

带时间窗军事物资配送问题的 NSGA-Ⅱ 算法

赵文飞, 周 刚, 杨树杰, 董 超

(海军航空工程学院基础部, 山东 烟台 264001)

摘 要: 针对战场军事物资配送中带时间窗的路径优化问题, 以运输距离、运输费用和风险性为目标, 建立了带有时间窗的多目标网络运输模型, 提出了一种改进的多目标遗传算法 NSGA-Ⅱ。算法中引入剩余网络的概念, 采用数值编码方式, 增加了精英保留策略和小生境密度。仿真实验结果表明, 本文建立的模型合理, 算法在一定程度上克服了求解多目标优化问题过程中易陷入局部最优的现象, 提高了战场上求解军事物资配送路径优化问题的效率, 并能够使决策者根据仿真实验中的各项参数值自行择优选择运输方案。

关键词: 军事物资; 时间窗; 多目标; NSGA-Ⅱ

中图分类号: O 224

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.11.14

NSGA-Ⅱ algorithm for military resources distribution with time windows

ZHAO Wen-fei, ZHOU Gang, YANG Shu-jie, DONG Chao

(Department of Basic Sciences, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: Aiming at the transportation problem of military resources distribution with time windows, a dynamic network model of the vehicle routing problem including travel distance, cost and risk for targets is built, and an improved multi-objective genetic algorithm NSGA-Ⅱ is proposed. The algorithm introduces residual network, puts forward numeric code, and adds the elitism strategy and niche density. The simulation results show that the algorithm can avoid the phenomenon of leading to local optimization in some degree and improve the efficiency of solving military resources distribution route, and an effective solution for the transportation problem about the supply of wartime equipment is provided.

Keywords: military resources; time windows; multi-objective; NSGA-Ⅱ

0 引 言

随着军事装备的不断发展, 军事物资的配送往往要求运输种类多、批次大、运输量小、运输时间短等。因此, 为了达到运输目的, 军事物资配送的核心环节“车辆路径优化问题”显得尤为重要。近来, 很多学者在社会物流配送研究领域做了大量工作^[1], 而在军事物资配送领域中, 尤其是战时的军事物资配送问题研究较少。战时军事物资运输的过程中往往会因为运输路径或工具遭受破坏而停止, 为了避免拖延运输物资的时间影响战争局势, 必须及时找到最优的备用路径, 拟达到对战争影响最小的效果。

事实上, 在战时的军事物资调配中, 若将运输路径的交叉口视为网路中的节点, 运输路径视为节点与节点之间的弧, 则战时军事物资调配网络可视为一个依赖时间变化的动态网络。战时运输路径和工具遭到破坏则可模拟为网络中弧和节点上的权值发生改变, 也就是模拟为网络弧上的

权值依赖时间动态变化。一般讲可分为 4 种形式: 弧的删除与添加, 弧权重的变大与变小。

对于一个实际的物资配送问题, 往往会考虑多个运输参数, 如距离、费用及风险性等多个目标。而在求解多个目标优化问题时, 往往很难找到一个对所有目标均为最优的解, 通常处理这类问题的办法有以下几种^[2-3]: 加权法, 效用函数法, 字典序法和距离函数法。但是当决策者如果不能准确知道目标间的任何偏好信息时, 上述方法都是基于一种妥协的思想。为了能够有效地解决时间依赖条件下的物资配送问题, 近年来国内外学者做了大量的研究工作^[4-8], 其中文献[7]提出了 1-SA 和 2-SA 方法, 并研究了以运输距离、费用为目标的软时间窗车辆路径问题; 文献[8]研究了带有时间窗的多源点、多种装备物资调配的多目标规划问题。目前国内对带有时间窗的车辆路径优化问题的研究也取得了一定的结果^[9-12], 其中文献[12], 提出了一种改进的约束多目标粒子群优化算法, 研究带有硬时间窗的战

收稿日期: 2014-10-27; 修回日期: 2015-04-15; 网络优先出版日期: 2015-05-04。

网络优先出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2422.TN.20150504.1523.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61205206); 山东省自然科学基金(ZR2014AM006)资助课题

场物资配送的车辆路径问题。

文献[13]研究了和平时军事物资配送的多目标路径优化问题。本文在此基础上,以战时军事物资调配为背景,以距离、费用和风险性为目标(风险性取决于各路径在运输网络中的重要程度),构造了一个依赖时间变化的多目标动态网络模型,并在传统的 NSGA-II 算法基础上进行改进,用于求解该问题。

1 问题描述及数学建模

1.1 问题描述

在战时军事物资调配网络中,运输路径上的运输距离、费用、风险系数等参数都随着时间的变化发生改变,网络中的节点位置始终保持不变,如果某条运输路径遭受损坏,则视该路径的权值为无穷大。若在运输过程中某节点被损坏,则把与该节点相关联的所有弧的权值函数设为无穷大。因此,战时军事物资调配可以模拟为带有时间窗的动态网络问题,模型的动态性体现在网络中弧上的权值函数随着时间改变而改变,且动态网络中的弧是不定向的。

为了叙述方便,依据我军后勤部门保障体系的实际情况,将战时各地区物资配送问题模拟为由 m 个军事仓库向某基地输送军事物资,每个仓库虚拟为源点,军事基地为汇点,网络中运输路径上各权值函数依赖时间变化。考虑军事物资调配往往会涉及到运输距离、费用、风险系数等参数,从而战时军事物资调配可视为依赖时间的多目标动态的网络模型。

1.2 模型建立

战时军事物资配送的动态网络为

$$G = (V, A, D(t), W(t), Q(t), C(t))$$

节点集为

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$$

弧集为

$$A = \{e_{ij} \mid e_{ij} = (v_i, v_j), i, j \in \{1, 2, \dots, n\}\}, \\ A \subseteq V \times V$$

弧上的非负权函数集为

$$D(t) = \{d_{ij}(t)\}, W(t) = \{w_{ij}(t)\}, \\ Q(t) = \{q_{ij}(t)\}, C(t) = \{c_{ij}(t)\}, \\ i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$$

式中, $d_{ij}(t)$ 、 $w_{ij}(t)$ 、 $q_{ij}(t)$ 和 $c_{ij}(t)$ 分别表示在 t 时刻从节点 v_i 出发,经弧 (v_i, v_j) 到达节点 v_j 的运输距离、单位流量的运输费用、风险系数以及弧 (v_i, v_j) 能承受的容量上限,时间 $t \in [t_0, t_m]$, $[t_0, t_m]$ 是有效的时间闭区间。

在给出军事物资调配动态网络模型前,定义变量如下: S 表示所有源点的集合,其中 $S = \{(a_1, t_1), (a_2, t_2), \dots, (a_m, t_m)\}$; v_b 表示汇点; \mathfrak{S} 表示物资种类的集合, $\mathfrak{S} = \{\mathfrak{S}_1, \mathfrak{S}_2, \dots, \mathfrak{S}_l\}$; x_{ij}^k 表示从第 a 个源点发出的物资 \mathfrak{S}_k 经过弧 (v_i, v_j) 的次数; $d_{ij}^k(t)$ 表示在时刻 t 从第 a 个源点发出的军事物资 \mathfrak{S}_k 经过弧 (v_i, v_j) 的运输路程长度; $f_{ij}^k(t)$ 表示在时

刻 t 从第 a 个源点发出的军事物资 \mathfrak{S}_k 经过弧 (v_i, v_j) 的流值; $w_{ij}^k(t)$ 表示在时刻 t 从第 a 个源点运出的军事物资 \mathfrak{S}_k 经过弧 (v_i, v_j) 的单位流量费用; $c_{ij}^k(t)$ 表示时刻 t 从第 a 个源点运出的军事物资 \mathfrak{S}_k 在弧 (v_i, v_j) 上的容量上限; $q_{ij}^k(t)$ 表示在时刻 t 从第 a 个源点运出的军事物资 \mathfrak{S}_k 经过弧 (v_i, v_j) 的单位流量的风险系数; f_0^k 表示第 a 个源点运出的军事物资 \mathfrak{S}_k 的流值; M 表示需求点的物资总量, $M = \{m_1, m_2, \dots, m_l, \dots, m_l\}$, 其中 m_k 表示汇点对军事物资 \mathfrak{S}_k 的需求量。

下面给出军事物资运输网络中源点 S 到需求点 v_b 军事物资 \mathfrak{S}_k ($\forall \mathfrak{S}_k \in \mathfrak{S}$) 运输路程最短、费用最少和风险系数最低的多目标优化问题模型。

(1) 运输路径路程最短的目标函数

$$\min f_1 = \sum_{a \in S} \sum_{((v_i, t_i), (v_j, t_j)) \in A^*} d_{ij}^k(t) x_{ij}^k$$

(2) 运输费用最少的目标函数

$$\min f_2 = \sum_{a \in S} \sum_{((v_i, t_i), (v_j, t_j)) \in A^*} w_{ij}^k(t) f_{ij}^k(t)$$

(3) 运输风险最低的目标函数

$$\min f_3 = \sum_{a \in S} \left[1 - \prod_{((v_i, t_i), (v_j, t_j)) \in A^*} (1 - q_{ij}^k(t) x_{ij}^k) \right]$$

模型的约束条件如下:

(1) 运输过程中确保可行解是一条有效运输路径的约束条件

$$\sum_{v_j \in M^+(v_i)} x_{ij}^k - \sum_{v_j \in M^-(v_i)} x_{ji}^k = \begin{cases} 1, & i = a \\ 0, & i \in V \setminus \{v_a, v_b\}, \forall a \in S \\ -1, & i = b \end{cases}$$

(2) 运输过程中可行流的约束条件

$$\sum_{v_j \in M^+(v_i)} f_{ij}^k(t) - \sum_{v_j \in M^-(v_i)} f_{ji}^k(t) = \begin{cases} f_0^k, & i = a \\ 0, & i \in V \setminus \{v_a, v_b\}, \forall t \in T \\ -f_0^k, & i = b \end{cases}$$

(3) 运输过程中需求汇点对军事物资点需求量的约束条件

$$\sum_{a \in S} f_0^k \geq m_k, \forall a \in S$$

(4) 网络中弧上的容量限制条件

$$0 \leq f_{ij}^k(t) \leq c_{ij}^k(t), \forall (v_i, v_j) \in A, \forall a \in S$$

(5) 网络中弧上的权值非负约束条件

$$x_{ij}^k(t) \geq 0 \text{ 或 } 1, d_{ij}^k(t) \geq 0, w_{ij}^k(t) \geq 0, \\ q_{ij}^k(t) \geq 0, \forall a \in S, \forall (v_i, v_j) \in A$$

2 算法设计及执行过程

针对时间依赖的动态网络 G , 通常将时间以较小的时间间隔 Δ 进行离散化, 在设定的时间间隔 Δ 内, 近似认为网络中弧的条件不发生改变, 则所研究的感兴趣的时间区间 $[t_0, t_m]$ 将被离散化为一个时刻的集合 $T = \{t_0, t_0 + \Delta, \dots, t_0 + (M-1)\Delta, t_M = t_0 + (M-1)\Delta\}$. M 是正整数; t_0 是网络

中从任意某节点出发的最早时刻。这里假设 $t_0 = 0$, 则 $T = \{0, \Delta, \dots, (M-1)\Delta\}$, Δ 是较小的时间间隔, 在该时间间隔内弧上所有权值不发生改变。对 $\forall t \in T$, 弧上所有权值函数均为非负实数, 若 $t > (M-1)\Delta$, 则定义 $d_{ij}(t) = \infty$, $w_{ij}(t) = \infty$, $q_{ij}(t) = \infty$, $c_{ij}(t) = 0$ 。

通过将时间区间 $[t_0, t_m]$ 离散化, 则网络 $G = (V, A, D(t), W(t), Q(t), C(t))$ 可调整为

$$G^* = (V^*, A^*, D(t), W(t), Q(t), C(t))$$

式中, $V^* = \{(v_i, t) | (v_i, t) \in V \times T\}$, 即 G 中的每个节点在时间维展开成一系列节点时间组; A^* 是 G^* 的弧集, 弧 A^* 的定义为

$$A^* = \{((v_i, t), (v_j, t + \Delta_{ij}(t))) | (v_i, v_j) \in A, t + \Delta_{ij}(t) \leq M\}$$

弧上所有权值定义为

$$\begin{aligned} w_{ij}(t) &= w((v_i, t), (v_j, t + \Delta_{ij}(t))) \\ q_{ij}(t) &= q((v_i, t), (v_j, t + \Delta_{ij}(t))) \\ c_{ij}(t) &= c((v_i, t), (v_j, t + \Delta_{ij}(t))) \end{aligned}$$

其中, $\Delta_{ij}(t)$ 指从节点 v_i 到节点 v_j 所用的时间。

在动态网络 G^* 中, 假设 v_a 和 v_b 分别是指定的源点和汇点, 则路径

$$P_{ab}(t) = ((v_a, t), (v_1, t_1), (v_2, t_2), \dots, (v_k, t_k), (v_b, t_b))$$

表示在 t 时刻, 从节点 v_a 出发到达节点 v_b 的一条路径, 其中 $t_1 = t + \Delta_{a1}(t), \dots, t_b = t_k + \Delta_{kb}(t_k)$ 。节点 v_a 到达 v_b 的时间为 $\Delta_{P_{ab}}(t) = t_b - t$ 。在动态网络 G^* 中, 求解 $v_a \rightarrow v_b$ 最短路问题就是求从 t 时刻出发的 $v_a \rightarrow v_b$ 路径中最短的路径, 类似可得最小费用和风险度的路径。

容易看出, 对时间区间进行离散化后, 依赖时间的动态网络优化问题可近似转化为静态网络优化问题进行处理。在离散后的每个时间区间里, 弧上的所有权值近似视为不变。为了符合战场的实际规律, 把弧上权值函数发生变化的时刻抽象为军事物资运输网络受到损坏的时刻。因此, 在感兴趣的时间段里, 可根据网络路径受到破坏的时刻对时间区间进行离散, 在离散后的每个时间区间里, 弧上的权值函数不会发生改变。

一般来讲, 运输网络遭到破坏包括以下两种情况:

(1) 运输路径遭到损坏。这种情况可模拟为网络中弧上的权值发生改变, 包括运输路径的距离、运输费用以及风险系数等。如果按照原来的运输路线继续运输, 运输路径的距离、费用以及运输过程中的风险度可能会大幅度增加, 因此必须迅速选择最优的替代路径。

(2) 运输工具遭到损坏。如果运输工具上的物资没有遭到损坏, 原则上则是从相应的源点另派运输工具去接应, 但是实际情况下, 在运输途中没有运输工具, 因此重新装载会浪费更多时间。所以如果运输途中运输工具遭到损坏, 则需从源点中寻找一条当前网络中最优的替代运输路径进行运输。

为了解决军事物资运输动态性的问题, 本节引入剩余网络的概念。

2.1 剩余网络

剩余网络的定义: $\forall t_i \in T$, 设网络 G 在 t_i 时刻遭到破坏, 则网络 G 中的各种参数需作以下调整。

(1) 需求点需求量的调整:

$$M' = M - M_i$$

式中, M_i 为在 t_i 时刻以内需求点已经收到物资的总量。

(2) 容量约束的调整:

$$c_{ij}^k(t_{i+1}) = c_{ij}^k(t_i) - f_{ij}^k(t_i)$$

其中, 对 $\forall (v_i, v_j) \in A^*, \forall k \in Q, \forall a \in S$ 。

(3) 时间约束的调整: 感兴趣的时间段由 $[t_0, t_m]$ 改为 $[t_i, t_m]$ 。

(4) 弧上权值函数的调整: 对弧上的权值函数做相应的改变。例如, 在 t_i 时刻, 弧 (v_i, v_j) 被损坏, 则可令 $d_{ij}(t_i) = \infty$ 或者让 $d_{ij}(t_i)$ 变得更大, 类似处理弧上运输费用和风险系数的情况。

(5) 网络节点的调整: 从源点运出的每种物资, 在 t_i 时刻网络 G 中的位置均记为新的源点(需求点除外、被损坏的运输工具除外), 与网络 G 中的节点组成新的网络节点。

经过上述(1)~(5)5个方面的调整后所得到的网络称之为 G 的剩余网络, 记为 G' 。网络 G' 中新源点的出弧容量上限和源点的供给量均为该节点的流值。

2.2 算法思想

实际上, 多目标的最短路径问题是单目标的最短路径问题的一种重要的变形问题, 以 NP-难题著称于学界。因此, 求解动态的多目标最短路径问题则变得更加复杂。针对动态网络求解的复杂性, 本文首先将时间区间进行离散化, 利用剩余网络重新构造运输网络, 从而把动态运输网络转化为静态的运输网络, 然后结合问题实际, 利用改进的 NSGA-II 算法对静态的运输网络进行求解。

NSGA-II 算法的核心思想是根据个体的非劣排序(非支配序)与其适应度函数进行选择。其中非劣排序(非支配序)是由非劣解^[14]产生的。

定义 1^[14] 设多目标优化问题的目标函数为

$$z = \min f(x) = \min(f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))$$

若存在解 x 和 y 满足下面等式:

$$\begin{aligned} f_i(x) &< f_i(y), \text{ 对于某些 } i \in \{1, 2, \dots, n\} \\ f_j(x) &\leq f_j(y), \forall j \neq i \end{aligned}$$

则称解 x 为非劣解, 并称 x 非劣于 y 。

种群中的个体依据非劣关系进行排序, 定义 n_x 为种群中非劣于 x 的个体数量, R_x 为个体 x 支配的所有个体存入集合 R_x 。首先, 在种群中利用非劣解的定义计算出 $n_x = 0$ 的所有个体, 并存入集合 F_1 , 并记个体的非劣序 $x_{i_{\text{rank}}} = 1$; 然后, 考虑集合 F_1 中个体 x 支配集 R_x 中的个体 y , 若 $n_y - 1 = 0$, 则将个体 y 存入集合 F_2 , 并记集合 F_2 中所有个体的非劣序 $y_{i_{\text{rank}}} = 2$; 类似地, 在集合 F_2 中重复上述步骤, 当种群中所有个体都有非劣序值时结束。

为了进一步对非劣序值相同的个体进行排序, 这里引入小生境密度的概念。由于本文中考虑的是“多对一”的

动态网络模型,因此将同源点的所有运输路径分为同一个区域。

定义 2 设 x 为集合 F_i 中的个体, F_j 为 F_i 中与个体 x 同区域的路径,令个体 x 的小生境密度函数为

$$x_{i_d} = \sum_{y \in F_j} (|V(x) \cap V(y)| + |A(x) \cap A(y)|)$$

式中, $A(x)$ 为运输路径 x 上所包含的弧集; $V(x)$ 为运输路径 x 所包含的节点集; $|B|$ 为集合 B 的势。从定义 2 中不难看出,小生境密度 x_{i_d} 高的个体表示该个体在同区域与别的路径重合度比较高。

种群中所有个体经过非劣序和小生境密度的计算都得到两个属性:非劣序 i_{rank} 和小生境密度 i_d 。下面针对这两个属性定义偏序关系。

种群中任意两个个体 x 和 y , 当 $x_{i_{rank}} < y_{i_{rank}}$, 或 $x_{i_{rank}} = y_{i_{rank}}$ 且 $x_{i_d} < y_{i_d}$ 时, 定义 $x \succ y$ 。即若两个体的非劣排序不同时,非劣序较小的个体越优秀;若两个体的非劣序相同,则小生境密度值较小的个体越优秀。整个算法正是以偏序关系为依据进行选择。

2.3 算法步骤

步骤 1 对模型 G 中的时间区间 $[0, T_{max}]$ 进行离散, 得 $T = \{0, \Delta, \dots, (M-1)\Delta\}$, $T_{max} = (M-1)\Delta$; 初始化相关参数, 令 $t=0, k=1$; 构造源点集合 $S = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 。

步骤 2 设时间为 t , 令 $j=0, a_j \in S$ 。

步骤 3 对任意一种物资 \mathfrak{S}_k , 源点 a_j , 设定算法终止准则, 给定种群规模为 N , 杂交概率为 p_c , 变异概率为 p_m , 最大迭代次数为 $maxgen$, 最大时间迭代步为 T_{max} ; 令 $i=0, \Phi_i(i) = \phi$, 利用 Dijkstra 算法确定初始种群 $C_k(0)$, 对其进行

选择、交叉和变异产生第一代种群 $Z_k(0)$ 。

步骤 4 进入循环迭代, 令 $i=1$ 。

步骤 5 对种群 $C_k(i)$ 进行交叉操作和变异操作, 得到 N 个后代 $Z_k(i)$ 。

步骤 6 记 $\rho(i) = C_k(i) \cup Z_k(i)$, 计算 $\rho(i)$ 中每个个体的非劣序 i_{rank} 和小生境密度 i_d , 并进行非劣前沿分级, 利用精英策略保留方法选择 $\rho(i)$ 中较好的 N 个个体组成新的父代种群 $C_k(i+1)$, 并记 $\rho(i)$ 中非支配序 $i_{rank}=1$ 的等级为 F_{i_1} , 令 $\Phi_i^*(i+1) = \Phi_i^*(i) \cup F_{i_1}$ 。

步骤 7 若 $i < maxgen$, 令 $i=i+1$, 转步骤 4; 若 $i = maxgen$ (最大迭代次数), $j < n$, 令 $j=j+1$, 转步骤 3; 若 $i = maxgen, j=n, k < l$, 令 $k=k+1$, 转步骤 2; 若 $i = maxgen, j=n, k=l$, 转步骤 8;

步骤 8 若 $k < l$, 令 $k=k+1$, 转步骤 2; 若 $k=l, t < T_{max}$, 判别 t 时刻汇点已收到的军事物资 M_t , 若 $M_t \geq M$, 则迭代停止; 否则, 令 $t=t+\Delta$, 构造剩余网络 G' , 令 $G=G'$, 转步骤 2; 若 $t=T_{max}$, 则迭代停止, 算法结束。

3 仿真实验

针对本文提出的战时军事物资配送建模思想及其求解算法, 以某海军岸导团军事物资调配补给为背景, 首先利用本文的建模思想和算法进行建模, 用 Matlab 软件编程进行仿真实验, 并采用传统的加权遗传算法与本文提出的建模思想和算法作对比; 其次针对本文提出的解决动态网络的算法思想对案例做仿真实验。假设该岸导团需要两种物资, 由 3 个联勤部后勤仓库向其提供物资保障。各后勤仓库与岸导团的物资运输网络参数如表 1 所示。

表 1 物资 1、物资 2 在网络 G 中各项权值参数

弧	运输 距离/km	运输费用/元		风险系数		容量上限/t	
		物资 1	物资 2	物资 1	物资 2	物资 1	物资 2
(1,5)	298	4 500	3 000	0.09	0.08	90	70
(1,6)	245	3 643	1 400	0.072	0.011	90	85
(1,8)	424	8 680	8 680	0.13	0.23	105	95
(2,4)	401	8 221	8 000	0.096	0.09	90	95
(2,7)	265	2 032	2 032	0.043	0.043	85	85
(2,9)	578	9 032	5 032	0.22	0.22	95	80
(2,10)	231	1 400	50 100	0.013	0.163	95	100
(3,4)	401	4 221	4 221	0.076	0.076	100	80
(3,5)	487	2 593	2 593	0.014	0.084	90	90
(3,6)	180	3 113	1 313	0.015	0.045	80	95
(3,9)	363	3 200	4 200	0.097	0.095	90	95
(4,9)	250	3 200	3 100	0.012	0.022	95	85
(4,10)	117	1 580	2 580	0.032	0.042	95	90
(5,6)	268	2 209	2 200	0.012	0.012	100	95
(5,8)	202	1 689	1 500	0.008	0.008	90	95
(5,11)	290	2 302	2 102	0.016	0.036	95	90
(6,8)	448	4 905	4 005	0.023	0.033	100	95
(6,9)	305	2 576	2 500	0.026	0.036	90	95
(6,11)	283	2 209	1 100	0.014	0.014	95	90
(7,10)	236	2 209	2 111	0.024	0.034	90	95
(7,12)	342	4 209	4 200	0.094	0.054	95	80
(7,13)	280	3 209	3 000	0.014	0.024	95	90
(8,11)	312	2 782	2 700	0.012	0.022	110	100
(8,14)	380	3 682	3 600	0.007	0.027	95	90
(9,11)	250	2 235	2 000	0.023	0.043	95	95
(9,12)	150	1 210	5 210	0.016	0.076	95	85
(10,12)	230	2 102	2 000	0.015	0.045	90	95
(10,13)	315	3 576	3 000	0.004	0.014	100	100
(11,12)	400	4 347	4 311	0.005	0.025	100	90
(11,14)	289	2 690	1 600	0.004	0.011	90	90
(11,15)	100	2 280	2 380	0.069	0.019	105	95
(12,13)	280	2 774	5 700	0.011	0.061	95	90
(12,14)	130	1 280	2 280	0.009	0.019	95	100
(12,15)	280	1 980	5 800	0.01	0.31	90	85
(13,15)	530	5 824	2 180	0.011	0.041	90	80
(14,15)	660	5 023	4 000	0.241	0.009	100	90

3.1 仿真实验结果对比

根据本文建立的军事物资调配的模型和算法思想, 利

用 Matlab 编程可求出在时刻物资 1、物资 2 的最佳运输方案各项参数值如表 2 所示。

表 2 物资 1、物资 2 在 $t=0$ 时刻各运输方案中的相关参数(1)

物资种类	运输路径	运输距离/km	运输费用/元	风险系数	容量上限/t	非劣序	小生境密度
物资 1	2→10→12→15	741	5 482	0.028	90	1	0.80
	3→6→11→15	563	7 602	0.198	80	2	0.80
	1→5→11→15	688	9 082	0.175	80	3	0.80
	3→9→11→15	713	7 715	0.189	80	4	0.80
物资 2	2→10→13→15	1 076	10 800	0.018	90	5	0.80
	3→6→11→15	563	4 793	0.078	90	1	0.80
	1→6→11→15	628	4 880	0.044	90	2	0.80
	2→7→13→15	1 075	7 212	0.108	80	3	0.80
	1→5→11→15	688	7 482	0.135	60	4	0.8
	3→6→11→14→15	1 412	8 013	0.079	80	5	0.83

一般来讲传统加权法是把多目标问题转化为单目标问题来进行求解,为了消除量纲的不可加性,本文将多目标函数转化如下:

$$\min f = \frac{f_1}{\max f_1} + \frac{f_2}{\max f_2} + \frac{f_3}{\max f_3}$$

这里假设 3 个目标函数的权重相等,利用传统遗传算法编程仿真,得到结果如表 3 所示。

表 3 物资 1、物资 2 在 $t=0$ 时刻各运输路径的相关参数(2)

物资	运输路径	运输距离/km	运输费用/元	风险系数	容量上限/t	目标值 f
物资 1	2→10→12→15	741	5 482	0.028	90	0.94
	3→9→12→15	793	6 390	0.123	80	1.338
	2→10→13→12→15	1 106	9 730	0.028	90	1.458
	2→10→13→15	1 076	10 800	0.018	90	1.475
物资 2	3→6→11→15	563	7 602	0.198	90	1.501
	1→6→11→15	628	4 880	0.044	80	0.477
	3→6→11→15	563	4 793	0.078	90	0.509
	1→5→11→15	688	7 482	0.135	90	0.725
	1→6→5→11→15	903	8 082	0.078	80	0.732
	3→6→5→11→15	838	7 995	0.112	90	0.764

从表 2 和表 3 不难看出,用传统的加权遗传算法求出的解比较依赖于各目标所占的权重,如物资 2 运输路径 1→6→11→15 的风险系数比路径 3→6→11→15 小,排第 1,而路径 3→6→11→15 的运输距离及费用都比路径 1→6→11→15 优越。此外,对比表 2,利用传统的遗传算法求出的解比较集中,而利用改进的 NSGA-II 算法求出的解分布相对均匀,保证了种群的多样性,在一定程度上防止算法陷入局部最优,并且运输路径的多样性有利于战场上军事物资的运输。

3.2 动态网络仿真实验分析

从表 2 不难看出物资 1 与物资 2 的最佳运输方案为 2→10→12→15 与 3→6→11→15,现假定物资 1、物资 2 均以速度为 60 km/h 和 58 km/h 的速度沿着最优路径进行运输,并假设网络在 $t=5$ h 时该运输网络遭到破坏(仿真实验时,不是所有的路径都遭到破坏,而是由计算机随机选择路径,同时为方便叙述,假设该运输网络只遭到一次破坏,两次和两次以上的破坏情况可相同处理)。根据第 2.2 节剩余网络的定义,结合破坏实际情况,构造剩余网络图,如图 1 所示。

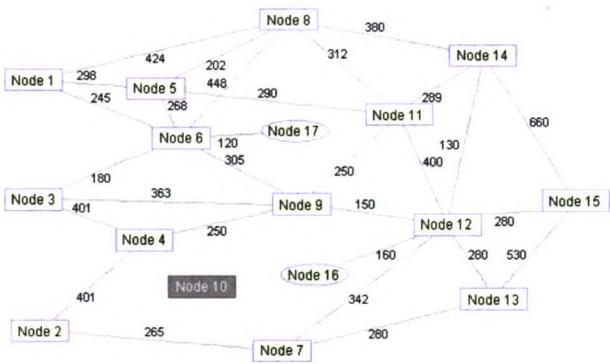


图 1 剩余网络图

从图 1 中可以看出该网络在 $t=5$ h 时刻,路径(3,5)、(2,9)、(11,15)、(6,11)和网络节点 10 遭到破坏。从构造的剩余网络图 1 不难发现,网络中新增了节点 16、17,其中节点 16 表示当物资 1 运输到该位置时,节点 10 遭到了破坏,因此该破坏并不影响物资 1 的运输,节点 17 表示当物资 2 运输到该位置时,按计划运输到节点 11 的路径遭到破坏,但是从节点 6 到该位置的路径并没有受到影响。

针对构造的剩余网络图 1,可知在军事物资调配网络中新增了两个源点节点 16 和节点 17,也就是现在仿真的对象变为 5 个后勤仓库向 1 个岸导团配送军事物资 1 和物资 2。在不考虑军事物资存在浪费情况的前提下,以剩余网络图为仿真对象,经 Matlab 仿真得到运输路径及其相关参数,如图 2 和表 3 所示。

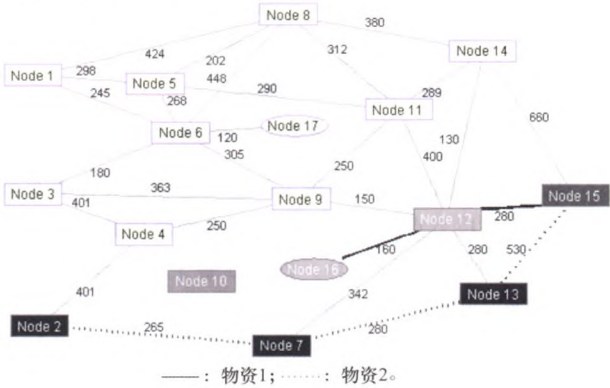


图 2 运输网络破坏后的运输路径 1

表 4 运输网络破坏后各物资运输路径的相关参数

物资	运输方案	运输路径	运输距离/km	运输费用/元	风险系数	容量上限/t	非劣序	小生境密度
物资 1	最优路径	16→12→15	440	3 442	0.02	90	1	0.75
	备用路径	3→9→12→15	793	6 390	0.123	90	2	0.80
		2→7→13→15	1 075	11 065	0.068	80	3	0.80
物资 2	最优路径	2→7→13→15	1 075	7 212	0.108	90	1	0.80
	备用路径	3→6→5→11→14→15	1 687	11 215	0.083	80	2	0.86
		2→7→12→15	887	12 032	0.407	80	3	0.80

对比表 2,可以看出物资 1 最优运输路径并没有受到影响,但是其备用路径发生了变化,由 $3 \rightarrow 6 \rightarrow 11 \rightarrow 15$ 和 $1 \rightarrow 5 \rightarrow 11 \rightarrow 15$ 改为 $3 \rightarrow 9 \rightarrow 12 \rightarrow 15$ 和 $2 \rightarrow 7 \rightarrow 13 \rightarrow 15$ (因为路径 (11,15)遭到破坏);而物资 2 的运输路径均发生了变化,最优路径变为 $2 \rightarrow 7 \rightarrow 13 \rightarrow 15$,备用路径变为 $3 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 11 \rightarrow 14 \rightarrow 15$ 和 $2 \rightarrow 7 \rightarrow 12 \rightarrow 15$ 。经对比表 2 还可以看出,运输网络遭到破坏后,物资 1 和物资 2 运输路径的各项参数均没有原来的优越。以物资 2 最优路径为例,破坏之前其运输路径 $3 \rightarrow 6 \rightarrow 11 \rightarrow 15$ 的运输距离、费用和风险系数分别为 563 km、4793 元和 0.048,运输网络破坏之后,最优路径 $2 \rightarrow 7 \rightarrow 13 \rightarrow 15$ 的运输距离、费用和风险系数分别为 1 075 km、7 212 元和 0.108,各项参数均变大,符合客观规律。

事实上,在军事物资运输中,有时会考虑军事物资的浪费情况,因此为避免物资浪费,在做仿真实验时重新以节点 16 和节点 17 作为运输源点,寻找其在剩余网络中的最优路径。利用本文设计的算法编程,计算出在剩余网络中的最优运输路径如图 3 所示。

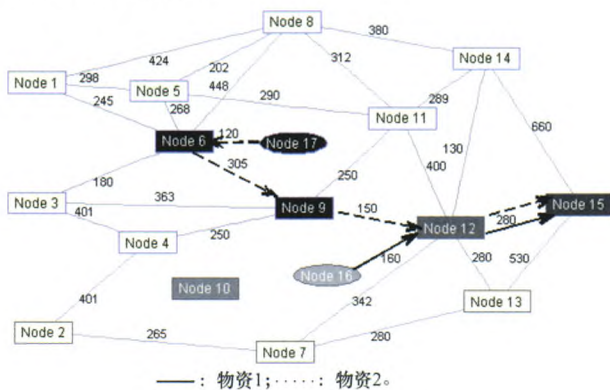


图 3 运输网络破坏后的运输路径 2

从图 3 中可以看出,物资 1 的最优运输路径没有受到影响,物资 2 以节点 17 为起点,在剩余网络中找到的最优路径为 $17 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 12 \rightarrow 15$ 。因此在整个运输过程中,物资 1 和物资 2 的最优运输路径分别为 $2 \rightarrow 10 \rightarrow 16 \rightarrow 12 \rightarrow 15$ 和 $3 \rightarrow 6 \rightarrow 17 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 12 \rightarrow 15$,其运输路径中的各项参数值如表 5 所示。

表 5 运输网络破坏后物资 1、物资 2 运输路径的各项参数

物资	运输最优路径	运输 距离/km	运输 费用/元	风险 系数
物资 1	$2 \rightarrow 10 \rightarrow 16 \rightarrow 12 \rightarrow 15$	741	5 482	0.028
物资 2	$3 \rightarrow 6 \rightarrow 17 \rightarrow 6 \rightarrow 9 \rightarrow 12 \rightarrow 15$	1 093	8 992	0.129

如果以军事物资浪费程度为重要依据,则在整个运输过程中,物资 1 没有遭受到网络破坏的影响,物资 2 的运输路径相对静态情形下的运输路径发生了变化。从仿真结果可以看出,虽然在运输中避免了军事物资的浪费,但其运输路径各项参数值相比表 2 和表 3 中的最优运输路径参数的结果要差,这充分说明多目标车辆路径优化问题的绝对最优解是不存在的,决策者根据不同的决策手段得到的结果往往不同。

4 结 论

本文以带有时间窗的军事物资配送问题为研究对象,基于多目标优化理论建立了动态的军事物资配送网络模型,提出了一种改进的 NSGA-II 算法。在传统 NSGA-II 算法进化中增加精英保留策略和小生境密度,通过仿真实验得出,算法在一定程度上克服了求解多目标优化过程易陷入局部最优的问题。仿真实验表明,本文建立的模型合理、算法有效,能够使决策者根据仿真实验中的各项参数值自行择优选择运输方案,为指挥员提供有力的决策依据。

参考文献:

- [1] Zhang Q. The scheduling modeling and practice of logistics distribution path optimization [M]. Chinese Material Press, 2006. (张潜. 物流配送路径优化调度建模与实务[M]. 中国物资出版社, 2006.)
- [2] Miaou S P, Cnin S M. Computing k-shortest paths for nuclear spent fuel highway transportation[J]. *European Journal of Operational Research*, 1991, 53(1): 64-80.
- [3] Erkut E. The discrete p-dispersion problem[J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, 46(1): 48-60.
- [4] Cook K L, Halsey E. The shortest route through a network with time-dependent internode transit times [J]. *Journal of mathematical analysis and applications*, 1996, 14(3): 493-498.
- [5] Chabini I. Discrete dynamic shortest path problem in transportation applications [J]. *Transportation Research Record*, 1998, 1645: 170-175.
- [6] Davies C, Lingras P. Genetic algorithms for rerouting shortest paths in dynamic and stochastic networks[J]. *European Journal of Operational Research*, 2003, 144(1): 27-38.
- [7] Narath B, Ali G Q, Eiichi T. The trade-off between fixed vehicle costs and time-dependent arrival penalties in a routing problem transportation[J]. *Research Part E*, 2014, 62: 1-22.
- [8] Sandeep K, Diwakar P. Fuzzy programming approach to solve multi-objective transportation problem[J]. *Advances in intelligent and Soft Computer*, 2012, 130: 525-533.
- [9] Tan G Z, Gao W. Shortest path algorithm in time-dependent networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2002, 25(2): 165-172. (谭国真, 高文. 时间依赖的网络中最小时间路径算法[J]. 计算机学报, 2002, 25(2): 165-172.)
- [10] Li N, Zou T, Sun D B. Particle swarm optimization for vehicle routing problem with time windows[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2004, 24(4): 130-135. (李宁, 邹彤, 孙德宝. 带时间窗车辆路径问题的粒子群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(4): 130-135.)
- [11] Sheng L J, Zhou X Z. Vehicle routing problem optimization with time windows[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2007, 28(4): 64-67. (盛丽俊, 周溪召. 带有时间窗的车辆路径问题优化[J]. 上海海事大学学报, 2007, 28(4): 64-67.)
- [12] Wang L F, Song J S, Wang Z Y, et al. Vehicle routing optimization with time windows in battlefield resources distribution[J]. *Systems*

- Engineering and Electronics*, 2013, 35(4): 771 - 776. (王连锋, 宋建社, 王正元, 等. 带硬时间窗的战场物资配送车辆路径优化[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 771 - 776.)
- [13] Zhao W F, Zhao W C, Han Q L, et al. Application of improved NSGA-II in the transportation problem about the supply of equipment[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2013, 32(10): 33 - 36. (赵文飞, 赵文昌, 韩庆龙, 等. 改进 NSGA-II 算法在装备保障运输问题中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(10): 33 - 36.)
- [14] Zitzler E, Thiele L. Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach[J]. *IEEE Trans. on Evolutionary Computer*, 1999, 3(4): 257 - 271.

作者简介:

赵文飞(1986 -), 男, 讲师, 主要研究方向为智能算法、组合最优化。

E-mail: zhaowenfei1986@126.com

周 刚(1975 -), 男, 副教授, 主要研究方向为数据挖掘、机器学习。

E-mail: Zhg_3019@163.com

杨树杰(1970 -), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为脉冲泛函微分方程稳定性研究。

E-mail: yangshujie@163.com

董 超(1988 -), 男, 讲师, 主要研究方向为模式识别、图像处理。

E-mail: 117097248@qq.com

带时间窗军事物资配送问题的NSGA-II 算法



作者：[赵文飞](#)，[周刚](#)，[杨树杰](#)，[董超](#)，[ZHAO Wen-fei](#)，[ZHOU Gang](#)，[YANG Shu-jie](#)，[DONG Chao](#)
作者单位：[海军航空工程学院基础部, 山东烟台, 264001](#)
刊名：[系统工程与电子技术](#)
英文刊名：[Systems Engineering and Electronics](#)
年，卷(期)：2015, 37 (11)

引用本文格式：[赵文飞](#). [周刚](#). [杨树杰](#). [董超](#). [ZHAO Wen-fei](#). [ZHOU Gang](#). [YANG Shu-jie](#). [DONG Chao](#) [带时间窗军事物资配送问题的NSGA-II 算法](#) [期刊论文] - [系统工程与电子技术](#) 2015 (11)