

文章编号: 1001-0920(2013)10-1587-04

一种求解两级车辆路径问题的Memetic算法

许维胜, 曾正洋, 徐志宇

(同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 两级车辆路径问题是指物资必须先由中心仓库配送至中转站(第1级),再由中转站配送至客户(第2级)的一种车辆路径问题. 针对该NP难问题提出一种Memetic算法通过自底向上的方式进行求解. 首先利用改进的最优切割算法MDVRP-Split将客户合理分配至中转站; 然后采用局部搜索解决第1级问题,交叉产生的精英个体通过局部搜索改进. 标准算例的测试结果表明,所提出算法更注重求解质量与求解效率的平衡,性能优于其他现有的两种算法.

关键词: 两级车辆路径问题; Memetic算法; 最优切割; 局部搜索

中图分类号: TP273

文献标志码: A

A Memetic algorithm for solving two-echelon vehicle routing problem

XU Wei-sheng, ZENG Zheng-yang, XU Zhi-yu

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China. Correspondent: ZENG Zheng-yang, E-mail: zengzhengyang@yahoo.com)

Abstract: Two-echelon vehicle routing problem(2E-VRP) is a kind of vehicle routing problem in which freight from depot is compulsorily delivered through intermediate depots(satellites). The first echelon is from depot to satellites, while the second is from satellites to customers. This paper proposes a Memetic algorithm to solve the NP-hard problem in a bottom-up way. The customers are assigned to the satellites reasonably by an improved optimal splitting algorithm MDVRP-Split. Then the first-echelon problem is solved by using local search. The elitist produced by crossover is improved by local search. Computational tests on some benchmark instances show that the proposed algorithm pays more attention on the balance between solution quality and efficiency, and outperforms two existing algorithms for 2E-VRP.

Key words: two-echelon vehicle routing problem; Memetic algorithm; optimal split; local search

0 引言

经典的车辆路径问题(VRP)大多假设单级配送,即由中心仓库(Depot)直接向客户配送物资.但很多城市对加剧交通拥堵、噪音和尾气污染的大型货运车辆采取限行措施,从中心仓库配送的物资必须先到达各个中转站(Satellites),再通过小型车辆转运至市内各客户,这便形成了两级车辆路径问题(2E-VRP)^[1],2E-VRP的第2级可以看作多车场车辆路径问题(MDVRP);由于中转站的转运量可能会超过第1级大型车辆的容量,进而需要多次访问,故第1级可以看作需求可分割的车辆路径问题(SDVRP).2E-VRP首先追求两级使用的车辆数最少,其次两级总配送路径最短.

2E-VRP不同于VRP,两级间存在相互耦合关系,第1级和第2级的配送方案均影响各中转站的中

转量,进而两级配送方案相互影响;因此2E-VRP的求解需要综合考虑两级的配送.现有文献对2E-VRP的求解主要分为精确算法和启发式方法两类. Perboli等^[1]提出2E-VRP的商品流模型,并采用分支切割精确算法求解,由于计算时间较长,没有给出算法的全部运行时间. Jepsen等^[2]提出一种特殊的分支切割精确算法. Perboli等^[1,3]提出一些可用的不等式,增强对分支切割法中商品流模型的连续松弛.由于2E-VRP是NP难问题,在规模较大时,精确算法需要相当长的时间求解.启发式方法主要有Crainic等^[4]提出的多起始点启发式方法,将两级问题分解为两个路径规划子问题,然后迭代求解,求解速度虽快,但精度欠佳.此外, Crainic等^[5]研究了中心仓库、中转站和客户间相对位置关系等对总成本的影响.

Memetic算法(MA)^[6]最早由Moscato于1989年提

收稿日期: 2012-06-14; 修回日期: 2012-10-24.

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(71090404, 71090400); 上海市基础研究重点项目(10JC1415300).

作者简介: 许维胜(1966-),男,教授,博士生导师,从事应急物流、智能控制等研究;曾正洋(1987-),男,博士生,从事智能优化算法、应急物流的研究.

出, 现已成为进化计算领域的一个研究热点, 它受达尔文的自然进化理论和道金斯的文化进化思想启发, 将进化算法(EA)和局部搜索(LS)相结合, 也称为混合遗传算法、遗传局部搜索^[7]等. MA中, EA算子用于执行全局探索, LS策略进行局部开发, 算法因此能够在探索和开发能力之间保持较好的平衡^[6-7]. 针对已有算法的不足, 并结合Memetic算法的优势, 本文设计了一种Memetic算法求解2E-VRP.

1 2E-VRP的Memetic算法

2E-VRP问题示例见图1, $S_1 \sim S_3$ 为中转站, $c_1 \sim c_9$ 为客户点, 两级路径用不同的箭头区分. 将2E-VRP看成第2级的MDVRP和第1级的SDVRP的耦合, 采用自底向上的方式求解. 首先对所有客户进行随机排列, 通过对排列进行最优切割获得第2级合理的分配方案, 从而得到中转站的转运量, 再求解对应的第1级问题获得两级的车辆数和总里程. 这样可使Memetic算法在较好的初始解的基础上进行搜索和改进, 提高了算法的效率.

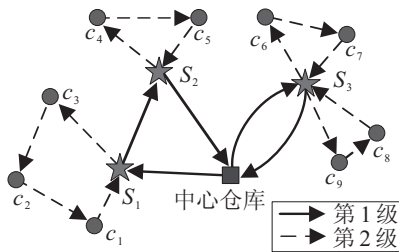


图1 2E-VRP问题示例

1.1 编码方式及初始种群

采用两阶段编码方式, 依次对第2级和第1级编码. 第2级染色体为所有客户的排列. 将Prins^[8]求解VRP的Split算法经过多中转站扩展后, 得到MDVRP车辆数最少的前提下的一种最优切割算法MDVRP-Split, 该算法的流程如图2所示, 伪代码如下:

```

Length0 := 0; V0 := 0;
for i := 1 to n do Lengthi := +∞, Vi := i; endfor
for i := 1 to n do
    load := 0; Cost := 0; Costk := 0; j := i;
    repeat
        load := load + Q(Cj)
        for k := 1 to ns do
            if i = j then
                Costk := D(Sk, Cj) + D(Cj, Sk);
            else
                Costk := Costk - D(Cj-1, Sk) + D(Cj-1, Cj) + D(Cj, Sk);
            end if
        end for
        Costm := min{Costk | k ∈ [1, ns]}; Cost :=
    
```

```

Costm;
    if (load ≤ W) and (Cost ≤ L) then
        if Vj > Vi-1 + 1
            {Vj := (Vi-1 + 1),
             {sj := Sm, Lengthj := Lengthi-1 +
Cost, Pj := i - 1; }
            if (Vj = Vi-1 + 1) and (Lengthi-1 +
Cost < Lengthj)
                sj := Sm, Lengthj := Lengthi-1 +
Cost, Pj := i - 1; }
            j = j + 1;
        end if
    end for
until (j > n) or (load > W) or (Cost > L);
end for

```

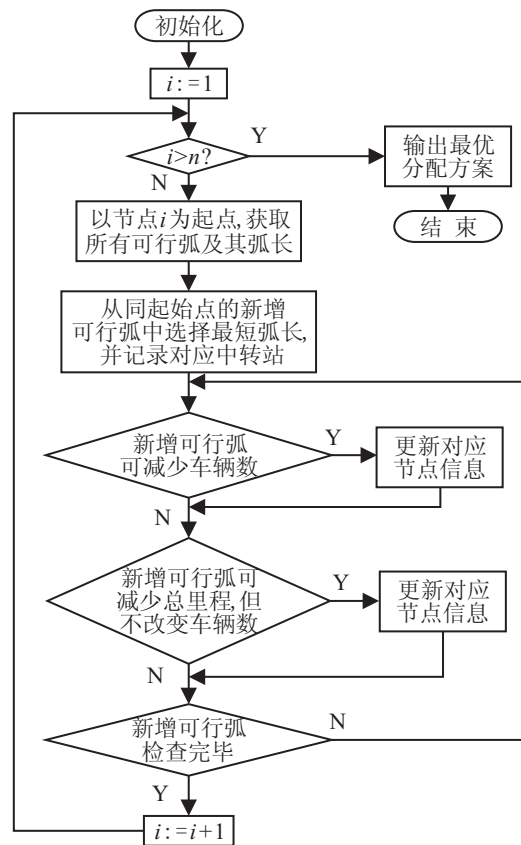


图2 MDVRP-Split算法流程

图2和伪代码中: n 为染色体长度, n_s 为中转站数目, S_k 为第 k 个中转站, V_i 为染色体前 i 个节点所需的第2级车辆数, $Length_i$ 为对应的最短行车距离, W 和 L 分别为第2级车容量和最大行驶里程, $D(i, j)$ 为节点 i 到节点 j 的距离, $Q(C_i)$ 为客户点 C_i 的需求量. 计算完毕后, 得到最优节点信息: V_n 为第2级所需要的最少车辆数, $Length_n$ 为对应的最短行车距离, s_i 记录了客户点 C_i 所属的中转站, P_i 记录了以客户点 C_i 为终点的最优可行弧的起点.

最优分配方案由节点信息从后向前复现: 根据 P_n 获得最后一条第 2 级路径, 同时获得前一条路径的结尾, 继续向前运行直至所有客户点分配完毕. 复现最优切割方案的算法^[8]如下所示:

```

for  $i := 1$  to  $V_n$  do  $\text{trip}(i) := \emptyset$  endfor
 $t := V_n; j := n$ 
repeat
   $i = P(j)$ 
  for  $k := i + 1$  to  $j$  do  $\text{enqueue}(\text{trip}(t), C_k)$  endfor
   $j := i; t := t - 1$ 
until  $i = 0$ 

```

其中: $\text{trip}(i)$ 为切割后第 i 条路径序列; $\text{enqueue}(\text{trip}(t), C_k)$ 操作将客户 C_k 放入第 t 条路径序列 $\text{trip}(t)$ 的末尾.

第 2 级配送方案确定了中转站的转运量. 第 1 级采用 Archetti^[9]的方法, 按车装满的原则处理需要多次访问的中转站, 将 SDVRP 转化为 VRP, 剩余转运量大于 0 的中转站组成第 1 级染色体, 并采用 Prins^[8]的 Split 算法评价. 然后采用 Derigs^[10]的基于局部搜索的元启发式算法彻底改进.

Memetic 算法的种群只包含第 2 级染色体, 初始种群中的染色体均随机生成. 这种方式可以保证初始种群的多样性, 有利于 Memetic 算法搜索到全局最优解.

1.2 EA 算子设计

1) 选择策略. 采用二元联赛选择法^[11]选择准备交叉的染色体, 交叉时再进行 (μ, λ) 选择^[12]. 交叉多次, 从生成的染色体中选择最好的两条进入下一代种群, 这样可使染色体之间优良基因的结合更为紧密.

2) 交叉策略. 为了较好地保留染色体中相邻关系, 采用顺序交叉法 (OX)^[12], 交叉的切点均随机选取. 初始化时设定交叉概率 P_c , 若生成的随机数 $\text{rand} \in (0, 1)$ 满足 $\text{rand} \leq P_c$, 则进行交叉.

3) 变异策略. 等概率地采用 Inversion (左右翻转)、Swap (交换)、Insertion (插入)^[13]3 种变异算子, 初始化时设定变异概率 P_m , 若生成的随机数 $\text{rand} \in (0, 1)$ 满足 $\text{rand} \leq P_m$, 则进行变异.

为了增加种群多样性, 减少因近亲繁殖出现的早熟收敛, 采用种群多样性管理: 若两条待交叉的染色体中相同部分的长度超过染色体长度的一半, 则将较差的染色体中的相同部分随机乱序.

1.3 局部搜索

根据 2E-VRP 编码方式和两级相互耦合的特性, 采用 Relocate、Exchange、2-Opt* 和 2-Opt^[14]算子,

并提出 SatelliteChange 和 SatelliteSwap 两种局部搜索算子. SatelliteChange 更改 1 条第 2 级路径所属的中转站; SatelliteSwap 交换 2 条第 2 级路径所属的中转站; 2-Opt 算子对其他算子作用结果进一步改进.

由于 SatelliteChange 和 SatelliteSwap 算子改变了中转站的转运量, 需要进一步计算第 1 级的总距离. Relocate、Exchange 和 2-Opt* 算子只有在搜索属于不同中转站的 2 条第 2 级路径时才需计算第 1 级距离. 为了保证局部搜索的多样性, 第 2 级的局部搜索只针对交叉生成的精英个体, 若其改进后优于种群中的最好个体, 则替代种群中的最差的个体. 第 1 级采用 2-Opt*、Relocate、Exchange 和 2-Opt 进行改进. 两级的局部搜索均采用 first-accept (FA)^[14]策略以减小计算量. 当在邻域中发现有改进时, 以改进解为新起点继续搜索. 局部搜索算子按顺序循环执行, 当所有算子均无法改进当前解时, 停止局部搜索过程.

2 仿真与分析

2.1 算例描述与实验设置

本文算例取为算例集 Set 2^[1-2], 由 VRP 算例 E-n22-k4, E-n33-k4 和 E-n51-k5 演化而来, 通过选定中转站, 增加第 1 级车容量和两级车辆数约束构成 2E-VRP. 在主频为 1.8 GHz、内存为 1 GB 的硬件平台上通过 C++ 只使用单线程实现本文算法. 算法参数设置如下: 种群规模最大为 20, 交叉概率 $P_c = 0.75$, 变异概率 $P_m = 0.10$, 最大迭代次数 1 000, 最长计算时间 60 s.

2.2 实验结果与对比分析

实验结果如表 1 所示. Branch and Cut^[2]算法使用 Intel(R) Xeon X5550 2.60 GHz 处理器和 24 GB 的内存. Multi-start^[4]算法在 2.5 GHz 的 Intel Centrino Duo 上通过 C++ 实现. Best 为获得的最好结果, Time 为相应的计算时间. Memetic Algorithm 为本文算法. 给出 10 轮计算获得的最好结果 (Best)、平均结果 (Average) 和最好结果出现时间的平均值 (Time). 加粗的数据为目前已知的最好结果.

从最优解的质量而言, 本文的 Memetic 算法每轮计算均能获得当前已知的最优解, Branch and Cut 的质量较高, Multi-start 的质量较差. 从计算时间而言, 考虑到硬件配置, Memetic 算法的硬件配置最低, 但计算速度最快; Multi-start 速度其次; Branch and Cut 的计算时间最长. Branch and Cut 解的质量较高, 但耗费的计算时间相当长; Multi-start 计算速度相对较快, 但由于未能从整体把握 2E-VRP 两级相互耦合的特性, 解的质量较差; Memetic 算法注重求解质量与效率的平衡, 性能优于其他两种算法.

表 1 测试结果记录与比较

序号	算例名称	Branch and Cut		Multi-start		Memetic Algorithm		
		Best	Time/s	Best	Time/s	Best	Average	Time/s
1	E-n22-k4-s6-17	417.07	4.94	417.07	16	417.07	417.07	0.02
2	E-n22-k4-s8-14	384.96	5.76	384.96	9	384.96	384.96	0.03
3	E-n22-k4-s9-19	470.60	17.19	472.23	20	470.60	470.60	0.02
4	E-n22-k4-s10-14	371.50	3.64	375.91	7	371.50	371.50	0.03
5	E-n22-k4-s11-12	427.22	7.87	444.83	15	427.22	427.22	0.05
6	E-n22-k4-s12-16	392.78	6.82	403.79	26	392.78	392.78	0.02
7	E-n33-k4-s1-9	730.16	57.92	757.56	20	730.16	730.16	0.19
8	E-n33-k4-s2-13	714.63	42.52	733.18	25	714.63	714.63	0.20
9	E-n33-k4-s3-17	707.48	1135.8	754.65	18	707.48	707.48	1.29
10	E-n33-k4-s4-5	778.74	63.25	792.89	19	778.74	778.74	11.91
11	E-n33-k4-s7-25	756.85	95.87	756.88	15	756.85	756.85	2.45
12	E-n33-k4-s14-22	779.05	10.75	824.60	16	779.05	779.05	2.01
13	E-n51-k5-s2-17	597.49	>10000	614.17	12	597.49	597.49	3.62
14	E-n51-k5-s4-46	530.76	28.88	533.83	46	530.76	530.76	2.08
15	E-n51-k5-s6-12	554.81	>10000	564.92	32	554.81	554.81	14.39
16	E-n51-k5-s11-19	581.64	229.3	597.90	19	581.64	581.64	16.29
17	E-n51-k5-s27-47	538.22	>10000	553.77	17	538.22	538.22	12.33
18	E-n51-k5-s32-37	552.28	2129.5	555.05	33	552.28	552.28	3.35
19	E-n51-k5-s2-4-17-46	530.76	102.14	565.00	5	530.76	530.76	2.34
20	E-n51-k5-s6-12-32-37	531.92	3660.9	567.00	6	531.92	531.92	2.60
21	E-n51-k5-s11-19-27-47	527.63	817.06	600.00	3	527.63	527.63	4.49

3 结 论

本文针对两级车辆路径问题 (2E-VRP) 提出一种改进的编码方法, 并设计了一种 Memetic 算法通过自底向上的方式进行求解. 实验结果表明, 所提出的算法注重 2E-VRP 两级相互耦合的特性, 平衡了算法的全局探索能力和局部开发能力, 性能优于已有的算法, 在物流运输中更具有实际意义.

参考文献(References)

- [1] Perboli G, Tadei R, Vigo D. The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics[J]. *Transportation Science*, 2011, 45(3): 364-380.
- [2] Jepsen M, Spoorendonk S, Ropke S. A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem[J]. *Transportation Science*, 2013, 47(1): 23-37.
- [3] Perboli G, Tadei R. New families of valid inequalities for the two-echelon vehicle routing problem[C]. *Proc of Electronic Notes in Discrete Mathematics*. Torino, 2010, 36: 639-646.
- [4] Crainic T G, Mancini S, Perboli G, et al. Multi-start heuristics for the two-echelon vehicle routing problem[C]. *Proc of Lecture Notes in Computer Science*. Torino, 2011, 6622: 179-190.
- [5] Crainic T G, Perboli G, Mancini S, et al. Two-echelon vehicle routing problem: A satellite location analysis[J]. *Procedia Social and Behavioral Science*, 2010, 2(3): 5944-5955.
- [6] Neri F, Cotta C, Moscato P. *Handbook of memetic algorithms*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2012: 43-72.
- [7] Krasnogor N, Smith J. A tutorial for competent memetic algorithms: Model, taxonomy and design issues[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2005, 9(5): 474-488.
- [8] Prins C. A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2004, 31(12): 1985-2002.
- [9] Archetti C, Speranza M G, Hertz A. A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem[J]. *Transportation Science*, 2006, 40(1): 64-73.
- [10] Derigs U, Li B, Vogel U. Local search-based metaheuristics for the split delivery vehicle routing problem[J]. *J of the Operational Research Society*, 2010, 61(9): 1356-1364.
- [11] Ghoseiri K, Ghannadpour S F. Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2010, 10(4): 1096-1107.
- [12] Potvin J Y. State of the art review: Evolutionary algorithms for vehicle routing[J]. *Inform J on Computing*, 2009, 21(4): 518-548.

(下转第1595页)