

文章编号: 1001-0920(2003)04-0418-05

## 物流配送路径多目标优化的聚类-改进遗传算法

张 潜<sup>1</sup>, 高立群<sup>1</sup>, 胡祥培<sup>2</sup>, 吴 畏<sup>3</sup>

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116023; 3. 北方航空公司 维修基地, 辽宁 沈阳 110169)

**摘要:** 探讨运输车辆路线安排调度问题的解决方法, 提出一种先用优先级综合聚类分析法将客户分类, 再用带有控制开关系统的改进遗传算法求解多目标 VRP 的优化方法。构造了一种随机开关, 以此控制遗传算法中的变异运算, 增加了群体的多样性, 避免了遗传算法中“局部最优现象”的发生。计算机仿真实验证明了该算法的有效性。

**关键词:** 改进遗传算法; 多目标运输车辆路线安排; 定位-运输路线安排; 物流系统优化; 聚类分析  
中图分类号: TP18 文献标识码: A

## Research on multi-objective vehicle routing problem of optimization based on clustering analysis and improved genetic algorithm

ZHANG Qian<sup>1</sup>, GAO Li-qun<sup>1</sup>, HU Xiang-pei<sup>2</sup>, WU Wei<sup>3</sup>

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;  
2. Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;  
3. Maintenance and Overhaul Base, China Northern Airlines, Shenyang 110169, China)

**Abstract:** An improved genetic algorithm(IGA) with control switch system architecture is presented for the solution of multi-objective vehicle routing problem (MVRP). Random switch is constructed to control crossover calculation and to improve the population complexity in the suggested method. This improved GA architecture makes it possible to search the solution space efficiently, thus producing good solutions without local optimization. A computational study shows that the IGA with switch control system achieves significant improvement over a recent MVRP heuristic.

**Key words:** Improved genetic algorithm; Multi-objective vehicle routing problem; Location routing problem; Logistic systematic optimization; Clustering analysis

### 1 引言

物流配送车辆调度问题包括运输路线安排问题 (VRP) 和车辆调度问题 (VSP), 被认为是 NP-hard 问题。VRP 调度问题具有复杂性和多约束性的特点, 属组合优化问题, 很难获得对一般问题的解决方

案。VRP 问题包括带时窗的 VRP, 随机 VRP, 多仓库 VRP 等问题<sup>[1]</sup>。近年来, 学者们用精确算法和近似算法求解 VRP 组合优化难题, 并取得了一定的进展。

精确算法有分枝定界法, Column generation,

收稿日期: 2002-08-26; 修回日期: 2002-10-21。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70171040)。

作者简介: 张潜(1971—), 女, 辽宁沈阳人, 讲师, 博士生, 从事系统建模与控制、物流运输调度的研究; 高立群(1949—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统的建模与控制等研究。

Lagrangian decomposition 和 K-树状算法。Laporte 和 Nobert 提出了多种分枝定界法<sup>[2]</sup>。Christofieds 用动态规划放宽空间变量解决 VRP 问题<sup>[3]</sup>。Fisher 提出用两阶段优化方法解决带有时窗的 VRP 问题<sup>[4]</sup>。Simchi 提出先用 Column generation 再用分枝定界法解决 VRP 整数规划问题。关于近似算法, Laporte 用禁忌搜索提高了求解 VRP 问题的精度<sup>[5]</sup>。Osman 用 2-opt 组合优化方法<sup>[6]</sup>, 通过交换不同路线的顶点进行求解。国内学者蔡延光等用模拟退火和禁忌搜索<sup>[7]</sup>求解带时窗的多重运输调度问题。张涛等用禁忌搜索和 3-opt 组合优化方法<sup>[8]</sup>解决多车队运输调度问题。李军等用序列优化启发式算法<sup>[9]</sup>求解组合运输调度问题。

本文研究多目标运输车辆路线安排问题 (MVRP)。由于 MVRP 问题不同目标之间相互制约, 使其建模和求解具有一定的难度。文中将带有时窗的 VRP 中的时间变量引入目标函数, 建模时重点考虑运输成本和时间两个目标, 满足总成本最小和时间准时两个条件, 将时间约束作为目标转化成成本函数, 实现了将多目标问题转化成单目标问题求解。本文提出一种用聚类分析的改进遗传算法求解 MVRP 的方法。首先用优先级综合聚类分析将不同客户分为若干客户子类; 然后对每一客户子类用带有控制开关系统的改进遗传算法求解优化运输路线。该方法能自适应求解物流配送路径优化问题, 为解决物流系统优化中运输车辆路线安排问题提供新的思路。

## 2 运输车辆路线安排问题的含义和描述

### 2.1 运输车辆路线安排问题的含义

运输车辆路线安排问题是定位-运输路线安排问题之一, 可定义为: 运输车辆从一个或多个设施到多个地理上分散的客户点, 优化设计一套货物流动的运输路线, 并满足一系列约束条件<sup>[10]</sup>。

该问题的前提条件是设施位置、客户点位置和道路情况已知, 由此确定一套车辆运输路线, 以满足目标函数。通常, VRP 的目标函数是总费用最小, 如图 1 所示。其中:  $H$  表示设施,  $V$  表示客户,  $k$  表示运输路线。

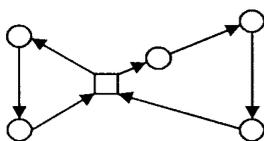


图 1. VRP 的目标函数

### 2.2 MVRP 问题的描述

建立 MVRP 问题模型, 假设前提如下:

- 1) 物品流向为双向, 即涉及的设施(或称仓库)既有输入又有输出。
- 2) 供/需特征满足确定型的特点, 即物品供应/需求量是已知的, 并在一定时期内相对稳定。
- 3) 仓库为多个, 且每次仅由一个仓库为运输路线上的客户提供服务。
- 4) 运输工具为多车辆, 并满足单车的容量大于运输路线上客户的总需求量, 车辆在完成全部运输任务后回到出发点。
- 5) 目标为多目标, 满足 VRP 的多目标通常是总费用(包括车辆运输费用等)最小, 运输时间准时。若提前或准时运给顾客, 则不予惩罚; 否则, 要给予惩罚。

## 3 多目标 VRP 问题的模型建立

### 1) 模型中的决策变量

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{第 } k \text{ 台运输工具从客户 } i \text{ 到 } j \\ & i \in H, j \in H, k \in V \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

### 2) 模型中参数的含义

$C_{ij}$  - 从客户  $i$  到客户  $j$  的平均单位运输成本;

$d_{ij}$  - 从客户  $i$  到客户  $j$  的距离;

$\alpha$  - 整体运输路线上的路况权系数;

$T_{ij}$  - 按要求准时将货物从客户  $i$  运到客户  $j$  所用的时间;

$T_{ijb}$  - 没按要求拖期将货物从客户  $i$  运到客户  $j$  所用的时间;

$H \{i | i = 1, \dots, N\}$  - 一系列需要服务的客户;

$V \{v_k | k = 1, \dots, K\}$  -  $K$  台运输工具可以到达客户的路线;

$C_r$  - 没按客户要求拖期将货物运到的平均单位时间惩罚成本;

$r (r = 1, \dots, R)$  - 某一已知给定的仓库;

$q_j$  - 客户  $j (j \in H)$  需求的平均数量;

$Q_k$  - 运输工具  $k (k = 1, \dots, K)$  的容量;

$X_{ijk}$  - 第  $k$  辆车从仓库  $r$  为客户  $j$  提供运输服务。

### 3) 模型的建立

目标函数

$$f(x) = \min_{i \in H, j \in H, k \in V} C_{ij} X_{ijk} (\alpha d_{ij}) + C_r (T_{ijb} - T_{ij}) \quad (1)$$

满足约束条件

$$X_{ijk} = 1, \quad \forall j \in H \quad (2a)$$

$$q_i X_{ijk} \leq Q_k, \quad \forall k \in V \quad (2b)$$

$$X_{pk} - X_{jk} > 0, \quad \forall k \in V, p, j \in H \quad (2c)$$

$$X_{ijk} \leq 1, \quad \forall k \in V, \forall j \in H \quad (2d)$$

$$X_{ijk} = 0 \text{ or } 1, \quad \forall i, j \in H, k \in V \quad (2e)$$

在以上公式中,目标函数(1)为总成本(包括运输成本,获取运输工具所需成本,货物拖期的惩罚成本)求极小值。约束条件(2a)确保每一客户仅由一台运输工具提供服务;式(2b)为运输工具容量约束,满足在路线上行驶的每台车辆都不超过其容量;式(2c)是一系列路线连续约束,是指运至某一点的货物由同一车辆运出;式(2d)保证每一运输车辆的路线最多从一个仓库驶出;式(2e)是取整数约束。

### 4 MVRP 问题的求解算法

#### 4.1 MVRP 问题的聚类-改进遗传算法

##### 4.1.1 MVRP 的聚类分析

聚类分析是运用数学方法研究事物分类的一种方法,它根据一批样本的多个观测数据,设法找出表征样本间相似程度的统计量,把一些相似程度较大的样本聚合成一类,把另一些相似程度较大的样本聚合成另一类;如此下去,直到把所有样本聚合完毕为止。

优先级综合聚类评价一般模型为

$$Y_i = \lambda_1 Z_{i1} + \dots + \lambda_p Z_{ip} + \lambda_1 \beta_1 X_i + \dots + \lambda_p \beta_p X_i \quad (3)$$

其中:  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$  为标准化后样本的指标向量,由具体实际问题而确定;  $i = 1, 2, \dots, n$  为样本容量,  $m$  为指标数;  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m > 0$  为实对称矩阵;  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$  为实对称矩阵  $R$  的特征向量,  $R = (r_{ij})_{m \times m}$  为指标的相关矩阵,其中

$$r_{ij} = \frac{\sum_{R=1}^n x_{Ri} x_{Rj}}{(n-1)}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

本文假设有  $n$  个客户等待服务,即

$$f_i = P(x_i, y_i), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

其中:  $P(x_i, y_i)$  为任一客户点位置的坐标,  $x_i$  为客户点位置的横坐标,  $y_i$  为客户点位置的纵坐标。则  $n$  个客户的节点集记为  $Z = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ , 其中  $z_1, z_2, \dots, z_n$  为  $n$  个客户点在坐标系中的对应位置。

对于  $n$  个节点分类,就是确定它们之间的亲疏

程度。本文提出用优先级综合聚类法将其分类,聚类结果满足停止判断准则。

选择两个停止判定准则如下:

1) 客户间的相对距离和取极小,即

$$P(x) = \min_{i=1}^k [(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2] \quad (6)$$

其中

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}, \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \quad (7)$$

2) 客户类的需求量之和不大于一台大车容量,且不小于一台小车容量的 95%,即

$$95\% Q_{\text{小车}} \leq \sum_{i=1}^k D_i \leq Q_{\text{大车}}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

其中  $D_i$  为客户类的需求量。

#### 4.1.2 基于聚类分析-控制开关系统的遗传编码方案

遗传算法<sup>[11,12]</sup>为解决诸多复杂函数的优化问题提供了新的工具。本文提出面向 VRP 问题的带有控制开关系统的改进遗传算法,它能自适应求解多目标物流配送路径优化问题。通过构造随机开关系统,控制遗传算法中的变异运算,可增加群体的多样性,避免遗传算法中局部最优现象的发生。

首先将城市物流配送路况(指城市物流配送的交通拥挤程度)分成(好,中,差)3个等级,整体路况权系数为  $\alpha$ 。

- 1) 当  $\alpha > 0.7$  时,路况为好;
- 2) 当  $0.4 \leq \alpha \leq 0.7$  时,路况为中;
- 3) 当  $\alpha < 0.4$  时,路况为差。

对于  $n$  个待服务客户,在不同路况下,选择客户之间的距离 ( $Z_{i1}$ ),不同客户的需求量能力 ( $Z_{2i}$ ),假定二者满足  $Z_{i1} > Z_{2i}$ ,并以二级指标进行优先级综合聚类评价。其次将  $n$  个待服务客户分成  $N$  类客户群,满足停止判定准则。最后对所分的  $N$  类客户群,利用基于控制开关系统的遗传算法求解运输车辆路线安排优化问题,进行车辆配送的组合运输调度。

车辆配送方案基于如下假定前提:小车机动灵活,适合于各种路况的运输调度,但其耗油量高,运输成本较高。在可能的情况下,可用大型和中型车运输。大车运输成本低,却不适合于交通拥挤情况下的运输。本文通过计算机仿真实验证明:在路况允许的情况下,采用大、中、小型车组合运输配车方案较佳。

#### (1) 遗传编码

对于确定的运输路线,VRP 的个体由  $M$  个随机子串组成,每个子串代表一条运输路线上被访问客户的先后顺序,采用客户号自然数进行编码。

对于遗传编码中的个体  $K$ ,计算适应度

$$f_k = 1 / \sum_{i, j \in H_k} \sum_{H_k, V} C_{ij} X_{ijk} (\alpha l_{ij}) + \sum_{i, j \in H_k} \sum_{V} (C_i (T_{ijb} - T_{ij})) \quad (9)$$

选择概率为

$$P_k = \frac{f_k}{\sum_{i=1}^L f_i} \quad (10)$$

其中  $L$  为个体数,适应度应作适当的线性拉伸。当个体适应度较大时,则在算法中选择它。

(2) 交叉算子和变异算子

遗传编码采用交叉算子和变异算子,即随机产生一个在  $(1, N)$  中的自然数  $K$ ,将基因  $a_k$  用一个在  $(1, J_k)$  中的随机数来代替。交叉和变异都局限在子串内进行。交叉操作采用 LOX 算子;变异操作典型的细胞神经网络模型构造随机开关,利用开关值控制遗传算法的变异操作。即当开关值小于  $\delta$  ( $\delta$  通常取 0.5) 时不发生变异,当开关值大于  $\delta$  时发生变异。按如下方式产生一个对应的变异个体

$$a_i = P_{ik} + \frac{f}{f_{\Sigma}} N(0, 1), \quad k = 0 \sim n \quad (11)$$

其中:  $f$  为第  $i$  个个体的适应值,  $f_{\Sigma}$  为群体适应值的总和,  $P_{ik}$  为第  $i$  个个体的第  $k$  个分量。

这里设计了一种随机开关,通过控制开关的切换,自适应地调整染色体的选择,将适应度高的染色体保留并遗传给后代,从而保证了交叉和变异后子串基因的多样性,有效地防止了局部最优的发生。

4.2 算法操作的实现

算法的实现步骤可描述如下:

- 1) 对个体进行编码,用随机法产生  $L$  个个体;
- 2) 对每个个体  $k$ ,用式(9) 计算适应值,并进行线性拉伸;
- 3) 按式(10) 计算每个个体的选择,并用蒙特卡洛法确定个体是否保留;
- 4) 对个体进行交叉和变异操作,且仅限于子串内进行,变异操作时用随机开关控制,并要求在同一运输路线的客户之间进行;
- 5) 对交叉或变异后得到的新个体进行解死锁处理;
- 6) 判断个体是否达到进化代数  $G$ ,若达到则终止运算,否则转步骤 7);
- 7) 对个体进行选择 and 变异操作,选择算子和变

异算子如上所述。

5 仿真实例分析

本文选择大、中、小型车从一个设施(或称仓库)为 10 个客户提供运输服务。假设大、中、小型车的运输能力分别为 10, 6, 4(t);大、中、小型车的数量分别为 1, 2, 5(台);大、中、小型车的单位运输成本  $C_{ij}$  分别为 5, 3, 2(元/(t·km))。设施(1 个)和客户(10 个)的坐标位置及不同客户的需求量如表 1 所示。

结合表 1 的数据,针对 3 种不同的路况,用本文提出的聚类-改进遗传算法求解优化运输路线。不同路况的聚类结果如表 2 所示。3 种不同路况的车辆优化调配方案及仿真结果分别如表 3 和表 4 所示。

表 1 设施和客户坐标位置及客户需求量

项目	标号	坐标位置		点的表示	客户需求量/t
设施	F1	0	0	PF1	-
客 户	1	0.20	1.86	A	2
	2	1.07	3.45	B	1
	3	1.52	2.87	C	2
	4	1.76	2.69	D	1
	5	4.18	2.23	E	4
	6	4.30	1.09	F	1
	7	5.30	1.56	G	2
	8	4.72	2.77	H	2
	9	2.68	6.09	I	2
	10	4.76	6.03	J	2

表 2 不同路况的聚类结果

结 果	路况好	路况中	路况差
客	①F G H E	①A B C D	①A B C D
户	②A B C D	②F G H	②E ③F
类	③J I	③E ④J I	④G H ⑤J I
配车选择	大/中/小车	中/小车	中/小车

表 3 3 种不同路况的车辆优化调配方案

方 案	路况好	路况中	路况差
车 辆	大车(1 台)	中车(2 台)	中车(2 台)
调 配	中车(1 台)	小车(2 台)	小车(4 台)
选 择	小车(1 台)		
大车运 输路线	PF1-F-G-H-E-PF1	—	—
中车运 输路线	PF1-A-B-C-D-PF1	PF1-A-B-C-D-PF1 PF1-F-G-H-PF1	PF1-A-B-C-D-PF1
小车运 输路线	PF1-J-I-PF1	PF1-E-PF1 PF1-J-I-PF1	PF1-E-PF1 PF1-F-PF1 PF1-G-H-PF1 PF1-J-I-PF1

从仿真数据可以看出,本文提出的聚类-改进

表 4 不同路况下带有拖期惩罚成本的目标函数值

$(T_{ijb} - T_{ij})$	$\frac{C_t}{\text{元/t}}$	目标函数 $f(x)$		
		路况好	路况中	路况差
0	0	831.40	1 083.76	1 224.69
< 30 min	1.0	850.40	1 102.76	1 243.69
30 ~ 60 min	1.5	859.90	1 112.26	1 253.19
60 ~ 120 min	2.0	869.40	1 121.76	1 262.69

遗传算法能适应不同的路况和不同种类的运输工具,并带有拖期惩罚成本。它对于求解 MVRP 问题是有效的。

## 6 结 语

本文用优先级综合聚类分析法将客户分为若干子类,然后采用改进的遗传算法求解多目标VRP的优化问题。构造了一种控制随机开关,以此控制遗传算法中的变异运算,增加了群体的多样性,避免了遗传算法中局部最优现象的发生,并能自适应求解多目标物流配送路径优化问题。计算机仿真实验证明了该算法的有效性。本文提出的混合算法可为研究物流配送优化调度问题提供参考。

### 参考文献(References):

- [1] Sam R T, Jean Y P, Tong S. Heuristic approaches to vehicle routing with backhauls and time windows[J]. *Computers and Operations Research*, 1996, 23(11): 1043-1057.
- [2] Laporte G, Nobert Y. *Exact Algorithm for the Vehicle Routing Problem* [M]. Amsterdam: North-Holland Publishing, 1987. 47-84.
- [3] Christofides N. A new exact algorithm for the vehicle routing problem based on  $q$ -path and  $k$ -shortest path relaxations[R]. London: Imperial College, 1993.
- [4] Fisher M L. Vehicle routing with time windows: Two optimization algorithms[J]. *Operations Research*, 1997, 45(3): 488-492.

- [5] Laporte G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithm[J]. *European J of Operational Research*, 1992, 59(3): 345-358.
- [6] Osman I H. Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithm for combinatorial optimization problems[J]. *Annals of Operations Research*, 1993, 41(3): 421-451.
- [7] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 带有时间窗的多重运输调度问题的自适应 Tabu Search 算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2000, 20(12): 42-50.  
(Cai Yanguang, Qian Jixin, Sun Youxian. Self-adaptive tabu search for multiple demands vehicle routing and scheduling problems with time windows[J]. *J of Systems Engineering Theory and Practice*, 2000, 20(12): 42-50.)
- [8] 张涛, 王梦光. 遗传算法和 3-opt 结合求解带有能力约束的 VRP[J]. *东北大学学报*, 1999, 20(3): 254-256.  
(Zhang Tao, Wang Mengguang. Solving the VRP by a hybrid algorithm of genetic algorithm and 3-opt algorithm[J]. *J of Northeastern University*, 1999, 20(3): 254-256.)
- [9] 李军, 郭强, 刘建新. 组合运输的优化调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2001, 21(2): 117-121.  
(Li Jun, Guo Qiang, Liu Jianxin. Optimal scheduling on combinatorial transportation[J]. *J of Systems Engineering Theory and Practice*, 2001, 21(2): 117-121.)
- [10] Bruno D B, Vincent F, Paul S, et al. Solving vehicle routing problems using constraint programming and metaheuristics[J]. *J of Heuristics*, 2000, 6(4): 501-523.
- [11] Holland J. *Adaptation in Natural and Artificial Systems* [M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- [12] Goldberg D. *Genetic Algorithm in Search Optimization and Machine Learning* [M]. New York: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1989.

## 下 期 要 目

- 关键链——一种项目计划与调度新方法 ..... 刘士新, 唐加福
- 基于简化 Takagi-Sugeno 模糊模型的系统镇定策略 ..... 韩安太, 王树青, 等
- 典型模糊控制器的模糊规则函数与极限结构分析 ..... 周 畅, 朱德森, 等
- 基于极点配置的平整机张力解耦控制 ..... 贺建军, 喻寿益, 等
- 一种基于模糊切换的模糊复合控制器及其应用 ..... 刘红波, 李少远, 等
- 基于贝叶斯网络的故障诊断策略优化方法 ..... 李俭川, 胡葛庆, 等
- 不确定信息条件下的灰色模式识别 ..... 赵艳林, 杨绿峰, 等