

http://bhxb.buaa.edu.cn jbuua@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2021.0685

基于多 Agent 的航空机群保障仿真评估分析

丁刚¹, 崔利杰^{1,*}, 韩诚², 王新河², 张峰²

(1. 空军工程大学 装备管理与无人机工程学院, 西安 710051;

2. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710129)

摘 要: 航空机群保障涉及要素广、策略多、交互性强, 仿真分析方法是开展飞机保障决策与评估研究的热点和难点。提出一种机群保障仿真评估方法, 建立多智能体 (Agent) 功能类型与交互关系模型; 对多 Agent 结构进行定义, 并建立模型; 以五型飞机构成的航空机群为仿真对象, 以任务成功率为保障指标进行案例验证与仿真计算分析。结果表明: 各型飞机平均故障间隔时间 (MTBF)、设备故障平均修复时间 (MTTR) 对任务成功率的影响总体趋势相似, 随着 MTBF 的增加任务成功率提升, 随着 MTTR 的增加任务成功率降低。所提方法能够为航空机群维修保障智能决策提供一种可行、有效的方法手段, 支撑基于模型的智能决策优化实现。

关 键 词: 航空机群; 保障; 多智能体; 仿真评估; 敏感性分析

中图分类号: V221⁺.3; TB553

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2023)09-2306-11

在现代战争中, 多平台、高精密设备已成为主导, 多设备协同作战相较于单设备作战效果愈发显著^[1]。航空机群是面向执行一定任务的航空机群, 由相互关联、功能互补的航空保障设备或航空机群, 按照能力需求牵引、综合集成优化原则形成的支撑航空机群保障功能的有机整体^[2-3]。航空机群的保障能力直接影响和制约航空机群的战斗力, 有效评估航空机群保障性一直以来都是航空设备领域的关注重点之一^[4]。针对机群保障体系规模宏大、复杂度高的特点, 采用仿真的方法探究体系能力的作用机理, 研究各类敏感性因素对机群能力的贡献度, 能够有效检验与评估机群的作战能力和效能^[5-6]。

智能体 (Agent)^[7] 仿真实验论和方法有效地实现了复杂系统运行过程仿真, 近年来, 相关学者

运用 Agent 技术解决了诸多方面的问题, 如行为控制^[8-9]、军事仿真^[10-13]、人工智能^[14-15]、智能进化^[16]和控制架构^[17]等。多 Agent 系统^[18]是一组自主的、相互作用的实体, 这些实体共享一个环境, 利用传感器感知, 利用执行器行动, 并赋予预先设计的行为, 且不断学习, 使得多 Agent 的性能逐步提高, 这种系统提供了一种分析问题的分布式视角, 将控制权限分布在各个 Agent 上。多 Agent 解决方案被广泛应用于生产物流车间调度^[19-20]、人机交互^[21-22]、强化学习^[23]、疫情防控^[24]和智能监控^[25]等领域。

近年来对设备保障体系建模与仿真方面的研究有很多。文献 [26] 构建了基于面向对象的 PetriNet (object-oriented PetriNet, OPN) 设备维修保障系统 Petri 网模型, 并利用 CPN-Tools (colored

收稿日期: 2021-11-15; 录用日期: 2022-03-04; 网络出版时间: 2022-03-22 15:24

网络出版地址: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220321.1807.002.html

基金项目: 技术基础科研计划 (212KJ43005)

* 通信作者. E-mail: baffulo@sina.com

引用格式: 丁刚, 崔利杰, 韩诚, 等. 基于多 Agent 的航空机群保障仿真评估分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49 (9): 2306-2316.

DING G, CUI L J, HAN C, et al. Simulation evaluation and analysis of aircraft group support based on multi-agent [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49 (9): 2306-2316 (in Chinese).

PetriNet-tools)验证了其动态性能。文献[27]从系统工程建模和仿真的角度,建立了军事设备保障仿真概念模型。文献[28]提出一种美国国防部架构框架(Department of Defense Architecture Framework, DoDAF)建模框架,该框架基于 DoDAF 元模型(DoDAF meta model, DM2),并定义了所有建模概念及其关系。文献[29]以数据为中心的体系结构建模思路,提出体系结构的语义模型,并构建作战视图、系统视图、能力视图本体模型。

以上研究大多基于离散系统,采用离散系统仿真方法,体系的状态是由离散事件驱动的,难以发现与反映机群保障的非线性、“涌现”性、自适应性及自组织性等特点^[30]。多 Agent 技术是一种自底向上的建模方法,将多 Agent 技术应用于机群保障体系仿真中能够具有很强的适应性,不少学者尝试将多 Agent 技术应用于设备保障体系中。文献[31]针对设备保障运行的实际情况,采用多 Agent 仿真的方法,构建了设备保障体系供应保障系统。文献[32]设计了基于多 Agent 的导弹设备军民一体化维修保障决策支持系统的功能模块和体系结构,并分析了决策支持系统的决策过程。文献[33]将基于 Agent 的离散事件仿真建模技术,引入设备综合保障系统可靠性、维修性、保障性(reliability, maintainability and supportability, RMS)的建模与仿真研究中。文献[30]提出了基于多 Agent 分布式建模与仿真的体系架构,并基于 JavaAgent 开发框架(JavaAgent DEvelopment Framework, JADE)开源平台设计并实现了基于多 Agent 的设备保障体系分布式仿真软件原型系统。

通过以上研究发现,研究的对象主要集中在单飞机层面的设备保障,针对航空机群保障领域,还缺乏一种有效的建模与仿真方法和系统。多 Agent 技术可以模拟航空机群保障系统的每个单元,并实现相互之间复杂的交互关系。目前将多 Agent 技术应用于航空机群保障建模方法的相关研究还比较少,因此,本文针对航空机群保障展开研究,提出一种基于多 Agent 的航空机群保障仿真评估分析方法,以五型 40 架飞机组成空战作战机群,以任务成功率为机群保障评估指标,建立多 Agent 机群保障仿真模型及其求解算法,最后进行仿真试验,验证本文方法的合理性和有效性。

1 航空机群多 Agent 功能类型与交互关系建模

1.1 多 Agent 功能类型设计

多 Agent 模型主要用来表示 2 类实体。一类是保障系统中具有心智概念和理性特征的实体,通过规划、推理和决策实现 Agent 功能,表达指挥人员、设备管理人员、设备乘员、保障人员和维修保障管理人员的智能行为,学习优化任务下达、保障指挥、保障监控、维修实施、器材供应等过程,需要综合各种约束进行资源的调度和分配,其协作关系也非常复杂;另一类是保障系统中通过相对简单的代理之间交互实现体系的智能行为,内部不需要复杂的推理模型,如保障设备、备品备件、保障设施等。航空机群保障性研究的目的是解决构成航空机群的系统及其要素相互作用、相互影响产生的随时间推移而涌现出的体系属性、状态及行为变化。通过对这些属性、状态和行为的分析预测,采取一定的控制方法,引导体系产生出有益的或期望的涌现。进行航空机群保障多 Agent 建模的起点是体系任务,主线是随时间线推进不断发生的各种事件,基础是体系运行涉及的众多实体及其行为,重点是形式化的准确描述各种场景下的实体约束,通过对这些约束的调整来控制引导体系涌现。其中多 Agent 建模的难点则在于面向研究目标刻画各个 Agent 之间的交互关系,设计 Agent 内部的规则、推理和决策模型。

1.2 面向航空机群的多 Agent 交互关系设计

面向航空机群保障研究目标,本文构建的多 Agent 模型包括体系保障性 Agent、保障要素 Agent 和保障行为 Agent 3 大类。体系保障性 Agent 模型包括保障任务 Agent、保障监控 Agent、保障指挥 Agent 和飞机选取 Agent;保障要素 Agent 模型包括组织机构 Agent、机群 Agent、使用人员 Agent、维修机构 Agent、仓库 Agent、保障资源 Agent、保障设备 Agent 和保障人员 Agent;保证行为 Agent 模型包括预防性维修 Agent、修复性维修 Agent、器材供应 Agent 和弹药供应 Agent。

以保障任务 Agent 为例,其目标为保障任务的生成。功能包括从作战指挥机关接收任务想定,解析作战任务、分解任务阶段、产生保障任务、生成保障设备体系对象。交互包括向指挥机关反馈任务完成情况;向保障监控 Agent 传输任务数据;向保障指挥 Agent 发送任务状态消息,接收决策消息等。航空机群保障 Agent 基本功能类型和交互关系如图 1 所示。

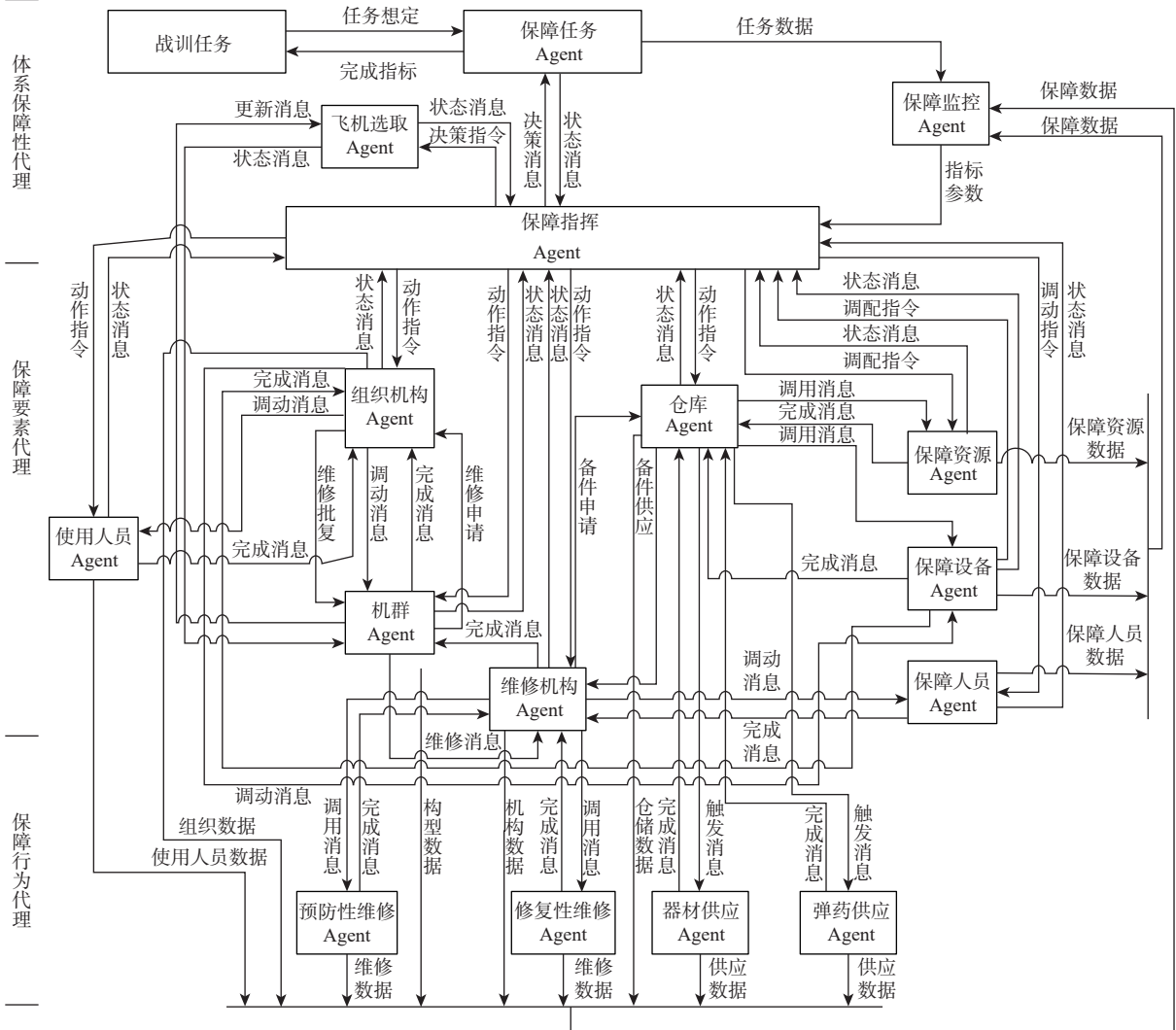


图 1 设备保障 Agent 基本功能类型和交互关系

Fig. 1 Basic function types and interaction relationships of equipment support Agent

2 航空机群的多 Agent 结构定义与控制模型设计

航空机群保障建模涉及众多 Agent 内部结构、交互属性与学习算法的设计,为了实现传统由保障指挥人员和保障人员人工控制和决策的功能,自然考虑到将复杂的要素控制、流程模拟和逻辑决策固化到各类 Agent 内部实现的算法模块中。以 Agent 基本结构框架为基础,从易于构造和实现的角度出发,采取一种基于目标驱动具有内部状态的 Agent 结构^[34],内部状态作为历史信息与当前感知共同决定下一步动作,使 Agent 反应更具理性;同时通过目标完成度的评价,实现 Agent 的自适应。以飞机选取 Agent 设计、机群 Agent 和保障监控 Agent 设计为例,阐明 Agent 设计架构及与其他 Agent 的交互设计。

2.1 飞机选取 Agent 设计

航空机群中飞机选取重点考虑阶段飞机任务

要求,结合飞机动用的影响因素(年度总飞行时间、飞机平均规定寿命值和飞机余寿等),选取执行任务的飞机。飞机选取 Agent 首先从保障任务 Agent 获取决策指令,解析各机型在各任务阶段所需机型数量,根据规则库获取年度总飞行时间 T_{all} 、平均规定寿命 T_{aver} 、飞机总数 N 和阶段剩余寿命 T_r 等。通过飞机选取 Agent 内部推理确定年度机队总余寿与总寿命比值(以下简称“余寿比”),进而确认飞机出动策略,最后给出满足各任务阶段数量要求的飞机编号,并将该数据记录下来,用于与其他 Agent 交互。飞机选取 Agent 功能设计如图 2 所示。

第 n 架飞机的年度标准余寿比 Q 为

$$Q = \left(\frac{T_{all}}{N} + \frac{0.8T_{aver}}{N} \cdot \frac{0.8}{N} \right) n \tag{1}$$

飞机出动的计算式为

$$\max_M (T_r - Q) \tag{2}$$

式中: M 为本科目计划出动的飞机架数。

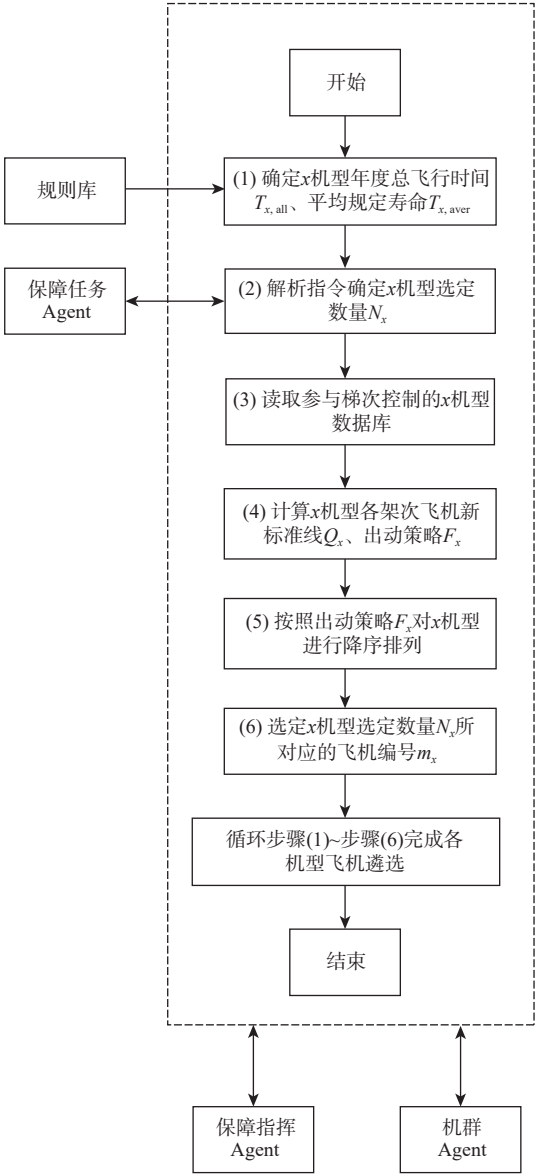


图 2 飞机选取 Agent 功能设计

Fig. 2 Aircraft selection Agent function design

2.2 机群 Agent 设计

航空机群 Agent 作用在于构建完成体系任务的符合各任务阶段的航空机群构型,并给出机群的实时状态。功能包括向保障任务 Agent 获取各机型数量及各任务阶段时间;向保障指挥 Agent 提供构型状态,并接收来自保障指挥 Agent 的命令;根据动作指令向组织机构 Agent 发出维修申请,并能接收来自组织机构 Agent 的调用信息;向维修机构 Agent 发出维修消息,并能接收维修机构 Agent 发送的完成信息;向保障监控 Agent 提供保障数据。

航空机群状态矩阵即考虑飞机发生故障或战损,保障指挥机构调动保障资源和库存物流资源组织维修保障活动,修复完毕后立即返航到指定空域整个任务阶段内的状态序列。

例如有 4 架 A 型飞机, $[0,T]$ 时间段内状态序列

时序分别为

$$\begin{aligned} &[0 \cdots t_{a1} \cdots t_{b1} \cdots t_{a1}^1 \cdots t_{b1}^1 \cdots t_{a1}^2 \cdots t_{b1}^2 \cdots t_{a1}^n \cdots t_{b1}^n \cdots T] \\ &[0 \cdots t_{a2} \cdots t_{b2} \cdots t_{a2}^1 \cdots t_{b2}^1 \cdots t_{a2}^2 \cdots t_{b2}^2 \cdots t_{a2}^n \cdots t_{b2}^n \cdots T] \\ &[0 \cdots t_{a3} \cdots t_{b3} \cdots t_{a3}^1 \cdots t_{b3}^1 \cdots t_{a3}^2 \cdots t_{b3}^2 \cdots t_{a3}^n \cdots t_{b3}^n \cdots T] \\ &[0 \cdots t_{a4} \cdots t_{b4} \cdots t_{a4}^1 \cdots t_{b4}^1 \cdots t_{a4}^2 \cdots t_{b4}^2 \cdots t_{a4}^n \cdots t_{b4}^n \cdots T] \end{aligned}$$

式中: a 和 b 分别为 A 型飞机故障开始时刻和维修后返回任务状态的时刻; t_a^n 和 t_b^n 分别为 A 型飞机第 n 次故障时间和维修后返回的时间,且满足: $t_b^n = t_a^n + t_{amnt}^n + t_{amldt}^n$, 其中, t_{amnt}^n 和 t_{amldt}^n 分别为 A 型飞机第 n 次故障的修复时间和后勤延误时间。

生成 4 架 A 型飞机状态矩阵,矩阵的行代表 4 架飞机;列表代表飞机任务状态,状态时间间隔为 1 min,如果时刻在无故障区间,状态标记为 1,非无故障状态标记为 0,即

若 $t \in [t_{a1}, t_{b1}] \cup [t_{a1}^1, t_{b1}^1] \cup \cdots [t_{a1}^n, t_{b1}^n]$, 则 $a_{ij} = 0$;
若 $t \notin [t_{a1}, t_{b1}] \cup [t_{a1}^1, t_{b1}^1] \cup \cdots [t_{a1}^n, t_{b1}^n]$, 则 $a_{ij} = 1$;

则可以得到飞机状态矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} & \cdots & a_{1T} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} & \cdots & a_{2T} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3n} & \cdots & a_{3T} \\ a_{41} & a_{42} & \cdots & a_{4n} & \cdots & a_{4T} \end{bmatrix}$$

假设某任务阶段时间为 $[0, t]$, 对应机群构型为这 4 架飞机,此阶段任务需要 4 架飞机中至少 3 架无故障工作。则遍历 4 架飞机状态矩阵, t 时刻对应矩阵的第 j 列,判断 4 架飞机完好状态架数 $State_A$ 的值:

如果 $State_A = a_{1j} + a_{2j} + a_{3j} + a_{4j} \geq 3$, 则阶段任务可以完成;

如果 $State_A = a_{1j} + a_{2j} + a_{3j} + a_{4j} < 3$, 则阶段任务失败。

对于不同任务阶段构型的飞机计算步骤相同。如增加 S 型飞机 6 架,要求至少 5 架无故障工作,则同样构建 6 架 S 型飞机状态矩阵,遍历状态矩阵 A 和状态矩阵 S ,判断 $State_A$ 和 6 架飞机完好状态架数 $State_S$ 的值。

如果 $State_A = a_{1j} + a_{2j} + a_{3j} + a_{4j} \geq 3$, 且 $State_S = s_{1j} + s_{2j} + s_{3j} + s_{4j} + s_{5j} + s_{6j} \geq 5$ 同时满足, 则阶段任务可以完成, 否则阶段任务失败。

航空机群 Agent 外部交互及内部工作原理如图 3 所示。

2.3 航空机群保障监控 Agent 设计

航空机群保障监控 Agent 从机群 Agent 获取机群状态信息,通过解析状态信息获取机型体系状态时间序列和任务构型参数,输入总仿真次数 N_s , 通过该 Agent 内部推理判断,记录任务成功次数 n_s , 最终计算出任务成功率并记录,用于与其他 Agent 交互。

以计算任务成功率为例,通过生成的机群时间

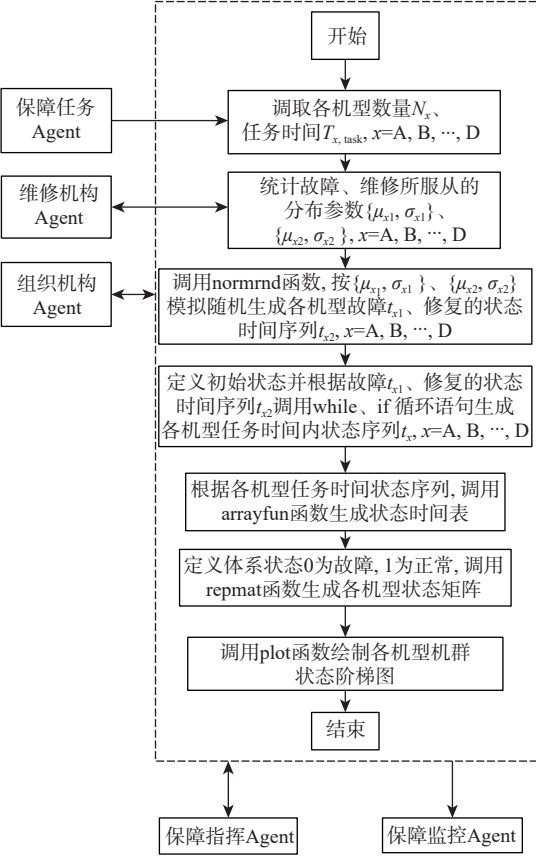


图3 航空机群 Agent 外部交互和内部工作原理

Fig. 3 Aircraft group Agent external interaction and internal working principle

序列,以各机型任务阶段构型为约束,通过判断在仿真过程中各机型是否满足构型要求,来确认任务成功与失败,任务成功率 R 的计算式为

$$R = \frac{n_s}{N_s}$$

(3)

保障监控 Agent 设计如图4所示。

Agent 设计在流程和方法上类似,区别在于功能与智能化要求,输入与输出、交互 Agent 设计,内部实现则主要体现在学习算法和行为模型的不同。

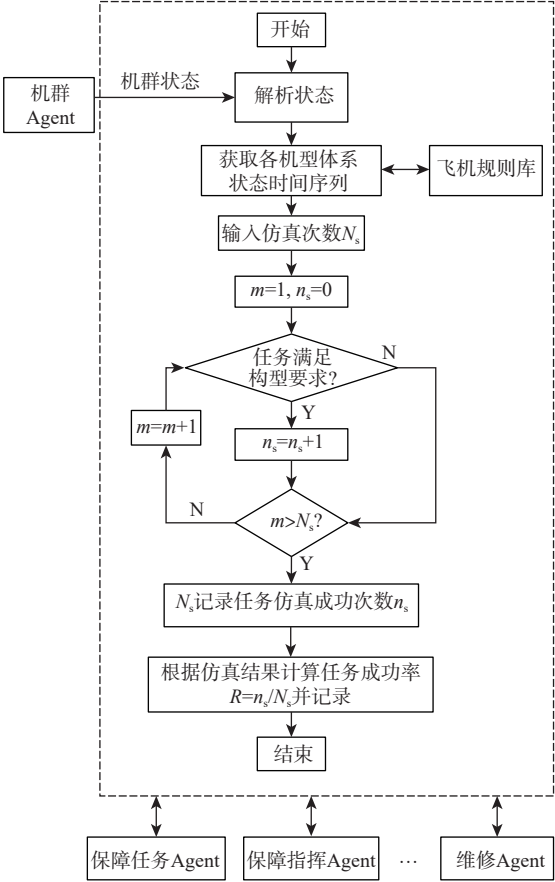


图4 保障监控 Agent 设计

Fig. 4 Guarantee monitoring Agent design

3 航空机群保障仿真评估分析

3.1 航空机群保障案例想定

某次作战行动要求空中作战集团出动 A、B、C、D、E 五型飞机共 40 余架组成空中编队执行任务,任务持续时间约 26 h,包括预警探测阶段 12 h、前出侦查阶段 8 h 和远程攻击阶段 6 h。仿真计算初始输入数据如表 1 所示,表中 n 为要求出动的飞机架数, k 为任务完成要求的最少完好飞机架数。

表1 仿真计算初始输入

Table 1 Initial input of simulation calculation

机型	数量/架	滞空时间/min	任务时间/min			构型要求(k/n)			MTBF/h	MTTR/h
			第1阶段	第2阶段	第3阶段	第1阶段	第2阶段	第3阶段		
A	3	210	12	8	6	1/2	1/2	2/3	[300,20]	[10,2]
B	10	210			6			7/10	[330,25]	[6,2]
C	16	90	12	8	6	5/8	7/10	10/16	[200,30]	[5,1]
D	8	180		8	6		4/6	6/8	[300,50]	[7,2]
E	6	210			6			4/6	[350,30]	[8,2]

本文考虑一定任务条件下的平均故障时间间隔(mean time between failure, MTBF)和平均修复时间(mean time to repair, MTTR)值,取值来源于设备实际使用过程中质量控制部门统计得到的样本,进

行概率拟合得出。

3.2 任务成功率敏感性分析

3.2.1 各型飞机可靠性维修性任务成功率敏感性分析

对各型飞机基本作战单元典型任务场景进行仿真数据敏感性分析, 将 MTBF 和 MTTR 服从的正态分布均值进行步长为 5% 的调整, 以任务成功率为输出指标, 分别进行 30 次仿真, 对数据进行拟

合, 得到各型飞机任务成功率敏感性分析图, 如图 5~图 15 所示。

通过仿真结果可知, 各型飞机 MTBF 和 MTTR 对任务成功率的影响总体趋势相似, 随着 MTBF 的增加任务成功率提升, 随着 MTTR 的增加任务成功率降低。由于各型飞机初始可靠性、维修性、任务强度参数要求不同, 拟合曲线在局部呈现不同的变

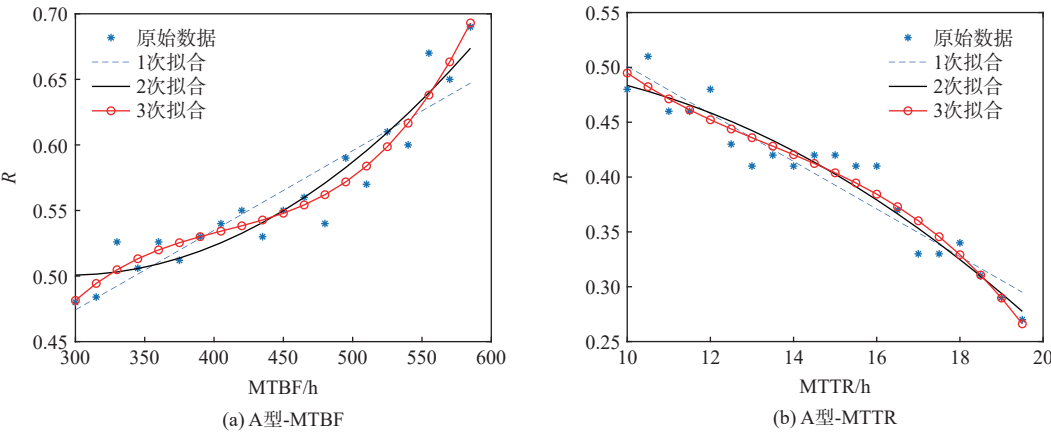


图 5 A 型-MTBF 和 A 型-MTTR 步长 5% 任务成功率敏感性分析

Fig. 5 Sensitivity analysis of A type-MTBF and A type-MTTR step size 5% mission success rate

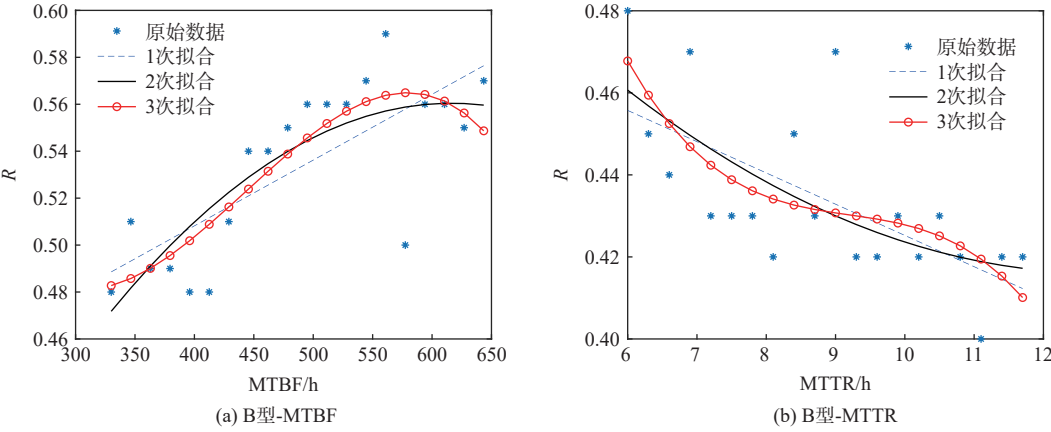


图 6 B 型-MTBF 和 B 型-MTTR 步长 5% 任务成功率敏感性分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of B type-MTBF and B type-MTTR step size 5% mission success rate

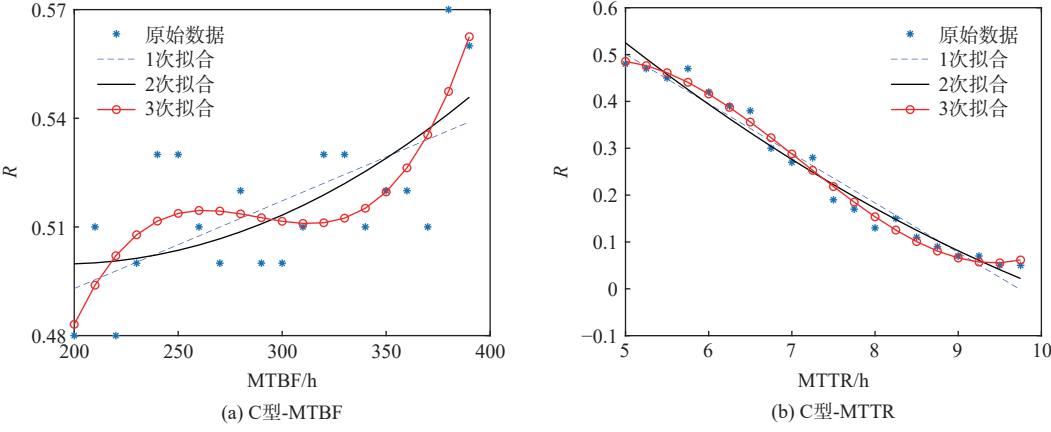


图 7 C 型-MTBF 和 C 型-MTTR 步长 5% 任务成功率敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of C type-MTBF and C type-MTTR step size 5% mission success rate

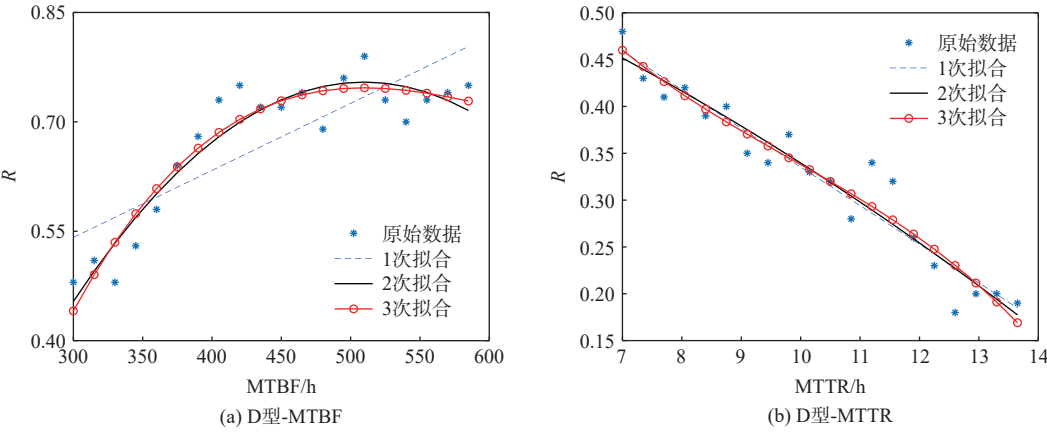


图 8 D 型-MTBF 和 D 型-MTTR 步长 5% 任务成功率敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of D type-MTBF and D type-MTTR step size 5% mission success rate

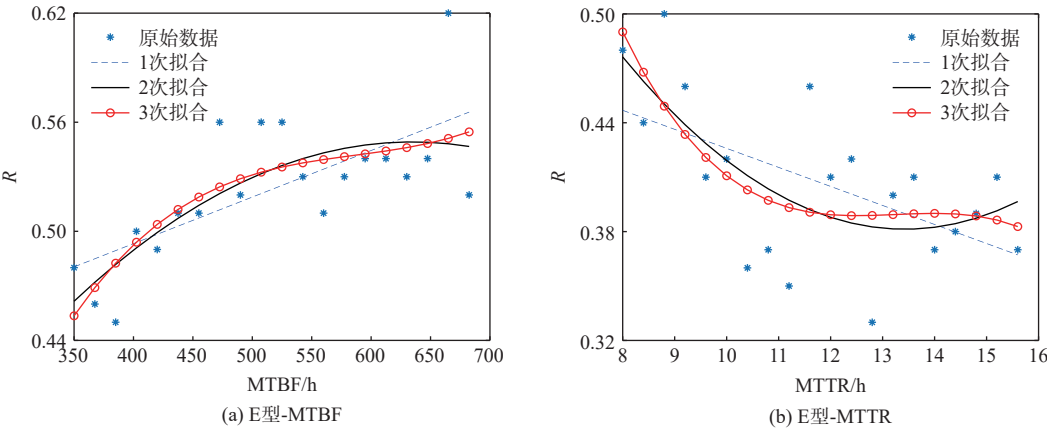


图 9 E 型-MTBF 和 E 型-MTTR 步长 5% 任务成功率敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of E type-MTBF , and E type-MTTR step size 5% mission success rate

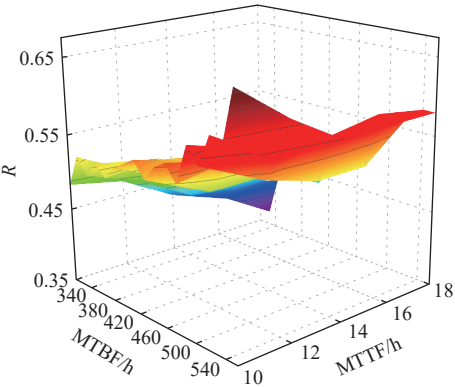


图 10 A 型-MTBF-5% 和 A 型-MTTR-20% 步长任务成功率敏感性分析

Fig. 10 Sensitivity analysis of A type-MTBF-5% and A type-MTTR-20% step size mission success rate

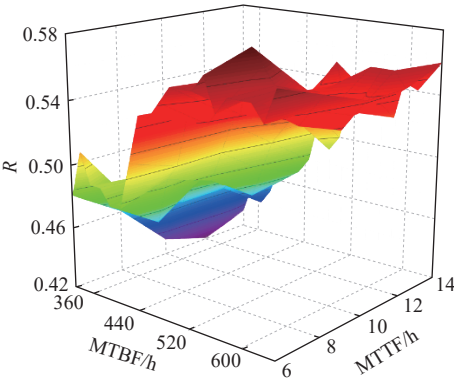


图 11 B 型-MTBF-5%、B 型-MTTR-20% 步长任务成功率敏感性分析

Fig. 11 Sensitivity analysis of B type-MTBF-5% and B type-MTTR-20% step size mission success rate

化规律。以 A 型飞机为例,当 A 型飞机 MTBF 服从的均值增加时,故障间隔时间增加,体系任务成功率呈现上升的趋势,从初始 0.48 上升至 0.69,当 MTBF=585 h 时,任务成功率最高达到 0.69;当 MTTR 服从的均值增加,修复时间逐步增加,体系任务成

功率呈现下降趋势,从初始 0.48 下降至 0.27,当 MTTR=19.5 h 时,任务成功率最低到 0.27;当对 MTBF 服从的均值按照 5%,MTTR 服从的均值同步按照 20% 步长进行变化,即 MTBF 增加、MTTR 减少,通过得到的三维颜色映射曲面图进行综合敏感性分

析得知, 体系任务成功率呈现上升趋势, 当 [MTBF, MTTR] 取值为 [300,18] h 时任务成功率取最小值, 为 0.37, 当 [MTBF, MTTR] 取值为 [585,12] h 时任务成功率取最大值, 为 0.69。

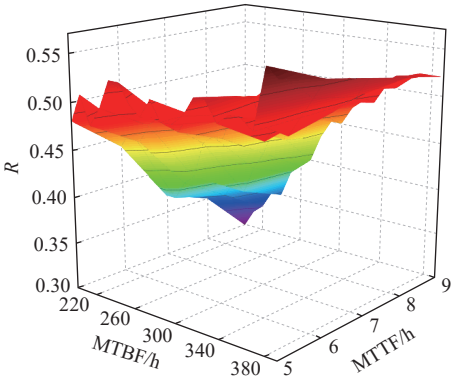


图 12 C 型-MTBF-5%、C 型-MTTR-20% 步长任务成功率敏感性分析

Fig. 12 Sensitivity analysis of C type-MTBF-5% and C type-MTTR-20% step size mission success rate

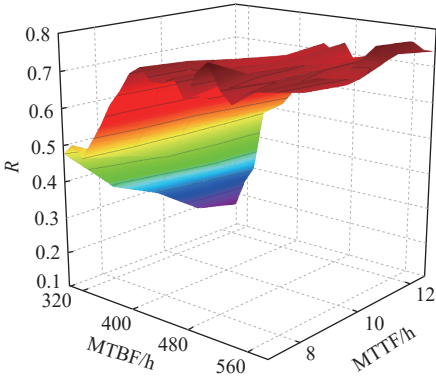


图 13 D 型-MTBF-5%、D 型-MTTR-20% 步长任务成功率敏感性分析

Fig. 13 Sensitivity analysis of D type-MTBF-5% and D type-MTTR-20% step size mission success rate

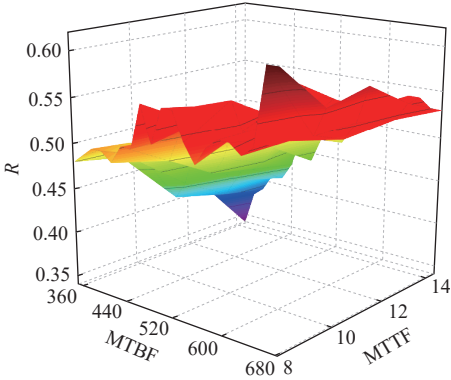


图 14 E 型-MTBF-5%、E 型-MTTR-20% 步长任务成功率敏感性分析

Fig. 14 Sensitivity analysis of E type-MTBF-5% and E type-MTTR-20% step size mission success rate

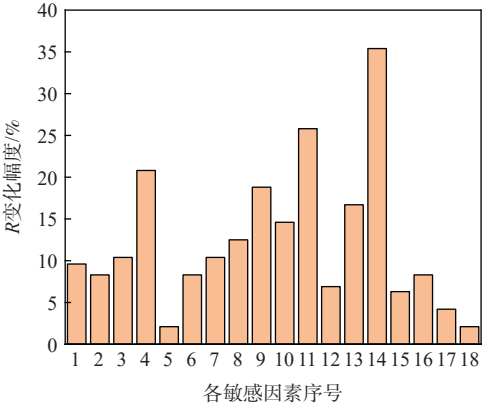


图 15 综合敏感性分析图

Fig. 15 Comprehensive sensitivity analysis chart

3.2.2 机型与任务强度敏感性对比分析

对各机型任务强度及各阶段任务时间进行步长为 20% 的调整, 进行仿真计算。各敏感性因素步长 20% 综合敏感性分析图如图 15 所示, 计算统计数据如表 2 所示。

表 2 任务强度敏感性分析

Table 2 Mission intensity sensitivity analysis					
类别	序号	敏感性因素	R		R变化幅度/%
			初始值	变化值	
各机型 MTBF	1	A型-MTBF增加20%(300~360)	0.48	0.526	9.6
	2	B型-MTBF增加20%(330~396)	0.48	0.52	8.3
	3	C型-MTBF增加20%(200~240)	0.48	0.53	10.4
	4	D型-MTBF增加20%(300~360)	0.48	0.58	20.8
	5	E型-MTBF增加20%(350~420)	0.48	0.49	2.1
各机型 MTTR	6	A型-MTTR增加20%(10~12)	0.48	0.44	-8.3
	7	B型-MTTR增加20%(6~7.2)	0.48	0.43	-10.4
	8	C型-MTTR增加20%(5~6)	0.48	0.42	-12.5
	9	D型-MTTR增加20%(7~8.4)	0.48	0.39	-18.8
	10	E型-MTTR增加20%(8~9.6)	0.48	0.41	-14.6
任务强度	11	A型飞机任务强度降低20%(2/3→1/3)	0.48	0.60	25.8
	12	B型飞机任务强度降低20%(5/10→4/10)	0.48	0.51	6.9
	13	C型飞机任务强度降低20%(4/10→3/10)	0.48	0.56	16.7
	14	D型飞机任务强度降低20%(6/8→5/8)	0.48	0.65	35.4
	15	E型飞机任务强度降低20%(4/6→3/6)	0.48	0.51	6.3
阶段任务时间	16	第1阶段时间减少20%(9.6 h)	0.48	0.52	8.3
	17	第2阶段时间减少20%(6.4 h)	0.48	0.50	4.2
	18	第3阶段时间减少20%(4.8 h)	0.48	0.49	2.1

4 结 论

1) 本文方法不仅适用于航空机群, 同样可推广至其他类似体系和复杂系统中。所提 Agent 模型构建与实现, 针对不同实体或行为进行分析提炼后可推广至其他仿真活动中。本文围绕典型想定所开展的敏感度分析只列举了个别变量, 且仅以随机变量的形式进行抽样计算, 如对其他变量进行分析, 还需对其取值空间和不确定性形式进行细化, 以便得到更加精准的结果, 为实际保障决策与评估提供科学有效的支持。

2) 本文方法能够为体系化作战开展预先保障推演或实时保障决策提供一种研究思路。另外, 提出的保障功能与交互行为机制、Agent 模型实现、敏感性评估等可作为体系级保障仿真的一种有益探索, 支撑保障决策向更准、更快、更科学转变。

参考文献 (References)

[1] 汤润泽, 张承龙, 李林林, 等. 多武器跨域智能协同对空作战应用及关键技术[J]. 现代防御技术, 2021, 49(2): 26-34.
TANG R Z, ZHANG C L, LI L L, et al. Research on applications and key technologies of multi-weapons in cross-domain intelligent coordination air combat[J]. Modern Defence Technology, 2021, 49(2): 26-34(in Chinese).

[2] 丁刚, 张琳, 崔利杰, 等. 航空装备体系保障性分析仿真运行控制[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(1): 58-62.
DING G, ZHANG L, CUI L J, et al. Simulation operation control of aviation equipment system of system supportability analysis[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(1): 58-62(in Chinese).

[3] 丁刚, 张琳, 崔利杰, 等. 基于任务的航空装备保障体系概念建模研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(1): 39-46.
DING G, ZHANG L, CUI L J, et al. Research on concept modeling of mission-based aviation equipment support system of systems[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2020, 34(1): 39-46(in Chinese).

[4] 崔利杰, 丛继平, 丁刚, 等. 基于不确定性的航空装备体系保障性评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(12): 2452-2461.
CUI L J, CONG J P, DING G, et al. Supportability evaluation of aviation equipment system based on uncertainty[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(12): 2452-2461(in Chinese).

[5] 杨东昌, 马永忠, 宋科. 武器装备体系需求论证研究[J]. 中国设备工程, 2021(12): 250-251.
YANG D C, MA Y Z, SONG K. Research on requirement demonstration of weapon equipment system[J]. China Plant Engineering, 2021(12): 250-251(in Chinese).

[6] 姜忠钦, 张明智, 张斌, 等. 基于仿真的武器装备体系论证关键问题研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(5): 19-23.
JIANG Z Q, ZHANG M Z, ZHANG B, et al. Study on key questions of weapon system-of-systems demonstration based on simulation[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Techno-

logy, 2009, 20(5): 19-23(in Chinese).

[7] KAVIARI F, MESGARI M S, SEIDI E, et al. Simulation of urban growth using agent-based modeling and game theory with different temporal resolutions[J]. Cities, 2019, 95: 102387.

[8] NGUYEN N D, NGUYEN T, NAHAVANDI S. Multi-agent behavioral control system using deep reinforcement learning[J]. Neuro-computing, 2019, 359: 58-68.

[9] HUANG J, CAO M, ZHOU N, et al. Distributed behavioral control for second-order nonlinear multi-agent systems[J]. IFAC-PapersOnLine, 2017, 50(1): 2445-2450.

[10] 黄柯棣, 刘宝宏, 黄健, 等. 作战仿真技术综述[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(9): 1887-1895.
HUANG K D, LIU B H, HUANG J, et al. A survey of military simulation technologies[J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2004, 16(9): 1887-1895(in Chinese).

[11] 李宏亮, 程华, 金士尧. 基于Agent的复杂系统分布仿真建模方法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(8): 209-213.
LI H L, CHENG H, JIN S Y. Research of modeling method for Agent-based complex systems distributed simulation[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(8): 209-213(in Chinese).

[12] 饶明波. 基于Agent战场仿真实体模型研究与实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
RAO M B. Agent-based battlefield simulation entity model research and implementation[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011 (in Chinese).

[13] 陈坚, 廖守亿, 邓方林. 基于多Agent系统的计算机生成兵力建模研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(10): 1924-1928.
CHEN J, LIAO S Y, DENG F L. On modeling computer generated forces based on multi-agent systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(10): 1924-1928(in Chinese).

[14] 阿纳达·佩雷兹·卡斯塔诺. 人工智能实战[M]. 敖富江, 周云彦, 李博, 等, 译. 北京: 清华大学出版社, 2019: 27-29, 51-73.
AMALDO P C. Practical artificial intelligence[M]. AO F J, ZHOU Y Y, Li B, et al. translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2019: 27-29, 51-73 (in Chinese).

[15] 武强. 多智能体强化学习在城市交通信号控制中的研究与应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
WU Q. Research and application of multi-agent reinforcement learning in traffic signal control[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020 (in Chinese).

[16] 梁鹏, 王海燕, 王耀辉. 由反应式Agent构造智能Agent的方法[J]. 东北电力大学学报(自然科学版), 2008, 28(2): 94-97.
LIANG P, WANG H Y, WANG Y H. The method by reflection type agent structure intelligence agent[J]. Journal of Northeast Dianli University (Natural Science Edition), 2008, 28(2): 94-97(in Chinese).

[17] MOSTAFA S A, MUSTAPHA A, GUNASEKARAN S S, et al. An agent architecture for autonomous UAV flight control in object classification and recognition missions[J]. Soft Computing, 2023, 27(1): 391-404.

[18] TAJALLI S Z, KAVOUSHI-FARD A, MARDANEH M. Multi-agent-based optimal power scheduling of shipboard power systems[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 74: 103137.

[19] SHPILEVOY V, SHISHOV A, SKOBELEV P, et al. Multi-agent system “Smart Factory” for real-time workshop management in

aircraft jet engines production[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2013, 46(7): 204-209.

[20] LU Z Y, ZHUANG Z L, HUANG Z Z, et al. A framework of multi-agent based intelligent production logistics system[J]. Procedia CIRP, 2019, 83: 557-562.

[21] ZHANG X, SUN Y C, ZHANG Y J, et al. Multi-agent modelling and situational awareness analysis of human-computer interaction in the aircraft cockpit: A case study[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2021, 111: 102355.

[22] LIU X, GE S S. Optimized control for human-multi-robot collaboration via multi-agent adaptive dynamic programming[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(2): 9207-9212.

[23] ZHANG L X, LI J C, ZHU Y A, et al. Multi-agent reinforcement learning by the actor-critic model with an attention interface[J]. Neurocomputing, 2022, 471: 275-284.

[24] CASTRO B M, MELO Y D AD, SANTOS N F D, et al. Multi-agent simulation model for the evaluation of COVID-19 transmission[J]. Computers in Biology and Medicine, 2021, 136: 104645.

[25] VALLEJO D, CASTRO-SCHEZ J J, GLEZ-MORCILLO C, et al. Multi-agent architecture for information retrieval and intelligent monitoring by UAVs in known environments affected by catastrophes[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2020, 87: 103243.

[26] NING H, SHI Y B, GAO X J. Dynamic simulation of the equipment repair support system based on the OPN model[J]. Procedia Engineering, 2011, 23: 284-289.

[27] ZHANG W J, KANG R, GUO L H, et al. Study on military equipment support modeling and simulation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(2): 142-146.

[28] GRADY J O. System modeling using the DoD architecture framework[C]//System Requirements Analysis. Amsterdam: Elsevier, 2006: 275-287.

[29] 李亢, 李新明, 刘东. 基于语义元模型的装备体系结构建模方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(11): 2503-2512.

LI K, LI X M, LIU D. Modeling method for weapon system of systems structure based on semantic meta-model[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(11): 2503-2512(in Chinese).

[30] 尹丽丽, 寇力, 范文慧. 基于多Agent的装备保障体系分布式建模与仿真方法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(12): 3185-3194.

YIN L L, KOU L, FAN W H. Distributed modeling and simulation method of equipment support system based on multi agent[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(12): 3185-3194(in Chinese).

[31] 邢彪, 曹军海, 宋太亮. 基于多Agent仿真的装备保障体系供应保障系统设计与实现[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(2): 102-105.

XING B, CAO J H, SONG T L. Design and implementation for the supply support system of equipment support system of systems based on multi-agent simulation[J]. Command Control & Simulation, 2016, 38(2): 102-105(in Chinese).

[32] 尹延涛, 徐衡博, 高杰, 等. 基于Multi-Agent的导弹装备军民一体化维修保障决策支持系统研究[J]. 质量与可靠性, 2012(4): 12-14.

YIN Y T, XU H B, GAO J, et al. Research on multi-agent-based decision support system for military-civilian integrated maintenance support of missile equipment[J]. Quality and Reliability, 2012(4): 12-14(in Chinese).

[33] 黄海, 曹军海, 单志伟. 基于MAS的装备综合保障仿真系统设计[J]. 装甲兵工程学院学报, 2008, 22(3): 17-21.

HUANG H, CAO J H, SHAN Z W. Design of the MAS-based material integrated support simulation system[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2008, 22(3): 17-21(in Chinese).

[34] 王步云, 张国. 一种适用于人工生命作战仿真的混合Agent结构[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(11): 2515-2518.

WANG B Y, ZHANG G. Mixed agent architecture for warfare-simulation based on artificial life[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(11): 2515-2518(in Chinese).

Simulation evaluation and analysis of aircraft group support
based on multi-agent

DING Gang¹, CUI Lijie^{1,*}, HAN Cheng², WANG Xinh², ZHANG Feng²

- (1. School of Equipment Management and UAV Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
- 2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Aircraft group support involves a wide range of elements, multiple strategies, and strong interaction. Its simulation analysis method is a hot and difficult point in conducting research on aircraft group support decision-making and evaluation. This paper first establishes the multi-agent function type and interaction relationship model; Secondly, defines the multi-agent structure and establish the model; Finally, Using the aircraft group consisting of five types of aircraft as the simulation object, the case validation and simulation analysis are conducted based on the mission success rate as the guarantee indicators. The results show that the mean time between failures (MTBF) and the mean time to repair (MTTR) of various types of fighters have similar effects on the mission success rate. As the MTBF increases, the mission success rate increases. As the MTTR increases, the mission success rate decreases. The proposed support simulation evaluation method can provide a feasible and effective method for the intelligent decision-making of aircraft group maintenance support, and support the realization of model-based intelligent decision-making optimization.

Keywords: aircraft group; support; multi-agent; simulation evaluation; sensitivity analysis

Received: 2021-11-15; **Accepted:** 2022-03-04; **Published Online:** 2022-03-22 15:24
URL: kns.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20220321.1807.002.html
Foundation item: Basic Scientific Research Program of Technology (212KJ43005)
*** Corresponding author.** E-mail: baffulo@sina.com