

# 人工免疫系统进展与展望

焦李成, 杜海峰

(西安电子科技大学智能信息处理研究所与雷达信号处理重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 本文评述人工免疫系统的历史、研究现状和进一步发展的方向, 着重论述人工免疫系统的机理、算法和应用, 总结了免疫算法的一般步骤, 比较了其与神经网络、进化计算以及一般确定性优化算法的异同. 在总结人工免疫系统存在问题的基础上, 探讨了进一步研究的方向.

**关键词:** 人工免疫系统; 进化算法; 神经网络

**中图分类号:** TP18 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 10-1540-09

## Development and Prospect of the Artificial Immune System

JIAO Li-cheng, DU Hai-feng

(Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** The history, research areas and development directions of the artificial immune system are reviewed. The research on immune mechanism, algorithm and application are emphasized. The similarities and differences between the AIS and evolutionary algorithms, neural networks, general optimized algorithm are studied. Based on the disadvantage of AIS, the development directions are discussed.

**Key words:** artificial immune system; evolutionary algorithms; neural networks

## 1 引言

人工智能(Artificial Intelligence)于 1956 年作为一门单独的学科问世以来, 已经取得了许多重要成果, 并且广泛应用于包括机械电子在内的许多领域, 引起了这些领域革命性的变化<sup>[1~6]</sup>. 但是, 回顾 40 多年的曲折发展历程, 人工智能并未象人们预料那样取得巨大的成功, 许多研究者深感现在的人工智能离真正的智能还差得很远<sup>[7]</sup>, 开始从方法论到技术实现各个层次对传统 AI 理论及技术的局限性进行反思<sup>[8]</sup>. 认为“在计算机科学中, 我们永远不会有运动学三定律”<sup>[9]</sup>, 智能行为不能用简单数学模型描述; 人工智能“应该从生物学而不是物理学受到启示”, 基于“还原论”的传统 AI 应该转向“进化论”<sup>[10]</sup>.

事实上, 生命现象和生物的智能行为一直为人工智能研究者所关注, 尤其是近 10 年人工智能的成就与生物有着密切关系, 不论是从结构模拟的人工神经网络, 还是从功能模拟的模糊逻辑系统, 还是着眼于生物进化微观机理和宏观行为的进化算法, 都有仿生的痕迹. 也正是模仿生物智能行为, 借鉴其智能机理, 许多解决复杂问题的新方法不断涌现, 丰富了人工智能的研究领域.

人工免疫系统是模仿自然免疫系统功能的一种智能方法, 它实现一种受生物免疫系统启发, 通过学习外界物质的自

然防御机理的学习技术, 提供噪声忍耐、无教师学习、自组织、记忆等进化学习机理, 结合了分类器、神经网络和机器推理等系统的一些优点, 因此具有提供新颖的解决问题方法的潜力<sup>[11]</sup>. 其研究成果涉及到控制、数据处理、优化学习和故障诊断等许多领域, 已经成为继神经网络、模糊逻辑和进化计算后人工智能的又一研究热点<sup>[12~22]</sup>.

## 2 人工免疫系统的历史

生物体是一个复杂的大系统, 其信息处理功能是由时间和空间尺寸相异的三个子系统完成的, 即: 脑神经系统、免疫系统和内分泌系统. 人工智能对神经系统的借鉴和模拟的成果很丰富, 已经有比较成熟的方法和模型以资利用, 相比较而言, 对免疫系统和内分泌系统的相应研究还处于初级阶段.

需要说明的是, 本文的人工免疫系统指应用于人工智能领域的免疫机理和由此而形成的方法和理论, 即计算机实现的数字化免疫系统智能计算模型. 其作为智能策略的研究也只是近十几年的事, 是人工智能的一个新兴研究领域.

### 2.1 生物免疫研究的发展<sup>[23~26]</sup>

在生物学领域中, 免疫学是一门相对年轻的学科, 然而, 人类对自然免疫的认识可以追溯到 300 年以前. 早在 17 世纪, 我国医学家就创造性地发明了人痘以预防天花. 1796 年英国医生 Edward Jenner“牛痘”的发明, 取代了人痘苗, 是公认

的现代免疫学开端.法国免疫学家 Pasteur 发明了减毒细菌疫苗,奠定了经典免疫疫苗的基础.经过 300 多年的发展,免疫学已经从微生物学的一章发展成一门独立的学科,并派生出若干分支,例如,细胞免疫学、分子免疫学、神经与内分泌免疫学、生殖免疫学和行为免疫学等.

表 1 总结了免疫学历史上(至 20 世纪 90 年代初)比较重要的思想、理论和研究成果.

表 1 自然免疫学的主要理论

主要目标	时间	代表人物	思想、理论和研究成果
经验 免疫时期	16 世纪起	中国民间	“人痘”的发明和应用
	1796 ~ 1870	Jenner	“牛痘”的发明和应用
		Koch	病理学
	1870 ~ 1890	Pasteur	疫苗接种
		Besedovsky	神经-内分泌-免疫网络学说
		Metchinikoff	噬菌作用
科学 免疫时期	1890 ~ 1910	Von Behring & Kitasato	发现抗体
		Ehrlich	发现细胞受体
	1910 ~ 1930	Bordet	免疫特性
		Landsteiner	半抗原
现代免疫 学时期	1930 ~ 1950	Breml & Haurowitz	抗体合成
		Linus Pauling	抗原模型
	1950 ~ 1980	Burnet	克隆选择
		Niels Jerne	免疫网络与协作理论
分子 水平研究	1980 ~ 1990	Susumu Tonegawa	受体的结构和多样性

事实上,人们对自然免疫系统的认识还不是十分充分,只是在免疫系统理论上“建立一个合作系统的综合性理论的基础和需要都已很明显”<sup>[27]</sup>.就现有的免疫系统理论而言,为学术界所接受,并为工程应用尤其是人工智能领域所借鉴的主要是 Burnet 的克隆选择学说和 Jerne 的免疫网络学说.

## 2.2 人工免疫系统研究概况

Farmer 等人(1986)率先基于免疫网络学说给出了免疫系统的动态模型,并探讨了免疫系统与其他人工智能方法的联系,开始了人工免疫系统研究<sup>[28]</sup>.在我国,靳蕃教授在 1990 年前后就已经指出“免疫系统所具有的信息处理与肌体防卫功能,从工程角度来看,具有非常深远的意义”<sup>[29]</sup>.但是,这以后的研究成果比较少见.

直到 1996 年 12 月,在日本首次举行了基于免疫性系统的国际专题讨论会,首次提出了“人工免疫系统”的概念.随后,人工免疫系统进入了兴盛发展期,D. Dasgupta (1997) 和丁永生(2000)等认为人工免疫系统已经成为人工智能领域的理论和应用研究热点<sup>[11,22]</sup>,相关论文和研究成果正在逐年增加.1997 和 1998 年 IEEE Systems, Man and Cybernetics 国际会议还组织了相关专题讨论,并成立了“人工免疫系统及应用分会”.

## 3 人工免疫系统的研究领域

D Dasgupta(1997)系统分析了人工神经网络和人工免疫系统的异同,认为在组成单元及数目、交互作用、模式识别、任务执行、记忆学习、系统鲁棒性等方面是相似的,而在系统分

布、组成单元间的通信、系统控制等方面是不同的<sup>[22]</sup>;并指出,自然免疫系统是人工智能方法灵感的重要源泉<sup>[18]</sup>.Y Dote (1998)拓展了软计算的概念,认为应该包括免疫网络和混沌理论<sup>[30]</sup>.Gasper(1999)等认为多样性是自适应动态的基本特征,而 AIS 是比 GA 更好地维护这种多样性的优化方法<sup>[31]</sup>.免疫系统所表现出的“学习”行为丰富了模式识别方法.

人工免疫系统的研究主要集中在以下几个方面:

### 3.1 人工免疫系统模型的研究

由于免疫系统本身比较复杂,因此人工免疫系统模型的研究相对较少.Jang-Sung Chu(1998)等介绍了免疫算法的数学模型和基本步骤,阐述了它不同于其他优化算法的优点.最后将免疫算法、遗传算法和进化策略同时应用于求解 sinc 函数的最优值,以进行比较研究.指出免疫算法在求解某些特定优化问题方面优于其他优化算法,有广阔的应用前景<sup>[32]</sup>.基于抗原-抗体相互结合的特征,A Tarakanov(2000)等建立了一个比较系统的人工免疫系统模型,并指出该模型经过改进后用于评价加里宁格勒(kaliningrad)生态学地图集的复杂计算<sup>[33]</sup>.J Timmis(2001)等提出了一种资源限制的人工免疫系统方法,该算法基于自然免疫系统的种群控制机制,控制种群的增长和算法终止的条件,并成功用于 Fisher 花瓣问题中<sup>[19]</sup>.Nohara(2000)不是基于免疫系统,而是基于抗体单元的功能提出了一种非网络的人工免疫系统模型<sup>[34]</sup>.

### 3.2 免疫机理的研究

为了适应环境的复杂性和异敌的多样性,生物免疫系统采用了单纯冗余策略.这是一个具有高稳定性和可靠性的方法.免疫系统是由  $10^7$  个免疫子网络构成的一个大规模网络,机理很复杂,尤其是其所具有的信息处理与机体防御功能,为工程应用提供了新的概念、理论和方法.对这些可借鉴的相关机理扼要阐述如下:

(1)记忆学习 免疫系统的记忆作用是众所周知的,如患了一次麻疹后,第二次感染了同样的病毒也不致病.这种记忆作用是由记忆 T 细胞和记忆 B 细胞所承担的.这是因为在一次免疫响应后,如果同类抗原再刺激时,在短时间内,免疫系统会产生比上一次多得多的抗体,同时与该抗原的亲合力也提高了.免疫系统具有识别各种抗原并将特定抗原排斥掉的学习记忆机制,这是与神经网络不同的记忆机制.

(2)反馈机制 图 1 反映了细胞免疫和体液免疫之间的关系,以及抗原(Ag)、抗体(Ab)、B 细胞(B)、辅助 T 细胞( $T_H$ )和抑制 T 细胞( $T_S$ )之间的反应,体现了免疫反馈机理.其中, $I_L^+$ 表示  $T_H$  细胞分泌白细胞介素, $I_L^-$ 表示  $T_S$  细胞分泌白细胞介素.由图 1 可见,当抗原进入机体并经周围细胞消化后,将信息传递给 T 细胞,即传递给  $T_H$  细胞和  $T_S$  细胞, $T_S$  细胞用于抑制  $T_H$  细胞的产生.然后共同刺激 B 细胞,经过一段时间后,B 细胞产生抗体以清除抗原.当抗原较多时,机体内的  $T_H$  细胞也较多,而  $T_S$  细胞却较少,从而产生的 B 细胞会多些.随着抗原的减少,体内  $T_S$  细胞增多,它抑制了  $T_H$  细胞的产生,则 B 细胞也随着减少.经过一段时间后,免疫反馈系统便趋于平衡.利用这一机理可提高进化算法的局部搜索能力,突出具有特异行为的网络,从而提高个体适应环境的能力.

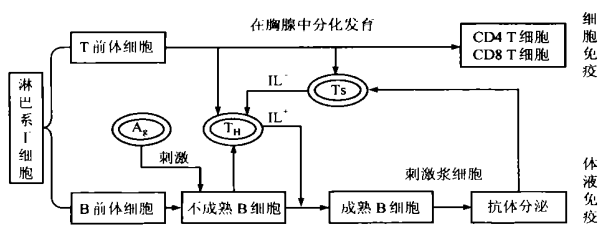


图1 细胞免疫和体液免疫

对上述反馈机理进行简化,定义在第  $k$  代的抗原数量为  $(k)$ ,由抗原刺激的  $T_H$  细胞的输出为  $T_H(k)$ ,  $T_S$  细胞对 B 细胞的影响为  $T_S(k)$ ,则 B 细胞接收的总刺激为<sup>[35]</sup>:

$$S(k) = T_H(k) - T_S(k) \quad (1)$$

式中:  $T_H(k) = k_1 \cdot (k)$ ;  $T_S(k) = k_2 f[S(k)] \cdot (k)$ ,  $f[\cdot]$  是一个选定的非线性函数.特别地,对于控制系统,若将抗原的数量  $(k)$  作为偏差, B 细胞接收的总刺激  $S(k)$  作为控制器输出  $u(k)$ ,则有以下反馈控制规律:

$$u(k) = \{k_1 - k_2 f[u(k)]\} e(k) \quad (2)$$

显然,构成了一个参数可变的比例调节器.

(3) 多样性遗传机理 在免疫系统中,抗体的种类要远大于已知抗原的种类.解释抗体的多样性有种族学说和体细胞突变学说.其主要原因可能是受基因片段多样性的联接以及重链和轻链配对时等复杂机制所控制.该机理可以用于搜索的优化,它不尝试于全局优化,而是进化地处理不同抗原的抗体,从而提高全局搜索能力,避免陷入局部最优.

(4) 克隆选择机理<sup>[23]</sup> 由于遗传和免疫细胞在增殖中的基因突变,形成了免疫细胞的多样性.这些细胞的不断增殖形成无性繁殖系.细胞的无性繁殖称为克隆.有机体内免疫细胞的多样性能达到这种程度,以至于当每一种抗原侵入机体都能在机体内选择出能识别和消灭相应抗原的免疫细胞克隆,使之激活、分化和增殖,进行免疫应答以最终清除抗原,这就是克隆选择.但是,克隆—无性繁殖—中父代与子代间只有信息的简单复制,而没有不同信息的交流,无法促使进化.因此,需要对克隆后的子代进行进一步处理.

在人工免疫系统中,克隆选择是由亲合度诱导的抗体随机映射,抗体群的状态转移情况可以表示成如下的随机过程:

$$C_s: A(k) \xrightarrow{\text{clone}} A(k) \xrightarrow{\text{mutation}} A(k) \xrightarrow{\text{compress}} A(k+1)$$

依据抗体与抗原的亲合度函数亲合度  $\text{aff}(\cdot)$ ,解空间中的一个点  $a_i(k) \in A(k)$  分裂成了  $q_i$  个相同的点  $a_i(k) \in A(k)$ ,经过变异和选择后获得新的抗体群.在上述过程中,实际上包括了三个步骤,即克隆、变异和压缩选择.

对于二进制编码,抗体  $a \in B^l$ ,其中  $B^l = \{0, 1\}^l$  代表所有长度为  $l$  的二进制串组成的集合,抗体群  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  为抗体  $a$  的  $n$  元组.

定义:

$$(A) = [ (a_1) \quad (a_2) \quad \dots \quad (a_n) ]^T \quad (3)$$

其中:  $(a_i) = I_i \times a_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $I_i$  为  $q_i$  维行向量.

$$q_i = g(N_c, f(a_i)) \quad (4)$$

一般取:

$$q_i = \text{Int} \left[ N_c \cdot \frac{f(a_i)}{\sum_{j=1}^n f(a_j)} \right], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$N_c > n$  是与克隆规模有关的设定值;  $\text{Int}(\cdot)$  为上取整函数,  $\text{Int}(x)$  表示大于  $x$  的最小整数.由此可见,对单一抗体而言,其克隆规模是自适应调整的.克隆过后,种群变为:

$$A = \{A, A_1, A_2, \dots, A_n\} \quad (6)$$

其中:

$$A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iq_i-1}\}, a_{ij} = a_i, j = 1, 2, \dots, q_i - 1 \quad (7)$$

为了保持抗体的原始种群,因此,变异算子并不是作用到

$A$  上,即:

$$p(a_i \rightarrow a_i) = \begin{cases} p_m^{H(a_i, a_i)} (1 - p_m)^{1 - H(a_i, a_i)}, & a_i \neq A_j \\ 1, & a_i = A_j \end{cases} \quad (8)$$

$\forall i = 1, 2, \dots, n$  若存在变异后抗体  $b = \max\{f(a_{ij}) | j = 2, 3, \dots, q_i - 1\}$ ,使得:

$$f(a_i) < f(b), a_i \leftarrow A$$

则用  $b$  取代原抗体  $a_i$ ,从而更新抗体群,实现信息交换.

可以看出,克隆的实质是在一代进化中,在侯选解的附近,根据亲合度的大小,产生一个变异解的群体,从而扩大了搜索范围,可以增加抗体群的多样性,有助于防止进化早熟和搜索陷于局部极小值;进一步可以认为,克隆是将一个低维空间( $n$  维)的问题转化到更高维( $N$  维)的空间中解决,然后将结果投影到低维空间( $n$  维)中.

(5) 其他机理 免疫系统所具的无中心控制的分布自治机理、自组织存储机理、免疫耐受诱导和维持机理以及非线性机理均可用于建立人工免疫系统.

### 3.3 人工免疫算法的研究

正是因为对免疫机理的认识还不十分系统深入,所以,有关于免疫算法(以下简称免疫算法)的研究主要集中在利用免疫机理改进其他的算法以构成新的算法,如免疫-遗传算法、免疫-神经网络等等,而关于人工免疫系统本身的算法研究成果并不多.

至于利用免疫机理改进其他的算法,又主要集中在遗传算法. R Deaton(1997)<sup>[14]</sup>, 孟繁桢(1997)<sup>[36]</sup>, 周伟良(1999)<sup>[37]</sup>, 王煦法(1999)<sup>[38]</sup>, 曹先彬(2000)<sup>[39]</sup>, 邵学广(2001)<sup>[40]</sup>, 王磊(2001)<sup>[41]</sup>等从不同的角度研究了利用免疫机理改进遗传算法的方法,克服遗传算法过早收敛的问题,获得了满意的效果.如,武晓今等(2001)探讨了免疫遗传系统的构造,及其在函数寻优中的应用<sup>[42]</sup>. 曹先彬(2000)等借鉴生物免疫中的独特性网络调节理论,将进化个体对应为免疫系统中的抗体,群体适应度增量作为抗原,提出了一种改进遗传算法,实现了个体群在群体收敛性和个体多样性之间动态平衡的调整<sup>[39]</sup>. 孟繁桢(1997)等提出具有免疫体亲近性特征的遗传算法,增加了在已知的优秀个体中扩大同类个体范围的功能,避免了在同类个体中的最优秀者被丢失的可能性,同时保留了通常的遗传算法的交叉、变异等遗传算子,扩大了全局的搜索范围,避免了局部收敛<sup>[36]</sup>. 这些改进算法可以快速求出满足一定精确度要求的最优解,对解决工程应用问题具有实用价值.

K Krishna Kumar (1997) 等将神经网络和免疫系统机理结合提出了“免疫神经控制(INC)”的结构<sup>[43]</sup>. M Sasaki (1999) 等提出了一种基于免疫系统反馈机理的自适应学习的神经网络控制器<sup>[16]</sup>. 李亭鹤等(2001)针对凹形重叠区难以精确寻点的问题,提出了一种新的洞点搜索方法:感染免疫法. 实际应用表明,该方法无论是寻点能力还是在通用性方面都优于传统模式<sup>[44]</sup>.

### 3.4 人工免疫系统方法的应用研究

人工免疫系统主要应用如下表 2 所示.

表 2 人工免疫系统主要应用领域

应用领域	示 例
控制	电压调节器的控制,复杂动力学系统自适应控制
规划	电网规划
设计	设计人工神经网络
组合优化	TSP 问题, CDMA 多用户检测
图象处理	图象分割, 立体匹配
数据处理	多组分混合色谱信号的解析
知识发掘	数据库知识发现
机器人	多智能体决策系统, 分布式自动机器人系统等
故障监测和诊断	加工工具破损监测, 旋转机械在线故障诊断

(1) 控制 K Krishna Kumar (1997) 等将“免疫神经控制(INC)”用于复杂动力学系统的模型自适应控制, 效果良好<sup>[43]</sup>. M Sasaki (1999) 等提出了一种基于免疫系统反馈机理的自适应学习的神经网络控制器, 避免了神经网络学习在最小值附近的摆动, 提高了收敛速度<sup>[16]</sup>. 丁永生(2000)等针对低阶或高阶对象, 提出一种新颖的基于生物免疫系统反馈机理的通用控制器结构<sup>[35]</sup>. 该控制器包括一个基本的 P 型免疫反馈控制器和一个增量模块, P 型免疫反馈规律由模糊控制器自动调整, 控制增量模块可以由常规控制或神经网络来实现<sup>[45]</sup>. 激光热疗法中组织温度控制的计算机仿真结果表明, 该控制器的控制性能优于常规控制器. 李海峰等(2001)提出了以电力系统电压调节为应用目的的免疫系统的基本模型, 演示了应用于 STATCOM 的细胞免疫电压调节器的控制作用<sup>[46]</sup>.

(2) 规划 高洁(2001)将一种新的随机优化方法—免疫算法应用于电网规划, 利用 IEEE-6 节点系统作为样本网络进行分析计算. 并将该方法跟基于遗传算法的电网规划方法进行比较, 结果表明免疫算法在全局寻优的性能方面要优越于遗传算法<sup>[47]</sup>.

(3) 设计 张军(2000)等利用共生进化原理设计人工神经网络, 创造性地融入了免疫调节原理中的浓度抑制调节机制以保持个体的多样性, 提出了基于免疫调节的共生进化网络设计方法<sup>[48]</sup>. 周伟良(1999)等结合遗传算法的随机全局搜索能力和生物免疫中抗体通过浓度的相互作用机制, 构造了免疫遗传算法, 并利用实验验证了其在设计神经网络时的有效性<sup>[37]</sup>.

(4) 组合优化 曹先彬(2000)等用一种免疫遗传算法有效解决了装箱问题的求解<sup>[39]</sup>. 王照法(1999), 刘克胜(2000)等提出的免疫遗传算法(Immune Genetic Algorithm, 简称 IGA)成

功实现了 TSP 优化<sup>[38, 49]</sup>. 牛志强(2001)等用免疫算法解决 CDMA 中的多用户检测问题<sup>[50]</sup>. 曹先彬等(2000)构造的免疫进化策略在求解二次布局问题时取得了完美的结果<sup>[51]</sup>.

(5) 图象处理 D F McCoy (1997) 等将人工免疫系统用于图象分割<sup>[52]</sup>. 王肇捷(2001)等为了得到最佳视差图, 将免疫算法用于解决计算机视觉中的立体匹配; 与基于像素点灰度匹配相比, 免疫算法的匹配效果好; 与模拟退火匹配相比, 虽然都能得到全局最优的视差图, 但免疫算法的匹配速度快<sup>[53]</sup>.

(6) 数据处理 邵学广(2000)将免疫机理用于信号拟合, 实现了多组分混合色谱信号的解析<sup>[54]</sup>; 利用免疫—遗传算法实现了二维色谱数据的快速解析<sup>[55]</sup>; 通过对免疫系统中抗体对外来抗原的识别、消除等过程的模拟, 建立了一种新型的免疫算法模型, 为利用数据库解析混合物或生物大分子等物质的复杂 NMR 谱图开辟了一条全新的途径<sup>[40]</sup>. 杜海峰等基于智能互补融合观点, 提出了一种新的数据浓缩方法 ART 人工免疫网络, 并用于 R2 空间分类和 Fisher 花瓣问题的实验<sup>[56]</sup>.

(7) 知识发掘 J Timmis (1999) 等将人工免疫系统用于数据库知识发现, 与单一联结聚类分析和 Kononen 网络作了比较, 认为人工免疫系统作为数据分析工具是适合的<sup>[19]</sup>.

(8) 机器人 D Dasgupta (1998) 基于人工免疫系统建立了多智能体决策系统<sup>[57]</sup>. H Meshref (2000) 等探讨了自然免疫系统的行为, 并利用其对外部环境变化敏感的特性改进 DNA 算法, 用于“狗—羊”问题的结果表明, 改进的 DNA 算法适用与解决分布式自动机器人系统问题<sup>[17]</sup>. Jir Hyung Jun (1999) 等人工免疫系统在分布式自动机器人系统实现了协作和群行为<sup>[21]</sup>. R L King (2001) 等提出了一个用于智能体的人工免疫系统模型, 并总结了人类免疫系统可用于人工免疫系统智能体的主要功能<sup>[58]</sup>. 刘克胜(2000)基于免疫学的细胞克隆学说和网络调节理论, 提出了能有效增强自律移动机器人在动态环境中自适应能力的新算法<sup>[59]</sup>.

(9) 故障监测和诊断 D Dasgupta (1999) 等将人工免疫系统用于工业中, 进行加工工具破损监测<sup>[18]</sup>. 刘树林等(2001)受生物免疫系统自己—非己识别过程的启发提出了反面选择算法, 在故障诊断应用领域中改进了反面选择算法, 提出了对旋转机械在线故障诊断的新方法<sup>[60]</sup>. 杜海峰等还将 ART 人工免疫网络用于解决多级往复式压缩机故障诊断<sup>[61]</sup>, 效果好.

(10) 其他 人工免疫系统的理论和方法还广泛应用于计算机安全和密码学等领域. 如杨晓宇等(2001)对 AIS 与网络安全相结合的基因计算机进行了全面的描述, 并认为智能模拟在网络安全方面的应用前景广阔<sup>[62]</sup>.

## 4 一般模型

自 50 年代末以来, 在免疫学中有 2 个学说占主导地位: 抗体克隆选择学说和免疫网络学说(主要是独特型网络调节学说). 抗体克隆选择学说的要点是外来抗原选择出原先处于静止状态的互补细胞克隆, 被选择细胞克隆的激活、增殖和效应功能是免疫应答的细胞学过程, 而针对自身抗原的细胞克

降则被抑制或消除,因而对外来抗原的识别是关键的因素.免疫网络学说的观点是建立在自身识别上,认为免疫系统淋巴细胞上分布的特异性抗原受体可变区(V)组成内网络,通过免疫细胞相互识别V区上的抗原决定簇来实现免疫系统的功能;对外来抗原的应答,是建立在识别自身抗原基础上的反应.它们从不同的角度体现了免疫系统的三大功能:免疫防御(immune defence)、免疫监视(immune surveillance)和免疫自稳(immune homeostasis).

#### 4.1 生物免疫系统模型<sup>[63]</sup>

免疫系统是一个由细胞、分子和器官组成的复杂系统,主要用于限制异物对机体的侵害,并由此产生抗体,引发免疫响应.机体的异物被称为抗原(Antigen,简称Ag),由载体和半抗原(又称抗原决定簇或表位)组成.如图2(a)所示,正是由于抗原决定簇与抗体细胞相结合才能完成免疫应答.一类应答是由B细胞或B淋巴细胞产生抗体(Antibody,简称Ab)的响应.如图2(b)所示,抗体成“Y”型,接受器分子就在B淋巴细胞的表面,主要利用相似形来识别和绑定抗原.

免疫系统最早被定义为一个庞大的复杂地识别抗原决定基与对位关系的系统.在免疫系统中相关的事件不仅是分子本身,也包括分子之间.免疫细胞可以对所识别的信号产生正的或负的反应.正的反映结果会使细胞增生,即或和分泌抗体,负反应将导致容噪和抑制.在Varela & Coutinho(1991)提出的免疫网络模型中,即第二代免疫网络,它强调了免疫网络的三个主要特征:结构、动态特性和稳态特性.网络结构描述了分子与细胞间的相互作用,以及联接的构造形式.免疫动态是指网络连接的浓度和亲合度随时间的变化,而稳态特性是指免疫系统处在连续制造抗体,同时祛除不再刺激的细胞的状态.

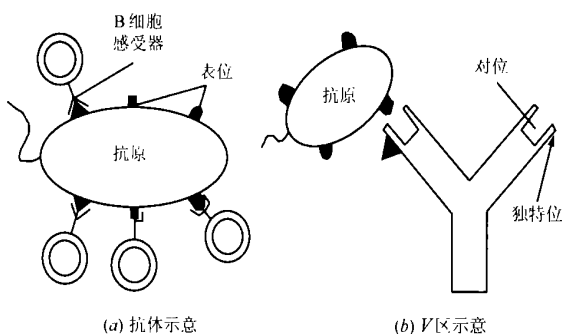


图2 B细胞、抗原、抗体、抗原决定基、对位和配位

免疫网络理论的核心特征是:定义了独立分子的一致性;其表现为网络组织通过学习分子与环境的关系使系统发展.实际上,这样的动态特性是和记忆容量一致的;这样的记忆不是在记忆细胞中,而是分布成一种模式.免疫网络研究一部分兴趣在于发展计算机工具,因为其提供了一系列的突现特征,如学习和记忆、自容噪、规模控制和细胞的多样性.

基于免疫学理论,可以构造出具有类似生物抗原与抗体、抗体与抗体间作用关系的人工免疫系统模型.通常多数网络模型的结构可以描述为:

变化率 = 流入的新细胞 - 死去的无刺激细胞

+ 复制的刺激细胞 (9)

其中,最后一项包括抗体—抗体识别和抗原—抗体刺激所产生的新抗体.

特别地,对于独特型网络调节有如下AB模型:

$$\frac{dB_i}{dt} = m - p \frac{A_j}{1 + A_j} \frac{2}{2 + A_j} B_i - d_b B_i \quad (10)$$

$$\frac{dA_i}{dt} = s B_i \frac{A_j}{1 + A_j} \frac{2}{2 + A_j} - d_c A_i A_j - d_a A_i \quad (11)$$

式中  $i, j = 1, 2$ , 且  $i \neq j$ , 这是因为有两种B细胞,且分泌两种抗体;  $1, 2$  为常数.式(10)右方第一项  $m$  表示B细胞的来源;第二项为B细胞的增殖,  $p$  为增殖常数;第三项为B细胞的死亡,  $d_b$  为死亡率.式(11)右方第一项反映B细胞分泌抗体;第二项为抗体复合物的降解,  $d_c$  为因独特型相互作用形成的两种抗体复合物的死亡率;第三项为抗体的消亡,  $d_a$  为死亡率.

#### 4.2 免疫算法一般步骤

基于抗体克隆选择学说和免疫网络学说的一般免疫算法由图3所示的主要步骤组成.其中,抗原、抗体、抗原和抗体之间的亲和性分别对应于优化问题的目标函数和各种约束条件、优化解、解与目标函数的匹配程度.

为了叙述算法方便,定义  $F$  为输入抗原;  $P$  为包含有  $n_i$  个网络单元(抗体);  $M$  为  $N$  个记忆单元;  $D$  为抗原—抗体(Ag-Ab)间的亲和度向量;  $S$  为抗体—抗体(Ab-Ab)间的亲和度矩阵;  $\rho$  为选择成熟分子的比率;  $d_s$  为相对自然死亡或衰减的阈值.

**步骤1:抗原输入** 一般将目标函数和各种约束作为算法的抗原  $F$  (\*).

**步骤2:产生初始抗体** 初始抗体通常是在解空间中用随机的方法产生.与进化算法相似,一般需要对抗体进行编码,并且遵循完备性(completeness)、健全性(soundness)和非冗余性(non-redundancy)要求.

**步骤3:计算亲合度** 分别计算抗原和抗体之间的亲合度及抗体和抗体之间的亲合度.抗体和抗体亲合度的度量一般采用解空间中的距离

$$s_{ij} = |p_i - p_j|, i = 1, 2, \dots, n_i, j = 1, 2, \dots, n_i \quad (12)$$

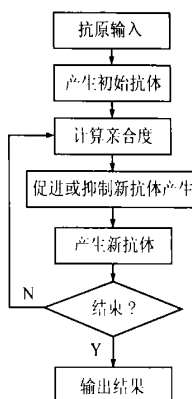
特别地,如果采用二进制编码,一般采用汉明距离表示.

抗原和抗体之间的亲合度则采用抗体对抗原的适应程度(即侯选解和目标函数的匹配程度)

$$D = \{d_1, d_2, \dots, d_{n_i}\} = \{F(p_1), F(p_2), \dots, F(p_{n_i})\} \quad (13)$$

**步骤4:更新记忆单元** 选择  $\rho\%$  个与抗原的亲合性高的抗体加入到记忆单元  $M$  中.由于记忆单元数目有限,祛除那些与抗原亲合度低于  $d_s$  以及较大密度的记忆单元(抗体的自然死亡).

定义  $Aff$  为抗体记忆矩阵与抗原的平均适应度:



$$Aff(M) = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} F(p_i) = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} d_i \quad (14)$$

因此,

$$Aff(M(t+1)) \geq Aff(M(t)) \quad (15)$$

**步骤 5:产生新抗体** 一般来讲,与抗原亲合性高的抗体和低密度的抗体生存机率较大,但是,为了有利于优化过程的进行,某些与抗原有较高亲合性的抗体也必须受到抑制,从而体现了抗体克隆控制机制的多样性。可以再随机产生新的抗体,也可以通过变异和交叉产生进入下一代的抗体,并将  $M$  加入新抗体群落,祛除那些亲合度低于  $d_c$  的记忆单元。提高抗体与抗原的亲合度。

$$P = P - \eta * g(D) \quad (16)$$

方程(5)表示了一种直接搜索,其中,  $\eta$  是学习率,  $P$  的取值是根据网络单元与抗原的亲合度而定的,亲合度高  $P$  的取值小;  $g(\cdot)$  是取为超越函数,目的是增强信息。

**步骤 6:终止条件** 一般采用限定迭代次数或在连续几次(如  $q$  次)迭代中的最好解都无法改善,以及二者的混合形式作为终止条件。

重复执行直到满足终止条件(收敛判据)为止。

上述步骤 4、5 实现了对抗体产生过程的控制,如果步骤 5 没有采用遗传操作,则该标准免疫算法就仅体现了免疫系统的网络理论,是一个标准的免疫网络算法;若通过变异和交叉产生新的抗体,则同时体现了体细胞理论,人工免疫系统也更象是进化算法的改进。

在上述标准算法中,如果抗体也采用类似进化算法的编码方法,而且新抗体的产生也主要通过交叉和变异来实现,则同样有类似进化算法的模板理论,只是:

$$(S, t+1) \geq (S, t) \frac{f(S)}{f} [1 - P_c \frac{(S)}{l-1} - O(S) \cdot P_m - P_s \cdot G(f(S))] \quad (17)$$

式中,  $S$  为抗体模式,  $l$  模式长度,  $O$  为模式阶,  $f$  为模式的定义距,  $f$  为抗体与抗原的亲合度,  $P_c$  为交叉概率,  $P_m$  为变异概率,  $P_s$  为抗体选择时因为保持多样性而促进或抑制时形成的选择概率,  $G$  为与亲合度有关的函数。统计确定理论中的双角子机问题表明,要获得问题的最优可行解,必须保证较优解的样本数呈指数级数增长。从而可以保证算法具有获得最优解的必要条件。至于其收敛性的证明和计算量大小的估计将另文给出。

## 5 人工免疫系统与其他方法的比较

### 5.1 人工免疫系统与人工神经网络

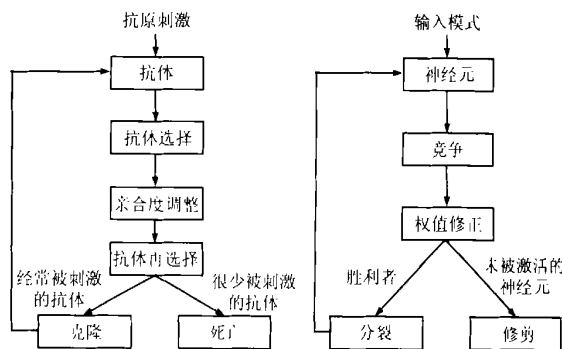
人工神经网络与人工免疫系统的比较如表 3 所示。

神经网络和人工免疫网络都是由大量高性能单元组成的,具有容噪、泛化能力和记忆能力,以及通过竞争实现的并行分布处理能力。但是神经网络获得所识别对象内部镜像图是通过归纳实现的,即不断压缩原始图像,而人工免疫网络先构造一充分反映所识别对象性态的随机图,通过对该图像不断扩展与压缩来反映所识别对象,因此人工免疫网络的计算量很大,而且主要集中在算法的初始阶段。

表 3 人工神经网络与人工免疫系统的比较

特点	神经网络	免疫系统
基本单元	$10^{10}$ 个神经元	参与免疫的淋巴细胞在 $10^{12}$ 以上,系统比神经网络更加庞大
单元间相互作用	刺激和抑制连接	激活和抑制相互作用
学习	通过改变神经元间的连接权值实现学习	通过改变网络单元间的浓度和亲合度实现学习
知识	识别是通过与存储在连接权中的“知识”匹配完成的	“识别”由单元的接受器完成,知识存储在抗体与抗原的相互作用中
结构	结构固定,神经元的位置是固定的,由大脑控制	结构松散,免疫系统可以在身体的任意位置,无控制机构

图 4 比较了人工免疫系统与神经网络算法(主要是竞争)的主要步骤。



(a) 免疫系统流程

(b) 神经网络(竞争网络)流程

图 4 免疫系统与神经网络算法的主要步骤

其中免疫系统中亲合度调整和神经网络权值修正是相当的,都是为了增加系统对输入模式的识别质量。

### 5.2 人工免疫系统与进化计算

免疫算法和进化计算都是群体搜索策略,并且强调群体中个体间的信息交换,因此许多相似之处。首先在算法结构上,都要经过“初始种群的产生 评价标准计算 种群间个体信息交互 新种群产生”这一循环过程,最终以较大概率获得问题的最优解;其次在功能上,二者本质上都固有并行性,在搜索中不易陷入极小值,都有与其他智能策略结合的固有优势;再次在主要算子上,多数免疫算法都采用了进化计算方法主要算子;最后,也正是因为二者存在共性,有关二者集成的智能策略——免疫-进化算法——成为免疫算法研究和应用的最成功的领域之一。

但是,它们之间也存在区别:(1)免疫算法在记忆单元基础上运行,确保了快速收敛于全局最优解;而进化算法则是基于父代群体,标准遗传算法不能保证概率收敛;(2)免疫算法评价标准计算是计算亲合性(Affinity),包括抗体-抗原的亲合度以及抗体-抗体亲合度;反映了真实的免疫系统的多样性(Diversity),而进化算法则是简单计算个体的适应度;(3)免疫算法通过促进或抑制抗体的产生,体现了免疫反应的自我调

节功能,保证了个体的多样性,而进化算法只是根据适应度选择父代个体,并没有对个体多样性进行调节,这也是免疫策略用于改进进化算法的切入点;(4)虽然交叉变异等固有的遗传操作在免疫算法中广泛应用,但是免疫算法新抗体产生还可以借助克隆选择、免疫记忆、疫苗接种等传统进化算法中没有的机理。

### 5.3 人工免疫系统与一般的确定性优化算法

与一般的确定性优化算法相比,多数免疫算法有以下显著特点:(1)它同时搜索解空间中的一系列点,而不只是一个点;(2)它处理的对象是表示待求解的参数的编码数字串,而不是参数本身;(3)它使用的是目标函数本身,而不是其导数或其他附加信息;(4)它的变化规则是随机的,不是确定的。

## 6 存在的问题和进一步研究的方向

### 6.1 人工免疫系统存在的问题

一方面,由于对人工免疫系统的研究还处于起步阶段;另一方面,由于免疫机理复杂,系统庞大,甚至连免疫学家对免疫现象的认识和描述都比较困难,人工免疫系统可以借鉴的成果不多,因此人工免疫系统不论在模型建立,算法等方面都存在一定的问题。Gasper (1999)、D Dasgupta (1997)等研究者认为人工免疫系统现在没有统一的基本框架,难以象人工神经网络那样用线性或非线性模型来对免疫机理进行抽象描述;虽然已经有免疫系统的非线性模型,但是,该模型多用于理论和实验的免疫学研究,还难以用于人工免疫系统实践<sup>[31,22]</sup>。在分析了现有的免疫算法后,D Dasgupta (1998)认为众多的计算模型只是从单一的角度模仿了免疫系统某一部分功能。而且,现有的免疫算法多集中在利用免疫机理改进已有的其他算法,尤其是对进化算法的改进<sup>[57]</sup>。

就免疫系统机理本身来讲,也存在缺憾。为了构造防御系统(最优可行解集合),获得初始抗体(解特征样本),需要进行大量计算;标准人工免疫系统往往没有充分利用研究对象的先验知识;在数据处理中,人工免疫系统一般只能浓缩数据样本(获取样本空间中的特征点),而不能对样本空间的构成进行优化(合理减少样本空间的维数)。

对于上述问题,仅仅通过深入认识相关免疫机理,进而对免疫系统算法本身改进,是难以获得彻底解决的。基于智能整合集成思想为问题的解决提供了可行之道,已有研究表明,结合其他智能策略(如模糊神经网络和粗糙集等),利用系统的先验知识构造疫苗,加速初始抗体的获得,实现样本空间的降维,可以改善免疫算法的性能<sup>[41]</sup>。

### 6.2 人工免疫系统进一步研究的方向

客观地讲,人工免疫系统的相关算法多是在1997年后提出的,而且这些算法几乎都是针对特定问题而言的,对算法计算量估计、收敛性证明等深刻而具有普遍意义的研究成果还很少。因此,和多数学者一样,本文认为现阶段的人工免疫系统研究在解决其存在问题的基础上,应该着重进行研究的方向包括:

(1)进一步研究免疫系统的各种计算机理。只有对免疫机理有了深入认识,才能为算法构造提供保障;而且,新机理的

发现必将催化新算法的产生。

(2)改进已有的人工免疫系统模型。如前所述,现有的人工免疫系统模型还比较简单,不能满足人工智能应用的需要,具体地讲,就是利用模型深入理解算法的执行过程,分析算法的收敛性,计算量,为算法的评价和改进提供依据。

(3)为人工免疫系统开辟新的应用领域。与其他人工智能方法一样,应用是方法研究的价值体现,是检验算法优劣的标准。虽然,人工免疫系统在短短10年间获得了广泛的应用,但是在工程应用中,还没有取得和其他智能算法(如模糊逻辑、神经网络)一样的地位。

(4)基于人工免疫系统的智能整合集成方法研究。免疫系统的机理可以被用于改进现有的方法,许多新算法,如免疫进化、免疫-神经网络等已经被提出,并有成功的应用。在这一交叉整合过程中诞生的新思想和新方法,正把人工免疫系统的能力扩展到能应付越来越复杂的问题,人工免疫系统也正以全新的方式对人工智能等学科作出贡献。

### 6.3 基于人工免疫系统的综合集成<sup>[64]</sup>

神经、内分泌和免疫三大系统虽有各自不同的功能,但在维持机体内环境稳定方面具有共性,有相似的活动规律及调节方式,它们相互作用和协调,形成一个紧密联系的复杂网络,共同完成调节整个机体功能的作用,以维持机体的健康和生命的延续。早在本世纪20年代,人们已注意到神经系统与免疫系统之间的关系。1924年Metalnikov已证明经典条件反射可改变免疫反应,说明免疫系统接受高级神经系统的影响。Besedovsky发现动物免疫应答过程中下丘脑神经元细胞放电频率发生变化,血浆及脾脏的去甲肾上腺素(NA)含量也发生明显改变。上述资料表明神经内分泌系统可调节免疫系统,免疫系统也可影响神经内分泌功能。1977年Besedovsky首先提出了神经-内分泌-免疫网络学说。

神经、内分泌及免疫这三大调节系统相互联系、相互补充和配合、相互制约的机理为基于人工免疫系统的智能综合集成提供了生物学基础。

本文提及的基于人工免疫系统的智能综合集成,不仅仅指已有的免疫-遗传方法、免疫-神经网络方法,而是希望能建立一个综合神经、内分泌及免疫这三大生物调节系统功能的大的协同集成框架。进而在这一集成框架下深入研究神经、内分泌及免疫的机理,提出新的算法,并使基于这些机理的方法能更广泛地用于工程实践。

在这一框架中,神经网络的研究比较成熟,免疫系统也已经起步,关于内分泌机理和算法的研究还未见报道,这必将是伴随着免疫系统研究,人工智能的另一新兴研究领域。

### 参考文献:

- [1] M N O Sadiku. Artificial Intelligence [J]. IEEE Potentials, 1989, 8 (2): 35 - 39.
- [2] R J Patton, C J Lopez-Toribio, F J Uppal. Artificial intelligence approaches to fault diagnosis[A]. IEE Colloquium on Condition Monitoring: Machinery, External Structures and Health (Ref. No. 1999/034) [C]. London: The Institute of Electrical Engineers, 1999. 5/1 - 5/18.



- [3] R Orwig, H Chen, D Vogel, et al. A multi-agent view of strategic planning using group support systems and artificial intelligence [J]. Group Decision and Negotiation, 1997, 6(1): 37 - 59.
- [4] A Christopher, Welty, G Peter, Selfridge. Artificial intelligence and software engineering: Breaking the toy mold [J]. Automated Software Engineering, 1997, 4(3): 255 - 270.
- [5] Donald Gillies. Book review: Artificial intelligence and scientific method [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1998, 22(1): 87 - 95.
- [6] G Sartor, L Karl Branting. Introduction: Judicial Applications of artificial intelligence [J]. Artificial Intelligence and Law, 1998, 6(24): 105 - 110.
- [7] FLASZKI MARIUSZ. "Every man in his notions" or alchemists' Discussion on artificial intelligence [J]. Foundations of Science, 1997, 2(1): 107 - 121.
- [8] 戴汝为, 王珏. 巨型智能系统的探讨 [J]. 自动化学报, 1993, 19(6): 645 - 655.
- [9] H A Simon. Artificial intelligence: Where has it been, and where is it going [J]? IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 1991, 3(2): 128 - 136.
- [10] 戴汝为, 王珏. 关于智能系统的综合集成 [J]. 科学通报, 1993, 38(4): 645 - 655.
- [11] 丁永生, 任立红. 人工免疫系统: 理论与应用 [J]. 模式识别与人工智能, 2000, 13(1): 52 - 59.
- [12] Jon Timmis, Mark Neal, John Hunt. An artificial immune system for data analysis [J]. BioSystems, 2000(55): 143 - 150.
- [13] 王磊, 潘近, 焦李成. 免疫算法 [J]. 电子学报, 2000, 28(7): 74 - 78.
- [14] Deaton R, Garzon M, Rose J A, et al. A DNA based artificial immune system for self-nonself discrimination [A]. 1997 IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1997, 1: 862 - 866.
- [15] Kuznetsov V A, Knott G D, Ivshina A V. Artificial immune system based on syndromes-response approach: recognition of the patterns of immune response and prognosis of therapy outcome [A]. 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1998, 4: 3804 - 3809.
- [16] Sasaki M, Kawafuku M, Takahashi K. An immune feedback mechanism based adaptive learning of neural network controller [A]. ICONIP '99, 6th International Conference on Neural Information Processing [C]. IEEE Computer Society Press, 1999, 2: 502 - 507.
- [17] H Meshref, H VanLandingham. Artificial immune systems: application to autonomous agents [A]. 2000 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 2000, 1: 61 - 66.
- [18] D Dasgupta, S Forrest. Artificial immune systems in industrial applications [A]. IPMM '99. Proceedings of the Second International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials [C]. 1999, 1: 257 - 267.
- [19] J Timmis, M Neal, J Hunt. Data analysis using artificial immune systems, cluster analysis and Kohonen networks: some comparisons [A]. IEEE SMC '99 Conference Proceedings [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1999, 3: 922 - 927.
- [20] K K Kumar, J Neidhoefer. Immunized adaptive critics for level 2 intelligent control [A]. Computational Cybernetics and Simulation, 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1997, 1: 856 - 861.
- [21] Jinn-Hyung Jun, Dong-Wook Lee, Kwee-Bo Sim. Realization of cooperative strategies and swarm behavior in distributed autonomous robotic systems using artificial immune system [A]. IEEE SMC '99 Conference Proceedings, 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1999, 6: 614 - 619.
- [22] D Dasgupta. Artificial neural networks and artificial immune systems: Similarities and differences [A]. Systems, Man, and Cybernetics, 1997 IEEE International Conference on Computational Cybernetics and Simulation [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1997, 1: 873 - 878.
- [23] 林学颜, 张玲. 现代细胞与分子免疫学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] 刘新民. 实用内分泌学 [M]. 北京: 人民军医出版社, 1986.
- [25] 史铁霖. 协和内分泌和代谢学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [26] 陈孝文, 江黎明, 叶锋. 肾内科学 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1994.
- [27] 学科交叉和技术应用专门小组(美). 学科交叉和技术应用 [R]. 北京: 科学出版社, 1994: 43.
- [28] Farmer J D, Packard, N H & Perelson, A S (1986). The immune system, adaptation, and machine learning [J]. Physica 22D, 187 - 204.
- [29] 靳蕃, 范俊波, 谭永东. 神经网络与神经计算机原理·应用 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1991, 12: 73 - 78.
- [30] Y Dote. Soft computing (immune networks) in artificial intelligence [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1998: 1382 - 1387.
- [31] A Gasper, P Collard. From GAs to artificial immune systems: improving adaptation in time dependent optimization [A]. Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation (CEC 99) [C]. US: IEE Press, 1999, 3: 1859 - 1866.
- [32] Jang-Sung Chu 等. 免疫算法与其它模拟进化优化算法的比较研究 [J]. 电力情报, 1998, 1: 61 - 63.
- [33] A Tarakanov, D Dasgupta. A formal model of an artificial immune system [J]. BioSystems, 2000, 55: 151 - 158.
- [34] B T Nohara, H Takahashi. Evolutionary computation in engineering artificially immune (EAI) system [A]. IECON 2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. US: IEE Press, 2000, 4: 2501 - 2506.
- [35] 丁永生, 任立红. 一种新颖的模糊自调整免疫反馈控制系统 [J]. 控制与决策, 2000, 15(4): 443 - 446.
- [36] 孟繁彬, 杨则, 胡云昌, 徐慧. 具有免疫体系近性的遗传算法及其应用 [J]. 天津大学学报, 1997, 30(5): 624 - 630.
- [37] 周伟良, 何鲲, 曹先彬, 程慧霞. 基于一种免疫遗传算法的 BP 网络设计 [J]. 安徽大学学报(自然科学版), 1999, 23(1): 63 - 66.



- [38] 王煦法,张显俊,曹先彬,张军,冯雷.一种基于免疫原理的遗传算法[J].小型微型计算机系统,1999,20(2):117-120.
- [39] 曹先彬,刘克胜,王煦法.基于免疫遗传算法的装箱问题求解[J].小型微型计算机系统,2000,21(4):361-363.
- [40] 邵学广,孙莉.免疫-遗传算法用于混合物重叠核磁共振信号解析[J].高等学校化学学报,2001,22(4):552-555.
- [41] 王磊.免疫进化计算理论及应用[D].西安:西安电子科技大学,2001.9.
- [42] 武晓今,韩生廉.免疫-遗传系统的构造及其在函数寻优中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(5):669-672.
- [43] K Krishna Kuma, J Neidhoefer. Immunized adaptive critics for level 2 intelligent control [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1997. 856-861.
- [44] 李亭鹤,阎超.一种新的分区重叠洞点搜索方法-感染免疫法[J].空气动力学学报,2001,19(2):156-160.
- [45] 丁永生,唐明浩.一种智能调节的免疫反馈控制系统[J].自动化仪表,2001,22(10):5-7.
- [46] 李海峰,王海风,陈珩.免疫系统建模及其在电力系统电压调节中的应用[J].电力系统自动化,2001(12):17-23.
- [47] 高洁.应用免疫算法进行电网规划研究[J].系统工程理论与实践,2001(5):119-123.
- [48] 张军,刘克胜,王煦法.一种基于免疫调节和共生进化的神经网络优化设计方法[J].计算机研究与发展,2000,37(8):924-930.
- [49] 刘克胜,曹先彬,郑浩然,王煦法.基于免疫算法的TSP问题求解[J].计算机工程,2000,26(1):1-2.
- [50] 牛志强,刘峥嵘,吴新余.基于免疫算法的智能多用户检测技术在CDMA中的应用[J].江苏通信技术,2001,17(2):6-9.
- [51] 曹先彬,郑振,刘克胜,王煦法.免疫进化策略及其在二次布局求解中的应用[J].计算机工程,2000,26(3):1-2.
- [52] D F McCoy, V Devarajan. Artificial immune systems and aerial image segmentation [A]. 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1997. 867-872.
- [53] 王肇捷,黄文剑.立体匹配的免疫算法[J].电脑与信息技术,2001(4):4-6.
- [54] 邵学广,陈宗海,林祥钦.一种新型的信号拟合方法-免疫算法[J].分析化学研究报告,2000,28(2):152-155.
- [55] 邵学广,孙莉.免疫算法用于多组分二维色谱数据的解析[J].分析化学研究报告,2001,29(7):768-770.
- [56] 杜海峰,王孙安.基于ART—人工免疫网络的数据浓缩方法研究[J].模式识别与人工智能,2001,14(4):401-405.
- [57] D Dasgupta. An artificial immune system as a multi-agent decision support system [A]. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics [C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Incorporated, 1998. 3816-3820.
- [58] R L King, S H Russ, A B Lambert, et al. Artificial immune system model for intelligent agents [A]. MSU/NSF Engineering Research Center for Computational Field Simulation Source: Future Generation Computer Systems [C]. Elsevier Science Publishers, 2001. 335-343.
- [59] 刘克胜,张军,曹先彬,王煦法.一种基于免疫原理的自律机器人行为控制算法[J].计算机工程与应用,2000(5):30-32.
- [60] 刘树林,张嘉钟,王日新,时文刚.基于免疫系统的旋转机械在线故障诊断[J].大庆石油学院学报,2001,25(4):96-100.
- [61] 杜海峰,王孙安.基于ART—人工免疫网络的多级压缩机故障诊断[J].机械工程学报,2002,38(4):88-90.
- [62] 杨晓宇,周佩玲,傅忠谦.人工免疫与网络安全[J].计算机仿真,2001,18(6):38-40.
- [63] 漆安慎,杜婵英.免疫的非线性模型[M].上海:上海科技教育出版社,1998.12.35-46.
- [64] 陆德源,马宝骊.现代免疫学[M].上海:上海科技教育出版社,1998.12.35-46.

#### 作者简介:



**焦李成** 男,1959年出生于陕西省,现为西安电子科技大学电子工程学院院长、教授、博士生导师.主要研究领域包括:计算智能与智能信息处理.



**杜海峰** 男,1972年9月出生于四川省巴中市,2002年毕业于西安交通大学机械电子工程系,获工学博士学位.现为西安电子科技大学电路与系统博士后,主要研究领域包括:模糊系统、人工神经网络、进化算法、人工免疫系统以及智能控制和故障诊断等.