

DOI: 10.3901/JME.2023.13.238

# 面向寿命定制的废旧产品再制造设计 过程模型研究<sup>\*</sup>

江志刚<sup>1</sup> 张俊辉<sup>1</sup> 朱硕<sup>2</sup> 鄢威<sup>3</sup> 张华<sup>3</sup>

- (1. 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;
2. 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;
3. 武汉科技大学绿色制造工程研究院 武汉 430081)

**摘要:** 寿命定制是量化废旧产品再制造需求并保障再制造产品设计质量的重要途径。针对废旧产品再制造设计目标不明确、设计质量不稳定等问题,引入寿命定制策略提升再制造设计过程的可解释性、增强设计模型的导向作用,考虑设计需求与废旧产品自身失效特征对再制造设计过程的双重影响,基于产品质量功能展开(QFD)的思想创建再制造产品寿命定制设计屋模型,实现面向寿命定制的废旧产品再制造设计。在寿命定制设计屋模型的关键再制造设计参数分析模块中,建立设计需求和失效特征双向反馈的寿命影响因素相互关系矩阵,得到影响寿命的关键设计参数;在再制造设计参数的生成模块中,构建基于关键设计参数的BP神经网络寿命预测模型,并以定制寿命为优化目标,采用神经网络-果蝇优化算法(BP-FOA)将最接近定制寿命的再制造设计参数作为最优解输出。以典型家电产品电冰箱的再制造设计过程为例,对模型的有效性进行验证。

**关键词:** 再制造设计; 寿命定制; 设计过程模型; 客户需求; 失效特征

**中图分类号:** TH122; TP391

## Research on Design Process Model of Used Product Remanufacturing for Life Customization

JIANG Zhigang<sup>1</sup> ZHANG Junhui<sup>1</sup> ZHU Shuo<sup>2</sup> YAN Wei<sup>3</sup> ZHANG Hua<sup>3</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

3. Academy of Green Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract:** Life customization is an important way to quantify the remanufacturing demand of used products and guarantee the quality of remanufactured products. Aiming at the problems of unclear remanufacturing design objectives and unstable design quality of used products, the life customization strategy is introduced to improve the interpretability of remanufacturing design process and enhance the guiding role of design model. The double influence of remanufacturing design requirements and failure characteristics of used products on remanufacturing design process is considered. Based on the concept of product quality function deployment (QFD), a life customization design house model of remanufactured products was established to support the life oriented remanufacturing design process of used products. In the key remanufacturing design parameter analysis module of the life customization design house model, the relationship matrix of the life influencing factors feedback from design requirements and failure characteristics was established, and the key design parameters affecting the life are obtained. In the generation module of remanufacturing design parameters, a BP neural network life prediction model is built based on key design parameters. Taking the customized life as the optimization target, the

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(52075396, 51905392)。20220708 收到初稿,  
20221124 收到修改稿

neural network fruit fly optimization algorithm (BP-FOA) is used to output the remanufacturing design parameters closest to the customized life as the optimal solution. Taking the remanufacturing design process of refrigerator as an example, the validity of the model was verified.

**Key words:** remanufacturing design; life customization; design process model; customer demand; failure characteristics

## 0 前言

作为我国的新兴战略性产业,再制造是实现退役产品高质量循环利用、实施国家“3060”双碳规划的重要途径。据统计,我国年退役家电产品高达1.9亿台、并以每年20%的涨幅增长,80%的工程机械超过服役期而面临淘汰,具备巨大的再制造市场潜力。再制造设计是以废旧产品及零部件作为毛坯,以极大化重用其材料和附加值为目标设计出再制造产品功能及结构,实现再制造产品质量不低于原新品的过程<sup>[1]</sup>。其中,实现废旧产品性能的恢复或升级,再设计出具有市场竞争力的再制造产品,充分发挥再制造循环经济效益,是废旧产品再制造设计的一项重要内容<sup>[2]</sup>。

然而,由于再制造设计过程受废旧产品自身失效特征和客户再制造需求的双重影响,使得废旧产品的再制造设计目标难以明确、再制造设计质量不稳定<sup>[3]</sup>。寿命定制可量化废旧产品的再制造设计需求,提升再制造设计过程的可解释性,增强设计模型的导向作用,对保障再制造产品的质量具有重要作用。因此,针对废旧产品再制造设计的特点,建立面向再制造产品寿命定制的性能参数优化设计模型,是支撑废旧机电产品高品质再制造的关键。

当前,国内外学者针对再制造产品设计过程建模问题,开展了大量的研究。在考虑客户需求的再制造设计过程建模方面,李菲等<sup>[4]</sup>运用质量功能展开法,将产品再制造质量评价指标与顾客满意度相结合,构建了产品再制造质量评价质量屋;姜兴宇等<sup>[5]</sup>基于废旧机电产品的再制造质量特征与客户需求之间的关系,构建了废旧机床再制造产品配置模型;鲍宏等<sup>[6]</sup>将TRIZ技术冲突解决原理与环境化质量功能配置方法相结合,基于再制造设计需求建立应用TRIZ技术冲突解决原理的主动再制造创新设计模型;KAUSTOV等<sup>[7]</sup>结合模糊评价法和层次分析法计算相应设计需求的准则和子准则权重,然后采用公理化设计方法建立再制造设计方案的决策模型;王东翻<sup>[8]</sup>在再制造产品设计需求建模中,考虑了废旧产品回收及其再制造各阶段的可靠性影响因素;KE等<sup>[9]</sup>对再制造设计客户需求进行了量化分

析,提出了一种基于向量空间模型和案例推理的废旧产品再制造设计模型;王帅<sup>[10]</sup>提出了基于改进单位成本效用值的客户满意度评价方法,并在此基础上建立了面向客户需求的再制造产品配置设计模型;李丽等<sup>[11]</sup>针对客户需求与废旧产品再制造设计质量的不确定性问题,提出了一种基于模糊线性回归模型的废旧机床再设计关键质量特性的识别方法。另一方面,考虑废旧产品自身的失效特征,HUANG等<sup>[12]</sup>针对废旧零件在失效特性方面具有高度的不确定性,为提升再制造方案设计的有效性,提出了一种基于旧零件不完全信息重构的再制造方案设计方法;江亚等<sup>[13]</sup>分析了废旧零部件的失效状况,并以再制造成本和时间为目标,建立了一种基于失效特征的废旧零部件再制造修复方案优化模型;张秀芬等<sup>[14]</sup>为将产品中具有再制造重用潜能的零部件及报废模式等信息反馈到设计过程,提出了失效模式信息反馈支持下的再制造设计模型;王涵等<sup>[15]</sup>基于废旧机械装备多级零部件的失效特征,提出了一种基于目标级联的废旧机械装备多目标优化再制造设计优化模型。

在此基础上,为提升废旧产品的再制造设计质量,已有学者将寿命作为衡量再制造产品设计质量的重要指标,如姚巨坤等<sup>[16]</sup>以再制造设计概念与特征分析为基础,提出了面向再制造创新设计的产品梯度寿命设计模型;SUSUMU等<sup>[17]</sup>提出一种面向再制造产品寿命设计方法,该方法能最大限度地减少重复使用机组的总体环境影响,并确定机组的最优设计参数向量;周京<sup>[18]</sup>为了研究再制造可靠性设计,基于涂层失效机制建立了再制造涂层寿命预测模型;宋守许等<sup>[19-20]</sup>提出零部件寿命均值匹配和倍数匹配的寿命匹配模式,建立了基于寿命匹配的零部件再制造优化设计方法,然后在分析产品再制造与其寿命周期的关系基础上,建立了基于寿命匹配的废旧产品再制造设计模型。

综上,再制造产品设计过程建模引起了学者们的广泛关注,并分别从产品设计需求和废旧产品失效特征两个角度开展了研究。但是,现有研究少有考虑二者对再制造设计过程的双重影响,无法同时满足基于客户需求与失效特征的废旧产品再制造,导致再制造产品关键设计参数分析不充分。此外,

现有研究虽然考虑了寿命在再制造设计过程中的导向作用,但尚未建立设计参数与产品寿命之间的关联关系,使得面向寿命定制的废旧产品再制造设计参数研究仍缺少有效的模型支持。

为此,本文在总结现有研究的基础上,为量化废旧产品再制造设计目标、保障再制造产品质量,基于再制造设计需求与废旧产品自身失效特征对再制造设计过程的双重影响分析,利用寿命定制策略对再制造设计过程中的导向作用,提出了一种面向寿命定制的废旧产品再制造设计过程模型,通过定制寿命的反馈引导,实现再制造设计参数的优化。

## 1 废旧产品再制造设计过程模型框架

面向寿命定制的废旧产品再制造设计过程旨在得到定制寿命目标下的废旧产品再制造设计参数,为此,建立了废旧产品再制造寿命定制设计屋模型框架,如图 1 所示。

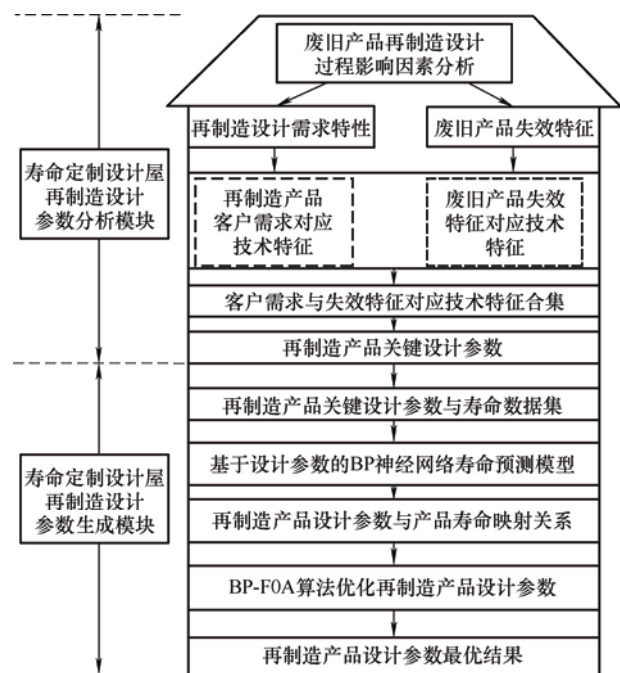


图 1 再制造寿命定制设计屋模型框架

废旧产品再制造寿命定制设计屋,主要由再制造设计参数分析模块和再制造设计参数生成模块两部分构成。

(1) 在寿命定制设计屋模型再制造产品设计参数分析模块中,考虑再制造设计需求与废旧产品自身失效特征对再制造设计过程的双重影响,建立设计需求和失效特征双向反馈的寿命影响因素相互关系矩阵,得到再制造产品寿命相关的设计性能参数。

(2) 在寿命定制设计屋模型再制造产品设计参

数生成模块中,基于影响寿命的关键设计参数,建立关于设计参数的 BP 神经网络寿命预测模型,以定制寿命为优化设计目标,采用神经网络-果蝇优化算法(BP-FOA)得到面向定制寿命的再制造产品优化设计参数。

## 2 基于寿命定制设计屋的再制造设计参数分析

与新产品相比,再制造产品的设计需求来源于客户需求及自身废旧毛坯失效特征两个方面。为提取面向寿命定制的再制造产品关键设计参数,首先应考虑再制造产品设计需求的特点,分析客户需求和自身失效特征的具体内容,其次,借鉴质量功能展开(QFD)方法和面向失效特征的可靠性功能配置(RFD)方法,建立客户需求和失效特征所对应的技术特征指标集,最后对技术特征指标所关联的设计参数进行重要度量化评估,提取出关键设计参数。具体内容如下。

(1) 分析客户需求与失效特征。在客户需求的分析方面,以质量屋中对需求的瀑布式分解方式,将客户需求信息依据再制造产品的安全性、功能、外观及操作需求等进行分类;在失效特征分析方面,基于产品故障树分析法,分析多级功能失效模式对应的关键零部件失效特征,获得废旧产品零部件的失效形式与程度信息。

(2) 建立客户需求和失效特征所对应的技术特征集。为得到客户需求对应技术特征,借鉴质量功能展开方法,从产品的功能角度出发,对客户请求进行分解,并将客户需求转换成相对应的技术特征;为得到失效特征对应技术特征,基于废旧零部件失效形式和失效程度,采用面向失效特征的可靠性功能配置(RFD)方法<sup>[21]</sup>,得到失效特征对应的技术特征。将客户需求和失效特征所对应的技术特征列为一个数据集,记为  $Q = \{w_i, n_j\}$ , 其中  $w_i$  为第  $i$  个客户需求对应技术特征,  $n_j$  为第  $j$  个失效特征对应技术特征。

(3) 评估与提取关键设计参数。基于再制造设计需求与废旧产品自身失效特征对再制造设计参数的双重影响分析,建立客户需求和失效特征所对应的技术特征的相互关系矩阵,记矩阵为  $R = [r_{ij}]$ 。其中  $r_{ij}$  为上述  $w_i$  与  $n_j$  之间的相互关联程度。以专家打分法对该关联程度进行打分,将关联程度量化后填入相互关系矩阵中,由此得相互关系矩阵为

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ r_{i1} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix}$$

对上述技术特征进行量化分析, 得到对应的再制造设计参数, 在此基础上计算得到再制造产品设计参数权重, 记设计参数重要程度为  $m_j$  ( $m_j$  为第  $j$  个关键设计参数的绝对权重), 取用上述相互关系矩阵中的影响程度量化数据, 得出  $m_j$  的取值。其获取方式如式(1)所示。

$$R_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \quad m_{ij} = \sum_{i=1}^n w_i \times R_{ij} \quad (1)$$

由此得到权重值系数行矩阵为  $[m_1 \cdots m_j]$ , 该矩阵记录了各设计参数在废旧产品再制造过程中的重要程度, 以各设计参数的重要程度进行排序得到关键设计参数。

### 3 基于寿命定制设计屋的再制造设计参数优化

由于各设计参数组合的多样性, 不同的设计参数方案会导致再制造产品具有不同的寿命, 其中产品寿命作为衡量再制造产品设计质量的重要指标, 与不同设计性能参数组合之间的形成了非线性的复杂耦合关系。为得到寿命定制设计屋中再制造设计参数, 在再制造设计过程中以寿命定制策略为导向, 基于 BP 神经网络在参数预测模型中的适用性及果蝇优化算法在参数优化中的寻优特点, 建立寿命定制设计屋的再制造设计参数优化方法。

在该设计参数优化方法中, 首先使用 BP 神经网络算法寻找再制造产品设计过程中的设计参数与寿命之间的关联关系。该神经网络输入层为再制造产品设计性能参数, 输出层为再制造产品寿命。以关键设计参数的权重系数作为输入层数据初始化的权重参数, 所有神经元采用的激活函数均为 sigmoid 函数

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

相较于其他激活函数, sigmoid 函数为一种连续的神经元输出函数, 具有非线性和处处可导的数学特性, 反映了神经元非线性输出特性, 对于处理复杂多样的再制造产品设计参数与寿命数据样本具有很好的适用性。

在完成对再制造产品设计参数与寿命之间的关联关系处理后, 以该 BP 神经网络训练完成的模型作为适应度函数, 代入 FOA 优化算法中。该算法的基本步骤包括随机初始果蝇的群体位置、随机化群体中果蝇个体的位置、估计果蝇个体位置与目标值位置并进行对比、选取果蝇种群中最优取值代替群体位置, 不断迭代直至输出优化目标值。在该优化方法中, 以再制造产品定制寿命为优化目标, 以市场新品设计参数确定的设计极限为约束, 通过调节算法中的种群规模和迭代次数, 以 BP 神经网络模型得到的再制造产品设计参数与设计寿命之间的关系为优化对象, 最后采用神经网络-果蝇优化算法 (BP-FOA) 将最接近定制寿命的再制造设计参数作为最优解输出。再制造产品设计参数的优化流程如图 2 所示。

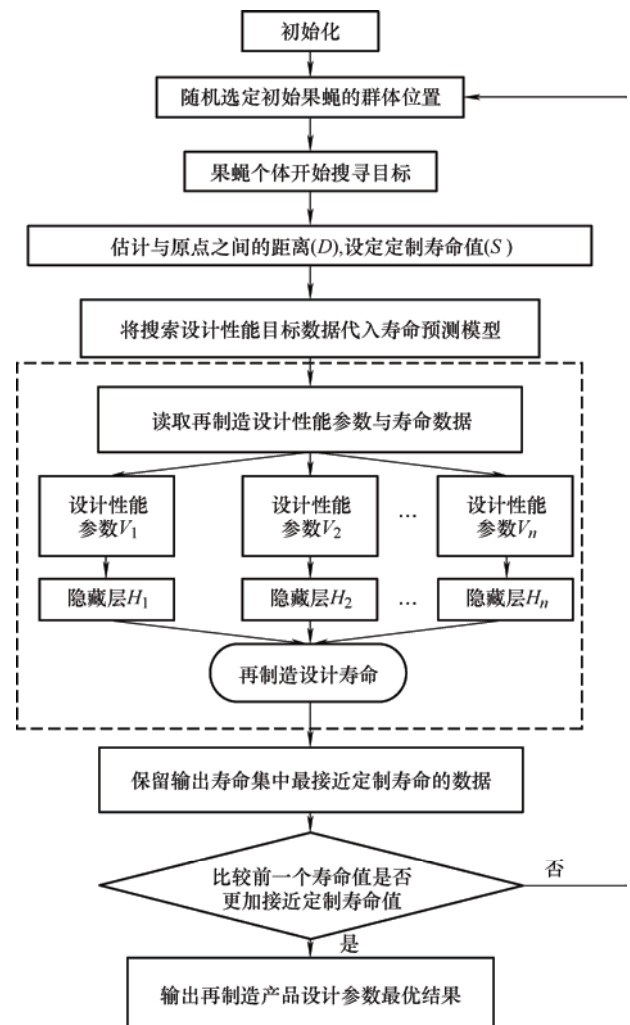


图 2 再制造产品设计参数优化流程图

### 4 案例分析

电冰箱产品作为一种典型的家电产品, 在日常

的生产生活中具有巨大的需求与保有量,对废旧产品的再制造采用规模化定制模式可为企业带来良好的社会效益与经济效益。以废旧电冰箱的整机再制造设计过程为例,对寿命定制设计屋中再制造电冰箱关键设计参数的分析和优化进行说明。

#### 4.1 再制造电冰箱寿命定制关键设计参数分析

该型号废旧电冰箱的再制造客户需求主要分为安全性、功能、外观、操作等方面,对该客户需求进行分解,将需求量化成再制造电冰箱的技术特征为冷冻速度、电冰箱能耗、运行噪音、外观样式、价格和操作难度。对废旧电冰箱的失效功能及特点以失效模式影响分析的方式进行量化处理,得到再制造电冰箱的失效特征要素:管道受损,压缩机损坏,电控系统损坏,箱体受损,材料老化和内胆破损,再采用失效特征配置相应技术特征的方法,得到失效特征对应的技术特征为制冷能力、压缩机功耗、整机电路能耗、整机容积、整机散热和保温时长。

再制造冰箱设计参数分析中相互关系矩阵行要素为再制造冰箱的失效特征对应技术特征要素;相互关系矩阵的列要素为再制造冰箱的各项性能需求要素,通过对二者之间的相互影响程度进行打分,得到关系矩阵为

$$R = [R_{ij}] = \begin{bmatrix} 9 & 9 & 3 & 3 & 1 & 9 \\ 3 & 3 & 9 & 3 & 3 & 9 \\ 3 & 9 & 3 & 3 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 9 & 3 & 0 \\ 1 & 1 & 3 & 3 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

为确定再制造产品设计参数的重要程度,以  $m_{ij}$  表示第  $j$  项设计参数的重要度,其中  $m_{ij}$  为各项  $R_{ij}$  的加权  $w_i$  之和,在此  $i$  取值均为 1,故仅保留  $j$  的取值变化,由式(1)可得

$$\begin{aligned} m_1 &= \frac{42}{12} & m_2 &= \frac{54}{12} & m_3 &= \frac{42}{12} \\ m_4 &= \frac{38}{12} & m_5 &= \frac{18}{12} & m_6 &= \frac{59}{12} \end{aligned}$$

把它们规范化为权数,第  $j$  项设计参数要素的权数为  $w'_j$ ,在此有

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^6 m_j &= \frac{253}{12} \\ w'_1 &= \frac{42}{253} & w'_2 &= \frac{54}{253} & w'_3 &= \frac{42}{253} \\ w'_4 &= \frac{38}{253} & w'_5 &= \frac{18}{253} & w'_6 &= \frac{59}{253} \end{aligned}$$

将上述设计参数要素权数数值以小数的形式与各项技术特征相对应。

综合上述废旧电冰箱的再制造性能需求和失效特征,依据客户对电冰箱的制冷能力需求、能耗需求和外观样式需求,选取再制造电冰箱设计性能参数为冷冻能力(冷冻效率)、压缩机功率、再制造电冰箱耗电量和冰箱漏热负荷(单位小时内的冰箱整机漏热量)、总容积、保温时长(常温下断电后保持冷冻室继续冷冻的时长)。

综上,再制造电冰箱寿命定制关键设计性能参数分析如表 1 所示。

表 1 再制造电冰箱寿命定制关键设计性能参数分析

	失效特征	管道受损	压缩机损坏	电控系统损坏	箱体受损	材料老化	内胆破损
客户需求	技术指标	制冷能力	压缩机功耗	整机电路能耗	整机容积	整机散热	保温时长
冷冻速度	0.25	9	9	3	3	1	9
电冰箱能耗	0.167	3	3	9	3	3	9
运行噪音	0.167	3	9	3	3	1	3
外观样式	0.083	1	1	1	9	3	0
价格	0.167	1	1	3	3	1	3
操作难度	0.166	0	0	1	1	1	1
	权重系数	0.167	0.212	0.167	0.15	0.071	0.233
	关键设计参数	冷冻能力/(kg/12h)	压缩机功率/W	耗电量/(kW·h/24h)	电冰箱容积/L	冰箱漏热负荷/W	保温时长/h

#### 4.2 再制造电冰箱寿命定制关键设计参数生成

在完成对再制造电冰箱寿命定制关键设计参数分析模块构建之后,以该寿命定制设计屋所输出的设计参数分类,基于企业近三年该型

电冰箱的运维服务数据及市场分析报告,获得相同或类似工作方式、工作类型的电冰箱产品的设计参数数据集及对应寿命数据,其参数如表 2 所示。



表 2 再制造电冰箱设计参数及寿命数据集

评价参数	冷冻能力/(kg/12h)	压缩机功率/W	耗电量/(kWh/24h)	电冰箱容积/L	冰箱漏热负荷/W	保温时长/h	对应寿命数据/年
同类产品 1	5.2	155	0.58	280	20	58	12.5
同类产品 2	4.1	130	0.61	310	26	60	13.1
同类产品 3	4.3	187	0.73	410	29	55	11.9
同类产品 4	6.9	98	0.52	210	13	51	16.2
同类产品 5	6.1	139	0.63	390	23	67	14.8
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
同类产品 50	5.7	124	0.48	300	26	62	15.3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
同类产品 74	7.8	175	0.83	420	30	52	13.9
同类产品 75	6.9	87	0.78	220	15	57	11.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
同类产品 97	4.7	143	0.74	330	25	59	14.3
同类产品 98	7	198	0.95	400	27	55	14.8
同类产品 99	6.9	101	0.62	200	15	62	15.2
同类产品 100	6.1	127	0.79	390	25	63	15.8

根据再制造电冰箱设计参数数据集，建立基于关键设计参数的 BP 神经网络寿命预测模型。在 BP 神经网络预测模型的预训练中，以 100 种同类产品电冰箱的性能参数和对应寿命数据作为预训练值，该预测模型为三层神经网络结构，其中输入层神经元包含冷冻能力、压缩机功率、耗电量、电冰箱容积、冰箱漏热负荷和保温时长，输出层神经元为再制造电冰箱寿命。经过神经网络算法对输入数据的训练，迭代误差趋于稳定时的模型记为  $L = P(t)$ ，并作为 BP-FOA 优化算法的优化目标函数。通过 BP-FOA 优化算法调节种群规模和迭代次数，以市面同类产品最优设计寿命为参照，设定寿命为 15.67 年。为确保再制造产品设计参数取值合理规范，以其原型新品以及同类产品市场取值极限作为设计参数优化约束，对设计性能参数进行寻优，将最接近定制寿命的再制造设计参数作为最优解输出各再制造设计参数解集对应预测寿命的变化如图 3 所示。

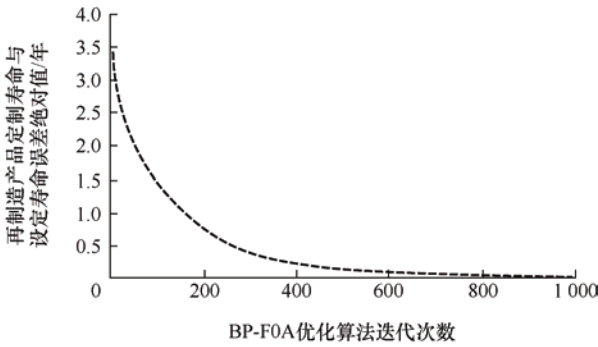


图 3 再制造电冰箱设计参数寻优

由图 3 可知，将定制寿命作为优化算法的优化目标，以设计参数的设计极限作为寻优取值区间。对再制造电冰箱设计参数对应寿命值进行寻优时，BP-FOA 优化算法迭代次数达到 800 次时预测寿命值的变化已趋于稳定状态，根据再制造设计参数数据集对应的预测寿命与定制寿命的接近程度选择出最优的解，该系列参数与同类新品设计参数对比如表 3 所示。

表 3 再制造电冰箱设计参数寻优对比表

性能参数	冷冻能力/(kg/12h)	压缩机功率/W	耗电量/(kW · h/24h)	电冰箱容积/L	冰箱漏热负荷/W	保温时长/h
优化取值	7.2	120	0.60	358	12	51
同类新品	6.7	142	0.72	310	17	46

再制造产品设计参数优化成功的标准是再设计的产品能满足设计需求，同时性能、功能等要求更

加符合再制造产品的使用。表 3 所得设计参数即为再制造电冰箱设计参数优化模型中的最优数据集。

该最优数据集中,通过以定制寿命作为衡量再制造电冰箱设计质量的指标,明确了再制造电冰箱的设计性能目标,各项设计参数均为废旧机电产品再制造设计过程中使产品寿命达到定制寿命的最优值。

## 5 结论

(1) 从再制造设计需求与废旧产品自身失效特征两方面对影响寿命的关键设计参数分析,将其作为优化的关键对象,识别了再制造产品设计的关键变量。

(2) 以典型家电产品废旧电冰箱的再制造设计过程为例,建立再制造电冰箱寿命定制设计屋模型,得到了最优的再制造设计性能参数方案,验证了寿命定制策略在再制造设计过程中的有效性。

本文基于废旧产品设计需求及产品自身失效特征信息,通过定制寿命的反馈引导实现再制造设计参数的优化,如何考虑经济因素影响下的再制造产品多目标优化设计需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] 杜彦斌,曹华军. 基于监测诊断的在役机床个性化再设计技术体系[J]. 中国机械工程, 2020, 31(5): 567-575.  
DU Yanbin, CAO Huajun. Technology system of individualized redesign for in-service machine tools based on monitoring and diagnosis[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(5): 567-575.
- [2] 朱硕,潘志强,江志刚,等. 基于多寿命特征的废旧机电产品再升级设计研究进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 183-192.  
ZHU Shuo, PAN Zhiqiang, JIANG Zhigang, et al. A Survey on remanufacturing upgrade design of used mechanical and electrical products based on multi-life characteristic[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 183-192.
- [3] ZHANG Xugang, HE Qian, ZHANG Hua, et al. Big data-based research on active remanufacturing comprehensive benefits evaluation of mechanical product[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2023, 36(4): 590-610.
- [4] 李菲,李天石,沈虹. 再制造产品质量评价指标的重要度计算方法研究[J]. 机床与液压, 2009(6): 38-41.  
LI Fei, LI Tianshi, SHEN Hong. Study of importance calculation method of quality evaluation indexes for remanufacturing[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009(6): 38-41.
- [5] 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): 13-16.  
JIANG Xingyu, SONG Boxue, DAI Mingming, et al. Decision method for re-design quality coefficients of waste machine tools[J]. Machinery Design of Manufacture, 2018(6): 13-16.
- [6] 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 Hong, LIU Zhifeng, HU Di. Research on green innovation design method of active manufacturing using TRIZ[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(5): 33-39.
- [7] KAUSTOV C, SANDEEP M, KAMPAN M. Analysis of product design characteristics for remanufacturing using fuzzy AHP and axiomatic design[J]. Journal of Engineering Design, 2017, 28(5): 338-368.
- [8] 王东翻. 新产品和再制造产品二维延保策略设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.  
WANG Dongfan. Two-dimensional extended warranty strategy design for new and remanufactured products[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [9] KE C, JIANG Z, ZHANG H, et al. An intelligent design for remanufacturing method based on vector space model and case-based reasoning[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123269.
- [10] 王帅. 面向不同复杂度的机电产品模块化设计若干关键问题研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
WANG Shuai. Research on several key issues for modular design of mechatronic products with different complexity[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [11] 李丽,金嘉琦,姜兴宇,等. 废旧机床再设计关键质量特性的识别方法[J]. 机械设计与制造, 2018(5): 151-154.  
LI Li, JIN Jiaqi, JIANG Xingyu, et al. Identification method of key quality characteristics for old machine tools redesign[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(5): 151-154.
- [12] HUANG Wenhao, JIANG Zhigang, WANG Teng, et al. Remanufacturing scheme design for used parts based on incomplete information reconstruction[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(3): 72-85.
- [13] 江亚,江志刚,张华,等. 基于失效特征的废旧零部件再制造修复方案优化研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(21): 168-172.  
JIANG Ya, JIANG Zhigang, ZHANG Hua, et al. Optimization study of remanufacturing reconditioning

- scheme for used parts based on failure features[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(21): 168-172.
- [14] 张秀芬, 蔚刚, 刘行. 支持再制造设计的产品失效模式信息传递模型[J]. 机械工程学报, 2017, 53(3): 201-208. ZHANG Xiufen, YU Gang, LIU Xing. Product failure mode information transfer polychromatic for design for remanufacture[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(3): 210-208.
- [15] 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(3): 147-153. WANG Han, JIANG Zhigang, ZHANG Hua, et al. 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.
- [16] 姚巨坤, 朱胜, 时小军, 等. 再制造设计的创新理论与方法[J]. 中国表面工程, 2014, 27(2): 1-5. YAO Jukun, ZHU Sheng, SHI Xiaojun, et al. New theory and methods of remanufacturing design[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2): 1-5.
- [17] SUSUMU O, TOSHIMITSU M, NORIO O. Life design for remanufacturing durable products[C]//2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign 2001). 2001: 275-280.
- [18] 周京. 大型压缩机转子疲劳损伤机理及再制造寿命预测基础研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016. ZHOU Jing. Investigation of large compress or rotor fatigue damage mechanism and life prediction for remanufacturing[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [19] 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.
- [20] 宋守许, 刘明, 刘光复, 等. 现代产品主动再制造理论与设计方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 133-141. SONG Shouxu, LIU Ming, LIU Guangfu, et al. Theories and design methods for proactive remanufacturing of modern products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 133-141.
- [21] 杜雷, 高建民, 陈琨, 等. 基于多失效模式相关分析的技术特征综合配置方法[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(10): 2512-2521. DU Lei, GAO Jianmin, CHEN Kun, et al. Technology feature comprehensive deployment method based OH multi—mode correlation analysis[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(10): 2512-2521.

作者简介: 江志刚, 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为绿色制造、再制造。

E-mail: jzg100@163.com

张俊辉, 男, 1998 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为绿色制造、再制造。

E-mail: 1844079070@qq.com

朱硕(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为绿色制造、再制造。

E-mail: zhushuo@wust.edu.cn

鄢威, 男, 1981 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为绿色制造。

E-mail: yanwei81@wust.edu.cn

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

E-mail: zhanghua403@163.com