

人工免疫系统及其模型分析

王 珺,刘希玉,王 鑫

(山东师范大学 信息管理学院,山东 济南 250014)

摘要:目前,受生物免疫系统启发而产生的人工免疫系统(Artificial Immune System, AIS)作为计算智能研究的新领域正在兴起。文中侧重以 AIS 的基本原理为线索,对其模型加以系统综述。介绍了人工免疫系统的生物原型及生物免疫系统模型。在此基础上讨论了3种人工免疫系统的网络模型:aiNet、骨髓模型及有限资源人工免疫系统。分别介绍了这3种主要模型的来源,详细描述了各个模型的基本思想,并归纳出各个模型的特征。

关键词:人工免疫系统;免疫系统模型;aiNet;骨髓模型;有限资源人工免疫系统

中图分类号:TP18

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2006)07-0105-03

Artificial Immune System and Analysis of Its Models

WANG Jun, LIU Xi-yu, WANG Xin

(Information and Management School, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: Nowadays, drawing inspiration from the vertebrate immune system, a new research field of artificial immune system (AIS) is springing up, which is a novel branch of computational intelligence. This article intended to give a comprehensive overview of the AIS models. It introduced the biological models and the biological immune system models of the artificial immune system. On the base of them, it then discussed three models of the artificial immune system: aiNet, bone marrow model and resource limited artificial immune system. It introduced the source of the three main models, described their basic theories in details, and then concluded their characteristics.

Key words: artificial immune system; immune system model; aiNet; bone marrow model; resource limited artificial immune system

0 引言

生物体是一个复杂的大系统,其信息处理系统可分为神经系统、遗传系统、免疫系统和内分泌系统^[1]。近年来,人们不断从生物系统中获得灵感,提出了若干采用计算途径实现的学习系统,包括人工神经网络(Artificial Neural Network)、遗传算法(Genetic Algorithm)、蚁群系统(Ant System)等,它们分别从大脑神经系统、自然进化过程和蚂蚁全体觅食、筑巢等社会活动启发而来。

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。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^[2]。

1 人工免疫网络模型

1972年,N.K. Jerne在生物免疫学对抗体分子独特性认识的基础上,首次提出了独特性网络模型的理论概念,并列出了该模型的微分方程。之后,许多研究人员又提出了多种免疫网络学说,如 Varela 和 Coutinho 提出的认知模型、Perelson 提出的独特型网络的概率描述、以及 Ishiguro 等人提出的互联耦合免疫网络模型等,都可借鉴用于建立人工免疫网络模型^[3]。文中主要介绍几种比较有影响的人工免疫网络模型。

1.1 aiNet

De Castro 等^[4]提出一种名为 aiNet 的免疫网络。该网络模型忽略 B 细胞和抗体的区别,利用统计推论技术实现^[5]。

1.1.1 网络定义与描述

aiNet 是一个边界加权图,无需全部连接,又称为细胞的节点集合组成,节点对集合称为边界。每一个连接的边界具有一组分配的权或连接强度。

网络中聚类用做内映像,负责映射数据集中的聚类到网络聚类,如图 1 所示。一个假设的网络结构由 aiNet 产生,如图 2 所示。图 2 给出了细胞表示和连接强度,其中,虚线表示连接应被剪除,目的是为了检测聚类和定义

收稿日期:2005-10-28

基金项目:山东省自然科学基金重大项目(Z2004G02);山东省优秀中青年科学家奖励基金资助项目(03BS003);山东省科委资助项目(012090101)

作者简介:王 珺(1981-),女,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为数据挖掘、人工神经网络;刘希玉,博士,教授,博士生导师,研究方向为非线性模型理论、神经网络遗传算法。

最终的网络结构。

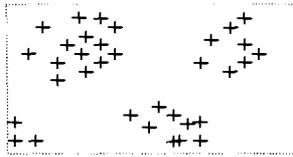


图 1 网络聚类

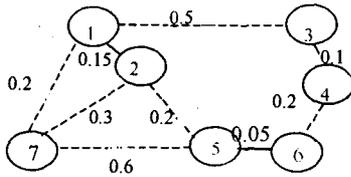


图 2 aiNet

1.1.2 aiNet 学习算法

在每一次循环中,do:

(1)对每一个抗原 i ,do:

- ① 根据一个距离度量,确定其对所有网络细胞的亲和力和 d_{ij} ;
 - ② 选择 n 个最高亲和力网络细胞;
 - ③ 克隆所选择的这 n 个细胞,细胞亲和力越大, N_c 越大 (N_c : 每一个受刺激细胞产生的克隆数);
 - ④ 对这 N_c 个细胞应用公式: $C = C - \alpha(C - X)$ (C : 网络细胞矩阵, X : 抗原矩阵, α : 学习率或者成熟率);
 - ⑤ 对这些改进的细胞确定 D (D : 元素 $d_{ij}(Ag - Ab)$ 的相似性矩阵);
 - ⑥ 重新选择最高亲和力细胞的 $\xi\%$, 建立一个部分 M_P 记忆细胞矩阵;
 - ⑦ 清除那些亲和力低于 σ_d 的细胞,产生 M_P 矩阵规模的削减 (σ_d : 自然死亡阈值);
 - ⑧ 计算网络 $Ab - Ab$ 亲和力 s_{ij} ;
 - ⑨ 清除 $s_{ij} < \sigma_s$ (克隆抑制) (σ_s : 抑制阈值);
 - ⑩ 连接 C 和 M_P ($C \leftarrow [C: M_P]$);
- (2) 确定 S , 清除 $s_{ij} < \sigma_s$ (网络抑制) 的那些细胞。
 (3) 替换最差个体的 $r\%$ 。

1.2 骨髓模型 (Bone Marrow Model)

Hunt 和 Cooke^[6]于 1996 年提出一种人工免疫系统形式结构,用模式识别问题进行学习评估,称为骨髓模型。该模型实现从免疫系统运行思想启发的人工免疫系统机器学习能力。它的目的不是精确模拟人类免疫系统,也不是提供人类免疫系统如何运行的原理解释,而是研究对机器学习和解决问题有用的特征。

骨髓模型由骨髓目标、B 细胞网络目标、一个抗原群体组成。在实现时,B 细胞、抗体、抗原和骨髓等由类例 (instance of classes) 来表示。这些类实现自己的功能,也表示 B 细胞网络作为一组 B 细胞对象和这些对象之间的连接实现。

(1)骨髓对象。

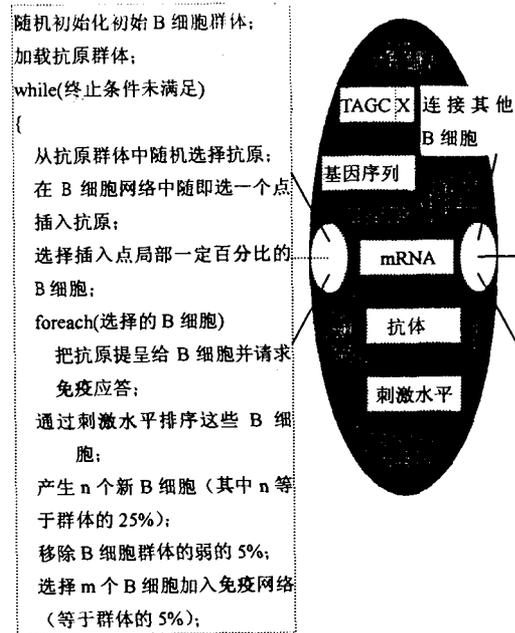
骨髓节点具有保持主要算法的作用,该算法初始化免

疫应答,通过提呈抗原给 B 细胞对象。免疫系统主要算法如图 3 所示。

一个 B 细胞的受刺激水平表明 B 细胞能否在网络中存活下去。可采用如下方法计算 B 细胞受刺激水平:

$$\text{stimulation} = c \left[\sum_{j=1}^N m(a, xe_j) - k_1 \sum_{j=1}^N m(a, xp_j) + k_2 \sum_{j=1}^n m(a, y) \right] - k_3 \quad (1)$$

其中, N 是抗体数, n 是抗原数, c 是取决于每单位时间比较数和通过一次比较刺激产生的抗体比率, a 是当前 B 细胞对象, xe_j 表示 B 细胞第 j 个抗原决定部位, xp_j 表示 B 细胞第 j 个 B 细胞抗体决定部位, y 表示当前抗原。



(a)免疫系统目标算法 (b)B 细胞目标结构

图 3 人工免疫系统目标学习算法

(2)B 细胞对象。

每一个 B 细胞对象具有通过模仿遗传机制 (在免疫系统中形成抗体的方式) 产生的模式匹配元素。遗传机制使用一个基因库 (表示法的积木块), 基因库用于形成许多中间表示法 (反映 DNA 转换成蛋白质的过程), 最终导致最后的抗体。B 细胞对象也记录 B 细胞的刺激水平, 并保持对其在网络中任何 B 细胞对象的连接。

B 细胞受刺激水平部分与其抗体抗原结合程度好坏有关, 部分与免疫网络有关, 刺激水平的计算见式 (2):

$$\text{stimulation} = c \left[\sum_{j=1}^N m_{ij} x_i x_j - k_1 \sum_{j=1}^N m_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^n m_{ij} x_i x_j \right] - k_2 x_i \quad (2)$$

其中, N 是抗体数, n 是抗原数, c 是取决于单位时间内遭遇数和一次遭遇刺激抗体产生速率的常数, m_{ij} 表示匹配特异性。

1.3 有限资源人工免疫系统

Timmis 于 1999 年提出可视化有限资源人工免疫系统 (Visualization Resource Limited Artificial Immune Sys-

tem)。该模型中,一个模式被识别出来,网络不衰退也不失去模型,不仅可用于一次性簇学习,而且表现出连续学习的能力。

1.3.1 人工识别球

Perelson 的理论指出,基于形态空间概念,存在有限数目的抗体可以代表无限多的抗原。在形态空间中存在一个小的区域称为识别球,用 V_e 表示。在这个识别球内,一个抗体可以识别所有抗原决定基。受这种思想启发, Timmis^[7,8] 提出人工识别球 (Artificial Recognition Ball, ARB) 的概念。每一个在网络内的 ARB 能够表示许多同样的 B 细胞,如图 4 所示。

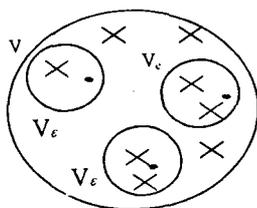


图 4 ARB 的表示

1.3.2 网络定义与描述

RLAIS 由一组 ARB 和它们之间的联系组成,表示相似性。ARB 在 RLAIS 内竞争表示许多 B 细胞的能力。RLAIS 算法流程图如图 5 所示。

训练数据不断提交给网络。一个 ARB 经历刺激计算,使用公式(3):

$$\text{stimulation} = \sum_{x=0}^a (1 - pd) + \sum_{x=0}^a (1 - dis_x) - \sum_{x=0}^a (dis_x) \quad (3)$$

其中, a 是 ARB 已经暴露的抗原数, pd 定义为正规化空间 ARB 和第 x 个抗原之间的距离, $0 \leq pd \leq 1$, dis_x 是从该 B 细胞开始的第 x 个邻居的距离。

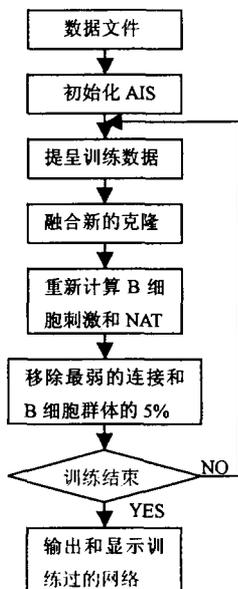


图 5 RLAIS 系统算法流程图

ARB 在学习循环期间经历克隆,以公式(4)表示:

$$e_x = k \cdot SI_x \quad (4)$$

其中, k 是用于限制克隆细胞数的常数, SI_x 是一个 ARB 的刺激水平。

训练数据的每一个表示之后, B 细胞分配给 ARB。每一个 ARB 刺激水平重新用公式(1) 计算。每一个 ARB 拥有的 B 细胞数取决于刺激水平,而与得到多少 B 细胞无关。定义如下:

$$R_i = k \cdot SI_i^2 \quad (5)$$

其中, SI_i 是一个 ARB 的刺激水平, k 是用于限制 ARB 拥有的 B 细胞数的常数。刺激水平越高, ARB 拥有的 B 细胞越多。如果分配的 B 细胞数比允许的最大 B 细胞数多,则多余的 B 细胞必须清除。

2 3 种模型的比较

这 3 种模型的比较见表 1^[9]。

这些系统由于研究目的不同,各有各的特点、功能和结构,这也正是免疫系统特性的真实体现:开放性、分布性、宏观上的无统一性和微观上的有统一性。

表 1 模型比较

	aiNet	骨髓模型	RLAIS
节点	抗体	B 细胞	B 细胞
编码	实数向量	二进制字符串	抗原集合的交叉部分
网络初始化	随机开始	对处理时间很重要	抑制具有低刺激水平的 B 细胞
抗原提呈	对所有网络	对网络随机选择的部分	促进多样性
亲和力	Euclidean 距离	与匹配位数成比例	具有高亲和力的 B 细胞互相之间被连接到一个网络区域
细胞死亡	抑制具有低抗原性的高抗体和高亲和力抗体	抑制低刺激水平的 B 细胞	—
高频变异	控制学习	促进多样性	—

参考文献:

- [1] 莫宏伟,金鸿章.人工免疫系统:一个新兴的交叉学科[J]. 计算机工程与科学,2004,26(5):70-73.
- [2] 焦李成,杜海峰.人工免疫系统进展与展望[J]. 电子学报,2003,31(10):1541-1543.
- [3] 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.
- [4] De Castro, Fernando J. An Evolutionary Immune Network for Data Clustering[A]. Proc 6th Brazilian Symposium on Neural Networks[C]. Rio de Janeiro, Brazil: [s. n.], 2000. 84-89.
- [5] 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(12):1282-1284.
- [6] Germain R N. MHC - Associated Antigen Processing, Presentation, and Recognition, Adolescence, Maturity and Beyond

相关表就是几张有相同字段的表,对应的配置系统会有相关的配置选项。如数据库节点配置,数据库节点和号段关系配置,这两个配置选项里必然都会有数据库节点号字段的配置,它们是相关的配置,对应数据库中的表就是两张相关表。

这种情况下,当某一个客户端获得了相关表中一张表的增删改操作的权限后,别的客户端对所有与这张表相关的表就只具有查询数据的权限了。

(3) 几个客户端的同步操作与对某一张表进行增删改操作的互斥。

因为后台配置管理系统由用户所配置的数据要真正起作用,必须要通过同步到前台的方式来配置管理。所以后台配置系统界面中会提供可以同步到前台的操作。同步可以选择同步变化表或是同步所有表。

在这种情况下,当某一个客户端获得了同步操作的权限,此时因为要把数据同步到前台,数据就不能再变化了,所以任何别的客户端都不具有对任意表的增加、删除、修改数据的权限。反之,若某一个客户端获取了对某一张表的增删改操作的权限,此时数据就有可能变化了,所以任何客户端都不具有把数据同步到前台的操作权限。

4.2 互斥操作的实现

针对不同情况的互斥操作是如何来实现的,即服务端是怎样根据不同的情况来赋予每个客户端不同的访问数据的权限,是问题解决的关键。

4.2.1 互斥模块配置文件

服务端定义了一个互斥模块的配置文件 `caf - cm - mutexconfig. xml`,以 `xml` 文件的标签格式来定义一些互斥的模块,如下:

```
<!-- 下面信息表明物理配置模块内互斥、物理配置与同步模块间互斥 -->
```

```
<!-- 即如果已经启动一个物理配置客户端,则启动的第二个物理配置客户端无修改权限 -->
```

```
<!-- 如果正在进行同步,则物理配置不能进行写操作,只能查询 -->
```

```
<Module ID="3GBSS-PHY">
```

```
<MutexModule>3GBSS-PHY</MutexModule>
```

```
<MutexModule>3GBSS-SYNC</MutexModule>
```

```
</Module>
```

每个配置项定义各自的 `Module ID`,并且列出了与之互斥的所有配置项,包括自身和同步,以及别的相关表的配置所作的增删改的操作权限。此处以物理配置为例在

该配置文件中的格式,因为它没有相关配置,所以只定义了自身和同步的互斥操作权限。

4.2.2 服务端与客户端的交互

服务端和客户端都会定义一些类的接口,实现交互。

服务端会定义一个 `CafCmServer` 类的接口,用于给客户端发送配置请求使用。每个客户端会获取一个 `CafCmServer` 类的实例,来实现与服务端的交互。

服务端还会定义一个 `CafCmMutexServer` 类的接口,用于给客户端提供配置权限的申请,释放查看、删除、修改等功能的权限。在客户端发送某一项配置的请求时,服务端会根据该配置项的 `Module ID` 去读互斥模块配置文件中定义的相应信息,获取互斥模块的描述信息,以此来判断该客户端所具有的操作权限。

当客户端关闭该配置界面时,则释放所有的配置操作权限。

此外服务端会定义一些别的类,如用来访问数据库的类等;客户端也会定义一些关于界面显示和从服务端获取数据的类。

客户端根据服务端所赋予的不同操作权限来改变界面显示,如若不具有增加、删除、修改操作的权限,而只能查询数据,则使相应按钮置灰,即不能进行该操作,真正实现了互斥操作。

5 结束语

此外,配置管理系统为了保持前后台数据的一致性,利用同步技术把后台配置好的数据同步到前台时也会有很多设计策略,并且会使用探针来查看前后台数据是否一致。总之,配置管理是整个网管系统的基础,而数据是配置管理的核心,管理好数据,整个网管系统才能正常操作。

参考文献:

- [1] 唐宝民. 电信管理网基本技术[M]. 北京:北京邮电学院出版社,1998.
- [2] 孔令萍. 电信管理网[M]. 北京:人民邮电出版社,1997.
- [3] 王乐文,彭授全. MVC设计模式在配置CAF中的应用[J]. 微机发展,2005,15(3):104-109.
- [4] 张舰,张强,郭梅. 一种基于界面自动生成技术的TMN配置管理设计[J]. 计算机应用,2003(S2):375-376.
- [5] 李增智,王志文,李钢. TMN配置数据一致性探讨[J]. 微计算机应用,2000(3):144-148.

(上接第 107 页)

[J]. The Immunologist,1995,6(3-5):185-190.

[7] Timmis J, Neal M, Hunt J. An artificial immune system for data analysis[J]. Biosystem,2000,55(1-3):143-150.

[8] Timmis J, Neal M. A resource limited artificial immune sys-

tem for data analysis[J]. Knowledge - Based - System,2001(14):121-130.

[9] 莫宏伟. 人工免疫系统原理与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2003. 75-105.