DOI: 10.3901/JME.2021.09.203

基于非合作博弈的废旧机械装备零部件 重组策略研究*

陈颜祥¹ 江志刚^{1,2} 朱 硕^{1,2} 张 华^{1,2}

- (1. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室 武汉 430081;
2. 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081)

摘要: 废旧零部件的重用组合策略是影响废旧机械装备再制造经济性的重要因素。由于各废旧零部件重用策略的不确定性及其零件间耦合关系的复杂性,导致废旧机械装备重组策略优化变得更为复杂,并由此影响产品的多寿命周期成本。为此,提出一种基于非合作博弈的废旧机械装备零部件重组策略研究方法,将重组策略下成本与寿命均衡性的多目标优化模型转变为非合作博弈模型并形成映射关系,以不同重组策略的成本与寿命均衡性作为非合作博弈双方,通过对废旧零部件的模糊聚类分析形成博弈双方策略归属,并结合博弈效用函数构建效用矩阵,通过效用矩阵的纳什均衡分析得到最优重组策略,同时改善传统基于经验或线性加权法在解决多目标优化模型时的不足。将所提方法应用于 CA6140 废旧机床重组策略优化,通过与传统方案的比较,证明其实用性与有效性。

关键词: 再制造; 多寿命周期成本; 零部件重组策略; 非合作博弈; 纳什均衡

中图分类号: TG95

Research on Reassembly Strategy of Used Mechanical Equipment Components Based on Non-cooperative Game

CHEN Yanxiang¹ JIANG Zhigang^{1,2} ZHU Shuo^{1,2} ZHANG Hua^{1,2}

- (1. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430081;
2. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430081)

Abstract: The reassembly strategy of used components is an important factor affecting the cost of remanufacturing of used mechanical equipment. The uncertainty of the reuse strategy and the complexity coupling relationship between used components, make the optimization of the reassembly strategy more complex, and affect the multi-life cycle cost of product. A research on the reassembly strategy of used mechanical equipment components based on non-cooperative game is proposed, the multi-objective optimization model of reassembly strategy with cost and balance of residual service life is transformed into a non-cooperative game (NCG) model and a mapping relationship is formed. The cost and balance of residual service life of different reassembly Strategies are taken as non-cooperative game parties, fuzzy cluster analysis is used to form the strategic attribution of two players in the game, and the utility matrix is formed by combining the utility function of the players. The optimal reassembly strategy is obtained through the Nash equilibrium analysis of the utility matrix, to improve the short comes of previous methods which depend on experience or linear weighted. A used lathe C6132 is taken as an example, to validate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words: remanufacturing; multi-life cycle cost; component reassembly strategy; non-cooperation game(NCG); Nash equilibrium

* 国家自然科学基金资助项目(51675388, 52075396)。20200601 收到初稿,
20210203 收到修改稿

0 前言

再制造是通过修复或更换部分零部件,从而将废旧产品性能提升到“如新”状态的过程^[1]。在对废旧机械装备进行产品级再制造以恢复其性能与功能时,所属零部件不同的重用组合策略决定了产品的再制造生产成本与下一寿命周期运行维护费用,最终对废旧机械装备的多寿命周期成本产生影响。由于零部件在重用策略上的不确定性,增加了重用组合策略优化的复杂程度。因此如何针对废旧机械装备再制造特点,合理制定面向产品多寿命周期成本的零部件重组策略,已成为废旧机械装备再制造亟待解决的关键问题之一。

现阶段针对零部件级的重用策略问题,国内外学者已展开了广泛的研究,姜兴宇等通过对废旧机电产品再制造质量特征与客户需求间的匹配关系,对废旧机电产品的再制造质量标准进行了制定^[2]。鲍宏等给出了应用 TRIZ 理论来解决再制造指标间冲突的方法,提高再制造效率与成功率^[3]。FEGADE 等^[4]通过再制造过程中对于环境及经济指标的影响,对再制造产品重用框架进行了构建。SOH 等^[5]综合考虑零部件的结构复杂性与可达性,提出了面向再制造产品的拆卸与装配准则,给出再制造产品的设计与分析方法。HATCHE 等^[6]通过对再制造设计概念的扩展,统筹考虑影响再制造决策的众多因素,提出了一种集成网络模型进行因素间关系的识别。上述研究基于废旧零部件剩余价值与需求对其重用策略进行了分析,但在进行产品级零部件重用组合策略研究时,不仅需要考虑个体零部件的重用策略对于产品整体的影响,还需要针对产品级再制造特点,考虑不同废旧零部件间重用策略组合的协调优化问题。

在再制造产品级重组策略研究方面,ZWOLINSKI 等^[7]通过对再制造重组策略约束体系的集成,开发出一种基于再制造零部件重组方式的工具(REPRO2),在设计阶段完成再制造重组决策。CAO 等^[8]通过对废旧机床功能与结构分析,提出了一种机床重用再设计方法。王涵等^[9]通过目标级联模型,建立再制造成本、能耗与材料消耗的合理区间与传递反馈函数,借助自适应调整策略的教与学算法对废旧机械装备进行重组方式再设计。宿彪等^[10]以再制造装配偏差与质量损失为目标建立多目标优化模型,对再制造产品零部件选配方式做出优化。LIU 等^[11]针对不同零部件在再制造时的不确

定度,对废旧零部件再制造公差等参数的组合分配进行了决策,实现再制造零部件的分组选配。薛臣等^[12]通过分析废旧机械装备零部件间再制造工艺复杂性、再制造成本与剩余寿命建立多目标优化模型,并借助第二代强度 Pareto 进化算法对零部件再制造组合进行了优化,但在分析剩余寿命均衡性时未考虑整体寿命过低的可能。上述文献在进行产品级重组策略制定时,未考虑重组策略对产品多寿命周期成本的影响,并且在进行多目标优化模型求解时,普遍采用线性加权法将多个优化目标联合,由于目标权重系数选取的主观性较强,降低了最终方案的客观性与普适性。

通过对废旧机械装备零部件重用组合策略特点的研究,发现其作为离散型多目标优化问题,各优化目标间的冲突可被视为一种非合作博弈(Non-cooperative game, NCG)问题。由于博弈理论中纳什均衡解的“自我强制性”特点,使得模型无需过多人为规则制定便可稳定的输出最优解,具有较高的客观性与鲁棒性,可以很好地解决传统线性加权法在进行多目标优化时主观性过强的问题。

综上,针对废旧机械装备多寿命周期成本下零部件重组策略优化问题,提出一种基于非合作博弈的废旧机械装备零部件重组策略研究方法。首先根据废旧机械装备重组策略特点与多寿命周期成本影响因素分析,将不同零部件重组策略的成本与寿命均衡性作为博弈双方进行博弈,然后通过成本、寿命均衡性函数与策略归属构建博弈双方的效用函数与策略空间,形成博弈效用矩阵,最后通过对效用矩阵的分析与比较寻找纳什均衡点,从而得到最优重组策略。

1 基于NCG的重组策略优化过程模型

1.1 基于NCG的重组策略优化机制

一个完整的博弈模型可以表示为 $G = \{P_i; S_i; ui(i=1,2,\dots,n)\}$, 其中 P_i 为博弈方, S_i 为博弈方 P_i 所对应的策略空间, ui 为博弈方效用函数。本文中博弈方分别为不同重组策略下的再制造成本与零部件寿命均衡性,策略空间为博弈方所属零部件的不同重组方式,效用为博弈方收益。

非合作博弈作为一种非零和博弈通过引导博弈双方在不同策略下的效用冲突,最终达成纳什均衡以获得最优策略。此时博弈双方均不会单独做出策略改变而降低自身收益,博弈由此进入稳定状态。非合作博弈模型在纳什均衡点满足式(1)

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) \geq u_i(s_i, s_{-i}^*) \quad s_i \in S_i \quad (1)$$

式中, u_i 为博弈方 P_i 的效用; s_i^* 与 s_{-i}^* 分别为博弈方 P_i 在纳什均衡处的策略与除 P_i 之外的其他博弈方在纳什均衡处的策略; s_i 为博弈方 P_i 非纳什均衡处的策略。

纳什均衡的“自我强制性”特点,使得无需过多的主观规则限定便可使输出解保持稳定状态,具有显著的客观性与普适性特点。

1.2 基于 NCG 的重组策略优化过程模型

对废旧机械装备零部件进行重组策略研究的

目的在于得到多寿命周期成本下的废旧机械装备零部件重用组合最优策略。使用非合作博弈模型进行重组策略优化时,首先对废旧零部件进行零部件级的重用策略分析,建立策略层;然后在博弈层通过模糊聚类对各零部件进行博弈方策略归属,并以再制造成本函数与零部件寿命均衡性函数为目标构建多目标优化模型,形成博弈效用矩阵;最后在优化层通过对博弈效用矩阵的纳什均衡分析,得到最优重组策略。整个过程如图 1 所示。

图 1 基于 NCG 的废旧机械装备重组策略优化过程模型

2 基于 NCG 的重组策略优化数学模型

2.1 多目标优化模型与非合作博弈模型的映射关系

在进行废旧机械装备重组策略优化时,不同的废旧机械装备重组策略会导致不同的制造成本与剩余寿命均衡性,其中制造成本决定了当前再制造活动的经济效益,并可以与工艺性、能耗等指标形成直接映射^[13];剩余寿命均衡性则通过影响产品检测与运行维护费用影响了废旧机械装备下一寿命周期的成本。因此重组策略的成本与剩余寿命均衡性是影响废旧机械装备再制造多寿命周期成本的关键。

基于此,本文以再制造产品成本与零部件间寿命均衡性为优化目标,对废旧机械装备零部件重组策略进行优化,多目标优化数学模型如式(2)、式(3)所示

$$\begin{cases} \min C = C(C_1, C_2, \dots, C_n) \\ \min \sigma_L = \sigma_L(L_1, L_2, \dots, L_n) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & C_i \in \{C'_i\} \\ & L_i \in \{L'_i\} \quad 1 \leq i \leq n \\ & C \leq C_{\text{new}} \cdot 80\% \\ & L_{\min} \geq |L| \\ & L_{iAL} \geq \theta \cdot L_{iRU} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, C 与 σ_L 分别为废旧机械装备重组策略成本函数与寿命均衡性函数; C_i 与 L_i 分别为废旧零部件 i 的成本与剩余寿命; C'_i 与 L'_i 分别为废旧零件 i 在采用可行重用策略时的成本与剩余寿命集合, n 为待决策废旧零部件数量, C_{new} 为购买新设备价格, 考虑企业对于再制造产品的认可度, 再制造成本不应超过购买新设备的 80%; $L_{\min}$ 与 $|L|$ 分别为重组策略中零部件剩余寿命最小值与企业最低规定阈值, 为防止产品整体寿命过低, 策略中零部件剩余寿命最小值应不低于企业最低规定阈值; L_{iAL} 与 L_{iRU} 分别为废旧零部件 i 同类调配件剩余寿命与自身再利用剩余寿命, 为了防止调配件引起产品整体寿命性能劣化, 同类调配件在品质上应不低于原零部件, 即同类调配件剩余寿命应不低于设备原零部件剩余寿命; θ 为安全系数, 由专家基于经验获得, 通常产品重要程度越高, θ 的取值越大。

再制造重组策略多目标优化模型与非合作博弈模型的映射关系如图 2 所示。

图 2 多目标优化与非合作博弈模型映射关系

2.2 博弈方效用函数

2.2.1 再制造成本博弈方效用函数

废旧零部件的不同重用策略会导致不同的再制造重组策略成本, 废旧机械装备重组策略成本博弈方效用函数如式(4)所示

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_j \xi_{iC} \cdot C_{ij} \quad (4)$$

式中, n 为废旧零部件数量; C_{ij} 为废旧零部件 i 采用重用策略 j 时的成本, 可分为固定成本与变动成本两部分。其中, 变动成本受加工批量、阶梯电价、工人熟练度等方面影响产生波动(如生产批量越大, 单件平均生产成本越低)。为此引入成本修正系数 ξ_{iC} 对废旧零部件 i 的再制造成本进行修正, ξ_{iC} 的值基于历史数据与专家经验获得, 由企业直接提供。

由于废旧零部件的重用策略具有加工工艺路线不确定性。在设计阶段对重用策略成本进行预测时, 需要考虑不同加工工艺路线的概率。借助工艺流程图对废旧零部件工艺路线进行表述, 协助专家对工艺流动概率做出合理的分析预测^[14], 某废旧车床刀架工艺流程如图 3 所示。

图 3 废旧车床刀架再制造工艺流程图

图 3 中节点代表工艺方法, 箭头代表工艺流向。当同一节点存在多个流出箭头时(如 $2 \rightarrow 3$, $2 \rightarrow 4$, $2 \rightarrow 6$), 则需要根据同类产品历史数据由专家进行工艺流向概率预测。节点 N , RU , RM 与 AL 分别为废旧零部件换新, 再利用, 再制造与同类调配四种重用策略。当某零部件采用同类调配策略时, 该零部件进入调配库, 与其他同类零部件进行调配。此时废旧零部件 i 采用重用策略 j 的成本如式(5)所示

$$C_{ij} = \sum_{g=1}^m p_g \cdot C_g \quad (5)$$

式中, p_g 与 C_g 分别为废旧零部件 i 达成重用策略 j 时第 g 条加工工艺路线的概率与成本; m 为可行加工工艺路线数。

2.2.2 寿命均衡性博弈方效用函数

废旧机械装备所属零部件的剩余寿命均衡性是影响再制造机械装备下一寿命周期成本的关键。当废旧零部件的剩余寿命出现较大差异时, 产品会因零部件无法同时结束剩余寿命而多次进入产品再制造回收与检测环节, 造成额外的物流与运行维护成本。使用零部件间的剩余寿命标准差来对产品寿命均衡性进行描述, 如式(6)所示

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{L} - \xi_{iL} L_{ij})^2} \quad (6)$$

式中, σ_L 为产品剩余寿命标准差; σ_L 的值越小, 表明该重组策略下各零部件剩余寿命越均衡; $\bar{L}$ 为零部件剩余寿命平均值; L_{ij} 为废旧零件 i 采用重用

策略 j 时的剩余寿命。机械装备零部件的寿命因结构、要求与标准不同,在设计时便具有较大差别^[15],因此引入寿命修正系数 ξ_{iL} 对废旧零部件 i 的剩余寿命进行修正,以保证寿命均衡函数的合理性。为简化计算, ξ_{iL} 的取值为最小零部件设计寿命与各零部件设计寿命比值的模糊取整。

2.3 博弈效用矩阵建立

在确认非合作博弈模型博弈方与相应效用函数后,便可构建不同重组策略下的效用矩阵,如表 1 所示。

表 1 再制造重用策略效用矩阵

重用组合策略	成本效用 u_1	寿命均衡效用 u_2
X_1	$u_1(X_1)$	$u_2(X_1)$
X_2	$u_1(X_2)$	$u_2(X_2)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
X_n	$u_1(X_n)$	$u_2(X_n)$

在实际问题中,由于各零部件的不同重组策略是成本与寿命均衡性函数共有的设计变量,而非合作博弈模型要求博弈双方在进行决策时彼此独立且互不干扰,因此需要对废旧零部件做出博弈方策略归属,以形成博弈双方独立的策略空间。模糊聚类法通过对模糊相似矩阵截数的取值变化可以实现变量的灵活聚类,过程如下所述。

(1) 建立初始样本。废旧零部件 i 相对博弈方效用函数的偏导如式(7)所示

$$\delta_i = \left\{ \frac{\partial L_i}{\partial S_L}, \frac{\partial C_i}{\partial C_L} \right\} = \{ \xi_{iC}, \xi_{iL} \} \quad (7)$$

式中, δ_i 为废旧零件 i 对优化目标影响因子的集合。

(2) 效用纲处理。由于博弈双方效用的量纲不同,需要进行量纲处理以消除影响,如式(8)所示

$$\xi'_{ik} = \frac{\xi_{ik} - \bar{\xi}_k}{\sigma_k} \quad i=1,2,\dots,n \quad k=C,L \quad (8)$$

$$\text{式中, } \bar{\xi}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_{ik}, \quad \sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\xi_{ik} - \bar{\xi}_k)^2}$$

经极差变换如式(9)所示

$$\xi''_{ik} = \frac{\xi'_{ik} - \min_{1 \leq i \leq n} \{ \xi'_{ik} \}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{ \xi'_{ik} \} - \min_{1 \leq i \leq n} \{ \xi'_{ik} \}} \quad (9)$$

(3) 建立模糊相似矩阵。建立模糊相似矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$, 其中 r_{ij} 为 ξ''_{ik} 与 ξ''_{jk} 的相似度,通过绝对距离法进行计算,如式(10)所示

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 1 - M \sum_k |\xi''_{ik} - \xi''_{jk}| & i \neq j, k = C, L \end{cases} \quad (10)$$

式中, M 为相似度修正系数,其取值应在 $\sum_k |\xi''_{ik} - \xi''_{jk}| > 1$ 时,保证 $r_{ij} \in [0,1]$ 。

(4) 建立模糊等价矩阵。对模糊相似矩阵 R 使用自平方合成法建立传递闭包矩阵 R^* ,即 R 的模糊等价矩阵,且满足 $R^* = R^* \circ R^*$,“ $\circ$ ”为布尔算子。

(5) 策略聚类归属。根据聚类需求选取截数 λ 对矩阵进行分类,满足 $R^*_\lambda = \begin{cases} 1, r_{ij} \geq \lambda \\ 0, r_{ij} < \lambda \end{cases}$ 以获得不同的截集,最终通过对相同截集元素的聚类,实现各废旧零部件对于博弈方的策略归属。

在完成博弈策略聚类后,最终得到非合作博弈模型效用矩阵如表 2 所示。

表 2 非合作博弈模型效用矩阵

成本 P_1	寿命均衡性 P_2		
	β_1	...	β_m
α_1	$\mu_1(\alpha_1, \beta_1), \mu_2(\alpha_1, \beta_1)$	...	$\mu_1(\alpha_1, \beta_m), \mu_2(\alpha_1, \beta_m)$
$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$
α_n	$\mu_1(\alpha_n, \beta_1), \mu_2(\alpha_n, \beta_1)$	...	$\mu_1(\alpha_n, \beta_m), \mu_2(\alpha_n, \beta_m)$

表 2 中, P_1 与 P_2 分别为成本博弈方与寿命均衡性博弈方;效用 $u_1(\alpha_n, \beta_m)$ 与 $u_2(\alpha_n, \beta_m)$ 分别为博弈方 P_1 所属零部件采用 n 重组策略,质量博弈方 P_2 所属零部件采用 m 重组策略时,成本博弈方与寿命均衡性博弈方效用。

2.4 纳什均衡分析

再制造重组策略多目标优化数学模型的适应度取决于博弈双方在不同策略下的效用。在非合作博弈中,当存在一个策略使得所有博弈方均处于严格优势时^[16],这种绝对的利好策略是各博弈方都愿意选择的,代表了博弈最稳定的结果。但在实际工程问题中,由于博弈方效用间的冲突,使各博弈方均达到严格优势的理想策略难以出现。非合作纳什均衡便是基于此类问题提出的一种解决方法,不同于多目标规划统筹所有优化目标的联合行动,非合作博弈中各博弈方只为自己的收益进行绝对理性的调整,当所有博弈方所选策略都是己方相对其他策略的最佳策略时,整个博弈系统达到纳什均衡。结合式(1),当博弈方在满足式(11)时,博弈达成纳什均衡。

$$u_i(s_i^*, s_{-i}^*) = \min u_i(s_i, s_{-i}^*) \quad (11)$$

此时博弈方做出的任何改变都只会使自己的收益下降, 系统由此变为一个各博弈方都不会变动的稳定态。

非合作博弈纳什均衡由于无需考虑博弈方权重, 在结果方面减小了人的主观影响, 使得最终的结果具备更高的客观性与普适性, 并且当优化目标函数发生较小改变时, 不会影响到纳什均衡的稳定状态, 使得最终解具有较好的鲁棒性。在计算求解时, 由于不需要复杂算法或多次迭代, 仅依靠比较程序便可实现快速收敛, 优化过程如图 4 所示。

图 4 非合作博弈模型优化过程

3 实例研究

车床作为一种重要的工业生产设备, 被广泛应用于各类回转类零部件的生产加工过程中, 具有巨大的需求与保有量, 再制造价值高。现以某企业废旧 CA6140 车床为例, 使用非合作博弈模型对其进行再制造重组策略优化。

3.1 废旧车床零部件重用策略分析

对该型号废旧车床零部件进行再制造重用策略分析: 电器类元件、密封类元件等易耗品不进行决策直接换新; 刀架是影响车床加工精度的关键部件, 在服役过程中, 具有较大的失效不确定性, 在进行重用决策时, 四种重用策略均有可能; 主轴是保证加工精度的核心部件, 在服役过程中会有较大损伤, 在进行重用决策时, 不考虑直接再利用或直接同类调配; 变速箱、床鞍、尾座等铸造类零部件, 精度要求低, 具有较高的再制造价值, 在无性能升级要求前提下, 不考虑直接换新; 丝杠与光杆类零件再制造价值较低, 不考虑再制造; 导轨修复工艺简单, 再制造性价比高且新品价格较贵, 不考虑直接换新。

购买新设备的价格为 $C_{new} = 8k$, 企业规定设备的最小剩余寿命阈值为 $|L| = 2.5k$, 同类调配件安全

系数为 $\theta \geq 1.5$ 。

综上, 结合企业意见与调配件库存, 该废旧车床各零部件重用策略分析如表 3 所示。

表 3 车床各零部件重用策略分析

废旧零部件	换新	再利用	再制造	同类调配
刀架 C_1	1	1	1	1
主轴 C_2	1	0	1	0
变速箱 C_3	0	1	1	1
尾架 C_4	0	1	1	0
床鞍 C_5	0	1	1	0
丝杠/光杆 C_6	1	1	0	1
导轨 C_7	0	1	1	1

*注: 表中, 1 代表可采用的重用方式, 0 代表不采用重用方式。

3.2 基于 NCG 的再制造重用策略优化

3.2.1 成本博弈方分析

废旧车床再制造重组成本由式(4)确定。以刀架重用成本为例进行说明, 该刀架工艺路线图及工艺流向概率如图 3 所示, 图中各工艺节点对应工艺方法根据该企业同类废旧车床刀架产品历史工艺流程得到, 如表 4 所示, 工艺节点流向概率与成本由企业历史数据得到。将 p_g 与 C_g 代入式(4), 得到刀架不同重用策略成本如表 5 所示, 其他废旧零部件重用策略成本如表 6 所示。

表 4 刀架再制造流程工艺节点及对应方案

节点编号	1	2	3	4
工艺	清洗检测	刷镀	涂敷	焊补
节点编号	5	6	7	8
工艺	铣削	粗磨	平面校正	精磨

表 5 刀架重用策略成本

方案	换新	再利用	再制造	同类调配
成本/元	941	412	645	858

表 6 废旧零部件重用策略成本

废旧零部件	换新/元	再利用/元	再制造/元	同类调配/元
刀架 C_1	941	412	645	858
主轴 C_2	1 411	0	852	0
变速箱 C_3	0	342	483	637
尾架 C_4	0	133	260	0
床鞍 C_5	0	473	658	0
丝杠/光杆 C_6	707	283	0	607
导轨 C_7	0	187	524	646

3.2.2 寿命均衡性博弈方分析

零部件的剩余寿命是一个随零部件自身品质与服役环境变化而变化的动态值, 受历史服役工况、实际使用寿命等多方面因素影响^[17]。借助神经网络算法的线性映射能力对零部件剩余寿命进行预测。

采用三层神经网络结构，其中输入层神经元为实际使用寿命，历史服役工况，失效程度与重用策略，输出层神经元为剩余使用寿命，隐藏层神经元个数基于经验公式进行确定，如式(12)所示

$$h = \sqrt{mn} + \gamma \quad \gamma=1 \sim 10 \quad (12)$$

式中， m 与 n 分别为输入与输出神经元数目， γ 为修正系数。建立 4-4-1 结构的三层神经网络模型，如图 5 所示，同类调配件由于也经过相应再利用工艺流程，因此其剩余使用寿命预测模型与图 5 一致。最终获得各废旧零部件不同重用策略下的剩余寿命如表 7 所示。

图 5 神经网络预测剩余寿命模型

表 7 废旧零部件剩余使用寿命

废旧零部件	换新/h	再利用/h	再制造/h	同类调配/h
刀架 C_1	7 892.51	2 851.79	5 516.14	6 813.75
主轴 C_2	6 712.54	0	4 932.48	0
变速箱 C_3	0	5 451.35	9 254.49	10 134.18
尾架 C_4	0	5 083.48	9 581.15	0
床鞍 C_5	0	3 253.31	6 426.34	0
丝杠/光杆 C_6	7 934.86	2 461.46	0	7 048.62
导轨 C_7	0	4 418.13	5 832.28	7 434.19

$$R = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 0.980 & 0 & 0.980 & 0 & 0.980 & 0 \\ 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 0.980 & 0 & 0.980 & 0 & 0.980 & 0 \\ 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 1.000 & 0 & 0.980 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 \\ 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 0.980 & 0 & 1.000 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 \\ 0.980 & 0 & 0.980 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0.980 & 0 & 0.980 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0.980 & 0 & 0.980 & 0 & 0.730 & 0 & 0.730 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 & 1.000 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

得到传递闭包矩阵 $R = R^* = R^* \cdot R^*$ ，取截数 $\lambda = 0.98$ ，得到各废旧零部件关于博弈方的策略归属为 $S_1 = (S_{11}, S_{12}, S_{15}, S_{16}, S_{17}) = (C_1, C_2, C_5, C_6, C_7)$ ，共包含 $4 \times 2 \times 2 \times 2 \times 3$ (96) 种策略， $S_2 = (S_{23}, S_{24}) = (C_3, C_4)$ ，共包含 3×2 (6) 种策略。

对效用值进行标准化处理，如式(17)所示

根据表 7，丝杠与光杆再利用策略剩余寿命不满足 $L_{min} \geq |2.5k|$ ，因此在进行重组策略时，不采用丝杠与光杆再利用策略。各同类调配件剩余寿命 $L_{iAL} \geq 1.5L_{iRU}$ ，满足企业要求。刀架，主轴，床鞍，丝杠与导轨在设计寿命上相差不大，取寿命修正系数 $\xi_{1L} = \xi_{2L} = \xi_{5L} = \xi_{6L} = \xi_{7L} = 1$ 。变速箱、尾架在设计寿命方面相比其他零部件较长，取其寿命修正系数 $\xi_{3L} = \xi_{4L} = 0.5$ 。

3.3 博弈效用矩阵构建

采用模糊聚类对废旧零部件进行博弈方策略归属。根据式(7)，废旧零部件对成本博弈方的影响程度为废旧零部件成本修正系数 ξ_{iC} ，如式(13)所示

$$\alpha = \{\xi_{1C}, \xi_{2C}, \xi_{3C}, \xi_{4C}, \xi_{5C}, \xi_{6C}, \xi_{7C}\} = \{0.85, 0.85, 1.00, 0.95, 0.90, 0.90, 0.90\} \quad (13)$$

废旧零部件对寿命均衡性博弈方的影响程度为废旧零部件寿命修正系数 ξ_{iL} ，如式(14)所示

$$\delta_{i2} = \{\xi_{1L}, \xi_{2L}, \xi_{3L}, \xi_{4L}, \xi_{5L}, \xi_{6L}, \xi_{7L}\} = \{1.0, 1.0, 0.5, 0.5, 1.0, 1.0, 1.0\} \quad (14)$$

废旧零部件对博弈双方的影响因子集合 δ_i 如式(15)所示

$$\begin{aligned} \delta_1 &= (\xi_{1C}, \xi_{1L}) = (0.85, 1.0) \\ \delta_2 &= (\xi_{2C}, \xi_{2L}) = (0.85, 1.0) \\ \delta_3 &= (\xi_{3C}, \xi_{3L}) = (1.00, 0.5) \\ \delta_4 &= (\xi_{4C}, \xi_{4L}) = (0.95, 0.5) \\ \delta_5 &= (\xi_{5C}, \xi_{5L}) = (0.90, 1.0) \\ \delta_6 &= (\xi_{6C}, \xi_{6L}) = (0.90, 1.0) \\ \delta_7 &= (\xi_{7C}, \xi_{7L}) = (0.90, 1.0) \end{aligned} \quad (15)$$

根据式(10)，取模糊系数 $M = 0.5$ 使 $r_{ij} \in [0, 1]$ ，此时模糊相似矩阵如式(16)所示

$$\begin{aligned} u_1(C) &= \frac{C_{nm}}{C_{\min}} \\ u_2(L) &= \frac{\sigma_{Lnm}}{\sigma_{L\min}} \quad 1 \leq m \leq 6, 1 \leq n \leq 96 \end{aligned} \quad (17)$$

式中， C_{nm} 与 σ_{Lnm} 分别为博弈方 P_1 采用策略 n ，博弈方 P_2 采用策略 m 时的再制造成本与寿命均衡性

效用值; $C_{\min}$ 与 $\sigma_{L\min}$ 分别为再制造成本效用最小值与寿命均衡性效用最小值。此时该废旧车床不同重

组策略下再制造成本与寿命均衡性非合作博弈效用矩阵如表 8 所示。

表 8 废旧车床再制造成本-寿命均衡效用矩阵

策略编号	成本/元(P_1)	寿命均衡/h(P_2)					
		2,2	2,3	3,2	3,3	4,2	4,3
1	1,1,2,1,2	1.30, 2.86	1.34, 2.55	1.35, 2.61	1.39, 2.20	1.40, 2.59	1.44, 2.16
2	1,1,2,1,3	1.41, 2.85	1.45, 2.50	1.46, 2.57	1.50, 2.10	1.51, 2.54	1.55, 2.05
3	1,1,2,1,4	1.45, 3.02	1.50, 2.64	1.50, 2.71	1.54, 2.22	1.55, 2.67	1.59, 2.15
⋮							
40#	2,3,2,4,2	1.00, 1.94	1.04, 1.81	1.04, 1.84	1.08, 1.62#	1.09, 1.87	1.14, 1.63
⋮							
65	3,3,2,4,3	1.18, 2.07	1.23, 1.77	1.23, 1.83	1.27, 1.40	1.28, 1.83	1.33, 1.37
66	3,3,2,4,4	1.23, 2.40	1.27, 2.10	1.27, 2.16	1.31, 1.73	1.32, 2.14	1.37, 1.70
67	3,3,3,1,2	1.17, 2.31	1.21, 1.95	1.21, 2.02	1.26, 1.50	1.27, 2.00	1.31, 1.45
68	3,3,3,1,3	1.28, 2.32	1.32, 1.91	1.33, 1.99	1.37, 1.39	1.38, 1.96	1.42, 1.32
69	3,3,3,1,4	1.32, 2.54	1.36, 2.11	1.37, 2.19	1.41, 1.59	1.42, 2.15	1.46, 1.51
70*	3,3,3,4,2	1.13, 2.05	1.18, 1.68	1.18, 1.75	1.22, 1.18*	1.23, 1.74	1.28, 1.13
⋮							
94	4,3,3,4,2	1.20, 2.23	1.25, 1.85	1.25, 1.92	1.29, 1.35	1.30, 1.90	1.35, 1.29
95	4,3,3,4,3	1.32, 2.24	1.36, 1.79	1.36, 1.88	1.41, 1.20	1.42, 1.84	1.46, 1.12
96	4,3,3,4,4	1.36, 2.46	1.40, 2.00	1.40, 2.08	1.45, 1.42	1.46, 2.04	1.50, 1.33

注: 1. 表中数字代号代表对应废旧零部件的重用策略, 1 为换新、2 为再利用、3 为再制造、4 为同类调配; 2. 表格纵栏为成本博弈方的 1~96 种策略选择, 横栏为寿命均衡博弈方的 1~6 种选择; 3. #标记数据为纳什均衡策略, *为线性加权最优策略。

3.4 策略分析

通过表 8, 对不同重用策略组合下该车床的再制造成本与寿命均衡性效用进行策略分析。

对于成本博弈方效用, 策略组合 $S_1 = \{(S_{11}, S_{12}, S_{15}, S_{16}, S_{17})\} = \{(C_1, C_2, C_5, C_6, C_7)\} = \{(2, 3, 2, 4, 2)\}$ 具有严格优势, 即无论博弈方 P_2 采取何种策略, P_1 采用该策略都可保证自身效益的最大化。因此在该严格优势策略下, 找到博弈方 P_2 的最大收益策略 $S = \{(S_{11}, S_{12}, S_{15}, S_{16}, S_{17}), (S_{23}, S_{24})\} = \{(C_1, C_2, C_5, C_6, C_7), (C_3, C_4)\} = \{(2, 3, 2, 4, 2), (3, 3)\}$, 此时, 博弈双方达到纳什均衡状态(策略编号 40)。

取成本与寿命均衡权重相同进行线性加权, 即 ($\omega_1 = \omega_2 = 0.5$), 当博弈双方策略为

$$S = \{(S_{11}, S_{12}, S_{15}, S_{16}, S_{17}), (S_{23}, S_{24})\} = \{(C_1, C_2, C_5, C_6, C_7), (C_3, C_4)\} = \{(3, 3, 3, 4, 2), (3, 3)\}$$

时, 得到线性加权法最优方案(策略编号 70)。

3.5 结果讨论

通过效用矩阵分析, 该废旧机床在进行重组策略优化时, 并不存在一个可以同时使成本与寿命均衡性都达到最佳的绝对最优策略, 因此需要对各策略进行进一步分析讨论。

由于篇幅所限, 以 P_1 策略区间 [30, 40, ..., 80] 为例进行结果讨论, 博弈双方效用如图 6、图 7 所示。由图 7 可知, 在达到线性加权法最优策略 $S_2 = \{(S_{23}, S_{24})\} = \{(C_3, C_4)\} = \{(3, 3)\}$ (P_1 策略编号 70) 时, 寿命均衡效用为 $u_2 = 1.18$, 此时仍存在 P_2 策略 $S_2 = \{(S_{23}, S_{24})\} = \{(C_3, C_4)\} = \{(4, 3)\}$ 效用为 $u_2 = 1.13$, 在寿命均衡性方面优于线性加权最优策略, 即在线性加权最优策略下, 寿命均衡性仍有改善空间。由图 6 可知, 相比于博弈方 P_1 的其他策略, $S_1 = \{(S_{11}, S_{12}, S_{15}, S_{16}, S_{17})\} = \{(C_1, C_2, C_5, C_6, C_7)\} = \{(2, 3, 2, 4, 2)\}$ 在成本效用方面存在严格优势, 满足式(11)。此时 P_1

图 6 不同再制造重组策略下的成本变化

做出的任何策略改变都只会降低自身收益，由于策略 $S_2 = \{(S_{23}, S_{24})\} = \{(C_3, C_4)\} = \{(3, 3)\}$ 为 P_2 在 P_1 严格优势策略下的最优值，因此 P_2 为保障自身收益也无法单方面做出策略改变，博弈由此达成纳什均衡。

图7 不同再制造重组策略下的寿命均衡性变化

表9 线性加权法与博弈法方案效用比较

方法	刀架	主轴	变速箱	尾架	床鞍	丝杠、光杆	导轨	成本/元	寿命均衡/h
线性加权	再制造	再制造	再制造	再制造	再制造	同类调配	再利用	3.69×10^3	0.92×10^3
博弈方法	再利用	再制造	再制造	再制造	再利用	同类调配	再利用	3.27×10^3	1.25×10^3

求解速度方面，线性加权法通过相应算法根据等式与不等式约束对目标函数进行迭代，求解时间较长。而博弈法作为一种非零和纯策略型博弈，两者存着“互利”解，只需很少的比较回合便能找到纳什均衡点，求解速度快。

4 结论

(1) 针对废旧机械装备重组策略特点，面向废旧机械装备多寿命周期成本，提出一种基于非合作博弈的废旧零部件重组策略优化方法，以成本与零部件寿命均衡性为博弈双方，构建了废旧机械装备重用策略非合作博弈优化框架。

(2) 将重组策略多目标优化模型与非合作博弈模型进行映射，结合非合作博弈模型特点，基于模糊聚类算法对废旧零部件进行策略归属，构建效用矩阵。

(3) 通过对效用矩阵的纳什均衡分析得到最优重组策略，以 CA6140 车床再制造重组策略研究为例，证明方法的有效性与实用性。通过与传统线性加权法的比对，证明所提方法在客观性、普适性以及稳定性上的优势。

本文通过博弈论中的非合作博弈模型解决了废旧机械装备多寿命周期成本下零部件的重组策略优化问题，同时改善了线性加权法在求解多目标优化

该废旧车床线性加权法与博弈方法最优策略及效用如表 9 所示，两种方案均满足企业要求。寿命均衡性效用 u_2 方面线性加权法优于博弈方法，但在成本效用 u_1 上博弈方法相较线性加权法更优。

线性加权法最优方案会随优化目标权重的变化而变化，权重制定的主观性降低了优化结果的可信度与普适性，博弈方法由于不受博弈双方权重影响，降低了人为主观影响，在客观性与普适性上相较线性加权法有所提升。并且再制造重组策略优化作为一种离散型多目标优化问题，当策略间效用差距较小时，权重的微小改变都可能使最优方案发生改变，稳定性较差，而博弈方法在相关系数发生微小变动时仍可以保持纳什均衡，具有更好的鲁棒性。

模型时主观性过强且稳定性较低的问题，为再制造领域的其他离散型多目标优化问题提供了一种可行解决方案。由于再制造过程本身涉及多学科交叉，优化决策影响因素众多，博弈方法尚难以对连续变化的复杂环境与模型进行描述，在存在多均衡点状态下的决策方法是本文后续研究的重点。

参 考 文 献

- [1] IJOMAH W L, CHILDE S J. A model of the operations concerned in remanufacture [J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(24): 5857-5880.
- [2] 姜兴宇, 宋博学, 代明明, 等. 废旧机床再设计质量参数决策方法[J]. 机械设计与制造, 2018, 6(6): 13-16. JIANG Xingyu, SONG Boxue, DAI Mingming et al. Decision method for re-design quality coefficients of waste machine tools[J]. Machinery Design and Manufacture, 2018, 6(6): 13-16.
- [3] 鲍宏, 刘志峰, 胡迪, 等. 应用 TRIZ 的主动再制造绿色创新设计研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(5): 33-39. BAO ong, LIU Zhifeng, HU Di, et al. Research on green innovation design method of active manufacturing using TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 33-39.
- [4] VISHAL F, SHRIVATSAVA R L, KALE A V. Design for remanufacturing: Methods and their approaches[J]. Materials Today: Proceedings, 2015, 2(7): 1849-1858.
- [5] SOH S L, ONG S K, NEE A Y C. Design for assembly

- and disassembly for remanufacturing[J]. Assembly Automation, 2016, 36(1): 12-24.
- [6] HATCHER G D, IJOMAH W L, WINDMILL J F C. A network model to assist 'design' for remanufacture integration into the design process[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 64: 244-253.
- [7] ZWOLINSKI P, LOPEZ-ONTIVEROS M A, BRISSAUD D. Integrated design of remanufacturable products based on product profiles[J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(15): 1333-1345.
- [8] CAO H, CHEN X, XU L, et al. A reuse-oriented redesign method of used machine tool based on matter-element theory[J]. International Journal of Precision Engineering & Manufacturing, 2014, 15(5): 921-928.
- [9] 王涵, 江志刚, 张华, 等. 基于目标级联的废旧机械装备多目标优化再设计方法研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(33): 147-153.
- WANG Han, JIANG Zhigang, ZHANG Hua. Research on multi-objective optimization redesign method for used mechanical equipment based on analytical target cascading[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(3): 147-153.
- [10] 宿彪, 黄向明, 任莹晖, 等. 基于蚁群算法的工程机械再制造优化选配方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 60-68.
- SU Biao, HUANG Xiangming, REN Yinghui, et al. Research on selective assembly method optimization for construction machinery remanufacturing based on ant colony algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 60-68.
- [11] LIU Mingzhou, LIU Conghu, GE Maogen, et al. The online quality control method for reassembly based on state space model[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 137: 644 - 651.
- [12] 薛臣, 江志刚, 张旭刚, 等. 废旧机械装备零部件重用组合多目标优化模型及应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(5): 76-85.
- XUE Chen, JIANG Zhigang, ZHANG Xugang. Multi-objective optimization model and application of components reuse combination for used mechanical equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(5): 76-85.
- [13] 贾春晖. 基于成本图谱的定制产品工艺成本快速估算方法及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- JIA Chunhui, Method for quickly estimating process cost of customized products based on knowledge map and its application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [14] 李成川, 李聪波, 曹华军, 等. 基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 298-305.
- LI Chengchuan, LI Congbo, CAO Huajun, et al. Uncertain remanufacturing process routings model for used components based on GERT network [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 298-305.
- [15] 宋守许, 冯艳, 柯庆镐, 等. 基于寿命匹配的零部件再制造优化设计方法[J]. 中国机械工程, 2015, 26(10): 1323-1329.
- SONG Shouxu, FENG Yan, KE Qingdi, et al. Component optimization design for remanufacturing based on life matching[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(10): 1323-1329.
- [16] 范如国, 韩民春. 博弈论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- FAN Ruguo, HAN Minchun. Game theory[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006.
- [17] 张旭刚, 张华, 江志刚, 等. 基于剩余使用寿命评估的再制造方案决策模型及应用[J]. 机械工程学报, 2013, 49(7): 51-57.
- ZHANG Xugang, ZHANG Hua, JIANG Zhigang, et al. Remanufacturing scheme design decision model and application based on remaining useful life estimation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(7): 51-57.

作者简介: 陈颜祥, 男, 1988 年出生, 博士研究生。主要研究方向为绿色制造和再制造。

E-mail: chenyanx516@163.com

江志刚(通信作者), 男, 1978 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造与再制造。

E-mail: jiangzhigang@wust.edu.cn

朱硕, 男, 1989 年出生, 博士。主要研究方向为绿色制造、再制造、制造信息化。

E-mail: tczswilly@163.com

张华, 女, 1964 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造与再制造。

E-mail: zhanghua403@163.com