

飞行保障过程中车辆调度仿真优化

方绍强¹, 卫克^{1,2}, 陈伟鹏^{1,2}, 赵尚弘¹, 吴继礼¹

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军后勤部, 北京 100720)

摘要:建立了飞行保障过程中车辆调度模型,设计了基于禁忌搜索(Tabu Search)的车辆资源配置的优化算法。并利用 Arena 内嵌的 VBA 技术和 VBA block 模块将仿真模型与优化算法集成起来,实现了控制仿真模型、集成优化算法以及向仿真模型重新输入参数 3 个功能,构成车辆调度仿真优化系统。利用该系统,得到了在单机保障时间最小情况下的最优车辆数配置方案。其运行效率比用 Arena 自带的优化工具 OptQuest 提高 7 倍多。

关键词:飞行保障过程;车辆调度;禁忌搜索算法;仿真优化

中图分类号: V37; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2008)06 - 0006 - 05

飞行保障过程中车辆调度是指航空兵场站在飞行保障过程中,指挥员对担负战斗或训练任务的飞机保障需求做出积极响应,合理调度各种保障车辆(如加油车、充氧车、充氮车以及空调车等)对飞机进行及时保障,使飞机能够以最快的速度起飞(或再次起飞)执行任务^[1-3]。车辆调度实质上是一种整数型非线性组合优化决策问题,属于 NP - Complete 问题^[4]。这类问题在优化时往往利用仿真过程求取性能指标值^[5]。因此,这类问题归结于建立仿真模型和优化算法,并将两者集成起来。文献[6-8]均以 ARENA 为建模工具,分别建立了各自的仿真模型并设计了各自的启发式优化算法,然后利用 Visual Basic 将仿真模型和优化算法集成起来。这种实现方式,仿真模型与优化程序互相独立,利于模块化编程,但是在运行期间两者需要来回切换,运行效率较低。

1 仿真优化系统

仿真优化研究基于仿真的目标优化问题,把优化方法同仿真模型结合起来确定输入参数的合适设置,使仿真系统的性能最优。仿真优化可以定义为:在不确切地评估每种可能性的情况下从所有的可能性输入变量值中寻找最佳的输入变量值。仿真优化不需要对每一个可行解进行仿真就可以非枚举地从可行解空间中找出最佳的输入变量。仿真优化的目标是以最小化资源消耗,最大化在仿真试验中的信息获取。其原理即基于模型仿真给出的输入输出关系(性能),通过优化算法得到最佳的输入量^[9-11]。描述如下:

$$\min J(\theta) = E[L(\theta, \xi)]$$
,式中: $\theta \in \Theta$ 为决策量,在本文中 $\theta = \{\theta_{oi}, \theta_{ox}, \theta_{ni}, \theta_{ai}\}$, $\theta_{oi}, \theta_{ox}, \theta_{ni}, \theta_{ai}$ 分别表示加油车(OilVeh)、充氧车(OxygenVeh)、充氮车(NitrogenVeh)和空调车(AirConVeh)的数量; ξ 为随机噪声,表示仿真过程中的随机、不确定因素; $L(\theta, \xi)$ 为 θ 的一次性能估计,在本文中 $L(\theta, \xi)$ 表示保障完 1 架飞机的保障时间; $J(\theta)$ 为 θ 的期望性能,表示单架飞机的平均保障时间。

2 仿真模型

利用 ARENA 所建立的车辆调度模型由 4 个模块组成^[1-3]:待保障飞机到达模块(Plane Arrive)、仿真策略模块(Simulation Strategy)、保障过程模块(Support Process)和评估模块(Evaluation)见图 1。

* 收稿日期:2008 - 05 - 05

作者简介:方绍强(1978 -),男,山东惠民人,博士生,主要从事系统仿真与优化研究。Email:fangsq@gmail.com

1) Plane Arrive 模块的作用是产生或者接收降落的飞机实体,确定需要保障的类型,传送到 Simulation Strategy 模块。

2) Simulation Strategy 模块的作用是对某一时刻到达的飞机实体,进行保障资源的调度,确定由哪种车辆前去保障,并传送到 Support Process 模块;如果飞机保障完毕,则将飞机实体传送到 Evaluation 模块。

3) Support Process 模块的作用是按照 Simulation Strategy 模块的调度对飞机进行保障,飞行保障活动完成,将待保障飞机传送到 Simulation Strategy 模块。

4) Evaluation 模块的作用是统计各个飞机的保障时间和飞机平均等待时间,直到最后一架飞机的所有保障活动全部执行,触发优化程序。

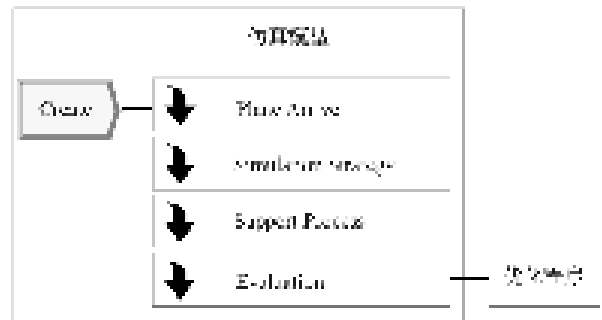


图1 车辆调度仿真模型

Fig.1 The simulation model of vehicle schedule

3 优化程序

仿真程序运行到最后一个实体移出系统时,触发 VBA block 模块。该模块包含优化程序,主要实现仿真模型控制、模型参数重置以及优化算法 3 个功能。

3.1 仿真模型控制

优化过程中,需要多次的仿真,并对每次的仿真结果进行评估,其核心就是多次重复以下过程:修改模型中的某些运行参数、运行模型、评估结果。这就需要优化程序能够自动控制模型,包括开始、终止以及设置仿真次数(replication)。本系统是利用 Arena 的 VBA block 模块以及内嵌的 VBA 技术实现的^[12]。

当一次仿真的最后一个实体移出仿真程序前,该实体将触发一个 VBA block 模块,该 VBA block 模块的功能。一是统计评估目标函数;二是当仿真次数(Replication)达到最大仿真次数时自动结束仿真程序;三是运行仿真优化算法,生成新的候选方案。代码如下:

```
Private Sub VBA_Block_3_Fire()
Set oModel = ThisDocument.Model '将 Arena.Model 实例的引用赋给 oModel 变量
Set oSIMAN = oModel.SIMAN '将 Arena.SIMAN 实例的引用赋给 oSIMAN 变量
Dim RunMaximumReplications As Integer
Dim RunCurrentReplication As Integer
RunMaximumReplications = oSIMAN.RunMaximumReplications '最大仿真次数
RunCurrentReplication = oSIMAN.RunCurrentReplication '当前仿真次数
If RunMaximumReplications = RunCurrentReplication Then '当仿真次数等于最大仿真次数时
Call Evaluation '调用目标函数评估程序
Call TabuSearch '调用优化算法,生成新的候选方案
Call ChangeResource '调用参数重置程序,为下次仿真作初始化
Model.End '终止仿真运行激活 ModelLogic_RunEnd 事件
End If
End Sub
```

当程序执行到 VBA block 模块中的 Model.End 指令后,仿真程序终止,并自动激活 ModelLogic_RunEnd 事件,程序判断优化终止条件是否满足,如果终止条件不满足,则启动下一次仿真。其代码如下:

```
Private Sub ModelLogic_RunEnd()
If RunEndIndex = 0 Then 'RunEndIndex 为优化算法终止条件标志符等于 1,表示满足终止条件;等于 0,表示不满足终止条件'
Model.Go '启动仿真运行
End If
End Sub
```

这样优化程序中的 VBA block 模块和 ModelLogic_RunEnd 里的代码,联合实现了对仿真程序的控制。

3.2 模型参数重置

优化算法生成的新的候选方案需要输入到仿真模型之中,完成模型参数的重置。作为下一次仿真的输入。在飞行保障过程中的车辆调度模型中,要得到保障时间最少条件下的车辆配置方案,资源重置程序需要

重置加油车、充氧车、充氮车和空调车的车辆配置数: θ_{O_i} 、 θ_{O_x} 、 θ_{N_i} 以及 θ_{A_i} 。其代码如下:

```
Private Sub ChangeResource()
Set oModel = ThisDocument.Model '将 Arena.Model 实例的引用赋给 oModel 变量
nResOilVehIndex = oModel.Modules.Find(smFindTag, "ResOilVeh") '定位加油车资源
nResNitrogenVehIndex = oModel.Modules.Find(smFindTag, "ResNitrogenVeh") '定位充氮车资源
nResOxygenVehIndex = oModel.Modules.Find(smFindTag, "ResOxygenVeh") '定位充氧车资源
nResAirconVehIndex = oModel.Modules.Find(smFindTag, "ResAirconVeh") '定位空调车资源
Set oResOilVehModule = oModel.Modules(nResOilVehIndex)
Set oResNitrogenVehModule = oModel.Modules(nResNitrogenVehIndex)
Set oResOxygenVehModule = oModel.Modules(nResOxygenVehIndex)
Set oResAirconVehModule = oModel.Modules(nResAirconVehIndex) '将 4 个实例引用分别赋给 4 个变量
oResOilVehModule.Data("Capacity") = nOilVeh
ResNitrogenVehModule.Data("Capacity") = nNitrogenVeh
oResOxygenVehModule.Data("Capacity") = nOxygenVeh
oResAirconVehModule.Data("Capacity") = nAirconVeh '优化算法生成新候选方案对车辆数量重置
End Sub
```

3.3 优化算法

禁忌搜索(Tabu Search,简称 TS)算法是对局部领域搜索的一种扩展,是一种全局逐步寻优算法,是对人类智力过程的一种模拟。TS 算法通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,并通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态,进而保证多样化的有效探索以最终实现全局优化^[13-15]。

本文利用禁忌搜索算法,得到在单机保障时间 $J(\theta)$ 最小情况下的最优的车辆数配置方案。其基本运算步骤如下:

1) 初始化。①从第一次的仿真中,得到优化算法的初始方案, $\theta = \{\theta_{O_i}, \theta_{O_x}, \theta_{N_i}, \theta_{A_i}\}$,并令最优方案 $\theta^* = \theta$;②初始化禁忌表为空: $T = \emptyset$;③设置迭代计数 $k = 0, l = 0$;

2) While ($N(x) \setminus T \neq \emptyset$) do。①RunEndIndex = 0;② $k = k + 1, l = l + 1$;③在集合 $N(x) \setminus T$ 中选择 θ 为最优方案;④if $J(\theta) < J(\theta^*)$ then 令 $\theta^* = \theta, l = 0$;⑤if $k = \bar{k}$ 或 if $l = \bar{l}$, 令 RunEndIndex = 1, 执行第 3 步;

3) 输出最好的方案。 $\theta^* = \{\theta_{O_i}^*, \theta_{O_x}^*, \theta_{N_i}^*, \theta_{A_i}^*\}$ 。

4 优化算例

4.1 优化结果

以要完成对 6 架飞机 6 批次飞行的加油、充氧和充氮以及通风 4 项保障为例。这 4 项保障任务需要的保障资源是加油车、充氧车、充氮车和空调车。其中:加油车执行一次保障活动的时间服从参数为(10, 15, 20)min 的三角分布,即 TRIA(10, 15, 20);充氧车执行一次保障活动的时间服从 TRIA(3, 4, 5);充氮车执行一次保障活动的时间服从 TRIA(3, 4, 5);空调车执行一次保障活动的时间服从 TRIA(5, 7, 10)。当 6 架飞机全部保障完毕,飞机起飞执行飞行任务,降落后接受下一批次飞行的飞行保障,如此反复 6 批次。由于保障工作的性质,一架飞机在进行通风的同时可以进行加油、充氮以及充氧中的一种保障这些活动开展的先后顺序没有严格限制。

其约束条件为:加油车最少 2 辆,最多 4 辆;充氧车最少 1 辆,最多 2 辆;充氮车最少 1 辆,最多 2 辆;空调车最少 2 辆,最多 4 辆。可用以下最优化方程表示:

$$\begin{aligned} \text{Min } J(\theta) \quad (1) \quad \text{s. t.} \quad & 2 \leq \theta_{O_i} \leq 4 \\ & 1 \leq \theta_{O_x} \leq 2 \\ & 1 \leq \theta_{N_i} \leq 2 \\ & 2 \leq \theta_{A_i} \leq 4 \end{aligned} \quad (2)$$

初始参数设置: $\theta_{O_i} = 3, \theta_{O_x} = 1, \theta_{N_i} = 1, \theta_{A_i} = 3$;单次仿真的最大仿真次数为 10。

优化结果:图 2 中 $J(\theta)$ 线表示每种候选方案的目标值,即单机保障时间; $J(\theta^*)$ 线表示最优值改进序列。如图 2 所示,共有 36 种候选方案,当运行到第 7 个候选方案时,得到全局最优化结果,此候选方案为: $\theta_{O_i} = 4, \theta_{O_x} = 2, \theta_{N_i} = 2, \theta_{A_i} = 2$;单机保障时间为 0.409 6 h,见表 1。

表 1 优化结果
Tab.1 Optimization results

序号	$J(\theta)$	θ_{A_i}	θ_{N_i}	θ_{O_i}	θ_{O_x}
7	0.409 6	2	2	4	2
8	0.410 0	3	2	4	2
4	0.410 5	4	2	4	2
32	0.421 7	3	1	4	2
30	0.422 7	2	1	4	2
35	0.422 9	4	1	4	2
...

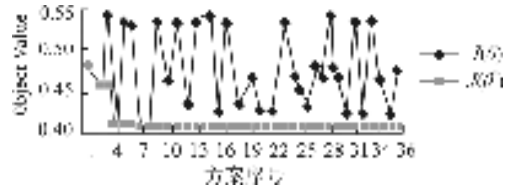


图 2 优化结果目标值及最优值改进序列
Fig.2 Objective values and the best values list

4.2 与 OptQuest 的比较

在 ARENA 中集成了 OptQuest 优化器^[16-17]。OptQuest 使用启发式方法,神经网络和数学优化方法,找到使目标函数值最大或最小的离散和(或)连续模型参数的值。它能够根据约束条件和不确定性给出最优解。OptQuest for Arena 是以变量(variable)和资源(resources)为控制参数(controls),对模型的系列响应进行最优化处理,但是不能对用户设置的实体属性(attribute)进行优化。

在车辆调度模型中 $L(\theta, \xi)$ 表示的单架飞机保障时间是以飞机实体(Entity)的属性(Attribute)来记录的,不能用 OptQuest 来进行优化。另外 OptQuest for Arena 不能处理多目标优化问题^[15]。

为了检验车辆调度仿真优化系统的运行效率,选用 Tally Value 类型的 Entity 1. VAtime 为优化目标,分别用 OptQuest 和本文的方法进行优化,和上一节同样具有 36 种候选方案,每个方案运行 10 次,即 replications = 10。计算机 CPU 配置为酷睿 T2050@1.60 G,内存 1 G。使用本文设计的优化方法运行 72 s,CPU 占用约 36%,内存占用率约 23 M;使用 OptQuest 需要运行 521 s,CPU 占用率约 78%,内存占用约 72 M。OptQuest 运行效率低是因为在优化过程中 OptQuest 每运行一个 replication,需要重新调用一次仿真程序,需要调用 $36 \times 10 = 360$ 次。而本文设计的优化程序是 Arena 模型的一部分,只需要重复启动 36 次。这说明运行仿真模型会耗费整个优化过程的大部分时间,而仿真模型的重复调用是耗时的重要原因。优化结果证明本文开发的优化系统的运行效率较高。

5 结束语

本文以 Arena 软件为仿真平台,提出了飞行保障过程中车辆调度问题的仿真建模方法及一种新的仿真优化系统架构,并结合实例说明了其具体实现情况。该框架利用 Arena 内嵌的 VBA 技术以及 VBA block 模块使优化程序作为仿真模型的一个组成部分,其运行效率是 OptQuest 的 7 倍多。为仿真与优化的集成提供了一个新的有效的思路和方法。在未来的工作中,对其它启发式优化算法,如遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等的集成以及多目标优化的开发,将是一个重要而有意义的研究方向。

参考文献:

[1] 方绍强,卫 克,陈伟鹏,等. 飞行保障过程中车辆调度建模与仿真[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2008,9(1):18-21.
FANG Shaoqiang, WEI Ke, CHEN Weipeng, et al. Research of Modeling and Simulation of Vehicle Schedule in Flight Supporting Process [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(1): 18-21. (in Chinese)

[2] 方绍强,卫 克,陈伟鹏,等. 基于 ARENA 的航空兵场站飞行保障过程建模与仿真[J]. 系统仿真学报,2008,20(3):746-750.
FANG Shaoqiang, WEI Ke, CHEN Weipeng, et al. Modeling and Simulation of Flight Supporting Process of Airfield Station Based on ARENA [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(3): 746-750. (in Chinese)

[3] 方绍强,卫 克,陈伟鹏,等. 基于 ARENA 的 UML 建模及其在飞行保障过程仿真中的应用[J]. 系统仿真学报,2008,20(11):3020-3023.
FANG Shaoqiang, WEI Ke, CHEN Weipeng, et al. UML Modeling Based on Arena and Its Application in Flight Support Process [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(11): 3020-3023. (in Chinese)

[4] Lloyd S P, Witsenhausen H S. Weapons Allocation is NP-complete [C] // Proc of the 1986 Summer Conf on Simulation. Reno,

- NV:[s. n.],1986:1054-1058.
- [5] AZZARO P C, BERNAL H L, BAUDET P, et al. A Two-stage Methodology for Short-term Batch Plant Scheduling: Discrete-event Simulation and Genetic Algorithm [J]. Computers & Chemical Engineering, 1998, 22(10): 1461-1481.
- [6] Hani Yasmina, Hehade Hi, Yalaoui Farouk. Simulation Based Optimization of A Train Maintenance Facility Model Using Genetic Algorithms [J]. Service Systems and Service Management, 2006, (1): 71-78.
- [7] 潘燕春,周泓,冯允成. 基于Arena的车间作业排序问题建模方法及其仿真优化系统设计[J]. 计算机集成制造系统. 2006,12(3):389-394.
PAN Yanchun, ZHOU Hong, FENG Yuncheng. Modeling & Simulation Optimization Systems Design for Job Shop Scheduling Based on Arena [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems. 2006,12(3):389-394. (in Chinese)
- [8] 鞠彦兵,王爱华,李桂芬. 生产作业计划仿真优化研究[J]. 微计算机信息. 2006,22(3):4-6.
JU Yanbing, WANG Aihua, LI Guifen. Simulation and Optimization of Production Scheduling Problem [J]. Microcomputer Information. 2006,22(3):4-6.
- [9] Jay April, Fred Glover, James Kelly P, et al. Practical Introduction to Simulation Optimization [C]//Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, December 07-10, 2003. New Orleans, Louisiana: [s. n.], 2003: 71-78.
- [10] 王凌,张亮,郑大钟. 仿真优化研究进展[J]. 控制与决策, 2003,18(3): 257-262.
WANG Ling, ZHANG Liang, ZHENG Dazhong. Advances in Simulation Optimization [J]. Control and Decision, 2003, 18(3): 257-262. (in Chinese)
- [11] Michael C Fu. Optimization for Simulation: Theory vs. Practice [J]. INFORMS Journal on Computing, 2002, 14(3): 192-215.
- [12] David Kelton W. Sadowski Randall P, Sturrock David T. Simulation with Arena (3rd ed) [M]. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [13] 王力,刘长有,涂奉生. 民用机场停机位优化配置[J]. 南京航空航天大学学报. 2006,38(4):433-437.
WANG Li, LIU Changyou, TU Fengsheng. Optimized Assignment of Civil Airport Gate [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics [J]. 2006,38(4):433-437. (in Chinese)
- [14] 高海昌,冯博琴,朱利. 智能优化算法求解TSP问题[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 241-247.
GAO Haichang, FENG Boqin, ZHU Li. Reviews of the Meta-heuristic Algorithms for TSP [J]. Control and Decision, 2006, 21(3): 241-247. (in Chinese)
- [15] 韩水,汪定伟. 禁忌搜索协调的多智能体优化方法及其应用[J]. 控制与决策, 2002, 17(4): 450-453.
HAN Shui, WANG Dingwei. Optimization Approach of Multi-agent System with Tabu Search Coordination and Its Application [J]. Control and Decision, 2002, 17(4): 450-453. (in Chinese)
- [16] Rockwell Software In. Arena Opt-Quest User's Guide [M]. [S. l.]: Rockwell Software In, 2004.
- [17] Paul Rogers. Optimum-seeking Simulation in the Design and Control of Manufacturing Systems: Experience With Opt-Quest for Arena [C]//Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, December 08-11, 2002. San Diego, California: [s. n.], 2002: 1142-1150.

(编辑:姚树峰,徐敏)

Research of Simulation-based Optimization of Vehicle Schedule in Flight Supporting Process

FANG Shao-qiang¹, WEI Ke^{1,2}, CHEN Wei-peng^{1,2}, ZHAO Shang-hong¹, WU Ji-li¹

(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Logistics department of Air Force, Beijing 100720, China)

Abstract: The vehicle schedule model in flight supporting process is established, and an optimized algorithm of vehicle resource arrangement based on Tabu Search algorithm is proposed. The simulation model and the optimized algorithm are integrated through built-in VBA technique and VBA block of Arena, which makes up the vehicle schedule simulation-based optimization system. The simulation-based optimization system realized three functions: controlling simulation model, integrating optimization algorithm and inputting parameters into simulation model. Through this system, the optimum vehicle number arrangement under minimum single flight support time is obtained. The operation efficiency is increased by more than 7 times by using this system than by using the bound optimized tools OptQuest for Arena.

Key words: flight supporting process; vehicle schedule; Tabu search algorithm; simulation-based optimization