文章编号:1674-8190(2025)06-061-10

基于虚拟现实的舰面保障流程优化仿真研究

穆琳[1],吴家仁[1],刘东[1],田永亮[2],杨思超[2],刘虎[2]
(1.中航工业沈阳飞机设计研究所 专业工程部,沈阳 110035)
(2.北京航空航天大学 航空科学与工程学院,北京 100083)

摘　要: 舰载机的舰面保障流程及保障时间对其整体出动能力有重要影响,提出采用启发式算法结合三维建模虚拟仿真的方法来解决舰载机舰面保障流程优化问题。使用考虑多重约束的启发式算法求解舰载机舰面保障时序方案,缩短舰载机舰面保障流程的耗时;基于虚拟现实平台搭建舰载机保障流程仿真环境,对舰载机舰面保障作业流程进行高精度组件化三维建模,通过细粒度的舰载机舰面保障流程可视化仿真推演和空间干涉检测,对人工调度或算法求解出的舰载机舰面保障时序方案进行验证,证明了其合理性和可行性,且验证评估结果能够支持舰载机舰面保障时序方案的进一步优化。

关键词: 舰面保障;虚拟现实;调度优化;仿真推演;遗传算法
中图分类号: V271.4+92　　**文献标识码:** A
DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.06.07

Research on flight deck operation process optimization based on virtual reality

MU Lin[1], WU Jiaren[1], LIU Dong[1], TIAN Yongliang[2], YANG Sichao[2], LIU Hu[2]
(1. Professional Engineering Department, AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)
(2. School of Aeronautics Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The flight deck operation process and support time of carrier-based aircraft have an important impact on the overall dispatch capability. Aiming at the optimization of the flight deck operation process of carrier-based aircraft, a method of using heuristic algorithm combined with 3D modeling and virtual simulation is proposed, and the heuristic algorithm considering multiple constraints is used to solve the time-series scheme of flight deck operation for carrier-based aircraft and shorten the time required for the carrier surface support process. The support process is time-consuming. Based on the virtual reality platform, the carrier-based aircraft support process simulation environment is built, and the high-precision component 3D modeling of the carrier-based aircraft flight deck operation process is carried out, and the fine-grained visual simulation of the carrier-based aircraft flight deck operation process is carried out. Deduction and space interference detection are used to verify the carrier-based aircraft flight deck operation sequence scheme solved by manual scheduling or algorithm, evaluate its rationality and feasibility, and verify that the evaluation results can support the further optimization of the carrier-based aircraft flight deck operation timing scheme.

Key words: flight deck operation; virtual reality; scheduling optimization; simulation deduction; genetic algorithm

收稿日期: 2024-05-11;　**修回日期:** 2024-06-25
通信作者: 田永亮(1985—),男,博士,副教授。E-mail: tianyl@buaa.edu.cn
引用格式: 穆琳,吴家仁,刘东,等. 基于虚拟现实的舰面保障流程优化仿真研究[J]. 航空工程进展,2025,16(6):61-70.
MU Lin, WU Jiaren, LIU Dong, et al. Research on flight deck operation process optimization based on virtual reality[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(6): 61-70. (in Chinese)

0 引 言

舰载机是航母的核心战斗力构成，其出动能力是衡量航母综合作战能力的关键指标[1]。舰载机在每次出动之前，都需要在舰面完成一系列机务勤务保障工作，这一系列保障工作的高效完成是舰载机出动能力的基础和保证[2]。

目前主流的舰载机舰面保障方式是“一站式”保障，即在保障流程中，舰载机在舰面的停机位上固定，保障人员携带设备在舰面转移，对舰载机开展保障作业。舰载机舰面保障流程较为复杂，包括加油、充氧、挂载武器、补充特种气体等多项作业，涉及到多类人员和多种设备，而舰面空间狭小，尤其是舰载机周边的作业空间有限，如何合理地利用有限的人员、设备、空间资源提高舰载机舰面保障的效率，对于提升舰载机出动能力具有重要意义，也是目前研究的一个难点。

现阶段，关于舰载机舰面保障调度问题的优化研究集中在保障流程时序规划、保障资源配置等方面，研究方法多为建立离散模型，以启发式算法和最优化方法进行求解，也有研究人员进行了智能决策的研究。Dastidar等[3]提出了基于飞行甲板作业排队网络模型的航母随机调度方法，以为舰载机服务的不同站点为节点建立网络模型，使用差分进化算法寻找最优调度策略；史玮韦等[4]使用结合和声算法的遗传算法对舰载机机务准备调度问题进行研究；苏析超等[5]使用遗传算法对舰载机甲板机务勤务保障问题进行了多目标优化求解，并比较了不同保障机组模式下的保障效率；张洪涛等[6]将机群保障资源配置问题抽象为NP-hard问题，使用启发式搜索策略进行优化求解；冯强等[7]基于多智能体技术构建舰载机作业动态调度模型，结合遗传算法与合同网算法求解舰载机在舰面的动态保障调度方案；李超等[8]对机务准备流程进行模块化建模，采用基于图结构模型与聚类分析的流程模块k-划分算法对机务准备流程进行优化；Ryan等[9]将舰面指挥人员的舰面调度决策意图和决策经验总结为舰面调度规则，形成了基于专家经验的启发式算法，并对比了基于专家经验的启发式方法和整数线性规划方法的调度效果，证明二者均可用于解决舰载机舰面作业规划问题，但启发式方法的决策风格更倾向于安全保守；谭大力等[10]进一步比较了基于分支定界法的混合整数线性规划求解与启发式算法求解的性能差异。

在舰载机舰面保障作业调度智能决策方面，Ryan等[11-12]和Michini等[13]开发了航母甲板作业规划决策系统（Deck Operations Course of Action Planner，DCAP），该系统用于甲板作业调度的自动规划算法能够基于逆向强化学习吸收专家经验，以提高自身提出策略的合理性；胡钰湄[14]将地面机群保障问题拆分为停机位分配问题和保障资源匹配问题，采用Q-Learning算法进行求解；郭之俊等[15]结合了图示评审技术（Graphical Evaluation and Review Technique，GERT）和马尔科夫决策过程，通过在GERT网络中添加决策点的方法阐述了维修保障决策对作业时间的影响，并给出了蒙特卡洛仿真结果。

在舰面调度虚拟现实仿真方面，Sastry等[16]建立了用于航母甲板指挥操作训练的虚拟现实仿真系统原型，受训人员通过肢体动作与仿真系统交互，指挥舰载机在舰面的行动。

韩维等[17]对舰面路径规划的研究关注到了舰载机在舰面移动时的空间约束问题，为舰面障碍物建立二维凸壳模型，在舰载机移动时进行碰撞检测；另有部分研究人员在对舰载机舰面保障流程进行研究时，对舰面的空间约束模型更加简化，舰面的空间资源多被简化为二维平面，划分成停机位和固定的舰面站位进行资源匹配[5,18]。但在实际的舰载机舰面保障流程中，保障人员需要进入机舱、机翼下方等狭小位置作业，保障人员和保障设备在三维空间中占用的空间是动态变化的，为舰面保障作业匹配固定的空间资源显然不够精确；且保障人员和保障设备在不同位置间移动需要一定的时间，离散模型无法对人员和设备的移动时间进行求解。因此，将这些方法解算出的舰面保障时序方案应用到实际的舰面保障作业中时，进行保障作业的人员和设备之间很可能产生预料之外的空间冲突，导致部分保障作业相较于理想的时序方案延后，整个保障流程的耗时延长，解算出的舰面保障时序方案无法发挥预期的作用。

本文针对舰载机舰面保障流程优化问题，采用启发式算法结合三维建模虚拟仿真方法进行研究。以舰面保障流程耗时最短为优化目标，建立

时序、空间与逻辑等多约束模型,采用时序规划遗传算法求解舰面保障时序优化结果,并通过建立舰面保障流程优化虚拟现实仿真验证系统,进行仿真示例验证。

2　舰面保障流程时序规划方法

在"一站式"保障下的机组制保障模式下,若干名保障人员组成一个保障组,携带各种设备对一架舰载机进行舰面保障作业,舰面保障流程是一个包含 n 个舰面保障活动的集合 $J=\{1,2,3,\cdots,n\}$,各保障活动以编号表示。舰面保障流程时序规划算法的优化目标是完成舰面保障流程的耗时 $C_{\max}$ 最短。

$$\min\ C_{\max}=\max_{\forall j\in J}(T_j+d_j) \tag{1}$$

式中:T_j 为保障活动 j 的开始时刻;d_j 为保障活动 j 的耗时。

根据舰面保障作业约束条件属性,可将舰面保障涉及的多种约束划分为时序与逻辑约束和资源约束两大类。通过总结优化目标、安全作业规则和舰面保障调度决策人员的经验,建立时序与逻辑约束模型,在不同保障活动之间建立先后关系和兼容性方面的硬性约束,保证舰面保障的作业过程不具有危险性,且在逻辑上合理。资源约束可分为保障人员和设备约束以及空间资源约束,在进行时序规划时将资源匹配给具体的保障活动。

2.1　时序约束

一些保障活动必须在特定的保障活动完成之后才能开展,如接通舰面电源后才能进行电路检查,这些必须先完成的保障活动称为该保障活动的紧前活动。对保障活动 j,其紧前活动集合 P_j 中的每个保障活动 p 的完成时刻(即保障活动 p 的开始时间 T_p+持续时间 d_p)不晚于保障活动 j 的开始时刻 T_j。考虑到保障人员和保障设备在不同保障位之间移动需要一定的时间,有:

$$T_j\geqslant T_p+d_p+\Delta_{kpj}\quad(\forall p\in P_j,\forall j\in J) \tag{2}$$

式中:Δ_{kpj} 为第 k 种资源(可能是人员或设备)从进行保障活动 p 时所在的保障位转移到进行保障活动 j 时所在的保障位需要的时间。

2.2　逻辑约束

出于作业安全性等考虑,规定一些保障活动不能同时开展,比如同一架舰载机的加油和挂弹作业不能同时开展。即一个逻辑约束集合 L 中的所有保障活动,各保障活动进行的时间段不能产生重叠。

$$(T_i,T_i+d_i)\cap(T_j,T_j+d_j)=\varnothing\quad(\forall i,j\in L,i\neq j) \tag{3}$$

2.3　首先开始的活动

一些保障活动必须在保障流程的最初开展,这类保障活动的集合记为 F。

$$T_f=0\quad(\forall f\in F) \tag{4}$$

2.4　保障人员和设备约束

保障活动在作业过程中需要一定数量的各专业人员和设备。这些人员和设备均为独占性资源,在为保障活动 j 安排时序之前,需要确定在保障活动 j 进行期间 (T_j,T_j+d_j),需要的各专业人员和设备数量足够。

$$v_k\geqslant q_{jk}\quad(\forall t\in(T_j,T_j+d_j),\forall k\in K,\forall j\in J) \tag{5}$$

式中:K 为全部保障人员和设备种类的集合;v_k 为第 k 类保障人员或设备可用的数量;q_{jk} 为保障活动 j 需要的第 k 类保障人员或设备的数量。

2.5　自由人约束

各保障活动需要的人员的工种通常是确定的,但也有保障活动除需要确定工种的人员外,还需要若干个任意工种的保障人员参与作业,这类工种不确定而数量需求确定的保障人员称为自由人,在某一时刻,未被安排至正在开展的保障活动的人员均可作为自由人进行安排。

$$\sum_{k=1}^{K}v_k\geqslant q_{j\mathrm{free}}\quad(\forall t\in(T_j,T_j+d_j),\forall k\in K,\forall j\in J) \tag{6}$$

式中:$q_{j\mathrm{free}}$ 为保障活动 j 需要的自由人的数量。

在保障活动 j 进行的时间段中,需要保证自由人数量始终足够,但允许自由人的具体人员变更,如第 1～3 分钟由 2 号特设员作为保障活动 j 占用的

自由人，第3～4分钟由1号机械员作为保障活动j占用的自由人。

2.6 空间约束

将空间资源划分为舰载机周围的多个保障位以及等待作业区域，保障人员在保障位上对舰载机进行保障，各保障作业与固定的保障位匹配；负责的保障活动完成后，保障人员回到等待区域。

若多个保障活动需要占用同一个保障位，则这些保障活动进行的时间段不能产生重叠，即

$$(T_i, T_i + d_i) \cap (T_j, T_j + d_j) = \varnothing \quad (\forall i, j \in S, i \neq j) \tag{7}$$

式中：S为需要占用某一个保障位的保障活动的集合。

2.7 时序规划遗传算法

采用实数编码方式对舰面保障时序方案进行编码，以保障活动编号作为基因的值，并引入调度序列标准化。使用改进的双种群遗传算法对舰面保障模型进行求解，得到舰面保障时序方案，算法逻辑图如图1所示。

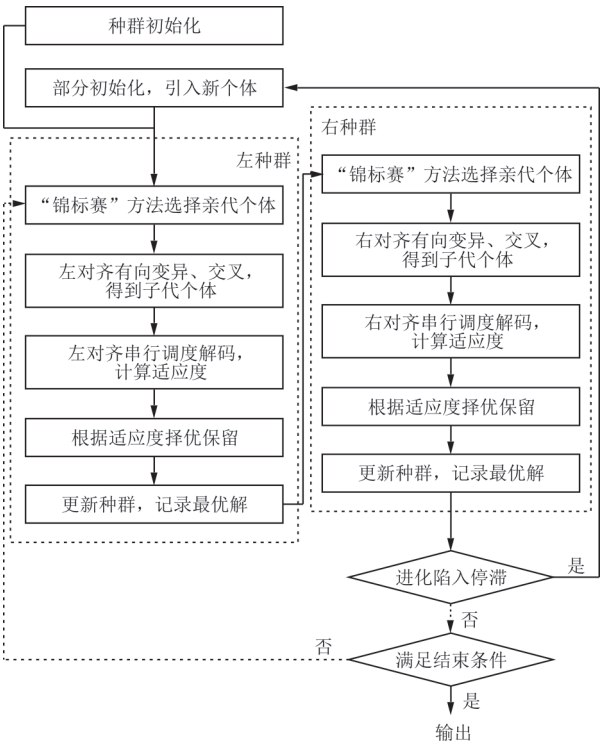


图1 舰面保障流程时序规划方法逻辑图

Fig. 1 Logic diagram of timing planning method for ship flight deck operation process

在双种群遗传算法求解中，采用双层实数编码的方式描述舰面保障活动集$J=\{0, 1, 2, \cdots, 24\}$，当有$f$架舰载机时，可以得到舰面保障活动集的编码集合为

$$J_{\text{all}} = \{1.00, 1.01, \cdots, 1.24, 2.00, \cdots, f + 0.24\} \tag{8}$$

其中，编码的整数部分作为第一层编码，记录舰载机编号；小数部分作为第二层编码，记录舰面保障活动编号。

由于舰面保障调度问题存在紧密的紧前紧后关系约束，会在一定程度上抵消交叉和变异的效果，因此采用基于顺序的交叉算子进行交叉操作。

基于顺序的交叉算子随机选择亲代中的若干个位置，并将该亲代中所选位置上的基因保持原本顺序，施加到另一个亲本上。通过“二元锦标赛”机制在除选定亲本以外的全部其他个体中随机选取两个个体，取其中适应度更优的个体作为另一个亲本。基于顺序的交叉算子能够保证在交叉完成后，被操作的若干个基因之间仍然符合紧前紧后关系约束，产生的两个新的子代仍然对应可行解。

编码变异处理方法为插入变异算子，在染色体中随机选取若干位置，将该位置的基因移除后插入到另外若干个随机选择的位置，并通过基于Rollout的邻域搜索方法，保证变异产生新编码形式的约束合理性[19]。

定义保障活动的优先度$A=[A_1, A_2, \cdots, A_n]$，描述保障活动$j$被安排尽早开始的优先级别。根据保障活动$j$的前序活动集$Q_j$和后序活动集$H_j$的大小计算保障活动$j$的优先度，后序活动越多，保障活动$j$的优先度就越高，意味着保障活动$j$应尽早开始以利于其后序保障活动的进行。在进行变异操作时，以优先度A_j作为接受保障活动j向前交换变异的概率。

$$B_j = \sum_{i \in H_j} d_i - \sum_{h \in Q_j} d_h \quad (\forall j \in J) \tag{9}$$

$$A_j = \frac{B_j - \min B}{\max B - \min B} \tag{10}$$

在为保障活动匹配保障人员时，基于空闲时段最长原则进行匹配，有多名同工种保障人员等待被调度时，优先选择最早结束上一个保障活动

作业的保障人员。

求解的目标是获得最优保障调度方案,即舰载机的各保障活动的开始时刻 T_{start}。该参数为一个序列,对应唯一的舰面保障调度时序方案:

$$T_{\text{start}}=[t_{1.00},t_{1.01},\cdots,t_{1.0n},\cdots,t_{f.0n}] \tag{11}$$

其中,每个元素的下标对应某架舰载机的某个舰面保障活动,按照舰载机编号和保障活动编号从小到大依次排列。

以此方法进行保障活动编码的染色体在解码前需要对每个个体进行编码修正操作以确保生成的个体满足活动约束。

解码染色体信息采用串行调度解码的方式,以活动为调度的中心,时间的最小粒度选为 0.5 min,按照序列中的顺序逐个地将保障活动安排到可能开始的最早时刻,直到所有保障活动安排完毕,得到舰面保障时序优化结果。

3　舰面保障流程优化虚拟现实仿真验证系统设计

3.1　系统架构设计

舰面保障流程优化虚拟现实仿真验证系统遵循数据—组件—应用的开发思路,搭建组件化、模式化的具有较好扩展性的系统框架。组件化建模的思想来源于面向对象的建模方法,将模型组装成组件,组件进一步集合为系统。组件化建模提高了各类模型的可重用性和仿真系统的扩展性,便于用户自由编辑所需的舰面保障环境,对不同的舰面保障时序方案进行仿真推演。

仿真系统的总体架构分为数据层、组件层和应用层三大层级,如图 2 所示。数据层主要包含各类三维模型、动作模型、动画特效以及舰面保障时序规划算法等资源,作为虚拟现实仿真环境的数据来源;组件层包括由各类资源封装的组件,具有属性、状态和行为,且受到各类约束条件的影响,组件之间可以产生交互行为;应用层提供舰面使用保障活动验证与评估应用程序和保障活动 VR (Virtual Reality)演示应用程序,实现了舰面保障时序方案的自动规划、仿真验证与评估以及 VR 演示功能。

图 2　舰载机舰面保障虚拟现实仿真系统架构图
Fig. 2　Architecture diagram of virtual reality simulation system for shipboard support of carrier-borne aircraft

3.2　模型资源库构建

舰面保障流程涉及的建模对象包括航母、海洋和天气环境、舰载机、各类保障人员和保障设备、各型武器及挂架等,建模内容包含三维实体建模(如图 3 所示)与物理属性建模。

(a) 舰载机　　(b) 舰面保障人员

图 3　舰载机及舰面保障人员三维实体模型示意图
Fig. 3　Schematic diagram of three-dimensional solid model of carrier-borne aircraft and shipboard support personnel

在建模时,与保障流程相关的部位进行精细建模,而与保障流程关系不大的部位则适当简略,如在航母三维实体模型中,对舰岛等部位的建模仅包括三维外观模型,而无实际功能;对甲板则进行粒度更细地建模,包括建立停机位模型、升降机模型以及供电站、加油站、特殊气体充填站等舰面保障接口的模型。舰载机三维实体模型除对机身、机翼各部位进行建模外,还包括座舱舱盖、弹药舱门口盖等可动部位以及机身各接口。保障人员三维实体模型包括机械、军械、航电、特设等 5 个专业共 7 个职能,以不同的贴图和渲染处理进行区分。

为模拟不同气象条件下甲板上的能见度,提高虚拟现实仿真系统的仿真程度,建立海洋环境模型,包括光照、天空、海浪和雨雾等要素(如图 4

所示)。光照通过仿真引擎天空盒对全天的日照位置、光照强度、光照颜色进行连续建模。天空由随机生成的云贴图与夜晚呈现的夜空贴图连续变化实现。海浪使用傅里叶算法[20]计算和调整高度,生成动态可视化海浪。雾、雨等气象效果使用仿真引擎粒子系统实现。

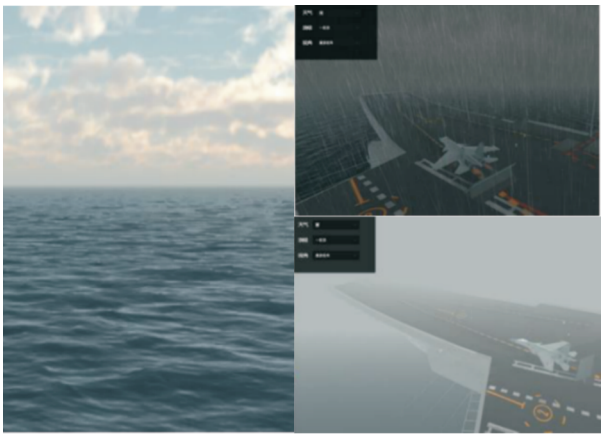


图 4 光照、天空、海浪及气象效果粒子模型
Fig. 4 Particle models of light, sky, sea and weather effects

实体模型仅能满足可视化的要求,为实现各模型间的运动、碰撞、交互等功能,模拟真实世界中的舰载机舰面保障流程,需要进行物理属性建模。在三维实体外形上添加凸面网格碰撞体,使模型之间能够进行物理属性的交互。通过调整复杂网格使碰撞体的形状贴近三维实体模型的形状,将刚体和碰撞体添加到舰载机、保障人员和保障设备等模型上,能够在模型接触时产生碰撞效果,以模拟真实环境中保障人员和设备对空间资源的占用,如图 5 所示。

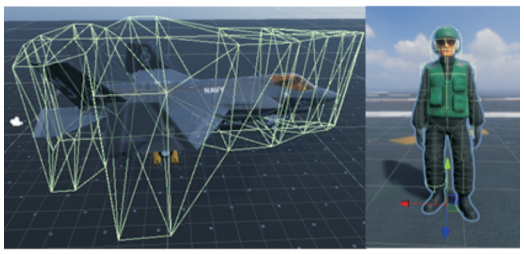


图 5 碰撞体示意图
Fig. 5 Diagram of collider

针对运动部件建立相应的运动动画,如起落架、座舱舱盖、弹药舱门口盖等。保障人员的运动姿态则更为复杂,在保障流程中,保障人员可能需要在舰载机周围走动,并在机舱、机翼下方、机背等狭小位置进行作业。将保障人员的运动模型分为基础动作模型和人员操作动作模型,其中基础动作模型包括站立、行走、转弯、下蹲等基本行为动作,人员操作动作模型包括系留、检查、接线、接管、挂装、上下扫视等保障行为动作。采用数据衣捕捉的方法进行保障人员动作建模,由演示人员穿戴数据衣进行标准动作的演示,数据衣捕捉其各个关节的动作并采集数据,将数据导入仿真环境中,依据保障人员三维实体模型进行动作的调整与优化,得到保障人员动作模型,如图 6 所示。

图 6 通过数据衣进行动作捕捉和建模示意图
Fig. 6 Schematic diagram of motion capture and modeling using data clothing

使用六边形网格地图 A*算法进行保障人员在舰面行走时的自动寻路[21]。将舰面可以行走的区域划分为各向同性的正六边形网格,将舰载机、保障设备等作为障碍物约束,自动求解保障人员从起点到终点的最短路径。当障碍物位置发生变化时,可以自动求解新环境下的最短路径,如图 7 所示。

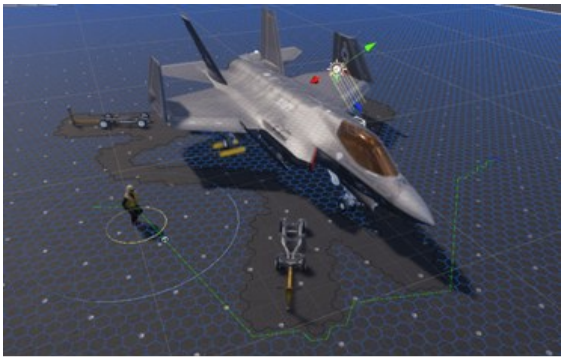


图 7 自动寻路功能示意图
Fig. 7 Schematic diagram of automatic pathfinding function

3.3 组件库构建

在三维实体模型和物理属性模型的基础上,将相关模型资源结合舰面使用保障作业流程要素抽象封装成具有属性、状态和行为的组件(如表 1 所示),

作为在系统中存在的具有一定功能的仿真实体。

表1　系统中的组件

Table 1　Components in a system

组件	属性	行为
航母组件	场景类	可设置航向、航速等运动行为参数
舰载机组件	对象类	可设置移动方向、移动速度等运动行为参数
保障人员组件	对象类	可设置移动路线、移动速度及典型的操作活动等运动行为参数
保障设备组件	对象类	可设置移动方向、移动速度等运动行为参数
环境组件	环境类	无
触发类组件	触发类	可使其他组件状态变化

各组件根据舰载机舰面保障流程仿真的需求设置属性、状态和行为,状态和行为可随仿真运行的过程而改变。

3.4　应用库构建

组件具备特定的能力,但无法独立完成保障作业,将组件集成并由仿真引擎组织调用,才能进行舰载机舰面保障作业。系统在应用层提供了操作界面,用户能够快速搭建高精度三维舰面场景,并进行舰面保障流程仿真推演。舰载机舰面保障虚拟现实仿真系统在应用层的操作逻辑如图8所示。

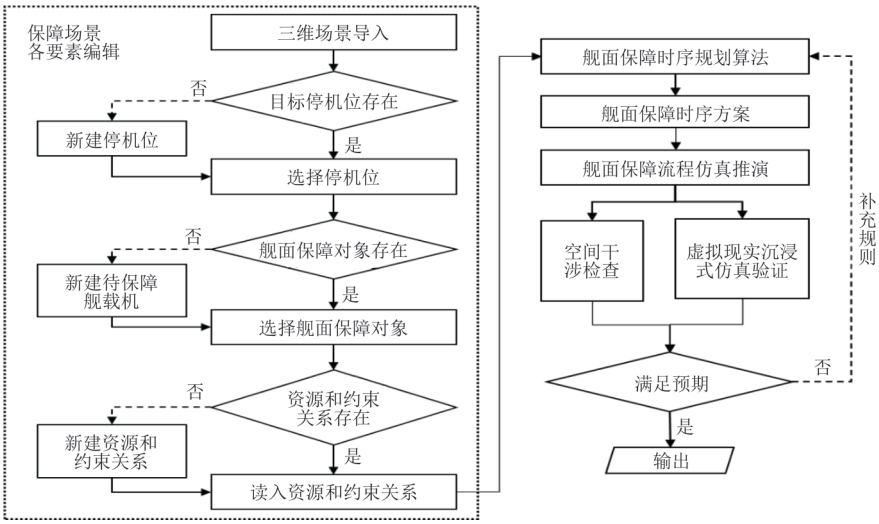


图8　舰载机舰面保障虚拟现实仿真系统应用层的操作逻辑

Fig. 8　Operation logic of shipborne aircraft flight deck operation virtual reality simulation system application layer

首先进行保障场景各要素的编辑,包括三维场景导入、停机位编辑、保障对象选择、资源和约束关系创建等。创建保障场景和约束规则后,通过舰面保障时序规划算法进行保障时序方案的快速生成,如果已有舰面保障时序方案则可以直接输入。运行舰面保障仿真推演,支持在仿真推演系统中接入多个VR头盔等设备进行第一人称视角漫游观察,也支持通过显示器观察仿真,还可以进行第一人称视角画面和第三人称视角画面切换。

空间干涉检查能够提示在仿真过程中出现不合理碰撞的部位,这意味着在仿真过程中发生了不符合安全性要求的空间干涉,说明舰面保障时序规划算法生成的时序方案实际不满足三维空间资源约束。通过观察分析和空间干涉检查对舰载机保障方案的流程可行性、合理性进行评估,寻找调度上的缺陷点,从评估中总结出专家经验和空间约束,作为启发式算法的补充规则加入舰面保障时序规划算法的约束中,从而进一步使用舰面保障时序规划算法对舰面保障时序方案进行优化。当舰面保障时序规划算法生成多个耗时相等的最优解时,也可以通过上述方法确定最符合操作习惯和最具有现实合理性的舰面保障时序方案。

4　仿真验证示例

以单架舰载机的舰面保障流程为分析对象进行测试,该保障流程共有23个保障活动需要完成,定义为活动1～活动23,保障组共配备4个专业共

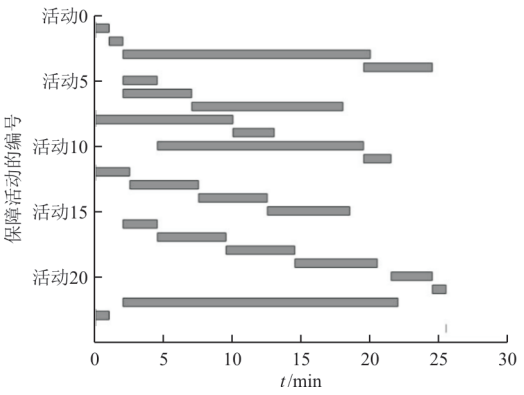
12名保障人员，各保障活动的持续时长、所需资源、已有的时序和逻辑约束如表2所示。已知活动5和活动10之间存在空间干涉，活动23需要首先开始。

表2 各保障活动信息及时序和逻辑约束

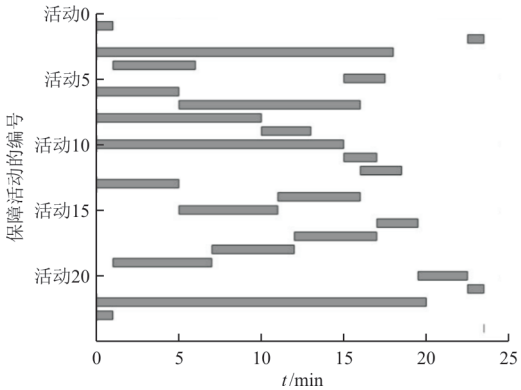
Table 2 Each guarantee activity information timely order and logical constraints

保障活动编号	耗时/min	所需资源或人数				紧前保障活动的编号
		机械专业保障人员	特设专业保障人员	航电专业保障人员	军械专业保障人员	
1	1.0		1			
2	1.0	1	1	1	1	1
3	18.0	1				
4	5.0		1			
5	2.5		1			
6	5.0			1		
7	11.0			1		1
8	10.0	1				
9	3.0	1				
10	15.0	1				
11	2.0	2				
12	2.5		1		1	
13	5.0		1		1	
14	5.0		1		1	
15	6.0		1		1	
16	2.5			1	1	
17	5.0			1	1	
18	5.0			1	1	
19	6.0			1	1	
20	3.0				1	1,11,12,13,14,15,16,17,18,19
21	1.0		1			1,20,7
22	20.0				3	
23	1.0				1	

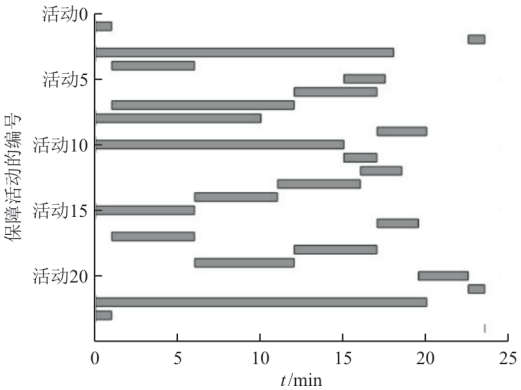
原舰面保障时序方案和优化后的舰面保障时序方案对比如图9所示，可以看出：原有的人工规划得到的保障时序方案完成保障流程的耗时为25.5 min；使用本文提出的舰面保障流程时序规划方法进行舰面保障时序方案求解，能够得到若干个耗时23.5 min的舰面保障时序方案，比原有的时序方案耗时缩短2 min。舰面保障时序规划算法得到的最优解主要不同在活动2的安排，在原始方案中，活动16～活动20需要在活动2完成后开展，而活动2需求的保障人员较多，将之后移，则活动16～活动20可以更早完成，活动20的紧后活动21也可以更早完成。通过测试，证明本文提出的舰面保障流程时序规划方法具备优化求解能力，求得的舰面保障时序方案具有合理性。



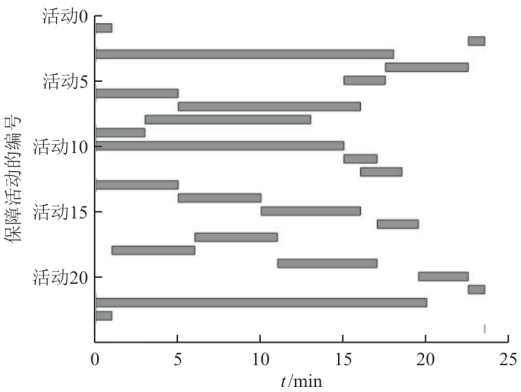
(a) 原有时序方案



(b) 优化时序方案 1



(c) 优化时序方案 2



(d) 优化时序方案 3

图 9　原舰面保障时序方案和优化后的舰面保障时序方案对比

Fig. 9　Comparison between the original ship flight deck operation timing scheme and the optimized ship flight deck operation timing scheme

舰面保障流程时序规划方法仅能基于现有的规则和约束求得一系列解,而不能对这些解在实际进行保障时的表现进行判断。在舰面保障流程优化虚拟现实仿真验证系统中,对舰面保障流程时序规划方法得到的舰面保障时序方案(图 9(b)～图 9(d))逐个进行舰面保障流程仿真推演,对方案的可行性进行验证。

5　结　论

1) 本文给出了一种基于改进的双种群遗传算法的舰面保障流程优化方法。采用双层实数编码的方式描述舰面保障活动集,通过分析舰面保障流程的约束特点,采用基于顺序的交叉算子和基于 Rollout 的邻域搜索的变异算子插入方法,以保障活动的优先度为约束求解最优保障时长的最优保障调度方案。

2) 基于改进的双种群遗传算法的舰面保障流程优化方法建立了舰面保障流程优化虚拟现实仿真验证系统,改善了舰面保障时序规划算法无法进行空间干涉检查的问题,使求解得到的舰面保障时序方案更具有可行性和合理性。同时,可视化的三维仿真系统能够起到辅助培训的作用。

3) 以单架舰载机的舰面保障流程为分析对象,基于改进的双种群遗传算法的舰面保障流程优化方法进行流程优化,证明舰面保障流程时序规划方法具备优化求解能力,求得的舰面保障时序方案具有合理性,为类似问题的求解提供了一种值得参考的方法。

参考文献

[1]　刘翱, 刘克. 舰载机保障作业调度问题研究进展[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(1): 49-60.
LIU Ao, LIU Ke. Advances in carrier-based aircraft deck operation scheduling [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37(1): 49-60. (in Chinese)

[2]　刘广, 颜世伟, 李海旭, 等. 国外航母航空保障技术发展现状[J]. 航空科学技术, 2020, 31(2): 1-11.
LIU Guang, YAN Shiwei, LI Haixu, et al. Aviation support technology development for foreign aircraft carrier[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(2): 1-11. (in Chinese)

[3]　DASTIDAR R G, FRAZZOLI E. A queueing network based approach to distributed aircraft carrier deck scheduling [C] // Infotech@Aerospace 2011. St. Louis, Missouri: AIAA, 2011: 1-10.

[4]　史玮韦, 韩维, 司维超. 舰载机多机直接机务准备优化研究[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(12): 4214-4219.
SHI Weiwei, HAN Wei, SI Weichao. Optimization of direct flight line maintenance process for multi-carrier planes [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(12): 4214-4219. (in Chinese)

[5]　苏析超, 韩维, 张勇, 等. 考虑人机匹配模式的舰载机甲板机务勤务保障调度算法[J]. 航空学报, 2018, 39(12):

222314.
SU Xichao, HAN Wei, ZHANG Yong, et al. Scheduling algorithm for maintenance and service support of carrier-based aircraft on flight deck with different man-aircraft matching patterns[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(12): 222314. (in Chinese)

[6] 张洪涛, 崔珊珊, 刘广, 等. 机群保障资源配置建模与优化研究[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(4): 1019-1026.
ZHANG Hongtao, CUI Shanshan, LIU Guang, et al. Resource scheduling for air fleet operations[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2015, 35(4): 1019-1026. (in Chinese)

[7] 冯强, 曾声奎, 康锐. 基于MAS的舰载机动态调度模型[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2119-2125.
FENG Qiang, ZENG Shengkui, KANG Rui. A MAS-based model for dynamic scheduling of carrier aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2119-2125. (in Chinese)

[8] 李超, 王瑛, 汪晓程, 等. 基于模块化理论的机务准备流程优化研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2011, 12(1): 83-86.
LI Chao, WANG Ying, WANG Xiaocheng, et al. Study of process optimization of flight line maintenance based on modular theory[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2011, 12(1): 83-86. (in Chinese)

[9] RYAN J C, BANERJEE A G, CUMMINGS M L, et al. Comparing the performance of expert user heuristics and an integer linear program in aircraft carrier deck operations[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(6): 761-773.

[10] 谭大力, 王云飞, 于连飞, 等. 基于整数线性规划方法的舰载机航空保障资源优化调度[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(5): 145-151.
TAN Dali, WANG Yunfei, YU Lianfei, et al. Optimal scheduling of aviation support resources for carrier based aircrafts based on integer linear programming[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(5): 145-151. (in Chinese)

[11] RYAN J C, CUMMINGS M, ROY N, et al. Designing an interactive local and global decision support system for aircraft carrier deck scheduling [C] // Infotech@Aerospace 2011. St. Louis, Missouri: AIAA, 2011: 19-27.

[12] RYAN J C. Assessing the performance of human-automation collaborative planning systems [D]. Massachusetts State: Massachusetts Institute of Technology, 2011.

[13] MICHINI B, HOW J. A human-interactive course of action planner for aircraft carrier deck operations [C] // Infotech@Aerospace 2011. St. Louis, Missouri: AIAA, 2011: 40-52.

[14] 胡钰湄. 基于强化学习的机群保障问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
HU Yumei. Research on aircraft cluster support problem based on reinforcement learning [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[15] 郭之俊, 王瑛, 孙赟, 等. 基于MDP-GERT的航空装备维修保障流程优化研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(6): 787-793.
GUO Zhijun, WANG Ying, SUN Yun, et al. Research on optimization of maintenance support process of aviation equipment based on MDP-GERT [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(6): 787-793. (in Chinese)

[16] SASTRY V V, STEEL J, TROTT E A. A virtual environment for naval flight deck operations training[R]. Netherland: RTO HFM Workshop, 2000: 1-7.

[17] 韩维, 司维超, 丁大春, 等. 基于聚类PSO算法的舰载机舰面多路径动态规划[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(5): 610-614.
HAN Wei, SI Weichao, DING Dachun, et al. Multi-routes dynamic planning on deck of carrier plane based on clustering PSO [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(5): 610-614. (in Chinese)

[18] 刘钦辉, 邱长华, 王能建. 考虑空间约束的舰载机作业调度模型研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(11): 1435-1439,1452.
LIU Qinhui, QIU Changhua, WANG Nengjian. Study on ship-based aircraft operation scheduling model considering spatial restriction[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(11): 1435-1439,1452. (in Chinese)

[19] 殷榕. 多机舰面保障调度优化方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2021.
YIN Rong. Research on optimization algorithm for support scheduling of multi carrier-based aircrafts on flight deck[D]. Beijing: Beihang University, 2021. (in Chinese)

[20] 杨秉正. 快速傅里叶变换法的海浪谱估计[J]. 重庆交通学院学报, 1985, 4(1): 53-60.
YANG Bingzheng. The estimation of wave spectrum by FFT method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1985, 4(1): 53-60. (in Chinese)

[21] 赵小涵, 史小露, 陈璐, 等. 多智能体中央式协同路径规划算法综述[J]. 农业装备与车辆工程, 2024, 62(6): 144-150.
ZHAO Xiaohan, SHI Xiaolu, CHEN Lu, et al. Overview of multi-agent central collaborative path planning[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2024, 62(6): 144-150. (in Chinese)

(编辑:马文静)