

集货需求可拆分的多越库中心库门分配及车辆路径协同优化

范厚明^{1†}, 白雪¹, 田攀俊¹

(1. 大连海事大学交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 针对集货需求可拆分的多越库中心库门分配及车辆路径协同优化问题, 综合考虑多越库中心共同配送、集货需求可拆分、库内操作等因素, 以车辆派遣成本、车辆油耗成本、库内叉车固定成本和运输成本以及时间窗惩罚成本之和最小化为目标, 建立优化模型. 根据问题特征, 设计混合遗传算法求解, 该算法在交叉变异中引入具有方向性的粒子群寻优, 采取进化逆转和保留最优个体策略改善求解质量. 通过多组算例验证了算法的有效性, 并分析了配送模式以及车辆类型对配送方案制定的影响, 结果表明, 本文所提出的模式能有效降低越库中心运营成本. 研究成果不仅丰富了越库配送模式下的车辆路径问题研究, 也为多越库中心物流企业合理利用资源制定科学的配送方案提供理论依据.

关键词: 多越库中心; 库门分配; 集货需求可拆分; 异型车辆; 混合遗传算法

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0298.

Multi-depot Vehicle Routing Problem with Split Pickup and Cross-dock Door Assignment Collaborative Optimization

FAN Hou-ming^{1†}, BAI Xue¹, TIAN Pan-jun¹

(1. Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The thesis is about the collaborative optimization of multi-depot vehicle routing problem with split pickup and cross-dock door assignment, considering joint distribution of multiple cross-dock center, split pickup and cross-docking operation, establish an optimization model which is aimed at minimizing the sum of vehicle dispatching cost, vehicle fuel cost, fixed and transportation cost of forklift in cross-dock center and time window penalty cost. According to the characteristics of the problem, the hybrid genetic algorithm is designed through adding the directed optimization method of the particle swarm algorithm, evolutionary reversal and elitist retention strategy are also used to improve the solution quality. The validity of the model and algorithm is verified by multiple examples, the influence of distribution mode and vehicle type on the distribution scheme formulation are also analyzed. The results show that the model proposed in this thesis can effectively reduce the cross-dock centers' operation cost. The research results expand and enrich the research of vehicle routing problem with cross-docking, and provide theoretical basis for logistics enterprises with multiple cross-centers to make use of resources efficiently and formulate the decision distribution scheme scientifically.

Keywords: multiple cross-dock center; dock-door assignment; split pickup; heterogeneous fleet; hybrid genetic algorithm

0 引言

集货需求可拆分的多越库中心库门分配及车辆路径协同优化 (Multi-depot Vehicle Routing Problem with Split Pickup and Cross-dock Door Assignment Collaborative Optimization, MDVRPSP-CDA) 是考虑集货需求可拆分及集配货车辆不同的情况下, 对多

个越库中心的库门分配、库内作业与车辆路径进行协同优化的 VRP 拓展问题. 现实中, 一些大的企业随着其业务量的快速增长, 在同一区域设置多个大型仓库, 采用越库 (Cross-Docking, CD) 配送模式实现集配货一体化, 以降低库存成本, 如沃尔玛在广州设立了两个仓库. 越库配送的物流模式能

收稿日期: 2021-02-21; 录用日期: 2021-10-27.

基金项目: 国家社科基金应急管理体系建设研究专项 (20VYJ024).

[†]通讯作者. E-mail: fhm468@163.com.

显著地提高配送效率,但也使得物流企业的生产组织活动更为复杂,为此,近年来一些学者开始关注并主要从两个方面对这一问题展开了研究:一方面为对配送中心货物搬运、库门分配、车辆排序等库内操作的研究;另一方面为配送中心集货和配货车车辆路径问题的研究.目前还没有针对 MDVRPSP-CDA 的研究,但与本文研究有关的越库配送车辆路径问题 (Vehicle Routing Problems with Cross-Docking, VRPCD)、多中心车辆路径问题 (Multi-depot Vehicle Routing Problem, MDVRP)、可拆分车辆路径问题 (Split Delivery Vehicle Routing Problem, SDVRP)、异型车辆路径问题 (Heterogeneous fleet Vehicle Routing Problem, HVRP) 等研究成果丰富.

有关 VRPCD 的研究, Enderer 等^[1] 针对库门分配和车辆路径问题,构建了带库门分配的路径优化模型并设计元启发式算法进行求解.范厚明等^[2] 针对越库配送下考虑时空距离的库门分配和车辆调度问题,以总成本最小化为目标建立库门分配与异型车辆路径优化模型,并设计自适应遗传算法求解. Yu 等^[3] 考虑越库中心异型车辆路径优化问题,以各越库中心集配货路径成本与各越库中心间转运成本之和最小化为目标设计自适应邻域模拟退火算法求解. Maknoon 等^[4] 针对多越库配送模式下考虑库内作业及越库间转运的车辆路径问题,以配送路径总成本最低为目标建立数学模型,设计大邻域搜索算法进行优化.

有关 MDVRP 的研究, Stodola 等^[5] 针对多中心车辆路径问题进行研究,建立 MDVRP 模型并采用蚁群算法求解.范厚明等^[6] 针对多中心联合配送模式下集货需求随机的同时配集货车车辆路径问题,构建了两阶段模型,并设计自适应邻域文化基因算法求解. Bezerra 等^[7] 针对跨区域多中心车辆路径问题,以总成本最小化为目标,设计广义可变邻域搜索元启发式算法求解. Ben 等^[8] 针对带时间窗的多中心集配一体化车辆路径问题,以运输距离最短为目标构建多中心集配一体化路径优化模型,并采用粒子群算法和遗传算法进行求解.

有关 SDVRP 的研究, Silva 等^[9] 针对考虑车辆数有限和无限的需求可拆分车辆路径问题,分别构建车辆数有限和无限的 SDVRP 模型,设计迭代局部搜索算法求解.潘雯雯等^[10] 针对需求可拆分的多车型车辆路径问题,构建多车型 SDVRP 混合整数规划模型,以配送总成本最小化为目标,设计两阶段算法求解. Moghadam 等^[11] 针对带硬时间窗的需求可拆

分车辆路径问题,以运输时间、距离成本以及库内装卸货成本之和最小化为目标,并设计模拟退火算法和混合元启发式算法求解.刘琼等^[12] 考虑需求可拆分、动态车辆数等因素,构建多周期订货与运输集成优化模型,设计混合遗传算法求解.

有关 HVRP 的研究, Subramanyam 等^[13] 针对多中心联合配送模式下的异型车辆路径问题,分别建立固定车辆数和不限车辆数的异型车辆路径优化模型,并采用分支定界算法求解.李顺勇等^[14] 针对多通路时变网络下低碳城市配送问题,建立混合整数规划模型,设计双循环模拟退火算法进行求解.肖建华等^[15] 针对多能源多车型车辆路径问题,以碳排放、运输费用等成本最小化为目标,建立多车型混合车辆路径优化模型,并设计变邻域搜索算法求解. Ganji 等^[16] 研究了考虑多时间窗约束和客户优先级的异型车辆路径问题,并设计多目标元启发式算法进行求解.

通过梳理以上相关文献可见,现有研究中存在的不足有:(1) 现有针对 VRPCD 的研究大多只考虑单越库中心,未结合现实中货物供求地分布特征对多越库中心共同集配问题展开研究;(2) 现有针对 HVRP 的研究,大多假定车辆单位距离运输成本固定,忽略了车辆载重变化对油耗的影响;(3) 综合考虑库门分配、库内作业与车辆路径的多越库配送中心协同优化研究较少且有待于深化.针对以上不足,本文综合考虑多越库中心共同配送、集货需求可拆分、库内操作等因素,对多越库中心库门分配及车辆路径协同优化问题展开研究.

1 问题描述及模型建立

1.1 问题描述

MDVRPSP-CDA 问题可描述为:由车辆集配货区域路网构成的完备有向图 $G = (V, E)$ 中,节点集合为 $V = V_0 \cup V_1 \cup V_2$, 其中 V_0 为越库中心的集合,各配送中心节点无路径连接, V_1 为供应商节点的集合, V_2 为客户点的集合;边集合 $E = \{(i, j) | i, j \in V\}$, l_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的距离.越库配送中心有 R 种类型车辆, $r (r \in R)$ 为任意一种车型,其中集货车辆车型一致 ($r = 1$); K_r 表示 r 型车辆集合, k_r 为任意一辆 r 型车; Q_r 为 r 型车辆的最大载重量, v_r 为 r 型车辆的行驶速度.各越库中心内所拣选的货种相同, H 为货物种类的集合, $h (h \in H)$ 为某类货物, t 表示货物的单位装卸货时间. p_{ihk_r} 表示集货车辆 k_r 在供应商节点 i 处对 h 类货物的集货量; p_{ih} 表示供应商节点 i 处对 h 类货物的供货量, d_{ih} 表示客户点 i

处对 h 类货物的需求量; T_{ik_r} 表示车辆 k_r 到达节点 i 的时刻, $[ET_i, LT_i]$ 表示客户点 i 的时间窗. M 为入库门集合, $m(m \in M)$ 为第 m 个入库门, N 为出库门集合, $n(n \in N)$ 为第 n 个出库门, l_{mn} 表示入库门 m 到出库门 n 的距离; S 为库内叉车的集合, Q_s 为叉车的最大载重量. c_r 为 r 型车辆单位派遣成本, c_1 为燃油价格, c_2 表示库内叉车的固定成本, c_3 表示库内叉车单位距离成本, c_4 为早到单位惩罚成本, c_5 为晚到单位惩罚成本.

决策变量 x_{ijk_r} 表示车辆 k_r 是否从节点 i 到节点 j , 是为 1, 否为 0; y_{mns} 表示叉车 s 是否从入库门 m 到出库门 n , 是为 1, 否为 0; z_{mk_r} 表示集货车辆 k_r 是否分配给入库门 m , 是为 1, 否为 0; z_{nk_r} 表示配货车辆 k_r 是否分配给出库门 n , 是为 1, 否为 0.

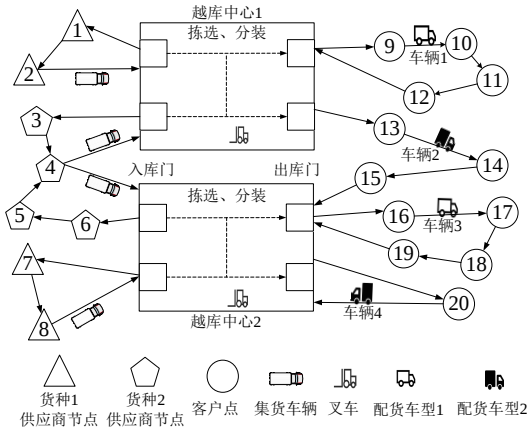


图1 多越库中心集配货示意图

如图1所示, 假设某配送区域有两个越库中心, 节点1、2、7、8为货种1的供应商, 节点3、4、5、6为货种2的供应商, 其余节点为客户点. 由于各供应商节点只供应一种货且供应量较大, 可由多个中心派车集货, 如供应商节点4处需由两越库中心的两辆集货车辆分别进行集货. 集货车辆集货并返回原越库中心, 货物在越库中心进行拣选、分装、转运, 由配货车辆完成后续配送服务, 配送服务完成后可返回其他配送中心, 如车辆2由越库中心1出发, 服务客户点13、14、15后返回越库中心2.

1.2 油耗计算

Bektas 等^[17] 针对 VRP 拓展问题污染路径问题 (Pollution-Routing Problem, PRP) 进行研究, 综合考虑车型、车速、载重量、道路坡度等因素计算车辆在节点 i 、 j 之间消耗能量 F_{ij} (单位: J) 的计算如式 (1) 所示.

$$F_{ij} = M(a + g \sin \theta_{ij} + g C_r \cos \theta_{ij}) l_{ij} + 0.5 C_d A \rho v^2 l_{ij} \quad (1)$$

其中, M (单位: g) 为车辆总重量 (包括车辆重量、货物重量等), a (单位: m/s^2) 为车辆加速度, g (单位: m/s^2) 为重力加速度, θ_{ij} 表示道路坡度, C_r 为滚动阻力系数, C_d 为空气阻力系数, A (单位: m^2) 为车辆迎风面积, ρ (单位: g/m^3) 为空气密度, v (单位: m/s) 为车辆行驶速度, l_{ij} (单位: m) 为节点间距离.

由文献 [18] 可知, 1L 汽油可产生 8.8kWh 的能量, 且汽油发动机的燃油效率为 20%^[19], 则节点间的耗油量计算如式 (2) 所示.

$$E_{ij} = \frac{F_{ij}}{3.6 \times 10^6 \times 8.8 \times 20\%} \quad (2)$$

2 模型构建

2.1 模型假设

(1) 对集配货路径及库内货物运输协同优化时不考虑库门处的车辆调度, 即忽略集配车辆在库门的等待时间.

(2) 为统一衡量不同种类的货物, 将货物重量作为衡量标准, 视不同货物的单位重量装卸时间相同.

(3) 集配货车辆车型不同, 各供应商处货种单一、货量较大, 集货车型单一为大车型且不用于配货, 各客户点处为城市配送, 按车载率最优选用不同车型的轻卡.

2.2 数学模型

$$\begin{aligned} \min & \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{r \in R} c_r x_{ijk_r} + c_1 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{r \in R} E_{ij} x_{ijk_r} \\ & + c_2 \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} y_{mns} + c_3 \sum_{m \in M} \sum_{n \in N} \sum_{s \in S} l_{mn} y_{mns} \\ & + \sum_{i \in V_0 \cup V_2} \sum_{j \in V_2} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{r \in R \setminus \{1\}} [c_4 \max \{(ET_j - T_{jk_r}), 0\} \\ & + c_5 \max \{(T_{jk_r} - LT_j), 0\}] x_{ijk_r}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in V_0 \cup V_1} \sum_{k_r \in K_r} x_{ijk_r} = \sum_{i \in V_0 \cup V_1} \sum_{k_r \in K_r} x_{jik_r} \geq 1,$$

$$\forall j \in V_1, r = 1; \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V_0 \cup V_2} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{r \in R \setminus \{1\}} x_{ijk_r} = 1, \forall j \in V_2; \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V_0 \cup V_2} \sum_{k_r \in K_r} x_{ijk_r} = \sum_{i \in V_0 \cup V_2} \sum_{k_r \in K_r} x_{jik_r}, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_1 \cup V_2} \sum_{k_r \in K_r} x_{ijk_r} \leq |K_r|, \forall r \in R; \quad (7)$$

$$\sum_{j \in V_1} x_{ijk_r} = \sum_{j \in V_1} x_{jik_r} \leq 1, \quad (8)$$

$$\forall i \in V_0, k_r \in K_r, r = 1;$$

$$\forall i \in V_0, r \in R \setminus \{1\}; \quad (9)$$

$$0 \leq p_{ihk_r} \leq p_{ih},$$

$$\forall i \in V_1, h \in H, k_r \in K_r, r = 1; \quad (10)$$

$$\sum_{k_r \in K_r} p_{ihk_r} = p_{ih}, \forall i \in V_1, h \in H, r = 1; \quad (11)$$

$$\sum_{i \in V_1} p_{ihk_r} \leq Q_r, \forall h \in H, k_r \in K_r, r = 1; \quad (12)$$

$$\sum_{i \in V_0 \cup V_2} \sum_{j \in V_2} \sum_{h \in H} d_{jh} x_{ijk_r} \leq Q_r,$$

$$\forall k_r \in K_r, r \in R \setminus \{1\}; \quad (13)$$

$$T_{jk_r} = T_{ik_r} + p_{ihk_r} t + (l_{ij}/v),$$

$$\forall i, j \in V_1, h \in H, k_r \in K_r, r = 1; \quad (14)$$

$$T_{jk_r} = T_{ik_r} + \left(\sum_{h \in H} d_{ih} \right) t + (l_{ij}/v),$$

$$\forall i, j \in V_2, k_r \in K_r, r \in R \setminus \{1\}; \quad (15)$$

$$T_{ik_r} = T_{ik'_r},$$

$$\forall k_r, k'_r \in K_r, k_r \neq k'_r, r = 1, i \in V_0; \quad (16)$$

$$\sum_{m \in M} z_{mk_r} = 1, \forall k_r \in K_r, r = 1; \quad (17)$$

$$\sum_{n \in N} z_{nk_r} = 1, \forall k_r \in K_r, r \in R \setminus \{1\}; \quad (18)$$

$$\sum_{k_r \in K_r} z_{mk_r} \geq 1, \forall m \in M, r = 1; \quad (19)$$

$$\sum_{k_r \in K_r} \sum_{r \in R \setminus \{1\}} z_{nk_r} \geq 1, \forall n \in N; \quad (20)$$

$$\sum_{i \in V_1} p_{ih} = \sum_{j \in V_2} d_{jh}, \forall h \in H; \quad (21)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{s \in S} y_{mns} = \sum_{h \in H} \left[\frac{\sum_{i \in V_0 \cup V_2} \sum_{j \in V_2} \sum_{k_r \in K_r} \sum_{r \in R \setminus \{1\}} (d_{jh} x_{ijk_r}) z_{nk_r}}{Q_s} \right],$$

$$\forall n \in N; \quad (22)$$

$$x_{ijk_r} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V, r \in R, k_r \in K_r; \quad (23)$$

$$y_{mns} \in \{0, 1\}, \forall m \in M, n \in N, s \in S; \quad (24)$$

$$z_{mk_r} \in \{0, 1\}, \forall m \in M, k_r \in K_r, r = 1; \quad (25)$$

$$z_{nk_r} \in \{0, 1\}, \forall n \in N, k_r \in K_r, r \in R \setminus \{1\}. \quad (26)$$

目标函数式(3)为集配货阶段车辆派遣成本、油耗成本、库内叉车的固定成本和运输成本以及客户时间窗惩罚成本之和的最小化。式(4)表示各供应商节点至少可由一辆集货车辆服务,且该节点车辆进出平衡;式(5)表示各客户节点由且仅由一辆配货车辆服务;式(6)表示各客户节点车辆进出平衡;式(7)表示所有越库中心内集配货车辆的车辆数限制;式(8)表示集货车辆需返回原配送中心,且车辆数守恒;式(9)表示配货车辆可返回任意一个越库中

心,且每种车型车辆数守恒;式(10)表示某集货车辆在节点*i*的集货量不超过该点的供货量;式(11)表示访问某供应商节点的所有集货车辆的集货量之和等于该点的供货量;式(12)、(13)表示集配货车辆的载重量约束;式(14)、(15)表示集配货车辆由节点*i*到达节点*j*的时间;式(16)表示各越库中心内集货车辆同时到达的约束;式(17)表示某集货车辆只能分配给某个入库门;式(18)表示某配货车辆只能分配给某个出库门;式(19)、(20)表示所有的库门需要参与调度;式(21)表示整个过程中集货量等于配货量;式(22)表示将货物转运至某一出库门时叉车的使用次数;式(23)-(26)为决策变量属性。

3 混合遗传算法设计

MDVRPSP-CDA问题是VRP拓展问题,包含多越库中心共同配送、集货需求可拆分、多种车辆类型、客户点时间窗以及集配货不同返回规则等多个特征,属于NP-hard问题,求解过程复杂,用精确算法求解该问题较为困难,而启发式算法在求解此类问题具有良好的性能。传统遗传算法全局搜索能力较强,但容易陷入局部最优,而粒子群算法中粒子寻优方式具有良好的局部搜索能力。因此对遗传算法中交叉、变异等进行改进,即将粒子与个体极值和群体极值进行交叉,再将粒子进行变异后寻优,设计混合遗传算法进行求解,从而改善求解质量。此外,根据研究问题的特点,粒子群的交叉变异操作只能在相应染色体片段内进行,即在集货、库门分配以及配货染色体片段内分别进行,且在不同片段内依据求解的复杂性选择合适的搜索方式,算法流程图如图2所示。

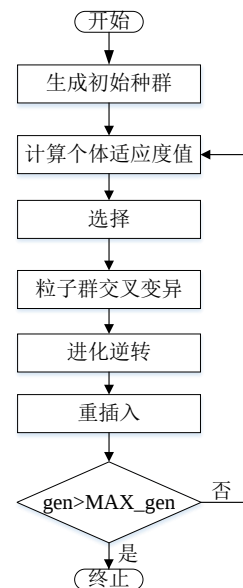


图2 混合遗传算法流程图

3.1 编解码与种群初始化

整数编码具有简洁直观、可读性强等优点, 结合 MDVRPSP-CDA 问题的特征, 每条染色体由三部分组成, 分别为集货、库门分配和配货的编码。其中, 一、三部分各基因分别表示供应商节点或客户点, 不可重复编码, 第二部各基因表示分配给各个越库中心内集配货车辆的库门, 编码能否重复根据实际情况决定。在集货阶段考虑供应商节点集货需求可拆分的情况, 若集货车辆 k_1 访问供应商节点 j 后累计集货量超过该车最大载重量或者已满足集货需求, 则将该节点的集货需求 p_j 拆分为 p_{j1} 和 p_{j2} , 使集货车辆 k_1 离开该点时集货量为 p_{j1} , 新派集货车辆 k_2 前往该节点收集剩余供应量 p_{j2} , 再继续访问下一供应商节点, 直至完成集货路径划分。配货阶段则按车辆载重划分路径并车载率最大原则灵活选择车型。库门分配阶段包括各越库中心入库门对集货车辆的分配以及出库门对配货车辆的分配两部分。为方便货物在越库中心进行拣选、分装、转运等操作, 规定前半部分染色体长度与货种数相等以保证各类货物有不同的入库门; 后半部分则根据配货阶段路径划分结果确定染色体长度, 当配货车辆数量多于库门数量时, 部分库门分配多辆车。以图 3(a) 为例, 假设有 4 个供应商节点, 6 个客户点, 2 个越库中心, 越库中心 D_1 设有 2 个入库门和 1 个出库门, D_2 设有 2 个入库门和 2 个出库门, 编码染色体如图 3(a) 所示。最终解码结果如图 3(b) 所示, 2 个越库中心总共派出 4 辆集货车辆并安排 3 辆车执行配送服务, 集货路径分别为 $D_1-2-1-D_1$ 、 D_2-1-D_2 、 D_2-4-D_2 、 $D_1-4-3-D_1$, 其中供应商 1、4 的集货需求被拆分; 配送路径分别为 $D_2-5-8-D_1$ 、 $D_1-10-7-D_2$ 、 $D_2-9-6-D_2$; 越库中心 D_1 库门的分配方案为: 集货车辆 1→入库门 2、集货车辆 4→入库门 1、配货车辆 2→出库门 1; 越库中心 D_2 库门的分配方案为: 集货车辆 2→入库门 1, 集货车辆 3→入库门 2、配货车辆 1→出库门 1、配货车辆 3→出库门 2。

3.2 构建适应度函数

染色体的适应度函数由目标函数式 (3) 进行构建, 如式 (27) 所示, 其中 f_R 为染色体 R 的适应度值, C_R 表示染色体 R 对应的目标函数值。由式 (27) 可知目标函数值越优时, 染色体的适应度值也越大。

$$f_R = \frac{1}{C_R} \quad (27)$$

3.3 选择

选择操作是建立在种群个体适应度评估基础上,

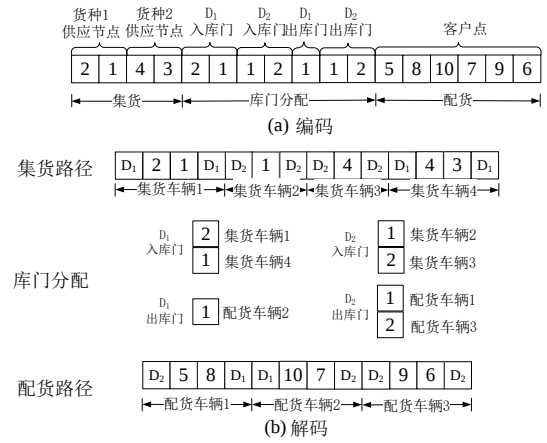


图 3 编解码示意图

从种群中选择优秀个体、淘汰劣质个体的, 其目的是将较优个体通过交叉变异等操作产生新个体, 并遗传到下一代。采用随机遍历抽样选择, 以一定概率选择个体进行后续交叉变异等操作, 个体被选择的概率由其适应度函数值大小决定, 当个体适应度值越大, 被选择的概率也越高; 反之, 个体被选择的概率则会降低。

3.4 粒子群交叉变异

混合遗传算法借鉴粒子群算法中寻优方法, 通过将各染色体分别与个体极值 $pbest$ 、群体极值 $gbest$ 交叉以及各染色体自身进行变异等方式来更新种群, 具有单向寻优性: 只有当更新后染色体适应度值增大时, 才接受更新操作, 否则不接受更新。具体步骤如下:

Step1: 计算初始种群个体的适应度函数值, 将适应度值最大的个体作为染色体个体历史最优 $pbest$ 和群体历史最优 $gbest$ 的初始值;

Step2: 将各染色体分别与个体极值 $pbest$ 、群体极值 $gbest$ 进行整数交叉, 再代入适应度函数进行评估, 采用保留优秀个体策略, 选择适应度值较优个体更新种群;

Step3: 将各染色体内的两个基因位点进行互换变异, 代入适应度函数进行评估, 采用保留优秀个体策略, 选择适应度值较优个体更新种群, 再次进行适应度值计算并更新参数。

3.5 进化逆转

由于集货库门分配阶段问题规模较小, 仅通过上述操作便可求得最优解, 而配货问题规模相对前两者而言较大。为增强算法寻优能力, 对第三部分的个体在交叉变异后单独进行进化逆转操作, 即染色体第三部分任选两个基因位点, 将两基因位点之间的基因进行逆转插入, 若逆转操作后适应度值提高, 则保留该个体, 更新种群。

3.6 重插入子代生成新种群

为保留种群中较优个体, 在算法设计中将当前种群中部分目标函数值较优个体保留到下一代: 父代染色体通过粒子群交叉、变异等操作产生子代后, 根据代沟设置, 将子代适应度值最差部分舍去, 将同等数量的父代目标函数值较优部分插入, 以确保种群规模不变且子代种群中最优个体永远不比父代最优个体差.

4 算法验证及算例分析

4.1 算法验证

为验证混合遗传算法的有效性, 选取 VPRCD 标准算例 (<http://web.ntust.edu.tw/<ucodetype=>) 进行验证, 算法编程使用 MATLAB R2018b 在 PC 机上运行, 电脑操作系统为 Window10, 运行内存为 8G,

CPU 为 Intel(R)Core(TM)i7-7700, 主频为 3.60GHz. 通过求解 VRPCD 对提出的混合遗传算法进行验证, 并与 Liao 等 (2010) 的禁忌搜索^[20] 和 Yu 等 (2021) 的自适应邻域模拟退火^[3] 结果进行比较. 表 1 给出了节点规模为 10、30、50 等三类算例的求解结果, 分别运行 10 次取平均值, 各结果 *Solution* 与已知最优解 *BKS* 的差值 *GAP* 由式 (28) 计算所得.

$$GAP = \frac{Solution - BKS}{BKS} \tag{28}$$

由表 1 可知, 混合遗传算法求得各算例的平均值分别为 7663.2、7548.7、18102.3, 与已知最优解差值 *GAP* 分别为 0.01、-0.02、0.02, 求解质量较高. 综合上述分析, 可验证本文设计的混合遗传算法求解越库配送车辆路径问题的有效性.

表 1 不同算法测试结果对比

算例	ITS			ANSA			BKS			HGA			GAP		
	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50	10	30	50
0	6847.6	7692.9	20704.6	6823	7559.8	18846.8	6823	7559.8	18846.8	6823	7426	18796	0	-0.02	0.00
1	6816.8	7787.2	20816.8	6741	7805.9	17665.4	6741	7787.2	17665.4	6741	7537.7	17289	0	-0.03	-0.02
2	9615.6	7893.6	19612.2	9269	7625	17102.8	9269	7625	17102.8	9269	7305.7	17392	0	-0.04	0.02
3	7289.7	7792.2	19549	7295	7661.8	18015.7	7289.7	7661.8	18015.7	7295	7421.3	17878	0	-0.03	-0.01
4	6599	7224.8	20448	6991	7414.8	17945.2	6599	7224.8	17945.2	6991	7174	18545	0.06	-0.01	0.03
5	9324.6	7245.9	21212	7392	6942.8	18523.6	7392	6942.8	18523.6	7434	6619.7	17621	0.01	-0.05	-0.05
6	12083	8206.9	20640.2	11713	7763.9	18779.5	11713	7763.9	18779.5	11713	7869.7	19579.7	0	0.01	0.04
7	8719.6	7880.9	20664.1	8158	7540.4	18008.8	8158	7540.4	18008.8	8158	7754.3	18054	0	0.03	0.00
8	7362.2	8157.3	18920	6989	7711.1	17436.4	6989	7711.1	17436.4	6989	7498.7	18219.4	0	-0.03	0.04
9	6204.5	7924.7	20384.2	5970	7726.1	18748.5	5970	7726.1	18748.5	5970	7685.3	18682	0	-0.01	0.00
10	7635.3	7452.6	19941.6	6932	7613.2	17988.8	6932	7452.6	17988.8	6916	7248	18130	0	-0.03	0.01
11	7867.2	8320	17258.4	7784	7827	16396.1	7784	7827	16396.1	7656	7505.3	17129.3	-0.02	-0.04	0.04
12	7097.9	8222.7	17829.9	6783	7757.3	17071.2	6783	7757.3	17071.2	6783	7691.7	17378	0	-0.01	0.02
13	5208	8211.7	19845.2	4906	8141.1	17204.4	4906	8141.1	17204.4	4743	7636.7	17627	-0.03	-0.06	0.02
14	7103.2	8144.6	21863	7088	7806.6	18872	7088	7806.6	18872	7088	7648	18850	0	-0.02	0.00
15	8768.7	7451.7	20144.2	8440	7820.7	17695.3	8440	7451.7	17695.3	8440	7201	17861	0	-0.03	0.01
16	9003	8086.2	20093.3	9306	7967.3	18036.8	9003	7967.3	18036.8	9306	7838	18595	0.03	-0.02	0.03
17	6887.5	7576	20244.8	6760	7749.5	17217.7	6760	7576	17217.7	6760	7363.3	17493	0	-0.03	0.02
18	7123	7871.2	19955	7051	7704.4	17638.8	7051	7704.4	17638.8	7051	7494	17867	0	-0.03	0.01
19	10471	7883.7	19267.7	10004	7477.3	16852.4	10004	7477.3	16852.4	11344	7474	17162	0.13	0	0.02
20	5431.4	7914.1	19533.4	4753	7783.2	17830	4753	7783.2	17830	5690	7476.3	18145	0.2	-0.04	0.02
21	6908	8005.3	19032.1	6442	7867.2	17635.7	6442	7867.2	17635.7	6442	7548.3	18315	0	-0.04	0.04
22	9224.1	7883.5	20562.5	9156	7674.4	17985.3	9156	7674.4	17985.3	9156	7515	18609	0	-0.02	0.03
23	11976	7731.2	19288.2	11976	7905.9	17558.2	11976	7731.2	17558.2	11976	7398	17999.7	0	-0.04	0.03
24	6638	7884.8	19695.9	6346	7671.9	17897.7	6346	7671.9	17897.7	6346	7584.3	18183	0	-0.01	0.02
25	7216.9	8001.6	20610.5	6915	7783.3	18333.8	6915	7783.3	18333.8	6915	7635	18614	0	-0.02	0.02
26	9709.8	8899.4	18942.8	9541	7970.3	17506.3	9541	7970.3	17506.3	9541	8159.7	18239.7	0	0.02	0.04
27	7408	10131	20097.3	6782	8226.8	17842.4	6782	8226.8	17842.4	6782	8353	18525	0	0.02	0.04
28	6748.5	8276.9	22248.1	6672	8024.6	18153.6	6672	8024.6	18153.6	6591	7930.7	18571	-0.01	-0.01	0.02
29	7304.4	8251.6	19321.9	6988	7706	17527.9	6988	7706	17527.9	6988	7467.3	17718	0	-0.03	0.01
Avg	7886.4	8000.2	19957.6	7598.9	7741	17810.6	7598.9	7741	17810.6	7663.2	7548.7	18102.3	0.01	-0.02	0.02

4.2 算例分析

4.2.1 算例描述

由于本文研究的多中心越库配送问题涉及集货需求可拆分、多越库中心共同配送以及库门分配等众多因素, 目前没有针对该问题的通用算例集. 因此对 MDVRP 标准算例 pr04 (<https://neo.lcc.uma.es/vrp/vrp-instances/multiple-depot-vrp-instances/>) 进行修改, 并添加供应商、时间窗等信息, 从而得到 MDVRPSP-CDA 的算例. 算例包含 2 个越库中心 D_1 、 D_2 , 10 个供应商和 100 个客户点, 客户与越库中心的坐标位置与标准算例 pr04 相同, 客户点的需求量由标准算例 pr04 中给出需求量缩小到原来的 0.37 倍得到, 时间窗在 [10,1000] 之间随机生成. 供应商节点的横坐标与纵坐标在 [2,125] 之间随机生成, 各货种供货量在 3t~5t 之间随机生成, 具体见表 2. 车辆早于客户最早可接受服务时刻到达的单位惩罚成本为 0.5 元/min, 车辆晚于客户最晚可接受服务时刻到达的单位惩罚成本为 1 元/min, 车辆的具体参数设置见表 3.

依据文献 [2] 和 [21] 相关研究, 设置各越库中心有 3 个入库门和 3 个出库门. 越库中心内部为矩形结构, 入库门和出库门分别分布在矩形的两条长边, 同一条边上两相邻库门的距离为 2m, 入库门与出库门之间距离为 6m, 假设库内叉车只能在平面上做垂直或水平移动. 库内配有叉车且数量不限, 叉车的派遣成本和单位运输成本分别为 20 元/辆、1 元/m, 两个越库中心都需对 3 种货物完成越库操作.

表 2 供货商节点信息

编号	横坐标	纵坐标	货种 1	货种 2	货种 3
1	2	105	3.19	-	-
2	12	107	3.37	-	-
3	36	125	3.35	-	-
4	48	111	3.27	-	-
5	96	105	-	4.54	-
6	1	89	-	4.24	-
7	77	120	-	4.43	-
8	9	101	-	-	4.28
9	15	4	-	-	4.07
10	100	26	-	-	4.78

表 3 不同车型参数设置

车型	车辆行驶速度 (km/h)	车辆派遣成本 (元/辆)	单位燃油价格 (元/L)
4t	50	300	5.65
5t	50	350	
8t	80	500	

4.2.2 优化结果

采用本文所设计的混合遗传算法求解, 运行 10 次的结果如表 4 所示. 由表 4 可以看出, 10 次求解结果中方案最优解为 8068.45、最差解为 8217.76, 10 次求解结果的平均值为 8142.39, 平均值与最优解的偏差为 73.94, 与最差解的偏差为 75.37, 算法运行时间在 110s 以内. 由此可知, 对于 MDVRPSP-CDA 所设计的算法能够稳定的收敛到较优解, 且求解速度在可接受范围之内. 最优集货路径分配方案、配货路径分配方案以及库门分配方案见表 5、6.

表 4 混合遗传算法求解 MDVRPSP-CDA 问题运行结果

运行次数	集货成本/元	库内成本/元	配送成本/元	总成本/元	运行时间/s
1	3967.30	620.00	3509.12	8096.42	102.62
2	3968.27	700.00	3487.07	8155.34	105.39
3	3967.31	620.00	3512.45	8099.76	106.93
4	3967.30	660.00	3500.3	8127.60	108.35
5	3968.24	740.00	3496.25	8204.49	108.80
6	3968.25	740.00	3509.51	8217.76	103.36
7	3968.25	700.00	3507.12	8175.37	105.63
8	3967.30	700.00	3485.05	8152.35	105.63
9	3967.29	660.00	3499.05	8126.34	108.43
10	3968.26	620.00	3480.19	8068.45	109.59
平均值	-	-	-	8142.39	106.47
最优值	-	-	-	8068.45	109.59

表 5 集货路径及入库门分配方案

编号	车型	路径	集货量	车载率	入库门
1	8t	D ₂ -1-2-D ₂	6.54	82%	D ₂ -入库门 3
2	8t	D ₁ -2-3-4-D ₁	6.64	83%	D ₁ -入库门 1
3	8t	D ₂ -5-7-D ₂	7.49	94%	D ₂ -入库门 1
4	8t	D ₁ -7-6-D ₁	5.72	72%	D ₁ -入库门 3
5	8t	D ₁ -10-9-D ₁	5.47	68%	D ₁ -入库门 2
6	8t	D ₂ -9-8-D ₂	7.66	96%	D ₂ -入库门 2

表 6 配货路径及出库门分配方案

编号	车型	路径	货种 1	货种 2	货种 3	车载率	出库门
1	4t	D ₂ -81-75-98-80-61-19-45-38-50-83-65-85-84-D ₁	1.31	1.32	1.27	98%	D ₂ -出库门 2
2	4t	D ₂ -72-37-31-82-32-51-52-47-102-103-70-28-D ₂	1.14	2.00	0.82	99%	D ₂ -出库门 3
3	4t	D ₂ -76-43-68-105-109-95-24-D ₁	1.23	1.06	1.62	98%	D ₂ -出库门 1
4	5t	D ₁ -33-77-49-66-14-64-86-60-30-40-D ₂	2.65	0.58	1.76	100%	D ₁ -出库门 3
5	5t	D ₁ -54-110-108-101-71-93-18-58-57-21-73-100-20-D ₂	1.73	1.65	1.61	100%	D ₁ -出库门 1
6	5t	D ₂ -91-17-55-27-16-87-13-88-44-39-78-36-97-D ₁	0.59	2.20	2.18	99%	D ₂ -出库门 2

(接下页)

(续表 6)

编号	车型	路径	货种 1	货种 2	货种 3	车载率	出库门
7	4t	D ₁ -63-35-34-90-22-11-41-74-59-46-29-D ₂	1.34	1.44	1.20	100%	D ₁ -出库门 2
8	4t	D ₁ -107-23-89-62-99-106-15-94-56-92-D ₂	0.92	2.05	0.90	97%	D ₁ -出库门 3
9	5t	D ₂ -42-79-104-69-26-96-48-53-25-67-12-D ₁	2.27	0.91	1.77	99%	D ₂ -出库门 2

最优方案中,集货阶段累计使用 6 辆 8t 车,集货成本为 3968.26 元;越库中心 1 对各类货物的集货需求分别为: 6.64t、5.72t、5.47t,越库中心 2 对各类货物的集货需求分别为: 6.54t、7.49t、7.66t;配送阶段共使用 9 辆车,其中越库中心 1 使用了 2 辆 5t 车、2 辆 4t 车进行配货,越库中心 2 使用了 2 辆 5t 车、3 辆 4t 车进行配货,配送成本为 3480.19 元.采用多车型进行配送时,各配送车辆的车载率均高于 97%,有效降低了配送成本.此外,各越库中心库内操作成本之和为 620 元,与集配货成本相加得到多越库中心越库配送总成本为 8068.45 元.

4.2.3 敏感性分析

目前,各越库中心在配货阶段大多采用独立配送方式,未考虑多个越库中心共同配送的优势.当采用多越库共同配送模式时,车辆在完成配货服务后可返回任意一个越库中心.为验证多越库中心共同配送优化的有效性,本文对不同配送模式和车辆类型等条件下的配送方案进行求解并对比分析.其中,方案 1 为本文的算例,方案 2 配送模式为各越库中心进行单独配送.方案 3、4 的配货阶段均采用统一车型,分别为 4t、5t.各方案参数设置如表 7 所示.

表 7 敏感性分析参数设置

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
车辆类型	4t、5t、8t	4t、5t、8t	4t、8t	5t、8t
配送模式	共同配送	独立配送	共同配送	共同配送

采用上文所设计的混合遗传算法求解不同方案,运行 10 次得到的平均值如图 4 所示.由图 4 可以看出,方案 1 结果最优,相对于其他方案分别改进了 1.4%、5.0%、2.8%,由此可知,物流企业采用多个越库中心共同配送、多种车型进行配货能有效降低配送成本.

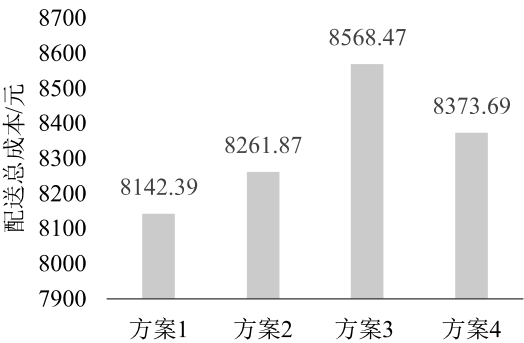


图 4 敏感性分析运算结果

5 结论

本文综合考虑多越库中心共同配送、集货需求可拆分、库内操作等因素,以配送总成本最小化为目标,建立优化模型并设计混合遗传算法求解,通过实验验证了模型与算法的有效性,可得出以下结论:

(1) 以各越库中心集配货成本与库内成本之和最小化为目标建立集货需求可拆分的多越库中心库门分配及车辆路径协同优化模型,所得出的车辆调度及库门分配方案能有效降低越库中心的运营成本,且能够提高城市区域内物流配送效率.

(2) 在设计的混合遗传算法中,将粒子群算法方向性的寻优方式与传统遗传算法中交叉变异相结合,并采取进化逆转和保留最优个体策略,有效增强了算法的寻优能力,提高了求解质量.通过对不同规模的算例进行测试并与已有文献对比,验证了混合遗传算法的有效性,为求解多越库中心库门分配及车辆路径协同优化问题提供新的有效算法.

(3) 在不同配送模式以及不同集配货车车辆类型对配送方案制定的敏感性分析中表明,采用多个越库中心共同配送、多种车型进行配货能有效降低配送成本.

基于上述研究结论,本文得到以下管理启示.首先,各物流企业可以通过越库配送模式直接对各类货物进行拣选分装,省略了在库模式中货物上架、仓储等环节.货物在越库中心内部储存时间短、周转效率高,越库中心基本处于零库存状态,节约了库存管理成本.其次,货物需求种类和数量的大规模增长,对于物流企业中货物的收货、分类、配货等操作效率提出更高的要求,部分企业在同一地区设置了多个越库中心.物流企业制定实际配送计划时,采用多越库中心半开放式联合配送,并灵活选用多种车型进行货物集配,能有效提高资源利用效率,提升企业物流运营管理水平.

本文成果不仅丰富和拓展了越库配送及 VRP 相关理论研究,也为物流企业科学制定配送方案提供了依据.未来将考虑速度时变、模糊需求等因素的影响,对本问题进行进一步深入研究.

参考文献 (References)

[1] Enderer F, Contardo C, Contreras I. Integrating dock-door assignment and vehicle routing with

- cross-docking[J]. *Computers and Operations Research*, 2017, 88(dec.): 30-43.
- [2] 范厚明, 田攀俊, 吕迎春, 张跃光, 任晓雪. 越库配送下考虑时空距离的库门分配与车辆调度优化 [J/OL]. *中国管理科学*: 1-12 [2021-10-10]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0062>.
(Fan H M, Tian P J, Lv Y C, Zhang Y G, Ren X X. Cross-dock door assignment and vehicle routing problem of considering temporal-spatial distance[J/OL]. *Chinese Journal of Management Science*: 1-12 [2021-10-10]. <https://doi.org/10.16381/j.cnki.issn1003-207x.2020.0062>.)
- [3] Yu V F, Jewpanya P, Redi A.A.N.P, Tsao Y C. Adaptive neighborhood simulated annealing for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with multiple cross-docks[J]. *Computers & Operations Research*, 2021, 129(2): 105205.
- [4] Maknoon Y, Laporte G. Vehicle routing with cross-dock selection[J]. *Computers & Operations Research*, 2017, 77: 254-266.
- [5] Stodola P, Mazal J. Applying the ant colony optimisation algorithm to the capacitated multi-depot vehicle routing problem[J]. *Int. J. of Bio-Inspired Computation*, 2016, 8(4): 228-233.
- [6] 范厚明, 刘鹏程, 刘浩, 侯登凯. 多中心联合配送模式下集货需求随机的 VRPSDP 问题 [J]. *自动化学报*: 2021, 47(07): 1646-1660.
(Fan H M, Liu P C, Liu H, Hou D K. The multi-depot vehicle routing problem with simultaneous deterministic delivery and stochastic pickup based on joint distribution[J]. *Acta Automatica Sinica*: 2021, 47(07): 1646-1660.)
- [7] Bezerra S N, Souza S R D, Souza M J F. A GVNS algorithm for solving the multi-depot vehicle routing problem[J]. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2018, 66: 167-174.
- [8] Ben A E, Harbaoui I, Borne P, et al. A comparative study of the PSO and GA for the m-MDPDPTW[J]. *International Journal of Computers Communications & Control*, 2018, 13(1): 8-23.
- [9] Silva M M, Subramanian A, Ochi L S. An iterated local search heuristic for the split delivery vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 53: 234-249.
- [10] 潘雯雯, 郭海湘, 周光勇, 杜天松. 基于两阶段算法的需求可拆分多车型车辆路径问题 [J]. *中国管理科学*, 2016, 24(S1): 55-61.
(Pan W W, Guo H X, Zhou G Y, Du T S. Research on split delivery and heterogeneous fleet vehicle routing problem based on two phase algorithm[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(S1): 55-61.)
- [11] Moghadam S S, Ghomi S M T F, Karimi B. Vehicle routing scheduling problem with cross docking and split deliveries[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2014, 69(0): 98-107.
- [12] 刘琼, 许金辉, 张超勇, 李俊. 需求可拆分的多周期订货—运输集成优化算法 [J]. *计算机集成制造系统*, 2013, 19(10): 2599-2606.
(Liu Q, Xu J H, Zhang C Y, Li J. Multi-cycle order-transportation integrated optimization algorithm for split delivery[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2013, 19(10): 2599-2606.)
- [13] Subramanyam A, Repoussis P P, Gounaris C E. Robust optimization of a broad class of heterogeneous vehicle routing problems under demand uncertainty[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2020, 32(3): 661-681.
- [14] 李顺勇, 但斌, 葛显龙. 多通路网络下多车型低碳城市配送问题 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(11): 2973-2982.
(Li S Y, Dan B, Ge X L. Low-carbon heterogeneous vehicle routing problem under multi-graph network. [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(11): 2973-2982.)
- [15] 肖建华, 王超文, 陈萍, 牛云云. 基于城市道路限行的多能源多车型车辆路径优化 [J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(05): 1339-1348.
(Xiao J H, Wang C W, Chen P, Niu Y Y. The multi-energy heterogeneous fleet vehicle routing optimization under urban traffic restriction[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2017, 37(05): 1339-1348.)
- [16] Ganji M, Kazemipoor H, Molana S M H, Sajadi S M. A green multi-objective integrated scheduling of production and distribution with heterogeneous fleet vehicle routing and time windows[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120824.
- [17] Bektaş T, Laporte G. The pollution-routing problem[J]. *Transportation Research Part B*, 2011, 45(8): 1232-1250.
- [18] Mima S, Criqui P. The future of fuel cells in a long term inter-technology competition framework[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [19] Kreith, F, West, R E. Gauging Efficiency, Well to Wheel[EB/OL]. (2003) [2011-02-09] *Mechanical Engineering*. <http://www.memagazine.org/supparch/mepower03/gauging/gauging.html>
- [20] Liao C J, Lin Y, Shih S C. Vehicle routing with cross-docking in the supply chain[J]. *Expert Systems With Applications*, 2010, 37(10): 6868-6873.
- [21] 强瑞, 缪朝炜, 吴为民. 供应网络中越库转运中心仓门分配问题研究 [J]. *管理工程学报*, 2011, 25(01): 209-215.
(Qiang R, Miao Z W, Wu W M. Truck dock assignment problem for crossdocks in supply networks[J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2011, 25(01): 209-215.)

作者简介

范厚明 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事交通运输系统规划与设计等研究, E-mail: fhm468@163.com;

白雪 (1997—), 女, 硕士研究生, 从事车辆路径问题的研究, E-mail: 107638768@139.com;

田攀俊 (1996—), 男, 硕士研究生, 从事车辆路径问题的研究, E-mail: 15235366769@163.com.