

# 多式联运中运输方式与运输路径集成优化模型研究<sup>\*</sup>

康 凯, 牛海蛟, 朱越杰, 张维存

(河北工业大学 管理学院, 天津 300401)

**摘 要:** 运输方式和运输路径选择问题是影响多式联运时间和费用的关键问题, 直接影响承运人和客户的利益。依据运输方式选择和运输路径优化的关系特点, 采用主从混合智能启发式方法, 构建了运输方式选择和运输路径优化集成模型, 给出了粒子群—蚁群双层优化算法求解方案, 解决了运输网络多节点、多方式、多路径的集成优化问题。实验结果表明, 该方案优于蚁群算法和遗传算法。

**关键词:** 多式联运; 运输方式; 运输路径; 集成优化

**中图分类号:** U116.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2010)05-1672-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2010.05.017

## Research of improved integrated optimization model for mode and route in multimodal transportation

KANG Kai, NIU Hai-jiao, ZHU Yue-jie, ZHANG Wei-cun

(School of Management, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

**Abstract:** The transport mode and transport path in the multimodal transport are the key problems of affecting transportation cost and time, and have an effect on the benefits of the carriers and customers. According to the relationship between the transport mode selection and the transport path optimization, this paper proposed a integrated model which could select the transport mode and optimize the transport path synthetically. Then, achieved the solving method about the integrated model by the PSO-ACO double-layer optimization algorithm. Solved the multi-mode, multi-path integrated optimization problems by this modal. Experiment shows that the result is superior to ACO and GE.

**Key words:** multimodal transportation; transport mode; transport path; integrated optimization

随着我国经济的发展, 物流基础设施的不断完善, 综合运输体系逐步健全, 多式联运由于其时效性成为物流运输体系竞协的最佳方式, 而运输方式选择和运输路径优化在流通中占有重要的地位, 已成为本领域研究的焦点问题之一。多式联运中运输方式选择和运输路径优化相互关联、互为影响, 并从运输费用与运输时间等方面影响承运人和客户利益。因此, 探索多式联运中运输方式与运输路径集成优化方法具有重要的现实意义。

在多式联运中运输方式选择与运输路径优化方面, 已有学者作过相关研究, 并取得一些成果, 如 Zlatoper 等人<sup>[1]</sup>研究了在运价和运量变化时运输方式选择的敏感性; Haper 等人<sup>[2]</sup>研究显示: 不同成本、运量是托运人选择运输方式的决定性因素; Pattic<sup>[3]</sup>研究了以运输成本最小确定公路运输及公铁联运的市场范围及其影响因素; Lozano 等人<sup>[4]</sup>研究了多式联运下的最短路径问题, 并应用顺序算法求解; Ziliaskopoulos 等人<sup>[5]</sup>对综合运输网络中运输时间最短条件下的路径求解问题进行研究, 提出了时间因素决定下的多式联运网络最佳路径算法; Boussedjra 等人<sup>[6]</sup>采用双向研究策略考虑综合运输网络, 提出源点与终点间运输时间最小化条件下的最短路径算法; 王涛等人<sup>[7]</sup>构建了多式联运的虚拟运输网络, 结合运输方式选择建立组合优化模型, 给出 Dijkstra 启发式算法求解; 魏众等人<sup>[8]</sup>

提出了多式联运下的路径最短时间模型; 孙华灿等人<sup>[9]</sup>考虑合理的换装次数和运输方式序列, 研究了综合运输网络的路径优化模型; 贺竹馨等人<sup>[10]</sup>建立了时间容量约束下的 0-1 整数规划模型, 设计遗传算法求解。

已有研究成果从定性或定量的角度考虑运输方式的选择或运输路径的优化, 不同程度上促进了多式联运的合理化, 但这些研究大多是建立在运输路径单一或运输过程(阶段)直线化的假设之上, 难以适应现实中运输路径和运输过程多样化需求, 且没有考虑客户对货物运输的准时性要求(JIT 时效)。本文在已有研究的基础上, 尝试建立运输方式和运输路径集成优化模型, 并设计相关算法求解, 以适应运输路径和运输过程多样化的需求, 并满足客户的准时性要求。

## 运输方式和运输路径集成优化模型

### 运输方式选择和运输路径优化的关系

多式联运中, 选定某两个节点间的运输方式和运输路径是两个相互影响的过程。首先, 选定某种运输方式(如图 1(a)所示, 其中节点间不同类型的线代表不同的运输方式)是选择该运输方式所对应的运输路径(如图 1(b)所示, 其中节点间不同类型的线代表既定运输方式下不同运输路线)的前提; 其次,

收稿日期: 2009-09-24; 修回日期: 2009-11-06      基金项目: 河北省科学技术研究与发展计划资助项目(09215603D)

**作者简介:** 康凯(1964-), 男, 河北乐亭人, 教授, 博导, 主要研究方向为产业工程、物流服务管理(kkang2000@sina.com); 牛海蛟(1983-), 女, 河北廊坊人, 硕士, 主要研究方向为产业工程、物流服务管理; 朱越杰(1965-), 男, 河北唐山人, 博士研究生, 主要研究方向为物流服务管理; 张维存(1975-), 男, 河北乐亭人, 讲师, 博士, 主要研究方向为工业工程与智能算法。

某运输方式下所选择的路径是衡量该运输方式优劣的重要依据。结合多式联运的整体目标,运输方式和运输路径整体优化方案在于联运中各环节运输方式和运输路径选择的协调。

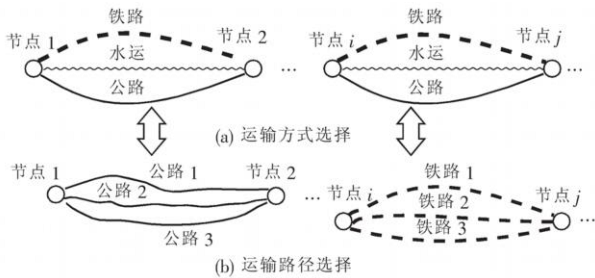


图 1 运输方式与运输路径优化关系

### 问题描述

假设一批货物欲从出发点 O 运达目的地 D。途中可选择  $n$  个节点 (城市) 中的若干个节点作为中转以构建从出发点 O 到目的点的完整路径,任意相连的两个节点之间有  $k$  种运输方式,且每种运输方式有  $q$  条运输路径可供选择。每个节点都可实现货物在不同运输方式之间的相互转载,但需要一定的中转时间和中转费用。整个运输过程还受线路容量和货物转载次数的约束,客户对货物的运输时间有合理的区间要求,过早会产生存储费用,过晚产生惩罚费用。需要选择整个运输过程中所途经的节点及节点间最佳的运输方式和运输路径组合,以使总费用 (包括运输费用和转运费用) 最低,且尽可能满足用户的运输期限。

### 假设条件

假设 1 货物的转载只能发生在节点,且在各节点最多进行一次转载;

假设 2 货物在节点间只能整批运载,不能分割;

假设 3 货物在两个节点间只能选择一种运输方式和一条运输路径;

假设 4 货物在节点即时换装,不存在库存;

假设 5 运输成本与运距和所选路径单位运输成本成正比。

### 符号说明

$x_{ij}^{k,q}$ :若节点  $i \sim j$  选择运输方式为  $k$  的  $q$  路径,则  $x_{ij}^{k,q} = 1$ , 否则  $x_{ij}^{k,q} = 0$ 。 $y_i^{k,l}$ :若在节点  $i$  由运输方式为  $k$  转换为运输方式  $l$ ,则  $y_i^{k,l} = 1$ ,否则  $y_i^{k,l} = 0$ 。 $c_{ij}^{k,q}$ :节点  $i \sim j$  选择运输方式为  $k$  的  $q$  路径时的单位运输费用。 $t_{ij}^{k,q}$ :节点  $i \sim j$  运输方式为  $k$  的  $q$  路径的运输时间。 $c_i^{k,l}$ :在节点  $i$  处,运输方式由  $k$  转到  $l$  的中转费用。 $t_i^{k,l}$ :在节点  $i$  处,运输方式由  $k$  转到  $l$  的中转时间。 $d_{ij}^{k,q}$ :节点  $i \sim j$  运输方式为  $k$  的  $q$  路径的运输距离。 $w_{ij}^{k,q}$ :节点  $i \sim j$  运输方式为  $k$  的  $q$  路径的承载能力。 $[a, b]$ :用户要求的到达期限。 $Q$ :待运输的货物总量。 $P$ :货物最多的换装次数。 $n$ :节点集合。 $k$ :运输方式集合。 $q$ :运输路径集合。

### 模型描述

$$\min z_1 = \sum_q \sum_k \sum_i \sum_n c_{ij}^{k,q} x_{ij}^{k,q} + \sum_k \sum_i \sum_n c_i^{k,l} y_i^{k,l} \quad (1)$$

$$\min z_2 = \max((\sum_q \sum_k \sum_i \sum_n t_{ij}^{k,q} x_{ij}^{k,q} + \sum_k \sum_i \sum_n t_i^{k,l} y_i^{k,l} - b), 0) + \max((a - \sum_q \sum_k \sum_i \sum_n t_{ij}^{k,q} x_{ij}^{k,q} - \sum_k \sum_i \sum_n t_i^{k,l} y_i^{k,l}), 0) \quad (2)$$

$$s.t. \quad \sum_q \sum_k x_{ij}^{k,q} = 1 \quad \forall i, j \in n \quad (3)$$

$$\sum_i \sum_j x_{ij}^{k,q} = 1 \quad \forall k \in k, \forall q \in q \quad (4)$$

$$\sum_{k,l} y_i^{k,l} = 1 \quad \forall i \in n \quad (5)$$

$$Q \leq \sum_k \sum_i \sum_n w_{ij}^{k,q} x_{ij}^{k,q} \quad \forall i, j \in n, \forall k \in k, \forall q \in q \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_n y_i^{k,l} \leq P \quad \forall k, l \in k \quad (7)$$

$$x_{ij}^{k,q}, y_i^{k,l} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

$$c_{ij}^{k,q}, d_{ij}^{k,q}, c_i^{k,l}, t_{ij}^{k,q}, t_i^{k,l}, a, b \geq 0 \quad (9)$$

### 模型说明

目标函数:式 (1)是最小化运输和转载费用;式 (2)是总运输时间尽量满足用户要求到达的期限;约束条件:式 (3)指两节点间只能选择一种运输方式和一条路径,式 (4)指货物在运输过程中不能分割,式 (5)指在某节点只能进行一次换装,式 (6)指节点  $i \sim j$  选择运输方式  $k$  和路径  $q$  的货物运量不能超出路径承载能力,式 (7)指运输过程的总换装次数不能超出规定要求,式 (8) (9)为变量的取值范围。

### 算法求解过程

#### 求解思路

由 1.5 节模型可知,本文所研究的问题是一类求解多目标、多权值、多约束的运输网络中两节点间最短路问题。该问题已被证明是 NP-hard 问题,因此采用智能启发式优化算法的求解效果会更好。

首先,本文所研究问题可以转换为三个相关并需要依次求解的子问题,即:a)选择由起点到终点所经过的中间节点序列,且使节点间不会形成回路;b)对已选定由起点到终点路径上的节点序列,选择节点间的运输方式,且使节点间运输方式的转载次数不超过规定的转载次数  $P$ ;c)对已选定由起点到终点路径上的节点序列,选择节点间既定运输方式下的运输路线,且使所选路线的承载能力满足货物运量的要求。

根据上述问题的求解特点,可采用主—从两级 (层) 的混合智能启发式优化方法对问题进行求解。主级采用编码简单、计算效率高的粒子群优化算法求解子问题 a);从级采用基于解空间参数化概率分布模型的蚁群优化方法求解子问题 b)和 c)。设计该主—从混合智能启发式优化算法需要解决三个关键问题:a)主级粒子向量的编码和解码方法;b)从级蚁群优化算法的蚂蚁遍历地图、局部和全局启发式信息的设计;c)主、从两级算法的协调机制。

主从混合粒子群—蚁群优化算法流程如图 1 所示。其中主级粒子群算法如图 2 (a) 所示,从级蚁群算法如图 2 (b) 所示。

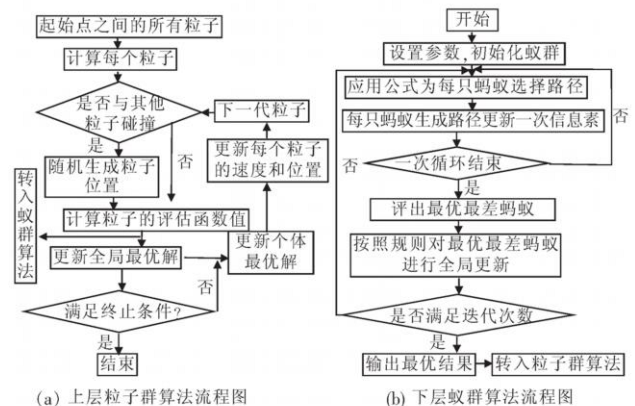


图 2 蚁群算法流程图

· 算法设计

2.2.1 PSO设计优化

粒子群优化算法 (PSO)是一种进化计算技术 (evolutionary computation),由 Eberhart等人于 1995年提出,源于对鸟群捕食行为的研究。

算法描述为:设搜索空间为  $D$  维,粒子数为  $m$ ,第  $r$  个粒子位置向量为  $X_r = (x_{r1}, x_{r2}, \dots, x_{rd}, \dots, x_{rD})$ ,速度向量为  $V_r = (v_{r1}, v_{r2}, \dots, v_{rd}, \dots, v_{rD})$ ,  $r = 1, \dots, m$ ,  $d = 1, \dots, D$ 。  $P_r = (p_{r1}, p_{r2}, \dots, p_{rd}, \dots, p_{rD})$  为粒子的历史最优位置向量 (即适应值最优的位置向量),  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd}, \dots, p_{gD})$  为全局最优位置向量,各粒子按式 (10)更新位置。

$$v_{rd} = v_{rd} + c_1 r_1 (p_{rd} - x_{rd}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{rd}), x_{rd} = x_{rd} + v_{rd} \quad (10)$$

其中:  $c_1$  为惯性因子;  $c_1, c_2$  为学习因子;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  的随机数。粒子位置和速度初始化随机产生,并按上述公式迭代,直到找到最优解为止。

根据求解问题的特点,按照运输网络 (图 3) 中节点总数  $n$  构造粒子  $r$  为一维向量且包含  $n$  个元素 (图 4),每个元素分别对应相应的节点,表示相应节点解码时的优先级。粒子群算法通过解码找到一条连通起点和终点的节点序列,并计算该通路的路径长度,再将其最优路径回传给蚁群算法,以求解最优的运输方式和运输路径组合。

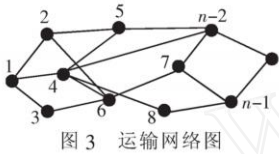


图 3 运输网络图



图 4 粒子向量元素结构

2.2.2 蚁群算法设计优化

为更好体现蚁群算法全局搜索的优点,避免早熟、搜索时间长的缺点,在算法设计中不仅集合最大-最小蚁群算法和最优-最差蚁群算法的优点,并在蚂蚁搜索过程中加入了信息素的局部更新,使得蚂蚁更快、更好地收敛到最优解。具体优化设计如下:

a)对路径选择的设计

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}(t) \cdot \eta_{ij}(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}(t) \cdot \eta_{is}(t)} & j \in allowed_k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

蚂蚁在路径选择过程中并不是惟一选择概率最大的路径,而是结合赌轮法,使蚂蚁以较大的概率选择概率最大的路径,但不排除选其他路径的可能,从而保证搜索的全面。

b)在蚂蚁构造路径的同时按式 (12)进行局部信息素更新,使相应的信息素量减少,更符合蚂蚁搜索过程,且可以有效避免蚂蚁收敛到同一路径。

$$(\tau_{ij} + 1) = (1 - \rho) \times (\tau_{ij} + 1) + \rho \quad (12)$$

c)每只完成蚂蚁循环后,不仅对最优蚂蚁的信息素加强,同时对最差蚂蚁的信息素进行削弱,增大最优、最差路径上信息素的差异,使搜索行为更快集中到最优路径。

蚂蚁搜索路径如图 5 所示。

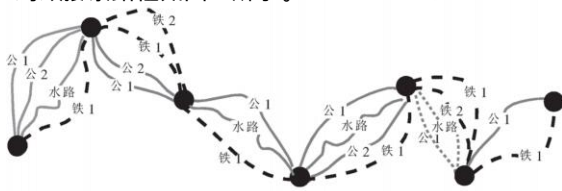


图 5 蚂蚁搜索路径图

2.2.3 评价函数的选取

对此类运输问题,本模型提出了运输费用最少和运输时间刚好满足客户要求的双目标,设计惩罚函数的概念处理实际运输时间和客户对运期的要求,将运输时间的目标转换为惩罚函数:

$$M \times \max((\sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{qj} \times x_{ik}^{qj} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{jl} \times y_{ik}^{jl} - b), 0) + M \times \max((\sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{qj} \times x_{ik}^{qj} - k \times \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{jl} \times y_{ik}^{jl}), 0) + \max((a - \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{qj} \times x_{ik}^{qj} - k \times \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{jl} \times y_{ik}^{jl}), 0) \times \max((a - \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{qj} \times x_{ik}^{qj} - \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{jl} \times y_{ik}^{jl} - b), 0) \quad (13)$$

其中:  $M$  为一个充分大的正数,于是将目标转换为

$$\min \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{qj} \times x_{ik}^{qj} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{jl} \times y_{ik}^{jl} + M \times \max((\sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{qj} \times x_{ik}^{qj} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{jl} \times y_{ik}^{jl} - b), 0) + \max((a - \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{qj} \times x_{ik}^{qj} - k \times \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ik}^{jl} \times y_{ik}^{jl}), 0)$$

式 (13)的含义是当实际运输时间大于或小于客户要求的期限,都会使得目标函数值非常大;当实际运输时间在客户要求期限内,式 (13)则不会有影响。

· 粒子群-蚁群算法步骤

双层粒子群-蚁群算法分为上下两部分,首先上层粒子群算法产生连通起点到终点的运输节点,下层应用蚁群算法找出此节点序列上最优的运输方式和运输路径的组合。具体算法如下:

a) PSO 相关参数和变量初始化;

b)设置蚁群算法相关参数,初始化每只蚂蚁的位置;

(a)按照概率选择式 (11)和赌轮法为每只蚂蚁选择路径;

(b)每只蚂蚁在构造路径的同时按式 (12)进行局部信息素的更新;

(c)循环执行 (a)和 (b),直到每只蚂蚁都生成一条完整的路径;

(d)按禁忌表记录计算每只蚂蚁的目标函数值,评出最优蚂蚁和最差蚂蚁;

(e)将本次迭代最优蚂蚁的路径按照式 (14)进行全局信息素更新;

$$(\tau, s) = (1 - \rho) \times (\tau, s) + \rho \times (\tau, s) \quad (14)$$

(f)将最差蚂蚁按照式 (15)进行全局信息素更新;

$$(\tau, s) = (1 - \rho) \times (\tau, s) - \rho \times C_{\text{worst}} / C_{\text{best}} \quad (15)$$

(g)循环 (b) ~ (g)直到满足结束条件;

c)调用蚁群算法得出每个粒子的适应度值,更新历史最优粒子位置向量  $p_r$  和全局最优粒子位置向量  $p_g$ ;

d)按照式 (10)对粒子速度向量和位置向量进行更新;

e)循环 b) ~ d)到满足结束条件,用下层蚁群算法得出最优解;

f)结束。

仿真实验

有一批货物,总量为 4 000 t,客户要求要在  $[65 \sim 85 \text{ h}]$  从 O 地运往 D 地,O、D 两地之间的运输网络及道路信息 (表 1)、换装信息 (表 2),由于货物原因要求换装次数不得超过两次,选取最佳运输节点,求解最佳的运输方式和运输路径组合使总费用最少,运输时间满足客户要求。

表 1 中给出了一个包括起点和终点共 11 个节点的运输网络,每两个节点间有 2、3 或 4 种运输方式,每种运输方式又有

数条运输路径可以选择,每条路径都有最大运输载重,且每两种运输方式之间换装存在换装费用。

表 1 运输网络信息

起始节点	终止节点	运输方式	最大载重/吨	运输时间/时	运输费用/元	起始节点	终止节点	运输方式	最大载重/吨	运输时间/时	运输费用/元
1	2	1	4 500	8	16 000	5	7	3	5 200	35	60 000
1	2	1	4 600	10	14 000	6	7	1	3 500	20	35 000
1	2	1	3 800	12	10 000	6	7	1	4 800	15	40 000
1	2	2	5 000	10	10 000	6	7	2	5 600	16	37 000
1	3	1	3 000	7	14 000	6	7	3	6 200	25	27 000
1	3	1	5 000	9.5	15 000	6	8	1	5 500	13	60 000
1	3	1	5 600	12	8 000	6	8	2	5 600	17	45 000
1	3	2	4 900	11	9 000	6	8	2	6 300	14	40 000
2	4	1	5 000	9	36 000	7	9	1	6 100	5	20 000
2	4	2	4 500	12	30 000	7	9	1	4 900	4	30 000
2	4	2	6 000	15	26 000	7	9	2	5 200	3	35 000
3	4	1	5 000	8	50 000	8	10	1	5 400	6	10 000
3	4	3	7 500	18	55 000	8	10	1	4 700	3	15 000
4	5	1	6 000	19	34 000	8	10	2	6 900	2.5	15 000
4	5	2	5 000	20	76 000	8	10	2	5 300	2	20 000
4	5	3	8 200	26	70 000	9	10	1	5 000	5	5 000
4	6	2	7 000	32	60 000	9	10	1	6 000	3	8 000
4	6	2	2 900	23	59 000	9	10	2	5 000	2.5	10 000
4	6	2	6 500	25	90 000	10	11	1	5 500	3	5 000
4	6	3	8 000	41	59 000	10	11	1	5 200	2	7 000
5	7	2	6 000	37	80 000	10	11	2	6 200	1.5	10 000
5	7	2	5 440	28	92 000	10	11	4	6 000	0.5	50 000

表 2 换装信息

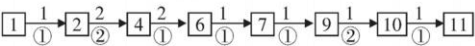
换装_From	To	换装费用/元	换装时间/h	换装_From	To	换装费用/元	换装时间/h
1	2	4.3	2.5	3	1	4.7	1.8
1	3	3	2	3	2	1.9	1.2
1	4	10	3	3	4	9	1.5
2	1	2.7	1.8	4	1	8.5	2
2	3	2.5	1.2	4	2	7	2
2	4	8	3	4	3	8	3

用粒子群—蚁群算法求解结果如表 3 所示。

表 3 粒子群—蚁群求解结果

运输费用/元	运输时间/h	换装次数/次	运行时间/s
169 000	83	2	43

所选节点、运输方式、运输路径如下：



其中：1)为公路,2)为铁路,3)为水路,4)为航空。箭头之上为所选运输方式,之下为所选运输路径。

经过实验程序所定最优参数(表 4)。其中：为启发式因子；为期望启发式因子；为信息素挥发系数；为最差蚂蚁的削弱程度；min为信息素下限；max为信息素上限；为惯性因子； $c_1$ 为自身学习因子； $c_2$ 为全局学习因子； $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 为[0,1]的随机数； $n$ 为粒子数。

表 4 程序参数

下层蚁群	参数				
	算法	2	5	0.05	0.2
				min	max
				0	1
上层粒子群					
参数					
算法		$c_1$	$c_2$	$\eta_1$	$\eta_2$
		0.9~0.4	2.8	1.3	0.7
				0.3	30

各运行 15 次与蚁群算法和遗传算法比较,如表 5 所示。

表 5 结果比较

算法	运输时费用/元	运输时间/h	换装次数/次	运行时间/s
粒子群—蚁群	169 000	83	2	43
蚁群	18 500	85	2	77
遗传	178 000	76	2	68

从表 5 可以看出,基于 PSO-ACO 算法的优化方案相比蚁群算法和遗传算法的优化方案,主要有以下优点：

a)在同样的条件下,最佳优化值全局优化度最高,优化结果令人满意。

b)不仅克服了遗传算法和蚁群算法易早熟收敛的弱点,而且相对于蚁群算法,明显改善了算法的时间性能。虽然运输时间大于遗传算法,但在客户可以接受的范围内,不影响最优解的评价。

结束语

针对多式联运中运输路径和运输过程多样化的实际需求以及客户对货物运输准时性的要求,本文提出了运输方式和运输路径集成优化模型,设计粒子群—蚁群双层优化算法对模型求解,解决了多节点、多方式、多路径的运输优化问题,得出优化的运输方案,通过实例对模型及算法进行检验,表明其结果优于蚁群算法和遗传算法,为承运商选择运输过程提供了参考方法。本文在研究过程中没有考虑货物的中途卸载,以及运输费用随时间季节的变化等因素,这些问题还有待进一步研究。

参考文献：

[1] ZLATOPER T J, AUSTR IAN A. Freight transportation demand: a survey of recent econometric studies[J]. Transportation Journal, 1989, 16(1): 27-46.

[2] HARPER D V, EVERS P T. Competitive Issues in intermodal rail-road-truck service [J]. Transportation Journal, 1993, 32(3): 31-45.

[3] PATTIC N. Market area of rail-truck terminals: pertinence of the spatial theory[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 1997, 31(2): 109-127.

[4] LOZANO A, STORCH I G. Shortest viable path algorithm in multimodal networks [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(3): 225-241.

[5] ZILASKOPOULOS A, WHITNEY W. An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 125(3): 486-502.

[6] BOUSSEDJRA M, BLOCH C, EMOUDNIA. An exact method to find the intermodal shortest path [C] // Proc of IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control Taiwan: [s n], 2004: 1075-1080.

[7] 王涛,王刚. 一种多式联运网络运输方式的组合优化模型 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(10): 46-50.

[8] 魏众,申金生,黄爱玲,等. 多式联运的最短时间路径—运输费用模型研究 [J]. 中国工程科学, 2006, 8(8): 61-64.

[9] 孙华灿,李旭宏,陈大伟,等. 综合运输网络中合理路径优化模型 [J]. 东南大学学报, 2008, 38(5): 873-877.

[10] 贺竹馨,孙琳岩,李晓宏. 时效性物流联运方式选择模型及其算法 [J]. 管理科学, 2007, 20(1): 8-12.

[11] MURAD B, AZEDINE B, HICHAM M. Object modeling and path computation for multimodal travel systems[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175(3): 1705-1730.

[12] QULi-li, CHEN Yan, MU Xiang-wei. A transport mode selection method for multimodal transportation based on an adaptive ANN System [C] // Proc of the 4th International Conference on Natural Computation 2008.

[13] XIA Qing-lan. Interior regularity of optimal transport paths[J]. Calculus of Variations and Partial Differential Equations, 2004, 20(3): 283-299.

[14] MONZÓN A, RODRIGUEZ-DAPENA A. Choice of mode of transport for long-distance trips solving the problem of sparse data[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2006, 40(7): 587-601.

[15] 康凯,牛海蛟,朱越杰,等. 基于粒子群蚁群算法求解运输方式与运输路径集成优化问题 [J]. 物流工程与管理, 2009, 31(10): 61-65.

[16] 张维存,康凯. 蚁群—粒子群算法求解多模式资源受限项目调度问题 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(34): 213-216.