

文章编号: 1001-0920(2007)03-0352-05

混合性能指标优化问题的进化优化方法及应用

周 勇^{a,b}, 巩敦卫^b, 张 勇^b

(中国矿业大学 a. 计算机科学与技术学院, b. 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 针对混合性能指标优化问题的普遍性及其处理过程中的特点, 提出一种混合性能指标优化问题的进化优化方法. 首先给出混合性能指标优化问题的定义; 然后, 确定不同类型和标度的性能指标的转换策略、混合性能指标的个体适应度的赋值方法、以及混合性能指标优化问题的进化优化流程; 最后, 通过服装设计这一典型的混合性能指标优化问题的仿真验证了算法的有效性.

关键词: 进化优化; 混合性能指标; 交互式进化计算

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Evolutionary optimization methods for hybrid index optimization problems and application

ZHOU Yong^{a,b}, GONG Dun-wei^b, ZHANG Yong^b

(a. School of Computer Science and Technology, b. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China. Correspondent: ZHOU Yong, E-mail: zhouyongchina@126.com)

Abstract: To the popularity and the characters of hybrid index optimization problems, an evolutionary optimization method is proposed. The definition of hybrid index optimization problems is given. A strategy for converting the indexes for different styles and graduation, a method for evaluating individual's fitness and the flow chart of the evolutionary optimization of hybrid index optimization problems are provided. The effectiveness of the proposed algorithm is validated through a fashion design which is a typical hybrid index optimization problem.

Key words: Evolutionary algorithm; Hybrid index; Interactive evolutionary algorithm

1 引 言

实际优化问题通常包括多个性能指标. 在这些性能指标中, 有的可以用明确定义的函数表示, 称为显式性能指标; 有的则不能, 称为隐式性能指标. 同时包含显式和隐式性能指标的优化问题称为混合性能指标优化问题^[1]. 如服装设计问题, 其中, 服装颜色搭配的协调性和成本是显式性能指标^[2], 而服装款式的新颖性和服装满足用户需求的程度则是隐式性能指标. 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.

已有的进化优化方法和研究成果可以处理各种单纯含有显式性能指标或隐式性能指标的优化问题. 对于同时含有多个显式性能指标的多目标优化问题, 一般通过计算机直接计算其显式性能指标函

数的值作为个体的适应值, 采用权重法或 Pareto 优化的方法寻找符合目标空间的最优解^[3]. 对于含有纯隐式性能指标的优化问题, 一般采用交互式进化计算的方法^[4], 通过用户对个体隐式性能指标的评价获得进化个体的适应值, 从而通过进化优化寻找用户满意的解.

对于同时含有显式性能指标和隐式性能指标的优化问题, 很难直接获得能够表示两种性能指标的个体适应值. 一方面, 由于显式和隐式性能指标的评价方式不同, 使得优化算法获得性能指标评价结果的时间不能同步, 即显式性能指标可通过相应的适应度函数直接求得, 而隐式性能指标需从用户的评价中获得. 另一方面, 两种性能指标的标度范围不同, 而进化优化过程需要个体的适应值作为进化的依据, 因此必须进行个体适应值的标度变换. 这就使

收稿日期: 2005-11-22; 修回日期: 2005-12-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60575046); 中国矿业大学青年科研基金项目(0D4549).

作者简介: 周勇(1974—), 男, 江苏徐州人, 讲师, 博士生, 从事进化计算的研究; 巩敦卫(1970—), 男, 江苏铜山人, 教授, 博士生导师, 从事进化计算与智能控制的研究.

得混合性能指标的优化问题既不同于传统的显式性能指标,也不同于传统的隐式性能指标优化问题,因此有必要研究适合混合性能指标的进化优化方法。

另外,由于混合性能指标问题含有多个性能指标,可借鉴已有的多目标进化优化方法来处理混合性能指标的优化问题^[3,5-7]。但是 Pareto 比较法的进化代数较多,运行时间较长,通常需要进化几百代甚至上千代。而混合性能指标中的隐式性能指标需要用户进行评价,为了避免用户的疲劳,一般用户的评价代数为 20 代左右^[4]。虽然适应度松弛和适应度替代的方法可以达到增加进化代数、减轻用户疲劳的目的^[8-11],但其增加的代数毕竟有限,且加之 Pareto 比较的进化优化方法时间较长,也易产生用户等待的疲劳。因此,Pareto 比较的多目标进化优化方法不适用于混合性能指标的进化优化,本文将采用权重法作为混合性能指标的赋值方法。

针对混合性能指标优化问题的普遍性及其处理过程中的特点,本文提出一种混合性能指标优化问题的进化优化方法。首先,给出了混合性能指标优化问题的定义;其次,确定了不同类型和标度的性能指标的转换策略、混合性能指标的个体适应度的赋值方法、以及混合性能指标优化问题的进化优化的流程;最后,通过实例仿真验证了算法的有效性。

2 混合性能指标优化问题的进化优化方法

2.1 问题描述

混合性能指标优化问题是既含有显式性能指标又含有隐式性能指标的一类多目标优化问题,显式性能指标可直接通过相应的显式函数计算出性能指标的值;隐式性能指标则需通过测量实际信号或由特定的用户赋值,然后再用多目标的方法寻找出优化的决策变量。混合性能指标优化问题的定义为:

定义 1 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,具体描述如下:

$$\max y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T, \tag{1}$$

$$\text{s. t. } e(x) = (e_1(x), e_2(x), \dots, e_z(x))^T \leq 0. \tag{2}$$

其中: $y_i = f_i(x) (i = 1, 2, \dots, k)$ 表示第 i 个显式性能指标; $y_{j+k} = h_j(x) (j = 1, 2, \dots, l)$ 表示第 j 个隐式性能指标; k, j 分别表示问题含有显式和隐式性能指标的个数; x 表示决策变量, X 表示决策变量 x 的决策空间, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in X$; y 表示目标向量, Y 表示目标向量 y 的目标空间, $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)^T \in Y$; 约束条件 $e(x) \leq 0$ 确定决策变量可行的取值范围。

2.2 算法思想

混合性能指标优化所面临的主要困难是对两种形式性能指标评价值的采集,不同性能指标的标度变换以及多个性能指标的寻优过程。对此,本文首先通过交互式进化计算的方法获得用户对隐式性能指标的评价值,通过相应的评价函数获得显式性能指标的评价值;其次,对不同形式的性能指标进行归一化和标度变换;再次,通过与用户交互的过程获得用户对各性能指标的偏好信息,根据这些信息对系统的多个性能指标进行加权,作为待评价个体的适应值;最后,依据个体的适应值,通过进化优化的方法寻找到混合性能指标优化问题的最优解。

2.3 混合性能指标的标度变换

混合性能指标优化问题包含多种不同的性能指标,而这些指标的目标向量范围不同,对其采用权重法转换成单目标时,各性能指标的标度直接影响其是否依据相应的权重进行转换。因此,在应用权重法进行多目标优化时,需将各性能指标进行归一化的标度变换,从而使得各性能指标的权重能直观地表达其对最终目标的贡献程度,便于用户根据实际情况调整和确定各性能指标的权重。

对不同的性能指标采用如下的标度变换方法:

$$f_i(x) = \frac{f_i(x) - f_{i\min}}{f_{i\max} - f_{i\min}} \tag{3}$$

其中: $f_i(x)$ 表示第 i 个性能指标, $f_{i\max}$ 和 $f_{i\min}$ 分别表示第 i 个性能指标的最大值和最小值, $f_i(x)$ 表示标度变换后的第 i 个性能指标的值。由式(3)可知,经过标度变换后,第 i 个性能指标 $f_i(x)$ 的目标值范围归一化为 $(0, 1)$ 。

2.4 混合性能指标的个体适应度赋值

本文采用权重法进行混合性能的优化,因此,混合性能指标中个体的适应值既要反映显式性能指标和隐式性能指标对系统的影响,也要反映出各性能指标对最终优化结果的贡献程度,即用户对不同性能指标的重视程度。显式性能指标可由相应显式函数直接计算出目标值,即得到相应 $f_i(x)$ 的值;隐式性能指标则必须通过间接的或用户参与的形式获得其评价的结果,即得到相应 $h_j(x)$ 的值。则系统中个体适应度可依下式赋值:

$$F(x) = \sum_{i=1}^k w f_i f_i(x) + \sum_{j=1}^l w h_j h_j(x), \tag{4}$$
$$\sum_{i=1}^k w f_i + \sum_{j=1}^l w h_j = 1.$$

其中: $w f_i \in [0, 1] (i = 1, 2, \dots, k)$ 为第 i 个显式性能指标的权重; $w h_j \in [0, 1] (j = 1, 2, \dots, l)$ 为第 j 个隐式性能指标的权重; $f_i(x)$ 和 $h_j(x)$ 表示标度变换后

各显式和隐式性能指标的值. 各性能指标的权重 wf_i 和 wh_j 应依据其对最终结果的影响根据实际情况调整、确定.

2.5 混合性能指标的进化优化方法

混合性能指标进化优化方法的流程如图1所示. 由图1可知, 该优化方法针对单纯显式性能指标可直接通过性能指标函数获得其评价价值; 针对隐式性能指标则可通过人机交互的方法获得特定用户的评价价值, 并通过标度变换和个体适应度赋值得到每个个体的适应值. 该方法的主要问题是多个性能指标权重的获得和对个体的适应度赋值.

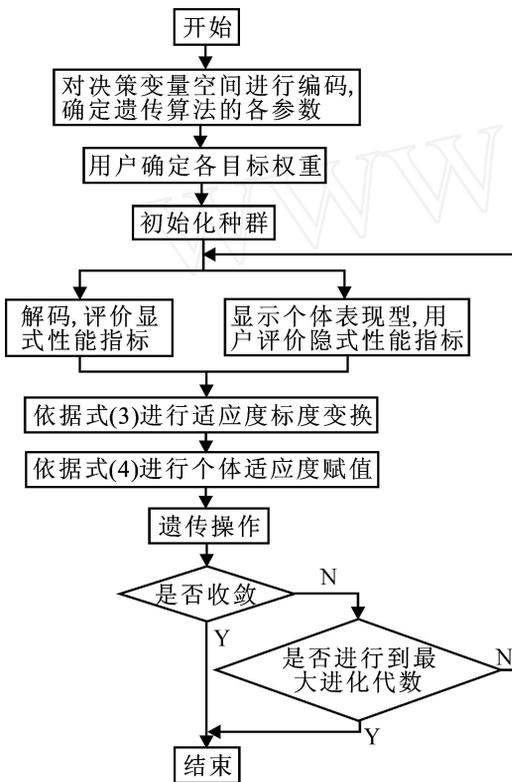


图1 混合性能指标优化问题的进化优化流程

具体步骤如下:

Step1: 对决策变量空间进行编码;

Step2: 通过交互的方法获得用户对不同目标的权重;

Step3: 初始化种群, 设定各算子的参数和进化结束条件;

Step4: 通过适应度函数直接计算各显式性能指标的评价价值;

Step5: 通过用户交互获得各隐式性能指标的评价价值;

Step6: 依据式(3) 对各性能指标进行标度变换;

Step7: 依据式(4) 对个体适应度进行赋值;

Step8: 选择、交叉、变异的遗传操作生成新一

代种群;

Step9: 判断算法是否收敛, 若收敛, 结束进化, 输出最优个体; 若不收敛, 则转 Step4;

Step10: 判断是否达到最大进化代数, 若达到, 结束进化, 输出最优个体; 若不达到, 则转 Step4.

3 基于混合性能指标进化优化方法的服装设计

3.1 服装设计中的混合性能指标

服装设计中服装的款式是一种典型的隐式性能指标, 不同的用户因其年龄、性别以及知识背景等不同, 对服装款式的要求也有相应的差异性, 对同一款服装的喜欢程度也不同. 但对于服装中不同色彩搭配问题, Matsuda 通过长期的问卷调查和研究, 给出了服装色彩搭配协调性的定量描述, 将这一问题转化成可用显式函数表示的显式性能指标问题^[2]. 运用 Matsuda 方法, 可以对任意两种颜色的搭配协调性作出一个定量的评价, 评价的返回值是一个 0 ~ 1 之间的数值. 如果两种颜色搭配的协调性好则返回 1, 如果不搭配则返回 0, 一般的返回值都介于 0 ~ 1 之间, 返回值越高, 说明两种颜色搭配的协调性越好^[2].

3.2 编码和参数设置

本文考虑设计一套只有上衣和裙子的二维女装设计系统作为应用实例. 上衣和裙子的款式各 32 套, 分别可以被染成 16 种颜色, 因此, 解的搜索空间为 $2^5 \times 2^5 \times 2^4 \times 2^4 = 262\ 144$, 搜索空间的样本达到 26 万. 个体采用二进制编码, 编码个体共有 18 位, 其中前 5 位表示上衣的代码, 第 6 位 ~ 第 10 位表示裙子的代码, 第 11 位 ~ 第 14 位表示上衣颜色的代码, 第 15 位 ~ 第 18 位表示裙子颜色的代码, 具体如图 2 所示, 颜色的编码与相应的颜色取值如表 1 所示.



图2 个体编码示意图

表1 颜色编码对照表

值	颜色	值	颜色	值	颜色
0	黑色	6	黄色	12	亮红色
1	兰色	7	白色	13	亮洋红色
2	绿色	8	灰色	14	亮黄色
3	青色	9	亮蓝色	15	亮白色
4	红色	10	亮绿色		
5	洋红色	11	亮青色		

上衣和裙子的款式以 bmp 图片格式存放在统一的文件夹中并按照一定的顺序将图片排列、命名,

名称分别是 0 到 31 的整数,对应于相应部位款式二进制代码的十进制值.例如图 2 中上衣代码 10110 对应于编号为 22 的上衣款式,裙子的代码 00100 对应于编号是 4 的裙子图片;上衣颜色代码 0110 对应于编号为 6 的黄色,裙子的代码 1001 对应于编号为 9 的亮蓝色.

由于需要用户的交互式打分,考虑尽量减少用户疲劳问题,本算例的种群规模取 8,交叉概率为 1,变异概率为 0.01.算例的遗传操作采用适应值比例选择方法,多点交叉和单点变异.为防止进化过程中优异个体被淘汰,在选择操作中采取精英保留策略.

3.3 个体适应度赋值和目标权重确定

本系统中有一个显式性能指标——上衣和裙子色彩搭配的协调性,一个隐式性能指标——用户对服装款式的满意程度.显式性能指标可通过 Matsuda 的色彩搭配评价函数得到,隐式性能指标则通过用户的打分获得.对于隐式性能指标,本算例中以百分制对服装个体进行打分,即隐式性能指标的取值范围为 0 ~ 100.记用户给服装评价的分值为 $f_k^1(x_i)$,每套服装的颜色协调性评价函数的返回值记为 $f_k^2(x_i)$,其中,上标表示不同的优化目标,下标 k 表示服装个体的进化代数, x_i 表示不同的服装个体, $i = 1, 2, \dots, 8$.经过式 (3) 的标度变换,隐式性能指标归一化为 $f_k^1(x_i)/100$.取 w_1 和 w_2 分别表示隐式和显式性能指标的权重,则依据式 (4),服装设计中心个体适应度的赋值为

$$f_k(x_i) = w_1 \frac{f_k^1(x_i)}{100} + w_2 f_k^2(x_i), \quad (5)$$

其中 $f_k(x_i)$ 为最终系统所采用的评价服装第 k 代个体 x_i 的适应值.由于 $w_1 + w_2 = 1$,则式 (5) 可进一步简化为

$$f_k(x_i) = w_i \frac{f_k^1(x_i)}{100} + (1 - w_1) f_k^2(x_i). \quad (6)$$

式 (6) 中权重系数 w_1 的取值十分重要,它决定了不同用户对不同目标重视程度的大小.在实际中,究竟用户自己更在意服装款式还是服装的色彩搭配,很难有一个统一的结论.因此,本文中服装设计系统通过用户交互的方式由用户自己设定 w_1 的大小,即呈现给用户如图 3 所示的画面,通过用户的决策获得 w_1 的值.系统中设定了 5 个不同的 w_1 值,即 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 和 0.9,分别对应于用户不同的决策.因为本系统只有两个性能指标,所以不考虑权重取 0 和 1 的两个极端的情况,否则问题就转化为单目标问题,有失本文讨论问题的一般性. w_1 取 0.1 时对应的选项语句是:我更倾向于颜色搭配协调性的设计; w_1 取 0.3 时对应的选项语句是:我比较倾向于

颜色搭配协调性的设计; w_1 取 0.5 时对应的选项语句是:一般; w_1 取 0.7 时对应的选项语句是:我比较倾向于服装款式的设计; w_1 取 0.9 时对应的选项语句是:我更倾向于服装款式的设计.

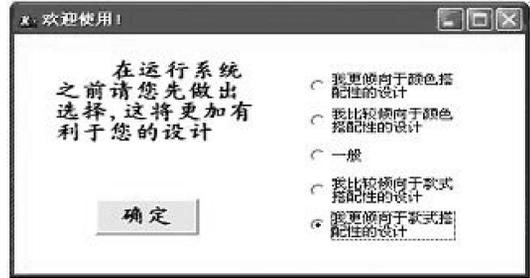


图 3 用户目标权重交互获取界面

3.4 系统实现

系统主界面有两种外观,一种是通过用户通过拖动滚动条给系统生成的服装打分,水平滚动条给出分值是在 0 ~ 100 之间整数;另一种为了简化用户的操作,设计了 5 个单选按钮,用户通过点击单选按钮为相应的服装进行打分操作,每一单选按钮分别对应于“很满意”,“较满意”,“一般”,“较差”,“很差”5 个等级的语气副词,相当于 90, 70, 50, 30, 10 的分值.

进入主界面后可以点击初始化按钮,则系统自动生成种群规模为 8 的一个种群,并把个体解码成相应的服装款式和颜色呈现给用户,供其评价.同时系统内部按照 Matsuda 的评价指标给出相应个体颜色搭配协调性的值,最后依据式 (6) 得到个体的适应值,然后进行相应的遗传操作,系统运行过程中的界面如图 4 所示.



图 4 点击一次自动设计按钮后系统界面

在系统设计进行过程中,系统会自动计算每一代的个体平均适应值,当系统的平均适应值与系统最大适应值的差值小于 0.05 时,则认为系统已经收敛,此时输出适应值最高的个体作为用户设计的结果.另外,系统为了不使用户疲劳,当遗传操作进行到 20 代时,系统自动结束运行,选择最后一代中适应值最大的个体作为用户设计的结果.

由于交互式设计的特殊性,当用户在设计过程中发现了较为满意的个体后,可以点击结束按钮结束设计过程,获得满意个体.当最终用户完成了满意的设计后,系统将呈现给用户最终的设计结果.

4 结 语

针对混合性能指标优化问题的普遍性和其处理过程中的特点,本文提出一种混合性能指标优化问题的进化优化方法,给出了混合性能指标的定义,不同类型和标度的性能指标的转换策略,混合性能指标的个体适应度的权重赋值方法,以及混合性能指标优化问题的进化优化流程,并通过服装设计这一典型的具有混合性能指标优化问题的仿真验证了算法的有效性.本文仅采用了加权多目标的方法处理混合性能指标的优化问题,而对于混合性能指标中隐式性能指标的评价特点,应用其他多目标方法处理混合性能指标的优化则是需进一步研究的问题.

参考文献(References)

- [1] Funes P, Bonabeau E, Herve J, et al. Interactive multiparticipant tour allocation [C]. Proc of the 2004 Congress on Evolutionary Computation. Oregon: IEEE Press, 2004: 1699-1705.
- [2] Masataka Tokumaru, Noriaki Muranaka, Shigeru Imanishi. Color design support system considering color harmony [C]. Proc of the 2002 IEEE Int Conf on Fuzzy System. Honolulu: IEEE Press, 2002: 378-383.
- [3] Dragan Cvetković, Ian C Parmee. Preferences and their application in evolutionary multiobjective optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 42-57.
- [4] Takagi H. Interactive evolutionary computation: Fusion of the capabilities of EC optimization and human evaluation [J]. Proc of the IEEE, 2001, 89(9): 1275-1296.
- [5] Deb K, Pratap A. A fast elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA- [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [6] Zittler E, Deb K, Thiele L. Comparison of multi-objective evolutionary algorithms: Empirical results [J]. Evolutionary Computation, 2000, 8(2): 173-195.
- [7] Jason Teo, Hussein A. Multiobjectivity and complexity in embodied cognition [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2005, 9(4): 337-360.
- [8] Sugimoto F, Yoneyama M. An evaluation of hybrid fitness assignment strategy in interactive genetic algorithm [C]. Proc of the 5th Australasia-Japan Joint Workshop on Intelligent and Evolutionary Systems. Dunedin, 2001: 62-69.
- [9] 巩敦卫, 郝国生, 周勇, 等. 分层交互式进化计算及其应用 [J]. 控制与决策, 2004, 19(10): 1117-1120. (Gong D W, Hao G S, Zhou Y, et al. Hierarchical interactive evolutionary computation and its application [J]. Control and Design, 2004, 19(10): 1117-1120.)
- [10] 周勇, 巩敦卫, 郝国生, 等. 交互式遗传算法基于 NN 的个体适应度分阶段估计 [J]. 控制与决策, 2005, 20(2): 234-236. (Zhou Y, Gong D W, Hao G S, et al. Neural network based phase estimation of individual fitness in interactive genetic algorithm [J]. Control and Decision, 2005, 20(2): 234-236.)
- [11] Jin Y. A comprehensive survey of fitness approximation in evolutionary computation [J]. Soft Computer, 2005, 9(1): 3-12.
- [6] Xu S Y, Yang C W. An algebraic approach to the robust stability analysis and robust stabilization of uncertain singular systems [J]. Int J of Systems Science, 2000, 31(1): 55-61.
- [7] Xu J X. Recent advances in iterative learning control [J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(1): 132-142.
- [8] Arimoto S, Kawamura S, Miyazaki F. Bettering operation of robots by learning [J]. J Robot System, 1984, 1(12): 123-140.
- [9] Xu J X, Tan Y. Robust optimal design and convergence properties analysis of iterative learning control approaches [J]. Automatica, 2002, 38(11): 1867-1880.
- [10] 孙明轩, 黄宝键. 迭代学习控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. (Sun M X, Huang B J. Iterative learning control [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1999.)
- [11] 林辉. 迭代学习控制理论 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998. (Lin H. Iterative learning control theory [M]. Xi 'an: Northwestern Industry University Press, 1998.)
- [12] 李仁俊, 韩正之. 迭代学习控制综述 [J]. 控制与决策, 2005, 20(9): 961-966. (Li R J, Han Z Z. Survey of iterative learning control [J]. Control and Decision, 2005, 20(9): 961-966.)
- [13] 谢胜利, 谢振东, 刘永清. 滞后广义系统状态跟踪的学习控制算法 [J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(5): 10-16. (Xie S L, Xie Z D, Liu Y Q. Learning control algorithm for state tracking of singular systems with delay [J]. Systems Engineering and Electronics, 1999, 21(5): 10-16.)

(上接第 351 页)