

# 控制与决策

Control and Decision

## 考虑碳限额的制造/再制造混合系统生产优化决策

郭钧, 王建国, 杜百岗, 李益兵

引用本文:

郭钧, 王建国, 杜百岗, 等. 考虑碳限额的制造/再制造混合系统生产优化决策[J]. *控制与决策*, 2021, 36(9): 2249–2256.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1457>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 面向建材装备集团制造的分布式多项目资源调度

Distributed multi-project resource scheduling oriented to manufacturing of building materials equipment group

*控制与决策*. 2021, 36(9): 2133–2142 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1802>

### 混合碳政策下制造商低碳转型的技术选择策略

Technology selection in low carbon transition of the manufacturer under mixed carbon policy

*控制与决策*. 2021, 36(7): 1763–1770 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1536>

### 考虑绿色网络效应的再制造产品最优生产决策及产品之间的竞争

Optimal production for remanufacturing products and competition among consumers in the presence of green network effect

*控制与决策*. 2021, 36(4): 993–1002 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0366>

### 考虑绿色网络效应的再制造产品最优生产决策及产品之间的竞争

Optimal production for remanufacturing products and competition among consumers in the presence of green network effect

*控制与决策*. 2021, 36(4): 993–1002 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0366>

### 求解约束优化问题的改进果蝇优化算法及其工程应用

Improved fruit fly optimization algorithm for solving constrained optimization problems and engineering applications

*控制与决策*. 2021, 36(2): 314–324 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0557>

# 考虑碳限额的制造/再制造混合系统生产优化决策

郭 钧, 王建国, 杜百岗<sup>†</sup>, 李益兵

(1. 武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430100; 2. 武汉理工大学  
数字制造湖北省重点实验室, 武汉 430100)

**摘要:** 针对碳限额交易机制下制造/再制造混合系统生产决策问题,以最大化总利润和最小化碳排放量为目标,考虑客户需求差异以及碳减排技术投入成本和收益的影响,建立多周期产品制造/再制造混合系统生产决策优化模型. 根据模型特点,结合多种群协同进化思想,设计一个多种群混合布谷鸟算法(multi-population hybrid cuckoo search, MPHCS)进行求解. 提出一种自定义偏好随机游走策略,增加优秀个体对全局搜索的影响,以优秀个体指导种群进化,实现各子种群信息共享;采用自适应公式更新步长,防止陷入局部最优;同时引入基于Logistic映射的混沌搜索,用于对MPHCS算法全局搜索发现的优质解区域进行精细搜索,提高局部搜索能力. 最后通过实例仿真验证了所提出模型和算法的合理性和有效性.

**关键词:** 制造/再制造混合系统; 生产决策; 碳限额交易政策; 混合布谷鸟算法

中图分类号: TP391; F224

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1457

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



**引用格式:** 郭钧,王建国,杜百岗,等. 考虑碳限额的制造/再制造混合系统生产优化决策[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2249-2256.

## Production optimization decision of manufacturing/remanufacturing under carbon emission permits

GUO Jun, WANG Jian-guo, DU Bai-gang<sup>†</sup>, LI Yi-bing

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430100, China;  
2. Hubei Digital Manufacturing Key Laboratory, Wuhan University of Technology, Wuhan 430100, China)

**Abstract:** In view of the production decision-making problems of manufacturing/remanufacturing hybrid systems under the carbon cap-and-trade mechanism, a production decision-making optimization model of multi-cycle manufacturing/remanufacturing hybrid systems is proposed to maximize the total profit and minimize carbon emission considering the impact of customer demand differences and input costs and benefits of carbon emission reduction technology. According to the characteristics of the model and the thought of multi-population co-evolution, a multi-population hybrid cuckoo search (MPHCS) algorithm is designed to solve the problem. A custom preference random walk strategy is proposed to increase the influence of excellent individuals on global search, so as to guide population evolution and realize information sharing among subpopulations. The adaptive formula is used to update the step size to prevent falling into local optimum. Moreover, the chaos search based on Logistic mapping is introduced to carry out fine search on the high-quality solution region found by the global search of the MPHCS algorithm and improve local search ability. Finally, an example is given to illustrate the rationality and effectiveness of the proposed model and algorithm.

**Keywords:** manufacturing/remanufacturing hybrid production; production decision; carbon emission permits; hybrid cuckoo search algorithm

## 0 引言

随着全球气候变暖、空气污染等环境问题日益凸显,减少碳排放已成为一项严峻挑战. 再制造作为一种资源循环利用的有效方式,不仅具有显著的碳减

排效益,而且是生产方式向低碳转型的有效途径. 企业通过制造/再制造对资源混合利用,一方面可以实现企业的利益最大化,另一方面实现国家的减排要求. 与此同时,随着碳政策相关法律法规的颁布以及

收稿日期: 2019-10-18; 修回日期: 2020-02-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705386); 中国国家留学基金项目(201606955091); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018-IVB-010).

责任编辑: 李勇建.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: dbg767@163.com.

消费者日益认同并倾向于购买低碳产品等外部因素的影响,企业开始对新产品和再制造品的生产进行减排技术投入,以期减少单位产品的碳足迹,从而实现经济与环境的共同发展.因此,在碳限额交易政策下,研究减排技术投入对混合制造系统生产优化决策的影响十分必要.

近年来,国内外许多学者对制造/再制造混合系统生产决策问题进行了研究.在模型构建方面,Macedo等<sup>[1]</sup>研究了需求、回收率及设置成本随机情形下的制造/再制造混合生产决策模型;陈伟达等<sup>[2]</sup>在再制造生产率和市场需求不确定情况下,研究考虑了资金时间价值的企业制造/再制造生产决策优化;阳成虎等<sup>[3]</sup>分析了不同再制造渠道结构下再制造产品对顾客的新产品感知价值的促进或抑制作用,建立了相应的制造/再制造优化模型;Polotski等<sup>[4]</sup>研究了带调整时间的回收品占优混合制造系统生产决策模型;许民利等<sup>[5]</sup>分析了3种再制造产品生产模式下,再制造产品支付意愿和产品质量对生产决策及利润的影响.上述文献主要考虑客户需求、产品质量、换代周期、资金时间价值等传统因素对混合制造系统生产决策的影响.随着节能减排受到全球关注,越来越多的学者开始研究碳排放对混合系统生产决策的影响.针对碳限额政策下的生产决策问题,申成然等<sup>[6]</sup>构建了碳排放约束下的两周期制造/再制造生产决策模型;Chang等<sup>[7]</sup>对需求可替代与不可替代两种市场分别建立了利润最大化模型,研究碳限额交易政策对混合制造生产决策的影响;Yenipazarli<sup>[8]</sup>研究了碳税政策对再制造产品生产和定价决策的影响;Wang等<sup>[9]</sup>研究了资本和碳排放共同约束下的混合系统生产决策问题;Drake等<sup>[10]</sup>研究了碳税政策和碳限额交易政策对企业减排技术选择的影响.上述文献主要是研究碳排放约束下的生产决策问题,对于碳限额交易下考虑减排技术投入的制造/再制造混合系统生产优化问题的相关研究较少.减排技术的投入关系到企业减排成本、制造/再制造过程中碳排放量、生产计划以及用户需求的变化等,是企业制造/再制造生产决策的重要因素.因此,对于碳限额下研究减排技术投入成本对混合系统生产优化决策是至关重要的.

在模型的求解算法方面,钟精诚等<sup>[11]</sup>建立了不确定换代周期下的短生命周期产品的制造/再制造混合生产决策模型,并设计了一种混合遗传人工鱼算法对模型求解;Turki等<sup>[12]</sup>考虑了受碳排放约束新品和再制品随机需求下的混合系统生产决策模型,提出了一种离散化与随机搜索相结合的混合算法求解模

型;景熠等<sup>[13]</sup>针对多重不确定环境下制造/再制造混合生产场景中的批量计划问题,将自适应机制引入双倍体遗传算法对模型进行了求解;刘林等<sup>[14]</sup>在碳排放交易机制下,建立了考虑企业生产能力的多周期产品制造/再制造混合生产优化模型,提出了一种改进的离散化引力搜索算法求解模型.

布谷鸟算法(cuckoo search, CS)是一种新型的群智能优化算法,它通过模拟布谷鸟巢寄生生育雏行为,结合鸟类、果蝇等的Lévy flights机制进行寻优操作,其具有参数少、结构简单的优点<sup>[15-16]</sup>,在工程优化方面得到了广泛应用<sup>[17-19]</sup>.CS具有较强的全局搜索能力,但与其他启发式算法一样,也面临着局部搜索能力相对较弱的问题,如在寻优域较大或进化到后期时导致寻优精度较低、搜索速度较慢.因此,结合本文所研究的问题性质以及布谷鸟算法的不足,本文在算法结构上采用多种群协同进化的思想,提出一种多种群混合布谷鸟算法(multi-population hybrid cuckoo search, MPHCS).通过各子种群之间的信息共享机制,以优秀个体指导种群进化,并采用自适应公式更新步长,防止陷入局部最优;用新的策略公式实现偏好随机游走更新种群,以突出最优个体对全局搜索的影响,提高算法收敛速度;用基于Logistic映射的混沌搜索加强局部搜索,实现区间内无重复遍历,具有一定的随机性和规律性,以提高算法局部搜索能力.

综上所述,本文在客户需求差异和库存成本等影响因素的基础上,建立碳限额交易政策下考虑减排技术投入成本影响的制造/再制造混合系统生产优化决策模型,并根据决策模型中搜索空间高度复杂的特点,提出一种多种群协同进化混合布谷鸟算法对模型进行求解.

## 1 模型构建

### 1.1 问题描述

制造和再制造过程中都会产生碳排放量,由于再制造一般是对旧产品进行清洗和修复等,所产生的碳排放量要低于制造过程.为了引导企业进行低碳生产,政府实施碳限额交易政策.即政府对企业碳排放量上限进行规定,若生产活动中排放的碳量超过上限,则需要在碳交易市场中购买超出的碳排放指标;反之,可以出售未使用完的碳排放指标.在环境效益和经济效益的驱动下,企业对新产品或再制品生产时进行减排技术投入,其制造/再制造混合生产系统如图1所示.

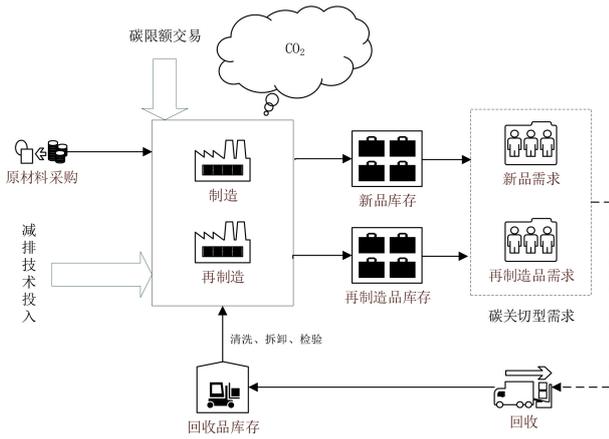


图1 碳限额交易政策下混合生产系统流程

根据本文所研究的模型问题,作如下假设:

- 1) 将再制造成品数量与投入量的比值称为再制造率;
- 2) 减排技术投入只在生产期前决定.

1.2 参数定义

制造/再制造系统生产计划模型中所涉及的基本符号及其含义如下.

1) 决策变量.

$q_t^j$ : 第  $t$  期  $j$  类产品的生产数量, 其中

$$j = \begin{cases} 0, & \text{新产品} \\ 1, & \text{再制品} \end{cases};$$

$\xi^j$ :  $j$  类产品低碳技术投入因子,  $\xi^j \in [0, 1]$ ;

$s_t^j$ : 第  $t$  期  $j$  类产品的销售价格.

2) 参数及状态变量.

$T$ : 计划期,  $t = 1, 2, \dots, T$ , 指生产的总周期数;

$\theta_t$ : 第  $t$  期再制品的再制造率,  $0 < \theta_t < 1$ ;

$\sigma_t$ : 第  $t$  期回收产品的可再制造率,  $0 < \sigma_t < 1$ ;

$D_t^j$ : 第  $t$  期  $j$  类产品的市场需求量;

$C_{vt}$ : 第  $t$  期废旧产品的单位回收成本;

$u_t$ : 第  $t$  期废旧产品的回收数量;

$C_{rt}$ : 第  $t$  期回收产品的单位再制造成本;

$C_{mt}$ : 第  $t$  期新产品的单位制造成本;

$C_t^{in}$ : 第  $t$  期回收产品的单位检验成本;

$\varphi_t$ : 第  $t$  期回收产品的再制造处理系数,  $\varphi_t^p > 0$ ;

$\eta_t$ : 企业设置的第  $t$  期回收产品质量差异率;

$w_t$ : 第  $t$  期需要购买的碳排放指标数量;

$C_t^g$ : 购买碳排放指标的单位成本和卖出碳排放指标的单位收益;

$\alpha$ : 无低碳技术投入时每生产单位新产品所产生的碳排放量;

$\beta$ : 无低碳技术投入时每生产单位再制造产品所产生的碳排放量, 且  $\beta < \alpha$ ;

$\bar{\lambda}_j$ :  $j$  类产品库存的最大容量;

$\lambda_t^j$ : 第  $t$  期末  $j$  类产品的库存量;

$C_t^j$ : 第  $t$  期  $j$  类产品的单位库存成本;

$C_{st}$ : 第  $t$  期产品库存成本;

$\pi_t$ : 第  $t$  期碳排放量标准值;

$C^{ts}$ : 低碳技术投入设定成本;

$C_{dt}^j$ : 第  $t$  期  $j$  类产品的缺货成本;

$C_{d0t}^j$ : 第  $t$  期  $j$  类产品单位缺货成本;

$\varepsilon_t$ : 第  $t$  期再制品的消费者偏好系数,  $\varepsilon_t^p \in (0, 1)$ ;

$\delta_t^j$ : 减排技术投入对第  $t$  期  $j$  类产品市场需求的扰动系数,  $\delta_t^j > 0$ ;

$C_t^j(\xi^j)$ : 减排技术投入对第  $t$  期  $j$  类产品的市场需求扰动函数.

1.3 生产决策模型

本文在已有的生产决策研究的基础上, 基于碳限额交易政策, 考虑减排技术投入成本带来的阶段性影响以及生产系统中各影响因素的复杂关联而导致的多重不确定性, 以新产品和再制造产品的生产数量、市场定价和减排技术投入因子作为决策变量, 以生产系统利润最大化和碳排放量最小化作为优化目标, 建立制造/再制造混合生产决策模型.

1.3.1 减排技术投入

减排技术投入可以用减排技术投入因子来描述, 其与减排投入成本呈递增函数关系<sup>[20]</sup>. 因此, 本文将投入成本与减排技术投入因子之间的关系表示为

$$C(\xi^j) = C^{ts}\xi^j - 1, \xi^j \in [0, 1]. \quad (1)$$

碳排放不仅关系到企业减排要求, 也关系到企业碳排放成本. 对制造、再制造进行减排技术投入可以影响生产过程中碳排放量<sup>[21]</sup>, 因此, 其碳排放量的大小与减排技术投入因子的关系可表示为

$$\begin{cases} f(\xi^0) = \alpha^{1-(\xi^0/2)}, \\ f(\xi^1) = \beta^{1-(\xi^1/2)}. \end{cases} \quad (2)$$

1.3.2 市场需求

假设异质性消费者对于新产品和再制品有不同的心理价位, 且消费者对第  $t$  期新产品的价值评价服从  $[0, 1]$  的均匀分布, 对再制品的偏好系数为  $\varepsilon_t$ . 在每一个产品周期内, 产量必须满足一定的市场需求. 当市场上同时存在新产品与再制造产品时, 异质性消费者会优先选择购买价值效用高的产品, 而价值效用取决于产品价格和消费者偏好系数. 在考虑到产品碳足迹对消费者购买心理的影响下, 认为市场需求是价格和碳足迹的线性函数<sup>[22]</sup>. 而产品碳足迹

与减排技术投入因子相关,因此,市场需求函数定义为产品价格和减排技术投入因子共同影响下的函数,即

$$D_t^j(s_t^j, \xi^j) = D_{jt}(s_t^j) + \delta_t^j G_t^j(\xi^j), \quad (3)$$

其中  $D_{jt}$  为第  $t$  期  $j$  类产品市场需求受价格影响的部分. 市场需求是由产品偏好系数和市场价格共同决定的,可以表示为

$$D_{0t}(s_t^j) = [(s_t^0 - s_t^1)/(1 - \varepsilon_t)], \quad (4)$$

$$D_{1t}(s_t^j) = (\varepsilon_t s_t^0 - s_t^1)/[\varepsilon_t(1 - \varepsilon_t)]. \quad (5)$$

### 1.3.3 生产过程成本

生产过程成本由废旧产品回收成本、检验成本、再制造成本、新产品加工成本、库存成本(包含新产品和再制品库存成本)以及未到达市场需求的缺货成本组成.

企业从消费者手中回收废旧产品,由于各回收产品使用年限不同,回收的废旧产品损耗程度也不同,导致了再制造单位加工成本的不确定性. 因此,引入回收产品的质量差异率,将单位再制造加工成本表示为再制造处理系数  $\varphi_t$  线性影响下关于质量差异率  $\eta_t$  的指数函数形式,有

$$C_{rt} = \varphi_t e^{\eta_t}. \quad (6)$$

企业根据市场需求生产规划产品,而市场需求在价格和减排技术投入扰动下具有不确定性,使得生产的实际数量与市场需求之间存在差异. 因此,当前期库存量与当期生产量之和少于当期需求量时会产生缺货成本,而多于当期需求量时会产生库存成本. 由下式可以表示:

缺货成本

$$C_{dt}^j = \begin{cases} [D_t^j - (q_t^j + \lambda_{t-1}^j)]C_{d0t}^j, & D_t^j > q_t^j + \lambda_{t-1}^j; \\ 0, & D_t^j \leq q_t^j + \lambda_{t-1}^j. \end{cases} \quad (7)$$

库存成本

$$C_{st}^j = \lambda_t^j C_t^j. \quad (8)$$

### 1.3.4 目标函数

在碳限额交易政策下,混合生产系统不仅要考虑各决策变量之间的错综复杂关系,还需要考虑减排技术投入成本对系统从生产到销售整体流程的影响. 同时,为了积极响应低碳生产要求,承担社会责任,降低碳排放量,将以下两个运作目标作为经济指标和环境指标.

目标1:系统的总利润最大化. 用模型表示为

$$P = \max \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_j \{[\min(D_t^j, q_t^j + \lambda_{t-1}^j)]s_t^j - (C_{dt}^j + C_{st}^j)\} - (q_t^0 C_{mt} + q_t^1 C_{rt}) - (C_{vt} u_t + C_t^{in} u_t) - w_t C_t^g \right\} - [C(\xi^0) + C(\xi^1)]. \quad (9)$$

其中:  $[\min(D_t^j, q_t^j + \lambda_{t-1}^j)]s_t^j$  代表产品的总收益,  $(C_{dt}^j + C_{st}^j)$  代表产品总的缺货成本和库存成本,  $(q_t^0 C_{mt} + q_t^1 C_{rt})$  代表总的制造和再制造成本,  $(C_{vt} u_t + C_t^{in} u_t)$  代表总的回收成本和检验成本,  $w_t C_t^g$  代表总的碳排放成本,  $[C(\xi^0) + C(\xi^1)]$  代表生产期前减排投入成本.

目标2:制造/再制造过程中产生的碳排放量. 碳排放量越小,表明企业承担社会责任越多,企业低碳生产实施得越好. 有

$$E = \min \sum_{t=1}^T [q_t^0 f(x^0) + q_t^1 f(x^1)]. \quad (10)$$

$$\text{s.t. } q_t^1 = u_t \sigma_t \theta_t, \quad (11)$$

$$0 < l e \lambda_t^j \leq \bar{\lambda}_j, \quad (12)$$

$$\lambda_t^j = \lambda_{t-1}^j + q_t^j - D_t^j, \quad (13)$$

$$w_t = q_t^0 f(\xi^0) + q_t^1 f(\xi^1) - \pi_t. \quad (14)$$

式(11)表示每个周期再制品与回收数量之间的关系;式(12)表示产品库存不能超过最大容量;式(13)表示新产品、再制品库存平衡;式(14)表示企业在每个周期所需购买的碳排放指标. 其中:当  $q_t^0 \alpha^p + q_t^1 \beta^p - \pi_t > 0$ ,即在该周期制造和再制造过程中实际产生的碳排放量多于政府设定的碳排放指标时,需要在碳排放交易市场购买超过这部分的碳排放指标,以保证生产活动能顺利进行;当  $q_t^0 \alpha^p + q_t^1 \beta^p - \pi_t < 0$ ,即在该周期制造和再制造过程中实际产生的碳排放量少于政府设定的碳排放额度时,可以在碳排放市场中出售多余的碳排放指标.

## 2 基于多种群混合布谷鸟算法优化求解方法

在碳限额交易政策下,通过求解最佳的决策变量值来使混合生产系统整体目标值达到最优,MPHCS算法流程如图2所示,其算法步骤如下.

step 1:初始化算法的参数. 种群数量  $N$ ,子种群大小  $Q$ ,发现概率  $P_a$ ,最大迭代次数  $k_{\max}$ , Logistic 映射参数  $\mu$ ,初代混沌变量  $cv(0)$  等.  $cv(0)$  是  $(0,1)$  之间随机生成的  $6 \times T$  个不同初始值,且各值不能等于  $0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$ .

step 2:初始化  $N$  个子种群. 由于每个鸟巢位置代

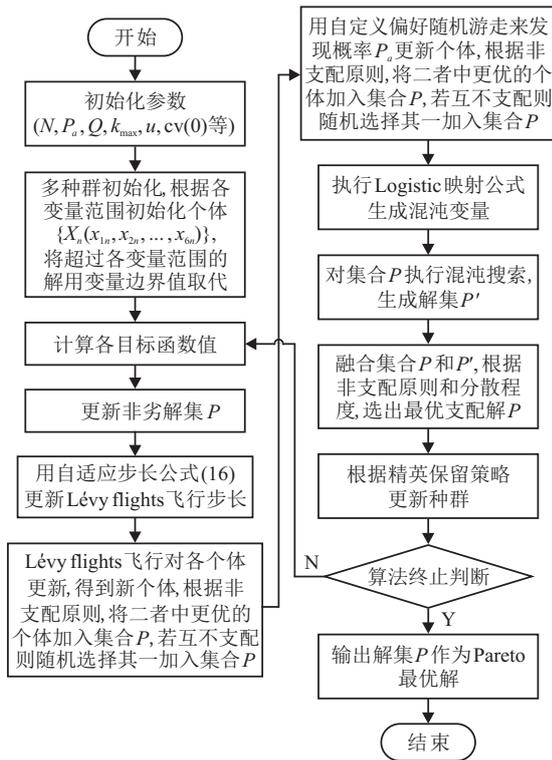


图 2 MPHCS 算法流程

表一个解,在初始化该值时不能保证在变量区间生成的解都符合要求,应将超过变量范围的值用变量范围边界值取代.其中,每个鸟巢位置有  $x_1 \sim x_6$  共 6 个参数变量,都是采用实数编码,其具体参数变量如表 1 所示.由于减排投入只在生产期前决定,减排投入因子只初始生成第 1 期,而后的生产期减排投入因子值设为 0.初始化集合  $P$ ,并设置为空,集合  $P$  表示各子种群迭代过程中产生的较优解,即 Pareto 最优解集,为各种群的共享数据.

表 1 算法各参数变量

参数	参数含义	内容
$x_1$	$q_t^0$	$1 \times T$ 第 $t$ 个值表示第 $t$ 期新产品生产数量
$x_2$	$q_t^1$	$1 \times T$ 第 $t$ 个值表示第 $t$ 期再制品生产数量
$x_3$	$\xi^0$	$1 \times T$ 表示新产品低碳技术投入因子
$x_4$	$\xi^1$	$1 \times T$ 表示再制品低碳技术投入因子
$x_5$	$s_t^0$	$1 \times T$ 第 $t$ 个值表示第 $t$ 期新产品销售价格
$x_6$	$s_t^1$	$1 \times T$ 第 $t$ 个值表示第 $t$ 期再制品销售价格

step 3: 计算子种群中所有鸟巢对应的各目标函数值,并依据以下规则选择非劣解,更新集合  $P$ : 即首先比较个体间的目标函数值支配情况,若集合  $P$  中的非劣解数量超过初始化设定的最大容量  $P_{\max}$ ,则以集合中目标值分散程度较大的  $P_{\max}$  个个体组成新的 Pareto 最优解集.在多目标函数求解中,每一个个体  $i$  总体分散度为个体在各个目标函数  $f_k$  的分散度之和,可以用下式表示:

$$D_i = \sum_k \frac{|f_{k,i+1} - f_{k,i-1}|}{f_{k,\max} - f_{k,\min}},$$

$$i = 2, 3, \dots, P_{\max} - 1. \quad (15)$$

其中:  $f_{k,i}$  为个体  $i$  在目标函数  $f_k$  上的函数值,  $f_{k,\max}$  和  $f_{k,\min}$  为目标函数  $f_k$  在集合  $P$  所提供的解空间上的最大值和最小值,前边界和后边界的分散度均设为  $\infty$ .

step 4: 对子种群中所有个体执行布谷鸟的 Lévy flights 飞行行为,形成新种群.为了使算法在初期以较大步长搜索种群,避免陷入局部最优,出现早熟现象,而在后期以较小步长更新种群,提高空间局部区域的搜索精度,并加快算法收敛,采用下式自适应策略更新步长因子:

$$\text{step} = 0.001 \times k_{\max} \times \exp\left(-\left(\frac{k}{k_{\max}}\right)^{0.6}\right). \quad (16)$$

产生的新个体与旧个体之间采用非支配原则保优,若互不支配,则随机保留一个个体,并将该非劣解加入集合  $P$  中.

step 5: 执行布谷鸟的偏好随机游走行为,对 step 4 中产生的新个体随机抛弃,并利用下式更新产生新种群:

$$X_n^* = \begin{cases} X_n + \text{rand} \oplus (X_{n_1} - X_{n_2}) + \\ (X_{\text{best}} - X_n), \text{rand} < p_a; \\ X_n, \text{otherwise.} \end{cases} \quad (17)$$

该式不仅保留了种群的多样性,也增加了较优个体对全局的影响.然后利用非支配原则保留较优的个体,若互不支配,则随机保留一个个体,并将该非劣解加入集合  $P$  中.其中  $X_{\text{best}}$  为 Pareto 集合  $P$  中随机选择的一个前沿解.

step 6: 为加强布谷鸟算法的局部搜索能力,实现解变量的精细搜索,采用 Logistic 映射公式生成第  $k$  次迭代的混沌变量  $\text{ch}(k+1)$ ,即

$$\text{ch}(k+1) = \text{ch}(k) \times (1 - \text{ch}(k)) \times \mu. \quad (18)$$

然后根据混沌搜索公式

$$H_2 = H_1 + \gamma \times \text{ch}, \quad (19)$$

在集合  $P$  基础上进行混沌搜索,生成集合  $p'$ ,并与原集合  $P$  融合,再利用非支配原则和分散程度选择最优支配解  $P$ .  $\mu$  为混沌映射参数,当  $\mu = 4$  时,能实现混沌映射的完全遍历.

step 7: 随机选择集合  $P$  中部分优秀个体加入到子种群中,并按照精英保留策略即个体支配情况和分散程度选择  $Q$  个个体作为下一次迭代的初始种群,以减少种群随机初始化对算法搜索结果造成的波动,同

时也有利于种群之间的协同进化,加快算法的收敛速度.

step 8: 算法终止条件. 若迭代次数小于最大迭代次数, 则执行 step 3; 否则, 输出 Pareto 解集  $P$ , 终止算法.

### 3 应用算例

为了验证本文所提出的模型和算法的有效性, 以某生产企业的电子产品制造/再制造生产决策为例. 近年来, 该企业积极响应绿色生产节能减排, 在生产决策的同时考虑经济指标和环境指标. 该企业的产品处于稳定期, 在生产的准备阶段, 该企业对生产过程进行减排技术投入. 该企业总生产规划周期  $T = 5, \alpha = 25, \beta = 12, \bar{\lambda}_0 = 20, \bar{\lambda}_1 = 20, \varepsilon_t = 0.7$ , 其他生产信息如表2所示.

本文提出的MPHCS算法运行环境为: 双核CPU主频 1.8 GHz, 内存为 8 GB, 处理器 intel(R)Core(TM) i5-3337U, 操作系统为 Window8, 编程语言为 Matlab. 算法相关参数设置如下: 种群数量为 4, 种群大小为 25, 迭代次数为 200, 发现概率为 0.25, Logistic 映射参

数为 4.

表 2 混合制造系统生产信息

参数	$t$				
	1	2	3	4	5
$\delta_t^0$	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2
$\delta_t^1$	1.2	1.1	1.1	1	1.1
$\varepsilon_t$	0.73	0.76	0.81	0.78	0.78
$C_{dt}^0$	0.61	0.53	0.43	0.46	0.55
$C_{dot}^0$	0.44	0.4	0.39	0.35	0.42
$C_{mt}$	2.51	2.32	2.45	3.02	2.68
$C_{rt}$	1.3	1.11	1.23	1.5	1.35
$C_{vt}$	0.5	0.34	0.45	0.56	0.5
$\sigma_t$	0.92	0.95	0.93	0.96	0.97
$\theta_t$	0.95	0.96	0.94	0.97	0.96
$C_t^{in}$	0.12	0.13	0.15	0.12	0.14
$\pi_t$	50	50	50	50	50
$C_t^g$	0.18	0.22	0.16	0.19	0.22
$C_t^0$	0.11	0.12	0.09	0.11	0.1
$C_t^1$	0.098	0.099	0.082	0.095	0.089
$\varphi_t$	0.8	0.75	0.79	0.82	0.76
$\eta_t$	0.75	0.8	0.79	0.81	0.74

表 3 制造/再制造混合生产系统决策优化结果

决策方案	$q_t^0; q_t^1$	$\xi^0; \xi^1$	$s_t^0; s_t^1$	$P$	$E$
原始决策	(2.07, 4.71, 3.75, 3.79, 4.46); (1.22, 3.56, 3.95, 3.2, 3.54)	(0.76); (0.46)	(5.97, 5.4, 5.55, 5.16, 5.65); (3.83, 3.57, 3.38, 3.23, 3.4)	40.5	243.6
MPHCS 1	(5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (4.0, 4.0, 4.0, 4.0, 4.0)	(0.84); (0.697)	(6.0, 6.0, 6.0, 6.0, 6.0); (4.0, 3.81, 4.0, 4.0, 4.0)	80.77	262.3
MPHCS 2	(5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (2.16, 3.81, 4.0, 4.0, 4.0)	(0.91); (0.72)	(5.97, 6.0, 6.0, 6.0, 6.0); (3.96, 4.0, 4.0, 4.0, 4.0)	78.1	232.7
MPHCS 3	(5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (2.3, 3.59, 4.0, 3.4, 3.55)	(1.0); (0.616)	(6.0, 6.0, 6.0, 6.0, 6.0); (3.99, 4.0, 4.0, 4.0, 4.0)	74.03	219.3
MPHCS 4	(4.41, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (0.28, 0.21, 1.17, 0, 0)	(0.82); (0.17)	(5.62, 6.0, 5.79, 5.28, 6.0); (3.95, 4.0, 4.0, 4.0, 4.0)	64.73	186.6
NSGA-II 1	(5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (2.43, 4.0, 4.0, 4.0, 2.42)	(0.864); (0.472)	(6.0, 6.0, 6.0, 5.96, 6.0); (3.96, 4.0, 3.99, 4.0, 3.92)	77.19	267.9
NSGA-II 2	(5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (0.85, 4.0, 4.0, 4.0, 3.47)	(0.906); (0.582)	(6.0, 6.0, 6.0, 5.85, 6.0); (4.0, 4.0, 3.96, 4.0, 4.0)	76.14	240.5
NSGA-II 3	(5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (2.11, 3.31, 3.98, 2.13, 2.18)	(1.0); (0.661)	(5.91, 6.0, 6.0, 6.0, 6.0); (4.0, 4.0, 3.97, 3.98, 3.88)	67.89	197.4
SPCS 1	(5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (4.0, 4.0, 3.06, 1.79, 4.0)	(0.818); (0.702)	(6.0, 6.0, 5.0, 6.0, 6.0); (4.0, 4.0, 4.0, 3.99, 4.0)	78.7	252.1
SPCS 2	(5.0, 5.0, 5.0, 4.95, 5.0); (3.49, 3.94, 3.64, 4.0, 3.4)	(0.97); (0.619)	(6.0, 6.0, 6.0, 6.0, 6.0); (4.0, 3.84, 4.0, 4.0, 4.0)	76.39	234.3
SPCS 3	(5.0, 5.0, 5.0, 5.0, 5.0); (1.98, 3.80, 2.35, 0.89, 3.18)	(0.925); (0.68)	(6.0, 6.0, 5.22, 5.83, 5.69); (3.89, 4.0, 4.0, 3.99, 4.0)	69.03	204.1

为了验证本文算法的有效性,与多目标遗传算法NSGA-II及单种群布谷鸟(single population cuckoo search, SPCS)算法进行了对比.在NSGA-II中设置迭代次数为200,种群大小为100,交叉概率为0.75,变异概率为0.01;在SPCS中设置迭代次数为200,种群大小为100,发现概率为0.25.表3和图3展示了该生产系统初始生产决策和3种算法所求的Pareto最优解及各目标函数值.

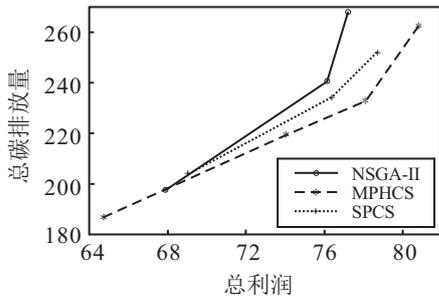


图3 MPHCS、NSGA-II和SPCS寻优结果对比

从表3中数据可知,MPHCS算法获得了4个Pareto解,比NSGA-II算法和SPCS算法获得Pareto解的范围更广,且前者获得的大部分目标函数值都优于后者,甚至在所求的非劣解之间存在着支配情况.如MPHCS算法获得的方案2分别支配于NSGA-II算法获得的方案1、方案2,同时也支配于SPCS算法获得的方案1;MPHCS算法获得的方案1也支配于NSGA-II算法获得的方案1.说明MPHCS算法能够获得比NSGA-II算法和SPCS算法更优或更多目标函数优化效果的生产决策.从图3中可以看出,MPHCS算法获得非劣解在函数值跨度上要优于NSGA-II算法和SPCS算法,且求得了最多的Pareto解,能给企业实际生产决策提供更多的选择.由此表明MPHCS算法比NSGA-II算法和SPCS算法具有更好的寻优效果和全局搜索能力.

表4 3种算法评价指标

仿真次数	MPHCS			NSGA-II			SPCS		
	IGD	Ns	ER	IGD	Ns	ER	IGD	Ns	ER
1	0.112	4	0	0.183	1	0.66	0.142	2	0.33
2	0.043	4	0	0.253	1	0.66	0.263	0	1
3	0.134	2	0.33	0.167	2	0	0.219	1	0.5
4	0.069	3	0.25	0.456	0	1	0.175	2	0
5	0.085	4	0	0.358	0	1	0.183	2	0.33
6	0.076	3	0	0.245	1	0.33	0.164	1	0.5
7	0.112	2	0.33	0.389	1	0.66	0.243	2	0.66
8	0.056	4	0	0.267	0	1	0.115	2	0.33
9	0.045	4	0	0.121	2	0.33	0.154	2	0.33
avg	0.081	3.3	0.1	0.271	0.89	0.63	0.184	1.5	0.44

为进一步比较3种算法的求解质量,以反世代距离(IGD)、非支配解的数量(Ns)和错误率(ER)3个常见的算法性能分析指标作为评价标准<sup>[23]</sup>.在前文设定的实验环境下,3种算法分别单独进行9次重复仿真实验,其相关评价指标如表4所示.

从表4中数据可知,3种算法的平均反世代距离分别为0.081、0.271及0.184,表明MPHCS算法比另外两种算法具有更好的求解结果.MPHCS算法获得的3种评价指标平均值分别为0.081、3.3和0.1,每一项都优于其他两种算法,凸显了通过MPHCS算法所求的结果相比较NSGA-II算法和SPCS算法更优,而且更接近于真实解.

### 4 结 论

本文针对碳限额交易政策下,考虑了减排技术投入成本对制造/再制造混合生产优化决策的影响,建立了以利润最大化和碳排放量最小化的多目标混合生产决策模型.针对模型特点,提出了一个多种群混合布谷鸟算法;给出一种自适应步长控制因子和偏好随机游走策略,以防止陷入局部最优和增加搜索效率;引入混沌理论对种群进行精细搜索,以提高搜索精度.通过对比实验验证了多种群混合布谷鸟算法具有更好的寻优效果.未来的研究方向是考虑碳限额的多产品多周期制造/再制造混合系统生产优化问题.

### 参考文献(References)

- [1] Macedo P B, Alem D, Santos M, et al. Hybrid manufacturing and remanufacturing lot-sizing problem with stochastic demand, return, and setup costs[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(5/6/7/8): 1241-1257.
- [2] 陈伟达, 李雅光. 再制造生产率和市场需求不确定情况下考虑资金时间价值的制造/再制造生产决策优化[J]. 工业工程与管理, 2017, 22(1): 73-81. (Chen W D, Li Y G. Manufacturing/remanufacturing production decisions considering time value of money under uncertainties[J]. Industrial Engineering and Management, 2017, 22(1): 73-81.)
- [3] 阳成虎, 何丽金, 陈杜添, 等. 基于回收和再制造渠道选择的制造/再制造生产决策[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(4): 1046-1056. (Yang C H, He L J, Chen D T, et al. Manufacturing/remanufacturing decision based on selection of recycling and remanufacturing channel[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(4): 1046-1056.)
- [4] Polotski V, Kenne J P, Gharbi A. Set-up and production planning in hybrid manufacturing-remanufacturing systems with large returns[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(13): 3766-3787.

- [5] 许民利, 梁红燕, 简惠云. 产品质量和WTP差异下的制造/再制造生产决策[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 467-476.  
(Xu M L, Liang H Y, Jian H Y. Manufacturing/remanufacturing decision based on product quality and WTP differentiation[J]. Control and Decision, 2016, 31(3): 467-476.)
- [6] 申成然, 熊中楷. 碳排放约束下制造商再制造决策研究[J]. 系统工程学报, 2014, 29(4): 537-549.  
(Shen C R, Xiong Z K. Production decision of the manufacturer remanufacturing decision under carbon emission cConstraints[J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(4): 537-549.)
- [7] Chang X Y, Xia H Y, Zhu H Y, et al. Production decisions in a hybrid manufacturing-remanufacturing system with carbon cap and trade mechanism[J]. International Journal of Production Economics, 2015, 162: 160-173.
- [8] Yenipazarli A. Managing new and remanufactured products to mitigate environmental damage under emissions regulation[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 249(1): 117-130.
- [9] Wang Y J, Chen W D, Liu B Y. Manufacturing/remanufacturing decisions for a capital-constrained manufacturer considering carbon emission cap and trade[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 140(3): 1118-1128.
- [10] Drake D F, Kleindorfer P R, Van Wassenhove L N. Technology choice and capacity portfolios under emissions regulation[J]. Production and Operations Management, 2016, 25(6): 1006-1025.
- [11] 钟精诚, 郭钧, 杜百岗, 等. 考虑换代周期影响的制造/再制造生产优化决策[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(11): 2909-2920.  
(Zhong J C, Guo J, Du B G, et al. Manufacturing/remanufacturing production optimization decision considering update cycle disruptions[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(11): 2909-2920.)
- [12] Turki S, Sauvey C, Rezg N. Modelling and optimization of a manufacturing/remanufacturing system with storage facility under carbon cap and trade policy[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 193: 441-458.
- [13] 景熠, 王旭, 李文川, 等. 多重不确定环境下考虑产品差异的再制造批量生产计划[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12): 2650-2658.  
(Jing Y, Wang X, Li W C, et al. Remanufacturing lot sizing production planning considering product differentiation in multi-uncertain environment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(12): 2650-2658.)
- [14] 刘林, 陈蕾, 杨爱峰. 考虑碳排放约束的制造/再制造生产优化[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(9): 231-235.  
(Liu L, Chen L, Yang A F. Manufacturing/remanufacturing production planning problem with carbon emissions[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(9): 231-235.)
- [15] 张永韡, 汪镭, 吴启迪. 动态适应布谷鸟搜索算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(4): 617-622.  
(Zhang Y W, Wang L, Wu Q D. Dynamic adaptation cuckoo search algorithm[J]. Control and Decision, 2014, 29(4): 617-622.)
- [16] 钟祿充, 钱斌, 胡蓉, 等. 混合布谷鸟算法求解绿色流水车间调度问题[J]. 中国机械工程, 2018, 29(22): 2674-2681.  
(Zhong L C, Qian B, Hu R, et al. Hybrid cuckoo algorithm for green flow shop scheduling[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(22): 2674-2681.)
- [17] Wang H, Wang W J, Sun H, et al. A new cuckoo search algorithm with hybrid strategies for flow shop scheduling problems[J]. Soft Computing, 2017, 21(15): 4297-4307.
- [18] Chroua J, Chakchouk W, Zaafour A, et al. Modeling and control of an irrigation station process using heterogeneous cuckoo search algorithm and fuzzy logic controller[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 976-990.
- [19] Yang B, Wang Z Q, Yang Y, et al. Optimum fixture locating layout for sheet metal part by integrating kriging with cuckoo search algorithm[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(1/2/3/4): 327-340.
- [20] 赵丹, 戡守峰. 多重碳政策下供应链最优减排投资策略[J]. 工业工程与管理, 2018, 23(4): 53-61.  
(Zhao D, Ji S F. The optimal emission-reduction investment strategy in supply chains under multiple carbon policies[J]. Industrial Engineering and Management, 2018, 23(4): 53-61.)
- [21] 陈玉玉, 李帮义, 柏庆国, 等. 碳交易环境下再制造企业生产及减排投资决策[J]. 控制与决策, 2020, 35(3): 695-703.  
(Chen Y Y, Li B Y, Bo Q G, et al. Research on production and emission reduction investment decision of the remanufacturing enterprises under carbon trading environment[J]. Control and Decision, 2020, 35(3): 695-703.)
- [22] Yalabik B, Fairchild R J. Customer, regulatory, and competitive pressure as drivers of environmental innovation[J]. International Journal of Production Economics, 2011, 131(2): 519-527.
- [23] Wu R, Li Y B, Guo S S, et al. An efficient meta-heuristic for multi-objective flexible job shop inverse scheduling problem[J]. IEEE Access, 2018, 6: 59515-59527.

### 作者简介

郭钧(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事再制造智能决策与优化等研究, E-mail: junguo@whut.edu.cn;

王建国(1993—), 男, 硕士, 从事再制造优化决策的研究, E-mail: wangg521@qq.com;

杜百岗(1987—), 男, 副教授, 博士, 从事制造过程理论与优化等研究, E-mail: dbg767@163.com;

李益兵(1978—), 男, 教授, 博士, 从事智能优化等研究, E-mail: ahlyb@whut.edu.cn.

(责任编辑: 李君玲)