doi: 10.7690/bgzdh.2014.04.010

基于改进蚁群算法的多约束供应保障网络路径优化

王涌鑫，王希武，王寅龙
（军械工程学院信息工程系，石家庄 050003）

摘要：针对网络优化领域中的多约束网络路径优化问题，以战时供应保障路径优化问题为研究对象，建立一种保障代价最小的路径优化模型。分析保障路径优化中存在多约束限制问题的特点，在基本蚁群算法的基础上引入蚂蚁相遇策略，融合了多约束条件对保障路径优化的影响，通过正、逆反馈同时作用，对信息素更新策略进行改进，并对搜索最优保障路径实例的仿真。仿真结果显示：改进蚁群算法平均执行时间较基本蚁群算法提高了 40.1%，说明改进的蚁群算法能在更短的时间内找到最优解，而且在避免陷入局部最优解方面具有更好的效果。

关键词：蚁群算法；多约束；保障代价；路径优化
中图分类号：TP393　　**文献标志码**：A

Path Optimization for Multi-Constrained Supply Support Network Based on Improved Ant Colony Algorithm

Wang Yongxin, Wang Xiwu, Wang Yinlong
(*Department of Information Engineering*, *Ordnance Engineering College*, *Shijiazhuang* 050003, *China*)

Abstract: Taking the problem of supply support path optimization in wartime as the research object and aiming at the characteristics of multi-constraint limited problem in support path optimization, the optimization model of support path with supply minimum cost was established. Based on general ant colony algorithm, ant encounter strategy is introduced into this algorithm which the positive and negative feedback simultaneously, and pheromone updating policy is improved. The simulation result shows that the improved ant colony algorithm the average execution time increase 40.1% than the basic ant colony algorithm. The new algorithm can find the optimal solution in the shortest time, and it is effective on reducing the possibility of falling in local optimum.

Keywords: ant colony algorithm; multi-constraint; support cost; path optimization

0　引言

多约束网络路径优化问题是网络优化领域的基本问题之一，和传统的最短路径问题略有不同，通常被看作是最短路径问题的拓展，国内外学者对于此类问题展开了大量研究并应用于许多不同的领域。文献[1]研究了通信网络的路由和最可靠路径问题。文献[2]把随机理论应用于网络优化，研究了期望最短路径问题及最短期望路径问题。文献[3]在路径规划中着重研究道路本身的约束因素，对影响道路指标的因素进行无量纲化。文献[4]在详细分析物流网络传输属性的基础上，并给出约束参数的完整描述，为保障任务规划满足多个约束的可行路径。

战时物资供应保障活动对维系部队战斗力和生存力起到了关键作用，由于战争的突发性和速决性，对供应保障的快速性和可靠性提出了很高的要求[5-6]，保障路径选择的合理与否不仅影响保障代价的大小，还关乎战局的成败；因此，研究战时物资供应保障路径优化问题，针对特定的保障目标进行模型建立和算法优化，为物资供应保障寻求在满足多个约束参数条件下的可行路径，并根据任务需要制定最优的保障路径方案，具有非常重要的军事应用价值。

1　多约束供应保障网络路径优化模型

确定保障路径的约束参数是供应保障网络路径优化问题面临的首要问题，一般来说，保障线路的约束参数主要有道路承重约束、保障时间、保障可靠性和保障费用等[7]。根据约束参数对整个保障网络路径约束特性影响的不同，通常把它们分为以下 4 类：

1) 加性约束，其计算公式为：$W(p)=\sum\limits_{e\in p}W(e)$；

2) 乘性公式，其计算公式为：$W(p)=\prod\limits_{e\in p}W(e)$；

3) 最小约束，其计算公式为：$W(p)=\min\limits_{e\in p}W(e)$；

4) 最大约束，其计算公式为：$W(p)=\max\limits_{e\in p}W(e)$。

其中：$W(e)$表示 2 个节点之间边的权值约束；$W(p)$表

收稿日期：2013-11-12；修回日期：2013-12-25
基金项目：国家自然科学基金(61271152)
作者简介：王涌鑫(1988—)，男，吉林人，在读硕士，从事军事信息系统、指挥自动化研究。

示保障路径的权值约束。针对不同性质的约束参数的优化方法也是不同的，道路承重约束属于最小约束，对于此类约束一般先对网络拓扑进行剪枝工作，剪除不满足约束的网络单元，转化为一般的无资源约束的最短路径问题。保障可靠性属于乘性约束参数，此类约束可以通过取自然对数转化为加性约束参数进行研究。而保障时间、保障费用都属于加性约束参数。因此，笔者主要研究基于可加性参数约束的网络路径优化问题。

将供应保障网络抽象为无向赋权图 $G=(V,E)$，其中 $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$ 是网络 G 的节点集，代表了供应保障网络中的各个交叉路口(包括供应点、需求点)，$E=\{e_1,e_2,\cdots,e_n\}$ 是网络 G 的边集，代表了两节点之间的道路，$W=\{w_1,w_2,\cdots,w_n\}$ 表示网络边上约束参数的集合，$L=\{l_1,l_2,\cdots,l_n\}$ 表示参数约束；所以，对于任意的可加性约束参数 $w\in W$，基于路径 p 的多约束网络路径参数优化的目标函数为：

$$w(p)=\min\sum_{e\in p}w(e) \tag{1}$$

满足 $w_i(p)=\sum_{e\in p}w_i(e)\leqslant l_i$，其中 l_i 为具有可加性的约束参数。

接下来笔者做如下定义：

定义保障代价由保障时间代价、保障危险性代价、保障费用代价 3 部分组成。

在满足式 (1) 的前提下，笔者把从节点 i 到节点 j 进行供应保障活动所需的保障代价表示为：

$$E_{i,j}=\omega_1\times\varepsilon_1\times T_{i,j}+\omega_2\times\varepsilon_2\times(1-R_{i,j})+\omega_3\times C_{i,j} \tag{2}$$

其中：$\omega_1,\omega_2,\omega_3$ 分别为时间权重、危险性权重和保障费用权重；ε_1 表示单位时间内物资的损耗价值；ε_2 表示危险性对应的物资损失价值；$T_{i,j},R_{i,j},C_{i,j}$ 分别表示节点 i,j 之间的保障时间、保障可靠性和保障费用。此时，多约束条件下的最优路径规划问题已转化为传统的最短路径求解问题。

2　改进蚁群算法

根据复杂网络理论，结合维修保障力量体系的具体情况，将维修保障力量实体(维修单元、维修指挥机构、维修资源仓库等)抽象为节点，实体间的关系抽象为边，建立维修保障力量网络。根据信息战争对保障组织互联互通(边的方向性)以及快速实施保障(边的时间限制性)的要求，笔者重点研究无向加权复杂网络。

在算法实现过程中，每次遍历所用的蚂蚁数目是一定的，通过正、逆反馈能相遇的蚂蚁的数量也是一定的。执行过程中，为了使逆反馈策略显现出来，新算法中加入了一个阈值 ε，如果在某次循环时，相遇蚂蚁的数量没有超过该阈值，则整个蚁群的搜索过程继续进行，直到所有的蚂蚁都完成自己的路径为止，这时，信息素的更新过程和传统蚁群算法一样；如果在某次循环时，能相遇蚂蚁的数量超过了该阈值，则信息素就更新在所有的相遇蚂蚁产生的新的路径上。

基于上述改进策略，提出的改进蚁群算法流程图如图 1 所示。

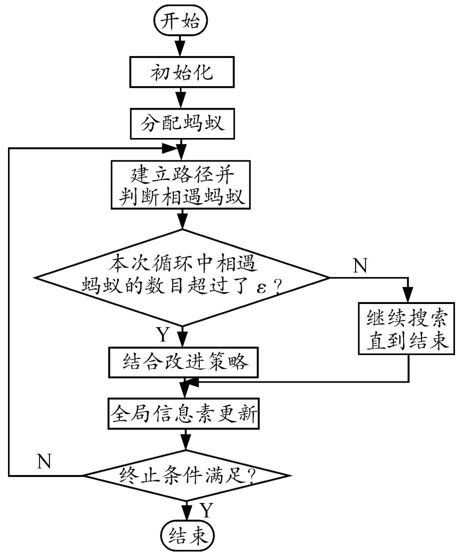

图 1　改进蚁群算法流程

基于改进蚁群算法的多约束供应保障路径优化算法具体实现过程如下：

Step1　参数初始化：在每次循环之前，所有参数都应当被初始化。α 是残留信息的相对重要程度，β 是期望值的相对重要程度，ρ 是残留信息的保留部分，Q 是单位信息素浓度的一个常数，m 是蚂蚁数量，NC 是最大迭代次数。

Step2　约束消除转换：对于道路承重约束，利用剪枝操作，消除不满足约束的路径；对于保障可靠性约束，通过取自然对数的负数，将可乘性约束转换为可加性约束。

Step3　蚂蚁分配：在该次循环中将蚁群中的 m 只蚂蚁根据随机选择规则初始化到供应点和需求点 2 个节点。

Step4　路径建立：根据随机选择规则，每只蚂蚁以一定的概率选择一个要访问的保障点(正、逆反馈同时进行搜索)，建立自己的搜索路径。假如 $j\in N_i^k$，则 t 时刻位于节点 i 的蚂蚁 k 选择城市 j 为

下一访问节点的概率有

$$p_{ij}^{k}(t)=\frac{\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}}{\sum\limits_{j\in N_i^k}\tau_{ij}^{\alpha}(t)\eta_{ij}^{\beta}} \tag{3}$$

式中：α 是残留信息的相对重要程度；β 是期望值的相对重要程度；N_j^k 是蚂蚁 k 所有可能访问的目标节点。

Step5 相遇蚂蚁判断：在每次遍历时，当搜索过程进行到一半时，对搜索路径上所有蚂蚁所经过的路径进行检查，如果有任何 2 只蚂蚁已经访问的节点数之和大于或者等于节点总数，就认为这 2 只蚂蚁在搜索路径过程中遇到过，这 2 只蚂蚁就被记作相遇蚂蚁，它们已搜索的路径取并就形成了一条新的搜索路径。

Step6 阈值判断：本次循环中，如果相遇蚂蚁的数目没有超过阈值 ε，则算法中的蚂蚁继续进行搜索，直到所有的蚂蚁都建立了自己的路径为止，这时信息素的更新策略和传统蚁群算法一样；如果在循环中相遇蚂蚁的总数目超过了阈值 ε，则信息素更新在建立的新路径上，本次搜索过程也将结束。

Step7 信息素更新：根据阈值判断结果进行相应的信息素更新，有

$$\tau_{ij}(t+n)=\rho\tau_{ij}(t)+\sum_{k=1}^{m}\Delta\tau_{ij}^{k} \tag{4}$$

式中：ρ 是残留信息的保留部分；$\Delta\tau_{ij}^{k}$ 是蚂蚁 k 在时间段 t 到 $t+n$ 内的访问过程中，在 i 到 j 的路径上留下的残留信息素浓度。并根据式 (2) 计算路径的保障代价。

在算法每次循环时，所有路径上信息素浓度都被限制在 $[\tau_{\min},\tau_{\max}]$ 的范围内，超出这个范围的值被强制设为 $\tau_{\min}$ 或 $\tau_{\max}$，从而有效地避免了算法过早收敛于非最优解，有

$$\tau_{ij}=\begin{cases}\tau_{\min}, & \text{if} \quad \tau_{ij}\leqslant\tau_{\min}\\ \tau_{\max}, & \text{if} \quad \tau_{ij}\leqslant\tau_{\max}\end{cases} \tag{5}$$

Step8 输出满足约束条件的保障代价最小的路径及最佳结果。

3　仿真实验

战时提取某道路信息构建供应保障网络如图 2 所示。根据上级下达的保障命令，建立从供应点 v1 到需求点 v18 的最优保障路径。网络边上的数据代表约束参数，即 W=(S, T, R, C)，S 表示道路的最大承重，T 表示保障时间，R 表示保障可靠性，C 表示保障费用，约束 L=(10, 40, 0.86, inf)，即任务要求物资重量为 10，保障时间不超过 40，运输可靠性不小于 86%，而运输费用则不受限制，专家给出条件为：$\omega_1=0.4,\omega_2=0.4,\omega_3=0.2,\varepsilon_1=9,\varepsilon_2=1\,000$，求满足约束条件的总保障代价最小的保障路径。

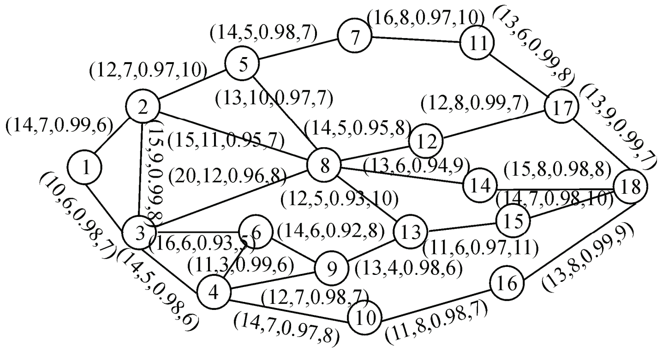

图 2　供应保障网络

笔者选取基本蚁群算法作为参照，实验环境选择 Matlab7.1 作为仿真平台，实验 PC 配置为 CPU：Intel Core Q8400，RAM：2 GB。经多次仿真实验测试，对基本蚁群算法和改进蚁群算法的参数设置为：

$\alpha=1$，$\beta=5$，$\rho=0.8$，$Q=100$，$m=20$，$NC=200$，$\tau_0=1$，$\tau_{\min}=0.000\,01$，$\tau_{\max}=20$，$\varepsilon=1$。

算法仿真结果见表 1 和图 3。

表 1　2 种算法运行结果对比

指标	改进蚁群算法	基本蚁群算法
算法总执行时间/s	7.274	12.116
算法平均执行时间/s	0.036 3	0.060 6
最小保障代价	174.64	174.64
平均保障代价	175.91	187.06

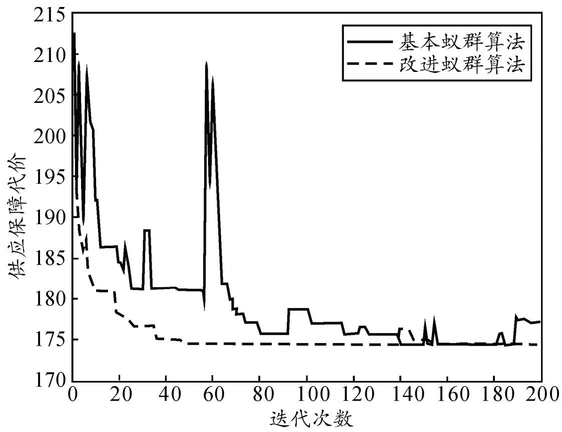

图 3　算法求解所得供应保障代价

从仿真结果来看，2 种算法在最大迭代次数内均找到了最优路径，并且改进蚁群算法找到最优解的效率远远优于基本蚁群算法。

（下转第 46 页）