

考虑顾客满意度的多目标车辆路径优化问题

吕焱远,张春美

(太原科技大学 电子信息工程学院,太原 030024)

摘要:针对物流配送中带时间窗的多目标车辆路径问题,建立以最小化车辆使用数与车辆行驶距离,以及最大化客户满意度为目标的数学模型,考虑最大运输时间限制,时间窗及车载量为约束条件,并在对基本差分进化算法的改进基础上,提出一种混合离散差分进化算法。算法两次引入擂台法则使种群中的染色体逐一进行比较和判断从而构造 Pareto 非支配解集。进一步,针对于车辆路径问题中的自然数编码方式,设计一种互换的变异算子并构造了以随机的交叉点进行自定义交叉的交叉算子。针对传统的差分进化算法易过早收敛并陷入局部最优这一问题,采用变邻域的局部搜索策略并提出了两种邻域结构来平衡算法的寻优能力。算例分析表明,算法在平均路径长度上相比于常用于多目标问题求解的 NSGA-II 算法减少了 6.8%,平均客户满意度提高了 3.1%,证明了算法的有效性。

关键词:车辆路径问题;多目标;差分进化算法;客户满意度;局部搜索

中图分类号:U191,TP301 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-2057.2023.06.007

车辆路径问题(vehicle routing problem,VRP)^[1]由 Dantzing 和 Ramser 于 1959 年首次提出,引起了大量学者的关注。随着对传统车辆路径问题及其变体的深入研究,对于车辆到达时间及配送目标的个数越来越有所要求,便提出了有时间窗的车辆路径问题(VRP with time windows,VRPTW)^[2]及多目标车辆路径问题(multi-objective vehicle routing problem,MOVPR)^[3]。文献[4]根据车辆路径问题的特征设计了一种二维编码方式,并应用惩罚函数构建了以车辆行驶总费用最小为目标的单目标数学模型,利用改进狼群算法求解了该问题。文献[5]建立了生鲜农产品多隔室车辆路径优化模型,并通过初始解生成方式的重新设计并加入局部搜索策略,重新设计了一种改进粒子群算法,求解了以生鲜农产品配送成本最小化为目标的单目标车辆路径问题。然而,这些智能启发式算法^[6]的应用还尚在求解单目标车辆路径问题的阶段。考虑到实际生活物流

配送过程中顾客对服务的满意程度、配送成本、车辆利用率等多个问题,单一目标的物流配送已经不再能满足越来越复杂的物流配送任务。

差分进化算法(Differential Evolution,DE)^[7]最初是由 Rainer Storn 和 Kenneth Price 于 1996 年共同提出的在连续空间中进行随机搜索的优化算法,如今,差分进化算法及其变体被不断提出,并广泛应用于解决现实生活中的离散问题。文献[8]建立了带时间窗的车辆路径问题混合整数规划模型,设计了一种整数序规范的辅助算子解决变异问题,应用改进的差分进化算法实现了车辆与路径的双目标优化。但是,对于目标函数的处理采用了一种加权的方法将多目标转化为了单目标,对于多目标的优化并没有很好的展现出来。带精英策略的非支配排序遗传算法(NSGA-II)由 Deb 等人于 2000 年提出,在遗传算法的基础上提出了非支配排序策略,降低了其算法复杂度,并引入精英策略提高种群的多样性。文献[9]建

收稿日期:2021-03-10

基金项目:国家自然科学基金(61603266);山西省自然科学基金(201801D121128)

作者简介:吕焱远(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为复杂系统的建模与优化;通讯作者:张春美副教授,E-mail:zcm10606@163.com.

立以顾客满意度最大及企业配送成本最小的多目标数学模型,分析了顾客对配送满意程度的影响因素,利用 NSGA-II 算法对模型进行了求解。文献[10]通过对初始种群确定及交叉算子的改进,提出一种改进的 NSGA-II 算法,求解了以配送路径最短、综合费用最低的多目标车辆路径问题。

传统的物流配送车辆路径问题大多数是从物流企业的角度出发考虑顾客对于配送服务的时间要求,较少考虑顾客对于不同时间段的配送满意程度,且现有的多目标车辆路径问题一般以总行驶路径或配送成本最小化为目标,缺乏综合考虑配送过程中多个目标函数的优化。本文引入顾客满意度函数,考虑车辆到达时间对顾客满意程度的影响,建立以最小化车辆行驶距离与使用车辆数,及最大化客户满意度为目标的多目标数学模型,提出一种与变邻域搜索相结合的混合差分进化算法对模型进行求解,并与常用于多目标车辆路径问题求解的 NSGA-II 算法进行对比,验证算法的有效性。基于实地调研数据构建算例,利用所提出算法对其进行求解,并找到一组最优路线及相对于各目标平均值较优的折衷行驶路线。

1 多目标 VRPTW 的问题描述及模型建立

1.1 问题描述

假设所有的车辆类型相同且载重量相同,根据文献[11],本文所研究的问题应该满足以下 5 个条件:

- (1) 所有车辆服务完路径上的所有客户后回到它的起点——单一的配送中心。
- (2) 每个客户有且只有一辆车为其服务,但是每辆车可以服务多个客户。
- (3) 任意一条配送路线上所有客户的需求量之和不能超过配送车辆的最大载重量。
- (4) 任意一辆车配送过程中的运输时间不能超过最大运输时间 T 。
- (5) 时间窗约束:客户接受服务的最早时间为 c_i ,最晚接受服务的时间为 d_i ,即顾客允许接受服务的时间在 $[c_i, d_i]$ 的时间窗内。

1.2 数学模型建立

1.2.1 引入顾客满意度

令顾客 i 接受配送服务的时段在 $[a_i, b_i]$ 的时间

窗内。实际生活中,如果车辆因为一些因素在时间窗 $[a_i, b_i]$ 以外的时刻到达,此时客户仍然会接受服务,但对配送的满意程度会降低,于是本文引入了顾客满意度^[12]这一概念。假设客户允许接受服务的最早时间为 c_i ,能接受服务的最晚时间为 d_i 。

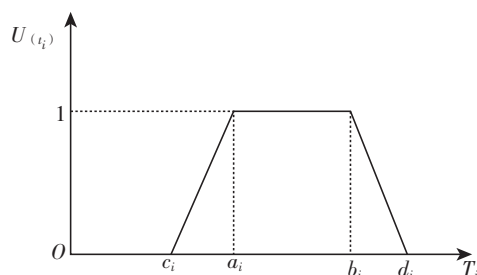


图 1 顾客满意度函数图

Fig. 1 The customer satisfaction function chart

车辆在时间窗 $[a_i, b_i]$ 内到达顾客点处,此时顾客的满意度最大;若车辆在时间窗 $[a_i, b_i]$ 之外到达,但到达的时间窗仍然在 c_i 和 d_i 之间,顾客仍然接受服务,但对于服务的满意度随之下降。基于时间窗的顾客满意度函数如图 1 所示。

引入顾客满意度函数如下式所示:

$$U_{(t_i)} = \begin{cases} \frac{t_i - b_i}{d_i - b_i}, & t_i \in [b_i, d_i] \\ 0, & t_i \notin [c_i, d_i] \\ 1, & t_i \in [a_i, b_i] \\ \frac{t_i - c_i}{a_i - c_i}, & t_i \in [c_i, a_i] \end{cases} \quad (1)$$

1.2.2 数学模型

令 $K = \{1, 2, 3, \dots, m\}$ 为配送中心车辆的集合和客户的集合 $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ (配送中心定义为 1);每辆车的最大载重量为 Q ,最大工作时间为 T ;车辆到达客户 i 的时刻为 t_i ,顾客接受配送服务的软时间窗为 $[c_i, d_i]$;客户 i 到客户 j 的距离为 D_{ij} ,从客户 i 到客户 j 的行驶时间为 t_{ij} ;第 j 个客户需要配送的货物量为 q_i ,服务时间为 s_i ,等待时间为 w_i ; S 为某一车辆的配送客户集合, $|S|$ 表示集合中所包含顶点的个数。

决策变量:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 从客户 } i \text{ 行驶到客户 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{客户 } i \text{ 的需求由车辆 } k \text{ 完成} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

目标函数:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{n+1} \sum_{k=1}^k D_{ij} x_{ijk} \quad (2)$$

$$\min f_2 = \sum_{j=2}^{n+1} \sum_{k=1}^k x_{1jk} \quad (3)$$

$$\max f_3 = \sum_{i=1}^n U_{(t_i)} \quad (4)$$

约束条件:

$$\sum_{i=2}^{n+1} q_i y_{ik} \leq Q, k \in \{1, 2, 3 \dots K\} \quad (5)$$

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

$$\sum_{j=2}^{n+1} x_{1jk} = \sum_{i=2}^{n+1} x_{ilk}, K = \{1, 2, 3 \dots k\} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} x_{ijk} = y_{jk}, j \in \{2, \dots, n+1\}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^{n+1} x_{ijk} = y_{ik}, j \in \{2, \dots, n+1\}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (9)$$

$$\sum_{i \in S, j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=2}^{n+1} x_{ijk} (t_{ij} + s_i + w_i) + \sum_{i=2}^{n+1} x_{ilk} * t_{il} \leq T \quad (11)$$

$$c_i \leq t_i + w_i \leq d_i, i \in \{1, 2, \dots, n+1\} \quad (12)$$

$$w_i = \{c_i - t_i, 0\}, i \in \{1, 2, \dots, n+1\} \quad (13)$$

式(2)和式(3)分别为要求车辆运输距离和车辆数最少的目标函数;式(4)表示最大化平均顾客满意度;式(5)表示车辆载重约束;式(6)表示任意一个客户的配送服务只能由一辆车完成;式(7)表示配送车辆从配送中心出发,在完成配送服务后返回配送中心;式(8)表示车辆对客户*i*完成配送服务后服务客户*j*;式(9)表示车辆在完成客户*j*的配送任务之前服务客户*i*;式(10)表示消除子回路。式(11)表示任意一辆车完成配送的运输时间不能超过最大运输时间;式(12)为车辆开始服务时刻在时间窗范围内;式(13)为等待时间表达式。

本文研究多目标车辆路径问题主要包含三个目标,分别为总的行驶距离最短,车辆使用数最少,以及顾客满意度最大。为了求解方便,即最后能同时得到三个目标函数的最小值或者最大值,于是本文在求解的时候目标函数取顾客满意度的倒数,从而能够使得最后求得的解(三个目标函数)都能同

时得到最小或者最大。

2 改进后的混合差分进化算法

2.1 擂台法则

擂台法则^[13]构造非支配解集:

(1)从当前初始解集中先选出一个个体作为擂主(一般为当前解集的第一个解或第二个解);

(2)将选出的擂主与当前解集中的解逐一进行比较,将被支配者淘汰出局,非支配解将作为新的擂主再与解集中的其他解进行比较直至结束;

(3)重复比较过程,直至当前构造解集为空,筛选出最终的非支配解集。

(4)若在解与解的比较过程中出现了更替现象(即擂主被更换了一次以上),这时需要记录并保留更替发生时的当前解集和新的擂主,因为新的擂主与更替现象发生时被保留下来的解有可能并不是互不相关的关系,反而可能会相互支配。这种情况下,最新比较出的擂主必须与之前被保留下来的个体再行比较,并清除被它所支配的个体。

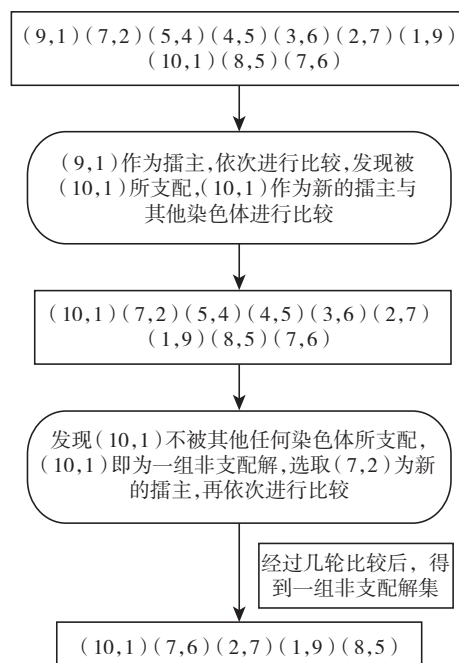


图2 擂台法则示意图

Fig. 2 Schematic diagram of challenge rules

2.2 染色体编码设计

采用针对于车辆路径问题的自然数编码方式,将差分进化算法离散化用于解决离散空间的实际问题。任意一条染色体*S*用(*g*₁, *g*₂, *g*₃, ..., *g*_{*n*})来表

示,第 i 个顾客点用染色体的基因位 g_i 来表示。这样的编码方式不仅能够体现车辆访问顾客点的顺序,还能够保证每辆车只访问每个顾客点一次。1 表示配送中心, k 表示车辆数,从第一个顾客点开始,对配送车辆的容量和时间窗约束进行检验,若满足所有约束则将该顾客点加入路径中,然后考虑下个顾客点,否则,重新使用新的车辆服务该顾客。这种编码方式可以更直观地反映出车辆数量以及路径的划分,从而更方便地对车辆数量和车辆路径进行自动寻优。例如染色体串 4 7 5 8 6 2 3 9, 可以编码为 (1, 4, 7, 1, 5, 8, 6, 1, 2, 3, 9, 1), 即表示有三辆车, 行驶路径分别为 (4→7), (5→8→6), (2→3→9)。

2.3 改进变异策略

针对车辆路径问题重新设计变异操作产生变异个体,增加不同解的个数从而保证种群的多样性,避免算法陷入局部最优,即“早熟”现象。

随机生成两个顾客点位随机数,交换两个随机数所对应的这两个顾客点,产生新的变异个体。

改进后的变异策略如图 3 所示:

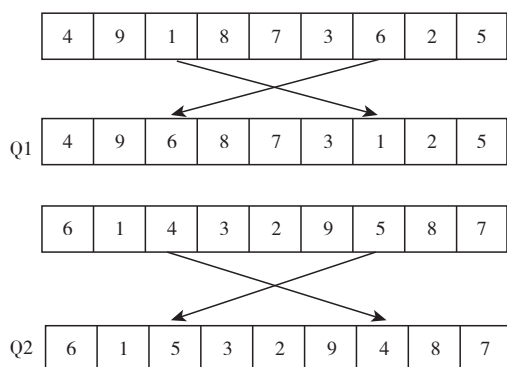


图 3 变异操作示意图

Fig. 3 Variation operation diagram

2.4 改进交叉策略

为避免传统的单点交叉造成的非法子代及基本差分进化算法因交叉的父代个体相同而不能产生新子代的缺点,设计一种以随机的交叉点进行自定义交叉的交叉算子。改进后的交叉算子图如图 4 所示。

对传统交叉策略进行改进,改进后的交叉策略:

(1) 随机选择两个序列 Q1 和 Q2 进行交叉,并随机产生两个交叉点 X 和 Y。

(2) 把交叉点 Y 后的序列移动至原序列的最前

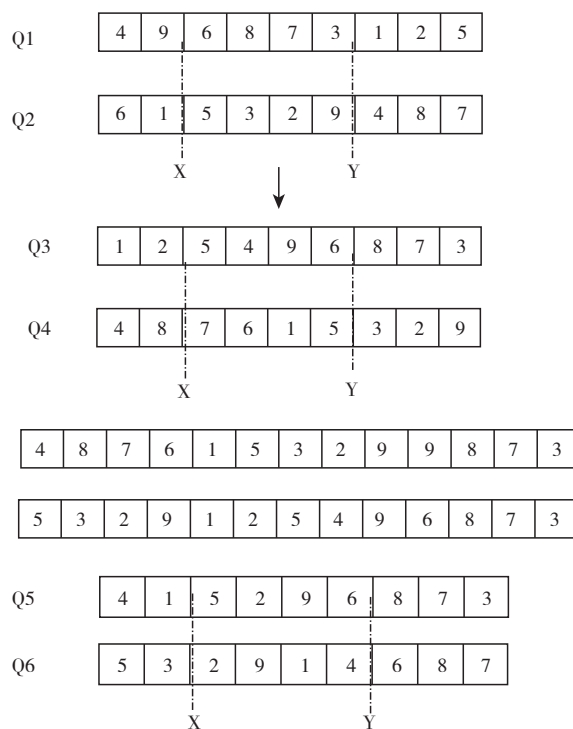


图 4 交叉算子示意图

Fig. 4 The schematic diagram of crossover operator

面,得到新个体 Q3 和 Q4。

(3) 将 Q1 与 Q2 的交叉部分分别移动至 Q4 的尾部和 Q3 的首部。

(4) 将与交叉片段相同的部分消去,得到 Q5 和 Q6 两个新的个体。

2.5 变邻域的局部搜索策略

变邻域搜索(VNS)由 Hansen 等学者于 1997 年提出,基本思想是通过不同的邻域结构进行搜索,不断提高解的质量,具有较强的局部搜索能力。混合差分进化算法局部搜索执行变邻域的局部搜索过程,扩展当前解的搜索空间,减小算法陷入局部最优的可能,平衡算法的寻优能力。采用两种邻域搜索算子产生邻域解。当不能继续改进当前解时,局部搜索过程结束。

邻域结构:

(1) 互换邻域:在自然数编码的顾客序列中随机选择两个顾客点位 a 和 b ,将这两个位置对应的顾客点交换。

(2) 插入邻域:在自然数编码的顾客序列中随机选择两个顾客点位,把点位 a 对应的顾客点抽出并插入到位置 b 。

混合差分进化算法流程图如图 6 所示。

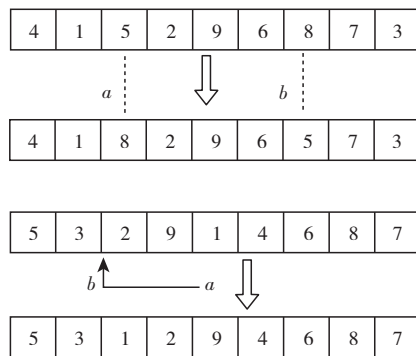


图 5 局部搜索过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of local search process

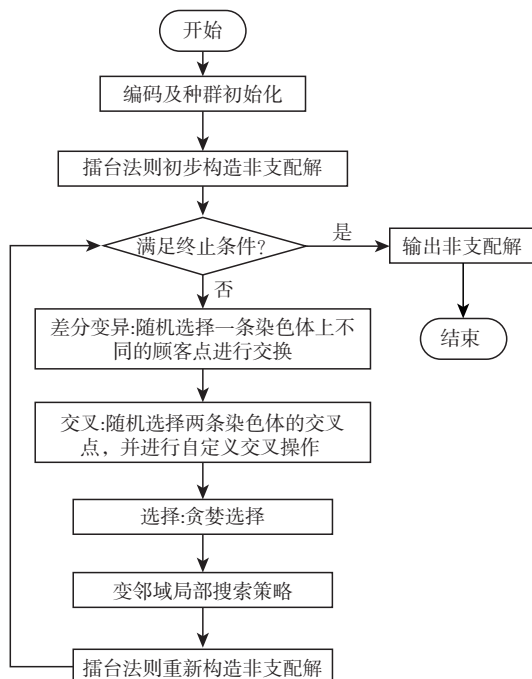


图 6 混合差分进化算法流程图

Fig. 6 The flow chart of hybrid differential evolution algorithm

3 实验与分析

3.1 算例描述与参数设置

采用 20 个配送点为例,通过 Matlab R2018a 对本文算法 DDE-VNS 及 NSGA-II 算法进行求解,20 个配送点信息取自北京燕京啤酒部分营销数据。测试算例中各参数设定情况如下:用自重为 8 t,最大载重量为 20 t,车速为 50 km/h 的车向 20 个客户提供服务,每辆车的最大运行时间 T 为 8 h,在每个客户点处的服务时间为 0.4 h。配送中心坐标为 (30 km, 30 km)。算法的实验参数设置:维数 20,种群规模为 100,最大迭代次数为 1 000,邻域解搜

索最大次数为 100,客户数据以及每辆车的服务时刻如表 1 所示。第一列为客户点编号,第二列为客户点的横纵坐标,即客户点的位置,第三列为每个客户点的需求量,第四列与第七列为硬时间窗限制,第五列与第六列为反应顾客满意度的软时间窗限制。

表 1 20 个配送点的坐标以及客户需求量信息表

Tab. 1 Coordinate of 20 distribution points and customer demand information table

客户编号	坐标	客户需求量	a_i	b_i	c_i	d_i
1	30.0 30.0	0	0	0	0	0
2	7.0 16.0	0.3	0.5	1.5	2.5	3.5
3	15.2 10.9	0.5	2.0	2.5	3.0	3.5
4	18.6 12.9	2.5	1.0	2.0	4.0	5.0
5	11.9 8.2	1.3	0.5	1.5	4.0	5.0
6	10.2 9.5	0.2	1.0	2.0	4.5	5.5
7	15.3 9.6	3.2	3.0	4.0	7.0	8.0
8	0.0 19.0	0.4	0.5	1.5	2.0	3.0
9	11.0 25.0	2.5	1.5	2.5	4.0	5.0
10	7.6 19.2	0.2	3.5	4.5	7.0	8.0
11	26.0 15.7	0.5	1.0	2.0	2.5	3.5
12	15.3 22.0	0.3	1.5	2.5	4.5	5.5
13	1.6 14.7	1.5	1.0	2.0	3.5	4.5
14	19.0 9.2	1	2.0	3.0	5.0	6.0
15	25.4 13.3	0.4	2.5	3.5	4.5	5.5
16	28.0 10.0	0.3	3.0	4.0	6.0	7.0
17	18.6 10.0	2	2.0	3.0	5.0	6.0
18	14.5 15.3	4	2.0	3.0	4.0	5.0
19	15.0 18.7	3.3	0.5	1.5	2.5	3.5
20	9.8 5.0	2	1.0	2.0	3.5	4.5
21	11.4 16.9	1	1.0	2.0	3.5	4.5

3.2 实验结果与分析

本文算法 DDE-VNS 及 NSGA-II 算法分别运行 15 次,两种算法得到 Pareto 解前沿如图 7 和图 8 所示。

由图 7 及图 8 可以看出,相较于 NSGA-II 算法,DDE-VNS 算法的 Pareto 解集中且最优解数量更多,Pareto 前沿具有更好的分布性及聚集性。两种算法运行结果如表 2 所示,DDE-VNS 算法在平均顾客满意度上相比于 NSGA-II 算法提高 3.1%,在平均路径长度上提高了 6.8%。

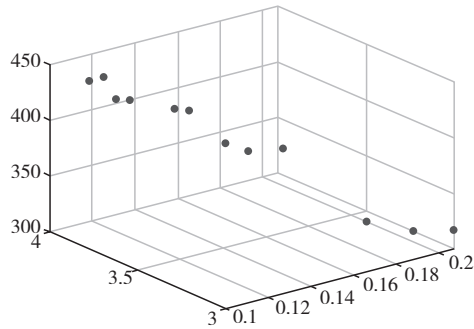


图7 DDE-VNS 算法 Pareto 解前沿

Fig. 7 The distribution of the mean value of Pareto solution

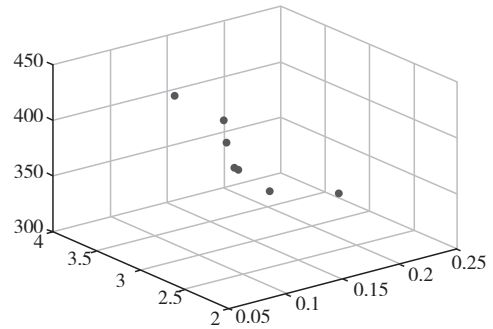


图8 NSGA-II 算法 Pareto 解前沿

Fig. 8 Pareto solution frontier of NSGA-II algorithm

本文算法 DDE-VNS 求解得到 9 组车辆最优路线如图 9 所示。

表 2 两种算法的运行结果

Tab. 2 Results of three algorithms

算法	最优路径 长度/km	最差路径 长度/km	最优路径 顾客满意度	最差路径 顾客满意度	最优路径 车辆数	最差路径 车辆数	平均路径 长度/km	平均客户 满意度	平均车 辆数
NSGA-II	351.25	403.94	8.133 9	5.153 1	3	6	375.19	6.723 3	4
DDE-VNS	316.26	382.51	8.436 2	5.398 6	3	5	349.39	6.932 5	4
改进比例	9.9%	5.3%	3.2%	4.7%	0%	16.7%	6.8%	3.1%	0%

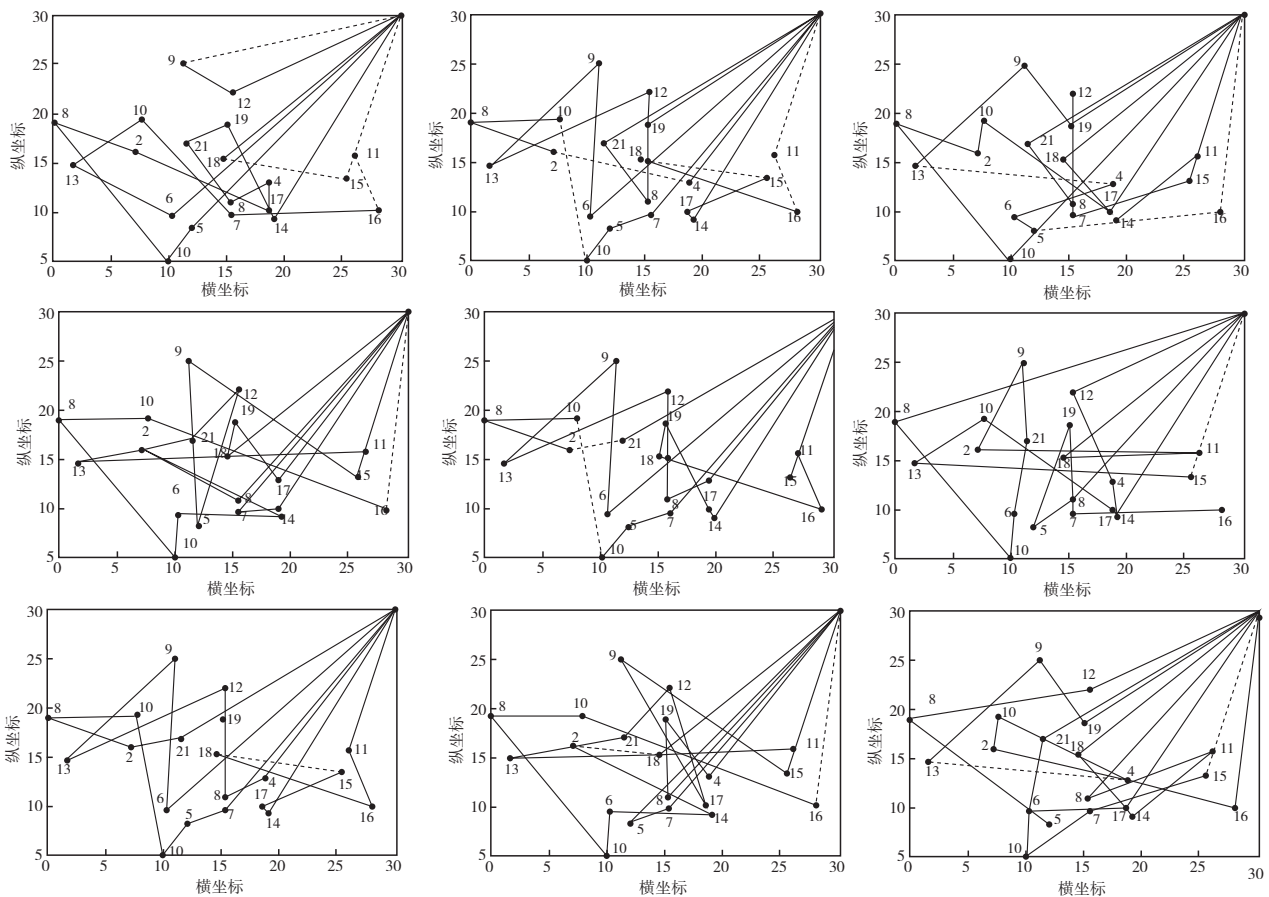


图9 车辆最优路线图

Fig. 9 Vehicle optimal roadmap

平均顾客满意度为 6.932 5, 平均行驶路径长度为 349.39 km, 平均用车辆数为 4 辆车。各目标

值相对平均值最优的折衷行驶路线为路线 8, 其顾客满意度为 7.984 4, 用车辆数为 3 辆, 行驶距离为

326.75 km.

满足各目标值较优的折衷行驶路线为路线8,行驶路线图如图10所示:

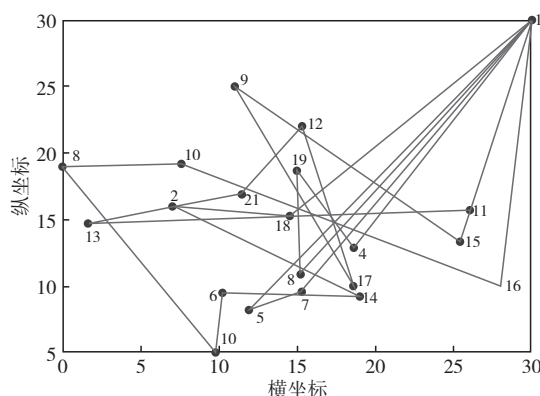


图10 折衷解行驶路线图

Fig. 10 A compromise solution to the road map

4 结束语

研究多目标VRPTW问题,是目前较为复杂的多目标优化问题,不仅难于实现,而且目标函数之间容易产生冲突,很难找到一组各方面都达到最优

的解,甚至应用进化算法来解决该问题都比较困难。本文为使得车辆路径问题更贴近实际生活,在同时优化车辆数及行驶距离的基础上,增加了顾客对配送服务的满意程度,即顾客满意度最大化这一优化目标。针对该问题,在基本差分进化算法的基础上,通过采用针对于车辆路径问题的自然数编码和种群初始化方式,以及对变异算子和交叉算子的重新设计,最后结合两种邻域结构的局部搜索策略,设计了一种混合差分进化算法。经过算例求解,得到一组非支配解集及相对于各目标平均值较优的折衷行驶路线,实现了运输距离与车辆数、以及顾客满意度的多目标优化。本文研究了带时间窗的物流配送多目标优化问题,其目标函数仅定义了顾客满意度,运输距离及车辆数,而在实际生活中,车辆的非满载率、碳排放量、能量消耗等目标函数都会影响物流配送方案的决策。如何实现物流配送中更多目标的优化以及如何正确处理好各个目标之间的制约关系,将是今后进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] DANTZIG G B, RAMSER J H. The truck dispatching problem[J]. Management Science, 1959, 6(1): 80-91.
- [2] DOMINIQUE FEILLET, ALAIN QUILLIOT. Empirical analysis for the VRPTW with a multigraph representation for the road network[J]. Computers and Operations Research, 2017, 88: 103-116.
- [3] WANG, YUAN HE, YONG MING HE, et al. Bio-Inspired Algorithms Applied to the Multi-Objective Vehicle Routing Problem: Frameworks and Applications[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2016, 13(6): 33-48.
- [4] 叶勇, 张惠珍. 求解带时间窗车辆路径问题的狼群算法[J]. 公路交通科技, 2017, 34(10): 100-107.
- [5] 陈久梅, 周楠, 王勇. 生鲜农产品多隔室冷链配送车辆路径优化[J]. 系统工程, 2018, 36(8): 106-113.
- [6] 胡立华, 马瑞, 张名师, 等. 基于改进蚁群算法的智能小车路径规划方法[J]. 太原科技大学学报, 2020, 41(6): 463-469.
- [7] STORN R. Differential evolution design of an IIR filter[C] // Proceedings of IEEE conference Evolutionary Computation (S07803-29023). Nagoya, Japan, 1996: 268-273.
- [8] 曹二保, 赖明勇, 聂凯. 带时间窗的车辆路径问题的改进差分进化算法研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(8): 2420-2423.
- [9] 罗梓瑄, 杨杰庆, 刘学文. 基于NSGA-II的考虑客户满意度的多目标车辆路径问题研究[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2020, 37(6): 13-17.
- [10] 徐慧英, 赵建民, 张泳, 等. 改进NSGA-II算法在车辆路径多目标优化问题中的应用[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(10): 117-121.
- [11] 刘云, 张惠珍. 多目标带时间窗的车辆路径问题的单亲遗传混合蚁群算法[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 95-100 + 106.
- [12] BALAKRISHNAN N. Simple heuristics for the vehicle routing problem with soft time windows[J]. Journal of the Operational Research Society, 1993, 44(3): 279-287.
- [13] 郑金华, 蒋浩, 邝达. 用擂台赛法则构造多目标Pareto最优解集的方法[J]. 软件学报, 2007(6): 1287-1297.

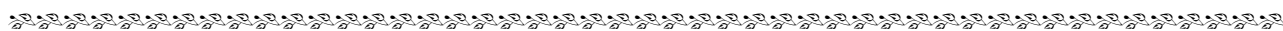
Application and Research of Hybrid Differential Evolution Algorithm in Multi-objective VRPTW Problem

LV Yao-yuan, ZHANG Chun-mei

(College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology,
Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the multi-objective vehicle path problem with time window in logistics distribution, a mathematical model is established to minimize the vehicle usage and vehicle distance, and maximize customer satisfaction. Considering the maximum transportation time limit, time window and vehicle load as constraints, a hybrid discrete difference evolution algorithm is proposed based on the improvement of the basic differential evolution algorithm. The algorithm introduces challenge table rule twice to compare and judge chromosomes one by one in the population, and then construct Pareto non dominating solution set. Furthermore, a kind of crossover operator is designed to deal with the natural number coding in vehicle path problem, and a crossover operator is constructed to customize the intersection at random intersection. In order to solve the problem that the traditional differential evolution algorithm is easy to converge early and fall into local optimization, a local search strategy with variable neighborhood is adopted, and two neighborhood structures are proposed to balance the optimization ability of the algorithm. The results of the example show that the algorithm is 6.8% less than the NSGA-II algorithm, which is commonly used in multi-objective problem solution, and the average customer satisfaction is improved by 3.1%, which proves the effectiveness of the algorithm.

Key words: vehicle routing problem, multi-objective, differential evolution algorithm, customer satisfaction, local search



(上接第 526 页)

Research on Controlling Output Harmonics of Wind Turbine

YANG Jie-bao, YU Shao-juan, YUAN Tian-sheng, YANG Jia-qi

(College of electronic information engineering, Taiyuan University of science and technology,
Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on the continuously increasing harmonic distortion rate of the output current due to the use of IGBT components in PWM converter of wind turbines, a compound control method of parallel repeat controller with proportional integral controller with harmonic suppression function is proposed and applied to the network side converter. Taking the double-fed wind turbine generator (DFIG) as the research object, the mathematical model and its grid-side converter are analyzed, and then the compound controller is placed in the double closed-loop control system of the grid-side converter. The control principle of the compound control strategy is discussed, the mathematical model is established, and the parameter design is carried out, which is verified in MATLAB. Theoretical analysis and simulation results verify the effectiveness of this method for harmonic suppression in grid-side converters of wind turbines.

Key words: grid-side converter, harmonic, repetitive control, proportional integral control