	24#扳手	S ₁	AC
		020202	拧下油缸基座	02020201	拧下油缸基座	专用工具	S ₁ &S ₃	SC
		020203	取下“O”型圈	02020301	取下“O”型圈	平口螺丝刀	S ₁	AC
0203	拆卸二级油缸	020301	卸下顶端挡圈	02030101	旋下紧固螺栓	平口螺丝刀	S ₂	AC
				02030102	取下顶端挡圈	徒手	S ₂	AC
		020302	卸下二级油缸	02030201	退出/放置油缸 II	徒手	S ₂ &S ₁	SC
0204	拆卸一级油缸	020401	卸下定位螺钉	02040101	旋下左定位螺钉	平口螺丝刀	S ₂	AC
				02040102	旋下右定位螺钉	平口螺丝刀	S ₂	AC
		020402	卸下支耳	02040201	拧下支耳	专用工具	S ₂ &S ₁	SC
		020403	卸下一级油缸	02040301	退出/放置油缸 I	徒手	S ₂ &S ₁	SC
0205	取下密封圈、垫圈	020501	取下密封圈	02050101	取下密封圈	平口螺丝刀	S ₁ S ₂	AC
		020502	取下垫圈	02050201	取下垫圈	平口螺丝刀	S ₁ S ₂	AC

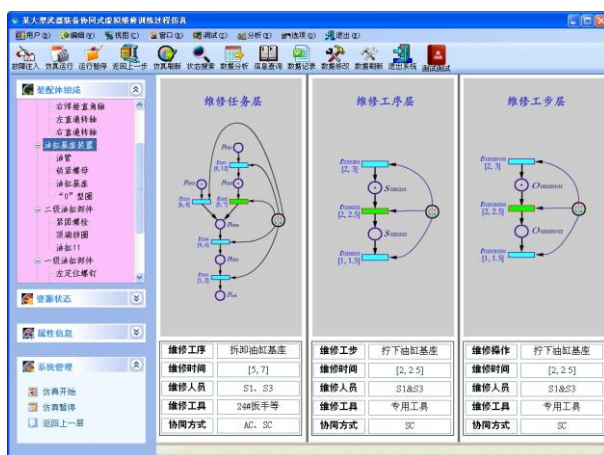
表 1 中协同方式反映了在维修任务规划和分配中多个维修人员间的协同关系,主要有异步协同(Asynchronous Collaboration, AC)和同步协同(Synchronous Collaboration, SC) 2 种方式。该维修任务需要由 3 个维修人员 S₁, S₂ 和 S₃ 协同配合完成,“&”表示需要由相应的多个维修人员一起协作完成,“|”表示可以由任一维修人员完成。

基于以上的分析方法,考虑到该液压执行装置所需维修工具、维修人员等资源的独占性,根据维修人员的协同模式对其进行优化分配,并基于时间 CPN 建立该装置 CMOP 模型。为了使 CMOP 模型

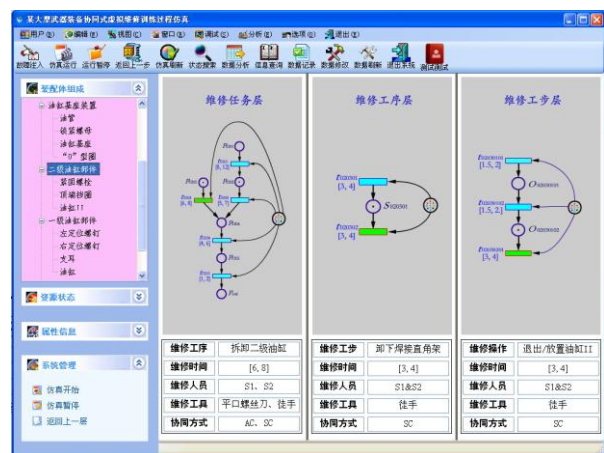
具有较好的通用性和可扩展性,便于今后实现与协同式虚拟维修操作过程的控制和交互,基于 Visual Studio 2010 编程环境,综合采用可扩展标记语言(Extensible Markup Language, XML)和 Flash Action Script 编程技术,开发了大型复杂装备通用化 CMOP 仿真平台,图 12 所示为该液压执行装置 CMOP 仿真界面的运行截图。通过对不同维修任务层面 CMOP 中的资源分配和状态演化进行仿真运行和结果分析,从而为其协同式虚拟维修过程的仿真实现提供参考依据。



(a) 运行阶段一



(b) 运行阶段二



(c) 运行阶段三

图 12 某液压执行装置 CMOP 模型仿真运行截图

5 结论

由于大型复杂装备维修操作过程的随机性, 维修模式的多样化, 以及多个维修人员的并发性协同操作, 使得多个维修人员进行协同式维修操作时,

具有独占性的维修资源存在一定的竞争性。为了能够对具有该特性的 CMOP 进行建模, 在对其相关的各类要素进行建模分析基础上, 利用 CPN 对 CMOP 中的维修对象、维修人员和维修资源等进行行为分析和状态变换描述。从而基于维修资源的竞争机制, 采用时间 CPN 建立了大型复杂装备的 CMOP 模型, 并对避免资源竞争和并发冲突的相关策略进行了分析和论述。为了使 CMOP 模型具有较好的通用性和可扩展性, 开发了大型复杂装备通用化 CMOP 仿真平台, 从而为大型复杂装备协同式虚拟维修过程的建模和实现提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 李向阳. 大型复杂装备协同式虚拟维修训练系统关键技术研究 [D]. 西安: 第二炮兵工程大学, 2012.
- [2] 陈禹六. IDEF 建模分析和设计方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] Šerifi V, Dašić P, Jecmenica R, *et al.* Functional and information modeling of production using IDEF methods [J]. *Journal of Mechanical Engineering* (S0039-2480), 2009, 55(2): 131-140.
- [4] Grady Booch, James Rumbaugh, Ivar Jacobson. UML 用户指南(第二版) [M]. 邵伟忠, 麻志毅, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [5] Bendraou R, Jézéque J M, Gervais M P, *et al.* A comparison of six UML-based languages for software process modeling [J]. *IEEE Transactions on Software Engineering* (S0098-5589), 2010, 36(5): 662-675.
- [6] Ertugru İrfan, Karakasoglu N İsen. Fuzzy pert and its application to machine installation process [J]. *Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing* (S1542-3980), 2009, 15(1): 65-79.
- [7] Charongrattanasakul P, Pongpullponsak A. Minimizing the cost of integrated systems approach to process control and maintenance model by EWMA control chart using genetic algorithm [J]. *Expert Systems with Application* (S0957-4174), 2011, 38(5): 5178-5186.
- [8] 吴哲辉. Petri 网导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] Fatih T., Cengiz K.. Modeling a flexible manufacturing cell using stochastic Petri nets with fuzzy parameters [J]. *Expert Systems with Applications* (S0957-4174), 2010, 37(5): 3910-3920.
- [10] 胡志刚. 常规潜艇维修过程建模与仿真方法研究 [D]. 武汉: 海军工程大学, 2007.

- [11] Trappey A J C, Hsiao D W, Ma L. Maintenance chain integration using Petri-net enabled multiagent system modeling and implementation approach [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems (S1083-4427), 2011, 41(3): 306-315.
- [12] Michael Köhler, Heiko Rölke. Properties of super-dual nets [J]. Fundamenta Informaticae (S0169-2968), 2006, 72(1-3): 245-254.
- [13] Meng Xiuli. Modeling of reconfigurable manufacturing systems based on colored timed object-oriented Petri nets [J]. Journal of Manufacturing Systems (S0278-6125), 2010, 29(2-3): 81-90.
- [14] Lee D Y, Chung S Y, Hwang M J, *et al.* Adaptive modeling of robotic assembly using augmented Petri nets [C]// Proceedings of the 2007 American Control Conference, New York, USA: IEEE, 2007: 3600-3605.
- [15] Guo Y Z, Zeng J C. Decision-making and controlling for products collaborative design implement process based on Fuzzy Petri net [J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2011, 15: 3032-3040.
- [16] Jensen K, Kristensen L M, Wells L. Coloured Petri nets and CPN tools for modeling and validation of concurrent systems [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer (S1433-2779), 2007, 9(3-4): 213-254.
- [17] 胡涛, 杨春辉, 杨建军. 基于 CPN 的复杂装备系统维修任务建模仿真研究 [J]. 海军工程大学学报, 2008, 20(6): 25-30.
- [18] 杨元, 黎放, 侯重远, 等. 协同维修过程的合成 Petri 网建模与分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(6): 711-716.
- [19] 刘兴堂, 梁炳成, 刘力, 等. 复杂系统建模理论、方法与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [20] Zhong Y G, Xue K, Zhan Y. Modeling and analysis of panel hull block assembly system through timed colored Petri net [J]. Marine Structures (S0951-8339), 2011, 24(4): 570-580.
- [21] Aguiar M, Barreto R, Caldas R, *et al.* Modeling and analysis of flexible manufacture systems through hierarchical and colored Petri nets [C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. New York, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [22] Huang H Z, Zu X. Hierarchical timed colored Petri Nets based product development process modeling [J]. Lecture Notes in Computer Science (S0302-9743), 2005, 3168: 378-387.
- [23] Xiangyang Li, Qinhe Gao, Zhili Zhang, Xianxiang Huang. Collaborative Virtual Maintenance Training System of Complex Equipments based on Immersive Virtual Reality Environment [J]. Assembly Automation (S0144-5154), 2012, 32(1): 72-85.
- [24] Xiangyang Li, Zhili Zhang, Qinhe Gao, *et al.* Modeling of Task Establishment and Allocation for Collaborative Virtual Maintenance Training of Complex Equipment [J]. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology (S2040-7459), 2012, 4(20): 3989-3998.
- [25] Ha S, Suh H W. A timed colored Petri nets modeling for dynamic workflow in product development process [J]. Computers in Industry (S0166-3615), 2008, 59(2-3): 193-209.

(上接第 81 页)

并将此合成图像数据写入到指定的反射内存存储区域, 整个处理过程结束。

3 结论

本文研究了红外成像仿真中红外场景动态实时生成的重要技术问题, 详细阐述了高逼真度红外复杂场景动态实时生成技术的设计思想, 并给出了具体实现。高逼真度红外复杂场景动态实时生成技术可应用各类红外成像、射频/红外复合制导仿真系统中复杂红外场景的生成和模拟, 可以有效突破复杂环境仿真模型逼真度与实时生成相互制约的瓶颈问题, 大大提高仿真系统的模拟精度, 具有重要的实用价值和广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] 孙云, 李晓燕, 李敏. GPU 结合 OGRE 技术在红外场景仿真中的应用研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8): 1935-1939.
- [2] 王艳奎, 郑强. 红外场景实时生成驱动算法及应用研究 [J]. 红外, 2014, 35(3): 17-22.
- [3] 张建, 张建奇, 邵晓鹏. 基于 Vega Prime 的红外场景生成技术在成像制导仿真系统中的应用 [J]. 红外技术, 2005, 27(2): 124-128.
- [4] 贾建科, 张麟兮, 郑春来. 基于 Vega 的场景红外成像仿真研究 [J]. 红外技术, 2006, 28(3): 174-177.
- [5] 苏德伦, 王仕成, 廖守义, 等. 基于 CIG 的动态红外图像实时生成系统 [J]. 红外技术, 2009, 31(9): 549-552.
- [6] 陆志洋, 王春财, 郭刚, 等. 红外成像仿真外部渲染方法研究 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(9): 206-209.