

系统仿真学报
Journal of System Simulation
ISSN 1004-731X, CN 11-3092/V

《系统仿真学报》网络首发论文

题目：面向实战的装备系统 RMS 综合仿真验证技术
作者：张悦, 张文良, 冯强, 郭星, 任羿, 王自力
DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.25-0116
收稿日期: 2025-02-21
网络首发日期: 2025-03-18
引用格式: 张悦, 张文良, 冯强, 郭星, 任羿, 王自力. 面向实战的装备系统 RMS 综合仿真验证技术[J/OL]. 系统仿真学报.
<https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.25-0116>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

面向实战的装备系统 RMS 综合仿真验证技术

张悦, 张文良, 冯强, 郭星*, 任羿, 王自力
(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京市 100191)

摘要: 现有装备系统的可靠性、维修性和保障性(Reliability, Maintainability, Supportability RMS)仿真验证通常基于典型条件开展, 实战环境和任务建模能力弱。针对该局限性, 提出了一种基于多智能体的 RMS 仿真验证框架, 突破了复杂环境与多变任务的智能体建模技术, 同时构建了环境类智能体、任务类智能体与装备及保障系统的交互机制, 并给出了基于仿真的 RMS 综合评价方法。案例验证表明: 所提出的 RMS 综合仿真验证方法能够实现复杂环境与多变任务建模, 支持完成面向实战的仿真验证与设计方案综合评价, 从而满足实战化研制需求。

关键词: RMS; 多智能体; 仿真验证; 复杂环境; 多变任务

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.25-0116

The combat-oriented simulation and verification technology for equipment systems RMS

Abstract: The existing simulation verification of Reliability, Maintainability, and Supportability (RMS) for equipment systems is typically conducted under standard conditions, which often fails to meet the demands of developing combat-oriented equipment. To address this limitation, a multi-agent-based RMS simulation verification framework is proposed. This framework overcomes the challenges of agent modeling in complex environments and variable tasks, and establishes interaction mechanisms between environmental agents, task agents, and the equipment and support systems. Additionally, a simulation-based comprehensive evaluation method for RMS is presented. Case studies demonstrate that the proposed RMS comprehensive simulation verification method can effectively model complex environments and variable tasks, supporting the completion of combat-oriented simulation verification and comprehensive evaluation of design schemes, thereby meeting the requirements of developing combat-oriented equipment.

Keywords: RMS; Multi-agent; Simulation; Complex environment; Diverse tasks

收稿日期: 2025-02-21 修回日期: 2025-03-14

基金项目: 国家自然科学基金青年学生基础研究项目(723B2002)

第一作者: 张悦(1997-), 女, 博士生, 研究方向为可靠性仿真建模优化。

通讯作者: 郭星(1995-), 男, 博士后, 博士, 研究方向为可靠性仿真分析评价。

0 引言

随着现代军事技术的迅猛发展,装备系统的可靠性、维修性和保障性(Reliability, Maintainability, Supportability, RMS)已成为决定其作战效能的关键因素^[1]。装备的 RMS 特性不仅直接影响军事行动的效率和成功率,还在很大程度上决定了战场上的胜负。因此,在设计阶段对装备系统进行 RMS 综合评估验证显得尤为重要。传统的评估验证方法,如静态可靠性模型方法^[1]、Markov 仿真方法^[3]、离散事件仿真方法^[4]等,虽然在设计阶段的装备系统 RMS 综合评估中发挥了一定作用,但随着战争形态的不断演变,装备系统日趋复杂,作战环境愈发多样,作战任务也更加多变,这些传统方法逐渐暴露出诸多不足。例如,它们往往过于依赖理论分析而脱离实战需求^[5],或局限于单一典型场景,难以充分模拟真实战场环境的复杂性和多变性^[6]。因此,开发更加先进的评估验证方法,以满足实战化的装备研制需求,已成为当前军事技术研究的重要课题。

在此背景下,多智能体仿真技术因其显著优势而备受关注。该技术通过模拟多个自主决策智能体在复杂环境中的交互行为,能够更加真实、灵活地反映战场中装备、人员、保障资源、环境等多要素的动态变化和相互影响关系^{[7][8]}。自提出以来,多智能体技术便广泛应用于军事仿真领域^{[9][10]}。例如,蒋鑫等^[11]采用多智能体方法实现了常规导弹装备系统保障过程的建模与仿真,有效满足了保障方案的综合仿真验证需求。王宇琨等^[12]借助多智能体方法实现了多机空战行为建模。罗尚伟^[13]将多智能体方法应用于无人机装备体系的任务可靠性评估建模与仿真中,提出了装备体系任务可靠性仿真评估验证方法,并基于开源 JADE 平台完成了仿真系统的编程实现与案例验证。赵慧慧^[14]则应用多智能体仿真实现了舰船电子信息系统任务可靠性仿真评价。此外,Allal 等^[15]采用多智能体方法实现了海上风力发电机群的维修路线仿真评估优化,

Rosa 等^[16]借助多智能体仿真进行电力系统可靠性评估,丁善婷等^[17]实现了基于多智能体的舰载雷达保障性仿真评估,进一步证明了多智能体技术在体系 RMS 仿真方面的应用潜力。

然而,尽管多智能体技术在装备系统可靠性、维修性及保障性仿真验证方面取得了显著进展,现有研究仍存在一些问题,限制了其面向实战的深入应用。例如,现有多智能体仿真验证方法在模拟多变任务时通常缺乏灵活性,难以动态调整任务^[18];同时,对环境影响的建模也较为简单,未能充分考虑复杂多样环境条件对装备 RMS 性能的影响^[19]。这些问题导致多智能体仿真方法仍无法完全满足装备系统 RMS 性能的实战化验证需求。

针对上述问题,本文提出了一种面向实战的装备 RMS 综合仿真验证技术。设计了任务类智能体与环境类智能体的建模方法,使其能够模拟作战任务的动态多变特点和作战环境的复杂多样特征,从而更加贴近实战。智能体间的实时交互机制进一步保证了仿真进程的准确性与拟真性。提出了面向仿真的 RMS 综合评价方法,实现设计方案仿真验证。基于 Anylogic 平台的仿真案例验证了所提出技术的可行性与有效性,为装备系统 RMS 性能的实战化验证提供了新的解决方案。

1 基于多智能体的 RMS 综合仿真验证框架

针对装备系统的实战化验证需求,传统的仿真验证方法通常局限于典型条件下的单一场景,难以验证复杂环境和多变任务下的系统 RMS 性能。因此,需要提出一种面向实战的 RMS 综合仿真验证技术,能够模拟多种复杂环境和动态任务需求,并能够综合处理仿真结果,实现系统 RMS 评价。

多智能体建模方法可以在反映系统复杂交互关系的同时考虑系统整体性能,具有灵活性和可扩展性等优点,因此采用多智能方法作为装备系统 RMS 综合仿真的基础,仿真验证整体框架如图 1

所示。

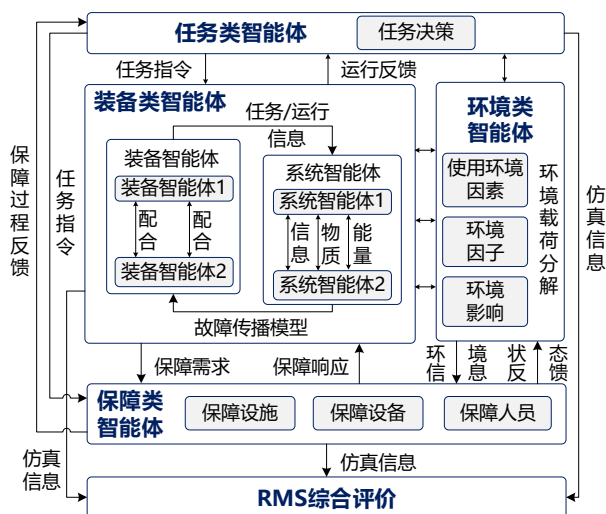


图 1 综合仿真验证框架

Fig. 1 Comprehensive simulation verification framework

装备类智能体可分为装备智能体与系统智能体，其中装备智能体主要模拟装备自身的运行与保障过程；系统智能体则主要承担装备部分功能的实现。装备智能体向系统智能体传递任务运行信息，系统智能体则向装备智能体传递故障传播信息。同时，装备类智能体也与任务类、环境类、保障类智能体进行交互，根据任务指令和环境影响调整自身行为。装备类智能体的部分状态图如图 2 所示：

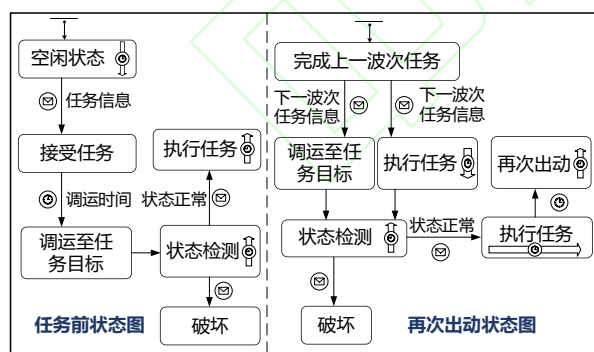


图 2 装备类智能体状态图

Fig. 2 Equipment agent state diagram

保障类智能体主要包括保障设施智能体、保障人员智能体和保障设备智能体，分别模拟保障设施、保障人员和保障设备等待、选择、接收和执行

保障作业的过程，以实现装备系统维护保障行为的模拟和仿真。保障类智能体实时接收任务智能体的指令和环境智能体的环境信息，并反馈保障过程信息。保障类智能体的部分状态图如图 3 所示：

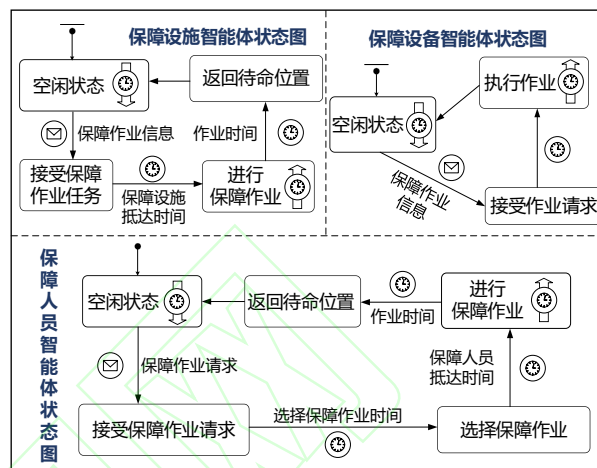


图 3 保障类智能体状态图

Fig. 3 Security agent state diagram

任务类智能体主要负责模拟装备系统的任务进程与指令下达，区别于传统的单一任务建模，能够实现更加贴近实战的多任务/动态任务建模仿真。同时，任务类智能体能够依据内部算法计算结果进行任务决策，并将决策结果传递给装备类智能体与保障类智能体执行。

环境类智能体用以模拟复杂耦合环境条件对装备系统性能的影响，在智能体内部对环境载荷进行分解，并采用不同影响模型进行相应建模。环境类智能体会向装备类智能体和保障类智能体实时反馈环境影响，以实现装备系统的退化、故障及保障行为模拟。

在此基础上，构建多智能体仿真模型，开展装备系统的 RMS 综合评价，以满足验证需求。

2 面向实战的复杂环境与多变任务建模技术

在基于多智能体的综合仿真验证框架中，任务类智能体与环境类智能体的设计是模拟实战环境的关键，本章提出了基于多智能体的复杂环境与多

变任务建模技术, 阐明了其与其他智能体间的交互机制。

2.1 复杂环境建模技术

2.1.1 复杂环境条件

作战环境是战场及其周围对作战活动有影响的各种情况和条件的统称, 作战环境的差异能够对装备系统作战效能造成显著影响。实战中由于装备应用场景的多样化, 作战环境通常无法通过单一典型条件进行描述, 而是具有复杂性、耦合性的特点, 因此需要复杂环境建模技术进行描述。

复杂环境主要可划分为空间环境, 自然环境和外部环境三大类。其中空间环境是指战场所处的空

间位置, 如陆战场、海战场、空战场等, 它是一种作战态势, 决定了可能存在的自然环境与外部环境类别, 也决定了能够参与作战的装备种类; 自然环境则包括地表环境、气象环境、昼夜环境、水文环境等, 是武器装备最直接接触的环境, 也是对系统 RMS 性能影响最大的环境; 而外部环境是指装备系统在敌我对抗场景下面临的特殊环境, 主要包括电磁环境和火力对抗环境, 其对装备系统完成任务的直接威胁较大。各类环境的详细分类见图 4, 在实战中装备系统面临的环境通常是三类环境的组合。^[1]

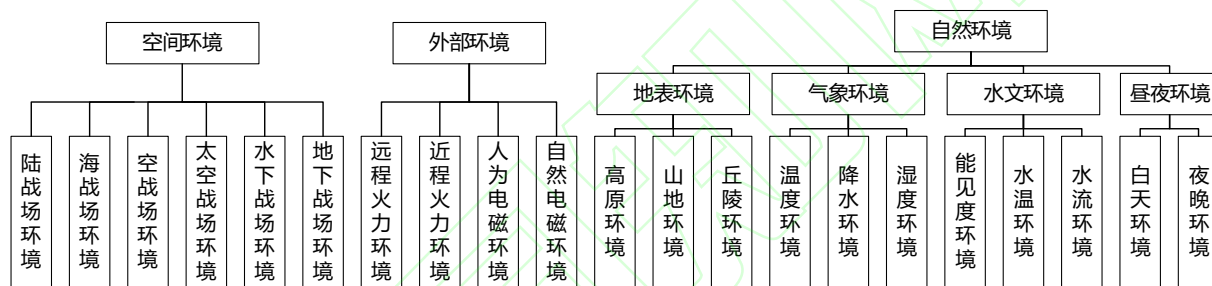


图 4 复杂环境分类
Fig. 4 Classification of complex environments

2.1.2 环境类智能体设计

为了能够模拟复杂耦合的实战战场环境, 采用模块化设计思想构建环境类智能体, 可表示为如下六元组:

$$\Omega = \{A, B, C, D, E, F_{env}\} \quad (1)$$

其中 A 代表空间环境模块, B 代表自然环境模块, C 代表外部环境模块, D 代表环境感知模块, E 代表协同通信模块, F_{env} 代表五类模块之间的交互关系。

具体模块及功能如下:

空间环境模块: 负责对作战区域整体环境的分析和模拟, 包括陆地环境分析、海洋环境分析等。它提供作战环境的整体情况, 会将分析结果反馈给自然环境模块, 以支持环境的真实模拟。

自然环境模块: 该模块专注于模拟环境的基本自然条件, 包括气温、湿度、风速和降水等气象要素。通过实时数据输入, 模块能够动态调整环境状况, 并通过接口将这些信息及时传递给环境感知模块。

外部环境模块: 负责仿真蓝方电子干扰和火力对抗环境, 该模块能够模拟电磁环境和对抗环境对装备系统 RMS 特性的影响, 并通过通信模块传递给装备类智能体和保障类智能体。同时还会将环境信息发送至任务类智能体, 帮助其进行决策。

环境感知模块: 该模块负责整合来自空间环境模块、自然环境模块和外部环境模块的信息, 并从中整理分析出应向其他智能体传递的信息, 发送给通信模块。

协同通信模块: 该模块接收来自环境感知模块

的信息，并承担与任务类智能体、装备类智能体和保障类智能体交互的任务。环境类智能体内部各模块间的协作关系如图 5 所示：

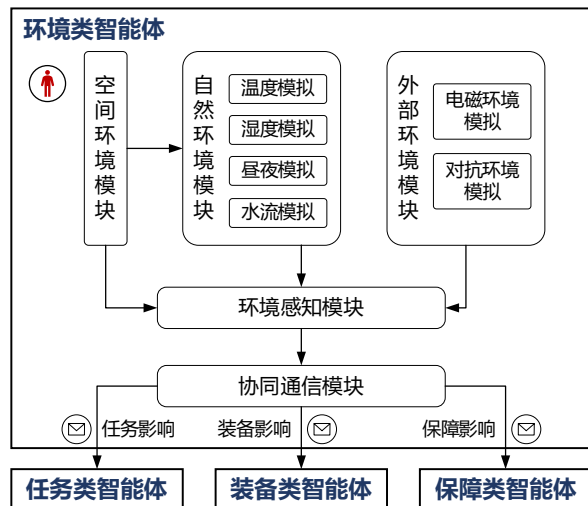


图 5 环境类智能体设计
Fig. 5 Design of environmental agent

在环境类智能体建模时，根据装备系统面临的不同实战环境，适应性调整空间环境模块、自然环境模块和外部环境模块的设置，以综合表征环境特点，实现贴近实战的复杂环境建模。

环境类智能体通过与其他智能体的交互影响仿真进程：与装备类智能体交互时，环境因素将直接影响装备性能，导致装备退化或故障；与保障类智能体交互时，部分环境因素会影响系统保障能力，从而影响任务执行进程；与任务类智能体交互时存在直接影响和间接影响两种方式，当环境的恶劣程度达到规定阈值后，将直接影响任务的执行与否，任务类智能体会据此判断是否取消任务。此外，环境智能体主要经“环境-装备/保障-任务”的传播链条，通过改变作战装备与保障装备的性能来对任务智能体产生间接影响。

2.1.3 环境智能体与装备/保障互动机制

环境类智能体与装备/保障类智能体之间的互动机制是模拟环境影响的关键环节。不同环境对装备系统的影响形式不同，分别分析昼夜环境、地理环境和对抗环境下的互动机制。

1) 昼夜环境影响

昼夜交替会显著影响装备类智能体的性能参数和保障类智能体的工作效率，进而影响任务执行状况。在夜晚环境下，装备类智能体的探测范围、行进速度等性能参数会受到影响而降低；保障类智能体的工作效率也会受到影响，保障人员效率下降，保障时长增加，部分保障设备将无法工作等；任务类智能体参考昼夜因素进行任务决策，夜晚期间部分任务将停止执行等。在这种情况下，环境类智能体将实时向其他三类智能体传递夜晚信息，从而指导其修正自身性能参数，并进行任务规划。昼夜因素对装备/保障的影响如下式所示：

$$X = a \cdot X_0 \quad (2)$$

其中， X_0 为装备/保障智能体的属性参数基础值， a 为昼夜影响因子，在白天情况下 $a=1$ ，在夜晚情况下 a 取值根据实际情况设置， X 为属性参数的修正值。

2) 地理环境影响

地理环境对装备系统的 RMS 性能有显著影响。不同的地理环境会影响智能体可执行的任务种类和性能参数，同时装备在特定地理环境下可能遭遇不同类型的故障，从而引发失效时间分布参数的变化。例如，装备在高海拔地区可能面临低温低压导致的性能衰退，在水陆两栖环境下则会在水汽、盐分影响下发生腐蚀故障，导致故障率升高等。环境类智能体会随仿真时钟模拟地理环境的变化，并向装备/保障智能体实时发送性能参数和 RMS 参数的修正情况。以失效时间服从指数分布情况为例，考虑地理环境影响，装备可靠度可用下式表示：

$$R(t) = e^{-b\lambda t}, t \geq 0 \quad (3)$$

其中， λ 为基础失效率， b 为地理环境影响因子，在基准环境中 $b=1$ ，其余环境中根据具体情况设置。

3) 对抗环境影响

对抗环境下蓝方火力打击的存在将进一步复杂化装备系统的故障模式与任务决策，火力打击带

来的外部冲击会直接导致装备破坏,且其破坏进程独立于随机故障与退化。环境类智能体根据对抗环境选择不同模型模拟冲击的影响,包括考虑因大量冲击损伤累积导致故障的累积损伤模型,冲击极值超过装备承受上限的极值冲击模型,外部冲击导致装备故障率增加的故障率增大模型,以及考虑连续冲击间隔过短导致故障的 δ 冲击模型^[20]。智能体内部随仿真时钟模拟外部冲击的影响,当破坏发生时,向装备类智能体传递破坏信号。以故障率增大模型为例,指数分布情况下装备可靠度可用下式表示:

$$R(t) = e^{-c\lambda t}, t \geq 0 \quad (4)$$

其中, λ 为基础失效率, c 为对抗环境影响因子,无对抗环境中 $c=1$,对抗环境中 c 的取值根据对抗强度设置。

2.2 多变任务建模技术

2.2.1 多变任务需求

作战任务是指在一定的战场环境和时空约束下,作战单元为了完成所承担的责任或达到特定目的,而进行的一系列相互关联作战行动的有序集合。区别于传统验证方法所采用的单一任务,实战中作战任务通常更为复杂,具有层次性、动态性等特点。

任务的层次性是指在实战情况下,装备系统层级的复杂任务可依系统结构逐层向下划分至单个装备的基本任务,而整个复杂任务的执行情况取决于基本任务的完成情况。例如装备系统的侦查任务,可向下分解为分系统的任务,分系统任务又可进一步划分为单装备的基本任务。

任务的动态性是指在实战中,装备系统的任务并非固定不变,而是要随战场态势和装备系统自身的变化进行动态调整,以提高任务成功率。例如,恶劣环境可能导致任务取消,部分装备损失可能导致任务重新分配等。

2.2.2 任务类智能体设计

为了实现动态复杂任务的建模与执行,使其更

加贴近实战环,可表示为如下五元组:

$$\Omega = \{G, H, I, J, F_{task}\} \quad (5)$$

其中 G 代表任务规划模块, H 代表维修决策模块, I 代表保障调配模块, J 代表任务执行模块, F_{task} 代表四类模块之间的交互关系。

具体模块功能及交互关系如下:

任务规划模块:该模块通过与外置任务规划算法的交互,实现任务执行策略的制定与优化。依据战场态势,优化调整任务执行顺序与执行装备,生成最优策略,并通过任务执行模块发送至装备类智能体执行。

维修决策模块:该模块主要负责实时监控装备系统运行状态,并根据故障情况生成维修任务方案。该模块同样外置维修决策算法,综合考虑任务需求与装备健康状况生成最优的维修方案,通过确定装备维修顺序和投入的维修资源,确保关键装备得到及时维修。

保障调配模块:该模块的主要职责是依据任务实际需求,动态分配保障资源。该模块通过保障调配算法,实时评估保障资源需求,动态调整保障任务,以支持任务顺利完成。

任务执行模块:该模块负责综合整理任务规划模块生成的装备任务,维修决策模块生成的维修任务,以及保障调配模块生成的保障任务,协调不同任务间的时序关系、依赖关系,生成每件装备的任务序列,并将其发送给装备/保障智能体执行。

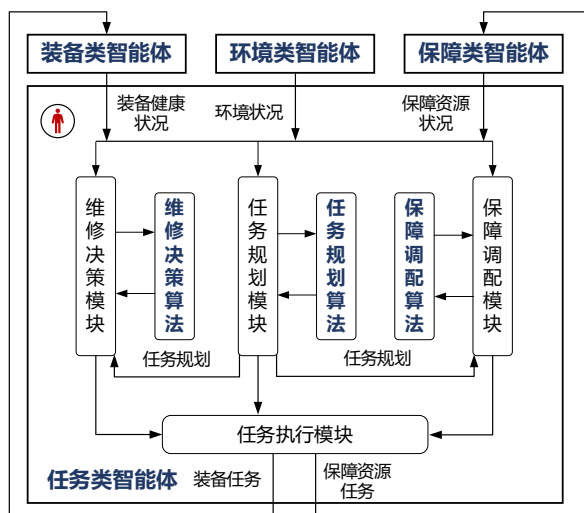


图 6 任务类智能体设计
Fig. 6 Design of task agent

任务类智能体内部各模块间的协作如图 6 所示，通过与多种规划算法实时交互调整实现动态任务建模，通过将任务划分至具体的装备实现复杂分层任务建模。

2.2.3 任务智能体与装备/保障互动机制

在与装备类/保障类智能体的交互过程中，任务类智能体充当决策者与协调者的角色。在仿真进程开始时，任务类智能体首先依据输入的总体任务进行任务分配，并将分配结果传递至装备类智能体执行。而随着仿真进程不断推进，任务类智能体将实时监控装备状态与外部环境因素，一旦系统发生变化，智能体将依据接收到的信息，调用数学规划算法进行决策，并将新的策略分解为单个装备能够执行的基本任务集合，最后将信息传递至装备/保障智能体执行。任务智能体与装备/保障智能体的互动机制如图 7 所示：

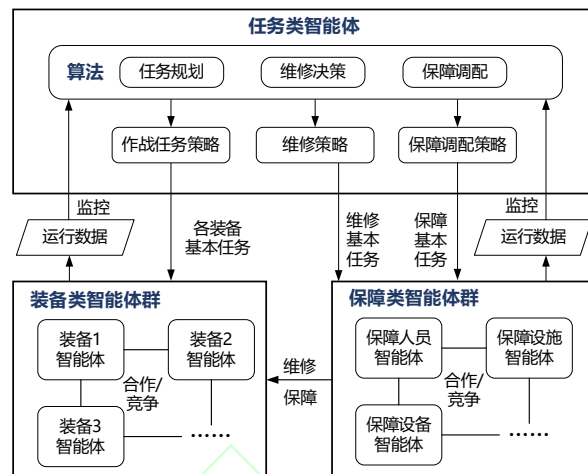


图 7 任务类智能体交互机制
Fig. 7 Task agent interaction mechanism

当装备智能体向任务智能体反馈维修需求时，任务智能体将根据反馈的故障信息和维修需求，调用设置的维修决策算法，求解当前情况下的最优维修任务策略，并将其分解为维修装备和人员所需执行的基本任务，传递给保障智能体群执行；当装备智能体反馈特殊保障需求时，任务智能体将依据收到的保障需求和保障智能体状态，调用设置的保障调度算法，计算最优保障方案，并分配到各保障设备进行执行；当装备智能体反馈故障状况或环境智能体反馈恶劣环境时，任务智能体将综合装备健康状况与环境条件，调用内置的任务决策算法，重新计算当前最优任务分配方案，并进一步分解为各装备的基本任务，传递给装备智能体群执行。

3 RMS 综合评价技术

通过本文提出的基于多智能体的综合仿真验证框架，可以实现装备系统在复杂环境和多变任务下的仿真模拟，获取仿真数据。而为了进一步利用仿真数据实现对设计方案的验证需求，则需要提出相应的综合评价技术，具体包括 RMS 评价指标的选取，RMS 评价指标的计算，以及 RMS 综合评价技术。

3.1 评价指标与评价方法

装备系统的 RMS 评价指标众多，从多智能体

仿真的角度出发,可分为基于时间计算的指标和基于状态计算的指标两大类。

3.1.1 基于时间的评价指标

基于时间的评价指标是指在多智能体仿真中,依据智能体的时间属性计算得到的 RMS 指标。主要包括使用可用度 A_o 、保障设备占用率 O_{ins} 等。

使用可用度是指装备系统处于可用状态的时间与总时间的比值,在多智能体仿真中,装备系统的使用可用度体现为所有装备使用可用度的均值,其在单次仿真中的评价方法为:

$$A_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{T_{ava}(i)}{T} \quad (6)$$

其中, n 代表装备数量, $T_{ava}(i)$ 代表第 i 件装备在此次仿真中的可用时间,包括健康状态下的待命时间和执行任务时间, T 代表总仿真时间。采用蒙特卡洛方法进行 N 次仿真,使用可用度评价方法为:

$$A_{o \text{ monte-carlo}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_{oi} \quad (7)$$

保障设备占用率是指在仿真周期中,保障设备处于工作状态中的时长与仿真总时长的比值,其在单次仿真中的评价方法为:

$$O_{ins} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t_{occupy}(i)}{T} \quad (8)$$

其中, n 代表保障设备的数量, $t_{occupy}(i)$ 代表第 i 件保障设备处在工作状态的总时长, T 代表总仿真时间。采用蒙特卡洛方法进行 N 次仿真,保障设备占用率的评价方法为:

$$O_{ins \text{ monte-carlo}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_{insi} \quad (9)$$

3.1.2 基于状态的评价指标

基于状态的评价指标是指依据单个或多个智能体在仿真过程中的状态:如任务是否成功、设备是否占用等,综合分析计算得到的 RMS 指标。主要包括任务可靠度 R_m 、保障设备满足率 S_{ms} 等。

任务可靠度是指装备系统在规定时间内完成

规定任务的概率,在多智能体仿真中,主要通过蒙特卡洛多次仿真的方法进行评价:

$$R_{m \text{ monte-carlo}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N S_i(t)}{N} \quad (10)$$

其中, N 为蒙特卡洛仿真次数, $S_i(t)$ 为装备系统在第 i 次仿真中 t 时刻的任务成功判据, $S_i(t) = 1$ 代表任务成功, $S_i(t) = 0$ 代表任务失败,该变量储存于任务智能体中。

保障设备满足率是指在所有产生保障设备使用需求的时刻,保障设备能够满足需求的次数与总次数之比,其在单次仿真中的评价方法为:

$$S_{ins} = \frac{1}{T} \sum_t \frac{1}{M} \sum_m s(m,t) \quad (11)$$

其中, T 为仿真时间, M 为保障设备种类数量, $s(m,t)$ 为在 t 时刻第 m 种保障设备的满足率,计算方式为:

$$s(m,t) = \frac{t \text{时刻第} m \text{种设备使用量}}{t \text{时刻第} m \text{种设备需求量}} \quad (12)$$

其在蒙特卡洛 N 次仿真中的评价方法为:

$$S_{ins \text{ monte-carlo}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{insi} \quad (13)$$

3.2 多场景评价方法

基于实战化验证需求,需要对装备系统设计方案进行多种场景下的综合仿真评价,因此提出了基于场景概率加权的单方案多场景评价方法。

装备系统在设计之初便存在多种目标实战应用场景,且不同的场景会对装备系统的作战效能产生不同影响。各个场景在实战中出现的概率不同,依据概率加权思想,某个场景出现概率越高,装备系统在其中的 RMS 表现越重要,在综合仿真评价时该场景的权重也应当越高。

考虑某装备系统在多种场景下分别进行 RMS 综合仿真,场景总数为 M ,共选取 n 个评价指标,记为 $\{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 。根据先验信息可知,第 m 个场景在实战中出现的概率为 p_m 。

分别针对每个场景进行蒙特卡洛仿真,计算相

应的评价指标取值，以使用可用度指标 A_o 为例，在场景 m 下仿真评价结果记为 A_o^m ，则装备系统的使用可用度指标的多场景评价结果为：

$$A_o = \sum_{m=1}^M p_m A_o^m$$

(14)

采用相同的概率加权方法，依据仿真结果计算选取的所有 RMS 评价指标取值，从而实现设计方案多场景综合评价。

4 案例验证与分析

4.1 案例设计

基于版本号为 8.8.4 的 Anylogic 仿真软件开展面向实战的 RMS 综合仿真验证技术案例验证。案例场景为两栖车及相应保障设备组成的装备系统进行跨海登陆作战，主要任务剖面包含出动前准备、登舰运送、两栖车涉水、两栖车登陆、两栖车返回等。对任务影响较大的环境条件主要包括地理环境、昼夜环境和对抗环境，依据三类环境情况，设计了 4 种可能出现的作战场景，如表 1 所示：

表 1 作战场景设计
Table 1 Combat scene design

场景序号	地理环境	昼夜环境	对抗环境	场景概率
1	水陆两栖	白天环境	无对抗	0.1
2	水陆两栖	夜晚环境	无对抗	0.2
3	水陆两栖	白天环境	有对抗	0.4
4	水陆两栖	夜晚环境	有对抗	0.3

两栖车系统设计方案如表 2 所示：

表 2 系统设计方案
Table 2 The design of system

关键分系统/ 性能参数	指数分布故障率 ($\lambda \times 10^{-6} h^{-1}$)	参数值 (km/h)
动力系统	13.61	\
通信系统	7.39	\
控制系统	9.20	\
乘员系统	3.21	\
防护系统	8.80	\
陆地行进速度	\	72
水中行进速度	\	13

不同场景下，环境因素对于装备系统的影响因子取值如表 3 所示：

表 3 环境因素影响因子
Table 3 Environmental factors

场景序号	昼夜影响因子 a	地理环境影响因子 b	对抗环境影响因子 c
1	1	1.2	1
2	0.7	1.2	1
3	1	1.2	1.4
4	0.7	1.2	1.4

采用 Anylogic 软件，基于本文提出的装备系统 RMS 综合仿真验证技术，对 4 种作战场景下的作战过程进行多智能体建模，运行蒙特卡洛仿真并统计结果。共选取使用可用度 A_o 、保障设备占用率 O_{ins} 、任务可靠度 R_m 和保障设备满足率 S_{ins} 共 4 项 RMS 指标作为仿真评价指标。

4.2 案例仿真结果分析

首先按照提出的综合仿真验证框架和各类智能体的建模方法，在 Anylogic 软件中完成任务类智能体、环境类智能体、装备类智能体和保障类智能体的建模，包括各智能体间的交互机制建模。以两栖车智能体为例，其智能体内部状态图如图 所示，同时可以看到，两栖车智能体的行为受到任务智能体的影响，实现了二者之间的交互机制建模。

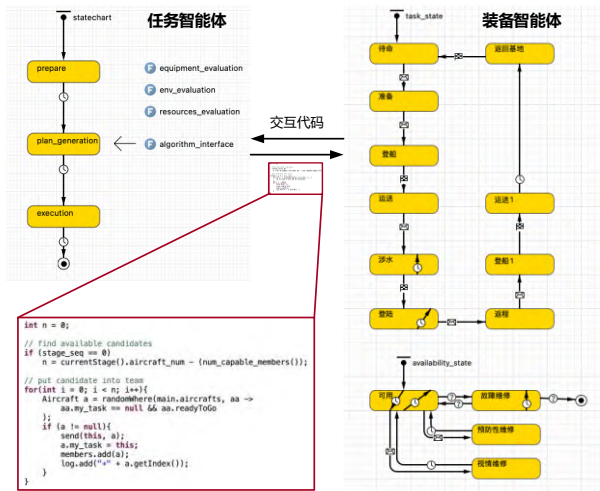


图 8 两栖车智能体状态图
Fig. 8 State diagram of amphibious vehicle agent

依据两栖车系统设计方案和案例场景设计方案，完成智能体参数设置，分别针对 4 种场景进行蒙特卡洛仿真，仿真过程如图 9 所示。

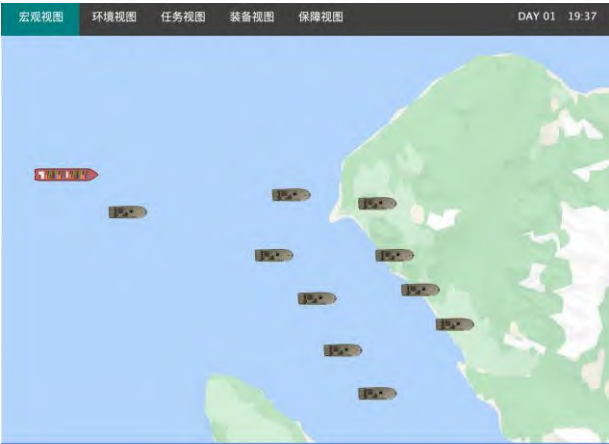


图 9 仿真过程宏观视图
Fig. 9 Macro view of the simulation process

通过蒙特卡洛多次仿真，记录仿真数据，并依据提出的 RMS 指标仿真评价方法，计算选取的 4 类指标的仿真结果并输出。以任务可靠度指标为例，4 种场景下的仿真结果如图 10 所示，可见在白天环境与无对抗环境下案例的任务成功率最高，在夜晚有对抗环境下最低。

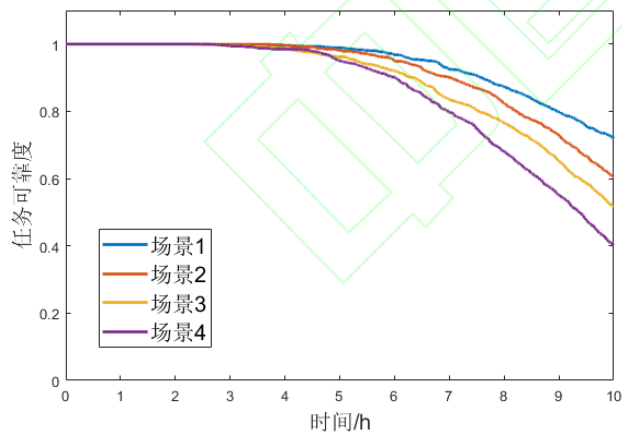


图 10 任务可靠度仿真结果
Fig. 10 The simulation results of mission reliability

在 4 种场景下，选取的 4 类 RMS 评价指标蒙特卡洛仿真结果如表 4 所示：

表 4 评价指标仿真结果
Table 4 Evaluation index simulation results

评价指标	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4
使用可用度 A_o	0.935	0.922	0.908	0.893
保障设备占用率 O_{ms}	0.143	0.166	0.236	0.309
任务可靠度 R_m	0.719	0.605	0.513	0.401
保障设备满足率 S_{ms}	1	1	0.960	0.905

依据提出的多场景综合评价方法，分别对 4 项评价指标在不同场景下的仿真结果依概率加权，获得综合评价结果为：使用可用度 $A_o = 0.909$ 、保障设备占用率 $O_{ms} = 0.235$ 、任务可靠度 $R_m = 0.518$ 、保障设备满足率 $S_{ms} = 0.956$ ，将指标仿真值与要求值进行对比，即可完成设计方案的综合仿真验证。

采用 Anylogic 完成仿真验证，包括证明能够完成智能体建模、能够完成智能体交互、能够完成仿真过程、能够输出仿真验证结果（各指标变化过程）、能够实现设计方案的 RMS 综合评价。

5 结论

本文针对现有装备系统 RMS 仿真验证方法难以满足实战化需求的局限性，提出了一种基于多智能体的 RMS 综合仿真验证技术。通过构建环境类、任务类、装备类和保障类智能体，实现了复杂环境和多变任务的动态建模仿真。该技术能够模拟实战环境，并动态调整任务策略，使仿真更贴近实战需求。

在环境建模方面，采用模块化方法设计环境类智能体，模拟空间、自然和外部环境对装备 RMS 性能的影响，并通过智能体交互实现装备性能参数和故障分布动态调整。在任务建模方面，支持任务动态调整和分层分解，根据战场态势和装备状态生成最优任务策略，指导任务执行。

通过两栖车登陆作战案例仿真，验证了该技术能够实现不同环境和任务条件下的装备系统作战活动建模与仿真，并采用多场景评价方法对设计方案进行综合评价验证，为装备系统 RMS 验证提供了新的解决方案。未来可进一步优化智能体交互和环境建模机制，以满足更复杂的实战验证需求。

参考文献:

- [1] 吕学志,冯晓容,谢智歌.考虑 RMS 因素的装备论证多方案分析方法[J].指挥控制与仿真,2024,46(04):21-27.
- [2] 吴迪,黄敬.基于可靠性框图的舰船电力系统可靠性建模[J].船电技术,2019,39(S1):28-31.
- [3] El-Awady A, Ponnambalam K. Integration of simulation and Markov chains to support Bayesian networks for probabilistic failure analysis of complex systems[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 211: 107511.
- [4] 苏续军,吕学志.基于离散事件仿真的多状态多阶段任务系统可靠性分析[J].兵工学报,2017,38(04):776-784.
- [5] 王家林,崔楠楠.基于可靠性框图法的智能变电站继电保护系统可靠性分析[J].光源与照明,2022,(03):138-140.
- [6] 李春阳.发射场典型装备可靠性建模与评估方法研究[D].成都:电子科技大学,2022.
- [7] Feng Q, Zhang Y, Sun B, et al. Multi-level predictive maintenance of smart manufacturing systems driven by digital twin: a matheuristics approach[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 68: 443-454.
- [8] Feng Q, Guo X, Sun B, et al. Reliability Modeling of Dynamic Spatiotemporal IoT Considering Autonomy and Cooperativity Based on Multi-Agent[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2023.
- [9] 成城,陈智杰,郭子铭,等.多智能体协同决策仿真平台研究与开发[J].系统仿真学报,2023,35(12):2669-2679.
- [10] 石鼎,燕雪峰,宫丽娜,等.强化学习驱动的海战场多智能体协同作战仿真算法[J].系统仿真学报,2023,35(04):786-796.
- [11] 蒋鑫,孙天宇,张同舟,等.基于多智能体的常规导弹保障仿真试验研究[J].环境技术,2024,42(12):115-119.
- [12] 王宇琨,王泽,董力维,等.基于分层的智能建模方法的多机空战行为建模[J].系统仿真学报,2023,35(10):2249-2261.
- [13] 罗尚伟.基于多Agent的装备体系任务可靠性建模与仿真研究[D].重庆:重庆邮电大学,2021.
- [14] 赵慧慧.基于多智能体仿真的舰船电子信息系统任务可靠性评估方法[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
- [15] Song Y, Ou J, Witold P, et al. Generalized Model and Deep Reinforcement Learning-Based Evolutionary Method for Multitype Satellite Observation Scheduling[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2024.
- [16] da Rosa M A, da Silva A M L, Miranda V. Multi-agent systems applied to reliability assessment of power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 42(1): 367-374.
- [17] 丁善婷,王淼,董正琼,等.基于多智能体的舰载雷达可靠性、维修性及保障性评估方法[J].中国舰船研究,2021,16(06):52-60.
- [18] 李超,李文斌,高阳.图多智能体任务建模视角下的协作子任务行为发现[J].计算机研究与发展,2024,61(08):1904-1916.
- [19] 周德海,应杰,韩鹏.海战场环境对反水雷作战影响效应建模仿真分析[J].兵器装备工程学报,2024,45(06):127-133+290.
- [20] Guo X, Feng Q, Wu Z, et al. Multi-agent-based failure modeling for uncrewed swarm systems considering cross-layer diffusion characteristics[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 257: 110831.