

计算机免疫系统 及其应用

柴争义 李亚伦 著



 科学出版社

计算机免疫系统及其应用

柴争义 李亚伦 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书将智能计算中的人工免疫系统用于计算机领域的相关问题求解,主要关注人工免疫系统中的克隆选择算法、否定选择算法、危险理论等的具体应用实现。本书主要介绍了基于克隆选择算法的认知无线网络频谱分配、频谱决策优化、认知 OFDM 资源分配方案;基于否定选择算法的入侵防御;基于危险理论的网络风险感知和评估模型与方法、用于异常检测的否定选择算法。

本书可以作为高等院校智能科学与技术专业高年级本科生和研究生的教材,也可供从事智能计算和网络优化的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机免疫系统及其应用/柴争义,李亚伦著. —北京:科学出版社,2016.9

ISBN 978-7-03-049658-4

I. ①计… II. ①柴… ②李… III. ①免疫学—应用—人工智能—研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 202022 号

责任编辑:王 哲 霍明亮 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

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>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本:720×1 000 1/16

2016 年 9 月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:230 000

定价:72.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

从大自然中进行学习，一直是人工智能的热点研究领域之一。生物是自然智能的载体。智能计算从生物学得到启示，解决了很多工程应用问题。人工免疫系统是一种模仿生物免疫系统机制、原理和模型解决复杂问题的自适应系统，具有学习、记忆和模式识别等学习机制，提供了新颖的解决问题的潜力，是一种典型的智能计算方法。人工免疫算法应用于计算机领域，也称为计算机免疫系统。计算机免疫系统是对人体免疫学的借鉴和实际运用，是一种新兴的智能信息处理方法。

人工免疫系统中主要有克隆选择算法、否定选择算法、危险理论等。克隆选择算法适合于求解优化问题，而否定选择算法和危险理论适合求解异常检测、入侵防御、风险评估等问题。本书主要将免疫克隆算法用于无线网络中的资源优化问题，将否定选择算法和危险理论用于网络安全问题，对人工免疫算法在工程领域的应用进行了积极探索。

本书是对作者从事计算机免疫前沿领域研究成果的梳理与总结。针对不同应用问题，设计出相应的免疫算法进行求解，并对求解效果加以分析和讨论。书中内容取材于作者近期在国内外学术会议、期刊发表的论文，包括频谱资源分配优化、频谱决策优化、子载波和功率资源的分配、入侵防御、风险评估、异常检测等。

本书具有以下特色：坚持学术性和应用性相结合的原则，把理论和实践融合在一起，以“理论及方法探索→建立问题模型→求解模型，给出优化方案→评估方案→修正模型”的方式展示技术方案。在讲解过程中，遵从了“用理论来指导实践，用实践来丰富理论”的科研规律，读者在阅读本书时，可以一边学习理论，一边进行案例仿真实验。

本书由天津工业大学柴争义、李亚伦撰写。在撰写过程中，参考了国内外同行的最新研究成果，在此向他们表示衷心的感谢。

在排版和校对过程中，研究生王玉林、郝旭正、韩亚敏、何君做了很多具体细微的工作，在此向他们表示感谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(U1504613)资助，在此表示深深的谢意！

计算机免疫系统处于不断发展过程之中，由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请业界专家、学者和读者批评指正。

作 者

2016年7月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
1.1	计算机免疫系统	1
1.1.1	生物免疫系统及其信息处理机能	1
1.1.2	计算机免疫系统及其应用	3
1.1.3	计算机免疫系统的主要算法	4
1.1.4	量子免疫计算	5
1.1.5	混沌免疫优化	7
1.2	克隆选择算法	7
1.2.1	基本免疫克隆优化算法	7
1.2.2	免疫克隆形态空间理论	9
1.3	否定选择算法	11
1.4	危险理论	13
1.5	优化问题建模	14
1.5.1	单目标优化问题	14
1.5.2	多目标优化问题	14
1.5.3	约束处理技术	16
1.5.4	优化问题的求解方法	16
1.6	本章小结	17
	参考文献	17
第 2 章	基于免疫优化的认知无线网络频谱分配	20
2.1	概述	20
2.2	认知无线网络的频谱感知和分配模型	20
2.2.1	物理层频谱感知过程	20
2.2.2	物理连接模型及建模过程	21
2.2.3	频谱分配的图着色模型	22
2.2.4	频谱分配矩阵	22
2.3	频谱分配具体实现	25
2.3.1	算法具体实现	25
2.3.2	算法特点和优势分析	27

2.3.3	算法收敛性证明	27
2.4	仿真实验与结果分析	29
2.4.1	实验数据的生成	29
2.4.2	算法参数设置	29
2.4.3	实验结果及对比分析	29
2.4.4	基于 WRAN 的系统级仿真	33
2.5	本章小结	34
	参考文献	35
第 3 章	基于混沌量子免疫优化的频谱按需分配算法	37
3.1	概述	37
3.2	考虑次用户需求的频谱按需分配模型	37
3.2.1	基于图着色理论的频谱分配建模	37
3.2.2	考虑认知用户需求的频谱分配模型	38
3.3	频谱按需分配具体实现	40
3.3.1	算法具体实现过程	40
3.3.2	算法特点和优势分析	43
3.3.3	算法收敛性分析	43
3.4	仿真实验与结果分析	45
3.4.1	实验数据的生成	45
3.4.2	相关算法参数的设置	45
3.4.3	实验结果及对比分析	45
3.5	本章小结	50
	参考文献	50
第 4 章	基于并行免疫优化的频谱分配	52
4.1	概述	52
4.2	认知无线网络的频谱分配模型	52
4.3	并行免疫优化算法主要思想	53
4.4	基于并行免疫优化的频谱分配具体实现	54
4.4.1	关键技术	54
4.4.2	算法实现步骤	55
4.5	仿真实验与结果分析	56
4.5.1	算法仿真环境和参数设置	56
4.5.2	实验结果及分析	56
4.5.3	并行算法的性能分析	58
4.6	本章小结	58

参考文献	58
第 5 章 认知 Mesh 网络中基于免疫多目标优化的频谱分配	60
5.1 概述	60
5.2 系统模型	61
5.3 算法实现	62
5.3.1 免疫优化算法	62
5.3.2 抗体编码	62
5.3.3 亲和度函数	62
5.3.4 算法描述	63
5.3.5 算法特点分析	64
5.4 实验结果及分析	64
5.5 本章小结	67
参考文献	67
第 6 章 量子免疫算法求解基于认知引擎的频谱决策问题	69
6.1 概述	69
6.2 基于认知引擎的频谱决策分析与建模	69
6.3 算法关键技术与具体实现	70
6.3.1 关键技术	70
6.3.2 算法具体步骤	71
6.3.3 算法特点和优势分析	72
6.3.4 算法收敛性分析	73
6.4 仿真实验与结果分析	74
6.4.1 仿真实验环境及参数设置	74
6.4.2 仿真实验结果及分析	75
6.5 本章小结	79
参考文献	79
第 7 章 基于免疫多目标的频谱决策参数优化	81
7.1 概述	81
7.2 基于认知引擎的频谱决策问题建模	81
7.3 算法关键技术与具体实现	82
7.3.1 关键技术	82
7.3.2 求解本问题的多目标免疫优化算法	83
7.3.3 算法特点和优势分析	85
7.4 仿真实验与结果分析	85

7.4.1	实验环境及参数设置	85
7.4.2	实验步骤	86
7.4.3	实验结果	86
7.4.4	相关算法比较分析	87
7.5	本章小结	89
	参考文献	90
第8章	基于免疫优化的认知 OFDM 系统资源分配	92
8.1	概述	92
8.2	基于免疫优化的子载波资源分配	92
8.2.1	认知 OFDM 子载波资源分配描述	92
8.2.2	认知 OFDM 子载波资源分配模型	93
8.2.3	算法实现的关键技术	94
8.2.4	基于免疫优化的算法实现过程	95
8.2.5	算法特点和优势分析	97
8.2.6	仿真实验结果	97
8.2.7	小结	100
8.3	基于免疫优化的功率资源分配	100
8.3.1	功率资源分配问题描述	100
8.3.2	功率资源分配问题的模型	100
8.3.3	算法实现的关键技术	101
8.3.4	基于免疫克隆优化的算法实现过程	103
8.3.5	算法特点分析	104
8.3.6	实验结果与分析	104
8.3.7	小结	107
8.4	联合子载波和功率的比例公平资源分配	107
8.4.1	问题描述	107
8.4.2	比例公平资源分配模型	108
8.4.3	基于免疫优化的资源分配实现过程	109
8.4.4	仿真实验结果与分析	115
8.4.5	小结	119
8.5	本章小结	119
	参考文献	119
第9章	基于免疫的新型入侵防御模型研究	122
9.1	概述	122
9.2	基本理论基础	122

9.2.1	入侵防御模型的形式化描述	122
9.2.2	入侵防御模型的检测性能描述	123
9.2.3	生物免疫系统与入侵防御的隐喻关系	123
9.3	模型具体实现	124
9.3.1	抗原、自体与非自体的形式化描述	124
9.3.2	抗体形式化描述	124
9.3.3	自体的动力学方程	124
9.3.4	未成熟抗体的生成和演化	125
9.3.5	自体耐受动力学方程	126
9.3.6	成熟抗体动力学方程	126
9.3.7	记忆抗体动力学方程	127
9.3.8	抗原及其动力学方程	127
9.3.9	模型入侵防御过程及性能分析	128
9.3.10	模型性能分析	128
9.4	系统仿真实验与分析	129
9.5	本章小结	131
	参考文献	132
第 10 章	基于危险理论的网络风险感知模型	134
10.1	概述	134
10.2	理论基础和 design 思想	134
10.3	网络入侵检测具体实现	135
10.3.1	抗原形式化描述及变化方程	135
10.3.2	抗体形式化描述及变化	135
10.3.3	未成熟抗体的动力学方程	136
10.3.4	成熟抗体动力学方程	137
10.3.5	记忆抗体动力学方程	137
10.3.6	入侵检测性能分析	137
10.4	网络风险评估具体实现	138
10.4.1	抗体浓度计算	138
10.4.2	风险定量计算	138
10.5	系统仿真实验与分析	139
10.6	本章小结	141
	参考文献	141
第 11 章	网络安全风险评估的云模型实现	143
11.1	概述	143

11.2	理论基础和 design 思想	143
11.2.1	云模型的再理解	143
11.2.2	设计思想和基本任务	144
11.3	关键技术与实现	145
11.3.1	系统变量云	145
11.3.2	云发生器的构造	145
11.3.3	网络入侵风险的评估和决策过程	149
11.4	系统仿真实验	150
11.4.1	仿真过程与结果	150
11.4.2	相关算法比较分析	151
11.5	本章小结	151
	参考文献	152
第 12 章	一种用于异常检测的实值否定选择算法	154
12.1	概述	154
12.2	相关工作	154
12.3	算法基本思想和步骤	155
12.3.1	算法改进的基本思想	155
12.3.2	算法基本步骤和流程	156
12.3.3	算法特点分析	157
12.4	实验和结果分析	158
12.4.1	异常检测系统及其性能的形式化描述	158
12.4.2	在合成数据上的结果	159
12.4.3	在真实数据上的实验结果	161
12.5	本章小结	164
	参考文献	164
第 13 章	一种免疫实值检测器优化生成算法	166
13.1	概述	166
13.2	国内外相关工作	166
13.3	算法关键技术分析和实现	167
13.3.1	检测器生成过程的概率统计分析	167
13.3.2	检测器生成过程的假设检验描述	168
13.3.3	检测器中心和半径的优化	169
13.3.4	算法基本步骤和分析	170
13.3.5	算法优势和特点分析	171

13.3.6 算法的复杂度	172
13.4 实验和结果分析	172
13.4.1 异常检测系统及其性能的形式化描述	172
13.4.2 合成数据上的实验及分析	173
13.4.3 在真实数据上的实验结果	177
13.5 本章小结	180
参考文献	180

第1章 绪 论

1.1 计算机免疫系统

人工智能的研究主要集中在探索智能及智能模拟的普适理论。智能计算是人工智能领域中的研究热点，充实了人工智能的研究内容。很多学者认为，人工智能“应该从生物学而不是物理学受到启示”。生物是自然智能的载体。从信息处理的角度来看，生物体就是一部优秀的信息处理机^[1]。

人工免疫系统是一种模仿生物免疫系统机制、原理和模型解决复杂问题的自适应系统，具有学习、记忆和模式识别等学习机制，提供了新颖解决问题的潜力^[2,3]。其主要研究在于通过深入探索生物免疫系统中所蕴含的信息处理机制，建立相应的工程模型和算法，解决国民经济和社会发展中面临的众多科学问题。人工免疫系统是生命科学和计算科学相交叉而形成的一个新的研究热点。近年来，人工免疫算法越来越受到相关领域研究人员的关注。不同的研究者借鉴其信息处理机制来解决工程和科学问题，研究成果涉及网络安全、数据处理、优化学习、故障诊断、资源调度等方面，显示出了优越的性能。与进化算法相比，人工免疫算法表现出了很多优异的特性，如在提高收敛速度的同时，较好地保持了种群的多样性，能比较有效地克服早熟收敛、欺骗等进化算法本身难以解决的问题，显示出较强的优化求解能力。

人工免疫算法应用于计算机领域，也称为计算机免疫系统^[4]。计算机免疫系统是对机体免疫学的借鉴和实际运用，是一种新兴的智能信息处理方法，在计算机网络安全、模式识别等领域中具有广阔的应用前景。不失一般性，本书中计算机免疫系统与人工免疫系统不作严格区分。

1.1.1 生物免疫系统及其信息处理机能

生物免疫系统是一个高度进化的生物系统，它旨在区分外部有害抗原和自身组织，从而清除病原体并保持有机体的稳定^[5,6]。从计算的角度来看，生物免疫系统是一个高度并行、分布、自适应和自组织的系统，具有很强的学习、识别、记忆和特征提取能力。人工免疫系统的隐喻机制主要来源于生物免疫系统中的获得性免疫的优良特性。目前，人们对生物免疫系统的认识还相当的不充分，还有待生物免疫学家进一步地研究与探讨。

下面首先对免疫学的几个基本概念进行介绍。

(1) 免疫。免疫学是研究机体免疫系统的组织结构和生理功能的学科, 主要研究免疫系统识别并消除有害生物及其成分的应答过程及机制。免疫系统的主要功能是对“自己”和“非己”抗原的识别和应答, 排除“非己”物质, 以维持机体的平衡。正常情况下, 免疫应答的结果对机体有利, 起到免疫防御、免疫稳定和免疫监视等生理性保护作用。

(2) 免疫细胞。能进行免疫应答的主要是淋巴细胞^[5,6]。淋巴细胞又分为 B 细胞和 T 细胞。B 细胞在免疫应答和清除病原体的过程中起主要作用, 受到刺激后分泌抗体去结合抗原, 但其发挥作用要通过 T 细胞的帮助。T 细胞的主要功能是调节其他细胞的活动。B 细胞所受的刺激水平不仅取决于抗体与抗原的结合情况, 而且取决于与其他 B 细胞的匹配情况(亲和力)。如果刺激超过一定阈值, B 细胞开始变大分裂, 大量复制自己, 以非常高的频率在基因中产生点变异, 这种机制称为体细胞高频变异。高频变异产生的新 B 细胞能否存活取决于它们对抗原和网络中其他 B 细胞的亲和力。如果新细胞对抗原有更高的亲和力, 将会进行复制并比现存的 B 细胞存活时间更长。因此, 通过重复的高频变异和选择过程, 经过一段时间后, 产生了对抗原具有更高亲和力的 B 细胞。

(3) 抗原。抗原(antigen, Ag)是指凡是能够诱导免疫应答而产生抗体, 并能与其发生特异性结合而产生免疫效应的物质。也就是说, 抗原是任何能被 T 细胞和 B 细胞识别并刺激 T 细胞及 B 细胞进行特异性免疫应答的物质。抗原表面被抗体识别的部分称为抗原决定基。抗原必须能够被抗原提呈细胞加工、处理, 以及能被 T 细胞和 B 细胞的抗原识别受体所识别。

(4) 抗体。抗体是 B 细胞识别抗原后, 通过克隆扩增分化所产生的一种蛋白质分子, 也称为免疫球蛋白。抗体结合由外部入侵的抗原, 消除对人体的威胁。抗体由抗体决定基和独特型组成, 抗体决定基是抗体上识别抗原决定基的部分, 而独特型是抗体上可供自身免疫细胞识别的抗原决定基。抗体具有两种截然不同的功能区分子: 保持相对静态状态的稳定区(简称 C 区); 负责与不同的抗原结合的变化区(简称 V 区)。可变区通过体细胞高频变异重组 DNA 片段, 实现对高度特异性的抗原决定基的识别。

(5) 亲和力。免疫系统中的免疫识别是基于抗体决定基和抗原决定基之间的形状互补^[7]。发生免疫识别的抗体决定基和抗原决定基在结构上越互补, 结合就越可能发生, 结合的力度也就越强, 这种结合的力度称为抗体与抗原之间的亲和力。当然, 抗体与抗原在结构上不一定需要完全一致, 但也必须在一定程度上匹配, 然后通过体细胞高频变异等途径实现亲和力的成熟, 达到与抗原的高度匹配。

生物机体在长期的进化过程中, 形成了两种免疫机制: 天然免疫和获得性免疫。天然免疫是机体天生就有的而且始终存在的防御机制。获得性免疫, 也称特异性免疫, 是机体与外来入侵性物质通过免疫作用之后获得的免疫。获得性免疫所具有的优良隐晦特性是人工免疫算法设计的思想来源。综合来讲, 免疫系统主要有以下功能。

(1) 免疫识别。免疫系统的主要功能是对抗原刺激进行应答, 而免疫应答又表现

为免疫系统识别自己和排除非己的能力。对于免疫识别现象,最主要的体现就是细胞克隆学说。

(2) 免疫应答。抗原性物质进入生物机体后激发免疫细胞活化、分化的过程称为免疫应答。免疫应答分两种类型:固有免疫应答和适应性免疫应答^[8,9]。前者是指遇到病原体后,首先并迅速起防卫作用的应答;后者是指当B细胞抗体能识别抗原决定基时,通过克隆扩增和高频变异,实现对抗原决定基的高度特异识别。

(3) 免疫耐受。免疫系统要正常工作,就必须能够区分自体细胞和非自体细胞。所谓免疫耐受是指免疫系统对自体抗原的不应答,也称为错误耐受。

(4) 免疫记忆。免疫系统不仅能记忆已经出现的抗原,而且在相同或者相似的抗原再次出现时,作出快速反应,成功清除被识别的抗原。免疫记忆是免疫系统的重要特征,有助于加快二次免疫应答过程。

随着免疫学研究的深入,人类对免疫系统的机理的认识越来越了解,然而,由于免疫系统的复杂性,很多免疫系统的机理仍然有待进一步研究。从信息处理的角度看,生物免疫系统具有以下几个特征。这些优良特性都为设计人工免疫算法提供了思想来源^[10,11]。

(1) 多样性。多样性是生物免疫系统的重要特征之一。免疫学的初步研究表明,通过细胞的分裂和分化、体细胞的超变异、抗体的可变区和不变区的基因重组等方式,可产生大量的不同抗体来抵御各种抗原,从而使免疫抗体群具有丰富的多样性。

(2) 适应性。免疫细胞通过学习的方式实现对特定抗原的识别。完成识别的抗体通过变异,增加了亲和度成熟的概率,并通过分化为记忆细胞,实现对抗原的有效清除和记忆信息保留,并且使最优个体以免疫记忆的形式得以保存,这是一个自适应的应答过程。

(3) 学习性。免疫学习分为两类:免疫初次学习和免疫二次应答(强化学习)。在未知抗原的入侵下,免疫系统能够通过克隆选择等免疫操作,产生与未知抗原相匹配的抗体,并加以分类储存,并为二次应答做好准备。

(4) 模式识别能力。虽然抗原种类繁多复杂,并且还会变异和进化,但免疫系统依靠有限的抗体就能对几乎无限的抗原进行识别。免疫系统对自体与非自体、对抗原的识别能力表明免疫系统具有强大的模式识别能力。

此外,生物免疫系统还具有分布性、鲁棒性和反馈性等特点。

1.1.2 计算机免疫系统及其应用

计算机免疫系统是一门医学免疫学、生物信息学、计算机科学、人工智能、计算智能等学科的交叉学科。目前关于计算机免疫系统的主要定义如下^[12-14]:计算机免疫系统由生物免疫系统启发而来的智能策略所组成,主要用于信息处理和问题求解;计算机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解决;计算机免疫系统是受免疫学启发,模拟免疫

学功能、原理和模型来解决问题的复杂自适应系统；计算机免疫系统是研究借鉴、利用免疫系统(主要是人类免疫系统)各种原理和机制的各类信息处理技术、计算技术及其在工程和科学中应用而产生的各种智能系统的统称。总之，计算机免疫系统着眼于生物隐喻机制的应用，强调了免疫学机理和应用，主要用于解决实际工程中存在的问题。

目前，还没有关于计算机免疫系统一般通用的、完整的理论体系，即能够解释所有计算机免疫系统方法的理论。计算机免疫系统主要的研究过程是抽取免疫机制、设计模型或算法、实验验证或计算机仿真。目前，计算机免疫系统的研究主要集中在三个方面：计算机免疫模型的研究、计算机免疫算法的研究和计算机免疫算法在工程应用中的研究。

计算机免疫系统的研究在国内外迅速展开。在国外，Dasgusta、Forrest 等对计算机免疫系统进行了广泛研究，取得了一些突破性成果。在国内，计算机免疫系统也得到了相关研究者的广泛兴趣。哈尔滨工程大学的莫宏伟出版了国内第一部关于计算机免疫系统的专著^[11]，并对计算机免疫系统的研究作了总结；西安电子科技大学的焦李成领导的团队，在免疫优化领域取得了很多原创性成果^[12,13]；四川大学的李涛在基于免疫的计算机网络安全方面进行了很多有益的工作^[4,14]；中国科技大学的王煦法和罗文坚团队在免疫硬件方面作了深入研究^[15]；华中科技大学肖人彬、东华大学丁永生在免疫工程优化、免疫控制方面取得了很大进展^[16,17]。此外，其他国内学者也对计算机免疫系统的发展作出了积极的贡献^[18-20]。

目前，计算机免疫算法已经在函数优化、组合优化、模式识别、通信、网络、图像处理、数据挖掘等众多工程和科学领域中得到了广泛应用。

1.1.3 计算机免疫系统的主要算法

计算机免疫算法主要包括人工免疫网络模型、否定选择算法、克隆选择算法、危险理论模型等^[11,16,17]。

(1) 人工免疫网络模型。

人工免疫网络模型是借鉴各种免疫网络学说，如独特型网络、互联耦合免疫网络、免疫反馈网络 and 对称网络等建立起来的。人工免疫网络模型将人工免疫系统视为一个由节点组成的网络结构，通过节点之间的信息传递和相互作用，实现识别、效应、记忆等免疫系统功能。目前，人工免疫网络模型主要有独特型网络模型、互联耦合网络模型、资源受限人工免疫系统、多值网络模型和抗体网络模型等。其中，影响最大的两个模型是资源受限人工免疫系统和抗体网络模型。前者基于自然免疫系统的种群控制机制，控制种群的增长和算法终止条件，并成功用于 Fisher 花瓣问题。后者受独特型免疫调节网络的启发，通过进化机制来控制网络的动态性，模拟了免疫网络对抗原刺激的影响过程。这些模型具有自己非己识别、自修复等功能，为信息处理和计算提供了一种途径。将人工免疫系统与人工神经网络、进化算法等智能方法相结合，提出

集成智能计算模型,是人工免疫系统模型的一个发展方向,其旨在充分利用各种方法的优点,能更有效地解决工程实际问题。

目前的免疫网络模型已经广泛地用于计算机网络,尤其是网络安全方面的研究工作。但这些应用多是思想上的,没有具体的实现算法。

(2) 否定选择算法。

否定选择算法又称阴性(负)选择算法,是基于免疫系统中的阴性选择原理而设计的。该算法主要包括两个步骤:首先,产生一个检测器集合,其中每一个检测器与被保护的数据不匹配;其次,不断地将集合中的每一个检测器与被保护数据相比较,如果检测器与被保护数据相匹配,则判断数据发生了变化。该算法并没有直接利用自我信息,而是由自我集合通过阴性选择生成检测子集,具备并行性、分布式检测等优点。不同的研究者对此算法进行了研究,提出了不同的改进算法。否定选择算法为免疫在计算机安全领域的应用奠定了理论基础。目前,否定选择算法广泛应用于垃圾邮件检测、模式识别、病毒检测、入侵检测、异常检测等领域。

(3) 克隆选择算法。

克隆选择算法是人工免疫系统的主要算法之一,其灵感来自生物获得性免疫的克隆选择原理。克隆选择算法已经在工程优化领域得到了广泛应用。这也是本书优化所使用的主要算法。

(4) 危险理论模型。

从免疫学的观点看,有些进入人体的异物,免疫系统并没有对它产生响应攻击,如人体消化道内的有益细菌。而对人体有害的自体,如肿瘤,免疫系统会对它产生攻击。危险理论认为诱发机体免疫应答的关键因素是外来抗原产生的危险信号而不是异己性^[21]。危险理论认为细胞的死亡分为凋亡和坏死。凋亡是正常的死亡过程,而坏死是异常的死亡过程,只有坏死才发出危险信号。危险理论模型并不要求清除每一种异己抗原,而是清除有害的抗原。对那些异己但无害的抗原采取耐受,即不处理。

英国诺丁汉大学的 Uwe Aickelin 开展了基于危险理论的信息安全方面的研究,首次提出了基于危险理论的异常检测系统。目前,基于危险理论的异常检测研究已经广泛展开,涌现出了各种研究成果。

1.1.4 量子免疫计算

量子计算具有并行性、指数级存储容量、指数加速特征等,展示了其强大的运算能力。目前,量子计算已经在通信、数据搜索等领域得到了成功应用。量子算法最本质的特征是利用了量子态的叠加性和相干性,以及量子比特之间的纠缠性,最主要的特点是其具有量子并行性^[22,23]。

(1) 状态的叠加。量子比特不仅可以处于 0 或 1 的两个状态之一,还可以处于两

个状态的任意叠加形式。一个 n 位的量子寄存器可处于 2^n 个基态的相干叠加态 $|\varphi\rangle$ 中，即可以同时表示 2^n 个数。叠加态和基态的关系可表示为

$$|\varphi\rangle = \sum_i c_i |\phi_i\rangle$$

式中， c_i 为状态 $|\phi_i\rangle$ 的概率幅， $|c_i|^2$ 表示 φ 坍塌到基态 $|\phi_i\rangle$ 的概率，即对应结果为 i 的概率，因此有

$$\sum_i |c_i|^2 = 1$$

(2) 状态的相干。量子计算的另一个主要原理就是构成叠加态的各个基态可以通过量子旋转门的作用发生干涉，从而改变其之间的相对相位。若量子系统 $|\varphi\rangle$ 处于基态的线性叠加的状态，称系统是相干的。

(3) 状态的纠缠。对于发生相互作用的两个子系统中所存在的一些状态，若不能表示成两个子系统态，就称为纠缠态。对处于纠缠态的量子位的某几位进行操作，不但会改变这些量子位的状态，而且会改变与它相纠缠的其他量子位的状态。量子计算能够充分实现，就是利用了量子态的纠缠性。

(4) 量子并行性。量子态是通过量子门的作用进行进化。量子计算利用了量子信息的叠加和纠缠的性质，在使用相同时间和存储量的计算资源时，提供了巨大的收益。

目前，量子计算已经和神经网络、进化算法、模糊逻辑等进行了有效结合，获得了广泛的应用。量子计算智能结合了量子计算和智能计算各自的优势显示了强大的优化能力。量子免疫克隆算法基于量子计算的概念和理论，使用量子比特进行编码。这种概率幅表示可以使一个量子染色体同时表征多个状态的信息，带来丰富的种群，而且当且最优个体的信息能够很容易地用来引导变异，使得种群以大概率向着优良模式进化，加快算法收敛。量子克隆中用到的一些基本概念如下。

(1) 量子比特。量子免疫克隆算法中，最小的信息单元为一个量子比特。一个量子比特的状态可以取 0 或 1，其状态可以表示为

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

式中， α 、 β 代表相应状态出现概率的两个复数 ($|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$)， $|\alpha|^2$ 、 $|\beta|^2$ 分别表示量子比特处于状态 0 和状态 1 的概率。

(2) 量子编码。量子编码即使用一对复数表示一个量子比特位。一个具有 m 个量子比特位的系统可以描述为

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_m \\ \beta_1 & \beta_2 & \cdots & \beta_m \end{bmatrix}$$

式中， $|\alpha_i|^2 + |\beta_i|^2 = 1$ ($i = 1, 2, \dots, m$)。这种表示可以表征任意的线性叠加态。