

废弃物处理站选址问题的和谐搜索算法

韩毅¹ 蔡建湖¹ 周根贵¹ 李延来² 宋平¹

(浙江工业大学经贸管理学院 杭州 310023)¹ (西南交通大学物流学院 成都 610031)²

摘要 近年来,随着人们环保意识的增强和环保法规力度的加大,逆向物流逐渐受到人们的关注与重视。废弃物处理站的选址问题(end-of-life items disposal facilities' location problem, EIDFLP)是逆向物流研究领域的关键问题,该问题能否有效解决直接关系到人们的日常生活环境能否得到有效改善。针对文献中的具有多个目标的 EIDFLP,首先将问题转化为单目标问题,之后采用一种新颖的和谐搜索优化算法(harmony search algorithm, HSA)对问题进行了求解。计算结果显示:1)本算法的最优解与文献中的最优解相同;2)本算法的计算时间明显少于文献中算法的计算时间;3)原文献中的一个解存在错误之处。

关键词 逆向物流, 选址问题, 多目标, 和谐搜索算法

中图分类号 TP29 **文献标识码** A

Harmony Search Algorithm for End-of-Life Items Disposal Facilities' Location Problem

HAN Yi¹ CAI Jian-hu¹ ZHOU Gen-gui¹ LI Yan-lai² SONG Ping¹

(College of Economics and Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(School of Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)²

Abstract In recent years, with the enforcement of people's environmental protection awareness and the improvement of environmental protection regulation, more and more focuses and importance are attached on reverse logistics. End-of-life items disposal facilities' location problem (EIDFLP) is a key research direction in reverse logistics research. Whether the EIDFLP can be effectively solved is directly related to the degree of improvement on people's daily life. In this paper, for solving a multi-objective EIDFLP from literature, the multi-objective EIDFLP was transformed into a single-objective problem and then a novel harmony search algorithm (HSA) was proposed. Through the computational results, we found that the best result of HSA is the same as that in literature, the computational time is much less than that of algorithm in literature and there are some errors in a reported solution.

Keywords Reverse logistics, Location problem, Multi-objective, Harmony search algorithm

1 引言

随着人口的增加、工业进程的加快和人们消费能力的提高,生活与工业废弃物给环境和人类健康带来了巨大的威胁^[1]。长期以来,管理者将顾客退回物品以及废弃物品的处理排除在企业经营战略之外。直至上世纪90年代末,逆向物流才逐渐受到国内外学者和企业管理者的高度重视。目前,逆向物流战略已成为国外许多企业(如宝马、惠普等)管理战略的重要组成部分^[2]。自逆向物流的概念提出以来,国内外学者已经进行了大量相关研究^[3-5]。废弃物处理站的选址问题是逆向物流研究中的关键问题之一,是关系到民生和周围环境的重要战略决策问题。由于逆向物流系统中的回收物品多数需要经过检测、分级、修复等工序,因此需要确定相应处理设备的安装地点及处理能力,这将导致废弃物处理站的选址比传统的选址问题更为复杂。

关于回收站选址问题的研究,文献[2]考虑了随机需求,

建立了混合整数规划模型,设计了相应的遗传算法;文献[3]考虑了废弃物回收站的处理问题,采用多目标算法对问题进行求解;文献[4]采用混合多目标进化算法对废弃物网络系统容量可扩张问题进行了求解;文献[5]考虑了带有回收中心的第三方物流产品回收网络优化问题,采用混合模拟退火算法进行问题求解;文献[6]提出了一个混合整数规划模型来确定电子产品的再制造工厂位置和数量;文献[7]考虑了集成物流网络设计问题,提出了混合整数规划模型,采用了遗传算法求解;文献[8]建立了有害废弃物处理站的选址和运输的多目标模型,然后利用目标规划方法进行求解;文献[9]采用 Benders 分解算法求解大型废旧产品回收网络的优化设计问题。

和谐搜索算法是2001年由 GEEM^[10]等人提出来的用于求解连续优化问题的亚启发式算法,可模拟音乐家(们)在音乐表演过程中探寻优美乐谱的过程。本文针对文献[3]的废弃物处理站选址问题,通过将其中一个目标转化为约束条件的方式,将双目标问题转化为单目标问题并采用和谐搜索算

法对问题进行求解,验证了算法在计算时间上的高效性和计算结果方面的精确性。

2 问题模型

本文的数学模型采用与文献[3]相类似的数学模型,区别在于本文将回收站的负效用这个目标转化为约束条件,以建站成本为目标,将原文献的双目标规划模型转化为单目标模型,这样做有可能得到比原文献更多的 pareto 解(因为群体中的一个可行解就是一个潜在的 pareto 解)。

2.1 模型假设^[3]

1)各个备选地已经过相关环境方面的论证和评价,符合相关的政策和法规。

2)每个废弃物产生点(居民区)的人口越多,废弃物产生得也越多。

3)废弃物的运输费用与距离成简单的线性关系。

4)各个废弃物产生点产生的废弃物的数量是确定的,并且在一定时期不变。

2.2 参数和决策变量^[3]

- i 废弃物产生点的下标;
- j 处理站的下标;
- H_i 废弃物产生点 i 处的居民数;
- β 每人每天产生的废弃物数量;
- F_{jm} 建等级为 m 的处理站 j 的费用;
- C_m 等级为 m 的处理站建设成本;
- α 单位废弃物的单位距离运费;
- d_{ij} 废弃物点 i 到处理站 j 的距离;
- I 废弃物产生点的数量;
- J 备选处理站的数量;
- M 处理站级别的最大值;
- N 处理站的最小数量;
- Neg 处理站的负效用约束;
- $X_{jm} = \begin{cases} 1, & \text{在备选地 } j \text{ 建立 } m \text{ 等级处理站;} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$
- $Z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{由处理站 } j \text{ 回收 } i \text{ 点的废弃物;} \\ 0, & \text{否则。} \end{cases}$

2.3 数学模型

$$\min \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^M F_{jm} X_{jm} + \alpha \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \beta H_i Z_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^I H_i \sum_{j=1}^J \frac{\sum_{m=1}^M (C_m X_{jm})}{d_{ij}} \leq Neg \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J Z_{ij} = 1, \forall i \in I \quad (3)$$

$$Z_{ij} \leq X_{jm}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall m \in M \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I \beta H_i Z_{ij} \leq \sum_{m=1}^M C_m X_{jm}, \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{m=1}^M X_{jm} \leq 1, \forall j \in J \quad (6)$$

$$N \leq \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M X_{jm} \quad (7)$$

目标函数式(1)为最小化总成本,包括建立处理站的费用和运输费用;式(2)为最小化产生的负效用;式(3)确保每个产生点只运往一个处理站;式(4)确保只有建立了处理站才能接受从产生点送来的废弃物;式(5)为处理站的容量约束;式(6)确保一个地址只能建立一个级别的处理站;式(7)表示建立的

处理站要满足最少建站数量。

3 和谐搜索算法简介

和谐搜索算法(harmony search algorithm, HSA)是2001年提出的、用于求解连续优化问题的一种新颖亚启发式算法,可模拟音乐家(们)在音乐表演过程中探寻优美乐谱的过程。HSA 具有一些特性,包括 1)算法不依赖微分梯度,可以处理连续函数和非连续函数问题;2)HSA 可以处理连续和离散变量;3)算法具有跳出局部最优的能力;4)算法产生新的解时考虑全部解的信息;5)算法在处理离散优化问题时,根据演奏者们的经验随机产生离散变量。目前关于和谐搜索算法的应用领域已经涉及算法改进^[11-16]、具有连续函数的工程优化问题^[17-21]、热(电)能经济分配问题^[22,23]、任务指派问题^[24]及地下水管网布局问题^[25]等。

HSA 算法努力尝试找到一个能够使目标函数达到最大化或最小化的向量 $bf(x) = \{x_1, \dots, x_n\}$,算法参数为和谐记忆的大小 hms (通常取 1 到 100 之间的一个整数)、从和谐记忆中选择一个向量的概率 $hmsr$ (通常为 0.7 至 0.99 之间的一个值)、对向量中的每一维上的值进行调节的概率 par (通常等于 0.1 到 0.5 之间的一个值)、调节步长 δ 以及最大调节步长 fw 。

算法执行步骤如下:

Step 1 产生 hms 个初始向量作为和谐记忆;

Step 2 随机生成一个向量 $bf'(x')$,生成过程按两种方式进行。第一种方式,根据概率 $hmsr$ 从和谐记忆中选择一个向量,将其对应维上的值赋给新向量。第二种方式,在允许范围内,以概率 $1-hmsr$ 随机生成新向量的某个维上的值;

Step 3 如果新向量 $bf'(x')$ 的某一维上的值是根据概率 $hmsr$ 从和谐记忆中选择出来的,则根据概率 par 对该维上的值进行调节(对于离散变量 $x_i' = x_i \pm \delta$,对于连续变量 $x_i' = x_i \pm fw * rand(0,1)$);

Step 4 如果新产生的向量 $bf'(x')$ 比和谐记忆中的最差向量更好,则用 $bf'(x')$ 替换和谐记忆中的最差向量;

Step 5 循环执行 Step 2 至 Step 4,直到终止条件满足为止。

4 处理站选址问题的和谐搜索算法

传统和谐搜索算法是求解连续优化问题的,本文研究离散优化问题的求解,因此需要对传统和谐搜索算法进行离散化处理。由于问题采用 0-1 编码方式,因此这里没有采用传统和谐搜索算法的调整概率 par 进行解向量调整。

4.1 问题编码

问题向量采用 0-1 编码方式,共 J 位(J 为候选回收站的个数)。其中 1 表示在相应的位置建站,0 表示在相应的位置不建站。图 1 表示具有 10 个候选站的问题,在地址 1,4,8 建站,在地址 2,3,5,6,7,9 和 10 处不建站。随机产生 hms 个向量构成和谐记忆。

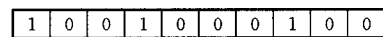


图 1 问题编码表示

4.2 交换操作

由于本文问题具有离散性,因此借鉴遗传算法的交换操

作来进行向量调整,调整方式与遗传算法的交换算子一致(根据交换概率 $P_i=0.5$ 进行)。图 2 给出了通过交换第 4 维和第 7 维上的值来产生新向量的过程。交换操作不会影响解向量的可行性。

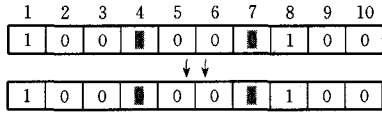


图 2 交换操作

4.3 变异操作

变异操作也是借鉴遗传算法的变异操作来进行向量调整,只是为了保证解向量的可行性并非在所有情况下都进行变异操作。根据变异率($P_m=0.5$)对解向量进行变异操作时,如果变异操作后回收站的个数不少于 3 个,执行变异;否则,对该解向量进行交换操作。图 3 给出对某个解向量的第 5 维进行变异操作的示意图。

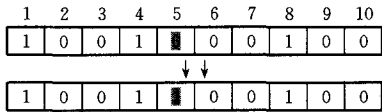


图 3 变异操作

4.4 解码过程

由于对选址决策变量进行 0-1 编码,在评价目标函数时,需要依次根据 3 个过程对解向量进行解码:

Step 1 根据解向量中 1 所对应的回收站,将废弃物产生点分配给离它最近的回收站;

Step 2 计算每个回收站需要回收的废弃物的量,判断其是否超过回收站的最大建站容量,如果否,则根据回收的废弃物数量确定回收站的建站成本;否则,进行废弃物产生点的重新分配;

Step 3 对于每个回收量大于最大容量的回收站,根据废弃物产生点到其他回收站的距离全部进行由小到大排序。根据排序后的距离,将废弃物产生点分配给某个回收站,直到当前回收站的回收量小于等于回收站的最大容量为止。

解码过程中的 Step 2 用于判断解的可行性,Step 3 是解的可行化处理,提高了算法的求解效率和求解质量。

4.5 算法执行过程

算法执行过程由图 4 给出。

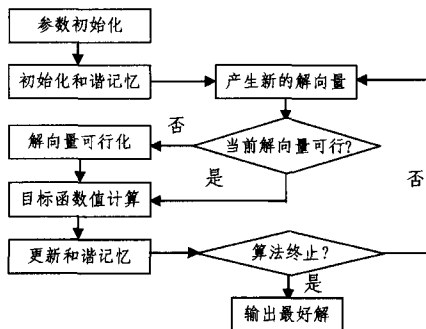


图 4 和谐搜索算法执行过程

4.6 算法终止条件

算法执行过程以最大迭代次数为终止条件。

5 数值算例

本文数值算例来自文献[3]的河南省某市调研的数据,包括 10 个备选处理站和 30 个废弃物产生点。编程环境为:电脑采用 IBM Thinkpad R400;编程工具采用 VC++6.0;操作系统是 Window XP;内存大小为 1GB;CPU 为酷睿 2 双核 P8700、主频 2.53GHz。

模型的部分参数,如处理站坐标、废弃物产生点的坐标和人口以及处理站的建站等级和费用参见文献[3]。和谐记忆大小为 30,最大迭代次数为 2000,和谐记忆选择概率、交换操作和变异操作的概率都为 0.5。处理站的最大处理能力(容量)为 300 吨/天, β 为 1.1 公斤/人/天, α 为 1 元/公里/吨。为了验证算法的正确性,根据原文献的解,将模型参数中的负效用值 Neg 设为 2571。统计各废弃物产生点的废物数量,得知至少需要建立 3 个回收站($N=3$)。

算法独立执行 100 次,平均计算时间为 1.34 秒,每次都得到最优值 1300.72。通过大量实验,得到 3 个符合原文献要求的 pareto 解。表 1 列出了 3 个 pareto 解及其对应的目标函数值和负效用。表 2 至表 4 分别给出了表 1 中 3 个解所对应的回收方案。

表 1 部分解向量及对应的目标函数值和负效用

解向量	目标函数值	负效用
0001010001	1300.72	2570.03
0100100001	1300.84	2218.09
0000100011	1300.88	1876.38

表 2 第一个解向量对应的回收方案

解向量	回收站(容量):管辖的产生点
0001010001	4(200);21-24-11-7-22-10-23-12 6(300);30-28-29-14-9-8-19-17-26-15-27-25 10(150);2-16-13-6-3-4-1-18-20-5
总成本	1300.72
负效用	2570.03

通过对比文献[3]的计算结果,本文算法的目标函数值和负效用值与文献上的对应值似乎不一样。实际上文献[3]的结果是对小数点后第二位的值采用了四舍五入的方式造成的,因此本文算法的结果与文献[3]的计算结果完全一致。通过将表 3 的计算结果与文献[3]的对应结果相比对,发现文献[3]中解向量 0100100001 对应的回收方案存在错误。

表 3 第二个解向量对应的回收方案

解向量	回收站(容量):管辖的产生点
0100100001	2(300);11-9-7-28-29-21-30-26-12-24-25-22-23 5(150);19-14-17-15-27 10(200);2-16-13-6-3-4-1-18-20-5-10-8
总成本	1300.84
负效用	2218.09

表 4 第三个解向量对应的回收方案

解向量	回收站(容量):管辖的产生点
0000100011	5(250);14-15-17-19-25-26-27-28-29-30 9(150);9-11-12-21-22-23-24 10(250);1-2-3-4-5-6-7-8-10-13-16-18-20
总成本	1300.88
负效用	1876.38

文献[3]中,把废弃物产生点 7 划归给回收站 10,把废弃物产生点 10 划归给回收站 2。但是根据图 5^[3],废弃物产生点 7 应划归给回收站 2,而废弃物产生点 10 应划归给回收站

10(这与本文算法的回收方案一致)。

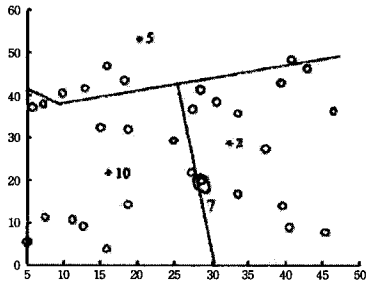


图5 回收站和废弃物产生点的分布图

本文算法与文献[3]算法的比较结果由表5给出。纵观整体计算过程,本文算法在计算效果和计算效率上都优于文献[3]的多目标进化算法和启发式算法。本文算法的优势十分明显,其原因可能在于文献[3]的算法中一部分的计算时间消耗在 pareto 解集的更新方面以及可行解的产生方面。

表5 第二个解向量对应的回收方案

算法	平均计算时间(秒)
和谐搜索算法	1.34
混合多目标演化算法	371
ϵ 约束法	59882

结束语 废弃物是世界经济高速发展的产物,如何有效处理废弃物是关系到人类生存环境的重大问题。本文针对固体废弃物的回收站选址问题,提出了一种新颖、高效的和谐搜索算法。通过计算算例表明,本文算法能够更高效、快速地求解问题。未来的研究可以考虑将算法应用于更复杂的回收站选址问题中,比如多周期问题、动态选址问题、模糊需求问题以及更大规模、更大型的回收网络规划问题。此外,将和谐搜索算法的应用领域扩展到更多优化问题的求解方面也是十分有价值的研究方向。

参考文献

[1] 李军,魏洁. 基于ERP制度的逆向物流研究与应用综述[J]. 管理科学,2010,24(4):43-47

[2] 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

[3] 何波,杨超,任鸣鸣. 废弃物处理站选址问题及多目标演化算法求解[J]. 系统工程理论与实践,2007,27(11):72-78

[4] 何波,杨超,任鸣鸣. 废弃物网络系统容量扩张模型及算法[J]. 系统工程理论与实践,2009,29(1):159-167

[5] 何波,杨超,任鸣鸣. 基于第三方物流的产品回收物流网络优化模型及算法[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(1):39-44

[6] 代颖,马祖军,刘飞. 基于混合遗传算法的制造/再制造集成物流网络优化设计[J]. 计算机集成制造系统,2006,12(11):1853-1859

[7] Hokey M, Hyun J, Chang S. A genetic algorithm approach to develop the multi-echelon reverse logistics network for product returns[J]. Omega,2006,34(1):56-69

[8] Giannikos I. A multiobjective programming model for locating treatment sites and routing hazardous wastes[J]. European Journal of Operational Research,1998,104(2):333-342

[9] 范体军,常香云,陈荣秋,等. 大型废旧产品回收网络的数学模型与算法研究[J]. 管理科学学报,2009,12(4):94-102

[10] Geem Z, Kim J, Logannathan G. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation,2001,76(2):60-68

[11] Geem Z. Novel derivation of harmony search algorithm for discrete design variables[J]. Applied Mathematics and Computation,2008,199(1):223-230

[12] Mahdavi M, Fesanghary M, Daman G E. An improved harmony search algorithm for solving optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation,2007,188(2):1567-1579

[13] Alatas B. Chaotic harmony search algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation,2010,216(9):2687-2699

[14] Coelho L, Bernert D. An improved harmony search algorithm for synchronization of discrete-time chaotic systems[J]. Chaos, Solitons & Fractals,2009,41(5):2526-2532

[15] Omran M, Mahdavi M. Global-Best harmony search[J]. Applied Mathematics and Computation,2008,198(2):643-656

[16] Zou D, Gao L, Wu J, et al. A novel global harmony search algorithm for reliability problems[J]. Computers and Industrial Engineering,2010,58(2):307-316

[17] Lee K, Geem Z. A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization: harmony search theory and practice[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2005,194(36-38):3902-3933

[18] Fesanghary M, Mahdavi M, Minary-Jolandan M, et al. Hybridizing harmony search algorithm with sequential quadratic programming for engineering optimization problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2008,197(33-40):3080-3091

[19] Jaberripour M, Khorram E. Two improved harmony search algorithms for solving engineering optimization problems[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,2010,15(11):3316-3331

[20] Wang C, Huang Y. Self-adaptive harmony search algorithm for optimization[J]. Expert Systems with Applications,2010,37(4):2826-2837

[21] Pan Q, Suganthan P, Tasgetiren M, et al. A self-adaptive global best harmony search algorithm for continuous optimization problems[J]. Applied Mathematics and Computation,2010,216(3):830-848

[22] Coelho L, Mariani V. An improved harmony search algorithm for power economic load dispatch[J]. Energy Conversion and Management,2009,50(10):2522-2526

[23] Vasebi A, Fesanghary M, Bathaee S. Combined heat and power economic dispatch by harmony search algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2007,29(10):713-719

[24] Zou D, Gao L, Li S, et al. A Novel Global Harmony Search Algorithm for Task Assignment problem[J]. The Journal of Systems and Software,2010,83(10):1678-1688

[25] Ayvaz M. Application of harmony search algorithm to the solution of groundwater management orders[J]. Advances in Water Resources,2009,32(6):916-924