

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.01.010

# 一种基于多目标多约束的战时抢修力量调度

王锐, 李羚伟, 郭波, 马武彬

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为合理调度抢修力量, 快速修复受损装备, 在对战场抢修中抢修力量调度问题进行分析的基础上, 考虑抢修任务的时间约束、逻辑约束、抢修力量的平衡度约束、抢修力量的能力、抢修花费代价等约束, 建立了使作战单元战斗力恢复最大, 抢修花费代价最小的多目标优化模型。同时, 给出了战时作战单元战斗力指数、抢修花费代价的计算方法, 设计了相应遗传算法对模型优化求解。最后, 以战场抢修任务为背景, 用算例验证了模型的实用性和算法的有效性。

**关键词:** 多目标; 战场抢修; 调度; 遗传算法

**中图分类号:** O224; N945.16 **文献标识码:** A

## Battle Repair Unit Scheduling with Multi-Objective and Multi-Constraints

WANG Rui, LI Ling-wei, GUO-bo, MA Wu-bin

(School of Information System &amp; Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to schedule the battle repair unit properly and repair the damaged equipments quickly, according to the analysis on battle repair unit scheduling in BDAR, under the constraints of urgent rush-repair mission finishing time, the logic relation between urgent rush-repair missions, the urgent rush-repair resources ability, the balance among resources, the repair cost, then, a optimal model to maximize the combat resilience recover and minimize the repair cost is established. A method of computing battle unit ability and the repair cost is studied; then, an algorithm based on GA for the model is presented in detail. Finally, based on battlefield repair task, an example is given to validate the model practicability and the solution validity.

**Keywords:** Multi-object; Battlefield repair; Scheduling; Genetic algorithm

### 0 引言

现代战争中, 战场态势瞬息万变, 装备受损的可能性大大增加, 如何合理调度抢修力量以快速修复受损装备是一个非常重要的问题。近年来, 针对抢修力量的调度方案, 大多数研究者以指派模型为基础<sup>[1-2]</sup>, 建立抢修力量的调度模型, 但这些研究仍然存在不足: 如约束条件过于简单, 没有充分考虑抢修任务完成的优先级、整体性、完成时间等限制; 评价指标单一, 仅仅单纯的考虑抢修花费代价或战斗力恢复最大等, 不能突出战场抢修中抢修力量调度的特点。故对抢修力量协同完成抢修任务进行研究, 依照战场抢修任务的特点, 充分考虑了抢修任务、抢修力量存在的各种约束, 以战斗力恢复最大<sup>[3]</sup>和抢修花费最小为优化目标, 建立了抢修力量的调度模型, 设计遗传算法, 并给出调度方案。

### 1 战场抢修中抢修力量调度问题的分析

在实际作战中, 抢修任务一般指抢修多个发生故障的装备, 调度即是指派各抢修力量协调、高效

地完成抢修任务。战时抢修力量调度的特点如下:

- 1) 抢修时间的紧迫性: 一般而言, 若损伤装备不能在 24 h 内恢复, 就不能再次投入战斗, 在防御战中, 允许的抢修时间为: 连, 2 h; 营, 6 h; 团, 24 h; 师, 36 h; 军, 48~96 h<sup>[4]</sup>, 因此在抢修过程中, 要考虑整个任务最大抢修时间的限制。
- 2) 抢修任务有优先性: 由于受损装备的战斗力指数, 作战中的重要度不同, 所发挥的效能也相差悬殊, 抢修任务也就存在优先次序, 同时, 某些装备的使用必须以另一些装备为辅助, 在抢修这些装备时, 必须先抢修辅助装备。
- 3) 抢修任务的整体性: 作战任务的完成通常需要多台装备协同工作, 因此, 要在一定的时间内, 将协同完成某一项任务的装备全部修好。
- 4) 抢修力量的约束: 由于抢修力量各自在抢修能力、抢修范围等方面存在差异, 导致在战场抢修过程中, 各自适合完成的抢修任务不同, 同时, 抢修力量通常还有最大的持续工作时间的限制。
- 5) 抢修力量的被毁伤率: 战场抢修过程中, 由

收稿日期: 2009-07-23; 修回日期: 2009-09-07

基金项目: 国家自然科学基金 (70501031)

作者简介: 王锐 (1986-), 男, 陕西人, 国防科学技术大学在读硕士, 从事保障工程及信息系统技术研究。

于敌方火力打击, 抢修力量自身也会受到一定的毁伤, 将这部分毁伤也算作抢修花费的一部分。

此外, 在实际战场抢修中, 为了在最短时间内最大恢复战斗力, 可分配多组抢修力量协同完成抢修任务, 同时单个抢修力量也可完成多个抢修任务。

## 2 应急抢修力量调度模型

### 2.1 抢修力量调度建模

假设在某次战场抢修任务中, 有  $n$  个地点的装备损坏需要抢修, 记为抢修任务  $A_1 A_2 \cdots A_j \cdots A_n$ , 共有  $m$  组抢修力量  $S_1 S_2 \cdots S_i \cdots S_m$ , 各装备战斗力为  $w_1 w_2 \cdots w_j \cdots w_n$ , 各抢修力量的价值量为  $b_1 b_2 \cdots b_i \cdots b_m$ ; 第  $i$  个抢修力量完成第  $j$  项抢修任务即修复第  $j$  项装备, 所需花费为  $C_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ ;

指挥中心或抢修地点  $i$  到  $j$  的时间为  $T_{ij} (i=0, 1, 2, \dots, n-1; j=1, 2, \dots, n)$ , 且  $T_{ij} = T_{ji}$ ;

抢修力量  $S_i$  完成抢修任务  $A_j$  的预计时间矩阵为

$T'_{ij} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ ;

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 个抢修力量完成第 } j \text{ 个抢修任务} \\ & (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

战场抢修中, 主要考虑 2 个优化目标: 作战单位的战斗力恢复最大, 抢修花费代价最小。

$$\max V_{all} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_j X_{ij} \quad (2)$$

$$\min C_{all} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (3)$$

装备战斗力  $w_j (j=1, 2, \dots, n)$  主要由装备的火力打击能力指数  $\alpha$  和该装备在本次作战中的重要度  $\beta (0 < \beta \leq 1)$  来决定。

$$w_j = \alpha_j \beta_j (j=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

火力打击能力指数  $\alpha$  由该装备的射击故障率  $p$  和装备的射击能力  $q$  决定, 即:

$$\alpha_j = (1-p_j)q_j (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

装备重要度  $\beta$ , 若是主战装备则取 1, 否则再考虑其可维修性  $\beta_j^1$ 、对作战任务的影响程度  $\beta_j^2$ , 即:

$$\beta_j = \begin{cases} 1, & \text{是主战装备} \\ \beta_j^1 \beta_j^2, & \text{不是} \end{cases} \quad (0 < \beta_j^1, \beta_j^2 < 1) \quad (6)$$

$\beta_j^1$ 、 $\beta_j^2$  的度量可以采用专家打分或模糊综合评价等方法确定, 这里不再赘述。

花费  $C_{ij}$  主要包括不同地点的抢修任务中转移, 即机动过程所用费用  $C_1$ 、抢修过程中的消耗费用  $C_2$  和敌方火力对抢修力量造成的毁伤代价  $C_3$ 。

$$C_{ij} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (7)$$

假设在单位时间内机动过程的花费为  $c_1$ , 具体执行抢修任务的费用为  $c_2$ , 则有:

$$C_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_1 X_{ij} [T_{ij}]^T \quad (8)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_2 X_{ij} [T'_{ij}]^T \quad (9)$$

$[T_{ij}]^T$ 、 $[T'_{ij}]^T$  分别表示  $T_{ij}$ 、 $T'_{ij}$  的转置矩阵。

设抢修力量  $S_i$  被分配去执行  $k$  项抢修任务, 敌方火力对此  $k$  个抢修地点的火力毁伤概率为  $d_1, d_2, \dots, d_k$ , 那么该抢修力量总的毁伤概率为:

$$d = 1 - \prod_{i=1}^k (1-d_i) \quad (10)$$

造成的抢修力量毁伤代价为:

$$C_3 = \sum_{j=1}^m b_j (1 - \prod_{i=1}^k (1-d_i)) \quad (11)$$

抢修力量调度中, 既要战斗力恢复最大, 又要花费代价最小, 那么考虑效费比最大, 即:

$$F = \frac{V_{all}}{C_{all}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (1-p_j)q_j \beta_j X_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_1 X_{ij} [T_{ij}]^T + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_2 X_{ij} [T'_{ij}]^T + \sum_{j=1}^m b_j (1 - \prod_{i=1}^k (1-d_i))} \quad (12)$$

如单纯考虑效费比, 当  $F$  最大时, 并不能保证  $V_{all}$  最大, 且  $C_{all}$  最小; 为了避免出现  $V_{all}$  最大时,  $C_{all}$  也比较大的情形, 给花费  $C_{all}$  设置一个可接受的上界  $C_{max}$ , 即:

$$C_{all} < C_{max} \quad (13)$$

约束条件为:

1) 抢修力量的平衡度约束: 每一组抢修力量至少分配一项抢修任务:

$$1 \leq \sum_{j=1}^m X_{ij} \leq n \quad j=1,2,\dots,n \quad (14)$$

2) 抢修力量能力约束: 各个抢修力量的持续工作时间不得超过各自最大可持续工作时间  $A_i (i=1,2,\dots,m)$ :

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} [T'_{ij}]^T + \sum_{j=1}^n X_{ij} [T_{ij}]^T \leq A_i \quad i=1,2,\dots,m \quad (15)$$

3) 抢修任务时间约束: 完成整个抢修任务总时间不得超过  $T_0$ :

$$\max \left( \sum_{j=1}^n X_{ij} [T'_{ij}]^T + \sum_{j=1}^n X_{ij} [T_{ij}]^T \right) < T_0 \quad i=1,2,\dots,m \quad (16)$$

4) 某些关键的抢修任务, 其抢修开始时间不得超过  $T_i (i=1,2,\dots,n)$ :

$$f(T_i) < T_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (17)$$

此外, 按照战时抢修任务的特点, 在抢修力量调度时还应根据受损装备具体特点, 考虑执行各抢修任务的时序、逻辑关系, 保证抢修任务的整体性和优先性。

### 2.2 抢修力量调度模型

该模型可描述为以式 (12) 为目标函数, 以式 (13)~式 (17) 为约束的多参数多约束的优化问题, 随着抢修任务数及抢修力量数的增加, 其解空间呈指数增长, 一般枚举法因解空间过大而导致求解效率过低, 传统的匈牙利算法显然也不适合求解<sup>[5-7]</sup>。对这类 NP 难的优化组合问题采用遗传算法求解, 无需考虑具体问题背景, 简洁有效。

### 3 遗传算法的设计

采用自然数符号编码方式, 编码长度等于抢修任务, 如: 有抢修任务  $A_1, A_2, A_3, A_4$ , 抢修力量  $S_1, S_2, S_3$ 。编码 2 0 2 3 表示  $S_2$  完成任务  $A_1, A_3, S_3$  完成任务  $A_4$ , 而任务  $A_2$  没有完成。选式 (12) 的作为适应度函数, 记染色体  $V_i$  的适应度值  $f_i$ 。

1) 选择算子: 用轮赌盘策略选择下一步进行交换的染色体, 同时采用最优保存策略, 在选择出新一代的个体后, 用上一代最佳个体替代当前群体中适应度最差的个体, 使上代群体中最佳个体能够保留到下一代。

2) 交叉算子: 采用对称交叉法, 对于进行交叉操作的两父染色体  $V_1 (1 3 4 3 2 5 6 7), V_2 (1 2 8 3 5 7 7 6)$ , 随机地选

择一个交叉点, 编码的第 5 个位置, 同时, 确定该交叉点的对称点,  $V_1, V_2$  分别被交叉点、对称交叉点分成了 2 部分, 依照算法<sup>[8]</sup>, 最终得到交叉之后的子代染色体  $V'_1, V'_2$  的编码分别为: 1 2 8 3 2 5 6 7、1 3 4 3 2 7 7 6。

3) 变异算子: 采用均匀变异原则, 以较小的概率替换个体编码串中各基因上的原基因值。

4) 惩罚函数: 将各约束条件均作为惩罚函数, 在迭代计算的初始阶段, 为保证解的多样性, 对于约束条件(13)、(14)、(15)、(16)、(17)可以只考虑某一个或两个作为惩罚函数; 在结束阶段, 再利用各个约束条件对所得解进行判断, 筛选符合条件的最优解。

算法如图 1。

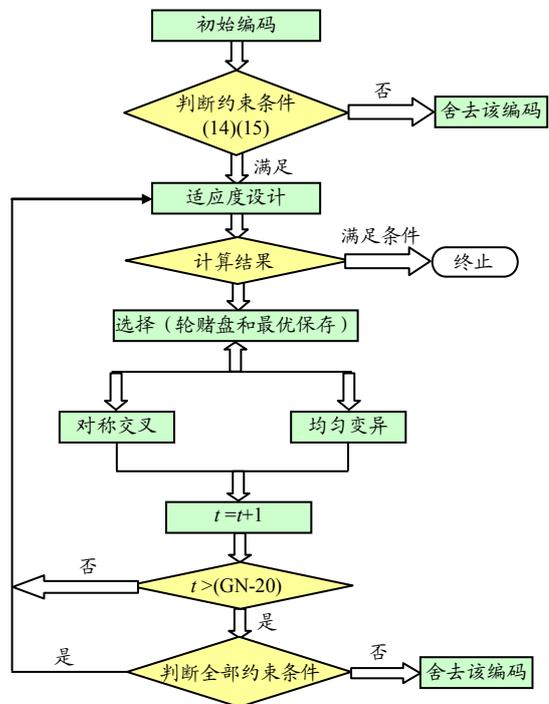


图 1 遗传算法示意图

### 4 示例分析

假设在某次作战演习当中, 某维修保障部队受命, 派遣抢修力量在规定的条件和条件下赶赴不同地点抢修受损装备, 以战斗力恢复最大, 抢修费用最低为目标, 求最优抢修方案, 具体参数及约束条件如表 1 (各时间单位: h)。

表 1 任务资源

抢修任务	$A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8$
抢修力量	$S_1, S_2, S_3, S_4$

要求: 总共花费  $C_{max} \leq 15$ ; 抢修任务  $A_2$  必须在  $A_7$ 、 $A_8$  之前完成。

各抢修小组最大持续工作时间为:  
 $A_4 = [4, 4.5, 4, 5]$ ;

各个抢修任务的最晚开始维修时间为:  
 $T_8 = [0, 1.5, 1.0, 1.0, 2.0, 1.5, 0, 0]$ , 以在整个抢修任务开始时间为初始时间算起, 0 表示该抢修任务开始时间没有限制;

完成整个维修任务总时间限制为:  $T_0 = 4$ ;

经计算后, 各个抢修地点装备战斗力值  $w_j$ , 时间矩阵  $T'_{ij}$ 、 $T_{ij}$  及花费矩阵  $C_{ij}$  分别为:

$$w_8 = [4, 16, 10, 4, 4, 10, 6, 6]$$

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} 2 & 3 & 4 & 4 & 2 & 5 & 3 & 2 \\ 2 & 4 & 3 & 3 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 3 & 2 & 4 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 3 & 2 & 2 & 3 & 4 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad T'_{ij} = \begin{bmatrix} 2, 3, 4, 3, 2, 4, 3, 2 \\ 2, 4, 2, 2, 3, 1, 2, 1 \\ 3, 2, 3, 2, 2, 1, 1, 1 \\ 2, 2, 2, 2, 2, 3, 1, 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{ij} = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.8 & 1.2 & 1.0 & 0.6 & 1.0 \\ & 1.0 & 0.3 & 0.5 & 0.6 & 0.9 & 1.0 & 1.0 \\ & & 0.8 & 1.0 & 0.7 & 1.2 & 0.4 & 0.5 \\ & & & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 0.2 & 0.3 \\ & & & & 1.5 & 0.5 & 0.5 & 1.0 \\ & & & & & 1.0 & 1.0 & 0.5 \\ & & & & & & 0.5 & 0.5 \\ & & & & & & & 0.3 \end{bmatrix}$$

采用上述遗传算法, 经多次仿真实验, 选取种群数目  $N=50$ 、交叉参数  $P_c=0.83$ 、变异参数  $P_m=0.01$  时, 算法收敛性速度快, 求解效率高, 仿真计算过程中适应度函数变化曲线如图 2。

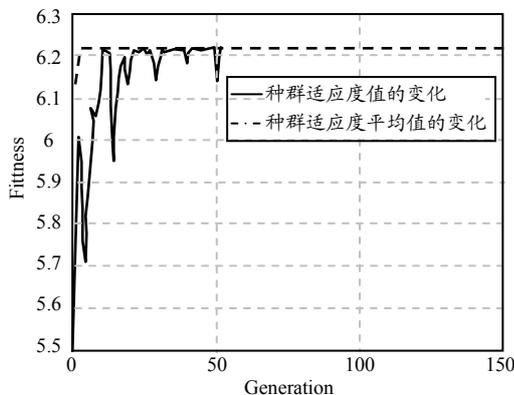


图 2 适应度变化曲线

分析所得调度方案, 首先总花费  $C_{all}$  为 13, 满足条件(13)限制, 4 组抢修力量同时进行抢修, 完成任务用时分别为: 2、3.9、3.4、3.3, 则完成整个维

修任务的最大时间为 3.9 满足约束条件(16); 也满足约束条件(15), 各抢修力量自身的最大持续工作时间的限制; 由抢修任务  $A_6$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_5$  同时开始执行, 而  $T_1$ 、 $T_7$ 、 $T_8$  的开始时间没有限制, 显然也满足约束条件(17), 最后由表 2 可看出, 抢修力量的分配也较均衡。任务  $T_4$  由于抢修时间有限, 综合权衡抢修花费, 战斗力指数等因素舍弃。最后整个调度方案使战斗力恢复达到:  $w_1 + w_2 + w_3 + w_5 + w_6 + w_7 + w_8 = 56$ , 花费成本为 9, 最高效率比为 6.22。

在计算迭代 50 次后, 适应度值达到最优, 选取个体编码为: 2 3 4 0 1 2 3 4, 具体分配方案如表 2。

表 2 调度方案

抢修力量	完成的抢修任务	次序	花费时间: h
$S_1$	$A_5$	$A_5$	2
$S_2$	$A_1$ 、 $A_6$	$A_6 \rightarrow A_1$	3.9
$S_3$	$A_2$ 、 $A_7$	$A_2 \rightarrow A_7$	3.4
$S_4$	$A_3$ 、 $A_8$	$A_3 \rightarrow A_8$	3.3

### 5 结束语

示例验证了所建立模型的实用性及算法的有效性。在未来战争中, 战场抢修会变得越来越复杂, 如何综合考虑各种情况建立仿真模型, 研究优化方案, 还有待于进一步解决。

### 参考文献:

- [1] 张芳玉, 高崎, 何鹏, 等. 战时装备维修任务指派模型及算法研究[J]. 运筹与管理, 2006, 15(1): 62-64.
- [2] 曹继平, 宋建社, 王正元, 等. 战时装备维修保障资源优化调度方法研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 29(6): 915-917.
- [3] 甘茂治, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [4] 甘茂治, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [5] 黄龙生, 徐光辉. 有资格限制的指派问题的求解方法[J]. 运筹与管理, 2005, 14(1): 28-29.
- [6] 黄力伟, 许品刚, 王勤. 基于匈牙利算法求解的火力分配问题[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(6): 25-26.
- [7] 贾春玉, 胡若飞, 洪琦. 带时间约束的运输问题简便解法[J]. 系统工程, 2004, 22(8): 14-15.
- [8] 梁艳春, 冯大鹏, 周春光. 遗传算法求解旅行商问题时的基因片断保序[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(4): 7-12.
- [9] 李传梁. 装备的战场抢修[J]. 四川兵工学报, 2008(4): 102-103.