

动态竞争环境下的物流配送中心双层规划模型

韩霜^{1,2}, 张邻³, 谭智华², 程南该²

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 成都 610031; 2. 广东工业大学 土木与交通工程学院, 广州 510006; 3. 南昌航空大学 数学与信息科学学院, 南昌 330013)

摘要: 考虑服务水平、产品价格、沟通便利性和距离对客户效用的影响以及服务水平和产品价格之间的关系, 建立动态竞争环境下, 以企业为领导者、以竞争者为跟随者的物流配送中心双层规划模型, 以带精英策略的快速非支配排序等遗传算法设计迭代求解算法并进行仿真分析. 仿真结果表明, 企业总利润和总销量所占比例分别为49.19%和55.66%, 不仅有效平衡了产品价格和服务水平, 而且以满意的利润获得了市场份额上更大的优势.

关键词: 物流配送中心; 双层规划模型; 动态竞争; 客户重要性; 服务水平; 价格

中图分类号: TP18; C934

文献标志码: A

Bi-level programming of logistics distribution center in dynamic competitive environment

HAN Shuang^{1,2}, ZHANG Lin³, TAN Zhi-hua², CHENG Nan-gai²

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Institute of Mathematical and Information Sciences, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330013, China. Correspondent: HAN Shuang, E-mail: hshyjld@163.com)

Abstract: A bi-level programming model is established to optimizing the logistics distribution center in the dynamic competitive environment, which considers the influence of service level, price, communicating convenience and distance on customer's utility, and takes the relationship between service level and price into account as well. In the model, the enterprise acts as the leader, and the competitor acts as the follower. Furthermore, an iterative algorithm is designed based on the elitist and fast non-dominated sorting genetic algorithm, and a simulation example is studied. Analysis results show that the proportions of enterprise's total profits and total sales are 49.19% and 55.66% respectively. The enterprise not only strikes an effective balance between the price and the service level, but also gains greater advantages on the market share with satisfactory profits.

Key words: logistics distribution center; bi-level programming; dynamic competition; importance of customer; service level; price

0 引言

尽管企业间的产品竞争最终多借助零售终端得以实现, 但企业并不能完全掌控零售终端, 在此情形下, 物流配送中心作为企业高度可控的供应链末端窗口, 是企业参与市场竞争的重要节点. 因此, 对物流配送中心优化而言, 竞争是不能回避的重要影响因素. 在同一市场内, 企业物流配送中心的调整必将引发已有竞争者的反击, 加之物流配送中心一旦建设就不易改变, 故在动态竞争环境中, 企业对物流配送中心进行优化时关注的应该是在竞争者反击下的最优. 最先

对竞争环境下的设施优化进行研究的是 Hotelling^[1]. Huff 等^[2-3]提出的引力模型在竞争环境下的设施选址中被广泛应用. 在其模型中, 客户需求按比例分配给所有开放的设施, 而各设施能够获得的份额则取决于其为客户提供的效用与客户总效用的比值, 并且客户效用与设施质量成正比、与距离的幂函数成反比. Aboolian 等^[4-5]假定客户需求具有弹性, 建立了竞争环境下的设施选址模型并讨论了算法, 客户以效用为依据选择设施, 而影响客户效用的因素为设施规模和距离. Mcgarvey 等^[6]则以设施容量和距离作为

收稿日期: 2013-08-03; 修回日期: 2014-01-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71161005); 广东省大学生创新创业训练计划项目(1184512112).

作者简介: 韩霜(1981-), 女, 讲师, 博士生, 从事物流经济、物流系统优化的研究; 张邻(1973-), 男, 副教授, 博士, 从事物流网络优化、区域交通规划等研究.

影响客户效用的因素对该问题进行了研究,并且增加了设施容量、设施禁设区域和投资预算等约束条件的限制.针对竞争的动态性,Beresnev等^[7]以利润最大化为目标研究了2家企业依次进行设施选址的问题.Küçükaydin等^[8-9]在竞争者可以通过关闭或新建设施、调整设施质量等措施进行反击的条件下,对新进入市场的企业设施进行选址优化,客户效用受距离和设施吸引力的影响,但该设施吸引力是一个宽泛的概念,没有具体的指向对象.Ashtiani等^[10]则假定企业仅知道竞争者新增设施的概率,以距离和设施质量作为影响客户效用的因素,建立了设施选址的健壮优化模型.

在竞争性物流节点优化方面,孙会君等^[11]基于市场中已有配送中心的现状,以距离作为影响客户效用的因素,建立了新增配送中心选址的优化模型.段刚等^[12]在“原有配送中心-新建配送中心-未来加入配送中心”的框架下,建立了企业新建配送中心选址的双层规划模型,上、下层模型的优化目标分别为企业和未来竞争者在计划期内的市场份额达到最大.虽然文章强调要以动态视角探讨新建配送中心的选址,但仅分别计算了竞争者在未来各个年份加入时,企业和未来竞争者的最优选址方案.Rezapour等^[13]针对新进入市场的供应链,在静态竞争条件下对其配送中心及零售店选址、库存和运输决策进行了分析.

当前竞争条件下的物流节点优化研究大多假定竞争者的状态不发生改变,且一般仅含选址决策.然而,在竞争环境下,一般设施的选址优化则多以距离、设施质量(或规模)作为影响客户效用的因素,这并不十分适合于物流配送中心的选址和运营策略优化.除产品质量外,产品价格、服务水平和沟通便利性对客户选择物流配送中心和企业决策均有重要影响:客户选择某个物流配送中心的目的是为了以合适的价格便利地获得附加了恰当物流服务的商品;而企业既要重视客户对产品价格和服务水平的要求,又不能忽视与服务水平密切相关的物流成本对其优化决策的影响.此外,不同客户对企业的重要程度有差异,根据这种差异进行物流配送中心选址并分别设定服务策略更有利于企业以有限的资源获取最大的效益.因此,本文基于客户重要性的差异,以产品价格、服务水平、沟通便利性和距离作为影响客户选择行为的因素,结合服务水平和产品价格之间的关系,对动态竞争环境下,以企业为领导者、以竞争者为追随者的物流配送中心优化进行探讨.

1 问题描述及模型假设

假定市场内已有企业和竞争者的若干物流配送中心,企业拟对其物流配送中心进行调整,竞争者亦可通过新建/关闭物流配送中心、调整服务水平/产品价格等措施进行反击,故企业物流配送中心优化时须

考虑竞争者的反应.为方便建模,作如下假设:1)市场内销售的产品同质.2)企业根据客户重要性的差异将其客户划分如下:当前价值高但未来价值低的为VIP客户,当前和未来价值均十分高的为战略客户,当前价值低但未来价值高的为潜力客户.3)仅在地理位置已知的备选地点新增物流配送中心,每个地点仅增加一个物流配送中心且一旦被企业选中即不能为竞争者所用.

2 模型建立

2.1 集合说明

I 为客户集合, $I = I_1 \cup I_2 \cup I_3$.其中: I_1 为VIP客户集合, $I_1 = \{1, 2, \dots, i_1\}$; I_2 为战略客户集合, $I_2 = \{1, 2, \dots, i_2\}$, $I_2 \cap I_1 = \emptyset$; I_3 为潜力客户集合, $I_3 = \{1, 2, \dots, i_3\}$, $I_3 \cap I_2 = \emptyset$, $I_3 \cap I_1 = \emptyset$. J_1 为企业现有物流配送中心集合, $J_1 = \{1, 2, \dots, j_1\}$; J_2 为竞争者现有物流配送中心集合, $J_2 = \{1, 2, \dots, j_2\}$, $J_2 \cap J_1 = \emptyset$; J_3 为备选地点集合, $J_3 = \{1, 2, \dots, j_3\}$, $J_3 \cap J_2 = \emptyset$, $J_3 \cap J_1 = \emptyset$,令 J_4 为 J_3 中被企业选中的备选地点集合($J_4 \subset J_3$),则 $J_3 - J_4$ 为可供竞争者选择的备选地点集合; T 为规划期集合, $T = \{1, 2, \dots, t_1\}$.

2.2 建模分析

2.2.1 客户效用

产品质量、产品价格、服务水平、沟通便利性和距离均对客户的选择决策有重要影响.文中服务水平指物流服务水平,它是客户对物流服务质量、物流服务流程、物流服务时效等的综合评判,可以从存货可得性、物流任务完成情况(速度、一致性、灵活性、故障与修复)和可靠性等方面进行衡量.因假定市场内的产品同质,故仅将服务水平、产品价格、沟通便利性、距离作为影响客户决策的因素:在产品同质的前提下,价格较低的物流配送中心往往会被客户产生较大吸引力.物流配送中心的服务水平和沟通便利性越好对客户的吸引力越大.但是,高服务水平往往意味着高物流成本,进而导致高价格,而高价又会在一定程度上降低对客户的吸引力,因此产品价格和服务水平在引导客户选择方面存在背反关系,需要决策者在二者之间进行权衡.一般情况下,设施吸引力越大意味着其提供的客户效用越大,但距离越远则效用会越小^[4,5,8-9].为避免距离 $\rightarrow 0$ 时,效用 $\rightarrow \infty$,第 t 期客户 i 从物流配送中心 j 获得的效用 U_{ijt} 的定义如下所示:

$$U_{ijt} = x_{jt} v_{jt} \left[1 + \frac{p_{it} - p_{ijt}}{p_{it}} \right] \frac{\eta_{ijt}}{\eta_{it}} (1 + d_{ij})^{-\beta_{it}},$$

$$\forall i \in I, t \in T, j \in J_1 \cup J_4 \text{ or } j \in J_2 \cup (J_3 - J_4). \quad (1)$$

其中: x_{jt} 为0-1变量,物流配送中心 j 开放时取1,否则取0; v_{jt} 为第 t 期物流配送中心 j 的沟通便利性;

p_{it} 为第 t 期客户 i 可接受的价格上限; p_{ijt} 为第 t 期物流配送中心 j 对客户 i 的产品价格; η_{ijt} 为第 t 期物流配送中心 j 为客户 i 提供的服务水平, $0 \leq \eta_{ijt} \leq \eta_{\max}$, 数值越大则服务水平越高: 通常, 企业可能只会明确若干个不同等级的物流服务标准方案, 具体操作中可以根据实际情况灵活调整, 若以 $1, 2, \dots$ 等整数代表各标准方案的服务水平, 则以介于 2 个整数之间的取值表示实际服务水平介于 2 个不同等级的标准方案之间; η_{it} 为第 t 期客户 i 的期望服务水平; d_{ij} 为客户 i 与物流配送中心 j 之间的距离; β_{it} 为第 t 期客户 i 的距离敏感参数, $\beta_{it} > 0$. 在式 (1) 中, 当 $j \in J_1 \cup J_4$ 时, 客户效用的提供者为企业; 当 $j \in J_2 \cup (J_3 - J_4)$ 时, 客户效用的提供者为消费者。

客户 i 第 t 期获得的总效用为

$$U_{it} = \sum_{j \in J_1 \cup J_2 \cup J_3} U_{ijt}. \quad (2)$$

2.2.2 物流成本

通常, 在没有较大技术进步的情况下, 物流成本将随着服务水平的提高而提高, 二者呈非线性关系, 且受“收益递减法则”的支配: 当服务处于低水平阶段, 追加成本 ΔX , 服务水平即可上升 ΔY ; 如果处于高水平阶段, 同样追加 ΔX , 服务水平上升 $\Delta Y'$, 且 $\Delta Y > \Delta Y'$, 如图 1 所示^[14].

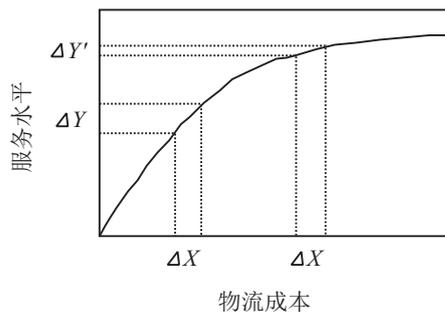


图 1 服务水平与物流成本的关系

本文用下式描述物流成本与服务水平之间的关系:

$$c_{ijt} = e^{1/(1-k_{vt}\eta_{ijt}/\eta_{\max})} - e. \quad (3)$$

其中: c_{ijt} 为第 t 期物流配送中心 j 为客户 i 提供单位产品时的物流成本; k_{vt} 为第 t 期向第 v 类客户提供产品时的成本系数, v 为客户类型, 若不对客户进行区分, 则 k_{vt} 表示向所有客户提供产品的平均成本系数 ($v = 1$), $0 < k_{vt} \leq 1$.

2.3 双层规划模型

根据以上分析建立上层模型如下:

$$\max Z_1 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_1 \cup J_4} S_{it} \frac{U_{ijt}}{U_{it}} (p_{ijt} - l_{jt} - c_{ijt}); \quad (4)$$

$$\max Z_2 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I_2} \sum_{j \in J_1 \cup J_4} S_{it} \frac{U_{ijt}}{U_{it}}. \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \eta_{ijt} \geq \min\{\eta_{qjt}\}_{q \in I_2},$$

$$\forall i \in I_1, j \in J_1 \cup J_4, t \in T; \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{i \in I_2} \sum_{j \in J_1 \cup J_4} S_{it} \frac{U_{ijt}}{U_{it}} (p_{ijt} - l_{jt} - c_{ijt}) \geq R; \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{j \in J_1 \cup J_4} [g_{jt}(x_{jt} - x_{jt-1})x_{jt} - f_{jt}(1 - x_{jt})x_{jt-1}] \leq B_1; \quad (8)$$

$$d_{\max} \geq \left\lceil \frac{\eta_{ijt}}{\eta_{\max}} \right\rceil d_{ij}, \forall i \in I, j \in J_1 \cup J_4, t \in T; \quad (9)$$

$$\eta_{ijt} \leq x_{jt} \eta_{\max}, \forall i \in I, j \in J_1 \cup J_4, t \in T; \quad (10)$$

$$\begin{cases} p_{it} \geq p_{ijt} \geq l_{jt} + c_{ijt}, \eta_{ijt} > 0; \\ p_{ijt} = 0, \eta_{ijt} = 0; \end{cases}$$

$$\forall i \in I, j \in J_1 \cup J_4, t \in T; \quad (11)$$

$$0 \leq \eta_{ijt} \leq \eta_{\max}, \forall i \in I, j \in J_1 \cup J_4, t \in T; \quad (12)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\}, \forall j \in J_1 \cup J_4, t \in T. \quad (13)$$

其中: U_{ijt}, U_{it}, c_{ijt} 如式 (1)~(3) 所示; S_{it} 为客户 i 第 t 期的需求量; R 为企业针对战略客户的盈利要求; g_{jt} 为第 t 期新建物流配送中心 j 的成本; f_{jt} 为第 t 期关停物流配送中心 j 的收益; B_1 为企业投资总额; d_{\max} 为最大配送半径; l_{jt} 为第 t 期物流配送中心 j 的产品到货价格. 目标函数 (4) 和约束 (6) 表示对 VIP 客户的目标为适当服务水平下的利润最大化; 目标函数 (5) 表示对战略和潜力客户的目标为销售量最大化; 约束 (7) 为企业对战略客户的利润要求; 约束 (8) 为企业投资限制; 约束 (9) 为最大配送半径限制, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号; 约束 (10)~(13) 为变量取值限制.

若竞争者不对客户进行区分, 则下层优化模型如下:

$$\max Z_3 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_2 \cup (J_3 - J_4)} S_{it} \frac{U_{ijt}}{U_{it}} (p_{ijt} - l_{jt} - c_{ijt}). \quad (14)$$

$$\text{s.t. } \sum_{t \in T} \sum_{j \in J_2 \cup (J_3 - J_4)} [g_{jt}(x_{jt} - x_{jt-1})x_{jt} - f_{jt}(1 - x_{jt})x_{jt-1}] \leq B_2; \quad (15)$$

$$d_{\max} \geq \left\lceil \frac{\eta_{ijt}}{\eta_{\max}} \right\rceil d_{ij}, \forall i \in I, j \in J_2 \cup (J_3 - J_4), t \in T; \quad (16)$$

$$\eta_{ijt} \leq x_{jt} \eta_{\max}, \forall i \in I, j \in J_2 \cup (J_3 - J_4), t \in T; \quad (17)$$

$$\begin{cases} p_{it} \geq p_{ijt} \geq l_{jt} + c_{ijt}, \eta_{ijt} > 0; \\ p_{ijt} = 0, \eta_{ijt} = 0; \end{cases}$$

$$\forall i \in I, j \in J_2 \cup (J_3 - J_4), t \in T; \quad (18)$$

$$0 \leq \eta_{ijt} \leq \eta_{\max},$$

$$\forall i \in I, j \in J_2 \cup (J_3 - J_4), t \in T; \quad (19)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\}, \forall j \in J_2 \cup (J_3 - J_4), t \in T. \quad (20)$$

其中: B_2 为竞争者投资总额, 目标函数 (14) 表示竞争者的优化目标为利润最大化, 其余约束的含义与上层模型类似.

3 双层规划模型求解算法

一般而言, 双层规划问题的求解非常复杂, 即使是很简单的双层线性规划问题也是 NP-hard 问题, 不存在多项式求解算法, 双层规划的非凸性也是造成其求解异常复杂的原因^[15]. 在上述双层规划模型中, 上、下层决策变量相互依赖, 但很难得出决策变量间的关系式, 故采用双层迭代法进行计算, 其基本思路是首先求解单层优化问题, 然后在上、下层规划间反复迭代以逐渐逼近问题的最优解^[16-17]. 下面给出具体步骤.

Step 1 令迭代次数 $n = 1$.

Step 2 将下层模型的当前最优解代入上层模型中, 计算出上层模型的 Pareto 最优解和目标函数值 $[F_{Z_1}^n, F_{Z_2}^n]$.

上层模型是多目标优化, 将其转化为最小化问题并采用带精英策略的快速非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 求解. NSGA-II 最突出的特点是采用快速非支配排序和排挤机制, 前者驱使搜索过程收敛到 Pareto 最优前沿, 后者保证了 Pareto 最优解的多样性. NSGA-II 得到的非劣解在目标空间分布均匀且收敛性和鲁棒性好^[18], 但传统 NSGA-II 的交叉算子搜索性能较弱, 为提高算法的搜索能力和进化效率, 本文在初始种群生成、交叉和变异算子上做出改进, 具体如下:

1) 初始种群生成. x_{jt} 采用二进制编码, p_{ijt} 和 η_{ijt} 采用实数编码, 染色体共分为 3 段, 排列顺序为 $p_{ijt}-\eta_{ijt}-x_{jt}$. 因各变量间有较强的关联性, 为提高初始种群的质量, 按照以下次序生成初始个体: ① 生成 x_{jt} . η_{ijt} 虽有理论最大值, 但受价格限制不一定能达到 η_{\max} , 而 p_{ijt} 的最小值则要根据 η_{ijt} 的实际值进行计算, 因此先根据式 (3) 和 (11) 计算出 η_{ijt} 的实际最大值. ② 根据式 (6)、(9)、(10) 和 (12) 随机产生 η_{ijt} . ③ 根据 η_{ijt} 、式 (3) 和 (11) 计算出 p_{ijt} 的实际最小值并随机产生 p_{ijt} . ④ 计算个体的目标函数值并检验其是否符合式 (7) 和 (8) 的要求, 若不满足则将其淘汰, 直至生成 N 个合格个体.

2) 交叉算子. 考虑到变量间的强相关性, 对随机选择的 2 个父代个体进行分段处理: 首先在二进制编

码段选择交叉位, 在该段染色体中, 交叉点前的基因保持不变, 交叉点后的基因互换; 接着找出该交叉位在 p_{ijt} 和 η_{ijt} 段编码中对应的交叉位, 各段染色体内的基因分别进行交叉; 然后再对实数编码部分进行算术交叉, 若父代分别为 u_1 和 u_2 , r 为 0 到 1 间的随机数, 则算术交叉后 $u_{子代} = 0.5[(1 \pm r)u_1 + (1 \mp r)u_2]$; 最后, 按式 (6)、(9)~(13) 调整不符合要求的基因位的值, 计算目标函数值并检查个体是否满足式 (7) 和 (8), 若不满足, 则令目标函数值为 0.

3) 变异. 随机选择父本, 若变异位在二进制编码部分, 则进行突变操作; 若变异位在实数编码部分, 则 $u_{子代} = u_{父代} \pm [(2r)^{1/(\rho+1)} - 1]$, 其中 ρ 根据计算精度设置, 加减随机进行. 按式 (6)、(9)~(13) 调整不符合要求的基因位的值并计算目标函数值, 若个体不满足式 (7) 和 (8) 的要求, 则令其目标函数值为 0.

4) 选择运算、快速非支配排序、虚拟适应度计算和精英保留策略参见文献^[18].

Step 3 将上层模型当前最优解代入下层模型, 计算出下层模型的最优解和目标函数值 $F_{Z_3}^n$. 下层模型遗传算法为: 将其转化为最小化问题并以目标函数作为适应度函数, 采用轮盘赌选择算子, 初始种群生成、交叉和变异操作与上层模型类似.

Step 4 令 $n = n + 1$, 重复 Step 2 和 Step 3, 直至 $\max\{\mu_1, \mu_2\} \leq \varepsilon$ 时停止. 其中: ε 为求解精度, $\mu_1 = |(F_{Z_1}^n - F_{Z_1}^{n-1})/F_{Z_1}^{n-1}|$, $\mu_2 = |(F_{Z_2}^n - F_{Z_2}^{n-1})/F_{Z_2}^{n-1}|$.

4 数值仿真

企业和竞争者当前各有 1 个物流配送中心, 有 4 个备选地点, 客户数为 10, 规划期为 2, 在 1 万 km^2 的区域内随机产生客户和物流配送中心的坐标. 客户坐标为 (21, 84)、(81, 25)、(45, 68)、(93, 38)、(47, 83)、(42, 50)、(85, 51)、(53, 43)、(20, 30)、(67, 19). 规划期 1, 客户 1~客户 3 为 VIP 客户, 客户 4 和客户 5 为战略客户, 客户 6~客户 10 为潜力客户; 规划期 2, 客户 1~客户 3 为 VIP 客户, 客户 4~客户 8 为战略客户, 客户 9 和客户 10 为潜力客户. VIP 客户的距离敏感参数为 2, 战略客户为 1, 潜力客户为 0.5; VIP 客户和战略客户的预期服务水平为 3.5, 潜力客户为 3. 企业和竞争者原有物流配送中心坐标分别为 (50, 66) 和 (19, 70), 沟通便利性分别为 0.9 和 0.8, 到货价格均为 120 元, 关停的收益均为 2 百万元, 关闭后重建的成本均为 8 百万元. 备选地点坐标为 (30, 50), (70, 45), (62, 29), (82, 40); 沟通便利性分别为 0.7, 0.9, 0.8, 1; 到货价格分别为 120, 110, 120, 110 元; 新建的成本分别为 800, 800, 900, 700 万元, 关停的收益均为 300 万元. 物流配送中心与客户间的距离采用欧氏距离, 企业和竞争者的投资总额均为 1 500 万元, 企业对战略客户的利润要求为 140 万元, η_{\max} 为 5, 企业为 VIP 客

户、战略客户和潜力客户提供产品的成本系数分别为 0.78、0.8 和 0.95, 竞争者的成本系数为 0.8, 最大送货距离为 50 km, 其余参数见表 1.

表 1 客户需求 and 价格上限 (周期 1/周期 2)

| 客户 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| S_{it} /千单位 | 10/8 | 15/14 | 16/16 | 15/16 | 9/9 |
| p_{it} /元 | 167/169 | 160/165 | 169/169 | 165/166 | 169/169 |
| 客户 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| S_{it} /千单位 | 3/9 | 4/9 | 4/7 | 1.8/2 | 2/4 |
| p_{it} /元 | 175/172 | 180/176 | 175/170 | 180/180 | 185/185 |

采用 Matlab 7.0 编程, 在 CPU Intel (R) Core(TM)2 Duo 2.8 GHz、内存 2 G 的电脑上进行计算, 参数设定为: 上、下层模型的种群数量均为 500, 进化代数为 300, 交叉概率为 0.7, 变异概率为 0.3, ρ 为 20, ϵ 为 2%. 通过迭代计算, 得到上层模型最优目标函数值分别为 184.93 万元和 5.50 万单位, 下层模型最优目标函数值为 363.98 万元. 在规划期内, 企业和竞争者原有物流配送中心均维持开放, 并将分别在备选地点 2 和 4 新建物流配送中心, 其余决策变量最优值见表 2 和表 3. 上层模型解空间的分布、下层模型目标函数值的变化

如图 2 和图 3 所示.

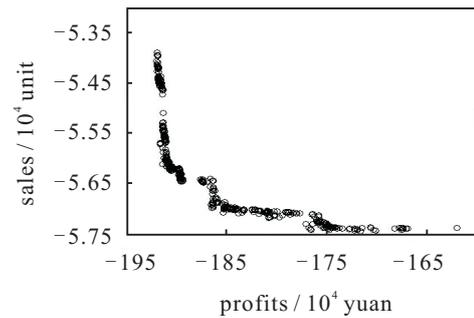


图 2 上层模型解空间的分布

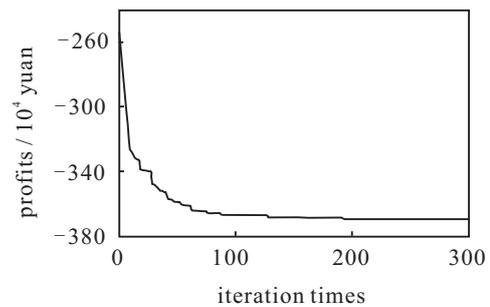


图 3 下层模型解的变化

表 2 企业的服务水平和价格 (周期 1/周期 2)

| 客户 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 原有 | 服务水平 | 3.38/3.70 | 0/0 | 3.45/3.60 | 0/0 | 3.43/3.16 |
| | 价格 | 167/169 | 0/0 | 169/169 | 0/0 | 154/151 |
| 备选地点 2 | 服务水平 | 0/0 | 3.62/2.72 | 4.12/3.88 | 4.4/4.34 | 0/2.12 |
| | 价格 | 0/0 | 159/165 | 168/169 | 162/156 | 0/169 |
| 客户 | | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 原有 | 服务水平 | 2.80/2.82 | 2.55/4.33 | 1.58/3.95 | 2.45/3.80 | 0/0 |
| | 价格 | 167/176 | 129/165 | 139/160 | 130/177 | 0/0 |
| 备选地点 2 | 服务水平 | 1.49/4.14 | 3.58/3.65 | 3.41/2.07 | 0/0 | 3.79/3.77 |
| | 价格 | 142/154 | 148/172 | 173/169 | 0/0 | 185/157 |

表 3 竞争者的服务水平和价格 (周期 1/周期 2)

| 客户 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 原有 | 服务水平 | 3.29/1.52 | 0/0 | 3.61/3.35 | 0/0 | 3.29/3.02 |
| | 价格 | 167/169 | 0/0 | 169/167 | 0/0 | 165/168 |
| 备选地点 4 | 服务水平 | 0/0 | 3.25/2.73 | 3.96/3.09 | 3.01/3.75 | 0/0 |
| | 价格 | 0/0 | 158/164 | 168/169 | 164/166 | 0/0 |
| 客户 | | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 原有 | 服务水平 | 2.22/2.52 | 0/0 | 2.64/2.74 | 4.20/3.02 | 0/0 |
| | 价格 | 172/164 | 0/0 | 173/170 | 177/179 | 0/0 |
| 备选地点 4 | 服务水平 | 2.59/1.69 | 3.67/2.77 | 4.40/3.24 | 0/0 | 2.00/2.52 |
| | 价格 | 172/172 | 180/174 | 173/166 | 0/0 | 171/185 |

通过对决策数据进一步分析可知: 企业总利润和总销量分别为 352.43 万元和 9.67 万单位, 分别占比 49.19% 和 55.66%; 竞争者总利润和总销量分别为 363.98 万元和 7.71 万单位, 分别占比 50.81% 和 44.34%. 企业仅以利润 1.62% 的微弱劣势获得了市场份额 11.32% 的优势. 总体来看, 企业尽可能以较高的服务水平和较低的价格为客户提供产品, 以便在满意

的利润水平下获得更多的市场份额, 这有利于提高客户对企业的满意度, 也有利于企业伴随着客户的成长和客户关系的发展而获取更多收益.

为比较算法的优劣, 采用 Lingo 编程计算上述算例, 得到局部最优解如下: 上层模型目标函数值分别为 157.51 万元和 4.56 万单位, 下层模型目标函数值为 450.85 万元. 限于篇幅, 价格和服务水平的决策值略.

对决策数据进一步计算可得企业总利润和总销量分别为 297.91 万元和 7.92 万单位, 竞争者的总销量为 9.46 万单位. 与前述算法相比, Lingo 计算出的企业总利润和总销量的下降幅度均较大, 这表明对企业而言, 以 NSGA-II 为基础的遗传迭代算法更优.

5 结 论

本文考虑产品价格、服务水平、沟通便利性和距离对客户效用的影响以及服务水平与产品价格间的关系, 建立了动态竞争环境下的多周期物流配送中心双层规划模型. 该模型的特点在于: 1) 基于客户重要性建立动态竞争环境下的企业物流配送中心优化模型, 有利于企业根据竞争和客户差异对其物流配送中心进行优化, 也有助于企业平衡在利润和市场份额上的目标; 2) 将服务水平、物流成本、产品价格的相互作用引入到决策中, 有利于决策者平衡产品价格和服务水平.

需要指出的是, 在动态竞争环境下以客户为起点对物流配送中心进行优化仅是企业物流系统优化的一部分, 将这种思想向上扩展并结合物流系统面临的高度不确定性对其进行整体优化是下一阶段的主要工作.

参考文献(References)

- [1] Hotelling H. Stability in competition[J]. *The Economic J*, 1929, 39(153): 41-57.
- [2] Huff D L. Defining and estimating a trade area[J]. *J of Marketing*, 1964, 28(3): 34-38.
- [3] Huff D L. A programmed solution for approximating an optimum retail location[J]. *Land Economics*, 1966, 42(3): 293-303.
- [4] Aboolian R, Berman O, Krass D. Competitive facility location model with concave demand[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 181(2): 598-619.
- [5] Aboolian R, Berman O, Krass D. Competitive facility location and design problem[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 182(1): 40-62.
- [6] Mcgarvey R G, Cavalier T M. Constrained location of competitive facilities in the plane[J]. *Computers & Operations Research*, 2005, 32(2): 359-378.
- [7] Beresnev V L. Upper bounds for objective functions of discrete competitive facility location problems[J]. *J of Applied and Industrial Mathematics*, 2009, 3(4): 419-432.
- [8] Küçükaydin H, Aras N, Altinel I K. Competitive facility location problem with attractiveness adjustment of the follower: A bilevel programming model and its solution[J]. *European J of Operational Research*, 2011, 208(3): 206-220.
- [9] Küçükaydin H, Aras N, Altinel I K. A leader-follower game in competitive facility location[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(2): 437-448.
- [10] Ashtiani M G, Makui A, Ramezani R. A robust model for a leader-follower competitive facility location problem in a discrete space[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(1/2): 62-71.
- [11] 孙会君, 高自友. 一类有竞争的物流配送中心选址模型[J]. *交通运输工程学报*, 2002, 2(4): 54-57.
(Sun H J, Gao Z Y. Competitive location model of logistics distribution center[J]. *J of Traffic and Transportation Engineering*, 2002, 2(4): 54-57.)
- [12] 段刚, 陈莉, 李引珍, 等. 物流配送中心选址双层规划模型与算法[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(1): 126-129.
(Duan G, Chen L, Li Y Z, et al. Bi-level programming model and algorithm on location of logistics distribution center[J]. *J of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(1): 126-129.)
- [13] Rezapour S, Farahani R Z, Drezner T. Strategic design of competing supply chain networks for inelastic demand[J]. *J of the Operational Research Society*, 2011, 62(10): 1784-1795.
- [14] 李伊松, 易华. 物流成本管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
(Li Y S, Yi H. Logistics cost management[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.)
- [15] Ben-Ayed O, Boyce D E, Blair C E. A general bi-level linear programming formulation of the network design problem[J]. *Transportation Research*, 1988, 22(4): 311-318.
- [16] 孙会君, 高自友. 供应链分销系统双层优化模型[J]. *管理科学学报*, 2003, 3(6): 68-70.
(Sun H J, Gao Z Y. Bi-level optimization model for distribution system of supply chain[J]. *J of Management Sciences in China*, 2003, 3(6): 68-70.)
- [17] 王旭, 葛显龙, 林云. 供应商选择的双层规划模型及求解分析[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(23): 11-14.
(Wang X, Ge X L, Lin Y. Bi-level programming model and solutions analysis for supplier selection[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(23): 11-14.)
- [18] 冯士刚, 艾芊. 带精英策略的快速非支配排序遗传算法在多目标无功优化中的应用[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(12): 146-151.
(Feng S G, Ai Q. Application of fast and elitist non-dominated sorting generic algorithm in multi-objective reactive power optimization[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(12): 146-151.)

(责任编辑: 闫 妍)