

果蔬运输车辆路径再规划*

黄华芳¹ 王以忠¹ 李 达¹ 门建婷¹ 张 平² 黄国全³

(1. 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222; 2. 国家农产品保鲜工程技术研究中心(天津), 天津 300384;
3. 香港大学工业及制造系统工程系, 香港 999077)

【摘要】 果蔬具有易腐性,在销售、消费时存在很强的时效性,这就要求合理规划果蔬运输车辆的配送路径。在果蔬配送途中,当某运输车遇到特殊情况无法按时送达配送点时,应当对其他运输车进行路径再规划。给出了带时间窗的果蔬运输车辆路径再规划的数学模型,并采用改进蚁群算法进行了求解。仿真试验结果表明,模型及算法可以有效地优化果蔬配送新路线,为降低果蔬腐烂损失、提高销售收入、有效控制运作成本提供了理论支持。

关键词: 果蔬 运输 车辆 路径再规划 时间窗 蚁群算法

中图分类号: S11⁺5; U49 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)04-0113-06

Vehicle Route Replanning for Fruit and Vegetable Delivery

Huang Huafang¹ Wang Yizhong¹ Li Da¹ Men Jianting¹ Zhang Ping² Huang Guoquan³

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China
2. National Engineering and Technology Research Center for Preservation of Agricultural Products, Tianjin 300384, China
3. Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract

Since fruit and vegetable are highly perishable, and have strong timeliness in selling and consuming, the delivery routes of transport vehicles must be planned reasonably. On the path of fruit and vegetable delivery, a transport vehicle may encounter some unusual circumstances and may not arrive at the next distribution site in time. In this case, the vehicle routes of other transport vehicles should be replanned. A mathematical model for vehicle route replanning with time windows for fruit and vegetable delivery was established, and an improved ant colony algorithm was used to resolve the model. Simulation experiment results showed that the new dispatching routing of fruit and vegetable could be optimized efficiently by using the proposed model and adopted algorithm. This research could provide theoretical support for enterprises which hoped to decrease rot loss of fruit and vegetable, increase sales income and control operating cost effectively.

Key words Fruit and vegetable, Delivery, Vehicle, Route replanning, Time window, Ant colony algorithm

引言

由 Dantzig 和 Ramser 于 1959 年提出的车辆路径问题 (vehicle routing problem, 简称 VRP) 是运筹学中的一个重要分支,是组合优化中一类 NP (non-deterministic polynomial) 完全难题。随着研究人员

的努力,在求解 VRP 问题的算法研究方面取得了一定的进展^[1~2]。从本质上说,VRP 的求解方法可以分为:精确算法和启发式算法。精确算法有严格的数学理论作支撑,能够求出 VRP 问题的最优解,但精确算法的计算量随问题规模增大呈指数增长,可移植性差,在实际应用中受限。启发式算法被设计

收稿日期: 2011-11-30 修回日期: 2011-12-16
* 天津市科技支撑计划重点项目 (08ZCKFNC00700)
作者简介: 黄华芳,讲师,主要从事测控技术和电力电子技术研究, E-mail: huanghf@tust.edu.cn

用于搜索最有可能出现次优解的部分空间,大幅减少搜索时间,从而找到接近实际需求的次优解。随着计算机技术的迅速发展,启发式算法得到了广阔的发展空间,产生了蚁群算法^[3~6]、神经网络^[7]、遗传算法^[8~9]、免疫算法^[10]等智能化的启发式算法,这些启发式算法在计算时间和计算精度上取得了较好的平衡,能在合理的时间内给出问题的近似最优解。

在果蔬物流中,由于果蔬具有含水量高、保鲜期短、极易腐烂变质的特点,而且果蔬的销售和消费都存在很强的时效性,因此,要用科学的方法确定合理的果蔬车辆配送路线^[11~12]。当出现特殊情况(如果蔬品质变化、交通道路拥堵等)使运输车不能在规定的时间内送到目的地时,需要改变原定行驶路线,对路径进行再规划,以降低果蔬的腐烂损失、提高销售收入、有效控制企业的运作成本。本文根据果蔬物流的特点,将蚁群算法应用在运输车辆的路径再规划当中,建立再规划路径的数学模型,并对基本蚁群算法进行改进,最后利用算法在模型上进行最优路径搜索。

1 路径再规划问题的描述

有一个固定的配送中心,需向若干个配送点运送果蔬,已按照带时间窗的车辆路径规划结果依次配送。但在配送过程中,某运输车遇到如果蔬变质、道路修理、交通堵塞等问题而不能在顾客要求的时间内到达指定配送点时,这辆运输车不能再按原来的路径进行配送,而应根据车载和果蔬保质期情况选择就近的配送点。剩下的车辆也不能再按原来的路径进行配送,用剩下的车辆对未配送的配送点进行路径再规划。如果剩下的运输车不能完成对所有配送点的配送,则需要从配送中心再发车,完成所有剩余配送点的配送。

在路径再规划的过程中,需要满足以下基本条件:①每个配送点有且仅有一辆车通过,车辆完成配送任务后要返回配送中心。②配送中心和配送点的位置、配送点之间的距离、配送点与配送中心之间的路程长度已知,每个配送点所需货物的需求量和时间窗已知。③运输车辆的载量、最大行驶距离和平均速度都已知,并且运输车不允许超载,不允许超过车辆被允许的最大行驶路程。④当某辆运输车发生特殊情况不能及时到目的地时,所有运输车的当前载量、已访问配送点和未访问配送点已知。⑤当某辆运输车发生特殊情况时,要确定剩余运输车的当前位置,是在哪个配送点上,若剩余运输车在 2 个配送点之间的路上,则采用就近原则,离哪个配送点

近,就定为该运输车在该配送点。

在满足所有条件的情况下,寻找一种从当前配送点到各未访问配送点并返回配送中心的车辆行驶路径,使该路径能最大程度地满足配送过程中成本最低的要求。

2 数学模型

若配送中心编号为 0,配送点编号为 1,2,⋯,n,配送点所需果蔬保质期的时间窗为 $[T_E, T_L]$,则配送的目标函数为

$$\min z = am + \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m bd_{ij}x_{ijk} + \sum_{i=1}^n e[\max((T_{Ei} - t_i), 0) + \max((t_i - T_{Li}), 0)] \tag{1}$$

其中 $x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{(车辆 } k \text{ 是从 } i \text{ 点行驶到 } j \text{ 点)} \\ 0 & \text{(车辆 } k \text{ 不是从 } i \text{ 点行驶到 } j \text{ 点)} \end{cases}$
式中 a ——出车单位成本 m ——车辆数目
 b ——车辆行驶单位成本
 d_{ij} —— i 点与 j 点的距离
 e ——因违反时间窗而增加等待的单位成本
 T_{Ei} —— i 点所需果蔬保质期的起始时间
 t_i ——车辆到达 i 点的时间
 T_{Li} —— i 点所需果蔬保质期的终止时间

式(1)中,第 1 项为车辆的出车成本,第 2 项为车辆在路程上消耗的行驶成本,第 3 项为车辆没有及时到达所造成的违约金,目标函数是使这 3 项的和最小。其约束条件为

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} &= \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{j0k} & (2) \\ \sum_{k=1}^m y_{ik} &= 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) & (3) \\ \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} &= 1 \quad (j = 0, 1, \dots, n) & (4) \\ \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} &= 1 \quad (i = 0, 1, \dots, n) & (5) \\ \sum_{i=1}^n y_{ik} q_i &\leq Q \quad (k = 1, 2, \dots, m) & (6) \\ \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} d_{ij} &\leq L \quad (i = 0, 1, \dots, n) & (7) \\ T_{Ei} &\leq t_i \leq T_{Li} & (8) \end{aligned}$$

其中 $x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{(车辆 } k \text{ 的初始位置在 } i \text{ 点)} \\ 0 & \text{(车辆 } k \text{ 的初始位置不在 } i \text{ 点)} \end{cases}$
 $x_{j0k} = \begin{cases} 1 & \text{(车辆 } k \text{ 是回配送中心)} \\ 0 & \text{(车辆 } k \text{ 不是回配送中心)} \end{cases}$
 $y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{(} i \text{ 是由车辆 } k \text{ 服务)} \\ 0 & \text{(} i \text{ 不是由车辆 } k \text{ 服务)} \end{cases}$

式中 q_i —— i 点的果蔬需求量
 Q ——车辆最大载量
 L ——车辆可允许的最长行驶路程

式(2)说明从各配送点出发的车辆,完成任务后都回到配送中心;式(3)~(5)保证每个配送点有且仅有一辆车通过;式(6)保证每辆车的载量不能超过车辆的最大载量限制;式(7)保证车辆的行驶长度不能超过车辆的最长行驶路程;式(8)是对时间窗的要求,要求运输车辆到达时间在时间窗内,否则要接受很大的惩罚成本。

3 改进型蚁群算法

蚁群算法(ant colony optimization,简称 ACO)由 Dorigo M 等^[13]于 1991 年提出,是一种用来在图中寻找优化路径的机率型算法,其主要特点是通过正反馈、分布式协作来寻找最优路径。基本蚁群算法存在一般需要较长的时间、容易出现停滞现象的不足,本文采用改进型蚁群算法对果蔬运输车辆的路径再规划问题进行研究。

3.1 状态转移规则

在基本蚁群算法中,当前路径的信息素浓度和启发式信息量是蚂蚁选择下一配送点的 2 个影响因素,所使用的状态转移规则为随机比例规则(random-proportional rule)。为了改善蚂蚁系统的性能,Dorigo 和 Gambardella^[14]提出了蚁群系统,其状态转移规则为伪随机比例规则(pseudo-random-proportional rule),在探索新路径和利用先验知识的方面取得了较好的平衡。蚁群系统的状态转移规则对于纯车辆路径优化问题的求解比较适用,但对于带约束条件的车辆路径优化问题来说,会浪费大量有用的启发信息,增加求解成本,降低求解效率。考虑到车辆载量、车辆行程因素的影响,本文对蚁群系统的状态转移规则进行了修改,下一个配送点确定公式为

$$\nu = \begin{cases} \arg \max_{j \in allowed_k} \tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta \mu_{ij}^\gamma \omega_{ij}^\lambda & (f \leq f^*) \\ p_{ijk} & (f > f^*) \end{cases} \quad (9)$$

$$p_{ijk} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta \mu_{ij}^\gamma \omega_{ij}^\lambda}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha \eta_{is}^\beta \mu_{is}^\gamma \omega_{is}^\lambda} & (j \in allowed_k) \\ 0 & (j \notin allowed_k) \end{cases} \quad (10)$$

其中 $\mu_{ij} = \frac{Q_i + q_j}{Q}$ $\omega_{ij} = \frac{L}{L_i + d_{ij} + d_{j0}}$

式中, τ_{ij} 为边(i, j)上的信息素浓度; α 为信息素浓度因子,表示信息素浓度在路径选择中的重要程度,

值过大则搜索的随机性太小,值过小则容易陷入局部最优解; η_{ij} 为边(i, j)的能见度,反映由 i 点转移到 j 点的启发程度,即 $1/d_{ij}$; β 为期望启发因子,表示能见度在路径选择中的重要程度,值过大容易陷入局部最优解,值过小则容易陷入纯粹的随机搜索(很难找到最优解); μ_{ij} 反映车辆载量利用率,其中 Q_i 为 i 点车辆的载量, q_j 为 j 点的果蔬需求量,显然 μ_{ij} 越大,选择 j 点的可能性就越大; γ 为车辆载量利用率对蚂蚁决策的影响因子, γ 越大,说明 μ_{ij} 在配送点选择中所起的作用越大; ω_{ij} 反映车辆行程利用率,其中 L_i 为 i 点车辆已行驶路程, d_{j0} 为 j 点到 0 点的距离,显然 $d_{ij} + d_{j0}$ 越小, ω_{ij} 越大, j 点被选择概率也会越大; λ 表示车辆行程利用率对蚂蚁决策的影响因子; $allowed_k$ 表示蚂蚁 k 尚未到达过的集合,此集合随着蚂蚁的行进动态变化; f 为在区间 $[0, 1]$ 内随机产生的数字; f^* 为自适应参数,是一个确定的参数, $0 < f^* < 1$; p_{ijk} 表示位于 i 点的蚂蚁 k 转移到 j 点的概率。

从式(9)可看出,蚁群系统在选择时首先有一个判断,将选择情况分成了确定性选择和探索性选择 2 种方式。当 $f \leq f^*$ 时,选择使 $\tau_{ij}^\alpha \eta_{ij}^\beta \mu_{ij}^\gamma \omega_{ij}^\lambda$ 产生最大值的 j 点,这种方式可以加快算法收敛速度,强化局部最优路径在全局路径中的影响;当 $f > f^*$ 时,根据状态转移概率式(10)选择,这种随机性探索选择可以增加搜索范围。

3.2 信息素更新规则

在每一次迭代过程中,蚂蚁每访问一次都需要采用局部更新规则来更新相应路径上的信息素浓度;当所有蚂蚁都遍历完 n 个节点后,采用全局更新规则更新路径上的信息素浓度。

3.2.1 局部信息素更新

局部信息素更新使已选的边对后来的蚂蚁具有较小的吸引力,从而使蚂蚁对没有被选中的边有更强的探索能力。每当蚂蚁完成一次循环后,路径上信息素要进行更新

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ijk} \quad (11)$$

式中 ρ ——信息素挥发系数, $\rho \in [0, 1]$

$\Delta \tau_{ijk}$ ——蚂蚁 k 在边(i, j)上留下的信息素增量

局部信息素更新的作用在于,蚂蚁每一次经过边(i, j)后,该边的信息素 τ_{ij} 会减少,从而使得其他蚂蚁选中该边的概率相对减少,这将增加探索未使用过的边的机会,使得算法不会陷入停滞状态,可以有效地避免蚂蚁收敛到同一路径。

3.2.2 全局信息素更新

全局更新原则对获得最优和最差的蚂蚁实施。当所有蚂蚁均完成一次循环时,找出最短路径和最长路径,最短路径和最长路径上边的信息素更新公式为

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ij} + \rho \Delta \tau_{ij} \tag{12}$$

其中
$$\Delta \tau_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{L_{\text{best}}} & (\text{边}(i,j) \text{为最短路径}) \\ -\frac{L_{\text{best}}}{L_{\text{worst}}} & (\text{边}(i,j) \text{为最长路径}) \\ 0 & (\text{边}(i,j) \text{为其他路径}) \end{cases} \tag{13}$$

式中 $\Delta \tau_{ij}$ ——边*(i, j)*上的信息素增量
 L_{best} ——本次循环时最短路径的长度
 L_{worst} ——本次循环时最长路径的长度

采用这种信息全局信息素更新对最优解进行更大限度的增强,而对最差解进行削弱,使得属于最优路径的边与属于最差路径的边之间的信息素量差异进一步增大,从而使蚂蚁的搜索行为更集中于最优解的附近。

3.3 局部最优搜索策略

局部最优搜索策略,即通过对边进行交换,在解的邻域进行调整,每次调整可使可行解得到改进,直到解在邻域内不能改进为止。现有局部最优搜索策略有 2-opt^[10]、3-opt、贪心算法及遗传算法等,本文采用 2-opt 策略,对每次迭代产生的最好解的相邻边进行交换,改善解的质量。

在算法中,*m* 只车辆蚂蚁搜索完一个循环后将得到 *m* 个解分支,在这些解分支的邻域运用 2-opt 法对解分支进行处理。当交换后路径长度减小,即满足条件

$$d_{ij} + d_{i+1,j+1} < d_{i,i+1} + d_{j,j+1} \tag{14}$$

则以*(i, j)*、*(i + 1, j + 1)*代替*(i, i + 1)*、*(j, j + 1)*,交换前、后的路径如图 1 所示。

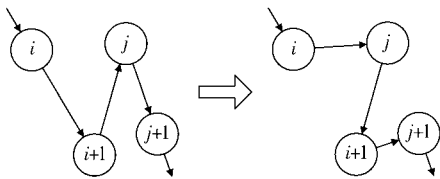


图 1 2-opt 交换示意图
Fig.1 2-opt exchange sketch map

3.4 算法步骤

应用于果蔬路径再规划的改进型蚁群算法步骤如下:

(1)变量的初始化,设置蚂蚁数 *m*,配送点数 *n*,有 *r* 辆车在 *r* 个不同配送点,迭代次数 *c* 初始值为 1,迭代次数最大为 *c*_{max},每条路径信息素增量的初

始值为零,设置集合 *A* 为蚂蚁未访问的配送点(不包含 *r* 辆车所在的配送点),把 *m* 只蚂蚁放在第 1 辆车所在的配送点。

(2)蚂蚁根据车的载量和时间窗的限制条件从集合 *A* 中选出蚂蚁可以去的配送点,放在集合 *B*,若集合 *B* 不为空则跳到步骤(3),为空则跳到步骤(4)。

(3)根据式(9)和式(10)计算出集合 *B* 的转移概率,从集合 *B* 中选出一个配送点,并把蚂蚁送到此配送点,同时把此配送点从集合 *A* 中删除。选择下一个配送点。

(4)判断集合 *A* 是否为空(即蚂蚁是否把所有配送点都访问完),若不为空(即没访问完),则把蚂蚁放到下一辆车所在的配送点。如果 *r* 辆车已全部走过,则把蚂蚁放到配送中心,并跳到步骤(3),否则跳到步骤(5)。

(5)对这只蚂蚁所走的路径根据式(11)进行信息素的局部更新。

(6)对这只蚂蚁所走的路径应用 2-opt 优化局部搜索。

(7)当所有蚂蚁都进行完一次遍历以后,计算出最短路径和最长路径,根据式(12)、式(13)对最短路径和最长路径进行全局信息素的更新。

(8)*c* ← *c* + 1,所有蚂蚁又回到初始位置,跳到步骤(2)。

(9)若迭代次数 *c* 等于迭代的最大次数 *c*_{max} 则循环结束,计算出最优结果,否则转步骤(2)。

4 仿真结果

某农产品配送中心出动 5 辆车对几个配送点进行某种果蔬的配送。该中心配送车辆的载量限制为 8 t,2 h 后,某一辆车不能准时到达目的地,对这辆车进行处理后,剩余 4 辆车所在配送点及载量如表 1 所示;以此时作为路径再规划的计时起点,未访问配送点的位置、需求量和时间窗如表 2 所示,其中时间窗指客户所需果蔬保质期的时间窗(*T_E*和*T_L*都是以路径再规划计时起点为参考的相对时间)。

表 1 4 辆车的信息

Tab.1 Information of four vehicles

车辆编号	所在配送点	载量/t
1	6	4
2	1	4
3	10	5
4	2	6

使用改进型蚁群算法进行了路径优化,参数设置为:*m* 为 8,*c*_{max} 为 100, α 为 1, β 为 2, ρ 为 0.9,*f*^{*}

为 0.95, γ 、 λ 为 5, Q 为 8, L 为 500, 运行 10 次, 结果如表 3 所示。

表 2 未访问配送点的坐标、需求量和时间窗

Tab.2 Coordinates, requirements and time windows of distribution sites not to access

	X 坐标/km	Y 坐标/km	需求量/t	T_E /h	T_L /h
配送中心 0	100	100	0	0	0
配送点 1	60	100	1	2.5	6.0
配送点 2	20	110	2	2.1	6.3
配送点 3	160	150	2	3.4	8.3
配送点 4	160	110	1	1.4	12.0
配送点 5	30	20	1.5	3.3	7.2
配送点 6	100	60	1	4.7	9.5
配送点 7	100	170	2.5	1.5	8.1
配送点 8	30	10	2	4.7	10.1
配送点 9	60	50	2	5.1	9.5
配送点 10	160	160	1	3.7	8.0
配送点 11	50	140	1.5	2.1	8.3

表 3 10 次运行结果

Tab.3 Experimental results of ten times

运行次数	总路程/km	车辆数量
1	651	4
2	670	4
3	664	4
4	681	4
5	674	4
6	673	4
7	668	4
8	656	4
9	672	4
10	668	4

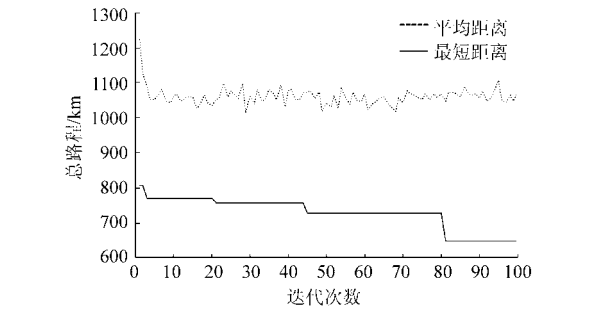
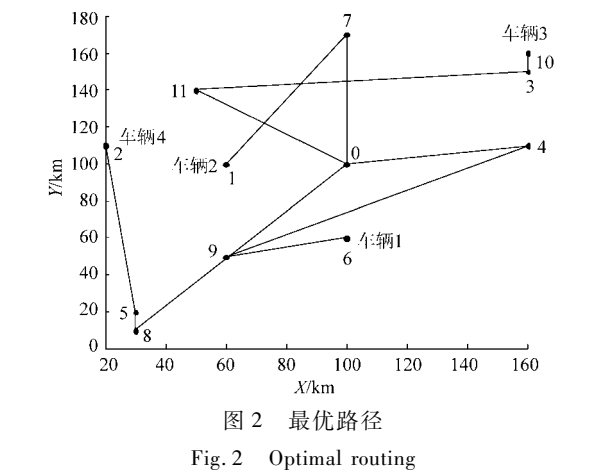
从表 3 可以看出, 最优解为 651 km, 最优配送方案和最优路径图分别如表 4 和图 2 所示。图 3 为最优解的平均距离和最短距离。

从图 3 中可以看出, 每次迭代最短路径的趋势由杂乱无章逐渐向最优解靠近, 符合蚁群算法搜索解的特点; 算法在求解的过程中, 每次迭代的平均距离一直呈波动状态, 而没有停留在一个定值上, 表明了本算法有着很强的搜索能力和稳定性。

表 4 最优配送方案

Tab.4 Optimal dispatching scheme

车辆编号	最优路径	消耗载量/t
1	6-9-4-0	4.0
2	1-7-0	3.5
3	10-3-11-0	4.5
4	2-5-8-0	5.5



5 结束语

针对果蔬运输车在原有规划路径途中遇到特殊情况不能及时送货的问题, 重新规划其他运输车的运输路径, 以满足各配送点的客户需求。文中以时间窗为约束条件建立了数学模型, 采用改进的蚁群算法进行了路径优化, 并通过仿真试验验证了模型和算法的有效性。

参 考 文 献

1 方金城, 张岐山. 物流配送车辆路径问题(VRP)算法综述[J]. 沈阳工程学院学报:自然科学版, 2006, 2(4):357~360.
Fang Jincheng, Zhang Qishan. Algorithm review on vehicle routing problem in logistics distribution[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering: Natural Science, 2006, 2(4):357~360. (in Chinese)

2 张宏. 物流配送中的车辆路径优化问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Zhang Hong. Study on vehicle routing problem in logistics distribution[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)

3 Bell J E, McMullen P R. Ant colony optimization techniques for the vehicle routing problem[J]. Advanced Engineering Informatics, 2004, 18(1):41~48.

- 4 吴启迪,汪镭. 智能蚁群算法及应用[M]. 上海:上海科技教育出版社,2004.
 - 5 吴隽,陈定方,李文峰,等. 基于改进蚁群算法的有时间窗车辆路径优化[J]. 湖北工业大学学报,2008,23(3):9~12.
Wu Jun, Chen Dingfang, Li Wenfeng, et al. An improved ant colony algorithm for vehicle routing problem with time windows [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2008, 23(3):9~12. (in Chinese)
 - 6 崔雪丽,朱道立. 带时间窗车辆路径问题的混合改进型蚂蚁算法[J]. 计算机工程与应用,2009,45(4):16~19.
Cui Xueli, Zhu Daoli. Hybrid improved ant algorithm for vehicle routing problem with time windows [J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(4):16~19. (in Chinese)
 - 7 李慧,杨东梅,沈洁,等. BP神经网络在路径规划中的应用[J]. 应用科技,2004,31(9):15~17.
Li Hui, Yang Dongmei, Shen Jie, et al. Application of BP neural network to path planning of mobile robot[J]. Applied Science and Technology, 2004, 31(9):15~17. (in Chinese)
 - 8 黄立君,许永花. 遗传算法和蚁群算法融合求解 TSP [J]. 东北农业大学学报,2008,39(4):109~113.
Huang Lijun, Xu Yonghua. Solving TSP converged on genetic algorithm and the ant algorithm [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(4):109~113. (in Chinese)
 - 9 温惠英,徐建闽,林正春. 适于物流配送车辆导航路径优化的遗传算法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(2):82~86, 91.
Wen Huiying, Xu Jianmin, Lin Zhengchun. Genetic algorithm for route optimization of vehicle navigation in logistics distribution[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(2):82~86, 91. (in Chinese)
 - 10 樊建华,王秀峰. 基于免疫算法的车辆路径优化问题[J]. 计算机工程与应用,2006,42(4):210~212, 217.
Fan Jianhua, Wang Xiufeng. Vehicle routing optimization problem based on immune algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(4):210~212, 217. (in Chinese)
 - 11 侯文英,秦驰越. 基于蚁群算法鲜活农产品配送路径优化研究[J]. 安徽农业科学,2009,37(1):109~110, 118.
Hou Wenying, Qin Chiyue. On the optimization of distribution routes for agricultural products based on ant algorithm[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(1):109~110, 118. (in Chinese)
 - 12 杨信廷,钱建平,范蓓蕾,等. 农产品物流过程追溯中的智能配送系统[J]. 农业机械学报,2011,42(5):125~130.
Yang Xinting, Qian Jianping, Fan Beilei, et al. Establishment of intelligent distribution system applying in logistics process traceability for agricultural product[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5):125~130. (in Chinese)
 - 13 Dorigo M, Bonabeau E, Theraulaz G. Ant algorithms and stigmergy[J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8):851~871.
 - 14 Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system; a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1):53~66.
-

(上接第 99 页)

- 19 何攀,何风华,王海燕,等. 操作条件对浸没式超滤膜污染影响的中试研究[J]. 给水排水,2010,36(3):12~17.
He Pan, He Fenghua, Wang Haiyan, et al. A pilot study about the effect of operating conditions on the immersed ultrafiltration membrane's fouling [J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(3):12~17. (in Chinese)
- 20 Glucina K, Alvarez A, Laine J M. Assessment of an integrated membrane system for surface water treatment [J]. Desalination, 2000, 132(1~3):73~82.
- 21 张崇华. 混凝剂与絮凝剂[M]. 北京:中国环境科学出版社,1991:42~44.
- 22 董秉直. 超滤膜与混凝、粉末活性炭联用处理微污染水源[D]. 上海:同济大学,2002:113.
- 23 孙飞. 影响超滤膜通量的因素研究[D]. 上海:同济大学,2008:9~10.