文章编号:1003－207(2011)05－0050－08

闭环供应链网络设施竞争选址模型研究

杨玉香[1],周根贵[2]

(1.中国计量学院经济与管理学院,浙江 杭州　310018;
2.浙江工业大学经贸管理学院,浙江 杭州　310032)

摘　要:如何把握市场竞争趋势的变化,充分了解行业竞争状况,为企业新建设施选择具有竞争优势与发展前景的位置,是企业进入新市场要解决的首要问题。考虑一个大型企业计划开设一定数量的制造/再制造工厂和销售/回收中心以进入一个区域市场,在此市场上已存在若干同类设施的情况下,通过分析新进企业与这个区域内现有企业构成一主多从 Stackelberg 主从对策问题,将均衡模型捕捉的由新进企业引起的网络均衡态的变化引入位置决策过程,建立设施竞争选址模型决策在竞争环境中使新进企业利润最大化的位置,以及产品生产量、各层设施间的产品交易量和产品价格等决策。针对模型的特点,提出了遗传算法与 QPADM 算法相结合的求解策略,最后利用提出的模型和求解算法对算例进行计算与分析。

关键词:闭环供应链网络;设施竞争;均衡模型

中图分类号:F224　　文献标识码:A

1　引言

设施选址问题是企业重要的长期战略决策之一,设施位置的合理与否直接影响着服务方式、服务质量、服务效率、服务成本等因素,进而会影响到企业获得的利润,同时也会决定企业的市场竞争力。随着环保意识的增强和环境立法的加强,基于废旧产品的回收、处理以及资源化利用问题发展起来的闭环供应链管理问题正成为学术界关注的焦点。而合理规划闭环供应链网络设施位置是闭环供应链管理的重要问题之一,是提高网络运作绩效的前提条件和基础,有助于解决日益严重的资源短缺和环境污染等诸多社会问题。对基于闭环供应链网络的设施选址问题已有大量的研究。Zhou 等(2006)[1]通过使用 Monto Carlo 模拟技术求解在需求和回收产品数量不确定条件下的非线性混合整数规划模型,以确定分销中心与回收中心的选址与流量分配,以及回收中心与回收点之间的指派问题。代颖等(2006)[2]提出多产品、有能力限制的 MILP 模型优化设计再制造闭环物流网络。Sahyouni 等(2007)[3]研究了确定环境下的网络设计问题。Lee 和 Dong(2008)[4]研究了计算机回收闭环网络的选址-分配问题。Easwaran 和 üster(2009)[5]考虑有限容量多产品闭环供应链,建立 MILP 模型决策回收中心和再制造设施的最优位置,并提出整合禁忌搜索算法和 Bender 分割的 Bender 分解求解方法。狄卫民(2009)[6]等基于制造/再制造集成闭环网络建立了反应资金时间价值的多周期、有能力限制的混合整数非线性规划模型,确定制造/再制造混合系统中不同周期的各种物流设施的运营位置、数量及相应的物流量分配。

以上研究选址问题,在作位置决策时多是考虑成本的最小化,即使包括运输成本、生产成本等总成本最小的位置为最优的位置。而且假设在作出位置决策前,该地区尚无同类的服务设施存在,市场上不存在竞争对手。显然,这与实际问题有一定的差距。事实上,新进企业的新设施进入这个区域市场前,市场通常已有若干个竞争对手存在,新企业的进入必然与原有的企业竞争市场份额,且商品的价格是由市场供需决定的,在新企业进入这个行业之前,这个行业的商品供求是均衡的,已达到了均衡状态,因而新企业进入之后必将打破原有的均衡,形成新的市场均衡价格、产品交易量和产品生产量,达到新的均衡状态。这时新进企业往往更关心的是其新设施进

收稿日期:2009－11－11;修订日期:2011－07－04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071142,71071146);浙江省高校人文社科重点研究基地——标准化与知识产权管理资助项目
作者简介:杨玉香(1979－),女(汉族),吉林松原人,中国计量学院经济与管理学院讲师,博士,研究方向:供应链管理、逆向物流.

入这个区域后,能否在与竞争对手的竞争中立于不败之地,能使企业获得竞争优势的位置决策才是企业最需要的。

对于竞争设施选址问题的研究,Tobin 和 Friesz(1986)[7]提出了古诺-纳什寡占模型决策生产设施的位置和生产水平。Friesz 等(1989)[8]和 Miller 等(1992)[9]进一步推广了上面的模型,新进企业不仅决定生产水平和位置还包括运输模式,并给出基于灵敏度分析的混合算法。但这些模型潜在的均衡问题都只是空间价格均衡,且只考虑产品的单向流,即研究的是产品的正向流。

因此,本文进一步扩展了 Miller 等人的竞争选址模型,研究了包括制造/再制造工厂、销售/回收中心和需求市场的多层闭环供应链网络,研究了基于新进企业与其竞争者构成一主多从对策问题,首先建立潜在选址决策内的设施与市场原有设施形成的潜在网络均衡模型,由此捕捉市场均衡态的变化,在此基础上,建立设施竞争选址模型。然后给出遗传算法与 QPADM 算法相结合的设施竞争选址模型求解算法,最后通过实例进行了计算及分析。

2　闭环供应链网络设施竞争选址模型

2.1　问题描述

设某一区域市场内现有闭环供应链网络是由制造/再制造工厂、销售/回收中心和需求市场组成的三层网络,第一层由 $I(i=1,2\cdots I)$个生产同质无差异产品的制造/再制造工厂构成,考虑回收、制造/再制造一种产品,且再制造产品与新产品不做区别,生产的产品由第二层 $J(j=1,2\cdots J)$个销售中心销往第三层 $K(k=1,2\cdots K)$个不同需求市场的顾客,需求市场可通过不同的地理位置或消费群体的特征加以区分,各个消费区域的废旧产品通过回收中心进行回收处理,回收的产品可再制造的部分运往工厂进行再制造,其余部分进行废弃处理。

现有一个大型企业要进入这个区域市场,准备在 R 个备选地址中选择 H 个地址建立制造/再制造工厂,在 T 个备选地址中选择 M 个地址建立销售/回收中心。假设新进企业足够大以至于可以影响市场价格,新企业的进入引起市场供给的增加,与其竞争者竞争市场份额,进而导致网络均衡态的变化,因而为使选址模型在位置决策过程中能够捕捉到这种变化,并将其影响引入位置决策中,本文研究新进企业与潜在新网络成员构成的一主多从 Stackelberg 对策问题。首先建立均衡模型研究从方潜在新网络中非合作竞争关系的各决策者的竞争行为,在此基础上,建立设施竞争选址模型,将均衡模型作为主方选址模型的约束条件之一,即将均衡约束捕捉的网络均衡态的变化引入位置决策过程。

引入下列符号,决策变量:W_i 为 $0-1$ 变量,$i \in \{I+1,\cdots I+R\}$,表示备选地址 i 是否建立工厂,0 表示不选,1 表示选中;S_j 为 $0-1$ 变量,$j \in \{J+1,\cdots J+T\}$,表示备选地址 j 是否建立销售/回收中心,0 表示不选,1 表示选中;q_i^{NEW} 为工厂 i 生产新产品数量,所有工厂新产品数量组成向量 q^{NEW};q_{ij}^N 为工厂 i 与销售/回收中心 j 间产品(新产品和再制造产品)总交易量,所有交易量组成列向量 Q^1;q_{ji}^R 为工厂 i 与回收中心 j 间废旧产品交易量,所有交易量组成列向量 Q^2;q_{jk}^N 为销售中心 j 与需求市场 k 间产品交易量,所有交易量组成列向量 Q^3;q_{kj}^R 为回收中心 j 与需求市场 k 间废旧产品交易量,所有交易量组成列向量 Q^4;ρ_{ij}^N 为工厂 i 对售往销售中心 j 单位产品索价;ρ_{ji}^R 为回收中心 j 对工厂 i 单位废旧产品索价;ρ_{jk}^N 为销售中心 j 对需求市场 k 单位产品索价;ρ_{kj}^R 为回收中心 j 从需求市场 k 回收单位废旧产品价格;ρ_{5k}^N 为需求市场 k 单位产品需求价格,K 个需求市场的需求价格构成 K 维列向量 ρ_5^N。相关参数:TR_i 为开设工厂 i 固定成本,$i \in \{I+1,\cdots I+R\}$;TT_j 为开设销售/回收中心 j 固定成本,$j \in \{J+1,\cdots J+T\}$;f_i^N 为工厂 i 制造新产品成本函数,且 $f_i^N = f_i^N(q^{NEW})$;f_i^R 为工厂 i 生产再制造产品成本函数,且 $f_i^R = f_i^R(Q^2)$;c_{ij}^N 为由工厂 i 与销售中心 j 交易产品引起的交易成本,$c_{ij}^N = c_{ij}^N(q_{ij}^N)$;$c_{ji}^R$ 为由工厂 i 与回收中心 j 交易废旧产品引起的交易成本,$c_{ji}^R = c_{ji}^R(q_{ji}^R)$;$f_j^N$ 为销售中心 j 产品处理成本,$f_j^N = f_j^N(Q^1)$;$\hat{c}_{ij}^N$ 为由销售中心 j 与工厂 i 交易产品引起的交易成本,$\hat{c}_{ij}^N = \hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^N)$;$\hat{c}_{ji}^R$ 为由回收中心 j 与工厂 i 交易废旧产品引起的交易成本,$\hat{c}_{ji}^R = \hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^R)$;$c_{jk}^N$ 为由销售中心 j 与需求市场 k 交易产品引起的交易成本,$c_{jk}^N = c_{jk}^N(q_{jk}^N)$;$c_{kj}^R$ 为由回收中心 j 与需求市场 k 交易废旧产品引起的交易成本,$c_{kj}^R = c_{kj}^R(q_{kj}^R)$;$\hat{c}_{jk}^N$ 为由需求市场 k 与销售中心交易产品引起的交易成本,$\hat{c}_{jk}^N = \hat{c}_{jk}^N(q_{jk}^N)$;$\hat{c}_{kj}^R$ 为由需求市场 k 与回收中心 j 交易废旧产品引起的交易成本,$\hat{c}_{kj}^R = \hat{c}_{kj}^R(q_{kj}^R)$;$\pi_k$ 为消费者偏好函数,$\pi_k = \pi_k(Q^4)$;f_j^R 为回收中心 j 处理成本,$f_j^R =$

$f_j^R(Q^4)$；d_k 为需求市场 k 的需求，$d_k = d_k(\rho_5^N)$；b 为单位废旧产品废弃处理成本；β 为废旧产品再制造比率。

2.2 潜在闭环供应链网络均衡分析

利用均衡理论和变分不等式研究工具分析潜在选址决策内的设施与原有设施形成的潜在新网络中各层决策者的竞争行为及其相互作用，给出系统达到均衡的条件，建立潜在闭环供应链网络均衡模型。

工厂 i 总成本包括产品制造/再制造成本、交易成本与购买可再制造废旧产品费用之和，其收入为产品销售所得。设 ρ_{ij}^{N*} 和 ρ_{ji}^{R*} 分别表示内生变量 ρ_{ij}^N 和 ρ_{ji}^R 的均衡值。则工厂 i 利润最大化的优化模型为：

$$\max \sum_{j\in\Phi(S)} \rho_{ij}^{N*} q_{ij}^N - f_i^N(q^{NEW}) - f_i^R(Q^2) - \sum_{j\in\Phi(S)} c_{ij}^N(q_{ij}^N) - \sum_{j\in\Phi(S)} c_{ji}^R(q_{ji}^R) - \sum_{j\in\Phi(S)} \rho_{ji}^{R*} q_{ji}^R \tag{1}$$

$$s.t.\ \sum_{j\in\Phi(S)} q_{ij}^N \leqslant q_i^{NEW} + \sum_{j\in\Phi(S)} q_{ji}^R \tag{2}$$

$$q_i^{NEW}, q_{ij}^N, q_{ji}^R \geqslant 0, \forall j \in \Phi(S) \tag{3}$$

目标式(1)为工厂 i 的利润；式(2)表示产品交易量不大于生产量；式(3)为变量非负约束。其中 $\Phi(S) = \{1\cdots J\} \cup \Pi(S)$，且 $\Pi(S) = \{j \mid S_j = 1, j = J+1, \cdots J+T\}$，即分别对应 $S_j = 1$ 的 M 个分销/回收中心。

假设上述各项成本函数都为连续可微凸函数，且各工厂间为非合作竞争关系，根据 Nash 均衡概念，所有工厂同时达到最优的条件可表示成如下变分不等式[10]，求解 $(q^{NEW*}, Q^{1*}, Q^{2*}) \in K^1$，使其满足：

$$\begin{aligned}&\sum_{i\in\Omega(W)} \left[\frac{\partial f_i^N(q^{NEW*})}{\partial q_i^{NEW}}\right] \times \left[q_i^{NEW} - q_i^{NEW*}\right] \\ &+ \sum_{i\in\Omega(W)} \sum_{j\in\Phi(S)} \left[\frac{\partial c_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N} - \rho_{ij}^{N*}\right] \times \left[q_{ij}^N - q_{ij}^{N*}\right] \\ &+ \sum_{i\in\Omega(W)} \sum_{j\in\Phi(S)} \left[\frac{\partial c_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R} + \rho_{ji}^{R*} + \frac{\partial f_i^R(Q^{2*})}{\partial q_{ji}^R}\right] \\ &\times \left[q_{ji}^R - q_{ji}^{R*}\right] \geqslant 0, \\ &\forall (q^{NEW}, Q^1, Q^2) \in K^1 \equiv \{(q^{NEW}, Q^1, Q^2) \in \mathbf{R}_+^{2(I+H)(J+M)+I+H} \text{ 且满足约束(2)}\}\end{aligned} \tag{4}$$

其中 $\Omega(W) = \{1\cdots I\} \cup \Gamma(W)$，且 $\Gamma(W) = \{i \mid W_i = 1, i = I+1, \cdots I+R\}$，即分别对应 $W_i = 1$ 的 H 个分销/回收中心。

销售/回收中心作为网络中间层，既要与上层进行交易也要与下层进行交易。设 ρ_{jk}^{N*} 和 ρ_{kj}^{R*} 分别表示 ρ_{jk}^N 和 ρ_{kj}^R 的均衡值。每一销售/回收中心 j 以利润最大化为目标，因而其优化模型为：

$$\begin{aligned}&\max \sum_{k\in\Psi} \rho_{jk}^{N*} q_{jk}^N + \sum_{i\in\Omega(W)} \rho_{ji}^{R*} q_{ji}^R - \sum_{i\in\Omega(W)} \rho_{ij}^{N*} q_{ij}^N \\ &- \sum_{i\in\Omega(W)} \hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^N) - \sum_{k\in\Psi} c_{jk}^N(q_{jk}^N) - f_j^N(Q^1) - \sum_{k\in\Psi} \rho_{kj}^{R*} q_{kj}^R \\ &- \sum_{i\in\Omega(W)} \hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^R) - \sum_{k\in\Psi} c_{kj}^R(q_{kj}^R) - b(1-\beta) \sum_{k\in\Psi} q_{kj}^R \\ &- f_j^R(Q^4)\end{aligned} \tag{5}$$

$$s.t.\ \sum_{k\in\Psi} q_{jk}^N \leqslant \sum_{i\in\Omega(W)} q_{ij}^N \tag{6}$$

$$\sum_{i\in\Omega(W)} q_{ji}^R \leqslant \beta \sum_{k\in\Psi} q_{kj}^R \tag{7}$$

$$q_{ij}^N, q_{ji}^R, q_{jk}^N, q_{kj}^R \geqslant 0, \forall i \in \Omega(W), k \in \Psi \tag{8}$$

目标式(5)为销售/回收中心 j 的利润，式(6)和(7)分别表示各节点产品输出量不大于产品输入量，式(8)为变量非负约束。其中 $\Psi = \{1\cdots K\}$。

假设上述各项成本函数均为连续可微凸函数，所有销售/回收中心同时达到最优的条件可表示成如下变分不等式，求解 $(Q^{1*}, Q^{2*}, Q^{3*}, Q^{4*}) \in K^2$，满足：

$$\begin{aligned}&\sum_{j\in\Phi(S)} \sum_{i\in\Omega(W)} \left[\rho_{ij}^{N*} + \frac{\partial \hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N} + \frac{\partial f_j^N(Q^{1*})}{\partial q_{ij}^N}\right] \times \\ &\left[q_{ij}^N - q_{ij}^{N*}\right] \\ &+ \sum_{j\in\Phi(S)} \sum_{k\in\Psi} \left[\frac{\partial c_{jk}^N(q_{jk}^{N*})}{\partial q_{jk}^N} - \rho_{jk}^{N*}\right] \times \left[q_{jk}^N - q_{jk}^{N*}\right] \\ &+ \sum_{j\in\Phi(S)} \sum_{i\in\Omega(W)} \left[\frac{\partial \hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R} - \rho_{ji}^{R*}\right] \times \left[q_{ji}^R - q_{ji}^{R*}\right] \\ &+ \sum_{j\in\Phi(S)} \sum_{k\in\Psi} \left[\rho_{kj}^{R*} + \frac{\partial c_{kj}^R(q_{kj}^{R*})}{\partial q_{kj}^R} + b(1-\beta) + \frac{\partial f_j^R(Q^{4*})}{\partial q_{kj}^R}\right] \\ &\times \left[q_{kj}^R - q_{kj}^{R*}\right] \geqslant 0, \\ &\forall (Q^1, Q^2, Q^3, Q^4) \in K^2, \\ &K^2 \equiv \{(Q^1, Q^2, Q^3, Q^4) \in \mathbf{R}_+^{2(I+H)(J+M)+2(J+M)K} \text{ 且满足约束(6)(7)}\}\end{aligned} \tag{9}$$

设 α 为需求市场废旧产品的最高回收率，则从需求市场 k 废旧产品总回收量的约束为：

$$\sum_{j\in\Phi(S)} q_{kj}^R \leqslant \alpha \sum_{j\in\Phi(S)} q_{jk}^N \tag{10}$$

需求市场 k 的空间价格均衡条件[11]，可表示为：

$$\rho_{jk}^{N*} + \hat{c}_{jk}^N(q_{jk}^{N*}) \begin{cases} = \rho_{5k}^{N*}, \text{若 } q_{jk}^{N*} > 0 \\ \geqslant \rho_{5k}^{N*}, \text{若 } q_{jk}^{N*} = 0 \end{cases} \tag{11}$$

$$d_k(\rho_5^{N*}) \begin{cases} = \sum_{j\in\Phi(S)} q_{jk}^{N*}, \text{若 } \rho_{5k}^{N*} > 0 \\ \leqslant \sum_{j\in\Phi(S)} q_{jk}^{N*}, \text{若 } \rho_{5k}^{N*} = 0 \end{cases} \tag{12}$$

$$\pi_k(Q^{4*}) + \hat{c}_{kj}^R(q_{kj}^{R*}) \begin{cases} = \rho_{kj}^{R*}, \text{若 } q_{kj}^{R*} > 0 \\ \geqslant \rho_{kj}^{R*}, \text{若 } q_{kj}^{R*} = 0 \end{cases} \tag{13}$$

式(11)表示均衡状态下，如果需求市场 k 消费

者会从销售中心 j 处购买产品,那么销售中心的产品价格和交易成本之和不会超过消费者愿意支付的价格;式(12)表示若需求市场 k 消费者愿意支付的均衡价格是正的,则需求市场 k 需求等于从销售中心总购买量;式(13)指出若能从需求市场 k 消费者回收废旧产品,则消费者偏好加上交易成本不会超过回收中心愿意支付价格。

均衡状态下,对于每个需求市场,式(10)－(13)都必须满足,这些条件可表示为如下的变分不等式问题,求解 $(Q^{2*},Q^{4*},\rho_5^{N*})\in K^3$,满足:

$$\sum_{k\in\Psi}\sum_{j\in\Phi(S)}[\rho_{jk}^{N*}+\hat{c}_{jk}^{N}(q_{jk}^{N*})-\rho_{5k}^{N*}]\times[q_{jk}^{N}-q_{jk}^{N*}]+\sum_{k\in\Psi}[\sum_{j\in\Phi(S)}q_{jk}^{N*}-d_k(\rho_5^{N*})]\times[\rho_{5k}^{N}-\rho_{5k}^{N*}]+\sum_{k\in\Psi}\sum_{j\in\Phi(S)}[\pi_k(Q^{4*})+\hat{c}_{kj}^{R}(q_{kj}^{R*})-\rho_{kj}^{R*}]\times[q_{kj}^{R}-q_{kj}^{R*}]\geqslant 0,$$

$\forall(Q^2,Q^4,\rho_5)\in K^3,K^3\equiv\{(Q^2,Q^4,\rho_5)\in \mathbf{R}_+^{2(J+M)K+K}$ 且满足约束(10)$\}$。　(14)

定义 1:潜在闭环供应链网络系统均衡条件就是不同层决策者间的产品流量是一致的,且产品流量和价格满足最优条件(4)、(9)和(14)的和。

定理 1　潜在闭环供应链网络系统均衡条件下的最优解等价于求解 $(q^{NEW*},Q^{1*},Q^{2*},Q^{3*},Q^{4*},\rho_5^{N*})\in K^{\circ}$,满足式(15):

$$\sum_{i\in\Omega(W)}[\frac{\partial f_i^N(q^{NEW*})}{\partial q_i^{NEW}}]\times[q_i^{NEW}-q_i^{NEW*}]+\sum_{i\in\Omega(W)}\sum_{j\in\Phi(S)}[\frac{\partial c_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}+\frac{\partial\hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}+\frac{\partial f_j^N(Q^{1*})}{\partial q_{ij}^N}]\times[q_{ij}^N-q_{ij}^{N*}]+\sum_{i\in\Omega(W)}\sum_{j\in\Phi(S)}[\frac{\partial c_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R}+\frac{\partial f_i^R(Q^{2*})}{\partial q_{ji}^R}+\frac{\partial\hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R}]\times[q_{ji}^R-q_{ji}^{R*}]+\sum_{j\in\Phi(S)}\sum_{k\in\Psi}[\frac{\partial c_{jk}^N(q_{jk}^{N*})}{\partial q_{jk}^N}+\hat{c}_{jk}^N(q_{jk}^{N*})-\rho_{5k}^{N*}]\times[q_{jk}^N-q_{jk}^{N*}]+\sum_{j\in\Phi(S)}\sum_{k\in\Psi}[\frac{\partial c_{kj}^R(q_{kj}^{R*})}{\partial q_{kj}^R}+b(1-\beta)+\frac{\partial f_j^R(Q^{4*})}{\partial q_{kj}^R}+\pi_k(Q^{4*})+\hat{c}_{kj}^R(q_{kj}^{R*})]\times[q_{kj}^R-q_{kj}^{R*}]+\sum_{k\in\Psi}[\sum_{j\in\Phi(S)}q_{jk}^{N*}-d_k(\rho_5^{N*})]\times[\rho_{5k}^N-\rho_{5k}^{N*}]\geqslant 0,$$

$\forall(q^{NEW},Q^1,Q^2,Q^3,Q^4,\rho_5^N)\in K^{\circ}$,

$K^{\circ}\equiv\{(q^{NEW},Q^1,Q^2,Q^3,Q^4,\rho_5^N)$

$\in \mathbf{R}_+^{2(I+H)+2(I+H)(J+M)+2(J+M)K+K}$

且满足约束(2)(6)(7)(10)$\}$。　(15)

证明:将式(4)、(9)和(14)相加简单处理即得,证明略。

对于模型中价格内生变量 ρ_{ij}^N、ρ_{ji}^R、ρ_{jk}^N 和 ρ_{kj}^R,可利用前文中的变分不等式求解其均衡值 ρ_{ij}^{N*}、ρ_{ji}^{R*}、ρ_{jk}^{N*} 和 ρ_{kj}^{R*} [12]:

若 $q_{ij}^{N*}>0$,由式(4):$\rho_{ij}^{N*}=\frac{\partial c_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}+\lambda_{1i}^*$,或等价地,由式(9):$\rho_{ij}^{N*}=\lambda_{2j}^*-\frac{\partial\hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^{N*})}{\partial q_{ij}^N}-\frac{\partial f_j^N(Q^1)}{\partial q_{ij}^N}$;若 $q_{ji}^{R*}>0$,由式(4):$\rho_{ji}^{R*}=\lambda_{1i}^*-\frac{\partial f_i^R(Q^{2*})}{\partial q_{ji}^R}-\frac{\partial c_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R}$,或由式(9) $\rho_{ji}^{R*}=\frac{\partial\hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^{R*})}{\partial q_{ji}^R}+\lambda_{3j}^*$;若 $q_{jk}^{N*}>0$,由式(9)有:$\rho_{jk}^{N*}=\frac{\partial c_{jk}^N(q_{jk}^{N*})}{\partial q_{jk}^N}+\lambda_{2j}^*$ 或由式(14) $\rho_{jk}^{N*}=\rho_{5k}^{N*}+\lambda_{4k}^*\alpha-\hat{c}_{jk}^N(q_{jk}^{N*})$。若 $q_{kj}^{R*}>0$,由式(9)有:$\rho_{kj}^{R*}=\beta\lambda_{3j}^*-\frac{\partial c_{kj}^R(q_{kj}^{R*})}{\partial q_{kj}^R}-b(1-\beta)-\frac{\partial f_j^R(Q^4)}{\partial q_{kj}^R}$,或由式(14) $\rho_{kj}^{R*}=\pi_k(Q^4)+\hat{c}_{kj}^R(q_{kj}^{R*})+\lambda_{4k}^*$. 上述式中 $\lambda_1=(\lambda_{11}\ \ \lambda_{12}\ \cdots\ \lambda_{1(I+H)})^T,\lambda_2=(\lambda_{21}\ \ \lambda_{22}\ \cdots\ \lambda_{2(J+M)})^T,\lambda_3=(\lambda_{31}\ \ \lambda_{32}\ \cdots\ \lambda_{3(J+M)})^T,\lambda_4=(\lambda_{41}\ \ \lambda_{42}\ \cdots\ \lambda_{4K})^T$ 构成向量 $\lambda=(\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4)^T\in \mathbf{R}_+^{(I+H)+2(J+M)+K}$,且 $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4$ 分别为约束(2)(6)(7)和(10)的 Lagrangian 乘子。

变分不等式(15)可以通过如下标准变分不等式形式表示:求解 $u^*=(x^*,y^*)^T\in K^{\circ}$,使得

$[f(x^*),x-x^*]\geqslant 0,[g(y^*),y-y^*]\geqslant 0,\forall u=(x\ \ y)^T\in K^{\circ}$　(16)

其中 $x=(q^{NEW},Q^1,Q^2)^T,y=(Q^3,Q^4,\rho_5^N)^T$,

$F(u)\equiv(f(x),\ \ g(y))^T=(F_{1i},F_{2ij},F_{3ij},F_{4jk},F_{5jk},F_{6k})^T_{\forall i,j,k.}$。

$F(u)$ 各个分量分别为(15)式中各乘号前面部分构成的函数,符号〈·,·〉表示 N 维欧式空间的内积。约束(2)(6)(7)和(10)可表示成下列矩阵形式:

$$Ax+By\leqslant b \tag{17}$$

设:$M_1=(1,1\cdots1)_{J+N},M_2=(1,1\cdots1)_K,M_3=(-\beta,-\beta\cdots-\beta)_K$

$$N_1=\begin{bmatrix}M_1&0&\cdots&0\\0&M_1&\cdots&0\\0&0&\cdots&0\\0&0&\cdots&M_1\end{bmatrix}_{(I+H)\times(I+H)(J+M)}$$

$$N_2 = \begin{bmatrix} M_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_2 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & M_2 \end{bmatrix}_{(J+M)\times(J+M)K}$$

$$N_3 = \begin{bmatrix} M_3 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M_3 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & M_3 \end{bmatrix}_{(J+M)\times(J+M)K}$$

$$N_4 = \begin{bmatrix} -E_{J+M} \\ -E_{J+M} \\ \vdots \\ -E_{J+M} \end{bmatrix}^T_{(J+M)\times(I+H)(J+M)}$$

$$N_5 = \begin{bmatrix} E_K \\ E_K \\ \vdots \\ E_K \end{bmatrix}^T_{K\times(J+M)K}$$

则 $A =$

$$\begin{bmatrix} -E_{I+H} & N_1 & -N_1 \\ 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & -N_4 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(I+H+2(J+M)+K)\times((I+H)+2(I+H)(J+M))}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ N_2 & 0 & 0 \\ 0 & N_3 & 0 \\ -\alpha N_5 & N_5 & 0 \end{bmatrix}_{(I+H+2(J+M)+K)\times(2(J+M)K+K)}$$

且 b 为 $I+H+2(J+M)+K$ 维零列向量，E_{I+H}，E_{J+M} 和 E_K 分别表示 $(I+H)\times(I+H)$，$(J+M)\times(J+M)$ 和 $K\times K$ 维单位阵。

2.3 设施竞争选址模型

设施竞争选址问题是空间经济、运筹学等领域主流研究课题之一。设施竞争选址问题研究的是在市场上已存在若干个同类设施的情况下，如何在竞争环境中决策使新进企业利润最大化的位置，以及设施间的产品交易量和交易价格的决策。

在上文潜在网络均衡模型的基础上，给出闭环供应链网络设施竞争选址模型，通过均衡约束(19)捕捉潜在位置决策下网络均衡态的变化。模型表述如下：

$$\max TP = \sum_{j\in\Pi(S)}\{\sum_{i\in\Omega(W)}(\rho_{ji}^R q_{ji}^R - \rho_{ij}^N q_{ij}^N) + \sum_{k\in\Psi}(\rho_{jk}^N q_{jk}^N - \rho_{kj}^R q_{kj}^R) - \sum_{i\in\Omega(W)}[\hat{c}_{ij}^N(q_{ij}^N) + \hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^R)] - f_j^N(Q^1) - f_j^R(Q^4) - \sum_{k\in\Psi}[c_{jk}^N(q_{jk}^N) + c_{kj}^R(q_{kj}^R) + b(1-\beta)q_{kj}^R]\} + \sum_{i\in\Gamma(W)}\{\sum_{j\in\Phi(S)}(\rho_{ij}^N q_{ij}^N - \rho_{ji}^R q_{ji}^R) - f_i^N(q^{NEW}) - f_i^R(Q^2) - \sum_{j\in\Phi(S)}[c_{ij}^N(q_{ij}^N) + c_{ji}^R(q_{ji}^R)]\} - \sum_{i\in\Gamma(W)} W_i TR_i - \sum_{j\in\Pi(S)} S_j TT_j \quad (18)$$

s. t.

$$[f(x^*), x-x^*] \geq 0, [g(y^*), y-y^*] \geq 0$$
$$\forall u = (x \quad y)^T \in K^\circ \quad (19)$$

$$\sum_{i\in\Gamma(W)} W_i = H \quad (20)$$

$$\sum_{j\in\Pi(S)} S_j = M \quad (21)$$

$$W_i, S_j = 0 \text{ 或 } 1 \quad (22)$$

目标(18)是新进企业总利润，式(19)为均衡约束，式(20)和(21)分别为工厂和销售/回收中心的数量约束，式(22)是 0－1 约束。

3 模型求解算法

均衡模型得到的变分不等式问题(16)的求解方法有很多，其中 Korpelevich(1977)[13]提出了外梯度方法是最简单的一种，但它的收敛性要求映射 Lipschitz 连续。随后 Khobotov(1989)[14]扩展了外梯度法，提出了 Korpelevich-Khobotov 法。此外，一个典型方法就是邻近点算法(the proximal point algorithm，PPA)[15]，这个方法在理论上具有良好的收敛性，但实际计算是相当困难的，甚至不可求解。近来，为了使 PPA 法更一般化，Auslender(1999)[16]引进了 LQP(logarithmic quadratic proximal method)法，这个方法仍然是理论上较完善，并未提出如何计算。对于大规模问题，交替方向法(alternating direction methods，ADM)[17]是行之有效的方法，这个方法降低了子问题的维数，但是求解难易度与原问题等价。He 等(2002)[18]提出了新的交替方向法，对 ADM 方法进行了改进，新方法只需近似求解，并允许罚参数随着迭代而逐渐变化。为了提高算法的计算效率与实用性，2007 年，Xu(2001)[19]提出了一个更普遍的二次临近交替方向法(quadratic proximal alternating directions method，QPADM)。本文应用 QPADM 算法求解变分不等式(16)，算法实现如下：

步骤 1　设置参数 $\gamma = 1.2 \in (0, \frac{1+\sqrt{5}}{2})$，$\varepsilon = 10^{-8} > 0$，迭代次数 $e = 0$，$\omega^0 = (x^0, y^0, \lambda^0)^T \in \mathbf{R}_+^{(I+H)+2(I+H)(J+M)} \times R_+^{2(J+M)K+K} \times R_+^{(I+H)+2(J+M)+K}$。

步骤 2　固定 x^e，y^e 和 λ^e，计算下列变分不等式

的解，得到 $x^{e+1} \in \mathbf{R}_{+}^{(I+H)+2(I+H)(J+M)}$。

$$(x'-x)^T\{f_e(x)+R(x-x^e)\} \geqslant 0,$$

$$f_e(x)=f(x)-A^T[\lambda^e-L(Ax+By^e-b)]。$$

其中 R、L 为正定阵，且 R 为对角阵。

步骤 3　固定 x^{e+1}，y^e 和 λ^e，计算下列变分不等式的解，得到 $y^{e+1} \in \mathbf{R}_{+}^{2(J+M)K+K}$。

$$(y'-y)^T\{g_e(y)+S(y-y^e)\} \geqslant 0,$$

$$g_e(y)=g(y)-B^T[\lambda^e-L(Ax^{e+1}+By-b)]。$$

其中 S 为正定阵，且为对角阵。

步骤 4　设 $\lambda^{e+1}=\lambda^e-\gamma L(Ax^{e+1}+By^{e+1}-b)$。

步骤 5　检查收敛性，若 $\|\omega^e-\omega^{e+1}\|_\infty<\varepsilon$，则停止；否则，设 $e=e+1$，返回步骤 2。

针对设施竞争选址模型的特点，利用 QPADM 算法与遗传算法相结合的混合算法进行求解。具体步骤如下：

第一步：初始化。置代计数器 gen＝1，设置最大遗传代数 Maxgen。首先进行编码，整个编码向量为 R＋T 位，前 R 位表示是否建立制造/再制造工厂，后 T 位表示是否建立销售/回收中心，编码时每位在{0，1}中选取，且考虑其满足式(20)和(21)的限制，产生包含 Pop_size 个染色体的初始种群。

第二步：对每个染色体，利用 QPADM 算法计算网络间产品生产量、交易量和价格，然后根据求得结果计算每个染色体目标函数值作为其适应度。

第三步：对染色体进行遗传操作。选择：使用轮盘赌算法选择新种群。交叉：采用单点交叉策略，将种群中染色体两两随机配对，然后随机选择一基因位作为交叉点，依一定的交叉概率互换交叉点后面部分染色体。同时要检验每一个后代的可行性，即编码提到的限制，如果都是可行的，则用其代替其父代，否则保留其中可行的，重新进行交叉操作，直到得到两个可行的后代或循环指定次数止。变异：采用两点变异，依一定的变异率选择一个染色体作为父代，随机选择两个变异位进行变异操作，同时要考虑染色体的可行限制。

第四步：重复第二、三步至指定的循环次数，从种群中选择最优的个体及其对应的网络间生产量、交易量和价格作为模型的最优结果。

4　算例

设现有的供应链网络结构包括 2 个制造/再制造工厂，2 个销售/回收中心和 10 个需求区域。新进企业在 3 个备选地点选择 1 个地点建立制造/再制造工厂，在 5 个备选地点选择 3 个地点建立销售/回收中心。在 3 个备选地点建立工厂的固定成本均为 100，在 5 个备选地点建立销售/回收中心的固定成本均为 60。

各项函数及参数如下：

$f_i^N(q^{NEW})=2(q_i^{NEW})^2+0.2(I+R+1-i)q_i^{NEW}+0.1\prod_i q_i^{NEW}$，$\forall i$；

$f_i^R(Q^2)=1.5(\sum_j q_{ji}^R)^2+0.1i\sum_j q_{ji}^R+0.1\prod_i\sum_j q_{ji}^R$，$\forall i$；

$c_{ij}^N(q_{ij}^N)=0.1(q_{ij}^N)^2+(i+j)q_{ij}^N$，$\forall i,j$；$\hat{c}_{ji}^R(q_{ji}^R)=0.5(q_{ji}^R)^2+0.1(i+j)q_{ji}^R$，$\forall i,j$；

$c_{jk}^N(q_{jk}^N)=q_{jk}^N+3$，$\forall j,k$；$\hat{c}_{kj}^R(q_{kj}^R)=q_{kj}^R+2$，$\forall j,k$；

$f_j^N(Q^1)=\sum_i q_{ij}^N)^2+0.1(J+T+1-j)\sum_i q_{ij}^N$，$\forall j$；$f_j^R(Q^4)=0.1\sum_k q_{kj}^R)^2+0.1j\sum_k q_{kj}^R$，$\forall j$。

需求函数为：$d_k(\rho_5^N)=-2\rho_{5k}^N-\sum_{h\neq k}\rho_{5h}^N+3000$，$\forall k$，偏好函数为：$\pi_k(Q^4)=0.5\sum_j\sum_k q_{jk}^R+8$。其余交易成本为零，单位废旧产品的废弃处理成本为 $b=0.6$。

新企业进入前，原有网络均衡状态可由 QPADM 算法求出，编写基于 Matlab 的应用程序，运行网络均衡模型，结果如表 1 所示。由表 1 可知，随着回收率与再制造率的提高，两个工厂新产品的生产量逐渐减少，销售/回收中心废旧产品的回收量逐渐增加。由于回收量与再制造率的提高，回收的废旧产品给销售/回收中心带来的利润逐步增加。

表 1　新企业进入前网络均衡结果

均衡值		$\alpha=0.1$ $\beta=0.2$	$\alpha=0.1$ $\beta=0.5$	$\alpha=0.5$ $\beta=0.5$
新产品生产量	制造/再制造工厂 1	43.24	42.56	39.75
	制造/再制造工厂 2	43.04	42.37	39.56
总生产量	制造/再制造工厂 1	44.28	46.02	53.14
	制造/再制造工厂 2	43.76	45.49	52.61
回收量	销售/回收中心 1	4.59	4.75	26.61
	销售/回收中心 2	4.21	4.40	26.26
利润	制造/再制造工厂 1	3838.30	3910.30	3570.30
	制造/再制造工厂 2	3802.00	3872.30	3523.70
	销售/回收中心 1	1929.00	2086.80	2903.40
	销售/回收中心 2	1890.90	2047.00	2855.00

新企业进入后，表 1 的均衡状态势必被打破。编写了基于 Matlab 的混合算法应用程序，模型参数设置如下：种群规模取 100，进化代数取 50，交叉率

为 0.8，变异率为 0.1。运行设施竞争选址模型，得到的选址决策为：选择备选地址 1 建设制造/再制造工厂，选择备选地址 3、4 和 5 建立销售/回收中心。新企业进入之后，形成新的均衡状态，新网络均衡结果如表 2 所示。

表 2　新企业进入后新网络均衡结果

均衡值		$\alpha=0.1$ $\beta=0.2$	$\alpha=0.1$ $\beta=0.5$	$\alpha=0.5$ $\beta=0.5$
新产品生产量	制造/再制造工厂 1	32.48	32.99	33.20
	制造/再制造工厂 2	31.67	32.15	32.35
	制造/再制造工厂 3	30.68	31.09	31.27
总生产量	制造/再制造工厂 1	33.49	35.06	44.49
	制造/再制造工厂 2	32.32	33.84	43.11
	制造/再制造工厂 3	30.96	32.40	41.48
回收量	销售/回收中心 1	3.16	3.28	14.16
	销售/回收中心 2	2.78	2.89	13.77
	销售/回收中心 3	1.63	1.71	12.60
	销售/回收中心 4	1.25	1.32	12.20
	销售/回收中心 5	0.87	0.93	11.81
利润	制造/再制造工厂 1	2005.60	2074.50	2234.10
	制造/再制造工厂 2	1903.90	1965.40	2113.20
	销售/回收中心 1	372.23	410.48	731.76
	销售/回收中心 2	353.71	391.07	704.15
	新进企业总利润	2732.10	2908.50	3970.30

由表 2 可知，新企业的进入，由于竞争的加剧，原有 2 个工厂的新产品生产量与产品总生产量都发生了明显的减少，由此也带来了巨大的利润下滑。同时原有的销售/回收中心废旧产品回收量也明显减少，原有的销售/回收中心所获得的利润也明显下降。

5　结语

本文建立了闭环供应链网络设施竞争选址模型，分析了新进企业与市场现有企业形成的 Stackelberg 对策问题，利用潜在均衡模型分析由新企业进入引起的均衡态的变化，并将其引入选址决策过程。提出了遗传算法与 QPADM 算法相结合的混合算法求解设施竞争选址模型。最后通过实例计算了新企业进入前的网络均衡值，并对新企业进入后的网络均衡态和选址决策进行了计算及分析。进一步的研究可以考虑多准则决策问题。

参考文献：

[1] Zhou, G. G., Cao, Z. Y., Qi, F. Q., Cao, J.. A genetic algorithm approach on a logistics distribution system with uncertain demand and product return [J]. World Journal of Modeling and Simulation, 2006, 2(2): 99－108.

[2] 代颖，马祖军，刘飞. 再制造闭环物流网络优化设计模型[J]. 中国机械工程，2006，17(8)：809－814.

[3] Sahyouni, K, Savaskan, R. C., Daskin, M. S.. A facility location model for bidirectional flows[J]. Transportation Science, 2007, 41(4):484－499.

[4] Lee, D. H., Dong, M.. A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery[J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(3): 455－474.

[5] Easwaran, G., üster, H.. Tabu search and benders decomposition approaches for a capacitated closed-loop supply chain network design problem[J]. Transportation Science, 2009, 43(3):301－320.

[6] 狄卫民，马祖军，胡培. 制造/再制造物流网络优化设计的多周期规划方法[J]. 西南交通大学学报，2009，44(1)：122－127.

[7] Tobin, R. L., Friesz, T. L.. Spatial competition facility location models: definition, formulation and solution approach[J]. Annals of Operations Research, 1986, 6(3):47－74.

[8] Friesz, T. L., Tobin, R. L., Miller, T. C.. Existence theory for spatially competitive network facility location models [J]. Annals of Operations Research, 1989, 18(1):267－276.

[9] Miller, T. C., Friesz, T. L., Tobin, R. L.. Heuristic algorithms for delivered price spatially competitive network facility location problems[J]. Annals of Operations Research, 1992, 34(1):177－202.

[10] Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., Shetty, C. M.. Nonlinear programming: Theory and algorithms[M]. New York: John Wiley &Sons, 1993.

[11] Samuelson, P. A.. Spatial price equilibrium and linear programming[J]. American Economic Review, 1952, 42(3): 283－303.

[12] Auslender, A., Teboulle, M.. Lagrangian duality and related multiplier methods for variational inequality problems[J]. SIAM Journal on Optimization, 2000,10(4): 1097－1115.

[13] Korpelevich, G. M.. The extragradient method for finding saddle points and other problems [J]. Matekon, 1977, 13(4):35－49.

[14] Khobotov, E. N.. Modification of the extragradient method for solving variational inequalities and certain optimization problems [J]. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 1989, 27(5): 120－127.

[15] Guler, O.. On the convergence of the proximal point algorithm for convex minimization[J]. SIAM Journal of Control and Optimization, 1991, 29(2): 403－419.

[16] Auslender, A., Teboulle, M., Ben-tiba, S.. A loga-

rithmic-quadratic proximal method for variational inequalities[J]. Computational Optimization and Applications, 1999, 12(1):31—40.

[17] Gabay, D., Mercier, B.. A dual algorithm for the solution of nonlinear variational problems via finite-element approximations[J]. Computers & Mathematics with Applications, 1976, 2(1):17—40.

[18] He, B. S., Liao, L. Z., Han, D. R., Yang, H.. A new inexact alternating directions method for monotone variational inequalities[J]. Mathematical Programming, 2002, 92(1):103—118.

[19] Xu, M. H.. Proximal alternating directions method for structured variational inequalities[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2007, 134(1):107—117.

Study on Location Model of Facility Competition for Closed Loop Supply Chain Network

YANG Yu-xiang[1], **ZHOU Gen-gui**[2]

(1. College of Economics and Management, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Business Administration, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To grasp the change of market competition trend, and fully acquaint industry competition situation, the most important thing for an entering enterprise to do is to choose locations which have the competitive advantage and developing prospect for the new facilities of the entering one. A large-scale enterprise will set up a number of manufacture/remanufacture firms and distribution/recycling centers and enter into a geographical market. There are already the same kinds of facilities in the market. Under the conditions, the entering enterprise and all competitors in the market form one-leader-multiple-follower Stackelberg strategies problem that is analyzed. An equilibrium model is developed to capture the change of the network equilibrium state caused by the entering one, and the change captured is led to the location decision process. A facility competition location model is build to determine location decision of these facilities to maximize the profit of the entering one under competitive condition, the amount of products produced, the amount of products transacted and the price, etc. According to characteristic of the model, a solution method integrates the genetic algorithm and QPADM method is built to solve the problem. Finally, numerical examples are solved and analyzed by using the proposed model and algorithm.

Key words: closed loop supply chain network; facility competition; equilibrium model