

# 基于交互式遗传算法模型的群体论证方法

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] 针对综合集成研讨厅进行复杂决策问题研讨时, 群体专家提出的众多定性意见最终如何实现收敛的问题, 提出了基于交互式遗传算法模型的群体论证方法, 使专家的群体思维与计算机技术紧密结合, 达成共识。实践证明, 该方法可以较好地获得复杂决策问题的优化解, 且更符合实际的研讨论证过程。

[关键词] 综合集成研讨厅; 复杂决策问题; 交互式遗传算法; 性能指标论证

[中图分类号] N94; TP18 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)11-0064-06

## 1 前言

复杂决策问题的求解方法与一般的决策问题求解不同, 首先在于所处理的问题大多是开放的复杂巨系统<sup>[1]</sup>问题, 如国民经济发展预测这样的社会经济系统问题, 军事对阵和现代作战模拟的军事系统问题以及涉及生态学、环境保护以及区域规划的地理系统问题等。这一类复杂性问题的结构都是极其不良的, 这种结构不良包括3个方面: 初始状态不明确, 目标状态不明确和操作不明确<sup>[2]</sup>。即整个问题的结构不清晰, 内容模糊; 问题的求解目标多样或尚无明确的求解方案; 通过现有的知识基础无法直接提供完整的解题操作, 需要协调、综合多学科的专家利用领域性的经验和知识对问题进行定性的分析和探索性的求解。在这种情况下, 我国科学家钱学森等人提出的“人机结合, 以人为本”的从定性到定量的综合集成方法论(metasyntesis)和根据这一方法论建立的综合集成研讨厅体系<sup>[3]</sup>(hall for workshop of metasyntetic engineering, HWME)已经被证明是处理这类问题的一种有效手段<sup>[4]</sup>。

笔者所研究的复杂产品的性能指标论证问题是一类复杂的决策问题。领域专家需要通过综合集成研讨厅将复杂产品的系统功能及其结构具体化, 并通过分析以各种可以度量的参数作出规定, 即形成

性能指标。性能指标可以反映产品的性质、功能、技术水平, 也界定了产品的方案论证和方案技术设计的思考范围。在开放的复杂巨系统问题范畴下, 复杂产品的性能指标论证问题具有目标状态不明确、领域专家的偏好随求解的进程而改变、求解空间极大的特点, 为典型的隐性目标决策问题<sup>[5]</sup>。利用综合集成研讨厅处理性能指标论证这样一个隐性目标决策问题, 领域专家们经常面临着如何以较高的问题求解效率获得满意/优化解、达成群体意见共识等挑战。因此, 结合当前的人工智能技术, 从复杂决策问题求解的角度研究有效的论证方法, 以支持求解现实中存在的“隐性目标决策问题”, 具有重要的理论意义和实践价值。

## 2 群体决策中的交互式遗传算法模型

复杂产品的性能指标论证问题的复杂性在于论证过程中存在着定量、定性两类决策准则: 一类是可以建立明确数量化、结构化表示的客观决策准则, 如有效距离、运行高度、运行速度等, 笔者将这样的决策准则称为定量指标, 另一类是不能或者难以建立显式数量化、结构化表示的主观准则, 如保养性能和先进性等, 这类准则具有模糊性且不同的决策者有着不同的理解, 称为定性指标。文献[6]认为这类决策问题是一类复杂的多准则决策问题, 不仅存在

[收稿日期] 2007-11-22; 修回日期 2008-01-07

[作者简介] 吴慧中(1942-), 女, 浙江舟山市人, 南京理工大学教授, 主要研究方向为虚拟现实和系统仿真等; E-mail: wuhzh@mail.njust.edu.cn

着难以显式表示的决策目标,而且决策者的偏好结构 (preference structure) 也未知或不确定,传统的决策方法难以进行求解,其求解的方法和过程与传统决策方法都有较大的差异。

我国科学家钱学森等人提出的综合集成研讨厅理论,采用综合集成的方法把专家、决策者的意见综合进去形成共识,是求解这一类复杂的多准则、隐性目标决策问题的有效手段。但具体如何形成意见的共识,达成专家群体思维的收敛,现有的研究还有待于进一步的深入。目前广泛应用的传统方法<sup>[7,8]</sup>基本上是通过利用判断矩阵的一致性、群体一致性指标、个体一致性指标等方法来实现专家群体的思维收敛并最终达成共识。这类方法虽然有其优点和合理性,但在求解效率上难以保证,在可操作性方面也存在着很多问题,难以满足实际研讨情形的需要。20世纪90年代中期发展起来的交互式遗传算法<sup>[9]</sup> (interactive genetic algorithm, IGA) 是一种解决定性指标优化问题的有效方法,它拓展了传统的遗传算法,利用进化个体的适应值代替难以(或无法)显式表示的适应度函数。因此,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,即具备交互式系统的可适应性及本质上适合搜索复杂性问题解的双重特性,是适合处理“隐性目标决策问题”的技术方法。

交互式遗传算法由于可以直接根据参与者的评价获得相关问题的适应度值,因此具备了将人的偏好、直觉、经验等定性的知识结合到目标系统中的特点,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,也可以通过与系统的不断交互获得所需的求解方案或解,因此在图形图像处理<sup>[10]</sup>、语音处理与合成<sup>[11]</sup>、建筑设计和工艺设计等领域获得了广泛的应用。但在群体决策领域,IGA算法的应用却并不多见。笔者尝试着提出了基于交互式遗传算法模型的群体论证方法,以应用于像复杂产品的性能指标论证这类群体决策问题。与一般的IGA算法的应用相比,应用综合集成研讨厅进行复杂产品的性能指标论证有着自己独特的特点:系统的使用者常常是多个专家;专家群体之间需要相互交流、协作;参与的方式为分布式在线同步研讨等。基于此,笔者采用的IGA算法模型为协同交互式遗传算法<sup>[12]</sup>。

在协同交互式遗传算法中,用户对个体的评价体现其偏好。因此,基于专家对个体的评价可以得

到专家的偏好。通过比较不同专家之间的偏差,可以得到专家偏好的相似程度,从而找到偏好相似的专家。具有相似偏好的专家在种群的进化过程中会互相提供最优的进化个体(方案),对HWME而言即是专家群体之间的交流、协作过程的实现。为求解综合集成研讨厅系统中的专家群体偏好相似度,首先需要进行如下定义。

定义1:基因意义单元  $U_i$  将复杂产品的性能指标参数称为因素,其对应的IGA算法表示即为基因意义单元。 $U_i$  为第  $i$  个因素对应的基因意义单元,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为因素个数。

定义2:等位基因意义单元  $U_i^{j_k}$  性能指标的指标参数在研讨论证过程中,专家群体对其有不同的定量、定性评价,称之为等位基因意义单元。 $U_i^{j_k}$  为  $U_i$  的第  $j_k$  个等位基因意义单元,  $j_k = 1, 2, \dots, |U_i|$ ,  $|U_i|$  为  $U_i$  所含等位基因意义单元的个数。

设  $e_1$  为当前专家,  $e_2$  为专家群体中同时参与研讨的任意一位专家,考虑进化个体的第  $i$  个基因意义单元  $U_i$ , 记  $\sigma_i(e_1, e_2)$  为专家  $e_1, e_2$  对  $U_i$  偏好的相似度。 $U_i^{j_k}$  的适应值  $P(U_i^{j_k})$  的计算公式采用以下方式<sup>[13]</sup>:

$$P(U_i^{j_k}) = \frac{1}{B} \sum_{m=1}^{N_1} \beta(U_i^{j_k}, x_m) P(x_m) - \frac{1}{N_{1m}} \sum_{m=1}^{N_1} P(x_m)$$

$$B = \sum_{m=1}^{N_1} \beta(U_i^{j_k}, x_m) \quad (1)$$

$\sigma_i(e_1, e_2)$  的计算公式为

$$\sigma_i(e_1, e_2) = \sqrt{\frac{1}{|U_i|} \sum_{j_k=1}^{|U_i|} (P_{e_1}(U_i^{j_k}) - P_{e_2}(U_i^{j_k}))^2} \quad (2)$$

$\sigma_i(e_1, e_2)$  越小,专家  $e_1, e_2$  对  $U_i$  的偏好越相似,反之,  $\sigma_i(e_1, e_2)$  越大,专家  $e_1, e_2$  对  $U_i$  的偏好相差越大。专家  $e_1$  与  $e_2$  偏好的相似度  $\sigma(e_1, e_2)$  为

$$\sigma(e_1, e_2) = \sum_{i=1}^n \sigma_i(e_1, e_2) \quad (3)$$

考虑到专家在对性能指标的参数进行研讨评价的过程中存在着一个认识逐渐深入的过程,其评价不可避免地存在偏差。文献[13]中对此种现象称之为“漂移”。为了减少“漂移”对算法中种群进化的影响,需要对等位基因意义单元的“适应值”给予一定的置信度。在研讨论证过程的初期以一定的折扣接受专家群体的评价,随着种群的进化,即研讨的

深入,专家对指标参数的评价偏差会逐渐减小,其置信度也逐渐增加。具有上述特征的置信度函数  $R(t)$  表示为

$$R(t) = \begin{cases} 1 + e^{-\alpha t} - e^{-\alpha T_s}, & t < T_s \\ 1, & t \geq T_s \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $\alpha$  为置信度系数。如果专家对待研讨的问题熟悉程度偏低,  $\alpha$  取较小值,种群初始进化代数  $T_s$  取较大值;否则,相反。

### 3 基于 IGA 的群体论证方法

在 HWME 的环境下利用 IGA 算法进行某复杂产品的性能指标论证。该产品包括多项性能指标,每一项又包括多个具体的指标参数,每个指标参数的变化都会组合成不同的产品总体性能方案。参与研讨的专家对每一个性能指标、指标参数及总体性能都有自己的主观经验,从而对每一代进化个体产生主观评价。研讨过程中,专家群体会根据产品的需求,参考以往成功的产品性能指标,提出若干套性能指标项及其参数值,并对具体的指标参数结合个人的经验进行打分评定或应用知识和机器的推理、仿真后给出相应的定性、定量评定。

专家群体共识的取得是通过 IGA 服务器端口对专家群体所评价的最进化个体(总体性能方案)的相似性进行跟踪测量实现的。当进化个体的差异度最终趋于一个较小的值时,即可认为专家群体达成了共识。设专家群体的规模为  $K$ ,各个专家提供的经过评价的最优个体为  $U^{(j)} = (U_{1j}, U_{2j}, \dots, U_{nj})$ ,  $j = 1, 2, \dots, K$ ,经过专家群体评价形成的最进化个体的编码为  $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ ,则最进化个体的差异度为<sup>[14]</sup>

$$\text{Diff}(t) = \sqrt{\frac{1}{K-1} \sum_{j=1}^K |U^{(j)} - \bar{U}|^2}$$

$$\bar{U} = (\bar{U}_{1j}, \bar{U}_{2j}, \dots, \bar{U}_{nj})$$

$$\bar{U}_{ij} = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K U_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

进化个体的差异度  $\text{Diff}(t)$  越小,则进化个体的相似性越大。随着进化的进行,  $\text{Diff}(t)$  呈波动下降的趋势,进化个体的相似性总体上趋于一致。对 HWME 而言,即是专家群体对论证方案达成了意见的共识,实现了思维的收敛。

基于 IGA 的综合集成研讨厅论证过程如图 1

所示。

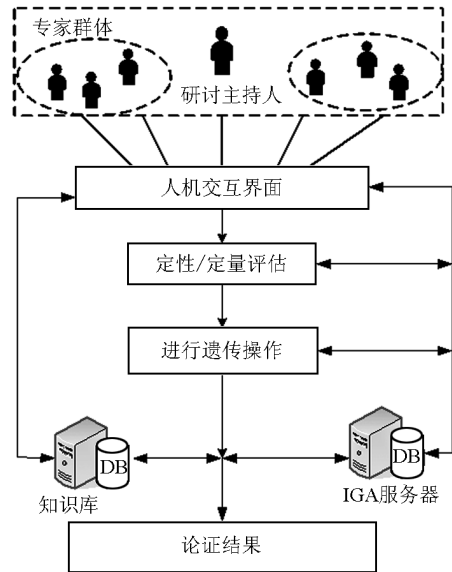


图 1 基于 IGA 的研讨厅中专家群体论证

Fig. 1 Group discussion in hwme based on IGA

分布的专家群体通过人机交互界面进行群体研讨论证。通过系统提供的投票、打分、评价等人机交互方式对性能指标参数进行定性/定量评定。系统输入的是根据专家个人的偏好、直觉、经验等定性的知识产生的评价结果,输出的是达成共识的论证方案结果。定性/定量的评价结果通过系统转化为个体的适应度,参与整个进化的过程。研讨主持人在论证之初根据案例库和个人知识对进化种群进行初始化,有利于加快整个进化过程的收敛速度。

由专家群体协作参与的基于 IGA 模型的性能指标论证算法步骤如下:

Step 1: 研讨主持人根据系统的案例库或研讨主持人的指定产生一个初始的论证方案,作为初始进化种群;

Step 2: 解码,将进化个体的表现型提交给参与研讨的专家群体;

Step 3: 专家群体综合各种主、客观准则给定各指标参数的适应值;

Step 4: 依染色体适应值机率选择一个族群数量的种子方案,进行方案间的交叉及变异运算,产生新一代方案;

Step 5: 计算专家群体的评价偏好是否稳定,若稳定,转 Step 6,否则,转 Step 3;

Step 6: 专家群体继续综合各种主、客观准则给定各指标参数的适应值;

Step 7: 选择偏好相似的进化种群,依染色体适应值机率进行方案间的交叉及变异运算产生新一代方案;

Step 8: 专家群体是否找到满意的方案或演化是否达到指定停止的代数,若是,转 Step9, 否则,转 Step 6;

Step 9: 达成意见共识,产生论证方案。

论证过程的流程如图 2 所示。

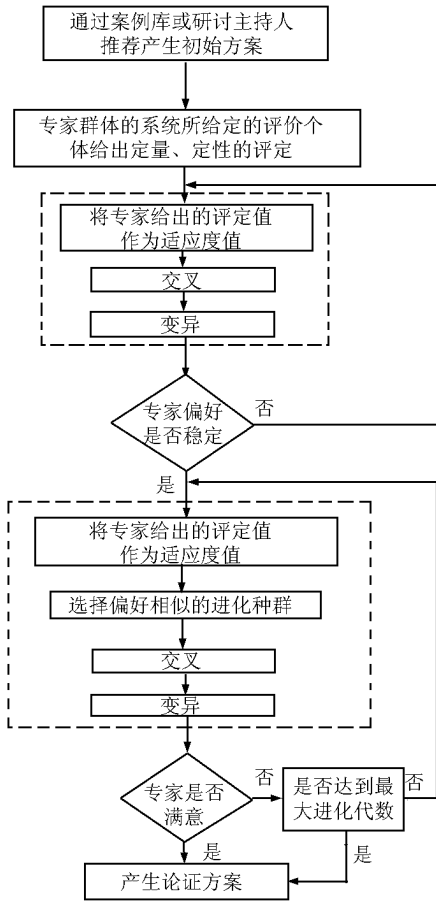


图 2 论证过程流程图

Fig. 2 Flowchart for discussion process

#### 4 应用实例

笔者所提出的基于 IGA 模型的群体论证方法目前应用于某复杂产品的性能指标论证。应用实例

为:参与论证的群体专家已借助于综合集成研讨厅在前一轮进行了群体研讨,并共识确定了某产品的各项性能指标,如图 3 所示。该产品的性能指标分为若干项,且每个专家均可能提出一整套定量指标参数值或定性指标参数评价。即会形成  $n$  套定量指标参数值和  $m$  种定性指标参数评价。不失一般性,为讨论问题方便,特设  $n=3, m=7$ 。

对于定量指标参数值的选择,来自给定的 A, B, C 三套定量指标参数值,如表 1 所示。对于定性指标参数,专家的定性评价为 7 等级制,分为 FC(非常差),HC(很差),C(差),YB(一般),H(好),HH(很好)和 FH(非常好)。实际运行中,给每个等级对应了相应的分数值(10~100),分数直接转化为个体的适应度。因此,定性的指标参数有 7 种选择,编码为 3 位,定量的指标参数有 3 种,编码 2 位。例如,某专家选择了定量指标参数“有效距离”为 45,则其编码为 00,如表 2 所示。因此一个方案的个体编码为  $2 \times (7 + 4 + 2) + 3 \times (1 + 5 + 1 + 3) = 56$  位,系统产生的搜索空间为  $3^{13} + 7^{10} = 284\ 069\ 572$ 。每种编码组合唯一确定一个总体性能方案,产品的某个总体性能方案染色体编码的结构如图 4 所示。

表 1 某复杂产品的定量性能指标  
Table 1 Quantitative performance target of some complex product

定量指标	A 套参数值	B 套参数值	C 套参数值
有效距离/km	45	36	39
运行高度/m	26	20	23
运行速度/Ma	0.71	0.8	0.75
吞吐量/(t·min <sup>-1</sup> )	0.6	0.6	0.7
反应时间/s	1.2	1.5	1.3
外观尺寸/cm <sup>3</sup> (长×宽×高)	520×35×135	381×34×105	445×35×120
成功率/%	67	70	63
有效率/%	83	88	86
作用范围/m	15	12	18
故障率/%	0.2	0.25	0.3
可靠性/%	80	83	76
系统耗费/¥10 000	800	760	785
系统寿命/a	8	6	5

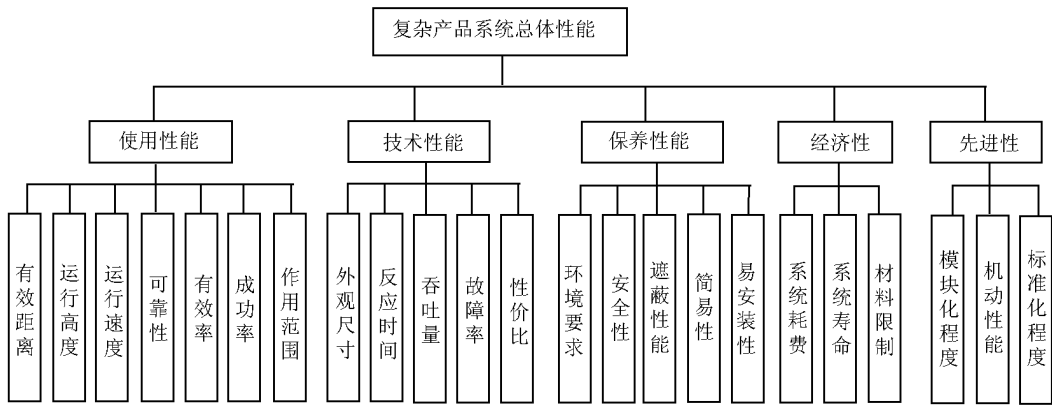


图3 某复杂产品总体性能评价的 AHP 模型

Fig. 3 AHP model for general performance evaluation of some complex product

定量指标													定性指标									
01	01	11	01	00	11	11	00	01	00	11	01	00	000	010	001	100	101	110	111	101	001	110
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1.有效距离	2.运行高度	3.运行速度	4.吞吐量	5.反应时间	6.外观尺寸	7.成功率	8.有效率	9.作用范围	10.故障率	11.可靠性	12.系统耗费	13.系统寿命	14.性价比	15.环境要求	16.安全性	17.遮蔽性	18.简易性能	19.易安装性	20.材料限制	21.模块化程度	22.机动性能	23.标准化程度

图4 某个总体性能方案染色体编码结构

Fig. 4 Structure of chromosome coding for some general performance scheme

表2 染色体的编码设计

Table 2 Design of chromosome coding

系统性能组成		评价方式		等位基因意义单元									
使用性能	有效距离			00		01					11		
	运行高度			00		01					11		
	运行速度			00		01					11		
	可靠性	定量评估		00		01					11		
	有效率			00		01					11		
	成功率			00		01					11		
	作用范围			00		01					11		
技术性能	外观尺寸	定量评估		00		01					11		
	反应时间			00		01					11		
	吞吐量			00		01					11		
	故障率			00		01					11		
	性价比	定性评估		000	001	010	100	101	110	111			
保养性能	环境要求			000	001	010	100	101	110	111			
	安全性			000	001	010	100	101	110	111			
	遮蔽性	定性评估		000	001	010	100	101	110	111			
	简易性能			000	001	010	100	101	110	111			
	易安装性			000	001	010	100	101	110	111			
经济性	系统耗费			00		01					11		
	系统寿命	定量评估		00		01					11		
	材料限制	定性评估		000	001	010	100	101	110	111			
先进性	模块化程度			000	001	010	100	101	110	111			
	机动性能	定性评估		000	001	010	100	101	110	111			
	标准化程度			000	001	010	100	101	110	111			

假设在研讨厅中有7位专家参与研讨论证,各专家给出的指标参数定性评价信息如表3所示。采用的算法是协同交互式遗传算法。由于研讨论证的循环次数不需要很多,因此人的疲劳问题影响不大,试验过程设定最大进化代数为15。通过轮盘赌的方式产生新的

种群。杂交概率、变异概率参数由人工指定,如表4所示。论证到一定次数后或进化个体(专家评价方案)的差异度趋于一个较小的值时,即可认为论证研讨完成。实践中当专家群体进行到第七轮研讨时,即可获得此复杂产品满意的优化解,且达成了群体意见的一致。

表3 各专家给出的定性指标评价

Table 4 Evaluation of qualitative performance target by experts

专家	定性指标参考值	性价比	环境要求	安全性	遮蔽性	简易性能	易安装性	材料限制	模块化程度	机动性能	标准化程度
E <sub>1</sub>	A	YB	YB	YB	HC	C	YB	H	HC	C	YB
	B	C	C	C	H	C	YB	C	YB	HH	C
	C	FH	C	C	YB	C	C	YB	C	H	C
E <sub>2</sub>	A	YB	YB	H	C	C	H	YB	C	H	YB
	B	C	C	C	YB	H	H	C	H	FH	H
	C	FH	C	C	H	C	YB	YB	HC	FH	H
E <sub>3</sub>	A	H	C	YB	C	YB	YB	H	C	YB	YB
	B	YB	C	C	H	C	YB	C	H	FH	YB
	C	HH	YB	YB	H	YB	HC	C	HC	FH	YB
E <sub>4</sub>	A	YB	C	H	YB	C	YB	YB	YB	H	H
	B	C	C	C	YB	C	H	C	YB	HH	C
	C	HH	YB	YB	H	YB	HC	C	HC	FH	C
E <sub>5</sub>	A	HH	C	H	YB	C	H	YB	YB	H	YB
	B	C	C	YB	H	YB	YB	C	H	H	YB
	C	HH	YB	C	HH	H	HC	C	HC	FH	C
E <sub>6</sub>	A	H	YB	H	YB	C	H	YB	H	YB	YB
	B	C	YB	C	YB	YB	H	HC	H	HH	H
	C	FH	C	YB	HH	H	C	C	HC	FH	C
E <sub>7</sub>	A	YB	C	H	C	YB	H	YB	YB	H	YB
	B	YB	C	C	H	YB	YB	HC	H	HH	H
	C	HH	C	YB	HH	H	HC	C	C	FH	C

表4 参数设置

Table 4 Parameters setting

群体数量 $K$	终止代数 $T$	交叉概率 $p_c$	变异概率 $p_m$	置信度系数 $\alpha$
7	15	0.65	0.01	0.9

## 5 结语

提出了一种基于交互式遗传算法模型的群体论证方法。人机交互的遗传算法充分发挥了人机各自的优势,对于求解复杂产品的性能指标论证问题,对“人机合作的“可操作性”问题及实现从定性到量化的有效转换,提供了一种有效的方法或途径。此种方式相比于研讨厅中传统的意见共识和思维收敛方法,不仅容易达成群体意见一致、有着更高的求解效率,而且更符合综合集成研讨厅在线研讨的实际,可以方便地进行多次循环论证。

### 参考文献

[1] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域—开放的复杂巨系统及其方法论[J]. 自然杂志,1990,13(1): 3-10  
 [2] 李耀东. 综合集成研讨厅设计与实现中的若干问题研究[D]. 北京:中国科学院自动化研究所,2003  
 [3] 戴汝为.“人机结合”大成智慧[J]. 模式识别与人工智能,

1994,7(3): 181-190

[4] 顾基发,唐锡晋. 综合集成方法的理论及应用[J]. 系统辩证学报,2005,13(4): 1-7, 22  
 [5] 许芳诚. 智慧型多准则决策支援研究:以交谈式遗传演算法为基础的模型[D]. 中国台北:国立中央大学资讯管理系,2000  
 [6] 黄永青,梁昌勇,郝国生,等. 隐性目标决策问题的IDSS结构模型研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2007,30(2): 217-221  
 [7] 王丹力,戴汝为. 专家群体思维收敛的研究[J]. 管理科学学报,2002,5(2):1-5  
 [8] Ngwenyama O K, Bryson N. Supporting facilitation in group support systems: techniques for analyzing consensus relevant data[J]. Decision Support Systems, 1996, 16: 155-168  
 [9] Takagi H. Interactive evolutionary computation: fusion of the capabilities of EC optimization and human evaluation [J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89 (9):1275-1296  
 [10] Sung-Bae Cho, Joo-Young Lee. A human-oriented image retrieval system using interactive genetic algorithm[J]. Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 2002, 32(3): 452-458  
 [11] Miki Mitsunori, Orita Hiroko, et al. Design of Sign Sounds using an interactive Genetic Algorithm[J]. Systems, Man and Cybernetics, IEEE, 2006. 4 :3486-3490  
 [12] Gong D, Zhou Y, Li T. Cooperative interactive genetic algorithm based on User's preference [J]. International Journal of Information Technology, 2005, 11(10):1-10

(下转78页)