

文章编号:1007-2780(2015)03-0499-06

基于量子免疫蛙跳算法的图像增强研究

周 原*, 张韧志

(黄淮学院 信息工程学院, 河南 驻马店 463000)

摘要:针对图像增强的特点,提出量子免疫蛙跳算法。该算法按适应度大小排序的青蛙个体进行量子编码,同时蛙跳移动离散化;通过动态调整量子蛙跳旋转门实现量子染色体中所有的量子比特都朝着与最优解对应的量子比特基态动态优化偏转;采用 Hadamard 门对量子位变异,基于阴性选择算法对蛙跳免疫进行像素匹配,并给出了图像增强过程。实验仿真表明,本文算法对图像增强效果的轮廓和细节更加清晰,层次感强,结构相似性 SSIM 其值较好,为 0.9849。

关键词:量子免疫;阴性选择;增强

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20153003.0499

Image enhancement research based on quantum immune leap frog

ZHOU Yuan*, ZHANG Ren-zhi

(*Department of Information Engineering, Huanghuai University,
Zhumadian 463000, China*)

Abstract: According to the characteristic of image enhancement, quantum immune frog leap algorithm is proposed. Frog individuals were quantum-encoded by this algorithm according to the order of fitness degree, meanwhile, the leap frog movements were discretized. Through the dynamic adjustment of the revolving gate of quantum leapfrog, all quantum bits of the quantum chromosome were deflected towards the dynamic optimization of the ground state of quantum bits which were corresponded to the optimal solution. Qubits were mutated by adopting Hadamard gate, the leap frog immunization was pixel-matched based on the feminine selection algorithm, and image enhancement process was provided. The experimental result show that effect of outline and details of QILF is more clearly, the better SSIM is 0.9849.

Key words: quantum immune; negative selection; enhancement

1 引 言

图像增强使原来不清晰的图像变得清晰,强

调整体或者局部感兴趣的特征,扩大图像中物体特征之间的差别,改善图像质量、丰富信息量^[1]。

双向滤波器(Bidirectional filter, BF)算法使用空间可变加权函数在高于信号维数的空间对像

收稿日期:2015-01-26;修订日期:2015-03-14.

基金项目:河南省科技攻关重点项目(No. 122102210404);河南省科技攻关项目成果(No. 9412012Y1574)

* 通信联系人, E-mail: hhzhouyuan@qq.com

素信号进行加权平均处理,其计算过程无需迭代,滤波效果明显,但是可能产生伪轮廓^[2];蛙跳(Leap Frog, LF)算法具有概念简单、参数少、快速跳出局部收敛向全局最优进化和易于编程实现等优势,在图像增强上已开始使用,但是处理起来较难搜索到最优解^[3];基于阈值蛙跳(Frog Threshold, FT)选择的策略,可减少个体空间的差异,改善算法收敛速度,但是图像增强效果并不理想,出现叠影^[4];量子进化(Quantum Evolution, QE)算法在图像增强上,具有处理速度快的特性,但求解高维连续优化问题时效果不够理想,导致该缺陷的主要原因是在进化后期种群多样性迅速下降,缺乏局部细化搜索能力,在避免早熟收敛和量子种群协同进化机制等方面还有待于进一步研究与完善^[5];量子遗传(Quantum Genetic, QG)算法较传统进化算法具有更好性能:如用特殊的量子位表示形式可带来种群进化多样性,较好地提高了算法运行效率等,但在算法收敛性、尤其是量子旋转门调整能力较差^[6]。

本文提出量子免疫蛙跳算法(Quantum Immune Leap Frog, QILF),量子比特对蛙群编码,使蛙群个体用多个量子比特的量子染色体存储,采用蒙特卡罗方法确定蛙跳的量子态概率,对量子旋转的 Hadamard 门在 Bloch 球上的旋转角度不与最佳个体旋转的角度比较,且幅度较大,避免了蛙跳早熟的缺陷,实验仿真显示对图像增强的效果更注重细节,定性指标较好。

2.1 量子蛙跳编码

采用基于量子比特蛙群个体编码方式,用一对复数 (α, β) 定义一个量子比特位^[7],其量子态可为:

$$|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \tag{1}$$

式中: α 和 β 是复数系数,量子态 $|\varphi\rangle$ 被测量处于 $|0\rangle$ 概率为 α^2 ,处于 $|1\rangle$ 概率为 β^2 ,设种群为 m ,优化空间为 n 维,采用 Bloch 球面坐标编码,将第 i 只按适应度 $f(i) = [\sqrt[m]{n}]/F_i$ 从小到大排序的青蛙个体编码为:

$$\begin{bmatrix} \cos\varphi_{i1} \sin\theta_{i1} \\ \sin\varphi_{i1} \sin\theta_{i1} \\ \cos\theta_{i1} \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \cos\varphi_{ij} \sin\theta_{ij} \\ \sin\varphi_{ij} \sin\theta_{ij} \\ \cos\theta_{ij} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

其中: $i = 1, 2, \cdots, m$; $j = 1, 2, \cdots, n$, $\theta_{ij} \in [0, \pi]$, $\varphi_{ij} \in [0, 2\pi]$, F_i 为目标函数。 $[\sqrt[m]{n}]$ 表

示取值不大于 $\sqrt[m]{n}$ 的整数值; $m = 1 + \ln N$, N 为根据问题复杂程度设定的最大进化代数; n 当前的进化代数。采用基于量子比特蛙群个体编码方式,蛙群个体用多个量子比特的量子染色体存储,每个体所表达包含所有可能概率的线性叠加态,簇内蛙群的任一操作也同时作用于所有可能信息^[8-9],这使量子蛙跳算法比经典蛙跳算法拥有更好的多样性特征,并通过 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ 实现收敛。

2.2 基于离散化的蛙跳移动

量子的状态通过用波函数来表示:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi|^2 dx dy dz &= \\ \int_{-\infty}^{+\infty} Q dx dy dz &= 1, \end{aligned} \tag{3}$$

式中: Q 是量子在球面坐标 (x, y, z) 时刻 t 出现的概率。通过蒙特卡罗方法,将量子状态转换为平常状态^[10]。这样青蛙的每一维的解 x_{is} 为0或1,为0则选择量子态 $|\varphi\rangle$ 概率为 α^2 ,为1则选择量子态 $|\varphi\rangle$ 概率为 β^2 ,第 i 个青蛙移动的距离 D_i 不限制。移动距离的大小确定青蛙在对应维 s 上选择0或1, D_i 如果大些,表示对应维 s 上选择1的概率大,而较小的移动距离则意味着选0的概率较大。引入 Sigmoid 函数将距离大小转换到 $[0, 1]$ 之间的概率值:

$$\text{Sig}(D_i) = \frac{1}{1 + \exp(-D_i)}. \tag{4}$$

蛙跳算法中每一维更新公式为:

$$x_{is} = \begin{cases} 1, r < \text{Sig}(D_i) \\ 0, r \geq \text{Sig}(D_i) \end{cases}, \tag{5}$$

其中: r 为均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的随机数。

2.3 动态调整量子蛙跳旋转门

对量子旋转门操作的关键量子旋转角度^[11],设两个量子比特 $(|\varphi\rangle, |\varphi'\rangle)$ 之间角距离为 $\Delta\theta_i$,其矢量形式定义为:

$$\Delta\theta_i \in (|\varphi\rangle, |\varphi'\rangle) = \arctan \frac{\alpha'}{\beta'} - \arctan \frac{\alpha}{\beta}, \tag{6}$$

其中: $|\varphi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, $|\varphi'\rangle = \alpha'|0\rangle + \beta'|1\rangle$ 。

量子旋转角 θ_i 为:

$$\theta_i = \frac{1}{k} - \frac{\exp\left(\frac{\text{Current_gen} - 1}{\text{Max_gen} - 1}\right) - 2}{\exp(\text{Current_gen}) - 2} \Delta\theta_{|\varphi\rangle_i, *}, \tag{7}$$

其中: k 为调节因子,介于随机常数 $[3, 8]$ 之间, Max_gen 为总进化代数, Current_gen 为当前进化代数, $\Delta\theta_{|\varphi_i\rangle,*}$ 表示量子染色体中第 i 个量子比

特与基态间的角距离, α_i 和 β_i 为 $|\varphi_i\rangle$ 的概率幅, x_i 为 $|\varphi_i\rangle$ 的测量值, b_i 为当前最优二进制解 b 的第 i 比特位。

$$\Delta\theta_{|\varphi_i\rangle,*} = \begin{cases} \Delta\theta_{|\varphi_i\rangle,|0\rangle} = -\arctan \frac{\alpha_i}{\beta_i} \text{if}(f(b) \geq f(x)) \wedge (b_i = 0) \wedge (x_i = 1) \\ \Delta\theta_{|\varphi_i\rangle,|1\rangle} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\alpha_i}{\beta_i} \text{if}(f(b) \geq f(x)) \wedge (b_i = 1) \wedge (x_i = 0) \\ 0 & \text{others} \end{cases}, \quad (8)$$

$\Delta\theta_{|\varphi_i\rangle,*}$ 实验中取值范围限定为 $[0.01\pi, 0.1\pi]$, 基本能保证量子染色体中所有的量子比特都朝着与最优解 b 对应的量子比特基态动态优化偏

转^[12]。如果适应值还没能得到提高,则随机产生一个新解取代原先最坏的青蛙。这时量子旋转角在量子蛙群进化时调整方式为:

$$\theta_i = \begin{cases} -\frac{1}{k} \frac{\exp(\frac{\text{Current_gen}-1}{\text{Max_gen}-1})-2}{\exp(\text{Current_gen})-2} \arctan \frac{\alpha_i}{\beta_i} & \text{if } b_i = 0, x_i = 1 \\ \left(\frac{\pi}{2} - \frac{1}{k}\right) \frac{\exp(\frac{\text{Current_gen}-1}{\text{Max_gen}-1})-2}{\exp(\text{Current_gen})-2} \arctan \frac{\alpha_i}{\beta_i} & \text{if } b_i = 1, x_i = 0 \end{cases}. \quad (9)$$

2.4 个体变异操作

为增加种群多样性,防止早熟收敛,采用 Hadamard 门对量子位变异为:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

则: $-iH = \cos \frac{\pi}{2} i - i \sin \frac{\pi}{2} \times$

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_x + 0 \sigma_y + \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_z \right), \quad (11)$$

其中: $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ 是 Bloch 球面三维坐标, $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \frac{1}{\sqrt{2}}\right)$ 是 Hadamard 门在 Bloch 球上的绕轴,旋转角度为 π , 旋转的结果等价于将 x 轴变为 z 轴,将 z 轴变为 x 轴, Hadamard 门在 Bloch 球上的旋转角度不与最佳个体旋转的角度比较,且幅度较大,因此增加种群多样性,进而突破早熟收敛^[13-14]。蛙群中的每个个体,首先生成一个随机数,若该数小于变异概率,则该个体上随机选取一个量子位,然后应用 Hadamard 门对其实施变异。

2.5 基于阴性选择算法的蛙跳免疫过程

阴性选择算法使抗体与抗原通过特征匹配结合^[15]。定义 U 表示整个图像像素集合, S 表示所有含噪像素组成的集合, N 表示所有非含噪像素

组成的集合,满足: $U = S \cup N, S \cap N = \emptyset$ 。

图像有 L 个像素,需要增强的像素集合为 S 。随机选取 M 个像素并依次与集合 N 中的像素进行匹配,匹配成功的像素被删除,不匹配成功的像素将变为成熟检测器,成熟检测器集合记为 D ,成熟检测器 D 与待增强像素集合 S 进行匹配,若匹配成功,则判断阈值需增强的像素,否则不进行增强。匹配过程采用 r 连续量子位匹配规则,如果任意两个像素中至少有连续 r 个量子位相同,则这两个像素匹配。 r 连续位匹配规则下两个随机生成的字符串匹配的概率 p :

$$p = m^r \left[\frac{(l-r)(m-1)}{m+1} \right], \quad (12)$$

其中: m 为像素量子编码符号数目, l 字符串长度, r 为量子位数。

在阴性选择算法中一个随机字符串不匹配任何自我集合中元素的检测率 η : $\eta = (1-p)^n$, 其中: n 是自我集合中元素的数目。

2.6 图像增强过程

青蛙映射为图像中的像素,与像素矩阵 L 中值为 0 的元素位置相对应的模糊矩阵 A 中的元素值必定为 0,为了降低计算时间开销,本文仅将与 L 中值为 1 的元素位置对应的 A 中的元素组

合成青蛙的位置信息^[16]。

图 1 给出了 $N=5, M=5$ 时的可用矩阵。由图 1 可知,青蛙位置维数为 $N \times M=30$, 由于 A 需要满足 L 的约束限制, 因此仅将 L 中为 1 的元素映射为青蛙的位置信息, 则位置维数仅为 7, 寻优空间压缩了 2^{23} 倍, 极大减少了计算复杂度。本文直接将青蛙位置的每一维按行逐个填充到与 L 中值为 1 的元素位置相对应的 A 的位置, 如图 1 中箭头所示, 以得到一种像素映射。

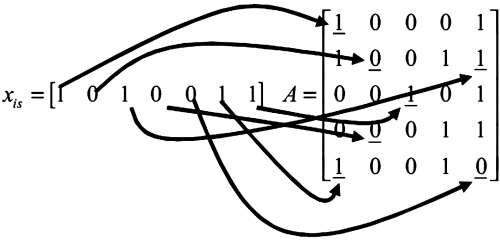


图 1 青蛙映射像素图

Fig. 1 Map of frog mapping pixel

第 i_i 只青蛙在寻优过程中的目标函数 F_i 为:

$$F_i = \frac{1}{N_0} \sum_{n=1}^{N_0} [f'_n - f'_{n-1}], \quad (13)$$

其中: f'_n 为第 n 次增强效果, N_0 为观测增强次数, 通过量子免疫蛙跳寻优将目标函数最小化。本文要求目标函数小于 0.008 3。

算法流程为:

- ①输入图像, 初始化对按适应值大小排序的青蛙进行量子编码;
- ②基于离散化进行蛙跳移动, 同时动态调整量子蛙跳旋转门进行个体变异操作;
- ③通过阴性选择算法对蛙跳免疫;
- ④满足模糊图像增强过程中目标函数要求, 进行步骤
- ⑤, 否则进行步骤②;
- ⑤输出图像。

3 实验仿真

3.1 增强效果视觉对比

硬件平台: CPU 为 AMD 系列, 主频 3.6 GHz, 二级缓存 4 MB、内存 4 GMB、操作系统 WIN7, 实验编程环境通过 MATLAB2010b 实现。

对本文涉及的算法进行模糊图像增强处理, 效果如图 2 和图 3 所示。

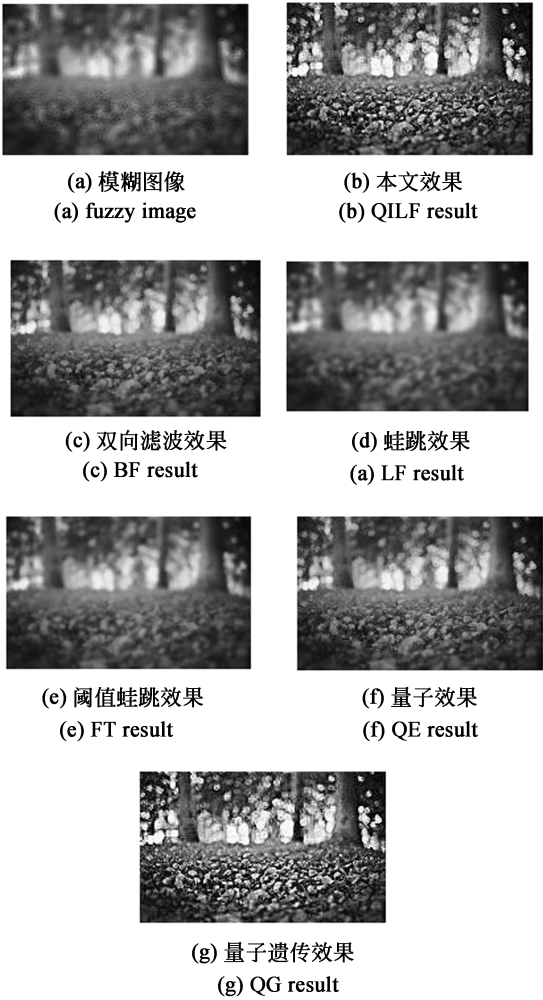


图 2 不同算法增强效果

Fig. 2 Enhancing result of different algorithms

本文算法增强的轮廓和细节更加清晰, 层次感强, 提升了图像的整体对比度, 更能使人视觉效果感到愉悦, 具有很好的增强效果, 几乎不产生“粘连”、“振铃”等负效应; 其他算法在增强暗区的同时其他地方也被相应地增强, 没有兼顾到图像中不需要改动的地方, 并且需要增强的细节并没有明显变化, 这是因为本文算法对图像中细节区域进行较大的增强, 而对平坦区域不增强或进行较小增强, 因而能减小平坦区域的模糊性。

3.2 结构相似性 SSIM 分析

结构相似性(structural similarity, SSIM)在图像去噪处理中, 评价全面超越 SNR(signal to noise ratio)和 PSNR(peak signal to noise ratio), SSIM 其值越大越好, 最大为 1。

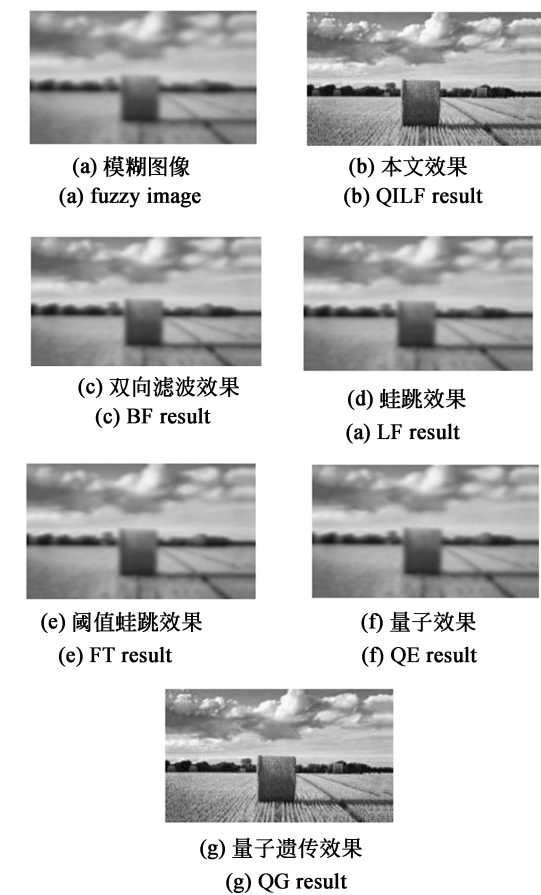


图 3 不同算法增强效果

Fig. 3 Enhancing result of different algorithms

$$SSIM(x,y)=l(x,y)\tau_1c(x,y)\tau_2s(x,y)\tau_3,$$
$$l(x,y)=\frac{2u_xu_y+\rho_1}{u_x^2+u_y^2+\rho_1},$$
$$c(x,y)=\frac{2\sigma_x\sigma_y+\rho_2}{\sigma_x^2+\sigma_y^2+\rho_2},$$
$$s(x,y)=\frac{\sigma_{x_y}+\rho_3}{\sigma_x\sigma_y+\rho_3},$$
$$\sigma_{x_y}=\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^N(x_i-\mu_x)(y_i-\mu_y),$$

其中： x 、 y 为标准图像和增强图像， u_x 、 u_y 、

σ_x^2 、 σ_y^2 、 σ_{x_y} 分别表示图像 x 、 y 的均值、方差和协方差， ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 为小的正数，避免分母为 0 出现不稳定， τ_1 、 τ_2 、 τ_3 ，为调节比例，取值范围为 (0,1)，表 1 给出了不同算法的结构相似性。

本文算法的结构相似性最大，增强图像中受噪声污染较少，这是因为蛙群中每个个体生成的随机数小于变异概率，则该个体上随机选取一个量子位，用 Hadamard 门对其实施变异，避免了早熟产生。

表 1 不同算法的结构相似性	
Table. 1 SSIM of different algorithms	
算法	SSIM
本文算法	0.984 9
双向滤波器算法	0.623 1
蛙跳算法	0.691 7
阈值蛙跳算法	0.761 6
量子算法	0.894 4
量子遗传算法	0.956 8

4 总 结

针对图像增强的特点，提出量子免疫蛙跳算法，适应值大小排序对青蛙进行量子编码，蛙跳移动过程中采用 Sigmoid 函数将距离大小转换到 [0,1]之间的概率值，免疫过程中随机选取的像素与匹配器进行匹配对比，如果任意两个像素中至少有连续 r 个量子位相同，则这两个像素匹配。实验仿真显示本文算法能够对平坦区域不增强或进行较小增强，减小平坦区域的模糊性。未来的主要研究工作包括进化量子蛙群中的子群如何动态划分，以及随着个体变异属性和阴性选择属性约束与结构相似性中一致性研究等。

参 考 文 献:

[1] 尹传历,王啸哲. 机载嵌入式图像增强系统设计与实现[J]. 液晶与显示,2013,28(4):604-607.
Yin C L,Wang X Z. Design and realization of airborne embedded image enhancement system[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*,2013,28(4):604-607. (in Chinese)

[2] Marina G A,Michael T,Alexander G,*et al.* Motion based object segmentation using hysteresis and bidirectional inter-frame change detection in sequences with moving camera[J]. *Signal Processing:Image Communication*,2013,28(10):1420-1434.

[3] Shi W, Wu X Y,Xia J L. Explicit multi-symplectic extended leap-frog methods for Hamiltonian wave equations[J].

- Journal of Computational Physics*, 2012, 231(12): 7671-7694.
- [4] Huang M Y, Duan R Y, Ji X. Chronic effects of environmentally-relevant concentrations of lead in *Pelophylax nigromaculata* tadpoles; Threshold dose and adverse effects[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 104(6): 310-316.
 - [5] Yang Y G, Jia X, Sun S J, *et al.* Quantum cryptographic algorithm for color images using quantum fourier transform and double random-phase encoding[J]. *Information Sciences*, 2014, 277(1): 445-457.
 - [6] Caraiman S, Vasile I M. Histogram based segmentation of quantum images and video via color moments[J]. *Theoretical Computer Science*, 2014, 529(10): 46-60.
 - [7] Yannick D. Iia based and second-order separability of nonlinear models involving reference signals; General properties and application to quantum bits[J]. *Signal Processing*, 2012, 92(8): 1785-1795.
 - [8] 丁卫平, 王建东, 管致锦. 基于量子蛙跳协同进化的粗糙属性快速约简[J]. 电子学报, 2011, 39(11): 2597-2603.
Ding W P, Wang J D, Guan Z J. Efficient rough attribute reduction based on quantum frog-leaping co-evolution[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(11): 2597-2603. (in Chinese)
 - [9] Liu A P, Liu Y C, Li C, *et al.* Quantum information processing in decoherence-free subspace with nitrogen-vacancy centers coupled to a whispering-gallery mode microresonator[J]. *Optics Communications*, 2014, 313(15): 180-185.
 - [10] 唐德玉, 蔡先发, 齐德显, 等. 基于量子粒子群搜索策略的混合蛙跳算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(29): 29-33.
Tang D Y, Cai X F, Qi D Y, *et al.* Shuffled frog leaping algorithm based on particle swarm optimization searching strategy [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2012, 48(29): 29-33. (in Chinese)
 - [11] Panzer M J, Aidala K E, Anikeeva P O, *et al.* Nanoscale morphology revealed at the interface between colloidal quantum dots and organic semiconductor films [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(7): 2421-2426.
 - [12] 丁卫平, 王建东, 管致锦, 等. 基于动态交叉协同的属性量子进化约简与分类学习级联算法[J]. 模式识别与人工智能, 2011, 24(6): 733-742.
Ding W P, Wang J D, Guan Z J, *et al.* A cascade algorithm of quantum attribute evolution reduction and classification learning based on dynamic crossover cooperation[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2011, 24(6): 733-742. (in Chinese)
 - [13] 张强, 李盼池, 刘丽杰. 基于量子混合蛙跳算法的油田开发规划多目标优化[J]. 信息与控制, 2014, 43(1): 116-122.
Zhang Q, Li P C, Liu L J. A cascade algorithm of quantum attribute evolution reduction and classification learning based on dynamic crossover cooperation[J]. *Information and Control*, 2014, 43(1): 116-122. (in Chinese)
 - [14] Xuj, Zhen M Z, Liu C X, *et al.* The processing method of spectral data in Hadamard transforms spectral imager based on DMD[J]. *Optics Communications*, 2014, 325(30): 122-128.
 - [15] 芦天亮. 基于人工免疫系统的恶意代码检测技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013: 35-40.
Lut L. Detection technology of malicious code based on artificial immune system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013: 35-40. (in Chinese)
 - [16] 彭振, 赵知劲, 郑仕链. 基于混合蛙跳算法的认知无线电频谱分配[J]. 计算机工程, 2010, 36(6): 210-212, 217.
Peng Z, Zhao Z J, Zheng S L. Cognitive radio spectrum assignment based on shuffled frog leaping algorithm[J]. *Computer Engineering*, 2010, 36(6): 210-212, 217. (in Chinese)

作者简介: 周原(1981—), 男, 河南平舆人, 硕士, 讲师。研究方向: 信号处理与通信系统。E-mail: hhzhouyuan@qq.com
张韧志(1980—), 男, 河南省泌阳人, 讲师, 硕士, 研究方向为网络管理, 软件工程开发。