

# 规划多波次导弹发射

王红梅

成都理工大学工程技术学院, 四川 乐山  
Email: 1739731829@qq.com

收稿日期: 2021年1月5日; 录用日期: 2021年2月13日; 发布日期: 2021年2月23日

## 摘要

导弹在军事作战中有着举足轻重的地位, 机动路线制定显得尤为重要。该问题需要充分考虑节点冲突, 隐蔽性, 以及在转载点处的时间限制, 同时考虑临时增加转载地域, 规划各台导弹发射装置的行径时间和路线是一个组合优化问题。基于该问题提出了一种基于Dijkstra的全局遍历搜索算法, 以总暴露时间最短为目标函数, 建立了多波次导弹发射优化模型。结果表明, 该研究成果可以为导弹发射时间规划提供有效的工程应用指导。

## 关键词

多波次导弹, Dijkstra算法, 组合优化, 全局遍历搜索

# Planning in Multi Wave Missile Launching

Hongmei Wang

The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan Sichuan  
Email: 1739731829@qq.com

Received: Jan. 5<sup>th</sup>, 2021; accepted: Feb. 13<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 23<sup>rd</sup>, 2021

## Abstract

Missiles play an important role in military operations, so it is very important to make mobile routes. In this problem, the node conflict, concealment, and time limit at the transfer point should be fully considered. At the same time, the temporary increase of transfer area should be considered. It is a combinatorial optimization problem to plan the travel time and route of each missile launcher. Based on this problem, a global ergodic search algorithm based on Dijkstra is proposed. Taking the shortest total exposure time as the objective function, a multi wave missile launch optimization model is established. The results show that the research results can provide effective engineering application guidance for missile launch time planning.

## Keywords

Combinatorial Optimization Problem, The Dijkstra Algorithm, Global Search, Multi-Wave Missile

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着武器系统的不断发展和更新, 导弹在未来的军事作战中扮演着重要的角色, 导弹作战路线的制定变得尤为重要, 路线制定的好坏决定着总暴露时间的长短[1] [2] [3] [4] [5]。要在有限的时间内完成机动快、暴露时间短, 就必须要有合理的机动方案[6] [7] [8]。在季青梅[9]等的文章中对于实际问题做了适当简化, 如在涉及多波次打击任务时, 主要考虑了当前波次对下一波次任务分配的影响, 这样得出的结果一般不是全局的最优解。文章中主要针对最近距离进行考虑, 可能存在车辆等待问题, 或者途中会车问题考虑不够全面。在宋志华[10]等的文章中, 模型没有考虑排队、时间窗口、转载地域容量限制等复杂约束条件。在王梓行[11]等的文章中根据国家军事战略目的, 将导弹核武器的配置划分为平时和战时两种状态, 虽具有一定的合理性, 但并没有讨论两种状态的相互衔接性。

以上这些导弹作战路线的文章中涉及多波次打击任务时, 模型会车问题考虑不够全面, 也没有考虑排队, 时间窗口, 转载地域容量限制等复杂约束条件。本文考虑会车冲突、超车冲突、转载冲突、单双车道、不同车型, 从全局的角度来考虑装载车的安排。

## 2. 多波次导弹发射中的规划模型

导弹发射车部署在待机地域隐蔽待命, 作战部队在收到发射命令后, 将导弹发射车分配到相应的导弹发射基地(发射点位)实施齐射任务, 而后发射车前往转载地域重新装载导弹, 再到相应的发射基地进行下一波次的齐射任务。针对  $n$  个波次的发射任务, 假设导弹类型为  $A, B, C, D, \dots$ 。第  $i$  个配送中心导弹数量为  $X_i$ , 待机地域、转载地域、导弹发射基地的坐标分别为  $D_i, Z_i, F_i$ 。现有  $m$  辆导弹发射车, 平均部署在待机地域  $\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$ , 转载地域为  $\{Z_1, Z_2, \dots, Z_M\}$ , 导弹发射基地为  $\{F_1, F_2, \dots, F_L\}$ , 要求在 5 个道路节点(J25、J34、J36、J42、J49)中选取两个作为临时转载地域, 这 5 个节点均是单车道道路节点, 而且均能从主干道经一次支路达到。在完成导弹齐射任务的前提下, 要求整体暴露时间尽可能短。

### 2.1. 模型建立

针对  $n$  个波次的导弹齐射任务, 将其分为  $(2n-1)$  个阶段, 前 2 波次(即前 3 个阶段)分别为从待机地域到第 1 波次导弹发射基地完成第 1 波次发射、从第 1 波次导弹发射基地到第 1 波次转载地域、从第 1 波次转载地域到第 2 波次导弹发射基地完成第 2 波次打击。由于第 3 波次及以后的发射均与第 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, 为了使所有导弹发射车整体暴露时间最短, 建立如下的函数:

$$T = T_l + T_w - T_s - T_z \quad (1)$$

$$T_l = \sum_k \sum_i \sum_{l=1}^{n_{k,j-1}} t_{p_{k,l}^i p_{k,l+1}^i}$$

$$T_w = \sum_k \sum_i \sum_{l=1}^{n_{k,i}} w_{p_{k,l}^i}^i$$

$$T_s = \sum_k w_{k,1}^1$$

$$T_z = \sum_k (w_{k,n_{k,2}}^2 + w_{k,1}^3)$$

式中： $T$  表示目标函数，表示整体暴露时间； $T_l$  表示所有的车载发射装置在路径上的行驶总时间； $T_w$  表示所有的车载发射装置在所有节点的等待总时间； $T_s$  表示所有的车载发射装置在待机地域延迟出发的总时间； $T_z$  表示所有的车载发射装置在转载地域内装弹和等待的总时间； $t_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i}$  表示第  $i$  阶段第  $k$  辆车载发射装置经过路径中的第  $l$  段所耗费的时间； $w_{k,l}^i$  表示第  $i$  阶段第  $k$  辆车载发射装置在第  $l$  个节点处需要等待的时间；第  $l$  段的机动时间，满足： $t_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i} = \frac{d_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i}}{v_k}$ 。

**第一阶段：**待机地域至第一次发射点位，考虑各阶段出现的会车冲突，超车冲突，单双车道，不同车型等条件，建立如下的约束条件：

$$s_k^1 \in \{D_1, D_2\} \tag{2}$$

$$e_k^1 \in \{F_1, F_2, \dots, F_{60}\} \tag{3}$$

$$f_{p_{k,l}^1, p_{k,l+1}^1} = 1 \tag{4}$$

$$(p_{k_i,l}^1, p_{k_i,l+1}^1) = - (p_{k_j,m}^1, p_{k_j,m+1}^1) \left| \Delta t_{p_{k_i,l}^1, p_{k_i,l+1}^1}^{k_i} \cap \Delta t_{p_{k_j,m}^1, p_{k_j,m+1}^1}^{k_j} = \phi \right. \tag{5}$$

$$\sum_{l=1}^{n_{k,l-1}} t_{p_{k,l}^1, p_{k,l+1}^1} + \sum_{l=1}^{n_{k,l}} w_{k,l}^1 = t_{mission}^1 \tag{6}$$

上式中： $s_k^i$  表示第  $i$  阶段第  $k$  辆发射装置的规划路径的起点； $e_k^i$  表示第  $i$  阶段第  $k$  辆发射装置的规划路径的终点； $f_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i}$  表示第  $i$  阶段第  $k$  辆发射装置对路径  $(p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i)$  的连通性判断：值为 1 表示连通，为 0 则表示路径不连续； $\Delta t_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i}^{k_i}$  表示第  $i$  阶段第  $k_i$  辆发射装置所经的有向路径  $(p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i)$  中的相邻两节点的时间区间； $w_{k,n_{k,l}}^1$  表示第  $k$  辆发射装置在第  $l$  阶段终点(发射点)所等待的时间； $t_{mission}^1$  表示第  $l$  波齐射中的行动时间。

式(2)表示起点约束；式(3)表示终点约束；式(4)表示第  $k$  辆车载发射装置在第  $i$  阶段中经过相邻节点路径应连通，表示路径连续性约束；式(5)表示任意两条道路节点的正反向行驶的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，表示冲突性约束；式(6)表示所有发射装置在发射前的总时间一致，表示齐射时间约束。

对式(5)进一步分析，则存在如下关系：

$$\begin{cases} \Delta t_{p_{k,l}^k, p_{k,l+1}^k} = \left[ T_{p_{k,l}^k}^k + w_{k,l}^1, T_{p_{k,l+1}^k}^k \right] \\ T_{p_{k,l}^k}^{k_i} = \sum_{m=1}^{l-1} (t_{p_{k,m}^1, p_{k,m+1}^1} + w_{k,m}^1) \end{cases} \tag{7}$$

式中： $T_{p_{k,l}^k}^{k_i}$  ——表示第  $i$  阶段第  $k$  辆发射装置中刚抵：达第  $l$  个节点的时刻。

**第二阶段：**第一次发射点位至转载地域，考虑各阶段出现的会车冲突，转载冲突，超车冲突，单双车道，建立如下的约束条件：

$$s_k^2 = e_k^1 \tag{8}$$

$$e_k^2 \in \{Z_1, Z_2, \dots, Z_6\} \tag{9}$$

$$f_{p_{k,l}^2, p_{k,l+1}^2} = 1 \tag{10}$$

$$\left\{ (p_{k_i,l}^2, p_{k_i,l+1}^2) = -(p_{k_j,m}^2, p_{k_j,m+1}^2) \left| \Delta t_{p_{k,l}^2, p_{k,l+1}^2}^{k_i} \cap \Delta t_{p_{k_j,m}^2, p_{k_j,m+1}^2}^{k_j} = \phi \right. \right\} \tag{11}$$

$$\left\{ k_i \neq k_j, e_{k_i}^2 = e_{k_j}^2 \left| \left| T_{p_{k_i, n_{k_i,2}}^2}^{k_i} - T_{p_{k_j, n_{k_j,2}}^2}^{k_j} \right| \geq 10 \right. \right\} \tag{12}$$

与第一阶段类似，式(8)表示起点约束；式(9)表示终点约束；式(10)表示路径连续性约束；式(11)表示冲突性约束；由于在装弹需要 10 分钟时间，所以对于同一转载地域的发射装置，彼此的装弹时间至少相差 10 分钟，即到达转载点的时间(包含在转载地域的等待时间  $w_{k,n_{k,2}}^2$ )相差 10 分钟及以上。

**第三阶段：**转载地域至第二次发射点位，考虑各阶段出现的会车冲突，超车冲突，单双车道，建立如下的约束条件：

$$s_k^3 = e_k^2 \tag{13}$$

$$e_k^3 \in \{F_1, F_2, \dots, F_{60}\}, e_k^3 \neq e_k^1 \tag{14}$$

$$f_{p_{k,l}^3, p_{k,l+1}^3} = 1 \tag{15}$$

$$\left\{ (p_{k_i,l}^3, p_{k_i,l+1}^3) = -(p_{k_j,m}^3, p_{k_j,m+1}^3) \left| \Delta t_{p_{k,l}^3, p_{k,l+1}^3}^{k_i} \cap \Delta t_{p_{k_j,m}^3, p_{k_j,m+1}^3}^{k_j} = \phi \right. \right\} \tag{16}$$

$$\left( \sum_{l=1}^{n_{k,2}-1} t_{p_{k,l}^2, p_{k,l+1}^2} + \sum_{l=1}^{n_{k,2}} w_{k,l}^2 \right) + \left( \sum_{l=1}^{n_{k,3}-1} t_{p_{k,l}^3, p_{k,l+1}^3} + \sum_{l=1}^{n_{k,3}} w_{k,l}^3 \right) = t_{mission}^2 \tag{17}$$

式中：  $t_{mission}^2$  ——表示第一波齐射后到第二波齐射时间的间隔时间。将上  $\left\{ \begin{aligned} \Delta t_{p_{k,l}^1, p_{k,l+1}^1}^k &= \left[ T_{p_{k,l}^1}^k + w_{k,l}^1, T_{p_{k,l+1}^1}^k \right] \\ T_{p_{k,l}^i}^{k_i} &= \sum_{m=1}^{l-1} \left( t_{p_{k,m}^1, p_{k,m+1}^1} + w_{k,m}^1 \right) \end{aligned} \right.$ 。

对于后续阶段，即第4阶段至第(2n-1) (n > 2)阶段，由于第3波次及以后的发射均与第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。

要求布设临时转载地域，使得完成两个波次发射任务的整体暴露时间最短。从发射点和转载地域的分布，对 3 个区域进行定性的分析，显然左上方的区域 I 是整个作战区域网络中发射点和转载地域最不均匀的地方，是引起整体暴露时间较大的主要区域。最终建立目标函数：

$$\min T' = \sum_k \sum_i \sum_{l=1}^{n_{k,i}-1} t_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i} \tag{18}$$

式中：

$T'$  ——表示目标函数，简化整体暴露时间；

$t_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i}$  ——表示第  $i$  阶段第  $k$  辆车载发射装置经过机动路径中的第  $l$  段所耗费的时间，

$$t_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i} = \frac{d_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i}}{v_k}。$$

约束条件:

$$\begin{cases} s_k^1 \in \{D_1, D_2\}, s_k^2 = e_k^1, s_k^3 = e_k^2 & (19) \\ e_k^1 \in \{F_1, F_2, \dots, F_{60}\} & (20) \\ e_k^2 \in \{Z_1, Z_2, \dots, Z_6\} \cup \{J_m, J_n\} & (21) \\ e_k^3 \in \{F_1, F_2, \dots, F_{60}\}, e_k^3 \neq e_k^1 & (22) \\ f_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i} = 1 (i=1, 2, 3) & (23) \end{cases}$$

上式中:

$s_k^i$ ——表示第  $i$  阶段第  $k$  辆发射装置的规划路径的起点;

$e_k^i$ ——表示第  $i$  阶段第  $k$  辆发射装置的规划路径的终点;

$f_{p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i}$ ——表示第  $i$  阶段第  $k$  辆发射装置对路径  $(p_{k,l}^i, p_{k,l+1}^i)$  的连通性判断: 值为 1 表示连通, 为 0

则表示路径不连续。

式(19)表示起点约束;

式(20-22)表示终点约束;

式(23)表示第  $k$  辆车载发射装置在第  $i$  阶段中经过相邻节点路径应连通, 表示路径连续性约束。

## 2.2. 全局遍历搜索算法步骤和流程

根据以上模型, 在求解该问题是, 本文采取的方法是全局遍历搜索, 该算法的思想流程如下所示:

Step1: 输入作战区域道路网的点位坐标, 包括待机区域(D1, D2)、转载地域(Z01~Z06)、发射点位(F01~F60)和道路节点(J01~J62)等, 方案记为  $n$ ,  $n = 1$ 。

Step2: 按次序输入 2 个备选临时转载地域。

Step3: 利用 Dijkstra 算法分别计算各出发点 to 各导弹发射点位的最短路径及路径长度。

Step4: 提取出发点 D1 到各导弹发射点位中路径长度最短的 12 条作为运输路径, 即选与发射装置数量相等的路径用于后面的机动路径规划。

Step5: 去掉已选的 12 个导弹发射点位, 然后进一步提取出发点 D2 到各导弹发射点位中路径长度最短的 12 条作为运输路径。

Step6: 从第一波发射点出发, 根据最短路径选择转载地域。

Step7: 去除第一波选择的发射点, 位于每个转载地域的发射装置选择第二波发射点位, 得到 24 条从待机地域至第二波发射点位的路径。

Step8: 给每条路径依次匹配不同速度的车载发射装置, 并计算每种方案下在机动状态下的整体暴露时间。

Step9: 比较得出整体暴露时间最小的速度分配方案, 并记录简化整体暴露时间,  $n = n + 1$ 。

Step10: 判断  $n$ , 如果  $n$  小于 10, 返回 step2, 否则终止算法, 并输出 10 种方案的简化整体暴露时间。

## 3. 实例仿真求解

### 3.1. 问题描述

某部参与作战行动的车载发射装置共有 24 台, 依据发射装置的不同大致分为 A、B、C 三类, 其中 A、B、C 三类发射装置的数量分别为 6 台、6 台、12 台, 执行任务前平均部署在 2 个待机地域(D1, D2)。

所属作战区域内有 6 个转载地域(Z01~Z06)、60 个发射点位(F01~F60)，每一发射点位只能容纳 1 台发射装置。各转载地域最多容纳 2 台发射装置，但不能同时作业，单台转载作业需时 10 分钟。各转载地域弹种类型和数量满足需求。相关道路情况如图 1 所示(道路节点 J01~J62)，相关要素的坐标数据如附件 1 所示。图 1 中主干道(图中红线)是双车道，可以双车通行；其他道路(图中蓝线)均是单车道，只能在各道路节点处会车。A、B、C 三类发射装置在主干道上的平均行驶速度分别是 70 公里/小时、60 公里/小时、50 公里/小时，在其他道路上的平均行驶速度分别是 45 公里/小时、35 公里/小时、30 公里/小时。部队接受发射任务后，要求整体暴露时间(所有发射装置的暴露时间之和)最短。本问题中的“暴露时间”是指各车载发射装置从待机地域出发时刻至第二波次发射时刻为止的时间。其中发射装置位于转载地域内的时间不计入暴露时间内。该部接受到实施两个波次的齐射任务(齐射是指同一波次的导弹同一时刻发射)，每个波次各发射 24 枚导弹。

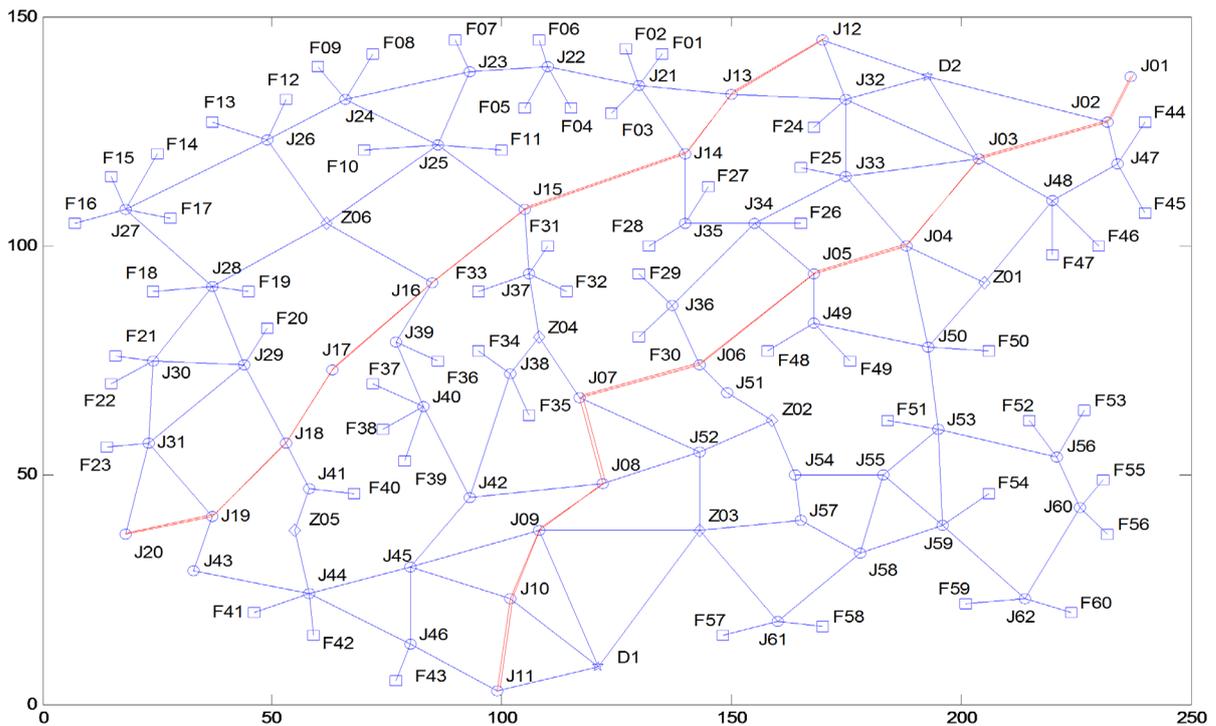


Figure 1. Schematic diagram of roads in combat area

图 1. 作战区域道路示意图

待机地域(D1, D2)。所属作战区域内有 6 个转载地域(Z01~Z06)、60 个发射点位(F01~F60)他们的坐标如下表在附件(一)中所示，除已布设的 6 个转载地域外，可选择在道路节点 J25、J34、J36、J42、J49 附近临时增设 2 个转载地域(坐标就取相应节点的坐标)。应该如何布设临时转载地域，使得完成两个波次发射任务的整体暴露时间最短。

### 3.2. 问题求解

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，再利用全局遍历搜索算法，通过 Matlab 编程实现对该问题的求解，从五个备选临时转载地域选择两个作为临时转载地域，共有 10 种方案。根据上面的优化搜索算法，我们得到了 10 种方案各自在机动状态下的整体暴露时间，结果汇总如下(表 1)。

**Table 1.** Summary of results of 10 schemes**表 1.** 10 种方案结果汇总表

方案	(25, 42)	(34, 36)	(34, 42)	(34, 49)	(25, 34)
暴露时间(minute)	9120.5	9436.5	9143.5	9946.2	9060.8
方案	(25, 36)	(25, 49)	(42, 49)	(36, 42)	(36, 49)
暴露时间(minute)	9480.6	9768.1	9281.3	9325.1	9380.6

从表 1 中我们知道, 选用 J25, J34 处作为临时转载地域是最佳方案。该方案下的暴露时间取得最小值, 为 9060.8 分钟, 从全局的角度考虑, 在 J25, J34 增设临时转载地域后, 大大降低了原本左上方的区域内整个发射点和转载地域的不均匀程度, 降低了整体暴露时间。

#### 4. 结论

本文考虑会车冲突、转载冲突等建立约束条件, 建立了三阶段的组合优化模型, 从全局的角度来解决该组合优化问题, 采用全局遍历搜索算法, 得到了最短暴露时间, 该模型有助于提高常规导弹作战指挥自动化和部队的生存能力, 对于军事作战指导具有很强的现实意义。但在现实做战中应该还会有很多突发情况, 该模型的灵活性不强。接下来需要在动态性上有所突破。

#### 参考文献

- [1] 郁磊, 史峰. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015: 35-44.
- [2] 姜启源, 谢金星, 刑文训. 大学数学实验[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 58-79.
- [3] 舒长胜, 孟庆德. 舰炮武器系统应用工程基[M]. 北京: 国防工业社, 2014: 66-90.
- [4] 申卯兴, 曹泽阳, 周林. 现代军事运筹[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 30-46.
- [5] 孙飞. 电力系统安全风险评估与脆弱性分析[M]. 武汉: 华中科学, 2009: 44-63.
- [6] 靳冰洁, 张步涵, 姚建国. 基于信息熵的大型电力系统元件脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 5(39): 61-68.
- [7] Chen, R.M. and Shen, Y.M. (2015) Novel Encoding and Routing Balance Insertion Based Particle Swarm Optimization with Application to Optimal CVRP Depot Location Determination. *Mathematical Problems in Engineering*, **1**, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2015/743507>
- [8] Iqbals, S., Kaykobad, M. and Rahmnn, S. (2015) Solving the Multi-Objective Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows with the Help of Bees. *Swarm and Evolutionary Computation*, **24**, 50-64. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.06.001>
- [9] 季青梅, 辛文芳. 多波次导弹火力打击任务研究[J]. 信息技术与信息化, 2017, 1(2): 122-128.
- [10] 宋志华, 张晗, 惠晓滨. 导弹作战行动网络流模型及动态规划算法[J]. 解放军理工大学学报, 2017, 1(5): 50-55.
- [11] 王梓行, 姜大立. 战时导弹火力打击任务分配与运输决策模型[J]. 后勤工程学院学报, 2017, 33(4): 77-85.