

文章编号: 1001-0920(2004)07-0773-05

定位-运输路线安排问题的两阶段启发式算法

张潜^{1,2}, 高立群¹, 刘雪梅², 胡祥培³

(1 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2 沈阳工程学院,
辽宁 沈阳 110015; 3. 大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要: 重点研究了集成化物流中一类特殊的定位-运输路线安排问题(LRP)的解决方法。LRP问题包括设施定位和运输路线优化两方面决策,属于NP-hard难题。由于问题的复杂性,提出基于假设前提的LRP模型及其两阶段启发式求解算法。该方法分两步实现:首先,采用基于最小包络聚类分析的启发式方法确定被选择的潜在设施及由每一个选中的设施所要提供服务的客户群;其次,运用带有控制开关的遗传算法求解每一确定客户类中的优化运输路线。提出利用两阶段启发式算法求解LRP问题,此方法实现容易,运算简单,一定程度上避免了遗传算法中的“局部最优现象”。仿真实验证明了该算法求解单目标LRP的有效性和准确性。

关键词: 定位-运输路线安排问题(LRP); 两阶段启发式算法; 物流系统优化; 定位-配给问题(LA); 运输-路线安排问题(VRP); 遗传算法(GA)

中图分类号: TP18 文献标识码: A

A two-phase heuristic approach to the location routing problem

ZHANG Qian^{1,2}, GAO Li-qun¹, LIU Xue-mei², HU Xiang-pei³

(1. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2 Shenyang College of Engineering, Shenyang 110015, China; 3 Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China Correspondent: ZHANG Qian, E-mail: stu_zyl@yahoo.com.cn)

Abstract: A special LRP including many candidate facilities and customers with different demands in integrated logistics is studied. A model of LRP is given based on some hypotheses. A two-phase heuristic approach for solving this LRP is proposed. First, the candidate facilities and their customers are determined on basis of minimum wrap-net method by using heuristic technique. Second, genetic algorithm (GA) is used to search the optimal routes. This two-phase heuristic approach integrates facility location and routing problem, which architecture makes it possible to search the solution space easily and effectively without overpass computation. A computer simulation shows that this two-phase heuristic algorithm achieves significant improvement over a recent LRP heuristic.

Key words: location routing problem (LRP); two-phase heuristic algorithm; logistic systematic optimization; location-allocation (LA); vehicle routing problem (VRP); genetic algorithm (GA)

1 引言

定位-运输路线安排问题(LRP)是定位-配给问题(LA)和运输车辆路线安排问题(VRP)的集成。由于LRP调度问题具有复杂性、多约束性的特点,为

组合优化问题,很难获得对一般问题的解决方案^[1]。Von Boventer^[2]研究了关于运输问题中运输成本和定位成本的相互关系;Maranzana^[3]研究了供应点定位的最小运输成本求解问题。最早将运输车辆多

收稿日期: 2003-07-18; 修回日期: 2003-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70171040, 70031020); 辽宁省教育厅基金资助项目(2024101179)。

作者简介: 张潜(1971—),女,辽宁沈阳人,博士生,从事复杂系统的建模与控制、智能优化等研究;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、模糊控制等研究。

点停留特性与定位-运输网络结合起来开展研究的是Watson-Gandy和Dohrn^[4]; Bookbinder和Reece^[5]定义了3层多商品配送体系,建立了非线性混合整数规划模型,并结合Benders分解将问题分解为定位配给和运输问题两部分。LRP的精确算法仅限于小规模的问题(范围在20~50个客户),随着问题研究对象的增多,应采用启发式算法解决。

本文对单目标定位-运输路线安排问题的求解方法进行了研究,提出一类基于假设前提的特殊LRP问题的模型及其两阶段启发式求解方法。该方法分两步完成:第1步,将启发式规则用于最小包络聚类分析,确定设施定位,即选中设施及每个选中设施所要提供服务的客户群;第2步,采用带有控制开关的遗传算法即改进算法求解不同客户类的优化运输路线。该算法将控制开关引入到遗传算法选择操作中,经遗传算法选择操作产生适应值大的染色体进行遗传的交叉、变异运算。由于遗传算法的控制开关可保证种群的多样性,从而在一定程度上克服了遗传算法易限于“局部最优”的不足,实现了高效、准确、快速搜索。本文提出的两阶段启发式算法为解决物流系统优化问题中定位-运输路线安排问题提供了新的思路。

2 LRP模型的含义

文中的LRP问题模型基于如下假设:1)货物均能按要求准时供应给客户;2)物品流向为双向:即涉及的设施中的一部分既有输入又有输出;3)供/需特征满足确定型的特点:指物品供应/需求量为已知,并在一定时期内相对稳定;4)有多个潜在设施(仓库);5)运输工具数量为多车辆,同时满足单车的容量大于运输路线上客户的总需求量:每辆车在完成全部运输任务后回到出发点,并假定运输车辆足够多,可完全满足运输路线上的客户服务;6)基于供应/需求的复杂性,只考虑一个客户由一个设施提供服务:即供方为零售业市场(如为超市提供服务的消费品市场);7)考虑运输的经济性,假定每个设施(仓库)至少为两个以上的客户供货;8)目标数为单目标,满足LRP的单目标通常是总的费用(包括车辆运输费用、建设设施和运营费用)最小。

3 LRP的数学模型

3.1 模型中的决策变量

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

$$Z_r = \begin{cases} 1, & \text{在 } r \text{ 处建立一个设施, } r \in G; \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

3.2 模型中的参数含义

$G = \{r | r = 1, \dots, R\}$ 为一系列可行 R 处的潜在设施; $H = \{i | i = R + 1, \dots, R + N\}$ 为一系列需要服务的客户; $S = \{G \cup H\}$ 为所有地点和客户总和(也包括仓库); $V = \{v_k | k = 1, \dots, K\}$ 为 K 个运输工具可到达设施的路线; C_{ij} 为客户 i 到客户 j 的平均单位距离运输成本; F_r 为在 $r(r = 1, \dots, R)$ 处建立并运作一个设施所需要的平均成本; q_j 为顾客 $j(j \in H)$,需求的平均数量; Q_k 为运输工具 $k(k = 1, \dots, K)$ 的容量; d_{ij} 为客户 i 到客户 j 的距离; X_{rjk}, X_{mk} 分别为第 k 辆车从仓库 r 向客户 j 和客户 m 提供服务。

3.3 模型的建立

目标函数

$$f(x) = \min_{i \in S, j \in S, k \in V} C_{ij} X_{ijk} d_{ij} + \sum_{r \in G} F_r Z_r \quad (1)$$

满足约束条件

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in S} X_{ijk} = 1, \forall j \in H; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{j \in S} q_j X_{ijk} \leq Q_k, \forall k \in V; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in S} X_{ipk} - \sum_{j \in S} X_{pjk} > 0, \forall k \in V, p \in S; \quad (4)$$

$$\sum_{r \in G} \sum_{j \in H} X_{rjk} \leq 1, \forall k \in V; \quad (5)$$

$$\sum_{k \in V} X_{mk} + Z_r + Z_m \leq 2, \forall m = 1, \dots, R, r \in G; \quad (6)$$

$$\sum_{k \in V} \sum_{j \in H} X_{rjk} - Z_r \leq 0, \forall r \in G; \quad (7)$$

$$\sum_{j \in H} X_{rjk} - Z_r \leq 0, \forall k \in V, r \in G; \quad (8)$$

$$X_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1, \forall i, j \in S, k \in V; \quad (9)$$

$$Z_r = 0 \text{ 或 } 1, \forall r \in G. \quad (10)$$

在式(1)中,目标函数为求总成本的(包括运输成本、选择和运作仓库所需成本)极小值;约束条件(2)确保每个顾客仅由一个运输工具提供服务;式(3)为运输工具容量的约束条件,满足在路线上行驶的每台车辆都不超过其容量;式(4)为一系列路线连续约束,指运至某一点的货物由同一车辆运出;式(5)保证每个运输车辆的路线最多从一个仓库运出;式(6)保证在任意两个仓库之间无其他连接方式;式(7)和(8)提供了每一运输工具的行驶源于一

个仓库且只能有一个起点; 式(9) 和(10) 保证满足取整数约束^[6,7].

4 LRP 问题的两阶段启发式求解算法

4.1 基于第 1 阶段启发式算法的LRP 问题分析

首先考察客户应归属于哪个配送中心, 因其运货量是一定的, 所以在客户信息确定后决定总成本最小的还是总路径最小. 在综合考虑路径最短, 且总成本最低(可大概表示为路径最短) 的情况下, 可确定启发函数如下:

$$f_1(x) = HSZ_1 = \sum_{i=1}^N MNL_i; \quad (11)$$

$$f_2(x) = HSZ_2 = \sum_{p=1}^i q_p = nQ_k,$$

$$n = 1, 2, \dots, N, p = 1, 2, \dots, i; \quad (12)$$

$$L = \sum_{i=1}^N d_i \quad (13)$$

其中: MNL_i 为客户 i 到 m 个配送中心中距离最小的值, N 为客户点, d 为某一客户 i 到任一配送中心的距离

文中应用最小包络法将客户集 C 划分成若干子类, 具体操作如下:

假设 m 个潜在设施对应的点及其坐标分别为 $PF_1(X_1, Y_1), PF_2(X_2, Y_2), \dots, PF_i(X_i, Y_i), \dots, PF_m(X_m, Y_m)$; 任意两个潜在设施 $PF_i(X_i, Y_i)$ 和 $PF_j(X_j, Y_j)$, d_{ij} 和 R_{ij} 分别为 PF_i 和 PF_j 之间距离及距离的一半, 且满足

$$d_{ij} = [(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2]^{1/2}, \quad (14)$$

客户的数量为 N , 客户集 $C = [C_1, C_2, \dots, C_N]$; 客户对应的点及其坐标分别为 $C_1(x_1, y_1), C_2(x_2, y_2), \dots, C_p(x_p, y_p), \dots, C_N(x_N, y_N)$; r_{ip} 为任意一个潜在设施 PF_i 到任意客户 p 的距离. 以

$$R_{ij} = 1/2d_{ij} \quad (15)$$

为半径作相切圆 $O_1, O_2, \dots, O_i, O_j, \dots, O_m$ 对应半径分别为 $R_1, R_2, \dots, R_i, R_j, \dots, R_m$; 若

$$r_{ip} = 1/2d_{ip} \quad (16)$$

对应的坐标点 C_p 落在某一圆 O_i 内, 则将 C_p 列入 O_i 类(C_p 由配送中心 i 提供服务), 即满足如下判定准则:

1) 如果满足

$$r_{ip} < R_{ij}, \quad (17)$$

则将客户 C_p 聚为设施 PF_i 类; 否则, 不列入此类

2) 在 O_i 类中有客户 $C_1, C_2, \dots, C_l, C_m$, 若

$$q_p = nQ_k, n = 1, 2, \dots, N, \quad (18)$$

则 C_1, C_2, \dots, C_l , 由配送中心 i 提供服务, C_m 转移到与其最近的配送中心并由它提供服务. 这种将最小包络法和客户需求量综合考虑聚类选址的启发式算法, 有利于解决实际问题. 该方法既考虑了不同客户之间的相对距离, 又考虑了不同客户的需求量.

3) 在邻界相切圆半径上的客户点还应满足如下条件: 即到与其最近的两客户点的距离和小于与它次近两个客户点的距离.

4) 如果存在某一客户 C_q 到任意设施 PF_j 的距离 $r_{jq} = 1/2d_{jq}$ 大于最大的两个设施距离和的一半, 即

$$r_{jq} > \max R_{ij} \quad (19)$$

从提高经济效率的观点考虑, 则取消对此客户供应, 或重新调整潜在设施(配送中心) 位置.

准则 3) 和 4) 主要适用于易引起奇异的客户点的聚类分析.

4.2 第 2 阶段遗传算法求解LRP 问题

对于在第 1 阶段已经选择的设施和其所要配送的客户, 采用遗传搜索方法在任一类中寻找优化运输路线. LRP 的个体由 M 个子串组成, 每个子串代表 1 条运输路线上访问顾客的先后顺序, 且采用顾客号自然数进行编码.

对于第 2 阶段遗传编码中的个体 K , 计算适应度

$$f_k = 1 / \sum_{i, s, j, s, k, v} C_{ij} X_{ijk} + \sum_{r, G} F_r Z_r, \quad (20)$$

选择概率

$$P_k = f_k / \sum_{i=1}^L f_i \quad (21)$$

适应度要作适当线性拉伸, 其中 L 为个体数.

遗传编码、交叉和变异算子都局限在子串内进行. 交叉操作采用 LOX 算子; 变异操作采用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 β 时不发生变异操作, 当开关值大于 β 时发生变异操作(通常取 $\beta = 0.5$), 并按如下方式产生一个对应的变异个体:

$$a_i = P_{ik} + \frac{f}{f_i} N(0, 1), k = 0 \sim n. \quad (22)$$

式中: f 为第 i 个个体的适应值, f_i 为群体适应值的和, P_{ik} 为第 i 个个体的第 k 个分量.

4.3 两阶段启发式算法的实现

基于两阶段启发式算法求解 LRP 问题实现步骤如下:

Step 1: 第 1 阶段利用启发式算法确定潜在设施

的位置及其服务客户

Step 2: 对于第 2 阶段的每个个体, 利用对成本有较好反应的启发式规则 (满足总路径最短的启发式规则) 产生第 2 阶段中 L 个个体, 此时第 2 阶段共有 L 个个体;

Step 3: 对第 2 阶段中的每个个体 k , 计算适应值 f_k , 并进行线性拉伸;

Step 4: 计算第 2 阶段中每个个体的选择概率 P_k , 并利用蒙特卡洛法确定个体是否保留;

Step 5: 对第 2 阶段中个体进行交叉和变异操作, 且操作仅限于子串内进行, 选择操作时用随机开关控制, 并要求在同一运输车辆路线的客户之间进行;

Step 6: 对交叉或变异后得到的新个体进行解死锁处理;

Step 7: 判断第 2 阶段个体是否已达到进化代数 G , 若达到转 Step 8; 否则, 转 Step 3;

Step 8: 对第 2 阶段个体进行选择和变异操作

注 1 潜在设施减少的判定准则为: 如果减少任意一潜在设施应满足客户运费增加总量小于建设一个潜在设施的固定成本, 否则, 潜在设施的数量不再减少

5 仿真实例分析

本文选择 3 种不同型车从 6 个潜在设施向 30 个客户提供运输服务. 假设潜在设施规模相同, 由 3 种不同型车提供运输服务 (大、中、小型车的运输能力分别为 10 t, 6 t, 2 t), 每个潜在设施处有一辆以上的车, 可利用一辆车以上为多个客户提供服务. 单位车的运输成本 $C_{ij} = 2 \text{ 元}/(\text{t} \cdot \text{km})$, 建立和运营一个潜在设施的成本 $F_r = 160 \text{ 元}$, 30 个客户总的需求量为 72 t. 潜在设施 (6 个) 和客户 (30 个) 的坐标位置见图 1. 结合图 1 的数据, 针对不同的客户, 用文中提出的两阶段启发式算法求解 LRP 优化问题. 算法程序采用 VC++ 语言编制, 程序运行在 PIII 微机上, 表 1、图 2~ 图 4 分别给出了程序 2 000 次迭代运行

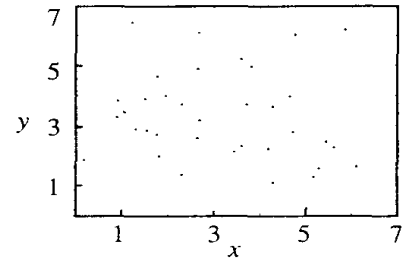


图 1 6 个潜在设施和 30 个客户的坐标位置

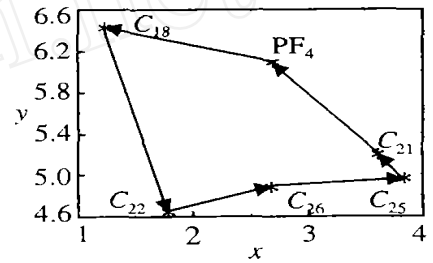


图 2 选定潜在设施 PF₄ 所提供服务的客户优化运输路线

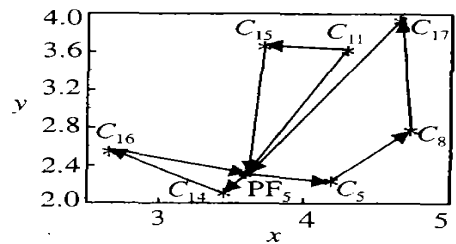


图 3 选定潜在设施 PF₅ 所提供服务的客户优化运输路线

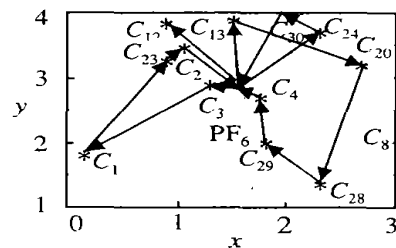


图 4 选定潜在设施 PF₆ 所提供服务的客户优化运输路线

表 1 选定潜在设施的 3 种不同车型的优化调配方案

潜在设施	车辆调配选择	优化运输路线		
		大型车运输路线	中型车运输路线	小型车运输路线
PF ₂	大型车 (1 台)	PF ₂ -C ₂₇ -C ₉ -C ₇ -C ₁₉ -C ₆	/	/
PF ₃	小型车 (1 台)	/	/	PF ₃ -C ₁₀
PF ₄	大型车 (1 台)	PF ₄ -C ₁₈ -C ₂₂ -C ₂₆ -C ₂₅ -C ₂₁	/	/
PF ₅	大型车 (2 台), 中型车 (1 台)	PF ₅ -C ₅ -C ₈ -C ₁₇ , PF ₅ -C ₁₄ -C ₁₆	PF ₅ -C ₁₁ -C ₁₅	/
PF ₆	大型车 (2 台), 中、小型车 (各 1 台)	PF ₆ -C ₂₄ -C ₃₀ , PF ₆ -C ₁₃ -C ₂₀ -C ₂₈ -C ₂₉ -C ₄	PF ₆ -C ₃ -C ₁ -C ₂₃ -C ₂	PF ₆ -C ₁₂

的结果

从上面的仿真结果可以看出: 如果选择大、中、小 3 种不同型号的车进行组合运输配送货物, 则有 5 个潜在设施被选中, 并由它们分别为 30 个客户提供服务, 此时目标函数值为最小 $f(x) = 6\,991.91$ 元

6 结 语

本文提出采用启发式规则将客户进行最小包络聚类分析为若干子类; 然后, 采用遗传搜索求解每一客户子类中的优化运输路线的方法, 为解决单目标物流配送 LRP 优化问题提供了新的思路和途径。根据遗传算法的搜索特性, 可将客户类中的不同客户进行遗传随机优化搜索, 在全局进行最优解(或近优解)寻找, 避免了传统优化算法中的“局部最优现象”的发生, 同时能够进行大规模物流配送路径优化问题的寻优。计算机仿真实验证明了该算法的有效性。本文将最小包络聚类分析和遗传算法有效地结合, 提出了两阶段启发式算法, 为进一步研究物流配送优化调度问题, 并将研究成果应用于物流生产调度的实际工作, 提高企业的经济效益, 提供了参考。

参考文献(References):

[1] Hokey M, Vaidyanathan J, Rajesh S. Combined loca-

tion-routing problem: A synthesis and future research directions [J]. *European J of Operational Research*, 1998, 108(1): 1-15

[2] Von Boventer. The relationship between transportation costs and location rent in transportation problem [J]. *J of Regional Science*, 1961, 3(2): 27-40

[3] Maranzana F E. On the location of supply points to minimize transport costs [J]. *Operational Research Quarterly*, 1965, 15(2): 261-270

[4] Watson-Gandy C, Dohrn P. Depot location with van salesman-A practical approach [J]. *Omega*, 1973, 1(3): 321-329

[5] Bookbinder J H, Reece K E. Vehicle routing considerations in distribution system design [J]. *European J of Operation Research*, 1988, 37(2): 204-213

[6] Bruno D B, Vincent F, Paul S, et al. Solving vehicle routing problems using constraint programming and metaheuristics [J]. *J of Heuristics*, 2000, 6(5): 501-523

[7] Hwang, H S. Design of supply-chain logistics system considering service level [J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2002, 43(7): 283-297.

(上接第 772 页)

4 结 语

本文按照信息化整体解决方案的目标, 提出了面向整体解决方案的企业建模框架 EM ITS, 强调模型内容和结构随信息化生命周期阶段不同而不同的观点, 分析了对应于实施信息化整体解决方案的各阶段中企业模型的内容和结构, 讨论了各阶段模型之间的关系和演化过程, 并根据 EM ITS 框架给出了企业建模系统的功能框架。

在本文提出的 EM ITS 框架下, 可继续深入研究业务模型与信息系统模型、模型与系统之间的转换和互动机制及模型演化过程中的一致性问题, 并结合本文提出的建模系统框架利用可操作的研究结果设计开发出有效的整体解决方案实施工具。

参考文献(References):

[1] 范玉顺. 信息时代企业综合发展框架与信息化整体解决方案 [J]. *航空制造技术*, 2002, 8: 17-22

(Fan Y S. Enterprise development framework in the information age and total solution for information system

implementation [J]. *The Aeronautical Manufacturing Technology*, 2002, 8: 17-22.)

[2] 范玉顺, 吴澄. 集成化企业建模系统体系结构与实施方法研究 [J]. *控制与决策*, 2000, 15(4): 401-405

(Fan Y S, Wu C. Research of system architecture and implementation method for integrated enterprise modeling [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(4): 401-405.)

[3] ESPRIT Consortium AMICE. *CMOSA: Open System Architecture for CIM* [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1993

[4] Vernadat F B. *Enterprise Modeling and Integration: Principles and Applications* [M]. New York: Chapman & Hall, 1996

[5] Hossain A, Gabbar, Yukiyasu Shimada, Kazuhiko Suzuki. Computer-aided plant enterprise modeling environment (CAPE-ModE) - design initiatives [J]. *Computers in Industry*, 2002, 47(1): 25-37.

[6] 范玉顺. workflow 管理技术基础: 实现企业业务过程重组、过程管理与过程自动化的核心技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 施普林格出版社, 2001.