

## 基于群智能的模糊多目标软件可靠性冗余分配

侯雪梅<sup>1\*</sup>, 刘伟<sup>1</sup>, 高飞<sup>2</sup>, 李志博<sup>1</sup>, 王婧<sup>1</sup>

(1. 信息工程大学 网络空间安全学院, 郑州 450001; 2. 信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450001)

(\* 通信作者电子邮箱 hihouxue@163.com)

**摘要:**针对软件可靠性冗余分配问题,建立了一种模糊多目标分配模型,并提出了基于分布估计的细菌觅食优化算法求解该模型。将软件可靠性和成本作为模糊目标函数,通过三角形隶属函数对模糊多目标进行处理,用高斯分布对细菌觅食算法进行优化,并将该优化算法用来求解多目标软件可靠性冗余分配问题,设置不同的隶属函数参数可以得到不同的 Pareto 最优解,实验数据验证了该群智能算法对解决多目标软件可靠性分配的有效性和正确性, Pareto 最优解可为在可靠性和成本之间决策提供依据。

**关键词:**群智能;细菌觅食算法;分布估计算法;Pareto 最优解;模糊多目标;可靠性分配

**中图分类号:** TP301.6 **文献标志码:** A

### Fuzzy multi-objective software reliability redundancy allocation based on swarm intelligence algorithm

HOU Xuemei<sup>1\*</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, GAO Fei<sup>2</sup>, LI Zhibo<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>

(1. Institute of Cyberspace Security, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China;

2. Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China)

**Abstract:** A fuzzy multi-objective software reliability allocation model was established, and bacteria foraging optimization algorithm based on estimation of distribution was proposed to solve software reliability redundancy allocation problem. As the fuzzy target function, software reliability and cost were regarded as triangular fuzzy members, and bacterial foraging algorithm optimization based on Gauss distribution was applied. Different membership function parameters were set up, and different Pareto optimal solutions could be obtained. The experimental results show that the proposed swarm intelligence algorithm can solve multi-objective software reliability allocation effectively and correctly. Pareto optimal solution can help the decision between software reliability and cost.

**Key words:** swarm intelligence; bacterial foraging algorithm; distribution estimation algorithm; Pareto optimal solution; fuzzy multi-objective; reliability allocation

## 0 引言

软件可靠性分配是软件可靠性工程中的一个重要环节,它是在保证软件可靠性目标的前提下,对组成软件系统的结构进行分析,把软件分解为一个一个基本模块,并对各个模块进行可靠性目标分配,以便在软件开发成本、软件规模一定的情况下,使软件可靠性尽可能地大。

多目标的软件可靠性分配模型实质是一种带有约束条件的数学规划问题,该问题带有很多局部极值点。最近几年群智能算法被广泛用来解决可靠性分配问题,这些算法比经典的数学优化算法有更多的人工推理,显示出了很大的优势:一方面,群智能算法基于种群的搜索方式实现了搜索的多向性和全局性,使其非常适合于求解多目标优化问题,即通过重组操作充分利用解之间的相似性,能够一次运行中获得多个 Pareto 最优解集<sup>[1]</sup>;另一方面,群智能算法不需要很多数学上的必备条件,可以处理所有类型的目标函数和约束。

Passino 等提出的细菌觅食算法(Bacterial Foraging Algorithm, BFA)作为一种群智能优化算法<sup>[2-3]</sup>,具有对 Pareto

最优解前端的形状和连续性不敏感的优点,使得其在求解多目标问题中得到广泛应用。Mühlenbein 等提出的分布估计算法(Estimation of Distribution Algorithm, EDA)是一种基于概率模型的随机搜索算法<sup>[4-5]</sup>。BFA 侧重于局部寻优,而 EDA 算法侧重于全局寻优,本文结合这两者的优点,将高斯分布引入到细菌觅食算法中,提出了一种基于分布估计算法的群智能优化算法,用来解决多目标软件可靠性分配问题。

## 1 软件可靠性分配数学模型

影响软件可靠性分配的因素很多,设计者要求软件系统可靠度最大化,同时还要求系统成本最小化和软件规模最小化,所以软件可靠性分配是一个多目标优化问题。由于几个相互冲突的目标不能组合成单目标函数,多目标的软件可靠性分配是非常复杂的问题。一个软件子系统或者子模块的可靠度往往并不是一个精确的值,不同的运行条件和运行环境下,软件可靠性并不一样,另外软件可靠性分配一般是在设计阶段进行,在这个阶段对一个未知的或者未开发出来的软件模块进行可靠性分配是很困难的。大多数情况下,软件可靠

收稿日期:2012-10-23;修回日期:2012-11-22。

**作者简介:**侯雪梅(1981-),女,河南商丘人,讲师,硕士,主要研究方向:软件过程管理、软件可靠性分配;刘伟(1966-),男,河南信阳人,高级工程师,主要研究方向:软件质量和控制;高飞(1978-),男,河南南阳人,讲师,硕士,主要研究方向:模式识别与智能系统;李志博(1982-),女,河南商丘人,讲师,硕士,主要研究方向:软件可靠性评估和测试;王婧(1986-),女,河南郑州人,助教,硕士,主要研究方向:可信计算。

性分配问题的目标和约束条件无法精确知道或者有明确定义,为了解决模糊环境下的分配问题,本文引入了模糊逻辑优化法<sup>[6-7]</sup>,在一定程度上,多目标优化本身就是一个模糊问题,就是寻找一种使每个目标都达到满意的解决方案,在模糊多目标软件可靠性分配中,对每个模糊目标和模糊约束定义隶属函数,这些隶属函数的值是衡量关于目标或约束的满意度。基于以上考虑,建立如下的软件可靠性分配模型:

目标函数如下:

$$\min f_1 = 1 - \bar{R}_s \quad (1)$$

$$\min f_2 = \bar{C}_s \quad (2)$$

约束条件如下:

$$g(x_i, v) \leq V \quad (3)$$

$$C_i = \alpha_i \left[ \frac{-t}{\ln(r_i)} \right]^{\beta_i} \left[ x_i + \exp\left(\frac{x_i}{4}\right) \right] \quad (4)$$

$$\bar{C}_s = \sum_{i=1}^n \bar{C}_i = [a, b, c] \quad (5)$$

$$\bar{R}_i = 1 - (1 - \tilde{r}_i)^{n_i} \quad (6)$$

$$\bar{R}_s = f(\bar{R}_1, \bar{R}_2, \dots, \bar{R}_n) = [d, e, f] \quad (7)$$

假设条件为  $1 \leq x_i \leq 10, 0.1 \leq r_i \leq 1 - 10^{-6}$ 。

上面所有式子中,  $i \in (1, 2, \dots, n)$ ,  $n$  是子系统的个数,  $x_i$  是第  $i$  个子系统的冗余模块数目,  $r_i$  是第  $i$  个子系统中冗余模块的软件可靠度。式(1)和式(2)分别是关于软件可靠度和软件系统成本的目标函数,目标函数要求最小化;式(3)是系统的规模,  $V$  是系统规模的限制;式(4)是成本与可靠度之间的关系函数,  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  都是常量,代表第  $i$  个子系统的物理特性;式(5)计算系统的总成本;式(6)计算每个子系统的可靠度;式(7)计算系统总的可靠度,函数  $f$  是基于软件体系架构的可靠性评估模型。

本文中定义  $\bar{R}_s, \bar{C}_s, \tilde{r}_i$  为一个三角形模糊数,  $[a, b, c]$  和  $[d, e, f]$  是三角形隶属函数的三个参数,隶属度由下面的隶属函数确定:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ 或 } x \geq c \\ (x-a)/(b-a), & a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b), & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (8)$$

子系统中冗余模块的软件可靠度也是一个三角模糊数,比如  $[r_i - I, r_i, r_i + I]$ ,其中  $I$  定义的是对应软件可靠度的三角形隶属函数参数大小,子系统的软件可靠度通过下式计算:

$$\begin{aligned} \tilde{r}_i &= [r_i - I, r_i, r_i + I] \Rightarrow \\ &1 - (1 - \tilde{r}_i)^{n_i} = \\ &1 - [(1 - r_i - I)^{n_i}, (1 - r_i)^{n_i}, (1 - r_i + I)^{n_i}] = \\ &[1 - (1 - r_i + I)^{n_i}, 1 - (1 - r_i)^{n_i}, 1 - (1 - r_i - I)^{n_i}] \end{aligned} \quad (9)$$

采用数学期望  $EV$  将三角模糊数转换成一个确定的值,计算系统的总可靠度如下:

$$\begin{cases} \bar{R}_s = [d, e, f] \Rightarrow EV(\bar{R}_s) = (d + 2e + f)/4 \\ E(\bar{R}_s) = (d + 2e + f)/4 \end{cases} \quad (10)$$

计算系统的总成本如下:

$$\begin{cases} \bar{C}_s = [a, b, c] \Rightarrow EV(\bar{C}_s) = (a + 2b + c)/4 \\ E(\bar{C}_s) = (a + 2b + c)/4 \end{cases} \quad (11)$$

## 2 细菌觅食算法

细菌觅食算法是通过模拟细菌觅食的行为而产生的一种群智能优化算法,它的主要操作有三种:趋化操作、繁殖操作

和迁移操作,通过这三个主要算子的迭代优化问题的解。

趋化操作主要模拟细菌随机性地向食物丰富的区域集中的过程,是算法的核心,主要包括翻转和游动两个步骤。翻转是细菌向任意方向移动的单位步长;如果细菌完成一次翻转后的适应值(细菌能量)得到改善,则沿同一方向继续移动若干步,直到适应值不再改善,这一过程称为游动。细菌觅食趋化操作的模型描述如下:

$$P^i(j+1, k, l) = P^i(j, k, l) + C(i)\Delta(i) / \sqrt{\Delta^T(i)\Delta(i)}$$

其中:  $P^i(j, k, l)$  表示细菌个体  $i$  在第  $j$  代的趋化操作,第  $k$  代繁殖操作,第  $l$  代迁徙操作的空间位置;  $C(i)$  表示游动的步长,  $\Delta(i)$  表示翻转的方向。

繁殖操作是在细菌生命周期结束时,以趋化过程中各细菌适应度值(能量)累加和为标准,能量较差的一半细菌由于觅食能力较差而被淘汰,较好的一半细菌觅食能力强而获得繁殖的机会,新繁殖的个体取代淘汰的个体,使种群维持在一定规模。

迁移操作是在细菌完成一定次数的繁殖后,以一定概率选取部分细菌随机将其驱散到搜索空间,其余细菌位置保持不变,目的是为了增加算法的全局寻优能力,减小陷入局部极小值的机会。

## 3 分布估计算法

分布估计算法是一种基于概率分布的随机进化算法。和传统的群智能算法相比较,在算法生成后代种群的过程中既没有交叉、也没有变异,取而代之的是从一个概率分布中采样新的个体生成新的种群,而此概率模型是根据包含有从前代种群中挑选出来的个体的数据估计而来。应用于概率分布估计算法的分布模型目前主要有贝叶斯分布和高斯分布<sup>[8]</sup>。

基于正态分布的随机爬山法是出现比较早的一种基于高斯分布的随机优化算法<sup>[9]</sup>,另外单变量实数编码分布估计算法和变量无关型分布估计算法也是把高斯分布作为描述连续解空间的概率模型<sup>[10]</sup>。这些算法借助于概率分布模型,能很好地描述变量间的相互关系,从而有效地解决多变量相关的优化问题,弥补群智能优化算法的研究内容,为解决复杂的优化问题提供了新的思路。

## 4 基于群智能的软件可靠性分配

从上面的研究可以看出,细菌觅食算法中细菌局部搜索能力的实现主要是通过趋化算子对邻域的随机搜索并根据适应度进行方向调整来获得,但算法收敛速度慢,在趋化周期结束后,算法根据细菌适应值进行繁殖,有利于提高寻优精度,但算法容易陷入局部最优;分布估计算法则侧重于全局寻优,将两者结合起来,充分利用各自的优点,实现优势互补,用来处理多目标函数最优解的求解问题是一个很好的方法<sup>[11-12]</sup>。为了方便理解求解多目标函数最优解问题,作如下定义。

**定义1** 设有  $m$  个优化目标,且这  $m$  个优化目标可能是互相冲突的,优化目标可表示为:

$$f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)]^T$$

找寻  $x^* = [x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*]^T$ , 使  $f(x^*)$  在满足约束的同时达到最优。如果  $x^* \in \mathbf{R}^n$ , 不存在  $x \in \mathbf{R}^n$  和任何的  $i = 1, 2, \dots, m$ , 使得  $f_i(x) \leq f_i(x^*)$ , 并且至少在一点上  $f_i(x) < f_i(x^*)$ , 把  $x^*$  叫作 Pareto 最优解,也叫作非支配解,通常 Pareto 边界上最优解不只一个,而是存在一个最优解集。

多目标优化算法的工作就是构造非支配集,并使非支配集不断逼近 Pareto 最优解集,最终达到最优。

**定义2** 设  $P$  为一个大小为  $n$  的集合,  $P$  中每个个体均有  $m$  个属性,  $f_i$  是每个属性的评价函数( $i = 1, 2, \dots, m$ ),  $P$  中个体之间的支配关系定义如下:

$\forall x, y \in P$ , 若  $f_i(x) \leq f_i(y)$ ; 且  $\exists k \in \{1, 2, \dots, m\}$ , 使  $f_k(x) < f_k(y)$ , 则称  $x$  支配  $y$ , 此时  $x$  为非支配的 (Non-Dominated),  $y$  为被支配的<sup>[13-14]</sup>。

基于上面的研究,本文提出了一种基于多目标优化的分布估计细菌觅食算法 (Multi-objective Estimation of Distribution-Bacterial Foraging Algorithm, MEDA-BFA), 用来求解多目标软件可靠性冗余分配问题, 算法具体实现如下:

1) 初始化算法参数。细菌总规模数为  $S$ , 迁移次数为  $N_{ed}$ , 繁殖次数为  $N_{re}$ , 趋化次数为  $N_c$ , 游动次数为  $N_s$ , 进化种群规模为  $N$ 。

2) 在细菌空间中生成一个初始种群  $P$ , 将种群  $P$  中的非支配解加入 Pareto 最优解集。

3) 分布式估计繁殖操作。对能量较好的细菌进行高斯分布估计再生, 更新方法如下:

$$\begin{cases} X_{\mu, \sigma} = r_{\text{norm}} \sigma + \mu \\ r_{\text{norm}} = \sqrt{-2 \ln r_1} \sin(2\pi r_2) \end{cases} \quad (12)$$

其中  $r_1$  和  $r_2$  为区间  $[0, 1]$  均匀分布的随机数, 更新  $r_{\text{norm}}$  的公式叫作 BOX-Muller 公式<sup>[15]</sup>,  $\mu, \sigma$  分别是细菌较优位置的分维度均值和标准差向量。

4) 根据分布估计算法产生新个体, 按照新个体和原个体之间的支配关系产生一个规模在  $N$  到  $2N$  之间的复合种群。

5) 将复合种群的非支配解加入 Pareto 最优解集, 选出 Pareto 最优解集中的非支配个体。当非支配个体数大于  $N$  时, 对非支配个体按拥挤度距离从大到小排序, 选择前  $N$  个非支配个体保留在 Pareto 最优解集中, 其余个体全部删除。

6) 从复合种群中按照细菌能量大小择优选出新一代进化种群。

7) 细菌的趋化操作。在 Pareto 最优解集中随机选出一个解  $Opt(i, :)$ , 进化种群中的细菌的位置可以按照下面的公式更新:

$$\begin{cases} Opt(i, :) = wOpt(i, :) + C(j)\Delta(j) / \sqrt{\Delta^T(j)\Delta(j)} \\ P(N-S+j, :) = Opt(i, :) \end{cases} \quad (13)$$

其中:  $j \in (1, 2, \dots, S)$ ,  $w$  为惯性因子,  $C(j)$  为趋化步长,  $P(N-S+j, :)$  为进化种群中第  $N-S+j$  个个体。

8) 如果达到最大迭代次数或者其他终止条件, 则停止运行, 输出 Pareto 最优解集; 否则返回 3)。

基于 MEDA-BFA 群智能算法的模糊多目标软件可靠性冗余分配的流程如图 1 所示。

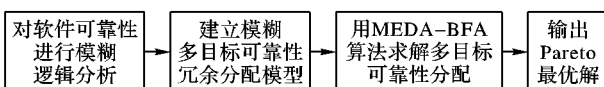


图1 基于 MEDA-BFA 群智能算法的软件可靠性分配流程

首先由于软件特性的不确定性, 对其可靠性和成本进行模糊逻辑分析, 在冗余体系结构的基础上建立模糊多目标可靠性冗余分配模型, 根据上述提出的 MEDA-BFA 群智能算法求出该模型的最优解, 即实现了可靠性分配。

## 5 实验计算结果

选取对可靠性、成本、规模都有限制的软件系统进行可靠性分配实验, 把可靠度和成本作为目标函数, 软件规模作为约束条件, 对一个含有 5 个子系统的桥式系统进行了软件可靠性冗余分配实验, 如图 2 所示。

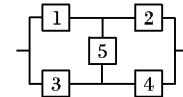


图2 桥式系统结构

系统的目标函数是:

$$\begin{cases} \min f_1 = 1 - (d + 2e + f)/4 \\ \min f_2 = (a + 2b + c)/4 \end{cases} \quad (15)$$

软件规模计算如式 (16), 软件成本计算如式 (17), 系统可靠度计算如式 (18) 所示, 其他约束条件同式 (3) ~ (6)。

$$\sum_{i=1}^5 v_i \times x_i \leq V \quad (16)$$

$$C_i = \alpha_i \left[ \frac{-1000}{\ln(r_i)} \right]^{\beta_i} \left[ x_i + \exp\left(\frac{x_i}{4}\right) \right]; \quad i \in (1, \dots, 5) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_s = & \bar{R}_1 \bar{R}_2 + \bar{R}_3 \bar{R}_4 + \bar{R}_1 \bar{R}_4 \bar{R}_5 + \\ & \bar{R}_2 \bar{R}_3 \bar{R}_5 - \bar{R}_1 \bar{R}_2 \bar{R}_3 \bar{R}_4 - \bar{R}_1 \bar{R}_2 \bar{R}_3 \bar{R}_5 - \\ & \bar{R}_1 \bar{R}_2 \bar{R}_4 \bar{R}_5 - \bar{R}_1 \bar{R}_3 \bar{R}_4 \bar{R}_5 - \bar{R}_2 \bar{R}_3 \bar{R}_4 \bar{R}_5 + \\ & 2\bar{R}_1 \bar{R}_2 \bar{R}_3 \bar{R}_4 \bar{R}_5 = [d, e, f] \end{aligned} \quad (18)$$

基于分布估计的细菌觅食算法参数设置中, 细菌总规模数  $S$  为 100, 迁移次数  $N_{ed}$  为 3, 繁殖次数  $N_{re}$  为 5, 趋化次数  $N_c$  为 2, 游动次数  $N_s$  为 2, 进化种群规模  $N$  为 20, 惯性因子  $w$  和趋化步长  $C$  取 0 到 1 之间随机数, Pareto 最优解集的上限设置为 50。

对模糊目标和模糊约束条件设置不同的三角形隶属函数参数  $I$ , 不同的  $I$  对应不同的 Pareto 最优解, 如图 3 所示, 所有的实验计算结果如表 1 所示, 表中也给出了一组最优解。

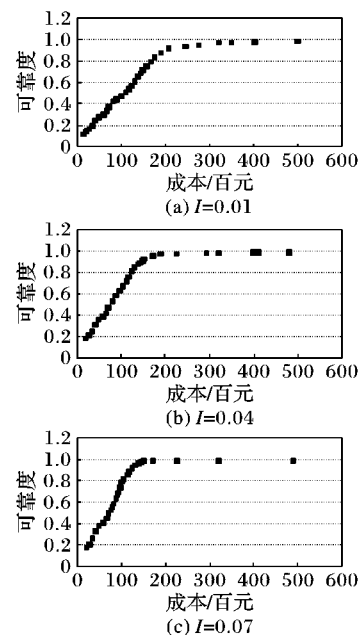


图3 不同的  $I$  对应的 Pareto 最优解

## 6 结语

本文对模糊多目标的软件可靠性分配问题进行了研究。



主要关注软件系统中模块的可靠性和冗余水平,建立模糊多目标软件可靠性分配数学模型,引入三角形隶属度函数用来处理模糊目标和模糊约束,提出了基于分布估计算法的细菌觅食优化法(MEDA-BFA),用来优化多目标可靠性分配,算法有效结合了分布估计算法良好的全局寻优能力和细菌觅食算

法的局部寻优能力强的优点,实验计算结果说明该算法在收敛性和分散性两方面都有很好的表现,是一种有效的多目标优化算法。多目标软件可靠性分配比单一目标软件可靠性能够获取的信息更多,Pareto 最优解能够帮助决策者在软件可靠性和软件成本之间找到一种平衡。

表1 实验计算结果

$I$	非支配解个数	可靠度平均值( $f_1$ )	成本平均值( $f_2$ )	一组最优解											
				$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$f_1$	$f_2$
0.01	41	0.79	143.23	3	1	3	4	1	0.721	0.653	0.832	0.754	0.786	0.998	149.78
0.02	46	0.80	156.49	2	3	2	1	2	0.826	0.832	0.667	0.721	0.568	0.997	157.35
0.03	49	0.65	147.98	2	3	2	4	1	0.779	0.887	0.867	0.654	0.586	0.998	154.27
0.04	37	0.76	178.56	4	3	3	2	1	0.776	0.843	0.902	0.791	0.443	0.998	165.69
0.05	43	0.74	163.52	1	2	4	2	1	0.904	0.885	0.703	0.467	0.716	0.998	161.24
0.06	48	0.68	120.26	3	4	2	1	1	0.625	0.838	0.815	0.655	0.764	0.998	140.36
0.07	35	0.71	137.35	3	4	1	2	2	0.629	0.757	0.802	0.554	0.722	0.999	149.78
0.08	32	0.72	115.67	4	3	1	1	1	0.728	0.803	0.745	0.656	0.652	0.999	168.11
0.09	41	0.76	109.38	3	4	1	2	2	0.906	0.859	0.501	0.687	0.386	0.998	176.43
0.1	38	0.83	101.51	4	2	3	1	1	0.511	0.913	0.889	0.783	0.775	0.999	174.62

## 参考文献:

- [1] KUO W, PRASAD V R, TILLMAN F A, *et al.* Optimal reliability design[M]. London: Cambridge University Press, 2001: 235 - 238.
- [2] PASSINO K M. Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2002, 22(3): 52 - 67.
- [3] MILLER S, AIRAGHI S, MARCHELO J, *et al.* Optimization algorithms based on a model of bacterial chemotaxis[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior. Paris: MIT Press, 2000: 375 - 384.
- [4] MUHLENBEIN H, PAASS G. From recombination of genes to the estimation of distributions I. binary parameters[C]// Proceedings of the 4th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 178 - 187.
- [5] LARRA N P, LOZANO J A. Estimation of distribution algorithms - a new tool for evolutionary computation[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [6] EBRAHIMPOUR V, SHEIKHALISHAHI M. Application of multi-objective particle swarm optimization to solve a fuzzy multi-objective reliability redundancy allocation problem[C]// Proceedings of IEEE International Systems Conference. Montreal, Canada: IEEE, 2011: 326 - 333.
- [7] RAVI V, REDDY P J, ZIMMERMANN H J. Fuzzy global optimization of complex system reliability[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2000, 8(10): 241 - 248.
- [8] 周树德, 孙增圻. 分布估计算法综述[J]. 自动化学报, 2007, 33(2): 113 - 124.
- [9] RUDLOF S, KOPPEN M. Stochastic hill climbing by vectors of normal distributions[C]// Proceedings of the 1st Online Workshop on Soft Computing. Nagoya: [s. n.], 1996: 60 - 70.
- [10] LARRA N P, ETXEBERRIA R, LOZANO J A, *et al.* Optimization in continuous domains by learning and simulation of Gaussian networks[C]// Proceedings of the 2000 Genetic and Evolutionary Computation Conference Workshop Program. Las Vegas: [s. n.], 2000: 201 - 204.
- [11] 杨尚君, 王社伟, 陶军. 基于混合细菌觅食算法的多目标优化方法[J]. 计算机仿真, 2012, 29(6): 218 - 223.
- [12] 刘小龙, 赵奎领. 基于免疫算法的细菌觅食优化算法[J]. 计算机应用, 2012, 32(3): 634 - 637.
- [13] 陈绍新. 多目标优化的粒子群算法及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [14] 刘淳安. 动态多目标优化进化算法及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 8 - 20.
- [15] 刘小龙, 李荣钧, 杨萍. 基于高斯分布估计的细菌觅食优化算法[J]. 控制与决策, 2011, 26(8): 1233 - 1238.

(上接第 1138 页)

- [3] 刘孟仁, 刘庆海. 软件可视化技术及其应用研究[J]. 计算机应用研究, 2002, 19(6): 26 - 28.
- [4] DIEHL S. Software visualization: visualizing the structure, behavior, and evolution of software[M]. Heidelberg: Springer, 2007.
- [5] MARTI R. Arc crossing minimization in graphs with GRASP[J]. IIE Transactions, 2001, 33(10): 913 - 919.
- [6] WANG X B, WANG H, LIU C. Automatic hierarchical layout algorithm for UML class diagram[J]. Journal of Software, 2009, 20(6): 1487 - 1498.
- [7] 张毅坤, 朱伟, 王凯, 等. 一种基于继承次序与相关度的布图算法[J]. 计算机应用, 2009, 29(5): 1373 - 1375.
- [8] OGAWA M, MA K-L. Code\_swarm: a design study in organic software visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009, 15(6): 1097 - 1104.
- [9] 欧胜高, 刘超. 一种基于通道的层次布图算法的研究和实现[J]. 计算机应用研究, 2004, 23(11): 173 - 177.
- [10] 窦长威. 层次信息可视化技术的一种实现方法[J]. 工程地质计算机应用, 2007(2): 11 - 15.
- [11] HARRIGAN M, HEALY P. Efficiently drawing a significant spanning tree of a directed graph[C]// APVIS'07: Proceedings of the 6th International Asia-Pacific Symposium on Visualization. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 53 - 59.
- [12] BACHMAIER C. A radial adaptation of the Sugiyama framework for visualizing hierarchical information[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(3): 583 - 594.
- [13] 孙军欢. 专用系统人机界面技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
- [14] 赵国庆, 杨南应, 贾振洋, 等. 概念图的布局算法研究[J]. 开放教育研究, 2005, 11(5): 32 - 37.
- [15] 孙昌爱, 刘超, 金茂忠. 一种有效的软件结构图的布图算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(6): 706 - 708.