

# 双碳目标下退役农机产品拆解规划与 EOL 决策集成优化

袁 刚<sup>1,2</sup>, 李洪波<sup>2</sup>, 罗建强<sup>2</sup>, 张宗毅<sup>2</sup>, 杨印生<sup>3\*</sup>, 孙俊华<sup>4</sup>

(1. 东南大学机械工程学院, 南京 211189; 2. 江苏大学中国农业装备产业发展研究院, 镇江 212000; 3. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 4. 江苏省农业农村厅农机行业发展处, 南京 210036)

**摘 要:** 退役农机产品回收再利用, 不仅是对其剩余价值的再利用, 也是实现可持续发展和循环经济的客观要求, 对实现碳达峰、碳中和目标有重要意义。该研究基于双碳目标要求剖析退役农机产品拆解规划和 EOL (end-of-life) 决策集成优化问题, 考虑拆解再制造过程中碳排放成本, 以实现经济环境效益的最优化。首先, 构建拆解再制造集成优化模型 (disassembly remanufacturing integrated optimization, DRIO); 其次, 提出一种改进的人工蜂群算法 (improved artificial bee colony algorithm, IABC) 对构建的数学模型进行迭代求解, 引入 logistic 映射生成初始解, 雇佣蜂阶段和守望蜂阶段加入邻域搜索机制, 侦察蜂阶段采用了轮盘赌方法, 以获得利润高且碳排放成本低的拆解再制造帕累托方案; 最后, 通过联合收获机电机拆解再制造实例验证所提模型的有效性和改进算法的可行性。结果表明, 所提 DRIO 模型的经济效益相较于 DRIO-D 和 DRIO-R 模型分别提高了 62.1% 和 54.8%, 碳排放成本比 DRIO-D 模型减少约 50%。IABC 算法相比于经典人工蜂群算法的求解时间缩短了 19.3%, 可行解数量增加了 28.6%, 相比于蚁群算法的求解时间缩短 47.8%, 可行解数量增加 1 倍。对于超体积值, 人工蜂群算法 (2.695) 与蚁群算法 (2.377) 相近, 但均小于 IABC 算法 (2.813)。对于间距度量值, 蚁群算法 (0.052 3) 低于人工蜂群算法 (0.068 2), IABC 算法 (0.041 6) 最低。运用该研究所构建的拆解规划集成优化模型, 可有效提高废旧农机产品拆解回收的经济效益, 减少碳排放, 可为相关标准制定提供重要依据, 为农机可拆解性设计提供决策支撑。

**关键词:** 农业机械; 优化; 碳排放; 拆解规划; 再制造决策; 退役农机

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210195

中图分类号: S23-9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)09-0017-08

袁刚, 李洪波, 罗建强, 等. 双碳目标下退役农机产品拆解规划与 EOL 决策集成优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 17-24. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210195 <http://www.tcsae.org>

YUAN Gang, LI Hongbo, LUO Jianqiang, et al. Integrated optimization of disassembly planning and EOL decision of obsolete agricultural machinery products under the dual carbon target[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(9): 17-24. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202210195 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

随着农业智能化智慧化的快速发展, 产生了大量退役农机产品。据 2022 年全国农业机械化统计年报, 2021 年国内拖拉机与联合收割机的保有量分别达到 2 173.06 万和 223.78 万台, 若按国家规定的农机产品服役年限 10~15 a 计算, 未来数年农机产品退役数量极其惊人。退役农机产品中包含着大量的可再生资源, 若不能有效再生利用将会造成极大的资源浪费和环境污染, 农机装备拆解回收对提高农业资源利用和促进农业可持续发展具有重要意义<sup>[1]</sup>。近年来, 国家相继出台了相关政策以促进退役农机产品回收、拆解、再制造等。《中国制造 2025》提出全面推行绿色制造, 大力发展再制造产业,

实施高端再制造、智能再制造, 促进再制造产业持续健康发展<sup>[2]</sup>。2011 年国家发改委会办公厅发布的《关于深化再制造试点工作的通知》, 明确提出要开展拖拉机、联合收获机等农业机械再制造试点, 探索完善可再制造旧件回收和再制造产品销售渠道<sup>[3]</sup>。2019 年农业农村部印发了《关于加快推进农业机械化转型升级的通知》, 指出农业机械化转型升级和绿色低碳发展是我国农业机械化全程全面高质量发展的重要内容<sup>[4]</sup>。2020 年农业农村部印发《农业机械报废更新补贴实施指导意见》, 提出加快老旧农业机械报废更新进度, 进一步优化农机装备结构, 促进农机安全生产和节能减排<sup>[5]</sup>。因此, 退役农机产品拆解规划已成为农业废弃物资源化利用和农机再制造领域的研究热点。

拆解是将产品、总成或部件等装配体进行解体的作业或活动, 是产品多次拆卸作业的结果<sup>[6]</sup>, 同时也是实现产品再利用的前提。拆解序列规划可以优化零件拆解顺序, 实现目标值最优化, 而 EOL (end-of-life) 决策可以对拆卸下来的零部件进行决策分类, 从而实现资源回收、零件重用以及减少环境污染的目的<sup>[7]</sup>。拆解序列规

收稿日期: 2022-10-25 修订日期: 2023-04-10

基金项目: 国家社科基金项目 (21ZDA054); 国家社科基金项目 (22GLB01404)

作者简介: 袁刚, 博士, 助理研究员, 研究方向为复杂产品拆解规划与决策评价。Email: [yuangang1224@163.com](mailto:yuangang1224@163.com)。

\*通信作者: 杨印生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农业经济管理与系统工程。Email: [yys@jlu.edu.cn](mailto:yys@jlu.edu.cn)。

划方法的研究主要分为基于图论的拆解序列优化<sup>[8]</sup>、基于 CAD 模型的序列优化<sup>[9]</sup>、基于数学规划的拆解序列优化<sup>[10]</sup>、基于启发式算法的拆解序列优化<sup>[11]</sup>、基于模糊理论的拆解序列优化<sup>[12]</sup>。拆解序列规划主要使用特定的图形表达工具来反映拆解的动态过程,例如 AND/OR 图<sup>[13]</sup>、拆解树<sup>[14]</sup>、Petri 网<sup>[15]</sup>、有向图<sup>[16]</sup>及解释结构图等。拆解规划的求解主要以启发式方法为主<sup>[17-18]</sup>,如遗传算法、人工蜂群算法、蚁群算法等。相关研究表明,农用履带拖拉机可再制造零部件占整机部件约 60%,而再制造拖拉机价格仅为新机价格的 50%~60%<sup>[19]</sup>。农机再制造评价从技术性、经济性、环境性、资源性等方面开展<sup>[20-21]</sup>,运用多智能优化算法和多属性决策方法从多角度多层次实现了废旧农机产品再制造的综合性能评价<sup>[22-23]</sup>。

现有的农机拆解研究主要以数学规划方法和元启发式算法获得 Pareto 拆解方案,但对于复杂装备,传统算法很难得到高质量的解。因使用状况的复杂性和零部件失效的不确定性,使得农机产品拆解再制造集成优化不同于其他机械产品,因此,本文提出考虑再制造成本和碳排放成本的拆解序列规划与 EOL 决策集成优化模型,以提高农业资源综合利用率和促进农机装备绿色可持续发展<sup>[24-25]</sup>。首先,考虑拆解再制造的综合收益构建拆解决策集成优化模型,所构建的目标函数包含收购成本、再制造产品收入、拆解成本、EOL 操作成本、碳排放成本。其次,提出一种改进的人工蜂群算法对所构建的模型进行求解。最后,通过联合收割机电机拆解再制造案例分析验证模型的可行性和有效性。

## 1 拆解再制造集成优化模型

### 1.1 问题描述

拆解再制造集成优化 DRIO(disassembly remanufacturing integrated optimization)是产品回收过程中拆解规划和 EOL 操作的集成优化。拆解序列是待拆解产品完成拆解过程的作业顺序。EOL 操作包括再利用(reuse)、再制造(remanufacturing)和回收(recycle)<sup>[25-26]</sup>,决定如何处理每个拆卸下来的部件或子组件。再利用指组件或零件在简单的处理后可直接再次使用。再制造是指零部件经过翻新修复达到使用功能。回收是对不满足再利用/再制造的零件回收其原材料。

假设待拆解产品由  $M$  个子组件构成,子组件集合为  $S = (s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_M)$ ,子组件对应的零件集合为  $C = (c_1, c_2, \dots, c_j, \dots, c_N)$ 且  $M < N$ 。子组件与零件间的关系可以用结构矩阵描述为  $O = [O_{ij}]_{M \times N}$ 。优先矩阵用于描述子组件/零部件间的优先约束关系,子组件的优先约束矩阵为

$$G = [G_{ip}]_{M \times M} \quad (1)$$

若子组件  $s_i$  优于  $s_p$  拆卸,则  $G_{ip} = 1$ ,否则  $G_{ip} = 0$ 。

零部件的优先约束矩阵为

$$H = [H_{jq}]_{N \times N} \quad (2)$$

若零件  $c_j$  优于  $c_q$  拆卸,则  $H_{jq} = 1$ ,否则  $H_{jq} = 0$ 。

EOL 操作的设计变量为

$$Z = [Z_\alpha, Z_\beta, Z_\gamma]^T \quad (3)$$

其中  $Z_\alpha = [z_{\alpha 1}, \dots, z_{\alpha i}, \dots, z_{\alpha L}]$  为再利用集合,  $Z_\beta = [z_{\beta 1}, \dots, z_{\beta i}, \dots, z_{\beta L}]$  为再制造集合,  $Z_\gamma = [z_{\gamma 1}, \dots, z_{\gamma i}, \dots, z_{\gamma L}]$  为回收集合。如果  $z_{\alpha i} = 1$ ,则  $c_i$  为再利用,否则  $z_{\alpha i} = 0$ 。同理,如果  $z_{\beta i} = 1$ ,则  $c_i$  为再制造,否则  $z_{\beta i} = 0$ ;如果  $z_{\gamma i} = 1$ ,则  $c_i$  为回收,否则  $z_{\gamma i} = 0$ 。

为便于研究,根据文献<sup>[27-28]</sup>,引入以下假设:

1) 再制造产品需求是关于售价  $p$  和保修期限  $w$  的函数<sup>[28]</sup>,定义为  $D(p, w) = \eta p^{-\alpha} \omega^\theta$ ,其中  $\alpha, \theta, \eta$  为正实数。

2) 折旧率是收购价格  $v$  和服役年限  $x$  的函数,定义为  $R(v, x) = kv^\sigma x^\gamma$ ,  $\sigma, \gamma, k$  为正实数。

3) EOL 成本是关于服役年限  $x$  和 EOL 操作  $x_m$  的函数,定义为  $c(x, x_m) = c_r(x - x_m)^\psi$ 。其中,  $c_r$  是单位时间再制造成本,元,且  $c_r > 0, \psi > 0$ <sup>[29]</sup>。

4) 零部件的失效在统计上是独立的,且零部件都可拆解。

5) 再制造产品和新产品的故障率一致。

### 1.2 DRIO 模型构建

#### 1.2.1 再制造产品销售收入

使用 Cobb-Douglas 函数对销售价格进行建模。对于服役年限为  $x$  的产品,销售价格  $p$  对保修期限  $w$  和改善因子  $u$  ( $0 \leq u \leq 1$ ) 的函数关系,销售价格  $p(x, w, u)$  为

$$p(x, w, u) = p_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right) (w + k_w)^a (u + k_u)^b \quad (4)$$

其中  $p_0$  为新产品的售价,元;  $L$  为产品期望寿命,  $a, k_w$  和  $k_u$  为非负参数;  $a$  和  $b$  为常数,且  $a > 0, b > 0$ 。

则再制造品的销售利润为

$$S(x, w, u) = p \cdot D(p, w) \quad (5)$$

式中  $p$  为单位再制造产品售价,元;  $D(p, w)$  为再制造产品的需求量。

#### 1.2.2 废旧产品的收购成本

单位回收成本可通过市场反馈数据或产品年限的折旧率估计。产品回收价格  $v_p$  和产品服役年限  $x$  的函数关系为

$$\begin{cases} A(v, x) = v_p \cdot \int_0^\infty R(v, x) f(x) dx \\ v_p = k_0 p_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right), 0 < k_0 < 1, x \leq L \end{cases} \quad (6)$$

式中  $R(v, x)$  为产品的折旧率;  $k_0$  为常数。

#### 1.2.3 拆解成本

拆卸成本受拆解顺序影响,通过拆解时间可以评估拆解成本,而拆解时间与产品的使用年限呈正相关,拆卸时间包括拆解操作时间、拆卸工具更换时间和拆解方向改变时间,拆解成本计算如下:

$$D(x) = c_{dt} \left( n_{it} \cdot \int_0^\infty \left(1 - \frac{x}{L}\right) f(x) dx + t_{dc} \cdot \mathcal{E}_{lk} + t_{dd} \cdot \xi_{lk} \right) \quad (7)$$

式中  $c_{dt}$  表示单位时间的拆解成本,元;  $n_{it}$  表示零件  $c_i$  拆

解的标准化时间,  $h$ ;  $t_{dc}$ 为拆解工具更换平均时间,  $h$ ;  $\mathcal{E}_{lk}$ 为二元变量, 如果拆解零件 $c_l$ 和 $c_k$ 使用相同的工具, 则 $\mathcal{E}_{lk} = 1$ , 否则 $\mathcal{E}_{lk} = 0$ ;  $t_{dd}$ 为拆解方向改变的平均时间,  $h$ ;  $\xi_{lk}$ 为二元变量, 如果拆解零件 $c_l$ 和 $c_k$ 方向改变, 则 $\xi_{lk} = 1$ , 否则 $\xi_{lk} = 0$ 。

#### 1.2.4 再制造成本

根据再制造经验, 再制造成本随产品服役年限和改善因子的不同而变化, 再制造成本 $E(x, u)$ 与改善因子 $u$ 和 $x$ 的函数关系, 则为

$$E(x, u) = \int_0^\infty (c_r(x - x_m)^\psi) D(p, w) f(x) dx \quad (8)$$

#### 1.2.5 碳排放成本

拆解再制造过程中的环境成本主要为碳排放成本, 根据文献[14]可知, 单位碳排放成本( $C_{ec}$ )包括以下几方面: 机器耗电的碳排放( $\mu \cdot w_{rp} \cdot T_{ec}$ )、再制造材料消耗 $c_{rc}$ 、化学品消耗 $c_{cc}$ 和能源消耗 $c_{en}$ , 计算式分别为

$$C_{GHG} = (a_r v^2 - b_r v + C_r) \beta_\zeta \cdot d \cdot C_{ec} \quad (9)$$

$$\beta_\zeta = 1 - \left[ \frac{(1-\beta)}{(1-\beta^{\zeta+1})} \right] \quad (10)$$

$$C_{ec} = \mu \cdot w_{rp} \cdot T_{ec} + c_{rc} + c_{cc} + c_{en} \quad (11)$$

式中 $\mu$ 为电力碳排放因子(0.928 kg/(kW·h), IPCC 2006);  $w_{rp}$ 为机器作业功率, kW;  $T_{ec}$ 为机器作业时间, h;  $a_r, b_r, C_r$ 是碳排放功能参数;  $d$ 为需求率, 且 $d < m$ ;  $\zeta$ 为再制造部件数量, 且 $\zeta > 0$ ;  $\beta_\zeta$ 表示再制造部件的实际比例。

根据以上分析可知, 拆解再制造的总利润为

$$J(x, p, w) = p(x, w, u) - A(v, x) - D(x) - E(x, u) - C_{GHG} \quad (12)$$

利润最大化问题的数学模型为

$$\begin{aligned} \text{Max } f = & p_0 \left( 1 - \frac{x}{L} \right) (w + k_w)^a (u + k_u)^b - \\ & k_0 p_0 \left( 1 - \frac{x}{L} \right) \cdot \int_0^\infty k v^\sigma x^\gamma f(x) dx - \\ & c_{dt} \left( n_{dt} \cdot \int_0^\infty \left( 1 - \frac{x}{L} \right) f(x) dx + t_{dc} \cdot \mathcal{E}_{lk} + t_{dd} \cdot \xi_{lk} \right) - \\ & \int_0^\infty (c_r(x - x_m)^\psi) \eta p^{-\alpha} \omega^\theta f(x) dx - (a_r v^2 - b_r v + C_r) \times \\ & \left[ \left( 1 - \frac{(1-\beta)}{(1-\beta^{\zeta+1})} \right) d \right] \cdot (\mu \cdot w_{rp} \cdot T_{ec} + c_{rc} + c_{cc} + c_{en}) \end{aligned} \quad (13)$$

约束条件为

$$D(p, w) \leq \int_0^\infty R(v, x) f(x) dx \quad (14)$$

$$D(p, w) \int_0^\infty c(x, x_m) f(x) dx \leq \Delta \quad (15)$$

$$x_m \leq \epsilon \quad (16)$$

$$v \geq 0, \omega \geq 0, p \geq 0, x_m \geq 0 \quad (17)$$

式中 $D(p, w)$ 为再制造产品的需求量;  $R(v, x)$ 为产品的折旧率;  $c(x, x_m)$ 为EOL成本, 元;  $x_m$ 为EOL操作;  $x$ 为服役年限, a;  $\Delta$ 为预算, 元;  $\epsilon$ 为部件使用年限上限。

## 2 DRIO 模型求解

本文所提的 DRIO 模型集成了拆解序列规划和 EOL 决策联合优化, 计算复杂, 最优解获得难度大。人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC) 是一种群体智能优化算法<sup>[30]</sup>, 主要用来解决 NP-Hard 问题的组合优化, 具有参数少、计算性能好等优点<sup>[30]</sup>, 广泛应用于制造业的优化求解。因此, 本文选用 IABC 算法对提出的 DRIO 模型进行优化求解。经典 ABC 最早用于求解连续优化问题, 而 DRIO 模型的求解属于离散优化问题, 为此, 本文提出一种改进的 ABC 算法进行拆解再制造联合决策优化, 算法流程如图 1 所示, 包括种群初始化, 雇佣蜂阶段, 守望蜂阶段, 侦察蜂阶段, 其中雇佣蜂阶段和守望蜂阶段需要判断蜜蜂所在蜜源的适应度值。算法运行参数, 最大迭代次数为  $T_{max}=50$ , 种群规模  $P_s=100$ , 蜜蜂开采上限为 200, 每次计算运行 20 次。

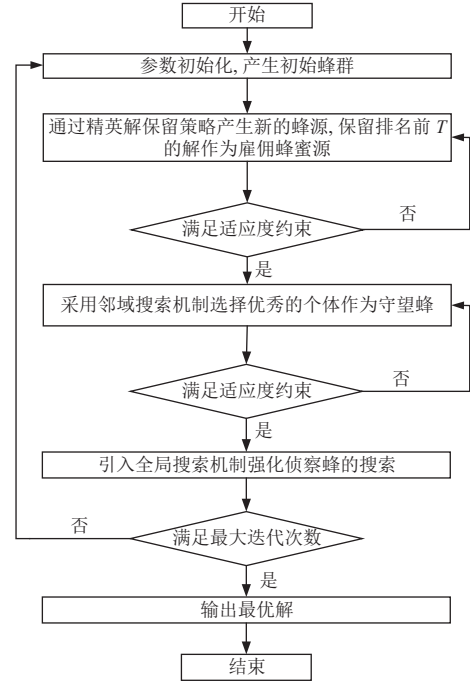


图 1 改进人工蜂群算法流程图

Fig.1 Flow chart of improved artificial bee colony algorithm (IABC)

### 2.1 种群初始化

种群初始化是群优化算法的关键环节, 直接影响算法的收敛速度和最终解的质量。在没有相关先验知识的情况下, 通常使用随机初始化来生成初始群体。随机初始化能保证初始种群在解空间中均匀分布, 但会影响算法的收敛速度。为得到高质量的初始解, 本文基于 logistic 映射生成初始解。假设种群  $P$  含有  $S_N$  个个体, 每个个体用向量  $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,D})$  表示,  $D$  表示解空间的维度, 本文采用双链表结构编码, 记为  $x = \{v_1, v_2\}$ ,  $v_1$  表示拆卸序列,  $v_2$  表示 EOL 操作方式, logistic 映射生成初始解的计算公式如下:

$$x_{ij} = x_{min,j} + y_{ij}(x_{max,j} - x_{min,j}) \quad (18)$$



$$y_{i+1,j} = \text{rand}(0, 1)y_{ij}(1 - y_{ij}) \quad (19)$$

其中  $i$  表示果蝇个体,  $i = 1, 2, \dots, S_N$ ;  $j$  表示空间维度,  $j = 1, 2, \dots, D$ ;  $x_{\max,j}$  和  $x_{\min,j}$  分别代表第  $i$  个个体第  $j$  维变量的上下界;  $y_{ij}$  为逻辑映射变量;  $\text{rand}(0, 1)$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。

## 2.2 雇佣蜂阶段

在经典 ABC 算法中, 雇佣蜂在食物源附近寻找浓度最高的位置。为了在不影响种群多样性的前提下加快收敛速度, 将目标函数值从小到大排序, 排名前  $T(T \leq T_{\max})$  (目标函数最大值) 的目标函数值所对应的寻优解作为精英解保留。为了加强探索以及避免局部最优, 随机选择个体  $k$  及其邻域调整雇佣蜂的搜索方向, 则精英解的位置由搜索方程  $v_{ij}$  生成:

$$v_{ij} = (x_{k\text{best},j} + x_{e,j})/2 + \varphi_{i,j} \cdot (x_{k\text{best},j} - x_{k,j}) \quad (20)$$

式中  $x_{e,j}$  为在维度  $j$  中随机选择一个精英解;  $x_{k,j} (k \in \{1, 2, \dots, S_N\})$  表示从种群  $j$  维中随机选择的个体;  $x_{k\text{best},j}$  表示第  $k$  个个体的  $j$  维邻域范围内目标函数值最优的食物源位置;  $\varphi_{i,j}$  为  $[-1, 1]$  之间的随机数。

## 2.3 守望蜂阶段

守望蜂通过选择机制从雇佣蜂的食物源中随机挑选寻优位置。为了使高质量解的位置有较大概率被守望蜂选中, 采取基于适应度的邻域搜索机制增强收敛能力, 越优秀的个体被选择的概率越大, 适应度较好的个体有更多的机会被选择参与寻优。第  $i$  个个体参与寻优的选择概率  $P_i$  的计算式如下:

$$P_i = \frac{r_i}{T_{\max}}, i = 1, 2, \dots, T_{\max} \quad (21)$$

式中  $r_i$  为根据适应度降序排列的第  $i$  个个体的等级。

## 2.4 侦察蜂阶段

侦察蜂的作用是识别并排除被守望蜂过渡搜索, 原始的侦察蜂阶段采用轮盘赌方法但容易陷入局部最优, 为了解决此问题, 在侦察蜂阶段引入全局搜索机制, 其计算式如下:

$$q_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij} \left[ \omega_{\max} - \frac{t_i}{T_{\max}} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \right] \cdot x_{ij} \quad (22)$$

式中  $t_i$  为当前迭代次数;  $\phi_{ij}$  为  $[-1, 1]$  内的随机数;  $\omega_{\max}$  和  $\omega_{\min}$  表示侦察蜂位置调整的最大和最小百分比。

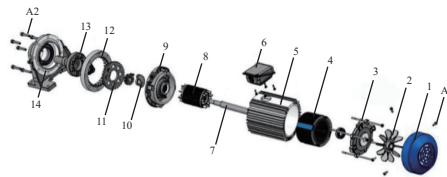
## 3 案例分析

为了验证所构建的 DRIO 模型和改进蜂群算法求解的可行性和有效性, 本文选用联合收获机的电机作为拆解再制造案例进行分析, 所有算法在 MATLAB2020 软件上进行编程实现, 计算机配置为 Intel(R) Core(TM), i5-1155G7 @2.5GHz (8CPUs)。

### 3.1 数据获取

电机是回收再制造的主要农机组件之一, 其通用性强和回收再制造利润高。以沃得 4LZ-9.0CR 联合收获机的电机拆解再制造为例, 电机零部件的三维结构如图 2 所示零部件的详细信息如表 1 所示。各零部件回收价值根据当前回收市场行情进行修正, EOL 处理数据采用文

献 [14] 提出的产品回收评估方法估算, 拆卸方向改变时间为 3 s<sup>[30]</sup>, 拆卸工具改变时间 5 s<sup>[31]</sup>, 拆卸人工费 25 元/h<sup>[32]</sup>, 材料回收详细参考数据见表 2, 根据 Petri 网构建的拆解顺序图如图 3 所示。



注: 图中数字及符号为零件编号。  
Note: Numbers and symbols in the figure are part No.

图 2 4LZ-9.0CR 电机三维结构  
Fig.2 The motor 3D structure of 4LZ-9.0CR

表 1 4LZ-9.0CR 电机零部件详细信息  
Table 1 Details of motor parts for 4LZ-9.0CR

零件编号 Component No.	名称 Name	尺寸 Size/mm	质量 Weight/g	拆卸时间 Disassembly time/s	回收价值 Recycling value/元
1	风扇罩	150	650	10	2.60
2	风扇	119	40	6	0.02
3	前端盖	144	540	35	2.16
4	定子	115	1 180	50	4.76
5	电机外壳	151	6 350	40	25.40
6	接线盒	60	130	16	0.26
7	转子轴	260	460	60	1.84
8	转子	115	730	40	21.90
9	后端盖	150	780	35	3.12
10	换向极	51	57	10	0.23
11	主磁极	104	240	10	4.80
12	齿圈	150	960	8	3.84
13	减速轴	125	1 120	55	4.48
14	减速箱体	180	5 480	19	21.92
A1	螺钉 X12	10	120	48	0.48
A2	螺钉 X8	20	160	56	0.64

表 2 原材料回收参考数据

Table 2 Raw material recovery reference data

原材料 Raw material	回收系数 Recovery factor	回收价格 Recycling price/(元·kg <sup>-1</sup> )
塑料 Plastic	0.06	0.82
铁 Iron	0.35	1.64
钢 Steel	0.26	1.92
电子器件 Electronic device	0.11	1.19
铜 Cuprum	0.14	8.25
Nd-Fe-B 磁铁 Nd-Fe-B magnet	0.08	172

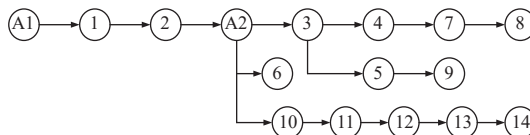


图 3 4LZ-9.0CR 电机拆解顺序图

Fig.3 Sequence diagram of motor disassembly for 4LZ-9.0CR

### 3.2 结果与分析

通过 IABC 算法求解 DRIO 模型得到一系列 Pareto 解, 如表 3 所示, 其中方案 3 和方案 4 为目标函数值的最大最小值, 分别为 124.5 元和 114.3 元。电机拆解再制造的最优解方案 3 的信息如表 4, 零件的拆解顺序为 A1→1→2→A2→6→3→4→7→8→5→9→10→11→12→13→14。对于方案 3 的 EOL 决策, 零件集{A1, 1, A2, 6, 10}

执行报废回收操作：{3, 5, 9, 12, 14}执行再利用操作：{2, 4, 7, 8, 11, 13}执行再制造操作。为更直观反应拆解再制造过程，图 4 给出了方案 3 的拆解序列与 EOL 决策顺序

图，箭头指向拆解执行方向，圆圈线型表示不同的 EOL 决策，再利用、再制造和报废回收部件分别占总零件的 37.5%、31.25% 和 31.25%。

表 3 IABC 算法获得的拆解方案 Pareto 解集

Table 3 Pareto solution set of disassembly scheme obtained by IABC algorithm

方案 Case	拆卸序列 Disassembly sequence	利润值 Profit value/元
1	A1→1→2→A2→3→5→6→9→4→7→8→10→11→12→13→14	119.6
2	A1→1→2→A2→10→11→12→13→14→3→4→7→8→5→6→9	121.7
3	A1→1→2→A2→6→3→4→7→8→5→9→10→11→12→13→14	124.5
4	A1→1→2→A2→10→11→12→13→14→3→5→6→9→4→7→8	114.3
5	A1→1→2→A2→6→10→11→12→13→14→3→5→9→4→7→8	115.2
6	A2→A1→6→10→11→12→13→14→1→2→3→4→7→8→5→9	122.8
7	A2→A1→6→10→11→12→13→14→1→2→3→5→9→4→7→8	123.5
8	A2→A1→6→1→2→3→4→7→8→5→9→10→11→12→13→14	118.4
9	A2→A1→6→1→2→3→5→9→4→7→8→10→11→12→13→14	120.5

表 4 方案 3 的拆解再制造决策

Table 4 Disassembly and remanufacturing decision of scheme 3

编号 No.	零件名称 Component name	拆卸序列号 Disassembly sequence	EOL 决策 EOL decision
1	风扇罩	No.2	回收
2	风扇	No.3	回收
3	前端盖	No.6	回收
4	定子	No.7	再利用
5	电机外壳	No.10	再制造
6	接线盒	No.5	回收
7	转子轴	No.8	再利用
8	转子	No.9	再利用
9	后端盖	No.11	再制造
10	换向极	No.12	回收
11	主磁极	No.13	再利用
12	齿圈	No.14	再制造
13	减速轴	No.15	再利用
14	减速箱体	No.16	再制造
A1	螺钉	No.1	回收
A2	螺钉	No.4	回收

最佳拆卸序列 Best disassembly sequence:  
A1→1→2→A2→6→3→4→7→8→5→9→10→11→12→13→14

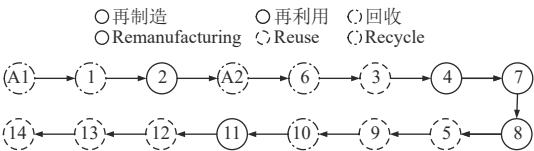


图 4 电机拆解序列与 EOL 决策

Fig.4 Motor disassembly sequence and EOL decision

3.3 对比试验分析

为了验证本模型方法的有效性，引入 3 种不同拆解再制造模型进行对比分析，结果如表 5 所示，其中，DRIO 模型考虑拆解再制造混合效益，DRIO-D 模型对所有零部件原材料回收，DRIO-R 模型将所有的零部件进行再制造。考虑再制造的 DRIO 和 DRIO-R 模型的碳排放成本约为 DRIO-D 模型的 50%，说明考虑拆解再制造比完全报废减少碳排放约 50%。DRIO-R 模型的再制造成本约为 DRIO 模型的 2 倍，但是总利润仅为 DRIO 模型的 45%，说明零件全部采取再制造操作不一定实现利润最大化。DRIO 模型的总利润为 124.5 元，相对于 DRIO-D 模型的 47.2 元和 DRIO-R 模型的 56.3 元，分别提高了 62.1% 和 54.8%，以上分析表明，零部件再制造率的增加会减少总利润，因此，适当的拆解再制造联合优化可

提高总收益。

表 5 不同模型下的求解结果对比

Table 5 Comparison of solution results under different models

模型 Model	碳排放成本 C <sub>GHG</sub> cost/元	再制造成本 Remanufacturing cost/元	总利润 Gross profit/元
DRIO	15.2	30.7	124.5
DRIO-D	32.1	0	47.2
DRIO-R	17.9	62.5	56.3

为了进一步验证改进人工蜂群算法的有效性，将 IABC 与人工蜂群算法（ABC）[33]、蚁群算法（ACA）[34] 进行对比分析，ABC 和 ACA 的算法参数设置分别见文献 [32] 和文献 [33]。对于算法性能的比较，选用特征指标超体积反应非劣解收敛性，间度量反应解的分散程度，各算法的求解结果如表 6 所示。从表 6 可以看出，IABC 算法相比于经典人工蜂群算法的求解时间缩短了 19.3%，可行解数量增加了 28.6%，相比于蚁群算法的求解时间缩短 47.8%。IABC 求解的非劣解个数最多且求解速度快，超体积值 2.813 大于 ABC（2.695）和 ACA（2.377），同时间度量值优于其他 2 种算法。以上分析表明，IABC 在求解质量和求解效率上表现优越。

表 6 不同算法的求解结果

Table 6 Solution results of different algorithms

算法 Algorithm	非劣解数 Pareto number	超体积值 Hyper volume value	间度量值 Spacing metric value	平均运行时间 Average running time/s
IABC	9	2.813	0.041 6	6.34
ABC	7	2.695	0.068 2	7.86
ACA	4	2.377	0.052 3	12.15

4 结 论

本研究提出了一种集成拆解规划和 EOL 决策方法，建立了考虑产品回收利润和碳排放成本的 DRIO 模型，将其运用到拆解再制造的集成决策优化中，并通过改进的人工蜂群算法求解所构建模型，最终确定最佳拆卸顺序和 EOL 决策。通过案例分析对本文的模型和算法进行了验证，同时将所提出的方法与 DRIO-D，DRIO-R 两种产品回收策略进行了对比分析，结果表明所提 DRIO 模型的经济效益相较于 DRIO-D 和 DRIO-R 模型，分别提高了 62.1% 和 54.8%，而 DRIO 和 DRIO-R 模型的碳排

放成本均比 DRIO-D 模型减少约 50%。IABC 算法相比于传统人工蜂群算法, 求解时间缩短了 19.3%, 可行解数量增加了 28.6%。本研究可为拆解回收企业提供利润高且节能效果好的综合性拆解决策方案, 进一步揭示了废旧产品回收利用以及再制造的经济价值和促进碳减排的社会意义。本研究仅分析了农机产品回收再制造过程的经济效益及碳排放成本, 后续将围绕智能农机装备全生命周期碳排放展开进一步研究。

#### 【参 考 文 献】

- [1] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1-11.  
LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Raise agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [2] 徐滨士, 夏丹, 谭君洋, 等. 中国智能再制造的现状与发展[J]. 中国表面工程, 2018, 31(5): 1-13.  
XU Binshi, XIA Dan, TAN Junyang, et al. Current situation and development of intelligent remanufacturing in China[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(5): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [3] 国家发展改革委. 国家发展改革委办公厅印发《关于深化再制造试点工作的通知》[EB/OL]. 2011-09-06 [2023-03-11]. <http://www.rrtj.cn/news/7058.html>.
- [4] 农业农村部. 农业农村部印发了《关于加快推进农业机械化转型升级的通知》[EB/OL]. 2019-04-19[2023-03-11]. [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-10/28/content\\_5446035.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-10/28/content_5446035.htm).
- [5] 农业农村部. 关于印发《农业机械报废更新补贴实施指导意见的通知》[EB/OL]. 2020-04-01[2023-03-11]. [http://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202003/202004/t20200416\\_6341675.htm](http://www.moa.gov.cn/nybg/2020/202003/202004/t20200416_6341675.htm).
- [6] 李方义, 戚小霞, 李燕乐, 等. 盾构机关键零部件再制造修复技术综述[J]. 中国机械工程, 2021, 32(7): 820-831.  
LI Fangyi, QI Xiaoxia, LI Yanle, et al. Review of remanufacturing and repair technology for key parts of shield machine[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(7): 820-831. (in Chinese with English abstract)
- [7] 马国杰, 朱琳影, 张苗苗, 等. 秸秆沼气发电技术生命周期评估及经济分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 162-168.  
MA Guojie, ZHU Linying, ZHANG Miaomiao, et al. Life cycle assessment and economic analysis of straw biogasification power generation technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(24): 162-168. (in Chinese with English abstract)
- [8] ZUSSMAN E, ZHOU M C. Design and implementation of an adaptive process planner for disassembly processes[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16: 171-179.
- [9] PRIOLI J P, ALRUFAIFI H M, RICKLI J L. Disassembly assessment from CAD-based collision evaluation for sequence planning[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 78: 1-9.
- [10] TIAN G D, REN Y P, ZHOU M C. Modeling and planning for dual-objective selective disassembly using AND/OR graph and discrete artificial bee colony[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15: 2456-2468.
- [11] GUO X W, LIU S X, ZHOU M C, et al. Disassembly sequence optimization for large-scale products with multiresource constraints using scatter search and Petri nets[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 46: 2435-2446.
- [12] 陈弋文, 陈伟达. 基于收益概率的不确定环境下的产品拆卸序列优化[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 793-798.  
CHEN Yiwen, CHEN Weida. Product disassembly sequence optimization under uncertain environment based on payoff probability[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2014, 20(4): 793-798. (in Chinese with English abstract)
- [13] KIZILAY D. A novel constraint programming and simulated annealing for disassembly line balancing problem with AND/OR precedence and sequence dependent setup times[J]. Computers & Operations Research, 2022, 146(8): 1-16.
- [14] FENG Y X, GAO Y, TIAN G, et al. Flexible process planning and end-of-life decision-making for product recovery optimization based on hybrid disassembly[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(1): 311-326.
- [15] 田广东, 储江伟, 金晓红, 等. 基于概率的产品可拆解性评价方法及数学描述[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(6): 1164-1170.  
TIAN Guangdong, CHU Jiangwei, JIN Xiaohong, et al. Probabilistic method and mathematical description of product disintegrability evaluation[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2011, 17(6): 1164-1170. (in Chinese with English abstract)
- [16] 任亚平, 郭洪飞, 张超勇, 等. 考虑产品制造过程内含能的选择性拆解规划能耗优化研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6): 200-210.  
REN Yaping, GUO Hongfei, ZHANG Chaoyong, et al. Study on energy consumption optimization of selective dismantling planning considering the energy contained in product manufacturing process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(6): 200-210. (in Chinese with English abstract)
- [17] SUN X, GUO S S, GUO J, et al. A two-stage interactive evolutionary algorithm for multi-objective asynchronous parallel selective disassembly sequence planning problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2023, 175: 1-19.
- [18] 王辰璇, 陈莉. 小波-智能优化支持向量机模型及其对农业可持续发展的评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(4): 208-216.



- WANG Chenxuan, CHEN Li. Wavelet-intelligent optimization model using support vector machine and its application for evaluating sustainable agricultural development[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(4): 208-216. (in Chinese with English abstract)
- [19] 梅书文, 杨金生, 张福学. 履带拖拉机再制造工程的质量体系及效益分析[J]. *中国表面工程*, 2002, 15(3): 9-13. MEI Shuwen, YANG Jinsheng, ZHANG Fuxue. Quality system and benefit analysis of crawler tractor remanufacturing project[J]. *China Surface Engineering*, 2002, 15(3): 9-13. (in Chinese with English abstract)
- [20] 侯林, 高波, 刘海春. 农机产品再制造性评价系统研究[J]. *农机化研究*, 2012, 34(7): 36-38. HOU Lin, GAO Bo, LIU Haichun. Research on remanufacturability evaluation system of agricultural machinery products[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2012, 34(7): 36-38. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王家胜, 舒林森. 农业拖拉机主轴激光熔覆再制造修复研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(7): 242-247. WANG Jiasheng, SHU Linsen. Remanufacturing and repair of agricultural tractor spindle by laser cladding[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2020, 57(7): 242-247. (in Chinese with English abstract)
- [22] YANG Y S, YUAN G, ZHUANG Q W, et al. Multi-objective low-carbon disassembly line balancing for agricultural machinery using MDFOA and fuzzy AHP[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 1082-1093.
- [23] YUAN G, YANG Y, TIAN G, et al. Comprehensive evaluation of disassembly performance based on the ultimate cross-efficiency and extension-gray correlation degree[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245: 1201-1213.
- [24] 刘城宇, 贺正楚, 卢小龙. 可持续发展目标下农作物秸秆收集运输的碳减排优化分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(10): 239-248. LIU Chengyu, HE Zhengchu, LU Xiaolong. Optimization analysis of carbon emission reduction from crop straw collection and transportation under the sustainable development goals[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(10): 239-248. (in Chinese with English abstract)
- [25] 郑博福, 梁涵, 万炜, 等. 江西省县域农业碳排放时空格局及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(23): 70-80. ZHENG Bofu, LIANG Han, WAN Wei, et al. Spatial-temporal pattern and influencing factors of agricultural carbon emissions at the county level in Jiangxi Province of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(23): 70-80. (in Chinese with English abstract)
- [26] IIGIN M A, GUPTA S M. Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(3): 563-591.
- [27] KWAK M J, HONG Y S, CHO N W. Eco-architecture analysis for end-of-life decision making[J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(22): 6233-6259.
- [28] SHAFIEE M, FINKELSTEIN M, CHUKOVA S. On optimal upgrade level for used products under given cost structures[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2011, 96(2): 286-291.
- [29] SAIDI M M, NOOROSSANA R, SHAFIEE M. Modeling and analysis of effective ways for improving the reliability of second-hand products sold with warranty[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, 46: 253-65.
- [30] LIANG J, GUO S, DU B, et al. Restart genetic flatworm algorithm for two-sided disassembly line balancing problem considering negative impact of destructive disassembly[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 355: 1311-1317.
- [31] 王书伟, 徐国勋, 刘佳. 第 II 类双边拆卸线平衡问题建模与优化[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(8): 51-56. WANG Shuwei, XU Guoxun, LIU Jia. Modeling and optimizing the two-sided disassembly line balancing problem of type II[J]. *Operation Research And Management Science*, 2022, 31(8): 51-56. (in Chinese with English abstract)
- [32] 王伏林, 冯显东, 赵明任, 等. 基于拆卸稳定性的多路径几何可拆卸性分析方法[J]. *机械设计与研究*, 2022, 38(6): 126-131. WANG Fulin, FENG Xiandong, ZHAO Mingren, et al. Method for analysis of multi-path geometric dismountability based on disassembly stability[J]. *Mechanical Design and Research*, 2022, 38(6): 126-131. (in Chinese with English abstract)
- [33] TIAN G D, REN Y P, ZHOU M C. Modeling and planning for dual-objective selective disassembly using AND/OR graph and discrete artificial bee colony[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 1: 2456-2468.
- [34] FENG Y, ZHOU M C, TIAN G, et al. Target disassembly sequencing and scheme evaluation for CNC machine tools using improved multiobjective ant colony algorithm and fuzzy integral[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, 49(12): 2438-2451.

# Integrated optimization of disassembly planning and EOL decision of obsolete agricultural machinery products under the dual carbon target

YUAN Gang<sup>1,2</sup>, LI Hongbo<sup>2</sup>, LUO Jianqiang<sup>2</sup>, ZHANG Zongyi<sup>2</sup>, YANG Yinsheng<sup>3\*</sup>, SUN Junhua<sup>4</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. China Institute for Agricultural Equipment Industrial Development, Jiangsu University, Zhenjiang 212000, China; 3. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 4. Agricultural Machinery Industry Development Division, Jiangsu Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** A large number of near-obsolete agricultural machinery can be produced with the agricultural intelligentization and the life cycle of machinery equipment in recent years. Among them, the disassembly and recycling of agricultural machinery and equipment can play an important role in the utilization of ecological resources and sustainable agriculture. The recycling of obsolete agricultural machinery products can also greatly contribute to realizing sustainable development and a circular economy under the carbon peak and carbon neutrality. This study aims to perform the integration optimization of obsolete agricultural machinery product disassembly planning and remanufacturing decisions under the requirements of dual carbon target. The economic benefits were also evaluated to consider the carbon emission cost of the disassembly process. Firstly, a disassembly and remanufacturing integrated optimization model (DRIO) was constructed using product depreciation rate, remanufacturing demand and cost. The mathematical model included the profit maximization of remanufacturing product revenue, such as the cost of acquisition, disassembly, remanufacturing, and carbon emission. Secondly, an improved artificial bee colony algorithm (IABC) was proposed to solve the mathematical model. A set of Pareto schemes were obtained with high profit and low environmental carbon emission. The improved ABC algorithm included the population initialization, bee hiring, watch, and bee scout stage. A logistic mapping was introduced to generate high-quality initial solutions. A neighborhood search mechanism was added to the hire and watch bee phases, in order to enhance the colony search with less local optimality. A roulette wheel was also used in the scout bee phase. The motor was one of the main recycling and remanufacturing components of agricultural machinery, indicating the strong universality and high recycling-remanufacturing profit. Finally, the effectiveness and feasibility of the system were verified by an example of combined harvester disassembly. A collection was generated for the reuse, recycling, and remanufacturing of parts of the motor EOL decision. The results show that the economic benefits of the improved DRIO model were improved by 62.1% and 54.8%, respectively, compared with the DRIO-D and DRIO-R models. The carbon cost of the DRIO and DRIO-R models was about 50% less than that of the DRIO-D model. The characteristic index was chosen to measure the convergence of the super volume reaction non-inferior solution, and the dispersion degree of the reaction solution was measured by the spacing. The solution time of IABC was shortened by 19.3%, and the number of feasible solutions increased by 28.6%, compared with the classical. The improved DRIO model presented better economic benefits than DRIO-D and DRIO-R models. The IABC shared better performance, in terms of robustness and convergence. The solution time of IABC was shortened by 47.8%, and the number of feasible solutions was doubled than before. In the super volume value, the artificial bee colony algorithm (2.695) was similar to the ant colony algorithm (2.377), but both were smaller than the IABC algorithm (2.813). In the spacing measure, the ant colony algorithm (0.052 3) was lower than the artificial colony algorithm (0.068 2), but the IABC (0.041 6) was the lowest. Therefore, the integrated optimization model of disassembly planning constructed can be effectively improved the economic benefits of the disassembly and recycling of waste agricultural machinery recycling products, for less carbon emissions. The finding can provide an important basis for the formulation of relevant standards, together with the decision support for the green design of agricultural machinery.

**Keywords:** agricultural machinery; optimization; carbon emissions; disassembly planning; remanufacturing decision; obsolete agricultural machinery