

多起讫点货物转运配送车辆调度模型及其粒子群、蚁群算法混合求解

王雷震^{1,2}, 汪定伟¹, 王素欣²

1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学秦皇岛分校, 河北 秦皇岛 066004

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273203)

通信作者: 王素欣, wsx96@126.com 收稿/录用/修回: 2017-01-23/2017-06-13/2017-06-29

摘要

为使多起讫点货物转运配送车辆调度结果全局最优, 建立多起讫点车辆调度模型. 该模型求解过程是先由粒子群算法的粒子位置向量, 得到每个货物的转运点及货物转运前后运货的车辆, 再把转运点加入到蚁群算法的禁忌表中, 用蚁群算法优化货物转运前、转运后的车辆路径, 然后粒子群算法根据优化目标对粒子进行评价筛选, 重复执行以上步骤直到满足终止条件. 该算法使所有车辆对所有货物的转运点及车辆路径进行优化, 货物转运点的位置和数量是变化的, 易于实现最优解. 实例求解结果表明货物转运配送得到的车辆总路径优于货物不转运配送得到的结果.

关键词

多起讫点
转运配送
车辆调度问题
粒子群算法
蚁群算法

中图分类号: U4

文献标识码: A

Study of Multi-depots Goods Transshipment Vehicle Scheduling Problem Model and Its Particle Swarm and Ant Colony Optimization Hybrid Arithmetic

WANG Leizhen^{1,2}, WANG Dingwei¹, WANG Suxin²

1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China

Abstract

To obtain a global solution to the multi-depots goods transshipment vehicle scheduling problem (VSP), in this study, we established VSP models. The optimization course is as follows: First, set up a particle position vector to obtain a goods transshipment point and then assign goods to vehicles. Second, establish a Tabu list for the ant colony optimization (ACO) to obtain a vehicle route. The particle swarm arithmetic then evaluates and filters the vehicle scheduling results by optimization, which continues until it meets the terminate qualification. The hybrid arithmetic optimizes the transportation point and vehicle route, and the position and number of the transportation point are changeable, which makes it easy to obtain a global solution. Simulation results show that the hybrid arithmetic is effective for the multi-depots goods transshipment vehicle scheduling problem.

Keywords

multi-depots;
transfer transportation
distribution;
vehicle scheduling problem
(VSP);
particle swarm optimization
(PSO);
ant colony optimization (ACO)

0 引言

货物转运配送车辆调度问题处理方法比不转运车辆调度更复杂, 学者对此问题进行研究并且取得一些成果.

在车辆调度的周期性方面, 杨丰梅等^[1]对多期单产品、单期多产品的物流问题分别建立数学模型, 采用动态规划法、结合两阶段法与分支定界法的混合算法求解模型, 模型中转运中心的位置和数量是固定的. Mirabi^[2]提出混合电磁算法(hybrid electromagnetism algorithm)解决多车场周期性车辆路径问题, 在电磁解结构中混合模拟退火机制, 循环过程中应用邻域搜索技术. Rahimi-Vahed^[3]用路径重新链接算

法(path relinking algorithm)对多车场周期性车辆路线问题进行研究. Hemmelmayr^[4]对垃圾中转的周期车辆调度问题(periodic vehicle routing problem with intermediate facilities, PVRP-IF)采用变邻域搜索(variable neighborhood search)和动态规划(dynamic programming)的混合算法.

在参与货运的车辆类型方面, Stenger^[5]用自适应变邻域搜索算法(adaptive variable neighborhood search algorithm)解决私人车队和公共承运人多配送中心车辆调度问题(multi-depot vehicle routing problem with private fleet and common carriers). Kergosien^[6]研究了法国 Tours 综合医院(Hospital Complex of Tours(France))的物流问题, 采用遗传算法和禁忌搜索算

法联合求解带时间窗、多种车型、多车场、多商品的车辆调度问题. Adelzadeh^[7]对带模糊时间窗、混合车型的车辆路径问题建立多车场车辆调度问题的数学模型,采用启发式方法对问题进行求解.

Contardo^[8]对有容量和行驶里程限制的多车场车辆调度问题进行研究,并提出精确算法(exact algorithm)进行优化,研究中的精确算法不适用于大规模的优化问题.

在车辆调度的时间窗方面,崔妍^[9]建立带有模糊处理时间且考虑中转发车时间的单点到多点多任务第四方物流路径问题模糊规划模型,模型求解过程是先将问题转化为清晰等价模型,然后对清晰化的模型设计蚁群优化算法进行求解.模型中的转运节点是从有限的固定节点中进行选择.

在回收物流方面,Peira^[10]研究了可回收垃圾收集系统的车辆路径问题,为物流网络界定了服务区域和车辆的路线,采用分割式求解方法(decomposition solution method)优化求解. Pereira^[11]对可回收垃圾系统中的车辆调度问题,建立多目标、多车场的车辆调度模型,采用数学的方法对车辆路径进行优化.

在车辆路径是否为开环方面,曾正洋^[12]构建开闭混合式两级车辆路径问题的数学模型.远程中心仓库的物资必须先配送至外围的中转站,再转运至最终需求点,第1级车辆在完成配送任务后无需返回中心仓库或原路返回.

在优化算法方面,Rodrigues^[13]将模拟退火算法用于车场位置安排以及车辆路径选择. Luo^[14]提出改进混合蛙跳算法(shuffled frog leaping algorithm, SFLA)及其多阶段模型解决多车场车辆路径问题,为提高 SFLA 局部搜索能力,加快收敛速度,将幂律极值优化邻域搜索引入优化算法. He^[15]提出带有可变集群分组的禁忌搜索算法(A Tabu search algorithm with variable cluster grouping, TSVCG)优化多车场车辆路径问题,优化过程先用可变集群分组将复杂的多车场车辆调度问题转换为单车场车辆路径问题,然后应用禁忌搜捕算法解决单车场车辆调度问题,此研究中存在的问题是单个车场最优,不能代表多个车场的整体也是最优. Wang^[16]提出云自适应粒子群算法(cloud adaptive particle swarm optimization, CAPSO),利用不同的惯性权重产生不同分组的方法,均衡局部和整体的搜索能力,解决多车场车辆调度问题. Demirel^[17]用蚁群优化算法解决多车场车辆调度问题. Vidal^[18]等采用动态规划方法进行车辆路径优化. Karakatic^[19]用遗传算法解决多车场车辆调度问题. Escobar^[20]采用混合粒子禁忌搜索算法(hybrid granular Tabu search algorithm)解决多车场车辆调度问题. 裴振兵^[21]针对传统蚁群算法在构造解的过程中存在收敛速度慢且容易陷入局部最优的问题,在蚁群搜索路径过程中提出通过建立信息素启发式因子 α 和期望启发式因子 β 的互锁关系,动态自适应调整 α 和 β ;其次对距离启发式因子 $\eta_{ij}(t)$ 进行重新定义,通过引入不同客户间的“偏好力”提高算法的搜索效率及实用性.

以上研究货物存在的问题如下:

1) 货物转运点的设置及数量是固定的,而货物信息是随时动态变化的,如果转运点的位置及其数量根据货物

信息的变化而变化,更容易实现全局最优.

2) 没有研究物流节点之间不同性质货物的对流问题.

3) 没有解决物流节点被多辆车或一辆车的多次访问问题.

4) 车辆的货物载重量是单调的递增或递减,不能进行在车辆行驶过程中进行货物的随时装卸.

5) 优化过程中,把多车场车辆调度问题转换为单车场车辆路径问题进行优化,虽然能做到每个车场的车辆路径最优,但不能代表所有车场的整体车辆路径最优,也就是局部最优不代表整体最优.

本文构建多起讫点货物转运配送车辆调度模型,混合粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)、蚁群算法(ant colony optimization, ACO)求解模型,充分利用货物和车辆资源.

1 多起讫点车辆调度模型

多起讫点的车辆运输模式见图1,横坐标代表车辆经过的节点顺序,纵坐标表示车辆运输过程中的载重量.

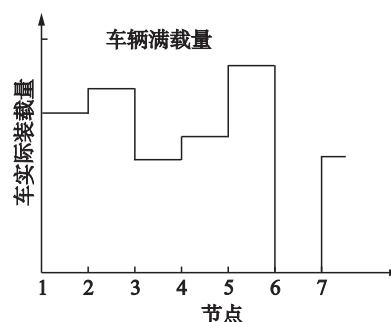


图1 车辆货物运输模式

Fig.1 Vehicle loading mode

多起讫点车辆货物运输模式的特点如下:

1) 车辆根据节点间的货运信息进行货物装卸运输,充分整合货物和车辆资源.

2) 车辆的货物载重量随货物的装卸而上下波动,货物载重量不是单纯地上升或下降.

1.1 模型参数标定

参数标定:路网 $G=(V, A)$,其中 V 为网络图中的所有节点集,节点 $i, j, u \in V$, A 为网络图中的所有弧; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的距离;车辆类型总数为 K ,车辆类型 $k \in K$, L^k 为 k 类型车辆的车辆总数, l^k 表示 k 类型车辆的序列号, $l^k \in L^k$; $x_{ij}^{l^k}$ 为车辆 l^k 是否从节点 i 直接载向节点 j ,是为1, 否为0;用 O_{ij} 表示节点 i 送往节点 j 的货物,这种表示的订单关系见图2,图2中的箭头由货物起点指向终点,图中货物 $O_{i(j+4)}$ 在节点 $j-2$ 被转运; q_{ij} 表示货物 O_{ij} 的重量; Q_v^k 为 k 类型车辆的荷载, Q_o 为货物的总重量; $q_j^{l^k}$ 为配送车辆 l^k 离开节点 j 时的车上货物总重量; $L_{\max}^k$ 为车辆出行的最大里程; $o_{ij}^{l^k}$ 表示 O_{ij} 是否由车辆 l^k 运输,是取1, 否取0.

图2中节点的数量、位置、货物需求关系是变化的,需要根据节点之间的货运关系进行车辆调度;节点货物如

果超出一辆车的载重量,节点可被多次访问;货物可以被转运,且货物转运点的数量和位置不确定。

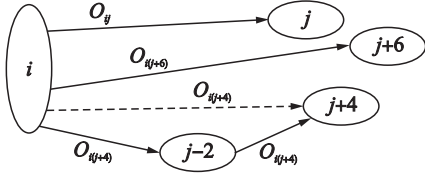


图2 节点间订单的表示

Fig.2 Representation of freight relationship between nodes

1.2 构建车辆调度模型

建立系统优化目标函数表示为

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{l^k \in L^k} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (d_{ij} x_{ij}^{lk}) \quad (1)$$

约束条件:

$$0 < q_{ij} \leq Q_v^k \quad (2)$$

$$0 \leq q_j^{lk} \leq Q_v^k \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (d_{ij} x_{ij}^{lk}) \leq L_{\max}^{lk} \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} q_{ij} = Q_o \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} o_{ij}^{lk} \geq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} o_{ij}^{lk} \geq 1 \quad (7)$$

$$1 \leq \sum_{l^k \in L^k} o_{ij}^{lk} \leq 2 \quad (8)$$

如果 $x_{ij}^{lk} = 1$

$$q_j^{lk} = q_i^{lk} - \sum_{i \in V} o_{ij}^{lk} q_{ij} + \sum_{u \in V} o_{ju}^{lk} q_{ju} \quad (9)$$

式(1)~式(7)是常规的车辆调度模型的目标函数及其约束条件,其中式(1)是将出行距离最短作为最优目标;式(2)、式(3)表示货物 O_{ij} 的重量和车上货物重量 q_j^{lk} 在车的载重量 Q_v^k 范围之内;式(4)体现车辆最大行驶里程限制;式(5)表示车辆需要运送的货物总量 Q_o 等于各个节点需要运送的货物量 q_{ij} 之和。

式(6)~式(9)是体现多起讫点货物转运配送车辆调度约束条件,其中式(6)、式(7)表示货物起始、终止节点可有多于一辆车进行配送服务;式(8)表示货物的转运情况,式中的 $1 \leq \sum_{l^k \in L^k} o_{ij}^{lk}$ 表示货物一定会被运送, $\sum_{l^k \in L^k} o_{ij}^{lk} \leq 2$ 表示货物最多被转运一次;式(9)体现了车辆进出节点载重量变化的情况,当 $x_{ij}^{lk} = 1$ 时,离开点 i 的货物重量 q_i^{lk} 减去在节点 j 卸掉的货物重量 $\sum_{i \in V} o_{ij}^{lk} q_{ij}$, 加上节点 j 装载的货物重量 $\sum_{u \in V} o_{ju}^{lk} q_{ju}$, 就等于车辆 l^k 离开节点 j 时的货物总重量 q_j^{lk} 。

模型中的式(1)~式(6)属于常规函数,式(7)~式(9)是为多起讫点货物转运所写出的函数。

1.3 模型的创新点

车辆调度模型的创新点如下:

1) 节点方面:每个节点既可以运入货物,也可以运出货物,节点之间还可以有货物对流问题(最好是不同性质

货物的对流,不然就出现了货物的无效运输问题);节点数量和位置、节点间货物需求关系是变化的,需给出节点之间的货运关系、车辆信息进行车辆调度。

2) 车辆方面:单车所走路径的总装载量可大于车辆的载重量(通过货物的随时装卸实现,不存在超载现象),可调用的车辆可以是空车或已经有货的车,同一辆车可进行多次配送。

3) 车与节点是多对多的关系:一个节点能被一辆以上的车服务,避免超载现象;同一辆车也可以服务多个节点,充分利用车辆的载重量。

4) 转运问题:任何一个网络节点都可能成为货物的转运点,转运点数量和位置是不确定的,这需要通过优化货物分配到车辆的运输关系确定。

2 模型的优化

2.1 模型优化的算法分析

本研究的车辆调度模型的优化,需要解决的问题如下:

- 确定货物的转运点;
- 货物转运前后运货的车辆,也就是货物分配到车辆;
- 每辆车的车辆路径。

车辆调度问题的解决方法如下:

1) 确定货物的转运点、把货物分配到车辆属于分配问题,遗传算法、粒子群算法均属于用一个矩阵或向量表示问题分配的一个解的算法。由于粒子群算法运算简单(迭代运算中只涉及到初等运算)、优化方向性强(随着迭代过程的进行,每个粒子的位置向量能通过获取群体历史经验和个体历史经验,使优化的方向不是随机的,而是逐步向最优位置靠近)的特点,本论文采用粒子群算法解决分配问题。

2) 每辆车的车辆路径优化问题,是根据车辆上所装载货物的起讫点及货物的重量(或容积)情况,优化出合理的车辆送货路线。车辆送货的过程和蚁群算法中的蚂蚁寻找食物的过程极其相似,且蚁群算法具有正反馈性(通过不断强化最优解的信息素,加快算法的收敛速度)、较强的鲁棒性(对基本蚁群算法模型稍加修改,便可以应用于其他问题)、并行计算(是一个分布式的多 agent 系统,它在问题空间的多点同时开始进行独立的解搜索,不仅增加了算法的可靠性,也使得算法具有较强的全局搜索能力)、自组织(当算法开始的初期,单个的人工蚂蚁无序的寻找解,算法经过一段时间的演化,人工蚂蚁间通过信息激素的作用,自发的越来越趋向于寻找到接近最优解的一些解,这就是一个无序到有序的过程),所以车辆路径优化问题可采用蚁群算法解决。

3) 模型的求解采用粒子群算法、蚁群算法混合优化算法求解,优化过程是先由粒子群算法的粒子位置向量,得到每个货物的转运点及货物转运前后运货的车辆,再把转运点加入到蚁群算法禁忌表,这里建立的禁忌表是矩阵的形式,用蚁群算法优化货物转运前、转运后的车辆路径,然后粒子群算法根据优化目标对粒子进行评价筛选,重复执行以上步骤直到满足终止条件。

粒子群算法、蚁群算法混合优化算法在其他的文献中也有研究.例如,姜文英^[22]在船舶机舱规划方法中,采用粒子群算法求解设备的布置,修改的蚁群算法求解管路的敷设,通过建立统一的目标函数,使两个目标共同达到最优.张超^[23]采用一种全局异步与精英策略相结合的信息素更新方式,同时合理减少蚁群算法被粒子群算法调用一次所需的迭代代数.本文和这些文献的主要区别在于粒子的位置向量、蚁群的禁忌表的表达方式方面.

2.2 粒子群算法粒子表达方式的改进

粒子群算法^[24]由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出,该算法模拟鸟集群飞行觅食的行为,通过鸟之间的集体协作使群体达到最优目的.

本文构造一个三行、待运货物数量个列的粒子位置向量,见图 3.在图 3 中,粒子的每列对应一个 O_{ij} ,第一行表示货物转运点,其取值为货物起点的随机值;第二行表示货物在转运前货物的运送车辆,第三行表示货物在转运后货物的运送车辆.第二行、第三行的取值为运送此货物的车辆 l^k .即用 N_0 维粒子的位置向量表示出货物的转运点及 O_{ij} 分配到车辆的解.

在图 3 中的粒子随机表达方式中,我们可以看出货物 O_{ij} 的转运点和 O_{ij} 起点相同,所以货物 O_{ij} 没有转运, O_{ij} 的运送车辆没有发生改变. $O_{(i-2)j}$ 的货物转运点为 $i-4$,转运前运送车辆为 l^k-3 ,转运后运送车辆为 l^k ,即转运前后的运送车辆发生了改变. $O_{(i-2)j}$ 和 $O_{i(j+3)}$ 的转运点相同.

上面的粒子构造方法能得到货物的转运点及货物转运前后运货的车辆,但得不到货物转运前、转运后的车辆路径,下面就对车辆路径进行优化.

O_{ij}	O_{ij}	$O_{(i-2)j}$	$O_{(i-4)(j+6)}$	$O_{i(j+3)}$	...	O_{iu}
O_{ij} 起点	i	$i-2$	$i-4$	i	...	j
O_{ij} 终点	j	j	$j+6$	$j+3$	...	u
O_{ij} 转运点	i	$i-4$	$i-3$	$i-4$	...	$i+1$
O_{ij} 转运前运货车辆	l^k	l^k-3	l^k+2	l^k	...	l^k-3
O_{ij} 转运后运货车辆	l^k	l^k	l^k+1	l^k-3	...	l^k

图 3 粒子的表达方式

Fig.3 Particle expression

2.3 蚁群禁忌表的改进

蚁群算法^[25]是意大利学者 Dorigo、Maniezzo、Colomni 提出的一种基于种群的模拟进化算法.在应用蚁群算法解决路径问题时,为防止节点重复或遗漏访问,常用一维禁忌表表示蚂蚁需要访问的节点访问状态.

为求解本研究的车辆调度模型,将一维禁忌表改为二维数组,数组的每列对应一个 O_{ij} .数组共有两行,其设置分为两个阶段,第一个阶段对应货物转运前的访问状态,第二个阶段对应货物转运后的访问状态,具体情况如下.

2.3.1 转运前禁忌表访问状态设置

转运前禁忌表访问状态设置见图 4,禁忌表第一行对应 O_{ij} 起点车辆访问状态,第二行对应 O_{ij} 转运点的车辆访问状态,节点被访问过状态置为 0,否则为 1.

为防止节点访问错误,禁忌表设置如下:

1) 若 O_{ij} 还没有装车,其转运节点不能被访问,可设置其访问状态为已被访问过,即 O_{ij} 状态置为 $\{1, 0\}$,是蚂蚁在搜索路径时不搜索转运点,如图 4 中 O_{ij} 的状态设置;

2) 当 O_{ij} 起点被车辆访问后, O_{ij} 状态置为 $\{0, 1\}$,如图 4 中的 $O_{(i-2)j}$ 状态设置;

3) 当 O_{ij} 转运点被车辆访问后, O_{ij} 状态置为 $\{0, 0\}$,如图 4 中的 $O_{(i-4)(j+6)}$ 状态设置.

O_{ij}	O_{ij}	$O_{(i-2)j}$	$O_{(i-4)(j+6)}$	$O_{i(j+3)}$	...	O_{iu}
O_{ij} 起点	i	$i-2$	$i-4$	i	...	j
O_{ij} 终点	j	j	$j+6$	$j+3$	...	u
O_{ij} 转运点	i	$i-4$	$i-3$	$i-4$	...	$i+1$
O_{ij} 起点访问状态	1	0	0	1	...	1
O_{ij} 转运点访问状态	0	1	0	0	...	0

图 4 转运前禁忌表的状态设置

Fig.4 Tabu list expression before transport

2.3.2 转运后禁忌表访问状态设置

转运后禁忌表访问状态设置见图 5,禁忌表第一行对应 O_{ij} 转运点的车辆访问状态,第二行对应 O_{ij} 终点的车辆访问状态.禁忌表状态的设置与第一个阶段禁忌表访问状态设置类似,只需要把里面的起点改成转运点,转运点改成终点.

O_{ij}	O_{ij}	$O_{(i-2)j}$	$O_{(i-4)(j+6)}$	$O_{i(j+3)}$	...	O_{iu}
O_{ij} 转运点	i	$i-4$	$i-3$	$i-4$	...	$i+1$
O_{ij} 转运点访问状态	1	0	0	1	...	1
O_{ij} 终点访问状态	0	1	0	0	...	0

图 5 转运后禁忌表的状态设置

Fig.5 Tabu list expression after transport

2.4 粒子群、蚁群算法混合算法实现过程

混合算法见图 6,其中蚁群算法流程图见图 7.

2.5 优化求解的创新之处

粒子群、蚁群算法混合求解的创新之处如下:

1) 粒子群算法粒子位置向量的改进:本文构造的粒子位置向量不是简单的一维向量,而是一个三行、待运货物数量个列的粒子位置向量,粒子的每列对应一个 O_{ij} ,第一行表示货物转运点,第二行表示货物在转运前货物的运送车辆,第三行表示货物在转运后货物的运送车辆.即用 N_0 维粒子的位置向量表示出货物的转运点及 O_{ij} 分配到车辆的解;

2) 蚁群算法禁忌表的改进:将一维禁忌表改为二维数组,数组的每列对应一个 O_{ij} .数组共有两行,其设置分为两个阶段,第一个阶段对应货物转运前的访问状态,第二个阶段对应货物转运后的访问状态;

3) 优化求解实现过程方面:先由粒子群算法的粒子位置向量,得到每个货物的转运点及货物转运前后运货的车辆,再用蚁群算法优化货物转运前、转运后的车辆路径,然后粒子群算法根据优化目标对粒子进行评价筛选,重复执行以上步骤直到满足终止条件.该算法使所有车辆对所有货物的转运点及车辆路径进行优化,货物转运点的位置和数量是变化的,优化过程可减少局部最优,实现全局最优.

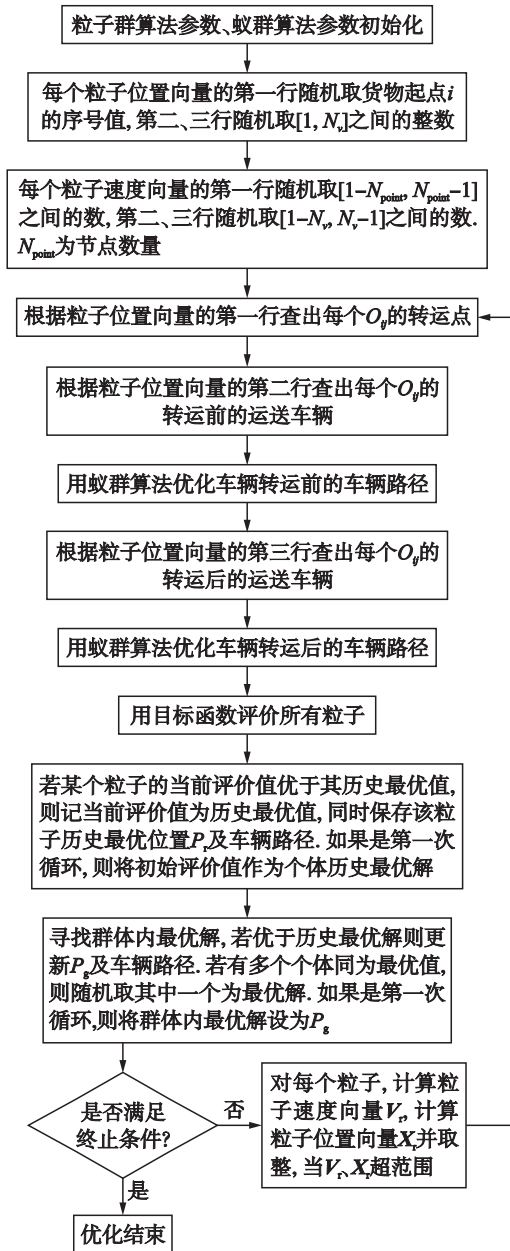


图6 优化过程流程图

Fig.6 Flow chart for optimization process

3 仿真实验

3.1 案例

某一地区在某一时刻的货运关系简化图如图8所示, 货物的重量及起讫点信息见表1. $Q_v^k = 10\text{ t}$, $L_{\max}^k = 70\text{ km}$, 本实例中, 简化为同一类型的车辆. 根据构建的模型及其求解方法, 对车辆进行调度.

3.2 仿真结果及其分析

用Java实现了货物转运配送车辆调度模型的优化求解. 根据表1中的17个货物, 构造了17列3行的粒子向量, 兼顾解的多样性和优化速度, 粒子数可采用空间维数的6~8倍, 即粒子数的取值范围为102~136, 本论文采用120个粒子. 粒子群算法中惯性因子 $w = 0.729$, 加速因

子 $c_1 = c_2 = 1.494\ 45$, 迭代20次. 蚁群算法中的轨迹相对重要性 $\alpha = 1$, 能见度相对重要性 $\beta = 5$, 轨迹持久性 $\rho = 0.7$, 蚂蚁留下的轨迹量常数 $Q = 100$, 迭代20次.

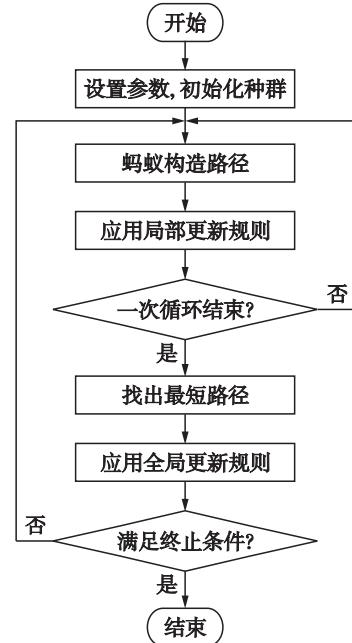


图7 用于VRP问题的蚁群优化流程图

Fig.7 Ant colony optimization flow chart for VRP

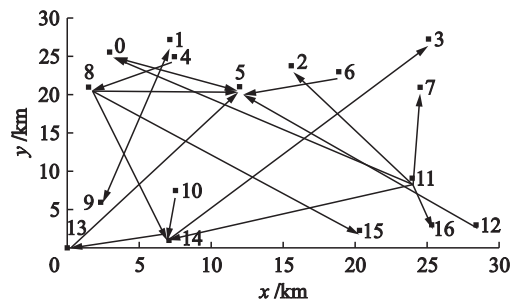


图8 货物起、终点关系图

Fig.8 Freight relationship diagram

表1 货物信息

Tab.1 Cargo information

货物	货物 起点	货物 终点	质量 /t	货物	货物 起点	货物 终点	质量 /t
$O_{(0)(5)}$	0	5	2	$O_{(11)(13)}$	11	13	4.7
$O_{(8)(5)}$	8	5	3	$O_{(1)(9)}$	1	9	1.4
$O_{(13)(5)}$	13	5	2.6	$O_{(9)(1)}$	9	1	4.3
$O_{(12)(5)}$	12	5	3.5	$O_{(14)(3)}$	14	3	1.6
$O_{(6)(5)}$	6	5	2	$O_{(10)(14)}$	10	14	2.1
$O_{(11)(16)}$	11	16	4.2	$O_{(8)(14)}$	8	14	1.2
$O_{(11)(7)}$	11	7	1.4	$O_{(8)(15)}$	8	15	2
$O_{(11)(2)}$	11	2	0.6	$O_{(4)(8)}$	4	8	3.3
$O_{(11)(0)}$	11	0	3.8				

3.2.1 仿真结果

由于车辆调度问题解的多样性, 每次优化的结果经常不同, 本论文的算法对模型优化20次, 选取的最优的结果见图9, 被转运的货物已经用粗线框表示出来.

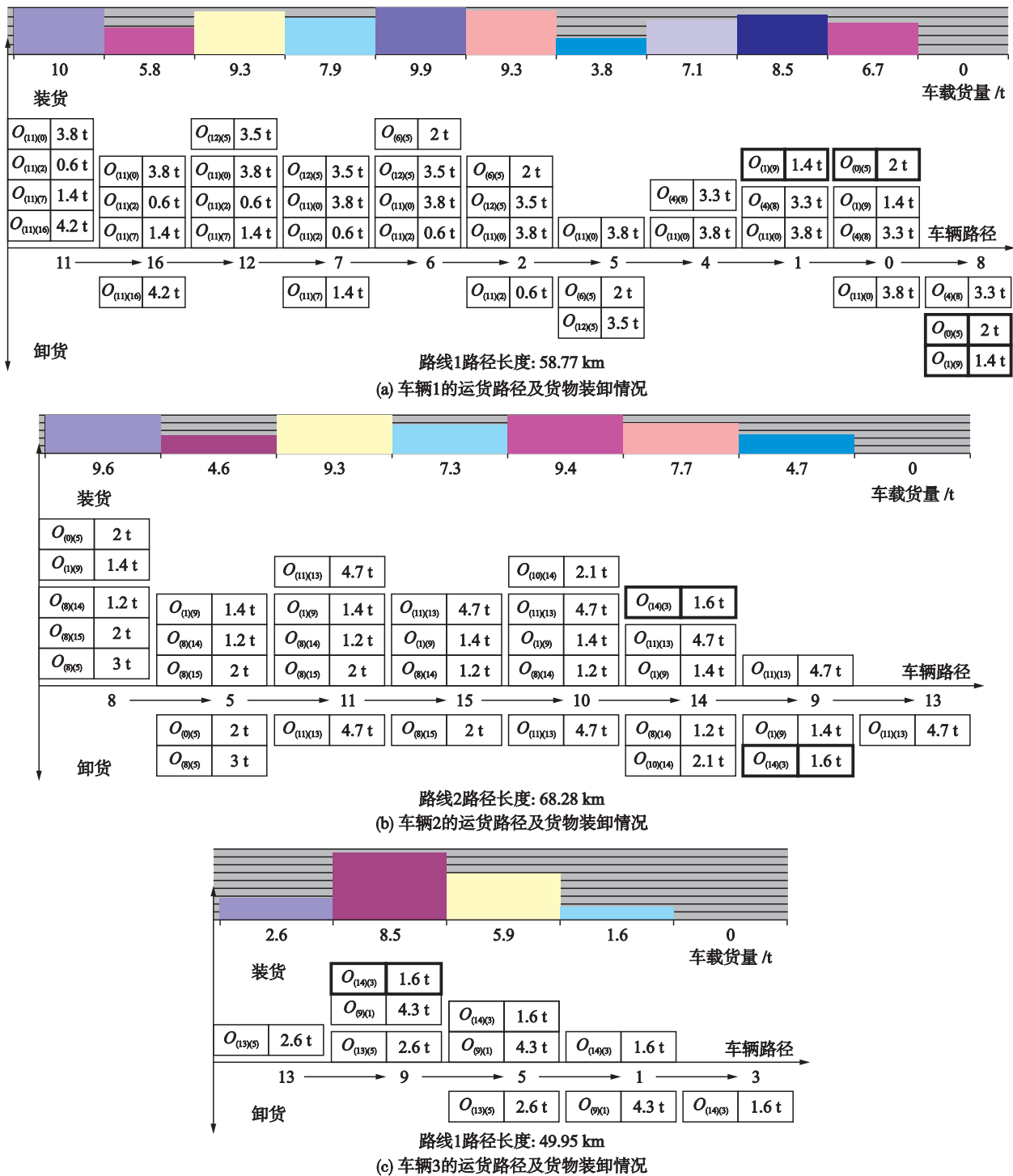


图9 车辆路径及货物装卸情况(粒子群、蚁群混合算法)

Fig.9 Vehicle route and cargo Load information by PSO & ACO

在图9中,横坐标表示车辆通过节点的顺序,在每个节点上面,有车辆在此节点的装货信息及车辆已经装有的货物信息,其中“装货信息”在“车辆已经装有的货物信息”上面.如图9(a)的节点“0”,在节点“0”的上面,有 $O_{(0)(5)}$ 、 $O_{(1)(9)}$ 、 $O_{(4)(8)}$ 这3个货物,其中 $O_{(1)(9)}$ 、 $O_{(4)(8)}$ 是车辆到节点“0”之前车上已有的货物, $O_{(0)(5)}$ 在 $O_{(1)(9)}$ 、 $O_{(4)(8)}$ 上面,有一段距离,表示 $O_{(12)(5)}$ 是在节点“12”新装上车的货物.

在图9(b)节点“9”的下面,有 $O_{(1)(9)}$ 、 $O_{(14)(3)}$ 这2个货,表示在节点“9”要卸下 $O_{(1)(9)}$ 、 $O_{(14)(3)}$,其中 $O_{(14)(3)}$ 的线框加粗,表示在节点“9”卸下的 $O_{(14)(3)}$ 需要被转运走,也就是节点“9”不是 $O_{(14)(3)}$ 的最终目的地,被图9(c)中的车辆在节点“9”装车运到货物带的目的节点“3”,节点“9”是货物 $O_{(14)(3)}$ 的转运点.

在图9中,受车载重量约束,节点“11、13、5、1、8、

9”均被多次访问,节点“8”是货物 $O_{(0)(5)}$ 、 $O_{(1)(9)}$ 的转运点,节点“9”是货物 $O_{(14)(3)}$ 的转运点,转运点的数量及位置是根据货物信息及地理位置优化产生的,不是固定的转运点,也不是固定数量的转运点,更适合车辆的动态调度.图9中的柱状图载重量变化现象和货物的装卸有关.

3.2.2 仿真转运与不转运结果的对比分析

参数设置和循环次数相同,得到的不转运车辆优化的结果和本论文转运优化的结果的比较见表2,表2中总路径差异是由车辆运货模式不同造成的.由于转运的存在,一些货物可以被一辆车运送到另外一辆车的路径上,可节

省一辆车或多辆车行驶里程.

表2 优化结果的对比

Tab.2 Optimal results comparison

车辆运货模式	总路径 /km	车辆数 /辆
货物转运 (PSO&ACO)	177	3
货物转运 (GA&ACO)	201.64	3
货物不转运 (PSO&ACO)	204.87	3

3.2.3 本研究算法与遗传、蚁群混合算法优化结果的对比
在遗传 (geneticalgorithm,GA)、蚁群的混合算法的优

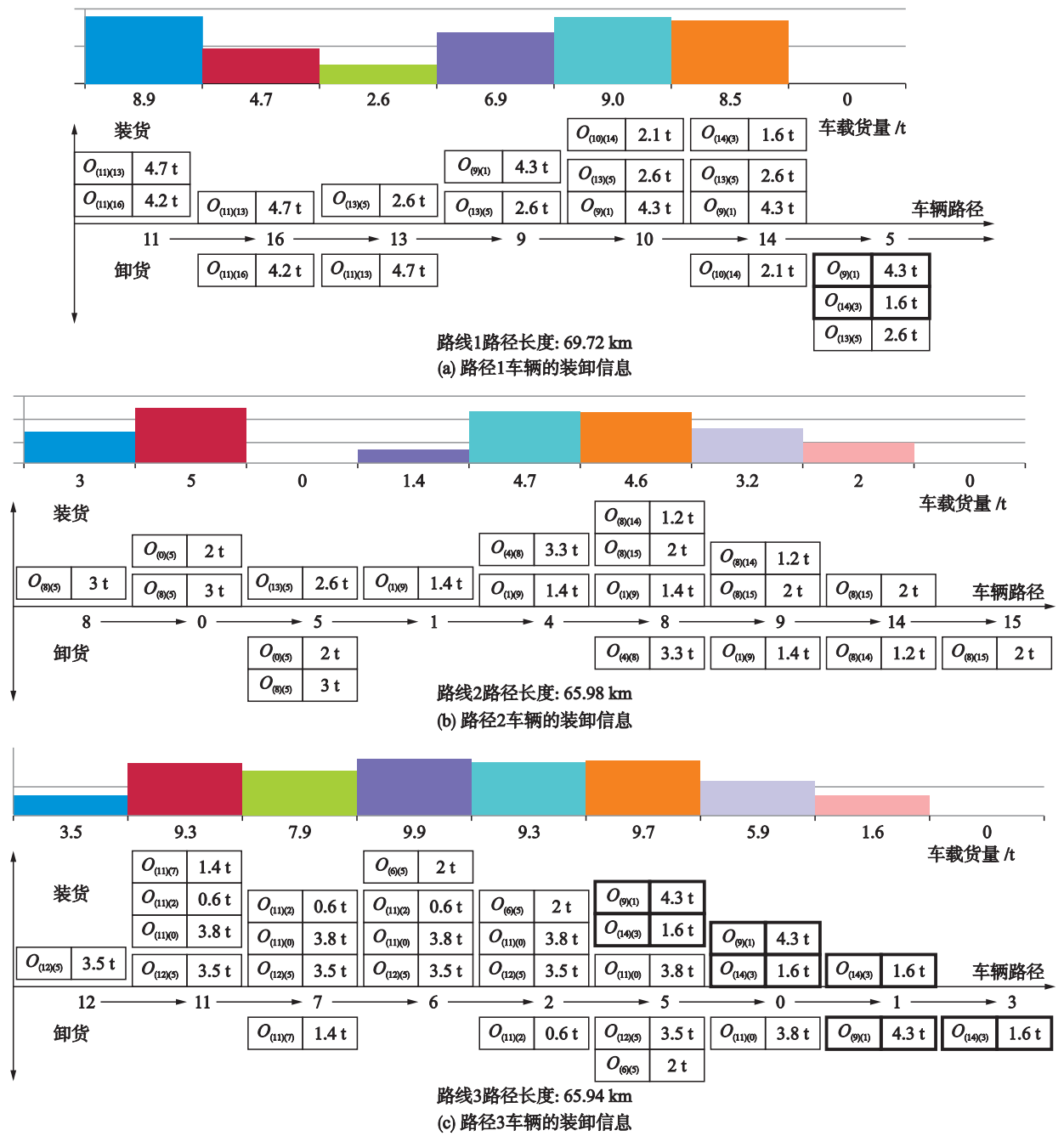


图10 车辆路径及货物装卸情况(遗传、蚁群混合算法)

Fig.10 Vehicle rout and cargo Load information by GA & ACO

化过程如下:采用遗传算法确定货物的转运点及货物转运前后运货的车辆,其染色体结构类似于图 3;采用蚁群算法确定车辆路径,其优化过程和 2.2 小节相同;优化算法的流程图和图 7 类似。

采用遗传、蚁群的混合算法得到的优化结果为 201.64 km, 每条路径的优化详细结果见图 10。从图 10 中可以看出, $O_{(9)(1)}$ 、 $O_{(14)(3)}$ 在节点“5”进行了转运。

从表 2 中可见,粒子群、蚁群的混合算法的结果优于遗传、蚁群的混合算法,从而验证了本研究算法的有效性。

4 结语

本论文建立多起讫点车辆调度模型,用粒子群算法、

蚁群算法混合优化算法求解。

模型中的特殊之处是建立了货物转运公式和货物在节点的装卸公式。

模型的优化过程是先由粒子群算法的粒子位置向量,得到每个货物的转运点及货物转运前后运货的车辆,再把转运点加入到蚁群算法的禁忌表中,这里建立的禁忌表是矩阵的形式,用蚁群算法优化货物转运前、转运后的车辆路径,然后粒子群算法根据优化目标对粒子进行评价筛选,重复执行以上步骤直到满足终止条件。

该算法使所有车辆对所有货物的转运点及车辆路径进行优化,货物转运点的位置和数量是变化的,易实现最优解。

参考文献

- [1] 杨丰梅,肖辉君.带转运中心的车辆组合运输问题的模型与算法[J].系统工程理论与实践,2007,27(3):28-35.
Yang F M, Xiao H J. The vehicle routing problems with transshipment points[J]. System Engineering Theory and Practice, 2007, 27(3): 28-35.
- [2] Mirabi M. A hybrid electromagnetism algorithm for multi-depot periodic vehicle routing problem[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 71(1/2/3/4): 509-518.
- [3] Rahimi-Vahed A, Crainic T G, Gendreau M. A path relinking algorithm for a multi-depot periodic vehicle routing problem[J]. Journal of Heuristics, 2013, 19(3): 497-524.
- [4] Hemmelmayr V, Doerner K F, Hartl R F. A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems[J]. Journal of Heuristics, 2013, 19(2): 129-156.
- [5] Stenger A, Vigo D, Enz S. An adaptive variable neighborhood search algorithm for a vehicle routing problem arising in small package shipping[J]. Transportation Science, 2013, 47(1): 64-80.
- [6] Kergosien Y, Lente Ch, Billaut J C. Metaheuristic algorithms for solving two interconnected vehicle routing problems in a hospital complex[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40(10): 2508-2518.
- [7] Adelzadeh M, Asl V M, Koosha M. A mathematical model and a solving procedure for multi-depot vehicle routing problem with fuzzy time window and heterogeneous vehicle[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(5/6/7/8): 793-802.
- [8] Contardo C, Martinelli R. A new exact algorithm for the multi-depot vehicle routing problem under capacity and route length constraints[J]. Discrete Optimization, 2014, 12(1): 129-146.
- [9] 崔妍,黄敏,王兴伟.考虑中转发车时间 4PLRP 的模糊规划模型与算法[J].系统工程学报,2012,27(4):35-542.
Cui Y, Huang M, Wang X W. Fuzzy programming model and algorithm of 4PLRP considering travel schedule[J]. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(4): 535-542.
- [10] Pereira R T R, Gomes M I, Barbosa-Povoa A P. Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 62: 34-54.
- [11] Pereira R T R, Gomes M I, Barbosa-Povoa A P. Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns[J]. Omega-International Journal of Management Science, 2014, 48: 60-74.
- [12] 曾正洋,许维胜,徐志宇,等.城市物流中的开闭混合式两级车辆路径问题[J].信息与控制,2014,43(6):744-749.
Zeng Z Y, Xu W S, Xu Z Y, et al. Open-close mixed two-echelon vehicle routing problem in city logistics[J]. Information and Control, 2014, 43(6): 744-749.
- [13] Rodrigues M H P, dos Machado C M S, Lima M L P. Simulated annealing applied to the berth allocation problem[J]. Journal of Transport Literature, 2013, 7(3): 117-136.
- [14] Luo J P, Chen M R. Improved shuffled frog leaping algorithm and its multi-phase model for multi-depot vehicle routing problem[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(5): 2535-2545.
- [15] He Y L, Miao W D, Xie R. A Tabu search algorithm with variable cluster grouping for multi-depot vehicle routing problem[C]//Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design(CSCWD 2014). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 12-17.
- [16] Wang T J, Wu K J. Study on multi-depot vehicle routing problem based on cloud adaptive particle swarm optimization[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 253-255: 1369-1373.
- [17] Demirel T, Yilmaz S. A new solution approach to multi-depot vehicle routing problem with ant colony optimization[J]. Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing, 2012, 18(3/4): 421-439.

- [18] Vidal T, Crainic T G, Gendreau M. Implicit depot assignments and rotations in vehicle routing heuristics[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 237(1): 15–28.
- [19] Karakatic S, Podgorelec V. A survey of genetic algorithms for solving multi depot vehicle routing problem[J]. Applied Soft Computing, 2015, 27: 519–532.
- [20] Escobar J W, Linfati R, Toth P. A hybrid granular Tabu search algorithm for the multi-depot vehicle routing problem[J]. Journal of Heuristics, 2014, 20(5): 483–509.
- [21] 裴振兵, 陈雪波. 改进蚁群算法及在车辆运输调度中的应用[J]. 信息与控制, 2015, 44(6): 753–758.
Pei Z B, Chen X B. Improved ant colony algorithm and its application to vehicle routing and scheduling[J]. Information and Control, 2015, 44(6): 753–758.
- [22] 姜文英, 林焰, 陈明, 等. 基于粒子群和蚁群算法的船舶机舱规划方法[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(4): 502–507.
Jiang W Y, Lin Y, Chen M, et al. An optimization approach based on Particle Swarm Optimization ant colony optimization for arrangement of marine engine room[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014, 48(4): 502–507.
- [23] 张超, 李擎, 陈鹏, 等. 一种基于粒子群参数优化的改进蚁群算法及其应用[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(7): 955–960.
Zhang C, Li Q, Chen P, et al. Improved ant colony optimization based on particle swarm optimization and its application[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(7): 955–960.
- [24] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[C]//Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 1942–1948.
- [25] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 1996, 26(1): 29–41.

作者简介

王雷震(1965–), 男, 硕士, 教授, 硕士生导师. 研究领域为物流系统工程, 商业与服务系统运作优化与决策.
汪定伟(1948–), 男, 博士, 教授, 博士生导师. 研究领域为计算机集成制造, 生产计划与调度, 建模与优化等.
王素欣(1976–), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究领域为物流管理, 车辆调度, 智能优化等.

(上接第 563 页)

- [12] Boulkroune A, Bouzeriba A, Bouden T. Fuzzy generalized projective synchronization of incommensurate fractional-order chaotic systems[J]. Neurocomputing, 2016, 173(P3): 606–614.
- [13] Bai J, Yu Y G, Wang S, et al. Modified projective synchronization of uncertain fractional order hyperchaotic systems[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17(4): 1921–1928.
- [14] Lian K W, Chiu C S, Chiang T S, et al. LMI-based fuzzy chaotic synchronization and communications[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001, 9(4): 539–553.
- [15] Ushio T, Yamamoto S. Prediction-based control of chaos[J]. Physics Letters A, 1999, 264(1): 30–35.
- [16] Boukabou A, Chebbah A, Mansouri N. Predictive control of continuous chaotic systems[J]. International Journal of Bifurcation & Chaos, 2011, 18(2): 587–592.
- [17] Senouci A, Boukabou A. Predictive control and synchronization of chaotic and hyperchaotic systems based on a T-S fuzzy model[J]. Mathematics & Computers in Simulation, 2014, 105(11): 62–78.
- [18] Zheng Y. Fuzzy prediction-based feedback control of fractional-order chaotic systems[J]. Optik, 2015, 126(24): 5645–5649.
- [19] Duarte-Mermoud M, Aguila-Camacho N, Gallegos J A, et al. Using general quadratic Lyapunov functions to prove Lyapunov uniform stability for fractional order systems[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2015, 22(1/2/3): 650–659.
- [20] Li Y, Chen Y, Podlubny I. Stability of fractional-order nonlinear dynamic systems: Lyapunov direct method and generalized Mittag Leffler stability[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2010, 59(5): 1810–1821.

作者简介

陈 旭(1992–), 男, 硕士生. 研究领域为混沌同步, 非线性系统.
郑永爱(1966–), 男, 博士, 教授. 研究领域为混沌理论与应用.