



华夏英才基金学术文库

黄席樾 张著洪 何传江 著
胡小兵 马笑潇

现代智能算法 理论及应用

2



科学出版社

www.sciencep.com



华夏英才基金学术文库

现代智能算法理论及应用

黄席樾 张著洪 何传江 著
胡小兵 马笑潇

北 京

内 容 简 介

本书主要论述了智能算法中的免疫算法、分形编码算法、蚁群优化算法和支持向量机等问题。首先针对几类不同类型的一般性最优化问题,建立相应的基于免疫的算法,并进行理论和应用研究;其次介绍分形编码算法的理论基础及实现,探讨该算法的改进和应用;然后介绍蚁群优化算法的基本原理及并行实现,探讨其在工程问题中的应用;最后介绍支持向量机的统计学习理论基础,研究其在数据分类、故障诊断及故障预测中的应用。

全书取材新颖,覆盖面较广,深入浅出,注重算法的理论依据、应用思路及应用效果,体现了国内外在这方面研究的最新研究进展。本书可作为从事计算智能研究的科研人员及工程技术人员的参考书,也可供高等工科院校自动控制、计算机、通讯及导航与制导等相关专业的教师及研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

现代智能算法理论及应用 / 黄席樾等著. —北京: 科学出版社, 2005
(华夏英才基金学术文库)

ISBN 7-03-015332-4

I. 现… II. 黄… III. 人工智能-算法理论 IV. TP183

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 029432 号

责任编辑: 李 锋 范庆奎 / 责任校对: 宋玲玲

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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

*

2005 年 4 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2005 年 4 月第一次印刷 印张: 27 1/2

印数: 1—4 000 字数: 544 000

定价: 49.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

前 言

以人工神经网络、演化计算等为代表的智能算法在工程领域的成功应用,激励人们从更广泛的生物或自然现象寻求启发以构造新的智能算法,来解决工程中广泛存在的复杂问题.这种以生物智能或自然现象为基础的随机搜索算法具有比数学规划方法更大的优越性,主要表现在:(1)具有一般性且易于应用;(2)搜索最优解的速度快且易于获得满意结果.以上优点使这类算法在工程问题上具有更广泛的应用前景,从而吸引了更多学者对其进行研究,使得现代智能算法正在成为人工智能领域一个新的研究热点.

本书是作者多年来对人工免疫算法、分形算法、蚁群优化算法和支持向量机的理论及应用进行了一系列研究并在所得成果的基础上总结而成的一本专著,内容反映了这四大分支的国内外最新研究动态.全书包括四部分,共十六章.其中第一章绪论是综述;第二章至第五章研究人工免疫系统的智能优化及免疫网络;第六章至第八章探讨分形算法理论及应用;第九章至第十三章研究蚁群优化算法理论及应用;第十四章至第十六章探讨支持向量机在故障诊断中的应用.各章内容安排如下:

第二章介绍免疫学的基本概念及原理,给出各原理中包含的运行机制之间的结构关系框架;对人工免疫系统理论及应用的发展历程及研究现状作了简要回顾,综述基于免疫机理的智能优化的发展阶段及免疫网络算法的主要结果.

第三章探讨一般性免疫算法的思路及与体液免疫应答的对应关系;对齐次及非齐次免疫算法的收敛性及收敛速度估计进行理论探讨;对免疫算法稳定性展开研究,探讨这类问题的自身理论体系;从实验角度研究免疫算法的鲁棒性,并对齐次及非齐次免疫算法进行理论分析和进行大量性能测试、比较.

第四章介绍基于免疫函数优化算法的研究存在的问题;给出小生境免疫算法及动态规模免疫算法,处理非约束函数优化问题,并对这两种算法进行性能检测、比较;提出约束优化免疫算法处理约束优化问题,并对其进行性能检测、比较;对小生境免疫算法、动态规模免疫算法及约束优化免疫算法的收敛性进行理论研究,并给出算法的实际应用.

第五章介绍智能算法解决多目标优化问题的发展现状,以及免疫网络算法处理数据分类问题的发展;提出多目标优化免疫算法,解决非约束多目标优化问题,进行收敛性论证及性能测试和比较;提出约束多目标优化免疫算法解决约束多目标优化问题;提出模糊免疫网络聚类算法处理分类问题,并用随机产生的样本组进行检测.

第六章介绍分形编码的理论基础,包括分形的概念、迭代函数系统、压缩映射原理和拼贴定理.

第七章从迭代函数系统的观点介绍分形编码的基本原理, 并从 VQ 的观点介绍该算法及实现.

第八章介绍作者的部分研究成果, 特别是发表在 IEE 刊物上的结果.

第九章综述蚁群优化算法的发展、应用及国内外研究现状; 通过“双桥实验”分析了蚁群优化算法的基本原理, 并由此导出蚁群优化算法的基本数学模型; 将蚁群优化算法与其他算法进行比较.

第十章介绍简单蚁群优化算法及其特性, 通过该算法分析了真实蚂蚁与人工蚂蚁之间的异同; 介绍蚁群优化元启发式; 分析蚁群优化算法中解的隐式评估、显式评估、信息素的留存和蚂蚁数等对算法的影响.

第十一章介绍蚂蚁系统的模型及实现, 并对该算法中的参数设置、蚂蚁数的选择、停滞现象、信息素的分布、蚂蚁协同作用和蚂蚁的初始分布等对算法的影响进行讨论; 介绍几种改进的蚁群优化算法, 并对各种算法的性能进行对比.

第十二章介绍蚁群优化算法并行实现的主要途径及其研究现状; 对比分析两种典型的蚁群优化算法的并行实现——同步并行实现和部分异步并行实现; 介绍带聚类处理的并行蚁群优化算法.

第十三章介绍蚁群优化算法在各个领域的应用, 包括 K-TSP、二次分配问题、作业调度问题、网络路由问题、0-1 背包问题、迷宫问题和机器人路径规划问题.

第十四章研究小样本情况的统计学习规律, 探讨支持向量机的统计学理论基础, 阐述从经验风险最小化到结构风险最小化的统计学习变革历程, 给出 SVM 学习机的推导算法; 利用一个可视化方便的 2 维两类分类的实例给出在以径向基、多项式和 Sigmoid 函数为核函数情况下的分类结果.

第十五章研究基于 SVM 的多类模式识别算法, 探讨支持向量机用于故障诊断的关键问题; 以柴油机振动信号的故障诊断为例, 利用基于 SVM 的二叉树多类分类方法判断柴油机故障检测和故障原因, 分析 SVM 理论中有关参数的特性和选择依据.

第十六章研究 SVM 回归算法的基本实现方法, 给出运用 SVM 机器学习方法进行故障趋势预测的方法, 通过对“Tennessee Eastman”工厂的实际数据进行仿真, 分析用 SVM 方法进行故障趋势预测的优越性.

本书由黄席樾教授执笔撰写第一、二、三、六、九、十和十四章; 由张著洪博士执笔撰写第四、五章; 由何传江博士执笔撰写第七、八章; 由胡小兵博士执笔撰写第十一、十二和十三章; 由马笑潇博士执笔撰写第十五、十六章.

全书内容取材新颖, 覆盖面较广, 深入浅出, 注重理论联系实际, 可作为高等院校相关专业研究生的专业参考书, 也可作为相关教师及工程技术人员的参考书籍.

由于作者水平有限, 缺点和错误在所难免, 敬请广大同行、读者批评指正.

作 者

2004 年 12 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 人工免疫系统概述	4
第二节 分形编码概述	6
第三节 蚁群优化概述	8
第四节 支持向量机概述	10

第一部分 免疫优化及免疫网络算法理论和应用

第二章 免疫学基本理论及人工免疫系统概论	15
第一节 免疫学基本概念及原理	15
第二节 人工免疫系统概述	22
第三节 本篇研究的主要内容及意义	30
第四节 最优化问题及分类	32
第五节 测试问题及性质分析	32
第六节 本章小结	36
参考文献	36
第三章 免疫算法理论及应用	41
第一节 引言	41
第二节 免疫算法的概念及工作原理	43
第三节 免疫算子及相关概念	45
第四节 突变规则	48
第五节 免疫算法描述	49
第六节 算法收敛性概念	51
第七节 免疫算子性质及齐次免疫算法收敛性	53
第八节 非齐次免疫算法收敛性	57
第九节 免疫算法收敛速度分析	60
第十节 免疫算法稳定性理论	63
第十一节 免疫算法的计算复杂度及鲁棒性分析	73
第十二节 齐次及非齐次免疫算法理论比较分析	78

第十三节 免疫算法的性能测试	81
第十四节 应用举例	86
第十五节 本章小结	87
参考文献	88
第四章 形态空间上免疫算法及收敛性理论	89
第一节 引言	89
第二节 小生境免疫算法	90
第三节 动态规模免疫算法	94
第四节 约束优化免疫算法	97
第五节 模糊控制免疫算法	104
第六节 形态空间上免疫算法的收敛性	111
第七节 应用举例	116
第八节 本章小结	123
参考文献	123
第五章 多目标优化免疫算法及免疫网络算法	125
第一节 引言	125
第二节 预备知识	126
第三节 非约束条件下多目标优化免疫算法	127
第四节 约束多目标优化免疫算法	138
第五节 模糊免疫网络分类算法	147
第六节 本章小结	153
参考文献	153
第二部分 图像编码的分形算法	
第六章 分形编码的数学基础	157
第一节 引言	157
第二节 度量空间	157
第三节 分形	168
第四节 迭代函数系统	175
第五节 本章小结	184
参考文献	184

第七章 基本分形编码算法	187
第一节 引言.....	187
第二节 矢量量化与分形编码.....	189
第三节 迭代函数系统正问题与自然图形模拟.....	197
第四节 迭代函数系统逆问题与图像编码.....	202
第五节 分形编码算法的基本原理与实现.....	204
第六节 本章小结.....	222
参考文献.....	222
第八章 分形编码的改进算法	225
第一节 引言.....	225
第二节 图像分割.....	227
第三节 虚拟码本构成.....	233
第四节 亮度变换类型.....	235
第五节 变换参数的量化.....	237
第六节 分形解码.....	240
第七节 最优分形编码.....	252
第八节 快速分形编码.....	255
第九节 混合分形编码.....	270
第十节 本章小结.....	275
参考文献.....	276

第三部分 蚁群优化算法理论及其应用

第九章 蚁群优化算法概述	283
第一节 引言.....	283
第二节 蚁群优化原理及算法描述.....	284
第三节 蚁群优化的特点.....	289
第四节 蚁群优化与其他算法的关系.....	290
第五节 蚁群优化的研究现状.....	291
第六节 本章小结.....	294
参考文献.....	294
第十章 蚁群优化元启发式及其收敛性	301
第一节 引言.....	301

第二节 蚁群优化元启发式	301
第三节 蚁群优化的收敛性	307
第四节 本章小结	317
参考文献	317
第十一章 基本蚁群优化算法及其改进算法	319
第一节 引言	319
第二节 蚂蚁系统及其属性	319
第三节 改进的蚁群优化算法	326
第四节 一种新的自适应蚁群算法	332
第五节 基于混合行为的蚁群算法	335
第六节 本章小结	340
参考文献	341
第十二章 蚁群优化的并行实现	343
第一节 蚁群优化的并行实现概述	343
第二节 蚂蚁系统的同步并行实现和部分异步并行实现	344
第三节 SPI 与 PAPI 的对比实验	346
第四节 对一类带聚类特征 TSP 的并行蚁群算法求解	348
第五节 本章小结	356
参考文献	356
第十三章 蚁群优化算法的应用	357
第一节 概述	357
第二节 蚁群优化算法与 K-TSP	357
第三节 蚁群优化与二次分配问题	361
第四节 蚁群优化算法与车间作业调度问题	368
第五节 蚁群优化算法与网络路由问题	370
第六节 蚁群算法与 0-1 背包问题	372
第七节 蚁群优化算法与三维空间机器人路径规划	378
第八节 本章小结	382
参考文献	383

第四部分 小样本统计学习理论与支持向量机

第十四章 小样本统计学习的基本理论	387
第一节 引言	387
第二节 基于 SLT 的机器学习理论的基本观点	387
第三节 支持向量机算法	394
第四节 算例	399
第五节 本章小结	401
参考文献	401
第十五章 基于 SVM 的多类分类算法及其在故障诊断中的应用	403
第一节 引言	403
第二节 基于二叉树的多级 SVM 分类器	403
第三节 SVM 用于故障诊断的一般步骤	406
第四节 基于 SVM 的柴油机故障诊断	408
第五节 本章小结	416
参考文献	416
第十六章 基于支持向量机的函数回归的方法	418
第一节 常用的损失函数的定义	418
第二节 函数回归的 SVM 方法	419
第三节 基于 SVM 的故障趋势预测研究	421
第四节 本章小结	426
参考文献	426
中英文词汇对照	428

第一章 绪 论

智能算法是一种借鉴和利用自然界中自然现象或生物体的各种原理和机理而开发的并具有自适应环境能力的计算方法, 衡量智能算法的智能程度高低的关键在于其处理实际对象时所表现出的学习能力的强弱. 智能算法的发展已有较悠久的历史, 早期发展起来的符号主义、联结主义、进化计算、模拟退火算法作为经典智能方法的主要研究学派, 至今仍在计算智能领域占据着重要位置, 并已取得极为丰硕的理论及应用成果. 随着历史的变革和时代的变迁, 智能算法的研究经历了漫长的发展过程, 从早期的经典智能算法发展到现代智能算法, 人们在不断探索新智能方法的同时, 对经典智能方法进行了一系列反思. 符号机制体系的建立, 以知识表达为基础, 通过推理求解的机器证明的成功实现, 开创了计算机进行几何证明的革命时代; 基于联结机制的人工神经网络简单地模拟人类大脑的学习功能, 对用网络模型处理工程问题作出了巨大贡献, 但是局部极小及搜索效率低是其主要不足; 进化计算的发展, 使得经典计算智能的研究再度掀起, 致使智能算法成为当今研究的热点, 并已发展为一种多学科、多智能交叉融合、渗透的信息与计算研究领域. 经典智能算法与来自生命科学中其他生物理论的结合, 使得这类算法有了较大进展, 如遗传算法与生物免疫或模糊逻辑的结合形成了免疫遗传算法或模糊遗传算法, 神经网络与免疫网络的结合形成了免疫神经网络. 现代智能算法在经典智能算法的理论及应用基础上, 已逐步发展出许多较有潜力的研究分支, 如人工免疫系统理论及应用、分形算法理论及应用、蚁群优化算法理论及应用、支持向量机等等. 这些表明智能算法已朝着多极化发展, 生物智能的应用越来越广, 研究学派越来越多, 研究气氛越来越活跃, 比如智能优化算法作为智能算法的重要研究内容, 已呈现较多的新智能工具, 如免疫遗传算法、免疫算法、混沌免疫算法、蚁群优化算法、噪声方法、变邻域搜索、巢分区方法、思维进化算法、混合优化算法等等. 这些算法的出现显示了模拟或借鉴生物智能, 开发具有较高智能的应用工具并对其进行理论与应用研究具有重要理论和现实意义.

目前智能算法的研究呈现出三大趋势: 一是对经典智能算法的改进和广泛应用, 以及对其理论的深入、广泛研究; 二是现代智能算法的发展, 即开发新的智能工具, 拓宽其应用领域, 并对其寻求理论基础; 三是经典智能算法与现代智能算法的结合建立混合智能算法. 至今新的智能算法不断涌现, 涉及的应用领域不断增加, 如最优化、模式识别、智能控制、计算机安全、计算机网络、投资组合等等, 因此开发新智能工具处理工程问题便成为现代智能算法研究的首要任务, 也是智能算法研究的热点.

为了使读者能更清楚地了解智能优化算法发展现状和趋势, 以下首先对进化算法、模拟退火算法、处理优化问题的神经网络的发展现状、存在的问题以及进一步研究态势作概要性介绍, 然后对本书的各研究分支的研究现状及本书研究内容作概述介绍。

智能算法是建立在生物智能或物理现象基础上的随机搜索算法, 由于其自身作为启发式随机算法, 具有比数学规划方法更优越的特性, 因此这类方法的研究也是最优化领域研究的重点。其优点是: (1) 具有一般性及易于应用; (2) 搜索最优解的速度快且易于获得满意的结果。目前智能优化方法较多, 许多方法存在着不同程度的相似性, 如噪声方法、变邻域搜索、巢分区方法均属于邻域搜索算法, 存在着与模拟退火算法所具有的许多共同特征。最为广泛被采用并具有代表性的智能优化方法是模拟退火算法 (SA)、进化算法 (EA) 和 Hopfield 网络。以下仅对这三种研究学派的研究状况作简单回顾。

进化算法包括 20 世纪 70 年代中期美国的 Holland 提出的遗传算法 GA、60 年代德国的 Rechenberg 及 Schwefel 提出的进化策略 ES 及 60 年代美国的 Fogel 等教授提出的进化规划 EP, 而 GA 又是这三种算法的代表。由于这三种算法的算子具有可统一性, 因此将此三种算法统称为进化算法 EA。目前关于 EA 的一般性理论研究, 德国的 Rudolph 获得了初步结果, 研究范畴主要集中在算法的收敛性, 但要求的条件较强, 即算法的状态转移矩阵正定, 这无疑导致应用受到极大限制, 但是这项研究成果标志着一般框架的进化算法的理论探讨迈出了坚实的一步。

EA 是模拟生物自然进化机制的一种启发式随机搜索算法, 这种算法是以个体构成的群体为状态并具有开采和探测能力的群体学习过程, 其由基于群体的选择、交叉及突变三种算子组成。选择操作反映了物种进化的“适者生存, 优胜劣汰”思想, 交叉是自然演化的主要机制, 其反映了个体之间的信息传递和信息交换关系, 突变使得群体搜索具有遍历性。选择、交叉、突变分别反映了物种进化过程的特定运行机制, 这三种算子在 GA、ES 及 EP 中的重要程度有所不同。GA 以选择和交叉为主产生多样的和高适应度的个体, 突变仅起到微调群体多样性的作用; ES 及 EP 主要通过突变产生多样的个体, 通过选择方式获得好个体; ES 与 EP 的主要区别在于: ES 的选择为确定性选择且含有交叉操作, 而 EP 无交叉操作及选择为 K 联赛选择。GA 的突出优点是结构相对固定、计算速度快、全局搜索能力强、并行性高、鲁棒性强及不依赖于问题的特征信息等, 这些优点是导致大量计算智能研究者及工程人员对其产生浓厚兴趣的根本原因。无论是这种算法的理论研究还是应用技术开发, 都在计算智能中占据了重要位置。

关于算法结构, GA 是以多个个体构成当前状态, 搜索过程是个体群进化, 最终获得的状态是由多个优良个体组成。但 GA 维持群体多样性及局部搜索能力较弱, 搜索性能与初始群体的分布密切相关, 已有的理论结果已表明基本遗传算法是不收敛的, 其主要原因在于尽管 GA 具有遍历性, 但是算法搜索过程中所获得

的较好个体的维持性能较差及群体多样性不足, 导致任何时刻获得的好个体随时可能消失及易于出现早熟现象, 因而 GA 不能被保证收敛. 由于 GA 具有的不能收敛特性阻碍了其应用和理论的进一步深入研究, 这导致人们去寻找一些新的方法改善 GA 的搜索性能, 因而出现了基于 GA 的种类繁多的算法, 如模拟退火遗传算法、并行遗传算法、模糊遗传算法等. 其次遗传算法处理约束函数优化问题的研究也取得了较大进展, 这些算法的出现有助于开发更有效的算法处理复杂约束优化问题; 另外以 GA 为基础的多目标优化进化算法作为进化算法的重要研究方向, 在近来已取得丰硕成果, 并在许多有关多目标优化领域获得广泛应用并引起同行研究人员的足够重视. 在此研究领域里, Zitzler 提出的算法是目前公认的最好算法. 这些算法不仅增强了 GA 的局部搜索能力和最优解维持能力, 而且使算法的搜索速度及处理复杂优化问题的能力极大提高, 特别是并行和模糊遗传算法及基于 GA 的多目标进化算法是计算智能领域里值得研究的、富有实际意义的研究方向, 同时也是目前 GA 的主要发展趋势. 但当 GA 结构复杂程度加大时, 无疑增加了其理论研究的难度. 在国内外, 对 GA 已有较系统的理论研究, 如西安交大的张文修教授等对 GA 的遗传算子的几何性质作了较全面探讨, 同时对建立在 GA 上的几类较为简单算法的收敛性作了深入研究, 提供了对智能优化方法进行理论分析的新思路, 获得了极为有价值的理论结果. 为了改善 GA 的性能, 通常可通过对 GA 的结构复杂化或给予附加的特定的算子, 这当然提高了 GA 的搜索性能, 但也带来了负面影响, 即算法的通用性和实用性有所降低, 同时计算复杂度及理论研究的难度大幅度提高.

ES 是基于实数编码的保优算法, 其主要的算子是确定性的选择操作及高斯变异策略, 突出的优点在于适应值函数可直接选择为优化问题的目标函数, 算法搜索速度快, 结构简单, 计算复杂度低, 对目标函数较为光滑的优化问题有较好的效果. 目前, Rudolph 从理论角度对这种算法的收敛性、收敛速度及自适应步长的引入都进行了较多研究, 但 ES 与多目标优化问题的理论分析有待开展. 从应用角度, 该算法已成功用于多目标最优化设计问题, 目前这种算法的研究主要集中在自适应步长的设计及探讨多目标进化策略算法.

EP 是基于实数编码的并行搜索算法, 其与 GA 的区别在于 EP 的选择为 K-联赛选择, 突变为高斯变异策略. 目前关于 EP 的研究主要是探讨 EP 与其他方法结合的混合规划方法, 应用对象是约束函数优化问题, 如 Maa 和 Shanblatt 提出两步最优化神经网络处理约束优化问题, 此方法是首先利用 EP 获得最优解的近似解作为神经网络的初始解, 然后利用神经网络获得最优解的精确值. Kim 和 Myung 提出两步混合规划算法处理约束优化问题, 即将 EP 作用于处罚函数获得较好的进化群体, 然后将处罚函数改变为增广的 Lagrange 乘子函数, 并再次利用 EP, 最终获得最优解.

模拟退火算法 SA 的思想是 Metropolis 等在 1953 提出的, 之后 Kirkpatrick 等

人于 1983 年在科学杂志上将其用于组合优化。此算法属于局部搜索算法,其基本思想是设计初始状态、初始温度及物体冷却的退温函数,以单个个体作为当前状态,在此状态的邻域中产生新状态,并按 Metropolis 准则接受稍次的新状态作为下一状态,最终达到寻优的目的。目前关于 SA 的理论及应用研究较多,理论研究已逐渐趋于成熟,应用范围已扩展到了许多领域,同时 SA 与其他智能方法的融合是 SA 能吸引许多领域的专家进行广泛研究的关键所在。由于 SA 的自身结构特性的限制,如何提高其搜索性能一直是计算智能研究者关注的焦点。近来对 SA 的研究主要集中在 SA 和其他智能算法的结合,以及如何扩展 SA 的结构并将其有效地应用于多目标优化问题。

神经网络解决优化问题的研究也在不断开展,这方面的起源研究是 Pyne 教授首次引自电路回路并用于解决非线性规划 (NP) 问题,之后又出现许多基于电路回路的模型处理 NP 问题,其中具有代表性的是 Chua 和 Lin 提出的经典非线性规划回路,以及 Hopfield 提出的 Hopfield 网络。非线性规划回路建立了一般性电路回路模型,为了增强此模型的动力学行为, Hopfield 在电路回路中引入了电容器,从而获得了 Hopfield 网络。针对已有网络存在不能保证收敛到可行解的缺陷, Walter 基于非线性规划回路的思想建立了无等式约束的约束优化神经网络模型。与此同时,两步神经网络的出现标志着神经网络处理约束优化问题取得了初步进展。至今,对于神经网络处理 NP 问题的研究主要集中在 Hopfield 网络,此网络已获得广泛应用,其理论研究也在广泛开展,但已有结果表明该网络的同步离散型模型是非稳定的。由于此网络结构的限制,致使其在 NP 问题中的应用受到极大的阻碍,困难在于构造能量函数。因此必然导致从其他角度探讨神经网络处理一般性 NP 问题。近来宋荣方等经设计能量函数,获得了一种新的神经网络处理线性约束凸优化问题,论证了此模型的稳定性。与此同时孟志青等基于静态处罚法,引入二次非线性罚函数并作为能量函数获得一种处理凸优化问题的神经网络,理论上论证了该网络在一定条件下平衡点序列收敛到最优解,有应用前景,但要求在不断增大罚因子情形下,网络产生平衡点序列,而且不能保证网络的平衡点为可行解,也阻碍了其应用。至今,神经网络模型处理优化问题的研究未能取得重大突破。

针对智能算法研究概况,本书对近年来出现的四大主要研究分支所关注的主要内容进行一系列研究,即人工免疫系统理论及应用、分形算法理论及应用、蚁群优化算法理论及应用和支持向量机,其目的在于使计算智能研究者、学者和工程人员更多地了解智能算法的研究现状,有助于智能算法不断向前发展。

第一节 人工免疫系统概述

经典智能算法不断向前发展,促使新的智能方法的不断出现,探讨新智能方法处理工程问题已成为热门话题。人工免疫系统的研究起源于 20 世纪 80 年代末期,

Farmer 作为这方面研究的先驱首次将免疫机理和人工智能结合之后,免疫系统的许多特征引起了研究者的广泛兴趣. 90 年代初,免疫学的多样性机理被成功地用于遗传算法之后,陆续出现了许多与免疫有关的新的智能算法,如免疫遗传算法、克隆选择算法、模式跟踪算法、阴性选择算法、免疫网络算法、免疫网络与神经网络结合的控制算法等. 这些方法已在工程领域获得了广泛应用,如模式识别、多模态函数优化、字符识别、TSP 问题、加工调度、模式跟踪、自适应控制、入侵检测、故障诊断、数据分析以及机器人行为控制等. 可是免疫系统的许多机理所隐含的丰富思想与工程问题结合的研究还处于初步阶段. 目前在国内外,人工免疫系统理论及应用正被广泛研究,已成为人工智能领域又一研究亮点. 人工免疫系统来自于对免疫系统概念、机理、特征、原理的模拟,对工程问题的解决越来越显示出了它的优越性. 免疫学作为一门独立地反映人体及其他动物免疫系统运动规律的学科,对人类及其他动物的疾病防治方面作出了巨大贡献. 免疫系统中免疫细胞的功能及免疫网络的动力学行为特性一直是免疫学研究的前沿问题,至今已获得突破性进展. 这种系统是一种高度并行的分布式、自适应信息处理学习系统,体现了免疫系统与抗原相互作用及免疫细胞学习抗原模式结构的内在变化规律. 从工程应用角度来看,免疫系统的行为特性及运行机制与工程领域中许多研究方向有着紧密的联系,如最优化、计算机安全、智能控制、故障诊断、数据分析、图像处理等等. 免疫系统所隐含的丰富资源给予工程人员更多灵感,开发、研究和建立适用于工程问题的人工免疫系统,已成为工程界关注的焦点,并已在国内外形成活跃的研究氛围. 目前,许多研究人员从免疫系统的不同侧面,找到了与工程问题的结合点,并已提出了许多智能方法有效地应用于现实问题. 免疫系统作为复杂的信息处理学习系统,尽管其一些思想已在工程问题的解决中得到体现,但仍有大量的机理、思想方法、行为特征等有待工程界研究人员利用,并提出有效的智能工具. 这不仅有助于工程问题的解决,而且也有益于激发免疫学家深入探讨免疫系统的内在运行规律,因而基于免疫系统研究和开发人工免疫系统是十分有趣及有意义的新的研究方向.

目前在人工免疫系统与工程结合过程中,主要研究方向有免疫优化算法、免疫网络、入侵检测、控制系统设计、故障诊断、免疫 Agent、机器人控制、基于免疫的计量化学等等,这些研究分支的不断深入探讨和应用丰富了人工免疫系统的内涵. 深入挖掘免疫系统的内在机制,开发更多、更有效的智能系统解决工程问题是目前人工免疫系统研究的首要任务之一. 在国内外,人工免疫系统理论及应用已倍受关注,其研究专家、学者主要分布在美国、中国、日本、英国、巴西、墨西哥、韩国、俄罗斯等国家,许多研究者已获得很多科研成果且被成功地应用于实际问题. 但由于人工免疫系统的研究在 1997 年之后才开始兴起,对其开发、理论研究、应用都有待进一步探讨.

关于人工免疫系统的定义尚未达成广泛共识,在此选择莫宏伟关于人工免疫

系统的定义,即所谓人工免疫系统(从工程和科学角度讲),就是研究借鉴、利用生物免疫系统(主要是人类的免疫系统)的各种原理和机制而发展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.从这个意义上说,人工免疫系统不仅涉及计算系统而且涉及信息处理的其他技术.开发免疫系统的任务不是激发人们对免疫系统的内在功能的运行规律进行深入研究,而是激发人们提取免疫系统中对解决工程问题有益的特征和免疫机制,并借助免疫学原理对各种运行机制进行有机组合,建立能有效解决实际问题的智能系统.

目前,人工免疫系统理论及应用已作为新的研究方向在许多国际会议上被作为专题进行了讨论,同时于2002年9月及2003年9月分别在英国肯特大学、爱丁堡大学召开了第一次、第二次人工免疫系统理论及应用国际会议,这标志着此领域已成为正式研究方向融入到人工智能领域.

第二节 分形编码概述

自20世纪80年代以来,计算机在各行各业和社会生活的许多方面得到了广泛的应用,并已被广泛应用于数据处理与数据通讯.特别是20世纪90年代以来,计算机系统的时代特征是多媒体技术的发展.简单地讲,多媒体技术就是指用计算机综合处理文字、声音、图形、图像等多种媒体上承载的信息.图像是其中最主要的信息载体,因为信息的图像载体存在很多适合于人类视觉系统的优点.这一信息系统涉及图像压缩等方方面面的问题,尽管每个问题都很重要,但以较少的空间储存海量文件(如图像)的压缩是解决数据有效传输与储存的关键问题.随着多媒体应用的日益增多,如何高效、实时地压缩图像是多媒体技术中最关键的问题之一,图像压缩技术已经成为一个十分重要的研究领域.

如果从Oliver等提出PCM编码理论算起,图像压缩技术已经走过50余年的光辉历程,其间诸如预测编码(又称DPCM)、变换编码和向量量化编码等许多经典压缩编码方法被提出,并得到较为广泛的实际应用.众所周知,经典压缩编码主要依据图像本身固有的统计特性,较少利用人眼视觉系统的特性.其压缩效率一般要受信息熵的约束,不能实现很高的压缩比.然而随着图像技术的广泛应用,特别是通信的实时性对图像压缩比要求越来越高.超高倍的数据压缩对图像通信技术是一个极大的推动,但按经典压缩编码方法是难以实现的.随着感知生理—心理学的发展,人们越来越清楚地认识到视觉感知是一种宏观认识过程,人的视觉感知特点与统计意义上的信息分布有时并不完全一致,统计上需要许多信息量才能表征的某些特征对视觉感知也许并不重要.因此,从感知角度来说,详细表征这部分特征是不必要的.受此启发,人们从微观转向宏观去研究开发新的编码方法,并注重对感知特性的利用,小波编码、模型编码与分形编码等新一代编码技术自然就应运而生.

分形图像编码 (fractal image coding) 是 Bernsley 和 Sloan 于 1988 年提出的美国专利技术, 源于他们对迭代函数系统的研究, 对几幅图像的分形编码获得了难以置信的超高压缩比 (10000 : 1). 尽管事实证明这种方法是不实用的 (编码时间太长, 且需要人机交互, 对操作者有较高要求), 但它毕竟为图像压缩提供了一条与以往完全不同的新思路. 实际上, 目前的实用分形图像编码正是在此基础上发展起来的. 在分形编码实用化的研究中, Jacquin 迈出了实质性的一步, 在其发表于 IEEE 刊物的著名论文里提出了分形块编码 (Fractal Block Coding), 这是一种基于方块划分的计算机自动分形编码算法, 其理论基础被称为 PIFS (partitioned IFS). 分形块编码算法建立在图像局部自相似的基础上, 在最简情形下, 图像被分割成大小两类子块, 子图像互不重叠且覆盖整幅图像. 然后对每个小方块, 在图像中搜索与之最仿射相似的大方块, 这样每个小方块由与其匹配的大方块的仿射变换 (大小比例重定、旋转、反射与亮度变换) 来近似. 这些作用于大块的变换以分块方式定义一个作用于整幅图像上的分形变换, 其不动点逼近待编码图像. 这就给出了图像数据的一种自相似描述, 解码后的图像呈现出一定的自相似结构.

纵观大量分形图像编码文献, 在上述基本原理的框架内, 在提高编码质量和加快分形编码等方面, 许多新观点和大量改进算法被提出, 对它们进行准确的分类是困难的. 但总的来说, 大多数现有分形编码文献都是围绕下面的基本问题展开的, 或者说大多数分形编码方案的区别主要反映在下列几个方面:

(1) 图像分割. 尽管固定方块分割方案实现简单, 也有分割方案占有零信息量的优点 (即无需存储或传输分割信息), 但编码质量不理想, 因为方块尺寸必须事先指定且不依赖于待编码图像, 也没有利用图像内容, 不能自适应于不同的图像, 也不能自适应于同一图像的不同细节 (如飞行中的飞机照片, 飞机与蓝天的细节显然不同). 四叉树分割方案虽然有一定的图像适应性, 且描述四叉树分割的成本也很小, 但它对图像的适应性仍然是有限的. 因此, 研究比四叉树分割的图像适应性更强的自适应分割方案是一个重要的问题.

(2) 虚拟码本构成. 从分形图像编码的迭代函数系统观点来看, 这就是如何构造 D 块 (domain block) 池的问题. 与向量量化 (VQ) 编码一样, 合适的虚拟码本对编码时间和编码质量都有很大影响. 以固定方块分割为例, 增大虚拟码本的容量 (如以小步长生成 D 块池、同时考虑八个等距变换), 编码质量自然会提高, 但这必须以牺牲编码时间和压缩比为代价 —— 虚拟码本越大, 匹配搜索的范围越大, 编码时间自然越多, 同时也需要更多的比特数来指明最佳匹配块的位置. 在虚拟码本构成方面, 许多 VQ 码本构成策略被移植到分形图像编码中.

(3) 亮度变换类型. 亮度变换是指作用于码本块的变换, 基本分形图像编码的亮度变换仅仅实现亮度调整与亮度补偿, 即每个 R 块用码本块和常值亮度块的线性组合来编码 ($R \approx sD + o1$). 显然, 按这种方式构造的变换具有结构简单、计算方便的优点, 但是其编码能力是有限的. 没有理论结果显示这种选择就是最优的.