

# 基于进出口贸易的帝国主义竞争算法

王帅群<sup>1</sup> 敖日格乐<sup>2</sup> 高尚策<sup>2,3</sup> 唐政<sup>1,2,4</sup> 马海英<sup>1,4</sup>

(同济大学电子与信息工程学院 上海 201804)<sup>1</sup> (日本富山大学工学院 日本富山 930-8555)<sup>2</sup>  
(东华大学信息科学与技术学院 上海 201620)<sup>3</sup> (南通大学计算机科学与技术学院 南通 226019)<sup>4</sup>

**摘要** 帝国主义竞争算法是受社会现象启发的一类新颖的群智能优化算法,但是它与其他的进化算法一样,对于多峰函数也存在收敛速度慢和容易陷入局部最优的缺陷。国际贸易是指不同国家和地区之间的商品和劳务的交换活动,有利于经济的发展,但在经济贸易中又存在贸易顺差和贸易逆差,一国不易长期存在贸易顺差或者贸易逆差,必须及时调整才利于国民经济的健康发展。受这种现象的启发,提出了基于进出口贸易的帝国主义竞争算法,选择了1个基准函数作为测试函数来实时跟踪算法的性能。结果表明,解的质量和收敛速度都有了明显的改善。兰纳-琼斯势问题是分子势能最小化问题,其局部最小值随原子数目呈指数增加,因此将基于进出口贸易的帝国主义竞争算法应用在兰纳-琼斯问题上来展现其解决实际问题的能力,并与免疫算法进行比较,结果表明,解的质量和收敛速度都有了明显的改善。

**关键词** 帝国,殖民地,同化,竞争,贸易

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.003

## Imperialist Competitive Algorithm Based on Import and Export Trade

WANG Shuai-qun<sup>1</sup> Ao-ri-ge-le<sup>2</sup> GAO Shang-ce<sup>2,3</sup> TANG Zheng<sup>1,2,4</sup> MA Hai-ying<sup>1,4</sup>

(College of Electronics & Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)<sup>1</sup>

(Faculty of Engineering, University of Toyama, Toyama 930-8555, Japan)<sup>2</sup>

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)<sup>3</sup>

(College of Computer Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)<sup>4</sup>

**Abstract** Imperialist competitive algorithm (ICA) inspired by the social phenomenon is a kind of novel swarm intelligence algorithms. Like other evolutionary algorithms, for multi-modal function, ICA also has slow convergence speed and is easy to fall into local optimum. International trade is the exchange of goods and services between different countries and regions and is beneficial to the development of national economy. But it has the trade surplus and the trade deficit in economic trade, and a country is not easy to long-standing the trade surplus. The trade deficit which must be timely adjusted, and is conducive to the healthy development of national economy. Inspired by this phenomenon, an improved ICA algorithm based on import and export trade (IICA) was put forward and a benchmark function was selected as the test function to verify the performance of the algorithm. The results show that the solution quality and convergence rate have obvious improvement. The Lennard-Jones potential problem is a potential energy minimization problem and has huge number of local minima, which is growing exponentially with the number of the atoms. So this paper applied IICA algorithm on L-J potential problem to exhibit its applicability over real-world problems. Compared with original ICA and immune algorithm, experimental results demonstrate the effectiveness of IICA in terms of convergence speed and solution quality.

**Keywords** Imperialist, Colony, Assimilation, Competition, Trade

## 1 引言

帝国竞争算法 (Imperialist Competitive algorithm, ICA) 是一种受社会现象启发的群智能优化算法,由 Atashpaz-Gar-

gari 和 Lucas 于 2007 年提出。迄今为止,ICA 已被广泛应用于调度问题<sup>[1]</sup>、机械设计问题<sup>[2]</sup>和分类问题<sup>[3]</sup>等一些实际的优化问题。ICA 算法虽然在解决优化问题上表现出了优越性,但是对于多峰函数,与其他的进化算法一样,存在收敛速

到稿日期:2014-05-30 返修日期:2014-09-14 本文受国家自然科学基金项目(61203325,61402244),上海市教育发展基金会晨光计划项目(12CG35),教育部博士点新教师基金(20120075120004),中央高校基本科研业务费(2232013D3-39),南通市科技计划项目(BK2013050)资助。

王帅群 博士生,主要研究方向为模式识别与智能系统、人工免疫系统、问题优化;敖日格乐 博士生,主要研究方向为人工免疫系统;高尚策 副教授,硕士生导师,主要研究方向为人工免疫系统、人工神经网络;唐政 教授,博士生导师,主要研究方向为智能信息技术、人工神经网络、免疫优化;马海英 女,博士生,讲师,主要研究方向为智能算法、密码学和网络安全。

度慢、容易陷入局部最优的缺陷,因此在算法的收敛性、结构改进和参数设置等方面还存在较大的研究空间。为了避免殖民地在向帝国移动的过程中陷入局部最优,Bahrami 等人<sup>[4]</sup>利用混沌映射改变同化算子中殖民地的移动方向。Lin 等人<sup>[5]</sup>提出了扰动的 ICA 算法,并且利用人工的帝国主义国家取代相对较弱的帝国主义国家,以此来增强帝国之间的信息交互<sup>[6]</sup>。

在原始的 ICA 算法中<sup>[7]</sup>,殖民地被帝国主义同化,殖民地向着帝国主义移动,使之越来越优。但是在解决多峰函数时,容易陷入局部最优,其收敛速度也慢,特别是针对一些实际的多峰问题,原始的 ICA 算法很难满足实际的需求。受国际贸易可以促进国民经济发展这一社会现象的启发,将此机制映射到 ICA 算法中,提出了基于进出口贸易的帝国竞争算法 (IICA),用来避免算法陷入局部最优,同时也加快了收敛速度。

首先将提出的 IICA 算法应用在多峰值的基准函数上进行验证,实时跟踪算法的收敛性;同时将其应用在兰纳-琼斯势问题,兰纳-琼斯势问题是一种势能最小化问题,目标函数的非凸性和其局部最小值数目随原子数目呈指数增长,因此被广泛应用于优化领域。本文将基于贸易的帝国主义竞争算法应用于兰纳-琼斯势问题,解的质量和收敛速度都有了明显的改善;并将其与原始的 ICA 算法、免疫算法进行比较,结果证明了算法在解决多峰值实际问题时的有效性。

## 2 基于贸易调整的帝国主义竞争算法

基于贸易调整的 IICA 算法如图 1 所示,图中灰色部分为新提出的机制,即帝国中的各个国家之间进行经济贸易。IICA 算法从帝国初始化(帝国主义和殖民地)开始,通过殖民地同化、国家之间经济来往、殖民地和帝国位置互换、帝国竞争、弱势帝国的倒塌来进行优化。进出口贸易机制的加入,促进了各国之间有效信息的交互,同时打破了原有 ICA 算法中帝国主义的进化仅靠殖民地与帝国主义位置的互换,加快了算法的收敛速度;同时对于多峰函数来说,该机制更有效地避免了算法陷入局部最优。

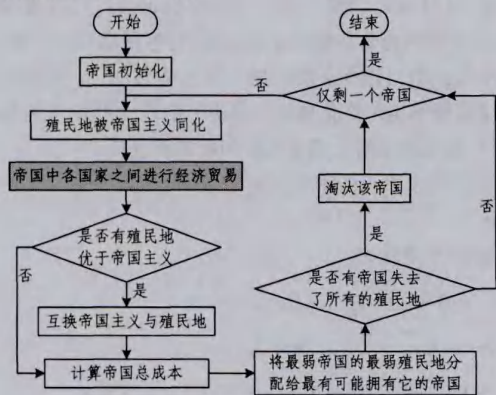


图 1 基于贸易调整的帝国主义竞争算法

### 2.1 帝国初始化

在帝国主义算法中,组成种群的个体称作国家。对于一个  $D$  维的优化问题,一个国家可以表示成:

$$\text{country} = [p_1, p_2, \dots, p_D] \quad (1)$$

一个国家的成本值用成本函数  $f$  来估计:

$$\text{Cost} = f(\text{country}) = f(p_1, p_2, \dots, p_D) \quad (2)$$

优化算法产生初始种群的大小为  $N$ , 选定  $N_{emp}$  个最有实力的国家作为帝国主义, 剩余的  $N_{col}$  个国家将根据帝国主义的实力分配给帝国主义作为其殖民地, 较有实力的帝国主义将分配更多的殖民地。在最小优化问题中, 帝国主义的实力用其成本值来衡量, 与其成反比, 即成本值越大, 帝国主义的势力越弱。

### 2.2 殖民地同化

帝国主义拥有自己的殖民地后, 将试图发展它们的殖民地, 这个过程叫做同化。下面通过图 2 来模拟殖民地向帝国主义的移动过程。

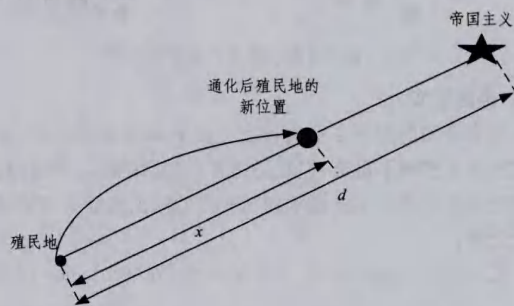


图 2 殖民地向帝国主义同化示意图

图 2 中殖民地向帝国主义移动了  $x$  个单位, 殖民地向帝国主义移动的过程中将变得更加强大。在图 2 中,  $x$  是随机均匀分布的变量,  $x$  满足:

$$x \sim U(0, \alpha \times d) \quad (3)$$

其中,  $\alpha$  是大于 1 的数,  $d$  是殖民地与帝国主义之间的距离,  $\alpha$  大于 1 可以保证殖民地从帝国主义的两侧向帝国主义靠近。

### 2.3 商品贸易机制

帝国中各国家之间进行贸易的流程如图 3 所示。随机地选择一类货物进行商品交换, 一类货物也就是优化问题解的某一维度上的值, 取其部分值进行交换, 如果出口大于进口, 则视为贸易顺差, 判断是否有利于该国经济发展, 若如果促进了该国经济发展, 则保留改动; 否则执行贸易逆差操作, 即进口大于出口, 判断是否有利于经济发展, 若促进经济发展, 则保留改动, 否则撤销改动。同样地调整贸易逆差为贸易顺差。

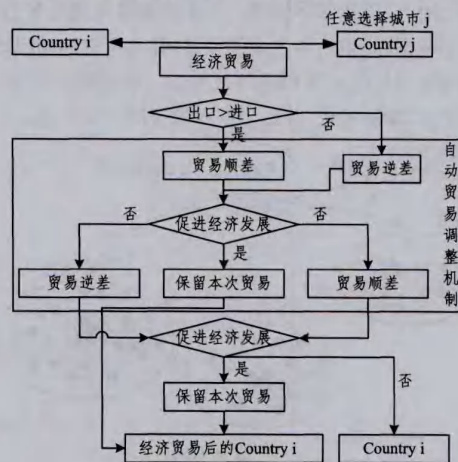


图 3 商品贸易流程

### 2.4 交换殖民地和帝国主义的位置

殖民地向帝国主义移动后, 判断帝国主义是否需要与殖

殖民地互换位置。殖民地向帝国主义移动中,可能会到达一个比帝国主义所在位置对应成本更低的位置。在这种情况下,这个殖民地将成为帝国主义,帝国主义将变为殖民地。在后面的迭代过程中,殖民地将继续向新的帝国主义移动。其过程如图4所示。

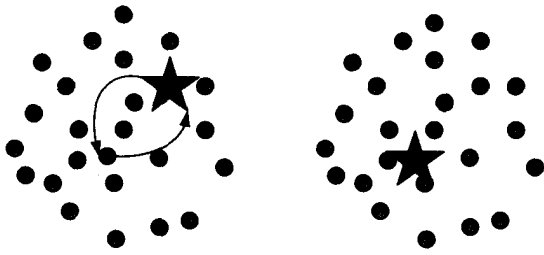


图4 帝国与殖民地位置互换示意图

### 2.5 帝国总实力

整个帝国的实力在很大程度上由其帝国主义决定,殖民地的实力虽然微不足道,但是还是有一些影响的。所以,整个帝国的成本是帝国主义成本和其所占的殖民地成本均值的百分比之和:

$$T_n = Cost(imperialist_n) + \xi mean\{Cost(colonies\ of\ empire_n)\} \quad (4)$$

其中,  $n \in N_{emp}$ ,  $T_n$  是第  $n$  个帝国的总成本,  $\xi$  是  $[0, 1]$  之间的正数,不同的  $\xi$  值显示了帝国主义成本在总成本中对应的权重。 $\xi$  的值很小时,帝国主义的成本在很大程度上将决定整个帝国的成本,随着  $\xi$  值的增大,殖民地的角色将会增加,本文  $\xi$  的值取 0.1。

### 2.6 帝国竞争、倒塌和算法收敛

在帝国竞争算法中,所有的帝国都试图依靠竞争来占有其他帝国的殖民地,并控制它们。帝国之间的竞争将导致弱的帝国失去自己的殖民地,该殖民地将被分配给其他帝国。在竞争过程中,所有的帝国都有可能拥有该殖民地,不过,越强大的帝国将有更大的机会占有该殖民地,进而实力越来越强大。本文利用轮盘赌算法选择出哪个帝国将占有该殖民地,随着竞争的进行,较弱的帝国将失去所有的殖民地,最后倒塌。图5展示了帝国竞争的过程。有很多不同的准则来定义帝国的倒塌机制,本文将利用最常用的准则,即当帝国失去所有的殖民地时,该帝国将倒塌。算法收敛最理想的状态是,只存在一个帝国,其他的帝国全部倒塌,并且所有的殖民地与该帝国拥有相同的位置和相同的成本值。在这样的情况下,帝国竞争结束,算法停止,收敛于存在的帝国主义位置。

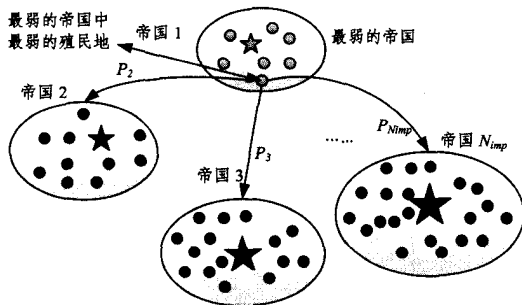


图5 帝国竞争

## 3 商品贸易机制

贸易顺差和贸易逆差映射到 IICA 算法中如图6所示,国

家  $\vec{X}_1$  和国家  $\vec{X}_2$  之间的矢量差是有方向的,对于国家  $\vec{X}_1$  来说,如果国家  $\vec{X}_2$  中某一维度上的值大于国家  $\vec{X}_1$  中同一维度上的值,则为贸易逆差;反之,则为贸易顺差。

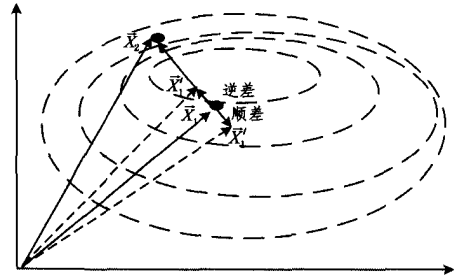


图6 贸易顺差和贸易逆差

每一维度都类比于一类货物,国家之间的贸易差额可以通过每一维度上的差额来统计,差额为正则作贸易顺差,为负则做贸易逆差处理。原则上认为帝国是能够较好地平衡贸易的进出口总额的,但是每次对贸易的调整并不一定都是合适的,就像现实中的国家也各有各的贸易优劣势,所以加入判断贸易顺逆差的过程。有些情况下国家之间的移动却不一定有利于该国经济的发展,这种情况在算法中作为无效调整,并不采取。帝国中的每个国家都将随机地选择一个国家与其进行经济贸易,交易的比值为  $\beta \in (0, 1)$ ,该比值决定着商品交换的多少,对于经济的发展有重大意义,灵活地运用该比值能够改善算法的性能。贸易顺逆差的定义、算法映射和代码执行如表1所列。

表1 贸易顺差和贸易逆差

贸易现象	顺差	逆差
定义	出口贸易总额大于进口贸易总额	进口贸易总额大于出口贸易总额
导致现象	外汇盈余,通货膨胀	货币外流,对外债务增加
算法映射	某维度差值为正	某维度差值为负
代码	$X_1(k) + \beta(X_1(k) - X_2(k))$	$X_1(k) - \beta(X_1(k) - X_2(k))$

## 4 兰纳-琼斯势问题

兰纳-琼斯势是计算化学中用来模拟两分子间作用的一个函数,最早由化学家 John Lennard-Jones 于 1931 年提出。兰纳-琼斯势问题是势能最小化问题,目标函数的非凸性和局部最小值的数目随原子数目的增加呈指数增加,使其成为一类高维多峰的实际优化难题。将提出的算法用来解决该类问题,可以验证算法解决高维实际问题的有效性。

假设  $D$  个原子的笛卡尔坐标为:

$$\vec{p}_i = \{x_i, y_i, z_i\}, i = 1, 2, \dots, D \quad (5)$$

则兰纳-琼斯势能为:

$$V_D(p) = \sum_{i=1}^{D-1} \sum_{j=i+1}^D (r_{ij}^{-12} - 2 \cdot r_{ij}^{-6}) \quad (6)$$

其中,  $r_{ij} = \|\vec{p}_j - \vec{p}_i\|_2$ , 梯度为:

$$\nabla_j V_D(p) = -12 \sum_{i=1, i \neq j}^D (r_{ij}^{-14} - r_{ij}^{-8}) (\vec{p}_j - \vec{p}_i) \quad j = 1, 2, \dots, D \quad (7)$$

在两点之间的特定距离兰纳-琼斯势能有最小值,兰纳-琼斯对势  $V(r) = r^{-12} - 2 \cdot r^{-6}$  随两个原子距离  $r$  的变化如图7所示。在距离  $r=1$  时,两个原子的兰纳-琼斯势能最小,为 -1,并且随着  $r$  的减少,势能快速增大;当  $r=0$  时,势能趋于无穷,两个原子势能曲线变化趋势导致兰纳-琼斯势问题是一

种非常难的优化问题。

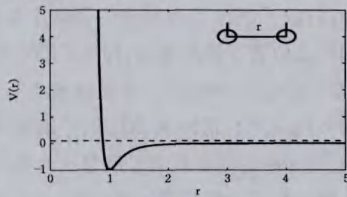


图7 势能随  $r$  的变化

## 5 算法测试及结果分析

参数的选择对算法的性能有很大的影响,在本文中,种群初始化大小为  $N=50$ ,帝国的数目为  $N_{mp}=5$ ,殖民地的数目为  $N_{col}=45$ ,算法独立运行 30 次,得到统计结果。

### 5.1 基准函数

二维函数  $G1$ :

$$f = x \cdot \sin(4x) + 1 \cdot 1y \cdot \sin(2y)$$

$$0 < x, y < 10, \text{minimum: } f(0.9039, 0.8668) = -18.5547$$

图 8 中,左边的图是二维函数  $G1$  的 3D 图,该函数在区间  $0 < x, y < 10$  上的最小值位于  $(x, y) = (0.9039, 0.8668)$ ,为  $-18.5547$ 。为了能更好地比较 ICA 和改进后 IICA 的优越性,应用了相同的初始种群,该种群的绘制如图 8 右图所示,整个种群被分为 5 个帝国,也就是 5 个帝国主义拥有其他的 45 个殖民地。帝国主义用五角星表示,殖民地用小圆圈表示,并且同一个帝国中的帝国主义和殖民地用相同的颜色。

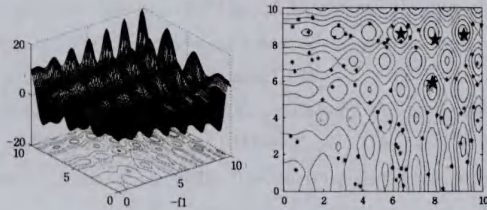


图 8 3D 图和初始帝国

图 9 为帝国竞争收敛图,左边的一列分别代表 ICA 算法在第 2 代、第 4 代、第 6 代、第 8 代、第 10 代的优化结果收敛图,右边的一列是基于贸易的帝国主义竞争算法 IICA 在第 2 代、第 4 代、第 6 代、第 8 代、第 10 代的优化结果收敛图。通过对比很容易发现,无论是收敛速度还是解的质量,改进后的算法都明显优于原来的算法。在第 2 代时,两个算法的差异并不是特别大,都还有 4 个帝国存在,但 IICA 的收敛图中 4 个帝国的位置要稍微优于 ICA 算法。在第 4 代时,ICA 和 IICA 都有 3 个帝国存在,不过 IICA 算法的 3 个帝国的位置明显优于 ICA。在第 6 代时,IICA 算法仅有 2 个帝国存在,其他的帝国都倒塌了,ICA 算法的收敛图中还有 3 个帝国存在。

表 3 IICA 与 ICA、PM-IA、LM-IA 统计结果的比较

Mean±std.	迭代次数	IICA		ICA		PM-IA		LM-IA	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
atom-2	100	-1.0000±1.9230E-16	-0.9998±4.4855E-04	-1.0000±1.0800E-11	-1.0000±5.2100E-11	-1.0000±1.0800E-11	-1.0000±1.0800E-11	-1.0000±5.2100E-11	-1.0000±5.2100E-11
atom-3	200	-3.0000±5.0202E-14	-2.4814±0.5587E+00	-3.0000±5.3900E-07	-3.0000±5.5500E-07	-3.0000±5.3900E-07	-3.0000±5.3900E-07	-3.0000±5.5500E-07	-3.0000±5.5500E-07
atom-10	2000	-28.4225±1.4648E-14	-10.2137±0.8946E+00	-28.4207±1.0000E-03	-28.4177±2.2000E-03	-28.4207±1.0000E-03	-28.4177±2.2000E-03	-28.4177±2.2000E-03	-28.4177±2.2000E-03
atom-38	5000	-162.0923±1.3929E+00	20.8910±4.7319E+01	-161.9648±5.2400E-01	-159.6461±9.8000E-01	-161.9648±5.2400E-01	-159.6461±9.8000E-01	-159.6461±9.8000E-01	-159.6461±9.8000E-01

表 3 是 IICA 与 ICA、PM-IA、LM-IA 算法的统计结果,在参数设计一样的情况下,IICA 的均值和方差要优于 ICA 和其他两种免疫算法。当原子的数目为 2 个和 3 个也就是低维的

在第 8 代时,IICA 算法已经收敛于 1 个最有实力的帝国,也就是算法已经找到了最优解,但是 ICA 算法还存在 3 个帝国。在第 10 代时,ICA 算法收敛到 2 个帝国。所以在整个收敛过程中,IICA 算法的收敛速度和解的质量都优于 ICA 算法,从而证明了所提算法的优越性。

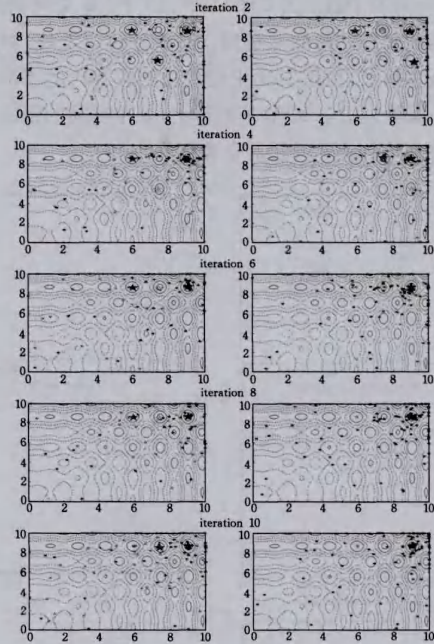


图 9 帝国竞争收敛图

### 5.2 兰纳-琼斯势问题

本文的兰纳-琼斯势优化问题来自于剑桥克拉斯特数据库,所以问题的最优值都是事先知道的,如表 2 所列,分别选择了 2 个、3 个、10 个和 38 个原子进行实验,这样保证了既有低维问题,也包括高维问题。表 2 给出了 ICA 和 IICA 实验中所获得的最小值和最大值,两种算法的初始化种群是一样的,IICA 中增加了商品贸易机制,算法剩余的所有执行代码也是一样的,这样,算法的比较性就比较可靠。从表 2 中不难看出,对于所有的优化问题,IICA 获得的最小值和最大值都明显优于 ICA,对于低维问题,IICA 找到了问题的最小值。

表 2 ICA 和 IICA 实验结果的最小值和最大值

Num.	Optimal	IICA		ICA	
		Min	Max	Min	Max
atom-2	-1.0000	-1.0000	-0.9990	-1.0000	-1.0000
atom-3	-3.0000	-3.0000	-3.0000	-2.9860	-1.7239
atom-10	-28.4225	-28.4225	-28.4225	-11.1611	-9.3834
atom-38	-173.9284	-163.9295	-160.6447	-24.2867	73.6227

优化问题时,IICA 与免疫算法 PM-IA、LM-IA 一样,都找到了问题的最优值,不过 IICA 的方差要优于其他两种免疫算法。当原子的数目增加到 10 时,IICA 的优越性就体现出来

了, IICA 找到了问题的最优值, 免疫算法没有找到, 但是均值的差别并不是特别的大。当原子数目增加到 38 时, IICA 找到的最优值已经非常明显地优于 ICA 和其他两种免疫算法 PM-IA、LM-IA, 所以 IICA 适合解决高维多峰优化问题, 在一定程度上能避免算法陷入局部最优。

图 10 为原子数目为 2 个、3 个、10 个、38 个时兰纳-琼斯势能平均收敛图和解的质量图。从该图可以发现, 对于低维和高维的实际优化问题, 无论是算法的收敛速度还是解的质量, IICA 都明显优于 ICA, 从而得出, 基本贸易的帝国竞争算法对解决高维的实际问题是非常有效的。

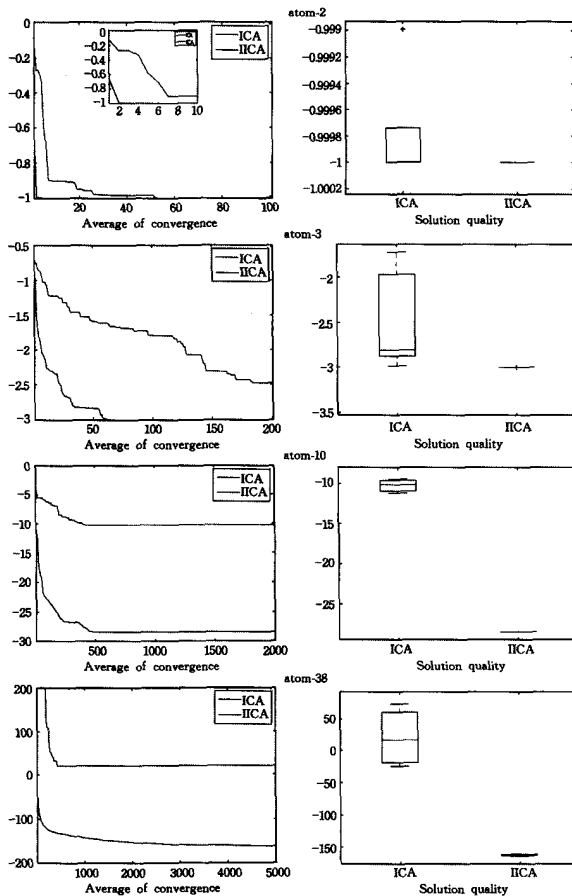


图 10 兰纳-琼斯势能平均收敛图和解的质量

**结束语** 本文提出了一种基于贸易的帝国竞争算法。基

于贸易顺逆差的进出口机制的引入, 促进了各国之间有效信息的交互, 同时打破了原有 ICA 算法中帝国主义的进化仅靠殖民地与帝国主义位置互换的规则, 加快了算法的收敛速度, 同时对于多峰函数来说, 该机制更有效地避免了算法陷入局部最优。将其分别应用在低维和高维的兰纳-琼斯势实际问题, 其收敛速度和解的质量都有了明显的改善, 从而验证了新提出的算法解决高维实际问题的有效性。对于更高维的实际优化问题, 其优化问题的时间也是一个考虑的因素。下一步将致力于提高算法的时间利用率, 并将改进的算法应用在其他实际优化问题、旅行商问题和调度问题等一些离散问题的研究上。

## 参考文献

- [1] Behnamian J, Zandieh M. A discrete colonial competitive algorithm for hybrid flowshop scheduling to minimize earliness and quadratic tardiness penalties[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(12): 14490-14498
- [2] Coelho L D S, Afonso L D, Alotto P. A modified imperialist competitive algorithm for optimization in electromagnetics[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(2): 579-582
- [3] Mousavi Rad S J, Akhlaghian Tab F, Mollazade K. Application of Imperialist Competitive Algorithm for Feature Selection: A Case Study on Bulk Rice Classification[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2012, 40: 41-48
- [4] Bahrami H, Faez K, Abdechiri M. Imperialist competitive algorithm using chaos theory for optimization (CICA)[C]// *Proceeding of the 2010 12<sup>th</sup> International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim)*. Cambridge, 2010, 5: 98-103
- [5] Lin, J L, Cho C W, Chuan H C. Imperialist competitive algorithms with perturbed moves for global optimization[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 284: 3135-3139
- [6] Lin J L, Tsai Y H, Yu C Y, et al. Interaction Enhanced Imperialist Competitive Algorithms[J]. *Algorithms*, 2012, 5(4): 433-448
- [7] Atashpaz-Gargari E, Lucas C. Imperialist competitive algorithm: An algorithm for optimization inspired by imperialistic competition[C]// *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2007, 7: 4661-4667

(上接第 13 页)

- [8] 冶元菲, 吕楠, 黄献龙, 等. 先进电子信息系统在通信卫星平台中的应用[J]. *空间控制技术与应用*, 2011, 37(1): 45-49
- [9] 林长苓, 周军连, 聂国健. COTS 元器件在舰载装备中的可靠性风险分析[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2006, 24(6): 37-41
- [10] 崔昆涛, 孙文力, 孙文强. 模块化开放式系统架构设计、原理研究[J]. *信息系统工程*, 2013(5): 35-37
- [11] 刘士全, 龚扬, 蔡洁明, 等. 1553B 总线应用发展研究[J]. *电子与封装*, 2013, 13(12): 11-15
- [12] 孔德岐, 李亚辉, 郭鹏. 高可靠嵌入式计算机系统的发展[J]. *通*

信学报, 2013, 34(Z1): 170-175

- [13] 邢克飞, 何伟, 杨俊. COTS 器件的空间应用技术研究[J]. *计算机测量与控制*, 2011, 19(7): 1741-1745
- [14] 王猛, 宁滨, 马连川. 基于 COTS 的安全计算机系统[J]. *铁道通信信号*, 2007, 43(3): 56-58
- [15] 罗巧云. 美军 F-22 的先进航空电子系统[J]. *电讯技术*, 2006, 46(6): 7-12
- [16] Luo Rui, LI Guo-zhu. Development of the F-35 Avionics System[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2012, 32(8): 21-23