

基于蜂群进化机制的产品配置技术研究^{*}

包志炎¹ 计时鸣² 阮曙峰³

(1. 浙江水利水电专科学校机电工程系, 杭州 310018; 2. 浙江工业大学机械工程学院, 杭州 310032;
3. 浙江众擎起重机械制造有限公司, 诸暨 311800)

摘要: 分析了蜂群进化机制给产品配置带来的启示,提出了基于蜂群进化机制的产品配置模型;采用新定制产品与历史实例的需求相似度评价实现选择算子,确定蜂王和雄蜂;通过构件遍历实现交叉算子,完成蜂王和雄蜂的构件继承;提出了约束有向图的概念,探讨了基于约束有向图拓扑排序算法的变异算子,解决定制件的差异性配置问题;通过构造评价基元,实现对产品配置结果的适应度评价。以桥式起重机产品配置为例,证明了所提方法的有效性和先进性。

关键词: 大批量定制 个性化产品 产品配置 蜂群进化 约束有向图

中图分类号: TH122; N945.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)01-0328-07

引言

大批量定制(Mass customization, MC)是一种面向 21 世纪的主流生产模式,它能够以大批量生产的效率和成本实现对个性化产品的设计和生产^[1]。产品配置是大批量定制的核心技术之一,通过合理配置可以实现客户个性化需求的快速响应,提高产品设计效率,进而提升企业的市场综合竞争力。

从产品配置思想的提出^[2],到产品配置系统的出现^[3],再到产品配置技术日益与大批量定制相结合^[4-5],国内外学者重点对产品配置的配置本体、配置建模、配置问题求解、配置产品知识的表达等方面^[4]进行了大量的研究。归纳起来,目前产品配置主要有基于规则(rule-based)^[4,6-10]和基于资源(resource-based)^[6,11-16]两类方法。基于规则的方法逻辑表达直观、简单,便于建模和推理,适合非标产品的配置,但是规则一致性检验和设计知识维护比较困难,对设计师依赖性相对较高^[3];基于资源的方法直接利用已有产品资源,对设计专家依赖性较弱,自动化程度比较高,但如何有效识别和充分利用已有产品资源有待深入研究,如何满足非标产品中客户的个性化需求也是其面临的关键问题之一。针对上述两类产品配置方法中存在的问题,本文引入生物进化思想,模拟生物进化过程,通过构造选择算子、交叉算子和变异算子,充分利用已有产品实例,合理安排规则作用顺序,提出一种仿生的基于蜂

群进化机制的产品配置方法。

1 蜂群进化机制及启示

蜜蜂是一种社会群居性的昆虫,蜂群由蜂王、雄蜂和工蜂组成。蜂王由受精卵发育而来,个体最大,职能是产卵繁殖后代,一个蜂群中只允许存在一只蜂王;雄蜂由不受精的卵发育而成,职能是与蜂王交尾;工蜂由受精卵发育而来,个体最小,无生殖能力。蜂王性成熟后,出巢飞舞,一群雄蜂追随其后,体弱的雄蜂相继掉落地面,最强壮的一只雄蜂获得与蜂王交配机会产生子代;生存环境的变迁会引起子代基因的变异,使其更加适应当前的生存环境。为了避免近亲繁殖,蜂王有时会寻找其他蜂群中的雄蜂交尾。

蜂群进化机制的优越性集中体现在:通过一系列的繁殖进化行为,基于现有的蜂群成员,将蜂群中的优质基因遗传给后代,使后代生存能力更强。在产品配置领域,可借鉴蜂群进化思想,基于现有的产品实例,建立相应的配置方法,快速配置出满足客户需求的产品。通过类比,表 1 给出了蜂群进化给产品配置带来的启示。在产品配置过程中,本文将作为蜂王和雄蜂的产品实例简称为蜂王和雄蜂。

2 基于蜂群进化机制的产品配置模型及关键技术

根据蜂群进化机制,产品实例库是产品配置的

收稿日期: 2012-12-25 修回日期: 2013-01-31
^{*} 国家自然科学基金资助项目(50705087)和浙江省重大科技专项资助项目(2009C11164)
作者简介: 包志炎, 讲师, 博士, 主要从事机械 CAD、制造业信息化研究, E-mail: baozhy0571@163.com

表 1 蜂群进化给产品配置的启示

Tab.1 Comparison between swarm evolution and product configuration

序号	蜂群进化行为	产品配置启示
1	生存能力最强的蜂王对繁殖过程起到主导作用	与新定制产品需求最相似的以往实例作为蜂王,并在此基础上开始配置
2	强壮的雄蜂通过竞争获得交配机会,实现基因遗传	选择一些有借鉴价值的产品实例作为雄蜂,参与配置
3	弱小的雄蜂不参与繁殖	仅部分产品实例参与配置
4	蜂王会寻找其他蜂群,吸取其优质基因	引进其他企业的同类产品作为雄蜂,参与蜂王交配
5	蜂王与雄蜂,通过交配行为,产生子代	蜂王与雄蜂产品,通过若干配置操作,产生子代产品
6	适合生存环境的蜜蜂得以生存	适合市场环境(客户需求)的产品会得到畅销

源材料,客户需求是产品配置的驱动力和约束条件,产品配置器是产品配置的核心,产品配置结果是否满足客户需求需要评价。基于以上分析,提出基于蜂群进化机制的产品配置模型,如图 1 所示,主要流程是:根据选择算子,从当前产品实例库中产生初始种群(蜂王和雄蜂交配池);然后,根据交叉算子,蜂

王与雄蜂通过构件交叉互换产生中间产品;中间产品在变异算子的作用下得到子代产品;运用适应度评价,对子代产品是否满足要求进行评价;根据评价结果,决定是否继续从交配池中选择另一只雄蜂,与产生的子代产品进行新一轮的进化配置,当适应度评价结果通过时,产品配置过程结束。

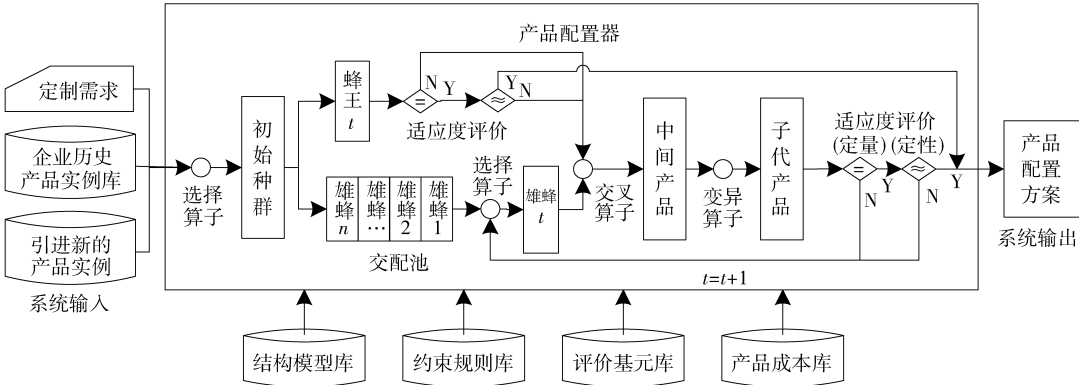


图 1 基于蜂群进化机制的产品配置模型

Fig. 1 Product configuration model based on swarm evolutionary mechanism

2.1 基于相似评价的选择算子

在蜂群进化机制中,雄蜂只有通过竞争才能得到交配的机会。在产品配置时,以往产品实例也同样需要通过竞争才能获得参与配置的机会。产品配置的首要工作就是按一定选择策略,产生作为蜂王和雄蜂的产品实例。本文提出将产品实例库中与新定制产品需求最相似的实例作为蜂王,同时将大于预先设定的相似度阈值的实例作为雄蜂,所有的雄蜂构成雄蜂交配池。具体算法如下(设产品实例库中共有 n 个实例, m 个定制参数,以往产品实例与新定制产品分别标记为 e_i 和 e_x):

(1) 需求相似度计算

从产品实例库中提取各实例的定制参数值,构造历史需求矩阵 M 和客户新定制产品需求向量 V

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$V = [v_{x1} \quad v_{x2} \quad \cdots \quad v_{xm}] \tag{2}$$

由于不同属性的量纲具有不同的含意,其值也有很大差别,因此在进行相似度计算时可能会有很大偏差,为了消除这种偏差,首先将 M 归一化

$$M' = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} & \cdots & a'_{1m} \\ a'_{21} & a'_{22} & \cdots & a'_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a'_{n1} & a'_{n2} & \cdots & a'_{nm} \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中

$$a'_{ij} = \frac{|v_{xj} - a_{ij}|}{\sum_{j=1}^m (v_{xj} - a_{ij})}$$

$(i = 1, 2, \cdots, n; j = 1, 2, \cdots, m)$

基于欧几里德贴近度,计算新定制产品实例与历史实例的需求相似度

$$s_{xi} = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j^2 (a'_{ij})^2} \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \tag{4}$$

式中: w_j 为第 j 个参数的权重,定制参数权重向量: $w = [w_1 \quad w_2 \quad \cdots \quad w_m]$; s_{xi} 为 e_i 和 e_x 的需求相似度。

(2) 需求相似度排序

根据需求相似度大小,对产品实例库中的以往

实例进行降序排列

$$\{e_1, e_2, \dots, e_n \mid s_{1x} > s_{2x} > \dots > s_{nx}\} \tag{5}$$

(3) 选择蜂王和雄蜂

令需求最相似的产品实例为蜂王 $e_q, e_q \in \{e_q \mid s_{xq} = \max\{s_{xi}\}\}$, 并设定相似度阈值为 $s_\Delta = \Delta$, 求雄蜂 e_p

$$e_p \in \{e_p \mid s_{xp} \geq s_\Delta, e_p \neq e_q\} \tag{6}$$

由式(5)可得蜂王 e_q 和交配池 $\{e_p\}$ 为

$$e_q = e_1 \tag{7}$$

$$\{e_p\} = \{e_2, e_3, \dots, e_i \mid s_{xi} \geq \Delta, s_{x(i+1)} < \Delta\} \tag{8}$$

2.2 基于构件遍历的交叉算子

在自然界,染色体的交叉互换是生物进化繁殖的原始独有特征,它将原有的基因遗传给下一代个体。在产品配置中,通过对蜂王与雄蜂在指定位置执行交叉操作,产生两个子代中间产品,其中以蜂王为主体的子代得以保留,以雄蜂为主体的子代予以丢弃,这样可以使蜂王不符合要求的部分不断得到替换,不断向满足要求的目标产品进化。

产品结构树被广泛用于描述产品结构,能很好地反映产品、零部件间的层次关系。本文将产品结构中的零件、部件统称为构件,在此基础上提出交叉算子(设产品结构树共含有 n 个构件):

(1) 构造构件序列:选择树的一种遍历方式(前序、中序或后序),对产品结构树中的构件进行编号,形成构件序列,记为: $C = \{c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n\}$ 。

(2) 构造交叉序列:构造一个二进制交叉序列 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_i, \dots, b_n \mid b_i \in \{0, 1\}\}$, b_i 按以下规则取值:建立 C 与 B 的映射关系,对蜂王实例进行产品适应度评价(详见 2.4 节),对评价不通过的构件 c_i 对应的 b_i 取值为“1”,否则 b_i 取值为“0”。

(3) 执行交叉操作:遍历产品结构树,按 b_i 值“1 则交叉,0 则不交叉”的规则,对蜂王、雄蜂实例相应构件 c_i 进行交叉,产生两个中间产品,并以蜂王为主体的中间产品给予保留。

图 2 给出某产品 P 的两个实例:蜂王 P_1 和雄蜂 P_2 。采用前序遍历 $C = \{a_1, a_4, a_5, a_6, a_2, a_3, a_7, a_8\}$, 交叉序列 $B = \{0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1\}$, 则交叉后的中间产品为 P'_1 (保留)和 P'_2 (丢弃)。

需要指出,在设置交叉点时,为了保证交叉操作的有效性,当某构件的所有子构件被设置为交叉点时,该构件本身将被设置成非交叉点;当某构件被设置成交叉点时,该构件所包含的子构件将被设置成非交叉点,具体可用程序控制实现。

2.3 基于约束规则的变异算子

因执行交叉操作得到的中间产品包含的全部是

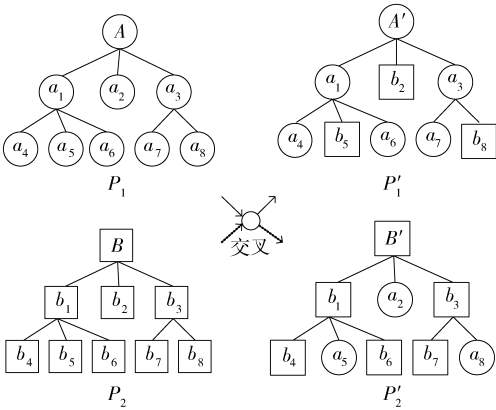


图 2 交叉算子示例

Fig. 2 Crossover operator case

以往实例的构件,通常情况下还是不能满足客户的个性化需求,这时需要通过变异算子来完成可定制构件的差异性配置。

变异操作的实质是通过构造约束规则,让构件的各项属性值达到设计要求,基本思想是:将产品设计中经常使用的设计规律和知识表达为约束规则(简称约束),组建约束规则库(Constraint rule library, CRL);在执行变异操作时,从 CRL 中选择或新建立约束,让约束在不同的输入(定制参数)下生成不同的构件属性值,让中间产品继续向满足要求的目标产品进化。

2.3.1 约束类型

按取值方式来分,约束可以分为定值约束和区间约束,前者将被约束的属性变量限定于某具体值,后者将被约束的属性变量限定于某区间。按被约束的属性来源不同,约束可细分为以下 5 种类型:

(1) 需求约束。产品定制参数受客户需求约束,如颜色、功率、功能等。

(2) 原理约束。构件属性受产品设计规律和知识约束,如以力学和数学为基础的设计计算公式。

(3) 装配约束。构件装配时存在的约束,如两构件装配间距、角度等。

(4) 数量约束。某构件数量受其他构件的约束,如:当一个零件的长度大于 8 cm 时,需要使用 4 个螺丝钉进行紧固;若小于 8 cm 时,使用 2 个螺丝钉。

(5) 共进约束。构件选型时存在约束关系,如选 A 零件时,不得选 B 零件或者必须选 B 零件。

2.3.2 约束表达

约束采用“IF (Condition) THEN (Result)”的方式来构造,同时结合“+”、“-”、“×”、“/”等算术运算符,“>”、“<”、“=”、“≤”、“≥”等关系运算符以及“and”、“or”等逻辑运算符,对“Condition”进行逻辑组合,表达简单,操作方便。

2.3.3 约束遍历算法

在执行约束规则时,有时会出现某规则中自变量可能是另一规则中的因变量,那么,这两条规则作用是有顺序的,为此,本文提出约束有向图(Constraint directed graph, CDG):以构件属性变量为结点,以约束规则中自变量指向因变量的方向为边的方向,以约束规则编号为边的内容,并用虚拟结点“S”、“O”作为开始和结束,以此构成的有向图,称为约束有向图。

CDG 图能直观地反映各构件承载的约束规则中变量的相互约束关系。在图论中,在某个集合上的一个偏序得到该集合上的一个全序,这个操作称为拓扑排序。那么,CDG 进行拓扑排序时边的输出顺序即为约束规则的作用顺序,具体算法如下:①删除起点和终点为同一结点的边,并输出这些边的内容。②任取一个入度为 0 的结点,并输出以该结点为起点的边的内容。③删除该结点以及以它为起点的边。④转步骤②,直至全部结点及边被删除。

下面给出一种基于堆栈的算法实现:

```
1  Status TopologicalSort( CDG_Graph Gc)
2  {
3      FindInDegree( Gc, indegree ); // 各结点求入度
4      InitStack( S ); // 建立入度为 0 的堆栈 S
5      For( j = 0; j < Gc. Vexnum; ++j)
6          If( ! indegree[ j ] ) Push( S, j );
7      Count = 0;
8      While( ! StackEmpty( s ) )
9      {
10         Pop( S, j );
11         // 输出遍历到的约束规则编号
12         Cout << Gc. Vex [ j ]. ConstraintRuleId
13             + ++count;
14         For( p = Gc. Vex [ j ]. firstArc; p; p = p->nextArc)
15         {
16             k = p->adjVex;
17             // 对邻接点入度减 1, 为 0 则入栈
18             if( ! ( --indegree[ k ] ) ) Push( S, k );
19         }
20     }
21 }
```

在上述算法中,ConstraintRuleId 为约束规则编号,S 为堆栈。为了避免重复检测入度为 0 的结点,用堆栈 S 暂存所有入度为 0 的结点(第 4 行);删除结点及以它为起点的边转化为结点的入度减 1 来实现(第 18 行)。

图 3 是产品 P 的属性变量标识,表 2 是为产品 P 建立的约束规则库,则由此可得其约束有向图如图 4 所示。根据 CDG 图拓扑排序算法,可得到约束规则作用顺序(不唯一):R01,R05,R08,R02,R06,R03,R09,R07,R04。图 5 为约束在不同的输入(定制参数)下变异生成的不同子代产品。

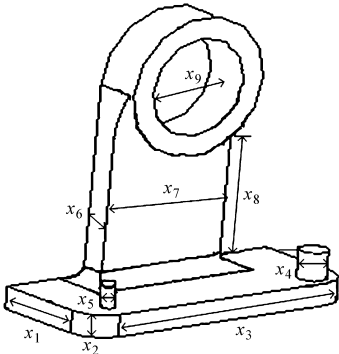


图 3 产品 P 结构参数标识

Fig. 3 Structure parameter identification of product P

表 2 产品 P 约束规则库

Tab. 2 Constraint rule library of product P

R_No	R_Value	
	IF	THEN
R01	Ture	$x_3 \in [30, 60]$
R02	$(x_1 < 10) \text{ or } (x_1 \geq 30)$	$x_4 = x_1 / 4$
R03	Ture	$x_4 = x_7 / 8$
R04	Ture	$x_5 = x_4 / 2$
R05	Ture	$x_7 \in [10, x_3]$
R06	Ture	$x_6 = x_2$
R07	$x_7 \leq 25$	$x_8 \in [x_7, 200]$
R08	$x_3 \geq 45$	$x_8 \in [15, 80]$

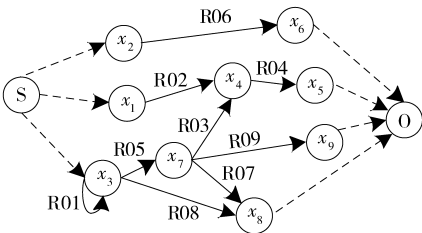


图 4 产品 P 约束有向图

Fig. 4 Constraint directed graph of product P

2.4 基于评价基元的产品适应度计算

通过变异得到的子代产品,需要进行产品适应度评价。适应度大小反映了子代产品满足要求的程度,是判断是否需要进入下一轮进化配置的判断依据。

2.4.1 指标体系

适应度通过适应函数计算得到,要构造有效的适应函数,首先需要建立合理的评价指标体系。客户主要关心产品级的功能性需求,因此需要建立功能性评价指标;企业最关心的是产品成本、能否达到利润最大化,因此需要建立经济性评价指标;为达到

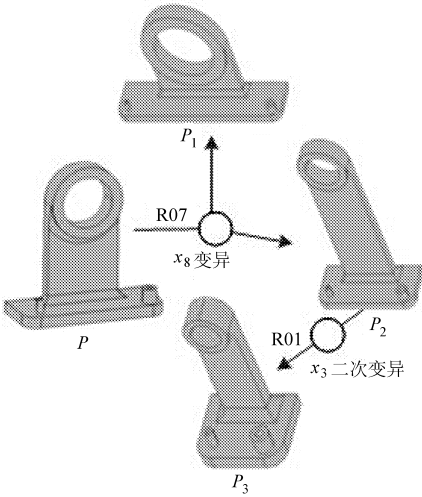


图5 产品 P 基于约束规则的变异示例

Fig. 5 Mutation case of product P based on constraint rules

各项功能性和经济性指标,设计师对构件进行选型,对型号、尺寸、装配进行详细设计,同时还要进行安全性校核,因此还需要建立结构性评价指标。综合客户、设计师、企业三者关注的不同角度,建立产品适应度评价指标体系如图6所示。

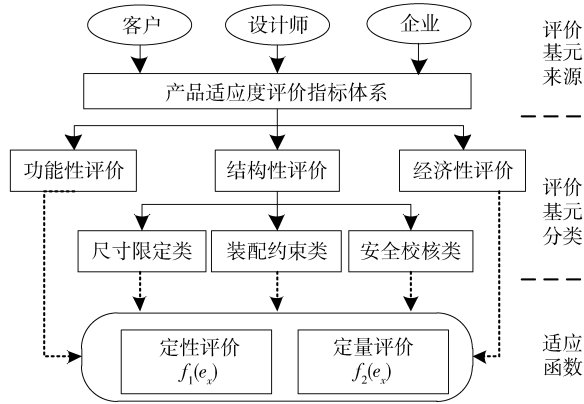


图6 产品适应度评价指标体系

Fig. 6 Index system of product fitness evaluation

2.4.2 评价基元

评价基元 (Estimated element) 是对产品某方面特征进行评价的最小逻辑单元。

根据指标体系,评价基元分为功能性评价基元、结构性评价基元和经济性评价基元。每一个评价基元具有 I 类、II 类值域,分别用于定性评价和定量评价。定性评价用于评价某产品该指标是否达到最低要求,用适应函数 $f_1(e_x)$ 求值;定量评价用于评价某产品该指标满足要求的程度,用适应函数 $f_2(e_x)$ 求值。表3列举出了部分评价基元示例。

在表3中, I 类值域采用 $\{0,1\}$ 表达 $\{$ “达到要求”,“未达到要求” $\}$; II 类值域采用 $\{0,1,2\}$ 或 $\{0,1,2,3\}$ 来分别表达评价基元对应指标满足要求的程度: $\{$ “不满足”,“一般”,“较好” $\}$ 或 $\{$ “不满足”,“一般”,“较好”,“很好” $\}$ 。

表3 产品适应度评价指标示例

Tab.3 Cases of product fitness evaluation index

评价类别	评价对象	评价基元	评价基元值域	
			I 类	II 类
功能性评价	效率	x_1	$\{0,1\}$	$\{0,1,2\}$
尺寸限定类	长度	x_2	$\{0,1\}$	$\{0,1\}$
装配约束类	间距	x_3	$\{0,1\}$	$\{0,1,2\}$
安全校核类	强度	x_4	$\{0,1\}$	$\{0,1,2,3\}$
经济性评价	成本	x_5	$\{0,1\}$	$\{0,1,2,3\}$

2.4.3 适应函数

每个评价基元均有自己的取值,产品整体适应度就是它承载的所有评价基元值的总和。定性评价采用评价基元 I 类值域,其适应函数值域为 $\{0,1\}$; 定量评价采用评价基元 II 类值域,其适应函数值域为 $\{0,100\%$ $\}$,具体计算方法为(设产品实例 e_x 共承载 n 个评价基元 x_i)

$$f_1(e_x) = \text{int} \left(\sum_{i=1}^n f_i(x_i) / n \right)$$

(9)

$$f_2(e_x) = \frac{\sum_{i=1}^n f_i(x_i)}{\sum_{i=1}^n \max f_i(x_i)} \times 100\%$$

(10)

式(9)使用了取整函数,式(10)中 $\max f_i(x_i)$ 为评价基元 x_i 值域上限, $f_i(x_i)$ 是评价基元 x_i 的适应函数,建立 $f_i(x_i)$ 的示例如下:

钢丝绳是起吊设备的重要构件之一。为确保安全,钢丝绳的最小破断拉力 F_0 必须大于理论上可能承受的最大拉力 $F_{\max}$,但如果大很多,成本也随之增加。现以钢丝绳的最小破断拉力为评价基元 x 为例,建立其适应函数。

建立 x 的评价指标。 I 类值域采用 $\{0,1\}$ 表达 $\{$ “满足要求”,“不满足要求” $\}$; II 类值域可以用 $\{0,1,2\}$ 表达 $\{$ “不满足”,“一般”,“较好” $\}$ 。

建立 x 的适应函数

$$f_1(x) = \begin{cases} 1 & (F_0 > F_{\max}) \\ 0 & (F_0 \leq F_{\max}) \end{cases}$$

(11)

$$f_2(x) = \begin{cases} 0 & (F_{\Delta} \leq 0) \\ 1 & (F_{\Delta} \leq a \text{ 或 } F_{\Delta} \geq b) \\ 2 & (a < F_{\Delta} < b) \end{cases}$$

(12)

式中, $F_{\Delta} = (F_0 - F_{\max}) / F_{\max}$, F_0 可根据钢丝绳型号查询得到, $F_{\max}$ 可根据起吊设备的定制参数求得, a 、 b 为常数,为技术人员提供的设计经验值。

显然,在运用适应函数进行产品适应度评价时,一方面要求定性评价 $f_1(e_x)$ 的值为1,另一方面要求定量评价 $f_2(e_x)$ 的值尽量高。

3 应用实例

桥式起重机是横架于车间、仓库和料场上空进行物料吊运的起重设备,是目前使用范围最广、数量最多的一种起重机械。用户定制时企业提供的起重量和跨度等需求参数会直接影响产品设计方案,属于典型的个性化定制产品。笔者根据本文提出的产品配置技术,开发了桥式起重机产品进化配置系统。系统由产品基础数据管理、产品配置设计和产品适应度评价 3 个功能模块组成,如图 7 所示。

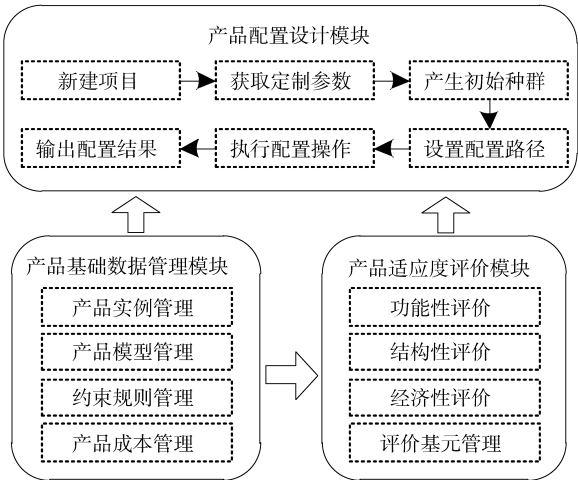


图 7 桥式起重机产品进化配置系统功能模块图
Fig. 7 Function modules of bridge crane evolutionary configuration system

系统提供了两种配置模式:智能配置模式和专家干预模式。智能配置模式,在采集定制参数后,系统会自动执行一系列的配置操作并输出配置结果,具有简单方便、配置效率高等特点;专家干预模式,允许设计师在配置的主要环节进行手动干预,根据设计经验,使配置过程更加有针对性和有效性,其主要步骤包括新建项目、获取定制参数、产生初始种群、设置配置路径、执行配置操作、输出配置结果。系统以产品物料清单(Bill of material, BOM)的形式输出配置结果。

假设客户新定制的桥式起重机产品需求为起重重量 25 t,跨度 23 m,起升高度 10 m,大车运行速度 76.2 m/min,小车运行速度 45.8 m/min,起升速度 7.3 m/min,工作级别为 M5。运用本系统在专家干预模式下进行产品配置。

新定制产品需求向量: $V = [25.00 \quad 23.00 \quad 10.00 \quad 76.20 \quad 45.80 \quad 7.30 \quad 5.00]$,定制参数权重: $w = [0.42 \quad 0.18 \quad 0.10 \quad 0.06 \quad 0.06 \quad 0.10 \quad 0.08]$ 。设当前产品实例库中共有 16 个以往实例,其需求信息如表 4。

根据 2.1 节的选择算子求得各以往产品与客户

新定制产品的需求相似度大小,如表 5。

表 4 桥式起重机产品实例库
Tab. 4 Product case library of bridge crane

产品实例	起重 量/t	跨度 /m	起升 高度/m	运行速度 /m·min ⁻¹		起升 速度 /m·min ⁻¹	工作 级别
				大车	小车		
e ₀₁	5.00	31.50	8.00	12.70	18.20	29.60	5.00
e ₀₂	2.00	18.55	9.00	30.00	20.00	8.00	5.00
e ₀₃	25.00	29.80	12.00	76.30	44.60	6.00	5.00
e ₀₄	25.00	28.50	9.00	59.10	37.60	7.10	5.00
e ₀₅	10.00	34.00	12.00	8.50	45.60	71.60	5.00
e ₀₆	16.00	16.50	10.00	75.50	44.60	8.00	5.00
e ₀₇	16.00	22.50	9.00	75.00	44.00	9.60	5.00
e ₀₈	20.00	22.50	9.00	75.00	44.00	7.20	6.00
e ₀₉	16.00	22.50	9.00	78.30	48.60	7.20	5.00
e ₁₀	20.00	22.50	12.00	86.90	44.60	9.30	6.00
e ₁₁	20.00	23.50	12.00	75.00	44.50	7.20	6.00
e ₁₂	10.00	13.50	9.00	69.70	44.30	10.40	5.00
e ₁₃	10.00	22.50	9.00	69.70	44.30	10.40	6.00
e ₁₄	32.00	22.50	12.00	59.10	38.70	12.30	6.00
e ₁₅	16.00	31.50	12.00	18.80	20.20	35.30	5.00
e ₁₆	20.00	22.50	9.00	76.30	44.60	7.20	6.00

表 5 以往产品与新定制产品的需求相似度
Tab. 5 Requirement similarity between history case and new customized product

产品实例	相似度 s_{xi}	产品实例	相似度 s_{xi}
e ₀₁	0.971 5	e ₀₉	0.990 1
e ₀₂	0.973 6	e ₁₀	0.991 1
e ₀₃	0.991 0	e ₁₁	0.991 2
e ₀₄	0.992 6	e ₁₂	0.979 8
e ₀₅	0.957 2	e ₁₃	0.982 5
e ₀₆	0.987 4	e ₁₄	0.989 1
e ₀₇	0.990 0	e ₁₅	0.977 1
e ₀₈	0.991 6	e ₁₆	0.991 6

因 $\max(s_{xi}) = 0.992\ 6$,则蜂王 $e_q = e_4$;令相似度阈值 $s_{\Delta} = 0.989\ 1$,可求得雄蜂交配池: $\{e_p\} = \{e_{16}, e_8, e_{11}, e_{10}, e_{03}, e_{09}, e_{07}, e_{14}\}$ 。因限于论文篇幅,交叉算子、变异算子及适应度计算的过程分别参见 2.2、2.3 和 2.4 节相应的实例,图 8 给出了系统配置结



图 8 桥式起重机产品进化配置系统应用示例
Fig. 8 Application case of bridge crane evolutionary configuration system

果页面。

浙江某起重机厂在使用本系统进行产品配置设计后,技术人员从传统繁琐的产品设计工作中解脱出来,有效地提高了企业产品的配置设计效率。

4 结 束 语

产品实例库中包含了以往成功的配置案例,是设计人员知识和经验的体现。基于蜂群进化机制的产品配置方法,通过选择和交叉操作,有效识别和利

用已有资源,将与新定制产品需求相似的以往实例的构件继承至配置方案,直接重用先前成功的知识和经验,能较少地依赖设计师,避开传统繁琐的配置过程,减轻设计人员的工作量;通过提出约束有向图,解决了规则作用顺序问题,建立的变异算子可以实现非标产品中可定制构件的差异性配置,本策略与方法在浙江某起重机厂的桥式起重机产品配置中已得到有效应用。

参 考 文 献

1 Lau R, Ronald S M. Mass customization;the next industrial revolution[J]. Industrial Management,1995,37(5):18~19.

2 Freeman P,Newell A. A model for functional reasoning in design[C]. Proceedings of the 2nd International Joint Conference on Artificial Intelligence. London,U K;British Computer Society,1971:621~633.

3 Mcdermott J. R1: A rule-basedconfigure of computer systems [J]. Artificial Intelligence,1982,19(1):39~88.

4 任彬,张树有,伊国栋. 基于模糊多属性决策的复杂产品配置方法[J]. 机械工程学报,2010,46(19):108~116.

Ren Bin, Zhang Shuyou, Yi Guodong. Configuration design of complex products based on fuzzy multi-attribute decision-making [J]. Journal of Mechanical Engineering,2010,46(19):108~116. (in Chinese)

5 Hwai E T,Chien C C, Shu H C. An applying case-based reasoning for product configuration in mass customization environment [J]. Expert Systems with Applications,2005,29(2):913~925.

6 Zeng F S, Jin Y. Study on product configuration based on product model [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2007,33(7):766~771.

7 Chen Zhaoxun, Wang Liya. Adaptive product configuration system based on neuralnetwork[J]. International Journal of Production Research,2009,47(18):5 037~5 066.

8 楼健人,张树有,谭建荣,等. 面向 DFMC 的产品配置设计技术研究[J]. 中国机械工程,2004,15(1):42~49.

Lou Jianren,Zhang Shuyou,Tan Jianrong,et al. Study on product configuration in design for mass customization (DFMC) [J]. 2004,15(1):42~49. (in Chinese)

9 徐剑,裴乐森,张树有. 知识反馈的递进式产品配置设计技术[J]. 计算机集成制造系统,2011,17(6):1 135~1 143.

Xu Jian, Qiu Lemiao, Zhang Shuyou. Progressive product configuration design technology based on knowledge feedback [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2011,17(6):1 135~1 143. (in Chinese)

10 郭传龙,裴乐森,张树有,等. 基于耦合强度设计结构矩阵的复杂产品配置模型优化及应用[J]. 计算机集成制造系统,2012,18(4):673~683.

Guo Chuanlong, Qiu Lemiao,Zhang Shuyou,et al. Optimization and application for complex product configuration model based on coupling intensity design structure matrix [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012,18(4):673~683. (in Chinese)

11 Borwn D C. Defining configuring artificial inteligent for engineering design[J]. Analysis and Manufacturing, 1998, 12(4):301~306.

12 Camduff T W, Goonetillake J S. Configuration management in evolutionary engineering design using versioning and integrity constraints[J]. Advances in Engineering Software,2004,47(35):161~177.

13 谭建荣,齐峰,张树有,等. 基于模糊客户需求信息的设计检索技术的研究[J]. 机械工程学报,2005,41(4):79~84.

Tan Jianrong, Qi Feng,Zhang Shuyou,et al. Research on technology of design retrieval based on fuzzy customer requirement [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2005,41(4):79~84. (in Chinese)

14 扈静,刘明周,葛茂根,等. 面向客户定制需求的机械产品选配方法[J]. 农业机械学报,2008,39(10):152~157,163.

Hu Jing,Liu Mingzhou, Ge Maogen,et al. Parts-selection method of mechanical products based on customer customization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2008,39(10):152~157,163. (in Chinese)

15 张树有,王彦超,裴乐森. 面向订单产品配置设计的非标结构单元层次转化技术[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(9):1 809~1 815.

Zhang Shuyou,Wang Yanchao, Qiu Lemiao. Transformation of non-standard structure units for order configuration design [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2010,16(9):1 809~1 815. (in Chinese)

16 范志君,姜兆亮,李智. 基于性能满意度的产品配置与变型设计范围界定算法[J]. 农业机械学报,2012,43(8):198~204.

Fan Zhijun, Jiang Zhaoliang, Li Zhi. Product configuration and variant design's scope definition algorithm based on customers' performance satisfaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(8):198~204. (in Chinese)

15 Dong Y, Lin R J T, Bhattacharyya D. Finite element simulation on thermoforming acrylic sheets using dynamic explicit method [J]. *Polymers & Polymer Composites*, 2006, 14(3):307 ~ 328.

16 Azdast T, Doniavi A, Ahmadi S R, et al. Numerical and experimental analysis of wall thickness variation of a hemispherical PMMA sheet in thermoforming process [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 64(1 ~ 4): 113 ~ 122.

17 Mooney M. A theory of large elastic deformation[J]. *Journal of Applied Physics*, 1940, 11(9): 582 ~ 592.

Numerical Simulation and Accuracy Analysis of Multi-point Thermoforming of Polycarbonate Sheet

Cao Junhui¹ Fu Wenzhi¹ Li Mingzhe¹ Liu Chunguo¹ Su Shizhong^{1,2} Pham D T²
(1. Dieless Forming Technology Center, Jilin University, Changchun 130025, China
2. Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, Cardiff CF23 3AA, U. K.)

Abstract: A new flexible forming technique for thermoplastic polymer: multi-point thermoforming (MPTF) was developed. Polycarbonate (PC) is a typical thermoplastic polymer exhibiting many properties ideally. The material parameters of PC according to Mooney – Rivlin hyperelastic constitutive model were determined based on the high temperature tensile test data. The commercial software Abaqus was utilized to simulate the MPTF process of PC sheet. A series of numerical simulation results show that the best combination of forming temperature and forming pressure for PC sheet are 160℃ and 10 kPa, respectively. MPTF experiments were carried out under the processing parameters which were determined by numerical simulations and the simulation results were validated by comparing them with the experimental results. The spherical and saddle-shape parts formed by MPTF were measured using a 3D sensing system and the measured data were compared with the target shape to analysis the accuracy of MPTF. The comparison results show that the formed parts have good accuracy.

Key words: Multi-point thermoforming Flexible forming Polycarbonate Numerical simulation Forming accuracy

(上接第 334 页)

Product Configuration Technology Based on Swarm Evolutionary Mechanism

Bao Zhiyan¹ Ji Shiming² Ruan Shufeng³
(1. Department of Mechanical and Electronic Engineering, Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College, Hangzhou 310018, China
2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China
3. Zhejiang Zhongqing Lifting Machinery Co., Ltd., Zhuji 311800, China)

Abstract: The characteristics of swarm evolutionary mechanism were analyzed, and a corresponding product configuration model was proposed. In order to select appropriate queen and male bees, a selection operator was established via similarity evaluation technique. A crossover operator was established to inherit useful components through components traversal, and a mutation operator was also established so as to configure individualized components based on the topological sort algorithm of constraint directed graph. The method of fitness evaluation was put forward by using estimated elements. The strategy and method were effective in an instance of the product called bridge crane.

Key words: Mass customization Individualized products Product configuration Swarm evolutionary Constraint directed graph