



中国计算机学会学术著作丛书

基于正常模型的 人工免疫系统及其应用

Artificial Immune System Based on
Normal Model and Its Applications

龚涛 蔡自兴 著

清华大学出版社



中国计算机学会学术著作丛书

基于正常模型的 人工免疫系统及其应用

Artificial Immune System Based on
Normal Model and Its Applications

龚涛 蔡自兴 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

免疫计算是受自然界的免疫系统灵感启发而来的,该技术可以应用于计算机系统和网络的安全、异常检测、故障诊断和智能控制等领域,其基本思想包括自体/异体检测与识别、未知异体的学习与记忆、自组织系统的自动修复、并行计算与负载平衡、测不准的微观环境与整体的鲁棒性能等。

本书重点介绍作者在基于正常模型的人工免疫系统方面的研究成果,特别是按照反向思维方式提出了免疫计算的测不准有限计算模型,研究了人工免疫系统的3层体系结构,分析了人工免疫系统的测不准特征、计算有限性和鲁棒性;提出了人工免疫系统的正常模型,所述正常模型建立在信息空间的时空确定性基础上,这种时空确定性是由物理世界的时空坐标系映射过来的;在正常模型的基础上设计了一系列的免疫算法,实现抗病毒和软件故障诊断的人工免疫系统原型。

本书可作为高等院校有关专业高年级学生和研究生的人工智能和人工免疫系统课程教材,可供从事人工智能、人工免疫系统研究与应用的科技工作者学习参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

基于正常模型的人工免疫系统及其应用/龚涛,蔡自兴著.--北京:清华大学出版社,2011.5

(中国计算机学会学术著作丛书)

ISBN 978-7-302-25108-8

I. ①基… II. ①龚… ②蔡… III. ①免疫学—应用—人工智能 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 048736 号

责任编辑:薛 慧

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:175×245 印 张:21.75 字 数:423 千字

版 次:2011 年 5 月第 1 版 印 次:2011 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:60.00 元

产品编号:030881-01

序

Preface



实际上人工智能研究作为一门科学的前沿和交叉学科,在过去几十年中已取得长足进展,在我国也已形成一股不小的热潮,使人工智能得到迅速传播与发展。20多年前,国务委员兼国家科委主任、中国科学院院士和中国工程院院士宋健教授曾题词“人智能则国智,科技强则国强”,很好地阐明了人工智能与提高民族素质、增强科技实力和建设现代化强国的辩证关系,也是对全国人工智能工作者的殷切期望。免疫计算从生物角度研究免疫系统的整体特性,使用计算机模拟免疫系统的各种功能,寻找解决科学和工程中实际问题的智能方法,是智能科学中一个新的研究领域。

生物系统中的自然信息处理系统可以分为4种类型,即脑神经系统、遗传系统、免疫系统和内分泌系统。自然免疫系统是一个复杂的自适应系统,能够有效地运用各种免疫机制防御外部病原体的入侵。通过进化学习,免疫系统对外部病原体和自身细胞进行辨识。自然免疫系统有许多研究课题,有不少理论和数学模型解释了免疫学现象,也有一些计算机模型仿真了免疫系统的成分。

免疫计算是模仿生物免疫学和基因进化机理,通过人工方式构造的一类优化搜索算法,是对生物免疫过程的一种数学仿真。免疫算法是免疫计算的一种最为重要的形式,分为

白箱模拟法和黑箱模拟法两种。免疫算法作为一种优化算法和仿生智能算法,在计算、网络、控制、学习等方面都有不少的应用实例,具有很大的应用潜力。

本书是龚涛副教授在我的指导下从事硕士、博士科学研究期间的成果总结,重点内容是基于正常模型的人工免疫系统。龚涛的硕士学位论文题目是《多维教育免疫真体的研究》,其内容主要是免疫计算技术在教育网络中的应用研究。其博士学位论文的题目是《免疫计算的建模与鲁棒性分析研究》,其内容主要是人工免疫系统的测不准有限计算3层模型和基于问题归约法的鲁棒性分析研究。本书的特点是从反向思考免疫系统的缺点,从正常模型突破人工免疫系统的高精度自体/异体检测和自适应学习问题,从理论到实际应用比较全面地介绍了免疫计算研究与开发的过程和方法。因此,我认为本书既有比较坚实的理论基础,又有较大的实用参考价值,将对免疫计算学科的发展作出它应有的贡献。

蔡自兴

2010年12月30日



前 言

Foreword



1997 年以来,国际上免疫计算研究作为人工智能学科的新分支,在过去 10 多年中已经取得较大的进展。在我国,目前已形成相关的专业委员会,使免疫计算得到迅速传播与发展。免疫计算是受自然界的免疫系统灵感启发而来,该技术可以应用于计算机系统和网络的安全、异常检测、故障诊断和智能控制等领域,其基本思想包括自体 and 异体的检测与识别、未知异体的学习与记忆、自组织系统的自动修复、并行计算与负载平衡、测不准的微观环境与整体的鲁棒性能等。

生物免疫系统是一个复杂、自适应和具有较高智能的系统,其组成结构的复杂性在组分数量上不亚于大脑的复杂性。因此,生物免疫系统的模型构建是一个复杂、艰巨、需要长期努力的过程,对人类和自然界都十分重要。对于人体来说,免疫系统担负着与神经系统几乎同等重要的责任,这一点对每个人都很重要;免疫系统也具有与神经系统几乎同等的复杂性,因此每个研究人员都不容忽视。在计算机与智能科学领域,人工免疫系统既有和人工智能类似的研究重要性,也有和人工智能类似的复杂性。不过目前,由于人工免疫系统相对而言仍是比较新兴的研究领域,人工免疫系统划定为人工智能的一个子集。

本书重点介绍我们在基于正常模型的人工免疫系统方面的研究成果,共分为 13 章。第 1 章定义了免疫计算的一些概念,总结了免疫算法研究的进展和两大瓶颈,并提出了突破这两大瓶颈的研究思路。第 2 章综述了免疫计算的起源,分析了自然计算的问题,提出了自然计算的广义映射模型,提出了免疫计算的自然计算模型。第 3 章提出了自然免疫系统的可视化免疫模型,构建了自然免疫系统的可视化仿真,提出了自然免疫系统的正常模型和自体/异体检测模型,分析了自然免疫系统的测不准特性和免疫响应极限。第 4 章提出了人工免疫组件的时空属性,定义了人工免疫系统的正常状态,提出了人工免疫系统的正常模型,用组件的时空属性唯一确定该人工免疫系统的正常状态,并在此基础上构建了该系统的自体存储器。第 5 章在正常模型的基础上,提出了免疫计算的 3 层测不准有限计算模型,人工免疫系统包括固有免疫计算层、适应性免疫计算层和并行免疫计算层,这种模型与自然免疫系统的可视化免疫模型相互对应,构成自然计算的映射关系。第 6 章在所述人工免疫系统的正常模型和自体/异体检测模型的基础上,提出了通过检测自体以检测异体的自体/异体检测算法、未知异体学习算法、异体消除算法和基于正常模型的受损系统自修复算法。第 7 章设计了用于抗蠕虫病毒的静态 Web 免疫系统的方案,并对其原型进行了应用测试。第 8 章提出并分析了免疫计算的测不准特性和计算有限性,人工免疫系统的测不准特性与计算有限性是由自然免疫系统的一些特性映射而来的。第 9 章提出了免疫控制的四元结构理论,将免疫控制看作人工免疫系统、智能控制论、智能决策系统和生物信息论的四元交集,提出了免疫控制系统的自然计算体系结构,分析了免疫控制的复杂性。第 10 章针对计算机病毒所引起的软件故障和移动机器人的软件故障,设计了用于软件故障检测与诊断的人工免疫系统,并进行了应用实验。第 11 章研究了人工免疫网络的结构化表示方法,提出了人工免疫网络的自适应调节与重构模型及其算法,并探究自重构免疫网络在多机器人控制、网络教育和抗灾等方面的应用方法。第 12 章研究了人工免疫系统与其他智能技术的集成方法。第 13 章总结了本书的创新成果,展望了进一步研究将要解决的问题。

本书可作为高等院校有关专业高年级学生和研究生的人工智能和人工免疫系统课程教材,也可供从事人工智能、人工免疫系统研究与应用的科技工作者学习参考。

本书是龚涛副教授在蔡自兴教授的亲自指导下从事 7 年学术研究的成果总结和升华,龚涛谨以此著作表达对蔡教授因材施教的感激之情。在这 7 年里,蔡教授将龚涛从一个学术起点为零的初学者培养为一个有思想、有项目的学者,让人不由想起中南大学信息学院门口大石头上“琢”字的寓意。蔡教授曾对龚涛说,“琢”字不仅象征着老师像雕琢玉器一样培养学生,而且启示我们

写论文、著书也要像雕刻玉器一样认真撰写、反复修改、精益求精。

此外,我们十分感谢国家自然科学基金委员会(60404021)、上海市自然科学基金会(08ZR1400400)、上海市教育发展基金会(2007CG42)给予的项目资助,感谢中南大学和东华大学提供的科研项目资助和支持,感谢清华大学出版社给予的专著出版资助。

本书由龚涛副教授执笔、蔡自兴教授指导并审阅。由于免疫计算是一十分年轻、难度较大的学科,且作者学术水平有限,编著时间较紧,所以书中难免存在不足之处,恳请读者不吝指教和帮助。对此,我们将深表感激。

龚涛 蔡自兴

2011年1月1日



目 录

Contents

第 1 章 免疫计算的概念	1
1.1 免疫计算问题的定义	1
1.1.1 人工免疫系统的定义	2
1.1.2 免疫算法的定义	3
1.2 免疫计算研究的进展	4
1.2.1 免疫算法的分析和比较	5
1.2.2 免疫计算模型的分析和比较	7
1.2.3 人工免疫网络的分析和比较	11
1.2.4 人工免疫系统设计的分析和比较	13
1.2.5 免疫计算的应用	15
1.2.6 免疫计算的瓶颈问题和未来研究 重点	16
1.3 人工免疫系统与人工智能的关系	17
1.3.1 人工免疫系统与模式识别的关系	17
1.3.2 人工免疫系统与神经网络的关系	18
1.3.3 人工免疫系统在计算智能学科中的 地位	18
1.4 本书的思路与结构	19
1.4.1 突破免疫计算研究瓶颈的思路	19
1.4.2 本书研究要点的章节安排	19

参考文献	21
第 2 章 人工免疫系统的自然计算模型	26
2.1 自然计算的起源.....	26
2.2 自然计算问题.....	28
2.3 自然计算的广义映射模型.....	32
2.4 人工免疫系统的自然计算模型.....	35
2.5 小结.....	36
参考文献	37
第 3 章 生物免疫系统的模型构建	39
3.1 生物免疫系统的经典模型.....	39
3.2 人类免疫系统的可视化免疫模型.....	41
3.2.1 人类免疫系统的 3 层可视化免疫模型	41
3.2.2 人类免疫系统的可视化仿真	44
3.3 生物免疫系统的正常模型和自体/异体检测模型	50
3.3.1 生物免疫系统正常模型的提出	51
3.3.2 基于生物免疫系统正常模型的自体/异体检测模型.....	53
3.4 人类免疫系统的测不准特性与免疫响应极限.....	55
3.5 小结.....	56
参考文献	56
第 4 章 人工免疫系统的正常模型	59
4.1 人工免疫组件的时空属性.....	59
4.1.1 实例免疫系统组件的时空属性	60
4.1.2 文件组件的时空属性	63
4.2 人工免疫系统的正常状态.....	65
4.3 人工免疫系统的正常模型.....	66
4.4 小结.....	68
参考文献	69
第 5 章 人工免疫系统的 3 层免疫计算模型	70
5.1 基于正常模型的免疫计算模型.....	70
5.1.1 免疫计算的 3 层测不准有限计算模型	70
5.1.2 基于正常模型的自体/异体检测模型.....	75

5.2	未知异体学习模型	77
5.3	基于正常模型的系统自修复模型	80
5.4	小结	81
	参考文献	81
第 6 章	基于正常模型的免疫算法设计	82
6.1	人工免疫系统的正常模型构建算子	82
6.1.1	人工免疫静态系统的正常模型构建算子	83
6.1.2	人工免疫动态系统的正常模型构建算子	85
6.2	人工免疫系统的自体/异体检测算子	87
6.2.1	基于正常模型的自体/异体检测算子	87
6.2.2	自体/异体检测算子的实际应用例子	91
6.3	人工免疫系统的异体识别算子	92
6.3.1	已知异体识别算子	92
6.3.2	未知异体识别算子	96
6.4	人工免疫系统的异体消除算子和系统自修复算子	101
6.4.1	人工免疫系统的异体消除算子	101
6.4.2	基于正常模型的系统自修复算子	103
6.5	人工免疫系统的并行免疫计算	106
6.5.1	人工免疫系统的并行免疫计算框架	106
6.5.2	并行免疫计算的复杂度定理	109
6.6	小结	111
	参考文献	111
第 7 章	抗蠕虫病毒的静态 Web 免疫系统原型设计	113
7.1	Web 系统抗蠕虫病毒与免疫计算的需求分析	113
7.1.1	蠕虫病毒对 Web 系统的危害	114
7.1.2	Web 系统中抗蠕虫病毒技术的国内外研究现状	116
7.2	抗蠕虫病毒 Web 系统的正常模型构建	116
7.2.1	抗蠕虫病毒 Web 系统的形式化表示和正常模型构建	117
7.2.2	Web 系统正常模型的特性及其理论证明	118
7.3	抗蠕虫病毒 Web 免疫系统的原型设计	119
7.3.1	抗蠕虫病毒 Web 系统的免疫计算 3 层模型	120
7.3.2	Web 系统自体数据库和蠕虫病毒异体数据库的设计	125
7.3.3	基于正常模型的自体/异体检测	129

7.3.4	基于 BP 神经网络的未知蠕虫病毒识别	141
7.3.5	基于正常模型与免疫计算的 Web 系统自修复	159
7.4	抗蠕虫病毒 Web 免疫系统的实际应用测试	161
7.5	小结	184
	参考文献	185
第 8 章	免疫计算的测不准性、计算有限性和鲁棒性分析	187
8.1	免疫计算的测不准特性分析	188
8.2	人工免疫系统的计算有限性与并行计算	190
8.3	免疫计算的鲁棒性分析	191
8.3.1	人工免疫系统鲁棒性的定义	191
8.3.2	理想分布式人工免疫系统的鲁棒性归约定理	193
8.3.3	实际人工免疫系统的鲁棒相关性	194
8.4	小结	197
	参考文献	197
第 9 章	免疫控制的结构理论与自然计算体系结构	199
9.1	免疫控制的四元结构理论	199
9.2	免疫控制系统的自然计算体系结构	201
9.3	小结	202
	参考文献	202
第 10 章	基于正常模型和免疫计算的软件故障检测与诊断	204
10.1	免疫计算新模型在病毒故障诊断中的应用	204
10.1.1	病毒故障诊断的免疫算法	205
10.1.2	病毒故障诊断的免疫系统及其应用测试	206
10.2	免疫计算新模型在移动机器人软件故障诊断中的应用	210
10.2.1	移动机器人软件系统的正常模型	210
10.2.2	未知环境中移动机器人软件故障诊断的正常模型 构建算法设计	212
10.2.3	移动机器人软件故障诊断的故障检测算法和异物 消除算法设计	217
10.2.4	未知环境中移动机器人的已知软件故障诊断算法 设计	227
10.2.5	未知环境中移动机器人软件系统的未知故障诊断 算法设计	239

10.2.6	未知环境中移动机器人软件系统的故障修复算法设计	252
10.2.7	未知环境中移动机器人软件故障诊断系统的界面设计	269
10.2.8	机器人 Amigo 的软件故障诊断实验	270
10.2.9	中南大学移动机器人 1 号的软件故障诊断实验	273
10.3	小结	276
	参考文献	277
第 11 章	免疫网络的自适应调节与重构	278
11.1	免疫网络的结构化表示	278
11.2	免疫网络的自适应调节与重构	279
11.2.1	人工免疫网络的自适应调节与重构模型	280
11.2.2	人工免疫网络的自适应重构应用	281
11.3	免疫网络在网络教育平台上的应用	282
11.3.1	多维教育免疫网络的建模	282
11.3.2	多维教育免疫真体	290
11.3.3	多维教育免疫网络的原型设计	297
11.4	抗灾免疫网络的建模与设计	313
11.4.1	抗灾免疫网络的应用背景	315
11.4.2	免疫网络软件系统的正常模型	316
11.4.3	免疫网络的抗灾功能设计	318
11.5	小结	322
	参考文献	322
第 12 章	免疫计算与其他智能技术的集成研究	327
12.1	免疫计算与进化计算的集成	327
12.2	免疫计算与神经计算的集成	329
12.3	小结	330
	参考文献	330
第 13 章	结论与展望	331
13.1	几点总结	331
13.2	展望	332
	参考文献	334

免疫计算(immune computation)是受自然界的免疫系统灵感启发而来,该技术可以应用于计算机系统和网络的安全、异常检测、故障诊断和智能控制等领域,其基本思想包括自体(self)/异体(nonsel)检测与识别、未知异体的学习与记忆、自组织系统的自动修复、并行计算与负载平衡、测不准的微观环境与整体的鲁棒性能等。

本章主要介绍免疫计算问题的定义和研究进展,本书的免疫计算研究是在自然计算(natural computation)研究的框架下进行的。免疫计算是由自然免疫系统映射的自然计算特例,免疫计算是与自然计算密切相关的新兴计算分支之一,免疫算法(immune algorithm)属于免疫计算的研究范畴。

1.1 免疫计算问题的定义

早期的人工免疫系统(artificial immune system, AIS)起源于生物医学家将免疫学理论向工程领域的拓展,人们尝试着用模拟免疫学理论或现象的计算机算法和系统求解计算机、控制领域的难点问题,例如参数优化、优化控制、异常检测、故障诊断、抗病毒、网络安全等。尽管人类免疫系统很复杂,甚至有的免疫学家都承认对该系统知之甚少,但免疫系统的至关重要作用和卓越性能吸引了越来越多的生物学家、医学家、数学家以及计算机学家、工程师等,免疫计算成为越来越

越被公认的新兴计算发展方向之一^[1]。

1.1.1 人工免疫系统的定义

生物免疫系统(biological immune system)是生物体保护自身的防御性结构,主要由淋巴器官、其他器官内的淋巴组织和全身各处的淋巴细胞、抗原呈递细胞等组成;广义上也包括血液中其他白细胞及结缔组织中的浆细胞和肥大细胞。构成生物免疫系统的核心成分是淋巴细胞,它使生物免疫系统具备识别能力和记忆能力。淋巴细胞经血液和淋巴周游全身,从一处的淋巴器官或淋巴组织至另一处的淋巴器官或淋巴组织,使分散各处的淋巴器官和淋巴组织连成一个功能整体。生物免疫系统是生物在长期进化过程中与各种致病因子的不断斗争中逐渐发展而成的,在个体发育中也需抗原的刺激才能发育完善。

生物免疫系统是生物体执行免疫功能的器官、组织、细胞和分子的总称。器官包括胸腺、法氏囊或囊类同器官、淋巴结、脾脏、扁桃体;组织指机体内(特别是消化道、呼吸道黏膜内)存在的许多无被膜的淋巴组织;细胞主要指淋巴细胞、单核吞噬细胞、粒细胞;分子主要指免疫球蛋白、补体、淋巴因子以及特异性和非特异性辅助因子、抑制因子等参与生物体免疫应答的物质,免疫球蛋白包括抗体(antibody)。生物免疫系统各组分功能的正常是维持生物体免疫功能相对稳定的保证,任何组分的缺陷或功能的亢进都会给生物体带来损害。

生物免疫系统各组分广布全身,错综复杂,特别是免疫细胞(immune cell)和免疫分子(immune molecule)在生物体内不断地产生、循环和更新。生物免疫系统具有高度的辨别力,能够精确识别自体 and 异体物质,以维持生物体的相对稳定性;同时还能接受、传递、扩大、储存和记忆有关免疫的信息,针对免疫信息发生正、负应答并不断调整其应答性。因此,生物免疫系统在功能上与生物神经系统(biological neural system)和内分泌系统(endocrine system)有许多相似之处。然而,免疫系统功能的失调会对人体极为不利:人体的免疫响应过强容易导致过敏现象的发生(如食用某种食物、注射药物出现过敏反应,甚至导致休克),反之则会引起反复感染;人体的自我稳定能力异常,会使人类免疫系统(human immune system)对自身的细胞作出反应,引发自身免疫疾病,诸如风湿性关节炎、风湿性心脏病等;人体的免疫监视的功能降低,则如同失去了一位“警卫员”,使肿瘤有了可乘之机。由此可见,人类免疫系统对人类的健康起着举足轻重的作用,如果它的功能不稳定,人类很有可能会被病毒、细菌这些病原体所侵害和折磨。

人工免疫系统是对生物免疫系统的模拟,目前,人工免疫系统还没有一个统一的定义。从算法的角度看,人工免疫系统是由免疫学理论和观察到的免疫功能、原理和模型启发而生成的适应性系统,可以通过免疫算法进行人工免疫系统的计算和控制^[2]。Dasgupta认为,人工免疫系统由生物免疫系统启发而来的智能策略组

成,主要用于信息处理和问题求解^[3]。Timmis认为,人工免疫系统是一种由理论生物学启发而来的计算范式,它借鉴了一些免疫系统的功能、原理和模型,并用于复杂问题的求解^[4]。

免疫系统的正常状态十分重要,有必要对免疫系统的正常状态建立系统正常模(normal model)。为了便于从系统正常模型、自体/异体检测与识别等角度研究免疫计算,下面给出人工免疫系统的定义,也给出自体和异体的定义。

定义 1.1 人工免疫系统是受生物免疫系统的免疫现象和生物医学理论启发而设计的计算机系统,该系统由一些人工免疫组件及其免疫算子构成,用以模拟生物免疫系统的自体构建、异体检测与识别、未知异体学习与记忆、异体消除和系统修复等功能,可用于优化计算(optimized computation)、信息安全(information security)、智能网络(intelligent network)、故障诊断(fault diagnosis)、智能机器人(intelligent robot)等领域。

根据定义 1.1,人工免疫系统是一种计算机系统,包括计算机硬件和软件。一般来说,构成软件的基本存储组件是文件,一个软件可能是由许多文件组成的系统。本书以基于文件的人工免疫系统(file-based artificial immune system)作为应用研究的主要对象,从基于文件的人工免疫系统的建模寻找其免疫计算研究瓶颈的突破口。免疫算子(immune operator)是用来对人工免疫组件进行操作的计算步骤,免疫算子会改变人工免疫组件的状态。

定义 1.2 人工免疫系统的自体是所述人工免疫系统中正常的组件,所述组件的正常状态是指该组件对于合理的输入能够产生合理预定范围的输出时所处的组件状态。人工免疫系统的异体是所述人工免疫系统中发生异常的组件和外来入侵的对象,所述组件的异常状态是指该组件对给定合理的输入产生超出合理预定范围的输出时所处的组件状态。

1.1.2 免疫算法的定义

免疫响应是生物体的特异性生理反应,生物免疫系统由具有免疫功能的器官、组织、细胞、免疫效应分子及基因等组成^[5]。根据 Burnet 的细胞克隆选择学说和 Jerne 的免疫网络学说,生物体内先天具有针对不同抗原特性的多样性 B 细胞克隆,抗原侵入机体后,在 T 细胞的识别和控制下,选择并刺激相应的 B 细胞,使之活化和增殖,并产生特异性抗体结合抗原;同时,抗原与抗体、抗体与抗体之间的刺激和抑制关系形成的网络调节结构维持着免疫平衡^[6]。随着理论免疫学的发展,相继提出了几种免疫网络学说,如 Jerne 提出了独特型网络,以描述抗体之间、抗体与抗原之间的相互作用^[7]; Ishiguro 等人提出一种互相耦合免疫网络模型^[8]; Tang 等人提出一种与免疫系统中 B 细胞与 T 细胞之间相互反应相似的多值免疫网络模型^[9]; Herzenberg 等人提出一种更适合于分布式问题的松耦合网络

结构^[10]。基于这些自然免疫学说,可以创建一些算法来模拟免疫机制,例如 De Castro 和 von Zuben 根据克隆选择原理进行人工机器的学习和优化研究^[11]。

目前,对免疫算法以及有关问题还没有明确而统一的定义,王磊、焦李成等人将免疫概念及理论应用于遗传算法(genetic algorithm),在保留原算法优点的前提下,试图有选择、有目的地利用待解问题中的一些特征信息或知识来抑制其优化过程中出现的退化现象,这种算法称为免疫算法^[12]。为了便于从系统正常模型构建、自体/异体检测、异体识别与消除等角度研究人工免疫系统的算法,下面给出免疫算法的定义。

定义 1.3 免疫算法是模拟生物免疫学和基因进化机理,人工构造的免疫操作集合,是免疫计算的重要形式之一。

定义 1.4 抗原(antigen)是人工免疫系统中待检测的组件,抗原可能是自体受其他异体感染而产生的。

定义 1.5 自体数据库(self database)是人工免疫系统中的自体特征库,用以存储所有自体的特征信息。异体数据库(nonsel self database)是人工免疫系统中的异体特征库,用以存储所有已知异体的特征信息。

免疫算法的关键功能在于人工免疫系统对其受害部分的屏蔽、保护和学习控制。设计免疫算法有两种思路^[1]:一是白箱模拟法(white-box simulation method),用人工免疫系统的结构模拟自然免疫系统的结构,用类似于自然免疫机理的流程设计免疫算法,包括对外界侵害的检测、人工抗体的产生、人工抗体的复制、人工抗体的变异和交叉等;二是黑箱模拟法(black-box simulation method),不考虑人工免疫系统的结构是否与自然免疫系统的结构相似,而着重考察两个系统在相似的外界有害病毒侵入时,其输出是否相同或类似,侧重于对免疫算法的数据分析,而不是流程上的直接模拟^[13]。因为免疫机制与进化机制有关,所以免疫算法往往利用进化计算来进行优化求解^[11]。

1.2 免疫计算研究的进展

人工免疫系统是由免疫学理论和观察到的生物免疫功能、原理和模型启发而生成的适应性系统,这方面的研究最初从 20 世纪 80 年代中期的免疫学研究发展而来。1990 年, Bersini 等人首次使用免疫算法来解决问题^[14]。1994 年, Forrest 等人开始将人工免疫系统应用于计算机安全领域^[15]。1995 年, Cooke 和 Hunt 开始将免疫计算应用于机器学习(machine learning)领域^[16]。近年来,越来越多的研究者投身于免疫计算的研究,生物免疫系统强大的信息处理能力对计算技术的研究有很多重要的启发。一些研究者基于遗传算法提出了一些模仿生物机理的免疫算法^[17];人工免疫系统的应用问题也得到了研究^[18];还有一些学者研究了控制