

# 基于互联耦合免疫网络的突现计算模型及其服务实现<sup>\*</sup>

任立红 张向锋 皋 磊 丁永生

(东华大学信息科学与技术学院 上海 200051)

**摘要** 基于生物免疫系统中的互联耦合免疫网络学说,构建了一种新颖的网络突现计算模型。该模型通过生物网络结构中的生物实体之间的相互作用形成超级实体,或进一步形成超级实体网络,来实现生物网络中的服务突现。在生物网络仿真平台上,通过设计和实现生物实体、超级实体和超级实体网络之间的相互作用,验证了基于互联耦合免疫网络计算模型的突现服务能满足用户的各种需求。

**关键词** 互联耦合免疫网络,服务突现,超级实体,生物网络平台

## Mutual-Coupled Immune Networks Based Emergent Computation Model and its Service Implementation

REN Li-Hong ZHANG Xiang-Feng GAO Lei DING Yong-Sheng

(College of Information Science and Technology, Dong Hua University, Shanghai 200051)

**Abstract** We propose a new model for network emergence computation based on mutual-coupled immune network hypothesis in biological immune systems. The service emergences of the bio-networks are implemented by the super-entities generated from the interaction among the bio-entities, or the super-entity networks generated from the interaction among the super-entities in bio-network architecture. In our bio-network simulation platform, we design and implement the bio-entities, the super-entities, and the interaction among the super-entities, and examine the emergent services generated from the mutual-coupled immune network computation model can satisfy various users' requirements.

**Keywords** Mutual-coupled immune networks, Service emergence, Super-entities, Bio-network platform

### 1 引言

未来的 Internet 网络是以用户需求为中心,应具有自扩充性、可移动性、可生存性、对异构和动态条件的自适应性、安全性及服务应用的简单易操作性等特点。这些需求使我们有必要进一步地优化并发展 Internet 网络的智能体系结构,并设计其应用。

另一方面,生物信息系统能被启发以提供给工程领域各种富有成效的智能技术和方法,其中,由生物免疫系统引发的人工免疫系统,直到近几年才得到国内外研究学者的重视<sup>[1]</sup>。免疫系统通过从不同种类的抗体中构造的自己-非己的非线性自适应网络,在处理动态变化环境中起主要作用。生物免疫系统是安全的、可生存的,即使一定比例的个体被入侵者、事故或疾病损伤,它们仍然能起作用。免疫系统是以一种完全分布式方式实现许多复杂计算,具有进化学习、联想记忆和模式识别等能力。目前人工免疫系统的研究结果主要集中在免疫算法和人工免疫网络,并应用到控制、故障诊断、模式识别、图像识别、优化设计、机器学习、联想记忆和计算机安全性等领域。其中,免疫网络模型主要有独特型网络、互联耦合免疫网络和对称网络等<sup>[1-3]</sup>。但是现有的计算模型仅仅是模拟了免疫系统的某一方面,而没有考虑大规模免疫网络的一些重要特性。

通过研究,我们发现生物免疫系统的一些重要特征,尤其是大规模免疫网络的突现行为,可用于建立生物网络突现计算模型。在此基础上可设计一种新颖的具有服务突现和进化能力的生物网络结构及其仿真平台,用于仿真复杂的大规模的 Internet 网络服务与应用<sup>[4-5]</sup>。本文在现有的互联耦合免疫网络学说的基础上,进一步探讨免疫网络的突现行为。通过局部免疫网络(LIN)之间相互协调和控制来形成大规模的免疫网络,使其表现出自扩充性、自适应性、可生存性及进化等能力,从而构建一种新颖的网络突现计算模型来满足生物网络的服务突现。在生物网络仿真平台上的仿真实验,也表明该模型可用于 Internet 网络中实现服务突现。

### 2 互联耦合免疫网络的突现计算模型

生物免疫系统是生物,特别是脊椎动物和人类所必备的防御机理<sup>[3]</sup>,它由具有免疫功能的器官、组织、细胞、免疫效应分子及有关的基因等组成,可以保护机体抵御病原体、有害的异物及癌细胞等致病因子的侵害。免疫系统最重要的细胞是淋巴细胞,主要是 B 和 T 两类淋巴细胞。在整个生命过程中, B 细胞持续地从骨髓产生,其主要功能是产生抗体,执行特异体液免疫功能,其过程由 T 细胞调节。T 细胞由胸腺产生,执行特异细胞免疫和免疫调节功能。T 细胞有抑制 T 细胞和辅助 T 细胞,分别用于抑制和帮助 B 细胞对某一刺激的

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金青年基金(60004006);上海市青年科技启明星计划(00QD14038)、上海市青年教师基金(01QN33)。任立红 副教授,博士,从事网络智能计算、DNA 计算和软计算等研究;张向锋 硕士研究生,从事网络智能自动化与网络智能计算等研究;皋 磊 博士研究生,从事网络智能自动化与网络智能计算等研究;丁永生 博士,教授,博士生导师,从事网络智能计算、计算智能、DNA 计算、人工免疫系统等研究。

反应。最近对免疫学的研究证实了免疫系统具有区别自己和非己物质的自我识别功能,其所构建的网络称为免疫网络。网络学说的观点是建立在自身识别上,认为免疫系统是淋巴细胞上分布的特异性抗原受体 V 区的网络,该网络是通过免疫细胞相互作用并识别 V 区上的抗原决定簇来实现的;对外来抗原的应答是建立在识别自身抗原基础上的反应。

在免疫网络中有两个学说占主导地位:细胞选择学说和网络学说。基于细胞选择学说,Jerne 开创了独特型网络的理论<sup>[2]</sup>。该学说是以淋巴细胞不是孤立的,而是通过抗体之间相互反应和在不同种类的淋巴细胞之间相互通讯为基础。相应地,抗原的识别是由抗原和抗体之间相互反应形成的网络来完成的。但由于免疫系统的复杂性,目前抗体之间大规模的联接还没有用实验论证。尽管如此,免疫学家已经发现免疫系统是通过抗体之间 4 个或 5 个链来成功地维持着生物组织,即免疫系统能利用局部的连接来维持生物组织的正常工作<sup>[1]</sup>。以上学说就是互联耦合免疫网络学说,其基本框架如图 1 所示。

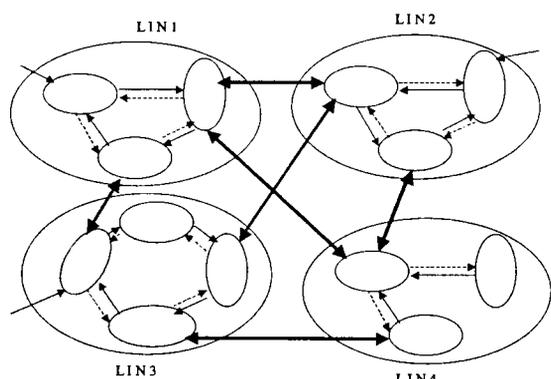


图 1 互联耦合免疫网络学说

根据互联耦合免疫网络学说,我们可以进行进一步分析,来理解免疫系统的突现行为。免疫系统的每个淋巴细胞(如 T 细胞、B 细胞等抗体)可看成生物个体,遵循一组简单的行为规则(如迁移、再生、变异和死亡等)。一群个体相互作用、相互通讯形成 LIN 完成某一特定的任务,多个 LIN 相互协调和控制进而形成大规模的免疫网络,展示复杂的突现行为,如自扩充性、自适应性、进化、安全性和自救性等。具体实现时,我们可以考虑如下:将淋巴细胞看作生物实体,多个分布、自治的生物实体与生物实体之间相互作用突现形成的 LIN 作为超级实体,多个超级实体之间相互协作和通讯再形成大规模免疫网络(超级实体网络),就可以构建一种基于互联耦合免疫网络的突现计算模型,来自组织地提供各种服务和应用。这种突现计算模型可以嵌入到我们所设计的生物网络结构的仿真平台<sup>[4,5]</sup>,将用户或其它生物实体发出的请求看作是抗原,对于发出的请求,如果某个生物实体不能完成该请求,它可以和本地平台上的其它生物实体聚集成超级实体(本地 LIN)来提供服务。若本地超级实体还是不能完成请求,生物网络模型中多个平台上的超级实体相互协作和通讯,形成超级实体网络,来实现请求的突现服务。

### 3 互联耦合免疫网络突现计算模型的设计与实现

为了构建突现计算模型,以下我们首先讨论生物实体的设计和实现,然后讨论生物实体之间是如何相互作用形成超

级实体,进而形成超级实体网络来实现用户需求的服务突现。

#### 3.1 生物实体的结构

生物实体由属性、本体和行为三部分组成:(1)属性部分包含生物实体本身的信息(如 ID 号、所属的超级实体、本体类型、能量水平、年龄、关系等)。关系包含生物实体和所处的环境之间的关系类型(如超级实体、团体、本地)、关系强度和生物实体的信息。如果一个生物实体知道另一个和它有关系的生物实体的 ID 号和位置,它将直接与之作用,否则该实体将向所有或部分与之相关的生物实体广播它的信息。(2)本体部分包含与生物实体提供的服务相关的资料,如数据或用户信息(不能执行的数据)和程序代码(可执行的代码)。(3)生物实体的行为有:资源购买行为、迁移行为、复制/再生行为、死亡行为、关系行为、保护行为、通讯行为等。

#### 3.2 生物实体间的服务提供

在生物网络中,生物实体之间建立关系,与其它生物实体相互作用,形成超级实体。超级实体不是在特定网络中的生物实体,而是指基于生物实体的自治行为、相互作用和关系建立的突现行为。通过超级实体的突现行为来提供服务。生物实体之间的相互作用完成生物实体的请求服务、提供服务和接收服务。

3.2.1 请求服务 生物实体所发出的请求可以是明确请求,也可以模糊请求。

在明确工作模式中,一个生物实体向具有特定服务的生物实体明确地提出请求。发出请求的生物实体事先知道可得到哪些服务(如超级实体)和哪些超级实体能提供期望的服务。

在模糊工作模式中,生物实体或用户不发送服务请求,而是能提供服务的生物实体以一定方式监视用户的行为。这种模式适用于用户不知道提出何种请求,也不知道它们能否创建服务。为了能有效地侦听,一个生物实体可以向它所处的环境广播它自身的信息(如它所代表的用户行为和个人信息),也可以让其它生物实体能访问它的信息以使其能监听到这些信息。该模式中,能提供服务的生物实体自动地向其它生物实体提供服务,生物实体选择它需要的服务。

3.2.2 提供服务 生物实体间相互作用可以是限定的,也可以是开放的。

在限定模式中,生物实体与特定的实体或超级实体相互作用。这些实体有特定的 ID 号、位置及明确的服务请求。该模式中,提出请求的生物实体只将请求发送给特定的一些生物实体,明确指明一个服务,也就是说,超级实体提供的服务是静止的。

在开放模式中,一个生物实体将服务请求发送给它所处的环境中的所有实体。这些实体收到请求并理解请求,只有能处理请求的那些生物实体响应,其它实体对请求不响应,发出响应的生物实体提供服务。该实体所处环境中的任何生物实体能够响应服务请求,但不能保证提出请求的生物实体能得到满意的服务。

在这两种模式中,多个生物实体(或超级实体)都可以提供服务。生物实体通过侦听环境(如能提供相同服务的生物实体数量以及所拥有的能量等)和学习与其它生物实体的关系来选择不同的提供服务策略。

3.2.3 接收服务 根据它收到的服务,生物实体记录超级实体的名称并与超级实体中的生物实体建立较强的关系,以便以后再次访问这个服务。

### 3.3 超级实体及其网络的形成和特性

如果一个生物实体需要服务(该实体也可代表一个用户),它创建一个服务请求并将该请求发送给它所处环境中的其它生物实体,以期望超级实体能提供所请求的服务。如果没有超级实体提供服务,那么超级实体中的每个实体将轮流询问与它相关的其它实体,与其它实体形成的超级实体相互通讯,从而通过多个超级实体之间的相互作用形成超级实体网络提供给请求的服务。图2所示是构建的一种生物网络突现

计算模型,可自组织地提供各种服务和应用。图2中,单个生物实体,如生物实体5能向用户或网络中的其它生物实体提供简单的服务,它遵循简单的行为规则。在一个生物实体LIN中,生物实体相互作用并突现为超级实体,所形成的超级实体能提供更复杂的服务。同时一个生物实体,如生物实体8可以同时存在于不同的生物实体LIN中。对于单个超级实体不能单独完成的服务,则由超级实体网络中的多个超级实体相互作用来提供服务和应用。

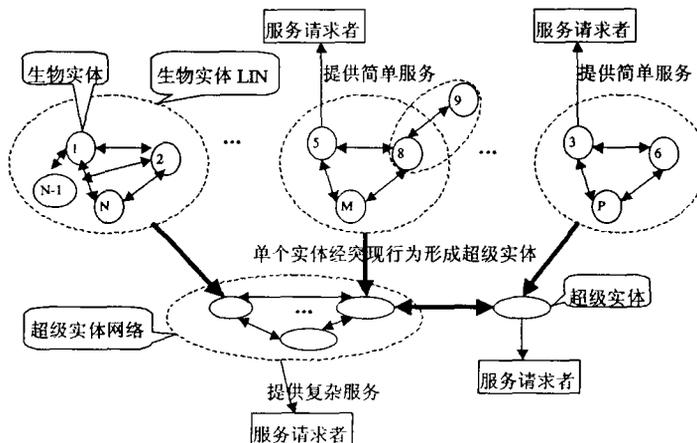


图2 生物网络结构中的超级实体和超级实体网络

生物网络结构中的超级实体和超级实体网络是动态变化的,通过自然选择过程,生物网络中的超级实体让具有优势的生物实体得以生存,而使劣势的生物实体从中消除,从而满足用户需求的动态自适应。基于互联耦合免疫网络建立的超级实体(即服务和应用)将共享一组共同的重要特性,如:(1)自扩充性。超级实体是可扩充的,因为它包含的所有生物实体是基于它们的环境的局部信息被设计成自治和局部的,例如,一个生物实体可以与邻近的生物实体建立关系,提供一种相似的或互补的服务以扩充超级实体;(2)自适应性。超级实体通过它的生物实体的突现行为和关系来适应异构和动态的网络条件。同时,生物实体的各种行为也有利于服务的多样性形成,通过自然选择过程如服务进化提高生物网络的适应性;(3)进化。生物网络可以通过多样性和自然选择(如生物实体的复制、再生行为)等机理来提供服务的进化;生物网络中超级实体提供的服务是通过多样服务(如服务突现)和自然选择来实现的。多样服务通过动态创建和修改超级实体的关系来突现的,如通过动态地删除和增加超级实体中的生物实体来得到新的超级实体,实现生物网络的进化;(4)简单性。仅需要设计单个生物实体的相对简单的行为,且生物实体可以自治地学习它所在的超级实体与其它邻近超级实体间的关系,使超级实体的构建得以简化;(5)安全性和可生存性。超级实体有多种突现的安全性和可生存性行为,它们可作为抵御攻击和预防失败的附加层,添加到现有的网络安全技术中。

## 4 Web 信息服务突现的仿真实验

以上基于互联耦合免疫网络的突现计算模型可用于设计大规模复杂网络环境下的信息服务和应用。下面我们以前述 Web 信息检索系统为例,在生物网络仿真平台上<sup>[4,5]</sup>,通过设计和实现生物实体、超级实体和超级实体网络之间的相互作用,来验证基于互联耦合免疫网络计算模型的突现服务能满足用户的请求。

在 Web 信息检索系统中,系统接收到用户的查询请求后,若采用明确工作模式,则通过搜索引擎来发现能提供它期望的服务的超级实体,并获得属于那个超级实体的生物实体的地址和 ID 号。然后,用户直接向那些生物实体发送信息检索请求。如果该生物实体不能满足用户的请求,可通过生物实体 LIN 中的实体自组织形成一个新的超级实体提供给请求的服务。如果还是不能满足用户的请求,生物网络模型中多个平台上的超级实体就会相互协作和通信,形成超级实体网络来实现信息检索的突现服务。若采用模糊工作模式,通过监视各种提供该信息检索请求的网页,用户可以自动地收到关于该服务请求的最新消息。

在仿真中,为了验证生物网络的突现行为,我们采用明确工作模式。先仿真网络中节点较少的情况(小网络),再仿真网络中节点较多的情况(大网络)。

在小网络中,首先,对仿真平台进行初始化配置,网络中有 24 个节点,各个节点在网络中的位置不同。网络中有能提供各种 Web 页服务的生物实体。配置生物实体行为的参数,如行为的类别、因素名称、因素值及其范围等。再对仿真器进行配置,如仿真周期、输出数据周期等,并选择生物实体在仿真中是否有迁移、复制/再生和死亡等行为。假定用户每秒请求一个 Web 页,一个生物实体每秒内能服务 20 个 Web 页。用户的查询请求在节点 1 上,系统将查询请求向距离用户最近的生物实体发送,并搜索能提供该 Web 页的生物实体,这些生物实体不断地向节点 1 迁移。随着用户请求的不断增多,系统将用户请求放在队列中,等待有更多的生物实体提供服务。而网络中提供该 Web 页服务的生物实体由于数量较少而不能及时满足用户的请求,因此对生物实体不断地复制/再生,并利用关系发现提供相似服务的其它生物实体。这些生物实体也向节点 1 迁移并相互作用形成超级实体,迅速向用户提供服务,满足了用户的请求,节省了用户的搜索时间。

- 2001,49(5):771~783
- 14 Yang Chao, Zhang Jianzhong. Two general methods for inverse optimization problems. *Applied Mathematics Letters*, 1999, 12: 69~72
  - 15 Huang Siming, Liu Zhenhong. On the problem of k-matching of bipartite graph. (to appear)
  - 16 刁在筠, 戎晓霞. 解一般线性规划逆问题的一个  $O(n^3L)$  算法. *山东大学学报*, 1998, (4): 64~72
  - 17 丁在筠, 丁梅. 凸二次规划问题逆问题的模型与解法. *运筹学学报*, 2000, 4(4): 88~94
  - 18 关秀翠, 刁在筠. 求解一般线性规划逆问题的预校正内点法. *山东大学学报(自然科学版)*, 2000, 35(1): 24~30
  - 19 关秀翠, 刁在筠. 一般线性规划问题的限制逆问题. *运筹与管理*, 2000, 9(3): 8~13
  - 20 关秀翠. 关于一般线性规划逆问题的一种简化. *运筹与管理*, 2002, 11(2): 35~40
  - 21 Burton D, Toint P L. On the use of an inverse shortest paths problem for recovering linearly correlated costs. *Mathematical Programming*, 1994, 63: 1~22
  - 22 Zhang Jianzhong, Ma Zhongfan, Yang Chao. A column generation method for inverse shortest path problem. *ZOR-Mathematical Methods of Operations Research*, 1995, 41: 347~358
  - 23 Dial B. Minimum-revenue congestion pricing, Part 1: A fast algorithm for the single-origin case. [Technical Report]. The Volpe National Transportation Systems Center, Kendall Square, Cambridge, MA 02142
  - 24 Xu Shaoji, Zhang Jianzhong. An inverse problem of the weighted shortest path problem. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 1995, 12: 47~59
  - 25 Hu Zhiqian, Liu Zhenhong. A strongly polynomial algorithm for the inverse shortest arborescence problem. *Discrete Applied Mathematics*, 1998, 82: 135~154
  - 26 Burton D, Pulleyblank B, Toint P. The inverse shortest problem with upper bounds on shortest path costs. *Lecture Notes in Economics and Mathematical System*, 1997, 450: 156~171
  - 27 王洪国, 马绍汉. 关于无向网络的容量扩充问题. *山东大学学报*, 2000, 35(4): 418~425
  - 28 王洪国, 马绍汉. 无向网络容量扩充的几个特例. *山东大学学报*, 2001, 36(1): 117~120
  - 29 王洪国, 马绍汉. 关于有向网络的容量扩充问题. *高校应用数学学报 A 辑*, 2001, 16(4): 471~480
  - 30 Zhu Yongjin, Liu Zhenhong. The shortest arborescence of a directed graph. *Sci. Sinica* 14, 1965. 1394~1400
  - 31 Megiddo N. Combinatorial optimization with rational objective functions. *Mathematics of Operations Research*, 1979, 4(4): 414~425
  - 32 Zhang Jianzhong, Liu Zhenhong, Ma Zhongfan. On the inverse problem of minimum spanning tree with partition constraints. *Mathematical Methods of Operations Research*, 1996, 44: 171~187
  - 33 Zhang Jianzhong, Xu Shaoji, Ma Zhongfan. An algorithm for inverse minimum spanning tree problem. *Optimization Methods and Software*, 1997, 8: 69~84
  - 34 Sokkalingam P T, Ahuja R K, Orlin J B. Solving inverse spanning tree problems through network flow techniques. *Operations Research*, 1999, 47(2): 291~298
  - 35 Ahuja R K, Orlin J B. A faster algorithm for the inverse spanning tree problem. *Journal of Algorithms*, 2000, 34(1): 177~193
  - 36 Zhang Jianzhong, Liu Zhenhong, Ma Zhongfan. The inverse fractional matching problem. *Journal of the Australian Mathematical Society, Series B. Applied Mathematics*, 1999, 40(4): 484~496
  - 37 Zhang Jianzhong, Liu Zhenhong. On inverse problem of maximum matching. (to appear in *Optimization*)
  - 38 Yang C, Zhong J, Ma Z. Inverse maximum flow and minimum cut problems. *optimization*. 1997, 40: 147~170
  - 39 Zhang J, Cai M C. Inverse problem of minimum cuts. *Mathematical Methods of Operations Research*, 1998, 47(1)
  - 40 杨锦, 谢政. 最大流问题的逆问题. *数学理论与应用*, 2000, 20(3): 45~49
  - 41 王洪国, 马绍汉. 对称的运输问题及其逆问题. *经济数学*, 1999, 16(4): 45~53
  - 42 Zhang Jianzhong, Liu Zhenhong, Ma Zhongfan. An algorithm for ratio cycle and its applications. (report)

(上接第 8 页)

在大网络中,我们采用  $18 \times 12$  的网格结构,网络中共有 216 个节点。同样,要对仿真平台上的生物实体和仿真器进行初始化配置。初始条件下,网络中能向用户提供 Web 页的 9 个生物实体分布在不同的节点上。然后,仿真器开始运行,随机地产生服务请求,网络中的节点上用户向其它生物实体发出使用 Web 页的服务请求,这些生物实体向较近的服务请求迁移,它们相互作用形成超级实体,向用户提供服务。在第 22425 仿真周期中中断仿真,此时整个网络中生存 28 个生物实体,死亡了 56 个生物实体。这是因为网络中用户请求较少时,生物实体不断在网络中迁移并且不提供服务,消耗了它自身的能量,以至于死亡。而当服务请求较多时,超级实体中的生物实体通过复制/再生行为提供相同的服务。根据网络中生物实体数量及迁移仿真可以看出,若用户请求增多,则生物实体迁移频繁;而当向用户提供服务后,网络中请求减少时,生物实体迁移减少。并且,我们也计算了等待时间、跳跃次数、获取和消耗的能量等性能指标,其结果也可说明生物实体在网络中相互作用形成超级实体,并实现服务突现。

另外,我们还进行了生物实体各种工作模式的组合,通过仿真实验验证了所构建的互联耦合免疫网络突现计算模型能满足服务请求者的需求,从而也验证了以上所设计的网络突现计算模型能反映生物网络的自扩充性、自适应性以及进化

能力等特点。

**结语** 本文基于互联耦合免疫网络学说构建和实现了生物网络结构中的一种网络突现服务模型。该模型可实现根据用户的请求,通过生物实体相互作用形成超级实体,或进一步形成超级实体网络,来自组织地提供服务。通过生物仿真平台上的 Web 信息检索实验验证了所构建的突现计算模型能满足服务请求者的需求。该模型具有通用性,可适合于其它大规模复杂环境下突现计算的应用领域。

生物网络中的许多特性能满足未来 Internet 网络的服务进化、自适应和安全等特性,进一步工作是继续研究其它生物网络计算模型,拓展这些模型的应用领域,并付之实际应用。

## 参考文献

- 1 丁永生, 任立红. 人工免疫系统: 理论与应用. 模式识别与人工智能, 2000, 13(1): 52~59
- 2 Jerne N K. Towards a network theory of the immune system. *Annual Immunology*, 1974, 125C: 373~389
- 3 林飞卿, 余传霖等编著. 医学基础免疫学. 上海: 上海医科大学出版社, 1995
- 4 丁永生, 任立红. 一种基于免疫突现计算的生物网络结构的设计. 控制与决策, 2002, 18(2)
- 5 任立红, 丁永生. 一种新颖的基于生态网络计算的生物网络仿真平台. 系统仿真学报, 2002, 14(11): 1497~1499, 1503