

# 基于协同交互式遗传算法的复杂产品概念设计

宋东明 朱耀琴 吴慧中

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

**摘要** 针对复杂产品概念设计中的方案求解问题,建立了基于进化思想的求解过程模型,提出了一种新的基于协同进化算法与交互式遗传算法相结合的复杂产品概念设计方法。针对手机概念设计中功能设计的特点提出了变长度编码和两层编码的混合编码方式。实例表明,该方法对多目标、人机交互的复杂产品概念设计方案求解是有效的。

**关键词** 概念设计,协同进化,交互式遗传算法,多目标优化,人机结合

**中图分类号** TP391.72 **文献标识码** A

## Applying a Hybrid Approach Based on Cooperative Co-evolution and Interactive Genetic Algorithm to Complex Product Conceptual Design

SONG Dong-ming ZHU Yao-qin WU Hui-zhong

(School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** A scheme solving process model of complex product conceptual design based evolution idea was instructed, a new hybrid approach based on cooperative co-evolution and interactive genetic algorithm was proposed. According to the characteristics of function design of cell phone conceptual design, a hybrid coding approach based on Messy coding technique and two-row chromosome structure was proposed. A case study was carried out to demonstrate its utilization and efficiency to conceptual design of complex product involving of multi-objective and human-computer cooperation.

**Keywords** Conceptual design, Cooperative co-evolution, Interactive genetic algorithm, Multi-objective optimization, Human-computer cooperation

### 1 引言

概念设计是产品设计中一项关键的早期活动,涉及到产品概念的产生以及对概念进行评估等<sup>[1]</sup>。广义的产品概念设计包含了从产品的需求分析到详细设计之前的设计过程,包括功能设计、原理设计、形状设计、布局设计和初步的结构设计<sup>[2]</sup>等。产品的概念设计最终要通过概念的生成和选择形成产品的设计方案,这是概念设计的一个核心任务,需要全面考虑各种约束条件和设计目标。特别是对于复杂产品的概念设计,设计人员经常遇到需要使得多个目标在给定可行区域内尽可能最优的问题。例如在设计一种新型产品时,既要考虑使用性能,又要考虑制造成本,还要考虑产品的可制造性、可靠性和可维修性等。这些设计目标的改善可能互相抵触,必须在这些设计目标之间折衷和平衡,这种多个目标在给定区域上的最优化问题称之为多目标优化问题<sup>[3]</sup>。这一类问题通常解空间维数很大,组合出的方案数众多,难以对方案逐一评价并获得最优方案解。

近年来,国内外学者大量采用进化算法解决复杂产品的概念设计问题。文献<sup>[4]</sup>研究了基于遗传算法的方案智能优化设计方法,通过所建立的功能元素知识库,利用遗传算法完成方案解的“生成-评价-进化”的迭代,最后得到最优方案解

和一些较优解。针对建筑创新性概念设计问题,有学者提出了基于多目标遗传算法<sup>[5]</sup>以及进一步改进的动态小生境微粒群优化技术<sup>[2,6]</sup>等。另外,在产品外形、产品布局等产品概念设计方面也有大量进化计算的应用。实际的产品概念设计过程中,设计对象越复杂,设计的目标与约束条件就越多,涉及到人的主观因素也就越多。在评价方案时,不但要依据各种有明确函数表示的显式性能指标,而且需要综合考虑各种涉及到人的主观因素的隐式性能指标。例如,在手机产品的功能设计中,产品成本是显式的性能指标,而设计者对产品性能的满意程度则是隐式的性能指标,难以用明确的函数表示。因此,对复杂产品进行概念设计不但要考虑多目标优化的问题,还要考虑设计过程中人的主观评价。

针对以上问题,本文基于协同进化算法和交互式遗传算法提出了一种新的复杂产品概念设计方法。利用协同进化算法的多个种群协同合作,实现复杂产品概念设计中多目标方案的生成。在方案的评价过程中,通过交互式遗传算法根据参与者的评价直接获得隐式性能指标问题的适应度值,将设计人员的偏好、直觉、经验等主观因素和创造性知识融合到方案的生成过程中,实现人机的紧密结合。通过手机产品的功能设计证明,该方法对同时涉及到多目标、人机交互的复杂产品概念设计问题具有较高的求解效率。

到稿日期:2008-07-16 返修日期:2008-11-17

宋东明(1976-),男,博士研究生,研究方向为系统集成、智能决策和系统仿真,E-mail:moment\_ming@hotmail.com;朱耀琴(1977-),女,研究方向为项目管理、虚拟样机;吴慧中(1942-),博士生导师,研究方向为虚拟现实、系统仿真、图像建模与处理等。

## 2 复杂产品概念设计中的多目标优化

复杂产品的概念设计过程中,产品性能和成本之间的权衡是一个多目标优化问题。一般地讲,多目标优化问题可以定义为

$$\begin{aligned} \text{Max } f_m(X) \quad m=1,2,3,\dots,M \\ g_j(X) \geq 0 \quad j=1,2,\dots,J \\ \text{sb. } h_k(X) = 0 \quad k=1,2,\dots,K \\ x_i^l \leq x_i \leq x_i^U \quad i=1,2,\dots,D \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $X$ 是由 $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 决定的 $n$ 维决策变量, $x_i^l$ 和 $x_i^U$ 为决策空间的边界, $g_j$ 和 $h_k$ 为不等式和等式约束函数, $f_m$ 为第 $m$ 个性能指标(目标函数)。

解决多目标优化问题常用的方法是将各目标进行线性加权,并将多目标优化问题转化为单目标优化问题。这种方法的缺点是经常面临着权系数的合理选择问题,在物理意义不明确的情况下各目标很难用同一尺度衡量。采用群体搜索的进化算法是近年来兴起的一种求解多目标优化问题的有效方法。由于进化算法具有本质上并行、不要求导或其他辅助知识、一次运行产生多个解和简单易于实现等优点,被视为求解多目标优化问题的有效方法。

合作式协同进化(Cooperative Co-Evolution)是由 Hillis<sup>[7]</sup>提出并经 M. A. Potter 和 K. De Jong 发展成一般的协同进化模型<sup>[8,9]</sup>。将协同进化概念引入到多目标优化中,是最近几年出现的一种方法。De Jong 协同进化算法的基本框架如下<sup>[7,10]</sup>:

(1)生成初始种群集 $\{Pop_i(0) | 1 \leq i \leq S\}$ , $S$ 为子种群个数。

(2)根据协作关系计算各子种群 $Pop_i$ 中个体 $x_j^i$ 的适应值或合作能力 $fitness(x_j^i, Pop)$ ( $1 \leq i \leq S, 1 \leq j \leq S_i, S_i$ 为子种群 $Pop_i$ 的群体规模)。

(3)采取合适的策略,提取各种群的典型个体。如果满足终止条件,转到步骤5,否则转到步骤4。

(4)对各子种群 $Pop_i$ 采用对应的进化算法,执行进化操作,形成下一代种群 $Pop_i(t+1)$ ( $t$ 为当前进化代数), $t=t+1$ ,转到步骤2。

(5)输出算法的最好结果 $x = \{x_{j_1}^1, x_{j_2}^2, \dots, x_{j_s}^s\}$ ,其中 $x = \{x_{j_1}^1, x_{j_2}^2, \dots, x_{j_s}^s\}$ 表示从各子种群 $Pop_i$ 中各选一个个体 $x_{j_i}^i$ 所组成的问题的完整解。

协同进化方法也是近年来产品概念设计方面的研究热点之一。M. L. Maher 和 J. Poon 最早提出了一种“Z”字形的协同进化模型<sup>[11]</sup>来形象地描述设计空间与解空间之间随时间演变的相互作用。文献<sup>[12]</sup>提出了一种分层的协同进化方法以支持概念设计,基于一系列规则对高层的功能进行分解并通过进化的计算过程实现功能与方案之间的映射。本文基于以上思想,针对复杂产品概念设计的特点,提出了设计方案生成的协同进化方法,利用算法的多个种群协同进化,实现概念设计方案的智能生成和多目标优化。

应用协同进化方法求解问题时,子种群中个体适应值的计算方法是必须考虑到一个重要问题。在遗传算法的操作中,适应度值的选取往往采用目标函数值性能指标,但在实际的复杂产品概念设计这类多目标优化问题中经常为包括多个目标函数值的混合性能指标优化问题<sup>[13]</sup>。如手机产品功能

设计问题中,手机功能的新颖性和功能组合满足用户需求的程度是隐式性能指标,而手机生产的成本是显式性能指标。这些含有混合性能指标的优化问题在人们的经济活动、工业生产和社会生活中是普遍存在的。

含有 $n$ 个决策变量,同时含有 $i$ 个显式性能指标(目标函数)、 $j$ 个隐式性能指标和 $m$ 个约束条件的优化问题称为混合性能指标优化问题。在复杂产品概念设计中,含有混合性能指标的多目标优化问题可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\text{Max } f(X) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) + \dots + a_S f_S(x) \quad (2)$$

其中, $a_i \in (0,1), i=1,2,3,\dots,S$ 为产品设计人员对 $f_i(x)$ 的偏好,一般地,有 $\sum_{i=1}^S a_i = 1$ 。

对这一类问题的求解通常需要采用交互式进化优化的方法求解。20世纪90年代中期发展起来的交互式遗传算法拓展了传统的遗传算法,把人的评价结果作为进化个体的适应值参与进化过程,以代替难以(或无法)显式表示的适应度函数。它除了具有传统进化算法的搜索能力强等优点外,还具备与决策者交互的机制,通过将人的偏好、直觉、经验等定性的知识结合到目标系统中,使得参与者在对问题的目标并不十分明确或完整的情况下,通过与系统的不断交互获得所需的求解方案或解。

## 3 复杂产品概念设计的求解过程

产品概念设计方案的生成和选择是一个反复进行的过程,特别是对于复杂产品,由于其结构复杂,子系统之间往往存在着大量的耦合关系,造成了方案的不断变动。另外,设计者的认知水平也是不断变化的,因此概念的设计过程应该视为一个设计问题和解通过相互作用实现共同进化的过程<sup>[8]</sup>。

本文建立了如图1所示的复杂产品概念设计方案求解过程模型,对产品概念设计过程中从功能元素到最优方案的生成和选择这一关键过程进行交互式协同进化算法的操作,实现方案优化设计过程的算法化和智能化。

在协同进化过程中,进化种群的个数根据复杂产品功能结构中的子功能数目而定。对于每一个子功能使用一个子种群,每个子种群代表复杂产品各子功能的一个可能的方案解,问题的完整解由各种群的个体组合生成。根据具体的应用背景,实现不同子功能的功能元素的编码方式可能并不相同。各子种群在整个搜索空间上分别独立进化,只在评价适应度的时候才与别的子种群发生联系。

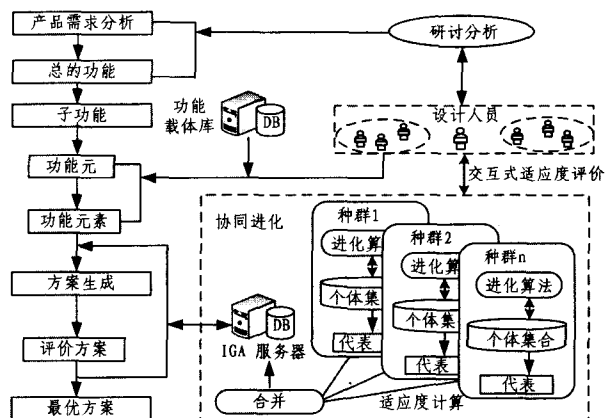


图1 复杂产品概念设计方案的求解过程

复杂产品概念设计的进化过程不但是进化种群的交互过程,也是人-机结合的过程。在评价方案的阶段,通过交互式遗传算法,设计人员或专家将人的经验与智慧间接地、多次地注入到系统之中,以引导系统进化的方向并做出基于人的偏好的方案排序。

协同交互式遗传算法的一般步骤如下。

步骤 1 确定算法涉及的功能元素及参数,编码、初始化进化种群;

步骤 2 对每个进化子种群  $X_s(t), s=1, 2, \dots, S$ , 计算、评价进化个体对显式和隐式性能指标的满足程度,产生各种群的初始代表;

步骤 3 对子种群  $X_s(t)$  进行选择、交叉和变异操作,生成进化种群  $X_s(t+1)$ ;

步骤 4 进化子种群  $X_s(t+1)$  的个体与各子种群  $X_s(t)$  的代表个体合作,进行个体迁移,产生整个种群的进化个体;

步骤 5 计算、评价进化个体对显式和隐式性能指标的满足程度,保存最优个体并产生进化种群的代表;

步骤 6 判断算法的全局搜索阶段是否终止,若终止,转步骤 6, 否则转步骤 3;

步骤 7 输出满意解,算法结束。

算法的流程图如图 2 所示。

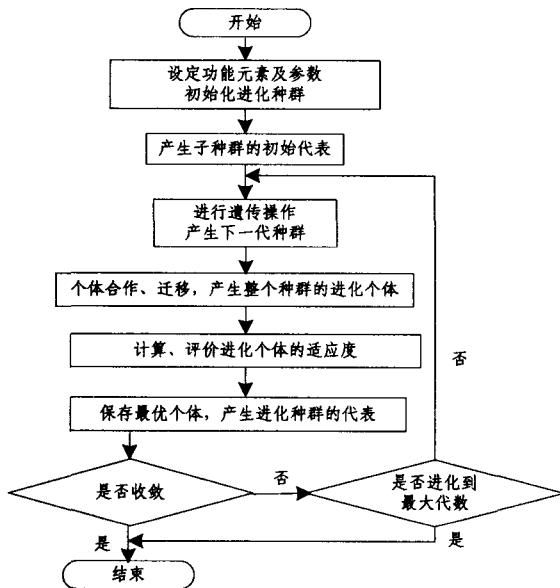


图 2 协同交互式遗传算法流程图

#### 4 算法中的编码问题

在实际应用中,不同的应用背景需要不同的编码方法,如何将问题的解转换为编码表达的染色体,是遗传算法的关键问题。本文中的手机产品功能设计的编码具有组合优化的特点,类似于“背包问题”,即染色体中的基因构成一个可行的背包,背包中的项目数不固定,染色体的长度可变,而且染色体中项目的顺序没有意义。如表 1 所列,手机的基本功能被分解为 6 大子功能,其中每一功能都包含有相应的功能元素。在进行功能方案的设计时,根据产品需求和目标函数(性能指标)的要求,每一子功能下所包括的功能元素数目并不固定。例如,一款实用型的手机,可能需要部分的商务功能,如日程表、电子书等,但并不需要 office 办公软件,也不需要娱乐功

能中的摄像头、音乐播放器等。但对于一款高端的商务型手机,则可能需要配置大部分的功能。因此,组成手机功能方案解空间的编码长度是不固定的。另外,诸如蓝牙、数据线、内存等影响着手机价格,这一主要性能指标的功能元素本身包含着不同的价格参数,具有层次化的特征。本文针对手机概念设计中功能设计的这些特点提出了变长度编码(Messy Coding)与两层编码相结合的编码方法,这种编码方式更适用于手机功能设计中功能元素数目不固定和元素含有参数情况下的编码。

表 1 手机的功能组成

功能	功能元素					
	1	2	3	...	19	
基本功能	中文短信	彩信	通讯录群组	...	录音	闹钟
商务功能	大容量电话簿	Office 办公软件	货币换算	...	日程表	
娱乐功能	摄像头	音乐播放器	FM 收音机	视频播放器	游戏	
网络功能	WAP 浏览器	WWW 浏览器	电子邮件			
传输功能	GPS	蓝牙	数据线	红外	无线 Modem	
其它功能	扩展卡	电池	CPU	操作系统	内存	

变长度编码遗传算法<sup>[14]</sup>(Messy Coding Genetic Algorithm, MGA)的思想是将常规遗传算法中染色体编码串各基因位置及相应的基因值组成一个二元组,把这些二元组按一定次序排列起来,就组成了变长度染色体的编码,其一般形式描述为  $X^m = (i_1, v_1) \dots (i_k, v_k) \dots (i_N, v_N)$ , 其中,  $i_k$  为基因位置编号,  $v_k$  为对应基因值。

本文采用 MGA 的思想对手机的功能元素进行了编码。首先将手机的功能及功能元素用整数加以标识,基本功能、商务功能、娱乐功能、网络功能、传输功能和其它功能用 [ ] 内的整数 1~6 表示,每项功能对应的几个功能特征元素同样用整数依次在 ( ) 内表示。一个功能方案中功能元素的选择就可以由两个级联的二元组表示,如 < > 中所示,第 1 位为变量,第 2 位为对应的值。手机功能元素的基因描述如图 3 所示。

基本功能={彩信, 中文短信, ..., 录音功能, 闹钟功能} [1] (1) (2) (3) ... (18) (19)	商务功能={大容量电话簿, 办公软件, ..., 日程表} [2] (1) (2) (3) ... (14) (15)
娱乐功能={摄像头, 音乐播放器, ..., 游戏}, ... [3] (1) (2) (3) (4) (5) ...	其它功能={扩展卡, 电池, ..., 内存} [6] (1) (2) (3) (4) (5) (6)
< [1], (2) > → 基本功能中的中文短信	< [2], (14) > → 商务功能中的电子书
< [3], (3) > → 娱乐功能中的 FM 收音机	< [6], (1) > → 其它功能中的扩展卡

图 3 手机功能元素的基因描述

根据手机的功能需求,某一款手机部分功能方案的染色体编码为

{(1,1), (1,2), (1,3) ..., (1,16), (2,1), (2,2), (2,10), ..., (6,1), (6,5)}

这种编码方式形成了一条染色体“路径”,每条路径上的节点不重复且个数可变,即染色体的长度是可变的。这种长度可变的染色体实现了对不同子功能含有不同功能元素这一要求进行表达和遗传操作的灵活性。

变长度染色体遗传算法种群之间的交叉操作不再使用常规遗传算法交叉操作,而是通过切断算子和拼结算子形成各种可能的染色体。详细的操作方法可以参考文献[15,16]。

对于含有参数数据的功能元素,为了能同时进化功能元

素与参数,采用两层编码的染色体结构<sup>[17]</sup>来描述,其中功能元素基因串在上层,参数基因串在下层。功能元素基因串中的每一基因均与一参数基因串相联系,采用实数表示。图4所示为蓝牙耳机这一功能元素的两层表达。

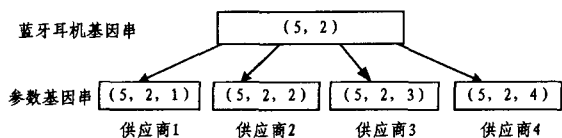


图4 功能元素的两层编码结构

根据不同产品的需求,产品的概念方案包含有不同的功能元素。由于本文所考虑的手机功能的定量约束主要为产品价格,所以参数基因串中只给出了决定产品价格的供应商,每个供应商对应着不同功能元素的价格。手机产品部分功能元素的参数如表2所列。

表2 部分功能元素的参数

	供应商1	供应商2	供应商3	供应商4
蓝牙耳机	230	299	529	385
数据线	58	139	100	66
手机耳机	80	159	170	98
闪存扩展卡(2G)	200	130	370	260
电子地图(旅行者测速版)	249	249	249	249

## 5 应用实例

目前,采用多目标进化算法求解复杂产品概念设计多目标优化问题的研究十分有限,本文以手机概念设计为例对这一问题进行研究。由于篇幅所限,本实例重点论述手机概念设计中的功能设计并以产品的商务需求为背景。设计目标为设计成本最低、功能配置最优,即  $\text{Max}\{f_1, 1/f_2\}$ , 其中  $f_1$  为功能配置,  $f_2$  为成本价格。

本文采用多群体并行协同进化方式对设计方案进行进化,设计方案的个体对应着基本功能、商务功能、传输功能等6个子功能的不同组合。设定的子群体分别为基本功能、商务功能、娱乐功能、网络功能、传输功能和其它功能等6个进化子群体。各子群体均采用本文设计的编码方式。每个子群体进化设计的一个功能特征,最后整合各子群体的优秀个体编码从而构成整个设计方案的染色体编码。

以上协同进化方法的数学模型可以表示为

$$\begin{cases} X_1 = \{x_1^1, x_2^1, \dots, x_{s_1}^1\} \\ X_2 = \{x_1^2, x_2^2, \dots, x_{s_2}^2\} \\ \vdots \\ X_S = \{x_1^S, x_2^S, \dots, x_{s_S}^S\} \end{cases} \quad (3)$$

其中,设计方案的染色体编码  $X = X_1 \cup X_2 \cup \dots \cup X_S$ ,  $S$  为子种群个数,  $S_i$  为子种群的群体规模。各子群体的优秀个体编码构成的设计方案为  $x = \{x_1^j, x_2^j, \dots, x_{s_j}^j\}, 1 \leq j \leq S$ 。

为了在满足功能需求的基础上尽量保证设计成本最低,文中采用混合性能指标评价的方法。可体现手机性能的功能特征,比如短信、电话簿、电子书等软件功能为隐式的性能指标;对于实现相应功能的硬件,例如摄像头、内存、蓝牙等影响价格的功能元素则为显式的性能指标。隐式的性能指标通过设计人员的交互式评价来获得满意度,以百分制表示。设计人员通过交互式人机界面对不同手机功能的组合方案进行选择 and 打分。软件记录每一个组合方案中参数被选中的次数,

根据记录的数据形成参数的权重。打分的过程是通过很满意、较满意、一般、较差、差等定性的评价选择实现的,分别对应100,80,50,30,10的分数。显式的性能参数通过函数计算直接得到。则手机功能方案每个子种群中进化个体的适应值计算公式为

$$F(x_j(t)) = a_1 \cdot \frac{f_1(x_j(t))}{100} + a_2 \cdot f_2(x_j(t)) \quad (4)$$

其中,  $f_1$  为隐式的性能指标,  $f_2$  为显式的性能指标,  $a_1$  和  $a_2$  表示设计人员对性能指标的重视程度,一般地,有  $1 = a_1 + a_2$ 。

初始种群数目  $N$  取6,最大进化代数  $T$  为20代,交叉概率  $P_c$  为0.8,变异概率  $P_m$  为0.05。选择算子和变异算子与常规遗传算法相同,采用比例选择、单点交叉和基本位变异的方法执行遗传操作,由设计工程师指定隐形性能指标的适应度值,产生如图5所示的设计方案染色体编码结构。

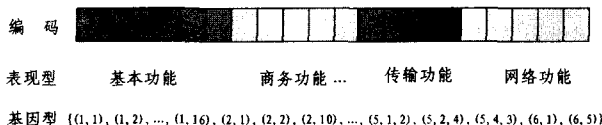


图5 手机功能概念设计方案的染色体结构

在系统实现过程中,系统自动生成规模为6的初始种群,解码后供设计人员评价不同的功能组合,同时系统自动评价决定手机价格的功能元素。按照式(5)计算子种群进化个体(子方案)的适应度,并依据该适应值进行遗传操作。本文采用了人工选择与精英保留技术相结合的方式,随着系统的运行逐渐减少人机交互,以减轻人的疲劳和尽快实现结果的收敛。

设计人员通过系统人机交互界面对某项功能元素进行打分评价的同时,也对某项功能元素的偏好进行投票选择。图6所示为设计人员对部分功能元素的支持和重视程度,共同形成式(5)中的权重  $a_1$  和  $a_2$ 。某商务手机产品的功能方案的隐性功能元素的部分配置如表3所列,其 Pareto 优化解如表4所列。

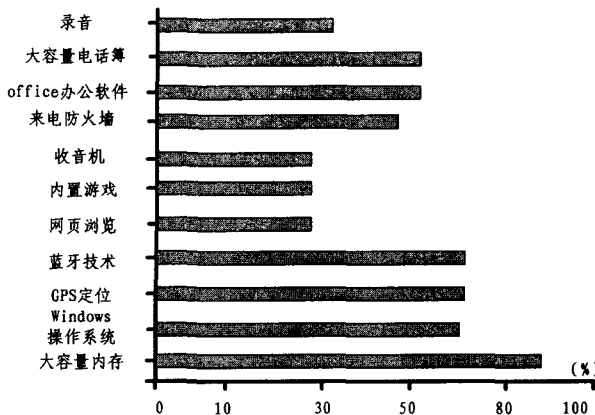


图6 设计人员的投票支持率

表3 部分功能及元素配置

隐性功能	功能元素配置						
基本功能	短信	时钟	内置震动	免提通话	语音拨号	内置天线	PDA功能
商务功能	日程表	Office软件	备忘录	记事本	计算器	货币换算	日历

铃声	64 和弦	支持 MP3 铃声	支持 MIDI	支持 AAC
信息功能	SMS 短信	EMS 短信	MMS 短信	
E-mail	POP3	IMAP4	SMTP	
输入法	T9 中文	T9 英文	中文	

表 4 手机功能设计的 Pareto 优化解

功能元素	方案 1	方案 2	方案 3
主观评定	好	较好	优
蓝牙耳机	230	529	385
数据线	58	139	100
手机耳机	80	159	170
内存扩展卡	130	200	260
电子地图	249	249	249

**结束语** 概念设计中经常存在着多目标的需求和显性、隐性相混合的性能指标。针对这一问题,本文将协同进化算法和交互式遗传算法应用到手机概念设计方案求解中。协同进化算法可在较大范围内搜索解空间,并能以较快的收敛速度提供解空间内分布均匀的 Pareto 最优解集。利用交互式遗传算法提供的对隐性性能指标的定性评价较好地解决了复杂产品概念设计中的人机结合问题,为概念设计中的方案求解带来了新的思路。本文提出的方法也同样适用于产品概念设计中的布局设计、外形设计等。

### 参 考 文 献

[1] Pahl G, Beitz W. Engineering, Design-A Systematic Approach [J]. Springer, 1996

[2] 刘希玉,王文平,刘弘,等. 动态小生境微粒群优化技术在概念设计中的应用[J]. 计算机科学, 2006, 33(10): 163-168, 209

[3] 崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2006

[4] 黄洪钟,赵正佳,等. 基于遗传算法的方案智能优化设计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(5): 437-441

[5] 吴子燕,张智,胡秦. 基于多目标遗传算法的高层建筑概念设计优化[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 10: 120-124

[6] Liu Xiyu, Liu Hong, Duan Huichuan. Particle swarm optimization based on dynamic niche technology with applications to conceptual design [J]. Advances in Engineering Software, 2007, 38: 668-676

[7] Hillis W D. Co-evolving parasites improve simulated evolution as an optimization procedure [D]. Physica D, 1990, 42: 228-234

[8] Potter M A, De Jong K A. A Cooperative Coevolutionary Approach to Function Optimization[C]// Proceeding of the Third Parallel Problem Solving from Nature. Springer-Verlag, 1994: 249-257

[9] Potter M A, De Jong K A. Cooperative Coevolution: An Architecture for Evolving Coadapted Subcomponents [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(1): 1-29

[10] 刘建成,蒋新华,吴今培. 广义模糊模型的协同进化方法研究[J]. 计算机学报, 2006, 29(3): 423-430

[11] 肖人彬,刘勇,梅顺齐,等. 基于多粒度共进化功能推理的机械运动方案设计新方法[J]. 机械工程学报, 2005, 41(12): 108-117

[12] Jin Y, Li W, Lu S C-Y. A Hierarchical Co-evolutionary Approach to Conceptual Design [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54(1): 155-158

[13] 巩敦卫,郝国生,周勇,等. 交互式遗传算法原理及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2007

[14] Goldberg D E, Korb B, Deb K. Messy genetic algorithms: motivation, analysis, and first results [J]. Complex Systems, 1989, 3: 493-530

[15] 张文志,吕恬生. 基于改进的遗传算法和模糊逻辑控制的移动机器人导航[J]. 机器人, 2003, 25(1): 1-6

[16] Van Veldhuizen D A, Lamont G B. Multiobjective Optimization with Messy Genetic Algorithms[C]// Proceedings of the 2000 ACM Symposium on Applied Computing. Como, Italy, 2000

[17] Walters G A, Halhal D, et al. Improved design of "Anytown" distribution network using structured messy genetic algorithms [J]. Urban Water, 1999, 1: 23-38

(上接第 156 页)

[2] Gruber T R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications[R]. Knowledge System Laboratory KSL 92-71. 1993

[3] Kashyap V. Design and Creation of Ontologies for Environmental Information Retrieval[C]// Proc. Workshop on Knowledge Acquisition, Modeling and Management. Alberta Canada, 1999

[4] Stojanovic L, Stojanovic N, Volz R. Migrating Data - Intensive Web Sites into the Semantic Web[C]// Proc. ACM Symposium on Applied Computing. Madrid Spain, 2002

[5] Astrova I. Reverse Engineering of Relational Database to Ontologies[C]// Proc. European Semantic Web Conference. Heraklion, Greece, 2004

[6] An Y, Borgida A, Mylopoulos J. Inferring Complex Semantic Mappings between Relational Tables and Ontologies from Simple Correspondences[C]// Proc. OTM Confederated International Conferences CoopIS, DOA, and ODBASE. Agia Napa, Cyprus, 2005

[7] An Y, Borgida A, Mylopoulos J. Refining Semantic Mappings from Relational Tables to Ontologies[C]// Proc. Semantic Web and Databases. Toronto, Canada, 2004

[8] 许卓明,王琦. 一种从关系数据库学习 OWL 本体的方法[J]. 河海大学学报, 2006, 34(2): 208-211

[9] 许卓明,董逸生,陆阳. 从 ER 模式到 OWL DL 本体的语义保持的翻译[J]. 计算机学报, 2006, 29(10): 1786-1796

[10] 赵荣娟,王丹. 一种从关系数据库提取本体的方法[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(增刊): 116-118

[11] 曹泽文,张维明,邓苏,等. 一种从关系数据库向 Flogis 本体转换的方法[J]. 计算机科学, 2007, 34(4): 149-153

[12] Bechhofer S, van Harmelen F, Hendler J. OWL Web Ontology Language Reference[R]. <http://www.w3.org/TR/owl-ref/>, 2004

[13] OWL API[OL]. <http://owlapi.sourceforge.net/index.html>

[14] Pellet[OL]. <http://pellet.owldl.com>