

文章编号:1003 - 207(2007)03 - 0061 - 07

废弃物回收的多层逆向物流网络优化设计问题研究

何波,杨超,张华

(华中科技大学管理学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 废弃物逆向物流网络设计问题是一个关系到经济效益和社会效益的问题。本文研究了废弃物逆向物流网络设计问题,包括选择中转站和处理站的地址,确定将产生点的废弃物分配给中转站以及从中转站运送到处理站的最佳策略,确定处理站的容量。考虑了在满足公众的意愿的情况下,建立了一个多目标的纯整数规划模型,最小化总的建设费用和设施对公众产生的负效用。设计了基于启发式的两阶段分解算法求解,从而构建一个废弃物回收的多层逆向物流网络。最后的算例仿真表明了算法的有效性和可行性。

关键词: 逆向物流网络;选址;启发式算法;多目标

中图分类号: F830 **文献标识码:** A

1 引言

随着社会经济的发展,人民生活水平日益提高,城市生活垃圾、固体废弃物也大幅增加。从 1987 年到 1996 年的 10 年间,我国城市生活垃圾产生量增加了将近 1 倍。2001 年达到 13470 万吨,2002 年达到 1.5 亿吨,并且每年以 8% - 10% 的速度增长。到 2010 年,年产量将达到 5.5 亿吨,紧随美国之后排在第二位^[1]。白色污染、垃圾围城已经成为困扰城市发展的大问题。城市生活垃圾是指人们日常生活中产生的固体废弃物,主要包括各种包装物、旧报纸书刊以及玻璃、铁、铝和饮料容器等,其余为家用电器、厨余物(kitchens surplus)、污泥^[2]。

固体废弃物处理产业化是实现固体废弃物资源化、降低环境污染和保护生态系统的最佳途径,世界发达国家十分重视对固体废弃物处理的产业化发展。美国、德国、日本等纷纷制定了促进固体废弃物处理产业化的法律,出台鼓励废弃物处理产业化的政策,采取积极有效的措施回收并再生利用废弃物,努力提高固体废弃物资源化利用率、缓解资源短缺和减轻环境压力,产生了显著的效果。我国也已加强了对这方面的管理。国家发展计划委员会、财政

部、建设部、国家环保总局等四部委联合颁发了《关于实施城市生活垃圾处理收费制度促进垃圾处理产业化的通知》。

目前,逆向物流的研究已经引起人们的广泛关注。达庆利给出了逆向物流的研究综述^[3],马祖军研究了产品回收逆向物流网络优化设计模型^[4],Jayaraman 提出了混合整数规划模型来确定电子产品的回收再制造工厂的位置和数量^[5,6],Fleischmann 提出一种单产品、无能力限制的产品回收物流网络设计模型,并用于分析复印机再制造^[7],周根贵考虑了随机需求量,建立一个混合整数规划模型并通过遗传算法求解^[8]。Min 等研究了多层的产品回收逆向物流网络,提出了一个混合整数规划模型,设计了遗传算法求解^[9]。现有文献基本上都是研究企业逆向物流网络的构建问题,其目标函数一般是要求构建物流网络系统的总费用最小,从而建立单目标混合整数规划模型。由于废弃物的逆向物流网络是由政府部门负责建设,这就不能只考虑建设费用,还需要考虑建立的设施对公众产生的影响,因此成为一个多目标优化问题。另外,多数文献研究某种产品的回收或者退货如旧电器、复印机、地毯等,研究固体废弃物逆向物流网络的很少。且大多数文献都是采用遗传算法求解模型,由于未能充分利用问题的启发式知识,从而制约了求解速度。本文与以往研究的不同之处在于:针对固体废弃物进行逆向物流网络设计,建立了一个多目标的纯整数规划模型,研究如何确定中转站和处理站的地址和数量,废弃物产生点的分配以及确定处理站的容量,同时考虑了

收稿日期:2006 - 06 - 18;修订日期:2007 - 03 - 15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(70471042);河南省重大科技攻关项目(0522010600)

作者简介:何波(1977 -),男(汉族),湖南长沙人,华中科技大学管理学院博士研究生,研究方向:物流和交通网络优化、管理决策等。

总的建设费用最小和所建设施对居民产生的负效用最小。根据问题的特点,将问题分解成两个阶段,并利用启发式知识,设计了两阶段分解算法求解。

2 问题描述

在一个区域有很多固体废弃物产生点,由于居民都是就近将固体废弃物放到中转站,我们设置一些中转站在这些产生点的附近。有一个处理站,这个处理站的主要作用是将从中转站运过来的固体废弃物进行分类、压缩等处理工作。对于这类设施(obnoxious facility),会对周围居民的生活带来负效用,所以居民希望这类设施离他们越远越好^[10]。由于做决策的是政府部门,在考虑总建设费用最小的同时,还要考虑居民的意愿,本文中用一个负效用函数来表示。固体废弃物逆向物流网络如图 1 所示:

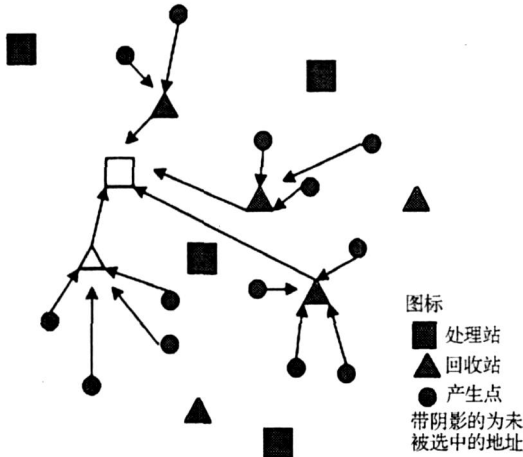


图 1 废弃物逆向物流网络结构示意图

因此,我们面临的问题如下:

- (1) 在满足居民的需求的前提下,确定建立中转站的位置和数量,使得废弃物产生点到相应的中转站的距离近可能的近。
- (2) 确定建立处理站的位置以及容量,使得处理站对居民产生的负效用近可能小。
- (3) 每个废弃物产生点经由哪个中转站运到处理站。

解决以上问题也就构建了一个多层的废弃物逆向物流网络。

3 模型建立

3.1 模型假设

在建立模型之前,我们给出以下的假设和说明。

- (1) 每个废弃物产生点也就是居民区。居民区人口越多,废弃物产生得也越多。

- (2) 废弃物只能直接运送到中转站,然后由中转站运送到处理站,不能直接运送到处理站。

- (3) 考虑的是网络离散选址,已知各个备选中转站和处理站。

- (4) 废弃物的运输费用与距离成简单的线性关系。

- (5) 在这个区域内,建立一个处理站,多个中转站。

3.2 参数和决策变量定义

模型参数如下:

- i I 废弃物产生点的下标;
- j J 中转站的下标;
- k K 处理站的下标;
- m M 处理站的级别;
- a_i 废弃物产生点每天产生的数量;
- F_j 建立中转站的费用;
- G_{km} 在 k 地建立等级处理站的费用;
- C_m m 等级处理站的处理能力;
- d_{ij} 废弃物产生点 i 到中转站 j 的距离;
- d_{ik} 废弃物产生点 i 到处理站 k 的距离;
- E_{ijk} 将单位数量的废弃物从产生点 i 经过中转站 j 运到处理站 k 的费用;
- N_1 建立中转站的最大数目;
- N_2 建立中转站的最小数目;
- B 中转站的最大容量;

决策变量定义如下:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{如果在被选地 } j \text{ 建立中转站} \\ 0 & \text{否则,} \end{cases}$$

$$Y_{km} = \begin{cases} 1 & \text{如果在被选地 } k \text{ 建立 } m \text{ 级的处理站} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$Z_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{如果产生点 } i \text{ 的废弃物经中转站 } j \text{ 运往处理站 } k \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

3.3 数学模型

$$\min \sum_j F_j X_j + \sum_m \sum_k G_{km} Y_{km} + \sum_k \sum_j \sum_i a_i Z_{ijk} E_{ijk} \tag{1}$$

$$\min \left[\sum_i (a_i)^k \sum_k \frac{(C_m Y_{km})^q}{(d_{ij})^r} + \sum_i \sum_k \sum_j Z_{ijk} (d_{ij})^r \right] \tag{2}$$

$$s. t. \sum_j Z_{ijk} = 1, \forall i \in I \tag{3}$$

$$a_i Z_{ijk} \leq B X_j, \forall k \in K \tag{4}$$

$$a_i Z_{ijk} \leq C_m Y_{km}, \forall k \in K \tag{5}$$

$$Z_{ijk} X_j \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (6)$$

$$Z_{ijk} Y_{km} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (7)$$

$$N_2 \sum_j X_j = N_1 \quad (8)$$

$$\sum_m \sum_k Y_{km} = 1 \quad (9)$$

$$Z_{ijk}, X_j, Y_{km} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall m \in M \quad (10)$$

本问题是一个多目标纯整数规划模型。目标函数(1)为最小化总的成本,包括建立中转站的成本,建立处理站的成本以及运输成本。目标函数(2)式是最小化所建立的设施对居民产生的负效用。其中第一项表示处理站所产生的负效用与其规模成正比,与离居民区的距离成反比;第二项表示中转站所产生的负效用,与其离居民区的距离成正比,也就是说中转站尽可能离居民区近。r, q 为参数,反映了相应的系数对效用的影响程度。(3)式确保每个产生点的废弃物都经过中转站运往处理站。(4)式是中转站的容量约束。(5)式是处理站的容量约束。(6)式确保只有建立的中转站才能接收产生点的废弃物。(7)式确保只有建立的处理站才能接受从中

转站送来的废弃物。(8)、(9)式为新建中转站和处理站的数量约束。(10)式为变量的取值范围约束。

4 基于启发式的两阶段分解算法

对于上述模型,如果只考虑目标函数(1)式,则变成一个有容量限制的设施选址问题(Capacitated Fixed Charge Facility Location Problem)。它已经被证明为 NP - complete 问题^[11],所以本问题的复杂性不低于有容量限制的设施选址问题,也是 NP - complete 问题。对于较小规模的问题,可以直接用优化软件包如 lingo 来求解,而实际中的问题,规模往往比较大,模型中包含的变量和约束条件很多,因此用优化软件包求解非常耗时,很多时候甚至无法求出最优解,于是我们转而设计启发式算法求解。

我们设计了基于启发式的两阶段分解算法(2 - PDAH)。首先我们通过专家咨询得到两个目标的权重,并且测算出经济效用系数,这个系数是将设施对居民产生的影响转化成环境成本^[12,13]。

采用线性加权和法将目标函数转化为如下形式:

$$\min_1 \left(\sum_j F_j X_j + \sum_m \sum_k G_m Y_{km} + \sum_k \sum_j \sum_i a_i Z_{ijk} E_{ijk} \right) + 2\mu \left[\sum_i (a_i) \sum_k \frac{(C_m Y_{km})^q}{(d_{ik})^r} + \sum_i (a_i) \sum_k \sum_j Z_{ijk} (d_{ij})^r \right] \quad (10)$$

其余约束条件不变。不失一般性,我们令 r, q 等参数都为 1,将问题分解成第一阶段的中转站的选址 - 分配问题(T - LAP)和第二阶段的处理站的选址 - 分配 - 定级问题(D - LALP)。算法主要思想是:第一阶段选定中转站并确定每个中转站收集的废弃物数量后,转入第二阶段,选出处理站并确定其容量级别和分配;根据第二阶段选出的处理站,重新转到第一阶段选出中转站。两个阶段相互作用,直到选定的中转站和处理站不变,则算法结束。

4.1 中转站的选址 - 分配问题及启发式求解算法

第一阶段的中转站的选址 - 分配问题可以表示为:

$$\min_1 \left(\sum_j F_j X_j + \sum_k \sum_j \sum_i a_i Z_{ijk} E_{ijk} \right) + 2\mu \left[\sum_i (a_i) \sum_k \sum_j Z_{ijk} (d_{ij})^r \right] \quad (11)$$

将 2μ 视为单位距离单位数量的废弃物的运费,则(11)式为一个带容量限制的固定成本设施选址问题(Capacitated Fixed Charge Facility Location Problem),对于这个问题,已经有贪心算法、启发式改进算法等^[9]。本文采用贪心 + 替换的启发式算法

求解。具体步骤如下:

步骤 0:任意打开一个备选处理站,关闭其它处理站。

步骤 1:任意打开个备选中转站,关闭其余中转站。

步骤 2:对所有关闭的中转站,找其中一个这样的中转站:如果打开它能够使(11)式的目标函数值降低得最多。如果找到,则转步骤 3;否则转步骤 4。

步骤 3:打开找到的这个中转站,调用分配算法(allocate)对产生点进行分配,转步骤 2。

步骤 4:令集合 Choused = { p / 打开的中转站 }, Unchoosed = { t / 关闭的中转站 }。对每个 p ∈ Choused, t ∈ Unchoosed 构成的组合,找这样一个组合,如果交换 p, t, 使得(11)式的目标函数值降低得最多。

步骤 5:如果找到,则交换这个组合的中 p, t, 转步骤 6;否则转第二阶段的步骤 7。

步骤 6:调用分配算法(allocate)对产生点进行分配后转步骤 4。

分配算法(allocate)的步骤如下:

step1:将所有产生点分配给离它最近的且打开的中转站。

step2:对每个中转站计算分配到的废弃物数量,判断是否超过中转站的最大容量。如果是,转step3进行产生点的重新分配,如果否,则结束算法。

step3:将分配给这个中转站的产生点分配给其它中转站,直到这个中转站所分配的产生点的废弃物数量之和不超过最大容量。分配给其它处理站的

原则是:将产生点分配给离它次近的且容量允许的打开的中转站,如果这样的中转站不存在,则将产生点分配给离它第3近的且容量允许的打开的中转站,依此类推。转step2。

4.2 处理站的选址 - 分配 - 定级问题

第二阶段的处理站选址 - 分配 - 定级问题(D-LALP)可以表示为:

$$\min \left[\sum_k G_{km} Y_{km} + \sum_k \sum_j \sum_i a_i Z_{ijk} E_{ijk} \right] + 2 \mu \left[\sum_i (a_i)^m \frac{(C_m Y_{km})^q}{(d_{ik})^r} \right] \quad (12)$$

s. t. 式(3), (5), (7), (9), (10)

其具体步骤如下:

步骤7:根据废弃物总的产生量来确定需要建立的处理站的等级,

令 choosed = {l | 已选好的处理站}, unchoosed = {r | 未被选中的处理站}, 对每个 l ∈ choosed, 用所有 unchoosed 中的 r 代替, 计算(12)式, 取其中最小值所对应的处理站为选中的处理站。

步骤8:重复执行步骤1~8,直到打开的中转站和处理站不变,则输出结果,算法结束。

5 废弃物回收的多层逆向物流网络优化设计步骤

我们给出构建废弃物回收的多层逆向物流网络的一般步骤:

步骤1:咨询专家或举行听证会,利用AHP法获得关于费用和效用两个目标的权重,测算出经济效用系数。

步骤2:从政治、经济、地理条件、环保等方面考虑,使用多属性决策方法(MACD)进行综合评价,得到中转站和处理站的备选地址。

步骤3:利用上文提出的数学模型和算法求解。

步骤4:根据求解结果,进行专家论证后建立设施。

表1 中转站的位置及建站费用

中转站的编号	横坐标 X	纵坐标 Y	成本(万元)
1	8.58	30.25	55
2	32.36	28.59	57
3	9.58	6.51	51
4	47.54	19.31	47
5	20.14	53.21	50
6	25.97	40.89	58
7	40.57	45.65	52
8	25.23	20.25	47
9	42.04	18.97	49
10	16.08	21.71	58

表2 处理站位置及不同等级的建设成本

处理站的编号 及坐标	处理能力			
	70	80	90	100
1(43.97, 49.89)	200	220	240	260
2(1.57, 12.65)	190	210	230	250
3(7.23, 50.25)	215	235	255	275
4(25.04, 8.97)	180	200	220	240
5(35.65, 58.93)	195	215	235	255

表3 产生点的位置及日产生量

No.	横坐标 X	纵坐标 Y	日产生量(kg)
1	15.69	3.80	1200
2	18.67	14.28	4300
3	12.6	9.13	3400
4	7.43	11.27	2100
5	5.08	5.43	1900
6	11.14	10.85	1000
7	28.62	20.00	3700
8	24.86	29.39	2200
9	33.42	35.85	3500
10	27.23	21.9	2900
11	37.32	27.23	2200
12	46.37	36.36	2100
13	14.93	32.6	1100
14	18.07	43.38	2700
15	9.77	40.5	4400
16	18.61	31.99	4100
17	12.8	41.71	4600
18	7.13	37.98	2200
19	15.78	46.81	3700
20	5.69	37.24	4500
21	33.51	16.72	3200
22	40.38	9.07	1600
23	45.29	7.87	2200
24	39.51	13.92	3600
25	42.82	46.24	1800
26	39.28	42.90	2900
27	40.68	48.38	1400
28	27.30	36.77	1700
29	30.59	38.45	3100
30	28.43	41.33	2300

6 算例及仿真分析

有 10 个备选中转站和 5 个备选处理站的位置坐标如表 1 和表 2 所示。30 个废弃物产生点的坐标及每天产生的废弃物数量如表 3 所示。每个中转站的容量为 10 吨/天。每吨废弃物的运费为 100 元/公里。设施之间为欧式距离,每单位距离表示 20 米。中转站和处理站的成本包括建设成本和运营成本,折算成每年的成本。分别取 0.6、0.4。

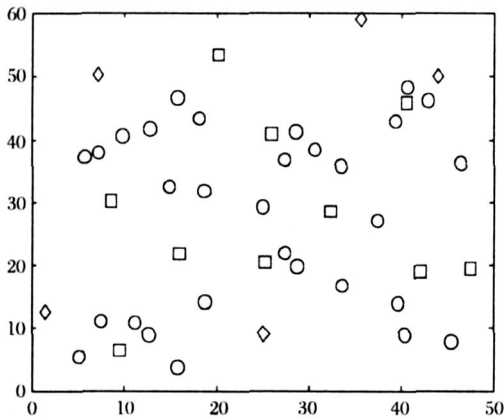


图 2 初始建站示意图

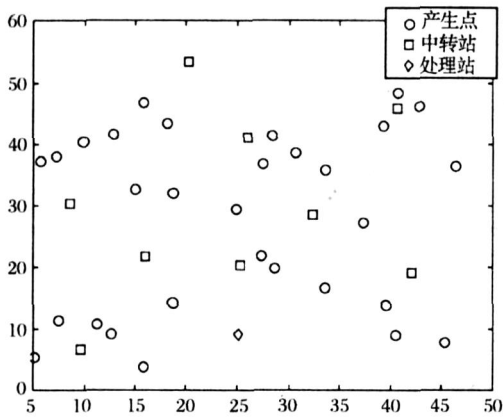


图 3 最终建站示意图

采用启发式算法运行 10 次,结果如表 4 所示,可见算法的求解速度很快,鲁棒性也很好。其中最小值的含义为:1(15,20),2(8,9,11,28),3(1,3,4,5,6),5(14,18,19),6(17,29,30),7(25,26,27),8(7,10,21),9(12,22,23,24),10(2,13,16)。括号前面的数表示建立的中转站,后面的数表示分配给这个中转站的产生点。建立处理能力为 90 的 4 号处理站。建设为 887.8 万元,其中建立和运营成本设施的成本为 697.0 万元,运输成本为 190.8 万元。环境成本为 99.9 万元。为了更清楚的表示最好解,

图 2 和 3 分别表示建设前后的状态。

表 4 实验结果统计

计算次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
综合成本	572	8572	2575	6574	3573	8575	6572	2575	1572	9572	6573.7
计算时间(s)	3.8	4.6	4.6	5.8	5.1	5.2	5.5	4.8	5.4	5.4	5.02

对中转站的最大容量进行灵敏度分析,当最大容量为 12 吨/天时,其网络结构如图 4 所示,建站及分配情况为:1(15,18,20),2(9,25,26,29),3(1,2,3,5,6),6(14,19,27,28,30),8(7,8,10,21),9(11,12,22,23,24),10(4,13,16,17,)。

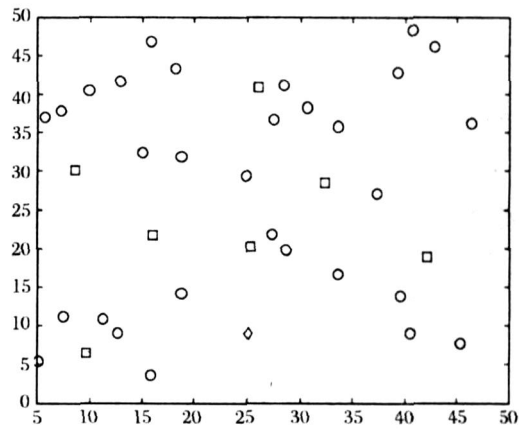


图 4 中转站容量为 12 吨/天的情况

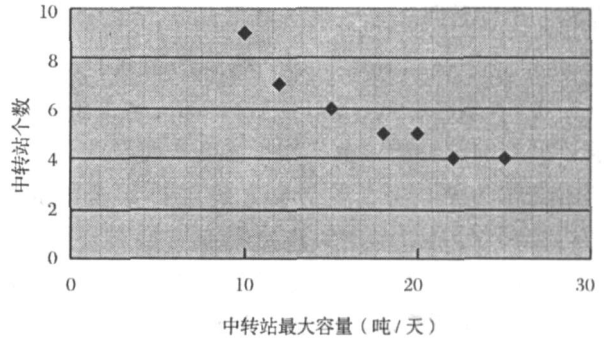


图 5 中转站最大容量和个数之间的关系

图 5 显示了中转站最大容量和个数之间的关系,随着最大容量的增大,建中转站的个数也随之减少。限于篇幅,其它对于模型有影响的相关因素分析不再叙述。

我们随机产生 3 组不同规模的算例,使用 Compaq Presario 2100 笔记本电脑, CPU 为主频 2.4GHZ 的 Pentium 4 处理器,256M 内存。对本文提出的基于启发式的两阶段分解算法(2-PDAH),在 MATLAB6.5 下编程计算,运行 10 次,取其平均

结果和平均计算时间,与 lingo8.0 软件的计算结果做比较试验,结果如表 5 所示。Lingo8.0 在求解整数规划时使用的是分支定界法。从计算速度来看,2 - PDAH 法非常快,要远好于分支定界法,而且随着问题规模的增大,2 - PDAH 的计算速度优势更加明显。从求解质量来看,2 - PDAH 法的结果非

常接近最优解,误差都在 1% 以内。进一步的大规模仿真结果表明,2 - PDAH 法在求解速度和求解质量上都拥有着非常好的性质。由于将两个目标函数转化成表示成本的目标函数,因此算法的性质不受两个目标函数的权重取值的影响,而模型结果与权重密切相关。

表 5 计算结果比较

问题规模			变量数	约束条件数	Branch - and - Bound		2 - PDAH		误差
产生点	中转站	处理站			最优解	计算时间(s)	平均结果	平均时间(s)	
30	×10	×5	1530	63	572.2	168	573.7	5.0	0.26%
50	×10	×5	2530	82	888.3	264	892.4	8.4	0.46%
80	×12	×5	4832	116	1120.89	2774	1128.1	14.2	0.64%

注:误差 = (2 - PDAH 的结果 - Branch - and - Bound 的结果) / Branch - and - Bound 的结果 ×100 %

7 结语

废弃物回收的网络设计问题是战略层决策问题,综合考虑定性与定量因素,提出了废弃物逆向物流网络设计的一般步骤。建立了一个双目标纯整数规划模型,最小化总的建设费用和设施对公众产生的负效用,设计了基于启发式的两阶段分解算法求解这一问题。由于算法采用贪心算法思想,而且用到了问题的启发式知识,所以求解质量和速度都有很好的表现。最后的算例仿真表明,2 - PDAH 法对求解中、大规模的问题非常有效。进一步的研究包括:

(1) 由于我们采用的是经典的求解多目标优化的方法,将多目标问题转化成单目标问题求解,因此需要事先确定目标函数的权重。我们可以采用多目标进化算法^[14],就不需要事先确定目标函数的权重,通过求出 Pareto 解集进行决策。

(2) 通常产生点产生的废弃物的数量很难准确的得到,将其不确定的性质用随机变量或模糊变量来描述,使用随机规划和模糊规划建模。

(3) 将本文的算法与其它算法,如遗传算法、粒子群算法等进行比较分析。

参考文献:

[1] 彭晓明,迟光宇,王红瑞,等. 城市生活垃圾收费的定价模型及其应用[J]. 资源科学, 2006, 28(1): 19 - 24.
 [2] 苗建青. 论循环经济的效率问题[J]. 外国经济与管理, 2005, 27(12): 51 - 57.
 [3] 达庆利,黄祖庆,张钦. 逆向物流系统结构研究的现状及展望[J]. 中国管理科学, 2004, 12(1): 131 - 138.

[4] 马祖军,代颖. 产品回收逆向物流网络优化设计模型[J]. 管理工程学报, 2005, 19(4): 114 - 117.
 [5] Jayaraman V., Guide Jr. VDR, Srivastava R. A Closed - loop Logistics Model for Remanufacturing[J]. Journal of the Operational Research Society, 1999, 50: 497 - 508.
 [6] Jayaraman V. Raymond A. Erik Rolland. The Design of Reverse Distribution Networks Models and Solution Procedures [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 150(1): 128 - 149.
 [7] Fleischmann M.. Quantitative Models for Reverse Logistics[M]. Berlin: Springer - Verlag, 2001.
 [8] 周根贵,曹振宇. 遗传算法在逆向物流网络选址问题中的应用研究[J]. 中国管理科学, 2005, 13(1): 42 - 47.
 [9] Hokey M., Hyun J., Chang S.. A Genetic Algorithm Approach to Developing the Multi - echelon Reverse Logistics Network for Product Returns[J]. Omega, 2006, 34: 56 - 69.
 [10] C. S. ReVelle, H. A. Eiselt. Location Analysis: A Synthesis and Survey[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 165: 1 - 19.
 [11] Mark S. Daskin. Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications[M]. New York, Wiley Interscience, 1995.
 [12] Caruso C., Colorni A., Paruccini M.. The Regional Urban Solid Waste Management System: A Modeling Approach [J]. European Journal of Operational Research, 1993, 70: 16 - 30.
 [13] 王金南. 论环境成本内部化及政策选择[J]. 中国人口、资源与环境, 1997, 17(1): 63 - 68.
 [14] 谢涛,陈火旺,康立山. 多目标演化的优化算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(8): 997 - 1003.

Optimal Design of the Multi-Echelon Reverse Logistics Network for Solid Wastes

HE Bo, YANG Chao, ZHANG Hua

(School of Management, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract : The design of reverse logistics network for solid waste is concerned with economy and society. This paper addresses the design of reverse logistics network for solid wastes that involves locating transfer facility and dispose facility, and determining the best strategy for allocating the wastes sources to transfer plants and transporting the wastes from transfer facilities to dispose facilities. The goal is to select the optimum numbers, locations and capacities of transfer facilities and dispose facilities to open so that all wastes sources are satisfied at minimum total costs of the reverse logistics network and at minimum disutility to people. We develop a multi-objective integer programming model and provide an efficient heuristic solution procedure for the reverse logistics network design. Computational tests demonstrate the efficiency and feasibility of our heuristics.

Key words : reverse logistics network ;location ;heuristics ;multi-objective