

开放式两级车辆路径问题建模与多起始点变邻域下降法求解

曾正洋 许维胜 徐志宇

(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)

摘要 针对城市物流中普遍存在的物资开放式两级配送情形,构建了开放式两级车辆路径问题的数学模型,它要求物资必须先由远程的中心仓库配送至转运中心(第一级),再由转运中心配送至客户点(第二级),两级车辆在完成各自的配送任务后,均不必返回出发点,若要返回,则必须按照原路返回。为有效求解该 NP 难问题,设计了一种多起始点变邻域下降算法。扩展算例的测试结果表明,所设计的算法注重求解质量与求解效率的平衡,可有效求解提出的开放式两级车辆路径问题。

关键词 开放式车辆路径问题,两级车辆路径问题,多起始点方法,变邻域下降法,分割算法

中图分类号 TP273 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.10.049

Modeling and Multi-start Variable Neighborhood Descent Solution of Two-echelon Open Vehicle Routing Problem

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

(School of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract In this paper, a Two-Echelon Open Vehicle Routing Problem (2E-OVRP) model was constructed according to the common open and two-echelon distribution of freight in city logistics. In 2E-OVRP, freight from a remote depot is compulsorily delivered through intermediate depots (called satellites). The first echelon is from depot to satellites, while the second from satellites to customers. Vehicles of both echelons are not required to return to starting points after finishing their respective distribution, or they are required to do so by making the same trips in the reverse order. We designed a multi-start variable neighborhood descent algorithm to solve this NP-hard problem effectively. Computational tests on several extended benchmark instances show that the designed algorithm pays attention on the balance between solution quality and efficiency and can solve the proposed 2E-OVRP effectively.

Keywords Open vehicle routing problem, Two-echelon vehicle routing problem, Multi-start methods, Variable neighborhood descent algorithm, Split algorithm

1 引言

随着社会经济的飞速发展和人民群众生活水平的不断提高,物流活动与日常生活的联系也越来越紧密。物资运输中传统的车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)一般假设物资是单级配送的,即由中心仓库直接向客户点配送物资。由于长途物流运输车辆体积较大,易于加剧城市交通拥堵、噪音以及尾气污染,从城市居住环境的舒适性出发,很多城市对这类大型货运车辆采取限行措施^[1];远程的物资必须首先由大型车辆运送至位于郊区的各个转运中心,再通过小型车辆转运至城市内的各个需求点,这就形成两级车辆路径问题(Two-Echelon Vehicle Routing Problem, 2E-VRP^[1-4]),图 1(a)为 2E-VRP 的一个简单的示意图,其中 $S_1 \sim S_3$ 为转运中心, $c_1 \sim c_9$ 为客户点。当前 2E-VRP 的研究均要求两级的车辆在完成各自的配送任务后,分别返回出发的中心仓库或转

运中心,即要求两级车辆的行驶路线均为封闭的。

当物流配送公司没有专门的配送车队,或者自有配送车辆数量不足的情况下,为了满足客户的配送需求,需要将物资配送任务分包给第三方物流公司,配送公司并不关心车辆在完成物资配送后是否返回出发点,也不支付所雇用车辆从服务的最后一个客户点到配送公司之间的行车费用,因此对车辆的行驶路线是按照开放式来规划的,这就形成开放式车辆路径问题(Open Vehicle Routing Problem, OVRP^[5-10]),图 1(b)为 OVRP 的一个简单的示意图,其中 $c_1 \sim c_9$ 为客户点。开放式的路径规划目标不仅在诸如报纸配送、牛奶配送、校园班车等具有明显外包业务特点的经济活动中具有重要的应用价值,而且广泛存在于铁路、公路以及航空等运输方式的运输路线优化中,因为列车、公共汽车和飞机等的运营路线基本属于开放式的,其运行路线和时刻表的编制问题可以抽象为各种不同类型的 OVRP 来研究^[7-9]。

到稿日期:2013-11-18 返修日期:2014-03-09 本文受国家自然科学基金重大项目(71090404, 71090400),高等学校博士学科点专项科研基金(20130072110045)资助。

曾正洋(1987-),男,博士生,主要研究方向为智能优化算法、车辆路径规划, E-mail: 0930080001@tongji.edu.cn; 许维胜(1966-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为应急物流、智能控制; 徐志宇(1982-),男,博士,主要研究方向为智能优化算法、智能控制等。

已有文献对 2E-VRP 和 OVRP 的研究均取得了一定的成果,文献[1]首次提出 2E-VRP 的数学模型,并采用分支切割精确算法求解;文献[2]提出一种求解 2E-VRP 的特殊的分支切割算法,并获得较好的结果;文献[3]构建了 2E-VRP 新的数学模型,并将其解耦为多个带边界约束的多车场车辆路径问题(Multi-Depot Vehicle Routing Problem, MDVRP),再设计一种新的分支定界精确算法求解,实验结果优于已有的精确算法;文献[4]采用一种自适应大领域搜索(Adaptive Large Neighborhood Search, ALNS)元启发式算法求解 2E-VRP,平衡了结果质量和计算时间。文献[5]首次提出 OVRP 的概念,并利用基于聚类和最小生成树的启发式算法进行求解;文献[6]设计了一种新的禁忌搜索算法求解 OVRP,在算法中包含了问题的下界;文献[7]设计了另一种求解 OVRP 的禁忌搜索算法,获得了较好的结果;文献[8]基于核心路径原理设计了求解 OVRP 的禁忌搜索算法,实验表明该算法的求解效果更佳;文献[9]提出一种混合蚁群优化算法求解 OVRP,以禁忌搜索作为局部优化算法,并集成了一个后优化过程来进一步改进;文献[10]将 OVRP 的思想引入到 MDVRP 中,建立了基于沿途多点补货的开放式车辆路径问题模型,并提出了带补货控制因子的蚁群算法求解。

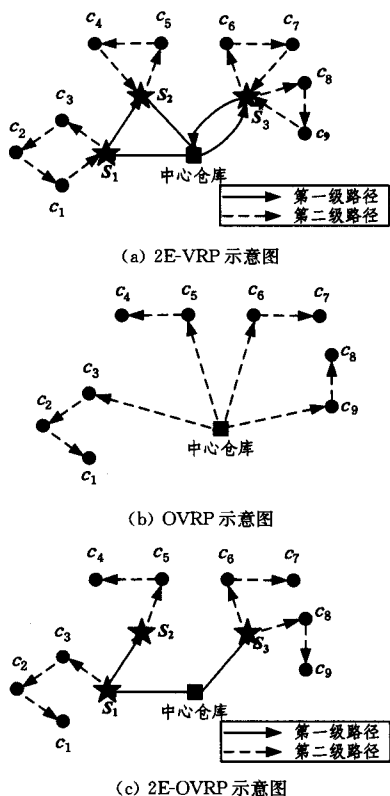


图1 2E-VRP、OVRP 及 2E-OVRP 示意图对比

与 2E-VRP 相比,OVRP 更早提出,其应用更为成熟;2E-VRP 是比 OVRP 更难于求解但同样重要的新问题。城市物流实践中普遍存在着的物资分级配送^[1-2]通常包含着开放式的车辆路径规划目标,实质为上述两类问题的紧密结合,但目前还未见这两类问题相结合的研究。本文将 OVRP 开放式车辆路径规划的思想引入 2E-OVRP,构建开放式两级车辆路径问题(Two-Echelon Open Vehicle Routing Problem, 2E-OVRP)的数学模型,并设计元启发式算法快速求解。图 1(c) 为 2E-OVRP 的示意图,其中 S_1-S_3 为转运中心, c_1-c_9 为

客户点,两级车辆的行驶路线均为开放式的。

变邻域下降算法(Variable Neighborhood Descent, VND^[11,12])是变邻域搜索算法(Variable Neighborhood Search, VNS^[11,12])的一种。VNS 最早于文献[12]中提出,其核心思想为对一组邻域组合进行系统性切换,一方面通过目标函数值下降的过程找到局部最优,另一方面对该局部最优进行扰动以获得新的搜索起始点,使搜索过程得以继续进行。VND 去除了 VNS 的扰动过程,虽然其局部搜索能力较强,但由于缺少扰动过程,易于陷入局部最优,通常用于增强其他算法的局部搜索能力。

在处理困难的组合优化问题时,启发式算法需要适当的多样性以跳出局部最优,搜索到全局最优解。多起始点方法(Multi-start methods^[13,14])在搜索到局部最优解时,通过产生全新的初始解进行搜索,以增加算法多样性,避免在改进希望较小的解周围重复搜索^[14]。多起始点方法每次迭代均生成一个局部最优,所有迭代中最好的局部最优为最终输出。多起始点方法需要由局部搜索强化其局部开发能力。多起始点方法与变邻域下降法的组合已有效解决旅行修理工问题(Traveling Repairman Problem, TRP^[15])、拖挂车路径问题(Truck and Trailer Routing Problem, TTRP^[16])、校车路径问题(School Bus Routing Problem, SBRP^[17])等车辆路径规划问题,受这些研究成果启发,本文选择多个局部搜索算子进行组合,再结合多起始点方法,设计了一种多起始点变邻域下降法(Multi-start Variable Neighborhood Descent, MS-VND)求解提出的 2E-OVRP,以达到求解质量与计算时间的平衡。

2 问题描述及数学模型

2.1 问题描述及符号说明

本文研究的 2E-OVRP 可描述为:物资由第一级车辆从一个远程的中心仓库 v_0 (标号为 0) 配送至 n_s 个转运中心,再由小型的第二级车辆从转运中心配送至 n_c 个最终客户点。转运中心和客户点的集合分别记为 V_S 和 V_C 。第一级路径为第一级车辆将物资从中心仓库配送至转运中心的各条路径;第二级路径为第二级车辆从转运中心出发,配送至客户点的各条路径。两级配送车辆的最大载重量分别为 W_1 和 W_2 ($W_1 > W_2$),两级可用车辆总数分别为 K_1 和 K_2 。每个客户点 i 的需求量记为 q_i ,所有 q_i 已知且均为正整数,不允许由多辆车分割配送,也不允许由中心仓库 v_0 直接配送。任意两个节点 i, j 之间的行车距离(运输成本)记为 d_{ij} 。为便于模型表述,参照文献[3],设定如下几个辅助参数:

M :第一级所有可能存在的路径的集合;

$M_k \subseteq M$:服务转运中心 k 的所有可能存在的的第一级路径的集合;

R_r :由单条第一级路径 $r \in M$ 服务的转运中心的集合;

$\mathcal{R}_k$:从转运中心 k 出发的所有可能存在的第二级路径的集合;

$\mathcal{R}_{*k} \subseteq \mathcal{R}_k$:从转运中心 k 出发,并服务客户点 i 的所有可能存在的第二级路径的集合。

设置如下的决策变量:

$y_r \in \{0, 1\}$:单条第一级路径 $r \in M$ 在 2E-OVRP 配送方案中时为 1,否则为 0;

$x_{kl} \in \{0, 1\}$:从转运中心 k 出发的单条第二级路径 $l \in \mathcal{R}_k$

在 2E-OVRP 配送方案中时为 1, 否则为 0;

$q_{kr} \in \mathbb{Z}_+$: 为非负整数变量, 表示由单条第一级路径 r 配送至转运中心 k 的物资配送量。

2.2 数学模型

根据上节的符号说明, 并受文献[1,3]的启发, 得到如下 2E-OVRP 的数学模型:

$$\min \sum_{k \in V_S} \sum_{l \in \mathcal{Q}_k} \sum_{(i,j) \in l} d_{ij} \cdot x_{kl} + \sum_{r \in M} \sum_{(i,j) \in r} d_{ij} \cdot y_r \quad (1)$$

$$\sum_{k \in V_S} \sum_{l \in \mathcal{Q}_k} x_{kl} = 1, \forall i \in V_C \quad (2)$$

$$\sum_{r \in M} y_r \leq K_1 \quad (3)$$

$$\sum_{k \in V_S} \sum_{l \in \mathcal{Q}_k} x_{kl} \leq K_2 \quad (4)$$

$$\sum_{k \in R_r} q_{kr} \leq W_1 y_r, \forall r \in M \quad (5)$$

$$\sum_{i \in l \cap V_C} q_i \cdot x_{kl} \leq W_2 x_{kl}, \forall k \in V_S, l \in \mathcal{Q}_k \quad (6)$$

$$\sum_{r \in M_k} q_{kr} = \sum_{l \in \mathcal{Q}_k} \sum_{i \in l \cap V_C} q_i \cdot x_{kl}, \forall k \in V_S \quad (7)$$

$$x_{kl} \in \{0, 1\}, \forall k \in V_S, l \in \mathcal{Q}_k \quad (8)$$

$$y_r \in \{0, 1\}, \forall r \in M \quad (9)$$

$$q_{kr} \in \mathbb{Z}_+, \forall k \in R_r, r \in M \quad (10)$$

式(1)为目标函数, 最小化两级车辆总的行车距离(运输成本); 约束条件(2)要求每个客户点 $i \in V_C$ 刚好被一条第二级路径访问; 约束条件(3)、(4)分别为第一级和第二级最大可用车辆总数约束; 约束条件(5)、(6)分别为第一级与第二级车辆的最大载重量约束; 约束条件(7)为转运中心从中心仓库获得的物资量与转运中心配送给其所属客户点的物资量的平衡; 约束条件(8)、(9)分别为决策变量 x_{kl} 与 y_r 的 0-1 约束; 约束条件(10)为决策变量 q_{kr} 的非负整数约束。

3 多起始点变邻域下降法

3.1 求解思路

由图 1(c) 及上述数学模型可知, 2E-OVRP 的第二级可看成一个开放式多车场车辆路径问题(Multi-Depot Open Vehicle Routing Problem, MDOVRP); 由于转运中心的转运量可能会超过第一级大型车辆的载重量, 进而需要多次访问, 故第一级可看作开放式需求可分割车辆路径问题(Split-Delivery Open Vehicle Routing Problem, SDOVRP)。MDOVRP 与 SDOVRP 均为 NP 难题, 且开放式规划目标的引入并未使问题变得简单和易于求解^[6,7], 因此 2E-OVRP 的第一级和第二级均为 NP 难题。此外, 2E-OVRP 第一级和第二级的配送方案均影响各转运中心的转运量, 进而两级的配送方案互相影响, 由于两级之间存在着这样相互耦合的关系, 因此 2E-OVRP 的求解需要综合考虑两级的配送方案以获得全局配送成本最小化, 这使得问题求解更为复杂。

考虑到 2E-OVRP 两级问题耦合的特性, 从解的可行性出发, 采用自底向上的方式获得 2E-OVRP 的初始可行解: 首先获得第二级 MDOVRP 随机的可行配送方案, 然后据此计算各个转运中心的转运量, 再求解第一级的 SDOVRP, 获得完整的初始可行解。在此基础上结合 2E-OVRP 问题特性, 选择合适的局部搜索算子进行组合, 构成变邻域下降法进一步优化随机的初始可行解。两级问题的相互耦合在变邻域下降法采用的局部搜索算子中得到体现。当所使用的几种局部搜索算子均无法改进时, 采用多起始点技术产生全新的随机初始可行解, 再重复变邻域下降法优化过程。当达到最大迭

代次数或其它停止条件后, 终止上述过程, 输出已搜索到的最佳的 2E-OVRP 配送方案。

3.2 初始可行解构建

第二级的初始分配方案通过合理地分割由所有客户点构成的随机排列实现, 这样可增加算法的多样性。通过对文献[18]的 Split 算法进行改进, 考虑转运中心与中心仓库距离远近, 同时以车辆数最少优先、其次总行车距离最短为原则, 按随机排列中的顺序合理将客户点分配至各个转运中心, 获得第二级的初始配送方案。Split 算法最早于文献[19]中提出, 在文献[20]中给出了详细的实现过程。基本的 Split 算法只适用于单车场、单级封闭式 VRP, 并不适合求解 2E-OVRP; 文献[18]的 Split 算法虽考虑了多个车场, 但只考虑了单级情形, 并未扩展至两级。此外, 这些 Split 算法只考虑距离最短的单一目标, 未考虑最小化所使用的车辆数。为克服已有 Split 算法存在的不足, 综合考虑转运中心-客户点之间以及中心仓库-转运中心之间的距离关系, 并结合 2E-OVRP 两级车辆路径开放式的特点, 改进已有的 Split 算法, 改进算法的伪代码如图 2 所示。

```

Length0 := 0; V0 := 0;
for i := 1 to nc do Lengthi := +∞, Vi := i; endfor
for i := 1 to nc do
  load := 0; Cost := 0; costk := 0; j := i;
  repeat
    load := load + Q(Tj)
    for k := 1 to nt do
      if i = j then
        costk := D(Sk, Tj) + D(Sk, v0);
      else
        costk := costk + D(Tj-1, Tj);
      endif
    endfor
    costmin := min{costk | k ∈ [1, nt]}; Cost := costmin;
    if load ≤ W2 then
      if Vj > Vi-1 + 1
        {Vj := (Vi-1 + 1), sj := Smin,
        Lengthj := Lengthi-1 + Cost, Pj := i - 1;}
      if (Vj = Vi-1 + 1) and (Lengthi-1 + Cost < Lengthj)
        {sj := Smin, Lengthj := Lengthi-1 + Cost, Pj := i - 1;}
      j := j + 1;
    until (j > nc) or (load > W2);
  endfor

```

图 2 改进的 Split 算法伪代码

图 2 中, T 为由所有客户点构成的随机排列, 0 号点为虚拟的起始点, T_j 表示 T 中第 j 个客户点, n_c 为客户点总数, n_t 为转运中心总数, $load$ 为一条临时路径中客户点需求量和, S_k 表示第 k 个转运中心; V_i 为排列 T 中前 i 个客户点所需要的第二级车辆数, $Length_i$ 为对应的行车距离(运输成本); W_2 为第二级车辆的最大载重量约束; $D(i, j)$ 表示节点 i 至节点 j 的行车距离(运输成本), $Q(T_j)$ 表示排列 T 中第 j 个客户点 T_j 的需求量。 $D(S_k, v_0)$ 为考虑了转运中心与中心仓库之间的距离而增加的惩罚项。计算完毕后, V_{nc} 为第二级配送方案所需要的车辆数, $Length_{nc}$ 为对应的行车距离, s_i 记录了排列 T 中第 i 个客户点所属的转运中心, P_i 记录了以 T_i 为路径终点的单条路径的起始客户点。利用 P_i 和 s_i , 从后向前可获得第二级完整的配送方案^[18]。

初始解生成阶段首先循环生成随机排列 T 并通过 Split 算法进行分配, 直至获得第二级可行的(满足第二级车辆数约束)初始配送方案; 然后计算各个转运中心的转运量, 在此基础上计算第一级总距离: 优先处理转运量超过 W_1 的转运中心, 满载的第一级车辆从中心仓库直接到达这些转运中心, 同时减少相应的转运量, 直至每个转运中心的转运量均小于第一级车辆的最大载重量, 将第一级的 SDOVRP 转化为

OVRP^[4,21],处理完毕后,转运量大于0的转运中心组成第一级的排列,按照贪婪的原则分配车辆,并通过局部搜索过程进一步改进^[4,21],再结合中心仓库与转运中心之间的直达路径,得到第一级的配送方案;两级的配送方案相结合,得到了2E-OVRP完整的初始可行解。

3.3 局部搜索算子选择

在获得了初始可行解后,通过VND进一步改进。VND的局部搜索分别针对第一级和第二级配送方案进行。由于第一级问题处理后是一个规模较小的OVRP,采用swap和move算子^[4,21]对第一级的配送方案进行搜索改进,这两种算子限定的搜索范围为:swap算子交换两个转运中心的位置,而move算子将一个转运中心移动到另一条第一级路径中。第一级的局部搜索仅在需要计算第一级总距离时执行。

第二级问题规模较大,所使用的局部搜索算子分为路径内部和路径间两种。第二级路径内部搜索采用swap、move和2-Opt算子^[4]。内部swap算子限定的搜索范围为单个客户点与单个客户点或者连续的两个客户点交换位置;内部move算子限定的搜索范围为单个客户点或连续的两个客户点前后移动位置,此外,该算子也将一条路径所属的转运中心调整至该条路径中的最佳位置;2-Opt算子左右翻转一段连续的客户点来构造邻域进行搜索。

第二级路径间搜索采用2-Opt*、swap及move算子^[4]。2-Opt*算子先分别中断两条第二级路径的一条边,再组合成两条新路径;swap算子交换两条第二级路径中的客户点,限定最多为一条路径中的连续3个客户点和另一条路径中的连续3个客户点交换位置,此外,当两条路径属于不同的转运中心时,该算子可用于交换这两条路径的转运中心;move算子将一条第二级路径中的客户点移动到另一条第二级路径中,限定最多移动连续3个客户点,此外,该算子可将单条第二级路径所属的转运中心更换为其他的转运中心。第二级路径间与路径内部局部搜索算子组合使用;每当路径间算子产生的第二级新路径均满足第二级车辆的最大载重量约束时,采用第二级路径内部算子进一步优化。

3.4 MS-VND算法流程图

本文的MS-VND算法可用流程图简要表述,如图3所示, i 为迭代次数, $i_{\max}$ 为最大迭代次数,Improve记录迭代过程中是否有改进。判定“方案可行”是指判定第二级配送方案是否满足可用车辆总数的约束。图3中,第二级路径间的2-Opt*、swap以及move算子搜索过程已包含由于转运中心转运量变化引起的对第一级总距离的重新计算。由于第一级总距离的计算过程相对简单,且在上述3种算子的执行过程中被反复调用,故未突出显示。“第二级路径内部搜索”是指使用内部swap、move及2-Opt 3种第二级路径内部局部搜索算子对每条第二级路径进行彻底优化。

局部搜索算子均采用First-Accept策略^[4]:当遇到更好解时,立即替换当前解。每当初始可行解生成后,几种算子循环执行,直至均无法获得改进。由于第二级路径内部算子执行次数较多,限定其与路径间算子结合时,不循环搜索;在“第二级路径内部搜索”中对每条第二级路径使用路径内部算子彻底改进。第二级路径间搜索时,若两条路径属于相同的转运中心,由于优化时不改变转运中心的转运量,故不必重新计算第一级距离;否则第一级总距离必须重新计算;move算子

改变一条第二级路径的转运中心时,由于改变了转运中心的转运量,第一级总距离必须重新计算。

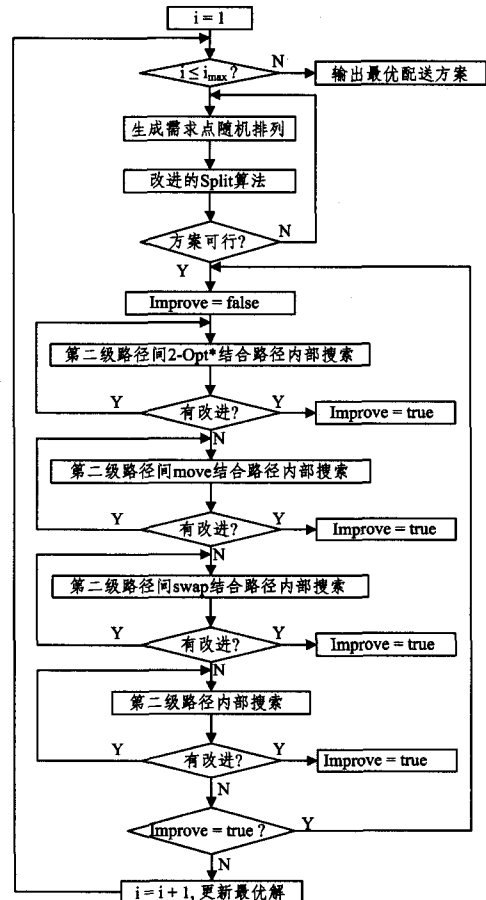


图3 求解2E-OVRP的MS-VND算法流程图

4 仿真实验

4.1 算例描述

本文算例扩展自文献[1],包含一个远程的中心仓库、5个转运中心以及50个客户点,采用不同的客户点分布和转运中心位置组合。客户点有随机分布(Random)、重心分布(Centroids)以及象限分布(Quadrants)3种类型。随机分布中客户点的X、Y坐标服从[0,100]的均匀分布。重心分布模拟了大城市的市区和郊区:中心40×40的方块区域代表市中心,中心方块外围4个20×20的方块代表郊区,中心方块中有6个客户点集群,周围每个郊区方块中各有一个客户点集群。象限分布模拟围绕河流、主干道、山谷等分布的城镇,客户点集中分布在4个象限内。转运中心有3种分布类型:随机分布(Random)、切片分布(Sliced)及禁区限制(Forbidden Zone)。随机分布模拟没有任何限制的情形,转运中心可分布在城市周围的任何位置。切片分布是指将城市周围按照转运中心个数分为 n_i 块,每块随机放置一个转运中心。禁区限制模拟了客户点靠近海边或者山脉分布的情形,由于地形等因素的限制,转运中心需要设置在一些禁区之外。

4.2 实验设置

在主频为2.8GHz的Intel奔腾双核E5500处理器(只用单核心)、内存为2GB的硬件平台上及Windows XP操作系统下通过Microsoft Visual C++ 6.0实现本文的MS-VND算法。设置算法的最大迭代次数为200,每个算例均进行10轮独立的计算以综合评价算法的性能。此外,每个算例均进

行了一轮 10000 次迭代的计算,以获得 MS-VND 算法求解 2E-OVRP 各算例的最好结果。

4.3 实验结果与对比分析

针对 18 个扩展算例的测试结果如表 1 所列。为便于比较,用 2E-OVRP 开放式的目标考察 2E-VRP 结果;去除每条路径中连接中心仓库或转运中心的较长的边。表 1 中“分支定界算法对应结果”与“ALNS 算法对应结果”分别为开放式目标下这两种算法的最好解对应的结果;“MS-VND 算法最好结果”是指该算法经过 10000 次迭代获得的最好解;“MS-VND 算法 10 轮 200 次迭代结果”给出了每个算例下 10 轮计算结果的最好解、平均值与结果标准差以及最好解首次出现时间的平均值。图 4 给出了 Instance50-s5-37 算例下 2E-VRP 对应结果和 2E-OVRP 的最佳配送方案对比:方块表示远程的中心仓库,三角形为转运中心,圆点为客户点,粗线为第一级路径,细线为第二级路径。

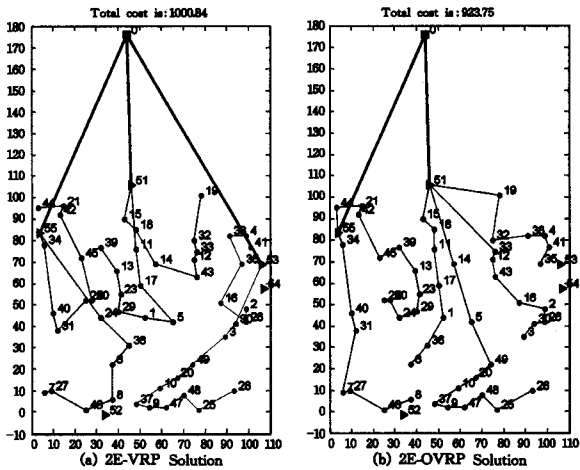


图 4 2E-VRP 对应结果与 2E-OVRP 最好结果对比

表 1 2E-OVRP 扩展算例结果与对比

扩展算例名称	分支定界算法 ^[3] 对应结果	ALNS 算法 ^[4] 对应结果	MS-VND 算法 最好结果	MS-VND 算法 10 轮 200 次迭代结果		
				最好解	平均值	首遇时间(秒)
Instance50-s5-37	1000.84	1000.84	923.75	923.75	923.75±0.00	0.13
Instance50-s5-38	816.94	816.94	712.09	712.09	712.09±0.00	25.38
Instance50-s5-39	1003.91	1003.91	911.36	911.36	911.36±0.00	3.68
Instance50-s5-40	824.12	824.12	717.96	717.96	717.96±0.00	2.34
Instance50-s5-41	1085.89	1085.89	989.84	989.84	989.84±0.00	3.65
Instance50-s5-42	884.58	884.58	740.06	740.06	740.06±0.00	10.94
Instance50-s5-43	869.78	869.78	774.77	774.77	778.07±4.81	31.54
Instance50-s5-44	675.67	675.67	598.96	598.96	598.96±0.00	17.05
Instance50-s5-45	919.29	912.46	797.82	799.31*	800.03±0.61	21.56
Instance50-s5-46	706.95	706.95	613.64	613.64	613.64±0.00	0.94
Instance50-s5-47	956.39	917.14	869.90	869.90	873.96±1.88	13.23
Instance50-s5-48	679.86	679.86	636.26	636.26	636.26±0.00	12.51
Instance50-s5-49	906.93	906.93	861.01	861.01	861.01±0.00	3.99
Instance50-s5-50	783.06	783.06	656.80	656.80	657.09±0.61	46.98
Instance50-s5-51	903.40	903.40	816.88	816.88	817.44±1.72	18.14
Instance50-s5-52	788.24	788.24	676.13	676.13	676.22±0.12	38.48
Instance50-s5-53	987.38	987.38	875.29	875.29	875.29±0.00	4.89
Instance50-s5-54	784.56	784.56	686.66	689.93*	689.93±0.00	15.46

由图 4 及表 1 中两种算法求解 2E-VRP 的对应结果与本文的 MS-VND 算法求解 2E-OVRP 的最好结果对比可知,好的 2E-VRP 解并不是好的 2E-OVRP 解,两者差距较大,故 2E-OVRP 的求解需要结合问题本身的特性,不适合当作 2E-VRP 求解。从最好解的质量来看,除算例 Instance50-s5-45 和 Instance50-s5-54 外,其它算例下 200 次迭代的最好解均达到了 10000 次迭代的最好解,算法收敛速度较快,计算结果质量较好;从最好解和平均值的差异以及标准差来看,算法 10 轮计算结果差异较小,平均值较为接近最好值,且有 12 个算例下 10 轮计算获得了相同的最好值,计算结果稳定,鲁棒性较好;从最好解首遇时间看,算法基本可在一分钟内找到高质量的结果,计算速度较快,满足物流配送系统的实时性要求。综合计算结果质量和计算时间,可知本文设计的 MS-VND 算法可有效求解提出的 2E-OVRP 模型。

结束语 本文针对城市物流中常见的物资开放式两级配送情形,结合新出现的两级车辆路径问题(2E-VRP)以及与之紧密联系并且普遍存在的开放式车辆路径规划目标,构建了开放式两级车辆路径问题(2E-OVRP)的数学模型,并设计了一种多起始点变邻域下降法(MS-VND)进行求解,针对 2E-OVRP 改进了已有的 Split 算法,获得了较好的初始可行解,并使用合理的局部搜索算子组合增强了变邻域下降法的寻优

效能。通过扩展的标准算例的实验结果表明所提出的模型和优化算法的有效性。此外,由于算法的实现过程较为简单,在城市物流优化决策过程中更有实际意义。

参考文献

[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] Baldacci R, Mingozzi A, Roberti R, et al. An Exact Algorithm for the Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem[J]. Operations Research, 2013, 61(2): 298-314

[4] Hemmelmayr V C, Cordeau J F, Crainic T G. An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for Two-Echelon Vehicle Routing Problem Arising In City Logistics[J]. Computers & Operations Research, 2012, 39(12): 3215-3228

[5] Saeiklis D, Powell S. A Heuristic Method for the Open Vehicle Routing Problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 2000, 51(5): 564-573

[6] Brandao J. A Tabu Search Heuristic Algorithm for Open Vehicle

- Routing Problem[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 157(3): 552-564
- [7] 符卓. 带装载能力约束的开放式车辆路径问题及其禁忌搜索算法研究[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(3): 123-128
- [8] 钟石泉, 杜纲. 基于核心路径禁忌搜索算法的开放式车辆路径问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(4): 827-832
- [9] 李湘勇, 田澎. 开放式车辆路径问题的蚁群优化算法[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(6): 81-93
- [10] 李延晖, 刘向. 沿途补货的多车场开放式车辆路径问题及蚁群算法[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(3): 557-562
- [11] Hansen P, Mladenovic N, Brimaerg J, et al. Variable Neighborhood Search[M]//Gendreau M, Potvin J. Handbook of Metaheuristics(Second Edition). New York: Spring Science + Business Media, LLC, 2010: 61-86
- [12] Mladenovic N, Hansen P. Variable Neighborhood Search[J]. Computers & Operations Research, 1997, 24(11): 1097-1100
- [13] Marti R, Moreno-Vega J M, Duarte A. Advanced Multi-Start Methods[M]//Gendreau M, Potvin J. Handbook of Metaheuristics(Second Edition). New York: Spring Science + Business Media, LLC, 2010: 265-281
- [14] Marti R, Resende M G C, Ribeiro C C. Multi-Start Methods for Combinatorial Optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 226(1): 1-8

- [15] Salehipour A, Sorensen K, Goos P, et al. Efficient GRASP+VND and GRASP+VNS Metaheuristics for the Traveling Repairman Problem[J]. 4OR, 2011, 9(2): 189-209
- [16] Villegas J G, Prins C, Prodhon C, et al. GRASP/VND and Multi-Start Evolutionary Local Search for the Single Truck and Trailer Routing Problem with Satellite Depots[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2010, 23(5): 780-794
- [17] Schittekat P, Kinable J, Sorensen K, et al. A Metaheuristic for the School Bus Routing Problem with Bus Stop Selection[J]. European Journal of Operational Research, 2013, 229(2): 518-528
- [18] Nguyen V P, Prins C, Prodhon C. Solving the Two-Echelon Location Routing Problem by a GRASP Reinforced by a Learning Process and Path Relinking[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 216(1): 113-126
- [19] Beasley J E. Route First-Cluster Second Methods for Vehicle Routing[J]. Omega, 1983, 11(4): 403-408
- [20] Prins C. A Simple and Effective Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem[J]. Computers & Operations Research, 2004, 31(12): 1985-2002
- [21] 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

(上接第 231 页)

为 Eipoal 提供编译和运行平台。通过在贪腐主题的网络舆情分析中的应用表明,该方法无论是处理长文本还是微博短文本都有效,生成的结果不仅可读性强,而且便于进一步处理。本研究将为新一代基于语义的舆情监测分析系统提供理论基础和技术支持,具有重要的理论意义和明显的实用价值。

基于语义文法的网络舆情精准分析方法可操作性强,系统执行效率高,满足对不同结构、不同处理粒度的网络舆情文本的处理需求,具有通用性。该方法可扩展到其他领域的 Web 自由文本分析处理中。今后的主要研究工作将包括:(1)语义文法的自动学习,手工总结网络舆情分析所需文法虽然准确率高但效率低,海量文本条件下,语义文法不易通过手工方式得到全面总结,文法的泛化能力难以保证;(2)在现有方法中增加正确性验证功能,由于网络舆情文本灵活多样,需要对分析结果的正确性进行验证,同时检测缺失、模糊、歧义、冗余等情况。

参 考 文 献

- [1] 方薇,何留进,宋良图. 因特网上舆情传播的预测建模和仿真研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(2): 203-205, 235
- [2] 许鑫,章成志,李雯静. 国内网络舆情研究的回顾与展望[J]. 情报理论与实践, 2009, 32(3): 115-120
- [3] 李忠俊. 基于话题检测与聚类的内部舆情监测系统[J]. 计算机科学, 2012, 39(12): 237-240
- [4] 丁杰,徐俊刚. IPSMS: 一个网络舆情监控系统的设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(4): 188-190
- [5] 戴媛,程学旗. 面向网络舆情分析的实用关键技术概述[J]. 信息安全, 2008(6): 62-65
- [6] 黄晓斌,赵超. 文本挖掘在网络舆情信息分析中的应用[J]. 情报科学, 2009(1): 94-99
- [7] 王灵芝. 高校学生网络舆情分析及引导机制研究[D]. 长沙: 中

南大学, 2010

- [8] 万源. 基于语义统计的网络舆情挖掘技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012
- [9] 王兰成,刘晓亮. 整合中文维基语义的网络论坛话题追踪方法研究[J]. 情报学报, 2013, 32(1): 22-27
- [10] 刘挺,马金山. 汉语自动句法分析的理论与方法[J]. 当代语言学, 2009(2): 100-112, 189
- [11] Poon H, Domingos P. Unsupervised semantic parsing[C]//Proceedings of the 2009 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Association for Computational Linguistics, 2009: 1-10
- [12] Roberts C W, Zuell C, Landmann J, et al. Modality analysis: a semantic grammar for imputations of intentionality in texts[J]. Quality & Quantity, 2010, 44(2): 239-257
- [13] Rao G, Agarwal C, Chaudhry S, et al. Natural language query Processing using semantic Grammar[J]. International Journal on Computer Science and Engineering, 2010, 2(2): 219-223
- [14] Vlassis N. A concise introduction to multiagent systems and distributed artificial intelligence[J]. Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning, 2007, 1(1): 1-71
- [15] Klein D. The unsupervised learning of natural language structure[D]. Stanford University, 2005
- [16] Hopcroft J E. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation, 3/E[M]. Pearson Education India, 2008
- [17] Burton R R. Semantic grammar: an engineering technique for constructing natural language understanding systems[J]. ACM SIGART Bulletin, 1977(61): 26-26
- [18] Cao C, Feng Q, Gao Y, et al. Progress in the development of national knowledge infrastructure[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2002, 17(5): 523-534
- [19] 王海涛. 文本知识处理方法及智能叙事生成应用研究[D]. 北京: 中科院计算所, 2008