



智能科学技术著作丛书



人工免疫系统

莫宏伟 左兴权 著



科学出版社

www.sciencep.com

TP18
463
1-

国家科学技术学术著作出版基金资助出版
智能科学技术著作丛书

人工免疫系统

莫宏伟 左兴权 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者在人工免疫系统领域研究的基础上,结合目前人工免疫系统的发展现状总结而成的。书中对人工免疫系统给出了新的定义,对人工免疫系统研究内容重新进行了系统划分,包括面向医学和面向工程的人工免疫系统两大方面。全书分四个部分,第一部分突出免疫系统本身的重要机制,给出了免疫系统智能性的完整论述;第二部分着重研究免疫系统建模与仿真方法;第三部分着重研究人工免疫系统在优化、调度、机器学习、智能主体、自动控制、人工免疫系统硬件与人工免疫系统软件等方面的应用,每部分均有作者的研究成果或提出的新思想;最后一部分探讨了人工免疫系统研究框架,以及进一步研究的方向和面临的问题。

本书可以为计算机科学、信息科学、智能科学、人工智能和自动化技术、计算免疫学等领域从事人工免疫系统研究的相关专业技术人员提供参考,也可以作为相关专业研究生和高年级本科生教材。

图书在版编目(CIP)数据

人工免疫系统 / 莫宏伟,左兴权著. —北京:科学出版社,2009

(智能科学技术著作丛书)

ISBN 978-7-03-023522-0

I. 人… II. ①莫… ②左… III. 免疫学-应用-人工智能

IV. TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 186581 号

责任编辑:余 丁 魏英杰/ 责任校对:张怡君

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年1月第一次印刷 印张:39 1/2

印数:1—3 000 字数:790 000

定价:100.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

《智能科学技术著作丛书》编委会

名誉主编：吴文俊

主 编：涂序彦

副 主 编：钟义信 史忠植 何华灿 蔡自兴 孙增圻 童安齐 谭 民

秘 书 长：韩力群

编 委：（按姓氏汉语拼音排序）

蔡庆生（中国科技大学）

蔡自兴（中南大学）

杜军平（北京工商大学）

韩力群（北京工商大学）

何华灿（西北工业大学）

何 清（中国科学院计算技术研究所）

黄河燕（中国科学院计算语言研究所）

黄心汉（华中科技大学）

焦李成（西安电子科技大学）

李祖枢（重庆大学）

刘 宏（北京大学）

刘 清（南昌大学）

秦世引（北京航空航天大学）

邱玉辉（西南师范大学）

阮秋琦（北京交通大学）

史忠植（中国科学院计算技术研究所）

孙增圻（清华大学）

谭 民（中国科学院自动化研究所）

童安齐（科学出版社）

涂序彦（北京科技大学）

王国胤（重庆邮电学院）

王家钦（清华大学）

王万森（首都师范大学）

吴文俊（中国科学院系统科学研究所）

杨义先（北京邮电大学）

尹怡欣（北京科技大学）

于洪珍（中国矿业大学）

张琴珠（华东师范大学）

钟义信（北京邮电大学）

庄越挺（浙江大学）

《智能科学技术著作丛书》序

智能是信息的精彩结晶,智能科学技术是信息科学技术的辉煌篇章,智能化是信息化发展的新动向、新阶段。

智能科学技术(intelligence science and technology, IST)是关于广义智能的理论方法和应用技术的综合性科学技术领域,其研究对象包括:

自然智能(natural intelligence, NI),包括:人的智能(human intelligence, HI)及其他生物智能(biological intelligence, BI)。

人工智能(artificial intelligence, AI),包括:机器智能(machine intelligence, MI)与智能机器(intelligent machine, IM)。

集成智能(integrated intelligence, II),即:人的智能与机器智能人机互补的集成智能。

协同智能(cooperative intelligence, CI),指:个体智能相互协调共生的群体协同智能。

分布智能(distributed intelligence, DI),如:广域信息网,分散大系统的分布式智能。

1956年,人工智能学科诞生,50年来,在起伏、曲折的科学征途上不断前进、发展,从狭义人工智能走向广义人工智能,从个体人工智能到群体人工智能,从集中式人工智能到分布式人工智能,在理论方法研究和应用技术开发方面都取得了重大进展。如果说,当年人工智能学科的诞生是生物科学技术与信息科学技术、系统科学技术的一次成功的结合,那么可以认为现在智能科学技术领域的兴起是在信息化、网络化时代又一次新的多学科交融。

1981年,中国人工智能学会(Chinese Association for Artificial Intelligence, CAAI)正式成立,25年来,从艰苦创业到成长壮大,从学习跟踪到自主研发,团结我国广大学者,在人工智能的研究开发及应用方面取得了显著的进展,促进了智能科学技术的发展。在华夏文化与东方哲学影响下,我国智能科学技术的研究、开发及应用,在学术思想与科学方法上,具有综合性、整体性、协调性的特色,在理论方法研究与应用技术开发方面,取得了具有创新性、开拓性的成果。智能化已成为当前新技术、新产品的发展方向和显著标志。

为了适时总结、交流、宣传我国学者在智能科学技术领域的研究开发及应用成果,中国人工智能学会与科学出版社合作编辑出版《智能科学技术著作丛书》。需要强调的是,这套丛书将优先出版那些有助于将科学技术转化为生产力以及对社会和国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信,有广大智能科学技术工作者的积极参与和大力支持,以及编委们的

共同努力,《智能科学技术著作丛书》将为繁荣我国智能科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

祝《智能科学技术著作丛书》出版,特赋贺诗一首:

智能科技领域广
人机集成智能强
群体智能协同好
智能创新更辉煌



中国人工智能学会荣誉理事长
2005年12月18日

本书序

众所周知,人类是整个大自然进化的最高级产物,在人类进化的漫长过程中形成了许多卓越超群的能力,因此被称为万物之灵。科学技术发展的一条重要的思路就是努力去模拟人类的这些卓越能力。特别是面临越来越复杂的问题和环境的时代,模拟人类的卓越能力就越来越成为科学技术发展的重要方向和出路。由此,便产生了一大批人工学科;模拟人的生命能力的,称为人工生命;模拟人的智慧能力的,称为人工智能;模拟人的意识能力的,称为人工意识;模拟人的情感能力的,称为人工情感;而模拟人的免疫能力的,就称为人工免疫,如此等等。

免疫,是在复杂环境条件下保障人体健康安全的一套行之有效的机制和系统。这样的机制系统对于人工信息系统的安全保障显然具有重要的借鉴意义。可见,人工免疫的研究不仅具有重要的理论价值,而且具有广阔的应用前景(事实上,基于免疫机制的信息网络安全和计算机系统安全的技术已经得到了实际的应用)。因此,近年来已经在国内外学术界引起越来越广泛的关注。

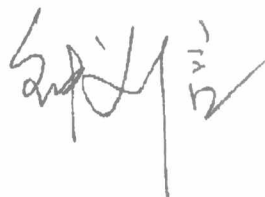
目前,国内外已经陆续出版了一批人工免疫的著作,不过它们往往偏重于人工免疫系统的某一方面研究(如免疫计算智能等,突出了人工免疫系统在优化领域的应用),而未能反映出人工免疫研究的全貌以及人工免疫系统的广泛应用。

本书的两位作者均是国内较早从事人工免疫系统的研究人员,获得多项国家级、省级基金项目的资助,对人工免疫系统的研究现状有着清楚地了解。通过自己的研究和理解,他们将理论免疫学、计算免疫学及人工免疫系统整合起来,系统详细地阐述了人工免疫系统的起源、概念、方法和体系,介绍了自己最新的研究成果,同时也介绍了其他研究人员有代表性的研究成果,广泛探讨了人工免疫系统在各个领域中的应用,为各领域问题的解决提供了新颖的思路。

本书在内容上的特色在于:不是单纯地介绍一些人工免疫的系统,而是从整体上阐述了计算免疫学、理论免疫学与人工免疫系统的关系,反映了人工免疫研究的学科交叉特色。书中还对人工免疫系统的相关理论模型进行了归纳和整理,对一些人工免疫系统的硬件实现方法和应用做了详细的介绍。本书在写作上的特点在于内容全面、体系清晰、结构严谨、阐述细致,适合从事该领域工作的人员研究和参考。

鉴于人工免疫、人工智能、人工生命等领域的研究正在快速发展,而且互相交叉、互相促进,对现代科学技术的发展将产生越来越重要的影响,我愿推荐本书作

为我国各高等院校、科研院所从事计算机科学、人工智能、智能科学与技术、智能系统、机器学习、模式识别、自然计算、生物计算、计算生物学等领域研究人员的学习资料,同时也可以作为博士和硕士研究生的教科书和参考书。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '钟山' (Zhong Shan), written in a cursive style.

前 言

人工免疫系统作为一个相对年轻的研究领域在最近五年空前活跃。在国内外众多研究人员的努力下,它已经成为计算机科学中的一个重要分支。目前,国际上涉及人工免疫系统研究的著名期刊、国际会议已经非常多,比如 IEEE 和 MIT 的 *Evolutionary Computation* 及 GECCO、CEC、WCCI、ICARIS 等。国内外关于人工免疫系统的专著也越来越多,这些都表明人工免疫系统是一个逐渐走向成熟的领域。

当然,我们也应看到该领域研究中面临的一些问题,比如缺乏系统性、理论性,而经验性、实验性的研究比较占优势,但应该指出,这是任何类似的领域发展初期都面临的共性问题。比如人工神经网络、遗传算法等都有这样的发展阶段,遗传算法至今也是以经验和实验研究为主流的。所以,正确看待人工免疫系统面临的问题,才能促使研究人员更加理性、有目的地开展研究。

最近三年,国内的人工免疫系统的研究空前繁荣,涌现出许多研究团队和丰硕的成果,在国际上已经具有相当的影响,出版了一批专著,也发表了大量文章。在这样一个良好的研究氛围中,笔者结合自己近几年的研究,希望将该领域国内外的成果进一步总结,尝试建立一些基本的概念、方法和体系并融合免疫学、生物医学等领域的前沿理论、思想和技术,目的是抛砖引玉,在国内宣传人工免疫系统,因为迄今为止还有许多专家、学者对其不甚了解。也有许多初学者迫切需要全面了解这个领域,以便找到适当的切入点开展研究。

人工免疫系统的产生实际上是专业里一个很时髦的词汇“涌现”的结果。它与几十年来人工智能、人工生命等领域的发展是分不开的,正是前面有了人工神经网络、进化计算、模糊系统等这些受生物启发的计算思想和方法,才有了受免疫系统启发的人工免疫系统。所以这里特别要感谢的是这些领域里最先提出这些思想的前驱,他们的灵感与顿悟甚至是奇思妙想永远值得后来者回味。这些不同的分支,连同膜计算、蚁群算法、粒子群计算、DNA 计算等后“涌现”的计算思想和方法,构成了自然计算这一独特的研究领域。

所以将人工免疫系统放到自然计算这一背景下,它的产生和发展就有其必然性。人工免疫系统存在和发展的另一个重要因素是应用需求及问题求解方法的需求。迄今,人工免疫系统在计算机安全、优化、故障诊断、数据挖掘甚至新的计算思

想和实现方面都得到运用和发挥,甚至其基本思想和原理已经渗透到社会学、经济学、农业等领域。像遗传算法一样,实际应用是它存在的理由,实践出真知。它不是试图取代其他自然计算方法的方法,而是有益地补充以及新的计算思想的实践。既然大自然给人们提供了丰富的启发源,人们当然有理由充分利用这些启发源的优势,扬长避短。

由于人工免疫系统的很多方面还处于发展中,很难得出确定的结论,所以在每章最好只有讨论,没有结论;只有更多的问题的起点,没有终点,也就是还有许多问题需要深入分析和解决。

本书作者的研究成果得到国家自然科学基金(60305007、60504028)、中国博士后科学基金(023209022)、黑龙江省归国留学人员基金(LC05C03)、黑龙江省自然科学基金(F0310)、黑龙江省博士后科研基金、黑龙江省科技攻关项目(GC06A118)、哈尔滨市青年科技创新人才资金(2007RFQXS033)的资助,对免疫系统在机器学习、优化、调度、异常检测、建模与仿真等几个重要方面进行了较深入地研究,并结合当前人工免疫系统研究现状和存在的问题,提出医学和生物学、计算机科学、生物医学等多学科合作开展人工免疫系统研究的新观点,讨论了关于免疫信息学、免疫栅格、免疫认知与免疫智能、免疫系统计算、免疫计算等一系列新观点、新概念,并进行了系统地论述,许多概念、思想和体系是此前出版的国内外专著和文献所没有提及和注意的,这也是本书的一大特色。

本书共分四大部分二十章,主要内容包括免疫系统智能性、免疫信息学、免疫算法、免疫优化、免疫调度、免疫控制、免疫机器学习、免疫异常检测、免疫主体、免疫硬件、免疫软件、免疫系统计算(免疫湿件)等问题,既有前沿性理论探讨,也有详细的具体问题解决方法和分析。

书中有关内容直接引用、参考了国内外许多文献,首先向所有被引用文献的作者表示感谢。感谢山东农业大学岳训教授,西安电子科技大学焦李成教授、公茂果博士,武汉大学梁意文教授等,贵州大学张著洪教授,中国科技大学罗文坚博士,东华大学丁永生教授,四川大学李涛教授,中南大学蔡自兴教授、龚涛博士等国内外专家、学者的支持和理解。感谢本书第一作者领导及导师王科俊教授的支持和鼓励,感谢哈尔滨工程大学孙尧教授、毕晓君教授多年来对作者的支持和鼓励。

感谢中国人工智能学会理事长、北京邮电大学钟义信教授及中国科学院计算所史忠植研究员、中国科学院半导体研究所王守觉院士多年来的鼓励和支持。

感谢作者的父母、家人对作者工作的大力支持。

本书适合从事人工免疫系统、人工智能、自然计算、计算智能以及与计算机科

学相关专业的研究人员阅读和参考。其中的许多思想也可以解决其他领域的问题,比如社会学、经济学等领域,也可作为相关专业学生的教科书。

本书作者理论功底及水平有限,不妥之处,在所难免,请各位同行和专家批评指正。

莫宏伟 左兴权

2008年1月

于哈尔滨工程大学、北京邮电大学

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

本书序

前言

第一部分 人工免疫系统与人类免疫系统

第一章 绪论	3
1.1 自然计算	3
1.2 人类免疫系统与免疫学	5
1.2.1 人类免疫系统	5
1.2.2 免疫学	6
1.3 人工免疫系统	8
1.3.1 定义	8
1.3.2 免疫系统与人工免疫系统	9
1.3.3 人工免疫系统发展历史及研究现状	12
1.3.4 研究内容	14
1.4 本书的目的和主要内容	21
参考文献	23
第二章 人类免疫系统	28
2.1 概述	28
2.2 组成	28
2.2.1 细胞因子	28
2.2.2 淋巴细胞	29
2.2.3 抗原	33
2.2.4 抗体	34
2.2.5 抗体-抗原相互作用的度量	36
2.2.6 MHC 复合体	37
2.2.7 淋巴系统	38
2.2.8 补体系统	38
2.3 结构	39
2.3.1 多层免疫系统	39
2.3.2 固有免疫系统	40

2.3.3	自适应免疫系统	40
2.4	功能	41
2.4.1	主要功能	41
2.4.2	自己与非己区分	41
2.4.3	免疫应答	42
2.4.4	免疫调节	45
2.4.5	免疫耐受	46
2.4.6	免疫自稳	47
2.5	特性	48
2.5.1	循环机制	48
2.5.2	亚动力学	48
2.5.3	免疫反馈	49
2.5.4	分布性	50
2.5.5	适应性	50
2.5.6	鲁棒性	51
2.5.7	进化	52
2.6	免疫系统如何保护人体	53
2.6.1	免疫系统功能的实现	53
2.6.2	免疫系统对不同病原体的应答	54
2.7	免疫系统与神经系统、内分泌系统	56
2.7.1	神经系统和免疫系统、内分泌系统的相互作用	56
2.7.2	神经系统与免疫系统比较	57
2.8	理论	59
2.8.1	克隆选择	59
2.8.2	免疫独特型网络理论	60
2.8.3	危险理论	64
2.8.4	Cohen 免疫模型	66
2.9	免疫系统——复杂自适应系统	68
2.9.1	复杂自适应系统的特征	69
2.9.2	免疫系统作为复杂自适应系统	69
2.9.3	复杂巨系统	72
2.10	自组织与混沌	72
2.11	涌现	73
2.12	免疫学新进展	73
	参考文献	74

第三章 免疫系统智能性	77
3.1 免疫系统认知	77
3.1.1 免疫认知	77
3.1.2 语言隐喻	78
3.1.3 免疫认知的意义	79
3.1.4 机制主义模型	79
3.2 免疫系统模式识别	85
3.2.1 免疫模式识别	85
3.2.2 免疫模式识别原理	86
3.3 免疫系统学习与记忆	87
3.3.1 免疫学习思想	87
3.3.2 免疫系统学习与记忆	88
3.3.3 免疫记忆理论	89
3.4 免疫系统智能模型	90
3.5 免疫智能与计算机系统	91
参考文献	92
第四章 免疫信息处理与免疫信息学	94
4.1 概述	94
4.2 信息论与生物学	94
4.3 免疫系统信息处理	95
4.3.1 免疫信息处理本质	95
4.3.2 免疫系统信息处理模式	96
4.3.3 新信息的产生	96
4.3.4 免疫多样性的随机产生	97
4.3.5 意义的产生	98
4.3.6 克隆选择的意义	98
4.3.7 危险与目的论	99
4.4 神经、内分泌、免疫系统间的相互信息交流和调节	99
4.4.1 免疫系统与其他系统的相互信息交流	99
4.4.2 免疫信息活动层次	101
4.4.3 免疫突触与免疫信息网络	102
4.5 免疫信息学	105
4.5.1 概念与起源	105
4.5.2 实验基础与理论基础	106
4.6 免疫信息学与人工免疫系统	107

参考文献..... 108

第二部分 面向医学的人工免疫系统

第五章 面向医学的免疫系统建模..... 111
5.1 概述 111
5.2 免疫系统建模与仿真方法 112
5.2.1 数学模型与计算模型 112
5.2.2 形态空间 115
5.2.3 字符串模型 125
5.2.4 细胞自动机模型 128
5.2.5 Petri 网模型 130
5.2.6 基于主体的模型 134
5.2.7 多尺度建模方法 137
5.3 模型要求 141
5.3.1 基本特征 141
5.3.2 免疫系统模拟方法 142
5.3.3 分析 143
5.4 本章小结 144
参考文献..... 144

第六章 面向医学的免疫系统仿真..... 147
6.1 概述 147
6.2 免疫系统仿真 148
6.2.1 免疫系统仿真器 148
6.2.2 改进 CS 模型 160
6.2.3 SIMMUNE 模型 169
6.2.4 群智能模型 172
6.2.5 自下而上方法 174
6.3 讨论 179
参考文献..... 180

第三部分 面向工程的人工免疫系统

第七章 免疫混合算法..... 185
7.1 概述 185
7.1.1 免疫算法的基本类型 185
7.1.2 免疫算法设计 186
7.2 一般免疫算法 187

7.2.1	一般免疫算法描述	187
7.2.2	信息熵免疫算法	189
7.2.3	矢量矩免疫算法	196
7.3	免疫遗传算法	198
7.3.1	概述	198
7.3.2	装箱问题免疫遗传算法	200
7.3.3	免疫记忆遗传算法	200
7.3.4	免疫疫苗算法	202
7.4	免疫策略进化算法	204
7.4.1	概述	204
7.4.2	算法描述	204
7.4.3	算法讨论	206
7.5	免疫规划算法	206
7.5.1	概述	206
7.5.2	多模式搜索遗传规划	206
7.6	免疫粒子群算法	208
7.6.1	概述	208
7.6.2	免疫记忆粒子群优化算法	209
7.6.3	基于疫苗接种的免疫粒子群优化算法	210
7.7	免疫蚁群算法	211
7.7.1	蚁群算法的基本原理	211
7.7.2	蚁群算法和免疫算法的融合	212
7.8	混沌免疫算法	214
7.8.1	概述	214
7.8.2	混沌免疫算法	214
7.9	混沌免疫遗传模糊算法	217
7.9.1	CIGAFS 的计算策略	217
7.9.2	CIGAFS 的基本特征	220
7.10	讨论	221
	参考文献	221
第八章	人工免疫网络	225
8.1	概述	225
8.2	人工免疫网络模型的基本框架	226
8.3	电路模拟人工免疫网络模型	227
8.3.1	模型描述	227

8.3.2 仿真结果	229
8.4 讨论	230
参考文献	230
第九章 克隆选择算法	232
9.1 概述	232
9.2 基本克隆选择算法	236
9.2.1 算法过程	236
9.2.2 不同用途的基本克隆选择算法	236
9.3 并行克隆选择算法	238
9.3.1 模型描述	238
9.3.2 分布式免疫记忆克隆选择算法	239
9.3.3 并行实现	241
9.4 免疫克隆数据项挖掘算法	243
9.4.1 算法思想	243
9.4.2 关联规则算法	244
9.4.3 性能分析	246
9.5 讨论	247
参考文献	247
第十章 免疫优化	250
10.1 概述	250
10.2 免疫多目标优化	252
10.2.1 问题描述	252
10.2.2 约束优化问题的人工免疫响应模型	253
10.3 免疫多模态(多峰值)优化	257
10.3.1 算法基本概念	258
10.3.2 算法流程	258
10.4 免疫并行优化	260
10.4.1 算法概念	260
10.4.2 并行混合免疫算法的实现	260
10.5 免疫结构优化	261
10.5.1 概述	261
10.5.2 结构优化免疫算法	262
10.6 旅行商问题	267
10.6.1 旅行商问题的描述	267
10.6.2 旅行商问题的人工免疫算法	268