

# 装备保障体系建模与仿真关键技术研究

邢彪<sup>1</sup>, 宋太亮<sup>2</sup>, 曹军海<sup>1</sup>

(1. 装甲兵工程学院 技保系, 北京 100072; 2. 中国国防科技信息中心, 北京 100072)

**摘要:** 为解决装甲装备体系保障能力生成的关键技术难题, 针对现有需求和装备保障体系仿真中心建设的实际情况, 以装甲机械化部队为主要研究对象, 论文主要研究内容包括: 描述了装备保障体系概念, 构建了装备保障体系结构框架; 总结了适合装备保障体系的建模与仿真方法, 采用分层建模、基于多 Agent 和基于 UML 的体系建模方法, 建立了装备保障体系模型, 并对模型进行了仿真; 借鉴霍尔三维结构, 建立了装备保障体系评估对象维、评估指标维和评估目标维, 进行装备保障体系效能评估; 通过研究, 初步明确了装备保障体系的内涵, 明确了适合装备保障体系的建模与仿真方法, 具备一定的实用性和可操作性, 能够为进一步推进装备保障体制改革、完善综合保障体系、创新保障模式、增强综合保障能力提供有力的理论支撑。

**关键词:** 装备保障体系; 建模仿真; 评估

## Research on Key Techniques of Modeling and Simulation for the Equipment Support System of Systems

Xing Biao<sup>1</sup>, Song Tailiang<sup>2</sup>, Cao Junhai<sup>1</sup>

(1. Department of Technical Support Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China;

2. China Defense Science and Technology Information Center, Beijing 100072, China)

**Abstract:** In order to solve the generated problem of the system of systems support capability, and considering the actual requirement and the existing situation of the Equipment Support System of Systems Simulation Center, the article makes its main research on the armed and mechanized units, including the follows: describe the concept of the equipment support system of systems, construct the framework of the equipment support system of systems; summarize the modeling and simulation methods which match the equipment support system of systems, and use the hierarchical modeling, multi-agent based and UML based methods to set up the equipment support system of systems model; run the simulation model of the equipment support system of systems; assess the effectiveness of the equipment support system of systems according to the appraisal target dimension, evaluation Index dimension and assessment target dimension from referencing the Hall three-dimensional structure. Finally we can promote the support security system, improve the logistical support system, innovative the support model and enhanced the logistical support capability.

**Keywords:** equipment support system of systems; modeling and simulation; assessment

## 0 引言

历次战争结果表明, 对战争胜负起决定作用的主要因素, 除了武器装备的各战术技术性能之外, 还包括装备的保障性能<sup>[1]</sup>。随着我军装备信息化的不断发展, 武器装备的高新技术水平不断提升, 各武器装备之间的联系也日益紧密, 军事力量建设发展的体系化特征日益明显。由此, 传统的平台式的对抗正在向以信息化为基础的体系间的对抗发展。《2015 年中国国防白皮书》<sup>[2]</sup>中关于中国“军事力量建设发展”章节均添加了: “增强综合保障能力”、“创新保障模式”、“发展新型保障手段”等内容; 并且针对国家未来军事斗争准备, 要求“着力解决体系作战能力的突出矛盾和问题”、“增强基于信息系统的体系作战能力”、“完善综合保障体系”等。可见, 武器装备的保障能力是我军战斗力的必要组成部分和重点发展方向, 同时武器装备能否形成体系保障能力,

也将是未来装备保障领域的研究重点。

## 1 研究需求

目前我军装备保障研究, 尤其是陆军装备保障研究, 存在以下事实:

1) 随着“两成两立”建设的发展, 为提高部队整体作战能力, 打赢信息化战争, 有效避免资源浪费, 部队武器装备体系正在向合成、集成方向发展, 并力争建成结构合理、功能完善、系统配套、适应一体化联合作战的装备保障体系, 形成体系保障能力。

2) 在全军范围内, 目前已经建立了“5+1”的装备体系仿真国防重点实验室, 针对信息化条件下的武器装备体系作战能力进行仿真研究。在装备及装备体系的研究过程中, 如何评估装备体系、如何优化装备体系的保障方案和保障资源配置, 促进装备体系保障能力的生成, 因此开展装备保障体系研究将会是对武器装备体系<sup>[3-5]</sup>研究的重要补充。

3) 装备保障体系研究的复杂性, 需要建模仿真技术的支持。装备保障体系是服务于军队装备体系的开放的复杂大系统, 其在要素构成、内外部关系、工作机制、业务流程、行为活动等方面具有复杂大系统的特征, 这就要求对装备保障体系的研究必须采用理论分析与仿真试验相结合的研究方法。

收稿日期: 2015-10-26; 修回日期: 2015-11-18。

基金项目: 国防项目(装司 2011[967]号)。

作者简介: 邢彪(1988-), 男, 河北石家庄人, 博士研究生, 主要从事装备保障方向的研究。

宋太亮(1962-), 男, 山东济宁人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事装备保障方向的研究。

因此, 拟针对装备保障体系建模与仿真的关键技术进行研究, 描述装备保障体系的组成, 构建装备保障体系概念模型框架, 提出装备保障体系仿真的技术方案, 从体系角度提出全面而科学的装备保障体系评估模型, 并对装备保障体系效能从指标维、目标维、对象维 3 个方面进行评估。

## 2 装备保障体系内涵

### 2.1 装备保障体系概念

装备保障体系是具有明确使命和任务的复杂军事系统, 其根本使命是保证和保持军事作战体系中的装备体系执行作战和训练任务的能力。在本文中装备保障体系, 是指为了满足不同保障任务需求, 由具有一定功能和相互联系的各级各类装备保障系统, 按照装备保障规律和保障原则综合集成的有机整体。其结构组成复杂: 在纵向层级上有总部、军区、军、师旅、营、连的各级指挥和保障机构, 在横向组成上有大量的装备、人员、器材、设施等实体, 并通过各种保障业务活动交叉、组合、集成为一个整体。

### 2.2 装备保障体系结构框架

根据 IEEE 标准 (STD1471-2000), 体系的结构框架是指体系中各组成系统的基础构成、各系统组成部分之间、系统与环境之间的交互关系, 以及指导系统设计和演化的规则。体系结构框架是一种工具, 能够提供体系的结构构建、分类和组织的指导原则。美国国防部体系结构框架 (DoDAF), 为美国国防工业提供标准和建设的指导。体系结构框架通常包含两个组成部分: 数据层和描述层。具体到装备保障体系, 数据层包含装备保障体系中所有的数据要素实体以及对应的数据要素属性, 从装备、人员、资源 3 个大方面划分, 主要包括: 零件; 组件; 备件; 装备; 保障装备; 人员; 机组; 使用部 (分) 队; 工具; 资源; 工作区; 设施; 维修保障机构; 供应保障机构等。

以零件为例, 其定义为: 构成装备系统物理结构或功能结构的最小独立工作单元。其属性包括: ID, 名称, 型号, 类型, 修理属性 (可修或不可修), 器材编码, 尺寸 (长宽高), 重量, 包装尺寸 (长宽高), 使用寿命, 成本, 修理级别, 故障模式列表 (名称, 概率), 故障分布类型及分布参数, 位置 ( $x, y, z$ ), 状态, 维修工时。

装备保障体系中描述层主要是通过图形、表格和文本的描述, 对装备保障体系进行形象化、可视化的描述。对装备保障体系数据要素关联关系的描述主要包括: 活动、关系、活动网络、关系网络、事件等。

以活动为例, 其定义为: 表达在一定的资源占用和消耗条件下, 实体所开展的最小活动项目的抽象实体。其属性包括: ID, 名称, 进度, 资源列表, 工作时间, 工作结果 (成功, 失败, 中止)。

## 3 装备保障体系建模与仿真

论文研究重点为: 建立系统的面向 Agent 的装备保障体系概念建模框架, 明确装备保障体系的概念建模流程, 解决 Agent 保障行为的概念描述方法等关键技术问题, 并提出装备保障体系仿真的技术方案。

### 3.1 装备保障体系建模

#### 3.1.1 分层建模

首先针对装备保障体系多维度、不同层级的组成结构, 采

用“分层一聚合、分块一集成”的组合建模方法对装备保障体系进行分层建模。现将装备保障体系分成若干复杂系统, 系统向下分为若干子系统, 对体系每一层次的活动按照组成实体的模拟大小、空间属性、时间属性、效能属性等合理地划分层次结构。这样能够大大降低对装备保障体系建模的技术难度, 能够使装备保障体系结构层次分明、容易检测、便于调整和后续修改。装备保障体系分层建模如图 1 所示。

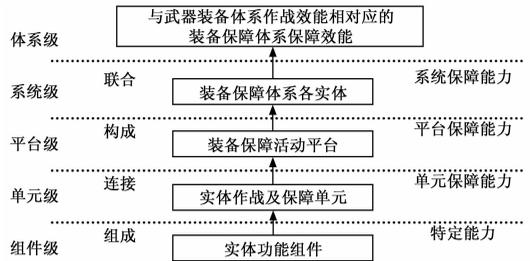


图 1 装备保障体系分层建模过程

#### 3.1.2 基于多 Agent 的装备保障体系建模

多主体 (Multi-agent systems, MAS) 建模兴起于 20 世纪 90 年代, 其理论基础是“涌现”。进行多主体建模的主要优点是, 即使主体的设计仅满足一些很简单的规则, 集体的行为也会由于主体的并发呈现复杂的模式。该方法适用于存在并发行为、非线性交互、无中央控制等的研究。多主体建模中的 Agent 一般认为具有: 主动性 (Pro-activeness), 自治性 (Autonomy) 和反应能力 (Reactivity)。进行装备保障体系的多主体建模与自顶向下的传统的建模方法不同, 首先要明确研究对象和研究目标, 定义单个的 Agent, 并对该主体进行参数和行为赋值, 然后对 Agent 与环境 and Agent 之间的交互原则进行规范, 最后模拟复杂系统的运行。多主体建模与传统计算机模型比较如表 1 所示。

表 1 传统计算机模型仿真和多主体建模的比较

研究方法	传统模型	多主体模型
是否决定性	确定性的	随机的
系统分析构造方式	自顶向下	自底向上
模型系统基本元素	基于方程	适应性主体
模拟结果对目标的意义	很难解释	有解释能力
系统参数数目	参数很少	参数很多
环境的角色	给定环境	产生环境
建模者与模型的关系	你可以作出反应	你可以从中学习

在装备保障体系层次建模的基础上, 对装备保障体系中各实体进行多 Agent 建模, 该 Agent 既可以指某型号装备, 也可以指装备的某一典型部件、零件, 同时更可以表示各保障人员、机关参谋等个体。每一个 Agent 均是按一定规则构成的局部细节模型, 拥有一定的知识和推理能力, 并按规定的交互规则组成体系的整体模型。装备保障体系多主体 (Multi-agent systems, MAS) 结构框架如图 2 所示。

#### 3.1.3 基于 UML 的体系过程建模

基于 UML 的体系过程建模方法, 是运用 UML 中“泳道”图来描述体系中交互。在复杂系统的建模中, 是将系统元素看作对象, 系统内或系统间的交互看作对象间的传递; 采用该方法描述体系, 则需在体系性能的测量指标上包含整个线程的完

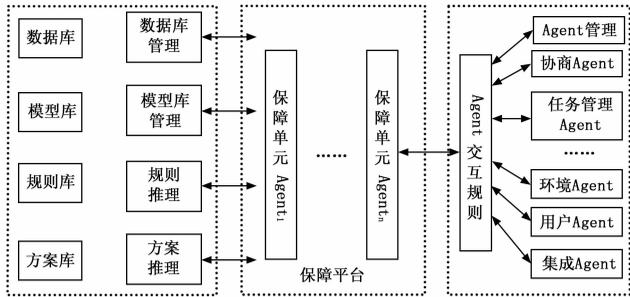


图 2 装备保障体系 MAS 结构框架

成时间。在确定体系分析的参数和参数层次的基础上，将体系的 UML 描述转换为可执行模型，并通过采用直角矩阵排列的方式来降低体系初始建模的难度，现该方法已应用于美国海军的远征作战体系。

因此，运用基于 UML 的体系过程建模方法，在装备保障体系 MAS 结构框架的基础上进行装备保障模型、子模型、元模型的开发和图形化建模工作，具体包括：装备任务剖面建模；装备动用任务建模；装备保障任务建模；装备零部件建模；装备建模；装备维修活动建模；人员建模；保障资源建模；装备使用机构建模；装备维修机构建模；装备器材供应机构建模；实体关系建模；实体基本行为建模；实体事件建模；实体交互建模；仿真环境建模等。

### 3.2 装备保障体系仿真

#### 3.2.1 装备保障体系中 Agent 状态

针对装备保障体系中大量交互的个体，拟对其行为 (Behavior)、动作 (Action)、约束 (Constraints)、序列 (Sequence) 和状态 (State) 等进行定义，建立单个 Agent 的行为模型，并通过这些个体之间的交互，涌现系统乃至体系的整体行为。在装备保障体系中以平台级的维修活动中的作战和保障单元 Agent 为例，仿真过程中各 Agent 状态转换如图 3 所示。

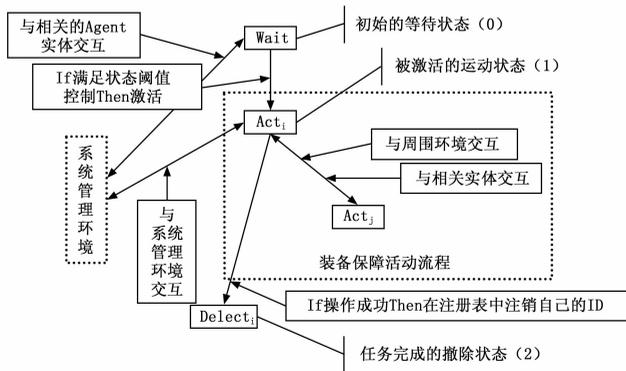


图 3 仿真过程中 Agent 状态转换图

#### 3.2.2 装备保障体系仿真方法

通过上述建立的 Agent 模型，针对体系中各组成系统、实体的相对独立性、彼此之间复杂的交互性和保障体系在宏观层次上的涌现特征，认为采用 ABMS 方法作为装备保障体系仿真的主要方法更为合适。同时针对装备保障体系中大量存在的保障活动流程 (如中修流程)、器材库存策略、装备年度动用计划制定等一定程度上可采用：排队论、随机库存系统、决策系统的离散事件系统仿真方法；针对不同装备保障体系仿真实

验室的不同仿真设备，可采用分布式仿真的方法。装备保障体系整体的仿真过程如图 4 所示。

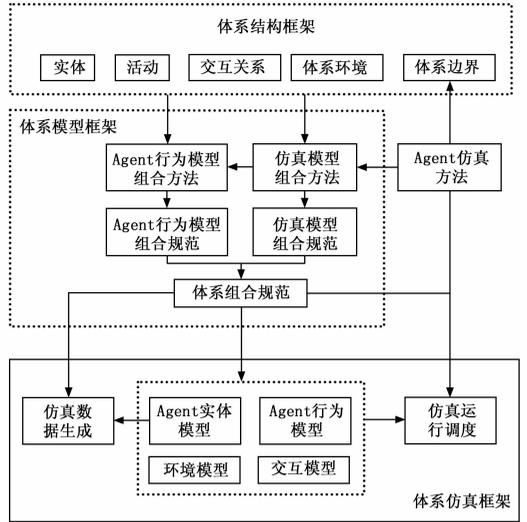


图 4 装备保障体系仿真过程

### 3.3 装备保障体系评估

综上，拟对装备保障体系进行体系保障效能评估方法研究，以装备保障体系的部队数据、仿真数据、推演验证数据为输入，从保障体系运行效果、成本、效率、能力等多维度，对装备保障体系效能进行综合建模，并发现制约装备保障体系效能的问题与瓶颈，为后续装备保障体系的优化分析打下基础。借鉴霍尔三维结构，初步拟建立评估对象维、评估指标维和评估目标维，构建装备保障体系的评估体系，对装备保障体系效能进行总体评估，其结构如图 5 所示。

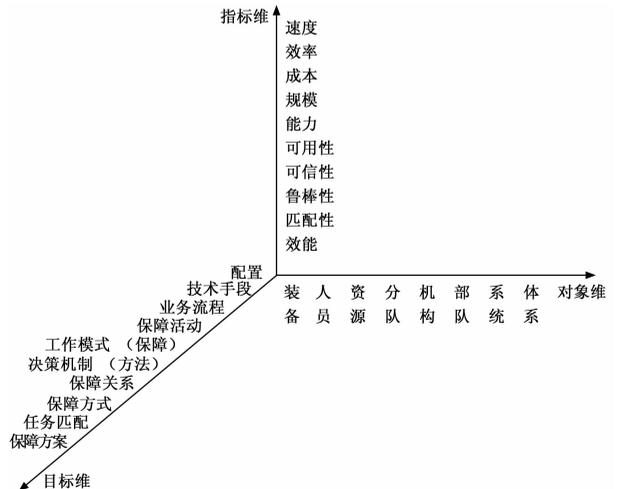


图 5 装备保障体系效能评估总体结构图

## 4 结论

目前，国内对于装备保障体系并没有一个统一规范认可的概念，对于装备保障体系的内涵界定也有广义、狭义之分，论文在构建装备保障体系结构框架的基础上，初步探索了一些适合装备保障体系的建模与仿真方法，并构建了三维体系效能评估结构，对于进一步明确装备保障体系与保障系统的区别、明确装备保障体系在体系方面的特征以及深入研究适合装备保障

体系的建模与仿真方法, 均有待继续深入研究。

参考文献:

[1] 宋太亮, 王岩磊, 方 颖. 装备大保障观总论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.  
 [2] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 2015 中国国防白皮书 [Z]. 北京: 新华社, 2015: 1-7.  
 [3] 胡晓峰, 张 斌. 体系复杂性与体系工程 [J]. 中国电子科学院院学报, 2011 (10): 446-450.  
 [4] 舒 宇, 谭跃进. 基于能力需求的武器装备体系结构描述方法研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2009, 23 (3): 51-55.  
 [5] 游光荣, 谭跃进. 论武器装备体系研究的需求 [J]. 军事运筹与系统工程, 2012, 26 (4): 15-18.

[6] 耿宏峰, 闫京海, 付海波. 基于 Multi-Agent 的 C4ISR 实体和对抗行为建模研究 [J]. 电子信息靶场, 2014, 24 (3): 37-40.  
 [7] Larry B. Rainey, Andreas Tolk. Modeling and simulation support for system of systems engineering application [M]. 2015.  
 [8] Bellifemine F, Greenwood D. Developing Muti-Agent system with JADE [M]. John Wiley & Sons Limited. 2013, 6.  
 [9] Mo Jamshidi. System of Systems Engineering (Innovations for the 21st Century). Wiley. 2013.  
 [10] 曹建军, 马海洲, 蒋德珑. 武器装备体系评估建模研究 [J]. 系统仿真学报, 2011, 27 (1): 37-42.  
 [11] 蒋德珑, 曹建军. 武器装备体系评估论证模型的构建研究 [J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28 (1): 47-51.

(上接第 97 页)

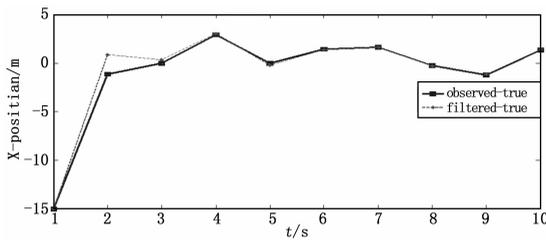


图 5  $X_E$  方向 (预测-真实) 与 (测量-真实) 轨迹

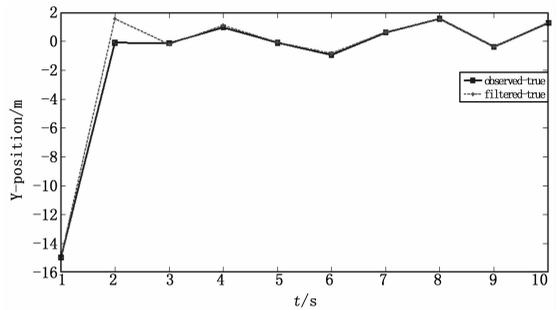


图 7  $Y_E$  方向 (预测-真实) 与 (测量-真实) 轨迹

线都逐渐趋于收敛, 且预测曲线偏差的离散程度更小, 即该预测算法模型具有良好的性能。

表 1  $X_E$  方向不同时间间隔两种偏差的协方差根值

$N(s)$	10	20	50	200
$rms(s-x)$	4.9292	3.4667	2.3775	1.3941
$rms(y-x)$	4.9321	3.4791	2.417	1.3948

同理, 假设飞机矢量中心在  $Y_E$  方向的卡尔曼预测器的初始系统状态向量是  $X(1) = [15 \ 0 \ -0.5]^T$ , 其他参数与  $X_E$  方向卡尔曼预测器一致, 则仿真结果如图 6、7 所示。

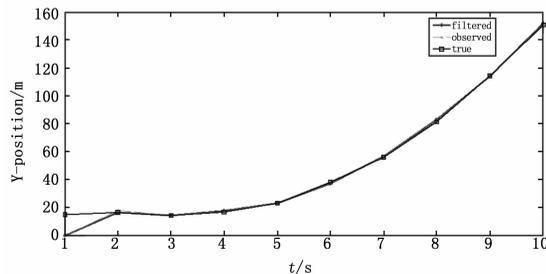


图 6  $Y_E$  方向位置预测

表 2  $Y_E$  方向不同时间段两种偏差的协方差根值

$N(s)$	10	20	50	200
$rms(s-x)$	4.811	3.4714	2.3198	1.4571
$rms(y-x)$	4.838	3.4926	2.3284	1.4625

以上结果表明, 根据载体飞机实际情况建立的算法模型并选取合适的卡尔曼预测器参数, 能够有效预测载体飞机的线运

动轨迹, 并作为姿态补偿算法的输入从而有效隔离载体对稳定跟踪的扰动。

4 结论

1) 针对机载天线捷联式稳定跟踪系统, 提出了隔离载体线运动及姿态扰动的融合算法。其核心在于, 通过卡尔曼预测提前补偿飞机线运动的位移变化, 并作为姿态补偿的输入与两个速率陀螺仪的反馈速度环共同构成姿态补偿算法。

2) 建立以飞机实际飞行情况为基础的状态空间模型, 并以该模型为仿真对象进行卡尔曼预测器的仿真模拟。结果表明卡尔曼预测器能及时预测载体下一秒的线运动位置, 且与真实值的偏差比观测值的偏差更收敛, 故将预测结果作为姿态补偿算法的输入能很好地隔离姿态扰动, 从而达到稳定跟踪的目的。

参考文献:

[1] 夏恩松, 王艳东. 基于速率陀螺反馈的位置跟踪系统仿真 [J]. 江南大学学报, 2006, 5 (4): 449-451, 471.  
 [2] 吴益飞. 机载天线跟踪系统设计及工程实现 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 11.  
 [3] 王俊凤, 雷 斌. 卡尔曼预测在自动跟踪云台中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2006, 25 (10): 53-55.  
 [4] 张嗣瀛, 高立群. 现代控制理论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
 [5] 徐晚成, 王 刚. 机载雷达坐标转换及数据处理的建模与仿真 [J]. 电子科技, 2012, 25 (6): 67-70.  
 [6] 李 果, 胡剑飞, 余达太. 移动卫星天线的自适应鲁棒控制系统 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24 (2): 307-310.