

求解分布式装配式建筑逆向物流问题的 离散人工蜂群算法^①

李俊青

(聊城大学 计算机学院, 山东 聊城 252059)

摘要 给出了一种混合离散的人工蜂群算法(HDABC)用于求解分布式装配式建筑逆向物流问题.为实现ABC算法的离散化,提出了一种基于两级向量链表的十进制编码机制.结合逆向物流特征和ABC算法特点,设计了8种邻域结构.算法通过对两个现实生产实例求解,并与当前文献中的典型算法对比分析,验证了提出的算法无论在算法运行时间还是在求解质量上,都具备良好的性能.

关键词 装配式建筑;逆向物流;分布式调度;人工蜂群

中图分类号 TH166

文献标识码 A

0 引言

随着科技的不断进步,装配式建筑得到了不断关注和广泛应用.2016年以来,中央到地方都加大了发展装配式建筑的政策支持力度,9月27日国务院办公厅印发《关于大力发展装配式建筑的指导意见》,提出了“力争用10年左右时间,使装配式建筑占新建建筑比例达到30%”的目标^[1,2].结合装配式建筑的进展,文献[2]指出目前装配式建筑存在的的关键问题是缺乏设计—加工—装配一体化的技术体系.目前,研究装配式建筑技术主要集中于项目调度、配送优化、现场装配、成本等方面.如刘丹丹等研究BIM在装配式建筑设计与建造中的应用^[3],赵平和吴昊研究不确定环境下的装配式住宅项目调度研究,并设计了一种粒子群优化(Particle Swam Optimization, PSO)和差分进化(Differential-Evolution, DE)相结合的混合算法^[4],李萍萍针对装配式建筑PC构件的配送问题,建立了成本优化模型,并采用人工鱼群算法(Artificial Fish School Algorithm, AFSA)求解.陈艳等建立了装配式建筑成本控制的系统动力学模型,通过VEN-SIM软件进行仿真分析^[5].针对装配式建筑中的构件生产过程,许多学者结合装配式PC构件生产中的资源受限等约束问题,以流水车间调度(flowshop scheduling, FSP)^[7,8]、作业车间调度(job shop scheduling problem, JSSP)^[9]和柔性作业车间调度(flexible job shop scheduling problem, FJSSP)^[10]等为优化模型,研究装配式PC构件生产中的项目调度问题.然而,随着装配式建筑不断应用和推广,现场装配过程一些工具或装配废弃用品需要回收再利用,由此带来装配式建筑逆向物流问题.分析可见,很少有文献研究分布式装配式建筑优化问题.

近年来,分布式生产优化研究已经成为热点领域.随着PC构件厂商的不断升级,加工工厂一般分布在不同地段或地域,也迫切要求开展分布式装配式建筑优化的相关研究.Naderi和Ruiz分析了分布式流水车间调度问题(distributed permutation flow-shop scheduling problem, DPFSP)的模型,并给出了几种启发式规则^[11].之后,许多学者针对DPFSP开展相关研究^[12-14].然而,上述文献只针对一般流水车间调度问题开展研究,尚缺乏针对实际约束的装配式建筑生产问题的研究.

① 收稿日期:2018-03-20

基金项目:国家自然科学基金项目(61773192)资助

通讯作者:李俊青,男,汉族,博士,教授,研究方向:智能优化与调度,E-mail:1141231492@qq.com.

综上所述,分布式装配式建筑生产优化存在诸多热点问题,如分布式生产项目调度、分布式配送优化、分布式装配生产工厂选择、分布式装配式建筑逆向物流等问题,亟待深入开展研究.本文主要贡献如下:(1)针对装配式建筑构件生产中的逆向物流问题开展问题描述;(2)结合人工蜂群优化算法,设计一种离散人工蜂群算法;(3)提出了一种基于两级向量链表的十进制编码机制;(4)算法结合逆向物流特征和ABC特点,设计了8种邻域结构;(5)针对生产实例,开展算法性能测试研究.

1 逆向物流问题和人工蜂群算法

1.1 逆向物流问题研究现状分析

区别于正向物流,逆向物流通过建立从消费者到各级装配式建筑回收点的物流网络,实现资源回收或处理废弃物品,包括生产中的废品和副产品、缺陷产品或维修退回产品,以及过期、不合格产品等^[16-17].由于产品回收过程中,顾客需求的不确定性,回收渠道的复杂性,以及回收处理方式的多样性等特点,逆向物流比正向物流更复杂.逆向物流所面对的复杂问题中,选址问题是其核心问题,因而也得到了越来越多的国内外学者的关注和研究.

针对逆向物流网络,国内学者开展了大量研究,采用不同算法进行优化选址问题.文献[16]对逆向物流的三种回收模式,即第三方负责回收、零售商负责回收、生产商负责回收进行了分析比较.文献[17]建立了一种单产品、有能力限制的产品回收逆向物流网络,并给出了Benders分解算法.文献[18]则提出了三级逆向物流网络模型,并采用遗传算法(genetic algorithm, GA)进行求解和优化.文献[19]针对逆向物流网络的多期动态选址问题,基于遗传算法,采用二进制十进制混合编码的染色体方式进行求解.文献[20]则综合考虑产品回收逆向物流网络中的选址、存储、运输、服务等因素,采用模拟退火算法和启发式算法相结合的混合智能算法进行求解.文献[21]构建了一个以以旧换新为收购方式的新的逆向物流网络优化设计的混合整数非线性规划模型,采用启发式算法确定最优选址(位置和数量)和折扣价格.文献[22]研究制造商责任制和分销商责任制两种回收法律体系对制造商和分销商的影响.国外相关研究中,文献[23]研究了运输费用为分段线性函数的逆向物流网络问题,并给出了求解该问题的遗传算法.文献[24]为三级逆向物流网络建立了非线性整数规划模型,并给出了两阶段编码的遗传算法.文献[25]研究了双目标混合整数规划模型,并给出了文化基因算法(memetic algorithm, MA).文献[26]综合考虑正向、逆向物流网络问题,并给出了混合0-1规划模型.文献[27]给出了优化最大利润的混合整数规划模型.文献[28]则给出了多代理模型用于求解逆向物流问题.文献[29]构建了不确定条件下的多级逆向物流网络模型.文献[30]则针对需求不确定条件下的逆向物流网络模型问题开展了研究.

1.2 逆向物流问题描述

客户点、回收点和回收中心构成逆向物流网络模型的基本单元.客户产生的废旧产品、待维修产品、不合格产品或过期产品,收集并运输到附近的回收点.回收点合理地分布在若干客户区域附近,负责回收并存储管辖客户区域的回收产品,并定期将回收产品运送到邻近的回收中心.本模型综合考虑运输成本、存储成本、规模经济等因素,主要解决的问题有:(1)回收中心的数量及选址问题;(2)回收点的数量及选址问题;(3)回收点的存储周期的确定.图1所示为某逆向物流网络结构图.

1.3 人工蜂群算法研究现状

人工蜂群(Artificial Bee Colony, ABC)算法是一种新的群体智能优化方法,由Karaboga等于2005年首次提出,主要应用于求解连续函数优化问题^[31,32].潘全科等针对ABC方法应用到离散问题领域,提出了离散人工蜂群算法,并应用求解流水线调度^[33].李俊青等则把离散ABC方法应用到求解多目标柔性作业车间调度问题^[34]、铁水调度问题^[35]、带维修约束的柔性调度问题^[36]等领域.上述文献表明,ABC算法由于有效平衡了全局搜索和局部搜索能力,可以有效应用于求解复杂调度问题.

2 混合算法框架

基本ABC用于求解连续优化问题,因而,应用于求解离散选址优化问题需要进行离散化.结合问题特征,本文对基本ABC算法进行离散化设计.

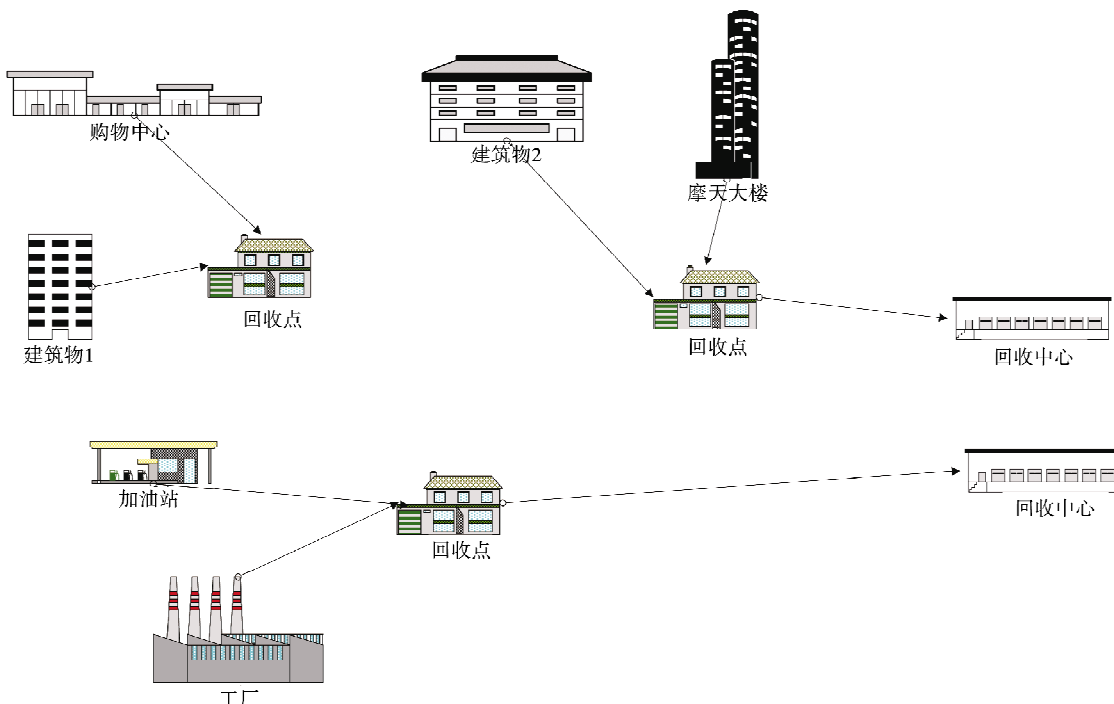


图1 逆向物流网络示意图

2.1 问题编码

问题编码采用两个链表向量的十进制编码方式,第一个链表向量描述各个装配式建筑回收中心所连接的装配式建筑回收点的记录,第二个链表向量则表达出各个装配式建筑回收点所连接的装配加工点信息. 给定一个3个装配式建筑回收中心,5个装配式建筑回收点,10个装配加工点的逆向物流网络,其编码如图2所示. 图中(a)表示装配式建筑回收中心编码,(b)表示装配式建筑回收点编码. 在装配式建筑回收中心编码中,分别建立了中心1和2,其中,装配式建筑回收中心1与装配式建筑回收点4相连,装配式建筑回收中心2连接的装配式建筑回收点有1和3. 在装配式建筑回收点向量中,装配式建筑回收点1与装配加工点4、7、8和10相连,装配式建筑回收点3与装配加工点5、6、和9相连,而装配加工点1、2和3则把回收产品运送到装配式建筑回收点4.

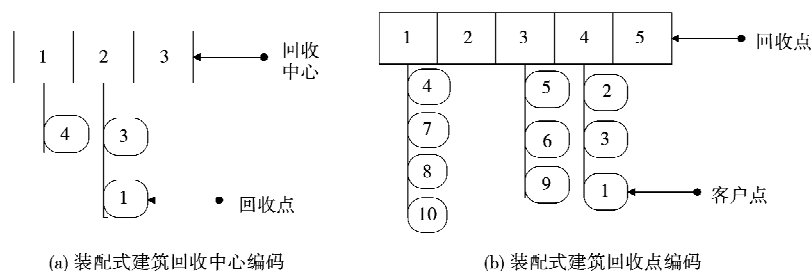


图2 问题编码

2.2 初始解的构造

包含两个链表向量的解的创建步骤如下:

步骤1 创建装配式建筑回收点编码向量:循环为每个装配加工点随机选择一个装配式建筑回收点,并记录到该装配式建筑回收点对应的链表下,直到所有装配加工点均已选择完毕.

步骤2 创建装配式建筑回收中心编码向量:循环每个有装配加工点记录的装配式建筑回收点,如图1中的装配式建筑回收点1、3和4,随机为其分配一个装配式建筑回收中心,并记录到该装配式建筑回收中心对应的链表中.

2.3 初始解集的建立

为了提高初始解集的多样性,避免解集的趋同性,本文采用如下随机解集产生策略:

步骤1 $C_{\text{at}}=1$,其中 C_{at} 表示当前解集中解的数量;

步骤2 如果 $C_{\text{at}}=SN$,终止初始过程,否则,随机产生一个解;

步骤3 如果产生的新解不同于当前解集中的任何解,则插入到当前解集,并设置 $C_{\text{at}}=C_{\text{at}}+1$;否则,忽略该解;

步骤4 跳转到步骤2.

2.4 邻域结构

结合问题结构特点,本文设计了8种邻域结构,定义如下:

(1) 交换装配式建筑回收点邻域,记为 N_1 .产生策略为:1) 在有装配式建筑回收点记录的装配式建筑回收中心集合中,随机选择两个装配式建筑回收中心,记为 r_1 和 r_2 ;2) 随机选择 r_1 对应链表中的任意一个装配式建筑回收点 p_1 ,把 p_1 移到 r_2 对应的链表中;3) 若删除 p_1 后, r_1 对应的链表为空,则清空 r_1 链表.

(2) 交换装配加工点邻域,记为 N_2 .产生策略为:1) 在有装配加工点记录的装配式建筑回收点集合中,随机选择两个装配式建筑回收点,记为 r_1 和 r_2 ;2) 随机选择 r_1 对应链表中的任意一个装配加工点 p_1 ,把 p_1 移到 r_2 对应的链表中;3) 若删除 p_1 后, r_1 对应的链表为空,则清空 r_1 链表.

(3) 新建装配式建筑回收中心邻域,记为 N_3 .产生策略为:1) 在没有装配式建筑回收点记录的装配式建筑回收中心集合中,随机选择一个,记为 r_1 ,在有装配式建筑回收点记录的装配式建筑回收中心集合中,随机选择一个,记为 r_2 ;2) 随机选择 r_2 对应链表中的任意一个装配式建筑回收点 p_1 ,把 p_1 移到 r_1 对应的链表中;3) 若删除 p_1 后, r_2 对应的链表为空,则清空 r_1 链表.

(4) 新建装配式建筑回收点邻域,记为 N_4 .产生策略为:1) 在没有装配加工点记录的装配式建筑回收点集合中,随机选择一个,记为 r_1 ,在有装配加工点记录的装配式建筑回收点集合中,随机选择一个,记为 r_2 ;2) 随机选择 r_2 对应链表中的任意一个装配加工点 p_1 ,把 p_1 移到 r_1 对应的链表中;3) 若删除 p_1 后, r_2 对应的链表为空,则清空 r_1 链表.

(5) 删除装配式建筑回收中心邻域,记为 N_5 .产生策略为:1) 在有装配式建筑回收点记录的装配式建筑回收中心集合中,随机选择两个装配式建筑回收中心,记为 r_1 和 r_2 ;2) 把 r_1 对应链表中的所有装配式建筑回收点移到 r_2 对应的链表中;3) 清空 r_1 对应的链表.

(6) 删除装配式建筑回收点邻域,记为 N_6 .产生策略为:1) 在有装配加工点记录的装配式建筑回收点集合中,随机选择两个装配式建筑回收点,记为 r_1 和 r_2 ;2) 把 r_1 对应链表中的所有装配加工点移到 r_2 对应的链表中;3) 清空 r_1 对应的链表.

(7) 移动装配式建筑回收中心邻域,记为 N_7 .产生策略为:1) 在没有装配式建筑回收点记录的装配式建筑回收中心集合中,随机选择一个,记为 r_1 ,在有装配式建筑回收点记录的装配式建筑回收中心集合中,随机选择一个,记为 r_2 ;2) 把 r_2 对应链表中的所有装配式建筑回收点移到 r_1 对应的链表中;3) 清空 r_2 对应的链表.

(8) 移动装配式建筑回收点邻域,记为 N_8 .产生策略为:1) 在没有装配加工点记录的装配式建筑回收点集合中,随机选择一个,记为 r_1 ,在有装配加工记录的回收的集合中,随机选择一个,记为 r_2 ;2) 把 r_2 对应链表中的所有装配加工点移到 r_1 对应的链表中;3) 清空 r_2 对应的链表.

2.5 HDABC 框架流程

本文给出的 HDABC 算法流程如下:

步骤1 初始化实验参数,生产初始解集;

步骤2 若终止条件满足,则结束算法,否则,执行步骤3-6;

步骤3 给当前解集中每个解分派雇佣蜂,执行挖掘搜索工作;

步骤4 分派跟随蜂,进一步挖掘更新后的解集;

步骤 5 如果满足派出侦察蜂的条件,则随机选择一种侦察蜂策略,开展进一步强化搜索;
步骤 6 返回步骤 2.

3 实验分析

3.1 实验设置

以 VC++6.0 为开发环境,采用 Intel Core i5 3.3 GHZ、4GB RAM 的 PC 机,实现了求解装配式建筑逆向物流网络选址问题的 HDABC 算法,算法参数设置如下:(1) 初始解集大小=5;(2) 雇佣蜂数量=5;(3) 跟随蜂数量=5;(4) 侦查蜂数量=1;(5) 侦察蜂派出时机:某个解超过 10 s 没有更新;(6) 局部搜索策略相关参数:雇佣蜂、跟随蜂循环次数 $T_i=10$, 侦察蜂循环次数 $T_r=50$, 邻域解集大小 $T_n=10$;(7) 结束条件:运行时间超过 150 s.

3.2 实例结果分析

本节采用文献[20]中相同的实例(以下简称实例 I),进行实验对比分析.实验环境描述如下:某企业共有 10 个装配加工点,5 个备选装配式建筑回收点和 3 个备选装配式建筑回收中心.相关坐标信息与产品数量参见文献[6].每个装配式建筑回收点的年运营费用为 2 万元,每个装配式建筑回收中心的运营费用为 30 万元.单位产品的日存储费用为 10 元,年工作日为 250 天,装配加工点人工费用为单位产品 10 元,每个装配式建筑回收点服务覆盖半径为 12.5 km,装配加工区的单位产品惩罚成本为 500 元,装配式建筑回收中心的最大容量为 1 000,装配式建筑回收点的最大容量为 200,规模效应因子参见文献[6],其中参数 $e=100$.

本节实验分两部分:

(1) 实例 I,实验约束条件与文献[20]相同;

(2) 实例 II,约束如下:1) 增加了装配式建筑回收点容量约束;2) 去掉惩罚成本,回收产品从装配加工点运送到装配式建筑回收中心的运输费用的规模经济函数参数设置如

$$\omega = \begin{cases} 1, & v_i \leq 100, \\ 0.95, & 100 < v_i \leq 200, \\ 0.90, & v_i > 100, \end{cases} \quad \xi = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq 12.5, \\ 10, & 12.5 < d_{ij} \leq 25, \\ 20, & d_{ij} > 25. \end{cases}$$

3.2.1 实例 I.在与文献[20]相同的实验条件下,运行 HDABC 算法 10 次,得到的实验结果如表 1 所示.由表 1 可知,HDABC 算法可以在极短的时间内获得相对稳定的优质解,验证了算法的鲁棒性.表 2 给出了 HDABC 算法与文献[20]给出的 H-S 算法的比较分析.由表 2 可知,HDABC 算法在求解结果的最小值、最大值、平均值以及计算时间等性能指标上,都明显优于 H-S 算法,结果比较验证了算法的求解实际问题的能力.表 3 给出了 HDABC 获得的最好解(总成本=822 万元)的具体含义.图 3 则给出了最好解的网络结构图.

表 1 实验结果统计

运行次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
总成本/万元	822	822.8	822.95	822.6	822.6	822.8	822.6	823.75	822.95	822.6	822.77
计算时间/s	0.13	0.15	0.26	0.78	0.15	1.2	0.95	0.34	0.11	0.08	0.415

表 2 实验结果统计对比

实例	II-S				IIDABC			
	最小值	最大值	平均值	计算时间	最小值	最大值	平均值	计算时间
实例 1	822.60	825.15	823.59	16.7	822	823.75	822.77	0.415

3.2.2 实例 II.表 4 给出了 HDABC 求解实例 II,10 次独立运行的运算结果.由表 4 可见,HDABC 在求解实例 II 中,可以在极短的运算时间内获得较为稳定的高质量的解.表 5 给出了求解实例 II 获得的最好解

的含义,图 4 则给出了该最好解(总成本:1 353.85 万元)的网络结构图.

表 3 最好解的具体含义

项目	数据
建立的装配式建筑回收点的个数	3
建立的装配式建筑回收中心的个数	1
装配式建筑回收点:存储周期	{(1;1), (4;1), (5;1)}
装配式建筑回收点:分配的装配加工点	{(1;5,7,8), (4;3,9), (5;1,2,4,6,10)}
装配式建筑回收点:接收的产品数量	{(1;78), (4;69), (5;115)}
装配式建筑回收中心:分配的装配式建筑回收点	{(1;1,4,5)}
装配式建筑回收中心:接收到的产品数量	{1;262}
装配式建筑回收点的运营成本/万元	6
装配式建筑回收中心的运营成本/万元	30
人工成本/万元	65.5
存储成本/万元	65.5
惩罚成本/万元	0
运输成本/万元	655
总成本/万元	822

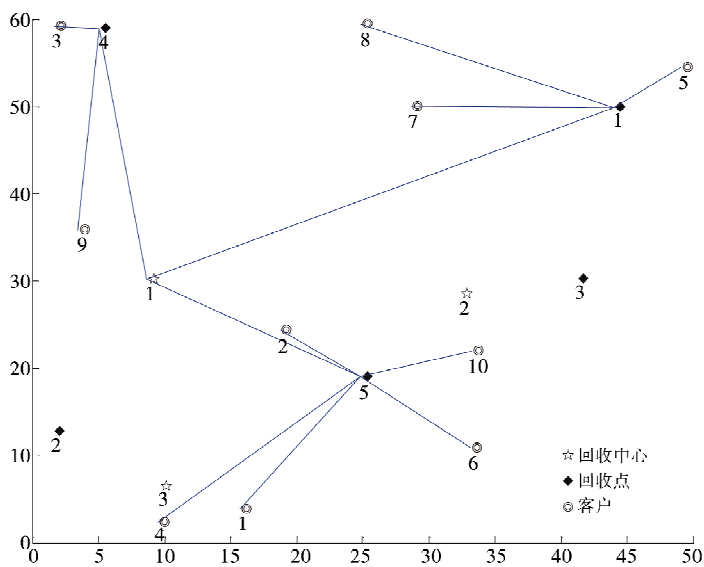


图 3 实例 I 最好解的逆向物流网络结构图(总成本=822 万元)

表 4 实验结果统计

运行次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均
总成本(万元)	1 416.28	1 353.85	1 520.3	1 472	1 499.75	1 453.3	1 511.5	1 453.3	1 524.5	1 353.85	1 455.86
计算时间(秒)	0.25	0.18	0.08	0.11	0.2	0.7	0.00	0.03	0.11	0.28	0.194

4 结论

本文给出了一种混合离散人工蜂群算法用于求解装配式建筑逆向物流网络选址问题,主要贡献包括:提出了一种有效的两阶段向量的编码结构;设计了性能良好的邻域结构;构建了新的雇佣蜂、跟随蜂和侦察蜂策略.通过现实生产实例和随机实例的测试,并与当前文献典型算法对比分析,验证了算法的有效性和稳定性.下一步的工作是继续优化提出的混合算法,并应用算法求解装配式建筑逆向物流网络中多目标问题.

表 5 最好解的具体含义

项目	数据
建立的装配式建筑回收点的个数	3
建立的装配式建筑回收中心的个数	1
装配式建筑回收点:存储周期	{(1;5), (4;5), (5;5)}
装配式建筑回收点:分配的装配加工点	{(1;5,7), (4;3,8,9), (5;1,2,4,6,10)}
装配式建筑回收点:接收的产品数量	{(1;56), (4;91), (5;115)}
装配式建筑回收中心:分配的装配式建筑回收点	{(1;1,4,5)}
装配式建筑回收中心:接收到的产品数量	{1;262}
装配式建筑回收点的运营成本/万元	6
装配式建筑回收中心的运营成本/万元	30
人工成本/万元	65.5
存储成本/万元	196.5
装配加工点到装配式建筑回收点运输成本/万元	453.75
装配式建筑回收点到装配式建筑回收中心运输成本/万元	602.1
总成本/万元	1 353.85

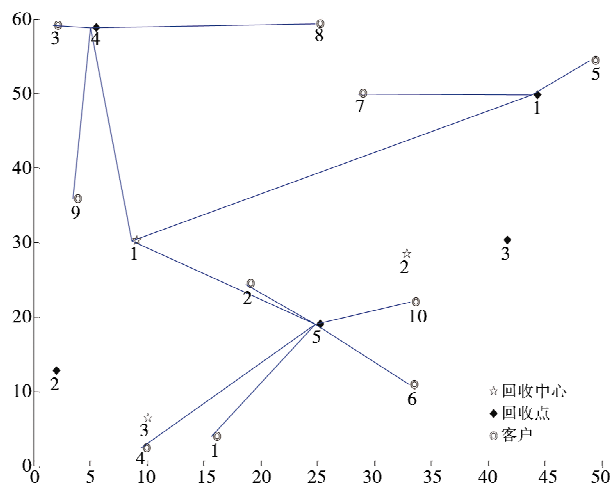


图 4 实例 II 最好解的逆向物流网络结构图(总成本=1 353.85 万元)

参 考 文 献

- [1] 国办发. 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[EB/OL]. <http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-09/30/content5114118.htm>.
- [2] 叶浩文,周冲. 装配式建筑的设计-加工-装配一体化技术[J]. 施工技术, 2017, 46(9):17-19.
- [3] 刘丹丹,赵永生,岳莹莹,等. BIM技术在装配式建筑设计与建造中的应用[J]. 建筑结构, 2017(15):36-39.
- [4] 赵平,吴昊. 差分进化混合粒子群算法求解装配式住宅项目进度优化问题[J]. 计算机工程与科学, 2016, 38(7):1495-1501.
- [5] 李萍萍. 装配式PC构件配送成本优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2016.
- [6] 陈艳,王宇,贾磊. 基于系统动力学的装配式建筑成本控制研究[J]. 价值工程, 2017, 36(32):1-5.
- [7] Yang Z, Ma Z, Wu S. Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production[J]. Automation in Construction, 2016, 72: 321-329.
- [8] Chen J H, Yang L R, Tai H W. Process reengineering and improvement for building precast production[J]. Automation in Construction, 2016, 68: 249-258.
- [9] Arashpour M, Wakefield R, Abbasi B, et al. Off-site construction optimization: Sequencing multiple job classes with time constraints [J]. Automation in Construction, 2016, 71: 262-270.
- [10] Anvari B, Angeloudis P, Ochieng W Y. A multi-objective GA-based optimisation for holistic Manufacturing, transportation and

- Assembly of precast construction[J]. *Automation in Construction*, 2016, 71: 226-241.
- [11] Naderi B, Ruiz R. The distributed permutation flowshop scheduling problem[J]. *Computers & Operations Research*, 2010, 37(4): 754-768.
- [12] Ying K C, Lin S W, Cheng C Y, et al. Iterated reference greedy algorithm for solving distributed no-idle permutation flowshop scheduling problems[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2017, 110: 413-423.
- [13] Komaki M, Malakooti B. General variable neighborhood search algorithm to minimize makespan of the distributed no-wait flow shop scheduling problem[J]. *Production Engineering*, 2017(10): 1-15.
- [14] Lin J, Wang Z J, Li X. A backtracking search hyper-heuristic for the distributed assembly flow-shop scheduling problem[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2017, 36: 124-135.
- [15] 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.
- [16] 姚卫新. 再制造条件下逆向物流回收模式的研究[J]. *管理科学*, 2004, 17(1): 76-80.
- [17] 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.
- [18] 戴守峰, 李峰, 董玉龙, 等. 基于遗传算法的三级逆向物流网络设计模型研究[J]. *中国管理科学*, 2007, 15(6): 86-91.
- [19] 李波, 曾成培. 一种逆向物流网络的多期动态选址方法[J]. *管理科学学报*, 2008, 11(5): 76-84.
- [20] 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.
- [21] 熊中楷, 方衍, 张聪. 以旧换新收购方式下的逆向物流网络优化设计[J]. *中国管理科学*, 2011, 19(6): 65-72.
- [22] 汪翼, 孙林岩, 杨洪焦, 等. 不同回收法律下的再制造供应链决策与合作研究[J]. *管理科学*, 2009, 22(1): 2-8.
- [23] Honkey M, Hyun J, Chang S. A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns[J]. *Omega*, 2006, 34(1): 56-69.
- [24] Lee Jeong-Eun, Gen Mitsuo, Rhee Kyong-Gu. Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 56(3): 951-964.
- [25] Mir Saman Pishvaei, Reza Zanjirani Farahani, Wout Dullaert. A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design[J]. *Computers & Operations Research*, 2010, 37(6): 1100-1112.
- [26] Zhang Z, Hui Y V, Chen H. A forward and reverse logistics shipment planning model[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2013, 64(10): 1485-1502.
- [27] Das Kanchan, Chowdhury Abdul H. Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product mix planning[J]. *International Journal of Production Economics*, 2012, 135(1): 209-221.
- [28] Mishra N, Kumar V, Chan F T S. A multi-agent architecture for reverse logistics in a green supply chain[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(9): 2396-2406.
- [29] Lieckens K, Vandaele N. Multi-level reverse logistics network design under uncertainty[J]. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(1): 23-40.
- [30] Sónia R C, Ana Paula F D, Barbosa-Póvoa, et al. Design and planning of supply chains with integration of reverse logistics activities under demand uncertainty[J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 226(3): 436-451.
- [31] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2009-10-14.
- [32] Karaboga D, Basturk B. On The performance of Artificial Bee Colony (ABC) algorithm[J]. *Applied Soft Computing*, 2008, 8(1): 687-697.
- [33] Pan Quanke, Wang Ling, Li Junqing, et al. A novel discrete artificial bee colony algorithm for the hybrid flowshop scheduling problem with makespan minimization[J]. *OMEGA-International Journal of Management Science*, 2014, 45: 42-56.
- [34] Li Junqing, Pan Q K, Gao K Z. Pareto-based discrete artificial bee colony algorithm for multi-objective flexible job shop scheduling problems[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011, 55 (9-12): 1159-1169.
- [35] Li Junqing, Pan Q K, Duan P Y. An improved artificial bee colony algorithm for solving hybrid flexible flowshop with dynamic operation skipping[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(6): 1311-1324.
- [36] Li Junqing, Pan Quanke, Tasgetiren M F. A discrete artificial bee colony algorithm for the multi-objective flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(3): 1111-1132.

Solving Reverse Logistic Problem in Prefabricate System by a Discrete Artificial Bee Colony Algorithm

LI Jun-qing

(School of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract In this paper, we propose a hybrid discrete artificial bee colony (HDABC) algorithm for solving the location allocation problem in reverse logistic network system in a typical distributed prefabricated system. In the hybrid algorithm, a two level vector based integral encoding method is proposed. Eight neighborhood structures considering the problem structure and the ABC algorithm features are designed. Then, the proposed algorithm is tested on two realistic instances. The performance comparisons with other efficient algorithms are provided. It is concluded that the proposed algorithm holds efficient performance for the problem considered, in terms of searching quality, robustness and convergence ability.

Key words Prefabricate system; reverse logistic; distributed scheduling; artificial bee colony algorithm

(上接第 90 页)

[17] He Z, Fu J, Cheng B, et al. $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ clusters: novel noble-metal-free cocatalysts for efficient photocatalytic hydrogen production from water splitting[J]. *Applied Catalysis B Environmental*, 2016, 205: 104-111.

Preparation of $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3\text{-Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ Photocatalysts and Their Performances of Photocatalytic Hydrogen Production from Water Splitting

SHAO Zhu-wang PU Xi-peng ZHANG Da-feng ZENG Tian-tian HE Yin-na YANG Ya-nan

(School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract To improve photocatalytic hydrogen production activity of $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$, $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3\text{-Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ photocatalysts was in-situ synthesized via a precipitation method. The structure, morphology, optical absorption properties and properties of photocatalytic hydrogen production were characterized by XRD, SEM, DRS and GC. The influence of the $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ content on photocatalytic performance was studied and its mechanism as cocatalyst was discussed. The results showed that Cu^{2+} in $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ could be reduced to Cu^+/Cu^0 by obtained e^- from $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$, thus accelerating the hydrogen production rate of $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$. The sample with the molar ratio of $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3/\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ of 0.25% has the highest photocatalytic performance.

Key words $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$; cocatalysts; photocatalytic water splitting; mechanism

(上接第 96 页)

A Dual Chemosensor for Detecting Cu^{2+} and Hg^{2+} based on Fluorescein Functionalized Water-soluble Polymer

BAI Li-ping QIN Xiu-zhi LI Xiu ZHOU Na TAO Fa-rong LI Guang

(School of Materials Science and Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract A novel fluorescein functionalized polyethylene glycol PEGSFl was synthesized by the polymer-modification strategy. The detection properties of PEGSFl for metal ions in pure aqueous solution were characterized using UV-vis absorption spectra and Fluorescent spectra. As a colorimetric chemosensor, PEGSFl could selective detect Cu^{2+} and Hg^{2+} , and PEGSFl also showed remarkable selectivity towards Hg^{2+} as a fluorescent chemosensor. The high selectivity of PEGSFl to Cu^{2+} and Hg^{2+} was not influenced by other competitive metal ions. Furthermore, test papers were fabricated facilely using PEGSFl for convenient and qualitative detection of Cu^{2+} and Hg^{2+} .

Key words Cu^{2+} ; Hg^{2+} ; water-soluble polymer; fluorescein; test paper