

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.051

面向定制产品进化设计的优势种群产生策略

包志炎^{1,2} 王学斌³ 计时鸣¹ 张海波² 王萱²

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 杭州 310014; 2. 浙江水利水电学院计算机应用技术研究所, 杭州 310018;
3. 浙江省特种设备检验研究院国家电梯产品质量监督检验中心, 杭州 310020)

摘要: 为了提高个性化定制产品进化效率,提出了一种在相似实例等距布种的基础上进行等位基因多样化阈值控制的优秀种群产生策略。阐述了个性化定制产品优势种群的特征,认为精英个体应同时具有定制需求宏观上的相似性和种群基因微观上的多样性两大特征。在产品基因建模的基础上,采用夹角余弦作为聚类统计量,提取具有相似定制基因组的历史实例作为优势种群的初始解;基于加权的闵科夫斯基距离,对初始解成员进行等距采样,形成差异化精英个体候选队列,以实现种群的均匀布种;采用杰卡德距离度量候选个体承载的基因组与当前初始基因库两者间差异度,提出了等位基因阈值矩阵,构建了多样化等位基因生成算法。给出了产品适应度评价函数,基于评价反馈对优势度低的初始种群进行改进。以桥式起重机为例,对提出的策略进行了验证。实验结果表明,该策略能同时兼顾进化效率和进化质量,有助于避免早熟收敛现象的发生,适合个性化定制产品的进化设计。

关键词: 定制产品; 进化设计; 初始种群; 优势种群; 适应度评价

中图分类号: TH122; TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0404-10

Generating Strategy of Superior Population for Customization Products Evolutionary Design

BAO Zhiyan^{1,2} WANG Xuebin³ JI Shiming¹ ZHANG Haibo² WANG Xuan²

(1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China
2. Institute of Computer Application Technology, Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, Hangzhou 310018, China
3. National Elevator Product Quality Supervision and Inspection Center, Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China)

Abstract: The development of initial population generation strategy was briefly reviewed. In order to realize the efficient evolution design of customization products, a reasonable model and algorithm was proposed to produce the superior population. Characteristics of the superior population for customized products were discussed. The two remarkable features were that elite individuals should have the similarity of customized requirements and initial genes should be diverse. Based on product gene model, historical product design cases with similar custom genome were obtained by using the angle cosine as clustering statistic, and these cases were used as the initial solution for superior population. Elite individual candidate queue was established by sampling the initial solution members with equal weighted Minkowski distance to achieve uniform population distribution. Difference between the elite individuals genome and the current initial gene library was measured by Jaccard distance. Allele threshold matrix was defined and a diversity allele generation algorithm was built to achieve the diversity of initial population genes. The product fitness evaluation function was established and the dominance of the initial population could be improved according to the feedback result of the evaluation function. The strategy and method were effective in an instance of the product called bridge crane. The experimental results showed that the differentiation of individual queues and the control of multiple gene thresholds could help to avoid premature convergence and obtain high fitness solutions, the proposed approach could take into account

收稿日期: 2017-10-10 修回日期: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575494, 41601461)、浙江省重大科技专项计划项目(2014C01048)、浙江省博士后优先项目(201693)和浙江省水利厅重点科技项目(RB1314)

作者简介: 包志炎(1982—),男,博士后,浙江水利水电学院副教授,主要从事智慧水利和制造业信息化研究, E-mail: baozhiyan@163.com

通信作者: 王学斌(1969—),男,高级工程师,主要从事特种设备检验技术研究, E-mail: hzr18888@163.com

both the evolutionary efficiency and the evolutionary quality and increase the success rate of evolution. The strategy was suitable for customized product evolutionary design.

Key words: customization products; evolutionary design; initial population; superior population; fitness evaluation

0 引言

作为计算智能的重要分支,从 20 世纪 90 年代开始,进化计算被广泛应用于产品设计领域^[1-5]。进化设计具有进化计算的一切特点,是指采用进化机制,从一组类似产品实例(初始种群)出发,利用选择、杂交、变异等遗传算子,在适应函数引导下,继承原有产品优良基因,生成具有更好性能指标的下一代产品群;在具体实现时需要落实 4 个问题:适应函数、遗传算法、基因表达和初始种群的产生^[6-7]。进化设计的一个显著特点是基于多实例的一组类似产品的杂交,初始种群就是这些实例的集合。相对于基于单个实例的变异设计,基于初始种群实例集合的进化设计更易创新。初始种群的选取直接关系到进化设计的全局收敛性、搜索效率和成功率^[8]。国内外学者对初始种群的产生方法进行深入研究。常用的产生方法有随机法^[5,9]、基础个体法^[10-11]、选优法^[12]和基因空间均匀分布策略^[13-15]等。定制产品,可以追溯至 1970 年由美国著名科学家 TOFFLER 提出^[16-17]。本文面向个性化定制产品的进化设计,从定制参数出发,提出一种在相似实例等距布种的基础上进行等位基因多样化阈值控制的优势种群产生策略,以期有效重用已有的产品数据资源和设计知识。

1 定制产品优势种群特征

确定优势种群的核心是在有限精英个体的引导下,通过尽可能少的进化操作,获取尽可能高适应度的目标解。因缺乏明确的个体选择依据,在传统进化计算中普遍采用随机的方式产生初始种群,实现简单,占用计算资源少,但无法确保是否为优势种群^[8]。对于个性化定制产品,企业向客户开放各类定制参数,并以此为依据指导企业生产,这些定制参数在产品设计前是已知的,因此优势种群的产生是有方向性的,并非盲目的。从宏观和微观两个层面分析,定制产品优势种群应具有以下两大特点:

(1)精英个体定制需求具有相似性。为满足客户多样化需求,产品系列不断拓展,产品数量剧增,给企业资源维护和重用造成困难,同时也使初始种群有了丰富来源。从定制产品配置设计特点可知,相似问题具有相似解^[18]。历史实例均由客户需求

驱动设计,通过定制需求的模糊匹配可以得到待求产品的相似实例,进而可以快速实现基于实例推理的(Case-based reasoning, CBR)^[19-20]产品设计。因此,从具有相似定制需求的实例组出发进行进化设计,得到目标解的概率会比较大,效率会比较高。

(2)初始种群基因具有多样性。产品进化方向由市场选择决定,产品在功能、结构、外观等方面的继承和革新是产品进化的内因,产品畅销和淘汰是进化的结果,那些能满足客户需求产品被保留下来。因为客户需求的多样性和个性化,导致了产品的多样性和个性化。产品基因多样性代表产品种群遗传结构的变异,丰富的初始种群基因可以使选择、杂交、变异等遗传操作产生更多的模式,更有利于搜索效率,实现产品设计创新和系列化,形成产品族。

2 问题的形式化描述

针对某类定制产品,客户提出了个性化需求,如何从历史产品实例库中遴选出一组实例(优势种群),作为进化设计的输入,使得进化设计在该组实例所承载基因集合作用下快速得到满足客户需求的产品设计方案是研究的原始命题。

定义 1:产品实例库 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 。设产品实例库中共有 n 个产品实例,用 e_x 表示客户新订购产品。

定义 2:产品基因(Product genes, PG), $PG = \langle G_id, G_name, G_value \rangle$,具有遗传产品某一方面特征的最小信息单位。产品基因总和构成产品基因库(Product gene library, PGL)。

定义 3:定制基因(Customization gene, CG), $CG = \langle CG_id, CG_name, CG_value \rangle$,表达客户定制需求的产品基因。设产品共有 m 个定制参数,实例 e_i 的客户定制需求用其定制基因组来表达: $CG_i = (CG_{i1}, CG_{i2}, \dots, CG_{im})$,用 CG_x 表示待求产品的定制基因组。

定义 4:优势种群 $E' = \{e'_1, e'_2, \dots, e'_s | s \leq n\}$,具有较高进化效率和进化质量的初始种群。 e'_i 为选中的精英个体, s 为种群规模。 E' 中产品基因总和构成初始基因库,包含了实质性参与进化的产品基因,记为 PGL_0 。

基于以上定义,面向定制产品进化设计的优势种群产生模型可以表达为: $E' = f(E, CG_x, s)$,其中

要求 e'_i 与 e_x 的 CG 具有相似性, PGL_0 中的 PG 具有多样性, 且基于 E' 能实现高效进化。

3 优势种群产生模型及关键技术

3.1 优势种群产生模型

优势种群由精英个体组成, 精英个体来源于产品实例库。需要寻求合理的产生模型和算法, 遴选出精英个体。夹角余弦相关系数和闵科夫斯基 (Minkowski) 距离被广泛应用于事物间的比较和分类, 本质上都属于相似度评价范畴, 但又具有各自不同特点和应用领域。夹角余弦相关系数使用两个向量夹角的余弦作为衡量个体间的相关性, 侧重两个向量在方向上的差异, 对具体数值不敏感。个体间夹角余弦越大越相关, 可以归为一类。闵科夫斯基距离衡量的是绝对距离, 体现个体间数值特征的绝对差异, 距离越大越差异越大, 且可以量化。Google 公司采用夹角余弦相关性分析实现新闻的自主归类, 用闵科夫斯基衡量同类新闻间差异的量化程度; 文献[21]采用夹角余弦来辨别香精产品的真伪, 用欧氏距离 (闵科夫斯基距离的特例) 衡量都为真的产品间亲疏的量化程度。由此启发, 可以先用夹角余弦相关系数将历史产品实例进行自主聚类, 与待求产品同类的组成相似实例组, 以满足个体相似性条件; 再用闵科夫斯基距离计算待求产品与相似实例间的量化距离, 通过等步采样得到差异化的精英个体候选集合, 如图 1 所示。

杰卡德 (Jaccard) 距离用 2 个集合中相异元素占有所有元素的比例来衡量两个集合的区分度, 区分度越大包含差异化元素越多。因此, 利用杰卡德距离可以辨别出包含与当前初始基因库差异化基因多的个体作为精英个体, 并将其承载的差异化基因纳入初始基因库, 以尽可能小的规模构建足够丰富的初始基因库。

基于以上分析, 提出面向定制产品进化设计的优势种群产生模型如图 2 所示, 其核心思想是: 从

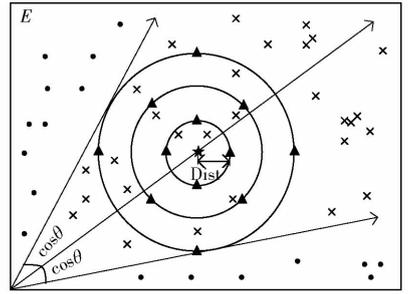


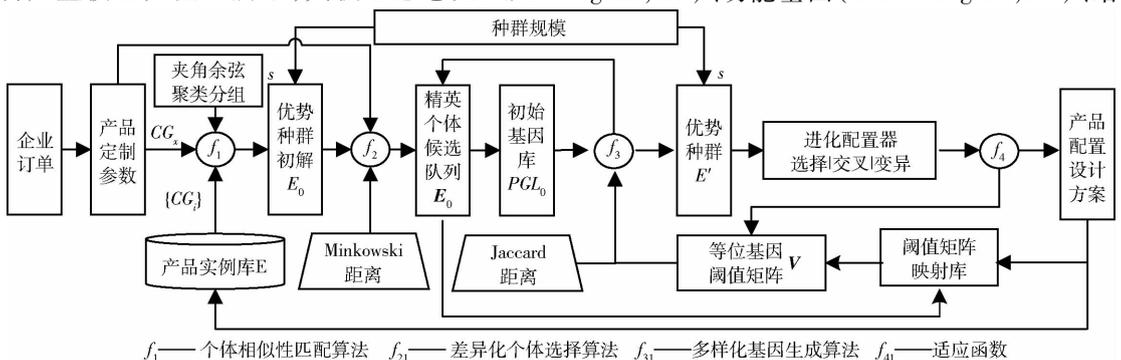
图 1 差异化候选精英个体形成图

Fig. 1 Formation graph of differentiated candidate elites

企业新订单中提取产品定制参数, 并转换为待求产品定制基因组 CG_x ; 在产品实例库 E 中提取历史实例定制基因组集合 $\{CG_i\}$ 。通过基于夹角余弦的个体相似性匹配算法 f_1 , 实现实例的自主聚类; 将与 e_x 同组的个体组成的相似实例组, 作为优势种群的初始解 E_0 , 其规模为 s_0 ($s_0 > s$)。根据基于加权闵科夫斯基距离的差异化个体选择算法 f_2 , 计算 e_x 与 E_0 中个体间的相似度; 按相似度降序排列后进行等距采样, 形成差异化的精英个体候选队列 E_0 。基于等位基因阈值矩阵的多样化基因生成算法 f_3 , 从 E_0 中筛选出拥有差异化基因多的实例作为精英个体, 组成优势种群 E' 。 E' 作为进化配置器的输入, 通过选择、交叉和变异等进化操作配置出子代产品。子代产品按适应函数 f_4 计算适应度, 其值在进化质量上表征了 E' 的优势度。因此, 基于适应度评价反馈结果可以继续改进 E' , 以提高其优势度。

3.2 产品基因信息建模

产品进化设计需基于特定的产品信息模型, 文献[6]对定制产品信息进行了分类, 建立了基于基因表达的产品信息模型。每个产品基因均有基因编号、基因名称和基因值 3 个属性, 其中基因编号在该产品基因库中是唯一识别号, 由实例编号、构件编号、基因类别和特征编号组合构造。按承载对象不同, 将产品基因分为产品级、部件级和零件级; 按描述信息类别不同, 分为定制基因 (Customization gene, CG)、功能基因 (Function gene, FG)、结构基因



f_1 —个体相似性匹配算法 f_2 —差异化个体选择算法 f_3 —多样化基因生成算法 f_4 —适应函数

图 2 定制产品进化设计的优势种群产生模型

Fig. 2 Superior population generation model for customized product evolutionary design

(Structural gene, SG)、原理基因(Rule gens, RG)和成长基因(Growth gene, GG),分别描述客户需求、功能性能、结构装配、设计知识和全生命周期内版本更新等信息,其中 CG 是产品级特有,实质性参与进化过程的是 FG、SG 和 RG,GG 为设计人员提供各零部件方案的有效追踪和并行开发,如图 3 所示。

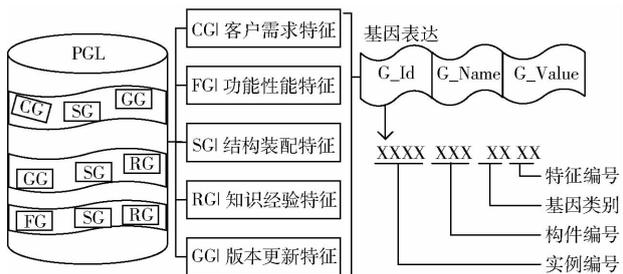


图 3 产品基因建模

Fig. 3 Product gene model

3.3 个体需求相似性匹配算法

产品实例个体间相似性在产品级主要体现在定制需求的相似性。定制基因组表达了客户需求信息,因此可以通过定制基因组的相似性匹配提取待求产品的相似实例组。以待求产品定制基因组 CG_x 为输入,以历史产品实例库 E 为遴选池,产生与 CG_x 相似的产品实例,作为优势种群初始解 E_0 输出,具体流程与算法如下:

(1) 建立扩展的定制基因组值矩阵。以待求产品和历史实例的定制基因组的值 ($CG_{ij}value, CG_{ij}$) 为内容构建数据矩阵 A ,通过“平移-标准差-极差”变换,将数据转换到 $[0, 1]$ 区间,得到矩阵 A'

$$A = [CG_{ij}]_{(n+1) \times m} = \begin{bmatrix} CG_{11} & CG_{12} & \cdots & CG_{1m} \\ CG_{21} & CG_{22} & \cdots & CG_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CG_{n1} & CG_{n2} & \cdots & CG_{nm} \\ CG_{x1} & CG_{x2} & \cdots & CG_{xm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A' = [a_{ij}]_{(n+1) \times m} \quad (2)$$

其中

$$a_{ij} = \frac{CG'_{ik} - \min_{1 \leq i \leq n+1} \{CG'_{ik}\}}{\max_{1 \leq i \leq n+1} \{CG'_{ik}\} - \min_{1 \leq i \leq n+1} \{CG'_{ik}\}}$$

$$CG'_{ik} = \frac{CG_{ik} - \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} CG_{ik}}{\sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} \left(CG_{ik} - \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} CG_{ik} \right)^2}}$$

($i = 1, 2, \dots, n+1; k = 1, 2, \dots, m$)

(2) 计算模糊等价矩阵。引入夹角余弦相关系数作为聚类统计量,计算得到 A' 模糊相似矩阵 B 。

$$B = [b_{ij}]_{(n+1) \times m} \quad (3)$$

其中

$$b_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m a_i a_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m a_{ik}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^m a_{jk}^2}}$$

在对矩阵 B 进行改造后,采用平方法求其传递闭包,得到模糊等价矩阵 B' ,作为聚类分组的依据。

(3) 求取优势种群初始解。使用 λ -截矩阵,当 λ 值由 1 变为 0 时, B' 的分类由细变粗,生成一个动态聚类图,实现了实例库成员的动态聚类分组。按待求种群规模的整数倍(记为 ts ,其中 t 为整数,可按需调整)确定为初始解的最小规模,使下一步差异化个体选择时有足够样本源。在调整 λ 值时,当第 1 次出现包含 e_x 的组别成员个数超过 $(ts + 1)$ 时,将该组别除去 e_x 后的所有成员构成的实例集合作为优势种群初始解 E_0 ,显然 $E_0 \subset E, E_0$ 规模 $s' \geq ts$ 。

3.4 种群基因多样化策略

3.4.1 基于等距布种的差异化个体候选队列

差异化个体有利于形成初始基因库中基因的多样性。种群个体的空间分布越广、越分散,则种群个体所拥有基因的多样性就越好。均匀设计是一种可以用最少的信息来获取空间最多信息的方法,让个体均匀分散在变量的可行解空间内,可以避免个体信息的重复和浪费^[13]。均匀设计有很多种方法,例如格子法、拉丁方法、正交表扩充法、翻转法等^[14-15]。本文提出等距采样的方法,具体流程如下:

(1) 建立优势种群初始解 E_0 各成员定制基因组值矩阵

$$C = [E_0 CG_{ij}]_{s' \times m} = \begin{bmatrix} E_0 CG_{11} & E_0 CG_{12} & \cdots & E_0 CG_{1m} \\ E_0 CG_{21} & E_0 CG_{22} & \cdots & E_0 CG_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_0 CG_{s'1} & E_0 CG_{s'2} & \cdots & E_0 CG_{s'm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(2) 定制参数权重赋值。针对 m 个产品定制参数,采用层次分析法(AHP),组织专家确定各参数权重,构成权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ 。

(3) 计算相似度。考虑数据归一化,采用加权的闵科夫斯基距离,得到初始解成员与待求产品之间的相似度

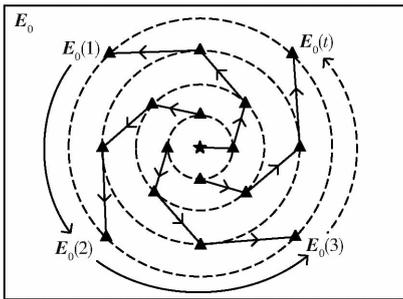
$$Sim(e_i, e_x) = 1 - \left(\sum_{j=1}^m w_j^q \left| \frac{E_0 CG_{ij} - CG_x}{\sum_{j=1}^m (E_0 CG_{ij} - CG_x)} \right|^q \right)^{\frac{1}{q}}$$

($i = 1, 2, \dots, s'; j = 1, 2, \dots, m$)

式(5)中 q 为自然数,当 $q = 1$ 时,为海明距离;当

$q=2$ 时,为欧氏距离;当 $q = \infty$ 时,为切比雪夫距离。

(4)生成差异化精英个体候选队列。为实现尽少的实例覆盖尽可能广的解搜寻区域,将相似度紧密相邻的实例分散到不同组。先按步骤3计算得到的相似度降序排列,第1次采样从最相似的实例开始,以 t 为步长,提取 s 个实例,组成第1个有序组,记为 $E_0(1)$;第2次采样以次相似的实例开始,步长不变,以此类推,共形成 t 个有序组,记为 $E_0(1) \sim E_0(t)$ 。当 $s' > ts$ 时,序列中位于 ts 后的个体均纳入 $E_0(t)$ 。将 $E_0(1) \rightarrow E_0(t)$ 作为精英个体候选队列 E_0 。较理想的等距布种的候选队列如图4所示。



▲—候选精英个体 ★—待求产品 E_0 —优势种群初始解空间
图4 等距布种的精英个体理想队列

Fig. 4 Excellent elite queue with equal spacing

3.4.2 基于阈值矩阵的多样化基因生成算法

定义5:等位基因阈值矩阵 V 。在待求产品进化设计过程中,以产品零部件编号为行,零部件上承载的功能基因、结构基因和原理基因的特征编号为列,在初始基因库中以相应等位基因最小期望数为值来构造的矩阵,称为待求产品的等位基因阈值矩阵,简称阈值矩阵。

阈值矩阵可通过抽取基因编码中零部件编号、基因类别、特征编号等信息来构造,如图5所示。设有 l 个零部件, v_{ij} 为阈值, k_1 为产品中承载最多 FG 零部件的 FG 总数, k_2, k_3 含义和取值类似。

$$V = \begin{bmatrix} FG_1 & \cdots & FG_{k_1} & SG_1 & \cdots & SG_{k_2} & RG_1 & \cdots & RG_{k_3} \\ v_{11} & \cdots & v_{1k_1} & v_{1(k_1+1)} & \cdots & v_{1(k_1+k_2)} & v_{1(k_1+k_2+1)} & \cdots & v_{1(k_1+k_2+k_3)} \\ v_{21} & \cdots & v_{2k_1} & v_{2(k_1+1)} & \cdots & v_{2(k_1+k_2)} & v_{2(k_1+k_2+1)} & \cdots & v_{2(k_1+k_2+k_3)} \\ \vdots & \vdots \\ v_{l1} & \cdots & v_{lk_1} & v_{l(k_1+1)} & \cdots & v_{l(k_1+k_2)} & v_{l(k_1+k_2+1)} & \cdots & v_{l(k_1+k_2+k_3)} \end{bmatrix}$$

图5 等位基因阈值矩阵构造图

Fig. 5 Allelic threshold matrix

基因多样化是个相对的概念,并非指基因的绝对总量巨大,应看不同的等位基因分布情况。阈值矩阵中的值表征了为达到高效进化而设置的各等位基因的最少数目。阈值设置偏大会增加系统计算成本,偏小会导致子代产品适应度偏低。通过构建阈

值矩阵映射模型来简化阈值矩阵的赋值问题。预设常用的种群规模,在评价函数(3.5节)的引导下,逐一开展产品配置测试实验。每成功进化一次,就将定制基因组、种群规模、相应阈值矩阵存入映射库。在进化设计时,待求产品阈值矩阵按映射库中最相似实例(3.4.1节步骤4)的同规模阈值矩阵进行初始化,并根据以下规则进行校核:阈值的上限不能超过待求种群规模,同时也不能超过产品基因库中该等位基因总数;对于 FG, SG 和 RG 分别未达到 k_1, k_2, k_3 的零部件相应的列赋值为0;如果进化失败,根据产品适应度评价反馈结果有针对性地微调部分阈值,进一步提高基因多样化水平。

以精英个体候选队列 E_0 为序,逐一选择个体并评判其是否满足加入优势种群 E' 的条件,提出基于阈值矩阵的多样化基因生成算法,如图6所示。先将待求的优势种群成员和初始基因库清空,当被选择个体与初始基因库中基因差异度达到要求且种群规模未超限时,将当前个体加入优势种群,并把其承载的差异化基因纳入初始基因库;如果种群规模已超限,但初始基因库中等位基因尚未达到阈值矩阵要求,此时通过替换^[8]优势种群已有成员中拥有重复的等位基因来进一步丰富初始基因库,种群规模保持不变。

以上算法考虑了2种情况:①精英个体候选队列 E_0 中所有成员均已参与遴选,但 PGL_0 仍未满足阈值条件,或者提前满足阈值条件,此时通过从实例库 E 中随机产生产品实例补充遴选样本源。②实例库 E 中所有的实例均已参与遴选, PGL_0 仍未满足阈值条件,此时视为运行失败,无法生成满足阈值矩阵条件的优势种群。

算法中采用了杰卡德距离衡量被选择个体 e 与初始基因库 PGL_0 中包含产品基因的差异度(式(6)),杰卡德距离越大表明当前实例差异化基因越多。

$$\text{Dist}(\{e, PG\}, PLC_0) = \frac{|\{e, PG\} \cup PLC_0| - |\{e, PG\} \cap PLC_0|}{|\{e, PG\} \cup PLC_0|} \quad (6)$$

3.5 初始种群优势度改进

个体需求相似性和种群基因多样性会提高初始种群的优势度,但进化效率和进化质量是判断初始种群是否为优势种群的最重要依据。产品适应度是衡量进化质量的指标,进化过程中迭代次数是衡量进化效率的指标,基于适应度评价反馈可实现对优势度低的初始种群进行改进。

产品适应度大小反映了产品设计方案满足企业、客户和设计师各方要求的综合程度。文献[6]将产品某方面特征进行评价的最小逻辑单元定义为评价基元,为每个评价基元构造定性评价函数和定

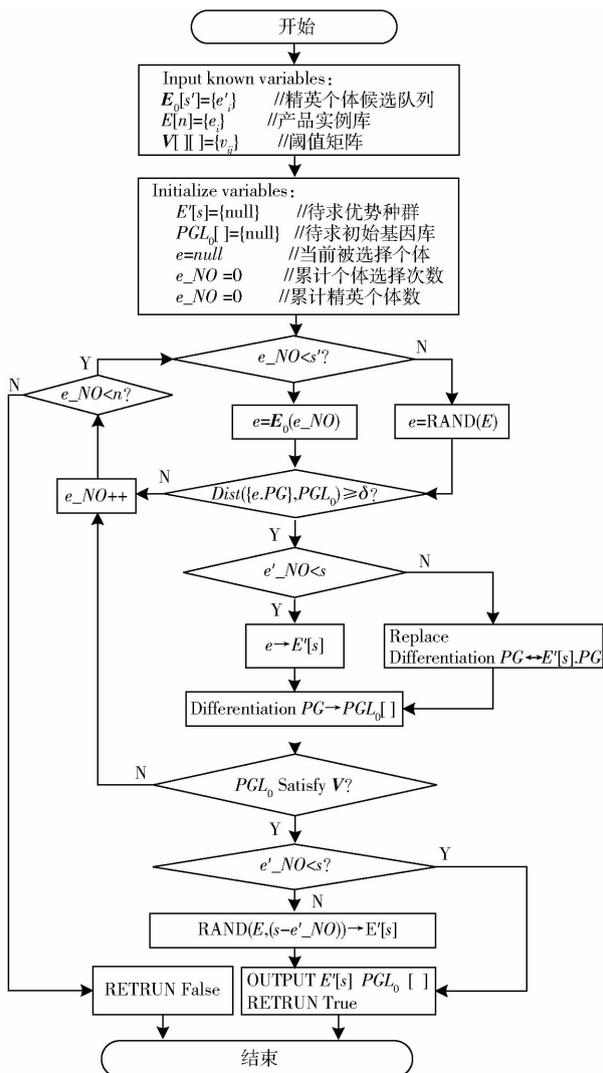


图 6 多样化等位基因生成算法

Fig. 6 Diverse alleles generation algorithm

量评价函数。定性评价函数采用 I 类值域, 判别是否已达到最低设计要求

$$f_{1i}(x_i) = \begin{cases} 1 & (x_i \text{ 满足最低设计要求}) \\ 0 & (x_i \text{ 不满足最低设计要求}) \end{cases} \quad (7)$$

定量评价函数采用 II 类值域, 值越大满意度越高

$$f_{2i}(x_i) = \begin{cases} 0 & (x_i \text{ 完全不满足设计要求}) \\ 1 & (x_i \text{ 满足设计要求的程度“较低”}) \\ 2 & (x_i \text{ 满足设计要求的程度“一般”}) \\ 3 & (x_i \text{ 满足设计要求的程度“较好”}) \\ 4 & (x_i \text{ 满足设计要求的程度“很好”}) \end{cases} \quad (8)$$

并把所有评价基元的值的总和作为产品适应度评价结果。在具体运用时, 需对式中的“较低”、“一般”、“较好”、“很好”不同等级给出明确的量化标准。

现对产品整体适应度计算给出以下假设: 当有

1 个评价基元的定性评价函数值为 0, 即至少存在有一项未达到最低设计要求, 则产品整体适应度为 0; 当定性评价函数值均为 1 时, 产品整体适应度为所有定量评价函数实际值之和与每一个定量评价函数值域上限之和的比值。设共有 n 个评价基元, 引入取整函数, 定义产品整体适应函数为

$$f(e_x) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n f_{1i}(x_i)}{n} \right] \frac{\sum_{i=1}^n f_{2i}(x_i)}{\sum_{i=1}^n \max f_{2i}(x_i)} \times 100\% \quad (9)$$

式中 x_i ——第 i 个评价基元

$f_{1i}(x_i)$ —— x_i 的定性评价函数

$f_{2i}(x_i)$ —— x_i 的定量评价函数

针对进化结果适应度较低的初始种群, 获取未通过定性评价或定量评价偏低的评价基元集合。对这些评价基元与产品基因进行相关性分析, 可以得到当前初始基因库中尚未能满足进化需求的等位基因列表, 依此逐步增大相应等位基因的阈值, 有针对性的让更多的差异化基因纳入初始基因库, 不断改进初始种群, 以得到适应度更高的产品设计方案, 如图 7 所示。

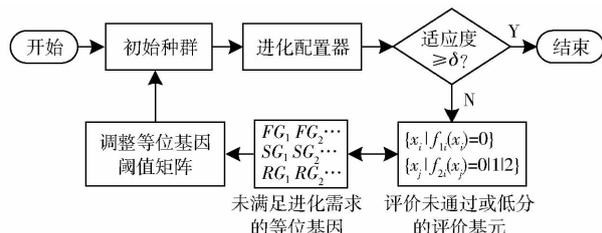


图 7 基于适应度评价反馈的种群优势度改进

Fig. 7 Improvement of population dominance based on fitness evaluation feedback

4 应用案例

桥式起重机是位于车间、仓库和料场上空, 用于货物、材料吊运的起重设备。因应用场地、吊运对象不同, 起重机跨度和吨位就会不同, 属于典型的个性化定制产品。通过梳理企业订单, 建立产品实例库。为方便说明问题, 取其中 27 个样本, 见表 1; 以电动机和主梁部件承载的部分基因为例, 给出产品基库, 见表 2。假设客户新订购产品需求为起吊质量 10 t、跨度 28.5 m、起升高度 12.0 m、大车运行速度 70.0 m/min、小车运行速度 40.0 m/min、起升速度 12.5 m/min, 工作级别为 A5, 初始种群规模为 10, 现运用上述方法求解其优势种群。

(1) 模糊聚类分组。根据客户新订购产品的需求, 得到待求产品的定制基因组

表1 桥式起重机产品实例库(部分)

Tab.1 Bridge crane product case library

ID	起吊质量/ t	跨度/ m	起升高度/ m	运行速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)		起升速度/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	工作级别
				大车	小车		
e_1	5.0	22.5	8.0	35.5	26.5	12.7	5
e_2	10.0	22.5	12.0	69.7	44.3	10.4	5
e_3	20.0	22.5	12.0	75.0	44.5	7.2	5
e_4	50.0	29.8	16.0	73.6	40.2	6.0	6
e_5	25.0	34.0	14.0	9.5	40.2	6.0	5
e_6	16.0	25.5	12.0	75.0	44.0	9.6	5
e_7	20.0	23.5	12.0	75.0	44.5	7.2	5
e_8	20.0	25.5	12.0	75.0	44.0	7.2	5
e_9	32.0	26.5	10.0	30.0	20.0	8.0	5
e_{10}	32.0	34.5	12.0	15.5	40.2	6.0	5
e_{11}	20.0	16.5	9.0	44.0	43.0	6.0	5
e_{12}	10.0	19.5	10.0	93.0	40.0	12.5	6
e_{13}	10.0	22.5	9.0	69.7	44.3	10.4	5
e_{14}	16.0	22.5	10.0	42.7	16.9	8.0	5
e_{15}	16.0	22.5	9.0	75.0	44.0	9.6	5
e_{16}	32.0	22.0	12.0	81.7	38.0	12.0	5
e_{17}	5.0	22.5	12.0	69.7	44.3	12.7	5
e_{18}	10.0	13.5	9.0	69.7	44.3	10.4	5
e_{19}	32.0	22.5	12.0	59.1	38.7	12.3	6
e_{20}	20.0	22.0	12.0	77.0	39.1	9.5	6
e_{21}	20.0	22.5	9.0	75.0	44.0	7.2	5
e_{22}	5.0	16.5	9.0	70.0	62.0	12.0	5
e_{23}	20.0	22.5	14.0	86.9	44.6	9.3	6
e_{24}	20.0	22.9	9.0	44.0	43.0	6.0	5
e_{25}	50.0	22.5	14.0	59.4	39.1	7.7	6
e_{26}	10.0	28.5	10.0	70.0	40.0	10.0	5
e_{27}	20.0	29.8	12.0	77.0	39.1	9.5	6

$$CG_x = (10.0, 28.5, 12.0, 70.0, 40.0, 12.5, 5.0)$$

建立扩展的定制基因组值矩阵,对待求产品与历史实例进行基于余弦相关系数的聚类分析,得到动态聚类图,如图8所示。

(2)求取优势种群初始解。令待求种群规模 $s = 10$,取 $t = 2$,那么初始解规模 $s' \geq 20$ 。由图8可知,当 $\lambda = 0.778$ 时,产品实例库被分为 $\{e_5, e_{10}\}$ 、 $\{e_2, e_3, e_4, e_6, e_7, e_8, e_{12}, e_{13}, e_{15}, e_{16}, e_{17}, e_{18}, e_{19}, e_{20}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{25}, e_{26}, e_{27}, e_x\}$ 、 $\{e_{14}\}$ 、 $\{e_1\}$ 、 $\{e_{11}, e_{24}\}$ 和 $\{e_9\}$ 等6个组别,且第1次出现包含 e_x 的组别成员个数达到20,将该组别作为待求优势种群初始解,即: $E_0 = \{e_2, e_3, e_4, e_6, e_7, e_8, e_{12}, e_{13}, e_{15}, e_{16}, e_{17}, e_{18}, e_{19}, e_{20}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{25}, e_{26}, e_{27}\}$ 。

(3)计算初始解成员相似度。构造 E_0 所有成员定制基因组值矩阵。通过层次分析法得到权重向量 $w = (0.40, 0.20, 0.04, 0.06, 0.04, 0.16, 0.10)$ 。按式(5),采用加权欧氏距离,计算得到相似度见表3。

(4)构建差异化精英个体候选队列。对表3中的实例,分别从 e_{26}, e_2 开始采样2次,步长均为2,得到2组有序队列: $E_0(1) = \langle e_{26}, e_{13}, e_6, e_{12}, e_{27}, e_{22}, e_{21}, e_{20}, e_{16}, e_{25} \rangle$; $E_0(2) = \langle e_2, e_{17}, e_{15}, e_8, e_7, e_3, e_{18}, e_{23}, e_{19}, e_4 \rangle$,并将 $E_0(1) \rightarrow E_0(2)$ 作为差异化精英个

表2 桥式起重机产品基因库(部分)

Tab.2 Bridge crane product gene library

G_Id	G_Value	G_Name	备注		
			基因类别	构件编号	构件名称
008-00-00-01	25	起重质量	CG	00	桥式起重机
008-00-00-02	28 500	跨度	CG	00	桥式起重机
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
008-01-11-01	63	功率_JC25%	FG	01	起升电动机
008-01-11-02	724	转速_JC25%	FG	01	起升电动机
008-01-11-03	831	力矩_JC25%	FG	01	起升电动机
008-01-11-04	55	功率_JC40%	FG	01	起升电动机
008-01-11-05	725	转速_JC40%	FG	01	起升电动机
008-01-11-06	724	力矩_JC40%	FG	01	起升电动机
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
008-05-12-01	28 500	上盖板长	SG	05	主梁
008-05-12-02	21 900	下盖板长	SG	05	主梁
008-05-12-03	500	盖板宽	SG	05	主梁
008-05-12-04	1 750	腹板高	SG	05	主梁
008-05-12-05	800	梯形端部高	SG	05	主梁
008-05-12-06	2 500	大加劲板间距	SG	05	主梁
008-05-12-07	625	小加劲板间距	SG	05	主梁
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
008-01-13-03	Rule016	功率过载校验	RG	01	起升电动机
008-05-13-01	Rule056	腹板高约束	RG	05	主梁
008-05-13-02	Rule057	盖板宽约束	RG	05	主梁
008-05-13-03	Rule058	剪应力校核	RG	05	主梁
008-05-13-04	Rule059	垂直刚度校核	RG	05	主梁
008-05-13-05	Rule060	水平弯矩约束	RG	05	主梁
008-05-13-06	Rule061	垂直弯矩约束	RG	05	主梁
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
008-05-14-02	V20161220	设计版本	GG	05	主梁

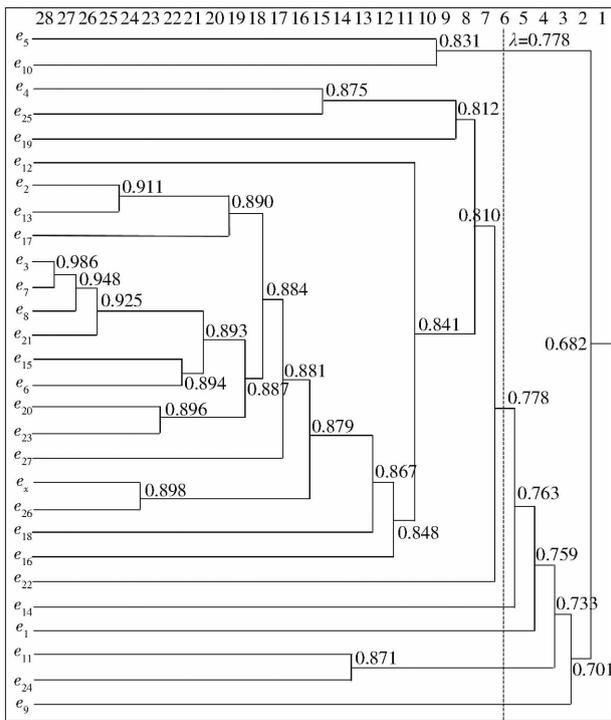


图 8 产品实例动态聚类图

Fig. 8 Instance dynamic clustering map of product cases

表 3 相似度计算结果

Tab. 3 Similarity calculation results

产品实例	相似度 $Sim(e_i, e_x)$	排序	产品实例	相似度 $Sim(e_i, e_x)$	排序
e_{26}	0.992 5	1	e_{22}	0.974 1	11
e_2	0.988 0	2	e_3	0.974 0	12
e_{13}	0.987 2	3	e_{21}	0.973 6	13
e_{17}	0.986 0	4	e_{18}	0.973 1	14
e_6	0.985 0	5	e_{20}	0.972 6	15
e_{15}	0.982 0	6	e_{23}	0.971 4	16
e_{12}	0.975 9	7	e_{16}	0.957 3	17
e_8	0.975 6	8	e_{19}	0.955 3	18
e_{27}	0.974 8	9	e_{25}	0.922 5	19
e_7	0.974 6	10	e_4	0.922 2	20

体候选队列 E_0 。

(5) 构造等位基因阈值矩阵。通过从阈值矩阵

	FG_1	FG_2	FG_3	FG_4	FG_5	FG_6	SG_1	SG_2	SG_3	SG_4	SG_5	SG_6	SG_7	RG_1	RG_2	RG_3	RG_4	RG_5	RG_6	RG_7	RG_8	RG_9	RG_{10}	RG_{11}	RG_{12}	RG_{13}
$V =$	6	6	4	6	6	4	3	3	3	2	2	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	6	0	0	0	0	6	6	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	6	0	6	6	0	3	3	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	0	0	1	2	1	1	2	1	1	1	1	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	2	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots																						
	0	0	0	0	0	0	4	4	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

22 × 26

为进一步检验上述方法的有效性,在桥式起重机产品进化系统中开展产品进化设计实验。实验实例库规模为 350,初始种群规模为 30,针对 20 次产

映射库中提取最大相似度的实例 e_{26} 的同规模阈值矩阵初始化 V 。起升电动机是桥式起重机需要配置选型的标准件,主梁是桥式起重机需要个性化设计的定制件,以这 2 个重要部件为例,说明阈值矩阵 V 中相应值的构造与校核。根据起重机设计规范,在选型设计时,起升电动机主要用到在中级 ($JC = 25\%$)、重级 ($JC = 40\%$) 工作制下的功率、转速和转矩等性能参数,相应的具有 8 个功能基因,是产品基因库承载最多 FG 的零部件;主梁具有上盖板长、下盖板长、盖板宽、腹板高、梯形端部高、大加劲板间距、小加劲板间距等 7 个基本的结构基因,同时承载了用于确定这些结构基因值和实施主梁刚度、强度、弯矩等校核的 13 个原理基因,是产品基因库中承载最多 SG 和 RG 的零部件。基于以上分析,结合表 2 提供的产品基因库,取 $k_1 = 6, k_2 = 7, k_3 = 13$;桥式起重机需要配置设计的零部件共有 22 个。因此,阈值矩阵的阶为 22×26 。当前产品基因库中有 28 种电动机型号,主梁规格参数需个性化定制,但待求种群规模仅为 10,因此两个部件等位基因阈值上限均为 10;对于不同实例的原理基因,基因值中输入变量的取值可以不同,但设计规范中的大多数公式是一样的,仅涉及少数的设计师个人经验公式会有差异,原理基因阈值总体上相对可设置低一些。在阈值矩阵 V 中“ $v_{[1][1]} \sim v_{[1][26]}$ ”和“ $v_{[5][1]} \sim v_{[5][26]}$ ”分别为起升电动机(构件编号 01)和主梁(构件编号 05)的所有等位基因阈值。

(6) 生成优势种群。根据多样化等位基因生成算法,当 $e_{NO} = 18$ 时,满足阈值矩阵条件,得到的优势种群 $E' = \{e_{26}, e_{13}, e_6, e_{12}, e_{27}, e_{20}, e_{16}, e_{25}, e_{15}, e_{23}\}$ 。将生成的 E' 在桥式起重机产品进化系统^[6]中开展选择、交叉和变异操作,进化出最优产品适应度为 76%。为方便说明问题,上述实例中待求规模被偏小设置,可以扩大 E' 种群规模,适当提高阈值,改进 E' 的优势度。

品设计任务,分别采用随机、相似实例(文献[4])和本文提出的在相似实例等距布种的基础上进行等位基因多样化阈值控制(以下简称基因多样化阈值控

制方法)这3种方法产生初始种群,开展以下两类测试实验:

进化效率测试实验:产品适应度达到85%认定为达标,在出现达标方案或进化代数已达500尚未出现达标方案的2种情形下均终止进化过程,统计每一次进化的迭代次数,实验结果如图9所示。

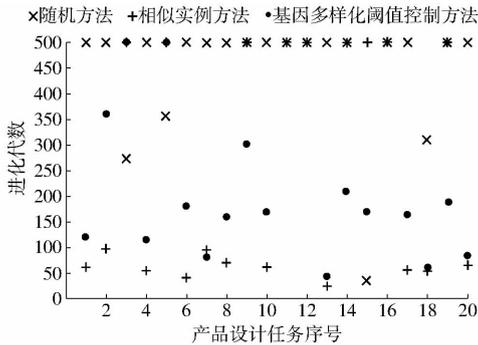


图9 不同初始种群产生方法下进化效率测试结果

Fig.9 Results of evolution efficiency test by different initial population generation methods

进化质量测试实验:不设定适应度达标阈值,当适应度达到100%或进化代数达到200时均终止进化过程,统计每一次进化的最优子代产品适应度,实验结果如图10所示。

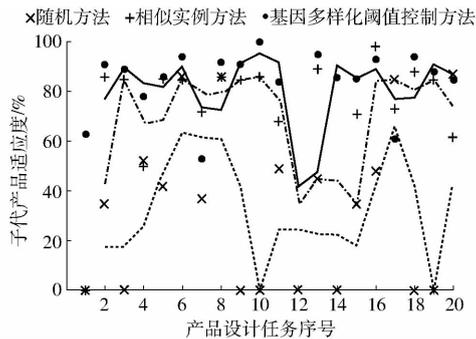


图10 不同初始种群产生方法下进化质量测试结果

Fig.10 Results of evolution quality test by different initial population generation methods

通过分析迭代次数(图9)可知,相似实例方法进化效率最高,基因多样化阈值控制方法次之,随机

方法最低,这与个性化定制产品从具有尽量相似需求的方案中去寻求目标解会加快求解效率的观点是一致的;通过分析子代产品适应度的趋势线(图10)可知,多样化阈值控制方法进化质量最高,相似实例方法次之,随机方法效率最低且不稳定,这说明了单纯使用相似实例来产生精英个体,会出现“早熟”现象,差异化个体队列和多样化基因阈值控制有助于避免过早收敛,得到适应度更高的目标解。在进化质量测试实验(2)中,若按适应度达到85%认定为进化成功,统计成功次数,则随机、相似实例和基因多样化阈值控制3种方法的成功率分别为20%、55%和70%,说明多样化阈值控制方法能提高产品进化成功率。

5 结论

(1)从宏观和微观2个层面分析了个性化定制产品优势种群的特征,提出精英个体定制需求相似性和种群基因多样性有助于提高定制产品进化设计初始种群的优势度,进化效率和进化质量是判断初始种群是否为优势种群的最重要依据。

(2)采用夹角余弦作为聚类统计量,提取了与待求产品具有相似定制基因组的历史实例;基于加权的闵科夫斯基距离,对相似实例组进行等距采样,形成差异化精英个体候选队列,有助于避免早熟收敛现象的发生。

(3)提出了等位基因阈值矩阵,采用杰卡德距离度量候选精英个体产品基因组与当前初始基因库两者间差异度,构建了多样化等位基因生成算法,并基于产品适应度评价反馈实现对初始种群优势度的改进。

(4)实验结果表明,在相似实例等距布种的基础上进行等位基因多样化阈值控制的优秀种群产生策略,能同时兼顾进化效率和进化质量,比较适合个性化定制产品的进化设计。

参 考 文 献

- 1 SALDANHA W H, SOARES G L, MACHADO-COELHO T M, et al. Choosing the best evolutionary algorithm to optimize the multiobjective shell-and-tube heat exchanger design problem using PROMETHEE [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127(1): 1049 - 1061.
- 2 GOTMARE A, BHATTACHARJEE S S, PATIDAR R, et al. Swarm and evolutionary computing algorithms for system identification and filter design: a comprehensive review [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2017, 32(1): 68 - 84.
- 3 付培红,李峰平,周宏明,等.基于系统动力学的产品进化机制研究[J/OL].农业机械学报,2012,43(6):195 - 201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20120635&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.06.035.
- 4 FU Peihong, LI Fengping, ZHOU Hongming, et al. Product evolutionary mechanism based on system dynamics [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 195 - 201. (in Chinese)
- 4 包志炎,计时鸣,阮曙峰.基于蜂群进化机制的产品配置技术研究[J/OL].农业机械学报,2014,45(1):328 - 334,340. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140150&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.

- 2014.01.050.
BAO Zhiyan,JI Shiming,RUAN Shufeng. Product configuration technology based on swarm evolutionary mechanism [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(1):328-334,340. (in Chinese)
- 5 吴金妹,王亚辉,贾晨辉. 基于正交设计模型的多目标进化算法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):362-369,392. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170249&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.049.
WU Jinmei,WANG Yahui,JIA Chenhui. Multi-objective evolutionary algorithm based on orthogonal designing model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):362-369,392. (in Chinese)
- 6 包志炎. 定制产品进化设计原理与方法研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2012.
BAO Zhiyan. Research on principle and method of evolutionary design oriented to customization products [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology,2012. (in Chinese)
- 7 PARMEE I C. Evolutionary and adaptive computing in engineering design [M]. London, UK: Springer, 2001: 59-202.
- 8 胡建军,吴晓云. 基因表达式编程中的优势种群产生策略[J]. 小型微型计算机系统,2009,30(8):1660-1662.
HU Jianjun,WU Xiaoyun. The strategy for diversifying initial population of gene expression programming [J]. Journal of Chinese Computer Systems,2009,30(8):1660-1662. (in Chinese)
- 9 王亚辉,吴金妹,贾晨辉. 基于反向学习模型的多目标进化算法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(4):326-332,342. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160443&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.043.
WANG Yahui,WU Jinmei,JIA Chenhui. Multi-objective evolutionary algorithm based on opposition-based learning model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):326-332,342. (in Chinese)
- 10 SHAO Weishi, PI Dechang,SHAO Zhongshi. A hybrid discrete optimization algorithm based on teaching-probabilistic learning mechanism for no-wait flow shop scheduling [J]. Knowledge Based System,2016,107(1):219-234.
- 11 张其亮,俞祚明. 基于优势种群的离散果蝇优化算法求解无等待流水车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(3):609-615.
ZHANG Qiliang,YU Zuoming. Discrete fruit fly optimization algorithm based on dominant population for solving no-wait flow shop scheduling problem [J]. Computer Integrated Manufacturing System,2017,23(3):609-615. (in Chinese)
- 12 杜修力,崔冬,侯本伟. 基于初始种群改进策略的经验遗传-单纯形算法[J]. 北京工业大学学报,2014,40(12):1876-1883.
DU Xiuli,CUI Dong,HOU Benwei. Initial population improvement strategy of empirical genetic-simplex algorithm [J]. Journal of Beijing University of Technology,2014,40(12):1876-1883. (in Chinese)
- 13 DAI C, LEI X. An improvement decomposition-based multi-objective evolutionary algorithm with uniform design [J]. Knowledge-Based Systems,2017, 125(1):108-115.
- 14 胡建军,唐常杰,段磊,等. 基因表达式编程初始种群的多样化策略[J]. 计算机学报,2007, 30(2):305-310.
HU Jianjun,TANG Changjie,DUAN Lei,et al. The strategy for diversifying initial population of gene expression programming [J]. Chinese Journal of Computers,2007, 30(2):305-310. (in Chinese)
- 15 何大阔,王福利,贾明兴. 遗传算法初始种群与操作参数的均匀设计[J]. 东北大学学报:自然科学版,2005,26(9):828-831.
HE Dakuo, WANG Fuli, JIA Mingxing. Uniform design of initial population and operational parameters of genetic algorithm [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science,2005,26(9):828-831. (in Chinese)
- 16 BRUNOE T D,NIELSEN K. Complexity management in mass customization SMEs [J]. Procedia CIRP,2016,51(1):38-43.
- 17 MAZILU T,TARARA A. A review of transition to mass customization in manufacturing environment [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015,760(4):428-443.
- 18 WANG Pengjia,GONG Yadong,XIE Hualong, et al. Applying CBR to machine tool product configuration design oriented to customer requirements [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2017,30(1):60-76.
- 19 赵秀艳,宋正河,张开兴,等. 基于多属性决策的农机专业底盘实例推理方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(2):370-377. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170250&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.050.
ZHAO Xiuyan,SONG Zhenghe,ZHANG Kaixing, et al. Evaluation method of agricultural machinery professional chassis cases based on multiple attributes decision [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):370-377. (in Chinese)
- 20 肖刚,包志炎,高飞,等. 基于相似实例的板构件产品配置方法[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(2):233-238,286.
XIAO Gang, BAO Zhiyan, GAO Fei, et al. Configuration method of slab products based on similar instance [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2010,16(2):233-238,286. (in Chinese)
- 21 李希强,王笛,陆舍铭,等. 夹角余弦与欧式距离相结合建立烟用香精 HPLC 指纹图谱[J]. 香料香精化妆品,2007(6):26-30.
LI Xiqiang,WANG Di,LU Sheming,et al. Study on application of the HPLC chromatographic fingerprint in quality control tobacco flavor with euclidean distance and included angle cosine [J]. Flavor Fragrance Cosmetic, 2007(6):26-30. (in Chinese)