

文章编号: 1000-8152(2005)06-0889-06

## 再制造/制造系统集成物流网络模糊机会约束规划模型

顾巧论<sup>1,2</sup>, 季建华<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学 安泰管理学院, 上海 200052; 2. 天津工程师范学院 计算机系, 天津 300222)

**摘要:** 在再制造/制造(R/M)系统集成物流网络中, 回收产品的数量具有不确定性. 根据这一特点, 将各消费区域废旧产品的回收数量看成是模糊参数, 提出了该集成物流网络的模糊机会约束规划模型. 通过把模型中模糊机会约束清晰化, 将模型转化为确定性的混合整数规划模型. 利用实例数据, 针对不同的置信水平对模型进行分析, 其结果为该集成物流网络的设计提供了依据.

**关键词:** 再制造; 物流网络; 模糊机会约束规划

**中图分类号:** TH16, O21 **文献标识码:** A

## Fuzzy chance-constrained programming model for the integrated logistics network of remanufacturing/manufacturing system

GU Qiao-lun<sup>1,2</sup>, JI Jian-hua<sup>1</sup>

(1. Antai School of Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200052, China;

2. Computer Department, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract:** In the integrated logistics network of remanufacturing/manufacturing(R/M) system, the quantities of recycled products are uncertain. Considering the uncertainty, a fuzzy chance-constrained programming model for the integrated logistics network of R/M system was presented by treating the quantities of recycled products as fuzzy parameters. The model was transformed into a deterministic mixed integer linear planning (MILP) model by converting fuzzy chance constraints to their respective crisp equivalents. Based on different confidence levels, the analysis was given to an application example. The results can guide the formulation of the model.

**Key words:** remanufacturing; logistics network; fuzzy chance-constrained programming

### 1 引言(Introduction)

再制造/制造系统集成物流网络不同于常规的物流网络, 其特点是<sup>[1,2]</sup>: 物流既包括传统的由制造/再制造厂→存储批发商→消费区域的正向物流, 又包括由消费区域→拆解中心→制造/再制造厂的逆向物流; 正向物流是市场需求驱动的, 而逆向物流则是一个供应驱动的物料流, 具有不确定性的特点; 整个过程是闭环的; 再生产品类型不变, 再生品和新产品共用销售网络, 其市场相同; 因为拆解中心需要专用处理设备, 所以一般初始投资额较高.

国外对再制造物流网络的研究已有很多成果<sup>[3-7]</sup>. 在文献[7]的综述部分, Fleischmann 等将再生利用网络模型的研究分为两类, 一类研究只包括从废弃市场到再加工设施的逆向物流; 另一类研究则包括从废弃市场到再加工设施, 再到重用市场的

完整物流网络. 完整的物流网络分开环和闭环两种: 开环物流网络是指废弃市场和重用市场是独立的, 闭环物流网络是指废弃市场和重用市场为同一个市场. 目前, 对闭环网络结构的研究还很少, 而且, 现有的研究成果中正向物流仅限于再生品的分配. 所有的模型除了一个为非线性规划(non-linear)模型, 一个为线性规划(LP)模型之外都是混合整数规划模型(MILP)模型, 都是确定性的. 在文献[1,2]中, 对再制造/制造系统集成物流网络进行研究. 其特点是: 闭环网络结构; 正向物流中统筹考虑再生品和新产品的物流分配. 研究给出了一个 MILP 模型, 并通过案例进行了分析, 但该模型也是确定性的.

本文将在文献[1,2]的基础上, 进一步对再制造/制造系统集成物流网络进行研究. 再制造/制造系统集成物流网络中, 回收产品的数量具有不确定性.

根据这一特点,将各消费区域废旧产品的回收量看成是模糊参数,提出了该集成物流网络的模糊机会约束规划模型.通过把模型中模糊机会约束清晰化,将模型转化为确定性的混合整数规划模型,给出了相应算法,并通过实例进行分析.

## 2 模型(Model)

在再制造/制造系统集成物流网络的结构中,再制造由原制造厂进行,再生品和新产品共用分销网络,即传统的制造设施及分销网络已存在.在此情况下,研究再制造中关键基础设施即拆解中心的选址及其物流分配模型.

在模型中做如下假设:

- 1) 制造/再制造厂的数目、位置和生产能力已知,用  $I$  表示制造/再制造厂的集合;
- 2) 负责存储批发的批发商的数目、服务范围和服务能力已知,每个批发商可从多个或所有制造厂进货,用  $J$  表示批发商的集合;
- 3) 消费区域的划分已知,每个消费区域既是废品收集源,又是新产品、再生品的市场,用  $K$  表示消费区域的集合;
- 4) 待建废旧产品拆解中心的可选场址及拆解能力已知,用  $L$  表示待建拆解中心的集合;
- 5) 焚烧填埋中心的数量、位置已知,服务能力无限,用  $M$  表示焚烧填埋中心的集合.

根据以上的假设,在文献[2]的基础上,给出如下的模糊线性规划模型,用 FLP 表示.

### 2.1 模糊线性规划模型(Fuzzy linear programming model)

$$[\text{FLP}]: \min \left\{ \sum_{l \in L} f_l^d Y_l^d + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk}^f d_k X_{ijk}^f + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk}^n d_k X_{ijk}^n + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} C_{kli}^r \bar{r}_k X_{kli}^r + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} C_{klm}^d \bar{r}_k X_{klm}^d \right\} \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijk}^f + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} X_{ijk}^n = 1, \quad \forall k \in K, \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \bar{r}_k X_{kli}^r \cong \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_k X_{ijk}^f, \quad \forall i \in I, \quad (3)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{i \in I} X_{kli}^r + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} X_{klm}^d = 1, \quad \forall k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{l \in L} \bar{r}_k X_{kli}^r \cong a_i d_k, \quad \forall k \in K, i \in I, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} a_i d_k X_{ijk}^f + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} b_j d_k X_{ijk}^n \leq e_i^m, \quad i \in I, \quad (6)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} d_k (X_{ijk}^f + X_{ijk}^n) \leq e_j^n, \quad j \in J, \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} \bar{r}_k \sum_{i \in I} X_{kli}^r + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} X_{klm}^d \leq e_l^d Y_l^d, \quad l \in L, \quad (8)$$

$$Y_l^d \in \{0, 1\}, \quad l \in L, \quad (9)$$

$$\begin{cases} 0 \leq X_{ijk}^f, X_{ijk}^n, X_{kli}^r, X_{klm}^d \leq 1, & i \in I, \\ j \in J, k \in K, l \in L, m \in M. \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$X_{ijk}^f$ : 制造厂  $i$  经批发商  $j$  利用再生品对消费区域  $k$  的需求的满足比率,  $i \in I, j \in J, k \in K$ ;

$X_{ijk}^n$ : 制造厂  $i$  经批发商  $j$  利用新产品对消费区域  $k$  的需求的满足比率,  $i \in I, j \in J, k \in K$ ;

$X_{kli}^r$ : 从消费区域  $k$  经拆解中心  $l$  到制造厂  $i$  的回收利用比率,  $k \in K, l \in L, i \in I$ ;

$X_{klm}^d$ : 从消费区域  $k$  经拆解中心  $l$  到焚烧填埋中心  $m$  的处理比率,  $k \in K, l \in L, m \in M$ ;

$Y_l^d$ : 拆解中心  $l$  的创建与否的标志量,  $l \in L$ ;

$C_{ijk}^f$ : 从制造厂  $i$  经批发商  $j$  对消费区域  $k$  的再生品单位服务费用,  $i \in I, j \in J, k \in K$ .  $C_{ijk}^f = C_i^f + C_{ij}^f D_{ij}^{fn} + C_j^{fn} + C_{jk}^f D_{jk}^{fn}$ , 其中:  $C_i^f$  为制造厂  $i$  生产再生品的单位再制造成本,  $C_{ij}^f$  为单位再生品从制造厂  $i$  到批发商  $j$  每公里的运费,  $D_{ij}^{fn}$  为制造厂  $i$  与批发商  $j$  之间的距离,  $C_j^{fn}$  为单位再生品在批发商  $j$  处的单位周期运营费用(包括存储费用、管理费用等),  $C_{jk}^f$  为单位再生品从批发商  $j$  到消费区域  $k$  每公里的运费,  $D_{jk}^{fn}$  为批发商  $j$  与消费区域  $k$  之间的距离;

$C_{ijk}^n$ : 从制造厂  $i$  经批发商  $j$  对消费区域  $k$  的新产品单位服务费用,  $i \in I, j \in J, k \in K$ .  $C_{ijk}^n = C_i^n + C_{ij}^n D_{ij}^{fn} + C_j^{fn} + C_{jk}^n D_{jk}^{fn}$ , 其中:  $C_i^n$  为制造厂  $i$  生产新产品的单位制造成本,  $C_{ij}^n$  为单位新产品从制造厂  $i$  到批发商  $j$  每公里的运费,  $C_j^{fn}$  为单位新产品在批发商  $j$  处的单位周期运营费用(包括存储费用、管理费用等),  $C_{jk}^n$  为单位新产品从批发商  $j$  到消费区域  $k$  每公里的运费;

$C_{kli}^r$ : 从消费区域  $k$  经拆解中心  $l$  到制造厂  $i$  的单位服务费用,  $k \in K, l \in L, i \in I$ .  $C_{kli}^r = CC_k^d + C_{kl}^d D_{kl}^{rd} + C_l^{rd} + C_l^{dh} + C_l^d + C_l^h + C_l^d D_{kl}^d$ , 其中:  $C_k^d$  为在消费区域  $k$  购买单位回收品的费用,  $C_{kl}^d$  为单位回收品从消费区域  $k$  到拆解中心  $l$  每公里的运费,  $C_l^{rd}$  为回收品在拆解中心  $l$  处的单位周期运营费用(包括存储费用、管理费用等),  $C_l^{dh}$  为在拆解中心  $l$  的单位拆解加工费用,  $C_l^d$  为可再制造回收品(或零部件)在拆解中心  $l$  的单位

周期运营费用(包括存储费用、管理费用等),  $C_{li}^r$  为单位可再制造回收品(或零部件)从拆解中心  $l$  到制造厂  $i$  每公里的运费,  $D_{li}^d$  为拆解中心  $l$  与制造厂  $i$  之间的距离;

$C_{klm}^d$ : 从消费区域  $k$  经拆解中心  $l$  到焚烧填埋中心  $m$  的单位处理费用,  $k \in K, l \in L, m \in M$ .  
 $C_{klm}^d = CC_k^{rd} + C_{kl}^d D_{kl}^{rd} + C_l^{rdh} + C_l^{rd} + C_l^{dh} + C_m^d D_{lm}^d + C_m^d$ , 其中:  $C_l^{dh}$  为需废弃回收品(或零部件)在拆解中心  $l$  的单位周期运营费用(包括存储费用、管理费用等),  $C_m^d$  为单位需废弃回收品(或零部件)从拆解中心  $l$  到焚烧填埋中心  $m$  每公里的运费,  $D_{lm}^d$  为拆解中心  $l$  与焚烧填埋中心  $m$  之间的距离,  $C_m^d$  为在焚烧填埋中心  $m$  单位处理费用;

$f_l^d$ : 拆解中心  $l$  的固定费用,  $l \in L$ ;

$d_k$ : 单位周期内消费区域  $k$  对产品的需求量,  $k \in K$ ;

$e_i^m$ : 单位周期内制造厂  $i$  的最大生产能力, 其中: 再生品比例为  $a_i$ , 新产品比例为  $b_i, i \in I$ ;

$e_j^w$ : 单位周期内批发商的最大服务能力,  $j \in J$ ;

$e_l^d$ : 单位周期内拆解中心  $l$  的最大拆解能力,  $l \in L$ .

$\bar{r}_k$ : 单位周期内消费区域  $k$  中废旧产品的模糊回收量,  $k \in K$ .

目标函数式(1)为整个过程的最小费用. 约束条件(2)表示各消费区域的需求要满足, 约束条件(3)~(5)表示物流平衡, 式(6)~(8)表示生产、服务和拆解能力约束, 式(9)表示拆解中心是否创建, 式(10)表示变量的取值范围.

由于存在模糊参数, 使目标函数(1)和约束条件(3)(5)(8)没有明确的意义. 在 Liu 和 Iwamura 工作的基础上<sup>[8,9]</sup>, 将模型 FLP 进一步表示成如下的模糊机会约束规划模型(用 FCCP 表示).

## 2.2 模糊机会约束规划模型(Fuzzy chance-constrained programming model)

$$[\text{FCCP}]: \min \bar{f} \quad (11)$$

s. t.

$$\text{Pos}\left\{\left[h_0(X_{jk}^f, X_{jk}^n) + \sum_{k \in K} \bar{r}_k \left(\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} C_{kli}^r X_{kli}^r + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} C_{klm}^d X_{klm}^d\right)\right] \leq \bar{f}\right\} \geq \alpha_1, \quad (12)$$

$$\text{Pos}\left\{\sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \bar{r}_k X_{kli}^r = \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} d_k X_{jk}^f\right\} \geq \alpha_2, \quad \forall i \in I, \quad (13)$$

$$\text{Pos}\left\{\sum_{i \in L} \bar{r}_k X_{kli}^r = a_i d_k\right\} \geq \alpha_3, \quad \forall k \in K, i \in I, \quad (14)$$

$$\text{Pos}\left\{\left[\sum_{k \in K} \bar{r}_k \left(\sum_{i \in I} X_{kli}^r + \sum_{m \in M} X_{klm}^d\right)\right] \leq e_l^d Y_l^d\right\} \geq \alpha_4, \quad \forall l \in L. \quad (15)$$

其他约束同模型 FLP 中的式(2), (4), (6), (7), (9)及(10). 其中

$$h_0(X_{jk}^f, Y_{jk}^n) = \sum_{i \in L} f_l^d Y_l^d + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk}^f d_k X_{ijk}^f + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{ijk}^n d_k X_{ijk}^n,$$

$\text{Pos}\{\cdot\}$  表示  $\{\cdot\}$  中事件成立的可能性. 模型中目标机会约束(12)表示所求的目标值  $\bar{f}$  应该是在保证置信水平至少是  $\alpha_1$  时所取的最小值; 机会约束(13)~(15)表示约束得到满足的可能性至少应达到给定的置信水平  $\alpha_2, \alpha_3$  和  $\alpha_4$ .

## 3 模糊机会约束的清晰化(Convert fuzzy chance constraints to crisp equivalents)

求解模糊机会约束规划的方法之一是把各机会约束转化为相应的清晰等价类. 为此给出以下的定义及引理<sup>[10]</sup>.

### 3.1 预备知识(Preliminaries)

设三角模糊数  $\bar{q}$  为  $(q_1, q_2, q_3)$ , 其隶属函数为  $\mu_{\bar{q}}(x)$ , 则

$$\text{Pos}\{\bar{q} \leq z\} = \sup\{\mu_{\bar{q}}(x) \mid x \in \mathbb{R}, x \leq z\}, \quad (16)$$

$$\text{Pos}\{\bar{q} \geq z\} = \sup\{\mu_{\bar{q}}(x) \mid x \in \mathbb{R}, x \geq z\}, \quad (17)$$

$$\text{Pos}\{\bar{q} = z\} = \mu_{\bar{q}}(z). \quad (18)$$

其中  $z$  是 FCCP 模型中决策变量的函数.

**引理 1** 设三角模糊数  $\bar{q}$  为  $(q_1, q_2, q_3)$ , 则对任意给定的置信水平  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ), 当且仅当  $z \geq (1 - \alpha)q_1 + \alpha q_2$  时, 有  $\text{Pos}\{\bar{q} \leq z\} \geq \alpha$  成立.

**引理 2** 设三角模糊数  $\bar{q}$  为  $(q_1, q_2, q_3)$ , 则对任意给定的置信水平  $\gamma$  ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ), 当且仅当

$$\begin{cases} z \geq (1 - \gamma)q_1 + \gamma q_2, \\ z \leq (1 - \gamma)q_3 + \gamma q_2 \end{cases} \quad (19)$$

时, 有  $\text{Pos}\{\bar{q} = z\} \geq \gamma$  成立.

### 3.2 模糊机会约束的清晰等价类(Crisp equivalents of fuzzy chance constraints)

在本文中, 用三角模糊数  $(r_{k1}, r_{k2}, r_{k3})$  ( $k \in K$ ) 来表示各消费区域废旧产品的模糊回收量  $\bar{r}_k$ . 对于模糊目标机会约束(12), 因为  $\bar{r}_k, k \in K$  为三角模糊数, 而  $X_{kli}^r \geq 0, X_{klm}^d \geq 0$ , 根据三角模糊数的加法和乘法运算,  $h_0(X_{jk}^f, X_{jk}^n) + \sum_{k \in K} \bar{r}_k \left(\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} C_{kli}^r X_{kli}^r +$

$$\sum_{l \in L} \sum_{m \in M} C_{klm}^d X_{klm}^d) \text{ 仍为三角模糊数, 可表示为}$$

$$h_0(X_{jk}^f, X_{jk}^n) + \sum_{k \in K} r_{k1} \left( \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} C_{kli}^r X_{kli}^r + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} C_{klm}^d X_{klm}^d \right),$$

$$h_0(X_{jk}^f, X_{jk}^n) + \sum_{k \in K} r_{k2} \left( \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} C_{kli}^r X_{kli}^r + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} C_{klm}^d X_{klm}^d \right),$$

$$h_0(X_{jk}^f, X_{jk}^n) + \sum_{k \in K} r_{k3} \left( \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} C_{kli}^r X_{kli}^r + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} C_{klm}^d X_{klm}^d \right). \tag{20}$$

由引理 1 可知, 目标机会约束(12)可转化为如下的清晰等价类:

$$h_0(X_{jk}^f, X_{jk}^n) + \sum_{k \in K} [(1-\alpha_1)r_{k1} + \alpha_1 r_{k2}] \left( \sum_{l \in L} \sum_{i \in I} C_{kli}^r X_{kli}^r + \sum_{l \in L} \sum_{m \in M} C_{klm}^d X_{klm}^d \right) \leq \bar{f}. \tag{21}$$

同样, 由引理 2 可知, 约束(13)和(14)可分别转化为其相应的清晰等价类:

$$\begin{cases} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} [(1-\alpha_2)r_{k1} + \alpha_2 r_{k2}] X_{kli}^r \leq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_k X_{jk}^r, \\ \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} [(1-\alpha_2)r_{k3} + \alpha_2 r_{k2}] X_{kli}^r \geq \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} d_k X_{jk}^r, \\ \forall i \in I, \end{cases} \tag{22}$$

$$\begin{cases} \sum_{l \in L} [(1-\alpha_3)r_{k1} + \alpha_3 r_{k2}] X_{kli}^r \leq a_i d_k, \\ \sum_{l \in L} [(1-\alpha_3)r_{k3} + \alpha_3 r_{k2}] X_{kli}^r \geq a_i d_k, \\ \forall k \in K, i \in I. \end{cases} \tag{23}$$

由引理 1 可知, 约束(15)可转化为

$$\sum_{k \in K} [(1-\alpha_4)r_{k1} + \alpha_4 r_{k2}] \left( \sum_{i \in I} X_{kli}^r + \sum_{m \in M} X_{klm}^d \right) \leq e_l^r Y_l^d, \tag{24}$$

$$\forall l \in L.$$

由此可以得出, 在将各消费区域废旧产品回收量看成是隶属函数已知的三角模糊数的前提下, FCCP 模型中的模糊机会约束都可以转化为各自的清晰等价类, 该模型转化为确定性的混合整数规划模型. 在该模型中, 如果置信水平  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  和  $\alpha_4$  均为 1, 容易得出如下的定理:

**定理 1** 当置信水平  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  和  $\alpha_4$  均为 1 时, 该模型即为文献[2]中的模型.

#### 4 应用实例及分析 (Application example and analysis)

该模型可用 LINGO 4.0 for Windows 应用软件包求解. 因为文献[2]中的模型是本文模型的一个特例, 所以本例仍采用文献[2]中的数据, 以便于分析比较.

已知某产品制造商有 1 个制造/再制造厂、3 个

存储批发商、5 个消费区域和 1 个焚烧填埋中心, 现有 4 个场地可供建立拆解中心, 需要决定建立拆解中心的数量、位置及物流分配, 以使整个过程费用最小.

从制造/再制造厂到批发商每公里单位运费: 再生品为 0.003 元, 新产品为 0.004 元; 从批发商到消费区域每公里单位运费: 再生品为 0.01 元, 新产品为 0.015 元; 从消费区域到待建拆解中心每公里单位运费: 0.004 元; 从待建拆解中心到制造/再制造厂和填埋中心每公里单位运费分别为 0.003 和 0.002 元. 有关距离和运营费用的信息见表 1~表 6.

单位周期内: 制造/再制造厂 1 的最大生产能力 6000 台. 其中: 再生品占 40%, 单位再制造成本 180 元, 新产品占 60%, 单位制造成本 250 元; 3 个批发商的最大服务能力依次为 2700, 2500 和 800 台; 5 个消费区域对产品的需求量依次为 1100, 1200, 1000, 1200 和 1000 台, 单位废旧产品的回收成本为 80 元; 焚烧填埋中心 1 的服务能力不限, 单位处理费用 2 元; 4 个待建拆解中心的最大拆解能力依次为 3100, 1500, 1300 和 600 台, 每个待建拆解中心固定费用为 500000 元, 废旧产品单位拆解费用 10 元.

各区域废旧产品的模糊回收量  $\bar{r}_1, \bar{r}_2, \bar{r}_3, \bar{r}_4$  及  $\bar{r}_5$  依次为 (560, 660, 760), (620, 720, 820), (500, 600, 700), (620, 720, 820) 和 (500, 600, 700).

表 1 制造/再制造厂到批发商的距离

Table 1 Distance between manufacturer/remanufacturer and warehouse km

	批发商 1	批发商 2	批发商 3
制造/再制造厂 1	210	320	250

表 2 批发商到消费区域的距离

Table 2 Distance between warehouse and consuming area km

	消费区域 1	消费区域 2	消费区域 3	消费区域 4	消费区域 5
批发商 1	150	280	460	240	440
批发商 2	310	140	200	440	440
批发商 3	570	540	330	320	120

表 3 消费区域到待建拆解中心的距离

Table 3 Distance between consuming area and disassembly center km

	拆解中心 1	拆解中心 2	拆解中心 3	拆解中心 4
消费区域 1	240	520	140	390
消费区域 2	200	400	80	340
消费区域 3	280	130	390	230
消费区域 4	300	430	440	270
消费区域 5	380	330	570	250

表4 待建拆解中心到制造/再制造厂及焚烧填埋中心的距离

Table 4 Distance between disassembly center and manufacturer/remanufacturer or disposal center km

	制造/再制造厂 1	焚烧填埋中心 1
拆解中心 1	170	110
拆解中心 2	300	210
拆解中心 3	350	300
拆解中心 4	130	100

表5 再生品和新产品在各批发商处的单位运营费用

Table 5 Warehouse's unit running cost of remanufactured/new product 元

	批发商 1	批发商 2	批发商 3
再生品	0.2	0.3	0.25
新产品	0.25	0.3	0.3

表6 回收品及拆解物在各拆解中心的单位运营费用

Table 6 Disassembly center's unit running cost of recovery product or disassembly part 元

	拆解中心 1	拆解中心 2	拆解中心 3	拆解中心 4
拆解前回收品	0.05	0.07	0.05	0.06
拆解后可用件	0.1	0.15	0.12	0.15
拆解后废弃件	0.03	0.04	0.03	0.04

4.1 不同置信水平结果分析 (Result analysis of different confidence levels)

假设置信水平  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\alpha_3$  分别为 0.7, 0.8, 0.6, 当  $\alpha_4$  取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1 时, 计算结果如表 7 所示.

表7  $\alpha_4$  取不同值时的计算结果

Table 7 Results of different  $\alpha_4$

$\alpha_4$	建拆解中心个数	建立位置	总费用/元
0.2	1	1	2015397
0.4	1	1	2015397
0.6	1	1	2015397
0.8	2	1,4	2515071
1	2	1,4	2515076

假设置信水平  $\alpha_2, \alpha_3$  和  $\alpha_4$  分别为 0.8, 0.6 和 0.9, 当  $\alpha_1$  取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1 时, 计算结果如表 8 所示.

假设置信水平  $\alpha_1, \alpha_3$  和  $\alpha_4$  分别为 0.7, 0.6 和 0.9, 当  $\alpha_2$  取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1 时, 计算结果如表 9 所示.

假设置信水平  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\alpha_4$  分别为 0.7, 0.8 和 0.9, 当  $\alpha_3$  取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1 时, 计算结果如

表 10 所示.

表8  $\alpha_1$  取不同值时的计算结果

Table 8 Results of different  $\alpha_1$

$\alpha_1$	建拆解中心个数	建立位置	总费用/元
0.2	2	1,4	2492038
0.4	2	1,4	2501252
0.6	2	1,4	2510467
0.8	2	1,4	2519681
1	2	1,4	2528895

表9  $\alpha_2$  取不同值时的计算结果

Table 9 Results of different  $\alpha_2$

$\alpha_2$	建拆解中心个数	建立位置	总费用/元
0.2	2	1,4	2499946
0.4	2	1,4	2504989
0.6	2	1,4	2510031
0.8	2	1,4	2515074
1	2	1,4	2520134

表10  $\alpha_3$  取不同值时的计算结果

Table 10 Results of different  $\alpha_3$

$\alpha_3$	建拆解中心个数	建立位置	总费用/元
0.2	2	1,4	2502979
0.4	2	1,4	2509230
0.6	2	1,4	2515074
0.8	2	1,4	2520568
1	2	1,4	2525730

通过以上计算结果, 容易得出如下定理:

**定理 2** 拆解中心数量的多少决定于置信水平  $\alpha_4$  的高低.

由表 7 可以得出, 当置信水平  $\alpha_4$  降低时, 拆解中心拆解能力的约束条件放宽, 此时, 只建立一个拆解中心即可满足需求; 当置信水平  $\alpha_4$  提高时, 拆解中心拆解能力约束条件变得严格, 此时, 必须建立两个拆解中心才能满足需求. 这就为决策者决定建立拆解中心的数量和位置提供了依据.

**定理 3** 当拆解中心的数量一定时, 置信水平  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\alpha_3$  降低时, 总费用减少; 置信水平  $\alpha_1, \alpha_2$  和  $\alpha_3$  提高时, 总费用增加, 但总的变化幅度不大.

定理 3 表明, 由于建立拆解中心的固定费用相对较高, 再制造/制造系统集成物流网络的总费用很大程度上取决于拆解中心的费用, 因此, 决策者应该依据定理 2 和定理 3 来决定建立拆解中心的数量, 以节省费用.

4.2 一个例子 (Example)

当置信水平  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  和  $\alpha_4$  分别为 0.7, 0.8, 0.6 和 0.9, 4 个待建拆解中心的最大拆解能力依次为

2200, 1500, 1300 和 1500 台时, 计算得出的结果见表 11.

表 11 本例的计算结果

Table 11 Numerical results of the example

得到最优解的步骤		160	
目标值		2514882	
变量	变量值	变量	变量值
$Y_1^d$	1.000000	$X_{211}^d$	0.7058824
$Y_4^d$	1.000000	$X_{411}^d$	0.2551781
$X_{114}^d$	1.000000	$X_{341}^d$	0.7142857
$X_{115}^d$	0.200000	$X_{441}^d$	0.4507042
$X_{122}^d$	0.010834	$X_{541}^d$	0.7142857
$X_{123}^d$	1.000000	$X_{111}^d$	0.2903226
$X_{111}^d$	1.000000	$X_{211}^d$	0.2941176
$X_{122}^d$	0.989166	$X_{411}^d$	0.2941176
$X_{135}^d$	0.800000	$X_{341}^d$	0.2857143
$X_{111}^d$	0.7096774	$X_{541}^d$	0.2857143

### 结果分析:

在第 160 步得到最优解, 且最小费用为 2514882 元; 应建立 2 个拆解中心, 且建在拆解中心 1 和拆解中心 4 位置; 由制造/再制造厂 1 经批发商 1 为消费区域 1 提供 100% 的新产品; 由制造/再制造厂 1 经批发商 2 为消费区域 2 提供 1% 的再生品和 99% 的新产品; 由制造/再制造厂 1 经批发商 2 为消费区域 3 提供 100% 的再生品; 由制造/再制造厂 1 经批发商 1 为消费区域 4 提供 100% 的再生品; 由制造/再制造厂 1 经批发商 1 和批发商 3 分别为消费区域 5 提供 20% 的再生品和 80% 的新产品; 消费区域 1 经拆解中心 1 为制造/再制造厂 1 提供约 70.97% 的可再制造品(或零部件)、填埋约为 29.03%; 消费区域 2 经拆解中心 1 为制造/再制造厂 1 提供约 70.59% 的可再制造品(或零部件)、填埋约为 29.41%; 消费区域 3 经拆解中心 4 为制造/再制造厂 1 提供约 71.43% 的可再制造品(或零部件)、填埋约为 28.57%; 消费区域 4 经拆解中心 1 和拆解中心 4 分别为制造/再制造厂 1 提供约 25.52% 和 45.07% 的可再制造品(或零部件)、填埋约为 29.41% 和 0; 消费区域 5 经拆解中心 4 为制造/再制造厂 1 提供约 71.43% 的可再制造品(或零部件)、填埋约为 28.57%.

## 5 结束语(Conclusion)

本文在文献[1, 2]的基础上, 进一步对再制造/制造系统集成物流网络进行研究. 再制造/制造系统集成物流网络中, 回收产品的数量具有不确定性. 根据这一特点, 将各消费区域废旧产品的回收量看成是模糊参数, 提出了该集成物流网络的模糊机会约束规划模型. 通过把模型中模糊机会约束清晰化, 将

模型转化为确定性的混合整数规划模型, 给出了相应算法, 并通过实例进行分析.

## 参考文献(References):

- [1] 顾巧论, 陈秋双. 再制造物流网络模型设计[C]//第 22 届中国控制会议论文集. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003: 463 - 466. (GU Qiaolun, CHEN Qiushuang. Model design for remanufacturing logistics network [C]// Proc of the 22nd Chinese Control Conference. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003: 463 - 466.)
- [2] 顾巧论, 陈秋双. 再制造/制造系统集成物流网络及信息网络研究[J]. 计算机集成制造系统 - CIMS, 2004, 10(7): 721 - 726, 731. (GU Qiaolun, CHEN Qiushuang. Research on the logistics and information network integrating remanufacturing and manufacturing system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems - CIMS, 2004, 10(7): 721 - 726, 731.)
- [3] FLEISCHMANN M, BLOEMHOF-RUWAARD J, DEKKER R, et al. Quantitative models for reverse logistics: a review [J]. *European J of Operational Research*, 1997, 103: 1 - 17.
- [4] SHIH Li-Hsing. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2001, 32(1): 55 - 72.
- [5] GUIDE V D R, JAYARAMAN V, SRIVASTAVA R, et al. Supply-chain management for recoverable manufacturing systems [J]. *Interfaces*, 2000, 30(3): 125 - 142.
- [6] 夏守长, 奚立峰. 再制造物流网络的研究现状及发展趋势[J]. 工业工程与管理, 2002, (5): 20 - 23. (XIA Shouchang, XI Lifeng. Research of remanufacturing logistics networks: its status quo and development trend [J]. *Industrial Engineering and Management*, 2002, (5): 20 - 23.)
- [7] FLEISCHMANN M. *Quantitative models for reverse logistics* [D]. The Netherlands: Erasmus University Rotterdam, 2001.
- [8] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 164 - 172. (LIU Baoding, ZHAO Reiqing. *Stochastic Programming and Fuzzy Programming* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 164 - 172.)
- [9] LIU Baoding, IWAMURA K. Chance constrained programming with fuzzy parameters [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1998, 94(2): 227 - 237.
- [10] 赵晓煜, 汪定伟. 供应链中二级分销网络优化设计的模糊机会约束规划模型[J]. 控制理论与应用, 2002, 19(2): 249 - 252. (ZHAO Xiaoyu, WANG Dingwei. Fuzzy chance constrained programming model for bi-level distribution network design in the supply chain [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(2): 249 - 252.)

## 作者简介:

顾巧论 (1967—), 女, 副教授, 在上海交通大学安泰管理学院作博士后研究工作, 主要从事运营管理、供应链管理, 再制造系统的建模、控制与优化等方面的研究, E-mail: tjuqiaolun@sohu.com;

季建华 (1950—), 女, 教授, 主要从事现代生产管理、集成化的物流管理等方面的研究, E-mail: jhji@sju.edu.cn.