

DOI:10.13196/j.cims.2019.10.014

# 超启发式遗传算法求解带软时间窗的车辆路径问题

韩亚娟, 彭运芳, 魏航, 史保莉

(上海大学 管理学院, 上海 200444)

**摘要:**针对车辆路径问题中传统软时间窗惩罚函数过于线性的问题,考虑客户容忍水平,提出一种折线型软时间窗,并构造出相应的惩罚函数。在此基础上,以运输配送总成本最小为目标,构造出一种带折线型软时间窗的车辆路径问题通用数学模型。同时,提出一种具有一定通用性的超启发式遗传算法,该算法以遗传算法作为上层搜索算法,以 3 种启发式算法——CW 节约法、MJ 插入法和 Kilby 插入法作为底层搜索规则,并通过预排序、局部搜索和全局优化来优化算法。最后,通过 Solomon 标准题库中的 R101 算例分析并验证了所提算法的可行性和有效性。

**关键词:**车辆路径问题;软时间窗;容忍水平;遗传算法;超启发式

**中图分类号:**TP301

**文献标识码:**A

## Hyper-heuristic genetic algorithm for vehicle routing problem with soft time windows

HAN Yajuan, PENG Yunfang, WEI Hang, SHI Baoli

(School of Management, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** The penalty function of traditional soft time window is too linear in Vehicle Routing Problem (VRP). To solve this problem, a new kind of broken line soft time window was proposed by taking the customer tolerance level into consideration, and the corresponding penalty function was constructed. On this basis, a general mathematical model of VRP with broken line soft time window was constructed with the objective of minimizing the total cost of transportation and distribution. Meanwhile, a commonality hyper-heuristic genetic algorithm was presented. Within the hyper-heuristic framework, the genetic algorithm was used as the upper level search algorithm, and three heuristic algorithms (Clarke-Wright algorithm, Mole-Jameson insert algorithm and Kilby insert algorithm) were used as the underlying search rules. The algorithm was optimized by pre-sorting, local search and global optimization. The example of R101 in Solomon benchmark problems was conducted to validate the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

**Keywords:** vehicle routing problem; soft time windows; tolerance level; genetic algorithms; hyper-heuristic

## 0 引言

车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP) 于 1959 年由 Dantzig 等<sup>[1]</sup>针对求解如何将汽油合理分配到不同的加油站,归纳并提出,是一个在物流研究领域具有重要理论和现实意义的问题。带时间窗的车辆路径问题 (VRP with Time Win-

dows, VRPTW) 是车辆路径问题的一种拓展类型,在经典组合优化车辆路径问题上引入了客户对货物到达时间的时间窗约束。在现实生活中,快递配送、门店补货和航运等路径规划问题均可被归结为带时间窗的车辆路径问题。时间窗分为硬时间窗和软时间窗,区别在于是否严格满足时间窗。如果严格满足客户的时间窗,必定使得空载率提升、行驶路径和

收稿日期:2018-05-10;修订日期:2018-07-09。Received 10 May 2018; accepted 09 July 2018.

基金项目:国家自然科学基金(青年基金)项目(71101086,51405283)。Foundation items: Project supported by the National Natural Science Foundation, China (No. 71101086, 51405283).

运行时间延长等,最终导致企业总成本的增加和社会资源的浪费。因此,在支付一定惩罚成本的前提下,适当放宽客户对到达时间的要求,以确保资源的合理配置更有实际意义。本文拟考虑带软时间窗的车辆路径问题(VRP with Soft Time Windows, VRPSTW),同时解决传统模型中惩罚函数太过线性的问题。

Sexton 等<sup>[2]</sup>认为“软时间窗”总是存在可行解,且可以通过惩罚系数实现与硬时间窗一样的评价,他们对带有软时间窗、部分负载和驻留时间的单车装卸问题进行了研究,每个负载的惩罚被假定为装卸时间窗偏差的加权和,并提出用 Benders 分解算法求解该问题。Taillard 等<sup>[3]</sup>在硬时间窗 $[a_i, b_i]$ 的基础上提出软时间窗及相应的惩罚函数,即若车辆在  $a_i$  之前到达,则等到  $a_i$  时刻进行服务并按硬时间窗处理;若车辆在  $b_i$  之后到达且顾客允许则进行服务,但需支付相应的惩罚费用(定义为违反量的线性函数),并利用禁忌搜索算法对该软时间窗问题进行求解。Koskosidis 等<sup>[4]</sup>认为无论车辆是在  $a_i$  之前到达还是在  $b_i$  之后到达顾客均允许,但均需支付相应的惩罚费用(定义为违反量的线性函数)。Balakrishnan<sup>[5]</sup>在对客户的应付罚款和等候时间均设置上限的情况下构造了线性惩罚函数,并采用 3 种简单的启发式算法求解了 Solomon 的 R1 和 RC1 算例。Fagerholt<sup>[6-7]</sup>对带有软时间窗的多船装卸问题进行研究,基于内时间窗 $[A_i, B_i]$ 最大允许违反量  $D_i^{\max}$  将外时间窗扩大为 $[A_i - D_i^{\max}, B_i + D_i^{\max}]$ ,在外时间窗内对应的惩罚函数包含线性的、固定值的和非线性的,并建议采用不同的惩罚函数进行比较,从而很好地权衡运输成本和顾客服务质量。Fu 等<sup>[8]</sup>总结归纳了 6 种类型的 VRPSTW(包含了文献[3-6]中的类型),并设计了统一的惩罚函数,其不同参数值的设定对应不同类型的 VRPSTW,同时提出一种统一的禁忌搜索算法来求解这 6 种类型的 VRPSTW。上述研究以及后续研究中定义的软时间窗惩罚函数基本都是线性的。

对于 VRPSTW 问题,已有多种不同的求解算法。文献[4]针对带软时间窗的车辆路径与调度问题建立了混合整数规划模型,并提出一种“先分群后构造路径”的启发式求解算法;Fagerholt<sup>[6]</sup>对带软时间窗的多船装卸问题进行了研究,Calvete 等<sup>[9]</sup>研究了针对中等规模的带时间窗车辆路径问

题,两文献均采用“先枚举后优化”的精确算法来求解最优解,尽管通过第一步骤后的过滤环节可有效减少可行路线的数量,但该方法的主要缺点是难以解决具有大量可行路线的问题;Gendreau 等<sup>[10]</sup>将带软时间窗的车辆路径和调度问题从静态扩展到动态,并以快递服务为例,利用禁忌搜索算法在并行平台上实现对该动态问题的求解;Hashimoto 等<sup>[11]</sup>针对旅行时间惩罚函数为凸函数而时间窗惩罚函数为非凸函数的情形,建立了动态规划模型,并设计了一种迭代局域搜索算法求解被拜访客户的最佳服务开始时间;Duygu 等<sup>[12]</sup>在模型中考虑了服务效率和客户可靠性,分别运用禁忌搜索算法和自适应大邻域搜索算法求解具有时间依赖性和随机旅行时间的带软时间窗车辆路径问题,并通过案例说明了该方法可用于解决大规模问题;Iqbal 等<sup>[13]</sup>利用人工蜂群激发蜜蜂的觅食行为,运用混合超启发式算法求解了带软时间窗的多目标车辆路径问题。

国内也有不少学者研究求解了 VRPSTW。宾松等<sup>[14]</sup>利用改进的遗传算法求解了带软时间窗的车辆路径问题;刘诚等<sup>[15]</sup>采用随机初始化和构造初始化法构造了并行遗传算法,对带软时间窗的车辆路径问题进行求解;蔡延光等<sup>[16]</sup>对蚁群算法进行改进,求解带软时间窗的联盟运输调度问题;段风华等<sup>[17]</sup>运用改进的禁忌搜索算法求解了带软时间窗约束带取送作业的车辆路径问题;王万良等<sup>[18]</sup>建立了基于车辆共享的软时间窗多配送中心动态需求车辆路径问题的两阶段数学模型,设计了混合 3-OPT 量子进化算法对各阶段模型进行求解;侯玉梅等<sup>[19]</sup>设计了自适应遗传算法,求解带软时间窗约束的整车物流配送路径优化问题;严正峰等<sup>[20]</sup>对不确定环境下复杂机械装配车间配送路径优化问题进行了研究,以工位对物料到达时间的平均满意度为约束条件,建立了带模糊软时间窗的物料配送路径优化模型,并采用动态规划和模拟退火遗传算法相结合的方法对模型进行了求解;杨翔等<sup>[21]</sup>研究了受时间窗影响的多中心开放式 VRP,选用梯形模糊数对时间窗进行模糊处理,定义了客户满意度函数和惩罚费用函数,建立了鲁棒优化模型,设计了改进的蚁群算法对模型进行求解;符卓等<sup>[22]</sup>运用禁忌搜索算法求解了带软时间窗的需求依订单拆分车辆路径优化问题。正如 Burke 在文献[23]中指出的,每一种启发式算法都只能在某一特定情况下表现优异。因此,

本文拟参考新出现的超启发式算法,针对改进的软时间窗车辆路径问题,构造运算简单、寻优性能优异的超启发式遗传算法。

# 1 VRPSTW 的问题描述和数学模型

## 1.1 问题描述

现有一个配送中心,拥有相同容量的若干辆车。有若干个客户点需要配送货物,每个客户的需求量、服务持续时间、最佳服务时间窗和客户的容忍水平已知。在上述已知条件下,合理规划车辆配送路径,使得配送总成本最小。

由于软时间窗放松了对时间窗的约束,能极大地优化资源配置,降低能源消耗和道路拥堵,本文选取软时间窗为研究对象。如文献[4]所述,在传统软时间窗下,无论车辆是在  $e$  之前到达还是在  $l$  之后到达,客户均允许服务,但需支付相应的惩罚费用,其惩罚费用与时间偏离程度一般是简单的线性关系,如图 1 所示。对于最佳服务时间窗的偏离,客户有容忍与无法容忍之分。如果在客户的容忍范围内,单位时间窗的偏离只需支付较少的惩罚成本;如果超过客户的容忍范围,将需支付较多的惩罚成本。因此,在传统软时间窗的基础上,本文考虑了客户的容忍水平,提出折线软时间窗,其惩罚成本函数如图 2 所示。根据客户的容忍水平  $\alpha$  和服务持续时间  $s$ ,可以在最佳时间窗的基础上得到一个容忍时间窗  $[\hat{e}, \hat{l}]$ ,其中,  $\hat{e} = e - \alpha s, \hat{l} = l + \alpha s$ 。如果车辆在最佳时间窗  $[e, l]$  内提供服务,将不需要支付惩罚成本;如果车辆在区间  $[\hat{e}, e]$  或  $[l, \hat{l}]$  内提供服务,单位时间窗的偏离将只需支付较少的惩罚成本;如果车辆开始服务时间早于  $\hat{e}$  或晚于  $\hat{l}$ ,单位时间窗的偏离将需支付较多的惩罚成本。相比于传统的软时间窗,折线软时间窗考虑了客户的实际感受,有利于企业更好地满足客户需求的同时,合理配置和优化资源。

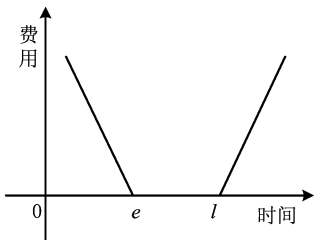


图1 传统软时间窗下惩罚成本函数

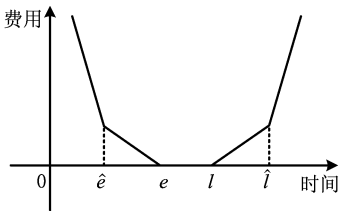


图2 折线软时间窗下惩罚成本函数

针对上述考虑,需要解决的问题及基本假设为:①车辆从配送点出发,服务若干客户点后返回配送点;②到达和离开某个客户点的车辆都只能是同一辆车;③车辆为同种车型,其运输总量不能超出其容量限制;④所有车辆必须在规定的时间内返回配送中心;⑤每位客户的位置坐标、需求量和最佳服务时间窗和容忍时间窗;⑥每位客户必须且只能被访问一次;⑦道路顺畅,不考虑交通堵塞拥挤等特殊情况;⑧配送总成本最小化。

## 1.2 参变量定义

(1)参数

$N$  为客户总数量;

$i, j$  为单个客户点,  $i, j = (0, 1, \dots, N), i, j = 0$  代表配送中心;

$K$  为车辆编号,  $k = (1, \dots, K)$ ;

$Q$  为单车的容量限制;

$d_i$  为客户  $i$  的需求量,  $\max d_i \leq Q$ ;

$e_i$  为客户  $i$  的最佳服务时间窗下限;

$l_i$  为客户  $i$  的最佳服务时间窗上限;

$\hat{e}_i$  为客户  $i$  的容忍时间窗下限;

$\hat{l}_i$  为客户  $i$  的容忍时间窗上限;

$c_{ij}$  为客户  $i$  与  $j$  之间的运输距离;

$t_{ij}$  为车辆从客户  $i$  行驶到客户  $j$  需要的时间;

$\gamma$  为车辆单位距离的运输成本;

$\beta$  为单位车辆的启用成本;

$p_o$  为车辆违反时间窗的单位时间惩罚成本,  $o = (1, 2, 3, 4)$ ;

$\alpha_i$  为客户  $i$  的容忍水平;

$s_i$  为客户  $i$  的服务持续时间;

$T$  为车辆  $k$  的最晚返回时间;

$M$  为极大值。

(2)决策变量

$T_i^k$  为第  $k$  辆车到达客户点  $i$  的时刻,其中  $T_0^k = 0$ ;

$T_i^{'k}$  为第  $k$  辆车服务客户点  $i$  的开始时刻;

当车辆  $k$  从客户点  $i$  行驶到客户点  $j$  时 ( $i \neq j$ ),  $x_{ijk} = 1$ ; 否则,  $x_{ijk} = 0$ 。

### 1.3 折线软时间窗下的惩罚函数

车辆服务客户的开始时间若违反了最佳时间窗约束, 必将产生相应的惩罚成本。如图 2 所示, 在折线软时间窗假设下, 定义的惩罚成本函数为:

$$S(T_i^k) = \begin{cases} p_1(\hat{e}_i - T_i^k) + p_2(e_i - \hat{e}_i), & T_i^k \leq \hat{e}_i; \\ p_2(e_i - T_i^k), & \hat{e}_i < T_i^k \leq e_i; \\ 0, & e_i < T_i^k \leq l_i; \\ p_3(T_i^k - l_i), & l_i < T_i^k \leq \hat{l}_i; \\ p_3(\hat{l}_i - l_i) + p_4(T_i^k - \hat{l}_i), & \hat{l}_i < T_i^k. \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\hat{e}_i = e_i - \alpha_i s_i$ ,  $\hat{l}_i = l_i + \alpha_i s_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。若车辆  $k$  在  $\hat{e}_i$  之前开始服务客户, 则其违反时间窗的单位时间惩罚成本为  $p_1$ ; 若车辆  $k$  在  $[\hat{e}_i, e_i]$  内开始服务客户, 则其违反时间窗的单位时间惩罚成本为  $p_2$ ; 若车辆  $k$  在  $[e_i, l_i]$  内开始服务客户, 则其应支付的惩罚成本为 0; 若车辆  $k$  在  $[l_i, \hat{l}_i]$  内开始服务客户, 则其违反时间窗的单位时间惩罚成本为  $p_3$ ; 若车辆  $k$  在  $\hat{l}_i$  之后开始服务客户, 则其违反时间窗的单位时间惩罚成本为  $p_4$ 。其中, 参数  $p_o$  的设定应满足  $p_1 > p_2$  和  $p_4 > p_3$ 。

### 1.4 数学模型

通过上述分析, 以配送总成本最小化为目标, 参照文献[24]构建带折线软时间窗车辆路径优化问题的数学模型为:

$$\min z = \gamma \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N x_{ijk} c_{ij} + \beta \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{0jk} + \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N S(T_i^k). \quad (2)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^N x_{0jk} = \sum_{i=1}^N x_{i0k} \leq 1, \quad k \in \{1, 2, \dots, K\}; \quad (3)$$

$$x_{ijk} \leq \sum_{p=1}^N x_{0pk} i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K\}; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N x_{ijk} = 1, j \in \{1, 2, \dots, N\}; \quad (5)$$

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N d_i x_{ijk} \leq Q, k \in \{1, 2, \dots, K\}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ipk} - \sum_{j=1}^N x_{pj k} = 0, p \in \{1, 2, \dots, N\},$$

$$k \in \{1, 2, \dots, K\}; \quad (7)$$

$$T_i^k + s_i + t_{ij} \leq T_j^k + M(1 - x_{ijk}), \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, k \in \{1, 2, \dots, K\}; \quad (8)$$

$$T_i^k \geq T_i, i \in \{1, 2, \dots, N\}, k \in \{1, 2, \dots, K\}; \quad (9)$$

$$T_i^k + s_i + t_{i0} \leq T, i \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K\}; \quad (10)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, i, j \in \{0, 1, \dots, N\}, \quad k \in \{1, 2, \dots, K\}. \quad (11)$$

其中: 式(2)表示目标函数为配送总成本最小, 是车辆行驶距离成本、车辆启用成本和惩罚成本三者之和; 式(3)表示如果这辆车启用, 则从配送中心出发并最终返回配送中心; 式(4)表示只有被启用的车才能经过客户点; 式(5)表示每位客户恰好被一辆车访问一次; 式(6)表示每辆车上客户点需求之和不超过车辆的容量限制; 式(7)表示从任意客户点出发的车辆数与进入车辆数必须相等; 式(8)表示一条路径上相邻两个客户点车辆开始服务时间与到达时间之间的关系; 式(9)表示客户点车辆开始服务时间与到达时间之间的关系; 式(10)表示车辆返回配送中心的时间不超过配送中心要求的最晚返回时间; 式(11)表示整数化约束, 限制了  $x_{ijk}$  只能取 0 或 1。

## 2 VRPSTW 超启发式遗传算法

Burke 等<sup>[23]</sup>将超启发式算法解释为一种自动的、用于选择和产生启发式算法解决搜索问题的方法。Garrido 等<sup>[25]</sup>将不同的启发式算法组合成一个大的框架——超启发式算法, 对搜索问题进行求解。基于文献[25]提出的超启发式爬山算法, 本文拟通过修改算法的搜索算法; 引入针对时间窗路径问题的启发式规则, 提出求解带软时间窗车辆路径问题的超启发式遗传算法。

本文选择基于元启发式的超启发式算法求解该问题, 总体框架如图 3 所示。上层策略选择采取遗传算法作为搜索算法; 对于底层启发式规则 (Low Level Heuristic, LLH) 的选择, 应选取能够相互交流、结构简洁、有良好结果和能解决不同问题等特性的规则, 由于没有特定的、较为适合的构造启发式算法能单独求解 VRPTW, 本文在 CW 节约法<sup>[26]</sup>、MJ 插入法<sup>[27]</sup>和 Kilby 插入法<sup>[28]</sup>的基础上, 引入与问题相关的排序规则, 通过局部搜索和全局优化组合成一个大的底层启发式框架。



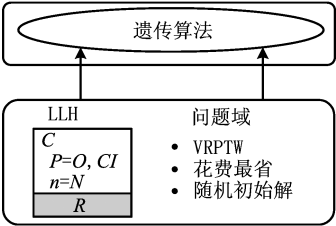


图3 超启发式遗传算法框架图

2.1 超启发式规则

本文选取以下 3 种启发式算法作为底层的搜索规则：

(1)CW 节约法 是一种里程节约法,在每次插入中,将依次需要插入到路线中的客户当成一个单独的线路,计算里程节约矩阵。在容量和里程约束下,考虑将这个客户与当前线路合并或者插入到当前线路组中。

(2)MJ 插入法 是一种花费节约法,在每次插入中,使得插入花费最小。

(3)Kilby 插入法 是一种动态插入法,每次插入到使总花费变化最小的点中。

2.2 排序规则

排序规则已广泛运用于去限制解的搜索空间,对于解集有限的问题,排序的好坏影响了算法的结果。本文考虑的排序是用于决定对客户分配到车辆路线之前的预先操作,即对未分配客户先进行排序后,再进行插入分配。根据客户点的属性,按照客户点的需求(大小)、时间窗(早晚)、距离(远近)和极坐标(大小)进行排序,共有 8 种排序规则。其中,极坐标排序方式指的是以当前集合中未分配距离最近的客户点为  $\theta=0^\circ(\theta$ :弧度),对剩余客户点的相对弧度进行排序。

2.3 局部搜索和全局优化

引入优化算法对插入后的每条线路进行优化,进而产生更好的解。优化算法是超启发式遗传算法框架中花费时间最长的部分。局部优化算法包括点交换方式和弧交换方式两类,其中弧交换方式——2-opt、3-opt 和 or-opt 已广泛应用于提升启发式去求解各类问题<sup>[29-31]</sup>,故本文选择这 3 种弧交换算法,用于对插入过程完成后的每一条线路进行内部优化,使得优化后的线路在总的花费上必定比优化前好。全局优化算法指的是针对任意两条线路之间的交叉、交换和重定位优化算法<sup>[32-33]</sup>,它对线路中任意两两线路进行优化,使得

优化后的解总费用更低。

2.4 遗传算法

(1)编码

传统的遗传算法直接采用解集进行编码,超启发式遗传算法采取组合而成的启发式框架(简称为一组基因)进行编码,这组基因通过解码操作能得到唯一对应的路径组合(如图 4)。通过编码将超启发式算法中的启发式规则表示为遗传空间中的基因,通过基因组成个体,进而组合成种群。一个种群包含若干个由构建和优化两部分组合而成的启发式框架。

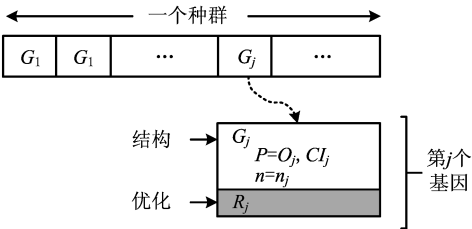


图4 若干基因组成个体的示意图

个体是由多个数量不定的基因组成,且个体中所有基因插入的总客户数固定。一个基因中包含 5 个启发式变量 $[C,P,CI,N,R]$ ,其中  $C$  为该段基因的插入方法; $P$  为选择插入数的排序方式; $N$  为该段基因插入的客户数; $CI$  为完成插入后对每段路线进行的局部优化算法; $R$  为局部优化完成后对所有路径进行的全局优化算法。通过设置不同的插入方法(3 种)、排序方式(8 种)、插入个数和优化算法(局部 3 种,全局 2 种),生成的启发式框架中包含各种不同的启发式规则。

在具体的实施过程中,选择直接以 5 位连续的数字进行编码,每 5 位代表一个基因,相较于传统编码而言,这种个体的编码长度并不固定,只需确保插入客户的总个数满足即为一个可行个体。

(2)解码

解码过程是将一组基因转化为一组路径的过程。单个个体的解码步骤如下：

步骤 1 确定个体中的基因数。

步骤 2 读取个体中的第一个基因,得到 5 个参数 $[C,P,CI,N,R]$ 。

步骤 3 通过排序方式  $P$  对剩余未插入客户点进行排序,选取前  $N$  个客户点得到待插入序列,更新未插入客户点。

步骤 4 根据插入方式  $C$  把待插入序列插入到现有路径中,得到新的路径。

**步骤 5** 对路径进行 CI 局部优化, R 全局优化。

**步骤 6** 判断是否存在下一个基因, 若存在则读取该基因的 5 个参数, 转步骤 3。

**步骤 7** 根据得出的路径, 计算路径上的等待时间、延误时间、总距离和使用车辆数, 进而通过适应度函数计算该个体的适应度。

(3) 适应度

在遗传算法的运行过程中, 需要通过适应度来评价个体在种群中的优劣程度。个体的适应度越大, 个体越优秀。由于 VRPSTW 的目标是使总的配送成本最小, 需要将其目标函数进行相应的转换。本文选取的适应度函数为:

$$f_i = \frac{1}{z_i}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

式中  $z_i$  为个体  $i$  的目标函数值, 即方案  $i$  的总配送成本。

(4) 遗传算子

遗传算子指的是根据适应度对种群中的个体进行的运算。通过遗传算子来操作个体模拟生物进化过程, 保留优秀的个体并生成既新且优秀的个体, 形成新的种群, 最后寻找出无法改进的最优解。遗传算子包含选择、交叉和变异 3 种操作方式(算子)。

1) 选择操作。模拟生物进化过程中的适者生存。本文考虑加入排序和重复随机, 采用改进型轮盘赌法选择方式, 最大限度地保证种群中的优秀个体能被选中, 同时加入最优个体替换机制, 将新种群中的最次个体替换成前代种群中的最优个体。

2) 交叉操作。模拟生物进化过程中的繁衍后代。由于本文编码方式的特殊性, 选择最为基础和简单的单点交叉方式, 在保留种群多样性的前提下搜索出新的优秀个体。交叉操作决定着遗传算法的全局搜索能力, 如果种群同质化过高, 会使得交叉效率降低或者无效。

3) 变异操作。模拟生物进化过程中的基因突变。由于本文选择基因的特殊性, 通过拆分基因、合并基因和替代基因 3 种方式进行变异操作。变异操作能在一定程度上增强遗传算法的局部搜索能力。

(5) 终止进化规则

在求解 VRPSTW 时, 只要满足以下条件之一, 则可终止迭代, 并输出当前最优解和历史记录数据:

1) 优化过程中, 种群个体相同, 且连续 10 代最优个体都无任何改进。

2) 达到预先设定的最大迭代次数。

2.5 超启发式遗传算法的优点

相比传统的启发式算法, 超启发式算法直接在解空间内搜索可行解的组合, 底层启发式规则搜索的还是问题的解, 而高层算法搜索的是不同的底层搜索策略组合, 每一种策略组合通过解码算法后能生成唯一对应的问题的解。通过上下两层协同搜索, 在足够短时间、足够低花费的情况下能够生成足够好的解。对于企业中的路径规划者而言, 花费大量时间和金钱去开发一个只能用于解决某种特定问题的算法是不明智的, 而超启发式算法即为一种通用算法, 在只改变底层搜索规则和评价函数的情况下将算法运用到其他不同的组合优化问题中。同时, 超启发式在问题和底层算法之间引入了一个中间层——规则, 相较于传统算法多了与底层无关的特性, 路径规划人员只需要根据实际问题修改相应的规则就可以将算法应用到其他问题上。

3 算例分析

3.1 算例数据及假设

算例选取 Solomon<sup>[34]</sup> 在 1987 年设计的时间窗路径问题基准测试数据 R101。该问题包含 25 个客户点, 每个客户点具有相应的客户编号(编号 1-25)、横纵坐标(X、Y)、需求量、最佳服务时间窗上下限和服务持续时间; 只有一个配送中心(编号 0), 且配送中心也有时间窗(限制车辆返回时间); 车型单一, 车辆数目无限制, 车辆容量限制为 200; 所有客户点均匀分布在  $(0, 25)^2$  的平面坐标中, 配送中心处于平面正中心; 配送中心与客户点和客户点之间的距离采用欧几里得公式计算, 即距离与时间可以同单位换算。

3.2 算例参数设定

本文考虑的模型中, 单个车辆启用成本  $\beta=60$ , 车辆单位距离的运输成本  $\gamma=8$ 。为便于计算, 统一设定客户的容忍水平  $\alpha=0.5$ , 违反时间窗的惩罚系数  $p_1=1$ 、 $p_2=0.5$ 、 $p_3=1.5$ 、 $p_4=2$ 。另外, 根据本算例问题规模 25, 设定种群参数 20, 交叉概率 0.9, 变异概率 0.098, 最大迭代次数 200。

3.3 算例分析与结果

运用 MATLAB 编程求解在折线软时间窗下的 VRP。为了尽可能地减少随机因素的影响, 本文对算例重复测试 10 次, 选取测试中得到的最好解, 如表 1 所示。

表 1 算例的最优解和具体配送方案

计算结果			路径	客户到达顺序
最优解	车辆数	达到最优解代数	编号	
4 763.8	4	38	1	0-5-16-6-18-8-17-13-0
			2	0-14-15-2-22-23-4-25-0
			3	0-21-12-3-24-1-0
			4	0-11-19-7-10-20-9-0

由表 1 可知,本算例的最优解为 4 763.8,最优配送方案包含 4 条配送路径。该配送方案中各客户点被访问的顺序,以路径 1(车辆 1)为例加以说明。路径 1:配送中心→客户节点 5→客户节点 16→客户节点 6→客户节点 18→客户节点 8→客户节点 17→客户节点 13→配送中心。经验证,所有车辆均没有超出规定的容量约束和时间窗约束,其最优配送路径如图 5 所示。

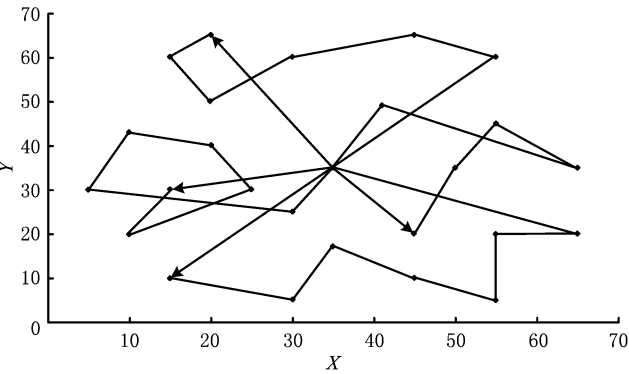


图5 算例最优配送路径示意图

3.4 对比分析

根据文献[35],在传统软时间窗下具有相同的参数: $\beta=60$ 、 $\gamma=8$ 、 $p_2=0.5$ 、 $p_3=1.5$ ,运用遗传算法求解本算例,其最优解为 5 937.2,车辆数为 7,车辆行驶总里程为 640.88。传统软时间窗是折线软时间窗的一个特例,其违反时间窗的惩罚系数  $p_1=p_2=0.5$  和  $p_3=p_4=1.5$ 。折线软时间窗考虑了客户的容忍水平,在容忍时间窗内,违反时间窗的惩罚系数取值不变( $p_2=0.5$  和  $p_3=1.5$ );在容忍时间窗之外,满足  $p_1>p_2$  和  $p_4>p_3$  的要求,其取值为  $p_1=1$  和  $p_4=2$ 。由此可见,在传统软时间窗参数基础上,折现软时间窗惩罚系数的选取将提高惩罚成本。然而,本文的最优解使得车辆总行驶里程减少了 23.24%,车辆使用数由 7 辆减少至 4 辆,配送总成本减少了 19.76%。由此可见,本文提出的超启发式遗传算法是有效的。

同时,两种情况下最优解各辆车的装载率和完成时间对比如表 2 所示。由表 2 可知,车辆均在时限 230 之内返回到了配送点,即车辆均没有违反时限约束。但本文得到的最优解中仅需要 4 辆车,车辆的装载率得到了明显提高。

表 2 最优解各辆车的装载率和完成时间对比

折线软时间窗+超启发式算法			传统软时间窗+遗传算法		
车辆	装载率/%	完成时间	车辆	装载率/%	完成时间
1	47.0	220.25	1	28.50	182.54
2	53.5	212.74	2	17.00	193.00
3	28.0	221.02	3	16.50	197.41
4	37.5	218.40	4	34.00	180.18
			5	7.00	139.46
			6	27.00	186.23
			7	36.00	217.03

4 结束语

本文通过对时间窗和路径问题进行研究,在传统软时间窗的基础上提出了一种折线软时间窗,并构建了相应的数学模型。同时,针对不同启发式算法对同一问题的不同局限性,提出了一种超启发式算法,以遗传算法作为上层搜索框架,运用一种组合启发式为底层搜索规则,融合了节约法和插入法的优点。最后,用 Solomon 的 R101 算例进行了验证。

不同的启发式算法(规则)适合求解不同的问题,超启发式算法的本意是集合多种启发式规则的优点,生成一种通用性算法,使管理人员在面对不同类型问题的时候,不用特意地去开发针对性的算法,而是稍加修改就能在花费足够少的情况下得出一个结果足够好的解。因此,对于超启发式算法来说,构建合适的底层启发式规则,使其更为贴近实际问题,就显得尤为重要。同时,随着问题规模的扩大,本文选取的启发式框架中的优化算法会大大延长运行时间,因此选取合适的启发式进行组合将是未来研究的重点。

参考文献:

[1] DANTZIG G B, RAMSER J H. The truck dispatching problem[J]. Management Science,1959,6(1):80-91.  
[2] SEXTON T R, CHOI Y M. Pickup and delivery of partial loads with “soft” time windows[J]. American Journal of Mathematical and Management Sciences, 1986, 6 (3/4): 369-398.

- [3] TAILLARD E, BADEAU P, GENDREAU M, et al. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows[J]. *Transportation science*, 1997, 31(2): 170-186.
- [4] KOSKOSIDIS Y A, POWELL W B, SOLOMON M M. An optimization-based heuristic for vehicle routing and scheduling with soft time window constraints[J]. *Transportation Science*, 1992, 26(2): 69-85.
- [5] 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.
- [6] FAGERHOLT K. Ship scheduling with soft time windows: an optimisation based approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 131(3): 559-571.
- [7] FAGERHOLT K. Evaluating the trade-off between the level of customer service and transportation costs in a ship scheduling problem[J]. *Maritime Policy and Management*, 2000, 27(2): 145-153.
- [8] FU Z, EGLESE R, LI L Y O. A unified tabu search algorithm for vehicle routing problems with soft time windows[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(5): 663-673.
- [9] CALVETE H I, GALÉ C, OLIVEROS M J, et al. A goal programming approach to vehicle routing problems with soft time windows[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(3): 1720-1733.
- [10] GENDREAU M, GUERTIN F, POTVIN J Y, et al. Parallel tabu search for real-time vehicle routing and dispatching[J]. *Transportation Science*, 1999, 33(4): 381-390.
- [11] HASHIMOTO H, IBARAKI T, IMAHORI S, et al. The vehicle routing problem with flexible time windows and traveling times[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 2006, 154(16): 2271-2290.
- [12] DUYGU T, DELLAERT N, VAN WOENSEL T, et al. The time-dependent vehicle routing problem with soft time windows and stochastic travel times[J]. *Transportation Research Part C*, 2014, 48(11): 66-83.
- [13] IQBAL S, KAYKOBAD M, RAHMAN M S. Solving the multi-objective vehicle routing problem with soft time windows with the help of bees[J]. *Swarm & Evolutionary Computation*, 2015, 24: 50-64.
- [14] BIN Song, FU Zhuo. An improved genetic algorithm for vehicle routing problem with soft time windows[J]. *Systems Engineering*, 2003, 21(6): 12-15 (in Chinese). [宾松, 符卓. 求解带软时间窗的车辆路径问题的改进遗传算法[J]. *系统工程*, 2003, 21(6): 12-15.]
- [15] LIU Cheng, CHEN Zhiya, FENG Quanxi. Parallel genetic algorithm for vehicle routing problems with soft time windows of logistic distribution[J]. *Systems Engineering*, 2005, 23(10): 7-11 (in Chinese). [刘诚, 陈治亚, 封全喜. 带软时间窗物流配送车辆路径问题的并行遗传算法[J]. *系统工程*, 2005, 23(10): 7-11.]
- [16] CAI Yanguang, SHI Kai. Ant colony algorithm for allied vehicle routing problems with soft time windows[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2006, 12(11): 1903-1908 (in Chinese). [蔡延光, 师凯. 带软时间窗的联盟运输调度问题研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2006, 12(11): 1903-1908.]
- [17] DUAN Fenghua, FU Zhuo. Research on the vehicle routing problem with pickup and delivery soft time windows and its tabu search algorithm[J]. *Computer Engineering & Science*, 2009, 31(3): 68-70 (in Chinese). [段风华, 符卓. 有软时间窗约束带取送作业的车辆路径问题及其禁忌搜索算法研究[J]. *计算机工程与科学*, 2009, 31(3): 68-70.]
- [18] WANG Wanliang, HUANG Haipeng, ZHAO Yanwei, et al. Dynamic customer demand VRP with soft time windows based on vehicle sharing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(5): 1056-1063 (in Chinese). [王万良, 黄海鹏, 赵燕伟, 等. 基于车辆共享的软时间窗动态需求车辆路径问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(5): 1056-1063.]
- [19] HOU Yumei, JIA Zhenhuan, TIAN Xin, et al. Research on the optimization on the vehicle logistics distribution with soft time windows[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2015, 30(2): 240-250 (in Chinese). [侯玉梅, 贾震环, 田歆, 等. 带软时间窗整车物流配送路径优化研究[J]. *系统工程学报*, 2015, 30(2): 240-250.]
- [20] YAN Zhengfeng, MEI Fadong, GE Maogen, et al. Path optimization method of workshop logistics based on fuzzy soft time windows[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(10): 2760-2767 (in Chinese). [严正峰, 梅发东, 葛茂根, 等. 基于模糊软时间窗的车间物料流路径优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(10): 2760-2767.]
- [21] YANG Xiang, FAN Houming, ZHANG Xiaonan, et al. Optimization of multi-depot open vehicle routing problem with fuzzy time window[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(7): 1768-1778 (in Chinese). [杨翔, 范厚明, 张晓楠, 等. 基于模糊时间窗的多中心开放式车辆路径问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(7): 1768-1778.]
- [22] FU Zhuo, LIU Wen, QIU Meng. A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with soft time windows and split deliveries by order[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(5): 78-86 (in Chinese). [符卓, 刘文, 邱萌. 带软时间窗的需求依订单拆分车辆路径问题及其禁忌搜索算法[J]. *中国管理科学*, 2017, 25(5): 78-86.]
- [23] BURKE E K, HYDE M, KENDALL G, et al. A classification of hyper-heuristic approaches[M]//*Handbook of Meta-heuristics*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2010: 449-468.
- [24] LI Lin, LIU Shixin, TANG Jiafu. Improved ant colony algorithm for solving vehicle routing problem with time windows[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(9): 1379-1383 (in Chinese). [李琳, 刘士新, 唐加福. 改进的蚁群算法求解带时间窗的车辆路径问题[J]. *控制与决策*, 2010, 25(9): 1379-1383.]
- [25] GARRIDO P, RIFF M, CRISTINA A. DVRP: a hard dy-



- dynamic combinatorial optimisation problem tackled by an evolutionary hyper-heuristic[J]. *Journal of Heuristics*, 2010, 16 (6):795-834.
- [26] CLARKE G, WRIGHT J W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points[J]. *Operations Research*, 1964, 12(4):568-581.
- [27] MOLE R H, JAMESON S R. A sequential route-building algorithm employing a generalised savings criterion[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1976, 27(2):503-511.
- [28] KILBY P, PROSSER P, SHAW P. Dynamic VRPs: a study of scenarios[R]. Glasgow, UK: University of Strathclyde Technical Report, 1998.
- [29] LEVIN A, YOVEL U. Nonoblivious 2-Opt heuristics for the traveling salesman problem[J]. *Networks*, 2013, 62 (3): 201-219.
- [30] MAHI M, BAYKAN Ö K, KODAZ H. A new hybrid method based on particle swarm optimization, ant colony optimization and 3-Opt algorithms for traveling salesman problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2015, 30(C):484-490.
- [31] BABIN G, DENEALULT S, LAPORTE G. Improvements to the Or-opt heuristic for the symmetric travelling salesman problem[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2007, 58(3):402-407.
- [32] BREEDAM A V. Improvement heuristics for the vehicle routing problem based on simulated annealing[J]. *European Journal of Operational Research*, 1995, 86(3):480-490.
- [33] BREEDAM A V. Comparing descent heuristics and metaheuristics for the vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2001, 28(4):289-315.
- [34] Solomon Benchmark Problems. R101 through R112 [DB/OL]. <http://w.cba.neu.edu/~msolomon/r101.htm>.
- [35] JIANG Bo. Study of vehicle routing problem with time windows based on genetic algorithm[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010 (in Chinese). [蒋波. 基于遗传算法的带时间窗车辆路径优化问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.]

# 作者简介:

韩亚娟(1979—),女,陕西宝鸡人,讲师,博士,研究方向:质量管理、系统评价与优化, E-mail: yajuan\_han@yeah.net;

彭运芳(1984—),女,湖北汉川人,讲师,博士,研究方向:制造系统建模与优化、生产调度等;

魏航(1993—),男,湖北荆门人,硕士,研究方向:车辆路径优化;

史保莉(1994—),女,安徽阜阳人,硕士,研究方向:车辆路径优化。