
人工免疫算法

(Immune Algorithm, IA)

1. 免疫算法概述

免疫算法（Immune Algorithm, IA）：

是指以人工免疫系统的理论为基础，
借鉴免疫系统的记忆、学习、自我识别等性质，
建立相应数学模型，从而设计出解决实际问题的算法。

该算法实现了：

类似于生物免疫系统的抗原识别、细胞分化、记忆和自我调节的功能。

发展历史

- Farmer等人在1986年首先在工程领域提出**免疫**概念；
- Varela等人受免疫网络学说的启发，进而完善免疫网络模型。
- ◆ **免疫算法的主要会议：**

International Conference on Artificial Immune Systems, ICARIS

- 1997年，IEEE的SMC组织专门成立了**人工免疫系统及应用**的分会组织；
- 目前，几乎所有有关人工智能领域的学术会议都收录**AIS**方面的论文。

应用领域

1. 自动控制
2. 故障诊断
3. 模式识别
4. 图象识别
5. 优化设计
6. 机器学习
7. 网络安全

身体如何抵抗疾病？

免疫系统由许多不同种类的白细胞组成。白细胞共同保护我们免受致病细菌的侵害。

- 1 **巨噬细胞识别细菌(识别)**：当细菌入侵时，巨噬细胞会吞噬细菌并显示其表面形状或抗原，以供其他免疫细胞看到。
- 2 **辅助性T细胞指导防御(指导防御)**：辅助T细胞在巨噬细胞上发现外源抗原并开始繁殖。它们警告其他白细胞并指导人体的防御。
- 3 **B细胞产生抗体(应答)**：B细胞开始制造称为抗体的化学物质。抗体可以锁定外来抗原，从而使其他免疫细胞更容易破坏它们。
- 4 **杀伤性T细胞破坏细菌(消灭病菌)**：在辅助性T细胞的刺激下，杀伤性T细胞繁殖并破坏入侵的细菌。
- 5 **免疫接种**：打疫苗，用来改进免疫能力的主要方法

2.1 生物免疫系统及功能

- 免疫是机体的一种生理反应，
- 当病原体(抗原)进入人体时，
- 刺激免疫细胞(淋巴B细胞，T细胞)产生抵抗该病源体的蛋白质——抗体，
- 抗体能将病原体消灭，并留在人体内。
- 当同样的病原体再次入侵时，能很快地被留在体内的抗体消灭。

免疫系统的作用

1. 免疫系统能抵御日常生活中的绝大多数病原体，使我们保持健康。
 2. 免疫系统还具有记忆功能，当我们得过某种疾病后，系统会生成专门的记忆细胞记住那些触发疾病的病原体，细菌再次入侵的时候身体就有了免疫力。
 3. 疾病的记忆细胞也可通过注射疫苗获得，记忆细胞不仅能记住曾经入侵的病原体，对类似的其他疾病也能起到一定的免疫效果。
- 从人的角度：免疫的主要作用是帮助人体自身的免疫系统抵制由病毒和细菌引起的疾病。
 - 从生物学角度：免疫或免疫接种是强化个体抵御外部个体的能力的过程。

相关名词

- ◆ **抗原**：引起免疫反应的分子。即能刺激人体免疫细胞，使人体产生免疫反应的物质。可以是人体本身固有的，如血液，也可以是人体内根本不存在的，如某些细菌，病毒，药物等。
- ◆ **抗体**：是指免疫系统受抗原刺激后，免疫细胞转化为浆细胞并产生能与抗原发生特异性结合的免疫球蛋白，该免疫球蛋白即为抗体。
- ◆ 每种抗体只识别特定的目标抗原。当这种抗原再次入侵时，人体会产生抵抗（免疫）能力，从而避免此类疾病的发生。

◆ **淋巴细胞**：免疫系统中起主要作用的微小白细胞，包括B细胞和抗体，T细胞和细胞因子以及自然杀伤细胞。

1. **B细胞**：全称为B淋巴细胞，免疫系统的本质部分。

2. **T细胞**：全称为T淋巴细胞，按功能可分为细胞毒T细胞（用来分解、消灭已感染病毒的细胞），辅助T细胞（用来识别病菌），调节/抑制T细胞和记忆T细胞。

◆ **亲和力**：抗体和抗原，抗体和抗体之间的相似程度。

免疫功能

◆ **免疫识别**：区分‘自己’和‘非己’。

自己”就是生物体自身的组织；“非己”是非生物体自身的组织或者某一物质

◆ **免疫应答**：免疫系统对自身成分产生天然免疫耐受，对抗原异物产生排除作用的生理过程

◆ **免疫记忆**：在再次遇到相同抗原时，在联想记忆作用下，应答速度大大提高。

◆ **克隆选择**：**B**细胞被激活后增值复制产生克隆**B**细胞，随后克隆**B**细胞发生变异，产生对**抗原**具有特异性的**抗体**。

免疫系统的工作模型

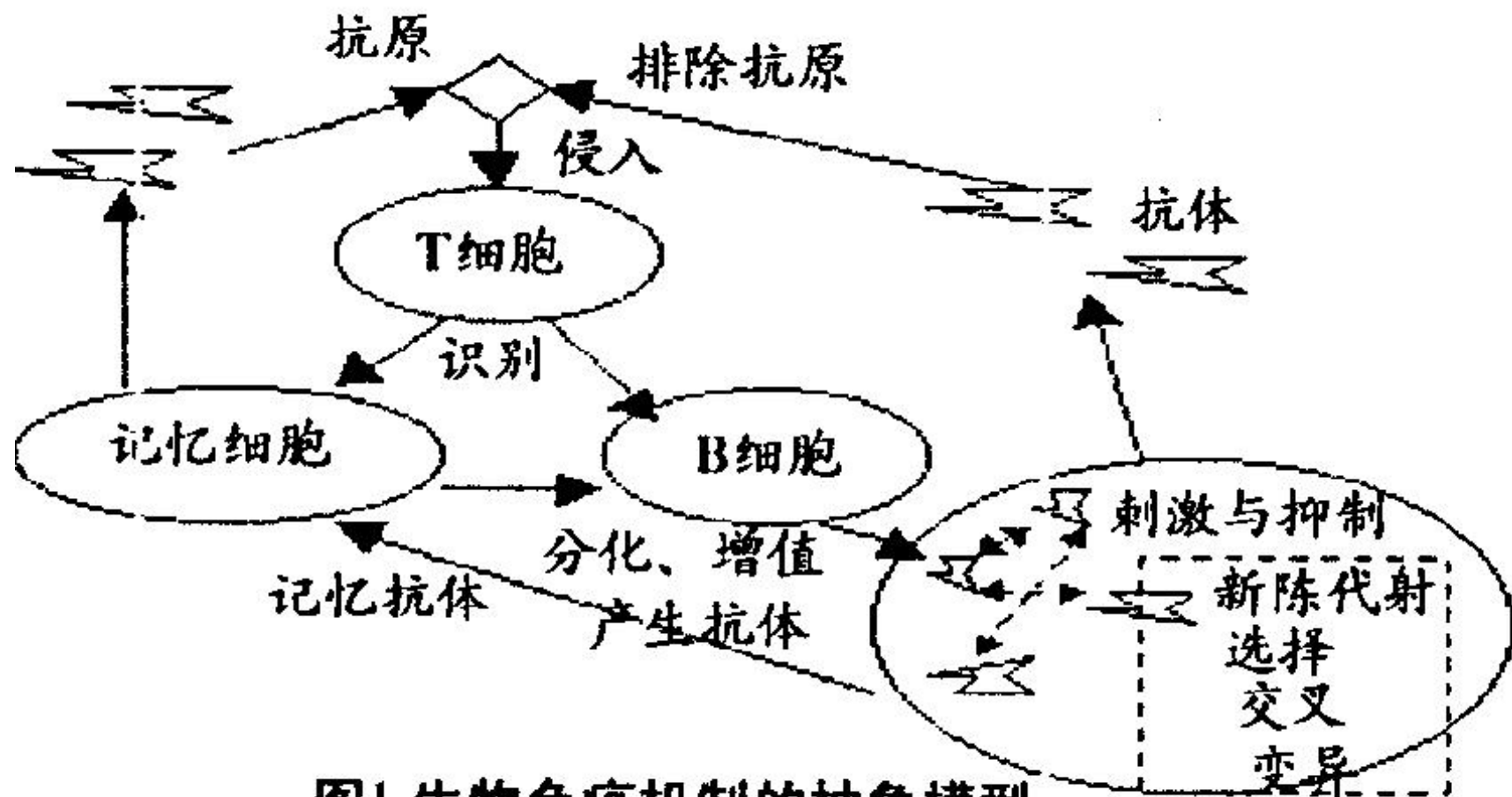


图1 生物免疫机制的抽象模型

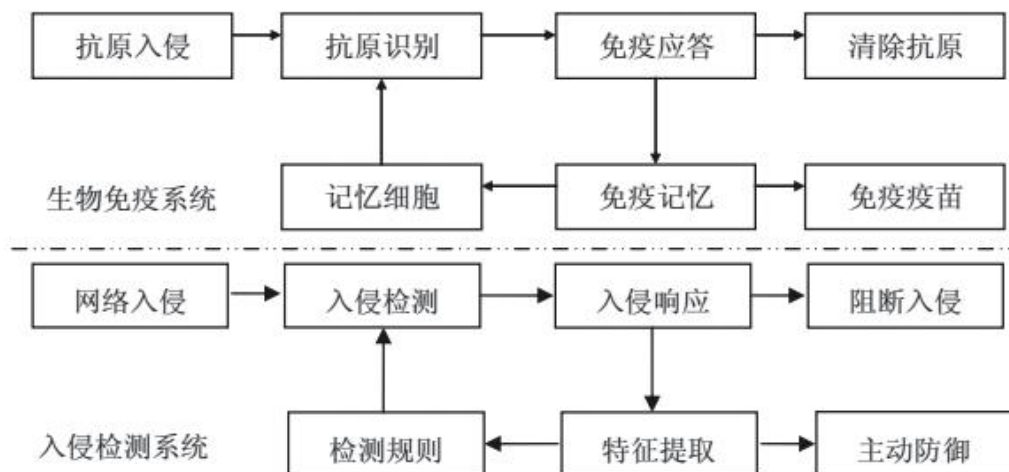
3 人工免疫算法

受生物免疫系统工作制的启发而推出的一种新型的智能搜索算法。

将优化问题的寻优过程与生物免疫系统识别抗原并实现抗体进化的过程对应起来，形成一种智能优化算法。

免疫算法：将优化问题中待优化的问题对应抗原，
可行解对应抗体（B 细胞），
可行解质量对应免疫细胞与抗原的亲合力。

应用案例：信息安全



算法主要包含以下几大模块：

（1）抗原识别与初始抗体产生。

根据待优化问题的特点设计合适的抗体编码规则，并在此编码规则下利用问题的先验知识产生初始抗体种群。

（2）抗体评价

对抗体的质量进行评价，评价准则主要为**抗体亲和度和个体浓度**，评价得出的优质抗体将进行进化免疫操作，劣质抗体将会被更新。

（3）免疫操作

利用**免疫选择、克隆、变异、克隆抑制、种群刷新**等算子模拟生物免疫应答中的各种免疫操作，形成基于生物免疫系统克隆选择原理的进化规则和方法，实现对各种最优化问题的寻优搜索。

3.1 免疫算法基本概念

抗原与抗体间亲和度评价算子

- 可描述为抗体结合抗原的强度
- 与遗传算法中的适应度类似。
- 亲和度计算与实际问题相关，针对不同的优化问题，应根据问题的特点定义合适的亲和度评价函数。
- 通常对目标函数进行简单处理：取倒数，取负数。。
- 输入为可行解， 输出亲和度评价结果

$aff(x)$: x 为可行解

抗体与抗体间亲和力

衡量抗体间的相似度。

➤ 基于欧式距离的计算方法：

$$\text{aff}(ab_i, ab_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^L (ab_{i,k} - ab_{j,k})^2}$$

➤ 基于海明距离的计算方法。

$$\text{aff}(ab_i, ab_j) = \sum_{k=1}^L \partial_k \quad \partial_k = \begin{cases} 1, & ab_{i,k} = ab_{j,k} \\ 0, & ab_{i,k} \neq ab_{j,k} \end{cases}$$

$ab_{i,k}$ 和 $ab_{j,k}$ 分别为抗体 i 的第 k 维和抗体 j 的第 k 维，

抗体浓度评价算子

- 衡量抗体种群的多样性好坏。
- **抗体浓度过高**：种群中非常类似的个体大量存在，则寻优搜索会集中于可行解区间的一个区域，不利于全局优化。
- 因此优化算法中应对浓度过高的个体进行抑制，保证个体的多样性
- 抗体浓度定义：

$$\text{den}(ab_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N S(ab_i, ab_j) \quad S(ab_i, ab_j) = \begin{cases} 1, & \text{aff}(ab_i, ab_j) < \delta_s \\ 0, & \text{aff}(ab_i, ab_j) \geq \delta_s \end{cases}$$

N 为种群规模； $S(ab_i, ab_j)$ 表示抗体间的相似度，

其中 ab_i 为种群中的第 i 个抗体， $\text{aff}(ab_i, ab_j)$ 为抗体 i 与抗体 j 的亲密度， δ_s 为相似度阈值。

激励度算子

- 抗体激励度是对抗体质量的最终评价结果，
- 通常亲和度好、浓度低的抗体会得到较优的激励度。
- 抗体激励度的计算：利用抗体亲和度和抗体浓度的评价结果进行简单的数学运算得到

$$\text{sim}(ab_i) = a \cdot \text{aff}(ab_i) - b \cdot \text{den}(ab_i)$$

$$\text{或 } \text{sim}(ab_i) = \text{aff}(ab_i) \cdot e^{-a \cdot \text{den}(ab_i)}$$

$\text{sim}(ab_i)$ 为抗体 ab_i 的激励度； a 、 b 为计算参数，

免疫选择算子

- 免疫选择算子：根据**抗体的激励度**确定选择哪些抗体进入克隆选择操作。
- 在抗体群中**激励度优**的抗体个体具有更好的质量，
- 更有可能被选中进行克隆选择操作，在搜索空间中更有搜索价值。

克隆算子

克隆算子将免疫选择算子选中的抗体个体进行复制

$$T_c(ab_i) = \text{clone}(ab_i)$$

$\text{clone}(ab_i)$ 为 m_i 个与 ab_i 相同的克隆构成的集合；

变异算子

- 对克隆算子得到的抗体克隆结果进行变异操作，以产生亲和度突变，实现局部搜索。
- 变异算子是免疫算法中产生有潜力的新抗体、实现区域搜索的重要算子。

克隆抑制算子

用于对经过变异后的克隆体进行再选择，抑制亲和度差的抗体，保留亲和度优的抗体进入新的抗体种群

种群刷新算子

对种群中激励度较差的抗体进行刷新，从抗体种群中删除这些抗体并以随机生成的新抗体替代，有利于保持抗体的多样性，实现全局搜索，探索新的可行解空间区域。

3.2 免疫系统和免疫算法的比较

免疫系统	免疫算法
抗原	要求解的问题
抗体	最佳解向量
亲和度	可行解的质量
细胞活化	免疫选择
淋巴细胞分化（记忆细胞分化）	维持最优解
T细胞抑制抗体	消除多余的候选解
生命增加（细胞克隆）	用遗传算子生成新的抗体

3.3 免疫算法分类

- 克隆选择算法

Castro提出了基于免疫系统的克隆选择理论的克隆选择算法

- 免疫遗传算法

Chun 等人提出了一种免疫算法，实质上是改进的遗传算法根据体细胞和免疫网理论改进了遗传算法的选择操作，从而保持了群体的多样性，提高算法的全局寻优能力。

- 反向选择算法

- 疫苗免疫算法

3.4 免疫算法基本步骤

- **（1）首先进行抗原识别**，即理解优化问题，对问题进行可行性分析，提取先验知识，构造出合适的亲和度函数，并制定各种约束条件。
- **（2）产生初始抗体群**，把问题的可行解表示成解空间中的抗体，在解的空间内随机产生一个初始种群。

-
- **(3)** 对种群中的每一个可行解进行亲和度评价。
 - **(4)** 判断是否满足算法终止条件： 如果满足条件，则终止算法寻优过程，输出计算结果; 否则，继续寻优运算。
 - **(5)** 计算抗体浓度和激励度。

- **(6)** 进行免疫处理，包括免疫选择、克隆、变异和克隆抑制。

免疫选择：

根据种群中抗体的亲和度和浓度计算结果选择优质抗体

克隆：

对选择的抗体进行克隆复制，得到若干副本；

变异：

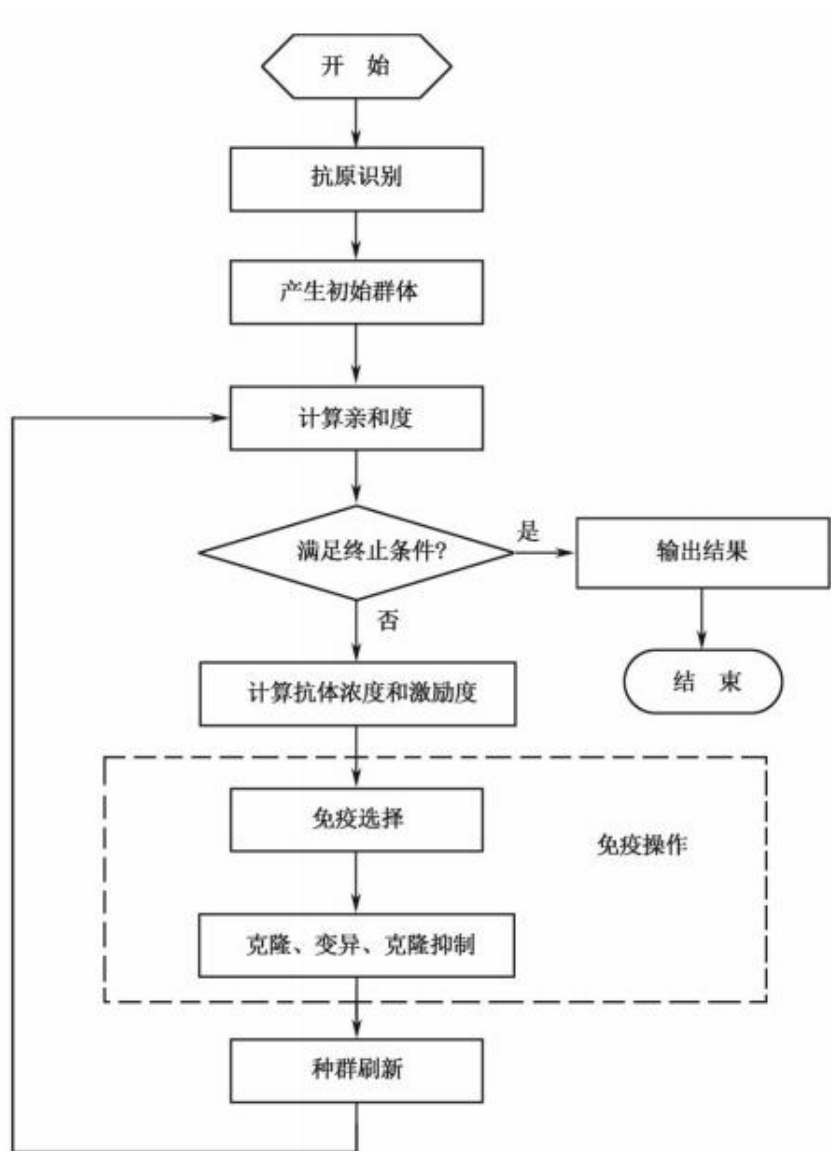
对克隆得到的副本进行变异操作，使其发生亲和度突变；

克隆抑制：

对变异结果进行再选择，抑制亲和度差的抗体，保留亲和度优的变异结果。

- **(7) 种群刷新**，以随机生成的新抗体替代种群中激励度较低的抗体，形成新一代抗体，转步骤（3）。

3.5 基本流程



3.6 关键参数

➤ 抗体种群大小 **NP**

种群越大，免疫算法的全局搜索能力越好，但是算法每代的计算量也相应增大。在大多数问题中，NP 取10~100较为合适，一般不超过200。

➤ 免疫选择比例

免疫选择的抗体的数量越多，将产生更多的克隆，其搜索能力越强，但是将增加每代的计算量。一般可以取抗体种群大小10%~ 50%。

➤ 抗体克隆扩增的倍数

克隆的倍数决定了克隆扩增的细胞的数量，从而决定了算法的搜索能力，主要是局部搜索能力。克隆倍数数值越大，局部搜索能力越好，全局搜索能力也有一定提高，但是计算量也随之增大，一般取5~ 10倍。

➤ 种群刷新比例

细胞的淘汰和更新是产生抗体多样性的重要机制，因而对免疫算法的全局搜索能力产生重要影响。每代更新的抗体一般不超过抗体种群的50%。

➤ 最大进化代数 **G**

一般G取100~500。

4 免疫算法应用举例

例1 利用免疫算法求解区间 $[-4, 4]$ 上的函数的最小值。

$$f(x,y)=5\sin(xy)+x^2+y^2$$

- **(1)** 变异概率为 $P=0.7$ ，激励度系数为 $\alpha=2$ ， $\beta=1$ ，相似度阈值为 $\delta_{\text{sim}}=0.2$ ，克隆个数为 $M_{\text{cl}}=5$;
- **(2)** 随机产生初始种群，计算个体亲和度、抗体浓度和激励度，并按激励度排序。
- **(3)** 取激励度前 $NP/2$ 个个体进行克隆、变异、克隆抑制的免疫操作;免疫后的种群进行激励度计算。
- **(4)** 随机生成 $NP/2$ 个个体的新种群，并计算个体亲和度、抗体浓度和激励度;免疫种群和随机种群合并，按激励度排序，进行免疫迭代。
- **(5)** 判断是否满足终止条件：若满足，则结束搜索过程，输出优化值;若不满足，则继续进行迭代优化。

解：

(1) 设定种群规模, 编码染色体, 产生初始 种群。

将种群规模设定为5; 用十进制数编码个体;

取下列个体组成初始种群 S_1 :

s1	s2	s3	s4	s5
-2.7517	-3.0329	1.6601	0.5167	1.2581
2.8296	0.0088	-1.4605	3.1164	-1.1671

(2) 计算抗原与抗体间亲和度:

$$f(x,y)=5\sin(xy)+x^2+y^2$$

f1= 20.9806	f2 =17.9303	f3 =3.0064
f4 =29.7501	f5 = -4.2576	

(3) 计算抗体浓度与激励度

$$D1 = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 S(s_1, s_j), S(s_1, s_j) = \begin{cases} 1, \|s_1 - s_j\|_2 < \delta \\ 0, \|s_1 - s_j\|_2 \geq \delta \end{cases}$$

$$D1 = 0.2000 \quad D2 = 0.2000 \quad D3 = 0.2000 \quad D4 = 0.2000 \quad D5 = 0.2000$$

激励度: $g_i = \alpha f_i - \beta D_i$

$$g1 = 20.9806 \quad g2 = 17.9303 \quad g3 = 3.0064$$

$$g4 = 29.7501 \quad g5 = -4.2576$$

$g1=20.9806$ $g2 = 17.9303$ $g3 = 3.0064$
 $g4 = 29.7501$ $g5 = -4.2576$

(4)激励度按升序排序:

$sg1= -4.2576$ (s5) $sg2 =3.0064$ (s3) $sg3 = 17.9303$ (s2)
 $sg4 = 20.9806$ (s1) $sg5 = 29.7501$ (s4)

选出激励度小的前N/2个体进行免疫选择操作

$s5 = (1.2581, -1.1671)$, $s3 = (1.6601, -1.4605)$

对每个抗体进行克隆操作5次，并进行变异操作

s5	1.2581	1.2581	1.2581	1.2581	-2.7081
	-1.1671	-3.1378	-1.1671	-3.8199	-3.2462
s3	1.6601	0.2469	1.6601	-3.1550	-2.7707
	-1.4605	2.5598	-1.4605	-0.6124	0.2171

克隆抑制

对新产生的抗体，计算亲和度

-2.0288 13.6558 18.8146 14.6767 8.6862

-1.0722 1.6033 6.6267 5.8575 20.0237

保留亲和度最小的个体

af1 = (1.2581, -1.1671) af2 = (1.6601,-1.4605)

af3 = (0.2469,2.5598)

种群刷新

重新随机生成新的抗体

$bf1 = (-0.3406, 3.0030)$

$bf2 = (0.1444, 3.5490)$

免疫种群与新抗体组成新的种群S

$af1 = (1.2581, -1.1671)$ $af2 = (1.6601, -1.4605)$

$af3 = (0.2469, 2.5598)$

$bf1 = (-0.3406, 3.0030)$, $bf2 = (0.1444, 3.5490)$

依次迭代

遗传算法和人工免疫算法的区别

- (1) AIS算法搜索多个极值效果较好，而遗传算法搜索全局最优解效果较好。
- (2) AIS算法中基因由个体选择，而遗传算法中基因由环境选择。
- (3) AIS算法一般较少用交叉算子，基因在同一代个体中进化，而遗传算法的子代个体则是父代个体基因交叉组合的结果。