

## 战时装备维修保障力量抢修行动模型构建与求解\*

郭一鸣<sup>1</sup>, 曹军海<sup>1</sup>, 陈春良<sup>1</sup>, 刘彦<sup>2</sup>, 张闯<sup>1</sup>

(1. 陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系, 北京 100072; 2. 军事科学院 系统工程研究院, 北京 100141)

**摘要:**针对战时装备维修保障任务重、修理时间有限以及维修保障力量类型与待修装备损伤需求不匹配,难以实现战场精确保障的问题,进行了战时装备维修保障力量多目标行动控制研究。考虑修理时间窗、装备损伤状态、维修保障力量类型与维修保障能力变化以及非遍历性等复杂约束,构建了以装备重要度总和、修缮装备总和以及超出修理时间窗时间总和为目标的维修保障力量多目标抢修行动控制模型。对带精英策略的非支配排序遗传算法进行改进,结合变邻域搜索算法加强算法的局部搜索能力,设计了改进变邻域搜索和非支配排序遗传算法的混合算法实现模型求解,并通过示例验证了模型及算法的合理性和有效性。

**关键词:**维修保障力量;行动控制;复杂约束;多目标

中图分类号:E917 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)04-170-12



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Construction and solution of emergency repair action model of equipment maintenance support force in wartime

GUO Yiming<sup>1</sup>, CAO Junhai<sup>1</sup>, CHEN Chunliang<sup>1</sup>, LIU Yan<sup>2</sup>, ZHANG Chuang<sup>1</sup>

(1. Equipment Support and Remanufacturing Department, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

2. System Engineering Research Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the wartime equipment maintenance support task is heavy, the repair time is limited, and the type of maintenance support force does not match the damage demand of the equipment to be repaired, which makes it difficult to achieve accurate battlefield support, the multi-objective action control of wartime equipment maintenance support force was studied. Considering complex constraints such as repair time window, equipment damage state, types of maintenance support forces, changes of maintenance support capabilities and non-traversal, a multi-objective emergency repair action control model of maintenance support forces was established, which aims at the sum of equipment importance, the sum of repaired equipment and the sum of time beyond the repair time window. The NSGA-II (non-dominated sorting genetic algorithm II) with elite strategy is improved, and the VNS(variable neighborhood search) algorithm is combined to strengthen the local search ability of the algorithm. The improved VNSGA-II (variable neighborhood search and non-dominated sorting genetic algorithm II) hybrid algorithm is designed to solve the model, and the rationality and effectiveness of the model and algorithm are verified by examples.

**Keywords:** maintenance support force; action control; complex constraint; multi-objective

战时装备维修保障力量行动是装备维修保障力量实施装备抢救抢修,保持和恢复部队装备数量、质量水平的活动。而战时装备维修保障力量行动控制则是保障指挥员根据战场实际,判断装备维修保障力量是否按照既定保障目标进行行动,发现偏差及时调整以保证保障目标的实现。面对战场不断随机出现的待修装备,保障指挥员如何根据待修装备损伤情况,在有限的时间内指挥不同类型的维修保障力量,在复杂现实约束条

件下,对待修装备进行精准有效的修理是当前战时装备维修保障力量行动亟须解决的问题。

战时装备维修保障力量行动控制问题约束条件多,研究难度大,众多学者对装备维修保障力量行动控制问题进行了深入探索,并取得了一定的成果。一是以装备维修保障力量为研究对象开展的行动控制问题研究。文献[1]运用规则驱动的仿真原理,构建了炮兵维修分队战场抢救抢修行动以及评估模型,为部队实施维修保障力量行动

\* 收稿日期:2022-12-18

基金项目:国家部委基金资助项目(6140001030112)

作者简介:郭一鸣(1995—),男,山东临沂人,博士研究生,E-mail: gym\_3416@163.com;

曹军海(通信作者),男,陕西西安人,教授,博士,博士生导师,E-mail: jhcao@163.com

训练提供了作业环境。文献[2]针对战时巡回修理问题,构建了基于维修优先级的维修保障力量调度优化模型,并利用改进遗传算法进行求解。文献[3]综合考虑多个维修需求点、多任务和多维修保障单位的动态调度,逐步生成优化维修保障力量的动态调度方案。以上研究对解决战时装备维修保障力量行动控制问题有较好的指导意义,但对战时维修保障过程中现实约束和战场不确定因素考虑较少,模型约束较为简单,对战场适应性不强。二是以维修保障任务调度为研究对象开展维修保障力量行动控制研究。文献[4]将战场抢修、伴随保障与任务动态调度相结合,提出了考虑不确定性进攻作战抢修任务动态调度模型,间接给出了伴随保障组的行动路线与控制策略。文献[5]在对装备重要度评估的基础上,考虑装备剩余寿命对抢修任务进行优化调度,给出机动巡修小组的行动控制路线,具有较强的指导意义。上述研究综合考虑了战场装备损伤率高、不确定性因素多以及任务随机性强的特点,但忽视了任务的执行者,即维修保障力量的特征以及行动模式特点,不利于提高任务执行的效率。

在模型构建方面,装备维修保障力量行动控制模型可抽象成车辆路径问题<sup>[6]</sup>(vehicle routing problem, VRP)模型,针对战场情况不同的约束,对VRP模型进行拓展延伸。针对时间窗约束,可抽象为带时间窗的车辆路径问题<sup>[7]</sup>;针对不同类型维修保障力量,可抽象为异型车辆路径问题<sup>[8-9]</sup>;针对维修保障力量无须返回出发点,可抽象成开放式车辆路径问题<sup>[10]</sup>;针对待修装备随机出现,可抽象成动态车辆路径问题<sup>[11-12]</sup>等。因此,可在上述模型的基础上,综合考虑相关约束,构建适用于战场实际的维修保障力量行动控制模型。在模型求解方面,主要有精确算法<sup>[13]</sup>和启发式算法。精确算法适用于规模较小的问题,对于复杂约束下的组合优化问题,精确算法难以求解,启发式算法逐渐成为学者们研究的重点。文献[14]将遗传算法与自适应大邻域搜索算法相结合,实现了VRP三种形式的求解。文献[15]基于蚁群算法,结合变邻域搜索算法(variable neighborhood search, VNS)设计了改进变邻域搜索和最大最小蚂蚁系统(variable neighborhood search and max-min ant system, VNS-MMAS)算法,有效解决了定点维修任务调度问题。遗传算法等启发式算法搜索能力强,收敛速度快,适用于有复杂约束的组合优化问题,但是易陷入局部最优,需要加强其局部搜索能力。

基于上述分析,综合考虑维修保障力量类型、修理时间窗、维修能力变化、装备重要度以及待修装备出现时间、出现地点和修复完成时间不确定性等复杂约束的影响,以战时装备维修保障力量为研究对象,提出维修保障力量并行开展维修作业的行动模式,构建战时装备维修保障力量多目标抢修行动控制模型并设计改进变邻域搜索和非支配排序遗传算法(variable neighborhood search and non-dominated sorting genetic algorithm II, VNSGA-II)进行求解。

## 1 基本描述

### 1.1 问题描述

战时装备维修保障力量抢修行动控制问题可以描述为:在战时条件下,面对随机时间、随机地点出现的不同损伤类型的待修装备,保障指挥员通过指挥维修保障力量行动,为不同的待修装备分配相应的维修保障力量,规划待修装备的修理顺序,并根据待修装备出现时间和地点、装备重要度、修理时间窗等复杂约束条件对维修保障力量的抢修行动加以动态控制,使其不偏离整体保障行动既定的保障目标,最终实现维修保障效益的最大化。

### 1.2 模型假设

为了突出问题重点并有效简化问题,进行如下假设:

1) 研究对象为执行伴随保障任务或机动保障任务的维修保障力量,包括营自身维修保障力量以及后方保障点前出支援维修保障力量。

2) 维修保障力量由不同类型维修单元编成,维修单元是指在规定时间内完成某一类维修任务、实现最佳保障效能的最小保障资源的组合。

3) 各待修装备为轻损和部分中损装备,均在旅维修保障力量能力范围内,其余超出旅维修保障能力的待修装备暂不研究。

4) 维修保障力量展开维修行动前,各待修装备的出现时间及位置、损坏部位、预计修理时间、装备重要度以及修理时间窗已通过技术侦察手段获知。

5) 维修保障力量在预定集结地域出发,每完成一项维修保障任务后不返回出发点,等待指挥员下达新的维修任务。

6) 维修保障力量正在修理某待修装备时,若出现新的待修装备导致总体任务调整,则继续执行当前维修任务。

## 2 模型构建

### 2.1 符号说明

为方便研究,对相关参数定义如下:

1) 设作战开始时刻为 0 min, 维修保障力量开始行动时刻为  $T_0$ , 作战结束时刻为  $T_{end}$ 。

2) 记  $t$  时刻待修装备集合为  $I(t)$ , 待修装备的总数为  $n$ 。待修装备  $i$  出现时刻为  $t_i$ , 出现位置坐标为  $(x_i, y_i)$ , 规定修理时间窗为  $[t_i, T_i^m]$ , 待修装备  $i$  的重要度为  $\omega_i$ 。

3) 同一台待修装备可能会产生不同类型部件的损伤, 不同待修部件的修复时间不同。将待修装备  $i$  产生的待修部件集合记为  $K_i = \{1, 2, \dots, m\}$ 。待修装备  $i$  中待修部件  $k$  的预计修复时间为  $t_{ik}$ 。

4) 设维修单元的类型集合为  $E = \{1, 2, \dots, r\}$ , 维修单元的平均行进速度为  $\bar{v}$ , 初始集结地域坐标为  $(x_0, y_0)$ 。

5)  $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$  为待修装备  $i$  与待修装备  $j$  的距离, 且  $d_{ij} = d_{ji}, i, j \in I$ ; 考虑到战场地形等因素, 引入道路迂回系数  $\tau$  估算待修装备之间的距离。设地形影响因素为  $G$ , 参考文献[16]中对不同地形的取值, 通常情况下, 隐蔽条件越好, 两者之间的交通越不方便。因此, 地形影响因素  $G$  的取值为: 密林 1.0, 山地 0.8, 丘陵 0.5, 建筑物 0.3, 平原、草原 0.2, 戈壁 0.1。由此可得, 待修装备  $i$  与待修装备  $j$  之间的距离估算为  $D_{ij} = \tau d_{ij} = (1 + G)d_{ij}$ 。

6) 维修单元  $r$  到达待修装备  $i$  修理待修部件  $k$  的开始修复时刻为  $T_{ikr}^s$ , 修复完成时刻为  $T_{ikr}^e$ , 修理实际消耗时间为  $\tilde{t}_{ik}$ 。当待修装备  $i$  中的所有待修部件  $k$  全部修理完成后, 则待修装备  $i$  修复完成, 记待修装备  $i$  的修竣时刻为  $T_i$ 。

7) 随着维修单元  $r$  不断执行维修任务, 其维修效率势必因人员疲劳等因素下降, 设维修单元  $r$  的维修效率为  $\eta_m^r, m = \{1, 2, \dots\}$  表示执行任务次数。

8) 记  $P^r = \{p_1^r, p_2^r, \dots, p_o^r, \dots, p_q^r\}, r \in E$  ( $r$  为维修单元类型) 为该问题的一个可行解, 表示维修单元  $r$  开展抢修行动的规划路线, 即待修装备的编号序列。  $q$  为截点,  $q \leq n$ 。  $p_q^r$  为截点装备,  $p_o^r$  为该维修单元  $r$  的规划路线中第  $o$  台待修装备,  $o \in \{1, 2, \dots, q\}$ ;  $|P^r|$  为维修单元  $r$  抢修行动路线中规划的待修装备数量。

9)  $x_i$  为 0-1 变量, 表示若待修装备  $i$  修竣完

成, 则  $x_i = 1$ , 否则  $x_i = 0$ 。

10)  $y_{ir}^k$  为 0-1 变量, 表示若维修单元  $r$  可以对待修装备  $i$  中的待修部件  $k$  进行维修, 则  $y_{ir}^k = 1$ , 否则  $y_{ir}^k = 0$ 。

11)  $\mu_{jr}^k$  为 0-1 变量, 表示若维修单元  $r$  从待修装备  $i$  前往待修装备  $j$  对待修部件  $k$  进行维修, 则  $\mu_{jr}^k = 1$ , 否则  $\mu_{jr}^k = 0$ 。

### 2.2 目标参数确定

战时维修保障力量行动与控制的目的旨在维修保障力量能够在规定的时间内最大限度地修复更多更重要的作战装备。因此, 用以下 3 个参数作为维修保障力量行动控制的目标。

1) 修复装备总重要度。修复装备总重要度是维修保障力量修复装备后得到装备重要度的总和, 其表达式为:

$$F_1 = \sum_{i \in I(t)} \omega_i x_i \tag{1}$$

其中:  $\omega_i$  为待修装备的重要度;  $x_i$  为 0-1 决策变量, 表示若待修装备  $i$  修竣完成, 则  $x_i = 1$ , 否则  $x_i = 0$ 。

2) 修复装备总量。修复装备总量是在整个战斗过程中, 维修保障力量修复的待修装备数量总和, 其表达式为:

$$F_2 = \sum_{i \in I(t)} x_i \tag{2}$$

3) 违反修理时间窗时间总和。违反修理时间窗总和是待修装备修竣时间超出规定时间窗的时间总和, 其表达式为:

$$F_3 = \max(0, \sum_{i \in I(t)} x_i (T_i - T_i^m)) \tag{3}$$

其中,  $T_i$  表示待修装备  $i$  的修竣时刻。

以上 3 个目标参数之间相互影响、相互制约, 不易同时达到最优。因此, 需要构建多目标优化模型实现全局的综合权衡。

### 2.3 约束条件分析

#### 2.3.1 待修装备损伤情况分析

战场环境下, 同一待修装备可能会产生一种或多种装备系统的部件损伤, 维修保障力量应根据待修装备的损伤类型、待修部件之间修理时的相互关系派出相应的维修保障力量进行针对性修理。

在待修装备  $i$  产生的待修部件集合  $K_i$  中, 若任意 2 个待修部件修理时互不影响, 此时可并行开展维修保障; 若任意 2 个待修部件属于同一装备系统且修理时具备前后约束关系, 则需按照部件修理先后顺序串行开展维修保障。设集合  $Q_{ii}$

为待修装备  $i$  中需串行维修的待修部件  $k$  集合,  $Q_{il} \subseteq K_i, l$  为装备系统类别,  $l = \{1, 2, \dots, h\}$ , 其预计修复时间为:

$$t_{iQ_{il}} = \sum_{u \in Q_{il}} t_{iu}, \forall i \in I(t) \quad (4)$$

将集合  $Q_{il}$  按照装备系统类别  $l$  分别视为各个整体加入原集合  $K_i$  并重新按顺序排列, 则待修部件新集合为  $\dot{K}_i = \{1, 2, \dots, |K_i/Q_{il}| + l\}$ , 此时集合  $\dot{K}_i$  中的待修部件均可实现并行维修。

### 2.3.2 维修效率变化

随着维修保障力量不断执行维修保障任务, 其维修效率势必因人员疲劳等因素降低。为此, 提出基于维修单元作业间隔时间的维修效率变化公式, 即:

$$\eta_m^r(t) = 1 - e^{-\alpha t^m} \quad (5)$$

其中,  $\alpha$  为疲劳系数,  $\alpha \geq 0$ 。为简化问题, 方便模型计算, 假设维修保障力量在前往下一台待修装备的途中以及正在进行维修保障任务时维修效率不发生变化,  $t^m$  值为每一次维修单元  $r$  到达待修装备  $i$  开始修理待修部件  $k$  的时刻  $T_{ikr}^s$  与上一次到达待修装备  $i-1$  对待修部件  $k$  修复完成时刻  $T_{(i-1)kr}^e$  的差值, 即  $t^m = T_{ikr}^s - T_{(i-1)kr}^e$ , 从而对维修单元  $r$  的维修效率进行更新,  $m$  为维修单元  $r$  的修理次数, 当  $m=1$  时,  $\eta_1^r(t) = 1$ 。

由此可以看出, 维修单元的维修效率与维修单元前后 2 次的维修作业时间间隔有关, 间隔时间越长, 维修单元能够得到充分休息, 维修效率越高, 反之越低。

### 2.3.3 任务时间限制分析

在维修保障任务过程中, 由于维修保障任务时间有限, 只能在一定的时间内对待修装备进行全部或部分维修。因此, 当待修装备出现较少, 维修保障力量能够遍历所有待修装备进行维修时, 其约束为:  $T_i \leq T_{\text{end}}, \forall i \in I(t)$ 。当待修装备较多, 由于保障时间限制维修保障力量无法遍历所有待修装备进行维修时, 其约束为:  $T_i \leq T_{\text{end}} < T_{i+1}, \exists i \in I(t)$ 。

### 2.3.4 维修单元行动分析

与传统单装包干式维修保障方式不同, 考虑战场维修保障实际, 同一种类的维修单元只可前往同一待修装备一次, 不同种类的维修单元根据各自维修保障任务需求可同时前往不同待修装备并行开展维修保障, 充分发挥维修单元灵活机动的模块化优势, 也符合当前战时维修保障力量行动模式。

## 2.4 模型建立

综合考虑维修保障力量与待修装备损伤部件的修理匹配关系、维修保障力量与待修装备的修理时间关系、待修装备是否得到修复, 确定相关约束条件, 构建战时装备维修保障力量行动控制模型如下:

$$\max F_1 = \max \sum_{i \in I} \omega_i x_i \quad (6)$$

$$\max F_2 = \max \sum_{i \in I} x_i \quad (7)$$

$$\min F_3 = \min \left\{ \max(0, \sum_{i \in I} x_i (T_i - T_i^w)) \right\} \quad (8)$$

$$\begin{cases} T_{kp_q}^e = \tau d_{0p_q}^e / \bar{v} + \tilde{t}_{kp_q}^r \\ \forall k \in \dot{K}, r \in E, l = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} T_{kp_o}^s = T_{kp_{o-1}}^e + \tau d_{p_{o-1}p_o}^e / \bar{v} \\ \forall o \in \{2, 3, \dots, l\}, k \in \dot{K}, r \in E \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} T_{kp_o}^e = T_{kp_o}^s + \tilde{t}_{kp_o}^r \\ \forall o \in \{2, 3, \dots, l\}, k \in \dot{K}, r \in E \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \tilde{t}_{kp_o}^r = t_{kp_o}^r / \eta_m^r(t) \\ \forall o \in \{1, 2, 3, \dots, l\}, k \in \dot{K}, r \in E \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} T_i = \max T_{kp_o}^e \\ \forall o \in \{1, 2, 3, \dots, l\}, i \in I(t), k \in \dot{K}, r \in E \end{cases} \quad (13)$$

$$\sum_{k \in \dot{K}} y_{ir}^k \leq 1, i \in I(t), r \in E \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sum_{i \in I} u_{ijr}^k = \sum_{i \in I} u_{jir}^k \\ \forall k \in \dot{K}, r \in E \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} T_i \leq T_{\text{end}}, \forall i \in I(t), \text{遍历} \\ T_i \leq T_{\text{end}} < T_{i+1}, \exists i \in I(t), \text{非遍历} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} x_i, y_{ir}^k, \mu_{ijr}^k \in (0, 1) \\ \forall i, j \in I(t), k \in \dot{K}, r \in E \end{cases} \quad (17)$$

其中: 式(6)、式(7)和式(8)表示战时维修保障力量行动控制目标分别为修复装备重要度和修复装备总数最大以及超出修理时间窗的时间和最小; 式(9)表示维修单元从初始集结地域出发前往修复第 1 台待修装备待修部件的时间关系; 式(10)表示待修装备的开始修理时间; 式(11)表示维修单元修复相邻 2 个待修装备待修部件的时间关系; 式(12)表示维修单元的维修效率与预计修复时间的关系; 式(13)表示待修装备的修竣完成时间为维修单元并行开展修复该待修装备中的所有待修部件所消耗时间的最大值; 式(14)表示维修单元至多修理每台待修装备的待修部件 1

次;式(15)为维修单元进出平衡约束;式(16)表示在战斗结束时间之前的待修装备修复才有效;式(17)为决策变量的取值范围。

## 2.5 模型分析

### 2.5.1 多目标分析

战时装备维修保障力量行动控制模型通过修复装备总重要度、修复装备总数和超出时间窗总和 3 个目标进行权衡得到一组满意解,即 Pareto 最优解集,保障指挥员可根据战场实际需求在 Pareto 最优解集中选择较为合理的一组解,从而为维修保障力量行动控制方案做出针对性决策。

### 2.5.2 行动控制策略分析

装备维修保障力量行动控制的实质是根据待修装备出现的时间、地点以及维修需求进行多次指挥控制维修保障力量行动的过程。维修保障力量行动控制策略就是设定某一驱动条件,用于判断该时刻是否进行维修保障力量行动的再次调整。结合维修保障力量行动特点,设定战时装备维修保障力量行动控制的驱动条件为:任意维修单元完成任意待修装备的最后 1 项待修部件的维修任务且有新的待修装备出现时,根据当前各维修单元位置信息、所有待修装备信息(去除已修竣装备)调控一次维修保障力量行动。将该时刻完成最后 1 项维修任务的维修单元所在修竣装备位置以及其他维修单元所在待修装备位置记为关键点,在下次维修保障力量行动调整时,处于关键点的维修单元位置保持不变,继续完成当前任务。该时刻为重规划时刻。

该行动控制策略可以对新出现的待修装备及时做出维修决策反应,且可以消除待修装备实际修理时间与预计修理时间之间的误差,提升维修保障力量行动控制的可靠性。

### 2.5.3 不确定性分析

战时环境下装备维修保障力量开展抢修行动时,会面临明显的动态不确定性。主要考虑三个方面:一是待修装备出现时间的不确定性,二是待修装备出现地点的不确定性,三是待修装备修复完成时间的不确定性。对于待修装备的出现时间和出现地点的不确定性,通过采取行动控制策略进行处理;对于待修装备修复完成时间的不确定性,通过依据维修单元的行动计划序列和维修单元前后 2 次维修作业时间间隔,确定该维修单元的维修对象和维修效率,进而明确待修装备某部件的实际修复时间进行处理。

## 3 模型求解

通过上述分析可知,战时装备维修保障力量行动控制模型约束复杂,且待修装备出现时间、地点不确定,模型中的维修保障力量行动控制具备动态性,使模型的求解难度更大,对算法要求更高,精确算法难以解决此类问题。针对模型特点,结合 Pareto 解集思想,设计 VNSGA-II 混合算法进行求解。

### 3.1 构建 Pareto 最优解集

为了较好地表达多目标问题中各个目标的特征以及它们之间相互制约的关系,利用 NSGA-II 的精英策略,通过非支配排序和拥挤度比较获得多个 Pareto 最优解,为保障指挥员提供多种行动方案支持。设定决策策略为:

$$F^* = \lambda_1 F'_1 + \lambda_2 F'_2 + \lambda_3 F'_3 \quad (18)$$

其中: $F'_1$ 、 $F'_2$ 、 $F'_3$ 为采用 0-1 规范化方法后的解; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 为指挥员的决策权重系数,根据战场态势需求进行调整。

### 3.2 编码与解码设计

考虑维修保障力量类型、待修装备修理顺序以及任务时间限制非遍历约束,设计矩阵式( $R \times I_t$ )顺序编码, $R$ 为维修保障力量类型数量, $I_t$ 为  $t$ 时刻战场上待修装备的数量。矩阵每一行顺序编码表示维修单元  $R$  对待修装备的修理顺序。该编码方式能实现染色体与解一一对应,避免了在遗传操作中不可行解的产生。解码时,以目标函数为适应度函数,通过相关约束计算维修单元与待修装备需求匹配情况以及关键点和重规划时刻,得到实际待修装备修竣情况,从而实现解码。如图 1 编码与图 2 解码所示。

假设某时刻染色体  $X$  为  $R=5$ 、 $I_t=6$  的矩阵,通过相关约束求得维修单元与待修装备需求匹配信息、关键点和重规划时刻信息以及相应适应度值,从而实现解码,其含义为:以维修单元 1 ( $R=1$ ) 为例,受相关约束影响,维修单元 1 对有相应需求的待修装备按照 3—1—2—5—4 的顺序进行修理,其中待修装备 6 没有相应维修需求故在任务序列中删除。在第 72 min 触发了维修保障力量行动控制策略,此时维修单元 1 对 5 台待修装备中的 2 台(3—1)进行了修理,并位于关键点待修装备 2 处继续修理或等待,直到下次调控。该染色体适应度值分别为  $F_1(t)$ 、 $F_2(t)$ 、 $F_3(t)$ 。

	修理顺序					
维修单元类型	3	1	2	5	4	6
	1	2	4	3	6	5
	5	3	2	1	6	4
	4	3	2	5	6	1
	1	2	6	4	5	3

图1 编码示例

Fig.1 Coding example

	修理顺序				关键点	重规划时刻	适应值			
维修单元类型	3	1	2	5	4	2	第72 min	$F_1(t)$	$F_2(t)$	$F_3(t)$
	1	3	5			3	第72 min			
	5	2	1	6		1	第72 min			
	4	3	2	5	1	5	第72 min			
	1	2	5	3		3	第72 min			

图2 解码示例

Fig.2 Decoding example

### 3.3 遗传算子设计

1) 染色体选择。以 NSGA-II 算法计算得出的非支配排序等级和拥挤距离为染色体选择依据,采用 Binary Tournament Selection 方法从上一代染色体中选取 40% 的个体作为父染色体进行后续交叉变异等遗传操作。

2) 染色体交叉变异。由于在编码设计中采取矩阵式编码,矩阵不同行所代表的实际意义不同,整体无法采用传统染色体交叉变异方式进行。为增大搜索范围,针对编码特点,在交叉操作中,采取分类交叉策略,即 2 个染色体之间相同类型的矩阵行向量进行单点或双点交叉操作,不同类型的矩阵行向量不进行交叉操作;在变异操作中,采取逆序变异和对换变异方式对染色体中的每一行向量进行操作。为更好地提高算法性能,采取自适应交叉变异概率对 NSGA-II 算法的交叉变异操作进行改进<sup>[17]</sup>。即

$$\begin{cases} p_c(gen) = p_{cmax} - (p_{cmax} - p_{cmin}) \times \frac{gen}{MaxIteration} \\ p_m(gen) = p_{mmax} - (p_{mmax} - p_{mmin}) \times \frac{gen}{MaxIteration} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $gen$  表示当前进化的代数;  $p_c(gen)$  和  $p_m(gen)$  表示进化到当前代数时交叉变异概率大小;  $MaxIteration$  表示最大迭代次数;  $p_{cmax}$  和  $p_{cmin}$  表示预设的交叉概率上下限的值;  $p_{mmax}$  和  $p_{mmin}$  表示预设的变异概率上下限的值。由式(19)可以看出,在

算法搜索初期,增大交叉变异概率,有利于增大搜索范围,获取更优解;在算法中后期,逐渐减小交叉变异概率,从而避免已有的最优解被破坏。

### 3.4 基于 VNS 的改进局部搜索

针对 NSGA-II 算法容易陷入局部最优的缺陷,引入 VNS 算法加强算法的局部搜索能力。具体方法为:将 NSGA-II 算法搜索得到的最优解作为 VNS 算法的初始解,通过设定的不同邻域结构对最优解进行迭代调整,提高解的质量。为加强 VNS 算法的搜索导向性,根据问题特征设计不同邻域结构如下:

1) 邻域结构 1:在维修保障力量行动序列中任意选择 2 个待修装备,将后者插入前者的规划路径之前。

2) 邻域结构 2:在维修保障力量行动序列中任意选择 2 个待修装备进行位置互换。

3) 邻域结构 3:在维修保障力量行动序列中任意选择 2 个待修装备,将 2 个待修装备之间的规划路径进行顺序反转。

以上操作对染色体中的每一行向量均进行邻域扰动。

VNS 算法的具体操作步骤如下:

**步骤 1:**参数初始化(最大迭代次数  $MaxGen$ 、邻域操作次数  $M$ ,初始解  $P_{best}$ ),确定邻域结构  $N_k(k=1,2,3)$ 。令  $gen=1$ 。

**步骤 2:**当  $gen \leq MaxGen$ ,输出最优解  $P_{best}$ ,否则,  $k=1$ 。

**步骤 3:**将初始解  $P_{best}$  在第  $k$  种邻域结构中产生新解  $P'$ ,比较  $P$  与  $P'$  的适应度值,若  $f(P') < f(P_{best})$ ,保留新解  $P'$ ,令  $P_{best} = P'$ ,否则,保留初始解  $P_{best}$ ,直至达到邻域操作次数  $M, k=k+1$ 。

**步骤 4:**若  $k > 3$ ,则  $gen = gen + 1$ ,转到步骤 2;否则,转到步骤 3。

### 3.5 算法流程设计

VNSGA-II 算法具体步骤如下:

**步骤 1:**参数初始化(包括种群规模  $popsiz$  最大迭代次数  $MaxIteration$ 、交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$ 、战斗结束时间  $T_{end}$  等)。

**步骤 2:**随机产生初始种群  $O$ 。

**步骤 3:**对  $O$  中的每一个染色体解码,得到符合约束条件的可行解种群  $Chrom$ ,计算适应度值、关键点以及重规划时间  $key\_T$  等信息。

**步骤 4:**采用 NSGA-II 算法对可行解种群  $Chrom$  依据适应度值进行非支配排序和拥挤距离计算,令  $Iteration = 1$ 。

**步骤 5:**采用 Binary Tournament Selection 方法选取规模为  $size$  的最优个体作为父代染色体种群  $parent\_chrom$ 。

**步骤 6:**对  $parent\_chrom$  进行交叉变异操作得到子代种群  $offspring\_chrom$ , 并计算适应度值。将  $offspring\_chrom$  和  $Chrom$  混合成中间种群  $pop\_Chrom$ 。

**步骤 7:**对  $pop\_Chrom$  再次进行非支配排序和拥挤距离计算, 采取精英保留策略选取规模为  $popsiz$  的优秀个体作为新种群  $Chrom$ 。

**步骤 8:**判断是否  $Iteration < MaxIteration$ 。若成立转步骤 9, 否则转步骤 10。

**步骤 9:**令  $Iteration = Iteration + 1$ , 返回步骤 5 继续寻优。

**步骤 10:**根据指挥员偏好对新种群  $Chrom$  进行决策, 得到最优个体解集  $BestChrom$ 。

**步骤 11:**采用 VNS 算法对  $BestChrom$  进行局部更新, 计算邻域解适应度值, 用较优解覆盖原染色体。

**步骤 12:**判断是否  $key\_T < T_{end}$ , 若满足, 返回步骤 2, 否则转步骤 13。

**步骤 13:**终止运算, 输出维修保障力量行动控制结果。

## 4 示例仿真与对比分析

### 4.1 示例仿真

某合成营受旅指挥所指示执行夺取某要点进攻作战任务。该营配属由通信系统、火力系统、动力系统、底盘以及指控系统等维修单元构成的伴随保障组对该合成营进行伴随保障, 即  $R = 5$ 。在指挥信息平台的支持下, 各待修装备的相关信息已知, 指挥员需要根据待修装备的出现时间、损伤状态对维修保障力量行动进行指挥控制, 确定维修保障力量的保障行动路线、待修装备的修理顺序, 并根据不断出现的待修装备对维修保障力量的保障行动路线进行动态调整。

序, 并根据不断出现的待修装备对维修保障力量的保障行动路线进行动态调整。

设种群规模  $popsiz = 100$ , 最大迭代次数  $MaxIteration = 500$ , 最大交叉概率  $p_{cmax} = 0.9$ , 最小交叉概率  $p_{cmin} = 0.4$ , 最大变异概率  $p_{mmax} = 0.6$ , 最小变异概率  $p_{mmin} = 0.2$ , 变邻域搜索最大迭代次数  $MaxGen = 50$ , 邻域操作次数  $M = 50$ 。战斗开始时刻为  $0 \text{ min}$ , 维修单元平均行进速度  $\bar{v} = 30 \text{ km/h}$ ,  $G$  取平原  $0.2$ , 道路迂回系数  $\tau = 1.2$ , 维修单元疲劳系数  $\alpha = 2$ , 战斗结束时刻  $T_{end} = 400 \text{ min}$ 。由于战时保障的延迟性以及维修保障力量需做好相应准备, 维修保障力量从初始集结地域坐标为  $(0, 0)$  出发, 在  $T_0 = 30 \text{ min}$  开始实施伴随保障。

战场待修装备损伤部件之间维修关系如表 1 所示, 其中 0 表示两两部件之间需串行维修, 1 表示可并行维修。

表 1 待修部件串并行维修关系  
Tab.1 Serial-parallel maintenance relationship of parts to be repaired

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2		1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1		0	0	1	1	1	1	1	1
4	1	0		0	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1		0	1	0	1	1	1
6	1	1	1	1		0	0	1	1	1
7	1	1	1	1	1		0	1	1	1
8	1	1	1	1	0	0		1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1		0	1
10	1	1	1	1	1	1	1	0		1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

待修装备  $i$  的出现时间  $t_i$ 、出现位置  $(x_i, y_i)$ 、装备重要度  $\omega_i$ 、修理时间窗  $T_i^w$ 、部件  $k$  的预计修理时间  $t_{ik}$  等信息如表 2 所示。

表 2 待修装备相关信息  
Tab.2 Information about equipment to be repaired

$i$	$t_i / \text{min}$	$(x_i, y_i) / \text{km}$	$\omega_i$	$T_i^w / \text{min}$	通信系统		火力系统		动力系统			底盘部分		指控系统
					$t_{ik} / \text{min}$		$t_{ik} / \text{min}$		$t_{ik} / \text{min}$			$t_{ik} / \text{min}$	$t_{ik} / \text{min}$	
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	14	(-2.4, 3.6)	0.5	70	25	10	0	10	0	0	0	0	0	0
2	22	(2.4, 2.8)	0.5	100	0	0	25	0	0	40	20	0	15	0
3	29	(-2.3, 4.7)	0.8	105	25	10	10	10	15	0	10	0	0	15
4	58	(0.1, 4.4)	0.5	165	0	0	0	0	25	0	10	20	20	15
5	62	(-3, 5.9)	0.8	115	15	10	12	0	10	10	0	0	0	0



表2(续)

i	$t_i/\text{min}$	$(x_i, y_i)/\text{km}$	$\omega_i$	$T_i^w/\text{min}$	通信系统		火力系统		动力系统			底盘部分		指控系统
					$t_{ik}/\text{min}$		$t_{ik}/\text{min}$		$t_{ik}/\text{min}$			$t_{ik}/\text{min}$		$t_{ik}/\text{min}$
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	99	(-2.3, 8.1)	0.6	150	10	0	0	0	20	0	20	0	0	0
7	128	(4.1, 6.3)	0.4	240	15	15	0	0	15	10	0	10	15	15
8	225	(4.7, 7.5)	0.4	300	15	0	15	0	0	30	30	0	0	25
9	246	(2.4, 8.8)	0.5	320	25	10	15	0	0	0	0	15	0	0
10	252	(-0.5, 9.6)	0.4	315	0	0	0	0	10	15	0	20	20	0
11	300	(0.4, 10.6)	0.5	390	25	25	0	0	0	0	0	0	0	15
12	310	(-4.6, 11)	0.8	390	0	0	20	0	0	0	0	15	25	20

设在战斗前期( $t \leq 300 \text{ min}$ ),此时需要让战斗贡献程度高的装备参与战斗进行攻坚,取决策权重系数  $\lambda_1 = 0.5, \lambda_2 = 0.3, \lambda_3 = 0.2$ ;随着战斗进行( $t > 300 \text{ min}$ ),需要更多装备能够及时参与战斗,减少修理时间延误,赢得更多战斗时间,取决策权重系数  $\lambda_1 = 0.2, \lambda_2 = 0.4, \lambda_3 = 0.4$ 。

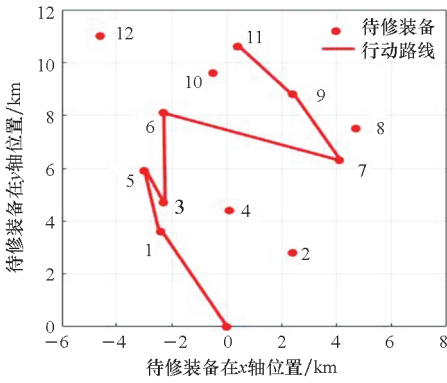
根据各维修单元的实际行动路线、对各待修装备不同损伤部件的实际修理时间以及维修保障力量行动控制策略对维修保障力量进行多次指挥控制,各维修单元的行动方案、各待修装备的修理顺序结果如表3所示。各维修单元维修保障行动路线图以及待修装备实际修竣顺序如图3、图4所示。

表3 维修保障力量行动控制规划结果

Tab.3 Maintenance force action control planning results

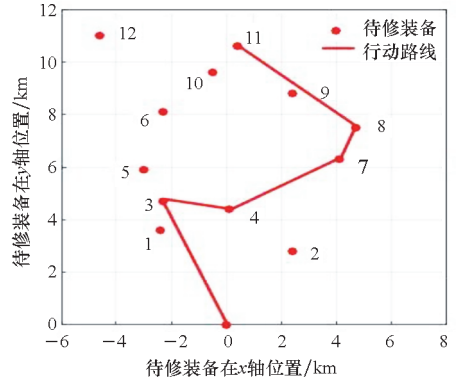
重规划时刻	参与待修装备	保障行动顺序	装备实际修竣时间/min	维修单元关键点位置	实际任务顺序	实际修竣装备	$F_1$	$F_2/\text{台}$	$F_3/\text{min}$
第30 min	1,2,3	1—3	65	1,2,3,2,3	1	1	0.5	1	0
		1—2—3			1—2				
		3—2			3				
		2			2				
第65 min	2,3,4,5	3	141	3,5,4,4,4	3	1—5	1.3	2	25.1
		1—5—3			1—5—3				
		2—5—3			2—5				
		3—5—4—2			3—5—4				
		2—4			2—4				
第141 min	2,3,4,6,7	3—4	262	7,7,7,7,7	3—4	1—5—4—3—6—7—7	3.6	6	0
		3—6—7			3—6—7				
		5—3—7			5—3—7				
		4—6—7—2			4—6—7				
		4—7			4—7				
第262 min	2,8,9,10	4—7	327	9,9,8,10,8	4—7	1—5—4—3—6—7—9	4.1	7	6.9
		7—9—8			7—9				
		7—9—8			7—9				
		7—8—2—10			7—8				
		7—9—10			7—9—10				
第327 min	2,8,10,11,12	7—8	368	11,11,10,10,11	7—8	6—7—9—11	4.6	8	0
		9—11—8			9—11				
		9—11—12—8			9—11				
		8—10			8—10				
		10—12			10				





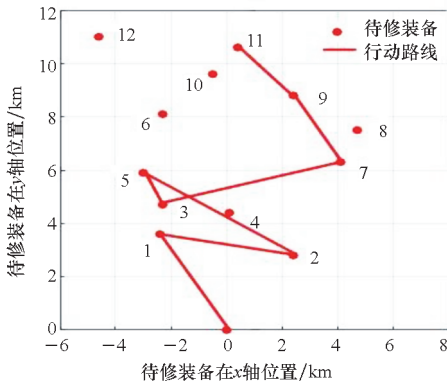
(a) 通信系统维修单元行动路线

(a) Action route of communication system maintenance unit



(e) 指控系统维修单元行动路线

(e) Action route of command and control system maintenance unit



(b) 火力系统维修单元行动路线

图 3 各维修单元行动路线

Fig. 3 Action route of each maintenance unit

(b) Action route of fire system maintenance unit

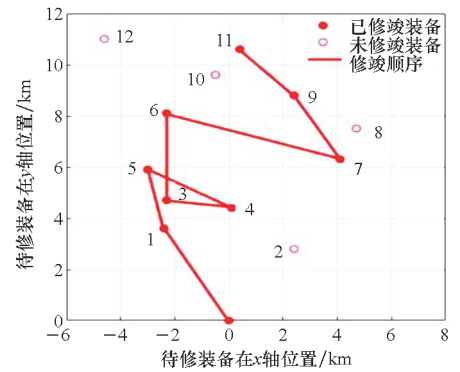
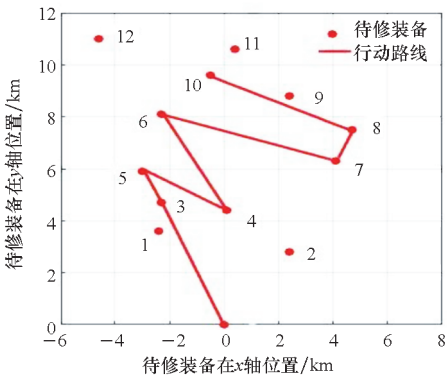


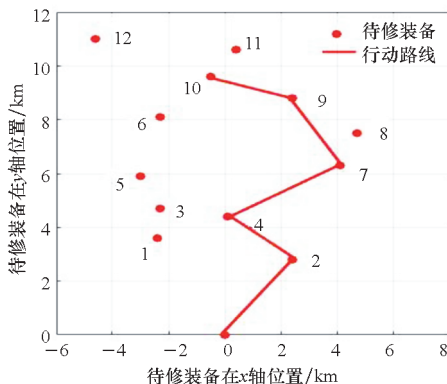
图 4 待修装备实际修竣顺序

Fig. 4 Actual repair sequence of equipment to be repaired



(c) 动力系统维修单元行动路线

(c) Action route of power system maintenance unit



(d) 底盘维修单元行动路线

(d) Action route of chasis maintenance unit

### 4.2 结果分析

1) 从各维修单元开始实施伴随修理至战斗结束,通信系统维修单元的维修保障行动路径为 1—5—3—6—7—9—11,火力系统维修单元的维修保障行动路径为 1—2—5—3—7—9—11,动力系统维修单元的维修保障行动路径为 3—5—4—6—7—8—10,底盘维修单元的维修保障行动路径为 2—4—7—9—10,指控系统维修单元的维修保障行动路径为 3—4—7—8—11。实际修竣装备顺序为 1—5—4—3—6—7—9—11,共修复装备 8 台,获得装备重要度总和为 4.6,超出修理时间窗时间总和为 32 min,实现了维修保障力量依据待修装备具体损伤状况,在适时、适量、适地的情况下对待修装备进行修理,有效恢复了部队的战斗力。

2) 由表 3 可以得到,在维修保障力量行动控制策略的影响下,分别在第 30 min、65 min、141 min、262 min、327 min 进行了 5 次调控。各维修单元能够对不断出现的待修装备依据保障目标

及时对自身的维修保障行动路线加以控制,确保在每次维修过程中使维修效益最大化。其中,待修装备2、8、10、12未得到完全修复,这是因为任务时间的限制,使待修装备不能全部修复,反映出战时维修保障非遍历性的特点。

3)1台待修装备的修竣时间受各维修单元保障行动的共同影响。图3(a)中通信系统维修单元规划路径出现了折线1—5—3,图3(b)火力系统维修单元规划路径出现了折线2—5—3,图3(c)动力系统维修单元规划路径出现了折线3—5—4,这是因为在时刻65 min进行第2次行动控制时,参与待修装备为2、3、4、5,待修装备3与待修装备5重要度相同,但待修装备3的通信系统和火力系统相对于待修装备5修理时间长,且待修装备5的修理时间窗较短,因此通信系统维修单元、火力系统维修单元舍弃较近的待修装备3,而先修理更易修复、更需修复的待修装备5。图3(b)火力系统维修单元规划路径出现了折线2—5—3—7的路线交叉,这是因为在第3次行动控制时,参与待修装备为2、3、4、6、7,其中待修装备4和待修装备6的火力系统并未损坏,待修装备2的火力系统已修复,此时火力系统维修单元的规划保障行动顺序为:5—3—7。原因是待修装备3的其他损伤系统在前2次维修单元行动时已得到部分修复,先完成待修装备3中火力系统的修复更有益于待修装备3的整体修竣。同时待修装备3的重要度高于待修装备7,待修装备3比待修装备7距离待修装备5更近,且待修装备3的修理时间窗较待修装备7更短。基于以上原因,火力系统维修单元修竣完待修装备5后,转向修理待修装备3,修竣后全局未触发动作控制策略,接着前往待修装备7处继续修理。对于

图3(c)中折线3—5—4,原因是待修装备4相对于待修装备5的重要度低,因此动力系统先修理重要度较高的待修装备5。从图4修竣装备整体情况看,出现折线1—5—4—3,这是因为待修装备5相对于待修装备3、4重要度高且整体预计修复时间短,因此在待修装备1修竣完成后,各维修单元紧接着将待修装备5修竣。因此,无论是局部维修单元的各自行动,还是整体待修装备修竣情况,均满足了战时“先修易修装备”和“先修重要装备”的维修保障原则,从侧面也反映出模型的合理性。

4)在前300 min的规划中,共修竣装备7台,获得重要度4.1,这是因为 $\lambda_1$ 取值较大,优先将重要度高的待修装备进行修复。在最后一次规划中,参与规划的待修装备为2、8、10、11、12,由于 $\lambda_3$ 取值较大,待修装备2、8、10均已超出修理时间窗;即使待修装备12重要度较高,但是其预计修复时间较长,超出修理时间窗时间较多,因此选择修竣待修装备11,以满足后期待修装备能够及时参与战斗,减少修理时间延误,赢得更多战斗时间的要求。

5)所提出的VNSGA-II求解算法在MATLAB R2022a软件上运行,每次重规划时间均在5 s以内,符合战时决策的时效性要求,可节省战时保障指挥员的决策时间,提高决策效率。

### 4.3 对比分析

#### 4.3.1 维修决策方式对比

对常规维修保障力量行动不采取行动控制,即对某时刻前出现的待修装备全部修理完成后,再对新出现的待修装备进行下一步的维修行动规划的决策方式,与在行动控制策略下按照相同的维修原则开展的维修保障行动进行效果对比。常规维修保障力量行动规划结果如表4所示。

表4 常规维修保障力量行动规划结果

Tab.4 Results of routine maintenance support force action planning

规划时刻	参与待修装备	保障行动顺序	装备修竣时间/min	维修单元关键点位置	修竣装备	$F_1$	$F_2/台$	$F_3/min$
第30 min	1,2,3	1—3 1—2—3 2—3 2 3	175	3,3,3,2,3	1—2—3	1.8	3	70.1
第175 min	4,5,6,7	5—6—7 5—7 5—6—4—7 4—7 4—7	381	7,7,4,7,7	1—2—3— 5—6—4	3.7	6	297.4

由表 4 可知,常规维修保障力量行动共修复了装备 6 台,获得装备总重要度为 3.7,累计延误时间为 367.5 min。与在行动控制策略下的维修保障力量行动相比,装备修竣数量减少了 25%,获得装备总重要度降低了 19.6%,而超出修理时间窗时间总和增加了 10.5 倍,且因任务时间限制,无法修复战斗后期出现的待修装备 8、9、10、11、12。因此,在行动控制策略下的维修保障力量行动决策方式是有效的,能够更好、更全面地恢复部队战斗力。

#### 4.3.2 算法优化性能对比

为了体现算法的有效性,对 VNSGA-II 算法与 NSGA-II 算法分别运行 30 次,通过对 2 种算法所得到的目标最优方案值  $A_1$ 、最差方案值  $A_2$ 、均值  $A_3$ 、标准方差  $A_4$  以及平均运行时间  $A_5$  (单位:s) 等指标来考察算法的求解效果,如表 5 所示。

表 5 2 种算法优化性能比较

Tab.5 Comparison of optimization performance of two algorithms

指标	VNSGA-II			NSGA-II		
	$F_1$	$F_2$ /台	$F_3$ /min	$F_1$	$F_2$ /台	$F_3$ /min
$A_1$	4.600	8.000	31.867	4.400	8.000	39.214
$A_2$	3.300	5.000	94.569	2.700	4.000	88.625
$A_3$	4.025	6.984	44.546	3.532	6.233	52.147
$A_4$	0.442	0.853	13.254	0.542	1.073	19.254
$A_5$ /s	4.325	4.325	4.325	4.124	4.124	4.124

由实验结果可知,采用 VNSGA-II 求解模型具有较好的最优方案值  $A_1$ 、均值  $A_3$  和标准方差  $A_4$ ,因此相比于 NSGA-II 算法,基于 VNSGA-II 算法的战时装备维修保障力量多目标行动控制方案求解效果更优。

## 5 结论

本文提出了战时装备维修保障力量行动控制军事问题,综合考虑装备损伤状况、维修保障力量类型、修理时间窗、维修能力变化、任务时间限制等复杂约束,构建了战时装备维修保障力量行动控制模型;设计了维修保障力量行动控制策略,实现了战时面对不断出现的待修装备动态调整维修保障力量行动使维修保障效益最大化。设计了改进 VNSGA-II 算法进行求解,并通过示例分析与对比分析验证了模型及算法

的有效性和合理性,为战时指挥员维修保障决策提供了定量支撑。

## 参考文献 (References)

- [1] 王华,何伟,陈永科. 炮兵维修分队保障行动仿真训练与评估系统[J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 50-55.  
WANG H, HE W, CHEN Y K. Simulation training and evaluation system of artillery maintenance unit support operation[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(2): 50-55. (in Chinese)
- [2] 何岩,赵劲松,王少聪,等. 基于维修优先级的战时装备维修保障力量优化调度[J]. 军事交通学院学报, 2019, 21(5): 42-46.  
HE Y, ZHAO J S, WANG S C, et al. Maintenance priority-based optimization and scheduling of equipment maintenance support strength in wartime [J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2019, 21(5): 42-46. (in Chinese)
- [3] 陈立云,刘爱珍. 战时维修保障力量的优化调度方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2014, 28(3): 43-47, 52.  
CHEN L Y, LIU A Z. Research on optimal dispatching method of wartime maintenance support force [J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2014, 28(3): 43-47, 52. (in Chinese)
- [4] 陈伟龙,陈春良,陈康柱,等. 考虑不确定性的进攻作战抢修任务动态调度[J]. 兵工学报, 2017, 38(5): 1011-1019.  
CHEN W L, CHEN C L, CHEN K Z, et al. Dynamic scheduling of battlefield rush-repair tasks under uncertainty in offensive operation [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(5): 1011-1019. (in Chinese)
- [5] 邓汉强. 面向作战任务的抢修保障任务优化调度方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.  
DENG H Q. Research on the optimal scheduling of emergency maintenance tasks oriented to combat missions [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [6] PILLAC V, GENDREAU M, GUÉRET C, et al. A review of dynamic vehicle routing problems [J]. European Journal of Operational Research, 2013, 225(1): 1-11.
- [7] AHMEDZ H, YOUSEFIKHOSHBAKHT M. An improved tabu search algorithm for solving heterogeneous fixed fleet open vehicle routing problem with time windows [J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 64: 349-363.
- [8] WANG Z, LI Y, HU X P. A heuristic approach and a tabu search for the heterogeneous multi-type fleet vehicle routing problem with time windows and an incompatible loading constraint [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 89: 162-176.
- [9] SCHMIDT C E, SILVA A C L, DARVISH M, et al. Time-dependent fleet size and mix multi-depot vehicle routing problem [J]. International Journal of Production Economics, 2023, 255: 108653.
- [10] BRANDÃO J. A memory-based iterated local search algorithm

- for the multi-depot open vehicle routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 284(2): 559–571.
- [11] XIANG X S, QIU J F, XIAO J F, et al. Demand coverage diversity based ant colony optimization for dynamic vehicle routing problems[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 91: 103582.
- [12] 李桃迎, 吕晓宁, 李峰, 等. 考虑动态需求的外卖配送路径优化模型及算法[J]. *控制与决策*, 2019, 34(2): 406–413.
- LI T Y, LYU X N, LI F, et al. Routing optimization model and algorithm for takeout distribution with multiple fuzzy variables under dynamics demand[J]. *Control and Decision*, 2019, 34(2): 406–413. (in Chinese)
- [13] FUKASAWA R, GUNTER J. The complexity of branch-and-price algorithms for the capacitated vehicle routing problem with stochastic demands[J]. *Operations Research Letters*, 2023, 51(1): 11–16.
- [14] VOIGT S, FRANK M, FONTAINE P, et al. Hybrid adaptive large neighborhood search for vehicle routing problems with depot location decisions [J]. *Computers & Operations Research*, 2022, 146: 105856.
- [15] 刘彦, 陈春良, 陈伟龙, 等. 基于 Pareto 改进 VNS-MMAS 的定点修理任务多目标动态调度[J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42(2): 356–364.
- LIU Y, CHEN C L, CHEN W L, et al. Multi-objective dynamic scheduling of fixed-point repairing tasks based on Pareto improved VNS-MMAS[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2020, 42(2): 356–364. (in Chinese)
- [16] 任保权. 野战指挥所选址问题建模及求解方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.
- REN B Q. Research on field command post site selection and its module solving [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [17] 崔庆勇. 基于改进 NSGA-II 算法的多目标 FJSP 研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- CUI Q Y. The study on multi-objective FJSP based on improved NSGA-II [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)