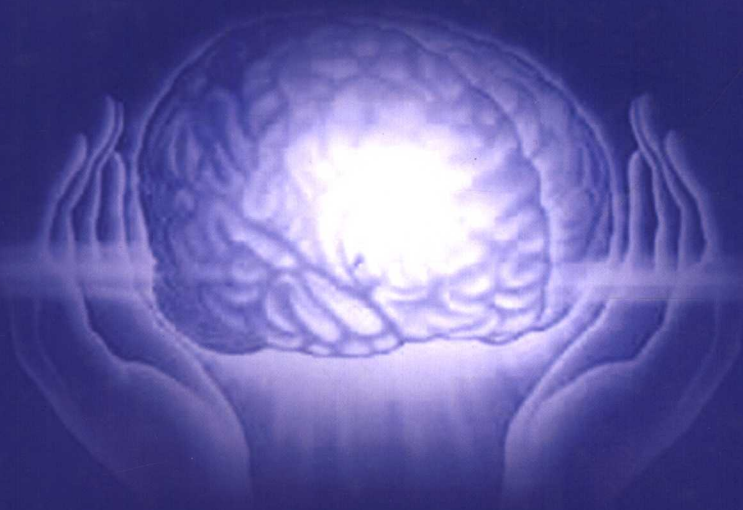




智能科学技术著作丛书

免疫优化 计算、学习与识别

焦李成 杜海峰 刘芳 公茂果 著



科学出版社

www.sciencep.com

智能科学技术著作丛书

免疫优化计算、学习与识别

焦李成 杜海峰 刘芳 公茂果 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成果的系统总结。在全面总结国内外人工免疫系统发展现状的基础上,本书着重介绍作者在这一领域的研究成果,主要包括:免疫算法、免疫克隆选择算法、量子克隆计算、人工免疫网络等算法的构造及其在数据聚类、网络路由、通信多用户检测、计算机网络安全等领域中的相关应用。本书也探讨了人工免疫系统进一步研究的方向。

本书可以为计算机科学、信息科学、人工智能和自动化技术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

免疫优化计算、学习与识别/焦李成等著. —北京:科学出版社,2006
(智能科学技术著作丛书)

ISBN 7-03-017006-7

I. 免… II. 焦… III. 人工智能-神经网络-计算 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 019495 号

责任编辑:田士勇 鄢德平 于宏丽/责任校对:钟 洋

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2006年6月第一次印刷 印张:30 1/4

印数:1—2 500 字数:568 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

庆祝人工智能诞生50周年

暨

中国人工智能学会成立25周年

吴文俊

《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

副秘书长：田士勇

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）

田士勇（科学出版社）

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 & technology，简称 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，简称 NI），包括：“人的智能”（human intelligence，简称 HI）及其他“生物智能”（biological intelligence，简称 BI）。

- “人工智能”（artificial intelligence，简称 AI），包括：“机器智能”（machine intelligence，简称 MI）与“智能机器”（intelligent machine，简称 IM）。

- “集成智能”（integrated intelligence，简称 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，简称 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，简称 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，五十年来，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，简称 CAAI）正式成立，二十五年来，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。

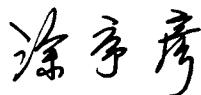
为了适时总结、交流、宣传我国学者在“智能科学技术”领域的研究开发及

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

前 言

免疫系统是生命系统的主系统之一，免疫系统通过从不同种类的抗体结构中构造自己-非己非线性自适应网络，在处理动态变化环境中起着重要的作用。基于免疫机理发展的人工免疫系统（AIS）提供了噪声忍耐、无监督学习、不需要反面例子、能清晰地表达学习知识、具有内容可访记忆和能遗忘很少使用的信息等进化学学习机理。它吸取了分类器、神经网络等的优点，并且免疫计算系统可结合先验知识和免疫自适应能力及强壮的鲁棒性，因而提供了一种解决复杂问题的新选择。但目前对此研究还有待深入，对免疫进化动力系统及其进化机制还有待进一步艰苦的工作。

免疫系统是一分布式自治信息处理系统，与神经网络和进化计算一样，是生物信息系统中富有成效的技术和方法。从工程上讲，它具有结合先验知识和免疫系统的适应能力；从信息科学讲，它具有强壮的鲁棒性和预处理能力；从生物角度讲，它有助于开发新的基于免疫系统的计算模型，并为生物免疫学服务。免疫系统不仅是一非线性自适应网络，而且是一自组织动态存储器。它具有内容可访记忆和能遗忘很少使用的信息等进化学学习机理和通过学习外界环境的自然防御机理，且是一自然发生的事件反应系统，能很快地适应变化的外界环境；同时免疫系统抗体多样性的遗传机理可用于进化搜索。它不尝试于全局最优，而是进化地处理不同抗原（场合）的抗体。独特型网络、互联耦合免疫网络、免疫反应网络和对称网络等免疫网络学说为建立人工免疫网络模型和进化计算模型提供了借鉴和基础。基于对异物的快速反应和很快能稳定免疫系统的免疫反馈机理，可发展有效的反馈智能控制系统，免疫系统的免疫耐受诱导和维持机理允许抗原被相同的抗体识别，且能容忍抗原显时噪声，这也是基于免疫进化的智能识别和诊断的内在机理。B细胞-抗体网络的振荡、混沌和稳态吸引性等非线性特性为建立相应的混沌进化网络提供了基础；免疫应答和选择学说等更为免疫进化计算提供了生物学依据。我们已经初步建立了免疫进化算法框架和免疫克隆选择进化计算理论框架，证明了其收敛性，其中包括免疫 GA、免疫进化规划、免疫进化策略、免疫进化聚类算法、免疫量子进化算法、克隆选择进化算法、免疫进化子波网络、免疫 Agent 算法等，并成功用于大规模数据聚类、智能多用户检测及组合优化（如 TSP-432, TSP-542, TSP-1000）、超高维函数优化及网络组播路由等 NP 问题。应当指出的是，免疫系统的多样性及其遗传机理不仅可以用于全局进化的探索，改善已有进化算法中对局部探索不是很有效的情况，而且在避免早熟

及处理多准则和约束问题方面显示出良好的潜力。AIS 能清晰地表达学习的知识，因而可能弥补神经网络等“黑箱”式学习模型难以表达学习知识的缺陷，有助于人们对问题的论证；同时由于 AIS 是一种强化学习系统，与其他计算智能方法的集成可用于解决采用 ES 和其他智能系统等难以解决的复杂问题。

免疫系统使用一组从 DNA 分子推导的有限数目的基本积木块（DNA 特定片段的随机重组）来获取鲁棒性和自适应性，免疫系统的进化可划分为 DNA 分子、DNA 特定片段的随机重组时的慢速学习模式和免疫系统中抵御异物的自适应快速学习模式，故可采用 DNA 进化算法来建立免疫计算系统。同时 AIS 是通过串匹配操作来分辨自己和非己，而近年来研究的 DNA 计算也是在碱基互补的串上进行操作的，故 DNA 计算可用于发展 AIS 算法；而 DNA 计算模型中也可通过引入人工免疫机理，建立基于 DNA 计算与 AIS 相结合的有较强干扰能力和稳定性的计算智能系统。

近年来得到广泛关注的量子算法有极强的并行处理能力，但不具有可实现的线性加速收敛性，因此将量子算法与上述算法相结合，有可能大大提高进化算法的收敛性能和全局求解问题的能力。我们已经建立了量子进化计算和量子克隆进化计算的基本框架，提出了量子进化算法、量子进化规划、量子进化策略、量子克隆选择算法等，证明了其收敛性，并成功用于 TSP-542、TSP-432、TSP-1000 问题及高维函数优化，这也为我们提供了新的研究方向。

从 1996 年开始，在国家自然科学基金重点项目（60133010，6073053，60372045，60372050），国家 863 计划（863-306-ZT06-1，863-317-03-99，2002AA135080），教育部重点科研项目（02073）及三项博士点基金、“十五”国防预研基金（413070504）及五项国防预研基金等项目的资助下，我们对进化计算理论、算法及应用进行了较为系统的研究，尤其对免疫进化计算、克隆选择、量子进化计算、AIS 等进行了较为深入的探讨，共培养了 15 位博士，出站博士后 3 人。本书正是我们研究工作的一个小结。

全书共分 13 章，主要内容包括：进化论与计算智能、生物免疫系统、从生物免疫到人工免疫系统、免疫进化算法、7 种基本免疫克隆选择计算、7 种高级免疫克隆选择计算、量子进化计算与量子克隆选择算法、人工免疫网络、基于免疫进化计算的数据聚类、移动通信中的免疫自适应多用户检测、网络组播路由免疫优化、基于免疫机理的网络安全与入侵检测及有待研究的公开问题等。书中给出了主要算法的源程序代码和相应标准测试问题，便于读者使用和研究。

本书是西安电子科技大学智能信息处理研究所 8 年来集体工作的结晶。特别感谢保铮院士多年来的悉心培养和指导；感谢中国科技大学陈国良院士和 IEEE 进化计算杂志主编、英国 Birmingham 大学的姚新教授的指导和帮助；感谢国家自然科学基金委信息科学部的大力支持；感谢王磊、李映、刘静、钟伟才、李

洁、刘若辰、王伶、李阳阳、杨淑媛、侯冲、尚荣华、马文萍、卢滨、杨海潮、谢银祥、冯小军等同学所付出的辛勤劳动。感谢科学出版社田士勇、鄢德平、于宏丽老师所付出的辛勤劳动。

感谢作者家人的大力支持和理解。

由于作者水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作 者

2005年11月

于西安电子科技大学

目 录

《智能科学技术著作丛书》序

前言

第 1 章 进化论与计算智能	1
1.1 人工智能与计算智能	1
1.2 进化论与进化计算	4
1.3 免疫系统与人工免疫系统	8
1.4 本书的结构	9
1.4.1 研究目的和方法	9
1.4.2 主要研究内容	10
1.4.3 结构安排与阅读建议	11
1.5 结论与讨论.....	13
参考文献	13
第 2 章 生物免疫系统	16
2.1 免疫基本概念及免疫学发展.....	16
2.1.1 免疫的含义	16
2.1.2 免疫学发展	17
2.2 生物免疫系统组成.....	18
2.2.1 免疫器官.....	19
2.2.2 免疫细胞.....	21
2.2.3 免疫分子.....	22
2.3 免疫分类.....	25
2.4 免疫系统的主要功能.....	26
2.4.1 免疫识别.....	27
2.4.2 免疫应答.....	27
2.4.3 免疫耐受.....	29
2.4.4 免疫记忆.....	30
2.4.5 免疫调节.....	31
2.5 抗体克隆选择学说.....	33
2.5.1 抗体生成理论的变迁	33
2.5.2 克隆选择学说	34

2.6	独特型网络调节学说	36
2.6.1	独特型网络调节学说概述	36
2.6.2	Jerne 的免疫网络结构	37
2.7	人工免疫系统的基本术语	38
2.8	结论与讨论	39
	参考文献	40
第3章	从生物免疫到人工免疫系统	41
3.1	人工免疫系统的历史	41
3.2	人工免疫系统的研究领域	41
3.2.1	人工免疫系统模型的研究	42
3.2.2	人工免疫系统算法的研究	44
3.2.3	人工免疫系统方法的应用研究	48
3.3	人工免疫系统与其他方法的比较	51
3.3.1	人工免疫系统与进化计算	51
3.3.2	人工免疫系统与人工神经网络	51
3.3.3	人工免疫系统与一般的确定性优化算法	53
3.4	结论与讨论	54
	参考文献	55
第4章	免疫进化算法	59
4.1	免疫算法	59
4.1.1	算法	59
4.1.2	收敛性分析	61
4.1.3	免疫疫苗	64
4.1.4	免疫算子	67
4.1.5	TSP 问题	69
4.2	免疫规划	72
4.2.1	算法	72
4.2.2	免疫疫苗的自适应提取	76
4.2.3	函数优化	77
4.3	免疫策略	80
4.3.1	算法	80
4.3.2	获取免疫疫苗的进化规划算法	84
4.3.3	TSP 问题	86
4.4	结论与讨论	88
	参考文献	90

第 5 章 免疫克隆选择计算	92
5.1 克隆选择算子	92
5.2 免疫克隆计算的统一描述	95
5.3 免疫克隆选择算法	96
5.3.1 免疫克隆选择算法	96
5.3.2 基本操作的性质	97
5.3.3 克隆选择算法的收敛性	98
5.4 免疫克隆选择规划	99
5.5 免疫克隆选择策略	102
5.6 多克隆算子与单克隆算子的比较	104
5.7 免疫克隆选择计算与进化计算	108
5.8 结论与讨论	116
参考文献	120
第 6 章 高级免疫克隆选择计算	122
6.1 自适应动态克隆算法	122
6.1.1 算法	122
6.1.2 函数优化	123
6.2 免疫优势克隆算法	126
6.2.1 免疫优势定义	126
6.2.2 抗体免疫优势的获得与算法	128
6.2.3 背包问题	129
6.2.4 函数优化	132
6.2.5 TSP 问题	133
6.3 自适应多克隆规划算法	143
6.3.1 算法	143
6.3.2 函数优化	144
6.4 免疫记忆克隆规划算法	147
6.4.1 算法	147
6.4.2 算法分析	151
6.4.3 函数优化	153
6.5 自适应混沌克隆进化规划算法	156
6.5.1 自适应混沌变异算子	156
6.5.2 算法	158
6.5.3 函数优化	159
6.6 求解 TSP 问题的超变异抗体克隆选择算法	163

6.6.1	TSP 问题与遗传算法	164
6.6.2	TSP 问题的三角形表示与启发式变异	165
6.6.3	超变异抗体克隆算法	167
6.6.4	TSP 问题	168
6.7	结论与讨论	172
	参考文献	175
第 7 章	量子进化计算与量子克隆选择算法	178
7.1	量子计算原理	178
7.1.1	状态的叠加	179
7.1.2	状态的相干	179
7.1.3	状态的纠缠	180
7.1.4	量子并行性	180
7.2	量子计算智能的几种模型	180
7.2.1	量子人工神经网络	180
7.2.2	基于量子染色体的进化算法	181
7.2.3	基于量子特性的优化算法	182
7.2.4	量子聚类算法	182
7.2.5	量子模式识别算法	183
7.2.6	量子小波与小波包算法	183
7.2.7	量子退火算法	183
7.2.8	其他	184
7.3	量子进化算法	184
7.3.1	量子进化算法的提出	184
7.3.2	量子进化算法中用到的一些基本概念	185
7.3.3	量子进化算法	186
7.3.4	量子进化算法的结构框架	190
7.3.5	量子进化算法的收敛性	192
7.3.6	QEA 求解背包问题	194
7.3.7	QEA 求解函数极值点	198
7.3.8	QEA 求解 TSP 问题	200
7.4	量子克隆进化算法	202
7.4.1	量子克隆遗传算法	203
7.4.2	量子克隆进化规划	203
7.4.3	量子克隆进化策略	204
7.4.4	量子克隆进化算法的收敛性	204

7.4.5 QCA 求解函数极值点	206
7.4.6 QCA 求解背包问题	209
7.4.7 QCA 的并行实现	211
7.5 结论与讨论	212
参考文献	213
第 8 章 人工免疫网络	218
8.1 两种典型的人工免疫网络	218
8.1.1 资源受限人工免疫系统	218
8.1.2 aiNet: 进化人工免疫网络	219
8.1.3 讨论	219
8.2 ART-进化免疫网络	220
8.2.1 算法实现策略	221
8.2.2 分类试验	222
8.3 形态空间人工免疫调节网络	224
8.3.1 字条模型与形态空间模型	224
8.3.2 学习算法	226
8.3.3 算法的收敛性	228
8.3.4 函数优化	230
8.4 结论与讨论	234
参考文献	235
第 9 章 基于免疫进化计算的数据聚类	237
9.1 数据聚类问题	237
9.2 基于 GA 的混合类型数据聚类算法	240
9.2.1 算法描述	240
9.2.2 仿真试验	242
9.3 基于 ICSA 的混合特征数据聚类算法	245
9.3.1 算法描述	245
9.3.2 仿真试验	246
9.4 基于进化免疫网络的聚类算法	251
9.5 基于克隆算法的网络结构聚类算法	252
9.5.1 算法描述	252
9.5.2 仿真试验	254
9.6 结论与讨论	258
参考文献	259

第 10 章 移动通信中的免疫自适应多用户检测	261
10.1 空时二维 CDMA 系统	262
10.1.1 空时信号模型	262
10.1.2 空时二维接收机	264
10.2 基于免疫策略的 RBF 网络	266
10.2.1 RBF 网络的基本形式	266
10.2.2 RBF 网络与多层感知器的比较	267
10.2.3 免疫策略算法	268
10.2.4 RBF 网络的学习策略	270
10.2.5 基于免疫策略的 RBF 网络	272
10.3 基于免疫 RBF 网络的 CDMA 多用户检测判决器	273
10.4 基于免疫 RBF 网络的 CDMA 多用户检测判决器的仿真结果与分 析	274
10.5 一种基于免疫克隆算法的多用户检测器	277
10.5.1 用于 CDMA 多用户检测的免疫克隆算法	278
10.5.2 算法复杂度分析	280
10.5.3 算法参数影响分析	281
10.6 基于免疫克隆算法的多用户检测器的仿真结果与分析	283
10.6.1 与最佳多用户检测器的比较	284
10.6.2 同步 CDMA 系统下的仿真	284
10.6.3 异步 CDMA 系统下的仿真	286
10.6.4 瑞利衰落信道多径 CDMA 系统下的仿真	288
10.7 结论与讨论	292
参考文献	292
第 11 章 网络组播路由免疫优化	295
11.1 组播技术	295
11.1.1 组播技术的产生背景	295
11.1.2 组播的特点	296
11.1.3 组播算法	297
11.1.4 组播路由协议	298
11.2 组播树理论基础及算法	300
11.2.1 Steiner 树问题的定义	300
11.2.2 Steiner 树启发算法	301
11.2.3 QoS 的基本概念	303
11.3 基于遗传算法的组播路由算法	305

11.4	免疫克隆选择组播路由算法	309
11.4.1	算法步骤	309
11.4.2	算法复杂度	311
11.4.3	仿真实例及结果分析	311
11.5	基于免疫克隆选择策略的时延受限组播路由算法	314
11.5.1	时延受限组播问题的数学描述	314
11.5.2	求解备选路径集	315
11.5.3	算法步骤	316
11.5.4	算法复杂度分析	318
11.5.5	仿真实验	318
11.6	基于克隆蚁群的时延受限组播路由	321
11.6.1	蚁群算法	321
11.6.2	基于自适应蚁群算法的时延受限组播路由	322
11.6.3	基于免疫克隆选择算法的时延受限组播路由	325
11.6.4	基于克隆蚁群算法的组播路由	328
11.7	基于免疫克隆选择算法的重构动态组播路由	331
11.7.1	动态路由问题描述	332
11.7.2	不可调的动态路由算法	332
11.7.3	部分重构的动态组播路由算法	333
11.8	基于免疫克隆选择算法的层次组播路由	338
11.8.1	层次网络结构	338
11.8.2	核节点选择方案	340
11.8.3	网络模型	340
11.8.4	基于免疫克隆选择算法的层次组播路由	341
11.8.5	实验仿真和算法分析	342
11.9	结论与讨论	344
	参考文献	344
第 12 章	基于免疫机理的网络安全与入侵检测	348
12.1	免疫机理在入侵检测系统中的应用	350
12.2	计算机免疫系统	354
12.2.1	信息传输免疫系统	354
12.2.2	计算机信息处理免疫系统	357
12.2.3	仿真研究	362
12.3	基于免疫机理的入侵检测系统	364
12.3.1	自然免疫系统和入侵检测系统	364