

文章编号: 2095-2163(2020)08-0105-05

中图分类号: TH133.3;TP274

文献标志码: A

基于改进人工鱼群的信号盲源分离方法

方宇, 余晨钟

(上海工程技术大学 城市与轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 基于人工鱼群算法收敛速度较快、具有良好的全局寻优能力等优点, 本文将人工鱼群算法运用到信号的盲源分离中, 提出一种基于改进人工鱼群的信号盲源分离方法。该方法以峭度的绝对值之和作为目标函数, 采用独立分量分析的方法, 采用改进的人工鱼群算法寻找目标函数最大值, 进而确定最优分离矩阵, 对信号进行分离。仿真结果表明, 该方法相比原方法, 在分离性能、算法收敛性和运算速度方面均具有明显优势。

关键词: 人工鱼群算法; 独立成分分析; 盲源分离

Blind source separation method of signal based on improved artificial fish swarm

FANG Yu, YU Chenzhong

(College of Urban and Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

【Abstract】 Based on the advantages of the artificial fish swarm algorithm, such as fast convergence and good global optimization ability, the artificial fish swarm algorithm is applied to the blind source separation of signals, and a signal blind source separation method based on the improved artificial fish swarm algorithm is proposed. In this method, the sum of the absolute value of kurtosis is taken as the objective function, and the improved artificial fish swarm algorithm is used to find the maximum value of the objective function. Simulation results show that the proposed method has obvious advantages over the basic artificial fish swarm algorithm in terms of separation performance, algorithm convergence and operation speed.

【Key words】 artificial fish swarm algorithm; rolling bearing; blind source separation

0 引言

在工程实际中, 由于不同源之间存在混叠、低信噪比和噪声干扰等问题, 使得信号分析变得困难。盲源分离(BSS)作为一种新的信号处理方法, 可从观测信号中分离特征信号^[1-2]。

20世纪80年代以来, 国内外学者和专家展开了信号盲源分离的研究, 取得许多研究进展, 提出了大量的、有效的信号盲源分离算法^[3]。其中, 基于独立分离分析的盲源分离方法具有分离效果好, 速度快等优点^[4], 其优化效果取决于分离矩阵的确定。

人工鱼群算法(artificial fish swarm algorithm, AFSA)^[5]由李晓磊于2002年提出, 它通过模拟鱼群的觅食等行为进行寻优。虽然该算法具有收敛速度快、全局收敛性好等优势, 但算法后期存在收敛精度低、易陷入局部最优等不足。黄华娟等^[6]通过改变步长和拥塞因子, 提高了算法的效率; 曲良东等^[7]提出了一种基于遗传算法的人工鱼群算法, 为实现人工鱼的个体跳跃、提高算法的收敛速度和全局搜索能力, 引入遗传算法中的交叉和变异因子; 张梅凤等^[8]结合小生境思想, 并引入变异算子来改进人工

鱼群算法。

本文对人工鱼群算法的视野和步长加以改进, 将改进的人工鱼群算法应用于盲源分离目标函数的优化, 提出了一种基于改进人工鱼群的盲源分离方法, 取得了较好的分离效果。

1 盲源分离基本理论和方法

1.1 盲源分离基本理论

假设 N 个统计独立的未知信号 $S(t) = [s_1(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_N(t)]^T$, 经过未知信息通道 A 的传输后, 由 M 个传感器检测获得 M 个观测信号 $X(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_M(t)]^T$ 。整个传输过程的数学模型为:

$$X(t) = AS(t) + n(t), \quad (1)$$

其中, $X(t)$ 为 M 维观测矢量; $S(t)$ 为 N 维未知源信号矢量; $n(t)$ 为 M 维信道噪声; A 为 $M \times N$ 维传递函数矩阵。盲源分离的问题是寻找一个分离矩阵 W , 通过该矩阵将观测信号 $X(t)$, 从源信号 $S(t)$ 的各个分量中分离出来。设 $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), y_3(t), \dots, y_M(t)]^T$, $Y(t)$ 为源信号 $S(t)$ 估计矢量, 则分离系统的数学描述为:

作者简介: 方宇(1974-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 车辆设计及车辆运行安全监测; 余晨钟(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机械状态监测与故障诊断。

收稿日期: 2019-12-12

$$Y(t) = WX(t). \quad (2)$$

进行盲源分离通常作以下假设:

- (1) 信号源的个数与传感器的个数相同。
- (2) 源信号相互统计独立。
- (3) 源信号各矢量均值为0,至多有一个是高斯信号。

1.2 独立成分分析法

独立成分分析(independent component analysis, ICA)是目前应用最广泛的盲源分离方法之一。ICA可在统计数据中寻找隐藏因素或者成分,用于揭示随机变量或者信号中隐藏的信息。

独立成分分析方法的处理对象是混合信号,该信号由相互统计独立的原始信号线性组合形成。处理目的,是将各原始信号从混合信号中分离提取出来,并通过一定的优化算法,将多通道观测信号按照统计独立原则分解成若干相互独立的源信号^[9]。由于在实际情况下,信号多为复杂的复合信号,因此本文采用峭度的绝对值作为目标函数,以求更有效的对信号进行分离。函数定义如下:

$$G(y) = \sum_{i=1}^n |kurt(y_i)| = \sum_{i=1}^n |E(y_i^4) - 3[E(y_i^2)]^2|. \quad (3)$$

2 改进人工鱼群算法

2.1 基本人工鱼群算法

假设在一个 n 维目标搜索空间中,由 N 条人工鱼组成一个群体,每天人工鱼的状态可表示为向量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_i (i = 1, \dots, n)$, 为欲寻优的变量。人工鱼当前所在位置的食物浓度表示为 $Y = f(X)$, $f()$ 为目标函数。人工鱼个体间距离表示为 $d = \|x_i - x_j\|$ 。Visual 表示人工鱼的感知范围; trynumber 表示人工鱼每次觅食最大试探次数; Step 为人工鱼移动步长; δ 为拥挤度因子。

(1) 觅食行为。鱼会循着食物多的方向游动,人工鱼 X_i 在其视野内随机选择一个状态 X_j :

$$X_j = X_i + rand() * visual. \quad (4)$$

分别计算它们的目标函数值进行比较。如果发现 Y_i 比 Y_j 优(Y_i 和 Y_j 分别为 X_i 和 X_j 的适应度值),则 X_i 向 X_j 的方向移动一步:

$$X_i^{next} = X_i + rand() * step * \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|}. \quad (5)$$

否则, X_i 继续在其视野内选择状态 X_j , 判断是否满足前进条件。反复尝试 trynumber 次后,仍没有满足前进条件,则随机移动一步使 X_j 到达一个新的

状态:

$$X_i^{next} = X_i + rand() * step. \quad (6)$$

(2) 聚群行为。为了保证自身的生存和避免伤害,鱼类在游动时会成群结队地聚集在一起。人工鱼 X_i 在其视野 $d_{ij} < visual$ 内寻找伙伴数目 n_f 及中心位置 X_c , 若 $Y_c/n_f < \delta Y_i$, 则 X_i 会向伙伴的中心位置移动一步,否则执行觅食行为:

$$X_i^{next} = X_i + rand() * step * \frac{X_c - X_i}{\|X_c - X_i\|}. \quad (7)$$

(3) 追尾行为。追尾行为即鱼在视野中朝最佳方向运动的行为。人工鱼 X_i 寻找其视觉领域 $d_{ij} < visual$ 内具有最高适应性的个体 X_j , 其适应度为 Y_j , 并在人工鱼 X_j 的视觉领域寻找伙伴数目 n_f 。若 $Y_c/n_f < \delta Y_i$, 则 X_i 朝 X_j 位置移动一步,否则执行觅食行为。

$$X_i^{next} = X_i + rand() * step * \frac{X_j - X_i}{\|X_j - X_i\|}. \quad (8)$$

(4) 随机行为。随机行为是人工鱼在视野内随机移动的行为,它是觅食行为的缺省行为。

(5) 公告板。在人工鱼的每一个行为之后,它的状态将与公告栏中的状态进行比较。如果优于公告栏的状态,则公告栏的人工鱼将被人工鱼取代,否则不变。最终,根据公告板中的记录得到寻优结果。

2.2 视野和步长的改进

在人工鱼群算法中,视野(visual)和步长(step)是两个重要的参数。当步长和视野较大时,人工鱼的全局搜索能力较强,收敛速度较快,但算法的收敛精度较低,后期人工鱼会陷入局部最优;当视野和步长较小时,人工鱼的收敛精度较高,但算法的收敛速度较低,容易陷入局部均值,难以逃逸。因此,有必要在算法的不同阶段选择合适的视野和步长,以保证算法的收敛速度、结果的准确性,防止算法陷入局部最优。

本文采用动态视野和步长。在算法早期,采用大视野和步长来提高全局搜索能力和收敛速度;随着迭代次数的增加,通过调节因子减小视野和步长,以增强局部搜索能力,提高收敛精度。改进后的视野和步长计算公式如下:

$$\begin{cases} Visual_i = k * \mu(t) * d_{i,j}, \\ Step_i = \mu(t) * Visual_i, \\ \mu(t) = \mu_{initial} - \exp(-\lambda * (t/m)). \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\mu(t)$ 为调节因子,其对视野和步长起到动态调节的作用。 $\mu(t)$ 中 $\mu_{initial}$ 为收敛因子 μ 的初始值; t 为当前迭代次数; t_{total} 为迭代总次数常量; k

$\in (0,1)$ 为限制因子,其值取决于函数自变量的搜索范围; λ, m 均为非线性调节系数。针对优化算法所涉及具体问题的复杂度,可以改变算法中参数的初始值和非线性调节系数,从而使算法既能提高收敛速度,又能保证收敛精度。

2.3 改进的人工鱼群算法流程

综上所述,改进的人工鱼群算法流程如下:

Step 1 对人工鱼群规模 N 、鱼群视野 $Visual$ 、移动步长 $Step$ 、拥挤度因子 δ 、尝试次数 $trynumber$ 、限制因子 k 、最大迭代参数 t_{total} 、非线性调节参数 λ 、非线性调节参数 m 进行初始化。

Step 2 计算出每条人工鱼的适应度值,并与公告板的状态比较,优则替换。

Step 3 根据式(9)计算此次人工鱼的视野和步长。

Step 4 执行人工鱼的四种行为:觅食、群集、追尾和随机行为,并更新每条人工鱼的位置和公告板的状态。

Step 5 判断当前迭代次数是否达到预设最大迭代次数。若满足条件,算法终止;否则,返回步骤 3 继续迭代。

2.4 基于改进人工鱼群的盲源分离方法

通过改进的人工鱼群算法,对 ICA 算法的目标函数进行优化,利用基于改进人工鱼群的盲源分离方法,得到估计的源信号流程如图 1 所示。

3 仿真实验

3.1 仿真信号

为了验证基于改进人工鱼群算法的盲源分离方法在信号分离中的有效性,选取 4 个模拟信号作为源信号进行研究。仿真信号公式分别表示为:

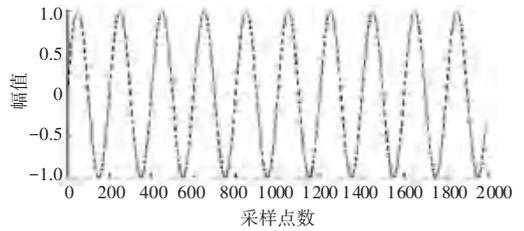
$$S_1 = \sin(0.01 * \pi * t), \tag{10}$$

$$S_2 = \text{sawtooth}(0.01 * \pi * t), \tag{11}$$

$$S_3 = \text{square}(0.02 * \pi * t), \tag{12}$$

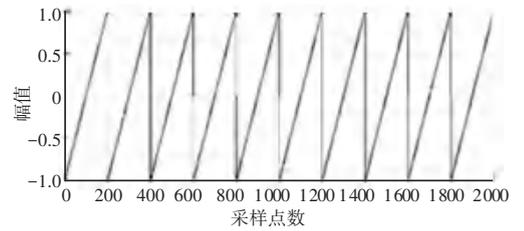
$$S_4 = \sin(0.005 * \pi * t) * \sin(0.3 * \pi * t). \tag{13}$$

4 个源信号波形如图 2 所示。



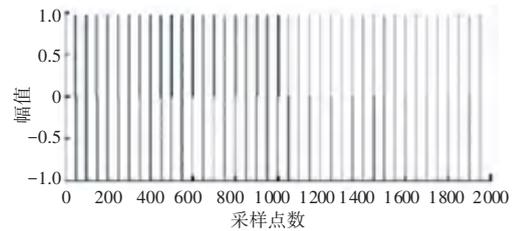
(a) 信号源 S_1

(a) Signal S_1



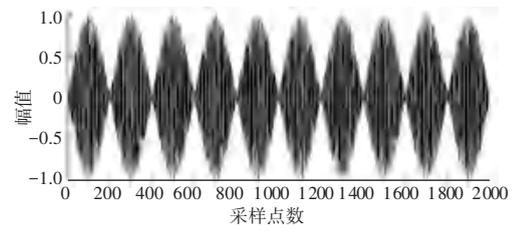
(b) 信号源 S_2

(b) Signal S_2



(c) 源信号 S_3

(c) Signal S_3



(d) 源信号 S_4

(d) Signal S_4

图 2 源信号

Fig. 2 Signal source

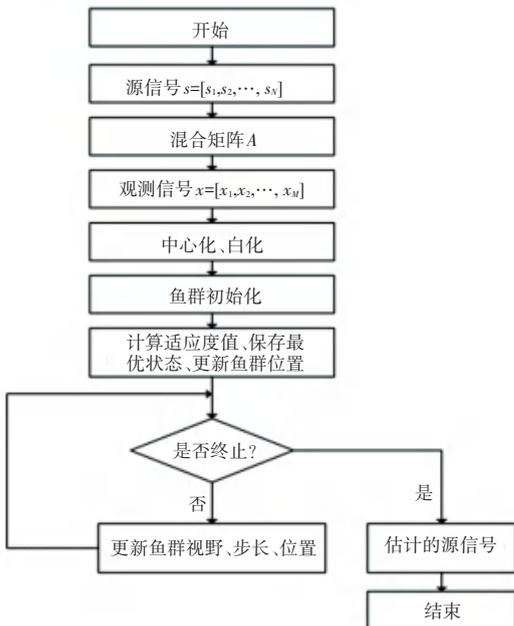


图 1 基于改进人工鱼群的盲源分离流程

Fig. 1 Flow chart of blind source separation based on improved artificial fishswarm

用随机正态分布矩阵 A 对信号进行混合叠加,得到观测信号如图 3 所示。

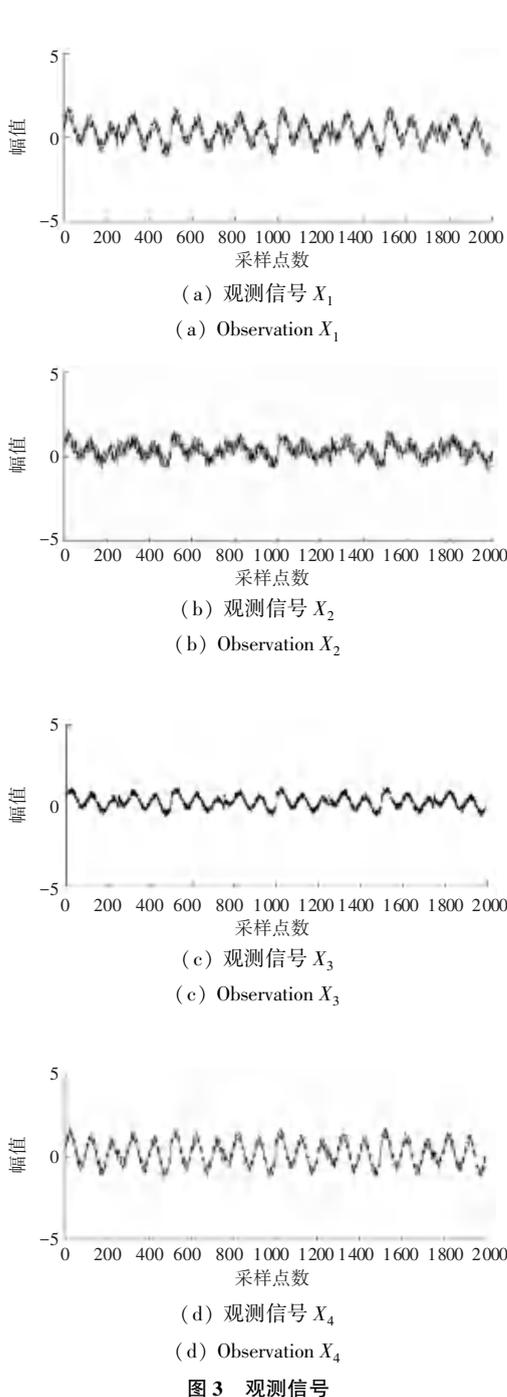


图3 观测信号

3.2 分离性能比较分析

图4和图5显示了基于基本人工鱼群算法和改进人工鱼群的盲源分离信号图。将两种方法所得分离信号与仿真源信号进行对比,通过计算得到基于基本人工鱼群的盲源分离方法和基于改进人工鱼群的盲源分离方法与源信号的分离精度系数见表1和表2。表中数据显示,基于改进人工鱼群的盲源分离方法相比基于基本人工鱼群的盲源分离方法的分离精度更高,具有更好的分离效果。

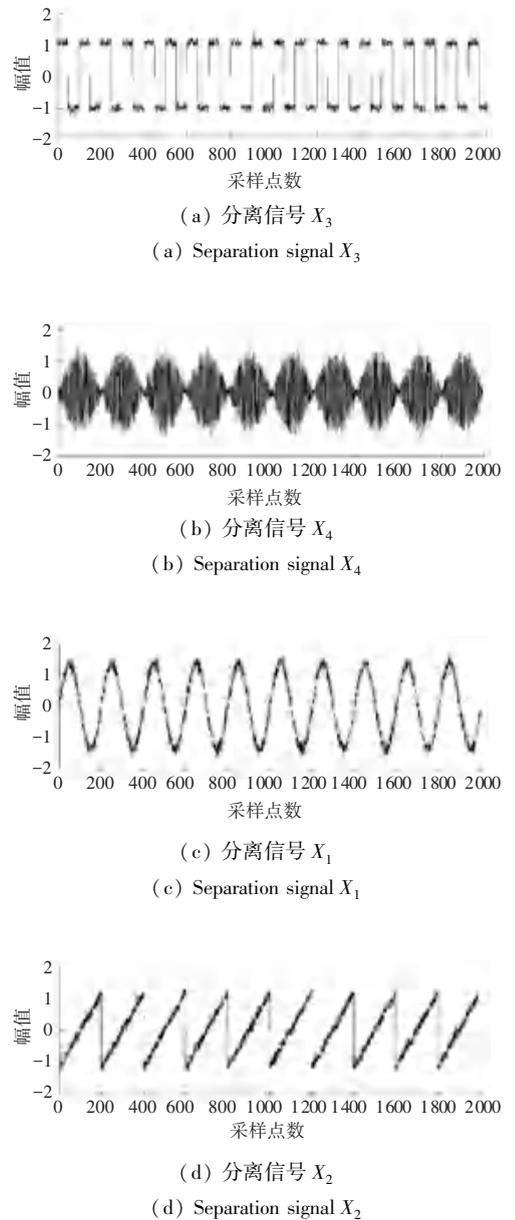


图4 基于基本人工鱼群的盲源分离信号

Fig. 4 Separate signal X

表1 基于基本人工鱼群盲源分离信号与源信号分离精度系数
Tab. 1 Blind source separation signal and source signal separation accuracy coefficient based on basic artificial fish swarm

源信号	S_1	S_2	S_3	S_4
分离信号	3	4	1	2
相似系数	0.990	0.992	0.993	0.990

表2 基于改进人工鱼群盲源分离信号与源信号分离精度系数
Tab. 2 Blind source separation signal and source signal separation accuracy coefficient based on improved artificial fish swarm

源信号	S_1	S_2	S_3	S_4
分离信号	2	1	4	3
相似系数	0.995	0.996	0.998	0.994

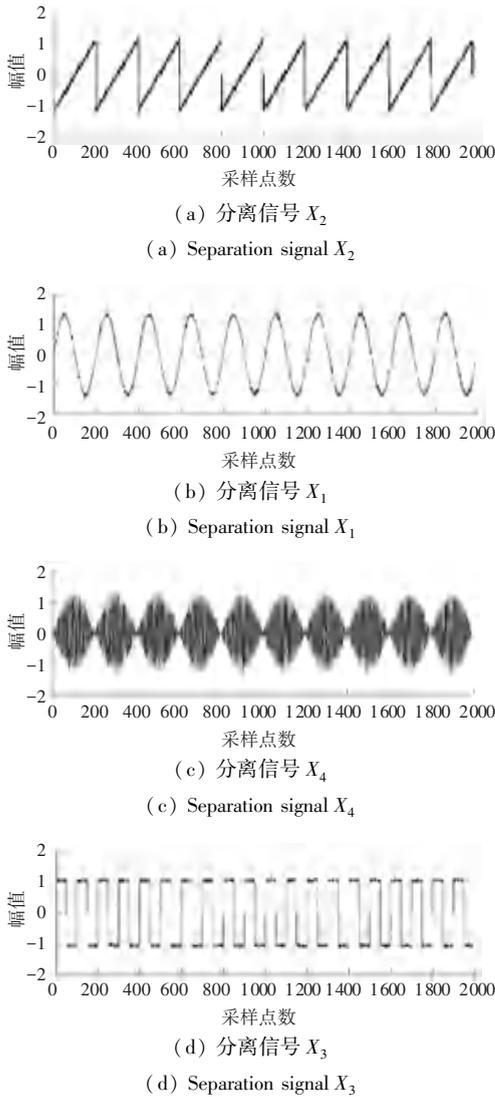


图 5 基于改进人工鱼群的盲源分离信号
Fig. 5 Separate signal X

3.3 收敛性和运算速度比较分析

在仿真算法中, 算法种群数量均设置为 12; 计算机 CPU 为 i5 - 4210U, 内存为 8GB; 采用 Matlab2014b 进行仿真。两种寻优算法的收敛曲线如图 6 所示。从图中可知, 基于基本人工鱼群盲源分离方法在 37 代进入收敛, 而基于改进人工鱼群盲源分离方法在 13 代就已经进入收敛。由表 3 可知, 基于基本人工鱼群盲源分离方法每次迭代运行时间为 0.106 5 s, 而基于改进人工鱼群盲源分离方法每次迭代运行时间为 0.006 3 s。因此, 在算法的收敛性和速度上, 基于改进的人工鱼群盲源分离方法具有更明显的优势。

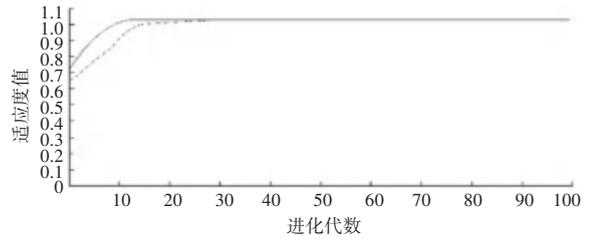


图 6 中实线和虚线分别代表基于改进人工鱼群的盲源分离和基于人工鱼群盲源分离收敛曲线。

图 6 收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve

表 3 运算时间

Tab. 3 Computing time

算 法	算法每次迭代运行时间/s
基于基本人工鱼群盲源分离方法	0.106 5
基于改进人工鱼群盲源分离方法	0.006 3

4 结束语

本研究将具有良好寻优能力的人工鱼群算法进行改进, 提出了基于改进人工鱼群的信号盲源分离方法。仿真结果表明, 相对基本人工鱼群盲源分离方法, 改进人工鱼群的盲源分离方法在分离性能、收敛性和运算速度均具有明显的优势。

参考文献

- [1] JIAO Weidong, YANG Shixi, WU Zhaotong. Study on the technique for interference removal based on blind source Separation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 23(3): 368-371.
- [2] 焦卫东, 杨世锡, 吴昭同. 基于盲源分离旋转机械干扰消除技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2004, 23(3): 368-371.
- [3] 刘据, 聂开宝. 何振亚. 非线性混叠信号的可分离性及分离方法研究[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(1): 54-61.
- [4] ZHANG K, CHAN L W. Convolutional blind source separation by efficient blind deconvolution and minimal filter distortion [J]. Neurocomputing, 2010, 73(13-15): 2580-2588.
- [5] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法-人工鱼群算法[D]. 浙江大学, 2003.
- [6] 黄华娟, 周永权. 改进型人工鱼群算法及复杂函数全局优化方法[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2008(1): 194-197.
- [7] 曲良东, 何登旭. 混合变异算子的人工鱼群算法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(35): 50-52.
- [8] 许恒迎, 孙伟斌, 张霞, 等. 自适应视野和步长的局部邻域人工鱼群算法[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(7): 2815-2821.
- [9] LEE T W, GIROLAMI M, SEJNOWSKI T J. Independent component analysis using an extended infomax algorithm for mixed subgaussian and supergaussian sources. [J]. Neural Computation, 1999, 11(2).