

11-20-2019

Multi-Objective Operation Scheduling Optimization of Shipborne-equipment Based on Genetic Algorithm

Jinsong Bao

Donghua University, Shanghai 201600, China;

Zhiqiang Li

Donghua University, Shanghai 201600, China;

Yaqin Zhou

Donghua University, Shanghai 201600, China;

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.

Multi-Objective Operation Scheduling Optimization of Shipborne-equipment Based on Genetic Algorithm

Abstract

Abstract: Multi-objective operation scheduling of shipborne equipment is a complex combinational optimization problem under multi-task system. Existing research focuses mainly on single-objective optimization while several other objectives need to be considered during real operation such as path, duration, resource, etc. *Considering the operation scheduling before exporting of an amphibious landing ship as the research object, both scheduling duration and resource requirement under the precedence constraint are optimized. The mathematical model of this multi-objective operation scheduling is established and solved using genetic algorithm. A fitness function which can be self-adaptively adjusted is designed; an adapting encoding strategy, a crossover operator, and a mutation operator are also designed during the solution.* The result of the instance simulation indicates that the algorithm is effective and reliable to optimize duration and resource requirements during the operation scheduling.

Keywords

shipborne-equipment, operation scheduling, precedence constraint, multi-objective optimization, genetic algorithm

Recommended Citation

Bao Jinsong, Li Zhiqiang, Zhou Yaqin. Multi-Objective Operation Scheduling Optimization of Shipborne-equipment Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(5): 901-908.

基于遗传算法的舰载装备多目标作业调度优化研究

鲍劲松, 李志强, 周亚勤

(东华大学, 上海 201600)

摘要: 舰载装备的作业调度是多任务模式下的复杂组合优化问题。已有研究主要针对单一目标优化, 而实际往往需同时优化路径、时长、资源等多个目标。以两栖登陆舰舰载装备出库前的作业调度为研究对象, 在考虑先序约束的基础上, 对作业时长及资源用量同时进行优化。分析建立了该作业调度的多目标优化模型, 利用遗传算法求解; 针对两目标设计了可自适应调整的适应度函数, 并对编码方式及遗传算子进行设计; 实例仿真, 验证算法可以高效地同时优化调度作业时长和资源用量。

关键词: 舰载装备; 作业调度; 先序约束; 多目标优化; 遗传算法

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 05-0901-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0160

Multi-Objective Operation Scheduling Optimization of Shipborne-equipment Based on Genetic Algorithm

Bao Jinsong, Li Zhiqiang, Zhou Yaqin

(Donghua University, Shanghai 201600, China)

Abstract: Multi-objective operation scheduling of shipborne equipment is a complex combinational optimization problem under multi-task system. Existing research focuses mainly on single-objective optimization while several other objectives need to be considered during real operation such as path, duration, resource, etc. *Considering the operation scheduling before exporting of an amphibious landing ship as the research object, both scheduling duration and resource requirement under the precedence constraint are optimized. The mathematical model of this multi-objective operation scheduling is established and solved using genetic algorithm. A fitness function which can be self-adaptively adjusted is designed; an adapting encoding strategy, a crossover operator, and a mutation operator are also designed during the solution.* The result of the instance simulation indicates that the algorithm is effective and reliable to optimize duration and resource requirements during the operation scheduling.

Keywords: shipborne-equipment; operation scheduling; precedence constraint; multi-objective optimization; genetic algorithm

引言

两栖登陆舰是如今各国的军事利器, 能否最大

化利用两栖登陆舰的作战能力一定程度上决定了一个国家在军事领域是否具有优势地位。其舰载装备在进行日常维护或更换时, 需要将其从甲板机库调运到陆地, 在此过程中舰载装备需要完成检修、卸载和转运等一系列任务。可见舰载装备出库前的作业调度是完成舰船作战效能的重要一环, 其重点就在于使出库作业的效率最大化。目前, 国内外学者已针对舰载装备调度优化进行了部分研究: 司



收稿日期: 2017-04-19 修回日期: 2017-07-07;
基金项目: 国家自然科学基金(51475301);
作者简介: 鲍劲松(1972-), 男, 安徽, 博士, 副教授, 博导, 研究方向为智能制造、复杂系统建模与仿真等; 李志强(1996-), 男, 安徽, 硕士生, 研究方向为智能调度等; 周亚勤(通讯作者 1978-), 女, 江苏, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为智能生产调度与控制等。

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

维超和刘亚杰针对复杂机库环境中多机出库调度问题, 利用改进遗传算法(NGA)对其路径进行优化^[1-2]; 王云祥运用柔性流水车间调度理论, 对空间约束条件下舰载机从航母机库转运到飞行甲板停机位的调度问题进行研究, 并采用智能粒子群算法(PSO)对出库顺序进行优化求解^[3]; 美国 MIT HAL 实验室定制的 DCAP 软件采用启发式算法和多智能代理技术(MA)对航母甲板上多种舰载装备的线性规划问题进行优化调度仿真和验证^[4-5]。

以上研究主要考虑某单目标优化, 使调度路径最短或调度时长最小。而在实际调度规划中, 调度方案的性能指标往往是一个多维的概念, 即需同时对多个目标进行优化。目前多目标优化的概念主要存在于资源调配、生产流水线等课题中: 王涛考虑资源受限情况, 对军用车辆维修保障资源调度的优化问题进行研究^[6], 李彬彬考虑服装生产流水线中多约束情况, 建立多目标规划优化模型^[7]。但目前针对舰载装备调度方面的多目标优化研究还较少, 前文提及到的司维超博士在对舰载机出库路径优化时也同时对总时长进行了优化, 但其中两个优化目标存在一定的参数重叠, 即能够被泛性地看作为一个目标。

在调度过程中, 舰载装备需在甲板的维修区、卸载区、牵引区等多个区域分别完成规定的作业任务, 每个任务都占用一定数量的资源和固定的时长; 同时作业需要按照规定的流程进行, 即先序约束。在若干个舰载装备完成其各自一系列作业任务的过程中, 可能出现某些时段资源需求较高而另一些时段需求较低, 造成资源的分配不合理以及分布不均衡。本文以两栖登陆舰舰载装备的出库作业为

研究对象, 在考虑先序约束的前提下, 以最小化资源用量以及最小化作业完工时间为目标, 研究并建立多目标作业调度数学模型, 并利用遗传算法进行求解, 给出最优或近似最优方案。

1 舰载装备作业调度问题

1.1 作业调度分析

舰载装备在出库前需经过甲板的任务区域, 并完成一系列有规定顺序的作业任务, 如维修、卸载等, 如图 1 所示。本文将舰载装备抽象为主体(body), 各作业任务抽象为节点(node), 每个节点均配置一定数量的资源并占用固定的作业时长, 不同主体需要完成的节点不同。如何在满足各主体节点先序顺序的约束下, 对各节点任务进行工作顺序和起始时间的确定, 使得总作业时长最短且资源用量最小, 是舰载装备作业调度需要解决的问题。作业调度过程中主体的节点间存在先序约束, 如图 2 所示。先序约束分为默认前置节点(Default pre-node)和主体间设定前置节点(Regulated pre-node), 其中默认前置节点为同一主体各节点的前一个节点, 表示某装备需要在前一作业结束后才能进行下一作业任务, 如主体 1/节点 2 的默认前置节点为主体 1/节点 1; 设定前置节点则存在于不同主体之间, 是各主体作业调度的流程约束, 如主体 4/节点 1 存在设定前置节点主体 3/节点 2。再如主体 2/节点 5, 不但有同主体的默认前置节点 2, 还有主体 1/节点 2 作为主体间设定前置节点, 即节点 5 需要在两个前置节点都结束后才能执行, 且一个节点可能存在多个设定前置节点。

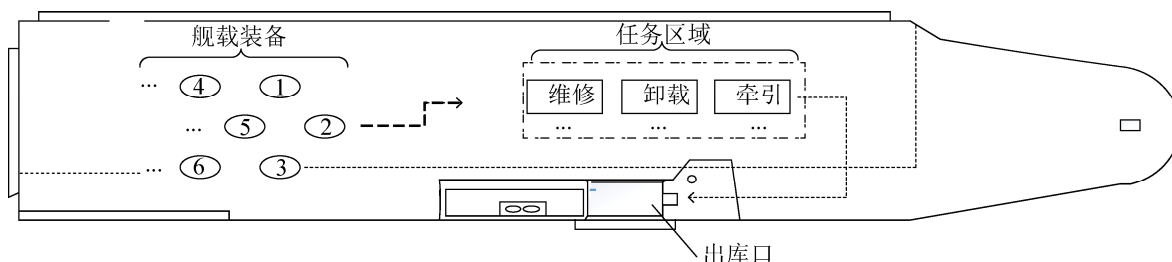


图 1 舰载装备出库作业示意图

Fig. 1 Operation of shipborne equipment before exporting

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

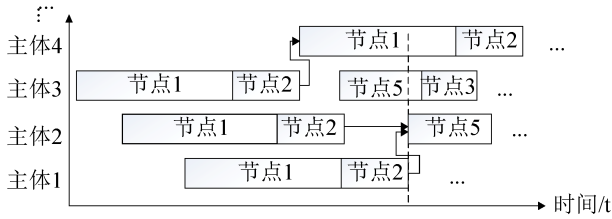


图 2 先序约束关系示意图

Fig. 2 Precedence constraint of scheduling

1.2 舰载装备出库调度数学模型

根据分析, 调度作业的过程中包含 m 个主体, n 种节点, 每个主体需执行 n_i 个节点数, 其中 i 为主体序号, n_i 表示主体 i 的节点数。每个节点都有固定的作业时长 $t_{M(i,j)}$ 和资源用量 $R_{M(i,j)}$, 其中 $M(i,j)$ 表示主体 i 的第 j 个节点, 指向该主体的某具体节点任务。

建立数学模型如下:

1) 约束条件:

$$\begin{cases} T_{M(i,j)}^s \geq T_{M(i,j-1)}^s + t_{M(i,j-1)} \\ T_{M(i,j)}^s \geq \max\{[T_{M(i_1,j_1)}^s + t_{M(i_1,j_1)}], \dots, \\ [T_{M(i_k,j_k)}^s + t_{M(i_k,j_k)}]\} \end{cases} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i$$

式中: $T_{M(i,j)}^s$ 表示 $M(i, j)$ 节点任务的开始时间点; $t_{M(i,j)}$ 表示该节点的作业时长; $M(i_1, j_1) \dots M(i_k, j_k)$ 表示 $M(i, j)$ 的 k 个设定前置节点。第一个方程表示满足式中节点的默认前置节点关系, 第二个方程表示节点满足主体间设定前置节点关系, 当存在多个设定前置节点时需满足所有关系, 即 $M(i, j)$ 需要在 k 个前置节点均结束后才可开始进行作业。

$$T_{M(i,j)}^s, t_{M(i,j)} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n_i \quad (2)$$

式(2)表示各时间函数都有不小于 0 的约束。

2) 目标函数

$$\min f = \{(f_{\text{res}}, f_{\text{time}})^T\} \quad (3)$$

该式为舰载设备作业调度问题的多目标函数, 包含两个子目标: 资源目标函数 f_{res} 和总作业时长目标函数 f_{time} 。

$$f_{\text{res}} = \min \left\{ \max \left[\sum_{i=1}^m R_{M(i,j,t)} \right] \right\}, \quad (4)$$

$$t \in (0, \max[T_{M(i,j)}^s + t_{M(i,j)}])$$

式(4)为资源目标函数, 要求调度过程中资源人员数量尽可能达到理论最小值, 其中 $R_{M(i,j,t)}$ 表示在 t 时刻主体 i 第 j 节点的资源数量(当 $T_{M(i,j)}^s \leq t < T_{M(i,j)}^s + t_{M(i,j)}$ 时有实际值, 否则为 0)。

$$f_{\text{time}} = \min \{ \max [T_{M(i,j)}^s + t_{M(i,j)}] \} \quad (5)$$

式(5)为总作业时长的目标函数, 要求总作业时长尽可能达到理论最小值。

为均衡两目标的权重, 本文设计了能自适应调整的权重分配策略, 将目标函数定义为:

$$f = \alpha_1 \times f_{\text{res}} + \alpha_2 \times f_{\text{time}} \quad (6)$$

式中: α_1, α_2 分别为时间权重系数和资源权重系数, 详细的权重分配算法在后文算法的适应度函数设计处介绍。

2 基于遗传算法的调度算法设计

遗传算法作为一种可在大规模搜索空间中寻求到满意解的高效算法, 在组合调度优化领域已有广泛运用^[8-10]。在本文的多目标作业调度过程中, 需要减小资源用量并使总作业时长最小, 因此在利用遗传算法求解时将二者作为算法的适应度函数, 而每个染色体对应一种作业调度方案。通过交叉、变异不断进化染色体, 最终得出使资源用量和作业时长综合最优的方案。

下面对遗传算法求解舰载装备多目标作业调度过程中的关键算子进行设计:

1) 编码

本文采用基于主体 i 的实数编码方式, 产生基于主体 i 和节点序号 j 的编码序列。序列中的奇数位表示主体号, 偶数位表示节点序号, 每两位编码组成的 (i, j) 形成一个节点, 指向作业中某特定节点任务。例如某个体的染色体编码是 [1, 1, 2, 1, 2, 2, 3, 1, 1, 2, 3, 2], 表示的作业调度方案是: ①主体 1/第 1 节点 → ②主体 2/第 1 节点 → ③主体 2/第 2 节点 → ④主体 3/第 1 节点 → ⑤主体 1/第 2 节点 → ⑥主体 3/第 2 节点。

若随机生成编码序列, 则极有可能造成同一节点的多次编码或节点次序的紊乱, 形成冲突。为保

证染色体的合法性,初始种群的编码序列需要基于一定规则产生,图3为生成合法编码的流程图。假设某染色体正在编码,图中*i*表示主体序号,*s*为主体*i*已存入编码的节点数,*k*表示已经存入编码的位数(初始值为0),*W*是作业调度的节点总数。

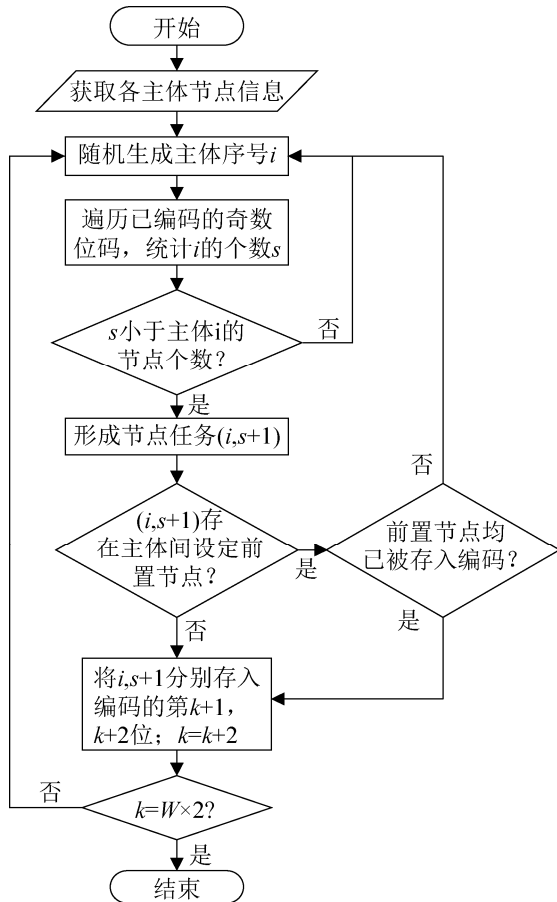


图3 编码流程

Fig. 3 Flow chart of encoding

2) 适应度函数

多目标优化问题的传统求解方法是权重系数法,即通过给予目标分别赋予相应系数,将多目标整合为一个目标,从而将问题转化为单目标优化问题。对权重系数的设定,目前有固定权重和随机权重两种策略,其中固定权重法带有决策者对目标优先级的主观偏向,结果往往存在侧重从而导致局部收敛,而随机权重法对于 Pareto 边界能给出更均衡的选择压力^[11-12],提高了算法在全局搜索能力上的稳定性。

本文以随机权重法为基础,以最小作业时长和最小资源需求的综合加工作为目标函数,设计了一种自适应权重分配法(Adaptive Weight Approach)^[7,13],可根据每代种群的进化程度动态调整适应度分配,并更新权重系数。

适应度函数为:

$$f_i = S - \{\alpha_1 [T_{M(i,j)}^s + t_{M(i,j)}] + \alpha_2 \times \max[\sum_{i=1}^m R_{M(i,j,t)}]\} \quad (7)$$

式中:*S*为一个足够大的输入参数; α_1 , α_2 分别为每代种群进化后更新的时间权重系数和资源权重系数。权重系数的具体设计方法如下:

设种群当前代数*g*,共经过*M*代进化,每代个数*N*。对于有*A*个子目标问题,定义 $V_a^{\min(g)}$, $V_a^{\max(g)}$ 分别为*a*目标第*g*代种群集合中的最小值和最大值, $f_a(x)$ 表示第*g*代种群个体集合。

$$\begin{cases} V_a^{\min(g)} = \min\{f_a(x), V_a^{\min(g-1)}\} \\ V_a^{\max(g)} = \max\{f_a(x), V_a^{\max(g-1)}\} \end{cases}, x=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

$$\omega_a = (V_a^{\max(g)} - V_a^{\min(g)}) / V_a^{\max(g)}, g=1, 2, \dots, M \quad (9)$$

$$\alpha_a = \omega_a / \sum_{a=1}^A \omega_a \quad (10)$$

式(8)表示第*g*代种群得到的*a*目标的最小值和最大值。其中*a*=1,2,分别代表时间目标和资源目标,*x*为种群个体编号;式(9)表示第*g*代中*a*目标的解的改善程度;式(10)表示第*g*代*a*目标的权重系数。

3) 选择算子

本文采用目前最为常用的轮盘赌选择(roulette wheel selection)作为算子,即种群中个体被选中的概率与个体的适应值成比例。设选择概率为*CP*,种群规模为*M*,个体的适应度为 f_i ,则个体的*i*被选中的概率为: $CP_i = f_i / \sum_{i=1}^M f_i$,选择概率大的个体被选中可能性大,进行下一步的遗传算子操作。

4) 交叉算子

随机取出当代种群中的两组染色体配对,执行两点交叉操作。但是只对配对的染色体进行简单的

两点交叉可能会割裂主体与节点的关系,同时可能导致节点的重复、遗漏,或违背先序关系,与实际作业调度流程相悖。

为解决此问题,本文仅对染色体的偶数位之后进行操作,避免将主体和节点的关系割裂,并且针对性地设计了一种类 PMX 交叉方法以防止序列冲

突:随机选择一对染色体中偶数位后的偶数个基因(两染色体被选中序列的位置相同),然后交换两组基因,接下来进行冲突检测,分别用 C_1, C_2, \dots 及 C_1', C_2', \dots 标记两组基因中发生冲突的基因,最后将数字相对应的基因再次交换,得到子代染色体。具体过程如图 4 所示。

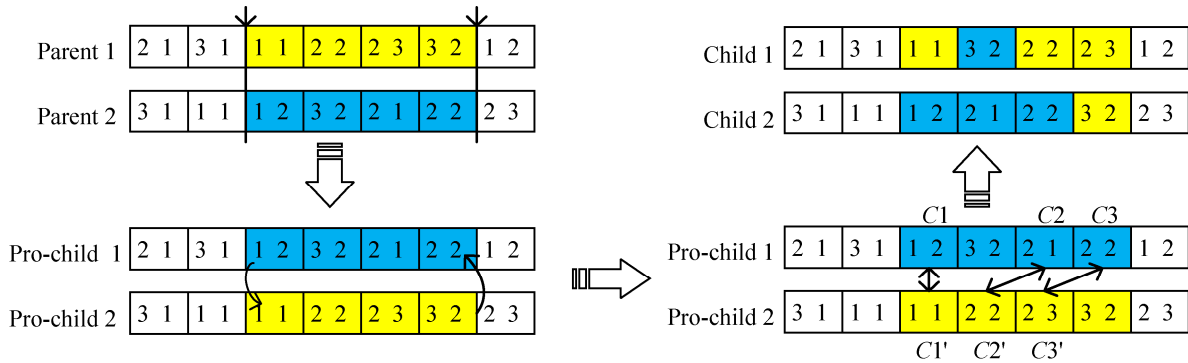


图 4 类 PMX 交叉方法
Fig. 4 Crossover operator adapted from PMX

5) 变异算子

变异的目的是维护群体的多样性,为选择和交叉过程中可能丢失的基因进行修补。本文采用互换变异。考虑到如上交叉算子中提到的问题,这里只对序列中相邻非同主体节点基因进行互换,如将图 4 中 Parent1 染色体中的[1 1]和[2 2]两个基因进行互换,而不可将相邻的[2 2][2 3]基因互换。

3 实例仿真

以两栖登陆舰为环境进行仿真,验证本文所设计的优化算法。

3.1 仿真模型建立

该两栖登陆舰上装有 10 个装备,即 10 个主体。其中主体 1, 2, 3, 4, 9, 10 在出库过程中各需要进行 30 个节点任务,主体 5, 6, 7, 8 则各需要进行 20 个节点任务。由于模型中节点数量庞大且各节点前置关系较为复杂,本文不作详细陈列。以某主体的部分节点为例,节点安排形式以及节点之间的关系如表 1 所示(省略默认前置节点信息);节点-资源使用情况如表 2 所示。

表 1 某主体部分节点信息

Tab. 1 Example of a body and its part nodes information

节点	时长/min	设定前置节点
1	6	主体 3/节点 4
2	1	/
5	2	主体 2/节点 2
1	6	/
8	21	/
7	1	主体 5/节点 1; 主体 2/节点 1; 主体 3/节点 1; 主体 4/节点 1; 主体 9/节点 2
16	22	/
18	15	/

表 2 各节点所需资源数量

Tab. 2 Resource requirements of nodes

节点	资源数量
1/3/7/11/15/16	1
2/4/6/12/18/19	2
5/9	3
其余	4

3.2 仿真实现及结果分析

本文采用 C#面向对象编程实现算法以及分析仿真。算法的参数设置如下:种群规模为 $N=200$,交叉概率 $P_c=0.9$,变异概率 $P_m=0.01$,进化代数

$G=200$, 以最终收敛后最好个体的目标函数值作为最优解。为确认算法的有效性, 本文对仿真程序进行大量运行, 均得到了较好结果。图5为算法运行时总作业时长最优值随进化代数(Optimal duration-Generation)的变化情况, 图6为资源使用最优解随进化代数(Optimal resource-Generation)的变化情况。可以看出: 最优值随着种群的进化逐渐地减小并且最后收敛于极值, 即趋近于最优值。其中, 资源用量的值在种群在进化了70代左右完全收敛, 作业时长的值在进化了150代左右完全收敛。说明该算法可以同时总作业时长和资源用量的配置进行优化。

在仿真时, 对算法得到的最优个体解码后转写成的ICS文件进行操作, 笔者开发出实现作业调度方案可视化查询和展示界面, 如图7所示(以某方案为例)。上述优化算法求得的方案显示的优化结果为: 资源使用量8人, 调度时长11.92h。

以上仿真证明了优化算法的可行性。为求证其是否高效, 本文使用枚举算法解得仅考虑对作业时

长优化情况下的最优调度方案。图8给出了时长最优方案的作业时长及资源用量状况, 图9则给出本文算法求解得出的多目标优化方案的时长与资源状况, 作为对比。

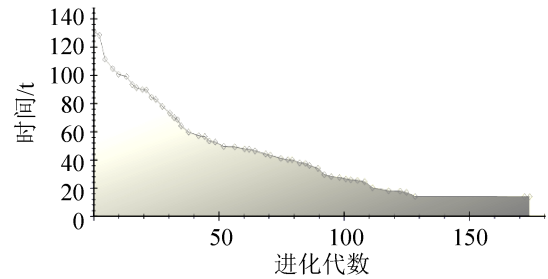


图5 时长最优值随进化代数的变化情况

Fig. 5 Convergence state of optimal duration-generation

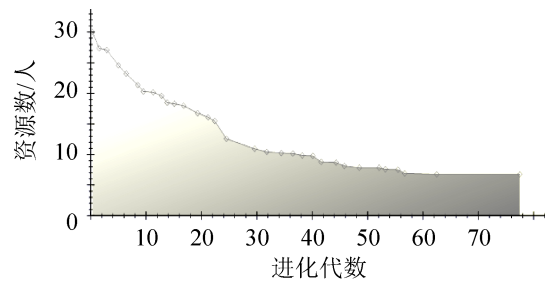


图6 资源最优值随进化代数的变化情况

Fig. 6 Convergence state of optimal resource-generation

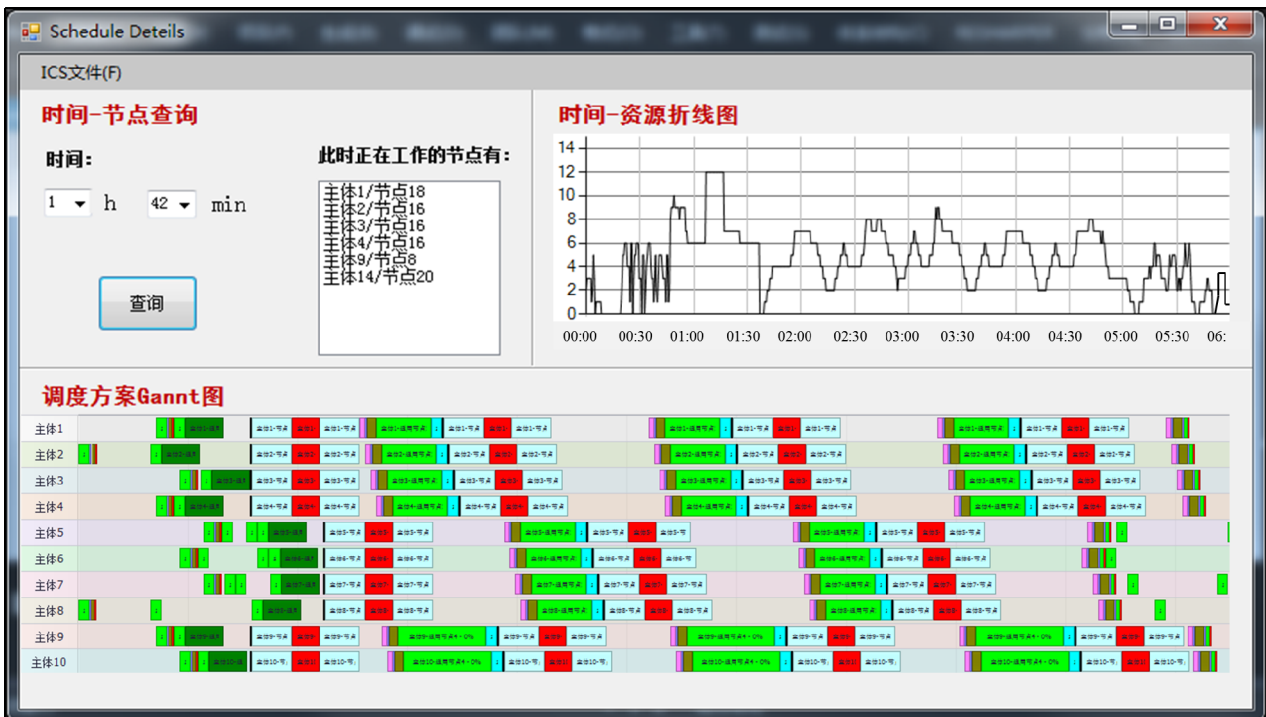


图7 作业方案查询及展示界面

Fig. 7 Interface of scheduling system

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

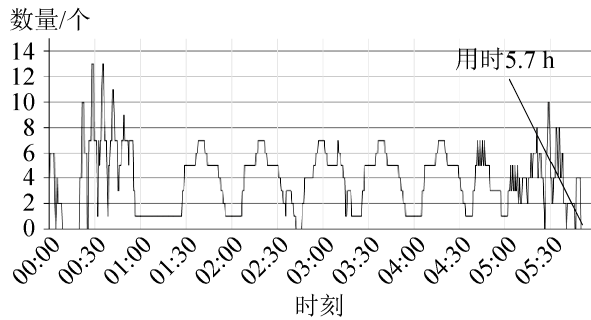


图 8 单一时长优化方案的作业时长及资源状况
Fig. 8 Operation duration and resource status of single-time optimization scheme

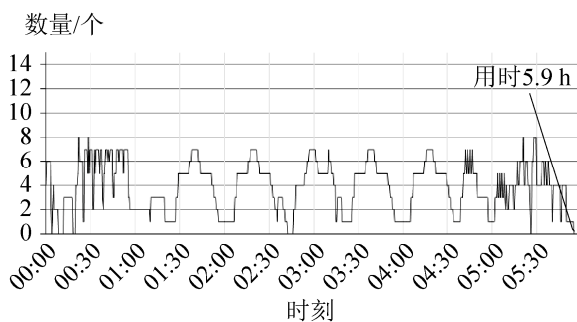


图 9 多目标优化方案的作业时长及资源状况
Fig. 9 Operation time and resource status of multi-objective optimization scheme

将图 8 和图 9 的信息以及计算运行时间进行统计, 可得到表 3 的对比结果, 可以看出: 基于本文优化算法所得方案的总作业时长与时长最优方案的用时差为 $5.9-5.7=0.2$ h, 而资源用量之差为 $8-13=-5$ 人。综合考虑时长和资源的目标需求, 虽然多目标优化方案多出 12 min 的用时, 但是作业调度中需要的资源数却少了 5 人; 且从折线图可以看出, 多目标优化方案在资源布置上更为均衡合理。另外, 由于作业时长最优方案是基于枚举法求得, 计算耗时约为 60 s, 而优化算法收敛到最优解的平均用时仅为 15 s 左右。

综合来看, 本文提出的综合考虑作业时长及资源用量的多目标优化算法方案与时长最优方案相比, 虽然总作业时长略大, 但资源用量更小、分布更合理, 并且计算时间较短, 更符合实际作业调度的需求。这表明本文的 GA 多目标优化算法在求解舰载装备作业调度问题时具有较好的有效性和快速性。

表 3 方案优化结果对比

Tab. 3 Optimization results of solutions

方案	调度总时长/h	资源用量/人	计算耗时/s
多目标优化	5.9	8	约 15
时长最优	5.7	13	约 60

4 结论

针对舰载装备出库前的多目标作业调度优化问题进行了研究。分析并建立了考虑先序约束情况下, 同时对作业时长目标和资源用量目标进行优化的数学模型; 利用遗传算法(GA)求解该多目标优化问题, 并结合实际作业调度的特点, 通过对各目标函数的权重调整、适应度函数的设计以及编码, 交叉和变异等策略的改编, 形成了适用于舰载装备出库作业调度的优化算法, 并利用 C#完成算法及仿真软件的实现。最后将该算法在两栖登陆舰的装备出库作业问题上进行仿真应用, 结果表明该方法在结果的准确性、与实际问题的切合性以及计算求解的快速性上都更加满足要求, 体现了其优越性。

参考文献:

- [1] 司维超, 齐玉东, 韩维. 基于 NGA 算法的舰载机机库出库调度优化[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(11): 13-19.
Si Weichao, Qi Yudong, Han Wei. Hangar-exporting Optimization Schedule of Multi-carrier Plane Based on NGA [J]. Fire Control & Command Control, 2015, 40(11): 13-19.
- [2] 刘亚杰, 李忠猛, 谢君. 基于改进遗传算法的舰载机出库调度优化方法[J]. 火力与指挥控制. 2015, 40(6): 57-60.
Liu Yajie, Li Zhongmeng, Xie Jun. Optimized Method of Carrier-borne Aircrafts Exporting Scheduling Based on Improved Genetic Algorithm [J]. Fire Control& Command Control, 2015, 40(6): 57-60.
- [3] 王云翔, 毕玉泉, 杨茂胜, 等. 基于空间约束的舰载机出库调度[J]. 指挥控制与仿真, 2015, 37(1): 107-111, 115.
Wang Yunxiang, Bi Yuquan, Yang Maosheng, et al. Shipboard Aircraft Scheduling Based on Space Constraint [J]. Command Control& Simulation, 2015, 37(1): 107-111, 115.

- [4] 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 (S2168-2267), 2014, 44(6): 761-773.
- [5] Ryan J, Cummings M, Roy N, et al. Designing an Interactive Local and Global Decision Support System for Aircraft Carrier Deck Scheduling: AIAA[Z]. St.Louis, Missouri: 2015.
- [6] 王涛. 基于混合进化算法的军用车辆维修保障资源调度优化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2013.
WANG Tao. Research on Maintenance Resource Scheduling Optimization for Military Vehicles Based on Hybrid Evolutionary Algorithm [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2013.
- [7] 李彬彬. 基于遗传算法的多目标生产作业调度研究 [D]. 上海: 东华大学, 2014.
Li Binbin, The Research on multi-objective production scheduling based on genetic algorithm on the background of a clothing enterprise [D]. Shanghai: Donghua University, 2014.
- [8] Ishikawa S, Kubota R, Horio K. Effective hierarchical optimization by a hierarchical multi-space competitive genetic algorithm for the flexible job-shop scheduling problem[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2015, 42(24): 9434-9440.
- [9] Meng Q, Zhang L, Fan Y. Approach of hybrid GA for multi-objective job-shop scheduling [J]. International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing (S1793-9623), 2016, 7(4): 1643006.
- [10] Oleśków Szlapka J, Pawłowski G. Scheduling and lot sizing problems for variable range of products using GA-based method [J]. IFAC-PapersOnLine(S2405-8963), 2016, 49(12): 662-667.
- [11] 李梅娟, 陈雪波. Pareto 遗传算法在货位配置中的应用研究[J]. 控制工程, 2006, 13(2): 138-140.
Li Meijuan, Chen Xuebo. Research and Application of Pareto Genetic Algorithm for Freight Sites Assignment Optimization [J]. Control Engineering of China, 2006, 13(2): 138-140.
- [12] 孙明辉, 刘继来. 一般均衡与 pareto 最优关系的探讨 [J]. 河北北方学院学报(自然科学版). 2007, 23(6): 8-10.
Sun Minghui, Liu Jilai. Discussion of the relationship between General Equilibrium and Pareto Optimum [J]. Journal of Heibei North University (Natural Science Editon), 2007, 23(6): 8-10.
- [13] 朱华炳, 程翔宇, 唐白玉, 等. 多目标遗传算法适应度函数权重设置的改进[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(4): 11-14.
Zhu Huabing, Chen Xiangyu, Tang Ziyu, et al. Improvement of Moderate Weight to Fitness Function of Multi-objective Genetic Algorithm [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique. 2007(4): 11-14.