

# 面向主动回收的产品模块化设计方法

张宠元<sup>1</sup>, 魏巍<sup>2</sup>, 詹洋<sup>2</sup>, 李汝鹏<sup>3</sup>

(1. 包头职业技术学院, 内蒙古包头 014035; 2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;  
3. 上海飞机制造有限公司, 上海 200436)

**摘要:** 随着人们环保意识的增强, 对产品可回收性能的要求也逐渐提高。本文在传统模块化设计方法的基础上, 在产品初期融入了可主动回收产品的模块化设计思想, 提出了基于主动回收产品的模块化准则, 并且把主动回收度、内部聚合度以及外部耦合度作为优化目标进行模块划分。在算法部分, 提出一种改进的免疫克隆多目标优化算法, 该算法以变异操作为主, 并通过去除较拥挤的抗体进行优化。最后, 把该方法应用于内燃机模块划分中, 与未优化的免疫算法进行对比, 证明了改进免疫算法的优越性。

**关键词:** 主动回收; 多目标优化; 模块化划分; 改进的免疫算法; 绿色设计  
**中图分类号:** TH122 **文献标识码:** A

## Product Modular Design Method for Active Recovery

Zhang Chongyuan<sup>1</sup>, Wei Wei<sup>2</sup>, Zhan Yang<sup>2</sup>, Li Rupeng<sup>3</sup>

(1. Baotou Vocational & Technical College, Baotou 014035, Inner Mongolia, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

**Abstract:** The demand for product recovery performance has been gradually improved with the environmental protection awareness. Based on the traditional modular design method, this paper integrates the active recovery products modular design idea, puts forward the active recovery products modularization criteria and takes the active recovery, internal polymerization degree and external coupling degree as the optimization target to divide modules. In the algorithm section, this paper proposes the clonal multi-objective optimization algorithm. It is based on mutation operation and optimized by removing more crowded antibodies. Finally, we apply the method to the internal combustion engine and compare the method with the unoptimized algorithm. The conclusion proves the superiority of the improved immune algorithm.

**Keywords:** active recycling; multiobjective optimization; modular partition; improved immune algorithm; green design

### 一、前言

改革开放以来, 中国制造业保持高速发展, 在制造业整体规模不断变大的同时, 其技术水平也有

了显著的提高。现在, 我国制造业总体水平在全球仅次于美国、德国和日本, 位居世界第四位, 而我国的制造业规模约占全球的 20%, 位居世界第一, 同时, 国家财政收入的 50% 来自制造业 [1]。虽然

收稿日期: 2018-02-15; 修回日期: 2018-03-10

通讯作者: 魏巍, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 讲师, 研究方向为产品族设计、数字化设计与制造; E-mail: weiwei@buaa.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“‘互联网+'行动计划的发展战略研究”(2016-ZD-03); 国家自然科学基金项目(51675028); 国家重点研发计划项目(2017YFB1104200)

本刊网址: www.enginsci.cn

我国的制造业发展迅速,但在报废产品的回收利用方面,仍与以上三个国家有较大差距。“既要金山银山,又要绿水青山”,在崇尚绿色发展的今天,产品的回收利用已经成为我国制造业所面临的一个不可忽视的问题。做好产品的回收工作,不仅可以减轻对环境的影响,还可以把有用的部件回收再利用,从而降低产品的生产成本。从产品生产的整个生命周期来看,为了实现这一目标,在初期的设计阶段不光要注意产品的生产制造过程,也要考虑在产品生命终结阶段中是否可以完成主动回收。为实现这一目标,必须引入模块化设计的思想。模块化设计,就是将产品中若干个部分组成一个模块,再将该模块与其他模块组合成一个系统,该系统可根据模块划分方法的不同来满足市场的不同需求。通过模块划分的思想,可以把产品回收的思想融入到产品的设计中,在产品设计生产时就兼顾到产品的回收利用。因此,面向主动回收的产品模块化设计方法可以有效解决寿命终结阶段产品的处理问题,合理处理报废产品,从而实现绿色生产。

如今,许多国内外专家学者对面向寿命终结阶段产品的回收利用过程进行了研究。李方义等[2]将模块化的技术应用于绿色产品的开发中,使得产品的可维护性、可拆卸性、可回收性等性能变得更好。Gu等[3]提出了生命周期的各个阶段和与之对应的相关设计目标,并在此基础上将模块化设计思想扩展到面向全生命周期。陆韵薇[4]提出将同异比值应用到判断产品族的模块化分类中,并与维修周期、回收关系、重用可能等绿色属性相结合。曾北昌[5]通过分析产品生命周期内的拆卸与回收等理论,提出了一种由模块化的拆卸混合模型产品得到的建立模型的方法。而在产品生命周期末端面向拆卸方面也有十分丰富的理论研究[6~10]。

对处于生命周期末端的产品而言,产品的回收利用是重中之重。然而,产品的回收涉及拆卸、可用部件的回收以及有害部件的处理等方面,很难量化为一个固有的函数,现有的一些方法是在产品生命终结阶段才着手解决回收问题,回收效率较低。笔者在产品设计时就考虑产品的主动回收,将模块化设计思想与产品的主动回收思想相结合,把主动回收的属性进行量化,并且将主动回收度、内部聚合度以及外部耦合度作为优化目标进行模块划分,

得到较合理的产品模块划分结果。最后,以传统内燃机为例验证了该方法的实用性。

## 二、基于生命周期末端产品主动回收的模块化模型

### (一) 面向主动回收产品模块化设计的定义

产品模块化设计,简单来说,是在产品设计时,将一些有关产品属性、功能等因素融入模块化设计中,从而把产品的多个零部件划分为不同的模块[11]。而主动回收的模块化设计,就是在模块化设计时,重点考虑产品的主动回收与再利用,使产品在寿命终结时能够很好地完成回收再利用,在很大程度上解决环境污染与能源消耗问题,从而实现绿色生产。

### (二) 面向主动回收产品的模块化准则

对产品而言,主动回收过程是一个比较复杂的过程,可以把该过程分为三个部分:①零部件的重用再制造;②可利用材料的收回;③不可利用废弃物的相关处置方式。在设计产品时以主动回收为依据,则产品在模块划分时应当遵循以下4条基本准则。

#### 1. 易于拆卸准则

在产品拆卸过程中,往往因为在初期设计时未考虑拆卸方面的问题而导致拆卸过程不顺利,使得拆卸完成的零部件因拆卸时造成零部件损坏抑或无法拆卸而导致无法很好地回收利用。为了解决这个问题,提出易于拆卸准则,定义拆卸过程因子 $I_d(i, j)$ :

$$I_d(i, j) = W_{dc} \frac{\sum_{h=1}^n I_{dc}(i, j)}{n} + W_{db} I_{db}(i, j) \quad (1)$$

式(1)中, $W_{dc}$ 表示拆卸关系的权值; $W_{db}$ 表示空间约束关系的权值;其中 $W_{dc} + W_{db} = 1$ ;  $I_{dc}(i, j)$ 表示装配关系值;  $I_{db}(i, j)$ 表示空间约束关系值;  $h$ 为连接点的序号;  $n$ 为连接关系的数目。

#### 2. 可主动回收处理准则

在产品的初期设计阶段,应该重视产品在废弃后其零部件的重新使用、零部件材料的回收以及其中无法回收部件的处理方法,处理方法一般包括集中焚烧等。而笔者通过模块划分的过程,可以运用主动回收处理准则综合考虑以上因素。定义主动回收性的交互因子为:

$$I_{RP}(i, j) = \frac{\min(RP_i, RP_j)}{\max(RP_i, RP_j)} \quad (2)$$

式(2)中,  $RP_i, RP_j$  分别为零件  $i, j$  的回收价值。

### 3. 经济性准则

所谓经济性准则是指在进行产品模块的划分时, 在事先评估完产品的回收价值的基础上尽量使得回收价值大致相同的零部件划分为一个模块, 这样在零部件回收时可以更加合理有效地回收产品, 从而减少劳动量, 提高回收的收益。下面给出主动回收经济性准则  $I_V(i, j)$ :

$$I_V(i, j) = \frac{\min(V_i, V_j)}{\max(V_i, V_j)} \quad (3)$$

式(3)中,  $I_V(i, j)$  是两个产品的产品价值比;  $V_i, V_j$  则代表零件  $i$  与  $j$  的回收价值。

### 4. 环境准则

产品主动回收的一个重要意义就是为了减少资源的浪费与有害物质的产生, 从而使产品对环境的影响降至最低。为此, 笔者引入主动回收的生态指数  $EI$ , 以模块  $EI$  值的高低来评定材料的回收价值, 即将材料分为应该主动回收的材料与可进行废弃处理的材料。现定义环境交互因子为  $I_e(i, j)$ :

$$I_e(i, j) = \frac{\min(|EI_i|W_i, |EI_j|W_j)}{\max(|EI_i|W_i, |EI_j|W_j)} \quad (4)$$

式(4)中,  $I_e(i, j)$  为  $i$  与  $j$  模块间回收生态指数比;  $EI_i, EI_j$  表示零件  $i$  与零件  $j$  的回收生态指数;  $W_i, W_j$  分别表示  $i$  与  $j$  的质量。

对以上 4 条主动回收模块化的准则进行分析, 由主动回收的相关定义, 对任意两个零部件之间的属性进行量化分析, 从而得到主动回收的属性值:

$$I(i, j) = \lambda_{RP}I_{RP} + \lambda_d I_d + \lambda_v I_v + \lambda_e I_e \quad (5)$$

式(5)中,  $\lambda_{RP}, \lambda_d, \lambda_v, \lambda_e$  分别为对应准则的权重因子, 在设计时可以根据实际情况给予不同的权重因子。

## 三、面向主动回收产品的模块划分

### (一) 模块划分的优化目标

#### 1. 建立零部件间的相互关联矩阵

在一个产品中, 不同的零部件之间有功能、结

构上的相互关系, 笔者用模糊关系的方式表示两个零部件间的相似程度关系, 取值范围为  $[0, 1]$ 。

综合相互关联矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \xi_{1,1,1} & \xi_{1,1,2} & \cdots & \xi_{1,1,q} & \cdots & \xi_{1,1,M_{NM}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \xi_{1_{N_1},1} & \xi_{1_{N_1},2} & \cdots & \xi_{1_{N_1},j_q} & \cdots & \xi_{1_{N_1},M_{NM}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \xi_{i_p,1} & \xi_{i_p,2} & \cdots & \xi_{i_p,j_q} & \cdots & \xi_{i_p,M_{NM}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \xi_{M_{NM},1} & \xi_{M_{NM},2} & \cdots & \xi_{M_{NM},j_q} & \cdots & \xi_{M_{NM},M_{NM}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中,  $\xi_{i_p,j_q}$  为两模块  $M_i$  与  $M_j$  中零件  $p$  与零件  $q$  的综合关联度。

#### 2. 产品零部件的内部聚合度

内部聚合度是指划分为同一个模块中不同零部件之间相似程度的一个指标。内部聚合度越大, 则该模块中零部件相似程度越高。因此, 内部聚合度越大越好。在模块划分时, 常常将它作为模块划分的准则, 创建零部件间相对聚合度的数学模型。

内部聚合度可以通过零件综合关联矩阵来反映。根据式(6)的关联矩阵, 产品模块中第  $i$  簇聚合指数为:

$$O_i = \sum_{p=1}^{N_i-1} \sum_{q=p+1}^{N_i} \varepsilon_{i,p,q} / \sum_{p=1}^{N_i-1} \sum_{q=p+1}^{N_i} 1 \quad (7)$$

产品中所有模块内部的综合聚合度为:

$$O_i = \sum_{i=1}^M \left( \sum_{p=1}^{N_i-1} \sum_{q=p+1}^{N_i} \varepsilon_{i,p,q} / \sum_{p=1}^{N_i-1} \sum_{q=p+1}^{N_i} 1 \right) \quad (8)$$

式(8)中,  $N$  表示某一模块单元的总零件数;  $\varepsilon_{i,p,q}$  表示综合关联度, 下角标  $p$  与  $q$  指第  $p$  个与第  $q$  个零部件。

#### 3. 产品零部件的相对耦合度

产品外部独立性指的是不同模块间的独立程度, 外部独立性越大, 则模块与模块间的相似程度越低, 而对外部独立性, 通常用相对耦合度来衡量。它是模块划分中最为重要的指标, 通常模块独立性是以零部件之间功能与结构为指标进行综合评价的。下面构建模块簇间综合相对耦合度数学优化模型。

根据关联度矩阵(6)的关联矩阵, 模块  $M_i$  与

模块  $M_j$  的相对耦合度为:

$$M_j^i = \frac{\sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} \varepsilon_{ipjq}}{\sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} 1} \quad (9)$$

则模块簇间的综合相对耦合度为:

$$M = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \left( \sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} \varepsilon_{ipjq} / \sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} 1 \right) \quad (10)$$

式(9)、(10)中,  $M_j^i$  为模块  $M_i$  与  $M_j$  间的相对耦合度;  $M$  为模块间的综合相对耦合度。

#### 4. 主动回收度

对产品而言, 其主动回收模块化的计算, 就是根据产品主动回收准则、易于拆卸准则、经济性准则以及环境准则等将零部件逐步划分为不同的模块, 从而令产品的主动回收度达到最大, 产品可以得到较好的回收。设  $N$  为产品零部件总数,  $M$  为产品模块单元数, 则其中  $N_i$  是指产品在第  $i$  模块单元  $M_i$  中的零件数,  $i$  的取值为 1 到  $M$ 。接下来, 只需计算出相应的各准则的交互因子, 再通过专家打分的方式求出各准则的权重值, 即可得到整个产品族内的相对主动回收度矩阵。

(1) 建立零部件相对主动回收度矩阵:

$$[I] = \begin{pmatrix} \gamma_{1,1,1} & \gamma_{1,1,2} & \cdots & \gamma_{1,1,j_q} & \cdots & \gamma_{1,1,M_{N_M}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{1,N_1,1} & \gamma_{1,N_1,2} & \cdots & \gamma_{1,N_1,j_q} & \cdots & \gamma_{1,N_1,M_{N_M}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{i_p,1} & \gamma_{i_p,2} & \cdots & \gamma_{i_p,j_q} & \cdots & \gamma_{i_{N_i},M_{N_M}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{M_{N_M},1} & \gamma_{M_{N_M},2} & \cdots & \gamma_{M_{N_M},j_q} & \cdots & \gamma_{M_{N_M},M_{N_M}} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式(11)中,  $r_{ipjq}$  为模块  $M_i$  内第  $p$  个零部件与模块  $M_j$  内第  $q$  个零部件之间的综合回收性。

(2) 建立各个模块间综合相对主动回收度数学优化模型。

模块  $M_i$  与模块  $M_j$  的相对主动回收度为:

$$I_j^i = \frac{\sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} r_{ipjq}}{\sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} 1} \quad (12)$$

则模块簇间的综合相对主动回收度为:

$$I = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \left( \sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} r_{ipjq} / \sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} 1 \right) \quad (13)$$

式(12)、(13)中,  $I_j^i$  为模块簇  $M_i$  与模块簇  $M_j$  的

相对主动回收度;  $I$  为模块簇间的综合相对主动回收度。

## (二) 基于 NICA-II 算法的模块划分

本文在对产品进行模块划分设计时, 有三个优化目标, 即主动回收性、内部聚合性和外部独立性, 因此该问题属于多目标优化问题。将其概念数学化:

$$\begin{aligned} F(X) &= [I(X), M(X), O(X)], \\ \begin{cases} g_j(x) \leq 0, j=1, 2, 3, \dots, J \\ h_k(x) = 0, k=1, 2, 3, \dots, K \end{cases} & \quad (14) \\ X &= (\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N) \\ \delta_i &\in (0, M) \end{aligned}$$

式(14)中,  $I(X)$ ,  $O(X)$  为极大化目标函数;  $M(X)$  为极小化目标函数;  $h_k(x)$  为优化问题的其中一个约束,  $K$  为其约束个数;  $g_j(x)$  为另一个约束,  $j$  为方程约束个数。

为了解决该问题, 笔者对原有的一种免疫多目标优化算法做出了改进。人工免疫系统 [12] 是人们由生物的免疫系统而联想到的一种全新的计算智能方法, 由此得到的免疫算法可以高效解决许多数学问题, 但也有一定的局限性。Coello 等 [13] 根据前人的免疫算法并经过深入思考, 最终得到免疫多目标优化算法 MISA。免疫多目标优化算法由于收敛速度和求解精度上优于已有的一些算法, 可广泛用于多目标优化问题中, 然而, 在面对一些模块划分的多目标优化问题时, 其效率较低, 因此笔者对传统的方法进行了改进。

图 1 所示为模块化划分问题中针对多目标问题所用算法 NICA-II 算法的流程图。

- (1) 初始化种群;
- (2) 输入该算法的基本参数, 包括初始代数  $i=0$ , 抗体群规模  $N$ , 克隆规模  $M$  和最大迭代数  $G$ ;
- (3) 随机生成规模是  $N(i)$  的抗体群, 并进行免疫克隆操作, 即  $N^{(1)}(i) = I_C(N(i))$ ;
- (4) 进行免疫基因操作, 并完成交叉变异, 即  $N^{(2)}(i) = I_C(N^{(1)}(i))$ ;
- (5) 将抗体划分为支配抗体和非支配抗体, 并选出模块元抗体群中非支配抗体, 完成抗体群更新  $N^{(3)}(i) = I_S(N^{(2)}(i))$ ;
- (6) 下一步计算得到  $N^{(4)}(i) = I_{RS}(N^{(3)}(i))$  和新目

标函数值矩阵  $F(N^{(4)}(i))$ ;

(7) 判断, 当  $i > j$  时, 直接输出模块元抗体群  $A(i)$  及其目标函数矩阵  $F(N(i))$ ; 当  $i < j$  时, 令

$$\begin{cases} N(i+1) = N^{(4)}(i) \\ F(N(i+1)) = F(N^{(4)}(i)), i = i+1 \end{cases}$$

然后返回步骤 (2)。

为实现全局搜索, 本文的算法采用克隆操作, 其中将变异操作作为主要部分, 采用 4 位 2 进制形式, 将抗体的某基因值与其基因位取反。在本文实例中, 内燃机有 19 个零件, 其中五号编码为 0011, 而在  $p$  为 0.2 的情况下, 克隆变异, 使其变异为 0010。其变异过程如图 2 所示。

为保证 Pareto 最优解分布的均匀性, 采用模块克隆选择操作以及模块元抗体群更新操作。前者有

效加快了收敛速度, 后者删除一个较为拥挤的抗体来保证均匀性。

#### 四、传统内燃机产品的模块划分过程实例

内燃机是一种动力机械, 它是将燃料里储存的化学能转化为人们所需动能的一种机械, 它的发明推动了汽车的产生与推广, 极大地方便了人们的生活。然而, 由于回收过程不完善, 大量废弃内燃机造成的环境污染问题也不容忽视。图 3 是某型号内燃机结构示意图, 表 1 为某型号内燃机简化后的主要零部件。

首先根据上文提出的 4 种主动回收准则, 分别计算出内燃机中任意两个零部件的各准则数值, 然后由专家协商得出结论, 综合认定内燃机的主动回

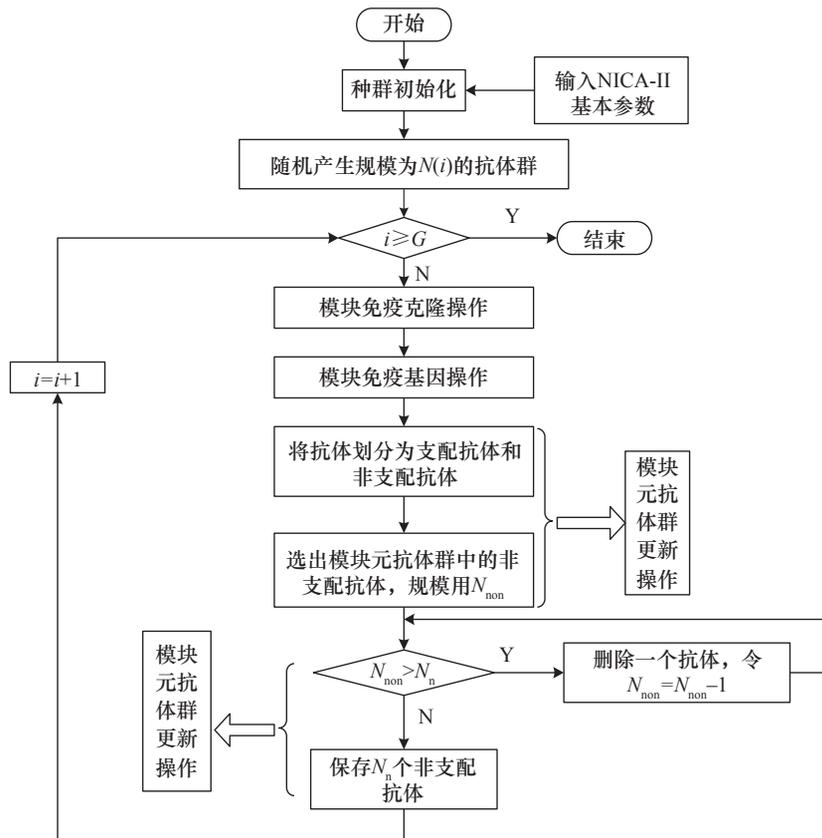


图 1 NICA-II 算法流程图

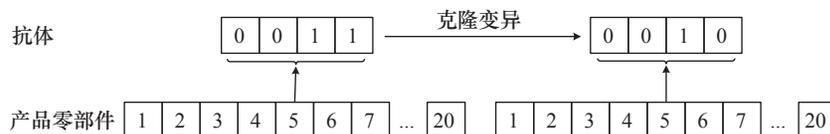


图 2 内燃机零部件抗体编码与克隆变异过程简图

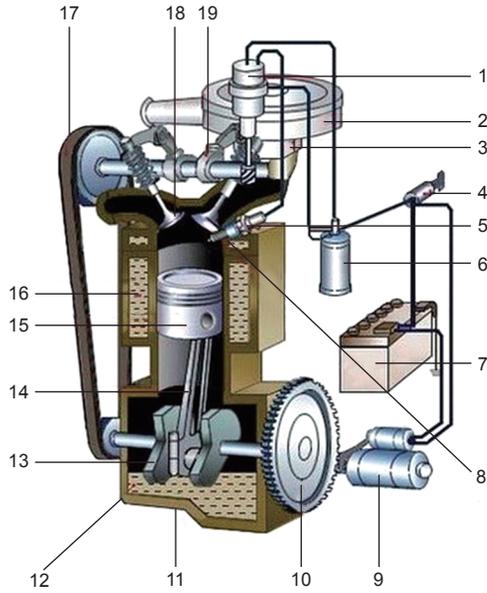


图3 某型号内燃机结构示意图

表1 某型号内燃机简化后的主要零部件

序号	零部件	序号	零部件
1	分电器	11	油底壳
2	空气滤清器	12	底舱
3	化油器	13	曲轴
4	点火开关	14	连杆
5	火花塞	15	活塞
6	点火线圈	16	内舱
7	蓄电池	17	正时链条
8	进气门	18	排气门
9	发动机	19	凸轮轴
10	飞轮		

收难度主要在于经济性准则以及可拆卸准则，给出各准则之间的权重指数： $\lambda = \{0.09, 0.33, 0.52, 0.06\}$ ，根据式(12)，归一化计算出主动回收度矩阵如下所示：

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	...	$K_{16}$	$K_{17}$	$K_{18}$	$K_{19}$
$K_1$	1.000	0.511	0.207	0.542	...	0.524	0.813	0.778	0.629
$K_2$	0.511	1.000	0.686	0.388	...	0.366	0.534	0.314	0.538
$K_3$	0.207	0.686	1.000	0.779	...	0.518	0.486	0.487	0.760
$K_4$	0.542	0.388	0.779	1.000	...	0.789	0.354	0.218	0.163
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮	⋮	⋮	⋮
$K_{16}$	0.524	0.366	0.518	0.789	...	1.000	0.596	0.747	0.213
$K_{17}$	0.813	0.534	0.486	0.354	...	0.596	1.000	0.515	0.311
$K_{18}$	0.778	0.314	0.487	0.218	...	0.747	0.515	1.000	0.109
$K_{19}$	0.629	0.538	0.760	0.163	...	0.213	0.311	0.109	1.000

各模块根据相互关联度矩阵(6)得到产品内

各个零部件之间的相对关联度，再经过归一化处理之后的结果如下所示：

	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	...	$K_{16}$	$K_{17}$	$K_{18}$	$K_{19}$
$K_1$	1.000	0.381	0.523	0.451	...	0.534	0.457	0.158	0.379
$K_2$	0.381	1.000	0.221	0.775	...	0.076	0.241	0.531	0.624
$K_3$	0.523	0.221	1.000	0.146	...	0.239	0.819	0.437	0.136
$K_4$	0.451	0.775	0.146	1.000	...	0.356	0.165	0.325	0.277
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋱	⋮	⋮	⋮	⋮
$K_{16}$	0.534	0.241	0.819	0.165	...	1.000	0.247	0.186	0.394
$K_{17}$	0.457	0.241	0.819	0.165	...	0.247	1.000	0.569	0.724
$K_{18}$	0.158	0.531	0.437	0.325	...	0.186	0.569	1.000	0.253
$K_{19}$	0.379	0.624	0.136	0.277	...	0.394	0.724	0.253	1.000

建立内燃机的多目标优化数学模型，其目标函数为：

$$F(X) = \begin{cases} \min f_1(x) = I_j^i = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \left[ \frac{\sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} r_{i,j,p}}{\sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} 1} \right] \\ \min f_2(x) = M_j^i = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \left[ \frac{\sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} r_{i,j,p}}{\sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} 1} \right] \\ \min f_3(x) = O_j^i = \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i+1}^M \left[ \frac{\sum_{p=1}^{N_i-1} \sum_{q=p+1}^{N_j} r_{i,j,p}}{\sum_{p=1}^{N_i-1} \sum_{q=p+1}^{N_j} 1} \right] \end{cases} \quad (15)$$

由于在模块划分时，当模块数量为零件总数的平方根时，模块划分结果最优，因此笔者设定模块数量为零件总数  $N$  的平方根，约束条件为：

$$\begin{cases} i, j < \sqrt{N} + 1 \\ i, j > 0 \\ i, j \in 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中， $N$ 代表零件的总数； $i$ 和 $j$ 代表模块划分中任意两个模块。

以  $\delta_i$  为优化对象，目标函数为内燃机模块间耦合度最小，模块内部聚合度最大。内燃机多目标优化的公式为： $A(i) = \{a_1(i), a_2(i), \dots, a_{100}(i)\}$ ，其中  $i$  表示迭代数。使用 NICA-II 算法的模块划分方法，令最大迭代数  $G$  为 200，变异概率  $P$  为 0.2，克隆比例  $R$  为 4，计算得到 Pareto 解集如图 4 所示。

为了证明 NICA-II 算法的优越性，本文引入 NSGA 算法。通过图 4 对比，明显可以看出 NICA-II 的 Pareto 解集较为密集。

从另一个角度，如表 2 所示，将两种算法在同样的条件下进行平均运算时间的比较，可以发现 NICA-II 的平均运算时间较短。

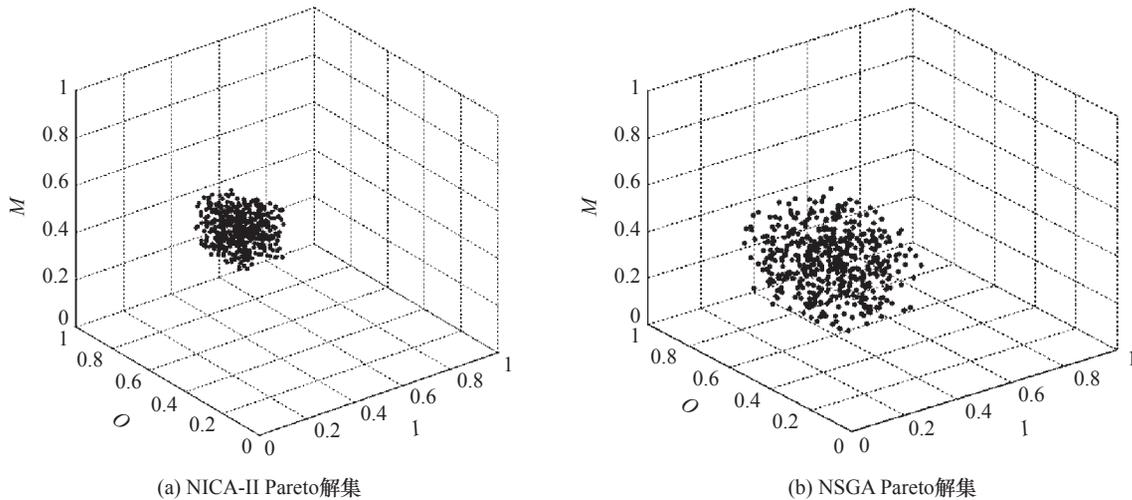


图4 求解的 Pareto 解集  
注:  $M$  为耦合度;  $O$  为聚合度;  $I$  为主动回收度。

最后, 将两种算法的非支配个体数量进行比较 (见表3), 结果显而易见, NICA-II 非支配个体数量较多, 最终解集的准确性相对较高。

表2 两种算法平均运算时长的比较

算法	NICA-II	NSGA
响应时间 $t/s$	75.34	94.24

表3 两种算法非支配个体数量的比较

算法	NICA-II	NSGA
个体数量	37.6%	31.8%

对比可知, 改进后的算法比之前的算法有较大优势。

根据 Pareto 解集的结果以及内燃机产品结构的特点, 求出内燃机模块单元多目标规划的综合最优解。最终模块划分方案由5个模块组成: 动力模块 {5,7,9,15}, 机身模块: {8,11,16,18,12}, 开关模块 {4,6}, 传动模块 {10,13,14,17,19}, 辅助模块 {1,2,3}。

## 五、结语

(1) 笔者将产品主动回收度量化为模块划分多目标优化问题中的一个优化目标, 并与产品内部聚合度与外部耦合度一起构建了产品基于主动回收的数学模型。

(2) 笔者使用一种改进的免疫遗传算法解决多目标优化问题, 并与传统的免疫遗传算法进行了对

比, 对比结果显示该算法有效提高了收敛速度, 使得多目标优化问题可以更加高效地解决。

## 参考文献

- [1] 李生. 结构变动对制造业技术效率影响的实证研究 [D]. 大连: 大连理工大学(硕士学位论文), 2009.  
Li S. An empirical study of the impact of structural change on manufacturing technology efficiency [D]. Dalian: Dalian University of Technology (Master's thesis), 2009.
- [2] 李方义, 刘钢, 汪劲松, 等. 模糊AHP方法在产品绿色模块化设计中的应用 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(9): 997-1000.  
Li F Y, Liu G, Wang J S, et al. A study on fuzzy AHP method in green modularity design [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(9): 997-1000.
- [3] Gu P, Hashemian M, Sosale S, et al. An integrated modular design methodology for life-cycle engineering [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1997, 46(1): 71-74.
- [4] 陆韵薇. 基于同异比的模块化绿色产品族设计方法 [D]. 上海: 上海交通大学(硕士学位论文), 2013.  
Lu Y W. Different than the modular green product family design method [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University(Master's thesis), 2013.
- [5] 曾北昌. 面向家电产品的拆卸与回收设计技术研究 [D]. 苏州: 苏州大学(硕士学位论文), 2010.  
Zeng B H. Research on design and technology of disassembly and recycling for household appliances [D]. Suzhou: Soochow University (Master's thesis), 2010.
- [6] 苏旭武, 左帆. 基于层次模块化的小型家电拆卸序列生成及优化 [J]. 湖北工业大学学报, 2017, 32(4): 6-11.  
Su X W, Zuo F. Generation and optimization of the disassembly sequence of small household appliances based on hierarchical modularization [J]. Journal of Hubei University of Technology, 2017, 32(4): 6-11.
- [7] 郭伟祥, 刘志峰, 刘光复, 等. 基于模块化思想的拆卸序列规划 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(3): 498-504.  
Guo W X, Liu Z F, Liu G F, et al. Disassembly sequence planning

- based on modularization [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(3): 498–504.
- [8] 容康权, 徐小明, 李福海. 模块化的产品拆卸方法研究 [J]. *机电工程技术*, 2009, 38(4): 88–91, 132.  
Rong K Q, Xu X M, Li F H. Research on modular method of disassembly of products [J]. *Mechanical and Electrical Engineering Technology*, 2009, 38(4): 88–91, 132.
- [9] 魏巍, 彭关伟, 吉军, 等. 基于改进免疫算法的可拆卸设计的产品模块划分方法 [J]. *航空制造技术*, 2017, 527(8): 64–69.  
Wei W, Peng G W, Ji J, et al. A product module partition method based on improved immune algorithm [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 527(8): 64–69.
- [10] 侯昆峰, 李中凯. 面向绿色模块化的产品重设计方法 [J]. *现代制造工程*, 2017 (12): 139–145.  
Hou K F, Li Z K. The method of product redesign for green modularization [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2017 (12): 139–145.
- [11] Muhamad A S, Deris S. An artificial immune system for solving production scheduling problems: A review [J]. *Artificial Intelligence Review*, 2013, 39(2): 97–108.
- [12] 权妮, 夏绪辉. 面向主动回收的汽车产品模块化设计研究 [J]. *物流技术*, 2014, 33(5): 148–150.  
Quan N, Xia X H. Research on modular design of auto products for active recovery research [J]. *Logistics Technology*, 2014, 33(5): 148–150.
- [13] Coello C A C, Cortes N C. Solving multiobjective optimization problems using an artificial immune system [J]. *Genetic Programming & Evolvable Machines*, 2005, 6(2): 163–190.