

文章编号: 1008-1542(2008)03-0214-05

# 基于遗传算法的西安邮政配送路线优化研究

解丹蕊, 薛惠锋, 韩建新

(西北工业大学自动化学院, 陕西西安 710072)

**摘要:** 构建了单源点、单车型、有时间窗约束的非满载车辆调度问题的模型, 设计了基于自然数编码的遗传算法用于求解该模型。采用最大保留交叉算子, 最大程度地保留了父代的优良特性并增强了算法的寻优能力。通过最后对西安邮政配送系统的行车路线问题进行计算机仿真, 得出 3 个不同配送中心所负责的需求点范围内的行车路线安排, 证明了本算法的优越性。

**关键词:** 遗传算法; 带时间窗的车辆路线问题(VRPTW); 优化; 西安邮政

中图分类号: TP301.6; F603

文献标识码: A

## Study on optimization of Xi'an post logistics distribution routing by genetic algorithm

XIE Dan-rui, XUE Huifeng, HAN Jianxin

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China)

**Abstract:** A model for non-full loaded vehicle scheduling problem with single park and single vehicle type, which has time windows restriction, was constructed. For solving the model, a genetic algorithm based on nature number was designed. Using the maximum preserved crossover, it furthest retained the excellent characteristics of parent, and built up the quality of the algorithm optimization capabilities. Finally, through computer simulation of Xi'an post logistics routing problem, the demand points of the route arrangement for responsible area of three different distribution centers was given, which proved the superiority of the algorithm.

**Key words:** genetic algorithms; vehicle routing problem with time windows (VRPTW); optimization; Xi'an post logistics

配送路线优化是影响物流经济效益、实现物流科学化的重要环节, 对提高配送效率及服务水平、降低运输费用等具有极其重大的意义。车辆调度优化问题则是配送问题的一个核心问题, 因此许多专家学者将着眼点放在如何更好地解决车辆优化调度的问题上。笔者研究的是不同配送中心责任区内部的配送路线优化问题。属于单源点、车队型、有时间窗约束、纯装(或纯卸)的配送路线优化研究, 简称 VRPTW (vehicle routing problem with time windows)。

VRPTW 问题是在满足时间窗约束条件下对车辆进行分配和对每辆车运行路线进行优化, 是典型的组合优化领域 NP 难题。由于 VRPTW 问题的复杂性, 先后涌现出了一大批启发式算法, 最早由 CLARKE 等提出的节约法<sup>[1]</sup>, GILLET 等提出的扫描法<sup>[2]</sup>, BRAMEL 等提出的基于选址问题转化的 LBH 法<sup>[3]</sup>, FISHER 等建立的一般分配算法<sup>[4]</sup>, CHRISTOFIDES 等建立的不完全树搜索算法<sup>[5]</sup>, PUREZA 等研究的 Tabu 搜索算法<sup>[6]</sup>等等。遗传算法的极强的鲁棒性和内在的并行计算机制, 特别适合于非凸空间中复杂的多极值优化和组合优化问题, 在配送路线优化领域有着广泛的应用背景。SOLOMON 等对相关的研究情况做

收稿日期: 2008-04-28; 责任编辑: 王海云

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2005F45); 西北工业大学创新基金资助项目

作者简介: 解丹蕊(1981-), 女, 陕西户县人, 博士研究生, 主要从事系统工程、复杂网络、物流网络等方面的研究工作。

了全面的回顾<sup>[7]</sup>, 文献[8]也对 VRPTW 的研究中所取得的一些成就做了介绍。

## 1 配送路线优化问题的描述与模型构建

### 1.1 问题描述

为讨论方便, 在文中称配送中心为资源点, 称所有的配送需求点为需求点。假设有  $l$  个配送需求点, 每个需求点的需求量和位置以及接收服务的时间范围已知, 要用  $m$  ( $1 < m < M$ ) 辆车 ( $M$  为最大允许的车辆数), 每辆车从配送中心出发, 分别旅行一条线路, 使得每个需求点都得到服务, 即有且仅有一辆车在规定的时间内对需求点作一次访问, 最后回到配送中心。每辆车受时间约束及车载容量的限制。问题是: 如何合理安排车辆数目和车辆路线, 使得满足时间约束的前提下, 配送总费用最少(行驶距离之和、总配送车辆数、闲置时间之和均达到最优值)。

鉴于配送路线安排的复杂性, 在建模前作以下基本假设: 各需求点的需求量固定且已知, 时间窗限制已知; 不考虑货物的装(或卸)耗时; 配送车辆为单一车型, 且车容量限制已知; 需求点有且只能被服务一次; 配送中心到各需求点的距离及需求点间的距离已知; 各道路均顺畅, 不考虑交通堵塞拥挤等特殊情况。

### 1.2 模型构建

在构建模型时, 将配送中心编号为 0, 需求点编号为  $1, 2, \dots, l$ , 配送中心及需求点均以点  $i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, l$ ) 来表示。本文对时间窗的要求为车辆可以在时间窗起点之前到达需求点  $i$ , 但是必须等待至需求点开始接收服务的时间为其服务; 需求点不接收超过时间窗终点的配送服务。模型中的变量和参数符号定义如下。

$M$  为最大允许的配送车辆数;  $\gamma$  为单车的基本运营费用;  $\beta$  为单位距离的配送费用;  $g_i$  为需求点  $i$  的配送需求量;  $q$  为车辆的最大装载容量;  $d_{ij}$  为从点  $i$  到  $j$  的距离;  $c_2$  为表示配送车辆在任务点处等待时, 单位时间损失的机会成本, 其值是一个事先确定的特定值;  $c_3$  为表示配送车辆在要求时间之后到达配送点时, 单位时间所处以的罚值, 其值是一个无穷大的数, 在实际操作中, 为了方便求解取适当大的数即可;  $t_{jk}$  为第  $k$  辆车从  $i$  到  $j$  行驶所用的时间, 简化起见, 忽略各点装卸时间, 且不受交通状况影响, 只与距离有关;  $x_{jk}$  为决策变量, 表示第  $k$  辆车是否从  $i$  开出后开向  $j$ , 如果是, 其值为 1, 否则, 其值为 0;  $y_{ik}$  为决策变量, 表示需求点  $i$  的任务是否由车辆  $k$  来完成, 如果是, 其值为 1, 否则, 其值为 0;  $z_k$  为决策变量, 表示第  $k$  辆车是否参与配送任务, 如果是, 其值为 1, 否则, 其值为 0。

客户要求到达时间用时间段  $[ET_i, LT_i]$  表示; 其中,  $ET_i$  是客户要求到货时间段的始点,  $LT_i$  是客户要求到货时间段的终点,  $T_i$  是估算货物送到的时间。

构建数学模型如下。

目标函数:

$$\min \left\{ \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l \sum_{k=1}^M \beta d_{ij} x_{ijk} + \sum_{k=1}^M \gamma z_k + c_2 \sum_{i=1}^l [ET_i - T_i, 0] + c_3 \sum_{i=1}^l [T_i - LT_i, 0] \right\}. \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^l g_i y_{ik} \leq q, k = 1, 2, \dots, M; \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^M y_{ik} = 1, i = 1, 2, \dots, l; \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^M z_k = m, 1 \leq m \leq M; \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^l x_{ijk} = y_{jk}, j = 1, 2, \dots, l, k = 1, 2, \dots, M; \quad (5)$$

$$\sum_{j=0}^l x_{ijk} = y_{ik}, i = 1, 2, \dots, l, k = 1, 2, \dots, M; \quad (6)$$

$$T_i = \sum_{j=0}^l x_{ijk} t_{jk}; \quad (7)$$

$$x_{ijk} (T_j - T_i) \geq 0, i, j = 1, 2, \dots, l, k = 1, 2, \dots, M. \quad (8)$$

其中,式(1)表示费用最小,其中第1项是配送运输成本,第2项为配送车辆的基本运营成本;第3项是若提前到达配送点产生的等待机会成本,第4项是如果在要求时间之后到达配送点所得到的罚值;式(2)表示车辆 $k$ 承担的任务量之和不大于车辆的容量;式(3)表示需求点 $i$ 只能由一辆车来完成;式(4)表示实际参与配送的车辆数为 $m$ ;式(5)和式(6)表示2个变量之间的关系;式(7)提供了目标函数中 $T_i$ 的数学表达式;式(8)保证了行车路线的顺序性。

## 2 遗传算法设计

由于标准遗传算法并不是全局收敛的,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,使算法能以较大的概率获得全局最优解。

### 2.1 约束的处理

对于VRPTW这类约束较复杂的优化问题,用遗传算法求解时,需要对约束进行处理。这里采用罚函数的方法处理约束。具体过程如下:如果一个染色体对应的解违反了某个约束,视其违反程度给予一定惩罚,使其具有较小的适应度。这样,一些不可行解也有可能进入群体,以保证群体中染色体的数目,使遗传算法得以继续进行。若干代后,不可行解在群体中所占的比例应越来越小,可行解逐渐占据主导地位,并趋于最优解。

### 2.2 解的构造

为提高算法效率,采用自然数编码,即序号编码,以配送中心点的编号0作为隔断,则前文所述VRPTW问题的一条可行线路可编成长度为 $l+M$ 的染色体,其中 $i_{kj}$ 表示第 $k$ 辆车负责配送的第 $j$ 个需求点(如图1所示)。这里 $M$ 为完成任务最大允许车辆数,初始值可根据数学模型 $M = \lceil l/2 \rceil$ 求解。(其中, $\lceil \cdot \rceil$ 表示不大于括号内数字的最大整数, $l$ 为需求点个数。在实际应用中,可根据需要手动调整最大允许车辆数。)

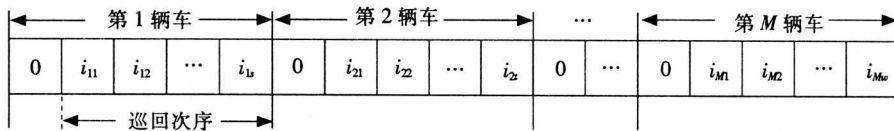


图1 染色体结构示意图

Fig. 1 Structure of chromosomes

这样的染色体结构可通俗地解释为车队的第1辆车从配送中心0出发,经过 $i_{11}, i_{12}, \dots, i_{1s}$ 后,回到配送中心0,形成子路径1;第2辆车从配送中心0出发,经过以前未访问的需求点 $i_{21}, i_{22}, \dots, i_{2s}$ 后,返回配送中心0,形成子路径2;如此往复,直到所有的 $l$ 个需求点全部被访问为止。

按照上述编码产生的染色体01203450678表示的行车路线:

子路径1(车辆1): 配送中心0  $\rightarrow$  需求点1  $\rightarrow$  需求点2  $\rightarrow$  配送中心0;

子路径2(车辆2): 配送中心0  $\rightarrow$  需求点3  $\rightarrow$  需求点4  $\rightarrow$  需求点5  $\rightarrow$  配送中心0;

子路径3(车辆3): 配送中心0  $\rightarrow$  需求点6  $\rightarrow$  需求点7  $\rightarrow$  需求点8  $\rightarrow$  配送中心0。

本文构造的这种染色体结构中,子路径内部是有序的,若子路径1中需求点1,2相互交换位置,会使目标函数值改变;而子路径之间是无序的,若子路径1和子路径2相互交换位置,则不会改变目标函数的值。

### 2.3 初始群体的产生

首先将染色体表示成一组需求点的全排列,然后随机抽取点对交换位置,生成 $l$ 个需求点的随机序列,

如 $i_1, i_2, \dots, i_l$ 。在此序列中插入配送中心点0,具体方法如下:若 $\sum_{j=1}^{s-1} g_{ij} \leq q$ 且 $\sum_{j=1}^s g_{ij} > q$ ,则将 $s$ 至 $l$ 的基因逐

一向后移动1位,使 $s$ 位空出,将0插入第 $s$ 位。接着若 $\sum_{j=s}^{t-1} g_{ij} \leq q$ 且 $\sum_{j=s}^t g_{ij} > q$ ,执行如上操作,使 $t$ 位空出,将0插入第 $t$ 位。如此继续,直到将 $M$ 个0全部插入染色体为止,这样就构成了一条初始染色体。其中, $g_{ij}$ 表示第 $i$ 条路径上载货车辆行驶到第 $j$ 个需求点的载货量, $s < l$ 。如此反复,直至达到初始染色体种群规模。

### 2.4 适应度函数的设计

适应度函数是区别群体中个体好坏的标准,是算法不断演化的驱动力。配送路线优化是一个多目标决策

问题, 最优方案应该是所有需求点的需求在规定时间内得到满足的前提下, 达到配送运输距离、配车车辆成本、闲置时间之和的最小值。选取公式(1)作为适应度函数, 即:

$$\text{fitness} = \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l \sum_{k=1}^M R_{ij} x_{jk} + \sum_{k=1}^M \sum_{k=1}^M \sum_{k=1}^M \lambda_k + c_2 \sum_{i=1}^l [ET_i - T_i, 0] + c_3 \sum_{i=1}^l [T_i - LT_i, 0]。$$

显然, 该式表示的适应度值是越小越好。

## 2.5 遗传算子

### 2.5.1 复制算子

这里采用轮盘法。由于选取的适应度为原始适应度, 值越小越好, 将基本轮盘法的选择概率修正为  $p_i = 1 - f_i / \sum f_i$ 。其中,  $p_i$  为个体  $i$  被选中的概率,  $f_i$  为个体  $i$  的适应度;  $\sum f_i$  为群体的累积适应度。

### 2.5.2 交叉算子

传统的交叉算子是采用  $k$  值交叉方式, 即随机选择交换点, 交换双亲的相应基因片断。由于 VRPTW 组间无序、组内有序的特征, 如果直接采用传统的交叉算子, 将很难保持双亲的优良组特征, 甚至有可能得到大量的不可行解, 有必要对交叉算子针对问题进行改进。这里采用文献[9]中的交叉算子——最大保留交叉方法进行运算。具体操作过程为1) 如果染色体交叉点处的2个基因都为0, 直接进行OX(顺序交叉)运算; 2) 如果染色体交叉点处的基因不全为0, 则将交叉点左移(右移), 直到左右2个交叉点处的基因都为0, 再进行OX运算。举例如下。

双亲 1( $P_1$ ): 0120 | 345 | 06780; 双亲 2( $P_2$ ): 0137 | 026 | 50480。其中, | | 内为匹配段, 经过最大保留交叉运算后, 产生子代 1: 017034502680; 子代 2: 013402650780。

### 2.5.3 变异算子

这里采用2点交换作为遗传算法的变异算子, 即在每代群体中以概率  $P_k$  随机选取染色体上的2个基因位, 把这2个位置上的基因互换, 形成新的基因串。若基因串中出现连续0代码的情况, 则为发生减少配送车数的情况, 对于优化配送车辆数目和改进配送路线有非常重要的影响。

算法参数设置为交叉概率: 变异概率 = 1: 2。算法终止条件采用演化代数作为判断。

## 3 西安邮政物流配送路线优化实例计算及分析

### 3.1 数据准备

选择西安邮政配送系统为研究对象, 分析 A, B, C 3 个不同的配送中心所负责的需求点范围内的行车路线安排配送。中心点和其所负责的需求点分配如表 1 和图 2 所示。受条件限制, 无法获取每个需求点的时间约束, 在具体运算中, 暂不考虑对需求点服务的时效性。因此确定寻优目标为在车辆容量限制约束下, 对各个配送中心点寻找最优配送路线, 使得运输费用和车辆数目最优。

对 3 个配送责任区分别按上文所述方法进行路线优化寻优。采用作者在文献[10]中已经做好的对配送中心点及需求点进行的编号, 各配送中心的具体配送任务如表 1 所示。

表 1 配送供需分配表

Tab. 1 Delivery schedule of supply and demand

配送中心点编号	配送责任点编号
325(C)	172 205 264 395 424 428 435 438 448 452 467 471 475 485 513 533 672 679
862(A)	536 551 601 626 686 690 736 755 762 773 774 774 780 782 793 795 797 798 798 799 801 802 805 809 809 810 812 813 814 814 815 816 817 823 824 825 826 828 832 839 840 841 844 845 849 849 852 858 860 861 864 865 883 885 886 887 925 930 940 941 942 942 943 950 952
130(B)	006 007 008 087 101 763

适应度函数修正为

$$\text{fitness} = w_d \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l \sum_{k=1}^M R_{ij} x_{jk} + w_v \sum_{k=1}^M \lambda_k。 \quad (9)$$

各需求点配送任务量按照需求量与需求点类型成正比的方法处理。需求量比例系数为邮政局: 市区中

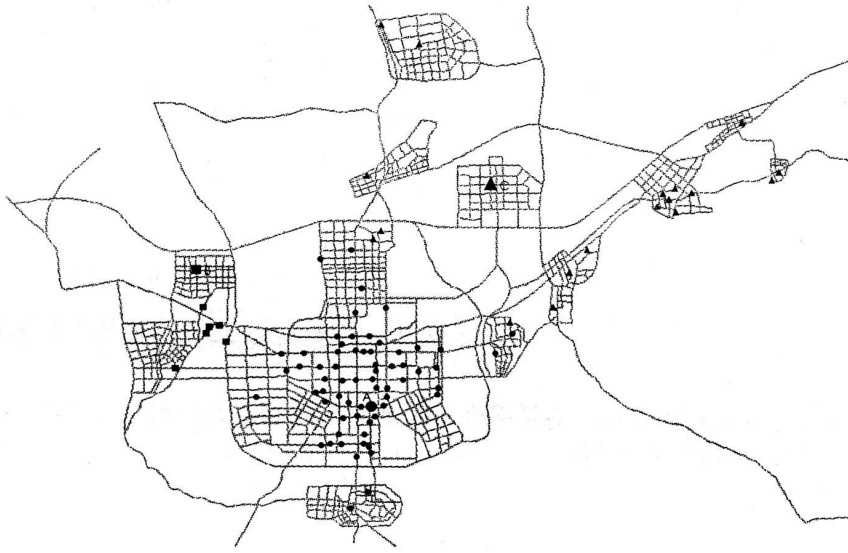


图2 配送中心责任范围

Fig. 2 Responsible range of distribution centers

心邮电局 / 县邮电局: 邮电支局: 邮电所 = 60: 20: 10: 1。取邮电所的需求量为1。单车的车载容量为60, 且交通保持畅通, 路线长度与车辆基本购置成本比重为  $w_d : w_v = 1 : 30$ , 演化100代, 取最优值。

### 3.2 结果分析

对3个配送中心分别计算车辆路线优化方案, A, B, C分别表示配送中心位置, 与之图形一致的点由同一辆车完成配送。

配送中心C路线优化方案的具体路线如表2所示。

表2 配送中心C的车辆路线安排方案

Tab. 2 Route arrangement for distribution center C

车辆编号	路 径	路长 / km	载重 / t
1	325 → 395 → 467 → 471 → 435 → 424 → 325	4 310.78	60
2	325 → 205 → 172 → 264 → 679 → 672 → 533 → 513 → 475 → 485 → 448 → 452 → 438 → 428 → 325	7 656.14	59

优化后配送中心C采用2辆配送车即可完成配送任务, 车辆行驶路线总长11 966.92 km, 比从配送中心出发后完成单点配送即返回的路线总长48 588.80 km, 节约36 621.88 km, 即节约75.4%的车程, 车载利用率达99.17%。

配送中心A路线优化方案的具体路线如表3所示。

表3 配送中心A的车辆路线安排方案

Tab. 3 Route arrangement for distribution center A

车辆编号	路 径	路长 / km	载重 / t
1	862 → 887 → 849 → 817 → 802 → 755 → 736 → 686 → 690 → 823 → 840 → 862	2 866.94	57
2	862 → 839 → 852 → 809 → 793 → 795 → 810 → 858 → 862	196.138	54
3	862 → 841 → 824 → 812 → 797 → 773 → 780 → 782 → 799 → 826 → 844 → 862	1 182.34	55
4	862 → 814 → 862	549.90	60
5	862 → 828 → 816 → 815 → 845 → 864 → 865 → 861 → 860 → 883 → 940 → 941 → 925 → 930 → 942 → 950 → 943 → 886 → 862	1 859.90	56
6	862 → 825 → 798 → 774 → 762 → 801 → 805 → 536 → 551 → 832 → 862 → 952 → 601 → 626 → 885 → 862	2 650.82	57

参考文献:

- [1] 孔繁慧. 粘合衬布的生产和应用[M]. 北京: 纺织工业出版社, 1985.
- [2] 田文玉. 服装粘合衬布聚乙烯热熔胶浆料的研究[J]. 现代化工, 1993, (11): 21-23.
- [3] 毕克鲁. 中国衬布这二十年[J]. 非织造布, 2002, 10(3): 9-10.
- [4] 张军营. 丙烯酸酯胶粘剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 曹同玉, 刘庆普, 胡金生, 等. 聚合物乳液合成原理性能与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1997.
- [6] 叶胜荣, 潘庆华. 我国纺织用品热熔胶的现状与发展[J]. 产业用纺织品, 2004, (11): 21-24.

(上接第 218 页)

优化后配送中心 A 采用 6 辆配送车即可完成配送任务, 车辆行驶路线总长 11 071.28 km, 比从配送中心出发后完成单点配送即返回的路线总长 46 588.00 km, 节约 35 516.72 km, 即节约 76.2% 的车程, 车载利用率 94.17%。

配送中心 B 路线优化方案的具体路线如表 4 所示。

表 4 配送中心 B 的车辆路线 安排方案

Tab. 4 Route arrangement for distribution center B

车辆编号	路 径	路长 / km	载重 / t
1	130 → 87 → 101 → 8 → 763 → 7 → 6 → 130	1 586.02	33

优化后配送中心 B 采用 1 辆配送车即可完成配送任务, 车辆行驶路线总长 1 586.02 km, 比从配送中心出发后完成单点配送即返回的路线总长 5 512.34 km, 节约 3 926.32 km, 即节约 71.2% 的车程, 车载利用率 55%。

配送路线优化前后路长长度如图 3 所示。

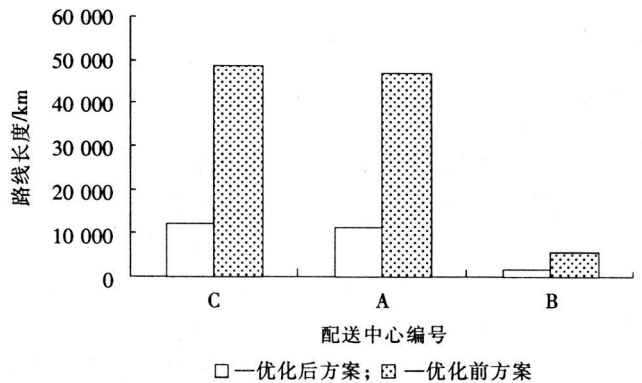


图 3 配送路线长度优化前后对比图

Fig. 3 Comparison of delivery routes length before optimizing and after optimizing

4 结 论

本文采用基于改进遗传算法的配送路线优化模型实现了配送车辆数目和配送路线的综合求解, 路线优化后采用巡回的方式访问各需求点。该方法不仅使得交通距离得到了很大的改善, 而且也充分利用了车辆的容积资源, 节省了配送车辆数目, 降低了配送车辆的基本购置费用。研究表明, 算法在全局上进行搜索, 通过对遗传算子的改进, 在一定程度上提高了算法的搜索速度, 有效解决了有车辆容量限制的配送路线优化问题。

参考文献:

- [1] CLARKE G, WRIGHT J V. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points[J]. Operations Research, 1964, 12: 568-581.
- [2] GILLET B E, MILLER L R. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem[J]. Operations Research, 1974, 22: 340-349.
- [3] BRAMEL J, SIMCH+LEVI D. A location based heuristic for general routing problems[J]. Operations Research, 1995, 43: 649-660.
- [4] FISHER M L, JAIKUMAR R J. A generalized assignment heuristic for vehicle routing[J]. Networks, 1981, (11): 109-124.
- [5] CHRISTOFIDES N, MINGOZZI A, TOTH P. The Vehicle Routing Problem[A]. Combinatorial Optimization[C]. New York: Johnly Wiley, 1979.
- [6] PU REZA V M, FRANCA P M. Vehicle Routing Problems via Tabu Search Metaheuristics[R]. Montreal: Publication CRT-747, Centre de Recherche Surles T transports, 1991.
- [7] SOLOMON M, DESROSIERS J. Timewindow constrained routing and scheduling problems[J]. Transp Sci, 1988, 22: 1-13.
- [8] 肖 雁, 符 卓. 带软时间窗的车辆路径问题及其应用前景探讨[A]. 中国运筹学会第六届学术交流会议论文集[C]. 香港: Global-Link 出版社, 2000.
- [9] 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, 3(9): 235-238.
- [10] 李 魁. 基于复杂系统理论的配送网络优化研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.