

# 碳交易环境下企业再制造集成物流网络优化设计

张琦, 李文惠, 王洪成

**摘要:** 再制造作为废旧产品高科技维修的产业化活动, 与新产品制造相比, 其资源利用和环境保护的优越性受到关注, 但再制造行为本身在其物流网络的循环流动中产生的环境污染及资源消耗问题被大多数现有研究所忽视, 大多数研究仅考虑了经济成本的最优化问题。基于此, 本文综合再制造集成物流网络的经济效益和环境效益, 构建了其在碳交易市场背景下的混合整数线性规划模型, 并通过再制造企业的实际算例及 Matlab 演算, 得到了实证企业再制造物流网络构建的最佳选址及最优运输路径。同时通过对单一经济效益、单一碳排放量、综合经济效益 (包括碳交易效益) 三种不同决策目标的对比, 发现企业加入碳交易市场能实现综合物流成本的最小化, 进而论证了碳交易政策对企业再制造物流网络构建具有显著影响。

**关键词:** 碳排放交易市场; 碳排放约束; 再制造物流网络; 混合整数线性规划模型

**中图分类号:** F252-39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0169(2014)05-0045-09

## 一、引言

再制造是一个资源潜力巨大、经济效益显著、环保作用突出、符合可持续发展的绿色工程和新兴产业, 也是实现制造产业可持续发展的重要技术途径。再制造作为废旧产品高科技维修的产业化活动, 完善的物流网络是实现资源循环利用的重要基础和关键, 对其进行科学的规划、设计及管理将从根本上保障再制造产业的运行效率<sup>[1][2]</sup>。

在世界气候环境不断恶化的大背景下, 各国对环境保护与可持续发展越来越重视, 碳排放约束也逐渐苛刻。我国提出到 2020 年, 单位国内生产总值的二氧化碳排放降低 50% 左右的低碳经济战略目标。自 2009 年我国首家碳排放交易所挂牌成立以来, 部分地方性碳排放交易试点平台已初步建立, 碳税的开征也已进行了前期研究工作, 我国碳政策体系正逐步得到完善。

碳排放交易市场的兴起, 让更多企业面临着碳减排的挑战, 也对再制造企业的原有发展模式提出了低碳目标的全新挑战。因此, 探讨碳交易政策对再制造企业物流网络构建的影响; 以及如何在再制造物流网络规划设计中考虑碳排放的优化目标, 从综合效益的视角权衡经济效益和环境效益之间的悖反关系是本文研究的主要问题。

## 二、文献综述

随着低碳经济改革的深入, 再制造物流网络的构建在模式、决策目标等方面的低碳趋势越来越明显。

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项基金项目“模块化制造网络的形成功因及价值创新路径研究: 基于中部产业的实证”(2011084072); 中国博士后科学基金项目“模块化制造网络的价值创新路径及治理机制研究”(2011084072)

**作者简介:** 张琦, 博士后, 中国地质大学(武汉)经济管理学院副教授(湖北武汉 430074); 李文惠, 中国地质大学(武汉)经济管理学院硕士研究生



节点设置、运输路线选择等, 从而进一步影响企业的碳排放量。碳交易中, 每个自愿参与碳交易的企业将拥有一定量的碳配额。在全球碳交易体系中, 企业获得碳配额的方式主要是通过: 免费分配、固定价格购买、拍卖三种方式。而在刚刚起步的中国碳交易市场中, 碳交易体系还在试运行中, 制度还有待完善, 目前中国企业碳配额的获得方式也主要是通过免费碳配额发放。当企业碳排放量低于碳配额时, 企业可以出售剩余碳排放权用于获取收益, 而当企业碳排放量高于碳配额时, 企业则需购买超出部分的碳排放权。此市场机制将有效调节二氧化碳为代表的温室气体排放, 即把二氧化碳排放权作为一种商品, 从而形成了二氧化碳排放权的交易。

碳交易市场中, 再制造企业原有成本结构发生变化, 会直接影响再制造网络优化决策, 这将是本文重点关注的问题。同时, 考虑到运输工具是影响碳排放量的重要因素, 而现有再制造物流网络模型涉及较少, 本文也将加以考虑。

#### 四、再制造集成物流网络混合整数线性规划模型

本模型在顾客群地点确定的条件下, 以再制造物流网络总运营成本最小为前提, 并在总成本中考虑碳交易中的经济效益, 最终确定回收中心、拆解中心、再制造中心和分销中心的数量、地点设置、流量分布及相应的碳排放量。

##### (一) 模型假设

本文做出如下假设:

此再制造集成物流网络为一个单产品、单周期的闭环供应链。

物流网络中各个设施的固定成本和运营成本、最大处理能力、各路径的单位运输成本均已知。

相同类型的设施中心运营成本相同, 如回收中心 1 和回收中心 2 的运营成本相同。

相同类型的设施中心里, 单位产品生产过程中的能源消耗量相同。

不能回收再利用的废弃产品统一放置废弃处理点, 其处理点的选址不在模型考虑范围。

消费者区域既存在可进行回收的废旧产品, 又对新再制造产品存在需求。但消费者区域作为回收对象时, 企业可有选择地对某些点进行回收, 且这些消费者区域的废旧产品能够满足回收量; 而作为需求方时, 企业则需满足所有消费者区域的需求。

##### (二) 符号、参数、决策变量

###### 1. 符号。

$i$ : 回收产品,  $i \in \{1, 2, \dots, I\}$ ;

$f$ : 回收中心可能的设定地点,  $f \in \{1, 2, \dots, F\}$ ;

$g$ : 拆解中心可能的设定地点,  $g \in \{1, 2, \dots, G\}$ ;

$m$ : 再制造中心可能的设定地点,  $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ ;

$n$ : 分销中心可能的设定地点,  $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ ;

$p$ : 确定性的消费者区域,  $p \in \{1, 2, \dots, P\}$ 。

###### 2. 参数。

$C_f, C_g, C_m, C_n$ : 回收中心  $f$ , 拆解中心  $g$ , 再制造中心  $m$ , 分销中心  $n$  的设置成本;

$DC_f, DC_g, DC_d, DC_m, DC_n$ : 回收中心  $f$ , 拆解中心  $g$ , 废弃中心  $d$ , 再制造中心  $m$ , 分销中心  $n$  的单位产品运作成本;

$CAP_{if}, CAP_{ig}, CAP_{im}, CAP_{in}$ : 各中心的最大处理能力;

$CC_i$ : 单位产品  $i$  的收购成本;

$d_p$ : 消费区域  $p$  的需求量;

$\theta$ : 回收产品的再制造率 (回收产品中符合再制造条件的产品数量)

$T$ : 单位产品/km 的运输费率,  $T = \begin{cases} t_1, & / \alpha - \beta / > z \\ t_2, & / \alpha - \beta / \leq z \end{cases}$ , 当运输距离  $/ \alpha - \beta /$  大于  $z$  时选用交通工具 1, 运

输费率为  $t_1$ ；当运输距离  $/\alpha-\beta/$  小于等于  $z$  时，选用交通工具 2，运输费率为  $t_2$ ， $z$  为设定距离；

$\mu$ ：碳排放系数；厂内消耗能源的碳排放系数为  $\mu_1$ ，厂外消耗能源的碳排放系数为  $\mu_2$ ，其中交通工具 1 的碳排放系数为  $\mu_2'$ ，交通工具 2 的碳排放系数为  $\mu_2''$ ；

$Y$ ：一个企业的碳配额；

$E$ ：每单位碳排放权交易价格；

$L_e'$ ：车辆的装载量能力；

$L_e$ ：车辆的实际装载量；

$EC$ ：能源消耗总量；其中  $EC_1$  为厂内生产过程能源消耗量， $EC_2$  为厂外运输过程能源消耗量；

$PC$ ：单位产品生产过程中的能源消耗量，各中心的单位产品生产过程中的能源消耗量分别为  $PC_f$ ， $PC_g$ ， $PC_m$ ， $PC_n$ ；

$X$ ：一个企业的实际碳排放总量；

$K_{\alpha\beta}$ ：节点  $\alpha$  到节点  $\beta$  的运输距离， $(\alpha, \beta)$  代表  $(p, f)$ 、 $(p, g)$ 、 $(f, g)$ 、 $(g, m)$ 、 $(m, n)$  或  $(n, p)$ ；

3. 决策变量。

$XJ_f$ ：0-1 变量，若在此地新建回收中心则取 1，反之取 0；

$XJ_g$ ：0-1 变量，若在此地新建拆解中心则取 1，反之取 0；

$XJ_m$ ：0-1 变量，若在此地新建再制造中心则取 1，反之取 0；

$XJ_n$ ：0-1 变量，若在此地新建分销中心则取 1，反之取 0；

$Q_{\alpha\beta}$ ：节点  $\alpha$  到节点  $\beta$  的运输量， $(\alpha, \beta)$  代表  $(p, f)$ 、 $(p, g)$ 、 $(f, g)$ 、 $(g, m)$ 、 $(m, n)$  或  $(n, p)$ 。

(三) 目标函数

以总成本最小为目标的再制造物流网络模型的成本主要由设置成本、采购成本、运作成本、运输成本构成，考虑碳交易后再制造物流网络模型则将加入相应碳交易的经济效益，其成本构成如下：

总成本 = 采购成本 + 设置成本 + 运作成本 + 运输成本 + 碳交易收支

$$\text{Min}T_1 = PC + FC + OC + TC + CM \quad (1)$$

1. 碳排放量及碳交易收支计算。

碳交易市场中，控排企业在一级市场中免费或有偿获得一定量的碳配额，当企业实际碳排放量小于碳限额，则可通过在二级市场上出售其多余的碳排放权获得收益；相反，则需在二级市场中购买其超出的碳排放量。其碳交易收支如下：

$$CM = E \times (X - Y)$$

企业碳交易的收支主要受碳限额和企业实际碳排放量所影响。而企业的实际碳排放量则是影响碳交易经济效益的关键所在。由于二氧化碳  $CO_2$  是加剧温室效应的主要来源，所以本文的碳排放仅指二氧化碳排放。而  $CO_2$  主要由能源消耗而产生，在厂外（各节点之间）主要体现为交通运输中的碳排放，在厂内（各节点）主要体现为产品生产过程中消耗的各种能源而产生的碳排放。企业实际碳排放量的计算中，根据计算精度及计算方法的不同碳排放量也会随之不同。一般情况下，我们认为二氧化碳的排放量  $X$  与能源消耗总量  $EC$ （厂内能源消耗  $EC_1$  + 厂外能源消耗  $EC_2$ ）成正比例关系，且存在能源消耗相关系数  $\mu^{[10]}$ ，则总碳排放量为：

$$X = \mu \times (EC_1 + EC_2)$$

其中， $\mu$  为能源消耗的碳排放系数。

由于能源属性差异，不同能源种类有着不同的碳排放系数。厂外运输过程中消耗的能源种类较为单一，多为汽油或柴油；而厂内生产过程中消耗的能源种类较为复杂，主要体现为燃料的燃烧以及电力、热力、蒸汽、制冷等能源消耗，能源的碳排放系数的计算将在下文实证算例的数据计算中呈现。

生产过程中的能源消耗主要与产品工艺、设备使用等综合消耗情况相关，本文生产过程中的产品能源消耗量的计算将参考单位产品的能源消耗平均值  $PC$ ，并考虑各中心的产品数量，则厂内能源消耗量  $EC_1$

计算如下:

$$EC_1 = PC_f \times \sum_{\alpha} \sum_{f \in F} Q_{\alpha f} + PC_g \times \sum_{\alpha} \sum_{g \in G} Q_{\alpha g} + PC_m \times \sum_{\alpha} \sum_{m \in M} Q_{\alpha m} + PC_n \times \sum_{\alpha} \sum_{n \in N} DC_n Q_{\alpha n}$$

运输过程中的能源消耗的影响因素根据现有研究主要可以分为: 运输距离<sup>[11]</sup>、装载量<sup>[12](P265)</sup>、道路坡度<sup>[12]</sup>、交通障碍<sup>[13](P1419)</sup>, 及其他运行条件(速度、驾驶行为等)。本文将主要考虑影响因素最大的运输距离和实际装载量, 并认为能源消耗量  $EC_2$  与运输距离  $K_{\alpha\beta}$  成正比例关系。且因为运输中车辆一旦发出则会产生固定能源消耗, 而又会随运输量的不同产生变动能源消耗, 所以又假设能源消耗量  $EC_2$  与装载量  $L_e$  成正线性相关。当运输量小于等于一辆车的装载能力  $L_e'$  时, 即一辆车便可完成运输, 则此车辆的实际装载量  $L_e$  为  $Q_{\alpha\beta}$ ; 当运输量大于一辆车的装载能力  $L_e'$  时, 则需多辆车共同完成运输, 那么前  $r-1$  辆车则为满载, 实际装载量就是最大装载能力  $L_e'$ , 第  $r$  辆车的装载量则为运输量  $Q_{\alpha\beta}$  与装载能力  $L_e'$  的余数。

$$EC_2 = \begin{cases} (a \times Q_{\alpha\beta} + b) \times K_{\alpha\beta}, Q_{\alpha\beta} \leq L_e' \\ (a \times L_e' + b) \times K_{\alpha\beta} \times \left\lceil \frac{Q_{\alpha\beta}}{L_e'} \right\rceil + (a \times Q_{\alpha\beta} \bmod L_e' + b) \times K_{\alpha\beta}, Q_{\alpha\beta} > L_e' \end{cases}$$

其中,  $a$  和  $b$  是某型号车辆能源消耗系数。

然而, 特定运输性能(运输距离等)的具体能源消耗其实首先取决于所选择的交通方式(例如公路、铁路, 或是不同排量的汽车等), 实际上交通工具对碳排放的影响是比较大的, 这也是很多现有研究所忽略的。所以本文假设存在两种交通工具可选择, 其中交通工具 1 的能源消耗排放系数为  $\mu_2'$ , 交通工具 2 的能源消耗排放系数为  $\mu_2''$ , 所以单周期再制造物流网络的碳排放量为:

$$X \left\{ \begin{aligned} &= \mu_1 \times (PC_f \times \sum_{\alpha} \sum_{f \in F} Q_{\alpha f} + PC_g \times \sum_{\alpha} \sum_{g \in G} Q_{\alpha g} + PC_m \times \sum_{\alpha} \sum_{m \in M} Q_{\alpha m} + PC_n \times \sum_{\alpha} \sum_{n \in N} DC_n Q_{\alpha n}) \\ &\quad + \mu_2' \times (a \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta} + b) \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{/\alpha-\beta' > z} K_{\alpha\beta} + \mu_2'' \times (a' \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta} + b') \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{/\alpha-\beta' \leq z} K_{\alpha\beta}, \\ &\quad Q_{\alpha\beta} \leq L_e' \\ &= \mu_1 \times (PC_f \times \sum_{\alpha} \sum_{f \in F} Q_{\alpha f} + PC_g \times \sum_{\alpha} \sum_{g \in G} Q_{\alpha g} + PC_m \times \sum_{\alpha} \sum_{m \in M} Q_{\alpha m} + PC_n \times \sum_{\alpha} \sum_{n \in N} DC_n Q_{\alpha n}) \\ &\quad + \mu_2' \times \left\{ (a \times L_e' + b) \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{/\alpha-\beta' > z} K_{\alpha\beta} \times \left[ \frac{\sum_{\alpha} \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta}}{L_e'} \right] + (a \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta} \bmod L_e' + b) \right. \\ &\quad \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{/\alpha-\beta' > z} K_{\alpha\beta} \left. \right\} + \mu_2'' \times \left\{ (a' \times L_e' + b') \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{/\alpha-\beta' \leq z} K_{\alpha\beta} \times \left[ \frac{\sum_{\alpha} \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta}}{L_e'} \right] \right. \\ &\quad \left. + (a' \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} Q_{\alpha\beta} \bmod L_e' + b') \times \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{/\alpha-\beta' \leq z} K_{\alpha\beta} \right\}, Q_{\alpha\beta} > L_e' \end{aligned} \right.$$

其中,  $a$  和  $b$  是交通工具 1 的能源消耗系数,  $a'$  和  $b'$  是交通工具 2 的能源消耗系数。

## 2. 其他成本计算。

采购成本(PC)是指回收的废旧产品的购买成本; 设置成本(FC)是指网络中各节点——回收中心、拆解中心、再制造中心、分销中心的建设成本; 运作成本(OC)是指网络中各节点内部运作所产生的费用, 如节点内部的库存持有成本、生产成本、人工成本等; 运输成本(TC)是指节点间的运输成本; 而碳交易收支(CM)则指企业在碳交易市场中的经济损益。其中, 采购成本、设置成本、运作成本和运输成本如下所示:

$$\begin{aligned} PC &= \sum_{\alpha} \sum_{f \in F} CC_f Q_{\alpha f} \\ FC &= \sum_{f \in F} C_f XJ_f + \sum_{g \in G} C_g XJ_g + \sum_{m \in M} C_m XJ_m + \sum_{n \in N} C_n XJ_n \\ OC &= \sum_{\alpha} \sum_{f \in F} DC_f Q_{\alpha f} + \sum_{\alpha} \sum_{g \in G} DC_g Q_{\alpha g} + \sum_{\alpha} \sum_{m \in M} DC_m Q_{\alpha m} + \sum_{\alpha} \sum_{n \in N} DC_n Q_{\alpha n} \\ TC &= \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{/\alpha-\beta' > z} t_1 K_{\alpha\beta} Q_{\alpha\beta} + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{/\alpha-\beta' \leq z} t_2 K_{\alpha\beta} Q_{\alpha\beta} \end{aligned}$$

## (四) 约束条件

同时, 此模型还受以下条件约束:

## 1. 流量约束。

(2)–(5)式表示单个节点输入的流量要大于等于输出的流量。其中, (2)式表示消费者区域到各回收中心的产品流动数量大于等于回收中心到拆解中心的产品流动数量; (3)式表示拆解中心的产品直接来自于回收中心和部分消费区域, 且拆解后的再制造率为  $\theta$ ; (4)式表示拆解中心到再制造中心的产品流动数量大于等于再制造中心到分销中心的产品流动数量; (5)式表示再制造中心到分销中心的产品流动数量大于等于分销中心到消费者区域的产品流动数量。

$$\sum_{p \in P} Q_{pf} \geq \sum_{f \in F} Q_{fg}, \forall g \in G \quad (2)$$

$$\theta(\sum_{f \in F} Q_{fg} + \sum_{p \in P} Q_{pg}) \geq \sum_{g \in G} Q_{gm}, \forall m \in M \quad (3)$$

$$\sum_{g \in G} Q_{gm} \geq \sum_{m \in M} Q_{mn}, \forall n \in N \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} Q_{mn} \geq \sum_{n \in N} Q_{np}, \forall p \in P \quad (5)$$

## 2. 容量约束。

(6)–(9)式表示各节点中心的物流接纳量均不超过该中心的最大容量。

$$\sum_{p \in P} Q_{pf} \leq CAP_{if} \quad (6)$$

$$\sum_{f \in F} Q_{fg} \leq CAP_{ig} \quad (7)$$

$$\sum_{g \in G} Q_{gm} \leq CAP_{im} \quad (8)$$

$$\sum_{m \in M} Q_{mn} \leq CAP_{in} \quad (9)$$

## 3. 需求约束。

(10)式表示分销中心的产品数量满足消费者需求, 由于上文流量一致的约束, 即表示整条供应链的物流流量满足消费者需求。

$$\sum_{n \in N} Q_{np} = d_p, \forall p \in P \quad (10)$$

## 4. 其他约束。

(11)式表示各物流路径上的物流量均不为负数, (12)式表述是否在此地建造回收中心、拆解中心、再制造中心、分销中心的选择, 为 0–1 变量, (13)式表示各设施中心的数量为整数, 且大于 0。

$$Q_{pf}, Q_{fg}, Q_{gm}, Q_{mn}, Q_{np}, Q_{pg} \geq 0, \forall i, p, f, g, m, n \quad (11)$$

$$XJ_f, XJ_g, XJ_m, XJ_n \in \{0, 1\}, \forall f, g, m, n \quad (12)$$

$$i, p, f, g, m, n \in N \text{ 且 } > 0 \quad (13)$$

## 五、实证算例

为延伸企业供应链链条, 深化可持续发展战略, Ws 汽车制造公司将在华中地区新成立一家发动机再制造公司, 专门从事该公司废旧发动机的回收、再制造、再流通。在成立初期, 该发动机再制造公司将以现有母公司发动机消费区为依托, 对其废旧发动机进行回收、再制造, 并再次销往现有消费区。当前, 发动机再制造公司处于物流网络构建阶段, 欲在消费者区域周边构建一个集回收中心、拆解中心、再制造中心、分销中心为一体的再制造物流网络。同时, 该再制造公司以环境保护为重要发展战略目标, 并有加入碳交易市场的意向, 所以在物流网络设计阶段网络的碳排放问题也是其考虑的重点。具体算例数据如下所示:

## (一) 算例数据

已知消费区域有 5 个分布点, 坐标分别为  $P_1(2, 5)$ ,  $P_2(3, 1)$ ,  $P_3(8, 18)$ ,  $P_4(12, 14)$ ,  $P_5(13, 9)$ ; 且需求量  $d_p$  分别为 450, 550, 200, 300, 700;

备选回收中心有 3 个, 坐标为  $F_1 (10, 20)$ ,  $F_2 (15, 18)$ ,  $F_3 (8, 27)$ ;  
 备选拆解中心有 2 个, 坐标为  $G_1 (58, 70)$ ,  $G_2 (40, 80)$ ;  
 备选再制造中心有 2 个, 坐标为  $M_1 (88, 130)$ ,  $M_2 (160, 60)$ ;  
 备选分销中心有 3 个, 坐标为  $N_1 (52, 138)$ ,  $N_2 (90, 68)$ ,  $N_3 (120, 89)$ 。

Ws 发动机再制造公司厂内的能源消耗以电能为主, 据多家发动机再制造企业用电量及产品数量统计, 可以得到各中心生产、处理单位产品的能源消耗量。同时, 再制造网络设施其他相关信息如表 1 所示。

表 1 再制造物流网络节点基础信息

节点	建设成本 (万元)	运作成本 (元/件)	最大处理能力 (件)	生产、处理单位产品的能源消耗量 (KWh/件)
消费者区域 (P)	/	/	/	/
回收中心 (F)	100	20	2 000	6
拆解中心 (G)	325	100	2 100	12
再制造中心 (M)	650	250	4 000	20
分销中心 (N)	250	30	1 800	4.8

同时, 已知单位产品  $i$  的收购成本  $CC_i$  为 500 元; 回收产品的再制造率  $\theta$  为 80%。

电能碳排放量系数的计算需要综合考虑发电厂燃料结构类型及燃料质量、密度等多方因素。根据国家发展改革委应对气候变化司 2010 年提供的数据, 我国华中区域 60 万千瓦电能范围内的碳排放量为 0.804 4 tCO<sub>2</sub>/MWh, 所以本文厂内能源消耗碳排放系数  $\mu_1$  将直接取值为 0.804 4 tCO<sub>2</sub>/MWh。

当前, Ws 发动机再制造公司主要使用装载能力为 10 吨和 5 吨的两种货车型号。当运输距离大于 20 公里时, 公司会使用 10 吨型卡车; 当运输距离在 20 公里内 (包括 20 公里) 时, 公司则会使用 5 吨型卡车。两种车型的运输费率分别为:  $t_1$  为 3.5 元每件/km,  $t_2$  为 3 元每件/km。

由于这两种车型都使用柴油, 根据 2012 年中国能源统计年鉴<sup>[14]</sup>, 每吨柴油会排放 0.591 3 吨二氧化碳, 则两种交通工具的碳排放系数  $\mu_2'$ ,  $\mu_2''$  都为 0.591 3<sup>[15](P444)</sup>。且知道两种车型具体参数 (如表 2 所示):

根据能源消耗公式:

$$EC_2 = (a \times Q_{q\phi} + b) \times K_{q\phi}$$

通过线性拟合可以得到, 10 吨型货车的能源消耗系数为:  $a = 4 \times 10^{-3}$ ,  $b = 0.215$ , 5 吨型货车的能源消耗系数为:  $a' = 6 \times 10^{-3}$ ,  $b' = 0.168$ , 其中能源消耗单位为升/(吨·公里), 装载量单位为吨。

碳排放交易中实际的碳配额是以年为单位, 但为了计算的简便则将碳配额分配到再制造物流网络的单周期配额, 设定配额为 14 000 吨。根据深圳碳交易市场目前碳排放权的成交价格, 本文设定单位量碳排放权的价格  $E$  为 80 元/吨。

(二) 算例结果

通过 matlab 软件计算 (如图 2 所示), 得到流量决策的最优取值为:  $Q_{p1f1} = 0$ ,  $Q_{p2f1} = 0$ ,  $Q_{p3f1} = 0$ ,  $Q_{p4f1} = 0$ ,  $Q_{p5f1} = 0$ ,  $Q_{p1f2} = 0$ ,  $Q_{p1f2} = 2 000$ ,  $Q_{p3f2} = 0$ ,  $Q_{p4f2} = 0$ ,  $Q_{p5f2} = 0$ ,  $Q_{p1f3} = 1 438$ ,  $Q_{p2f3} = 0$ ,  $Q_{p3f3} = 0$ ,  $Q_{p4f3} = 0$ ,  $Q_{p5f3} = 0$ ,  $Q_{p1g1} = 0$ ,  $Q_{p2g1} = 0$ ,  $Q_{p3g1} = 0$ ,  $Q_{p4g1} = 0$ ,  $Q_{p5g1} = 0$ ,  $Q_{p1g2} = 0$ ,  $Q_{p2g2} = 0$ ,  $Q_{p3g2} = 0$ ,  $Q_{p4g2} = 0$ ,  $Q_{p5g2} = 0$ ,  $Q_{f1g1} = 0$ ,  $Q_{f2g1} = 2 000$ ,  $Q_{f3g1} = 100$ ,  $Q_{f1g2} = 0$ ,  $Q_{f2g2} = 0$ ,  $Q_{f3g2} = 1 338$ ,  $Q_{g1m1} = 2 100$ ,  $Q_{g2m1} = 650$ ,  $Q_{g1m2} = 0$ ,  $Q_{g2m2} = 0$ ,  $Q_{m1n1} = 1 800$ ,  $Q_{m2n1} = 0$ ,  $Q_{m1n2} = 400$ ,  $Q_{m2n2} = 0$ ,  $Q_{m1n3} = 0$ ,  $Q_{m2n3} = 0$ ,  $Q_{n1p1} = 450$ ,  $Q_{n2p1} = 0$ ,  $Q_{n3p1} =$

表 2 10 吨和 5 吨型货车油耗参数

车型	油耗 (L/百公里)		
	满载	半载	空载
10 吨货车	25.5	23.5	21.5
5 吨货车	21.0	19.5	16.8

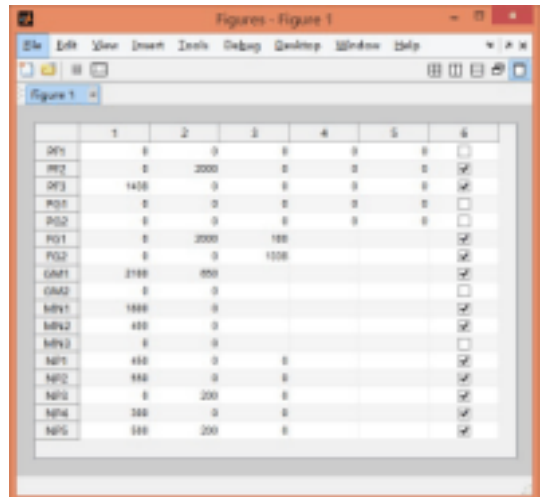


图 2 matlab 计算的流量决策最优取值

0,  $Q_{n1 p2} = 550$ ,  $Q_{n2 p2} = 0$ ,  $Q_{n3 p2} = 0$ ,  $Q_{n1 p3} = 0$ ,  $Q_{n2 p3} = 200$ ,  $Q_{n3 p3} = 0$ ,  $Q_{n1 p4} = 300$ ,  $Q_{n2 p4} = 0$ ,  $Q_{n3 p4} = 0$ ,  $Q_{n1 p5} = 500$ ,  $Q_{n2 p5} = 200$ ,  $Q_{n3 p5} = 0$ 。

10 个备选地址的最优选址决策为:  $P_1 (2, 5)$ ,  $P_2 (3, 1)$ ,  $F_2 (15, 18)$ ,  $F_3 (8, 27)$ ,  $G_1 (58, 70)$ ,  $G_2 (40, 80)$ ,  $M_1 (88, 130)$ ,  $N_1 (52, 138)$ ,  $N_2 (90, 68)$ , 最优选址决策坐标见图 3。

结果表明, 企业主要从消费区域  $P_1$  和  $P_2$  回收废旧产品, 而回收中心将设置 2 个:  $F_2, F_3$ , 拆解中心也设置 2 个:  $G_1, G_2$ , 再制造中心只设置 1 个:  $M_1$ , 分销中心设置 2 个:  $N_1, N_2$ 。

为进一步探讨不同形式的碳排放约束对选址决策、企业实际碳排放量和总成本的影响, 通过目标函数的结构调整, 可以得到表 3。

基于案例数据, 以总成本最小为目标的再制造企业是否加入碳交易市场对物流网络的选址决策和

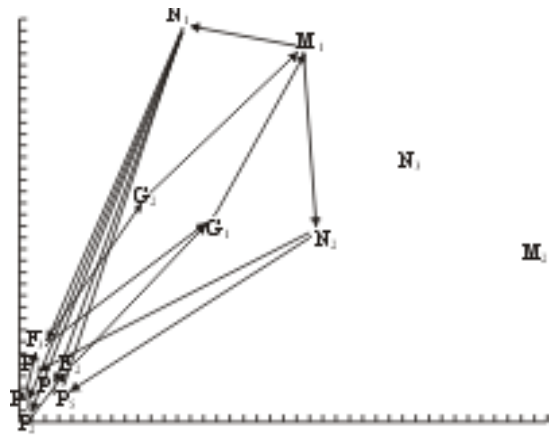


图 3 算例选址决策结果

表 3 不同碳排放约束条件影响分析

目标函数	选址决策	碳排放量 (T)	总成本 (元)
总成本最小 (加入碳交易成本)	$F_2, F_3, G_1, G_2, M_1, N_1, N_2$	12 894	25 617 325
总成本最小 (无碳约束)	$F_2, F_3, G_1, G_2, M_1, N_1, N_2$	12 894	25 714 325
碳排放量最小 (碳排放量约束)	$F_2, F_3, G_1, G_2, M_1, M_2, N_1, N_3$	12 779	32 188 325

当前的碳排放量的影响并不大, 这主要是因为相对于高额的物流网络建设成本来说, 碳交易市场的收支的数额过小, 以至于无法在物流网络的设计阶段影响其网络选址决策, 从而受选址及流量影响的碳排放量也没有变化。然而从总成本来看, 案例中企业加入碳交易市场后成本减少了 97 000 元。也就一定程度上说明, 在有效的节能减排前提下, 企业加入碳交易市场是可以增加其经济效益的。且从长期运营来看, 再制造物流网络的建设成本的影响将减少, 碳交易市场收支的重要性将加大, 从而对物流网络的产品流量产生影响; 且由于碳减排是一个长期优化的过程, 企业加入碳交易市场后也将在此优化过程中实现碳排放量的不断减少, 碳交易收益也从而增加。

然而, 相对以总成本最小 (加入碳交易成本) 为目标, 以单一碳排放量最小为目标的再制造物流网络在网络选址决策、产品流动路径和流量上都有所改变, 却只实现了碳排放量 115 吨的减排。但总成本却因此做出了较大的牺牲, 提高了 6 474 000 元。从结果来看, 单纯以碳排放量最小为目标的再制造物流网络的构建具有较大的不经济性。

因此, 权衡三种不同碳排放约束条件的结果, 从长期看, 考虑碳交易市场环境的再制造集成物流网络, 无论在碳减排还是在总成本的减少上都具有较大的优势。

## 六、结 语

本文提出了基于碳交易市场的再制造集成物流网络设计的优化模型, 并通过算例对模型进行了数值演算和验证。该模型结合物流系统实际运作管理中的优化决策过程, 为物流网络设计提供了有效的决策工具。通过该模型, 企业可以评估自身碳排放量, 预估碳减排成果及预测其在碳交易市场中的经济效益, 为企业是否加入碳交易市场的决策提供了重要参考依据。同时通过三种不同碳排放约束对比, 结果表明考虑碳交易市场环境的再制造集成物流网络相对于单一总成本最小 (无碳约束) 和单一碳排放量目标, 在碳减排和总成本减少上都具有较大优势, 因此碳交易政策对企业再制造物流网络的构建具有显著影响。

### 参考文献

- [1] 徐滨士, 马世宁, 刘世参, 等. 绿色再制造工程在军用装备中的应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2004, (1).
- [2] 徐滨士. 绿色再制造工程的发展现状和未来展望[J]. 中国工程科学, 2011, (1).
- [3] Jayaraman, V., V. D. Guide Jr., R. Srivastava. A closed loop logistics model for remanufacturing[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 1999, (5).
- [4] 顾巧论, 陈秋双. 再制造/制造系统集成物流网络扩展模型研究[J]. 信息与控制, 2004, (5).
- [5] 马祖军, 代颖, 刘飞. 再制造物流网络的稳健优化设计[J]. 系统工程, 2005, (1).
- [6] Cachon, G. *Carbon Footprint and the Management of Supply Chains*[Z]. The INFORMS Annual Meeting, San Diego, CA, 2009.
- [7] Paksoy, T., E. Özceylan, G. W. Weber. *A Multi-objective Model for Optimization of a Green Supply Chain Network*[Z]. Third Global Conference on Power Control and Optimization, 2010.
- [8] Wang, F., X. Lai, N. Shi. A multi-objective optimization for green supply chain network design[J]. *Decision Support Systems*, 2011, (2).
- [9] Wang, Y., T. Lu, C. H. Zhang. *Integrated Logistics Network Design in Hybrid Manufacturing/Remanufacturing System under Low-carbon Restriction*[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [10] 陈剑. 低碳供应链管理研究[J]. 系统管理学报, 2012, (6).
- [11] Easwarana, G., H. Usterb. A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions[J]. *IIE Transactions*, 2010, (11).
- [12] Kirby, H. R., B. Hutton, R. W. McQuaid, et al. Modeling the effects of transport policy levers on fuel efficiency and national fuel consumption[J]. *Transport Research Part D: Transport and Environment* 5, 2000, (3).
- [13] Xiao, Y., Q. Zhao, I. Kaku, Y. Xu. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2012, (7).
- [14] 中国统计局. 中国能源统计年鉴[Z]. 北京: 2012.
- [15] Tavares, G., Z. Zsigraiova, V. Semiao, M. da Grac. A case study of fuel savings through optimization of MSW transportation routes[J]. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 2008, (4).

(责任编辑 燕 祥)