第三届不确定系统年会论文集
南京，2005年8月12-16日，第284-289页

常规导弹波次作战中运输任务的规划

杨萍 刘卫东 李明雨

第二炮兵工程学院数学与系统工程室，陕西西安， 710025

摘要 常规导弹实施波次打击任务时，需要安排一个较优的运输方案，把多枚导弹在规定的时间内运往各个发射阵地。导弹运输时会涉及道路冲突性、隐蔽性、任务时间限制、道路容量限制等多方面因素，进行运输规划是一个组合优化问题。通过建立运输规划方案的优化模型，可以为常规导弹制定波次作战行动计划提供模型的定量支持，有助于提高常规导弹作战指挥的自动化和部队的整体决策能力。

关键词 常规导弹，运输规划，优化模型，随机规划理论

1 引言

近几次高技术条件下的局部战争都清晰地表明常规导弹在现代战争中作为主战装备发挥着极其重要的作用。对其战法理论，尤其是作战指挥决策的研究直接关系着作战的效果。常规导弹实施波次打击任务时，在对其战前作战计划的制定中，需要安排一个较优的运输方案，把多枚导弹在规定的时间内运往各个发射阵地。由于其运输量大，道路分支点多，极易引起运输中的冲突现象；同时运输方案的制定还需要尽量满足运输目标的分散，各道路、节点容量的限制，因此是一个涉及多个因素的组合优化问题。

在运输过程中，由于随机因素的影响，使得各导弹作战单元到达各个节点的时间存在着随机性，也就使得运输方案存在着不确定性。在建立数学模型时，首先应对各种不确定因素进行量化表示，在此基础上建立符合该问题的优化模型。

本文对此问题进行了详细地讨论，并对模型和算法进行了研究。

2 模型的描述

将几十枚或几百枚常规弹从洞库运往各发射阵地，要途经技术阵地、转运站等中间点，为建模的需要，将道路网抽象为一个有向图，记为$G=(V,A)$，其中A是边的集合，$V=\{1,2,\cdots,n\}$为节点的集合，节点的类型包括洞库、道路节点、技术阵地、转运站、发射阵地等，其中几条道路的交汇点称作道路节点；我们将V中的节点进行重排，使所有$(i,j)\in A$的边满足$i<j$。

对运输计划的优化结果是给出一个满足优化目标和约束条件的始发时间和运输路线的分配表。设各车辆的始发时间分配记为向量 $\mathrm{T}=(t_1^0,t_2^0,\cdots,t_m^0)$，其中 m 为车辆总数。运输路线记为向量 $\mathrm{X}=(x_1^{(1)},\cdots,x_{s_1}^{(1)},x_1^{(2)},\cdots x_{s_2}^{(2)},\cdots,x_1^{(m)},\cdots,x_{s_m}^{(m)})$，其中 $(x_1^{(i)},\cdots,x_{s_i}^{(i)})$ 表示车辆 i 的行驶路线，$x_j^{(i)}$ 为图中节点编号，而维数 s_i 是可变的。网络运输方案记为 (X,T)。

为了建模的方便，作如下一些简化假设：

（1）不考虑运输车辆在途中发生故障；

（2）不考虑因敌方攻击而造成道路有不可逾越的障碍；

3 模型的构建

（1）冲突性目标描述

在网络图 $G=(V,A)$ 中，节点的类型不同，其容量存在着一定的差异。某些节点可同时容纳多个车辆，而有些则不允许有车辆冲突。在运输计划安排时，必须考虑节点的冲突性问题。

A. 节点容量为 1 的冲突性目标

设 $f_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})$ 为车辆 j 到达节点 i 的时间，由于车辆在节点间的行驶时间是随机变化的，因此 $f_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})$ 是一个随机变量，我们定义：

定义 1 若存在 $k\neq j$，在 (X,T) 一次实现中有 $f_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})=f_{ik}(\mathrm{X},\mathrm{T})$

则称节点 i 在这次实现中有冲突，否则没有。

如果允许车辆在节点 i 停留，设车辆 j 在节点 i 的停留时间为 t_{ij}，则

定义 2 若存在 $k\neq j$，在 (X,T) 一次实现中有

$$[f_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T}),f_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})+t_{ij}]\cap[f_{ik}(\mathrm{X},\mathrm{T}),f_{ik}(\mathrm{X},\mathrm{T})+t_{ik}]\neq\phi$$

则称节点 i 在这次实现中有冲突，否则没有。

为了将定义 1 和定义 2 中的形式统一起来，我们定义一个协调函数：

定义 3 令

$$h_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=\begin{cases}1, & \text{节点}i\text{不具有冲突性}\\ 0, & \text{反之}\end{cases}$$

$h_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=\mathbf{1}$，称节点 i 是协调，不冲突的；否则称为是冲突的。

显然 $h_i(\mathrm{X},\mathrm{T})$（$i\in I$）为一个随机变量，我们期望优化目标：

M1 $\quad\max P\{h_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=1,i\in I\}$

其中 I 为容量为 1 的节点的集合。

B. 节点容量大于 1 的冲突性目标

设容量大于 1 的节点集合为 J，对 $i\in J$，其容量为 M_i。$g_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})$ 为车辆 j 在节点 i 接受服务的时间（若车辆 j 在节点 i 不进行任何服务，则 $g_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})=f_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})$），$g_{ij}^{*}(\mathrm{X},\mathrm{T})$ 为车辆 j 服务完离开节点 i 的时间，我们用 $d_i(\mathrm{X},\mathrm{T})(i\in J)$ 表示在运输方案 (X,T) 下节点 i 的冲突次数，$d_i(\mathrm{X},\mathrm{T})(i\in J)$ 显然也是一个随机变量，但其难以用解析式表达，可以用

以下的算法确定：

① 随机产生运输方案(X,T)，对车辆集G，模拟各车辆到达节点 i 的时间；

② 将到达时间由小到大排序$f_{ij_1}(X,T)<\cdots<f_{ij_m}(X,T)$，记$g_{ij_1}(X,T)=f_{ij_1}(X,T)$，并计算$g_{ij_1}{}^{*}(X,T)$；

③ 令$k=1,d_i=0$；

④ 令$\alpha_k=1,s\leftarrow k+1$；

⑤ 若 $f_{ij_s}(X,T)\in[g_{ij_k}(X,T),g_{ij_k}{}^{*}(X,T))$，则 $\alpha_k\leftarrow\alpha_k+1,s\leftarrow s+1$；

⑥ 重复⑤，直到$s=m$；

⑦ 若$\alpha_k>M_i$，令$d_i\leftarrow d_i+1$；

⑧ 令$G\leftarrow G-\{j_1\}$；$k\leftarrow k+1$；

$g_{ij_k}(X,T)=g_{ij_{k-1}}{}^{*}(X,T)$，计算$g_{ij_k}{}^{*}(X,T)$；

⑨ 重复④-⑦，直到$k=m$。

我们期望优化目标：

M2 $\max P\{d_i(X,T)=0,i\in J\}$

（2）隐蔽性目标描述

增大车辆运输计划的隐蔽性是提高战前武器装备生存能力的重要途径，而提高隐蔽性要求运输任务尽量分散到各条路线，这同时也能提高运输任务的可靠性。可以用网络图中运输流量的信息熵来描述隐蔽性。显然，道路的运输流量是运输路线和初始时间分配的函数。

定义 4 称

$$I(\upsilon_{ij}(X,T))=-\sum_i\sum_{j\neq i}\upsilon_{ij}(X,T)\ln\upsilon_{ij}(X,T)$$

为基于(X,T)运输方案下运输网络的信息熵。

其中$\upsilon_{ij}(X,T)$表示节点 i 与节点 j 间道路的运输流量。各υ_{ij}的值越趋于均衡，网络的信息熵越大，此时整个运输计划的隐蔽性越好。我们期望优化目标：

M3 $\max-\sum_i\sum_{j\neq i}\upsilon_{ij}(X,T)\ln\upsilon_{ij}(X,T)$

（3）车辆运行时间约束

容易计算车辆 k 在节点 j 的到达时间：

$$f_{jk}(X,T)=t_k^0+\sum_{i=1}^{j-1}\xi_{i,i+1}^{(k)}+\sum_{i=1}^{j-2}\eta_{i+1}^{(k)}\quad j=2,3,\cdots,s_k$$

其中：$\xi_{i,i+1}^{(k)}$表示车辆 k 从节点i到$i+1$的随机行驶时间；$\eta_{i+1}^{(k)}$表示车辆 k 在节点$i+1$的逗留时间。

则车辆 k 的总行驶时间为

$$f_k(X,T)=\sum_{j=1}^{s_k}(f_{(j+1)k}(X,T)-f_{jk}(X,T))\quad,\quad f_{1k}(X,T)=t_k^0$$

于是，希望满足随机约束

$$f_k(\mathrm{X},\mathrm{T}) \le T^* \qquad k=1,2,\cdots,m$$

其中T^*是总的任务时间要求。

（4）道路容量约束

根据每条道路允许的最大容量，有

$$\upsilon_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T}) \le C_{ij} \qquad i=1,2,\cdots,n-1;\ j>i$$

其中C_{ij}表示节点 i 与节点 j 间道路的容量限制。

根据前面的分析，可以得到一个随机规划模型：

$$(\mathrm{SG1})\quad \begin{cases} \max\begin{cases} P\{h_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=1,\ i\in I\} \\ P\{d_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=0, i\in J\} \\ -\sum\limits_i\sum\limits_{j\ne i}\upsilon_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})\ln\upsilon_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T}) \end{cases} \\ \text{s.t.} \\ \quad f_k(\mathrm{X},\mathrm{T}) \le T^* \qquad k=1,2,\cdots,m \\ \quad \upsilon_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T}) \le C_{ij} \qquad i=1,2,\cdots,n-1;\ j>i \\ \quad 1\le x_i^{(k)} \le n,\quad x_i^{(k)} \ne x_j^{(k)}, i\ne j,\quad i=1,2,\cdots,n, k=1,2,\ldots,m \\ \quad x_i^{(k)}\text{为 整数}，\ i=1,2,\cdots,n, k=1,2,\ldots,m \end{cases}$$

4 模型的进一步讨论

模型（SG1）是一个随机相关机会规划问题，为了便于求解，可将其化为一个随机相关目标规划。

第一优先级，希望尽量满足冲突性目标，即

$$P\{h_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=1, i\in I\} + d_1^- - d_1^+ = 0.95$$

$$P\{d_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=0, i\in J\} + d_2^- - d_2^+ = 0.95$$

其中d_1^-，d_2^-将被极小化。

第二优先级，尽量满足隐蔽性目标，即

$$-\sum_i\sum_{j\ne i}\upsilon_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})\ln\upsilon_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T}) + d_3^- - d_3^+ = 0$$

其中d_3^-将被极小化。于是，模型（SG1）变为：

$$
(\text{SG2})\quad
\begin{cases}
lex\min\{d_1^-, d_2^-, d_3^-\} \\
\text{s.t.}\quad P\{h_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=1, i\in I\}+d_1^- - d_1^+ = 0.95 \\
P\{d_i(\mathrm{X},\mathrm{T})=0, i\in J\}+d_2^- - d_2^+ = 0.95 \\
-\sum_i\sum_{j\neq i} v_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T})\ln v_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T}) + d_3^- - d_3^+ = 0 \\
f_k(\mathrm{X},\mathrm{T}) \le T^* \qquad k=1,2,\cdots,m \\
v_{ij}(\mathrm{X},\mathrm{T}) \le C_{ij} \qquad i=1,2,\cdots,n-1;\ j>i \\
1\le x_i^{(k)} \le n,\ \ x_i^{(k)} \neq x_j^{(k)}, i\neq j,\ \ i=1,2,\cdots,n, k=1,2,\ldots,m \\
x_i^{(k)}\text{为整数}\ i=1,2,\cdots,n, k=1,2,\ldots,m
\end{cases}
$$

此模型可以采用随机模拟和遗传算法形成的混合智能算法求解，限于篇幅，这里暂不详细讨论。

5 结束语

本文根据常规导弹作战运用的实际，针对其战前运输计划中运输车辆时间和路线的安排这一组合优化问题，通过对节点冲突性、车辆隐蔽性、任务时间、道路容量等因素的数学描述，运用不确定规划理论建立了随机规划模型，为解决该问题提供了理论基础，此研究对提高常规导弹作战指挥的效率和部队的生存能力有重要的现实意义。

参考文献

[1] 张最良等，军事运筹学，军事科学出版社，1993

[2] 刘宝碇等，不确定性规划及应用，清华大学出版社，2003

[3] 杨萍，常规导弹波次发射任务规划问题的数学建模，二炮工程学院研究报告，2004

[4] 钱颂迪，运筹学，清华大学出版社，1990

The Planning of Transport Scheme of Conventional Missile Turn Launch

Yang Ping Liu Weidong Li Mingyu

Section of Mathematics and Systems Engineering,

The Second Artillery Engineering Collage,710025 Xi'an,Shanxi,China

Abstract The arrange of transport time and transport line of vehicle in conventional missile turn plan is a combinatorial optimization problem when the operational plan is drawn up. In the paper, the factors of node conflict, vehicle hiding, task time limitation and road capacity are considered. An optimization model of transport scheme is built based on military operations and uncertain programming theory. This research helps for promoting fight efficiency of conventional missile and decision ability of army.

Keywords conventional missile, transport scheme, optimization model, uncertain programming theory

作者简介:

杨萍，女，籍贯：重庆，博士，副教授，研究方向为导弹作战运用，C^3I 系统，导弹武器系统分析。