

7-15-2024

Simulation System for Carrier-based Aircraft Ammunition Support Scheduling

Zhe Liu

School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Ji'nan 250061, China; National Experimental Teaching Demonstration Center of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China, 202214317@mail.sdu.edu.cn

Jiafeng Chen

Hunan Vanguard Group Co. Ltd., Changsha 419503, China

Junfei Ma

Hunan Vanguard Group Co. Ltd., Changsha 419503, China

Songhua Ma

School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Ji'nan 250061, China; National Experimental Teaching Demonstration Center of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China, msh_1216@sdu.edu.cn

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Simulation System for Carrier-based Aircraft Ammunition Support Scheduling

Abstract

Abstract: For inefficient scheduling of carrier-based aircraft ammunition support on the flight deck of aircraft carriers, a Unity3D-based 3D virtual demonstration method for carrier-based aircraft ammunition scheduling is proposed, and a 3D virtual simulation system for carrier-based aircraft ammunition scheduling on the flight deck of aircraft carriers is constructed. A problem model targeted at carrier-based aircraft ammunition transportation and loading scheduling process as well as processing rules for path determination, sequence constraint, and loading position compensation are established based on the defining system. An optimal solution for the scheduling process is realized by using the improved discrete grey wolf optimizer algorithm. By referring to the publicly available scenario information, a virtual interactive scene of carrier-based aircraft ammunition scheduling support on the flight deck of an aircraft carrier is created, and a system script performing various control tasks for mutual interactive control is designed. A controllable real-time demonstration of the virtual scenario is realized by loading on the system virtual scenario entity model respectively. The validity and feasibility of the proposed method are verified based on the optimal solution and simulation demonstration of the scenario example.

Keywords

carrier-based aircraft, ammunition scheduling, Unity3D, 3D virtual simulation, real-time demonstration

Recommended Citation

Liu Zhe, Chen Jiafeng, Ma Junfei, et al. Simulation System for Carrier-based Aircraft Ammunition Support Scheduling[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1621-1630.

舰载机弹药保障调度仿真系统

刘哲^{1,2,3}, 陈佳峰⁴, 马俊飞⁴, 马嵩华^{1,2,3*}

(1. 山东大学 机械工程学院, 山东 济南 250061; 2. 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061;
3. 山东大学 机械工程国家级实验教学示范中心, 山东 济南 250061; 4. 湖南云箭集团有限公司, 湖南 长沙 419503)

摘要: 针对航空母舰飞行甲板上舰载机弹药保障面临的调度效率不高的问题, 提出一种基于Unity3D的舰载机弹药调度三维虚拟演示方法, 构建了面向航空母舰飞行甲板上舰载机弹药调度的三维虚拟仿真系统。通过定义系统, 建立面向航空母舰舰载机弹药运输、装载调度过程的问题模型以及路径确定、顺序约束、装载位置补偿等处理规则, 使用改进离散灰狼优化算法实现了调度过程优化求解。参照公开的场景信息搭建了航空母舰飞行甲板上舰载机弹药调度保障虚拟交互场景, 设计了执行不同控制任务并能实现彼此之间交互控制的系统脚本, 通过在系统虚拟场景实体模型上分别加载实现了虚拟场景的可控实时演示。对场景实例的优化求解与仿真演示验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 舰载机; 弹药调度; Unity3D; 三维虚拟仿真; 实时演示

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)07-1621-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0393

引用格式: 刘哲, 陈佳峰, 马俊飞, 等. 舰载机弹药保障调度仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(7): 1621-1630.

Reference format: Liu Zhe, Chen Jiafeng, Ma Junfei, et al. Simulation System for Carrier-based Aircraft Ammunition Support Scheduling[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(7): 1621-1630.

Simulation System for Carrier-based Aircraft Ammunition Support Scheduling

Liu Zhe^{1,2,3}, Chen Jiafeng⁴, Ma Junfei⁴, Ma Songhua^{1,2,3*}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Ji'nan 250061, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 4. Hunan Vanguard Group Co. Ltd., Changsha 419503, China)

Abstract: For inefficient scheduling of carrier-based aircraft ammunition support on the flight deck of aircraft carriers, a Unity3D-based 3D virtual demonstration method for carrier-based aircraft ammunition scheduling is proposed, and a 3D virtual simulation system for carrier-based aircraft ammunition scheduling on the flight deck of aircraft carriers is constructed. A problem model targeted at carrier-based aircraft ammunition transportation and loading scheduling process as well as processing rules for path determination, sequence constraint, and loading position compensation are established based on the defining system. An optimal solution for the scheduling process is realized by using the improved discrete grey wolf optimizer algorithm. By referring to the publicly available scenario information, a virtual interactive scene of carrier-based aircraft ammunition scheduling support on the flight deck of an aircraft carrier is created, and a system script performing various control tasks for mutual interactive control is designed. A controllable real-time demonstration of the virtual scenario is realized by loading on the system virtual scenario entity model respectively. The validity and feasibility of the proposed method are

收稿日期: 2023-04-07 修回日期: 2023-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(51505254, 51975326); 中国博士后基金(2021M691704); 山东省博士后创新基金(202101017)

第一作者: 刘哲(1999-), 男, 硕士生, 研究方向为系统建模与可视化、调度优化求解。E-mail: 202214317@mail.sdu.edu.cn

通讯作者: 马嵩华(1985-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为知识工程、现代理论设计及方法。E-mail: msh_1216@sdu.edu.cn

verified based on the optimal solution and simulation demonstration of the scenario example.

Keywords: carrier-based aircraft; ammunition scheduling; Unity3D; 3D virtual simulation; real-time demonstration

0 引言

航空母舰舰载机航空弹药的高效供应在航母编队作战中至关重要,但由于供应过程涉及储存、补充、转运等复杂流程,而且需要货物升降机、弹药运输车、各类弹药、弹药装配舱等大量保障设备设施,整体保障效率不高。而航空弹药转运流程是其中耗时最长、参与人员设备最多的,贯穿于整个服务保障过程,主要影响着舰载机的出动架次率和作战能力。因此,优化弹药转运调度流程成为非常关键的作战保障工作^[1]。

文献[2]针对模块化弹药调度问题,建立了以任务完成时间最小化以及各舱室平均工作时间最小化为目标的舰载机模块化弹药调度模型,并使用改进的遗传算法对模型进行处理,获得了理想调度方案。文献[3]将移动保障车纳入舰载机甲板保障资源范围,建立了舰载机甲板机务勤务保障作业调度与资源配置优化模型,并通过改进遗传算法对模型进行求解。考虑作战态势的实时动态性,为获得更可靠的舰载机弹药保障与调度指导,文献[4]提出需要在原调度任务预先设计规划方式的基础上增加飞行甲板上的舰载机动态保障与调度方法,并实时对调度过程中出现的意外中断做出更优的决策。文献[5]提出基于强化学习的舰载机保障作业实时调度算法,来解决实际作战场景中传统保障调度方法无法接收环境的实时反馈的问题。在调度过程中保障资源冲突对调度保障过程有显著影响,因此在解决对应的路径规划问题时还要兼顾资源分配问题,尽量做到减少资源浪费,消除调度资源冲突^[6],同时在调度方案评价中增加对事前维修和事后维修的仿真,充分考虑保障装备的可用度以避免不必要的重调度^[7]。

为更有效地完成舰载机保障工作的调度任务,建立求解效率高、决策准确、可视化逼真的仿真

系统十分重要。文献[8]提出将弹药保障作业调度问题抽象为一类考虑交货期的柔性流水车间调度问题,为解决舰载机弹药保障调度问题提供了新的研究思路。文献[9]总结美国“尼米兹”级和“福特”级航母飞行甲板保障系统配置,利用AnyLogic软件,运用离散事件和基于智能体的混合建模方法,充分考虑舰载机出动回收作业闭环、多优先级、波次出动的特点,建立了舰载机出动回收仿真模型,支持不同飞行甲板保障系统配置对舰载机出动架次率的定量分析。文献[10]参考美国“福特”级航母,基于柔性作业车间调度问题建立了舰载机保障作业调度扩展模型,并提出一种以遗传算法为主的混合算法进行调度优化求解。文献[11]设计了一套用于舰载机保障作业调度仿真的智能调度软件系统,通过无线网络接入半实物仿真平台,定时接收模型舰载机的定位信息并对模型舰载机进行集中的调度控制,实现模型舰载机和保障资源的合理调度。

本文针对航空弹药在航空母舰飞行甲板上转运过程中的运输调度流程及约束进行分析,设计了一种基于Unity3D的舰载机弹药保障调度三维虚拟仿真系统,可以有效提高飞行甲板上弹药运输调度的工作效率,能够实现调度建模、求解和可视化;针对作战态势的变化和干扰事件对调度优化结果的影响,能够观测和记录调度保障中的关键信息,保证实时有效的调度优化决策。

1 基于 Unity 3D 的舰载机弹药调度三维虚拟仿真系统

为更直观实现航空母舰飞行甲板上舰载机弹药装载流程仿真,本文基于Unity3D软件设计了能通过与实际场景、人机界面的交互实现实时动态调整调度策略并在虚拟场景完成即时演示的三维数字虚拟仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 1622 •

1.1 系统架构

航空母舰舰载机弹药调度仿真系统定义为包括数据运算层、交互读写层、虚拟演示层的三层架构, 如图 1 所示。

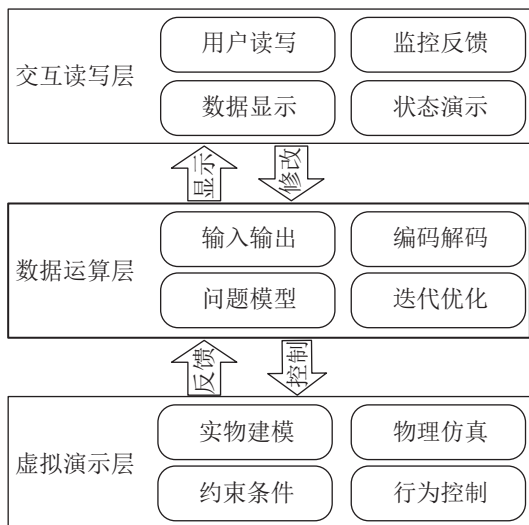


图 1 航空母舰舰载机弹药调度仿真系统架构
Fig. 1 Carrier-based aircraft munitions scheduling simulation system architecture

数据运算层是完成系统数据接收、存储、计算、分析与处理的核心与基础。主要根据采集实时物理场景更新相关数据, 更新预设问题模型, 并计算最优的调度方案; 通过对调度结果解码, 向交互读写层、虚拟演示层输出动态指令, 指导数字场景的可视化更新。

交互读写层主要面向操作用户, 通过定义可交互的按钮、对话框、图像等控件, 实现用户界面与运算脚本的数据交互。通过写入物理场景中各设备的状态数据、注入扰动事件, 更新数据运

算层; 展示和控制虚拟演示层的可视化结果。

虚拟演示层主要完成舰载机弹药装载调度方案的可视化演示。按照实际场景完成虚拟场景布局设计, 并对虚拟场景中舰载机、弹药、弹药运输车等运动模型定义运动执行脚本; 接收数据运算层发出的运动指令, 完成有序、可控的可视化动态调度方案演示, 并实时反馈数字模型运动状态信息。

各功能主要借助 Unity3D 软件, 使用 C# 语言脚本编辑实现^[12]。

1.2 虚拟场景搭建

虚拟演示层的核心为虚拟场景。在虚拟场景中, 涉及调度的航空母舰飞行甲板、舰载机、升降机、运输车、航空弹药及其他设备, 基于建模软件被首先重建为外观逼真度较高的三维模型。为保证可视化效果兼顾运算效率和场景文件读取速度, 对场景模型进行轻量化处理。轻量化模型以模型资源格式存储在场景资源库中供 Unity3D 场景调用。

为使可视化演示符合物理场景, 定义场景模型间的物理约束。定义场景模型的位置参数, 将升降机、运输车、舰载机、航空弹药这些关键模型坐标位置存储于数据脚本中, 并定义为坐标矩阵 R_p 供调度计算脚本读取使用。设置重力、刚体接触、光源等组件模拟真实的物理、几何和环境约束。最终虚拟场景构建如图 2 所示, 包含了标号 1~18 的航空母舰舰载机模型、标号 A~C 的升降机模型以及标号 a~e 的运输车模型。

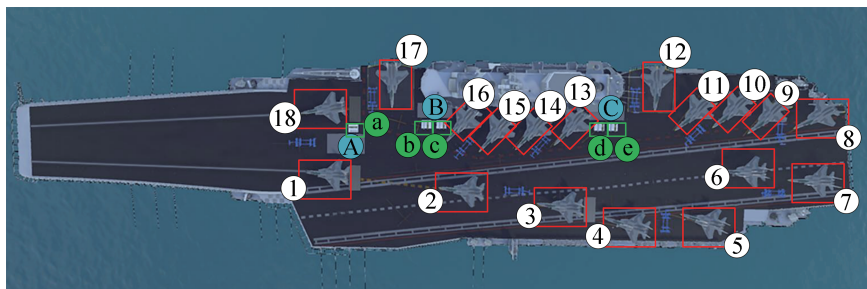


图 2 虚拟场景
Fig. 2 Virtual scene

<http://www.china-simulation.com>

1.3 优化求解功能实现

数据运算层最重要的功能是优化求解场景调度方案。为解决航空母舰飞行甲板上多运输车执行多舰载机弹药保障过程的优化调度问题，系统定义优化求解以最小总等待时间为目标的问题模型，并设计了目标点有效路径、弹药转运顺序规则、弹药装载位置补偿等问题模型处理规则；选取改进的离散灰狼优化算法对问题模型进行优化求解。

1.3.1 问题模型定义

结合上述虚拟场景，建立如下航空母舰飞行甲板上的航空导弹调度问题模型：

现场有 P 台货物升降机供应航空导弹；有 N 辆满载容量为 Q 的弹药运输车，同时具备航空导弹运输和辅助装载的功能。航空导弹全部从货物升降机出发，由运输车运输到达 K 个目标工作点并被装载上舰载机，其中包括 k 个运输暂存目标点和 $(K-k)$ 个航空弹药装载目标点。根据任务路径各目标点等待时间最短的要求，各运输车初始位置可在 P 个货物升降机中进行选择^[13]。由于现场环境复杂多变，补充影响运输时间的干扰集合 U ，包括升降机供应情况、运输车工况、运输人员变动、现场环境等参数。各目标工作点的等待时间是运输车到达该目标工作点前走过的路程所需时间，因此同一路径上的多个目标点等待时间具有累积的性质，运输车 n 到达目标工作点 z 的等待时间为

$$t_{zn} = \sum_{i=0}^W \sum_{j=0(j \neq i)}^W \alpha_{ijn} \theta_{ij} t_{ijn} \quad (1)$$

$$W_n = \{0, 1, \dots, z\}$$

$$t_{ijn} = L_{ij} / v_m$$

式中： α_{ijn} 为路径参数，运输车 n 由目标工作点 i 到达 j 则设为 1，否则为 0； θ_{ij} 为顺序参数，从目标工作点 i 到达 j 符合顺序要求则设为 1，否则为 0； W_n 为运输车 n 到达目标工作点 i 的路径有向集合； t_{ijn} 为运输车 n 由目标工作点 i 到达 j 的时间； L_{ij} 为两目标工作点之间的距离； v_m 为预设的运输车最大运行速度。

考虑实际作战情况对时间要求最为严格，故本问题以满足优先运输条件、最短等待时间为目标，设计以目标工作点为中心的运输调度策略，问题模型优化求解的最短等待时间为

$$T = \min \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K T_{in} \quad (2)$$

$$T_{in} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K (t_{in} + U_{in})$$

式中： T_{in} 为运输车 n 到达目标点 i 的综合等待时间； U_{in} 为由于干扰集合产生的等待时间。

1.3.2 模型处理规则

(1) 根据运输车到达相应的转运、挂载弹药位置坐标，设置目标工作点距离矩阵 R_D 。矩阵 R_D 中，每个元素为两目标点间距离 L_{ij} 。运输车在一条运输路径将经过若干目标工作点，其中相邻目标点间路程默认直线行驶通过，但两点连线不可避免地会经过甲板上其他设备、装置等。利用 Unity3D 软件刚体接触碰撞检查功能逐一测试 R_D 中目标点顺序组合，并添加合适数量的中间目标点以保证不会出现运输路径经过障碍物的情况。如图 3 所示，将两点之间的直线距离通过添加至少一个中间目标点转化为若干段直线距离，以避免原定两点连线经过的障碍物。

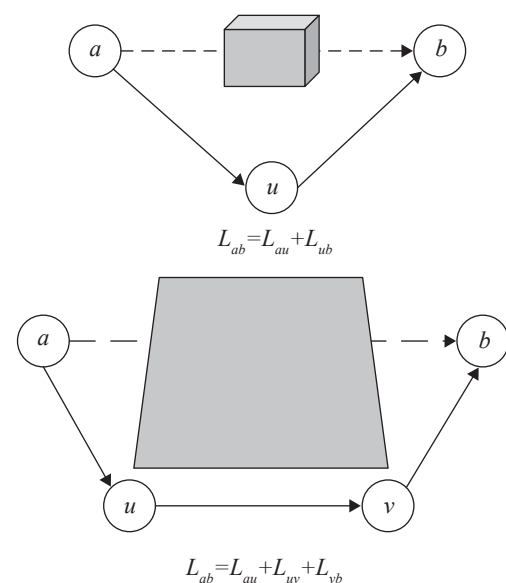


图3 中间目标点距离计算

Fig. 3 Middle target point distance calculation

(2) 运输车具有运输、装载的多功能性, 但运输车在舰载机处完成挂弹装载功能时必须以空载状态到达。因此, 在同一运输车的路径上需要保证有挂弹装载需求的目标点出现在全部运输暂存需求的目标点之后, 如图 4 所示。

(3) 目标工作点的坐标根据实体模型整体位置获得, 而坐标值往往对应实体模型的形心。在模

型体积较大时, 动态演示弹药运输、装载流程会有明显的错位现象。为解决此类问题, 本文补充了弹药运输、装载补偿矩阵 R_c , 即通过场景测定偏差尺寸, 将不同模型组合中的偏差尺寸计算对应坐标系下坐标修正值存储于 R_c , 在演示过程中完成带补偿的相对运动完成仿真流程, 如图 5 所示。

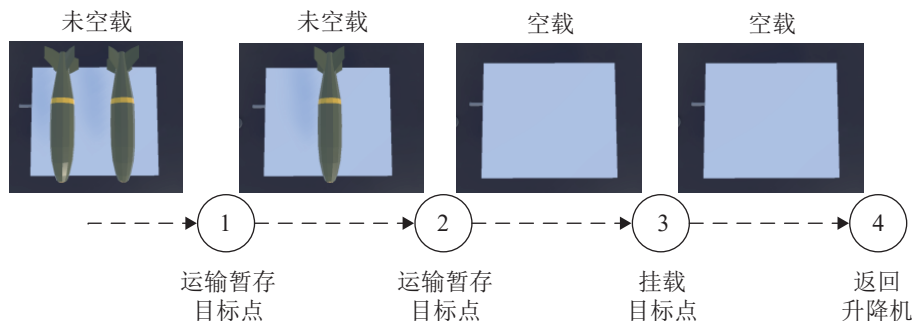


图 4 弹药转运顺序

Fig. 4 Ammunition transfer sequence

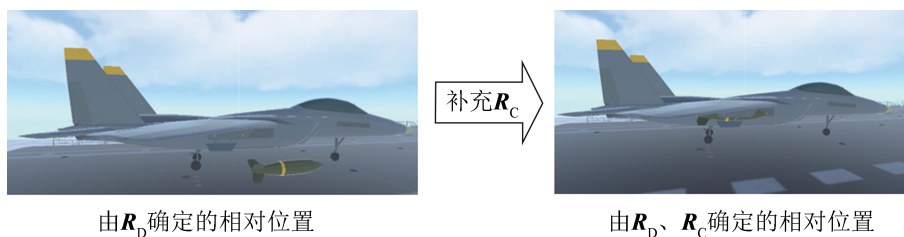


图 5 弹药装载位置补偿

Fig. 5 Ammunition loading position compensation

1.3.3 算法求解

灰狼优化算法^[14]是通过模拟狼群狩猎时普通灰狼在头狼的指引下不断靠近猎物的机制来获得最优解的一种启发式算法。其在解决作业车间调度问题等组合优化问题上有出色效果。传统的灰狼算法采用实数编码且多针对单目标问题, 难以解决多目标排列次序的问题^[15]。因此, 优化求解功能中使用了改进的灰狼算法用以求解上述问题模型: 本系统采用的改进灰狼算法使用整数编码方法获得运输车路径解向量, 一个灰狼个体对应的解向量就表示一组运输车的路径分配方案; 通过将负整数作为分组标记实现整数解向量的多目标分组, 一个解向量被负整数分割成的若干子向

量即代表各台运输车对应的运输路径; 在传统灰狼算法狼群跟随头狼 α 、 β 、 δ 狩猎全局搜索的基础上, 本系统改进灰狼算法也增加了灰狼个体自由搜索策略以避免算法求解陷入局部最优的问题; 参照遗传算法中算子交叉、变异的方法增加对灰狼种群初始解的初始优化, 明显改善了算法求解的收敛速度。本系统所采用的改进灰狼优化算法伪代码如下所示。

算法: 改进灰狼优化算法

输入: 迭代上限 T ; 种群规模 N ; 劣势个体规模 M

输出: 最优路径

1 种群初始化

```

2  初始种群排序(由小到大)
3  for  $i=1$  to  $M$  do {
4      随机选取两个非劣势个体
5      if 交叉 then {
6          交叉操作获得较优子代替代当前
个体}
7      else
8          {变异操作获得新个体替代当前
个体}}
9  选出头狼 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ ，最优路径初始化
10  $t \leftarrow 1$ 
11 while( $t \leq T$ ) do {
12     for  $j=1$  to  $N$  do {
13         灰狼个体执行狩猎过程向头狼
靠近完成更新
14         更新头狼，更新最优路径
15         if 自由狩猎 then {
16             灰狼个体执行自由狩猎过
程完成更新
17             更新头狼，更新最优
路径}}
18          $t \leftarrow t+1$ 
19     return 最优路径

```

1.4 交互功能实现

交互读写层对应虚拟场景交互功能，主要用于读取物理场景信息采集系统上传的各设备状态更新信号以及需要加入的人为扰动信号。反馈、修改信息处理系统数据以更新计算处理结果，并将新的结果写入数据存储文件同时在用户交互界面输出显示。

实际场景中布设大量传感器、测量仪、触发器类装置实时记录设备、人员、环境、舰载机以及航空弹药的状态信息，同时对相关状态信息进行筛选、对比、处理后向虚拟场景按照编码规范发送场景内设备、环境、人员等的文本数据。系统采取规范的解码方法定时读取状态参数以同步

更新虚拟场景。

2 调度系统实时动态可视化

为实现系统调度结果的动态可视化，需要建立数学模型优化结果与三维虚拟场景的交互控制。系统通过对多主体在可控场景下的分布控制实现了调度结果的实时动态演示。

2.1 多主体系统设计

弹药运输车作为调度系统中主要运动控制对象，在甲板上各自独立运行。因此需要对各运输车进行单独的运动控制。针对虚拟场景调度情况，结合多智能体建模仿真技术^[6]，设计如图6所示的多主体运动执行系统。各弹药运输车作为分布式主体，都具有独立的运动执行控制器完成相应的运输、装载任务；其接受中枢控制系统发出的整体调度指令与运输控制系统发出的约束控制指令，实现可控的相对独立运动。中枢控制系统对数据更新情况、智能优化算法、交互命令输入等信息进行处理，并向分布式主体发送整体调度控制指令。另外，场景中的物理、几何、环境、概率等条件共同组成约束控制系统对分布式运动主体施加约束。

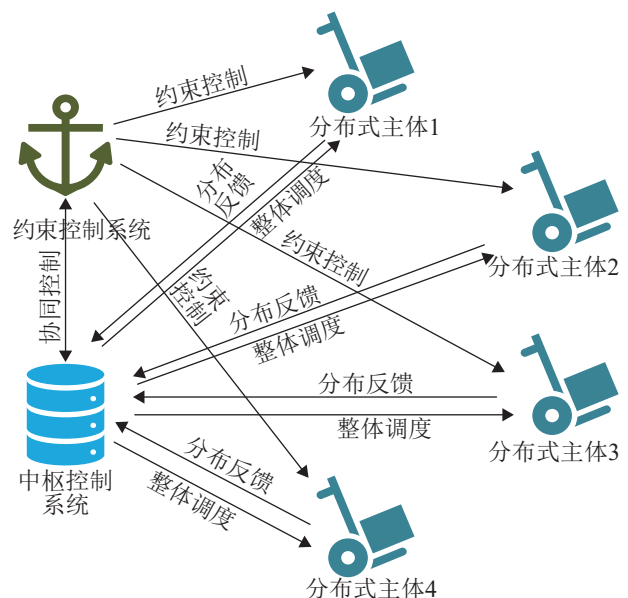


图6 多主体运动执行系统

Fig. 6 Multi-agent motion execution system

利用 Unity 定义三种 C# 编译脚本, 包括中枢控制脚本、运动执行脚本和约束脚本。不同的仿真主体通过独立的控制脚本实现分布式控制, 同

时, 脚本间的指令交互, 支持有核心控制命令的控制脚本发出指令, 实现分布式主体的统一调度, 脚本间的交互控制关系如图 7 所示。

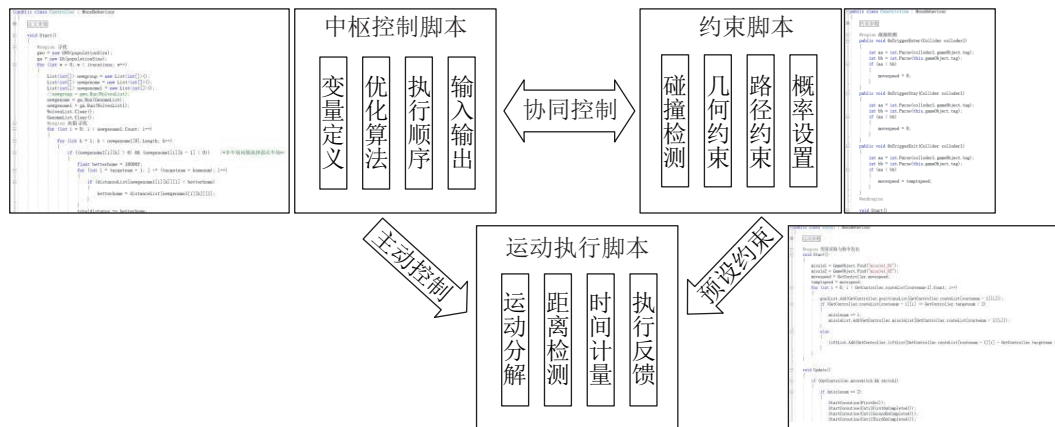


图 7 控制脚本间的相互关系
Fig. 7 Control of script interrelation

2.2 场景演示功能定义

场景演示功能满足由调度优化结果驱动场景模型按照一定的约束规则运动。考虑物理世界可能出现的性能退化、突发事件, 场景演示功能设计了物体指标实时更新和突发事件约束。在上述搭建完成的基于 Unity3D 的虚拟工作场景中, 在场景、物体上依照工作任务要求分别挂载不同功能的运动脚本, 其中定义了:

(1) 运输车模型挂载解码、运动脚本, 按照数据运算层改进灰狼优化算法解码方法对最优调度方案进行解码分组; 确定对应运输车要经过的目标点, 并参考各目标点间的路线矩阵确定运动路线后按照路线完成运动指令。

(2) 场景控制器, 挂载核心的调度算法脚本。一方面输出最优调度方案到各运输车上的运动脚本中驱动运动执行; 另一方面对结果进行解码和分组, 输出显示到用户交互界面, 让操作者直观获取最终的调度方案。

(3) 场景内设置了模拟物理环境下的突发事件触发功能。路径冲突时的排队等待、物体性能随工作时间的退化、运输车或其他工作设备故障, 都可用户选择以一定概率触发或人工输入触发。

(4) 场景添加相机追摄脚本, 为操作者提供可控的视角调整、切换功能, 并检测各模型的运动情况。

(5) 场景计时器, 挂载运动时间记录脚本, 对各目标点的等待时间、各运输车不同状态下的运行时间、人工控制的时间窗进行记录, 并将记录结果输出到用户交互界面。

上述脚本交互执行可以支持包括运动控制、状态更新、突发约束定义等, 实现更逼真的物理场景建模与演示。

在虚拟场景中可以根据物理场景, 随时在脚本中设置更多的突发事件: 运输车故障导致运输速度下降、弹药检查不合格导致运输暂停、升降功能故障导致装载速度下降、场景内舰载机对于弹药需求量突然增大要求全部运输车以最大速度极限工作、临时运输点位调整导致路线更改。系统设置键盘按键分别输入上述突发事件, 使虚拟场景最大程度上逼近真实场景状态。

3 系统功能验证

系统设计主界面如图 8 所示, 主要对场景模型和动态调度方案进行可视化。其中调度优化功

能中的目标工作地点位置、安装时间、交付时间等通过用户交互界面进行输入；调度路径顺序、空载时间、等待时间等信息通过交互界面与用户反馈。便于操作者直观检查调度方案并做出调度方案评价，如图 8(a)所示。

交互界面也设计了事件触发、参数修改、状态更新、传感读入等虚实模型交互功能，能够保证物理场景发生变动时，修正对应虚拟空间内的场景；有利于及时对调度问题模型更新，从而获得有效的调度方案，如图 8(b)所示。



(a) 信息显示界面



(b) 用户操作界面

图 8 系统设计主界面

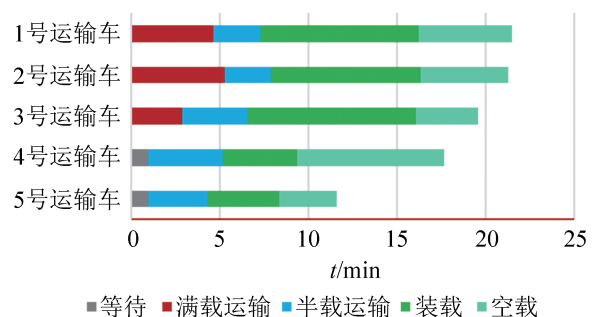
Fig. 8 Main interface for system design

以场景中包括 3 个货物升降机、5 辆装载容量为 2 的弹药运输车为例，假设向 16 个目标工作地点完成运输、装载任务，其中包括运输暂存目标点和弹药装载目标点各 8 个。按照系统改进灰狼优化算法对上述实例问题模型进行编码迭代求解，最终获得调度路线路径分配情况如图 8(a)所示，优化求解的调度时间信息和运输车运行甘特图如图 9 所示。同时将系统使用的改进灰狼优化算法与传统灰狼算法、遗传算法对相同问题求解结果进行对比，求解平均收敛代数分别提高 17.5%、19.4%，20 次重复实验获得最优解的次数分别高出 6 次和 7 次。

为验证系统应对干扰事件的实时处理能力，通过交互界面定义 4 号运输车的运输速度为原速度的 50%，并在一定时间段整体暂停运输，优化后的调度时间信息与运输车运行甘特图如图 10 所示。



(a) 时间信息



(b) 甘特图

图 9 调度时间信息及甘特图

Fig. 9 Scheduling time information and Gantt chart

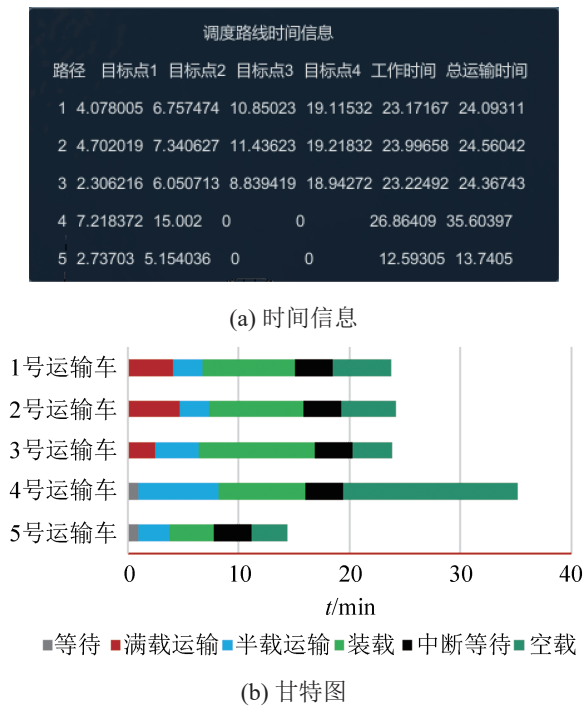


图10 加入干扰后调度时间信息及甘特图
Fig. 10 Scheduling time information and Gantt chart after adding interference

4 结论

高效高强韧保障是打赢现代战争的基础和关键支撑,改进航空母舰飞行甲板上舰载机弹药调度效率有十分重要的战略意义。为保障舰载机弹药调度更高效更可靠完成,本文设计了基于Unity3D的舰载机弹药调度三维虚拟仿真系统。通过问题模型实例验证,本系统能高效地完成调度方案规划,并通过三维虚拟场景演示和交互界面使用户更直观、及时地获取关键的调度信息,对大型作战场景的三维虚拟仿真演示有较好的指导意义,未来通过进一步的改进完善将会在高频次作战保障上发挥重要作用。

参考文献:

- [1] Guo Fang, Han Wei, Su Xichao, et al. A Bi-population Immune Algorithm for Weapon Transportation Support Scheduling Problem with Pickup and Delivery on Aircraft Carrier Deck[J]. Defence Technology, 2023, 22: 119-134.
- [2] 吕晓峰, 杨东泽, 马羚. 舰载机模块化弹药调度方案优

化设计[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(2): 465-471.

Lü Xiaofeng, Yang Dongze, Ma Ling. Optimal Design of Modular Ammunition Scheduling Scheme for Carrier-based Aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(2): 465-471.

- [3] 崔荣伟, 韩维, 苏析超, 等. 舰载机甲板机务勤务保障作业调度与资源配置集成优化[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7): 1884-1893.

Cui Rongwei, Han Wei, Su Xichao, et al. Integrated Optimization of Carrier-based Aircraft Flight Deck Operations Scheduling and Resource Configuration for Pre-flight Preparation Stage[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(7): 1884-1893.

- [4] Yuan Peilong, Han Wei, Su Xichao, et al. A Dynamic Scheduling Method for Carrier Aircraft Support Operation Under Uncertain Conditions Based on Rolling Horizon Strategy[J]. Applied Sciences, 2018, 8(9): 1546.
- [5] 李亚飞, 吴庆顺, 徐明亮, 等. 基于强化学习的舰载机保障作业实时调度方法[J]. 中国科学(信息科学), 2021, 51(2): 247-262.

Li Yafei, Wu Qingshun, Xu Mingliang, et al. Real-time Scheduling for Carrier-borne Aircraft Support Operations: A Reinforcement Learning Approach[J]. Scientia Sinica(Informationis), 2021, 51(2): 247-262.

- [6] Feng Qiang, Bi Wenjing, Sun Bo, et al. Dynamic Scheduling of Carrier Aircraft Based on Improved Ant Colony Algorithm Under Disruption and Strong Constraint[C]//2017 Second International Conference on Reliability Systems Engineering (ICRSE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-9.

- [7] 曾斌, 陈媛媛, 李厚朴. 考虑保障装备可用度的舰载机作业调度优化[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7): 1856-1865.

Zeng Bin, Chen Yuanyuan, Li Houpu. Launch Scheduling Optimization Considering Availability of Maintenance Equipment for Carrier Aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(7): 1856-1865.

- [8] 张少辉, 刘舜, 李亚飞, 等. 航空母舰舰载机弹药保障作业调度优化算法[J]. 航空学报, 2023, 44(20): 224-241.

Zhang Shaohui, Liu Shun, Li Yafei, et al. Optimization Algorithm for Ammunition Support Operation Scheduling of Carrier-borne Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(20): 224-241.

- [9] 陈成. 飞行甲板航空保障系统配置对出动架次率的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.

Chen Cheng. Research of the Influence of Aviation Guarantee System Configuration on SGR[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

- [10] 李梦龙. 舰载机保障作业的静态与动态调度研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

- Li Menglong. Research on Carrier-based Aircraft Deck Operation Static and Dynamic Scheduling[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [11] 周艾捷. 半实物仿真平台中的舰载机及其保障作业调度研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- Zhou Aijie. Research on the Scheduling of Carrier-based Aircraft and Its Support Operation on the Semi-physical Simulation Platform[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [12] 孙相. 基于U3D的服装车间生产系统三维虚拟仿真[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- Sun Xiang. Simulation of Garment Workshop Production System Based on Unity3D[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [13] 王龙昌. 多车场军物流车车辆调度问题优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- Wang Longchang. The Optimization of Multi-depot Military Logistics Vehicle Scheduling Problem[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [14] Mirjalili S, Seyed Mohammad Mirjalili, Lewis A. Grey Wolf Optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [15] 黄戈文. 应急物流运输调度理论与方法研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- Huang Gewen. Research of Theory and Method of Vehicle Routing Problems for Emergency Logistics[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [16] 薛均晓, 徐明亮, 李亚飞, 等. 面向航空母舰电子显灵板的多智能体建模技术研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(10): 1475-1485.
- Xue Junxiao, Xu Mingliang, Li Yafei, et al. Research Progress of Multi-agent Technology for Aircraft Carrier Electronic Display Panel[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(10): 1475-1485.