

文章编号:1672-9331(2017)03-0048-06

城市地下物流节点的选址

周安邦, 周爱莲

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为了对城市地下物流系统中的节点进行合理选址以提高城市地下物流服务水平, 首先对城市地下物流节点的特点进行了分析, 将城市地下物流节点选址问题抽象为“选址一分派问题”, 再经进一步分解, 将“分派”镶嵌在“选址”中; 其次构建了从决策者成本角度出发的上层规划模型和从客户利益角度出发的下层规划模型; 最后针对此类双层规划模型, 采用组合遗传算法进行求解。研究结果表明, 将物流部门成本与客户利益综合考虑的双层规划模型能够有效解决城市地下物流节点选址问题, 且模型的算法更加高效。

关键词: 城市地下物流系统; 物流节点; 合理选址; 选址一分派问题; 双层规划模型; 组合遗传算法
中图分类号: U491 **文献标识码:** A

Urban underground logistics node location

ZHOU An-bang, ZHOU Ai-lian

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of
Science and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: To make a reasonable node location in the urban underground logistics system and improve the service level of the urban underground logistics, the characteristics of urban underground logistics node are analyzed, the problem of the location of the underground logistics node could be abstracted as Location Allocation Problems. With further separation analysis, the paper made Allocation Problem inserted in the Location part. The upper layer planning model from the point of view of the decision maker and the lower layer planning model from the customer's point of view are constructed. A combination of genetic algorithm was used to solve the bi-level programming model. The results show that the bi-level programming model considering the cost of the logistics department and the customer's benefits can effectively solve the urban underground logistics node location problem, and the algorithm of the model is more efficient.

Key words: urban underground logistics system; logistics node; reasonable location; location-allocation problems; bi-level programming model; combined genetic algorithms

互联网经济的快速发展促使货运需求更为频繁, 而伴随私家车的大规模增加, 城市交通问题愈加严重, 在造成社会资源浪费的同时也制约了我国经济的发展^[1]。在寻找新出路的过程中, 地下

物流作为可持续物流研究的一个新方向越来越受到重视, 它将地面的货运交通转移至地下运行的思路令人耳目一新^[2-4]。姜阳光等^[5]运用集合覆盖模型分析了城市地下物流节点的选址问题; 谢

收稿日期: 2017-06-01

作者简介: 周安邦(1990-), 男, 江西上饶人, 长沙理工大学硕士研究生, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究。

丽^[6]采用双层规划模型研究了 ULS 节点选址问题,旨在以最低物流费用和最少的物流节点来满足所有的客户需求;闫文涛等^[7]研究的地下物流节点选址是在双层规划模型基础上建立了从决策者角度出发的上层规划模型和从客户角度出发的下层规划模型,借助反应函数分析了模型的解法,并运用 MATLAB 中的 Fmincon 函数进行了求解;黄欧龙等^[1]在关于节点的内部设计问题上分析了各功能区之间的联系,提出了在系统中进行平面布置的方法。在已有的研究中,一类是单方面在规划部门的角度看待问题忽略客户;另一类虽然考虑了物流规划部门和客户双方的利益,但在计算下层客户费用时运用了难以证明其收敛性的反应函数关系式。

综合分析以上两类研究的模型以及求解方法,笔者提出了更具推广性的模型,并采用适用性更强的组合遗传算法来求解该类问题。

1 双层规划模型的构建

1.1 问题描述

目前,世界各国对地下物流系统的概念和标准都不相同:荷兰称为地下物流系统;美国称为地下管道货物运输;德国又称为 Cargo cap 系统;日本称为地下货运系统。本研究的城市地下物流系统指的是城市内部运作在地下的一种货物运输供应系统,不同枢纽区的货物都由地下物流系统输送到各个需求终端,如:工厂、超市、小区等。地下物流线路的交接之处形成地下物流节点,由于实现货运的主要场所是地下,所以其运载工具必须具有高度自动化特性。在结合地面运输工具的同时,地上道路系统和地下系统需同时由节点调配^[8]。当货车经过长途运输到达目标城市边际后,节点负责将货物转移至地下物流系统以进行城市内部的物流配送,因而本研究问题可描述为在一个城市地下物流系统中如何对物流节点进行合理布设以及如何分配各节点的运输量以达到减少运营成本提升服务质量的目标。

本研究的建模思路为:从成本费用的角度出发,拟建立一个同时考虑决策者和客户(需求点)费用成本最优的城市地下物流节点选址双层规划模型。本研究的三层网络节点所构成的地下物流

系统运输网络拓扑如图 1 所示。

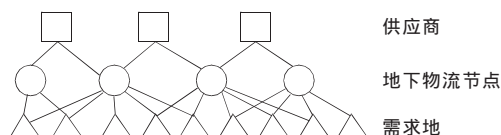


图 1 地下物流系统运输网络拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underground logistics system transport network

1.2 模型假设

本模型假设为:①本物流网络包含供应点、物流节点以及需求点三层节点;②允许多个节点共同承运同一客户的需求量;③所有货物都由新建的地下物流节点配送,不考虑新旧节点的竞争;④节点的最大货运量及运输距离(本文考虑为直线距离)已知;⑤供应商供应能力足够大;⑥物流节点投资费用、最大处理容量及单位产品管理费用已知;⑦客户对货物的需求服从随机正态分布;⑧运载工具同种类型且数量不限。

1.3 模型建立

本研究中上层规划旨在确定待建的物流配送节点,从而达到总成本(建造物流节点的固定成本与维护成本、供货商到节点的供货成本以及客户服务成本和节点的可变成本)最小的目的。而下层规划处理的是以客户费用最低为准则,将客户需求量合理地分配给不同的配送节点的问题。

设供应点 h 到物流节点 i 的单位运输量的广义费用为 C_{hi} ;节点的建设费用为 f_i ;节点维护费用为 e_i ;物流节点 i 到需求点 j 的运距是 d_{ij} ;节点 i 到需求点 j 的运输单价为 c_{ij} ;物流节点 i 周转货物的单位管理费用为 g ;供应点 h 到物流节点 i 的运量为 X_{hi} ; X_{ij} 是物流节点 i 到需求点 j 的运量; z_i 为节点决策变量,当其值取 1 时选中,为 0 则放弃; B 为修建物流节点的总投资预算; y_{ij} 为 0—1 变量,当客户 j 的需求被分派给节点 i ,其值取 1,否则取 0; A_n 为供应商 k 的供货能力; s_i 为物流节点 i 的最大处理容量; L_i 和 E_i 分别为客户要求时间窗的上限与下限。

上层模型为:

$$U: \min F = \sum_i^n f_i z_i + \sum_i^n e_i z_i + \sum_h^n \sum_i^n x_{hi} \times d_{hi} \times c_{hi} + \sum_i^n \sum_j^m x_{ij} \times d_{ij} \times c_{ij} \times y_{ij} +$$

$$\sum_h^n \sum_i^n g \sqrt{x_{hi}/2}。 \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_i^n f_i z_i + \sum_i^n e_i z_i \leq B。 \quad (2)$$

$$\sum_i^n z_i \geq 1。 \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{hi} \leq A_n; W_H = 1, 2, \dots, m。 \quad (4)$$

$$\sum_{h=1}^m x_{hi} \leq S_i; i = 1, 2, \dots, n。 \quad (5)$$

$$\sum_i^n x_{ij} \geq R。 \quad (6)$$

$$E_i \leq \frac{d_{ij}}{v} \leq L_i。 \quad (7)$$

$$z_i \in \{0, 1\}。 \quad (8)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}。 \quad (9)$$

客户的配送费用随着节点承载量的不同而发生变化,一个客户的费用组成可以描述为其所有的承载节点费用之和。下层规划所建立的基于客户最优模型,旨在获取客户需求量的不同节点间的分配情况。

下层模型表达式^[10]为:

$$L: \min H = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \int_0^{x_{ij}} D^{-1}(w) dw。 \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^n X_{ij} \geq W_j; \forall j = 1, 2, \dots, n。 \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^l X_{ij} \leq S_i; \forall j = 1, 2, \dots, l。 \quad (12)$$

$$D^{-1}(X_{ij}) \geq 0; \forall i = 1, 2, \dots, n。 \quad (13)$$

$$\varepsilon z_i \leq X_{ij} \leq M z_i; \forall j = 1, 2, \dots, l。 \quad (14)$$

$$x_{ij} \geq 0; \forall i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, l。 \quad (15)$$

式中: W_j 为需求点 j 的总需求量; S_i 为 i 地节点的供应能力; $D^{-1}(\cdot)$ 为需求函数的反函数, $D^{-1}(x_{ij}) = \beta \ln x_{ij} - v_i z_i$, 其中 β 为修正系数, 令 $\beta=1, v_1=3, v_2=1, v_3=2$; M 为足够大的正数, ε 为足够小的正数, 令 $\varepsilon=0.1, M=600$ 。

2 模型求解

由于双层规划问题不存在多项式求解算法, 这也是此处不能采用常规方法求解的原因。针对此类问题, 孙会君等^[9]在混合整数型双层规划问题的研究中, 通过对分析所得到的反应函数的具

体形式建立求解的启发式算法, 但其收敛性难以证明且算法规模过大而难以推广应用。作者在简单遗传算法的基础上进行算法改进, 使用嵌套的组合遗传算法(组合 GA)^[10]。用同一种算法处理模型中的选址和分派两大问题, 可以减少计算时的系统误差, 且结合遗传算法和嵌套方法的优点, 可以极大地提高后期的编码精度。算法实施时, 首先利用遗传算法确定出待建的节点位置和数目, 在此基础上再运用内部 GA 将相应节点的分派量求出。其程序如图 2 所示。

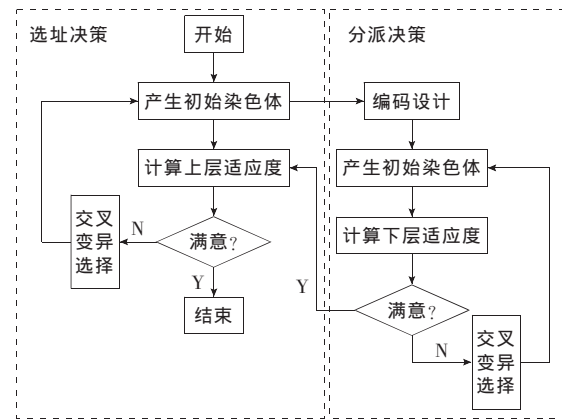


图 2 混合 GA 算法求解程序

Fig. 2 Solver program of combinatorial genetic algorithms

2.1 编码方法

1) 选址决策 GA1 的编码。

对某节点而言, 选址决策只存在选中与未选中两种情况, 故此用 0, 1 变量 z_i 表示节点 i 的选用情况。这里采用二进制编码方法。图 3 中的编码则表示第 2 节和第 3 节点未被选作物流节点建设。

1	0	0	1	1
---	---	---	---	---

图 3 GA1 编码示意图

Fig. 3 Code of GA1

2) 分派决策 GA2 的编码。

设定分派决策变量 y_{ij} 和 x_{ij} , 其中 y_{ij} 为 0, 1 变量。若物流节点 i 满足客户 j 的需求, 则 y_{ij} 的逻辑值为 1, 否则为 0。 x_{ij} 是解空间中某一正数。此处采用浮点数编码法则编码此两类决策变量, 使之成为一行有序变量。将每个备选点独立为一个小部分, 则整个编码由 I (I 为备选点数目) 个小部分组成。根据基因表达的含义可知, 每个小部

分的基因位数量为 $2J$ 。前 J 位和后 J 位分别表示决策变量 y_{ij} 和 x_{ij} 。详细的编码示意图见图 4。

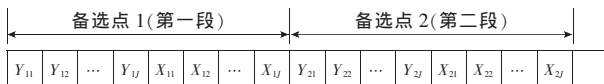


图 4 GA2 编码示意图

Fig. 4 Code of GA2

2.2 算法步骤

步骤 1:对 GA1 和 GA2 进行种群规模 q 、变异率 p_m 、交叉率 p_c 和最大迭代数的设定,且初始代数都置为零。

步骤 2:对 GA1 初始化,生成初始群体 $g_1(v_1)$ 。

步骤 3:执行内部的 GA2。

步骤 3.1:先根据 GA1 中的个体生成规模为 q_2 的初始群体 $g_2(v_2)$,再算得每一个体适应度,按照最初设定的遗传算子进行交叉变异以获得子代 b_2 。

步骤 3.2:算出 GA2 的各子代个体的适应度,再按轮盘赌方法和最优保存策略在 $g_2(v_2)$ 和 b_2 中选择出群大小为 q_2 的 $g_2(v_2+1)$ 。

步骤 3.3:在尚未达到设定的最大代数前,返回步骤 3.2 继续优化,直到最大代数为止,最后输出最佳染色体。

步骤 4:据 GA2 的输出值,算出 GA1 每一个体的适应度。

步骤 5:对外部进行交叉、变异操作,产生新的子代 b_1 。

步骤 6:执行步骤 3。

步骤 7:根据 GA2 的输出,求出子代 b_1 每一个体的适应度。

步骤 8:在上步产生的群体中采用轮盘赌方法在 $g_1(v_1)$ 和 b_1 中选出群大小为 q_1 的 $g_1(v_1+1)$ 。

步骤 9:在外部 GA1 遗传代数尚未达到设定值之前,返回步骤 5 继续进化。当达到最大代数时停止并输出最优个体。

3 算例分析

现一城市地下物流系统中存在 2 个供应点 (k),15 个客户 ($j=15$) 分别用 b_1, b_2, \dots, b_{15} 表示,3 个待建节点 (i) 的候选地且节点用 d_1, d_2, d_3 表示,忽略旧物流节点的影响(随机假定以下数值,实际应用中需采用统计方法确定合适值)。由于本研究考虑的是地下物流节点的建设,故各节点之间的直线距离即为地下货物的运输距离。各相关数据如表 1~6 所示。

表 1 供应商到物流节点的广义单位费用

Table 1 Unit cost of the suppliers to logistics nodes 元

供应商	单位费用		
	d_1	d_2	d_3
k_1	24	16	20
k_2	20	22	15

表 2 物流节点到客户的单位费用

Table 2 Unit cost of logistics nodes to customers 元

		客户单位费用														
		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
物流节点	d_1	9	3	7	11	16	3	13	7	10	19	22	8	12	3	20
	d_2	11	2	15	14	20	21	3	21	21	8	9	5	8	9	3
	d_3	13	15	8	12	23	9	7	5	8	14	16	14	3	2	6

表 3 节点投资费用、最大处理容量及单位产品管理费用

Table 3 Unit product management cost, investment cost and the maximum processing capacity of logistics nodes

物流节点	投资费用/ 万元	单位产品管理费用/ (元 \cdot t $^{-1}$)	最大处理 容量/kg
d_1	800	0.75	700
d_2	600	0.80	550
d_3	700	0.70	400

根据上述已知条件,本研究的组合 GA 可利用计算机编程语言中的 VB 6.0 进行模型求解。

经过迭代,当组合 GA 取得最小函数值时, z 的取值为 (1,1,0),表明候选点 1,2 被选作为物流节点的位置,候选点 3 暂不假设物流节点。客户需求在节点的分配如表 7 所示。相应总成本费用为 $F=86\ 780$ 万元,客户运输总成本为 $H=1\ 080\ 58$ 万元,此时既满足了客户的需求量,又保证了在客户要

求的时间窗内送达。组合 GA 的运算结果和收敛过程如图 5 所示。最优进化结果如表 7 所示。

表 4 客户需求量

Table 4 Customer demand t

客户	需求	客户	需求	客户	需求
b_1	56	b_6	108	b_{11}	52
b_2	84	b_7	130	b_{12}	79
b_3	72	b_8	37	b_{13}	112
b_4	99	b_9	80	b_{14}	98
b_5	130	b_{10}	39	b_{15}	46

若不将客户的费用纳入决策,原问题就转变

为一个只求总成本最低的单目标问题。采用普通遗传算法求解,并将求得的结果与本研究组合 GA 进行对比。

从表 8 可以看出,仅仅考虑选址费用最优的模型尽管节点建设总费用低于考虑用户最优的双层规划模型,但在前者最优节点选址的解下,其客户的物流费用远高于后者。由此可见,将节点建设费用与客户物流费用综合考虑的双层规划模型求得的选址方案与普通模型相比,虽然在总费用上略有增加,但能有效减少客户总费用。这种选址方案势必在该物流系统的实际运作过程中更为吸引客户,市场竞争力也更大。

表 5 各节点的运输速度与到客户的运输距离

Table 5 The speed of each node and the distance to the customer km

节点	速度	节点与客户的距离														
		b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}	b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}
d_1	16	10	5	9	12	17	5	15	18	16	21	20	9	13	4	25
d_2	17	14	5	18	17	23	24	6	21	20	11	12	8	13	12	20
d_3	20	6	19	8	15	23	14	9	10	12	14	17	25	19	11	5

表 6 供应商向物流节点供应量

Table 6 Supply quantity of suppliers to logistics nodes t

k	d_1	d_2	d_3
1	500	300	150
2	200	200	250

表 7 最优计算结果

Table 7 Optimal calculation result

序号	d_1	d_2	d_3	合计
1	56	0	0	56
2	0	84	0	84
3	72	0	0	72
4	99	0	0	99
5	130	0	0	130
6	108	0	0	108
7	0	130	0	130
8	37	0	0	37
9	80	0	0	80
10	0	39	0	39
11	0	52	0	52
12	0	79	0	79
13	0	112	0	112
14	98	0	0	98
15	0	46	0	46

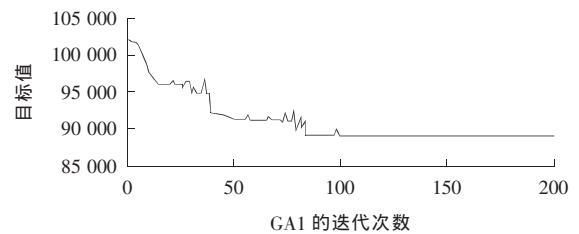


图 5 模型的优化过程

Fig. 5 Model optimization process

表 8 考虑客户最优的组合 GA 求解与单目标简单 GA 求解结果的比较

Table 8 The comparison between the results of solving the combinatorial optimization of GA with the single objective GA

目标对比	单目标简单 GA 求解	双层规划组合 GA 求解
选址方案	1,3	1,2
总费用/万元	85 370	86 780
客户总费用/万元	1 786.90	1 080.58

4 结论

1) 兼顾考虑物流规划部门和客户双方利益的

模型,较之单方面寻求上层决策最优更为全面,且弥补了摒弃客户利益而存在的不足,使模型实用性更强。

2) 本研究模型在处理地下物流节点选址问题时,不仅对费用成本进行了比较寻优,而且还将客户要求的时间窗加入到约束条件中,使得优化结果更为合理可行。

3) 本研究采用GA方法处理“分派”和“选址”问题,有利于提高运算速度。

本研究所建模型并没有将物流节点分层次考虑,而是一概而论,使得优化结果较为单一,难以适用于多层次复杂节点的情况。上层模型中所有运输距离均为直线,但在实际中可能由于地质及施工难度而不得不绕道选线。本研究所建选址模型忽略了初期竞争,但随着物流系统的扩展,地下物流与传统地面物流必定存在竞争关系。针对模型中存在的不足进行完善,将是后期研究的方向。

〔参考文献〕

- [1] 黄欧龙,郭东军,陈志龙.运用SLP方法布置地下物流系统配送中心[J].地下空间与工程学报,2006,2(1):1-4.
HUANG Ou-long, GUO Dong-jun, CHEN Zhi-long. Design of the distribution center of underground logistics system with SLP method[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(1): 1-4.
- [2] 马成林,毛海军,徐恒勤.城市地下物流系统发展模式及相关技术要求[J].物流技术,2012,31(3):72-75.
MA Cheng-lin, MAO Hai-jun, XU Heng-qin. Development of underground urban logistics system: mode and technical requirements[J]. Logistics Technology, 2012, 31(3): 72-75.
- [3] 范益群,钱七虎.基于地下集装箱运输的城市地下环境物流系统建设[J].科技导报,2011,29(7):31-35.
FAN Yi-qun, QIAN Qi-hu. Building urban underground environment freight transportation system based on underground container transportation[J]. Science and Technology Review, 2011, 29(7): 31-35.
- [4] 郭东军,谢金容,陈志龙,等.地下集装箱运输系统研究的深层动因及趋势[J].地下空间与工程学报,2012,8(2):229-235.
GUO Dong-jun, XIE Jin-rong, CHEN Zhi-long, et al. The trend and in-depth motivation for the research on underground container transport system[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 229-235.
- [5] 姜阳光,庞大钧.基于集合覆盖模型的城市ULS物流节点选址分析[J].物流科技,2009(10):54-55.
JIANG Yang-guang, PANG Da-jun. Analysis on Locations for urban ULS logistics links based on set covering model[J]. Logistics Sci-Tech, 2009(10): 54-55.
- [6] 谢丽.基于双层规划模型城市ULS节点最优选址分析[J].现代商贸工业,2014(2):72-74.
XIE Li. Optimal site analysis of urban ULS node based on Bi-level programming model[J]. Modern Business Trade Industry, 2014(2): 72-74.
- [7] 闫文涛,覃燕红.地下物流节点选址的双层规划模型及算法研究[J].地下空间与工程学报,2016(4):870-874.
YAN Wen-tao, QIN Yan-hong. Research on Bi-level programming model and algorithm of underground logistics node location[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016(4): 870-874.
- [8] 李彤,王众托.大型城市地下物流网络优化布局的模拟植物生长算法[J].系统工程理论与实践,2013,33(4):971-980.
LI Tong, WANG Zhong-tuo. Plant growth simulation algorithm of large urban underground logistics network optimization layout[J]. Systems Engineering Theory and Practice, 2013, 33(4): 971-980.
- [9] 孙会君,高自友.考虑路线安排的物流配送中心选址双层规划模型及求解算法[J].中国公路学报,2003,16(2):115-119.
SUN Hui-jun, GAO Zi-you. Bi-level programming model and solution algorithm for the location of logistics distribution centers based on the routing problem[J]. China Journal of Highway and Transport, 2003, 16(2): 115-119.
- [10] 周爱莲,李旭宏,毛海军.一类企业物流中心动态选址模型研究[J].系统工程学报,2011(3):360-366.
ZHOU Ai-lian, LI Xu-hong, MAO Hai-jun. Research on a multiple-period dynamic location model of enterprise logistics centers[J]. Journal of Systems Engineering, 2011(3): 360-366.