

文章编号: 1001- 2486(2010) 02- 0124- 06

基于随机服务资源管理对象的装备维修保障系统仿真建模*

李玲玮, 陈童, 郭波

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 装备维修保障系统 (EMSS) 是一类复杂的动态系统, 如何对其有效地仿真建模是一个问题。首先, 以“物理层—业务层”的两层分解方法详细地对 EMSS 进行分析。然后, 将一般的面向对象思想扩展为随机服务资源管理对象 (SSRMO) 来对 EMSS 物理层仿真建模。接着, 先给出了基于 UML 动态建模技术的 EMSS 业务建模方法, 然后将业务流程分解为每个 SSRMO 的业务规则来实现 EMSS 的业务流程模型。最后, 给出了一个全面的仿真实例并给出了详尽的仿真结果, 揭示了两层分析法的较完备性和 SSRMO 对物理资源和人为规则进行建模的可行性。

关键词: 装备维修保障系统; 仿真建模; 随机服务资源管理对象

中图分类号: TP319.9 文献标识码: A

Simulation Modeling for Equipment Maintenance Support System Based on Stochastic Service Resource Management Object

LI Ling-wei, CHEN Tong, GUO Bo

(College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Equipment Maintenance Support System (EMSS) is a class of complex dynamic system. How to effectively analyze and construct simulation model for EMSS is a problem. Firstly, a two-layers framework named “physical layer—operation layer” framework is presented to analyze the EMSS in detail. Secondly, the concept of Object is extended to Stochastic Service Resource Management Object (SSRMO) to model the physical layer of EMSS. Thirdly, a modeling approach based on UML dynamic modeling technique for the operation procedure of EMSS is presented and the operation procedure model is further decomposed into the operation rules of SSRMO. Finally, a detailed simulation experiment nearly including all the important aspects of EMSS is designed and conducted. The results have revealed the integrality of the two-layers analyzing method and the feasibility of SSRMO in modeling the physical resource and the artificial rules.

Key words: equipment maintenance support system; simulation modeling; stochastic service resource management object

装备维修保障系统 (Equipment Maintenance Support System, EMSS) 是一个离散事件动态系统, 它包含 EMSS 结构配置、装备任务、装备系统、维修活动、备件库存五大相互关联的要素。在 EMSS 中, 一方面, EMSS 的状态数随着参数的增加呈指数级增长而导致了复杂性, 另一方面, EMSS 的演化规律受随机参数影响而导致了动态性。所以, 基于解析方程的 EMSS 逼真建模很难并进而导致了 EMSS 的仿真研究。目前 EMSS 相关的仿真研究大致包括四个方面: 维修活动的仿真^[1-2]; 备件库存系统仿真^[3]; 装备任务仿真^[4]; 装备可靠性和维修性仿真^[5]。这些研究工作各自对所感兴趣的 EMSS 某个侧面建立了仿真模型, 可是在实际的 EMSS 中这四个方面的紧密关联的, 所以本文研究面向整个 EMSS 的仿真建模。

EMSS 的整体仿真建模在逻辑上需要考虑从物理层到业务层的全面兼容性; 在横向上需要包括多类装备任务, 装备的金字塔型层次结构和“维修—备件库存”系统的多级结构。为了满足这两个基本需要, 本文采用了面向对象 (Object Oriented, OO) 的设计方法, 最近, OO 的思想还被 Manuel 等成功应用在和 EMSS 类似的多级库存供应链系统的仿真建模中^[6]。

* 收稿日期: 2009- 10- 21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70501031)

作者简介: 李玲玮 (1982—), 男, 博士生。

1 装备维修保障系统分析

EMSS 是一个物理实在的且在人工规则控制下的系统。因此, 本节以一种“物理层—业务层”的两层方法对 EMSS 加以分析, 最后列一个 EMSS 的参数表来展现分析的成果。

1.1 EMSS 物理层分析

从基础设施结构看, EMSS 是包括多级基础设施、装备系统、维修人员与设备、备件供应系统等子系统的多级系统。以经典的三级保障体制为例, EMSS 最高层是基地级维修保障中心, 其下是 L 个能够执行某种任务的作战单元(Combat Unit, CU), CU 中有主管装备任务的作战部门和中继级装备维修保障部门, 后者包括维修组和备件库存。每个 CU 下有 N 个能够完成基本作战任务的基本作战单元(Basic Combat Unit, BCU), BCU 中有执行任务的装备(群)以及完成基层级维修保障任务的维修组和备件库存。

EMSS 物理层具有明显的面向服务性和随机性: (1) 如果将任务、故障和备件需求看成顾客, 则可将装备、维修台和备件库存当成服务台; (2) EMSS 中装备系统的劣化失效、备件到达、任务到达以及维修时间等因素都是随机的。总之, EMSS 物理层是一个由多种服务节点连接而成的随机服务网络系统, 又可简称为排队网络。

1.2 EMSS 业务层分析

EMSS 业务层实质上是 EMSS 之中的“软件”, 它是由各种业务流程组成的, 而业务流程又可以分为各种基本业务活动。因为 EMSS 的保障目的是装备任务, 保障方式是维修, 关键维修资源是维修台和备件, 所以不妨将 EMSS 的基本业务活动分成三类, 分别是装备任务管理活动、维修管理活动和备件管理活动。

EMSS 业务规则是生成 EMSS 业务活动和业务流程的根本因素。EMSS 业务规则是各种对象根据当前的状态采取适当的业务活动的映射规则, 包括任务管理规则、维修管理规则和备件库存管理规则。业务规则和随机环境的交互影响形成了各种复杂的 EMSS 业务流程。

1.3 影响 EMSS 性能的一些重要参数表

以下按 5 个类别简要列举影响 EMSS 性能的一些重要参数。EMSS 参数可以分为可控的设计参数和不可控的环境参数。其中设计参数可以分为一次性设定的配置参数和长期控制系统运行的业务规则; 环境参数可以分为确定参数和随机参数, 如表 1 所示。

表 1 EMSS 参数表

Tab. 1 The parameters of EMSS

EMSS 要素	要素子类	参数名称	参数类型	EMSS 要素	要素子类	参数名称	参数类型		
装备任务	计划任务	任务需求	确定参数	维修活动	维修组配置	人员技能配置	配置参数		
		任务调度策略	业务规则			维修设备配置	配置参数		
	随机任务	任务能力需求	随机参数		维修策略	预防性维修策略	业务规则		
		任务准备时间	随机参数			修复性维修策略	业务规则		
装备系统	可靠性	任务长度和强度	随机参数	EMSS 结构	装备配置	配置数量	配置参数		
		任务调度策略	业务规则			地理配置	节点距离等	配置参数	
		维修性	可靠性结构		配置参数		备件库存	备件属性	备件供给规律
			失效过程		随机参数	备件价格			随机参数
	维修性	维修时间分布	随机参数	库存策略	定时订货策略	业务规则			
		维修步骤	配置参数		临界订货策略	业务规则			
			维修资源需求	配置参数					

2 基于 SSRMO 的 EMSS 仿真建模

本节将进行基于 SSRMO 的 EMSS 仿真模型的综合设计。

2.1 EMSS 仿真模型的总体结构和物理层设计

从第1节的分析已知 EMSS 物理基础设施是一种三层体系结构, 所以对应地要设计一种基于三级 SSRMO 的 EMSS 仿真模型, 其总体框架如图 1 所示。

为了有效地对 EMSS 物理层的关联服务资源进行建模, 需要在对象的设计上对队列、服务台、队列管理和规则等通用数据结构和算法进行统一封装, 这是随机服务资源管理对象 (Stochastic Service Resource Management Object, SSRMO) 得名的根本原因。每个 SSRMO 的结构包括队列实体和服务台实体, 而方法则包括三种响应函数: 状态响应函数、消息响应函数和事件响应函数。以 BCU 的 SSRMO 建模为例, 可分成“BCU 备件 SSRMO”、“BCU 任务 SSRMO”和“BCU 维修 SSRMO”三个对象, 如图 2 所示。

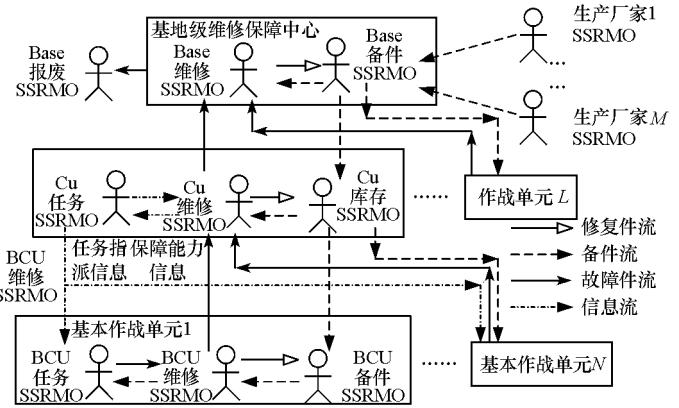


图 1 EMSS 的三级 SSRMO 仿真模型总体结构

Fig. 1 The the three layer SSRMO simulation modeling architecture for EMSS

以 BCU 的 SSRMO 建模为例, 可分成“BCU 备件 SSRMO”、“BCU 任务 SSRMO”和“BCU 维修 SSRMO”三个对象, 如图 2 所示。

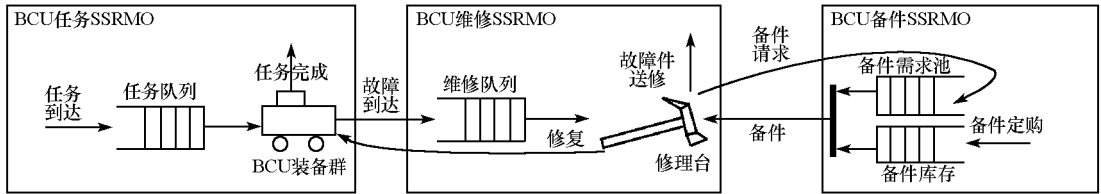


图 2 基于 SSRMO 的 BCU 物理资源设计

Fig. 2 BCU physical resource design based on SSRMO

2.2 EMSS 仿真模型的业务层设计

SSRMO 仿真模型通过各个 SSRMO 根据业务规则不断交互执行基本业务活动来完成 EMSS 中的业务流程。所以, 基于 SSRMO 的 EMSS 仿真建模要先解决业务流程建模的问题, 再解决将业务流程设计成每个 SSRMO 业务规则的问题。以下分别提出这两个问题的解决方案。

2.2.1 基于 UML 动态图的业务过程建模

UML 系列模型是面向对象分析与设计的标准模型, 本文借助 UML 动态建模技术来解决业务流程建模的问题。UML 动态建模包括状态图、活动图、顺序图和协作图的建模。图 3 以一个可中断任务到达空闲 BCU 引发的业务流程为例, 说明 UML 中活动图建模方法。

2.2.2 SSRMO 的业务规则设计

SSRMO 业务规则设计体现为将业务流程模型中蕴含的 SSRMO 业务规则设计成各个 SSRMO 的处理函数。

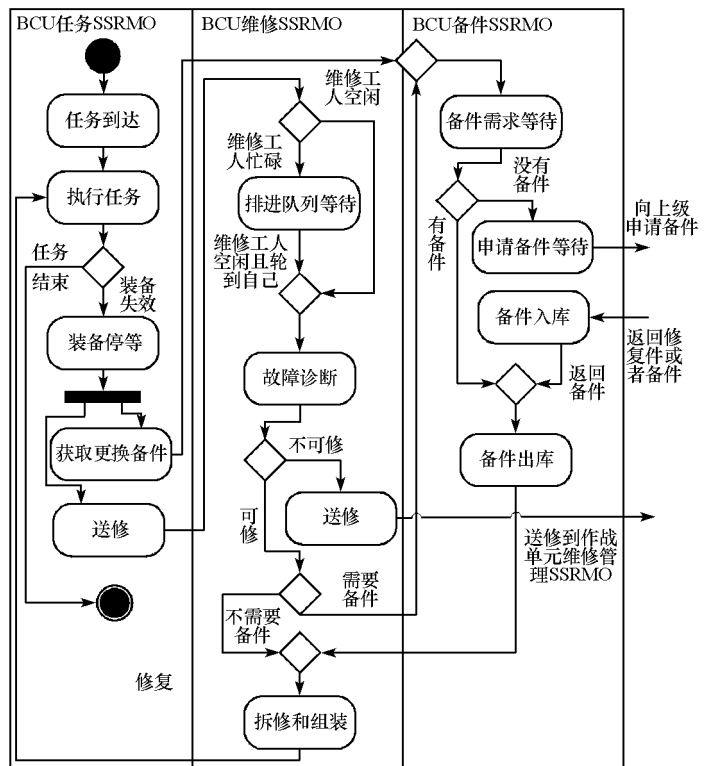


图 3 一个任务到达空闲 BCU 引发业务流程的活动图模型

Fig. 3 The activity chart model for a operation procedure when a mission arrives idle BCU

SSRMO 处理函数是从 SSRMO 的触发

事件、通知消息、自身状态、其他对象状态和环境状态到该 SSRMO 所能够采取的活动的, 具有“IFconditionTHENaction”形式的映射规则函数。SSRMO 处理函数包括: 被动式的事件响应函数(Event Handling Function, EHF) 和消息响应函数(Message Handling Function, MHF); 主动式的状态响应函数(State Handling Function, SHF) 和基于黑板模型的 SSRMO 协作机制。

(1) SSRMO 的 EHF 和 MHF 的提取

SSRMO 被动响应函数分成 EHF 和 MHF 两种, 要根据它们的特点来提取。EHF 是 EMSS 中发生在此后某个时刻的处理函数, 大多用在业务流程中处理故障件流转和备件流转等具有延时的事件上。而 MHF 是发生在当前时刻的业务处理函数, 大多数用在业务流程中处理可以瞬时到达的通知消息。比如, 从图 3 可以分析出: BCU 备件 SSRMO 至少需要有处理“备件需求到达消息”的 MHF 和处理“上级下发备件运到事件”的 EHF。

(2) 基于“State—Action”映射的 SSRMO 状态响应函数

有一些业务规则还要求 SSRMO 主动地监控一些关键的自身或者其他 SSRMO 的状态, 当满足特定条件时采取对应的活动。具备上述特点的业务规则应该设计成 SHF。例如: 从图 3 可以发现, BCU 维修 SSRMO 在“有新故障到达”且“维修台忙碌”两个状态同时成立时就采取“排队队列等待”活动。根据该业务规则设计出的响应函数就是对应的 SHF。

(3) 基于黑板模型的 SSRMO 共享与协作机制

基于 SSRMO 的仿真建模在通过对象分解来减少复杂性的同时也造成了状态信息和活动的分割, 从而减弱了 EMSS 业务规则的建模能力。所以, 本文采用黑板模型来将多个需要协作的 SSRMO 分布式信息集中, 然后各个 SSRMO 能根据黑板信息来相互协作以设计更复杂的响应函数。以 BCU 为例, 当建立信息共享黑板后, 可设计以下响应函数: 若 BCU 任务 SSRMO“任务量大于 5”且 BCU 维修 SSRMO“维修队列长于 4”, 则 BCU 任务 SSRMO“将新到达任务调整给其他 BCU”和 BCU 备件 SSRMO“发起备件请领”。

3 仿真实例

本节将基于本文提出的 SSRMO 方法来设计和实现一个 EMSS 案例的仿真模型。下边将给出 EMSS 案例的各种参数设置和仿真运行的结果及分析。

3.1 EMSS 配置结构

假设维修基地下有 3 个作战单元(CU), 每个 CU 下有 3 个基本作战单元(BCU), 每个 BCU 中有 3 台互异的装备。BCU 到 CU 的运输时间为 30 个时间单位, CU 到维修基地的运输时间设为 70 个时间单位。

3.2 装备的 R&M 特性参数

现假设所有的装备都是两层结构, 所有的部件的可靠性逻辑关系都是串联。三种装备的结构信息见表 2, 表中的 LRU 和 SRU 分别是现场可更换单元(Line Repairable Unit) 和车间可更换单元(Shop Repairable Unit) 的简称。

表 2 装备结构信息表
Tab. 2 The equipment structure information

装备	LRU	SRU	装备	LRU	SRU	装备	LRU	SRU	装备	LRU	SRU
	LRU11	SRU11 SRU12		LRU21	SRU21 SRU22		LRU31	SRU31 SRU32			SRU37
装备 1	LRU12	SRU13 SRU14	装备 2	LRU22	SRU23 SRU24	装备 3	LRU32	SRU33 SRU34	装备 3	LRU34	—————
	LRU13	SRU15 SRU16		LRU23	SRU25 SRU26		LRU33	SRU35 SRU36			SRU38

设装备故障可以归结为 LRU 的故障, LRU 的故障有两类, 一类可修故障是由更底层的 SRU 故障引

起,可以通过更换 SRU 修复,设所有 SRU 的故障时间都服从参数为 0.001 的指数分布;另一类是不可修故障,设每种 LRU 都有 0.1 的概率不可修而需要报废。

表3给出了每种 LRU 维修所需的维修资源。假设维修资源 R1 的维修时间服从参数为 $(0.2, 1, 4)$ 的三角分布,而其他维修资源的维修时间都服从参数为 $(0.5, 1, 4)$ 的三角分布。取三角分布的原因是为了避免常规的正态分布的概率密度函数两边无限延伸的缺点,该缺点会导致维修时间出现负值。另外,三角分布还能够描述实际中经常出现的非对称单峰分布。

表3 装备维修性信息表

Tab.3 The equipment maintainability information

部件	维修资源	部件	维修资源	部件	维修资源	维修资源	部件	维修资源	部件
LRU11	R1	LRU12	R1	LRU13	R3	LRU31	R2	LRU32	R3
LRU21	R1	LRU22	R2	LRU23	R4	LRU33	R4	LRU34	R3

3.3 维修组配置和维修策略与流程

本文的仿真模型中,维修基地配置 R3 和 R4 各 1 个;每个 CU 中配置 R1 和 R2 各 1 个。在维修活动上只考虑修复性维修,其流程是:①LRU 的更换可以在 BCU 进行,SRU 的更换只能用特定的维修资源来完成。②在各级,如果有备件则立即更换,否则按照各自的策略获取备件。③在各级,如果可修则进入待修队列,否则将故障件送修到上级。④修复后,修复件成为本级备件库存的备件。⑤在各个维修台前,维修策略是先到先修。

3.4 备件特性参数和备件库存策略

EMSS 的备件子系统参数包括备件的特性参数和备件库存策略两方面:(1)备件特性参数包括“备件购买延时”和“备件价格”等,不妨假设所有的 LRU 备件的价格都是 20,所有的 SRU 备件的价格都是 5,基地库存购买所有备件的到货延时服从参数为 $(200, 360, 400)$ 的三角分布。(2)备件库存策略是:①各级存储的备件种类由本级的维修需求和下级的备件需求决定:在 BCU 只有 LRU 备件,在 CU 有 LRU 和本级维修所需的 SRU(简称为 CU_SRU)备件,而在维修基地则有下级所需的 LRU 备件, CU_SRU 备件,和本级维修所特需的 SRU(简称为 MB_SRU)备件;②各级库存对上次订购之后的各种新到备件请求量做统计,当达到门限时进行请领/购买。假设 BCU 门限是 1, CU 门限是 3,维修基地的门限是 6。

3.5 任务特性参数

任务特性参数包括任务的到达间隔分布,任务持续时间分布和任务的可中断性。本例假设有两类任务:第一类是计划任务,它每隔 10 个单位时间执行一次,每次执行 5 个单位时间;第二类是随机任务,它的到达间隔时间服从参数为 0.01 的指数分布,任务执行时间服从参数为 0.1 的指数分布。

3.6 仿真结果与分析

按照以上给出的 EMSS 信息,本文基于 SSRMO 方法建立了 EMSS 模型,然后用 VC++ 6.0 将其编程实现。并在 P4, 3.06GHz 的 CPU, 512MB 内存的微机上进行了一次时钟长度为 100 000 的仿真,实际耗时 56s,表 4 给出了这次仿真统计出的 EMSS 性能指标。

至此可以得出两个方面的结论:(1)从本文案例贴近实际的特点可以看出基于 SSRMO 的仿真建模方法的可行性;(2)从表 4 可以看出基于 SSRMO 仿真模型对 EMSS 设计方案进行评价的可行性。例如,从表 4 可以得到以下结论:①R1, R2, R3 和 R4 这 4 种资源基本上处于空闲的状态,所以可以考虑减少它们的配置数量;②BCU 的可用度和 LRU 备件满足率能够保持比较高的水平,但是 BCU 的任务队列长度却有可能非常长,这是由于 BCU 之间任务动态分配的机制没有引进,当随机任务较多或者 BCU 出现偶然故障就造成很多任务等待的缘故,所以要考虑加入任务动态调度的机制来避免等待。

4 结论

本文提出了基于随机服务资源管理对象(SSRMO)的装备维修保障系统(EMSS)仿真建模方法。通过仿真实例表明该方法的优点是:(1)物理要素全面:针对EMSS的两层分析方法兼顾了EMSS的“硬件”和“软件”;(2)简明性:基于SSRMO的建模方法可以通过对物理实体,信息和流程的分解来减少EMSS建模的复杂性;(3)业务建模能力全面:事件响应,消息响应和状态响应的三大设计模式包括了驱动业务流程的主被动方式以及EMSS业务流转的物流和信息流;(4)扩展能力强:引进黑板机制和协作解决EMSS分解建模后带来的系统状态信息与业务活动分割的问题,保留了更灵活的业务规则的实现潜力。

表4 一些重要性能指标的仿真结果

Tab. 4 Simulation results of some important performance measures

统计对象	指标	仿真结果	统计对象	指标	仿真结果
BCU	可用度	0.98454	CU	R1 维修队长 Q 的分布	$P\{Q=0\}=0.980263$, $P\{Q=1\}=0.019513$, $P\{Q=2\}=0.000224$
BCU	LRU 备件满足率	0.96552	CU	R2 维修队长 X 的分布	$P\{X=0\}=0.986551$, $P\{X=1\}=0.013258$, $P\{X=2\}=0.000192$
		$P\{L=0\}=0.384932$, $P\{L=1\}=0.446032$, $P\{L=2\}=0.076586$, $P\{L=3\}=0.039374$, $P\{L=4\}=0.021063$, $P\{L=5\}=0.010270$, $P\{L=6\}=0.006331$, $P\{L=7\}=0.004746$, $P\{L=8\}=0.003766$, $P\{L=9\}=0.002521$, $P\{L=10\}=0.002023$, $P\{L=11\}=0.001340$, $P\{L=12\}=0.000730$, $P\{L=13\}=0.000240$, $P\{L=14\}=0.000046$	维修基地	R3 维修队长 Y 的分布	$P\{Y=0\}=0.942356$, $P\{Y=1\}=0.054913$, $P\{Y=2\}=0.002622$, $P\{Y=3\}=0.000108$, $P\{Y=4\}=0.000001$
BCU	BCU 的任务队长 L 的分布		维修基地	R4 维修队长 Z 的分布	$P\{Z=0\}=0.959482$, $P\{Z=1\}=0.039163$, $P\{Z=2\}=0.001311$, $P\{Z=3\}=0.000045$
			维修基地	备件成本	69715

参考文献:

- [1] Barata J, Soares C G, Marseguerra M, et al. Simulation Modeling of Repairable Multi-component Deteriorating Systems for “on Condition” Maintenance Optimization [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2002, 76: 255–264.
- [2] 尹晓虎, 温照森, 钱彦岭, 等. 复杂维修系统的动力学行为仿真[J]. 兵工学报, 2008, 29(5): 588–591.
- [3] 杨宇航, 赵建民, 李志忠, 等. 备件管理系统仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(5): 981–987.
- [4] 聂成龙, 张柳, 于永利, 等. 多阶段任务系统任务持续能力仿真模型研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 729–733.
- [5] 杨宇航, 冯允成. 复杂可修系统可靠性维修性综合仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(8): 978–983.
- [6] Rossetti M D, Miman M, Varghse V, et al. An Object-oriented Framework for Simulating Multi-echelon Inventory Systems[C]//Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, 2006: 1452–1461.