

# 战时导弹火力打击任务分配与运输决策模型

王梓行,姜大立,杨 李,范鸿显

(后勤工程学院 后勤信息与军事物流工程系,重庆401331)

**摘 要** 为有效提高战时导弹火力打击的效果,对多波次条件下打击任务分配与运输决策相结合的问题进行研究。根据实际战场情况进行模拟,构建了战时导弹火力打击任务分配与运输决策模型,设计出基于聚类分析和Floyd最短路径的综合性算法,运用分步讨论的方法依次求解各个参数,并通过线性加权的方式将多目标优化问题转化为单目标优化问题,进而找出最优方案,最后运用仿真算例验证了该模型的可行性及算法的有效性。

**关键词** 导弹打击;任务分配;运输决策;聚类分析

**中图分类号**:TP391.41

**文献标志码**:A

## Task Allocation and Transportation Decision Model of Missile Fire Strike in Wartime

Wang Zi-hang, Jiang Da-li, Yang Li, Fan Hong-xian

(Dept. of Logistics Information & Logistics Engineering, LEU, Chongqing 401331, China)

**Abstract** In order to improve the effectiveness of missile fire strike in wartime, the combinational problem of combining the task assignment and transportation decision under multi-wave sub-condition is studied. According to the actual situation of battle-field simulation, a wartime missile fire strike task allocation and transportation decision model is established, and an comprehensive algorithm based on clustering analysis and Floyd shortest path is designed. In this algorithm, the parameters are solved by stepwise discussion, and the multi-objective optimization problem is transformed into a single objective optimization problem by the way of linear weighting, then proposes the optimal arrangement, and eventually use the simulation example to verify the feasibility of the model and the effectiveness of the algorithm.

**Keywords** missile strike; task allocation; transportation decision; cluster analysis

导弹在未来战争中发挥着越来越重要的作用,战时导弹火力打击的效果往往是决定战争胜负的关键。但是由于战场环境的复杂性,使得任务的合理性、运输的安全性与及时性都存在诸多不确定因素<sup>[1-3]</sup>。在未来信息化联合作战条件下,战争进程不断加速,作战环境瞬息万变,系统合理的火力配置和运输决策模式将是信息化局部战争中保障作战发展方向的关键,因此建立战时导弹火力打击任务分配与运输决策模型具有重要意义。

目前我军对战时导弹火力打击问题的研究主要集中于单波次火力分配以及路径优化方面,而对实际战场中经常面临的多波次条件下打击任务分配与运输决策相结合的问题,研究成果偏少。模型建立方面,李旺等<sup>[4]</sup>建立了具有战时随机延误与损耗的多配送中心配送路径优化模型;杨萍等<sup>[5]</sup>运用军事运筹学和不确定性优化理论,充分考虑节点冲突性、车辆隐蔽性、任务时间、道路容量等因素,建立了运输任务方案的优化模型;周新初等<sup>[6]</sup>根据车载反坦克导弹的作战特点,建立了反坦克导弹火力分配的优化模型;冷旭等<sup>[7]</sup>通过分析航空兵对舰突击火力分配过程,确立了以突击目标毁伤效果最大、凌空时间差最小为目标函数,以突击火力总量分配限制、单个目标分配量限制、反舰导弹规划航路总长度限制等为约束条件的火力分配决策模型;李东等<sup>[8]</sup>以时效性限制为条件,建立了军事物流前送中心可靠选址模型。本文在已有成果的基础上,构建了战时导弹火力打击任务分配与运输决策模型,为此类问题的解决提供了参考。求解

收稿日期:2017-02-12

基金项目:重庆市研究生科研创新项目(CYB16129)

作者简介:王梓行,男,本科生,主要从事物流管理研究。

通信作者:姜大立,男,教授,博士生导师,主要从事物流工程和军事物流研究。

算法方面,现有研究较多采用蚁群算法、遗传算法和神经网络算法等,但蚁群算法往往适用于需返回出发点的最短路径问题,对单向路径最优问题缺乏适用性,本文拟结合聚类分析和Floyd最短路径算法的优点,对所建模型进行求解分析。

## 1 战时导弹火力打击任务分配与运输决策模型

### 1.1 问题描述

载导弹发射车(车载装置)战时随作战部队机动,部署在野战仓库隐蔽待命,作战部队接收到发射命令后,将导弹发射车合理分配到相应的导弹发射基地(发射点位)实施发射以打击相应目标,而后发射车前往配送中心(军事物流基地)重新装载导弹,再到相应的发射基地进行下一波次的火力打击。针对 $n$ 个波次的火力打击任务( $n \leq 10$ ),假设导弹类型为 $\Omega = \{\text{甲}, \text{乙}, \text{丙}, \text{丁}, \dots\}$ ,待打击目标为 $\Psi = \{A, B, C, \dots, N\}$ ,弹目匹配映射关系为 $f: \Omega \rightarrow \Psi$ ,第 $i$ 个配送中心导弹数量为 $X_i$ ,野战仓库、配送中心、导弹发射基地、待打击目标的坐标分别为 $D_q(x_q, y_q), Z_i(x_i, y_i), F_j(x_j, y_j), N(x_N, y_N)$ ,作战区域内相关要素及道路分布假设为加权图 $G = (V, E, \mu)$ , $V$ 表示图示任意一点, $E$ 表示任意两点间线段, $\mu$ 表示该线段的权重。现有 $k$ 辆导弹发射车,平均部署在野战仓库 $\{D_1, D_2, \dots, D_q\}$ ,配送中心为 $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_i\}$ ,导弹发射基地为 $\{F_1, F_2, \dots, F_j\}$ ,第 $n$ 波次中对各目标进行打击的导弹数为 $\{A_n, B_n, C_n, \dots, N_n\}$ 。在完成导弹火力打击任务的前提下,要求整体暴露时间(即所有导弹发射车的载弹时间总和) $X$ 和单辆导弹发射车最大暴露时间(包括载弹时间和空载时间) $Y$ 尽可能短。

### 1.2 模型构建

#### 1.2.1 模型假设

1)作战区域内道路节点位置分布和道路交通情况已知。由于实际的路况限制,除主干道路可以双向通行外,其他道路只能单向行驶,各道路节点处可以两车交会。

2)每辆导弹发射车只能载弹1枚,连续多波次发射时,需前往配送中心重新装载导弹。发射车战前均已载弹,每个配送中心存放的导弹数量有限,且弹种是确定的。

3)为了隐蔽发射基地,在实施多波次发射时,不能连续2个波次使用同一导弹发射基地。通常情况下,同一波次的导弹要求齐射,发射基地到打击目标连线的大地投影不交叉(即弹道不交叉)。

4)车辆的平均机动速度为50 km/h,1个配送中心最多同时容纳2辆导弹发射车,且不能同时装载作业,单辆发射车平均作业时间为10 min。

#### 1.2.2 模型评价指标

本文从合理性、安全性和时效性3个方面对实战化环境中多波次条件下打击任务分配与运输决策相结合的问题进行建模与分析。

1)合理性指标。战时火力打击任务的合理性主要取决于作战地域的地形地貌、敌我双方的作战部署情况以及对作战对象的调查、对作战意义即打击效果的评估等<sup>[9-10]</sup>。综合考虑后,本文主要以导弹发射基地、待打击目标的坐标 $F_j(x_j, y_j), N(x_N, y_N)$ 以及导弹发射车的数量、弹目匹配关系 $f: \Omega \rightarrow \Psi$ 为重点进行任务合理性研究。

2)安全性指标。战时运输过程中物资损耗不可避免,通常情况下物资在途时间与损耗情况正相关。对于导弹运输而言,安全问题是重中之重。为了火力打击任务的顺利完成,必须保证整体暴露时间 $X$ 最短,从而保证导弹在运输过程中的安全性。

3)时效性指标。战时运输时效性主要取决于军事物流的保障能力,是衡量作战任务效果的重要指标。在本文所研究的问题中,由于同一波次的导弹要求齐射,出于安全性考虑,必须保证整体暴露时间 $X$ 最短,导致了每辆导弹发射车的出发时刻不同(耗时长的先出发),整个任务的完成时间是最先出发的导弹发射车的运输耗时。因此运输时效性表现为单辆导弹发射车最大暴露时间 $Y$ 的时长。

#### 1.2.3 目标函数

针对 $n$ 个波次的火力打击任务,将其分为 $(2n-1)$ 个阶段,前2波次(即前3个阶段)分别为从野战仓库到第1波次导弹发射基地完成第1波次打击、从第1波次导弹发射基地到第1波次配送中心、从第1波次

配送中心到第2波次导弹发射基地完成第2波次打击。由于第3波次及以后的打击均与第2波次类似,故采取类比思想对后面的阶段进行简化处理。

对划分的  $(2n-1)$  个阶段进行系统性分析,为了使单辆导弹发射车最大暴露时间和整体暴露时间最短,将多目标优化问题转化为单目标优化问题<sup>[11-12]</sup>,目标函数为

$$\begin{cases} \min Z = \lambda_1 Y + \lambda_2 X / \chi, \\ X = \sum_k \sum_i \sum_l t_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(i)} \quad (i=1, 3, 5, \dots, 2n-1), \\ Y = \max \left\{ \sum_i \sum_l t_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(i)} \quad (i=2, 4, \dots, 2n-2) \right\}. \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $Z$  为目标函数,由于  $X, Y$  的数量级不一致,故引入相关系数  $1/\chi$ , 对各目标的数量级进行统一,  $\lambda_1, \lambda_2$  为各个目标的权重;记  $H_k^{(i)} = \{h_{k,1}^{(i)}, h_{k,2}^{(i)}, \dots, h_{k,n_k}^{(i)}\}$ , 表示第  $i$  阶段第  $k$  辆导弹发射车机动路径中节点的有序集合,  $t_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(i)}$  表示第  $i$  个阶段第  $k$  辆导弹发射车机动路径中相邻节点的载弹时间或空载时间,  $i$  为奇数表示载弹时间,  $i$  为偶数表示空载时间。

#### 1.2.4 各阶段的约束条件

第1阶段:

$$\psi_{k,1}^{(i)} \neq \psi_{k,2}^{(i)} (k_1 \neq k_2), \quad (2)$$

$$\begin{cases} e_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(i)} = 1 (1 \leq l \leq n_k - 1), \\ h_{k,1}^{(i)} = o_k^{(i)}, h_{k,n_k}^{(i)} = \psi_{k,1}^{(i)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Q_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(k,1)} \cap Q_{h_{k,l+1}, h_{k,l}}^{(k,1)} = \Phi (k_1 \neq k_2), \\ Q_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(k,1)} = [J_{h_{k,l}}^{(k,1)}, J_{h_{k,l+1}}^{(k,1)}], \\ J_{h_{k,l}}^{(k,1)} = \sum_{p=1}^{l-1} t_{h_{k,p}, h_{k,p+1}}^{(i)} + t_k^{(i)}, \\ t_k^{(i)} = \max_{k'} \sum_l t_{h_{k',l}, h_{k',l+1}}^{(i)} - \sum_l t_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(i)} \circ \end{cases} \quad (4)$$

$$\overline{\psi_{k,1}^{(i)}, \psi_{k,2}^{(i)}} \cap \overline{\psi_{k,2}^{(i)}, \psi_{k,3}^{(i)}} = \Phi (k_1 \neq k_2), \quad (5)$$

$$\psi_{k,2}^{(i)} \in \{A, B, C, \dots, N\}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sum_k s(\psi_{k,2}^{(i)} \in A) = A_1, \\ \sum_k s(\psi_{k,2}^{(i)} \in B) = B_1, \\ \sum_k s(\psi_{k,2}^{(i)} \in C) = C_1, \\ \dots \\ \sum_k s(\psi_{k,2}^{(i)} \in N) = N_1. \end{cases} \quad (7)$$

式(2)表示一辆导弹发射车应匹配一个导弹发射基地,且发射基地不重复,其中,  $\psi_{k,j}^{(i)}$  为第  $k$  辆导弹发射车第  $i$  波次的导弹发射基地或打击目标,  $j=1$  时表示导弹发射基地,  $j=2$  时表示打击目标;式(3)表示所列路径的相邻两点符合战场实际情况且有路相通,其中,  $e_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(i)}$  表示第  $k$  辆导弹发射车在第  $i$  阶段所经路径中相邻节点的连通情况,连通为1,否则为0,且第  $i$  阶段起点为  $o_k^{(i)}$ , 终点为  $\psi_{k,1}^{(i)}$ ;式(4)表示任意两道路节点的正反向行驶时间区间交集为空集  $\Phi$ , 以避免在单向道上出现无法错车的情况,其中,  $Q_{h_{k,l}, h_{k,l+1}}^{(k,i)}$  表示第  $k$  辆导弹发射车在第  $i$  波次打击任务所经路径中相邻两节点的时间区间,  $J_{h_{k,l}}^{(k,i)}$  表示第  $k$  辆导弹发射车在第  $i$  波次打击任务中到达其机动路径第  $l$  个节点的时刻,  $t_k^{(i)}$  表示第  $k$  辆车在第  $i$  波次的出发时刻;式

(5)表示为使弹道不交叉,将弹道进行降维处理,使投影为平面线段,约束条件转化为平面上任意两线段不相交;式(6)表示第 $k$ 辆车第1波次的打击目标按纵坐标从上至下分为 $N$ 个点以保证打击目标不在同一点;式(7)表示按照 $k$ 个导弹发射基地的纵坐标将其分为 $N$ 个区域,且每个区域导弹发射基地个数为其对应的打击目标需要被打击的导弹个数,其中 $s(\psi_{k,2}^{(i)} \in \psi_i)$ 表示满足条件 $\psi_{k,2}^{(i)} \in \psi_i$ 的个数。

第2阶段:

$$o_k^{(2)} = \psi_{k,1}^{(1)}, \quad (8)$$

$$\psi_{k,1}^{(2)} \in \{Z_1, \dots, Z_i\}, \quad (9)$$

$$e_{h_{k,l}^{(2)}, h_{k,l+1}^{(2)}} = 1 (1 \leq l \leq n_k - 1), \quad (10)$$

$$Q_{h_{k,l}^{(2)}, h_{k,l+1}^{(2)}}^{(k_1,2)} \cap Q_{h_{k,l+1}^{(2)}, h_{k,l}^{(2)}}^{(k_2,2)} = \Phi (k_1 \neq k_2), \quad (11)$$

$$t_k^{(2)} = \max_{k'} \sum_l t_{h_{k',l}^{(2)}, h_{k',l+1}^{(2)}} - \sum_l t_{h_{k,l}^{(2)}, h_{k,l+1}^{(2)}} \geq 0, \quad (12)$$

$$\sum_k s(\psi_{k,1}^{(2)} \in Z_i) \leq X_i, \quad (13)$$

$$\begin{cases} \psi_{k_1,1}^{(2)} = \psi_{k_2,1}^{(2)} (k_1 \neq k_2), \\ \left| J_{h_{k_1,1}^{(2)}, h_{k_1,2}^{(2)}}^{(k_1,2)} - J_{h_{k_2,1}^{(2)}, h_{k_2,2}^{(2)}}^{(k_2,2)} \right| \geq 10. \end{cases} \quad (14)$$

式(8)和式(9)分别表示第2阶段起点为第1波次导弹发射基地,终点为第1波次配送中心;式(10)表示所列路径的相邻两点符合战时实际情况且有路相通;式(11)表示任意两单向道路节点的反向行驶时间区间交集为空集 $\Phi$ ;式(12)表示因为存在第1阶段,故第 $k$ 辆车在第2阶段的出发时刻非负,即 $t_k^{(2)} \geq 0$ ;式(13)表示到达任意一配送中心的导弹发射车数目不大于最大导弹数目 $X_i$ ,满足每个配送中心最多存放的导弹数目为定值,每辆导弹发射车只能载弹一枚的前提;式(14)表示对每一辆导弹发射车驶离第一次导弹发射基地的时间进行调控,使其满足到达同一配送中心的任意两辆导弹发射车的时间差不小于10 min。

第3阶段:

$$o_k^{(3)} = \psi_{k,1}^{(2)}, \quad (15)$$

$$\psi_{k,2}^{(3)} \in \{A, B, C, \dots, N\}, \quad (16)$$

$$\psi_{k,1}^{(3)} \in \{F_1, F_2, \dots, F_j\} - \bigcup_{k'} \{\psi_{k',1}^{(1)}\}, \quad (17)$$

$$t_k^{(3)} = \max_{k'} \sum_l t_{h_{k',l}^{(3)}, h_{k',l+1}^{(3)}} - \sum_l t_{h_{k,l}^{(3)}, h_{k,l+1}^{(3)}} \geq 0, \quad (18)$$

$$e_{h_{k,l}^{(3)}, h_{k,l+1}^{(3)}} = 1 (1 \leq l \leq n_k - 1), \quad (19)$$

$$Q_{h_{k,l}^{(3)}, h_{k,l+1}^{(3)}}^{(k_1,3)} \cap Q_{h_{k,l+1}^{(3)}, h_{k,l}^{(3)}}^{(k_2,3)} = \Phi (k_1 \neq k_2), \quad (20)$$

$$\overline{\psi_{k_1,1}^{(3)}, \psi_{k_1,2}^{(3)}} \cap \overline{\psi_{k_2,1}^{(3)}, \psi_{k_2,2}^{(3)}} = \Phi (k_1 \neq k_2), \quad (21)$$

$$\psi_{k,2}^{(3)} \in \{A, B, C, \dots, N\}, \quad (22)$$

$$\begin{cases} \sum_k s(\psi_{k,2}^{(3)} \in A) = A_2, \\ \sum_k s(\psi_{k,2}^{(3)} \in B) = B_2, \\ \sum_k s(\psi_{k,2}^{(3)} \in C) = C_2, \\ \vdots \\ \sum_k s(\psi_{k,2}^{(3)} \in N) = N_2. \end{cases} \quad (23)$$

式(15)~(17)表示第3阶段起点为第1波次配送中心,终点为第2波次导弹发射基地,且第2波次导弹



发射基地与第1波次导弹发射基地不同;式(18)表示因为存在第1,2阶段,故第 $k$ 辆车在第3阶段的出发时刻非负,即 $t_k^{(3)} \geq 0$ ;式(19)表示所列路径的相邻两点符合实际情况且有路相通;式(20)表示任意两单向道路节点的反向行驶时间区间交集为空集;式(21)表示平面上任意两线段不相交,即使得弹道不交叉;式(22)表示表示第 $k$ 辆车第2波次的打击目标按纵坐标从上至下分为 $N$ 个点以保证打击目标不在同一点;式(23)表示按照 $k$ 个导弹发射基地的纵坐标将其分为 $N$ 个区域,每个区域导弹发射基地个数对应打击目标需要被打击的导弹个数。

对于后续阶段,即第4阶段至第 $(2n-1)(n>2)$ 阶段,由于第3波次及以后的打击均与第2波次类似,故采取类比思想对后面的阶段进行简化处理。偶数阶段均以第2阶段模型为基础,奇数阶段均以第3阶段模型为基础,依次建立后续各个阶段的相关模型。

## 2 基于聚类分析和Floyd最短路径的综合性算法

### 2.1 算法流程

第1步:输入打击波次、导弹类型、弹目匹配关系、导弹数量以及各野战仓库、配送中心、导弹发射基地、待打击目标的坐标 $D_q(x_q, y_q)$ ,  $Z_i(x_i, y_i)$ ,  $F_j(x_j, y_j)$ ,  $N(x_N, y_N)$ 等参数。

第2步:利用Floyd算法分别计算各出发点到各导弹发射基地的最短路径及路径长度。

第3步:提取一个出发点到各导弹发射基地中路径长度最短的 $m$ 条作为运输路径( $m$ 为导弹发射车数量与野战仓库个数的比值)。

第4步:去掉已选的 $m$ 个导弹发射基地,若已完成聚类的出发点数小于出发点总数,则返回第3步,否则进入第5步。

第5步:用所有路径中的最长路径除以车速得到最大暴露时间,以0时作为该路径的出发时刻,加上最大暴露时间作为齐射时刻,其余各路径的出发时刻用齐射时刻减去相应路径运输用时得到,再分别计算各路径中经过各节点的时刻。

第6步:判断任意两条路径中的车辆在同一非主干路段反向行驶的时间区间交集是否为空。

第7步:若交集不为空,则将两条路径中较短路径的出发时刻提前,并返回第6步,否则进入第8步。

第8步:将待打击目标按纵坐标从上至下分为 $N$ 个点,再将 $k$ 个导弹发射基地按纵坐标分为与之一一对应的 $N$ 个区域,每个区域的基地数目与对应打击目标需要被打击的导弹数目相等,各个区域中导弹发射基地到对应打击目标的大地连线即为导弹弹道平面投影。

第9步:判断已完成打击的波次数是否小于 $n$ ,若小于 $n$ 则进入第10步,否则终止算法,并输出各波次机动路径及各节点时刻。

第10步:利用Floyd算法分别计算各配送中心到各导弹发射基地的最短路径及路径长度。

第11步:在每个配送中心对应的导弹发射基地路径数均小于其上限值 $X_i$ 的原则上,提取所有路径中长度较短的一条作为运输路径。

第12步:去掉已选的发射基地,若已选的基地数小于 $k$ ,则返回第11步,否则进入第13步。

第13步:将第5步中的齐射时刻作为现在的出发时刻,计算各路径中经过各节点的时刻及到达时刻。

第14步:判断任意两路径中的车辆在同一非主干路段反向行驶的时间区间交集是否为空。

第15步:若交集不为空,则将两条路径中较短路径的出发时刻延后,并返回第14步,否则进入第16步。

第16步:判断任意两辆导弹发射车到达同一配送中心的时刻差是否大于等于10 min。

第17步:若时刻差小于10 min,则将对应的两条路径中较短路径的出发时刻延后,并返回第16步,否则进入第18步。

第18步:以配送中心作为出发点,并以去掉前一波次发射基地后所剩余的基地作为终点,返回第2步。

## 2.2 算法结果

上述算法流程可以确定每辆导弹发射车在  $(2n-1)$  个阶段的机动路线,达到整体暴露时间和单辆导弹发射车最大暴露时间最短的目的。由于路径长度可得,车速已知,可以得出每辆导弹发射车的齐射时刻  $t_q$ 、暴露时间  $t_b$ 、出发时刻  $t_k^{(n)}$  和经过各个节点的时刻  $J_{h_{k,l}}^{(k,n)}$  分别为:

$$t_q = \max_{k'} \sum_l t_{h_{k',l}^{(n)}, h_{k',l+1}^{(n)}}, \quad (24)$$

$$t_b = \sum_l t_{h_{k,l}^{(n)}, h_{k,l+1}^{(n)}}, \quad (25)$$

$$t_k^{(n)} = \max_{k'} \sum_l t_{h_{k',l}^{(n)}, h_{k',l+1}^{(n)}} - \sum_l t_{h_{k,l}^{(n)}, h_{k,l+1}^{(n)}}, \quad (26)$$

$$J_{h_{k,l}}^{(k,n)} = \sum_{p=1}^{l-1} t_{h_{k,p}^{(n)}, h_{k,p+1}^{(n)}} + t_k^{(n)}. \quad (27)$$

根据算法可确定:打击目标  $\Psi = \{A, B, C, \dots, N\}$  的位置  $N(x_N, y_N)$  可按纵坐标分为  $N$  个区域,每波次  $k$  个发射基地的位置  $F_j(x_j, y_j)$  也可按其纵坐标分为一一对应的  $N$  个区域,故通过位置对应关系以及弹目匹配关系,即可得到火力打击任务分配方案。

综合以上分析,即可得出发射任务的合理分配方案(在何时何地,使用哪辆导弹发射车,发射哪种类型导弹,打击哪个目标)和机动方案(经过各节点的时刻和暴露时间)。

## 3 算 例

### 3.1 问题描述

某部现有 12 辆导弹发射车,平均部署在 2 个野战仓库  $(D_1, D_2)$ ,可携带 3 种类型导弹甲、乙、丙,分别对应地打击 3 个目标  $A, B, C$ 。其所属作战区域内有 30 个导弹发射基地  $(F_1 \sim F_{30})$ , 5 个配送中心  $(Z_1 \sim Z_5)$ , 38 个道路节点  $(J_1 \sim J_{38})$ 。作战区域内的野战仓库、配送中心、导弹发射基地的分布和道路情况示意如图 1 所示,相应要素的名称及位置坐标数据  $(X, Y)$  如表 1 所示。

由于实际的路况限制,除主干道路(双实线)可以双车(双向)通行以外,其他道路(细实线)均只能单向行驶,但各道路节点处可以两车交会。通常车辆的平均机动速度为 50 km/h。每辆导弹发射车只能载弹 1 枚,如需连续多波次发射,则需要前往配送中心重新装载导弹。每个配送中心存放的导弹数量最多 5 枚,且弹种是确定的。一个配送中心最多同时容纳 2 辆导弹发射车,但不能同时装载作业,一辆装载作业平均需要 10 min。在实施多波次发射时,不能连续两个波次使用同一发射基地。现接收到 3 个波次对 3 个目标的火力打击任务,每个波次每个目标各 4 发导弹,给出各波次发射任务的合理分配方案和机动方案,使得单辆导弹发射车最大暴露时间和整体暴露时间最短。

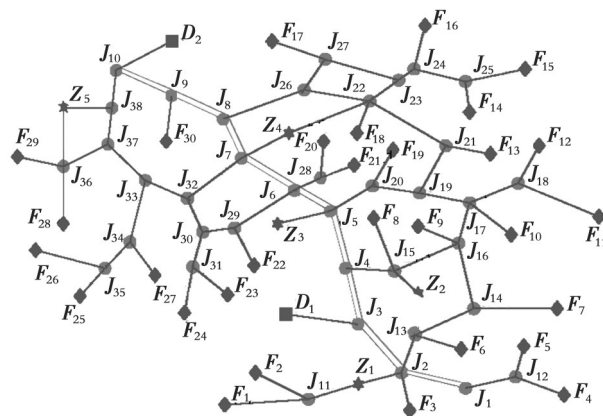


图1 野战仓库、配送中心、导弹发射基地的分布和道路情况示意

Fig. 1 Sketch map of field depots, distribution centres, distribution and road conditions of missile launch base

表1 要素名称及位置坐标  
Tab. 1 Element names and position coordinates km

要素名称	坐标	要素名称	坐标	要素名称	坐标
$A$	(596.2, 323.6)	$F_{21}$	(40.3, 33.3)	$J_{11}$	(34.9, 3.8)
$B$	(593.6, 327.0)	$F_{22}$	(28.6, 20.7)	$J_{12}$	(59.0, 6.5)
$C$	(591.2, 336.4)	$F_{23}$	(25.5, 16.9)	$J_{13}$	(47.4, 11.9)
		$F_{24}$	(20.5, 14.7)	$J_{14}$	(54.1, 15.2)
$D_1$	(32.3, 14.5)	$F_{25}$	(8.5, 16.7)	$J_{15}$	(44.9, 19.9)
$D_2$	(19.1, 48.8)	$F_{26}$	(3.3, 22.6)	$J_{16}$	(52.3, 23.4)
		$F_{27}$	(17.2, 19.3)	$J_{17}$	(53.7, 28.5)
$F_1$	(25.2, 3.0)	$F_{28}$	(6.5, 25.8)	$J_{18}$	(59.2, 31.0)
$F_2$	(28.8, 7.1)	$F_{29}$	(1.2, 34.3)	$J_{19}$	(47.9, 29.7)
$F_3$	(46.7, 2.3)	$F_{30}$	(18.5, 36.2)	$J_{20}$	(42.4, 30.6)
$F_4$	(64.6, 4.3)			$J_{21}$	(50.9, 35.7)
$F_5$	(59.9, 10.4)	$Z_1$	(40.8, 5.7)	$J_{23}$	(45.4, 44.0)
$F_6$	(52.7, 10.1)	$Z_2$	(47.6, 17.1)	$J_{24}$	(47.2, 45.4)
$F_7$	(63.8, 15.1)	$Z_3$	(31.3, 25.9)	$J_{25}$	(53.2, 43.7)
$F_8$	(42.5, 26.5)	$Z_4$	(32.7, 37.3)	$J_{26}$	(34.5, 42.7)
$F_9$	(47.6, 25.6)	$Z_5$	(6.5, 40.4)	$J_{27}$	(36.8, 46.6)
$F_{10}$	(58.4, 24.5)			$J_{28}$	(36.4, 31.7)
$F_{11}$	(68.7, 26.8)	$J_1$	(53.2, 5.2)	$J_{29}$	(26.3, 25.3)
$F_{12}$	(61.7, 35.7)	$J_2$	(45.8, 7.1)	$J_{30}$	(22.7, 24.8)
$F_{13}$	(56.0, 34.7)	$J_3$	(40.7, 13.3)	$J_{31}$	(21.6, 20.5)
$F_{14}$	(53.7, 39.9)	$J_4$	(39.2, 20.2)	$J_{32}$	(20.9, 29.1)
$F_{15}$	(60.1, 45.3)	$J_5$	(37.5, 27.4)	$J_{33}$	(16.0, 31.4)
$F_{16}$	(48.5, 50.8)	$J_6$	(33.3, 30.1)	$J_{34}$	(14.3, 23.6)
$F_{17}$	(30.7, 48.9)	$J_7$	(27.1, 34.2)	$J_{35}$	(11.4, 20.3)
$F_{18}$	(40.5, 37.3)	$J_8$	(25.1, 39.1)	$J_{36}$	(6.5, 33.1)
$F_{19}$	(44.7, 35.1)	$J_9$	(19.1, 42.0)	$J_{37}$	(11.7, 35.8)
$F_{20}$	(36.7, 36.2)	$J_{10}$	(12.6, 45.1)	$J_{38}$	(12.2, 40.4)

### 3.2 问题求解

对上述3个波次进行系统性分析,最终目标是使单辆导弹发射车最大暴露时间和整体暴露时间最短。此为多目标优化问题,可将其转化为单目标优化问题。对于目标的权重,战时可通过情报收集和专家评价法来确定,本问题中认为这两个目标重要性一致,采用线性加权的方法,权重均设为0.5。此外,由于两者数量级不一致,整体暴露时间是单辆导弹发射车最大暴露时间的数十倍,因此可将整体暴露时间缩小10倍,达到2个目标在同一数量级的目的。由此可得目标函数为

$$\min Z = \frac{1}{2} \times \max \left\{ \sum_n \sum_l t_{h_{k,l}^{(n)}, h_{k,l+1}^{(n)}} \right\} + \frac{1}{2} \times \sum_k \sum_n \sum_l t_{h_{k,l}^{(n)}, h_{k,l+1}^{(n)}} \times \frac{1}{10}。$$

根据前文建立的普适性模型,将本题中的相关参数代入后可得出本问题的模型,再利用基于聚类分析和Floyd最短路径的综合性算法<sup>[13-15]</sup>,通过Matlab编程实现对该问题的求解,最终求得较优方案。

表2给出了第1波次中12辆导弹发射车在最近的导弹发射基地使用相应类型导弹打击目标的任务分配方案。根据数据分析,此分配方案满足了运输任务的时效性指标。图2给出了在对第1波次打击目标进行火力打击时,导弹打击轨迹的大地投影,由图可知,大地投影互不相交,即每一枚导弹的打击轨迹不交叉,满足打击任务分配的合理性指标,确保了任务的顺利完成。后两波次的打击轨迹大地投影与图2类似,同样满足导弹打击轨迹的大地投影互不相交。

表2 第1波次分配方案  
Tab. 2 Distribution schemes in the first wave

导弹 发射车	发射 基地	出发 时刻/min	弹种	打击 目标	导弹 发射车	发射 基地	出发 时刻/min	弹种	打击 目标
1	$F_9$	24.45	甲	A	7	$F_{19}$	25.52	乙	B
2	$F_3$	17.53	甲	A	8	$F_8$	16.39	乙	B
3	$F_6$	17.64	甲	A	9	$F_{29}$	14.15	丙	C
4	$F_5$	9.51	甲	A	10	$F_{28}$	6.76	丙	C
5	$F_{27}$	9.03	乙	B	11	$F_{25}$	2.16	丙	C
6	$F_{21}$	8.82	乙	B	12	$F_{30}$	0	丙	C

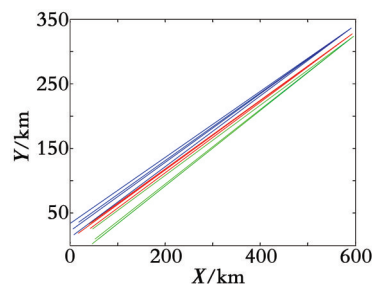


图2 第1波次导弹打击轨迹大地投影  
Fig. 2 The ground projection of missile trajectory in the first wave

$$\begin{cases}
 D_1^{24.45} \rightarrow J_3^{34.63} \rightarrow J_2^{44.27} \rightarrow F_3^{50.13}, \\
 D_1^{17.53} \rightarrow J_3^{27.71} \rightarrow J_2^{37.34} \rightarrow J_{13}^{43.42} \rightarrow F_6^{50.13}, \\
 D_1^{17.64} \rightarrow J_3^{26.62} \rightarrow J_4^{34.86} \rightarrow J_{15}^{41.70} \rightarrow F_8^{50.13}, \\
 D_1^{9.51} \rightarrow J_3^{19.69} \rightarrow J_4^{27.93} \rightarrow J_5^{37.04} \rightarrow J_{20}^{44.06} \rightarrow J_{19}^{50.13}, \\
 D_1^{9.03} \rightarrow J_3^{19.21} \rightarrow J_2^{28.85} \rightarrow J_1^{38.02} \rightarrow J_{12}^{45.15} \rightarrow F_5^{50.13}, \\
 D_1^{8.82} \rightarrow J_3^{19.02} \rightarrow J_4^{27.24} \rightarrow J_{15}^{34.08} \rightarrow J_{16}^{43.90} \rightarrow F_9^{50.13}, \\
 D_2^{25.52} \rightarrow J_{10}^{34.49} \rightarrow J_9^{43.13} \rightarrow F_{30}^{50.13}, \\
 D_2^{16.39} \rightarrow J_{10}^{25.37} \rightarrow J_{38}^{31.03} \rightarrow J_{37}^{36.58} \rightarrow J_{36}^{43.61} \rightarrow F_{29}^{50.13}, \\
 D_2^{14.15} \rightarrow J_{10}^{23.13} \rightarrow J_{38}^{28.79} \rightarrow J_{37}^{34.34} \rightarrow J_{36}^{41.37} \rightarrow F_{28}^{50.13}, \\
 D_2^{6.76} \rightarrow J_{10}^{15.74} \rightarrow J_{38}^{21.4} \rightarrow J_{37}^{26.95} \rightarrow J_{33}^{34.33} \rightarrow J_{34}^{43.91} \rightarrow F_{27}^{50.13}, \\
 D_2^{2.16} \rightarrow J_{10}^{11.14} \rightarrow J_{38}^{16.79} \rightarrow J_{37}^{22.34} \rightarrow J_{33}^{29.72} \rightarrow J_{34}^{39.31} \rightarrow J_{35}^{44.58} \rightarrow F_{25}^{50.13}, \\
 D_2^0 \rightarrow J_{10}^{8.976} \rightarrow J_{38}^{14.63} \rightarrow J_{37}^{20.18} \rightarrow J_{33}^{27.56} \rightarrow J_{32}^{34.06} \rightarrow J_{30}^{39.6} \rightarrow J_{29}^{43.96} \rightarrow F_{21}^{50.13}.
 \end{cases} \quad (28)$$

式(28)表示第1波次的机动方案,其中节点上标数值代表到达每一节点的時刻。对所得数据进行分析,机动路径和齐射時刻满足运输任务的时效性指标,而暴露时间之和则满足运输任务的安全性指标。

后续波次分配方案和机动方案的求解与第1波次类似,利用此模型算法,通过 Matlab 编程可实现求解。根据所有求解结果,进行数据综合分析,结果表明:各个波次的导弹火力打击任务分配方案满足发射基地到打击目标连线的大地投影不交叉(即弹道不交叉)的目标,能保证部队顺利完成火力打击任务;在打击路线及机动方案中,实现了目标函数最小值的获取,使单辆导弹发射车最大暴露时间和整体暴露时间最短,满足打击任务中运输时效性和安全性的指标,确保作战目标的最终实现。

## 4 结 语

本文针对实战化环境中多波次条件下导弹火力打击任务分配与运输决策相结合的问题进行了系统性、综合性的研究。在已有成果的基础上,建立了战时导弹火力打击任务分配与运输决策模型,并从合理性、安全性和时效性3个方面对此模型进行了分析评价。在求解算法方面,针对现有研究存在的难点和不足,结合聚类分析的特点和 Floyd 最短路径算法的优点,设计了基于聚类分析和 Floyd 最短路径的综合性算法。最后通过算例对算法求解模型的性能进行了测试。结果表明,基于聚类分析和 Floyd 最短路径的综合性算法能够很好地求解战时导弹火力打击任务分配与运输决策模型,得到符合题设情况的较优解,为军事运输决策提供参考。

## 参考文献

- [1] 高军,刘晓蕾,冀松娅. 军事物流系统中定位-运输路线安排模型及算法[J]. 数学的实践与认识,2012,42(19):152-159.  
Gao Jun, Liu Xiao-lei, Ji Song-ya. Model and algorithm for location-routing problem of military logistics system[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(19): 152-159.
- [2] 许国银,熊孝和,林海. 基于 GASA 算法的成品燃油战时公路配送路径优化[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版,2007,8(2):180-185.  
Xu Guo-yin, Xiong Xiao-he, Lin Tao. Optimization of wartime distributing routes of finished fuel oil based on genetic simulated annealing algo-



- rithms[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 8(2): 180–185.
- [3] 李丹, 王巨海, 陈振雷. 基于神经网络TSP算法的防空作战火力分配[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(4): 42–45.  
Li Dan, Wang Ju-hai, Chen Zhen-lei. Research on fire distribution in air defense operation based on TSP[J]. Fire Control & Command Control, 2006, 31(4): 42–45.
- [4] 李旺, 戴明强. 具有战时随机延误与损耗的多配送中心路径优化[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(2): 184–189.  
Li Wang, Dai Ming-qiang. Optimization of multiple depots vehicle routing problem with stochastic loss and delay[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(2): 184–189.
- [5] 杨萍, 刘卫东, 李明雨. 常规导弹战前运输任务优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(2): 41–43.  
Yang Ping, Liu Wei-dong, Li Ming-yu. An optimization model of transportation scheme in preoperational preparations of conventional missile[J]. Fire Control & Command Control, 2007, 32(2): 41–43.
- [6] 周新初, 张智智, 夏军, 等. 车载反坦克导弹火力分配优化模型[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(2): 109–111.  
Zhou Xin-chu, Zhang Zhi-zhi, Xia Jun, et al. Optimization model for firepower distribution of the vehicle-mounted antitank missile[J]. Fire Control & Command Control, 2011, 36(2): 109–111.
- [7] 冷旭, 崔倩, 年浩, 等. 航空兵对舰突击行动中反舰导弹火力分配模型[J]. 电光与控制, 2016(6): 27–29.  
Leng Xu, Cui Qian, Nian Hao, et al. Firepower assignment model for antiship missiles during air-to-ship attack[J]. Electronics Optics & Control, 2016(6): 27–29.
- [8] 李东, 匡兴华, 晏湘涛, 等. 多阶响应下军事物流配送中心可靠选址模型[J]. 运筹与管理, 2013, 22(1): 147–156.  
Li Dong, Kuang Xing-hua, Yan Xiang-tao, et al. A reliable location model for military logistics distribution centers based on multi-stages response[J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22(1): 147–156.
- [9] 任骥, 郑晓蕾. 战场不确定环境下考虑敌方打击的后勤供应网络设计[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(6): 126–130.  
Ren Ji, Zheng Xiao-lei. Logistics supply network design in battlefield uncertain in environment with enemy attack consideration[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(6): 126–130.
- [10] 张培林, 魏巧云. 物流配送中心选址模型及其启发式算法[J]. 交通运输工程学报, 2003, 3(2): 65–68.  
Zhang Pei-lin, Wei Qiao-yun. Logistics distribution center allocation model and elicitation algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2003, 3(2): 65–68.
- [11] 张亮, 工端民, 韩景惻. 战时装备保障的多目标运输问题及其求解[J]. 物流科技, 2005, 28(6): 14–17.  
Zhang Liang, Gong Duan-min, Han Jing-chou. Solving the multi-objective transportation problem in the supply of war equipment[J]. Logistics Sci Tech, 2005, 28(6): 14–17.
- [12] 张晓磊, 展丽潇, 叶飞, 等. 应急物资筹集问题的双目标模糊优化决策模型[J]. 后勤工程学院学报, 2013, 29(1): 71–78.  
Zhang Xiao-lei, Zhan Li-xiao, Ye Fei, et al. Double-aimed fuzzy optimization and decision model for emergency material collection[J]. Journal of Logistics Engineering University, 2013, 29(1): 71–78.
- [13] 张大巧, 鲜勇, 王明海, 等. 基于Floyd算法的灵活航迹规划方法[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(6): 55–58.  
Zhang Da-qiao, Xian Yong, Wang Ming-hai, et al. The research on path planning method for alternate target based on Floyd algorithm[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2011, 31(6): 55–58.
- [14] 杨颖, 魏鹏, 蒋鸣, 等. 基于并行蚁群算法的常规导弹作战任务分配[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(5): 189–192.  
Yang Ying, Wei Peng, Jiang Ming, et al. Combat task assignment of conventional missile based on parallel ant colony algorithm[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(5): 189–192.
- [15] 闫华, 何晓静, 周庆忠, 等. 基于保障时间窗的油料调拨运输模型[J]. 后勤工程学院学报, 2015, 31(4): 85–89.  
Yan Hua, He Xiao-jing, Zhou Qing-zhong, et al. POL allotment and transportation model based on support time window[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015, 31(4): 85–89.

(编辑 申小娜)