

人工免疫系统及其在控制系统中的应用*

韦巍 张国宏

(浙江大学电气工程学院·杭州, 310027)

摘要: 人工神经网络系统理论的研究已经取得了较大的进展, 然而对于人工免疫系统理论的研究还刚刚起步. 本文介绍了免疫系统的特点、免疫系统的组成, 比较了免疫系统和中枢神经系统的相似性和差异性, 论述了人工免疫网络系统及其在复杂系统建模和控制中的应用. 最后对进一步的研究工作作了简单的展望.

关键词: 生物免疫; 免疫网络; 智能控制

文献标识码: A

Artificial Immune System and Its Applications in the Control System

WEI Wei and ZHANG Guohong

(College of Electric Engineering, Zhejiang University · Hangzhou, 310027, P. R. China)

Abstract: The great advance has been achieved in the field of the artificial neural network. But the research programming on the artificial immune system is still in its beginning stages. The feature and the construction of the immune system have been discussed in the paper. The similarity and difference between the immune system and the neural network have been compared. The advance on the immune system and its applications on the complex control system have been discussed. Finally, the further research on the immune system has been proposed.

Key words: biologic immune; immune network; intelligent control

1 引言(Introduction)

免疫(immunity)是指生物体对感染具有的抵抗能力. 免疫系统是由许多执行免疫功能的器官、组织、细胞和分子等组成, 其主要作用是能够辨别“自己”与“异己”物质. 人体对感染物的免疫应答分为两类: 固有性免疫响应(innate immune response)和适应性免疫响应(adaptive immune response). 前者是先天遗传生成的天然免疫力, 后者则是由免疫系统的淋巴细胞针对病原体的免疫刺激诱导适应发展而生成的. 免疫系统通过进化学习来实现“自己”与“异己”的识别.

人工免疫系统是对生物免疫系统的模拟. 由于它具备强大的信息处理能力, 因此是一门充满巨大潜力的研究学科. 人工免疫系统理论伴随着免疫学研究的发展而不断成长. 免疫学的研究历史可以追溯到公元 12 世纪人痘苗的发明. 免疫学的重要进展是 17 世纪 Jenner 首创的牛痘苗, 它对预防天花起到决定性的作用. 然而免疫学科的兴起和发展应该是 20 世纪 60 年代以后. 根据免疫学理论可知, 人体内由大量的免疫细胞(约有 10^{12} 淋巴细胞、 10^{20} 抗体)在循环运动, 其中起主要作用的是淋巴细胞(Lymphocyte). 由于对淋巴细胞的主要两类细胞 T 细胞和 B 细胞的功能有了较深入的了解, 人工免疫系统的研究有了较好的理论基础, 也引起国内外专家的广泛关注. 从信息处理角度来看, 免疫系统与神经网络系

统一样也是一个高度的并行处理系统. 它除了具备的学习能力、记忆能力外, 还表现出来的相关修复能力、分布性和自组织性等都为智能控制和智能系统的研究提供又一途径. 生物免疫系统表现出来的免疫记忆(含短期记忆和长期记忆)能力、协同激励、多样性、适应性等都将对诸如模式识别、协同控制、优化设计、机器学习、故障诊断等领域的研究提供新思想和新方法. 研究免疫系统的重点是研究免疫响应. 免疫响应是抗原、免疫细胞及其分泌的抗体、细胞因子等分子相互作用的过程, 而 T 细胞和 B 细胞是产生免疫响应重要免疫细胞. B 细胞的功能是产生抗体, 它持续地从骨髓产生并执行特异体液免疫功能. T 细胞由胸腺产生, 它执行特异细胞免疫和免疫调节功能. 为了解释免疫现象, 目前已有一些理论和数学模型来表示免疫系统, 如微分方程法、随机方程模型、形态空间法、网络理论法等. 人工免疫网络系统是基于网络学说(如 Jerne 网络学说等)一种免疫系统模型. 网络学说为免疫系统的建模研究提供了一种切实可行的处理方法. 免疫系统存在的大量独特型和抗独特型的抗体及其相互之间的制约关系、T 细胞和 B 细胞之间的相互反应都可以用于建立人工免疫网络模型. 那么, 如何建立人工免疫网络模型来精确描述免疫响应的机理? 如何构造人工免疫网络来达到免疫网络系统这样的功能呢? 如何选择学习和自组织原则实

* 基金项目: 国家自然科学基金(69904009), 教育部骨干教师基金, 浙江省重大自然科学基金(ZD0107)资助项目.

收稿日期: 2000-01-24; 收修改稿日期: 2001-05-09.

现快速自适应?这些都是有待解决的问题.本文首先论述了免疫系统的组成和特点,介绍了免疫系统与中枢神经系统的类同和差异.综述了近几年来人工免疫系统在控制科学等中应用的最新进展,最后作了简单的展望.

2 免疫系统(Immune system)

免疫是机体的一种特异性生理反映,通过识别和排除抗原性异物维持内环境稳定.机体的免疫功能是在淋巴细胞、单核细胞和其他有关细胞的相互作用下完成的.免疫系统是机体执行免疫功能的机构,是产生免疫反应的物质基础.免疫系统在体内分布广泛,免疫细胞和免疫分子还可以通过血液在体内各处巡游、可持续地执行识别和排除抗原性异物的能力.自然免疫系统是一个非常复杂的生物系统.排除异己的方法有两类:固有性免疫机构和自适应免疫机构.固有性免疫系统是由机体静态防御层组成,如将个体与潜在的威胁分离开的皮肤、粘液.它们主要针对有限的或预知的免疫反应.自适应免疫是由免疫系统的淋巴细胞针对病原体抗原的免疫刺激诱导后发展而成的.它是后天生成的,故又称为获得性免疫.

免疫系统的免疫反应是通过克隆扩增来完成的.即当有外界细菌侵入时,只有少量免疫细胞能够识别出侵入者的肽,同时它迅速分化出众多针对此抗原的抗体,达到中和或消解异己物质的目的.抗体是免疫系统对付疾病挑战的关键物质之一,它是一类蛋白质大分子.抗体消除异己的方法有两种:一是抓住象细菌和病毒之类的外来侵入者,并把它们消解.整个过程是由自适应免疫系统中的B细胞产生的抗体有序地将其附属于菌体表面的分子上,而不是进入整个侵入细菌.最终将异己细胞中和或消解掉;二是通过包围微生物,使它们成为巨噬细胞等净化细胞的食物.免疫系统中的每一抗体只对某一特定的目标分子,即抗原进行攻击.每一抗原都有一组称作表位(epitope)的抗原遗传素,其主要作用是显示每个抗原的特征.抗体是三维的“Y”分子,由轻链和重链组成.每一轻链包含可变区(V段)和不变区(C段).每个抗体有一个部位可以与抗原的表位相结合(称作对位paratope).抗体对抗原的识别是通过表位和表位间的互补匹配来完成的.

免疫系统的最大特点是免疫记忆特性、抗体的自我识别能力和免疫的多样性.免疫系统具有分析、学习进入体内的外在物质,并且通过产生抗体来消灭入侵抗原的特点.免疫系统表现出来可用于信息处理等学科研究的主要特点有:

- 1) 模式识别能力:免疫系统能够认识不同的病原体并能产生相应的激励.“自己”、“异己”的区别是免疫系统在模式识别阶段中的主要任务.
- 2) 特征提取:抗原呈递细胞(APC)能够提取抗原特征,这一过程类同于某种滤波作用.
- 3) 多样性:由于遗传等原因,免疫系统能够产生足够多的淋巴细胞用来防止已知或未知的抗原.
- 4) 学习能力:通过经验能够学习特殊抗原的结构.在首次遇见新的抗原时改变淋巴细胞的浓度就是学习机制之一.

免疫系统的学习能力取决于补充机制(又称克隆膨胀).

5) 记忆能力:当淋巴细胞被激活时,部分细胞就变成了可寻址的特定记忆细胞.免疫记忆细胞的自然寿命是动态的,它需要残留抗原的不断激励.免疫系统能够保持一个理想的平衡记忆状态.

6) 分布式检测:免疫系统固有的分布性保证了免疫细胞不断地在体内运动寻找新的抗原进入.一旦检测到抗原的进入,淋巴细胞就会产生免疫响应.

7) 协同激励:B细胞的激活度将受到T细胞的作用或影响.

此外,免疫系统的其他特点如自适应性、特异性、鲁棒性等也是免疫响应的重要特性.所有这一些都将为信息科学、自动化科学的发展提供新的契机.

3 免疫系统和中枢神经系统比较(Immune system and nervous system)

免疫系统和中枢神经系统都是复杂的生物系统,它们都是智能系统的重要组成部分.到底怎样定义智能系统,目前还存在争议.但是,有一点是一致的,即系统的智能主要表现为处理不确定性、不精确性信息的能力,它包括自适应能力、记忆能力和学习能力.它们都是利用学习、记忆和相关性搜索来完成识别和分类任务.但它们识别和学习的机制不同.免疫系统提供多样性,并具有自组织记忆.神经网络通过一定的学习算法来改变神经元之间的连接权实现输入输出的映射.总之,免疫系统和中枢神经系统都具有某些智能行为,因此在系统行为级上有许多相似之处,可归结为:

- 1) 两个系统都是有大量的、各种类型的细胞组成的.人类的免疫系统大约有 10^{12} 个淋巴细胞,而中枢神经系统大约有 10^{10} 个神经元.
- 2) 细胞的差异性使得它们能够针对大量不同的激励产生相应的响应.免疫系统能够识别和响应许多不同种类的大分子,而中枢神经系统能够识别和响应特殊的小分子(如味觉、嗅觉)、图象型(如视觉)、空间或时间的压力型(如触觉或听觉).
- 3) 两个系统都是由细胞相互连接而成网络.网络中相关相邻细胞之间存在激励和压抑.在中枢神经系统中,细胞间的连接是由细胞核、轴突、树突传递的.而在免疫网络系统中,功能网络的概念尚不清楚.比较广泛接受的是直接取自实验的结果和显式网络模型.现在已经知道,免疫系统的认识单元(如特殊受体、抗体等)不仅能够识别出外来分子的形状,而且能够区分出相互间形状的特征.此外,每个接受体和抗体能够认识系统中少部份接受体或抗体、或被它们认识.免疫系统的调节作用主要在于系统单元的内部识别.
- 4) 神经系统和免疫系统都具备记忆能力.它们对事件的记忆可以达到很多年,两者都能通过学习来改善各自的行为.
- 5) 两个系统都对早期印象记忆更深.
- 6) 两个系统都具有神秘的自我感知能力.免疫系统的核心是能够识别自己 and 异己分子,并能及时地清除异己.自己 and 异己之间的差别类同于中枢神经系统中的原函数.

7) 免疫网络系统与中枢神经系统一样, 也具备某种模糊识别功能。

8) 神经系统和免疫系统能够进入身体中的其它许多组织, 但它们由于血脑屏障存在而无法达到相互接触。

9) 两个系统在功能逼近上表现为与网络内部连接的细节关系不大。

10) 神经系统和免疫系统都存在大量冗余。

神经系统虽然与免疫系统的许多相似主要表现在系统的行为级上, 而在系统元件和组织上存在明显差异。免疫系统与中枢神经系统相比, 它具备以下优点:

1) 免疫系统呈现出多样性, 它不追求全局最优, 相反它能够进化抗体达到对付不同的抗原。

2) 免疫系统是一个没有中央控制器的分布式系统, 即免疫系统通过组成的细胞和分子分布在全身。

3) 免疫系统是一个自然生成的事件驱动响应型系统, 它能够快速响应变化的环境。

4) 免疫系统具备自组织记忆, 它能够动态保持和遗忘有关的信息。

5) 免疫系统的记忆是可再寻址的, 它意味着同一抗体能够识别有差异的抗原, 从而保证了即使抗原在噪声干扰下也能被抗体识别。

由于对于免疫系统的机理的了解程度远没有对神经中枢系统的机理那样成熟, 完整精确地建立人类免疫系统的模型显然还有距离。基于人工免疫系统的控制策略研究的重点是如何开发和利用免疫系统的特性来解决复杂控制系统的学习和自适应目的。

4 人工免疫网络主要研究的领域 (Main research fields of artificial immune network)

1) 免疫系统的建模^[1,2]。

目前针对免疫系统的建模有三大类: 一是借助神经网络理论, 通过建立动态神经网络吸引子的方法实现免疫响应行为模拟。二是利用免疫细胞的浓度分布建立整个系统的非线性动态方程、随机系统方程, 从而达到对免疫响应的描述和分析。三是利用形态空间的概念来逼近免疫系统的动力学行为。与中枢神经系统中的神经元相似, 免疫系统中最重要单元是淋巴细胞。淋巴细胞有两类: T 细胞和 B 细胞。抗体分子是由 B 细胞分泌和合成的。其中分泌和合成的过程可以由 T 细胞来调节。T 细胞既可以促进也可以抑制 B 细胞对刺激的反应。已经发现, 某种特殊 T 细胞的特殊蛋白分子在调解这一过程中起重要作用。B 细胞的扩增行为是根据“克隆选择理论”进行的。扩增的每一细胞具有同一特征的感受体。这些细胞的后代除了极小的变异之外, 其特性基本与父辈相似。免疫网络模型是描述上述免疫响应过程的重要方法。Jerne^[3]基于细胞选择学说, 开创了独特型网络 (Idiotypic network) 的理论。给出了免疫系统的数学模型。他采用微分方程来模拟淋巴细胞的动态性。另一学者 Hoffmann^[4]依据免疫网络系统与中枢神经系统的相似性, 提出了基于神经元模型的免疫系统模型。它通过动态网络展示的 2^N 个吸引子来模拟

免疫响应行为。同时文中描述了如何模拟激励-响应行为学习的推想。根据此推想, 免疫网络的学习不是权值的修整而是通过有选择地选取导师信号进行不断激励。系统学习的目的是保持系统输出性能稳定。

免疫系统的数学建模方法仍然是建立在非线性动态方程和随机模型基础之上的。它的理论依据是“克隆选择原理”。免疫系统的建模理论和方法与传统的系统建模理论之间存在密切的关系。系统的建模和辨识理论的新进展也将有助于对免疫过程以及实验现象的定量分析, 如系统稳定性判据定理、系统可控可观、控制和优化理论、滤波和估计理论等都能对复杂免疫系统实验数据等的分析和处理有重要的借鉴作用。因此, 免疫系统的建模理论和方法会随着系统理论尤其是非线性理论的发展和完善而不断成熟。研究现代系统论在免疫系统中的应用也是一个重要研究方向。正如 N. K. Jerne 在 1974 年指出的只要免疫响应的定量分析难以实现, 免疫学仍然是一门现象学。

2) 基于免疫网络的不确定性系统建模^[5,6]。

针对不确定性系统的建模, 一种直观的方法是采用基本模型和变化模型相结合的途径。其基本思想是通过离线建立静态模型来描述不确定性系统的平均特性, 另一部分通过在线动态模型来表示。这一思想可以用免疫系统中抗体的二官性来模拟, 即抗体的不变域和可变域来实现不确定性系统平均特性和可变特性的等效。首先, 定义和学习一批可计算的模块, 通常这些模块具备某一功能又具有在线自适应能力, 如人工神经网络模型模块、模糊系统模型模块和其他可计算的模块来模拟免疫系统中的抗体。这些模块可以通过离线或在线学习先验知识而得到, 即首先完成静态模型和动态模型的初始化。目前, 进化计算仍然是动态模型自适应计算的有效方法。

3) 人工免疫系统解决模式识别问题^[7-9]。

免疫系统具备抗击外部异己入侵的能力, 而这一任务是由抗体来完成的。抗体是通过与抗原的结合达到消除异己。此外, 由于外部异己物千差万别, 对于免疫系统首次遇见的抗原, 免疫系统能够产生特定的抗体来对付此类抗原。这一现象也说明了免疫系统的另一特点即抗体细胞的数量、特性都会随环境变化而变化。因此, 人工免疫系统实质上是一个动态随机系统。但是, 免疫系统抗击外来侵入的方法只有一种, 即通过抗体抗原的亲合作用。利用免疫系统的亲合现象来解决模式识别问题是人工免疫系统研究的又一方向。Hunt^[7]首先研究了人工免疫系统在模式识别领域中的应用。提出了骨髓功能模拟, 通过它来决定 B 细胞的再生和死亡。B 细胞的死亡条件取决于免疫响应程度。文中给出的计算方法为:

① 随机生成 B 细胞初始群体。

② 装入抗原样本群。

③ 运行以下算法, 直到满足终止条件:

i) 随机从抗原样本群中选择一个抗原;

ii) 随机从 B 细胞网络中选择一点, 并插入抗原;

III) 选择此点 B 细胞邻域内某个百分比数的所有 B 细胞;

IV) 对以上选中的 B 细胞, 计算每个 B 细胞与该抗原的免疫响应程度;

V) 根据免疫响应程度进行排序;

VI) 消除免疫响应程度最差的 5% B 细胞体;

VII) 产生 n 个新的 B 细胞(其中 n 为 25% B 细胞群体);

VIII) 选择 m 个 B 细胞加入免疫系统中去(其中 m 为 5% B 细胞群体)。

免疫响应程度判别准则的选择是人工免疫系统设计的一个重要步骤, 免疫响应的核心是抗体和抗原的亲合作用。Farmer 给出了一种免疫响应程度的判别标准:

$$J = c \left[\sum_{j=1}^N m(a, x_{e_j}) - k_1 \sum_{j=1}^N m(a, x_{p_j}) + k_2 \sum_{j=1}^n m(a, y) \right] - k_3,$$

其中: N 为抗体数, n 为抗原数, x_{e_j} 为第 j 个 B 细胞的表位; x_{p_j} 为第 j 个 B 细胞的对应位, a 表示当前 B 细胞, y 表示对应的抗原。

式中第一项表示抗体与邻近 B 细胞的亲合力、第二项表示抗体邻近的不和谐细胞、第三项表示抗体和抗原的亲合力。最后一项表示在没有任何激励条件下细胞死亡趋势。

利用上述方法可以实现模式识别和 DNA 序列的识别问题。

4) 人工免疫系统的学习和进化^[10,11]

人工免疫系统的学习与人工神经网络系统的学习有许多相似之处, 它们都可分为有导学习和无导学习。对于固有免疫系统模型拟采用有导学习为主, 通过对免疫实验数据的采集和分析为人工免疫系统的有导学习提供保证。对于适应性免疫系统模型拟采用进化计算为主, 通过对人工免疫系统的不断进化和繁殖实现对不同抗原的抑制和消除。目前描述人工免疫系统模型主要有三种数学方法: 一是利用非线性微分方程来描述抗体抗原的运动, 二是借助于神经网络等计算模块来完成免疫系统的功能模拟, 三是利用形态空间学来描述免疫系统的动力学行为。然而直到现在还未形成一种非常有效的人工免疫系统模型的学习方法。

5) 基于免疫原理的优化算法。

基于免疫系统的优化算法的基本思想是将抗原对应于目标函数和约束条件, 抗体对应于搜索空间的解, 用抗原与抗体之间的结合力来对解进行评价和选择。当某种抗体的数量大于某个阈值时, 产生抗体的细胞将发生分化为抑制性细胞和记忆细胞。抑制性细胞抑制这种抗体的进一步增加; 记忆细胞将此抗体对应的解记为局部最优解。它是遗传学习算法的改进和更新。基于免疫原理的优化算法是研究全局快速优化方法的新尝试。

6) 高级智能控制器的免疫系统行为模拟^[12-14]。

智能控制从控制器设计的复杂程度来分可以有四个层次, 即最简单的鲁棒反馈控制、根据误差准则判据的控制器

参数自适应、基于目标函数优化的自适应控制和目标函数也随条件变化而变化的全局优化自适应系统。与其相对应的, 人工免疫网络系统也具有非常相似的四个层次: 对应于鲁棒反馈控制过程是天然免疫防御系统; 其次是 T 细胞激活 B 细胞应用于抵抗抗原; 再次, 是微噬菌体将抗原提供给 T 细胞, T 细胞被激活响应; 最后, 微噬菌体也会针对某些抗原发生变化。这非常类似于目标函数可变的优化问题。从以上分析可以看出智能控制器的智能程度与免疫系统表现出来的智能程度具有一致性。深入研究免疫系统的特性将有助于更高层次的智能控制的出现。

5 结论和展望(Conclusions and future works)

生物免疫系统与中枢神经系统是实现一切生物智能行为和防御行为的基本。研究和掌握这两大系统的规律对于提高人类自身行为、改善自然生存环境都具有重要意义。免疫系统具备的联想记忆能力(免疫记忆)、从经验中学习能力和相互独立的分布特性、渐渐遗忘特性和泛化能力都是机器学习迫切需要借鉴和解决的问题。免疫系统的这些特点为不确定性系统建模、学习分类系统和自适应控制提供广阔的前景。研究免疫系统可以从免疫系统的核心-淋巴细胞出发, 通过研究淋巴细胞如何识别抗原、淋巴细胞如何产生等机理来达到系统的分类和自适应控制目的。免疫系统的另一特点是免疫响应。免疫响应的核心是克服不确定性干扰。深入研究免疫系统的免疫响应机理有助于提高复杂不确定性控制的鲁棒性。

参考文献(References)

- [1] Farmer J D, Packard N H and Perelson A S. The immune system, adaptation, and machine learning [J]. *Physica D*, 1986, 22: 187-204
- [2] Mohler R T R. A system approach to immunology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1992, 28(6): 1083-1112
- [3] Jerne N K. Towards a network theory of the immune system [J]. *Annual Immunology*, 1974, 125(C): 373-389
- [4] Hoffmann G W. A neural network model based on the analogy with the immune system [J]. *J. Theor. Biol.*, 1986, 122(2): 33-67
- [5] Dasgupta D and Forrest S. Artificial immune systems in industrial applications [A]. *Proceedings of the Second Int. Conf. on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials [C]*, Florida, USA, 1999: 10-15, 257-267
- [6] Perelson A S. Immune network theory [J]. *Immunological Reviews*, 1989, 111(1): 5-36
- [7] Hunt J E and Cooke D E. Learning using an artificial immune system [J]. *J. of Network and Computer Appl.*, 1996, 19(4): 189-212
- [8] McCoy D F. Artificial immune systems and aerial image segmentation [A]. *IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics [C]*, Florida, USA, 1997, 867-872
- [9] Timmis J, Neal M and Hunt J. An artificial immune system for data analysis [J]. *Biosystems*, 2000, 55(1): 143-150
- [10] Ishida Y and Adachi N. Active noise control by an immune algorithm [J]. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1998, 28(2): 187-194

- approach with application to water tank level control [J]. *Contr. Theory Advanced Tech.*, 1992, 8(3):577 - 592
- [54] Kurek J E and Zaremba M B. Iterative learning control synthesis based on 2-D system theory [J]. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1993, 38(1):121 - 125
- [55] Fang Y and Chow T W S. Iterative learning control of linear discrete-time multivariable systems [J]. *Automatica*, 1998, 34(11):1459 - 1462
- [56] Lin H and Dai G. The iterative learning control and 2-D analysis [J]. *Control and Decision*, 1993, 8(6):437 - 443
- [57] Chow T W S and Fang Y. An iterative learning control method for continuous-time systems based on 2-D system theory [J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems - I*, 1998, 45(4):683 - 689
- [58] Kaczorek T. Reachability and controllability 2-D continuous-discrete linear system [A]. *Proc. of 1st Int. Symp. Math. Models Automat. Robot.* [C], Miedzyzdroje, Poland, 1994, 24 - 28
- [59] Wang D, Soh Y C and Cheah C C. Robust motion and force control of constrained manipulators by learning [J]. *Automatica*, 1995, 31(2):257 - 262
- [60] Cheah C C and Wang D. Learning control for a class of nonlinear differential-algebraic systems with application to constrained robots [J]. *J. Robot. Syst.*, 1996, 13(3):141 - 151
- [61] Wei Q, Chang W and Zhang P. Hybrid force/position control of robot manipulators based on iterative learning [J]. *Acat Automatica Sinica*, 1997, 23(4):468 - 474
- [62] Kim Y H, Han S H, Cho S H, et al. Learning approach to control of servomotors under disturbance torque dependent on time and states [J]. *IEE Proc. - D: Control Theory and Applications*, 1998, 145(3):251 - 258
- [63] Li G, Zhang L and Zhang P. An iterative learning PD longitudinal controller for unmanned land vehicles [J]. *Control Theory and Applications*, 1994, 11(6):713 - 719
- [64] Park K H, Bae Z and Hwang D H. Design of an iterative learning controller for a class of linear dynamic systems with time delay [J]. *IEE Proc. - D: Control Theory and Applications*, 1998, 145(6):507 - 512

本文作者简介

方忠 1974年生,1998年毕业于西北工业大学,现为上海交通大学控制理论与控制工程专业博士生,主要研究方向为学习控制。

韩正之 1947年生,上海交通大学控制理论与控制工程学教授,博士生导师,曾任上海交通大学研究生院副院长,现任上海交通大学出版社总编辑,主要从事控制理论与应用,计算机控制和智能控制的研究。Email: zzhan@mail.sjtu.edu.cn

陈彭年 1948年生,中国计量学院教授,目前主要研究方向是稳定性理论和非线性系统镇定。

(上接第 160 页)

- them; adaptation in immune system as an evolution [A]. *Proc. International Conference on Evolutionary Computation* [C], Nagoya, Japan, 1996
- [11] Krishnakumar M, Sasaki M and Takahashi K. Adaptive learning method of neural network controller using an immune feedback law [A]. *6th Int. Conf. on Neural Information Processing* [C], CA, USA, 1999, 641 - 646
- [12] Jun J H, Lee D W and Sim K B. Realization of cooperative strategies and swarm behavior in distributed autonomous robotic systems using artificial immune system [A]. *IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics* [C], Tokyo, Japan, 1999, 4:614 - 619
- [13] Otsuki J T and Sekiguchi T. Application of the immune system reaction mechanism concept to sequential control [A]. *Proceedings of Emerging Technologies & Factory Automation* [C], France, 1999, 1391 - 1396
- [14] Takahashi K and Yamada T. A self-tuning immune feedback controller for controlling mechanism systems [A]. *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics '97* [C], Tokyo, Japan, 1997, 101
- [15] Gerard W. A shape space approach to the dynamics of the immune system [J]. *J. Theor. Biol.*, 1990, 143(4):507 - 522
- [16] Ishida Y. The immune system as a prototype of autonomous decentralized systems; An overview [A]. *Third Int. Symposium on Autonomous Decentralized Systems* [C], Berlin, 1997, 85 - 92
- [17] Jeme N K. Clonal selection in a lymphocyte network [A]. Edelman, ed. *Cellular Selection and Regulation in the Immune Response* [M]. New York: Raven Press, 1974, 39
- [18] Kawafukumar K. *Immunized artificial neural systems* [A]. *World Congress on Neural Networks* [C], Portland, 1993, 11 - 15, 563 - 568
- [19] Dipankar Dasgupta. Artificial neural networks and artificial immune system: similarities and difference [A]. *Proceeding of the IEEE Int. Conf. Systems, Man and Cybernetics* [C], Orlando, Florida, USA, 1997, 873 - 878
- [20] Valera F J, Couunho A, Dupire B, et al. Cognitive networks: immune, neural, and otherwise [J]. *Theoretical Immunology*, 1988, 2(3):359 - 375

本文作者简介

韦巍 1964年生,1994年获博士学位,现为浙江大学电气工程学院教授,博士生导师,主要从事智能控制理论及应用,神经网络和免疫系统理论,机器人控制技术。Email: wwei@cee.zju.edu.cn

张国宏 1967年生,1998年获硕士学位,现为浙江大学电气工程学院工程师,主要从事智能控制,微处理器控制技术的研究。