

doi: 10.7690/bgzd.2013.10.009

改进 NSGA-II 算法在装备保障运输问题中的应用

赵文飞¹, 赵文昌², 韩庆龙¹, 孙慧静¹

(1. 海军航空工程学院基础部, 山东 烟台 264001; 2. 北方机器有限责任公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161000)

摘要: 通过对战时装备保障运输场景的分析, 建立了以运输距离、费用和风险系数为目标的多目标路径优化模型。将多目标遗传算法 NSGA-II 用于该模型求解, 对传统的 NSGA-II 算法进行改进, 在进化中增加精英保留策略和小生境密度, 克服了求解多目标优化过程易陷入局部最优的问题。仿真实验结果表明: 利用改进的 NSGA-II 算法求解多目标路径优化问题, 决策者能够有效地获得最优的运输方案以及最优的备用运输路径。

关键词: 装备保障; 多目标; 模型; NSGA-II 算法

中图分类号: TJ812 **文献标志码:** A

Application of Improved NSGA-II in Equipment Supply Transportation

Zhao Wenfei¹, Zhao Wenchang², Han Qinglong¹, Sun Huijing¹

(1. Department of Basic, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. North Machinery Co., Ltd., Qiqihaer 161000, China)

Abstract: By analyzing the transportation problem about the supply of wartime equipment, builds a multi-objective model of vehicle routing problem including travel distance, cost and risk indexes for targets. Genetic algorithm NSGA-II is applied into solve this model, and improved by introducing with elitism strategy and niche density, which are inspired to accelerate the convergence without leading to local optimization. Finally, the validity of the model and the algorithm are proven by analyzing an example, and an effective solution for the transportation problem about the supply of wartime equipment is provided.

Key words: equipment support; multi-objective; model; NSGA-II algorithm

0 引言

近几年, 应急物流运输管理的相关问题已经成为学界的研究热潮, 各国学者就有关物流系统优化的研究发表了大量文献。其中文献[1]分别从应急物流的问题描述、理论界定、模型构建及算法设计等方面进行了综述。作为应急物流的一个重要应用, 到目前为止, 对军事应急物流的研究文献还相对匮乏。在战争中, 装备保障的运输方案选择是影响整个战争结局的一个重要因素。与普通应急物流运输问题相比, 战时装备保障的运输问题不仅仅以运输费用研究为重点, 而且还会考虑运输的时间以及运输过程中的安全性等参数。目前, 我军装备保障的运输方式是以长线运输、整体搬运为主, 这种搬运方式不仅效率低下并且容易遭受攻击。因此, 战时装备保障的应急运输实际上是一个多目标的路径优化问题, 如何在复杂的交通网络中寻找满足成本、时间和安全性能需求的最优路径, 是保障军事行动得以全面开展的基础和前提条件。

多目标运输问题是运输问题的一个经典扩展, 有大量文献对它进行研究。文献[2]提出了具有模糊

信息的多目标运输问题的求解, 不适用于解决含有时间、费用和安全性等目标的运输问题; 文献[3]给出了3种利用模糊规划的方法求解多目标的运输问题; 文献[4]建立了以时间和安全性双目标装备保障运输问题模型, 但它将多目标转化为单目标进行求解。笔者以战时装备保障的运输问题为背景, 建立了以时间、费用和安全性为目标的运输规划模型, 并利用改进的 NSGA-II 算法对该模型进行求解^[5]。

1 问题的描述及数学模型

1.1 问题描述

为了简化问题, 根据后勤装备物资调配的实际需求, 笔者将战时装备物资调配和运输问题抽象为从 m 个基地向某阵地运送装备物资, 即模拟为一个“多对一”的运输网络模型。在该模型中, 把每一个基地虚拟成为模型中的源点, 由于装备保障涉及多种物资和多种运输方式, 在不违背实际背景的前提下, 把每个源点按照不同的运输方式虚拟为不同的源点, 即如果源点有 k 多种运输方式, 把源点抽象成 k 个源点, 每个源点只有一种运输方式, 源点

收稿日期: 2013-05-24; 修回日期: 2013-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(61205206)

作者简介: 赵文飞(1986—), 男, 重庆人, 硕士研究生, 从事图论、复杂网络、组合最优化研究。

之间互相独立；阵地作为模型中的汇点，由源点、汇点及道路运输网络构成了一个无向网络 $G=(V, A, D, W, Q, C)$ ，如图 1。

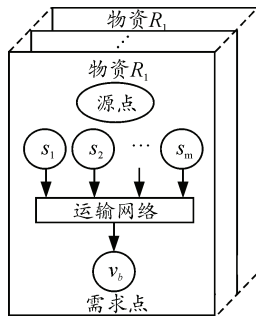


图 1 装备物资调配网络

1.2 模型建立

在装备物资运输网络 $G=(V, A, D, W, Q, C)$ 中， V 表示网络节点集：

$$V = \{s_1, s_2, \dots, s_m, v_1, v_2, \dots, v_n, v_b\}$$

其中： $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 表示运输网络中的源点； v_b 为汇点； $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为道路运输节点。 $A = \{e_{ij} \in V \times V\}$ ，表示网络的弧集。 D, W, Q 和 C 为网络 G 弧集 A 上的非负权函数集。

$D = \{d_{ij} | (v_i, v_j) \in A\}$ ， d_{ij} 表示从节点 v_i 出发经弧 (v_i, v_j) 到达节点 v_j 的单位运输时间；

$W = \{w_{ij} | (v_i, v_j) \in A\}$ ， w_{ij} 表示从节点 v_i 出发经弧 (v_i, v_j) 到达节点 v_j 的单位运输时间和费用；

$Q = \{q_{ij} | (v_i, v_j) \in A\}$ ， q_{ij} 表示弧 $e_{ij} = (v_i, v_j)$ 上的安全性 ($0 \leq q_{ij} \leq 1$)， q_{ij} 越大表示弧 e_{ij} 被攻击的可能性越大，越不安全，反之则越安全；

$C = \{c_{ij} | (v_i, v_j) \in A\}$ ，在装备物资运输网络中，将装备物资的运输重量作为流量，因此还需考虑弧上的容量限制问题，这里设 c_{ij} 为 $e_{ij} = (v_i, v_j)$ 弧所能承受的最大容量。

该模型中所涉及的其他变量定义如下：

S 表示所有源点的集合， $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 每一个源点只有一种运输方式； B 表示需求点 v_b ； \mathfrak{R} 表示物资种类的集合， $\mathfrak{R} = \{R_1, R_2, \dots, R_l\}$ ； $x_{ij}^{k_a}$ 表示第 a 个源点发出的物资 R_k 经过弧 (v_i, v_j) 的次数； $d_{ij}^{k_a}$ 表示第 a 个源点发出的物资 R_k 经过弧 (v_i, v_j) 的运输时间； $f_0^{k_a}$ 表示第 a 个源点发出的物资 R_k 经过弧

(v_i, v_j) 的流量； $w_{ij}^{k_a}$ 表示第 a 个源点发出的物资 R_k 经过弧 (v_i, v_j) 上的单位流量费用； $c_{ij}^{k_a}$ 表示第 a 个源点发出的物资 R_k 在弧 (v_i, v_j) 上的最大容量； $q_{ij}^{k_a}$ 表示第 a 个源点发出的物资 R_k 经过弧 (v_i, v_j) 时单位流量的安全性； $f_0^{k_a}$ 表示第 a 个源点发出物资 R_k 的流值； M 表示需求点的物资总量， $M = \{m_1, m_2, \dots, m_l\}$ ，其中 m_k 表示物资 R_k 的需求数量。

结合实际需求，为了建立装备物资调配的多目标优化模型，做以下基本假设：

- 1) 网络中所有源点每种物资的数量总和大于需求点的物资需求量；
- 2) 网络中道路相通的节点之间运输方式的时间、费用 and 安全性不同；
- 3) 网络 G 中弧上所有的权值函数以及所有节点的位置都是不变的。

基于上述假设，对任意一种物资 $R_k (\forall R_k \in \mathfrak{R})$ ，该物资的目标函数如下。

运输时间最小的目标函数：

$$\min \sum_{a \in S} \sum_{(v_i, v_j) \in A} d_{ij}^{k_a} x_{ij}^{k_a} \tag{1}$$

运输费用最小的目标函数：

$$\min \sum_{a \in S} \sum_{(v_i, v_j) \in A} w_{ij}^{k_a} f_{ij}^{k_a} \tag{2}$$

运输风险最小的目标函数：

$$\min \sum_{a \in S} \left(1 - \prod_{(v_i, v_j) \in A} (1 - q_{ij}^{k_a} x_{ij}^{k_a}) \right) \tag{3}$$

模型中的约束条件如下。

运输过程中可行路径的约束条件：

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

运输过程中可行流的约束条件：

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

运输过程中汇点需求量的约束条件：

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

运输过程中弧上的容量约束条件：

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

网络中弧上的权值非负约束条件：

$$x_{ij}^{k_a} = 0 \text{ 或 } 1, d_{ij}^{k_a} \geq 0, w_{ij}^{k_a} \geq 0, q_{ij}^{k_a} \geq 0, \forall (v_i, v_j) \in A$$

2 算法设计

针对多目标优化问题目标之间的不可公度性和目标产生的矛盾性^[6]，结合问题实际，笔者在 NSGA-II 算法的基础上进行改进，对第 1 节建立的模型进行求解。

1) 编码方式。

对于遗传算法来说，可行解是由个体来表示的，因此个体的编码方式对于问题的求解具有很大的影响。在路径优化问题中，常用的染色体编码方式有二进制编码和数值编码 2 种。结合模型实际，笔者采用数值编码方式，由于模型中个体表示的是一条运输路径，因此个体编码中的数值表示运输路径经过的节点。

2) 种群初始化。

因为多目标路径寻优主要考虑的是使各个子目标尽可能的小，故在考虑初始种群选取时，把关于各个子目标的较优的个体放入交配池，使得初始化种群得到改善。因此利用最短路算法分别求出网路中每一种物资运输时间最短、费用最小和风险最低的前 N 条路径作为初始种群。

3) 确定适应度函数。

在 NSGA-II 算法中，主要是根据非支配序和虚拟适应度函数对个体进行选择。其中非支配序是由非支配解^[7]产生的。如果个体 X 和 Y 满足以下 2 个等式：

$$f_i(X) < f_i(Y), \text{ 对于某些 } i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

$$f_j(X) \leq f_j(Y), \text{ 对于所有其他 } j \neq i. \quad (5)$$

则称个体 X 非支配于 Y ，种群中的个体按照支配关系进行分级，在 NSGA-II 算法中，每个个体 X 都设有参数 n_X 和 H_X ， n_X 为种群中支配个体 X 的个体数量， H_X 为被个体 X 所支配个体的集合。首先，利用支配解的定义找到种群中所有参数 $n_X=0$ 的个体，将它们存入集合 F_1 ，并赋予该集合内每个个体的非支配序 $X_{i_{\text{rank}}} = 1$ ；对于集合 F_1 中的每个个体 X ，考察 X 所支配的个体集 H_X ，将集合 H_X 中的个体 Y 的参数 n_Y 减去 1，若 $n_Y-1=0$ ，则将个体 Y 存入集合 F_2 ，并赋予该集合内每个个体的非支配序 $Y_{i_{\text{rank}}} = 2$ ；然后在集合 F_2 中重复上述过程，直至种群中所有个体都赋有非支配序为止。

种群中的个体按照非支配序进行优劣分级，而非支配序值相同的个体，则需要靠虚拟适应度来进

行排序。虚拟适应度 i_d 指种群中个体与同等级之间的小生境密度(即个体与个体之间的拥挤距离)。由于文中建立的装备物资调配模型是一个多对一的运输网络，为了保持种群个体的多样性，把由同一个源点出发的路径划分为一个区域，在考虑种群中每个个体的小生境密度时，只需考虑与其在同一个等级和区域内个体之间的小生境密度。设 X 为 F_i 中的个体， $V(X)$ 表示个体 X 中的所有节点的集合， $A(X)$ 为个体 X 中的所有弧的集合， F_j 为与个体 X 在等级 F_i 中相同的区域。在等级 F_i 中个体 X 的虚拟适应度定义为

$$i_d = \sum_{Y \in F_j} \left(\frac{|V(X) \cap V(Y)|}{|V(X) \cup V(Y)|} + \frac{|A(X) \cap A(Y)|}{|A(X) \cup A(Y)|} \right)$$

其中 $|A|$ 表示集合 A 的势。不难看出，虚拟适应度 i_d 高的个体，表明该个体周围比较拥挤，反之说明该个体周围比较稀疏。

4) 选择策略。

种群中的个体经过非支配序分级和虚拟适应度的计算，每个个体 X 都得到 2 个属性：非支配序 i_{rank} 和小生境密度 i_d 。为了选择较优的个体，定义偏序关系 \succ 如下：

对种群中的个体 X 和 Y ，当满足条件 $X_{i_{\text{rank}}} < Y_{i_{\text{rank}}}$ ，或者满足 $X_{i_{\text{rank}}} = Y_{i_{\text{rank}}}$ 且 $X_{i_d} < Y_{i_d}$ 时，定义 $X \succ Y$ 。也就是说，如果 2 个个体的非支配排序不同时，非支配序较小的个体越优秀；如果 2 个个体在同一等级，虚拟适应度较小的个体越优秀，算法在做个体选择时，正是以偏序关系为依据。

5) 算法执行流程。

为了保留优良的个体，本算法主要采用精英保留策略的思想，该思想主要体现在以下 2 点：

① 首先，父代 $Q(t)$ 和子代 $P(t)$ 合成一个种群 $\Pi(t) = Q(t) \cup P(t)$ ，并放入进化池中，种群 $\Pi(t)$ 的个体数成为 $2N$ ；其次，利用偏序关系对种群 $\Pi(t)$ 中的个体进行排序，依据等级的高低逐一选取个体，直至个体总数达到 N ，以此形成新一轮的父代种群；然后再进行选择、交叉和变异，形成新的子代种群。

② 为了防止在进化过程中优良个体的丢失，将每代的最优等级中的非支配解集 ($i_{\text{rank}}=1$ 的等级) F_{1g} 合并为一个集合 $\Omega = \bigcup_{g=1}^{\max \text{ gen}} F_{1g}$ ， $\max \text{ gen}$ 为遗传

算法的迭代次数，然后求出 Ω 中所有的非支配解集，作为最后的计算结果。算法的具体流程如图 2。

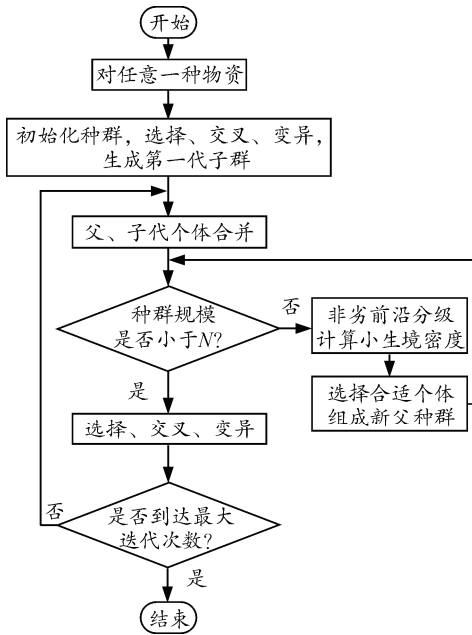


图 2 改进的 NSGA-II 算法流程

续表 2

弧	种类					
	运输距离/km	运输费用/元	风险系数	容量上限/t		
(5,11)	290	2 302	2 102	0.016	0.036	90 100
(6,8)	448	4 905	4 005	0.023	0.033	90 90
(6,9)	305	2 576	2 500	0.026	0.036	100 90
(6,11)	283	2 209	1 100	0.014	0.014	90 100
(7,10)	236	2 209	2 111	0.024	0.034	100 90
(7,12)	342	4 209	4 200	0.094	0.054	90 90
(7,13)	280	3 209	3 000	0.014	0.024	90 100
(9,11)	350	2 765	2 000	0.011	0.023	90 90
(8,11)	312	2 782	2 700	0.012	0.022	100 90
(8,14)	380	3 682	3 600	0.007	0.027	90 100
(9,11)	250	2 235	2 000	0.023	0.043	90 90
(9,12)	150	1 210	5 210	0.016	0.076	90 80
(10,12)	230	2 102	2 000	0.045	0.045	100 90
(10,13)	315	3 576	3 000	0.004	0.014	90 90
(11,12)	400	4 347	4 311	0.005	0.025	90 100
(11,14)	289	2 690	1 600	0.004	0.011	90 90
(11,15)	100	2 280	2 380	0.009	0.019	100 90
(12,14)	130	1 280	2 280	0.009	0.019	90 90
(12,13)	280	2 774	5 700	0.011	0.061	90 100
(12,15)	530	5 824	5 800	0.110	0.310	90 90
(13,15)	160	1 980	2 180	0.011	0.041	100 90
(14,15)	500	4 023	4 000	0.008	0.009	90 85

根据第 1 节的建模思路, 3 个基地为运输网络中的源点, 飞行团为汇点, 经 Matlab 软件编程计算, 得到运输物资 1 和物资 2 的最优路径, 如图 3 所示。

图 3 给出了物资 1 和物资 2 的最优运输路径, 下面给出物资 1、物资 2 的最优运输路径和备用路径以及其仿真实验的相关参数, 见表 3。

3 仿真实验

为验证笔者所提出的装备保障运输网络模型及其求解算法, 以海防某飞行团装备弹药调配为背景, 根据第 2 节设计的算法使用 Matlab 软件编程对其仿真实验。

假设该飞行团需要 2 种装备物资, 有 3 个基地向其提供运输保障。各个基地物资的存储量以及飞行团对物资的需求量如表 1 所示。

表 1 装备物资数量

装备物资	基地 1	基地 2	基地 3	飞行团需求量
物资 1	100	120	200	80
物资 2	120	110	100	80

各基地与飞行团以及运输途径中的各节点虚拟为 15 个网络节点, 节点与节点之间是相邻表明在运输网络中这 2 个节点是相通的, 网络图中的参数如表 2 所示。

表 2 物资 1 和物资 2 在网络 D 中的权值参数

弧	种类					
	运输距离/km	运输费用/元	风险系数	容量上限/t		
(1,5)	298	3 000	3 000	0.080	0.080	80 60
(1,6)	245	2 780	3 780	0.072	0.074	70 80
(1,8)	424	8 680	8 680	0.130	0.230	100 90
(2,4)	401	8 221	8 000	0.096	0.090	85 90
(2,7)	265	2 032	2 032	0.043	0.043	80 80
(2,9)	578	9 032	5 032	0.220	0.220	90 90
(2,10)	231	2 000	5 010	0.013	0.163	90 90
(3,4)	401	4 221	4 221	0.076	0.076	90 90
(3,5)	287	1 593	1 593	0.014	0.014	80 80
(3,6)	180	1 313	1 313	0.015	0.015	90 90
(3,9)	363	3 200	4 200	0.097	0.095	80 90
(4,9)	250	3 200	3 100	0.012	0.022	90 90
(4,10)	117	1 580	2 580	0.032	0.042	90 80
(5,6)	268	2 209	2 200	0.012	0.012	90 90
(5,8)	202	1 689	1 500	0.008	0.008	100 90

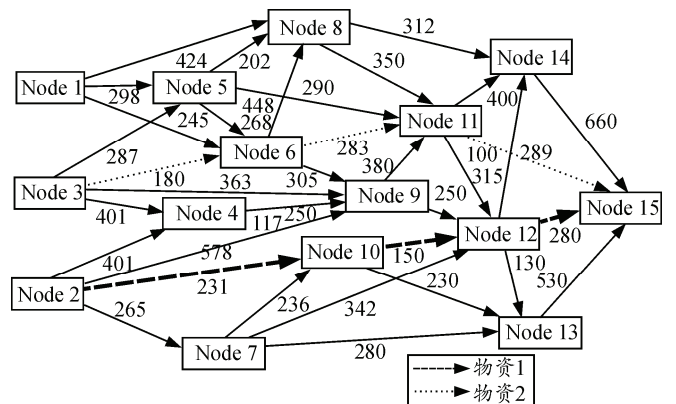


图 3 弹药物资运输网络

从表 3 中, 物资 1 和物资 2 的最优运输路径分别为 2→10→12→15 和 3→6→11→15。但从仿真结果中各路径的参数可以得出物资 1 和物资 2 的绝对最优路径是不存在的, 而通过文中采用的模型和算法找到了相对最优的运输路径, 在各目标函数权重同等重要的情况下, 物资 1 和物资 2 的最优路径中至少有 2 个目标函数值优于备用运输路径。类似地, 如果决策者要对这 3 个目标函数赋予不同的权重, 也可利用文中的算法解决该问题。事实上, 多目标优化问题的绝对最优解往往是不存在的, 而该仿真结果正好证实了多目标优化问题的这一特性。