

多扰动下面向设计的导弹装备保障系统仿真

郭璐^{1,2}, 刘晓东¹

(1.空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 陕西 西安 710051; 2.江南机电设计研究所, 贵州 贵阳 550009)

摘要:针对导弹装备,尤其是新研装备或历史经验数据欠缺的装备,在设计阶段保障方案规划不合理的问题,提出了一种多扰动下面向设计的导弹装备保障系统仿真方法。构建了分层分块的混合递阶仿真框架,抽象出装备保障过程中的装备类、保障类、管理类、环境类智能体,并根据保障流程确定了这4类智能体的交互机制及信息传递链路。分析了影响装备保障决策的2类扰动,建立了装备故障扰动和人员失误扰动模型,采用双时钟机制实现仿真过程中的扰动注入,并根据装备维修保障流程及智能体状态跃迁过程建立了保障系统的恢复行为模型。选取了某型导弹装备开展实例仿真,将保障资源仿真结果与装备初始设计方案和装备实际需求情况进行对比,验证了仿真系统的正确性,为在设计阶段制定合理科学的装备保障方案提供了新思路。

关键词:导弹装备;保障;面向设计;扰动;仿真

中图分类号: E927

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2022)05-1116-09

导弹装备保障系统是一个包含预防性维修行为、修复性维修行为以及保障资源调配的复杂系统,具有功能组成复杂、作业流程复杂、资源种类及约束条件复杂等特点^[1]。随着导弹装备保障系统越来越精准化,根据实际工况确定其所需的约束及变量,并通过确定性分析方法来展现和优化其保障过程变得愈发困难,而仿真技术的出现可以处理这些复杂性问题^[2]。

近年来,国内外装备保障研究人员采用了多种建模方法来描述装备维修保障过程^[3],例如,很多学者采用的 Petri 网^[4]及其改进模型,高层次体系结构(high level architecture, HLA)模型^[5]等。但随着导弹装备综合保障系统仿真对颗粒度和智能性的要求不断提升,很多方式已经不能完全满足综合保障设计全方位的需求,尤其是在设计阶段因缺乏数据而无法构建有效模型。智能体(Agent)仿真建模技术逐渐成为综合保障仿真建模的新趋势^[6]。

Agent 仿真技术通过多个 Agent 间的交互、调度、合作、竞争来解决复杂系统,特别是大型复杂装备系统的建模与仿真^[7]。基于智能体的综合保障

系统建模仿真方法可根据具体需求,采用不同的方式进行灵活设计,可以在不同层面抽象智能体,确保合适的仿真颗粒度。每个智能体都具有智能性,将 Agent 技术应用在装备保障系统中具有很好的适应性。

目前,针对保障系统的建模与仿真研究大多是面向任务的,根据装备交付后的保障数据开展仿真,验证构建的保障模型是否与装备保障实际情况相符^[8],或者评估装备保障效果^[9]。少有针对装备保障设计阶段的建模与仿真。还有一些针对装备保障资源配置的研究^[10],但仍然存在一系列的问题,保障资源需求预测模型研究一般都是针对故障件到达情况、排队或等待策略等展开研究,然后应用各类新型算法进行优化计算,基本不考虑保障资源共用情况、保障资源自身的故障情况、预防性和修复性维修占用时间等对保障资源的影响。保障人员需求预测模型研究^[11]相对于保障设备和备件要少一些,其方法也相对简单,主要包括类比法、排队论法和仿真法。对于人本身的因素,包括专业、技能等级、操作与维修分工等考虑较少。

收稿日期: 2022-01-22

基金项目: 国家国防科技工业局重大基础科研(JCKY2017204A011)资助

作者简介: 郭璐(1991—),空军工程大学博士研究生,主要从事防空装备综合保障研究。

通信作者: 刘晓东(1966—),空军工程大学教授,主要从事军事装备研究。e-mail: xdlu6609@qq.com

本文提出了一种新的基于建模与仿真的保障方案设计方法,针对装备设计阶段开展保障规划,尤其是新研装备或历史经验数据不充分的装备的保障方案设计。本文在对导弹装备典型任务场景中的保障过程及评价指标分析的基础上,以 Agent 技术为依托,建立装备类、保障类、管理类、环境类 Agent,搭建装备保障系统仿真框架。分析出装备使用可用度受装备故障扰动和人员失误扰动影响,建立装备故障扰动模型、人员失误扰动模型、恢复行为模型,开展装备保障系统仿真。本方法基于导弹装备设计阶段确定的各类属性,根据装备实际情况建立准确的保障模型,最终由 4 类 Agent 共同协作完成保障决策。仿真结果可辅助生成综合保障方案,使装备在设计阶段开展保障方案规划,尤其是使质保期内的保障资源配置有了更科学的方法。

1 仿真总体架构

由于导弹装备在运行过程中的复杂性和动态性,其保障系统中的各组成部分会因各种扰动而降低装备使用可用度,严重时将无法实现装备的既定功能且无法完成任务计划。本文以扰动数据为驱动,从导弹装备系统中提取有效信息,在对数据进行处理的基础上,将其输入保障仿真模型中,根据决策机制,对出现故障的装备进行维修或重构,以恢复装备的战备完好性。

1.1 建模过程

基于 Agent 技术搭建导弹装备保障系统建模与仿真框架。基于 Agent 的框架将建模过程分为 2 个主要阶段:分析阶段与设计阶段。每个阶段又由一组具体的步骤组成。分析阶段由问题及目标定义、基于角色的任务分解、Agent 功能与状态描述、Agent 标识与多智能体系统(multi-agent system, MAS)架构定义以及确定系统环境条件 5 个步骤组成。同时,前 4 个步骤之间存在反复迭代关系,目的是获取满意的分析结果。设计阶段则包含建立 Agent 协同机制、定义 Agent 内部逻辑、定义环境 Agent 以及 Agent 实现与 MAS 组装 4 个步骤。按照这些步骤实施相应的建模活动即可建立导弹装备系统模型。其中,分析阶段的主要任务是从影响任务成功率的关键因素出发,确定导弹装备在完成过程中的相关行为,以及建模必须考虑的环境条件。需定义 Agent 的类型与数量及扮演的角色及主要行为。该阶段的

最终输出是 MAS 架构、Agent 的属性和功能行为以及环境条件分析列表。设计阶段的主要任务是根据导弹装备系统中各种行为,设计 Agent 在任务中的各项行为,建立 Agent 间的协同机制与 Agent 内部的推理逻辑,并在通过一致性检查后编码实现。完成 MAS 环境模型的构建,构建环境 Agent,其他 Agent 通过与其交互获取环境信息。

1.2 Agent 类型

基于以上建模框架及导弹装备实际需求,将装备保障系统及其运行过程抽象为装备类、保障类、管理类和环境类 4 类 Agent。

装备类 Agent 是对指挥控制车、天线收发车、导弹发射车、电源配电车、运输装填车等各类装备的抽象。使用描述参数、时空参数、物理参数及能力参数来描述装备类 Agent 的属性。

保障类 Agent 是对保障人员、保障设备、保障设施以及保障物资的抽象,使用描述参数、时空参数、保障资源参数及保障能力参数来描述保障类 Agent 的属性。

管理类 Agent 为虚拟 Agent,来源于装备保障系统运行过程中的指挥管理过程,是对任务和逻辑的抽象。其属性仅包括描述参数。根据功能差别将管理类 Agent 分为状态监控 Agent、计算决策 Agent 及管理控制 Agent。管理类 Agent 包括任务驱动类型、数据驱动类型。任务驱动类型是当系统输入新的任务时,管理类 Agent 根据任务进行信息处理和信号下发,控制装备类 Agent 和保障类 Agent 完成任务;数据驱动类型是当装备出现故障时,管理类 Agent 采集数据并进行决策分析,根据装备状态变化做出控制调整措施,保障装备正常工作。

环境类 Agent 是对自然环境、诱发条件、力学环境及攻击目标等的抽象。其参数主要包括:时间参数,如太阳辐射时间等;状态参数,如温度、气压、湿度等。环境类会影响其他 Agent 的能力。

1.3 交互机制

管理类 Agent 处于最高层次,管理各 Agent 交互过程,保证交互的顺利进行;保障类 Agent 协同装备类 Agent,完成保障工作;环境类 Agent 对各 Agent 交互产生扰动。全局调度由管理类 Agent 负责,当管理类 Agent 收到装备类 Agent 发出的故障情况通知时进行整体协调控制,以生成总体维修策略,对保障资源进行全局优化配置。局部调度发生在装备类 Agent 和保障类 Agent 之间,侧重于具体维修作业的

实现过程。同时,在装备类 Agent 之间、保障类 Agent 之间还存在着复杂的竞争或合作的关系。各类 Agent 的交互机制如图 1 所示。

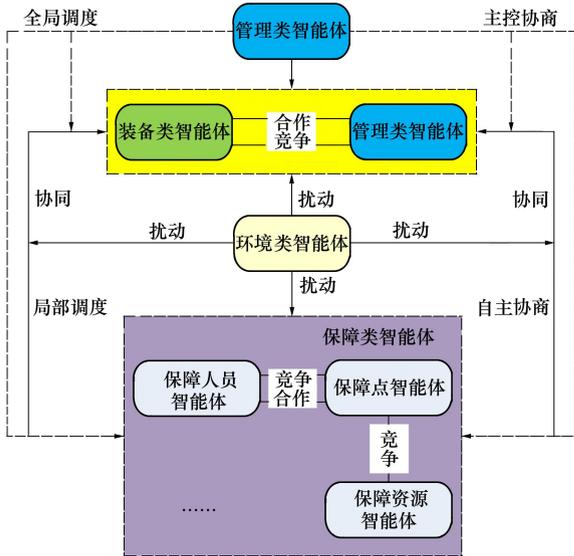


图 1 Agent 的交互框架

1.4 仿真框架

由管理类 Agent 在顶层负责全局主控协同。装备类、保障类和环境类 Agent 处于下一层次,可通过局部自主协同完成具体任务。同时,可按照各类 Agent 影响范围对装备类和保障类 Agent 进行分块管理。此外,考虑到需要基于多 Agent 模型获取优化控制策略,当破坏发生时,优先通过装备类和保障类 Agent 的局部协同进行恢复,仅当局部协同无法满足需求时,由管理类 Agent 进行系统重构,即任务的再分配。构建的分层分块的混合递阶仿真框架如图 2 所示。基于此分层协同运行框架,在局部自主协同的基础上,通过设定 Agent 间既定的逻辑规则来实现 Agent 间信息的实时传递。

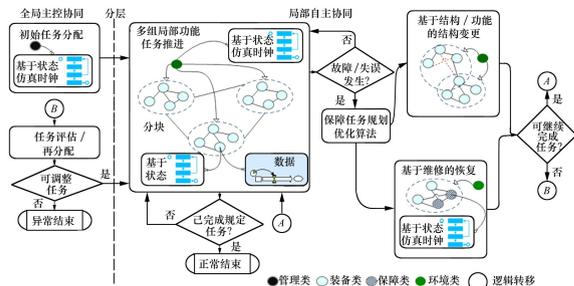


图 2 保障系统仿真框架

2 装备扰动模型

在导弹装备全寿命周期过程中,会不断出现多种扰动进而影响装备的任务执行,降低装备战备完好性。大部分的扰动是由于不可控制因素导致的,从扰动来源分析可将系统的扰动分成 2 类,分别是装备故障扰动和人员失误扰动。装备故障扰动是发生最多的扰动,装备故障的发生与装备自身结构组成、故障率水平以及装备使用过程中有着密切的关系。装备在使用过程中存在着大量的人员和装备交互的过程,如使用人员密集操作装备,保障人员定期开展预防性维修等,在这些过程中会由于各种因素,如身体状态、心理因素、极端的环境条件等导致人员发生失误从而影响装备的正常运行。所以准确描述人员失误可以提高模型的准确度,对装备保障规划有着重要作用。保障系统中出现各种扰动属于离散事件,如何设计合理的扰动触发方式对于保障系统模型后续的仿真运行十分关键,下面是 2 类扰动在模型运行过程中的建模方案。

2.1 装备故障扰动模型

装备的故障扰动可以建立在“武器系统——分系统(整车)——设备(组合)——现场可更换单元(line replaceable unit,LRU)——...”不同的层次上,由于故障建立的层次越低故障建立过程越复杂,本文故障注入的层次不超过 LRU 层。使用 Agent 的方法研究装备保障系统,需要采用仿真方式进行。因为在模型仿真过程中装备的故障发生属于离散事件而不能直接嵌入到 Agent 的正常仿真时钟,所以本文提出采用双时钟机制来实现正常仿真过程中的故障注入。双时钟机制示意如图 3 所示。

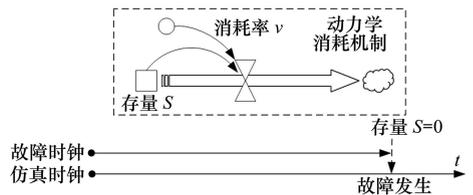


图 3 双时钟机制示意

双时钟机制的基本思路是利用系统动力学的基本原理结合离散事件触发方法,当系统动力学存量为 0 时故障发生。设编号为 i 的装备 Agent 为 A_i ,其包含 q 个 LRU,第 j 个 LRU 为 $L_{ij}(1 \leq j \leq q)$ 。设 L_{ij} 的寿命为 F_{ij} , A_i 的故障时间为 F_i 。

故障时钟机制的基础是动力学消耗机制,设 A_i 对应的故障时钟存量为 $S \in [0,1]$,动力学消耗速率为 v_i , t 为仿真时间。若 $v_i = 1/F_i$,则任意时刻系统动力学存量为

$$S_i(t) = 1 - v_i \cdot t = 1 - \frac{1}{F_i} \cdot t \quad (1)$$

$S_i = 0$ 的时刻即为 A_i 故障发生的时刻。

可以灵活地控制时钟的消耗速率来实现装备在不同阶段的故障发生情况仿真。当装备处于贮存状态或待机状态时,出现故障的概率很低,此时将动力学消耗速率设置为 0。当装备执行演训任务(包括阵地转移、运输)时,出现故障的概率较高,此时将动力学消耗速率设置相应提高。

根据故障时钟推进机制,确定 A_i 的寿命时间是关键环节。 A_i 的寿命时间可以根据 L_{ij} 的寿命 F_{ij} 以及 A_i 的可靠性框图(reliability block diagrams, RBD)来确定,具体步骤如下。

步骤 1 确定 LRU 及其寿命分布类型

开展装备故障模式与影响分析(failure modes and effects analysis, FMEA),确定装备 LRU。根据装备保障模式发展趋势,提升部队级维修保障能力的举措之一为减少部队级复杂维修任务,将大部分需在部队级开展的维修简化为换件维修,故装备 LRU 大多为能直接拆卸的设备、组合和功能单元。一般情况下装备 LRU 的寿命是服从某个分布的,可根据 LRU 所属类型,如机械类、电子类、机电类等,确定其分布。表 1 给出了发射车部分 LRU 的寿命分布类型。

表 1 发射车 LRU 的寿命分布

LRU	分布类型
副车架	正态分布
起竖架	正态分布
供电组合	指数分布
继电器	威布尔分布
伺服电源组合	指数分布
模拟器	指数分布
⋮	⋮
水平传感器	指数分布

步骤 2 确定 LRU 的寿命

LRU 的寿命值是一个随机变量,本文采用逆变

换法抽样得到 LRU 的寿命值。逆变换法抽样基本原理:如果随机变量 ξ 具有分布函数 $F(x)$ 或概率密度分布函数 $f(x)$,且 $F(x)$ 单调递增,则有

$$Z = F(x) \quad (2)$$

Z 是 $[0,1]$ 上的均匀分布,则有

$$\xi = F^{-1}(Z) \quad (3)$$

当 L_{ij} 寿命为指数分布时,设其寿命分布密度函数为

$$f_{ij}(t) = \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} \quad (4)$$

式中, λ_{ij} 为 L_{ij} 的失效率。

L_{ij} 寿命分布函数为

$$F_{ij}(t) = \int_0^t f_{ij}(t) dt = \int_0^t \lambda_{ij} e^{-\lambda_{ij} t} dt \quad (5)$$

根据(2)式可得 F_{ij} 的抽样公式为

$$F_{ij}(k) = F^{-1}(Z) = -\frac{1}{\lambda_{ij}} \ln(1 - Z) \quad (6)$$

故 F_{ij} 第 k 次随机抽样值 $t_{F_{ij}}(k)$ 的计算方式为

$$t_{F_{ij}}(k) = F^{-1}(\eta) = -\frac{1}{\lambda_{ij}} \ln(1 - \eta) \quad (7)$$

式中, η 是 $[0,1]$ 上的随机数。

同样,当 LRU 的寿命为正态分布、威布尔分布或其他分布时,根据逆变换法可计算出相应的抽样值。

步骤 3 确定 Agent 的故障逻辑

根据 Agent 对应装备的 FMEA 及自身功能与结构分析建立 RBD。一个典型装备的 RBD 如图 4 所示。

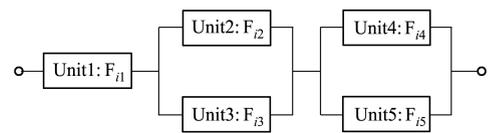


图 4 典型装备 RBD 示意图

其中,单元 Unit 对应 LRU。设 L_{ij} 的状态值为 X_{ij} ,其值为

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{正常} \\ 0 & \text{故障} \end{cases} \quad (8)$$

即当 $X_{ij} = 1$ 时表示 L_{ij} 正常,当 $X_{ij} = 0$ 时表示 L_{ij} 故障。建立 A_i 的状态函数 $\phi(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iq})$,将 L_{ij} 的状态与 A_i 的状态关联起来。根据 RBD 得到 A_i 的状态函数,可表示为

$$\phi(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{i5}) = [1 - (1 - X_{i1})] \times [1 - (1 - X_{i2})(1 - X_{i3})] \times$$

$$[1 - (1 - X_{i4})(1 - X_{i5})] \quad (9)$$

若 $\phi(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iq}) = 1$, 则表示 A_i 正常, 若 $\phi(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iq}) = 0$ 则表示 A_i 故障。

步骤 4 确定 Agent 的寿命

根据 Agent 的 RBD 可知, 当 L_{ij} 发生故障后, A_i 不一定发生故障, 所以需要在 L_{ij} 的基础上确定 A_i 的寿命 F_i 。根据仿真时间推进, 如果到达 $t = F_{ij}$ 的时刻, 则 L_{ij} 故障, 对应的状态值 $X_{ij} = 0$ 。若 $X_{ik} = 0$ ($1 \leq k \leq q$) 使得 A_i 的状态函数 $\phi(X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iq}) = 0$, 则有 $F_i = F_{ik}$ 。

特别的, 当 A_i 的 RBD 是串联模型时, 有

$$F_i = \min\{F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{iq}\} \quad (10)$$

当 A_i 的 RBD 是并联模型时, 有

$$F_i = \max\{F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{iq}\} \quad (11)$$

确定装备 Agent 的寿命时间后, 将得到的寿命时间作为故障时钟的初始时间, 然后利用双时钟仿真机制来触发故障, 实现故障发生的离散化。

2.2 人员失误扰动模型

人员在操作过程中发生失误的时间 M 同样服从相应分布 $Z = F(x)$, 所以对于人员的失误发生也采用双时钟机制。由于人员 Agent (包含在保障 Agent 中) 不可能建立类似装备 Agent 的 RBD, 所以抽样过程直接在人员的整体层面上进行。

人员工作是处于循环状态的, 人员是不断在“工作状态——空闲状态”之间进行循环。这样就跟装备 Agent 的故障时钟抽样有所不同, 即对同一个人员 Agent 的 M 需要重复抽样, 即由空闲状态到工作状态每循环一次就对其 M 进行抽样。

与装备的故障时钟抽样方法相同, 编号为 h 的人员 Agent 的 M_h 为

$$M_h = F^{-1}(Z) \quad (12)$$

一般情况下人员失误发生时间服从对数正态分布, 此时 M_h 的抽样值为

$$M_h = F^{-1}(\eta) = \exp(\sigma\sqrt{-2\ln\eta} \sin 2\pi\eta + \mu) \quad (13)$$

式中: η 是 $[0, 1]$ 上的随机数; μ 是失误时间均值; σ 是失误时间均方根。

使用基于动力学的时钟消耗机制来触发失误事件的发生, 任意时刻人员 Agent 对应的动力学存量 $S_h(t)$ 可以表示成

$$S_h(t) = 1 - v_h \cdot t = 1 - \frac{1}{M_h} \cdot t \quad (14)$$

式中: v_h 是消耗速率; t 是仿真时间。当 $S_h(t) = 0$ 时,

表示人员 Agent 在当前操作中发生了失误。

3 保障仿真过程

建立导弹装备类、保障类、管理类、环境类 Agent 后, 需确定 Agent 间的行为逻辑和信息传递链路, 导弹装备保障过程链路图如图 5 所示。

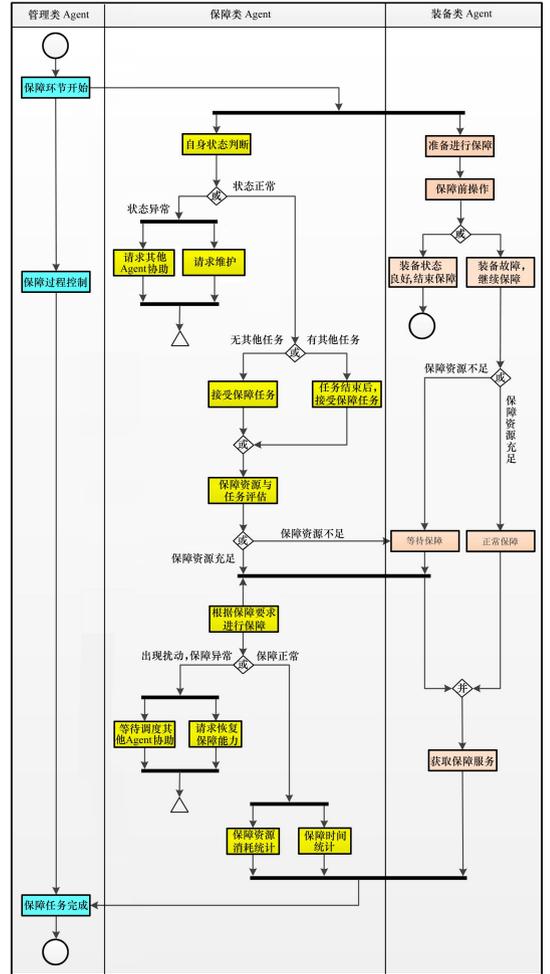


图 5 装备保障过程链路图

作为“任务发起者”的装备 Agent 首先检查装备的故障情况, 并与管理 Agent 交互, 发出维修任务需求。一旦有任务需求产生, 且维修任务分配给了保障 Agent, 则需与相应的保障 Agent 协作, 完成维修任务。作为“管理者”的管理 Agent 负责判定任务是否成功、制定维修策略、安排维修任务等动作。其中, 判定任务是否成功需要与装备 Agent 交互, 以充分了解装备 Agent 的数据; 制定维修策略需要在装备 Agent 和任务需求数据的基础上, 按照一系列规

则,制定维修策略以优化完成维修过程;安排维修任务需要与保障 Agent 交互,将维修任务分配给相应的保障 Agent。作为“服务者”的保障 Agent 的主要行为是向故障装备 Agent 提供维修保障服务。

4 仿真分析

针对导弹装备保障要素多、保障流程复杂等特点,使用基于 Agent 的方式对导弹装备保障系统进行建模与仿真。整个仿真过程涉及到的装备及相关的保障点、人员、设施、设备、备件、工具、技术资料等,在模型中以不同的 Agent 的形式表现,它们之间通过消息、事件、时间或命令触发和交互,共同构成了整个仿真系统。

由于装备的故障行为都是由装备的一个或多个设备或组合的失效造成的,对于建立的 Agent 模型来说,故障行为等价于故障设备或组合对应的装备 Agent 或保障 Agent 的参数值的改变。将装备故障行为的建模抽象如下:系统运行过程中故障作为“信号”传递给目标 Agent(装备 Agent);接受故障信号的 Agent 改变自身的相应参数值,更新系统的参数数据,并反馈给管理 Agent;在管理 Agent 的指导下对系统的运行进行新一轮的规划,包括安排保障 Agent 对装备 Agent 进行维修、更新装备 Agent 的任务规划等。

基于系统运行流程设计故障扰动的建模实现方案如下:根据装备 Agent 内所有会导致装备运行出现故障的设备或组合的失效率和寿命分布类型等随机抽取故障时间,通过时钟对故障时间进行监控。当时钟归零时,故障发生,正常运行的流程中的装备 Agent 检测时钟归零信号,自动变更当前 Agent 的相关参数为故障状态,终止当前活动并加入等待维修队列,或转入其他运行逻辑。

4.1 装备模型

装备类 Agent 包括指挥控制车、导弹发射车、电源配电车、运输装填车等各类装备的抽象 Agent。使用多种类型的参数,包括描述参数、时空参数、物理参数及能力参数来描述装备 Agent 属性,其中:描述参数用于描述装备 Agent 自身特征,如装备 Agent 的编号;时空参数用于描述装备 Agent 工作时的时空特征,如装备 Agent 的位置;几何参数用于描述装备 Agent 的构型,如装备 Agent 的长度;能力参数用于描述装备类 Agent 的各类能力,包括专用特性与通

用特性,专用特性如探测距离、精度、射程、最大速度等,通用特性如可靠性、测试性、维修性等。装备 Agent 所包含具体典型参数如表 2 所示。

表 2 装备 Agent 典型参数

参数类型	参数名称	作用
描述参数	number	获取装备 Agent 编号,区分同类 Agent 不同实体
	support type	描述在不同情况下装备 Agent 的保障类型
	state type	描述装备 Agent 的状态
	sequence	描述装备 Agent 在进行中的顺序
时空参数	point	描述装备 Agent 所在位置
	time	描述装备 Agent 所处某过程或某状态的时间
几何参数	length	描述装备 Agent 长度
	width	描述装备 Agent 宽度
能力参数	MTBF	描述装备 Agent 平均故障间隔时间
	MTTR	描述装备 Agent 平均修复时间

导弹地面装备有多种类型,提取各类车辆的共性状态形成状态图,将差异状态设计为保障任务内容和工作任务内容。建立的发射车内部视图如图 6 所示。

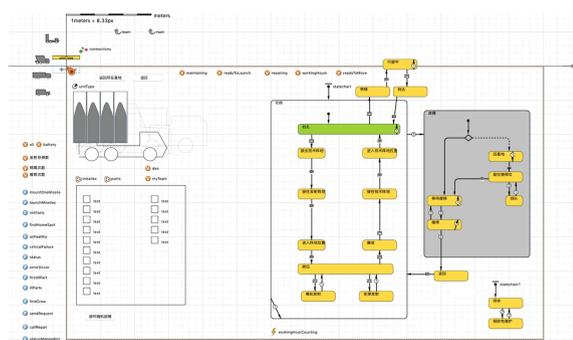


图 6 发射车内部视图

4.2 保障模型

保障类 Agent 是对装备运行过程中所涉及到的保障人员、保障设备、保障设施以及保障物资的整体抽象,即保障类 Agent 是拥有一定资源,且能够独立提供服务或物资的综合体。其属性包括描述参数、时空参数、保障资源参数及保障能力参数,其中,描述参数与时空参数内涵同装备 Agent;保障资源参数

用于描述保障 Agent 包含的保障人员、设备、设施、物资的相关信息,如保障人员类型、保障物资存储量等;保障能力参数用于描述保障类 Agent 提供服务或资源的能力,如最大可维修装备数、可维修时间等。

系统发出保障需求后,由保障人员领取后前往

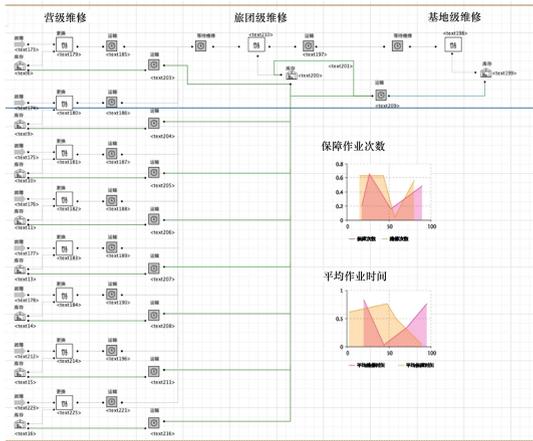


图 7 保障作业视图

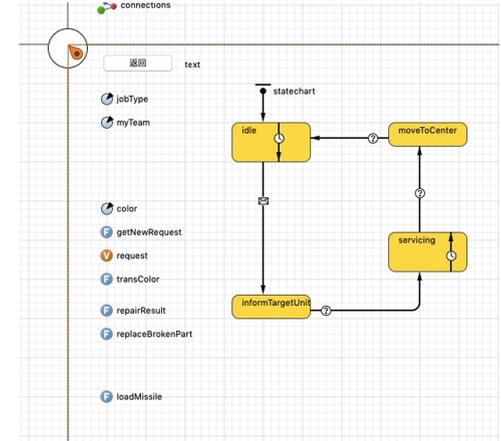


图 8 保障人员视图

在保障作业视图中,设计了营级、旅团级和基地级维修流程图,可观察装备及维修地点的整体运转情况。在保障人员视图中可观察人员的状态。

装备 LRU 视图包含参数和状态图,其中故障率、故障影响等故障机制都通过 LRU 参数进行配置,并在模型运行过程中进行更新。LRU 视图如图 9 所示。

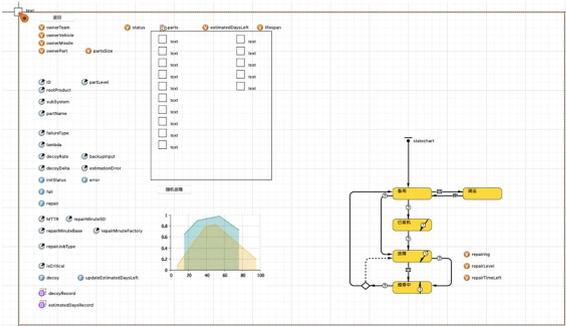


图 9 LRU 视图

4.3 仿真结果

为验证仿真系统的合理性,本文以某型服役导弹装备为例开展仿真。根据装备部件的寿命分布函数随机抽取故障时间,通过仿真时钟对故障时间进行监控,当仿真时钟归零时故障发生。在正常运行的仿真过程中,装备 Agent 检测到时钟归零信号,就

作业。保障人员领取保障作业时,需要考虑前置任务完成情况、保障人员专业与人数要求、保障设施与备件要求等各项约束条件。满足条件的保障作业才被领取。保障作业视图和保障人员视图分别如图 7 和图 8 所示。

自动变更当前 Agent 的相关参数为故障状态,管理 Agent 判断是否终止当前活动并加入等待维修队列,或转入其他运行逻辑。设定仿真周期为 2 年,经多次仿真后统计平均结果,可输出各类故障的数据,各类专业人员的使用数据,各种备件、工具、设备、技术资料等的使用和消耗数据。将仿真系统输出方案与该型装备的初始保障资源规划方案、装备实际使用数据进行对比,部分备件的设计量与实际消耗量对比结果如图 10 所示,部分备件的设计量与实际需求量对比结果如图 11 所示。

可以看出,在设计阶段装备的初始备件资源规划不合理,备件“备而不用”问题尤其突出,“用而不备”问题较突出,部分备件设计值与实际消耗值、实际需求值的偏差率甚至超过 100%。这会导致使用阶段装备作战任务受到严重影响,而同时保障费用又居高不下。

装备使用和保障过程涉及机械、电子、液压、控制、光电、驾驶等专业技术人员,这也是在设计阶段需要规划的。部分专业人员的设计量与实际需求量对比结果如图 12 所示。

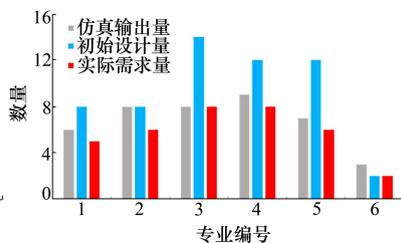
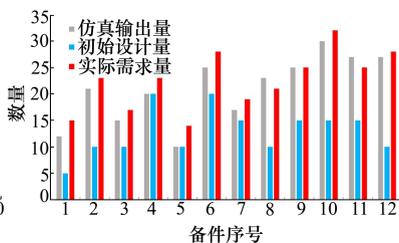
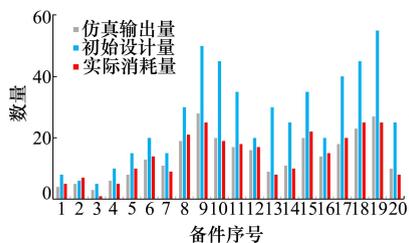


图 10 部分备件设计量与消耗量对比 图 11 部分备件设计量与需求量对比 图 12 部分专业人员的設計量与需求量对比

可以看出,装备的初始人员规划偏多,原因是在初始方案中未考虑人员交叉使用的情况。仿真系统输出的方案中初始人员规划也稍偏多,原因是在仿真模型中,设置专业技术人员为 8 小时工作制,而专业技术人员在实际过程中未严格按照工作时间执行任务。

5 结 论

本文根据导弹装备在设计阶段的保障性工作特点和需求,提出了一种考虑多重扰动的装备保障仿真方法。首先在对装备组成、功能、故障模式,及保障场景、任务过程、使用与维修保障过程等进行了分

析的基础上,确定了装备的扰动类型。然后,建立了保障系统仿真框架,在装备故障扰动和人员失误扰动的基础上,对装备保障过程中的各类 Agent 进行抽象,给出了 Agent 的状态变化图,以此为基础完成装备的使用与保障任务。其次,采用双时钟机制来实现仿真过程中的装备故障扰动和人员失误扰动注入,并建立了系统的恢复行为模型。最后,通过实例仿真,验证了装备保障仿真系统的合理性,根据仿真结果合理规划保障资源,不仅可以节省经费,还可以减少保障延误时间,从而提高装备使用可用度。本方法给在设计阶段制定合理科学的装备保障方案提供了参考,也为装备保障资源的规划提供了新思路。

参考文献:

- [1] 宋太亮. 装备保障性系统工程[M]. 北京:国防工业出版社, 2008
SONG Taiyang. Equipment support system engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008 (in Chinese)
- [2] 刘彬, 杜晓明, 高鲁. 装备保障仿真概念模型理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社, 2020
LIU Bin, DU Xiaoming, GAO Lu. Theory and method of conceptual model of equipment support simulation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020 (in Chinese)
- [3] GUO L, LIU X D. Mission-oriented missile equipment support system modeling: considering the failure and health state[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 5026555
- [4] 魏天宇, 张孝虎, 雷宇, 等. 基于 Petri 网的战时空空导弹保障建模[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(2): 37-41
WEI Tianyu, ZHANG Xiaohu, LEI Yu, et al. Modeling of air-to-air missile support in wartime based on petri net[J]. Command Control & Simulation, 2019, 41(2): 37-41 (in Chinese)
- [5] 徐廷学, 赵建忠, 余仁波, 等. 基于 HLA 的导弹装备军民一体化维修保障仿真系统设计与实现[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 802-808
XU Tingxue, ZHAO Jianzhong, YU Renbo, et al. Design and implementation of HLA-based military and civilian integrated maintenance and support simulation system for missile equipment[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2013, 33(3): 802-808 (in Chinese)
- [6] CONNORS C D, MILLER J O, LUNDAY B J. Using agent-based modeling and a designed experiment to simulate and analyze a new air-to-air missile[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2015, 12(5): 1-10
- [7] 邢彪, 曹军海, 宋太亮, 等. 基于 Agent 的维修保障仿真系统设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(1): 129-135

- XING Biao, CAO Junhai, SONG Tailiang, et al. Design and implementation for maintenance support simulation system based on agent[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(1): 129-135 (in Chinese)
- [8] LEE J, MITICI M. An integrated assessment of safety and efficiency of aircraft maintenance strategies using agent-based modeling and stochastic petri nets[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2020, 202, 107052
- [9] 王双川, 胡起伟, 李锋, 等. 装备维修保障效能评估研究综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(10): 2271-2278
WANG Shuangchuan, HU Qiwei, LI Feng, et al. Review of equipment maintenance support efficiency evaluation[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(10): 2271-2278 (in Chinese)
- [10] 凌海风, 郑宇军, 萧毅鸿. 装备保障智能优化决策方法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015
LING Haifeng, ZHENG Yujun, XIAO Yihong. Intelligent optimization decision method and application of equipment support [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015 (in Chinese)
- [11] 冉悄然, 王强, 王双川. 面向复杂任务的装备维修人员仿真评估[J]. *兵工自动化*, 2019, 38(10): 88-92
RAN Qiaoran, WANG Qiang, WANG Shuangchuan. Simulation evaluation of equipment maintenance personnel for complex tasks [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2019, 38(10): 88-92 (in Chinese)

Simulation on design-oriented missile equipment support system under multiple disturbances

GUO Lu^{1,2}, LIU Xiaodong¹

(1.School of Equipment Management and UAV Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;)
(2.Jiangnan Mechanical and Electrical Design Institute, Guiyang 550009, China)

Abstract: Aiming at the problem of unreasonable planning of support schemes in the design stage of missile equipment, especially newly developed equipment or equipment lacking historical experience data, a design-oriented simulation method of missile equipment support system under multiple disturbances is proposed in this paper. Firstly, a layered and blocked hybrid simulation framework is constructed. The equipment, support, management, and environment agents in the equipment support process are abstracted, and the interaction mechanism of these four types of agents is determined according to the support process and information transmission links. Then, two types of disturbances affecting equipment support decision-making are analyzed, and the equipment fault disturbance and personnel error disturbance models are established. The dual clock mechanism is used to realize the disturbance injection during the simulation process. According to the equipment maintenance support process and the state transition process of the agents, the recovery behavior model of the support system is established. Finally, a certain type of missile equipment is selected to carry out example simulation. The simulation results of support resources are compared with the initial design scheme of the equipment and the actual demand of the equipment, which provides a new idea for formulating a reasonable and scientific support scheme in the design stage.

Keywords: missile equipment; support; design-oriented; disturbance; simulation

引用格式: 郭璐, 刘晓东. 多扰动下面向设计的导弹装备保障系统仿真[J]. *西北工业大学学报*, 2022, 40(5): 1116-1124

GUO Lu, LIU Xiaodong. Simulation on design-oriented missile equipment support system under multiple disturbances[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2022, 40(5): 1116-1124 (in Chinese)