

基于改进蚁群算法的多时间窗车辆路径问题

朱 杰,张培斯,张询影,余微微

(北京物资学院 信息学院,北京 101149)

摘 要: 物流运输成本在物流总成本中占有很大比重,合理安排车辆路线,满足用户需求对企业有重要意义。车辆路径问题是运筹优化领域的热点研究问题,多时间窗车辆路径问题是对车辆路径问题的扩展。文中以总成本最小为目标,建立了多时间窗车辆路径问题的一般数学模型,针对蚁群算法在求解时容易陷入局部最优解和收敛速度慢的问题,改进转移概率公式,采用邻域搜索策略提高解的质量,借鉴模拟退火算法的思想对信息素进行更新,提高算法的寻优能力,加快收敛速度。实验结果表明,改进后的蚁群算法可以有效求得最优解,降低物流运输成本。相比其他算法,改进后的蚁群算法求解精确度高,收敛速度快,在求解多时间窗车辆路径问题上有着较好的性能。

关键词: 物流运输; 多时间窗; 车辆路径问题; 蚁群算法; 模拟退火

中图分类号: F252; TP18

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2019)01-0102-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2019.01.021

Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows Based on Improved Ant Colony Algorithm

ZHU Jie,ZHANG Pei-si,ZHANG Xun-ying,YU Wei-wei

(School of Information,Beijing Wuzi University,Beijing 101149,China)

Abstract: Logistics transportation costs account for a large proportion of the total cost of logistics. It is of great significance for the enterprise to properly arrange the vehicle route and meet the user's requirements. Vehicle routing problem with multiple time windows (VRPMTW) is the expansion of the vehicle routing problem, which is a hot research issue in the field of optimization. The general mathematical model of VRPMTW is established with a minimum cost. In view of the problem that the ant colony algorithm is easy to fall into the local optimal solution with slow convergence speed when solving, the transfer probability formula is improved and the quality of the solution is enhanced by the neighborhood search strategy. The simulated annealing algorithm is referred to update the pheromone, so as to improve the optimization and speed up the convergence. The experiment shows that the improved ant colony algorithm can obtain the optimal solution effectively and reduce the cost of logistics transportation. Compared with other algorithms, it has high accuracy, fast convergence speed and great performance in solving VRPMTW.

Key words: logistics transportation; multiple time windows; vehicle routing problem; ant colony algorithm; simulated annealing

0 引言

多时间窗车辆路径问题是车辆路径问题^[1]的扩展,它源于现实生活中人们对服务时间的需求。例如某甲要为周边多个用户提供配送服务,假设用户乙在[8:00,10:00]和[12:00,13:00]时间段有空闲时间接受服务,用户丙在[12:00,12:30]和[16:30,17:20]时间段内有空闲时间接受服务,用户丁等也具有多个互不重叠的时间窗;这就需要甲安排合理的路线,在满足用户要求的情况下实现成本最低、路程最短或用车最

少等目标。

从时间窗的数量角度划分,带时间窗的车辆路径问题可分为单时间窗问题和多时间窗问题;目前关于带时间窗的车辆路径问题研究主要集中在单时间窗^[2-4]类型,而多时间窗的车辆路径问题研究文献相对较少。Belhaiza等^[5]提出了变邻域禁忌搜索算法求解最小等待和延误时间的多时间窗车辆路径问题;Beheshti等^[6]设计了协同进化多目标量子遗传算法求解带有优先级顺序的多时间窗车辆路径问题;Favaretto

收稿日期:2018-02-07

修回日期:2018-06-12

网络出版时间:2018-11-15

基金项目:国家自然科学基金(71371033)

作者简介:朱 杰(1960-),男,硕士,教授,研究方向为优化理论与算法、数据仓库和数据挖掘;张培斯(1992-),男,硕士研究生,研究方向为智能物流系统。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20181114.1556.024.html>

等^[7]提出了允许多次访问的多时间窗车辆路径问题; 马华伟等^[8]设计了一种求解允许分割配送的多时间窗车辆路径问题的改进蚁群算法; 黄秋爱等^[9]通过引入最优个体保留机制改进传统的遗传算法, 并设计数学模型进行求解, 验证了算法及其模型的有效性; 朱玲玲等^[10]提出一种协同禁忌优化算法, 通过扫描算法求得初始解, 再设计自适应修改禁忌长度的算法和多个子禁忌算法进行协同优化进行求解; 李珍萍等^[11]运用智能水滴算法对多时间窗车辆路径问题进行了有效探索; 闫芳等^[12]应用粒子群算法, 以总成本最小和满意度最大为目标, 求解了多模糊时间窗车辆路径问题。

蚁群算法^[13]是意大利学者 Dorigo 在 20 世纪 90 年代提出的一种仿生算法, 具有正反馈、分布式计算以及贪婪的启发式搜索等特点, 同时具有较好的耦合性, 易于和其他算法结合, 这些特点为更好地解决组合优化问题提供了可能^[14]。文中以总成本最小为目标, 建立多时间窗车辆路径问题的数学模型, 改进蚁群算法对问题进行求解, 并通过算例验证模型和算法有效性。

1 数学模型

1.1 问题描述

多时间窗车辆路径问题可描述为: 某一个配送中心有 K 辆车, 每辆车的载重量为 Q , 为周边 N 个用户提供配送服务, 每个用户的需求量为 q_i , 每个用户有 W 个互不重叠的时间窗 $[E_i^a, L_i^a]$, 其中 $a = 1, 2, \dots, W$, 每个用户仅且只能被访问一次, 要求制定合理的行车路线, 在用户指定的某个时间段内进行配送等服务。

1.2 模型假设

假设一: 每个用户的需求量不超过车辆最大载重量; 假设二: 用户的时间窗为硬时间窗要求; 假设三: 用户的各个时间窗互不重叠; 假设四: 单车场多需求点的配送模式; 假设五: 各个配送车装载量相同; 假设六: 用户的需求不可分割。

1.3 数学模型

$G = \{V, E\}$ 表示配送网络, $V = \{0, 1, \dots, n\}$, 其中 0 表示配送中心, $A = V \setminus \{0\}$ 表示用户集合, $E = \{(i, j) \mid i, j \in V, i \neq j\}$ 为弧集, $K = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示配送车辆集合; D_{ij} 表示 i, j 两点间的距离, T_{ij} 表示 i, j 两点间的行驶时间, S_i 表示在 i 点的服务时间(卸货、验收、签收等时间), 其中 $S_0 = 0$; Q 表示车辆的最大载重量; q_i 表示点 i 的需求量; R_{ik} 表示车辆 k 到达用户点 i 的时间; $[E_i^a, L_i^a]$ 表示需求点 i 的第 a 个时间窗, 其中 E_i^a 表示需求点 i 的第 a 个时间窗的最早开始接受服务的时间, L_i^a 表示需求点 i 的第 a 个时间窗的最晚接受服务的时间; f_k 表示车辆 k 的固定成本; C_{ij} 表示 i, j 之间的变动成本(和时间、距离有关); $x_{ijk}, y_{ik}, z_{ik}^a$ 是二进制变

量, M 是一个无穷大数。

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 完成 } i \text{ 点的任务后直接去 } j \text{ 点} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & i \text{ 点的任务由车辆 } k \text{ 完成} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$z_{ik}^a = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 在用户点 } i \text{ 的第 } a \text{ 个时间窗内提供服务} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$\min Z = f_k \cdot \sum_k \sum_{i=1}^m x_{i0k} + \sum_k \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n x_{ijk} \cdot C_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_k \sum_{i=0}^n x_{ijk} = 1, j \in A \quad (2)$$

$$\sum_k \sum_{j=0}^n x_{ijk} = 1, i \in A \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = \sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_k \sum_{i=1}^n x_{i0k} = \sum_k \sum_{j=1}^n x_{0jk} = m \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n q_i y_{ik} \leq Q, \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} = y_{jk}, j \in A, j \neq i, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} = y_{ik}, i \in A, i \neq j, \forall k \in K \quad (8)$$

$$ET_i^a - M(1 - Z_{ik}^a) \leq R_{ik}, i \in A, \forall k \in K \quad (9)$$

$$R_{ik} \leq LT_i^a - M(1 - Z_{ik}^a), i \in A, \forall k \in K \quad (10)$$

$$R_{ik} + T_{ij} \cdot x_{ijk} + S_i \cdot x_{ijk} - M(1 - x_{ijk}) \leq R_{jk} \quad (11)$$

目标函数 1 表示总成本最小, 其中第一项表示动用车辆的固定成本, 第二项表示车辆运行成本; 式 2、3 表示一个用户能且仅能被访问一次; 式 4 表示所有车辆必须从配送中心出发, 最终返回配送中心; 式 5 表示完成所有任务共动用的车辆数; 式 6 表示任何一辆车所服务的用户的总需求量不超过车辆最大装载量; 式 7 表示如果车辆 k 到达 j 点, 则必为 j 用户提供服务; 式 8 表示如果车辆 k 为 i 用户提供服务, 则服务完必从 i 点离开; 式 9 表示任何车辆在其配送路线上前后两个相继节点的时刻之间的关系; 式 10、11 为时间窗约束。

2 算法设计

2.1 基本蚁群算法

蚂蚁在协同觅食的过程中, 会在经过的路径上留下信息素, 每一只蚂蚁经过的路径都可以看作是一个可行解, 各个蚂蚁之间通过信息素进行联系, 蚂蚁觅食时会选择信息素较高的路径, 信息素越高, 被选的概率就越大, 随着时间的推移, 较优路径上的信息素会越来越多, 而其他路径上的信息素随着蒸发逐渐降低, 算法最终收敛到最优解或近似最优解^[3]。但是该算法也有搜索时间长和收敛速度慢、容易陷入局部最优解等缺

点,对此,文中改进转移概率和信息素更新公式以跳出局部最优陷阱,结合邻域搜索策略提高算法的寻优能力,加快算法收敛速度。

2.2 改进算法描述

2.2.1 伪随机转移概率公式

$$P_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta [\omega_{ij}]^\varepsilon}{\sum [\tau_{is}]^\alpha [\eta_{is}]^\beta [\omega_{is}]^\varepsilon}, s \in \text{allow}_k \quad (12)$$

其中, τ_{ij} 为从 i 到 j 的信息素浓度; α 为信息素浓度重要因子; η_{ij} 为启发函数, $\eta_{ij} = 1/D_{ij}$, 表示蚂蚁从用户点 i 到 j 的期望程度; β 为启发函数重要因子; ω_{ij} 为节约值, $\omega_{ij} = D_{i0} + D_{0j} - D_{ij}$; ε 为节约值重要因子; allow_k 表示车辆在满足约束条件下可访问点的集合。

2.2.2 邻域搜索策略

蚁群算法具有贪婪的启发式搜索特性,这就造成算法在构造可行解的时候,只关心解的成分,而不关心解是怎么组成的,它只会随机组合这些成分,而最优解的组合方式一般是唯一的,随机组合得到最优解的可能性很低。因此借助邻域搜索策略增加算法搜索广度,提高解的质量。邻域搜索是指对产生的可行路径进行位置扰动并重新组合,假设当前路径中的节点个数为 N ,则其邻域变换的规模大小为 $N(N-1)/2$,通过对路径进行节点位置调换,如果调换两点后的路径满足约束条件,并且解的质量变优,则接受优化后的路径,否则保持原路径不变。

2.2.3 信息素更新策略

当全部蚂蚁完成对所有节点的访问后,对当前最优路径进行信息素更新,更新公式为:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (13)$$

为了防止算法容易停滞和陷入局部最优解,结合模拟退火法^[15]的特点,以一定概率接受恶化解,帮助算法跳出局部最优的陷阱。 f_{k+1} 为当前蚂蚁完成本次循环后得到的局部最优解, $\Delta f = f_{k+1} - f_k$, 如果 $\Delta f < 0$, 则接受新解, 否则进行判断, $p = \exp(-\Delta f/T)$, 如果 p 大于 $(0,1)$ 间的随机数, 则接受新的恶化解作为最优解, 否则不接受, 最优解仍为 f_k 。 T 是当前温度, 完成一次循环后进行降温处理, 降温速率为 r , $T(t+1) = T(t) \cdot r$ 。

2.3 算法步骤

(1) 输入参数, 初始化信息素矩阵, 设置最大迭代次数 N 和蚂蚁个数 K ;

(2) 将蚂蚁放置起点, 设当前出发点为 i , 建立禁忌表, 即蚂蚁已访问节点和未访问节点集合, 同时建立 allow_k 表, 即可去点的集合;

(3) 从当前出发点 i 开始, 根据约束条件从未访问节点集合中搜索出下个可去点并将其放入 allow_k , 直至所有节点搜索完毕, 如果 allow_k 为空集, 则车辆返回

配送中心, 更新车辆信息, 再令 $i=0$, 继续执行本步骤;

(4) 根据转移概率公式, 按照轮盘赌的方法从 allow_k 表中选择下个访问节点 j , 同时更新禁忌表以及车辆载重信息; 如果全部节点访问完毕, 转至步骤 5, 否则令 $i=j$, 转步骤 4;

(5) 如果所有节点均已访问完毕, 则 $k=k+1$, 转至步骤 2; 如果所有蚂蚁遍历完毕, 找出当前最优解, 按照邻域搜索策略进行可行解的优化, 然后根据更新公式更新信息素; $n=n+1$, 如果 $n < N$, 转至步骤 2;

(6) 输出结果, 退出程序。

3 仿真实验

多时间窗车辆路径问题尚无标准的测试数据, 该算例数据取自文献[11], 不在此一一列举。改进蚁群算法的参数设置为: 种群规模 100, 迭代次数 200, 初始信息素为 1, $\alpha=1, \beta=2, \varepsilon=1, \rho=0.1, T=1\ 000, r=0.9$ 。改进蚁群算法求得的最优解为 2 156.8, 共需要 4 辆车完成配送任务, 路线如图 1、2 和表 1 所示。

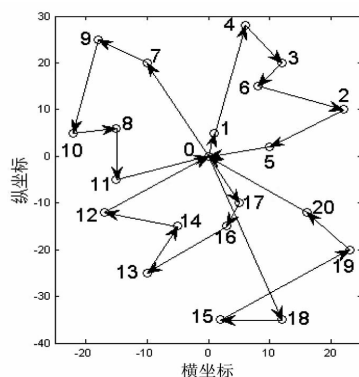


图 1 路线图 1

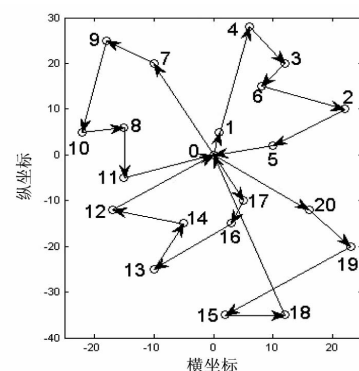


图 2 路线图 2

表 1 车辆路线表

车辆	路线	装载率/%
1	0 → 1 → 4 → 3 → 6 → 2 → 5 → 0	60
2	0 → 7 → 9 → 10 → 8 → 11 → 0	72.5
3a	0 → 20 → 19 → 15 → 18 → 0	95
3b	0 → 18 → 15 → 19 → 20 → 0	95
4	0 → 17 → 16 → 13 → 14 → 12 → 0	95

车辆一从配送中心出发,按路线4-3-6-2-5给用户配送服务,完成后返回配送中心;

车辆二从配送中心出发,按路线7-9-10-8-11给用户配送服务,完成后返回配送中心;

车辆三有两种方案选择,车辆从配送中心出发,可以按路线20-19-15-18给用户配送服务,或按路线18-15-19-20给用户配送服务,完成后返回配送中心;其成本和距离一样,决策者可根据实际情况自行选择行车路线安排配送;

车辆四从配送中心出发,按路线17-16-13-14-12给用户配送服务,完成后返回配送中心。

与文献[11]的结果相比较,智能水滴算法求得的结果为2 168.9,改进后的蚁群算法求得的结果为2 156.8,最快一次仅七代就搜索到最优解,而且结果变优,同时线路选择增加;相比智能水滴算法,改进蚁群算法可以更好地求得最优解。

同时,为进一步验证改进蚁群算法在求解多时间窗车辆路径问题上的有效性,又分别用标准蚁群算法、模拟退火算法和禁忌搜索算法进行20次测试对比,结果如表2所示。

表2 算法对比

算法	最优结果	平均最优结果	标准差
改进蚁群算法	2 156.8	2 161	6.69
标准蚁群算法	2 168.9	2 206	24.58
模拟退火算法	2 168.9	2 470.1	128.56
禁忌搜索算法	2 168.9	2 323.3	146.86

从表2中可以看出,在20次实验中,改进蚁群算法求得的最优解为2 156.8,平均每次求得的最优解为2 161,标准差为6.69,三项指标均优于其他三种算法。标准蚁群算、模拟退火算法和禁忌搜索算法均停留在某个局部最优解上,说明改进蚁群算法在跳出局部最优解方面具有良好的性能,而且算法求解的标准差较小,结果相对稳定,而未改进的标准蚁群算法、模拟退火算法和禁忌搜索算法在求解过程中的稳定性较差。

从图3可以看出,模拟退火算法和禁忌搜索算法在迭代过程中变化幅度大,稳定性差,而且求解质量不高,而改进蚁群算法在求解问题时速度较快,稳定性好,求解质量高于其他三种算法。

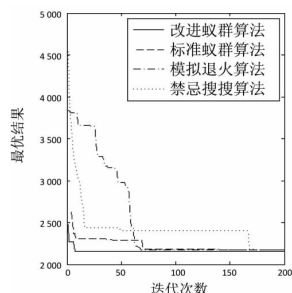


图3 算法迭代对比图

4 结束语

车辆路径问题属于NP难题,构造高质量的启发式算法是很多学者的研究方向。针对多时间窗车辆路径问题建立了一般数学模型,改进蚁群算法进行求解,和其他算法求得的结果进行比对分析。改进后的蚁群算法在求解多时间窗车辆路径问题上有着较好的性能,是求解多时间窗车辆路径问题的较好途径。

参考文献:

- [1] DANTZIG G, RAMSER J. The truck dispatching problem [J]. Management Science, 1959, 6(1): 80-91.
- [2] 杨宇栋,朗茂祥,胡思继. 有时间窗车辆路径问题的模型及其改进模拟退火算法研究[J]. 管理工程学报, 2006, 20(3): 104-107.
- [3] 刘志硕,柴跃廷,申金升. 蚁群算法及其在有硬时间窗的车辆路径问题中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4): 596-602.
- [4] 何小锋,马 良. 带时间窗车辆路径问题的量子蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(5): 1255-1261.
- [5] BELHAIZA S, HANSEN P, LAPORTE G. A hybrid variable neighborhood tabu search heuristic for the vehicle routing problem with multiple time windows [J]. Computers & Operations Research, 2014, 52: 269-281.
- [6] BEHESHTI A K, HEJAZI S R, ALINAGHIAN M. The vehicle routing problem with multiple prioritized time windows: a case study [J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 90: 402-413.
- [7] FAVARETTO D, MORETTI E, PELLEGRINI P. Ant colony system for a VRP with multiple time windows and multiple visits [J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2007, 10(2): 263-284.
- [8] 马华伟,叶浩然,夏 维. 允许分割配送的多时间窗车辆调度问题的改进蚁群算法求解[J]. 中国管理科学, 2012, 20(S1): 43-47.
- [9] 黄秋爱,李珍萍. 多时间窗车辆路径问题的数学模型及算法[J]. 物流技术, 2012, 31(7): 194-196.
- [10] 朱玲玲,杨爱琴,吴宽仁. 基于协同自适应禁忌的多时间窗VRP算法实现[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(12): 4542-4545.
- [11] 李珍萍,赵 菲,刘洪伟. 多时间窗车辆路径问题的智能水滴算法[J]. 运筹与管理, 2015, 24(6): 1-10.
- [12] 闫 芳,王媛媛. 多模糊时间窗车辆路径问题的建模及求解[J]. 交通运输系统工程与信息, 2016, 16(6): 182-188.
- [13] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colonies for the traveling salesman problem [J]. Biosystems, 1997, 43(2): 73-81.
- [14] 丁秋雷,胡祥培,李永先. 求解有时间窗的车辆路径问题的混合蚁群算法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(10): 98-104.
- [15] 张浩荣,陈平华,熊建斌. 基于蚁群模拟退火算法的云环境任务调度[J]. 广东工业大学学报, 2014, 31(3): 77-82.