

## 单车辆物流配送决策模型及其遗传算法

朱 伟,徐克林,侣占华,周 娜

(同济大学 机械工程学院,上海 201804)

**摘要:** 从提高装配运输系统运作效率及效益的角度出发,综合考虑配送时窗、配送重量、体积及车辆装载力等约束因素,建立了单车辆配装运输决策模型.通过遗传算法应用在模型中的适应性分析及可能存在的问题或缺陷分析,采用自然数编码、最大保留交叉及自适应交叉变异等技术以遗传父代优良特性、改善算法的早熟及进化停滞现象并增强其寻优性能.算法中嵌入配送重量、体积及配送时窗约束检验子程序以减小编码难度并提高解的精准度.最后以实例说明模型的应用,并指出进一步的研究方向.

**关键词:** 配运决策模型; 遗传算法; 最大保留交叉; 约束检验

**中图分类号:** TP 301

**文献标识码:** A

### Decision-making Model and Its Genetic Algorithm for Single-vehicle Distribution

ZHU Wei, XU Kelin, LI Zhanhua, ZHOU Na

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To improve efficiency and benefit for loading-transportation system, a decision-making model for single vehicle loading-transportation, under comprehensive consideration of the restraints of goods weight and volume as well as loading capacity of vehicle and time-window, is developed. Based on an analysis of the adaptability for genetic algorithm application to the model as well as its possible problems or defects, technologies such as decimal coding and maximum preserved crossover operator as well as adaptive crossover mutation are adopted to inherit good properties of parents and improve the phenomenon of algorithm premature and stagnation as well as enhance its optimization performance. Constraint test subroutine for distribution weight, volume and delivery time window embedded in genetic algorithm in order to reduce the coding difficulty and improve

solution's accuracy. An example is given to explain the process. In the end, further research orientation is discussed.

**Key words:** decision model for physical distribution; genetic algorithm; maximum preserved crossover; constraint test

对配装配载及配送路线优化问题的研究一直是运输组织以及运筹学关注的重点,二者既相互影响,又相互制约.为提高配送系统运作效率及服务水平、进一步降低成本,必须从系统化、集成化的角度出发,将配装配载与运输两大功能进行整合<sup>[1]</sup>.基于以上思路,本文研究并建立了单车辆配装运输决策模型(decision-making model for single vehicle loading-transportation, SLTD).

SLTD 研究是典型的组合优化领域的非确定性多项式难题(NP-Hard)<sup>[2]</sup>,传统的求解方法一般是优化或启发式算法,如 Clarke 和 Wright 提出的节约算法<sup>[3]</sup>,Gillett 和 Miller 提出的 Sweep 算法<sup>[4]</sup>,Lin 提出的  $r$ -opt( $r = 2, 3, \dots$ ;  $r$  指改换的边数)算法<sup>[5]</sup>,Norback 和 Love 研究的几何图解算法<sup>[6]</sup>,Landrieu 等运用的 Tabu 算法<sup>[7]</sup>等,但这些算法随结点数的增加会出现组合爆炸现象.

遗传算法(genetic algorithm, GA)最早由美国 Michigan 大学的 Holland 教授于 1975 年提出,它是受生物进化规律启迪的概率搜索方法<sup>[8]</sup>,极强的鲁棒性和内在的并行计算机机制使它不仅在旅行商问题、背包问题、图分割问题等组合优化问题中取得了很多成果<sup>[9-10]</sup>,而且在配装配载和运输问题中也有广泛应用<sup>[11-12]</sup>,但遗传算法在 SLTD 中的应用尚不多见.本文用 VC++ 6.0 语言实现了求解 SLTD 模型的遗传算法,实例计算表明了算法及模型的有效性.

收稿日期: 2010-03-15

第一作者: 朱 伟(1970—),男,博士生,主要研究方向为系统工程、物流工程. E-mail: zhwluihui@163.com

通讯作者: 徐克林(1945—)女,教授,博士生导师,主要研究方向为工业工程、物流工程及企业资源规划. E-mail: tjklxu@163.com

## 1 SLTD 问题定义及模型建立

### 1.1 SLTD 问题定义

SLTD 问题可定义为:有  $l$  个客户点,配送中心服务它们的配送需求,已知运输车辆的载重量限制为  $G$ ,容积限制为  $V$ ,以总配送成本最低和车载利用率最高为目标函数,在一定的约束条件下,确定满足配送要求的最合适的车辆数  $m$  和最佳的车辆行驶线路.本文研究 SLTD 模型基于如下假设:配送中心到各需求点的距离及需求点间的距离已知;客户数量及其需求量已知;各客户需求均能得到满足且每个客户只能由同一辆车服务;需求点有且只能被服务一次;客户  $i$  任务在时间窗  $[t_{e,i}, t_{l,i}]$  内完成,其中,  $t_{e,i}$  为时间窗起点,  $t_{l,i}$  为时间窗终点;所有货物均可配送;货物配装无需分类,亦无需采用隔离措施;配送车辆为单一车型;配送车辆均由配送中心出发且完成全部配送任务后返回出发点;线路总需求不大于运输车辆的容量;配送过程无退货产生;各道路均通畅,不考虑交通情况约束及车辆行程约束.

### 1.2 模型参数及决策变量

$I = \{i | i = 1, 2, \dots, l\}$  为客户点集合;  $d = \{0\}$  表示配送中心,  $I' = I \cup d$ ;  $K = \{k | k = 1, 2, \dots, M\}$  为车辆集合;  $g_j (j \in I)$  为客户  $j$  需求量;  $v_j (j \in I)$  为客户  $j$  需求体积;  $C_0$  表示单位距离运输成本,  $C_k$  表示车辆  $k$  的固定使用成本,装卸成本折算成运输成本;  $c_1$  表示车辆在客户点等待单位时间的机会成本,  $c_2$  表示车辆滞后到达单位时间的惩罚值( $c_1$  和  $c_2$  大小根据中心与客户双方情况确定).

$d_{hj} (h \in I', j \in I)$  表示中心至客户或客户点之间的距离;  $S_{ki}$  表示  $k$  车服务客户  $i$  的次序;  $t_{hjk} (h \in I', j \in I)$  表示车辆  $k$  从中心至客户或在客户点之间运行的时间;设点  $h$  是同一条线路上点  $i$  的前相邻点,车辆到达  $h$  的时间为  $t_h$ ,车辆到达  $i$  的时间为  $t_i$ ,  $t_{u,h}$  为点  $h$  的卸货时间,则  $t_i = t_h + t_{u,h} + t_{hik}$ , ( $i \in I, h \in I'$ ).  $G$  为运输车载重量,  $V$  为运输车载的体积.

决策变量为

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 从客户 } i \text{ 到客户 } j, i, j \in I, k \in K, i \neq j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{客户 } i \text{ 分配给车辆 } k, i \in I, k \in K \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$W_k = \begin{cases} 1 & \text{车辆 } k \text{ 参与配送任务, } k \in K \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

### 1.3 SLTD 数学模型

$$\min Z_f = C_0 \sum_{i \in I'} \sum_{j \in I} \sum_{k \in K} d_{ij} x_{ijk} + \sum_{k \in K} C_k W_k + c_1 \sum_{i \in I} [t_{e,i} - t_i, 0] + c_2 \sum_{i \in I} [t_i - t_{l,i}, 0] \quad (1)$$

$$\max Z_g = \sum_{i=1}^1 \sum_{k=1}^m g_i y_{ik} \quad (2)$$

$$\max Z_v = \sum_{i=1}^1 \sum_{k=1}^m v_i y_{ik} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i \in I'} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in I \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K} W_k = m, 1 \leq m \leq M \quad (5)$$

$$\sum_{j \in I'} \sum_{i \in I} g_j x_{ijk} \leq G \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in I'} \sum_{i \in I} v_j x_{ijk} \leq V \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I'} x_{ilk} = \sum_{j \in I'} x_{ljk} \quad \forall k \in K, l \in I' \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I'} x_{ijk} = y_{kj} \quad j \in I'; \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{j \in I'} x_{ijk} = y_{ki} \quad j \in I'; \forall k \in K \quad (10)$$

$$t_{e,i} \leq t_i \leq t_{l,i} \quad i \in I \quad (11)$$

$$y_{ik} W_k = 1 \quad \forall j \in I, k \in K \quad (12)$$

$$S_{ki} - S_{kj} + N x_{ijk} \leq N - 1 \quad \forall i, j \in I, k \in K \quad (13)$$

$$x_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1 \quad \forall i, j \in I', k \in K \quad (14)$$

$$y_{kj} = 0 \text{ 或 } 1 \quad \forall j \in I, k \in K \quad (15)$$

目标函数(1)为配送成本最小,其中第1项为配送运输成本,第2项为车辆基本运营成本,第3项和第4项分别为机会成本和惩罚成本;目标函数(2)为车载重量利用率最大,目标函数(3)为车辆容积资源利用率最高.令  $Z'_g = -Z_g$ ,  $Z'_v = -Z_v$ ,则线性加权后的单目标函数  $Z$  可表示为:  $\min Z = \alpha_1 Z_f + \alpha_2 Z'_g + \alpha_3 Z'_v$ ,其中,  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  是介于  $0 \sim 1$  之间的权重系数,可用层次分析法确定,且  $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ .新目标函数统一为追求最小化,为叙述方便,后文称  $Z$  为服务成本.约束式(4)确保每个客户有且仅有一个车辆为其服务;式(5)表示实际参与配送的车辆数为  $m$ ;式(6)为车载重量约束,保证车辆所服务客户的总需求重量不超过车载重量;式(7)为车载体积约束,保证车辆所服务客户的总需求体积不超过车

辆有效容积;式(8)为车辆路线连续性约束;式(9)和式(10)限定只能有一辆车从每个客户节点进出;式(11)为时窗约束表达式;式(12)表示客户  $i$  只能分配给参与配送任务的车辆  $k$ ;式(13)为支路消去约束,确保配送车辆在任何一个客户中不形成回路.

## 2 算法设计

由于标准遗传算法不能保证全局收敛,因此必须精心设计遗传算法的染色体结构、适应度函数、初始群体、遗传算子和控制参数,使之发挥其优越性并以较大的概率获得全局最优解<sup>[13-14]</sup>.

### 2.1 遗传算法应用在模型中的适应性分析

遗传算法以编码方式将搜索空间映射为遗传空间,把可能的解编码成一个向量,称为染色体或个体,通过随机方法确定起始的一群个体,称为种群,然后以生物进化为原型,通过复制、交叉和变异等操作,选择最好的染色体,如此进化下去,直至满足期望的终止条件.

遗传算法是一种应用于优化问题的启发式算法,它尤其适用于常规算法难于求解的复杂空间,自产生以来,便以其鲁棒性好,通用性强,并行计算等魅力吸引了无数学者和工程技术人员为之探讨,但同时,它也存在“编码复杂”、“寻优和收敛受算法设计影响大”、容易出现“早熟”和“进化停滞”等缺点.为此,在 SLTD 模型中,算法采用了以下措施:

(1) 算法中嵌入配送重量、体积及配送时窗检验子程序,减小了编码的复杂程序;

(2) 实验优化算法设计,确保其对于寻优和收敛的“正效应”;

(3) 通过最佳保留和自适应交叉变异等策略改善“早熟”和“进化停滞”现象.

### 2.2 染色体结构

根据公式  $\lceil \sum g_j / G \rceil + 1, j \in I$  确定初始车辆数  $m$ ,将其中  $m-1$  辆车看作虚拟配送中心,它们与配送中心具有相同的编号和位置坐标.采用自然数编码方式,用配送中心编号 0 分割,SLTD 的一条可行线路可编成长度为  $l+m$  的染色体,如图 1 所示.其中,  $i_{kj}$  表示车辆  $k$  负责配送的第  $j$  个客户.访问路径中出现的虚拟配送中心均表示前一车辆结束配送任务后返回配送中心,形成一个配送子路径;同时表示后一辆车由配送中心出发执行配送任务.图 1 染色体结构含义为:车辆 1 从配送中心出发,依次服务客户点  $i_{11}, i_{12}, \dots, i_{1s}$  后返回配送中心,形成子路径

1; 车辆 2 从配送中心出发,依次服务客户点  $i_{21}, \dots, i_{2t}$  后返回配送中心,形成子路径 2; 如此反复,直到所有客户都得到服务.

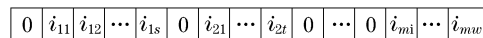


图 1 染色体结构示意图

Fig.1 Diagram of chromosome structure

图 1 染色体结构中,子路径内部有序即调整子路径中需求点位置,目标函数值会发生变化;子路径之间无序,即交换子路径位置,目标函数值不发生变化.

### 2.3 初始种群

配送中心是车辆的出发点和返回点,所以基因编码应始终以配送中心编号 0 开始;其次,生成  $l$  个需求点的随机序列,如  $i_1, i_2, \dots, i_l$ ,在此序列中插入虚拟配送中心点 0,具体方法如下:若  $\sum_{j=1}^{r-1} g_{kj} \leq G$  且  $\sum_{j=1}^{r-1} v_{kj} \leq V, \sum_{j=1}^r g_{kj} > G$  且  $\sum_{j=1}^r v_{kj} > V$ , 其中,  $g_{kj}$  表示第  $k$  条路径上第  $j$  个客户点的需求质量,  $v_{kj}$  表示第  $k$  条路径上第  $j$  个客户点的需求体积;  $t_{e,r} \leq t_r \leq t_{l,r}$ ,则将  $r$  至  $l$  的基因逐一向后移动 1 位,使  $r$  位空出,将 0 插入第  $r$  位 ( $r < l$ ).接着若  $\sum_{j=r}^{s-1} g_{kj} \leq G$  且  $\sum_{j=r}^{s-1} v_{kj} \leq V, \sum_{j=r}^s g_{kj} > G$  且  $\sum_{j=r}^s v_{kj} > V, t_{e,s} \leq t_s \leq t_{l,s}$ ,重复如上操作,使  $s$  位空出,将 0 插入第  $s$  位.如此继续,直到将  $m-1$  个 0 全部插入染色体为止,这样就构成了一条初始染色体.如此反复,直到生成满足种群规模要求的染色体数目.

### 2.4 适应度函数

适应度函数是判断解个体优劣的重要手段,是解值逐步优化的驱动力.为满足适应度函数的非负要求,目标函数通过变换  $f_i = \alpha Z_{\text{best}} / Z_i$  转化为适应度函数,此处,  $f_i$  为染色体  $i$  的适应度,  $\alpha$  为常数,  $Z_{\text{best}}$  为当代最好染色体的服务成本,  $Z_i$  为染色体  $i$  对应的服务成本.显然由表达式  $f_i = \alpha Z_{\text{best}} / Z_i$  得到的染色体适应度值越大越好.

### 2.5 遗传算子

选择算子:采用最佳保留的轮盘赌法复制染色体.

交叉算子:由于基因编码组间无序,组内有序的特点,如果直接采用传统的  $k$  值交叉方式,即随机选取交叉点,交换父代的相应基因片段,将可能分割已形成的优良子路径,甚至得到问题的不可行解.为此,本文采用文献[15]中的交叉算子——最大保留交叉算子运算.具体过程为:(1)如果染色体交叉点

处的2个基因都为0,直接进行部分匹配交叉运算(PMX);(2)如果染色体处的两个基因不全为0,则将交叉点左移(右移),直到交叉点处的两个基因都为0,再进行PMX运算.如:

父代1 0120|345|06780

父代2 0137|026|50480

||内为匹配段,经过最大保留交叉运算后,结果为:

子代1 013402650780

子代2 017034502680

变异算子:采用2点交换作为遗传算法的变异算子,随机选取染色体上的两个基因位,交换这两个位置上的相应基因,形成新个体.若基因串中出现连续0编码,则表示参与配送任务的车辆数多,此时应减少配送车辆,这对于优化配送车辆数目和配送线路非常重要.

## 2.6 交叉变异率及终止条件

(1) 自适应调整交叉率 $p_c$ 和变异率 $p_m$ :以 $f_{\max}$ 表示某代最优染色体的适应度; $f_{\text{avg}}$ 表示同代群体的平均适应度; $f_m$ 表示变异染色体的适应度; $f_c$ 表示两交叉个体的较大适应度值,得到:

$$p_c = \begin{cases} k_1(f_{\max} - f_c)/(f_{\max} - f_{\text{avg}}) & f_c \geq f_{\text{avg}} \\ \max(k_1, (f_{\max} + f_c)/(f_{\max} + f_{\text{avg}})) & f_c < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

$$p_m = \begin{cases} k_2(f_{\max} - f_m)/(f_{\max} - f_{\text{avg}}) & f_m \geq f_{\text{avg}} \\ \max(k_2, (f_{\max} + f_m)/(f_{\max} + f_{\text{avg}})) & f_m < f_{\text{avg}} \end{cases}$$

其中, $k_1, k_2$ 为常数,且满足 $0 < k_1 < k_2 < 1$ .

(2) 算法终止条件:设置进化代数作为算法终止的判断条件.

## 2.7 算法实现步骤

步骤1 输入需求重量集 $N(g) = (g_1, g_2, \dots, g_l)$ ,体积集 $N(v) = (v_1, v_2, \dots, v_l)$ ,运输车载重量 $G$ 和体积 $V$ ,初始车辆数 $m$ ;

步骤2 构造染色体;

步骤3 令 $V_{ms} = 0, G_{ms} = 0$ ,这里 $V_{ms}$ 和 $G_{ms}$ 分别表示车辆 $m$ 已装载的货物总体积和总重量;

步骤4 计算车辆剩余容重比 $R_m = \frac{V - V_{ms}}{G - G_{ms}}$ ;

步骤5 计算客户 $i$ 需求量的容重比 $c_i = v_i/g_i$ ;

步骤6 找出使得 $\min |R_m - c_i|$ 的客户 $i$ ;

步骤7 比较客户 $i$ 货物重量和体积与车辆剩余载重量和容积的大小,若 $V_i \leq V - V_{ms}$ 且 $G_i \leq G - G_{ms}$ ,转步骤8,否则,删除该染色体,转步骤2;

步骤8 若 $t_i \in tw_i$ ,转步骤9,否则,删除该染色体,转步骤2;

步骤9 令 $V_{ms} + V_i \rightarrow V_{ms}, G_{ms} + G_i \rightarrow G_{ms}, I_m/\{i\} \rightarrow I_m$ ;

步骤10 若 $I_m = \Phi$ ,转步骤11,否则转步骤4;

步骤11  $m = m - 1$ ;

步骤12 若 $m \geq 1$ 转步骤3,否则,确认该染色体生成;

步骤13 重复步骤2~步骤12,直至生成满足规模要求的染色体数目;

步骤14 设置控制参数(种群规模 $n$ 、交叉率 $p_c$ 、变异率 $p_m$ 及最大迭代次数 $T$ );

步骤15  $\text{gen} = 0$ ,产生初始群体 $p(0)$ ,群体中每条染色体表示一个SLTD方案;

步骤16  $i = 1$ ;

步骤17 将群体 $p(\text{gen})$ 中的第 $i$ 条染色体译成服务成本;

步骤18 计算第 $i$ 条染色体的适应度值;

步骤19  $i = i + 1$ ;

步骤20 若 $i \leq n$ ,则返回步骤17.否则,染色体复制;

步骤21 进行最大保留交叉、2点变异;

步骤22  $\text{gen} = \text{gen} + 1$ ,若满足终止条件则停止,否则转步骤16.

## 3 实例计算与分析

### 3.1 实例计算

某自有型配送中心服务8个客户的货物配送,配送中心与客户依次编号为0,1,...,8,各客户的货物需求量和需求体积、服务时窗及卸货时间由表1给出.配送任务由载重量为8 t,容积为10 m<sup>3</sup>的车辆执行,配送中心与客户点及各客户点之间的距离由表2给出(假设 $d_{ij} = d_{ji}, d_{ii} = 0$ ).取 $c_1 = 2, c_2 = 4$ ,车辆平均行驶速度为60 km·h<sup>-1</sup>,确定完成任务的车辆数及行车路线.

表1 客户需求特征

客户 $i$	1	2	3	4	5	6	7	8
$v/\text{m}^3$	2.6	3.6	5.9	2.8	3.6	2	2.9	2.2
$g/\text{t}$	1.9	4.3	3.7	3.2	3.7	1	2.1	1
$t_i/\text{h}$	1	2	1	3	2	2.5	3	0.8
$[t_{e,i}, t_{l,i}]$	[1,4]	[4,6]	[1,2]	[4,7]	[3,5]	[2,5]	[5,8]	[1.5,4]

### 3.2 结果分析

配送中心用3辆车即可完成配送任务,3车辆的

线路分别为 0→6→7→5→0,0→3→4→0,0→1→2→8→0; 其配送线路长度分别为 357,318 和 312 km; 服务成本分别为 946,849 和 834 元; 载重利用率分别为 85%,86%和 90%; 容积利用率分别为 85%,87%和 84%. 图 2 为配送结果柱状图.

表 2 网点间距离矩阵

Tab.2 Distance matrix of node

km

j	i								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	48	72	90	108	240	120	192	96
1	48	0	78	48	120	60	90	132	120
2	72	78	0	90	120	120	90	90	90
3	90	48	90	0	120	60	108	108	180
4	108	120	120	120	0	120	90	90	120
5	240	60	120	60	120	0	84	108	90
6	120	90	90	108	90	84	0	84	120
7	192	132	90	108	90	108	84	0	120
8	96	120	90	180	120	90	120	120	0

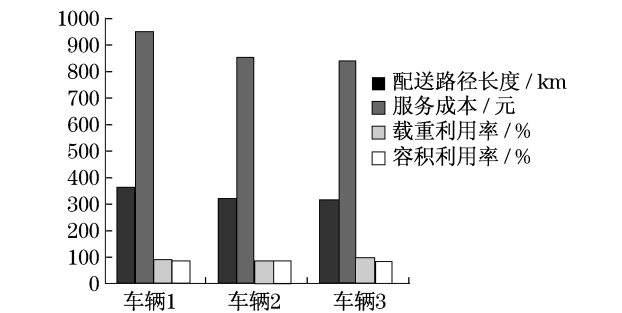


图 2 配送结果柱状图

Fig.2 Column map for distribution results

4 结束语

采用遗传算法实现了 SLTD 模型的求解,本方法可有效地节约车辆行程,降低服务成本;使车辆的载重量和容积资源得以充分利用,减少配送车辆数目,降低配送车辆的购置费用.通过对遗传算子的改进及约束检验子程序的嵌入,算法于全局搜索,改善了局部收敛及早熟现象且提高了算法的速度及解的精准度,较好地解决了多目标配装运输决策问题.下一步将对多车配送及配送与回收集成问题进行研究.

参考文献:

[ 1 ] Tuzun D,Burke L I. A two-phase tabu search approach to the

location routing problem[J]. European Journal of Operational Research,1999,116(1):87.

[ 2 ] Mosheiov G. The travelling salesman problem with pick-up and delivery[J]. European Journal of Operation Research,1994,79(2):299.

[ 3 ] 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.

[ 4 ] Gillett B,Miller L. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem[J]. Operations Research,1974,22(2):340.

[ 5 ] Lin S. Computer solutions of the traveling salesman problem [J]. Bell System Technology Journal,1965,44(10):2245.

[ 6 ] Norback J P,Love R F. Geometric approaches to solving the traveling salesman problem[J]. Management Science,1977,23(11):1208.

[ 7 ] Landrieu A,Mati Y,Binder Z. A tabu search heuristic for the single vehicle pickup and delivery problem with time windows [J]. Journal of Intelligent Manufacturing,2001,12(5-6):497.

[ 8 ] Holland J H. Adaptation in natural and artificial system[M]. Ann Arbor:The University of Michigan Press,1975.

[ 9 ] Grefenstette J,Gopal R,Rosimaita B,et al. Genetic Algorithms for the traveling salesman problem[C]// Proceedings of the 1st International Conference on Genetic Algorithm and Their Applications. Pittsburgh:Lawrence Erlbaum,1985:160-168.

[10] 王蕾,沈庭芝,招扬. 一种改进的自适应遗传算法[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(5):75.

WANG Lei, SHEN Tingzhi, ZHAO Yang. An improved adaptive genetic algorithm [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002,24(5):75.

[11] Montano B R, Anandalingam G, Zandi I. A genetic algorithm approach to policy design for consequence minimization [J]. European Journal of Operational Research,2000,124(1):43.

[12] 谢秉磊,孙毅,李荣喜. 求解配送\收集旅行商问题的遗传算法 [J]. 陕西工学院学报,2002,18(1):70.

XIE Binglei, SUN Yi, LI Rongxi. Genetic algorithm solving salesman problem with pickup and delivery [J]. Journal of Shaanxi Institute of Technology,2002,18(1):70.

[13] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2002.

ZHOU Ming, SUN Shudong. Genetic algorithm theory and application [ M ]. Beijing: National Defence Industry Press,2002.

[14] 玄光男,程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京:科学出版社,2000.

XUAN Guangnan, CHEN Runwei. Genetic algorithms and engineering design[M]. Beijing:Science Press,2000.

[15] 李军,谢秉磊,郭耀煌. 非满载车辆调度问题的遗传算法[J]. 系统工程理论方法应用. 2000,9(3):236.

LI Jun, XIE Binglei, GUO Yaohuang. Genetic algorithm for vehicle scheduling problem with non-full load [J]. Systems Engineering—Theory Methodology Application, 2000, 9(3):236.