

免疫控制算法与应用研究

苏建元

(河海大学 电气工程学院, 江苏 南京 210024)

[摘要] 生物免疫系统的学习、记忆、自适应和天然鲁棒性等特性为现代控制理论和控制工程提供了新的研究思路. 介绍了生物免疫系统的相关机理, 并对生物免疫系统、人工免疫系统和控制系统的相似性进行了说明, 总结了主要的免疫模型、算法和免疫控制最新研究成果及应用情况, 从理论分析、算法研究、融合研究、应用研究 4 个方面提出了免疫控制进一步的研究工作, 指出了人工免疫系统应用于自适应控制、智能控制、反馈控制、顺序控制、机器人行为控制、自适应干扰中和器等方面的研究方向. 结果表明: 免疫控制具有十分广阔的应用前景, 是富有挑战性的研究课题.

[关键词] 免疫, 控制, 系统, 反馈, 抗原, 抗体, 亲和力, 克隆

[中图分类号] IP273 [文献标识码] A, [文章编号] 1672-1292(2005) 04-0029-05

Study on Immune Control Algorithm and Application

SU Jianyuan

(College of Electric Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210024, China)

Abstract Biological immune system's learning and memory and self-adapting and robustness offer modern control theory and engineer new research approach. Biological immune system's corresponding mechanisms are introduced. Similarities of biological immune system and artificial immune system and control system are illuminated. Immune models and algorithms and immune control's new researches and applications are summarized. A further study is pointed out in immune control field from theoretical analysis and algorithm research and fusion research and applied research. So are the research directions about artificial immune system to apply to aspect of adaptive control, intelligent control, feedback control, sequential control, robot behavior control, and auto-adapted disturbance neutralizing agent. The results indicate that the immune control has extremely broad prospect of application and it is a challenging research topic.

Key words immune control system, feedback, antigen, antibody, affinity, clone

生物信息系统主要包括神经网络、遗传系统、免疫系统和内分泌系统, 其中人工神经网络和进化计算已得到广泛应用. 而人工免疫系统的理论研究和应用, 特别是在实际控制系统中的应用相对较少. 从计算的角度分析, 生物免疫系统是一个高度并行、分布、自适应和自组织的分布式系统, 它能识别身体内所有的细胞, 包括自体和非自体, 它具有很强的学习、识别、记忆和特征提取能力, 具有多样性、耐受性和天然鲁棒性等特点. 生物免疫系统的这些特征已被应用于信息安全、模式识别、数据分类与挖掘、优化设计、故障诊断、机器学习、联想记忆和控制等领域. 在控制领域中引入人工免疫系统

将会有效解决很多复杂工业过程中的难题.

1 生物免疫系统

生物免疫系统通过对病原物质的特殊提取、识别、刺激响应、自适应调节、学习和记忆等功能杀死抗原, 是抗击病原入侵的首要防御系统, 拥有 10^{12} 个免疫细胞, 遍布全身各个角落, 它主要包括 B 细胞和 T 细胞, 除了淋巴细胞外, 还有其他种类的免疫细胞在免疫系统中发挥着不可忽视的作用. 这个系统主要表现为免疫防御、免疫自稳、免疫监视等生理功能. 能被 T 细胞及 B 细胞识别并刺激 T 细胞及 B 细胞进行特异性应答的病原体, 称为抗原.

收稿日期: 2005-05-18
作者简介: 苏建元 (1965-), 副教授, 主要从事免疫控制、计算机工程与应用和智能仪表与自动化装置等方面的教学与研究.
E-mail: hhsuwy@yahoo.com.cn

在骨髓中的 B 细胞和在胸腺中的 T 细胞从不活跃、未成熟经自体耐受发展为成熟的免疫细胞,一旦人体受到有关攻击时,迅速产生免疫应答。免疫应答包括初次应答和再次应答,初次应答是指免疫系统首次遇到一种抗原,再次应答是指对已识别抗原产生的免疫应答。免疫应答的实质是一个识别、效应和记忆的过程。巨噬细胞等特异提呈细胞吸取消化病原体,把它们分解在细胞表面展示出来,形成 MHC 分子。MHC 分子激活成熟的 T 细胞,将病原体抗原提呈给 T 细胞识别。T 细胞识别特异抗原后,一方面 T 细胞复制并激活杀伤 T 细胞,杀伤 T 细胞杀死任何被特异抗原感染的细胞;另一方面通过辅助 T 细胞激活 B 细胞。激活后的 B 细胞识别特异抗原,并克隆扩增分化为浆细胞形成抗体。抗体与抗原结合,通过两种方式杀死抗原:与补体系统形成复合物或直接带至吞噬细胞被吞噬。其中巨噬细胞,是可以吞食外来物的大细胞。通常在消灭抗原的过程中,巨噬细胞最先对病原体发动攻势,又最后离开。B 细胞、T 细胞在从未成熟到成熟期间,将经历自体耐受,在识别杀死抗原后将形成免疫记忆,产生免疫反馈。免疫记忆对应于再次免疫应答和交叉免疫应答,而交叉免疫应答是免疫系统对结构相似的抗原所产生的免疫应答。免疫反馈原理为:抗原进入机体后,将信息传递给 TH 细胞和 TS 细胞,TS 细胞抑制 TH 细胞的产生。在 TH 细胞和 TS 细胞的共同刺激下, B 细胞产生抗体来消除抗原,抗原较多时, TH 细胞也较多,而 TS 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 TS 细胞增多,它抑制了 TH 细胞的产生,则 B 细胞也随着减少。最终免疫反馈系统趋于平衡。生物免疫系统实质是一个自治系统。

2 人工免疫系统

生物免疫系统的多样性、耐受性、大规模并行分布处理、自组织、自学习、自适应、免疫记忆和鲁棒性等特点,近年来受到国内外许多学者的高度重视。目前从事人工免疫系统的研究人员主要分布在美国、日本、英国、巴西、波兰、比利时、中国等国家。1974 年美国诺贝尔奖获得者,医学家、生物学家、免疫学家 Jeme 提出了免疫系统的第一个数学模型,奠定了免疫计算的理论基础^[9]。1986 年, Famer J D. 提出了免疫网络的数学描述,为基于免疫原理的计算系统的发展开辟了道路^[13]。1989 年 Varela 讨论了免疫网络以某种方式收敛的思想及通过产生不同的抗体和变异适应新环境的能力,为

免疫系统有效地解决工程问题做出了巨大贡献^[14]。1994 年,美国计算机安全科学家 Forrest 博士提出了否定选择算法,并将该算法应用于模拟实现自体耐受过程,另外还提出了人工免疫系统的一些基本概念^[12]。1999 年, Hunt 发展了克隆选择原理,并提出了高频变异学说^[10]。

图 1 为生物免疫系统、人工免疫系统和控制系统的映射关系。

图 1 生物免疫系统、人工免疫系统和控制系统的映射关系

生物免疫系统	人工免疫系统	控制系统
抗原	计算机病毒、网络入侵、其他待检测的目标	系统出现的不确定干扰
B 细胞、T 细胞和抗体	用位串描述的检测器	控制向量空间
抗体和抗原的绑定	模式匹配	干扰能转化为可量化观察的误差,被观察量子空间对应于抗原决定基,控制向量空间对应于抗体
细胞克隆	复制检测器(其中包括高频变异等)	要使控制系统抗体适应系统抗原,可随机组合控制系统元件。类似免疫应答的选择过程,控制元件基于性能的估量进行选择,系统参数微调类似高频变异
抗原检测和应答	对非自体位串的识别和应答	把扰动传递给误差函数,提呈给评价,修正控制器参数
自体耐受	否定选择算法	自适应干扰中和器

免疫算法的设计思路有两种,一是结构和机理的模拟,一是输入输出和功能上的模拟。免疫算法可分为基于群体的免疫算法和基于网络的免疫算法两大类。基于群体的免疫算法构成的系统中的元素之间通过间接方式联系,系统组成元素直接和系统环境相互作用。基于网络的免疫算法构成的系统中的部分或全部元素之间都能够相互作用。实际应用中,常常将免疫算法与进化算法或人工神经网络等相结合形成一些新的算法。如免疫遗传算法、Unorthodox 神经网络、PDP 网络、RBF 神经网络、ANN I 网络模型、基于免疫的 BP 网络设计、基于免疫的模拟退火算法、抗体网络等。图 2 列出了常用计算机免疫算法及模型。从图 2 中可看出,免疫学习机制中的一些思想如克隆选择、亲和力成熟和网络动态性可较多地被用于控制领域中。

表 2 常用计算机免疫算法

名称	生物学原理	应用
基于群体的免疫算法	否定选择算法 去除对自体产生应答的免疫细胞, 实现对自体的耐受, 经历耐受的检测器模拟成熟的免疫细胞	病毒检测、数据分类、机器人控制等
	肯定选择算法 只有与自体 MHC 分子有联系的 T 细胞才能识别抗原	病毒检测、数据分类等
	克隆选择算法 (ARTIS模型、Multi-Agent 模型等) 识别抗原的细胞根据与抗原的亲合力大小进行无性繁殖, 亲合力越大, 繁殖得越多, 变异越小, 主要有高频变异、受体编辑等特征.	模式识别、组合优化、控制、数据分类和压缩、病毒检测、入侵检测、风险检测等
基于网络的免疫算法	aNet模型、RLA B模型、动态免疫网络模型、多值免疫网络模型、基于独特性网络理论的模型、互联网耦合免疫网络模型等 当免疫细胞识别出一个抗原或免疫细胞时就被激活, 当免疫细胞被其它免疫细胞识别时就被抑制	自动导航系统、优化问题、自动控制、数据压缩、分类、挖掘及模式识别、异常检测、学习等

3 免疫控制研究概况

设计鲁棒控制算法以满足不断增加的高性能要求, 是现代控制工程的努力方向. 国际上免疫控制的研究起步于 20 世纪 90 年代, 其主要研究方向有 Bersini 为代表的自适应控制^[30]、Krishnakumar 为代表的智能控制^[23]、Takahashi 为代表的反馈控制^[19]、Ootsuki 为代表的顺序控制^[24]、Ishiguro 的机器人行为控制^[15, 16]、自适应干扰中和器等.

3.1 自适应控制

Bersini 于 1991 年提出了一种自适应控制的方法, 这种方法模拟了生物免疫系统的恢复机制与学习机制. 他指出在生物免疫系统中, 网络结构是一个根据环境动态变化的自组织系统, 免疫系统的亚动力学特征与控制系统类似, 其主要目的都是保持抗体在特定区域内的连续一致性. Bersini 和 Varela 又于 1994 年对免疫系统的动态特征和亚动力学特征做了总结, 他指出免疫系统的亚动力学能使免疫系统的特性维持一段时间, 并且还能适应新形式. Bersini 提出了一种免疫互补机制模拟免疫系统亚动力学特性, 以确保把免疫系统中最好、最新的抗体添加到系统网络中, 即新个体的选择是基于网络周围的状态进行, 他在论文中提出了几条应用于自适应控制领域建立控制系统的原则. Perelson 提出了独特型网络的概率描述方法, 讨论了独特型网络中的相传输, 并将此模型应用于自适应控制^[21].

3.2 智能控制

Krishnakumar 于 1999 年提出了免疫计算系统的概念, 把免疫系统的自适应能力应用到了智能控制中. 该系统模仿了生物免疫系统的鲁棒性和自适应性集成了不同的计算智能方法, 如模糊系统、人工神经网络和进化计算. Kumak 把免疫系统与神经网络相结合, 识别和处理人工神经网络的建筑块, 并应用于复杂动态行为建模和自适应控制. 文献[7]提出了一种基于人工免疫原理的最优 RBF 模糊神经网络控制器设计方案, 将免疫进化算法用于控制器参数的优化. 文献[6]设计了一种基于免疫算法的模糊神经网络板厚板形综合控制系统, 用免疫算法优化具有全局性的隶属函数参数后, 再用梯度下降法在线调节和优化网络的局部性参数. 文献[1]提出一种模糊自调整免疫反馈控制系统并用于激光热疗法中组织温度的控制, 其控制性能优于常规控制器.

3.3 反馈控制

Takahashi 于 1997 年提出了可应用于反馈控制器中的两种免疫反馈机制. 第一种机制为效应 T 细胞和被激活的 B 细胞之间的免疫规律, 第二种机制为抑制 T 细胞对适应性免疫应答的抑制作用. Takahashi 提出用一系列离散的方程构建免疫反馈控制器, 这些方程包含了抗体、抗原、辅助 T 细胞和效应 T 细胞. 系统使用神经网络来定义免疫反馈控制器的一些参数, 离散方程中的变量为欧几里得形态空间中的实际向量. Takahashi 将免疫反馈规律与 PID 控制结合, 设计了一个 PD 型免疫反馈控制器并用于控制带有非线性干扰的 DC 伺服马达系统. Takahashi 还设计了基于 T 细胞的免疫反馈规律的自调整免疫反馈控制器, 它包括用于控制反应速度的激活项和用于控制稳定效果的抑制项.

3.4 顺序控制

Ootsuki 和 Sekiguchi 于 1999 年提出了一种基于免疫的顺序控制方法. 他使用 Petri 网络和免疫网络理论开发其模型, 其顺序控制设备部件的离散动态性能模拟像 Petri 网络的状态机的结构. 与 Petri 网络一样, 控制顺序可以分解成几个子问题, 而系统的动态性由一组微分方程控制, 描述网络部件之间的相互作用. 该法对分布式、部件高度自由、大规模模型更具优越性, 可用于过程控制系统、大型信息系统等的建模^[31].

3.5 机器人控制

Ishiguro 等人于 1996 年提出了一种基于免疫

网络理论的机器人行为规划框架 Immunoid 这种方法中机器人检测到的当前环境(如阻碍的距离和方向等)和能力模块分别相当于免疫网络中的抗原与抗体,而能力模块之间的相互作用相当于抗体间的刺激和抑制。Ishiguro 基于生物免疫系统是通过抗体之间四个或五个链来成功地维持着生物组织,提出了一种互联耦合免疫网络模型,即生物免疫系统是通过多个完成某一特定任务的局部免疫网络之间相互通讯形成大规模免疫网络,这种模型已被用于六足行走机器人的步法协调控制。Lee 基于细胞选择和独特性网络的控制机理构造了一个人工免疫系统模型,将机器人个体视为 B 细胞,环境条件视为抗原,行为策略视为抗体,该模型已应用于分布式机器人系统的协同控制之中。Mitsumoto 将免疫系统的自体-非自体识别网络可在动态环境中适应和产生移动测量的免疫算法应用于多机器人的软件结构,将免疫系统中 B 细胞之间的相互反应机理即 B 细胞能在动态变化的环境中保持其数量的平衡的特性应用于多机器人系统的控制结构。文献[5]提出了能较快适应环境空间的基于免疫算法的移动机器人路径规划方案。人工免疫系统在机器人控制方面的应用很好地体现了人工免疫系统的智能突现和群体智能特性,但对于动态环境的适应性还有待进一步提高。

3.6 自适应干扰中和器

Ishida 提出了基于自体耐受原理的自适应干扰中和器,具有识别、中和干扰的能力^[22]。具体实现分中和器产生、自体耐受建立、非自体记忆 3 步进行。

4 免疫控制研究展望

由于人工免疫系统的性能优越、应用前景广阔,人工免疫系统的研究得到了许多大学、研究机构和工业界的重视,作为计算智能的一个新分支,也成为许多国际期刊的重要议题,2002 年 6 月,IEEE Trans on Evolutionary Computation 出专刊报道了人工免疫的研究进展,2002 年~2003 年国际上举办有关人工免疫的专题会议近 20 次。人工免疫系统很复杂,应用于控制领域才刚刚起步,进一步的研究工作还很多,主要包括以下几方面:

4.1 理论分析

控制科学有坚实的数学理论基础,而人工免疫系统仅停留在具体算法的应用,这样将免疫算法应用于控制领域就有一定的难度,特别是高阶系统,所以要建立人工免疫系统的理论基础。首先要研究

人工免疫系统的一般数学框架和通用数学范式,然后对收敛性、稳定性、非线性动态特性、参数等进行理论分析,为免疫算法提供理论依据。现在国内已经有少数学者开始这方面的理论研究,文献[3]就免疫记忆遗传算法及其完全收敛性进行了研究,文献[4]提出了基于动态评价的免疫算法,用马尔可夫链描述该算法并证明其收敛性。

4.2 算法研究

免疫系统和生物分子学一样是生命科学的热门研究领域,目前发展很快,新成果不断涌现。一方面要研究针对某一机理的算法,如基于分布式自治系统和再生功能的免疫算法应用于机器人行为控制;基于免疫反馈和学习机理的自调整、自组织和自学习的免疫反馈控制器应用于控制领域;基于 B 细胞抗体网络的振荡、混沌和稳定等非线性动态特性并应用于非线性控制;更要研究针对整个免疫系统的算法,开发出稳定性收敛性好、鲁棒性强和巨大并行性的自适应免疫计算理论,应用于控制领域。特别是应用于多机器人的协调控制和对动态环境的适应性。

4.3 融合研究

研究表明,脑神经系统对人体免疫有影响,人在悲观时免疫力下降,容易生病,人的智力和免疫有一定程度的遗传。智能计算的融合可以有效解决实际问题,这是一个研究难题也是一个很有前途的研究方向。如开发基于 DNA 计算的免疫算法来获取鲁棒性和自适应性,将 ART 自适应谐振神经网络与人工免疫系统相结合,可明显改善数据聚类分析的效果^[8],将人工神经网络与模糊系统相结合优化模糊神经网络的拓扑结构和参数以改善模糊系统的功能。智能计算的融合可以是部分算法的融合,也可以是整体融合,对应于生物信息系统的人工智能计算,整体融合的研究难度较大,最近出现的“突现智能”向整体融合跨出了一步。智能计算的融合为解决复杂工业过程的控制提供了一种行之有效的方法^[32]。

4.4 应用研究

人工免疫系统的应用研究主要包括软硬件两方面。一是免疫算法的工程化,建立面向工程应用的人工免疫系统模型构件,开发对应的仿真系统和测试工具;二是开发基于免疫算法的硬件产品,如象模糊 MCU、神经 MCU 一样开发免疫 MCU 等产品应用于工业嵌入式控制系统等领域。

[参考文献]

- [1] 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
- [2] 肖人彬, 王磊. 人工免疫系统: 原理, 模型, 分析及展望 [J]. 计算机学报, 2002 25(12): 1281-1293
- [3] 扬孔雨, 王秀峰. 免疫记忆遗传算法及其完全收敛性研究 [J]. 计算机工程与应用, 2005 41(12): 47-50
- [4] 余建军, 郑锋, 孙树栋. 一种新的免疫算法 [J]. 计算机工程与应用, 2004 40(23): 1-3
- [5] 武彬, 吴耿锋, 马飞, 等. 基于免疫算法的移动机器人路径规划系统 [J]. 计算机工程, 2004 30(12): 122-123
- [6] 王粉花, 孙一康, 王新平. 基于免疫算法的模糊神经网络在板厚板形控制中的应用 [J]. 信息与控制, 2004 33(4): 504-506
- [7] 左兴权, 李士勇. 一种基于人工免疫原理的最优模糊神经网络控制器 [J]. 信息与控制, 2004 33(3): 380-384
- [8] 杜海峰, 王建安. 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(12): 401-405
- [9] Jeme N K. Towards a network theory of the immune system [J]. Annual Immunology, 1974 125G: 373-389.
- [10] Hunt J, Timmis J, Cooke D, *et al*. Jsys The Development of an Artificial Immune System for Real World Applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999.
- [11] Hunt J, Cooke D. Learning using an artificial immune system [J]. Journal of Network and Computer Applications, 1996 19(2): 189-212
- [12] Forrest S, Perelson A S, Allen L, *et al*. Self-nonself discrimination in a computer [C] // Proceedings of IEEE Symposium on Research in Security and Privacy. CA: IEEE Computer Society Press, 1994: 221-231
- [13] Farmer J D, Packard N H. The immune-system, adaptation, and machine learning [J]. Physica, 1986 22(1): 187-204
- [14] Varela F J, Stewart J. Dynamics of a class of immune network: global stability of idiotypic interactions [J]. J Theoretical Biology, 1990 144: 93-101
- [15] Ishiguro A, Kondo T, Watanabe Y, *et al*. Emergent construction of artificial immune networks for autonomous mobile robots [C] // Proc 1997 IEEE Int Conf on System, Man and Cybernetics. Orlando, 1997: 1222-1228
- [16] Ishiguro A, Kuboshiki S, Ichikawa S, *et al*. Gait control of hexapod walking robots using mutual-coupled immune networks [J]. Advanced Robotics, 1996 10(2): 179-195
- [17] Lee D W, Sim K B. Artificial immune network-based cooperative control in collective autonomous robots [C] // Proc 6th IEEE Int Workshop on Robot and Human Communication. Sendai: IEEE, 1997: 58-63
- [18] M itsumoto N, Fukuda T, Arai F, *et al*. Control of the distributed autonomous robotic system based on the biologically inspired immunological artificial immune system [C] // Proc 1997 IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Albuquerque, 1997: 3551-3556
- [19] Takahashi K, Yanada T. Application of an immune feedback mechanism to control systems [J]. JSME International Journal (Series C), 1998 41(2): 184-191.
- [20] Leandro N de Castro, Fernando J V Z. Learning and optimization using the clonal selection principle [C] // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. Special Issue on Artificial Immune System, 2001.
- [21] Perelson A. Immune network theory [J]. Immunological Review, 1989 110: 5-36
- [22] Ishida Y, Adachi N. Active noise control by an immune algorithm: adaptation in immune system as an evolution [C] // Proc IEEC 96 Nagoya, 1996: 150-153
- [23] Krishna Kumar K, Neidhoefer J. Immunized adaptive critics for level 2 intelligent control [C] // Proc of the IEEE SMC' 97. Orlando, 1997
- [24] Ootsuki J T, Sekiguchi T. Application of the immune system network concept to sequential control [C] // Proc IEEE SMC' 99. Tokyo, 1999: 869-874
- [25] Daryl Bradley, Andy Tyrrell. A hardware immune system for benchmark state machine error detection [C] // Proceedings of the special sessions on artificial immune systems in Congress on Evolutionary Computation. Honolulu: IEEE World Congress on Computational Intelligence, 2002
- [26] CytoCom Network [EB/OL]. [2000-09-15]. <http://www.csc.liv.ac.uk/~cytocom/index.html>
- [27] Towards an Artificial Immune System for Network Intrusion Detection: An Investigation of Clonal Selection with a Negative Selection Operator [EB/OL]. <http://www.dcs.kcl.ac.uk/staff/jungwon/ComputerImmune.html>
- [28] Special Session on Artificial Immune Systems at the Congress on Evolutionary Computation (CEC) [EB/OL]. [2003-12-08]. <http://vlah.ee.nus.edu.sg/~ketan/sscec2003.htm>
- [29] Second International Conference on Artificial Immune Systems (ICARIS) [EB/OL]. [2003-09-01]. Edinburgh: Napier University. <http://www.aber.ac.uk/~icawww/IC3/icaris2003.htm>
- [30] Bersini, Varela. The immune learning mechanisms: reinforcement, recruitment and their applications [J]. Computing with Biological Metaphors, 1994 1(2): 166-192
- [31] 徐敏, 苏建元. OOPN 和 PNOO 建模技术研究 [J]. 电脑与信息技术, 2005 13(5): 5-7
- [32] 冷波, 苏建元. 聚类融合控制算法研究 [J]. 自动化博览, 2005 22(5): 67-68

[责任编辑: 严海琳]