

doi: 10.7690/bgzd.2021.08.012

## 多型地空导弹批量技术准备调度优化模型

刘 战, 宋贵宝, 曾 亮, 姜子劼  
(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 针对多型地空导弹批量技术准备调度优化的问题, 提出使用遗传算法模型进行优化。构建导弹批量技术准备调度优化模型, 利用遗传算法对模型进行解算, 通过对阵地准备 2 种型号导弹进行调度优化, 得到 5 枚导弹技术准备的最短完工时间及各项工作的安排顺序。实例分析结果表明: 该模型可根据人员和设备数量变化求出导弹准备的最短完工时间, 为战时决策者判断批量导弹何时能够完成技术准备并展开分配调运提供依据。

**关键词:** 导弹批量技术准备; 网络计划; 流程优化; 项目调度; 遗传算法

**中图分类号:** TJ762.1<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A

## Optimization Model for Multi-types Surface-to-air Missile Batch Technology Preparation Scheduling

Liu Zhan, Song Guibao, Zeng Liang, Jiang Zijie  
(College of Coastal Defense, Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of batch technology preparation scheduling optimization of multi-types surface-to-air missiles, a genetic algorithm model optimization is proposed. The optimization model of missile batch technical preparation scheduling is constructed, and the genetic algorithm is used to solve the model. Through the scheduling optimization of 2 types of missiles prepared against the ground, the shortest completion time of technical preparation of 5 missiles and the arrangement sequence of each work are obtained. The results of case analysis show that the model can calculate the shortest completion time of missile preparation according to the change of personnel and equipment quantity, which provides the basis for decision-makers in wartime to judge when the batch of missiles can complete technical preparation and launch distribution and transportation.

**Keywords:** missile batch technical preparation; network planning; process optimization; project scheduling; GA

### 0 引言

导弹技术准备是指将导弹由储存状态经分解、测试、总装等一系列操作后转化为一级战斗弹状态的过程, 是涉及多个专业、需要各专业操作号手紧密配合的复杂工作<sup>[1-2]</sup>。

随着导弹技术的发展, 部分导弹技术准备设备朝着通用化方向发展, 且地空导弹体积小, 为多型多枚导弹在同一场地展开并进行技术准备提供了条件。由于现役地空导弹种类较多, 一场防空作战部队需要近中远不同射程的多型导弹, 考虑多型导弹同时进行技术准备, 将有效提高人员和设备的利用率, 加快导弹技术准备效率。

在以往的研究文献中, 关于提高导弹批量技术准备效率的研究主要包括多项目优化衔接流水作业和多枚弹并行交叉网络作业方法。彭善国等<sup>[3]</sup>运用 PERT 技术并依据动态规划法的基本思想, 通过人为分析某型导弹技术准备各工序的前后约束关系,

将 2 枚导弹的技术准备网络作业流程图合并为一幅, 以达到多项目优化衔接的目的, 从而缩短技术准备完工时间; 邱开兰等<sup>[4]</sup>提出统筹交叉安排多枚导弹技术准备工序的交叉网络作业方法, 以减少专业交替作业的等待时间, 实现缩短批量导弹技术准备时间的目的, 并建立了各型多枚导弹技术准备完工时间的计算模型。

综合上述 2 种提高导弹技术准备效率的方法以及计算各型多枚导弹技术准备完工时间的方法, 存在以下 3 点有待改进的问题:

- 1) 合并网络作业流程图的方法对多枚不同型号导弹同时进行技术准备不适用;
- 2) 设备和人员多于某项工序所需数量但少于该项工序 2 组同时进行所需数量时, 无法对各工序进行有效调度;
- 3) 人员和设备数量改变时, 批量导弹技术准备的完工时间不易确定。

收稿日期: 2021-04-26; 修回日期: 2021-06-11

作者简介: 刘 战(1996—), 男, 山东人, 硕士, 从事航空装备系统工程研究。E-mail: 905268131@qq.com。

针对上述问题，为提高多型导弹批量技术准备效率并确定人员和设备数量改变时技术准备多枚导弹的完工时间，笔者将参加技术准备的人员和设备视为资源<sup>[5]</sup>，将多型导弹批量技术准备优化问题视为资源约束下的多项目调度问题 (resource constrained multi-project scheduling problem, RCMPSP)<sup>[6-13]</sup>，建立资源约束下多型导弹批量技术准备调度优化模型，并采用遗传算法对模型进行解算，最终求解在人员和设备数量约束下的导弹批量技术准备的最短完工时间及工序安排。

### 1 问题描述

在现代战场环境，对敌军的远程打击主要依靠导弹，消耗量巨大。为快速响应多个导弹发射阵地对不同型号导弹的需求，需从多个导弹仓库对导弹进行分配调运。在调运前，需将导弹从仓储状态经技术准备转化为一级战斗弹状态。为了提高批量导弹技术准备效率，需对技术准备流程进行调度优化；同时，不同仓库的人员和设备数量不同，技术准备能力也不同，判断不同仓库批量技术准备多枚导弹的完工时间将为导弹的快速分配调运提供重要参考依据。

以某导弹技术准备阵地准备批量导弹为例，可将批量导弹技术准备调度优化问题描述为：某技术准备阵地需准备  $N$  枚导弹，其中第  $i$  枚导弹的技术准备流程包括  $n_i$  道工序，各工序间存在前后约束关系，且各工序需要的设备及人员种类不尽相同。优化目标为通过各工序调度，使  $N$  枚导弹技术准备完工的总时间最短，并确定最终完工时间。

### 2 导弹技术准备流程

工程项目管理中常用网络图来直观表示各工序的逻辑关系，网络图分为双代号和单代号 2 种<sup>[14]</sup>。笔者采用双代号网络图绘制导弹的技术准备流程，某 2 种型号导弹的技术准备流程网络如图 1、图 2 所示。其中箭头线表示工作，节点表示事项，工作需要一定的时间和资源，事项表示一个工作的开始或结束。其中虚箭头线称为虚工序，是工时为零、不消耗任何资源的虚构工作，其作用只是为了表示工作的前行后继关系。

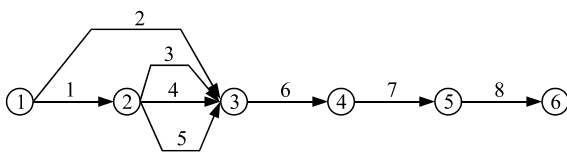


图 1 I 型导弹技术准备流程

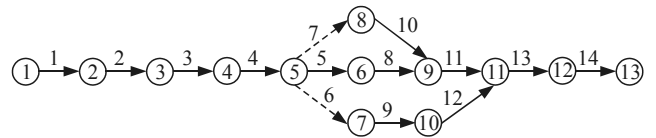


图 2 II 型导弹技术准备流程

### 3 调度优化模型

#### 3.1 模型假设

- 1) 同一时刻工作人员及设备只能进行 1 枚导弹的一道技术准备工序，且每道工序开始后中途不可停工；
- 2) 工序存在优先级，但等待进行技术准备的导弹无优先级；
- 3) 人员、设备均视为资源，由于工作的专业性，不同专业人员和设备视为不同资源；
- 4) 不同型号导弹技术准备时，人员及部分设备为通用，其余设备为专用；
- 5) 导弹技术准备的每一道工序时间为已知。

#### 3.2 模型建立

根据任务需求，某技术准备阵地需技术准备  $N$  枚导弹，受阵地大小及导弹展开后的占地面积限制，可同时展开技术准备作业的导弹最大数量为  $\lambda$ ，第  $\lambda+1$  枚导弹须在第 1 枚导弹完成技术准备后才可展开作业。第  $i$  枚导弹技术准备包含  $n_i+1$  项工作，其中第  $n_i+1$  项工作为该技术准备流程虚拟的终止工作，不占用资源和时间。技术准备各工序共享  $M$  种资源，其中第  $m$  种资源的总量为  $R_m$ 。用  $W_i$  表示第  $i$  枚导弹技术准备的工作集， $w_{ij}$  表示第  $i$  枚导弹技术准备流程中的第  $j$  项工作，其工期为  $d_{ij}$ ，对第  $m$  种资源的需求量为  $r_{ijm}$ ，第  $j$  项工作的开始时间标记为  $S_{ij}$ ，它的所有紧前任务形成的集合记为  $P_{ij}$ 。在时间  $t$  时正在进行的所有工作的集合标记为  $I_t$ 。

综合上述假设和采用的符号，批量导弹在人员和设备数量约束下的技术准备调度优化问题可以描述为：

$$\min \max_{k \in N} (S_{k, n_k+1}) ; \tag{1}$$

Subject to:

$$S_{ij} \geq S_{ih} + d_{ih}, \forall w_{ih} \in P_{ij} ; \tag{2}$$

$$\sum_{w_{ij} \in I_t} r_{ijm} \leq R_m, \forall m \in M ; \tag{3}$$

$$I_t = \{w_{kj} \in \bigcup_{k=1}^p W_k \mid S_{kj} \leq t \leq S_{kj} + d_{kj}\} ; \tag{4}$$

$$S_{\lambda+1, 1} > \min_{k \in \lambda} (S_{k, n_k+1}) . \tag{5}$$

其中: 式(1)为目标函数, 优化目标是 minimized 全部导弹完成技术准备的总工期, 即最后一枚完成技术准备的导弹的完工时间最短; 式(2)表示工作之间的逻辑约束, 工作  $j$  需在其紧前工作  $h$  完成后才能开工; 式(3)表示各工作之间的资源约束, 即任意时刻对资源  $m$  的使用量不得超过该资源数量上限; 式(4)表示  $t$  时刻所有工作的集合; 式(5)表示技术准备阵地最大同时展开导弹数量约束, 第  $\lambda+1$  枚导弹须在第 1 枚导弹完成技术准备后才可展开作业。

## 4 基于遗传算法的模型求解

### 4.1 染色体编码方案

根据多项目调度问题的特点, 在调度过程中, 需要调度的工作属于多个不同项目, 且同一项目的各项工作之间存在优先级约束; 因此, 笔者采用任务列表编码方式按工作优先级顺序对染色体进行编码。假设有  $N$  枚导弹同时进行技术准备, 第  $i$  枚导弹的技术准备任务包含  $n_i$  项工作, 则  $N$  枚导弹共有  $n_1+\dots+n_i+\dots+n_N$  项工作, 即该染色体的长度为  $n_1+\dots+n_i+\dots+n_N$ , 染色体上的每一个基因代表一个项目的某一项工作。

### 4.2 染色体初始化

笔者采用拓扑排序的方法随机生成各染色体。根据每个项目中工作的优先级顺序, 每次选择一个工作进入染色体。在每一次选择的过程中, 保持已选择工作的集合, 并随机地从可选择工作集合中选择一个工作安排到该集合中。重复该过程, 直到所有工作被安排。由于在模型中设置了最大同时进行项目数量约束  $\lambda$ , 因此, 可选择工作集合中最多只包含  $\lambda$  个项目中的工作, 当项目总数量大于  $\lambda$  时, 第  $\lambda+1$  个项目中的工作须在第一个项目完工后才可加入可选择工作集合。在生成染色体的过程中, 所有工作都处于下列 3 种状态之一<sup>[11]</sup>:

1) 已排序的工作: 已经被安排开始时间的工作, 即已在染色体中进行了排序。

2) 可选择工作: 所有紧前工作都是已排序的工作, 且该工作属于前  $\lambda$  个项目。

3) 自由工作: 剩余其他工作。

令  $v_k$  是包含  $t$  个活动的已拓扑排序的部分染色体,  $Q_t$  是在该阶段可调度工作的集合。产生初始调度过程如下:

```
begin
  k←-1
  while k ≤ popsize do
```

```
  t←-1;
```

```
  v_k←{m 个项目中的所有无紧前工作的工作};
```

```
  while t ≤ n_1+...+n_k+...+n_m do
```

```
    修改可调度活动集合  $Q_t$ ;
```

```
    通过随机数方法从  $Q_t$  中任选工作  $j$ ;
```

```
    v_k←v_k+j;
```

```
    t←t+1;
```

```
  end
```

```
  k←k+1;
```

```
end
```

```
end
```

### 4.3 遗传算子设计

#### 1) 交叉算子。

笔者求解项目调度问题的交叉操作采用改进的均匀交叉法<sup>[11]</sup>, 可使染色体的部分基因保持初始顺序, 有效减少非法个体的产生。方法: 首先从种群中随机选择 2 条染色体  $M$  和  $F$ , 选择随机整数  $q, \dots, J$  为染色体长度, 由  $M$  和  $F$  在  $q$  点交叉运算产生 2 个后代  $D$  和  $S$ , 其中  $D$  的前  $q$  个基因继承于染色体  $M$ , 即

$$j_i^D = j_i^M, i=1, 2, \dots, q。$$

其中  $i=q+1, \dots, J$  位置的基因来自染色体  $F$ , 即

$$j_i^D = j_k^F, i=q+1, q+2, \dots, J。$$

染色体  $S$  的形成与  $D$  相似, 这里将不再描述。

#### 2) 变异算子。

变异算子采取基于局部搜索的变异, 通过搜索当前解的邻域来寻找更优染色体。首先从种群中随机选择染色体, 然后在该染色体中随机选取  $n$  个连续的基因进行排列组合, 形成新的染色体, 新染色体中满足工序前后约束关系并且比当前染色体更优的保留为变异操作后的染色体。

#### 3) 选择算子。

选择操作采用轮盘赌法, 并在新种群中采用最优保存策略, 以缩小样本的随机误差。

### 4.4 适应度值

由于目标值是最后一个活动的结束时间, 而优化目标是求解最小化完工时间; 因此, 须将原始目标函数转换为适应度值。设  $v_k$  是当前种群的第  $k$  个染色体,  $g(v_k)$  是适应度值函数,  $f(v_k)$  是目标值 (即项目完工时间),  $f_{\max}$  和  $f_{\min}$  分别是当前种群的最大目标值和最小目标值。转换方法<sup>[15]</sup>如下:

$$g(v_k) = (f_{\max} - f(v_k) + \lambda) / (f_{\max} - f_{\min} + \lambda)。$$

其中  $\lambda$  为正实数，取值范围为(0,1)。

### 5 算例分析

#### 5.1 算例数据

在某导弹技术准备阵地，可同时展开技术准备作业的导弹最大数量为 4 枚。根据任务需求，需技术准备 2 种型号导弹共 5 枚(I 型 3 枚, II 型 2 枚)。2 种型号导弹的技术准备流程网络图如图 1、图 2，其中 I 型导弹技术准备流程包含 8 项工作，II 型导弹技术准备流程包含 14 项工作。所有工作共享技术准备阵地的人员及设备资源，资源类型及总量如表 1 所示。2 种型号导弹各项工作所需资源类型、需求量及工作持续时间如表 2、表 3 所示，表中空白位置表示资源需求量为 0。要求对技术准备各项工作进行调度优化，使 5 枚导弹以最短时间完成技

术准备任务，求出最短完成时间及各项工作的安排顺序。

表 1 资源类型及数量

编号	名称	数量
1	总体专业人员	10
2	引战专业人员	8
3	测试专业人员	10
4	I 型筒弹拖车	6
5	I 型筒弹测试系统	1
6	I 型筒弹压力检查设备	2
7	吊具(通用)	2
8	II 型导弹工艺结合车	5
9	II 型导弹测试设备	2
10	II 型导弹战斗部运输车	3
11	II 型导弹发动机运输车	5
12	II 型导弹装箱设备	2
13	II 型导弹加注设备	2
14	II 型导弹氮气冲洗设备	2
15	II 型导弹电爆管测试仪	3

表 2 I 型导弹所需资源类型、需求量及工作持续时间

工作编号	起止节点	持续时间/min	资源类型及需求量														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,2	10	5			1			1								
2	1,3	10			3		1										
3	2,3	10	1														
4	2,3	10	2														
5	2,3	20	2						1								
6	3,4	15		2				1									
7	4,5	15			2			1									
8	5,6	15			2			1									

表 3 II 型导弹所需资源类型、需求量及工作持续时间

工作编号	起止节点	持续时间/min	资源类型及需求量														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1,2	10	2														
2	2,3	6	7						1	1							
3	3,4	5	2														
4	4,5	5	5						1		1						
5	5,6	5			2											1	
6	5,7	0															
7	5,8	0															
8	6,9	15	5													1	
9	7,10	8			5								1				
10	8,9	8		4							1						
11	9,11	15	6														
12	10,11	8	3												1		
13	11,12	15	7														
14	12,13	10	5						1					1			

#### 5.2 遗传算法求解及结果

运用 matlab 遗传算法工具箱对所建模型进行仿真，设定种群规模为 200，最大迭代次数为 100，交叉概率为 0.5，变异概率为 0.1，经过仿真计算，5 枚导弹技术准备全部完工时间为 165 min。算法搜索过程如图 3 所示，5 枚导弹的技术准备工序安排甘特图如图 4 所示。

#### 5.3 对比分析

利用笔者提出的调度优化模型及算法可求得：该技术准备阵地现有资源单独技术准备 3 枚 I 型导

弹所需时间为 165 min，单独技术准备 2 枚 II 型导弹所需时间为 122 min。

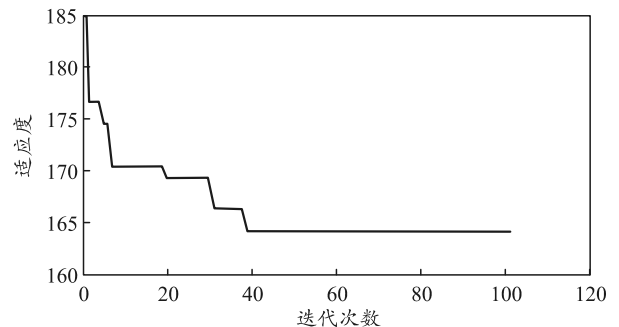


图 3 算法搜索过程

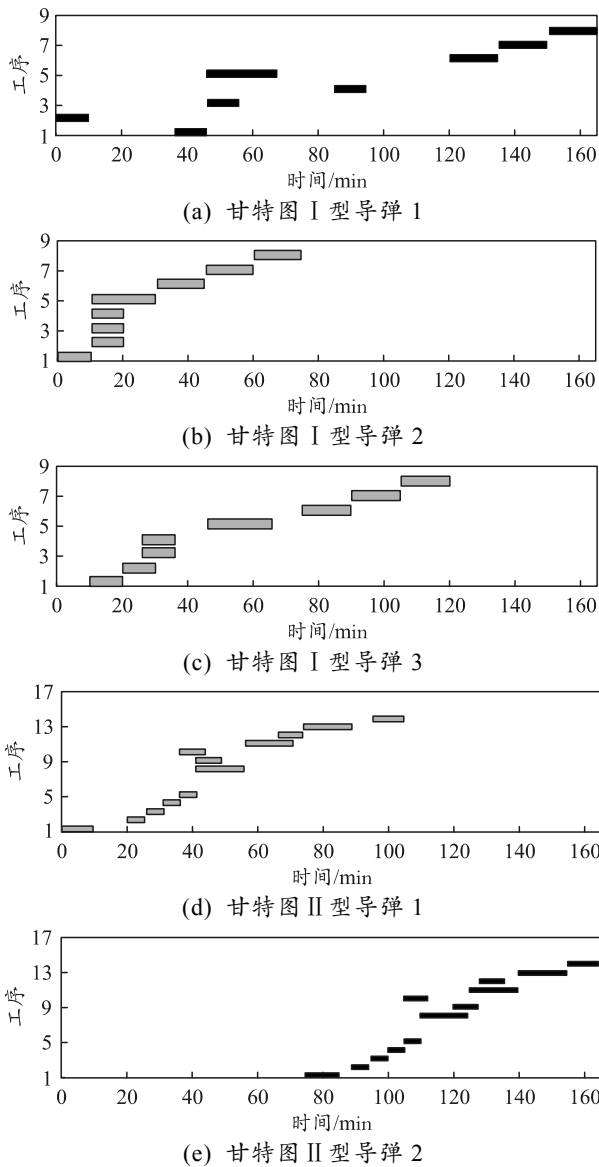


图 4 技术准备流程甘特图

将表 1 中资源数量调整如表 4 所示，其他数据不变，求得 5 枚导弹技术准备完工时间为 195 min。

表 4 资源类型及数量

编号	名称	数量
1	总体专业人员	8
2	引战专业人员	6
3	测试专业人员	8
4	I 型筒弹拖车	6
5	I 型筒弹测试系统	1
6	I 型筒弹压力检查设备	3
7	吊具(通用)	2
8	II 型导弹工艺结合车	5
9	II 型导弹测试设备	1
10	II 型导弹战斗部运输车	2
11	II 型导弹发动机运输车	5
12	II 型导弹装箱设备	1
13	II 型导弹加注设备	3
14	II 型导弹氮气冲洗设备	3
15	II 型导弹电爆管测试仪	2

通过仿真计算对比可知：在人员和设备数量允许范围内，技术准备 II 型 5 枚导弹的时间远小于单独技术准备 3 枚 I 型导弹及单独技术准备 2 枚 II 型导弹的时间和；同时，人员和设备数量改变后，可运用文中的调度优化模型及算法求得新的技术准备完工时间。

## 6 结论

为提高多型导弹批量技术准备效率并确定人员和设备数量改变时批量导弹技术准备的完工时间，笔者将多型导弹批量技术准备优化问题视为 RCMPSP 问题，建立资源约束下多型导弹批量技术准备调度优化模型，采用遗传算法对模型进行解算。通过实例分析，证明了采用调度优化模型可根据人员和设备数量合理调度安排各工序，有效缩短了多型导弹批量技术准备时间，并可根据人员及设备数量计算出批量导弹技术准备完工时间，为战时决策者判断如何从不同仓库以最快速度分配调运批量导弹至发射阵地提供依据。

## 参考文献：

- [1] 左传友. PERT 方法优化的导弹技术准备流程[J]. 海军航空工程学院学报, 2008(5): 569-572.
- [2] 吕卫民, 胡文林, 王哲, 等. 基于生产线平衡的导弹技术准备流程优化[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(7): 1589-1593.
- [3] 彭善国, 李善高, 张福光, 等. 导弹技术准备网络作业流程优化[J]. 海军航空工程学院学报, 2005, 20(5): 551-555.
- [4] 邱开兰, 张福光. 交叉网络作业法的导弹技术准备流程优化[J]. 海军航空工程学院学报, 2007(4): 493.
- [5] 胡江波, 李国林, 王文刚. 基于遗传算法的导弹技术准备资源平衡优化[J]. 计算机仿真, 2009, 26(1): 185-188, 215.
- [6] 安晓亭, 张梓琪. 基于改进蚁群优化的多目标资源受限项目调度方法[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(2): 509-519.
- [7] WANG J C, LIU W R. Forward-backward Improvement for Genetic Algorithm Based Optimization of Resource Constrained Scheduling Problem[C]//Advanced Science and Industry Research Center. Proceedings of 2017 2nd International Conference on Advances in Management Engineering and Information Technology. Advanced Science and Industry Research Center: Science and Engineering Research Center, 2017: 359-366.
- [8] 刘佳. 基于网络计划的施工项目调度优化问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.