

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.006

战时通信装备备件配送模型

王路路¹, 时和平¹, 王瑞², 谢俊柯³(1. 西安通信学院通信指挥系, 西安 710106; 2. 海军航空工程学院电子工程系, 山东 青岛 264001;
3. 中国人民解放军 73683 部队 551 分队, 福建 三明 353301)

摘要: 针对战时通信装备备件抢修, 建立了带硬时间窗的战时通信装备备件多目标优化配送数学模型, 并用蚁群算法对问题进行了求解。算法设计中, 为解决模型求解中蚁群算法存在早熟、收敛性差等问题, 引入伪随机规则调整状态转移概率; 利用时变函数更新信息素强度。实验结果表明, 该算法能得到较好的全局最优解, 验证了模型的有效性。

关键词: 通信装备; 多目标; 配送; 蚁群算法**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

Model of Wartime Communications Equipment Spare Part Delivery

Wang Lulu¹, Shi Heping¹, Wang Rui², Xie Junke³(1. Dept. of Communication Command, Xi'an Communications Institute, Xi'an 710106, China;
2. Dept. of Electronic Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;
3. No. 551 Team, No. 73683 Unit of PLA, Sanming 353301, China)

Abstract: Aiming at the communications equipment recovery with hard time windows in wartime, the mathematical model of choosing multi-objective optimization is put forward, and the ant colony algorithm is utilized to solve it. In order to solve premature and bad astringency of ant colony algorithm, the rule of pseudo random is introduced to adjust the state of transferring probability; time-varying function is used to update the information of element. The result of simulation shows that improved ant colony algorithm can obtain the preferable global solving result and the validity of model is validated.

Key words: communications equipment; multi-objective; delivery; ant algorithm

0 引言

战时通信装备备件配送路径优化属于硬时间窗问题, 通信备件需求点需要补充备件的时间不同, 而且备件必须要在规定的时间内送达, 带时间窗的车辆路径问题已经被证明为 NP 难问题。蚁群算法是继精确算法和经典启发式算法以后出现的又一个新的智能启发式算法。因此, 笔者针对传统的蚁群算法存在早熟、收敛性差等问题, 提出一种改进的蚁群算法来求解带硬时间窗的车辆路径优化问题。

1 多目标优化的通信装备备件配送模型

战时多目标优化问题的应用背景有其合理性, 因为传统的单一目标已不足以完整体现实际情况, 如指挥员往往更倾向于寻找合理解而不是针对所有目标的最优解(现实中常常做不到), 因此, 所需寻求的就是一种所谓的非劣解^[1](亦称有效解或 Pareto 最优解)。

多目标路径优化问题是一种特殊的离散线性多目标组合优化难题, 至今尚未得到广泛的研究^[2],

多目标路径优化问题与经典路径优化问题的区别在于: 给定的每条弧上都有一个以上的权重系数, 诸如距离、时间、费用等, 因此导致了问题的困难性和复杂性。

1.1 备件配送模型的研究现状

地方企、事业单位和军队装备部门对资源配送都有一些研究, 但是目标不同。地方企业多以车间作业调度(job shop scheduling)和物流调度研究为主, 目标是寻求时间最短、路程最短或者费用最低的优化方案。文献[3]以装备战斗效能损失最小化为备件配送的目标, 建立了多仓库车辆路径问题(multi-depot vehicle routing problem, MDVRP); 文献[4]以广义费用为目标研究了军事综合运输中方案优化问题。以上研究成果对军事装备资源配送的研究都有借鉴意义, 但是, 战时装备整体战斗力的保持和恢复要求战场抢修能力与资源“适时、适量”配送有效地结合。不同的战场环境、上级意图和作战任务等对维修资源配置和调度的优化目标各异,

收稿日期: 2012-01-22; 修回日期: 2012-02-14

作者简介: 王路路(1984—), 男, 山东人, 硕士生, 助工, 从事通信装备技术保障研究。

且呈现多目标性。因此, 笔者研究维修资源配送以战时维修备件为例, 以抢修效能最大化和安全配送概率最大化建立多目标优化模型。

1.2 战时通信装备备件配送模型的建立

为便于备件配送研究, 笔者结合通信装备维修保障的特点和战备完好性要求, 给出通信装备维修资源调度中抢修效能定义: 损伤通信装备在规定的抢修时间内和一定的维修资源消耗条件下经过抢修, 使战备完好性和基本战斗性能指标恢复的度量。

战时某通信装备备件供应点给多个备件需求点运送通信装备备件, 已知需求点的需求量和需求时间段, 战场态势下各路径安全系数, 通信备件供应点与通信备件需求点、通信备件需求点与通信备件需求点两两间的运输时间、运输距离, 及运输车辆在各需求点的服务时间等条件。备件供应点计划用多台运输车辆从通信装备备件供应点出发, 按顺序到达各备件需求点, 当累积载货量超出单车容量限制或到达时间超出时间窗时, 则该车辆完成运输任务返回供应点。要求为每辆备件运输车辆确定行驶线路, 在满足各备件需求点的硬时间窗约束和车辆容量约束的条件下, 以总体抢修效能和安全配送概率最大为目标建立多目标优化的数学规划模型。

抢修效能模型可以由下式得出。

目标函数:

$$\max \left\{ \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K w_{ij}^1 x_{ijk}, \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K w_{ij}^2 x_{ijk}, \dots, \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^K w_{ij}^L x_{ijk} \right\} \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1, k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = 1, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^n x_{ijk} = 1, i \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^n x_{ijk} = 1, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^n D_i \sum_{j=0}^n x_{ijk} \leq Q \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{i=0}^n x_{ijk} (T_{ij} + T_i + F_i) = T_j, j \in \{1, 2, \dots, n\} \quad (7)$$

$$ET_i \leq T_i \leq LT_i, i \in n \quad (8)$$

$$T_0 = F_i = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=i+1}^n p_{ij} = 1 \quad (10)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 从 } i \text{ 到 } j \text{ 时, } i, j \in \{1, 2, \dots, n\} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

上述各式中, n 为需求点总数; k 为运输车辆总数; T_{ij} 为从需求点 i 到需求点 j 所需的时间; D_i 为需求点 i 的需求量; F_i 为运输车辆在需求点 i 的服务(装卸搬运)时间; Q 为运输车辆的容量; T_i 表示运输车辆到达需求点 i 的时刻; ET_i 表示需求点 i 最早允许开始服务的时刻; LT_i 表示需求点 i 最晚必须完成服务的时刻。为方便研究, 假设所有车辆容量相同, 运输车辆在各需求点服务时间为零。目标函数表示抢修效能和安全送达概率最大, 约束条件式 (2) 表示运输车辆从供应点出发; 式 (3) 表示运输车辆完成运输任务后回到供应点; 式 (4)、式 (5) 表示每个需求点通信备件只由 1 辆运输车辆服务且所有需求点都得到服务; 式 (6) 表示运输车辆 k 装载的备件总量不超过该车辆的装载容量; 式 (7) 表示运输车辆到达需求点 j 的时刻为运输车辆到达需求点 i 的时刻、在需求点 i 的服务时间和通过路段 (i, j) 的运输时间的总和; 式 (8) 表示运输车辆必须在规定的时间内到达需求点; 式 (9) 表示运输车辆出发时刻为零, 在各需求点服务时间为零; 式 (10) 表示道路网络拓扑结构图是无向带权图, 且任意两点路径安全系数做归一化处理。

因为文中以抢修效能和安全配送概率为例研究多目标优化, 所以 L 取值为 $\{1, 2\}$ 。其中,

$$w_i^1 = E_i \cdot U(T_i) \quad (12)$$

$$E_i = \lambda_i R_i = \sum_{p=1}^4 \beta_p \gamma_p \cdot M \cdot P \cdot D \quad (13)$$

$$U(T_i) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t_{ik} \leq LT_i \\ (T_i - ET_i) / (LT_i - T_i), & ET_i \leq T_i \leq LT_i \\ 0, & LT_i \leq T_i \end{cases} \quad (14)$$

β, γ, M, P, D 详细参数定义和计算方法可参考文献 [4] 和文献 [5], 为了简化问题, 笔者假设通过抢修装备能使其完成原有作战任务所需要的基本功能即可, 上式可以变化为:

$$w_i^1 = E_i = \lambda_i m_z p_{zz} d_z \quad (15)$$

战场条件下, 后勤保障已成为重点打击对象, 备件成功配送的概率已越来越成为决策者制定资源配置和调度方案所考虑的因素。其求解方法由战场评估系统根据战场态势给出, 在此不做详细介绍。

$$w_i^2 = \varphi_{ij} \quad (16)$$

式中, φ_{ij} 表示 i 需求点到 j 需求点的路径安全系数, 因路网拓扑图是无向带权图, 故 $\varphi_{ij} = \varphi_{ji}$ 。

此处, 笔者主要讨论如何根据抢修效能和安全

配送概率最大选择制定抢修方案，因此对抢修效能和车辆路径安全系数的详细求解过程不做描述，由计算机随机给出。

2 模型求解

2.1 算法思想

多目标最短路的蚁群算法包括 Ant-Cycle、Ant-Density 和 Ant-Quantity 3 种模型，各蚂蚁的 η_{ij} 按概率选取 $1/w_i^r (r=1,2,\dots,L)$ 中之一，若实际问题有偏好结构，可按不同概率在算法中加以体现。算法思想可描述如下：

Begin

初始化；

Loop:

将所有蚂蚁的初始出发点 s 置于当前解集中；

for $k \leftarrow 1$ to m do

if 蚂蚁 k 尚未到达终点 t ，则

begin

按转移概率选择顶点 j ；

移动蚂蚁 k 至顶点 j ；

将顶点 j 置于当前解集；

end；

计算各蚂蚁的 L 个目标函数值；

记录当前的非劣解；

轨迹更新；

若迭代次数未到且退化行为，则转 Loop；

输出非劣解集；

End

当目标个数 $L=1$ 时，上述算法可用来求解标准的最短路问题，尽管从效率和质量上无法与已有的最短路算法相比拟，但毕竟提供了另一种思路和方法，对于一些附带其他条件的最短路问题而言，也许会有一番完全不同的景象，如，通过重复运行，可以找到多条最短路，以及寻找第二、第三……第 K 条最短路的能力，而这一点对复杂战场环境下的维修决策制定具有重要意义。此外，如果将目标改为瓶颈形式，则可将算法修改成用于多目标瓶颈问题的蚁群算法。

2.2 改进蚁群算法

2.2.1 状态转移概率公式的改进

蚁群算法在构造解的过程中，随机选择策略使得算法的进化速度变慢，正反馈原理旨在强化性能较好的解，却容易出现停滞现象^[6]。变量 τ_{ij} 表示学习所得到的经验，而 η_{ij} 由某种启发式算法确定，如

何将二者有效结合是提高蚁群算法收敛性能的关键性问题。基本蚁群算法状态转移概率 p_{ij}^k 表示蚂蚁 k 由城市 i 转移到城市 j 的状态转移概率，公式如下：

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau(i,j)]^\alpha \cdot [\eta(i,j)]^\beta \cdot [\varepsilon(i,j)]^\gamma}{\sum_{p \in \text{allowed}(k)} [\tau(i,p)]^\alpha \cdot [\eta(i,p)]^\beta \cdot [\varepsilon(i,p)]^\gamma}, & j \in \text{allowed}(k) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

位于城市 i 的蚂蚁 k 根据伪随机比例规则选择城市 j 作为下个访问的城市，这个规则由下式给出：

$$j = \begin{cases} \arg \max_{s \in \text{allowed}_k} \{[\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta\}, & \text{若 } q \leq q_0 \\ \text{式(17)}, & \text{否则} \end{cases} \quad (18)$$

其中： q 是均匀分布在区间 $[0,1]$ 中的一个随机变量； $q_0 (0 \leq q_0 \leq 1)$ 是一个参数。蚂蚁选择当前可能的最优移动方式的概率是 q_0 ，这种最优的移动方式是根据信息素的积累量和启发式信息值求出的。同时，蚂蚁以 $1-q_0$ 的概率有偏向性地探索各条边。通过调整参数 q_0 ，可以调节算法对新路径的探索度，从而决定算法是应该集中搜索至今最优路径附近的区域，还是应该探索其他区域。

2.2.2 信息素更新策略的改进

信息素更新策略是蚁群算法的关键步骤之一，信息更新过快将导致算法陷入局部最优甚至停滞，信息更新过慢则收敛速度缓慢，无法搜索到最优路线。这里采用时变函数 $Q(t)=\tanh(t)$ 来代替调整信息素 $\Delta\tau_{ij}^k(t) = \frac{Q}{L_k}$ 中为常数项的信息素强度 Q 。式中：

Q 为信息素强度，在一定程度上影响算法的收敛速度； L_k 为第 k 只蚂蚁在本次循环中所走的路径长度。

3 仿真实验与分析

设有 1 个通信备件供应点和 9 个备件需求点，各需求点的坐标、各路段通过时间、时间窗要求、各点需求量利用文献[6]所给数据，利用计算机随机给出各需求点的抢修效能及各路径安全系数。

各参数设定为 $m=6, \sigma=3, \alpha=1, \beta=3, \rho=0.75, \lambda_1=0.7, \lambda_2=0.3, NC=100, Q=10$ ，采用 Matlab 编程语言对设计的优化算法进行编程，随机运行得到 2 种配送方案如图 1。 $x、y$ 轴表示各点平面直角坐标，其中，第 1 种方案抢修效能等于 0.862，安全配送概率等于 0.516，需要 5 辆运输车；第 2 种方案抢修效能等于 0.708，安全配送概率等于 0.874，需要 6 辆车。与基本蚁群算法所得结果比较可知，使用设计的改进蚁群算法能够取得较好的计算结果，而且针对战场情况，本模型提供了不同优化目标权重下的配送方案。