



刘朝华 著

混合免疫智能算法 理论及应用



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

国家自然科学基金项目
中国博士后科学基金面上项目
高校博士点基金项目
湖南省自然科学基金项目

混合免疫智能算法理论及应用

刘朝华 著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书在全面总结国内外的混合免疫智能算法及其应用成果的基础上,着重介绍作者在混合免疫智能算法理论及应用这一领域的研究成果,主要包括竞争合作性协同免疫进化算法模型设计、算法分析与实验;免疫双态粒子群计算模型构建、算法分析与实验;免疫协同粒子群算法模型构建、算法分析与实验;免疫蚁群自适应融合算法设计及实验分析;混合免疫智能算法在复杂工业控制系统中的应用研究,如基于混合免疫智能算法的混沌系统自抗扰优化控制和基于混合免疫智能算法的永磁同步电机多参数辨识与状态监测等实际工业应用。本书为读者提供了混合免疫智能集成计算模型构建、算法设计、理论分析、算法编程和工程实际应用等新方法、新技术、新思路。

本书可供高等院校自动化、计算机科学、电子工程、智能科学与技术等专业博士研究生、硕士研究生和高年级本科生使用,也可供相关领域的工程技术与科学研究工作者参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

混合免疫智能算法理论及应用 / 刘朝华著. —北京: 电子工业出版社, 2014.1

ISBN 978-7-121-21923-8

I. ①混… II. ①刘… III. ①免疫学—应用—人工智能—算法理论 IV. ①TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 276263 号

责任编辑: 董亚峰 特约编辑: 王 纲

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 12.75 字数: 240 千字

印 次: 2014 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 38.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前言

在人类社会和自然界中存在许多有待人们去研究的奥秘，而人类的智能研究是最为重要的，生命现象的奥秘和生物的智能行为也一直被科学家们所关注。生物体是一个非常大的复杂系统，生物为了维持自身个体的非平衡耗散结构，获得了基于自组织化构造信息处理系统的能力。同时，生物系统也可看成一个高级信息处理系统，基于生物系统启发的信息处理方法能为科学与工程技术领域提供各种富有成效的智能技术。生物智能是在生物的遗传、变异、生长以及外部环境的自然选择中产生的。在用进废退、优胜劣汰的进化过程中，适应度高的结构被保存下来，智能水平也随之提高。基于生物进化、细胞免疫、神经网络、群体智能等某些生物机制可导向计算智能，其代表有神经网络、进化计算、群体智能、免疫计算、模拟退火以及模糊系统等。这些方法具有自学习、自组织、自适应的特征和简单、通用、鲁棒性强、适合并行处理的优点，一直是智能科学领域的研究热点。智能计算在求解问题时不依赖梯度信息，特别适用于传统方法难以解决的大规模复杂非线性优化问题，因此已经被广泛应用于诸多领域，如优化问题求解、复杂工业自动化、航空航天工程、机器人领域、电力系统领域、网络及通信领域、物流系统、计算机领域、半导体制造领域和工程设计领域、系统辨识与故障诊断领域等。随着工业生产过程朝着大型化、连续化、综合化的方向迅速发展，生产过程变得越来越复杂，随之而来的各类工程问题具有大规模、强非线性、大迟延、高变量维数、多求解目标、参数时变等特征，这使得变量的存储及工程优化问题的求解都相当困难。这些复杂工程优化问题因为涉及面广、影响大而成为国民经济及工业界中迫切需要解决的课题。

而复杂工业系统的建模、优化与控制又往往需要高效能的算法来辅助，但是现有依靠单一模式的进化方法往往难以满足该方面的性能要求。混合算

法的思想是利用各算法的优势和各种智能算法内部策略来相互取长补短,从而产生更好的优化能力和求解效率。免疫系统是一种具有高度分布性的复杂自适应学习系统,免疫系统为了抵御外来病原体的入侵维持机体自身耗散结构的平衡,保证生物体的生存与发展,蕴藏着强大的信息处理能力,如“自己-非己”识别能力、免疫细胞克隆扩增、免疫选择、免疫网络、免疫细胞更新、免疫抗体多样等机理,还结合了分类器、神经网络、机器推理等学习系统的优点,具有较好的模式识别功能,呈现出良好的分布性、多样性、耐受性、记忆性、自适应性、鲁棒性等特点。从工程应用角度来讲,免疫系统将先天的经验知识与后天的学习相结合,构造出一种基于知识的自适应动态系统。同时免疫系统经历长时间的进化与其他生物智能系统有着一些共同特性,也容易吸收其他智能系统的优势元素来不断完善免疫系统自身的进化。借鉴免疫系统的机理并结合其他优化算法开展混合免疫智能理论与算法研究能为复杂系统问题的求解提供新的思路和有效的途径。充分考虑多种智能方法之间的有机联系及其算法内在的差异性,通过不断地汲取经典最优搜索方法及现代智能启发式算法的优点,各取所长,建立新模式的混合免疫智能计算理论与算法已是现代免疫计算智能与工程研究的发展方向。

本书的内容是作者近年来在混合免疫智能算法理论及应用研究领域所取得科研成果的归纳与总结。全书深入挖掘生物免疫系统中蕴涵的智能学习机制并结合其他智能处理方法的优点,研究了四类混合免疫智能算法理论方法及其相关应用。希望通过本书,为读者提供混合免疫智能算法模型构建、算法设计、理论分析、算法编程和实际应用等新方法与技术。全书共7章,第1章主要从生物免疫系统的起源阐述了人工免疫的发展,陈述了人工免疫系统中典型的免疫智能算法,接着综述了现有的免疫混合算法及其应用研究现状,并分析了现有混合免疫智能算法研究中存在的主要问题;同时就文中需要研究的应用问题阐述了混沌系统控制与永磁同步电机系统参数辨识研究概况。第2~5章着重于算法模型构建、相关算子设计及实验分析。第6、7章则是基于混合免疫智能算法理论的实际应用研究。通过相应算法在组合优化、数值优化、多模态优化问题、高维问题、动态优化问题等经典复杂问题中的应用,验证了算法的有效性,同时在混沌系统自抗扰优化控制问题、永磁同步电机系统多参数智能辨识与状态监测问题实际应用研究中验证了算法具有解决实际工程问题的优势。

本书的研究成果得到了国家科技支撑计划项目(2012BAH09B02)、国家自然科学基金项目(61174140, 61203309, 51374107)、中国博士后基金面上项目(2013M540628, 一等资助)、高校博士点基金项目(20110161110035)、湖南省自然科学基金项目(14JJ3107)等项目资助。作者的研究成果和本书的撰写工作是在湖南大学章兢教授的悉心指导和帮助下完成的,在此谨致以最诚挚的感谢。感谢湖南大学张英杰副教授、吴建辉博士对本书研究工作的建议与帮助,感谢刘侃博士对本书研究工作所提供的建议与帮助,感谢湖南大学蔡立军教授、邓子云博士对本书工作的支持。感谢湖南科技大学信息与电气工程学院周少武教授、吴亮红博士等领导与同事对本书出版的支持与关心,感谢家人的默默支持与理解。正是这些支持为本书的形成奠定了坚实的基础,在此对他们表示衷心的感谢。本书由湖南科技大学学术著作出版基金资助,感谢湖南科技大学学术著作出版基金对本书出版的资助。

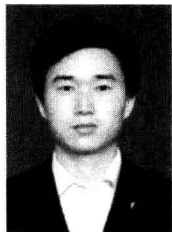
由于人工智能理论与应用正在蓬勃发展,该领域中很多理论技术方法还不完善,混合免疫智能算法与理论及其应用研究领域中还有许多科学与工程技术问题需要进一步深入研究和探索,完整的免疫计算智能理论体系还有待进一步完善。加之作者的学识水平与研究工作的范围有限,书中难免存在不足之处,敬请专家与读者批评指正。

刘朝华

2013年11月

作者简介

刘朝华 1983 年生，湖南衡阳人，工学博士、博士后，现为湖南科技大学信息与电气工程学院讲师，主要从事复杂系统建模、辨识、优化与控制，智能控制理论与应用，计算智能理论与应用，并行计算与云计算，以第一作者在《IEEE Transactions on Cybernetics》(IEEE T-SMC-B)、《自动化学报》、《物理学报》、《电子学报》、《电工技术学报》、《控制理论与应用》、《控制与决策》、《ICIEA》等国际、国内权威学术期刊及重要学术会议上发表科研论文 15 余篇，其中被国际权威检索机构 SCI/EI 收录 12 余篇。作为主要研究人员，参与过国家科技支撑计划重点项目、国家自然科学基金项目、高校博士点基金项目等 6 项。作为项目负责人主持过中国博士后基金面上项目（一等资助），湖南省自然科学基金项目，湖南省博士后科研项目（一等资助）等科研项目。2013 年获得国家留学基金委公派留学项目资助。兼任国内外多个主流期刊、国际学术会议论文评审人。



目 录

第1章 绪论	1
1.1 人工免疫系统的研究概况	1
1.1.1 生物免疫系统	2
1.1.2 人工免疫系统	4
1.1.3 人工免疫算法	6
1.2 混合免疫智能算法研究概况	11
1.2.1 典型混合免疫智能计算模型	12
1.2.2 混合免疫智能算法应用研究进展	19
1.3 现有混合免疫智能算法存在的主要问题及解决途径	24
1.3.1 混合免疫智能算法理论研究的缺陷及解决思路	25
1.3.2 混合免疫智能算法应用研究的局限及拓展	26
1.4 背景与意义	29
1.5 内容安排	30
第2章 竞争合作型协同免疫进化算法	32
2.1 引言	32
2.2 竞争合作协同免疫进化模型	34
2.2.1 基于生态种群密度的种群竞争操作	35
2.2.2 群体协同合作操作	36
2.3 种群内部免疫优势克隆选择操作	38
2.3.1 抗体局部最优免疫优势算子	38
2.3.2 基于信息熵的种群多样性控制	41
2.3.3 种群内部抗体克隆选择操作	42

2.4	算法流程及其收敛性能分析	43
2.4.1	竞争合作型协同免疫进化算法步骤	43
2.4.2	收敛性分析	44
2.4.3	时间复杂度分析	46
2.5	实验仿真	46
2.5.1	三种不同形式 ICA 算法性能比较	48
2.5.2	CCCICA 与其他免疫克隆选择算法的性能比较	51
2.5.3	CCCICA 与其他智能算法的性能比较	53
2.6	本章小结	54
第3章	免疫双态粒子群算法	56
3.1	引言	56
3.2	粒子群算法优化原理	58
3.3	免疫双态粒子群算法	60
3.3.1	双态粒子群算法机理	60
3.3.2	精英粒子局部增强学习算子	63
3.3.3	粒子免疫优化	63
3.4	IBPSO 算法流程及性能分析	65
3.4.1	算法 IBPSO 流程	65
3.4.2	算法性能及收敛性分析	66
3.5	仿真实验及分析	68
3.5.1	BPSO (双模态粒子群) 比例参数	69
3.5.2	算法精度比较	71
3.5.3	t-test 测试比较	74
3.5.4	高维函数实验	75
3.5.5	多模态函数及多样性实验	77
3.6	本章小结	80
第4章	免疫协同粒子群算法	81
4.1	引言	81
4.2	免疫协同粒子群进化算法	82

4.2.1	免疫协同粒子群进化模型	82
4.2.2	普通种群混合免疫网络粒子群算法	84
4.2.3	记忆库免疫进化	86
4.3	协作操作	88
4.3.1	个体极值小波学习	88
4.3.2	优势抗体迁移与共享	91
4.4	ICPSO 算法流程	91
4.5	实验仿真及分析	91
4.5.1	算法精度比较	94
4.5.2	算法计算复杂度比较	97
4.5.3	算法 t-test 值比较	99
4.5.4	相关参数及其算子分析	100
4.5.5	动态性能测试	101
4.5.6	ICPSO 与 IBPSO 的性能比较	104
4.6	本章小结	105
第 5 章	免疫蚁群自适应融合算法	106
5.1	引言	106
5.2	蚁群算法优化机理	108
5.3	基于统计学习的免疫融合蚁群算法 (ACALA)	109
5.3.1	带混沌扰动算子启发式蚁群算法	109
5.3.2	MAX-MIN 机制	110
5.3.3	免疫操作搜索算子	111
5.3.4	基于统计学习的自适应免疫蚁群融合算法	114
5.3.5	ACALA 算法收敛性分析及实验仿真	115
5.4	免疫双态蚁群融合算法 (BAIA)	122
5.4.1	双态蚁群机理	122
5.4.2	信息素的更新规则	124
5.4.3	BAIA 算法流程	124
5.4.4	BAIA 算法性能分析	125
5.4.5	BAIA 算法测试实验及分析	127
5.5	本章小结	130

第6章 基于混合免疫智能算法的混沌系统自抗扰优化控制	131
6.1 引言	131
6.2 自抗扰控制	133
6.3 基于免疫双态粒子群算法的混沌系统自抗扰优化控制	135
6.3.1 非线性混沌系统	135
6.3.2 评价函数的选择	135
6.3.3 混沌系统自抗扰优化控制系统结构图	136
6.3.4 基于 IBPSO 算法的混沌系统 ADRC 优化控制算法流程	136
6.3.5 实验	137
6.4 基于 IBPSO 算法的混沌系统 ADRC-CMAC 并行优化控制	142
6.4.1 CMAC 结构	142
6.4.2 ADRC 与 CMAC 并行控制算法	143
6.4.3 基于 IBPSO 的 ADRC-CMAC 优化设计流程	144
6.4.4 实验	144
6.5 本章小结	150
第7章 基于混合免疫智能算法的永磁同步电机系统多参数辨识与状态监测	151
7.1 引言	151
7.2 PMSM 数学模型	153
7.3 基于免疫智能算法的永磁同步电机多参数辨识与温度监测模型	155
7.3.1 基于 ICPSO 的永磁同步电机多参数辨识思想	155
7.3.2 基于 ICPSO 的永磁同步电机多参数辨识与温度监测模型	157
7.4 实验及分析	160
7.4.1 实验方案与平台	160
7.4.2 实验结果	163
7.5 本章小结	173
后记	174
参考文献	177

第 1 章

绪 论

1.1 人工免疫系统的研究概况

自古以来人们就不断对生物系统及人类自身功能结构进行模仿并从中提取有用的信息处理方法。例如,人工神经网络是对人脑结构感知的模拟^[1],模糊优化与控制思想模拟了人类模糊逻辑推理^[2,3],遗传进化算法仿效了大自然的优胜劣汰自然选择过程^[4],蚁群算法模拟了蚂蚁群体社会信息素传递机制^[5,6],粒子群算法仿效了鸟类、鱼类等的微粒觅食及迁徙行为^[7]。以上的生物信息行为模拟属于仿生智能范畴。对仿生智能算法的研究和应用业已成为智能系统领域的研究热点,人们相继提出了诸多求解复杂问题的智能处理方法,其中具有代表性的方法有人工神经网络、模糊系统、进化计算、多 Agent 系统、蚁群算法、粒子群算法、DNA 计算、免疫计算等^[1~8]。近年来,随着生物免疫系统的深入发展,免疫计算智能开始进入人们的视野,已成为人工智能系统领域研究的一个新热点。自 1974 年,丹麦学者 Jerne 提出了独特性免疫网络模型^[9],开启了人类对人工免疫系统研究的序幕。人工免疫系统^[8~11]是模拟生物免疫系统中的智能信息处理机制,且具有高度并行化的分布式、自组织、自适应等特征的智能系统。人工免疫系统的研究成果涉及数值优化^[12~15]、组合优化^[4,7,16~17]、多目标优化^[5,18~20]、故障诊断^[1,21~23]、计算机系统安全^[10,24~26]、系统辨识^[27~30]、智能控制^[31~35]、复杂系统优化与控制^[36~37]、数据挖掘^[2,38~41]及图像处理^[42~45]等诸多领域。随着人们对人工免疫系统的深

入研究，一方面不断地挖掘生物免疫系统蕴涵的智能信息处理机制并构造新的免疫优化机理；另一方面不断融合其他算法的优点，优势互补，而演化出一些新的混合免疫智能优化理论与技术。

1.1.1 生物免疫系统

生物免疫系统^[46]是生物机体的一种对外界环境特异性的生理反应，能够自动识别自身与清除抗原性入侵来维持自身非平衡耗散结构组织体的稳定；同时免疫系统是生物机体执行免疫功能的机构，是产生免疫应答的物质基础。免疫系统对自身细胞发生突变（如细胞病变、细胞癌变等）以及侵入机体的非己成分（如病毒等各种病菌体）具有精确识别、自适应应答及清除等功能。现代生物免疫系统的研究重点在于免疫动态响应：抗原、免疫细胞及其分泌的抗体、细胞因子等机体相互作用的动态过程。在生物体内存在的 B 细胞和 T 细胞是产生免疫响应的重要免疫细胞，它们都有着各自的分工。B 细胞的功能是产生抗体，且每个 B 细胞只能产生一种抗体，通过抗体与抗原的匹配，实现对抗原的清除；与此同时，T 细胞在免疫响应过程中能刺激和抑制 B 细胞的增殖与分化，对免疫调节有着积极的作用。生物免疫系统的研究发展历程归纳如下。

早在 17 世纪，中国民间医学家就发明了以人痘来预防天花的事例。接着英国医生 Edward Jenner 在 1796 年从“牛痘”中提取疫苗，标志着现代医学免疫的开端。而后来法国免疫学家 Pasteur 创造了减毒细菌疫苗并兴起了主动免疫的方法，奠定了经典免疫疫苗的基础。经过数百年的发展，免疫学逐渐从微生物学中的一小门类发展成为一门独立的学科，并派生出若干分支，形成了以细胞免疫学、分子免疫学、神经与内分泌系统免疫学、行为免疫学等基础免疫学研究体系。免疫学史上（20 世纪 90 年代初）比较重要的思想、理论和研究成果^[8,47,48]如表 1.1 所示。

表 1.1 生物免疫学的主要理论研究成果

发展简史	时 间	代表人物	思想、理论和研究成果
经验免疫学时期	17 世纪起	中国医学家	“人痘” 苗的发明和推广应用
	1796—1870 年	Jenner	“牛痘” 苗的发明和推广应用
		Koch	病理学
	1870—1890 年	Pasteur	减毒疫苗接种
		Besedovsky	神经—内分泌—免疫网络学说
		Metchinikoff	噬菌作用
科学免疫时期	1910—1930 年	Bordet	免疫特性
		Ehrlich	发现细胞受体
	1930—1950 年	Breidl&Haurowitz	抗体合成
		Landsteiner	半抗原结合
现代免疫时期	1930—1950 年	Breidl&Haurowitz	抗体合成
		Linus Pauling	抗原模型
	1950—1980 年	Burnet	克隆选择学说
		Niels Jerne	免疫网络理论学说
分子水平研究	1980 年至现在	Susumu Tonegawa	受体的结构与多样性理论

生物免疫系统智能特征如下。

① 免疫系统是由若干细胞和分子组成的生物体，是一种没有中心控制器的分布式系统，同时是一类能有效地处理复杂问题的非线性自适应网络。由于免疫系统存在多种不同的 B 细胞，且 B 细胞群体之间的相互反应能在动态变化的环境中维持其个体平衡。

② 免疫系统是一个自组织记忆存储器，它具有记忆与遗忘功能，通过免疫应答对外界进行无导师自适应学习，能够自适应外界环境变化。

③ 免疫系统中存在不同抗原与抗体的匹配及基因重组现象，保证了免疫系统的多样性；免疫系统中抗体多样性、克隆复制、亲和度变异、免疫性选择、基因重组等机理，可用于复杂问题的求解与寻优。

④ 借鉴独特型网络、互连耦合免疫网络、免疫反应网络 and 对称网络免疫网络学说能建立人工免疫网络模型，且免疫系统中 B 细胞和 T 细胞之间的相互反应维持系统动态平衡可以增强免疫算法的多样性。

⑤ 自身抗体对外界抗原的快速反应及快速维持免疫系统稳定的免疫反

馈机制可用于建立有效的反馈控制系统,如基于 T 细胞的免疫反馈原理可用于设计自调整免疫反馈控制器。

⑥ 免疫系统存在的免疫耐受诱导及维持机理,该机理允许抗原被相同的抗体识别且能对抗原中的噪声进行耐受,其机理可用于发展系统故障诊断方法。

⑦ 免疫系统的自体集与非我集的识别,可以清除外来抗原的入侵,借鉴此机理可以应用于计算机系统安全及入侵检测。

1.1.2 人工免疫系统

1958 年, Burnet 等人提出了生物克隆选择学说^[49],该学说表明生物免疫系统存在抗体-抗原自适应刺激的动态过程现象,在这一生命现象中所体现出的学习、记忆、抗体多样性等生物智能特征,正是建立人工免疫系统的基础。20 世纪 70 年代,美国著名免疫学家 Jerne 提出了免疫系统的网络学说,基于该学说并建立免疫网络的一般数学模型^[50],开创了人工免疫系统的研究。而后有关人工免疫系统研究的报道不断出现,如 Perelson 对独特型网络进行了进一步深入的研究与探索^[51]。1986 年, Farmer 进一步诠释了基于免疫网络的假说,构造出一种免疫系统的动态数学模型,并与 Holland 的分类器系统进行对比研究,提出了一系列有价值的智能信息学习方法。他们的工作为建立有效的基于免疫机理的人工智能系统和计算智能系统及其发展奠定了坚实的基础^[52]。根据 Burnet 的抗体克隆选择学说, De Castro 与 Kim 等人从不同的角度模拟了上述生物学抗体克隆选择实现过程,相继提出了一系列不同的免疫克隆选择算法,并建立了克隆选择算法基本框架,将其应用于复杂优化问题求解^[53,54]。20 世纪 90 年代初期,人们开始将免疫系统原理应用于工程问题求解,有关免疫机制用于解决实际工程问题的研究开始逐渐报道^[55]。1996 年 12 月,日本首次举行了基于免疫系统的国际专题讨论会,最先提出了“人工免疫系统”(Artificial Immune System, AIS)的概念。随后,人工免疫系统进入了发展期,人工免疫系统作为计算智能的崭新分支开始成为诸多国际期刊及国际学术会议的重要议题。1997 年开始,人工智能领域著名国际会议 IEEE System, Man and Cybernetics 每年均组织专门的 AIS 研讨会(Workshop);国际进化计算顶级杂志 IEEE Transaction on Evolutionary

Computation 在 2001 年和 2002 年还相继出版了有关 AIS 的专辑; 同时人工免疫系统研究主题也受到人工智能其他著名国际会议 International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)、International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)、GECCO (Genetic and Evolutionary Computation Conference)、CEC (Congress on Evolutionary Computation) 等的关注; 2002 年 9 月, 在英国 Kent 大学召开了第一届人工免疫系统国际学术会议 ICARIS (1st International Conference on Artificial Immune Systems)。自此, ICARIS 主要在英国、意大利、加拿大等国家每年相继轮回召开, 有关人工免疫系统的主题研究开始从单一的免疫系统理论研究走向多方位应用研究。在我国, 西南交通大学的靳蕃教授等人于 20 世纪 90 年代初在所著《神经网络与神经计算机原理应用》一书中就已经指出“免疫系统所具有的信息处理与肌体防卫功能, 从工程角度来看, 具有非常深远的意义”^[56], 开启了国内有关免疫系统信息提取机制的萌芽。从 1997 年开始, 国内逐渐出现有关免疫计算的研究报道, 近年来得到快速发展。2002 年国内学者莫宏伟出版了国内第一本介绍人工免疫系统的著作《人工免疫系统原理及其应用》^[57], 该著作阐述了从免疫系统生物学原理到人工免疫系统领域的研究成果及其相关工程技术应用。西安电子科技大学焦李成教授所领导的团队相继研究了一系列人工免疫优化方法, 如免疫遗传算法、免疫进化规划、免疫进化策略、量子免疫克隆算法等, 并证明了算法的收敛性, 分析了算法的复杂度以及相关参数效应, 无论在理论方法还是算法设计上均有所创新, 构建了免疫克隆计算智能的基本框架, 为免疫计算智能理论与应用的进一步研究提供了理论指导和技术支持, 并编著了免疫优化方面的系统理论著作《免疫优化计算-学习与识别》^[8]。肖人彬等人将人工免疫系统与工程领域结合研究并阐述了工程免疫计算的基本理论、集成方式、求解算法及技术实现^[58]。最近还有学者开始将人工免疫系统研究纳入自然计算范畴以拓宽人工免疫系统研究范围, 便于免疫系统研究成果得到更广泛工程应用研究, 期望促进人工免疫系统继续深入发展^[59]。随着人工免疫系统的发展, 人们开始将目光投向免疫系统机理与其他智能算法进行结合展开混合免疫计算智能理论与方法及其相关工程技术应用研究。

1.1.3 人工免疫算法

生物免疫系统也可看成一个高级信息处理系统，基于生物免疫系统启发的信息处理方法能为工程技术领域提供各种富有成效的智能技术。典型的人工免疫算法有一般免疫算法、克隆选择算法、免疫网络算法、阴性选择算法。

1. 一般免疫算法

受生物免疫系统机制启发，通过仿效人体的免疫系统，结合体细胞和免疫网络理论，以实现对生物免疫系统的抗原自动识别、细胞复制与分化、免疫记忆和自我调节功能的模拟。基本免疫算法流程如图 1.1 所示。

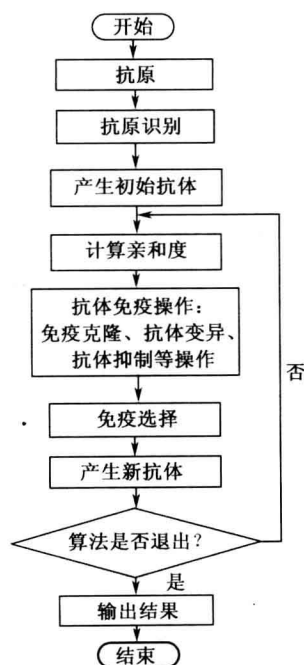


图 1.1 基本免疫算法流程