

doi: 10.7690/bgzdh.2021.02.018

多型地空导弹武器系统调运优化模型

刘 战, 宋贵宝, 姜子劫, 宋传洲

(海军航空大学岸防兵学院, 山东 烟台 264001)

摘要: 为在防控作战中利用有效资源在最短时间将地空导弹武器系统展开部署, 建立最短路模型及装备调运优化模型。以多型地空导弹武器系统在最短时间内完成由多驻地至各个发射阵地的调运为目标, 利用 Floyd-Warshall 算法进行解算, 提出作战需求下的装备调运方案及路线规划。结果表明: 该模型有效、可行, 可为相关研究和决策提供依据。

关键词: 地空导弹; 最短路模型; 调运优化模型; Floyd-Warshall 算法

中图分类号: TJ762.1⁺3 **文献标志码:** A

Optimization Model of Multi Types Surface-to-air Missile Weapon System Transportation

Liu Zhan, Song Guibao, Jiang Zijie, Song Chuanzhou

(School of Coast Guard, Navy Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to utilize effective resources to deploy surface-to-air missile weapon system in the shortest time, the shortest circuit model and equipment transport optimization model are established. Aiming at completing the multi types surface-to-air missile weapon system transfer from multiple stations to each launching position in the shortest time, Floyd-Warshall algorithm was used to solve the problem. Put forward the equipment transportation plan and route plan under the combat requirement. The results show that the model is effective and feasible, and can provide a basis for relevant research and decision-making.

Keywords: surface-to-air missile; shortest path model; dispatch optimization model; Floyd-Warshall algorithm

0 引言

在军事资源有限的条件下, 借助装备调运优化决策可以实现在最短时间内完成调运, 进而降低作战成本, 提高作战装备供应效率, 为顺利完成既定作战任务提供保障。装备调运问题多属于非确定性多项式(non-deterministic polynomial, NP)问题^[1], 其目标是确定各供应方向需求方提供的装备数量及其运输方式和最优路线。现有研究成果多基于模糊理论和智能优化算法, 从调运路线的优化出发, 改进优化目标和约束条件使之更接近战场环境。文献[1]针对战场上带模糊时间窗口、模糊运输风险等问题建立了多目标路线优化模型, 改进了时间约束, 考虑了短时间、低风险等优化目标; 文献[2]针对带模糊需求问题提出了改进粒子群算法, 将模糊理论与智能优化算法结合起来。对于其关联问题——最短路问题的研究多以结合战场应用, 改进一般的标号修正算法为主。文献[3]结合舰载机在特殊机库环境中调运的问题, 提出了融合 Dijkstra 方法的凸壳算法。

笔者从决策对象出发, 考虑“供应方”部署多型武器的作战需要, 以最短时间内完成调运为目标建立模型, 利用解决多节点网络问题更优的 Floyd-Warshall 算法进行解算, 并对作战需求下多型地空导弹武器系统的调运进行仿真。

1 问题描述

地空导弹部队一般通过机动作战来规避敌方可能实施的空中打击, 利用道路运输进行机动部署。有战斗情况时, 多个地空导弹武器系统迅速由所在驻地机动至各个发射阵地并展开进入战斗准备, 这一过程便涉及装备调运的优化决策。

上述过程中, 装备调运决策主要确定各型地空导弹武器系统由多驻地出发, 向各发射阵地进行调运所耗的最短时间及最优路线、各驻地向发射阵地调运的各型地空导弹的数量。在逻辑上, 各型地空导弹进行调运所耗的最短时间, 为地空导弹在最短时间内完成调运的优化目标提供了决策依据。在该过程中, 各驻地扮演“供应方”的角色, 而各发射

收稿日期: 2020-09-30; 修回日期: 2020-11-16

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。

阵地则是“需求方”。该过程一般化的问题描述如下。

为了应对机动快速的空中威胁，某防空部队接上级命令，须迅速出动展开部署。

该防空部队装备有 Λ 种不同型号地空导弹武器系统，需从 m 个驻地 $\{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ 经由 r 个道路枢纽 $\{V_1, V_2, \dots, V_r\}$ 调往 n 个地空导弹发射阵地 $\{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 。其中， i 驻地所能提供的 λ 型地空导弹武器系统数量为 $s_{\lambda i} (\lambda=1, 2, \dots, \Lambda; i=1, 2, \dots, m)$ ， j 阵地所需 λ 型地空导弹武器系统数量为 $c_{\lambda j} (j=1, 2, \dots, n)$ ，各驻地与各枢纽，各枢纽之间，各枢纽与各阵地间道路长度为 $d_{kl} (k, l=S_1, \dots, S_m, V_1, \dots, V_r, T_1, \dots, T_n)$ ， λ 型地空导弹在各道路的行驶速度为 $v_{\lambda kl}$ 。

现根据我作战需要及装备情况，以“最短时间完成调运”为目标，提出调运方案及路线规划，需要确定：

- 1) 各地空导弹武器系统全部完成调运的总时；
- 2) 由 i 驻地向 j 阵地调拨的各型地空导弹武器系统的数量 $x_{\lambda ij}$ ，最短时间 $\text{mint}(\mu_{\lambda ij})$ 以及所耗时间最短的路径 $\mu_{\lambda ij}$ 。

2 建立模型

2.1 最短路问题的一般模型

根据问题描述，首先要解决 λ 型地空导弹武器系统由 i 驻地向 j 阵地调运的路径选择及时间的问题。针对该问题，笔者结合文献[4-5]建立了最短路问题的一般模型。

定义各驻地、枢纽、阵地及其之间相互连通的道路共构成 A 个运输网络 $N=(V, A, W_\lambda)$ ，在其中任意一个网络之中， V 代表网络各节点，即各驻地、枢纽、阵地， $(k, l) \in A$ 称为弧，即各连通道路，其所对应的权 $\omega_{\lambda kl}$ 称为弧长。以任意驻地 S_i 为起点、阵地 T_j 为终点的有向路，其所经过的弧的弧长之和，称为该有向路的权或路长。在所有上述有向路中，权最小的一条称为最短路，亦即本问题中的 $\mu_{\lambda ij}$ 。求解最短路及其路长的问题即为最短路问题。

定义：

$$\omega_{\lambda kl} = \begin{cases} \frac{d_{kl}}{v_{\lambda kl}} & |k, l\text{-之间有道路连通} \\ \infty & |k, l\text{-之间无道路连通} \end{cases} \quad (1)$$

需要说明：各节点之所以构成 A 个运输网络，是因为各型地空导弹武器系统调运速度互有差异，构成了 A 个权矩阵，因此相应形成了 A 个运输网络。

则 λ 型导弹武器系统由 i 驻地向 j 阵地调运的最短时间实际上就是最短路各弧长的和，即

$$\text{mint}(\mu_{\lambda ij}) = \sum_{(k, l) \in \mu_{\lambda ij}} \omega_{\lambda kl} \quad (2)$$

2.2 导弹调运优化模型

在解决路径选择问题并得到各型地空导弹武器系统通过各驻地一阵地点间最短路所耗的时间 $\text{mint}(\mu_{\lambda ij})$ 后，将其作为参数，参考文献[6]建立导弹调运优化模型。

定义辅助变量 $y_{\lambda ij}$ 为 0~1 变量， $y_{\lambda ij}=0$ 为没有 λ 型地空导弹由 i 驻地运往 j 阵地， $y_{\lambda ij}=1$ 为有 λ 型地空导弹由 i 驻地运往 j 阵地。

$$y_{\lambda ij} = \begin{cases} 1 & x_{\lambda ij} > 0 \\ 0 & x_{\lambda ij} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

各地空导弹武器系统全部完成调运的总时间即最晚完成调运的地空导弹武器系统所耗时间，用公式表示为：

$$t = \max_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n} [y_{\lambda ij} \text{mint}(\mu_{\lambda ij})] \quad (4)$$

则“最短时间完成调运”的目标函数为：

$$f = \min_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n} \max [y_{\lambda ij} \text{mint}(\mu_{\lambda ij})] \quad (5)$$

由 i 驻地向 j 阵地调拨的各型地空导弹武器系统的数量 $x_{\lambda ij}$ 需要满足：

1) 由 i 驻地发出的各型导弹武器系统数量应不超过 i 驻地所能提供的各型导弹武器系统数量，即

$$\sum_{j=1}^n x_{\lambda ij} \leq s_{\lambda i} \quad (6)$$

2) 向 j 阵地调运的各型导弹武器系统数量应等于 j 阵地所需的各型导弹武器系统数量，即

$$\sum_{i=1}^m x_{\lambda ij} = c_{\lambda j} \quad (7)$$

3) i 驻地调往 j 阵地的各型导弹武器系统数量应满足非负整数约束

$$x_{\lambda ij} = Z \quad (8)$$

据此建立优化模型：

$$f = \min_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n} \max [y_{\lambda ij} \text{mint}(\mu_{\lambda ij})], \quad \text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_{\lambda ij} \leq s_{\lambda i} \\ \sum_{i=1}^m x_{\lambda ij} = c_{\lambda j} \\ x_{\lambda ij} = Z \\ y_{\lambda ij} = \begin{cases} 1 & x_{\lambda ij} > 0 \\ 0 & x_{\lambda ij} = 0 \end{cases} \end{cases} \quad (9)$$

2.3 模型假设

以上模型的建立需要遵循假设如下:

- 1) 各道路运力充足, 桥梁、隧道无限重限高, 即不考虑网络最大流的约束;
- 2) 经过某一条路的各装备, 不分先后地通过该路上的各个弧;
- 3) 不考虑道路遭到破坏而需要维修或重新架设的时间损失;
- 4) 各道路行驶速度为平均速度, 在实际作战应用中, 该参数可由交通部门的实时监测数据获得, 或在数据网络瘫痪情况下参照以往同期数据(前一天同一时段该路段情况)获得;
- 5) 参与调运的各武器装备皆达到作战要求, 并且不考虑在调运过程中武器装备受损的情况。

3 模型解算

3.1 基于 Floyd-Warshall 算法的最短路模型解算

Floyd-Warshall 算法是一般标号修正算法的衍生算法, 可用于解决网络中所有节点的最短路问题,

$$\left. \begin{aligned} u_{\lambda kk}^{(1)} &= 0 \\ u_{\lambda kl}^{(1)} &= \omega_{\lambda kl} \quad k \neq l \\ u_{\lambda kl}^{(h+1)} &= \min(u_{\lambda kl}^{(h)}, u_{\lambda kh}^{(h)} + u_{\lambda hl}^{(h)}) \quad k, l, h = S_1, \dots, S_m, V_1, \dots, V_r, T_1, \dots, T_n \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

利用 Floyd-Warshall 算法进行解算, 其步骤为:

- 1) $h=0$ 令 $p_{\lambda kl}^{(1)} = l, u_{\lambda kk}^{(1)} = 0, u_{\lambda kl}^{(1)} = \omega_{\lambda kl}$ 。
- 2) $h=h+1$ 若 $u_{\lambda kl}^{(h)} \leq u_{\lambda kh}^{(h)} + u_{\lambda hl}^{(h)}$,
令 $p_{\lambda kl}^{(\eta+1)} = p_{\lambda kl}^{(\eta)}, u_{\lambda kl}^{(\eta+1)} = u_{\lambda kl}^{(\eta)}$,
否则, 令 $p_{\lambda kl}^{(h+1)} = p_{\lambda kh}^{(h)}, u_{\lambda kl}^{(h+1)} = u_{\lambda kh}^{(h)} + u_{\lambda hl}^{(h)}$ 。

3) 若 $h=m+r+n$, 输出 $u_{\lambda, S_i, T_j}^{(m+r+n)}$ 即为 $\min t(\mu_{\lambda ij})$,

否则转 2)。

输出最短路径 μ_{ij} :

- 1) $p_{\lambda, S_i, T_j}^{(m+r+n)} \neq T_j$ 时, 记 $p_{\lambda, S_i, T_j}^{(m+r+n)} = p_{\lambda i}$,
- 2) $p_{\lambda, p_\eta, T_j}^{(m+r+n)} \neq T_j$ 时, 记 $p_{\lambda, p_\eta, T_j}^{(m+r+n)} = p_{\lambda, \eta+1}$,

否则输出最短路径 $\mu_{\lambda ij}: S_i \rightarrow p_1 \rightarrow \dots \rightarrow$

$p_\eta \rightarrow T_j$ 。

3.2 利用 lingo 求解装备调运问题

装备调运问题的解算一般来说可以由 Matlab 的寻优工具 optimization 来完成, 但由于该模型变量较多 $A \times m \times n$ 且有非负整数约束, 若用 matlab 的相应工具进行解算, 时间较长且不易实现全局寻优。lingo 可以容纳多个变量, 直接表述非负整数约束,

且解决此类问题时相比于一般标号算法需要改变起点的办法, 复杂度更低, 针对文中问题节点较多(共有起终点在内的 $m+r+n$ 个节点)的特点具有较好适用性。该算法的基本思路: 比较两节点间直接连通的弧长(若不直接连通, 则弧长为 ∞)与以节点标号为序, 逐次代入各节点作为中间节点后的路长, 取其较小者作为当前最短路(长), 取当前最短路第一条弧的头节点作为后趋节点, 最终将所有节点代入后得到的当前最短路即为符合问题要求的最短路。

根据该问题的描述与算法的基本思路^[7], 建立基于该算法的模型:

引入 A 对 $(m+r+n)$ 阶(把起终点也作为一般节点故而为 $(m+r+n)$ 阶)矩阵 U_λ 和 P_λ , 其中 U_λ 是最短路长矩阵, P_λ 是最短路矩阵, $u_{\lambda kl}$ 表示由点 k 到点 l 的当前最短路长, $p_{\lambda kl}$ 即后趋节点。

由于 Floyd-Warshall 算法采取依序代入各节点作为中间节点并进行比较的寻优办法, 因而其实质上是一种迭代算法。参照文献[4]建立迭代方程:

且完成解算方便灵活、执行速度较快。

为了适应 lingo 的语言环境, 需要将模型进行如下转化:

$$\left. \begin{aligned} f' &= \min C, \\ y_{ij} \min t(\mu_{ij}) &\leq C \\ \sum_{j=1}^n x_{\lambda ij} &\leq s_{\lambda i} \\ \sum_{i=1}^m x_{\lambda ij} &= c_{\lambda j} \\ x_{\lambda ij} &= Z \\ y_{\lambda ij} &= x_{\lambda ij} / (x_{\lambda ij} + \varepsilon) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: C 是一个辅助变量, 也是最终输出的目标函数最优解; ε 是一个极小的正数。

4 算例分析

某地空导弹部队有 2 处驻地 $S_1(-80,350)$ 、 $S_2(-20,250)$ 和 5 个发射阵地 $T_1(0,500)$ 、 $T_2(120,400)$ 、 $T_3(80,300)$ 、 $T_4(50,200)$ 、 $T_5(0,100)$, 2 处驻地均装备有 B、C 两型地空导弹武器系统共 5 个, 其中 B 型地空导弹武器系统 3 个, 分别驻于 S_1 (2 个)、 S_2 (1 个), C 型地空导弹武器系统 2 个, 分别驻于 S_1 (1

个)、 S_2 (1 个), 各枢纽坐标及道路(在实际作战应用中, 该信息须在作战标图中标定)如表 1 及图 1 所示。

表 1 道路枢纽坐标

V_1 (-60,450)	V_2 (-20,390)	V_3 (10,330)	V_4 (50,250)
V_5 (0,200)	V_6 (60,460)	V_7 (70,380)	V_8 (50,150)

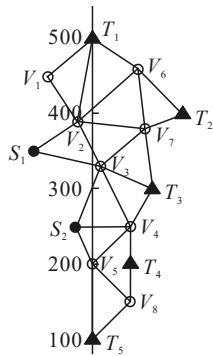


图 1 驻地-阵地道路

B 型地空导弹武器系统在各道路的行驶速度为 60 km/h, C 型地空导弹武器系统在各道路的行驶速度为 80 km/h, 现根据不同的导弹武器系统部署要求, 制定路线及调运方案。

1) 路线规划。

利用 Floyd-Warshall 算法解算, 分别输出两型地空导弹武器系统的最短路长矩阵和最短路矩阵:

$$U_B^{(15)} = \begin{bmatrix} \dots & 3.0014 & 3.6086 & 2.8059 & 3.8606 & 5.5248 \\ \dots & 4.4054 & 3.6232 & 2.1385 & 2.0000 & 2.5642 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix};$$

$$U_C^{(15)} = \begin{bmatrix} \dots & 2.2510 & 2.7065 & 2.1044 & 2.8955 & 4.1436 \\ \dots & 3.3041 & 2.7174 & 1.6039 & 1.5000 & 1.9231 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix};$$

$$P_B^{(15)} = P_C^{(15)} = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 4 & 4 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 \\ 5 & 2 & 5 & 5 & 5 & 6 & 7 & 5 & 5 & 7 & 5 & 5 & 6 & 6 & 7 \\ 1 & 4 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 11 & 4 & 4 & 11 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 1 & 5 & 3 & 4 & 5 & 5 & 5 & 8 & 9 & 5 & 11 & 9 & 5 & 5 & 5 \\ 1 & 2 & 4 & 4 & 5 & 6 & 2 & 9 & 9 & 6 & 4 & 9 & 13 & 6 & 2 \\ 5 & 2 & 5 & 5 & 5 & 6 & 7 & 13 & 13 & 14 & 5 & 13 & 13 & 14 & 7 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 6 & 7 & 6 & 6 & 10 & 2 & 6 & 6 & 6 & 15 \\ 4 & 9 & 11 & 4 & 9 & 9 & 9 & 8 & 9 & 9 & 11 & 12 & 9 & 9 & 9 \\ 4 & 5 & 4 & 4 & 5 & 13 & 13 & 8 & 9 & 13 & 8 & 12 & 13 & 13 & 13 \\ 14 & 7 & 14 & 14 & 14 & 14 & 7 & 14 & 14 & 10 & 14 & 14 & 14 & 14 & 15 \\ 3 & 4 & 3 & 4 & 4 & 4 & 4 & 8 & 8 & 4 & 11 & 8 & 8 & 4 & 4 \\ 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 9 & 8 & 9 & 9 & 8 & 12 & 9 & 9 & 9 \\ 5 & 6 & 5 & 5 & 5 & 6 & 6 & 9 & 9 & 6 & 9 & 9 & 13 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 10 & 6 & 6 & 6 & 14 & 10 \\ 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 7 & 10 & 7 & 7 & 7 & 10 & 15 \end{pmatrix}。$$

则 B、C 两型导弹武器系统分别由 S_1 、 S_2 向 5 个阵地调运的最短路径及最短耗时如表 2 所示。

表 2 驻地-阵地最短路及最短耗时

起点	终点	μ_{Bij}, μ_{Cij}	$\text{mint}(\mu_{Bij})$	$\text{mint}(\mu_{Cij})$	起点	终点	μ_{Bij}, μ_{Cij}	$\text{mint}(\mu_{Bij})$	$\text{mint}(\mu_{Cij})$
S_1	T_1	$(S_1, V_1), (V_1, T_1)$	3.001 4	2.251 0	S_2	T_1	$(S_2, V_3), (V_3, V_2), (V_2, T_1)$	4.405 4	3.304 1
	T_2	$(S_1, V_2), (V_2, V_7), (V_7, T_2)$	3.608 6	2.706 5		T_2	$(S_2, V_3), (V_3, V_7), (V_7, T_2)$	3.623 2	2.717 4
	T_3	$(S_1, V_3), (V_3, T_3)$	2.805 9	2.104 4		T_3	$(S_2, V_4), (V_4, T_3)$	2.138 5	1.603 9
	T_4	$(S_1, V_3), (V_3, V_4), (V_4, T_4)$	3.860 6	2.895 5		T_4	$(S_2, V_4), (V_4, T_4)$	2.000 0	1.500 0
	T_5	$(S_1, V_3), (V_3, S_2), (S_2, V_5), (V_5, T_5)$	5.524 8	4.143 6		T_5	$(S_2, V_5), (V_5, T_5)$	2.564 2	1.923 1

2) 调运方案。

根据本例的资源约束, 计算出共有组合数 $C_5^2 = 10$ 种任务需求及调运方案, 将所有可能的部署

方案分别作为输入参数代入 lingo 求解, 得到不同部署方案下的调运方案及完成调运的最短时间如表 3 所示。

表 3 调运方案及调运时间

序号	终点(导弹型号/调运起点)					完成调运的最短时间 t/h
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	
1	B/S ₁	B/S ₁	B/S ₂	C/S ₁	C/S ₂	3.608 6
2	B/S ₁	B/S ₁	C/S ₁	B/S ₂	C/S ₂	3.608 6
3	B/S ₁	B/S ₁	C/S ₁	C/S ₂	B/S ₂	3.608 6
4	B/S ₁	C/S ₁	B/S ₁	B/S ₂	C/S ₂	3.001 4
5	B/S ₁	C/S ₁	B/S ₁	C/S ₂	B/S ₂	3.001 4
6	B/S ₁	C/S ₁	C/S ₂	B/S ₁	B/S ₂	3.860 6
7	C/S ₁	B/S ₁	B/S ₁	B/S ₂	C/S ₂	3.608 6
8	C/S ₁	B/S ₁	B/S ₁	C/S ₂	B/S ₂	3.608 6
9	C/S ₁	B/S ₁	C/S ₂	B/S ₁	B/S ₂	3.860 6
10	C/S ₁	C/S ₂	B/S ₁	B/S ₁	B/S ₂	3.860 6

3) 仿真结果分析。

通过观察所有部署方案下的调运方案及目标函数解发现，不同的部署方案及其对应的调运方案、所耗时间最长的最短路径以及目标函数解之间存在以下内在关系：

当部署方案的调整仍然使原调运方案满足资源约束的条件时，调运方案不发生改变，但在这种情况下，仅当所耗时间最长的最短路径不发生改变时，目标函数解不发生变化。以部署方案 5、4、3 为例，由方案 5 到方案 4，B 型导弹的需求由 T₅ 转移到 T₄，C 型导弹的需求由 T₄ 转移到 T₅，这 2 个阵地的作战需求仍然能由原调运方案中的 S₂ 分别满足，故而调运方案未发生改变，且所耗时间最长的最短路径也未发生改变（仍然是 μ_{B11} ），因此，目标函数解未发生改变；而由方案 4 到方案 3，虽然 T₂、T₃ 两阵地间作战需求的变化仍然能由原调运方案中的 S₁ 满足，但所耗时间最长的最短路径由 μ_{B11} 转变为 μ_{B12} ，所以目标函数解发生了变化。

当部署方案的调整无法使原调运方案继续满足资源约束的条件时，调运方案发生改变，在该情况下，如果所耗时间最长的最短路径不发生改变，目标函数解不发生变化。以方案 2 到方案 1 为例，在方案 2 中，S₁ 可以提供 T₃ 所需的 C 型导弹，但当 T₃ 的需求调整为 B 型导弹即方案 1 时，因为 S₁ 仅能提供 T₁、T₂ 所需的 2 个 B 型导弹发射单元；因此，该需求需由 S₂ 满足，即调运方案发生了改变，但在方案 1 的全部 5 条最短路径中，所耗时间最长的仍然是将 B 型导弹由 S₁ 运往 T₂ 的那条，所以目标函数解未发生变化。

这一规律如图 2 所示。

5 结论

笔者建立了以“最短调运时间”为优化目标的装备调运优化模型和最短路径模型，为地空导弹武器

系统构建快速响应、机动作战的战术构想提供了理论支撑。通过解算该模型得出各部署方案下“完成调运的最短时间”，可为进一步研究地空导弹武器系统优化部署决策提供依据。

下一步研究，将把桥梁、隧道限重限高等真实道路情况以及道路、装备遭到破坏等随机因素加以考虑，使模型更加接近战场环境。

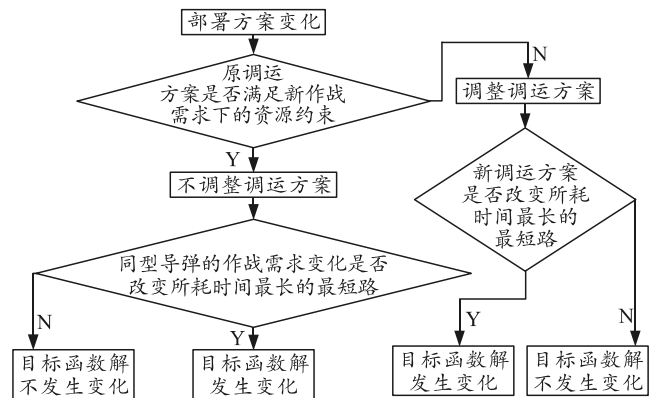


图 2 仿真规律

参考文献：

- [1] 赵文飞, 孙玺著, 司守奎. 基于模糊约束的军事物资配送多目标路径优化[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(12): 2699-2706.
- [2] 朱颖. 基于改进粒子群算法的带模糊时间和需求量的 VRP 问题[J]. 物流技术, 2017, 36(4): 80-89.
- [3] 司维超, 齐玉东, 韩维. 基于融合 Dijkstra 的凸壳算法的舰载机机库调运规划[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 583-588.
- [4] 谢金星, 邢文训, 王振波. 网络优化[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2009: 68-69.
- [5] 胡运权. 运筹学教程[M]. 4 版. 北京: 清华大学出版社, 2012: 242.
- [6] 凌海风, 郑宇军, 萧毅鸿. 装备保障智能优化决策方法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 78.
- [7] 王吉, 王健. 激光干扰红外成像制导导弹的仿真系统[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 55-57.