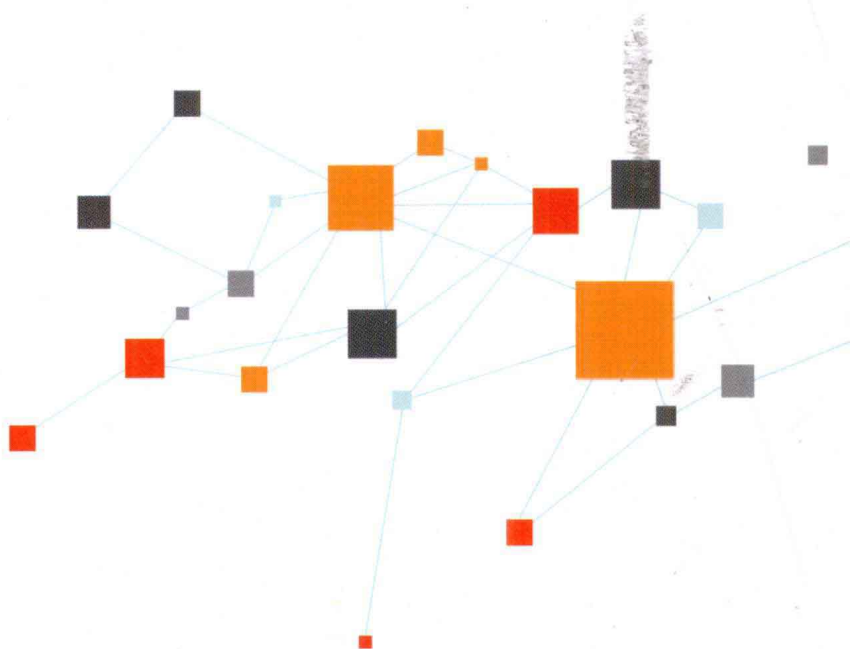


**Particle Swarm
Optimization**

微粒群优化算法

崔志华 曾建潮◎著



科学出版社

微粒群优化算法

Particle Swarm Optimization

崔志华 曾建潮 著

科学出版社

北 京

序

微粒群算法是群智能优化算法的典型代表，呈现在读者面前的《微粒群优化算法》一书通过分析微粒群算法的生物学特征，提炼形成了广义微粒群算法的概念，充实和发展了微粒群算法的研究范畴。该书从数学、控制、管理及生物学等方面，全面论述了改善微粒群算法性能的实现形式，结构严谨，研究深入，颇有创见。

微粒群算法作为一种典型的群集智能优化算法，模拟了鸟群觅食、鱼群游动等动物群体中各个体之间相互协作的社会行为。微粒群算法具有编程简单、运算速度快等特点，因此受到国内外研究人员的关注，提出之后迅速成为智能领域的一个新的研究热点，目前已有多本相关专著出版，该书的出版将进一步推进这一新兴领域的研究。

作为一本总结研究成果的学术专著，该书凝结了作者们的心血。他们善于把握研究方向，对学术前沿具有较强的敏感性，在智能计算领域取得了许多创新性研究成果，迄今已发表学术论文百余篇，出版专著 4 部，并多次获得科研成果奖励。他们以多项国家级和省部级基金项目为依托，在微粒群算法的理论与应用方面取得了重要研究进展。因此，我相信该书的出版对于推动微粒群算法的前沿研究与实际应用，进而促进智能科学的发展具有重要的学术价值和现实意义。

特此作序，并向读者推荐这本智能科学研究的优秀著作。

中国科学院研究员

史忠植

2011 年 1 月于北京

前 言

群智能计算源于对自然生物系统的社会智能交互行为的研究,并受到生物群体所表现的群体智能的启发,目前已涌现出多种群智能优化算法,微粒群算法就是其中的典型代表。微粒群算法具有运行速度快、参数较少、容易编程等特点,因此该算法迅速发展成为群智能计算领域的一个研究热点。

本书是作者近年来科研成果的总结,全书共有9章,可以分为以下4个部分:

(1) 微粒群算法基础,包括第1、第2两章。这部分介绍了微粒群算法的概念、基本方程以及相关社会行为分析等,并给出了一个较为详细的综述。

(2) 生物学角度的广义微粒群算法研究,包括第3~5章,分别从个体的觅食时间、觅食行为、觅食决策等方面提出了微粒群算法的改进模式。

(3) 控制角度的广义微粒群算法研究,包括第6~8章,分别从不同的控制角度改善了算法性能。

(4) 第9章利用适应值预测方式来提高算法性能,从而为解决适应值函数计算费时较长的应用问题提供了参考。

本书由两位作者共同拟定写作提纲并分头写作,其中,第7、第8两章由曾建潮撰写,其余部分(包括附录)由崔志华撰写,最后由崔志华对全书统校定稿。本书的完成得到了太原科技大学复杂系统与计算智能实验室的各位同仁的大力支持;在书稿出版过程中,科学出版社王丽平编辑提供了多方面的帮助,在此一并致以诚挚的谢意。

由衷感谢中国人工智能学会副理事长、中国科学院计算技术研究所史忠植研究员为本书作序。华中科技大学肖人彬教授对书稿内容提出了诸多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

本书研究工作得到国家自然科学基金项目“广义微粒群算法研究”(项目编号:60674104)及山西省青年科学基金项目“个性化微粒群算法的理论及结构优化研究”(项目编号:2009021017-2)的资助。上述基金项目的支持为作者及其团队创造了宽松的学术氛围和科研环境,在此谨向有关部门表示深深感谢并致以敬意。

由于作者水平有限,书中不妥和疏漏之处在所难免,恳请各位专家和广大读者不吝赐教。

崔志华 曾建潮

2011年2月于太原

目 录

序	
前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 智能计算概述	2
1.2.1 智能计算分类	2
1.2.2 智能计算原理	3
1.2.3 无免费午餐定理	4
1.3 常见的智能计算算法	5
1.3.1 人工神经网络	5
1.3.2 模糊逻辑	6
1.3.3 进化计算	7
1.3.4 人工免疫系统	8
1.4 人工生命	9
1.4.1 人工生命的概念	9
1.4.2 人工生命的基本思想	10
1.4.3 人工生命的研究内容	11
1.5 群体智能	12
1.5.1 人工动物	12
1.5.2 群体智能	15
1.5.3 常见的群体智能算法	16
1.6 本书的篇章结构	21
参考文献	22
第 2 章 微粒群算法概要	25
2.1 标准微粒群算法	25
2.1.1 生物学背景	25
2.1.2 基本概念及进化方程	26
2.1.3 算法流程	28
2.1.4 社会行为分析	28
2.1.5 与其他进化算法的比较	29

2.2 微粒群算法的系统学特征	30
2.2.1 微粒群算法的系统观点	30
2.2.2 算法的自组织性和涌现特性	30
2.2.3 微粒群算法的反馈控制机制	32
2.2.4 微粒群算法的分布式特点	33
2.3 参数选择策略	33
2.3.1 惯性权重	33
2.3.2 认知系数与社会系数	35
2.3.3 其他参数的调整	35
2.4 常见的改进微粒群算法	36
2.5 微粒群算法的行为及收敛性分析	37
2.6 小结	38
参考文献	39
第 3 章 微分进化微粒群算法	46
3.1 引言	46
3.2 微粒群算法的统一模型	46
3.2.1 统一模型	46
3.2.2 基于统一描述模型的 PSO 算法进化行为分析	47
3.2.3 收敛性分析	49
3.3 标准微粒群算法的数值算法分析	50
3.3.1 标准微粒群算法的微分方程模型	50
3.3.2 生物学背景	50
3.3.3 常见的微分方程数值方法介绍	51
3.4 微分进化微粒群算法	53
3.4.1 基于不同数值计算方法的微分进化微粒群算法	54
3.4.2 参数的选择	55
3.4.3 绝对稳定性	56
3.4.4 步长 h 的选择方式	57
3.4.5 算法流程	60
3.4.6 实例仿真	60
3.5 小结	62
参考文献	63
第 4 章 模拟觅食行为的微粒群算法	65
4.1 最优觅食微粒群算法	65
4.1.1 最优觅食理论	65

4.1.2	速度更新方程	66
4.1.3	基于几何速度稳定性的参数选择	67
4.1.4	仿真结果	69
4.2	食物引导的微粒群算法	70
4.2.1	内部饥饿函数	70
4.2.2	算法思想	71
4.2.3	进化方程构造	71
4.2.4	速度变异策略	72
4.2.5	算法步骤	72
4.2.6	实例仿真	73
4.3	风险效益微粒群算法	76
4.3.1	生物学基础	76
4.3.2	进化方程	76
4.3.3	数值仿真	77
4.4	小结	78
	参考文献	78
第 5 章	基于决策思想的微粒群算法	81
5.1	引言	81
5.2	惯性权重的个性化选择策略	82
5.2.1	类繁殖池策略	83
5.2.2	类 FUSS 策略	84
5.2.3	类锦标赛策略	84
5.2.4	基于混沌思想的变异策略	85
5.2.5	随机变异策略	86
5.2.6	数值仿真	86
5.3	利用个体决策历史信息的微粒群算法	88
5.3.1	个体决策介绍	88
5.3.2	利用个体决策历史信息的微粒群算法	90
5.3.3	数值仿真	94
5.3.4	基于小世界模型的个体决策微粒群算法	95
5.4	在非线性方程组求解的应用	100
5.4.1	非线性方程组及其等价优化模型	101
5.4.2	仿真实验	102
5.5	小结	103
	参考文献	104

第 6 章 带控制器的微粒群算法	108
6.1 引言	108
6.2 标准微粒群算法的控制理论分析	109
6.3 积分控制微粒群算法	110
6.3.1 积分控制微粒群算法的进化方程	110
6.3.2 稳定性分析	112
6.3.3 参数选择	113
6.3.4 ICPSO 算法流程	113
6.4 PID 控制微粒群算法	114
6.4.1 PID 控制微粒群算法的进化方程	114
6.4.2 基于支撑集理论的分析	115
6.4.3 基于稳定性理论的分析	121
6.4.4 参数选择	122
6.4.5 数值优化仿真	124
6.5 带控制器 PSO 算法在混沌系统控制中的应用	126
6.5.1 混沌系统的控制问题描述	126
6.5.2 混沌系统控制的微粒群算法求解	127
6.6 小结	127
参考文献	128
第 7 章 基于多样性控制的自组织微粒群算法	131
7.1 引言	131
7.2 自组织微粒群算法	132
7.2.1 群体多样性测度	132
7.2.2 多样性参考输入的确定	134
7.2.3 多样性控制器的设计	135
7.2.4 仿真实验与结果分析	136
7.3 自组织微粒算法在约束布局优化中的应用	138
7.3.1 约束布局优化问题	138
7.3.2 求解约束布局优化问题的自组织微粒群算法	139
7.3.3 实例应用及结果分析	140
7.4 小结	141
参考文献	142
第 8 章 基于知识的协同微粒群算法	144
8.1 引言	144
8.2 基于知识的协同微粒群算法	146

8.2.1 基本概念	146
8.2.2 KCPSO 的模型结构	146
8.2.3 知识集的定义	147
8.2.4 KCPSO 的行为控制	151
8.2.5 KCPSO 算法的流程	153
8.3 算法的收敛性分析	153
8.3.1 随机优化算法全局和局部收敛的判据	154
8.3.2 KCPSO 收敛性	155
8.4 仿真实验与分析	159
8.5 小结	160
参考文献	161
第 9 章 微粒群算法的适应值预测策略	163
9.1 引言	163
9.2 常见的适应值预测方法	164
9.2.1 多项式模型	164
9.2.2 Kriging 模型	165
9.2.3 神经网络模型	166
9.2.4 支持向量机模型	166
9.3 基于适应值的加权平均预测	168
9.3.1 适应值预测策略	168
9.3.2 算法思想	168
9.3.3 两种预测公式	170
9.3.4 预测的比例讨论	172
9.3.5 算法流程	172
9.3.6 基于适应值预测的随机期望值模型求解	173
9.4 基于可信度的预测	175
9.4.1 可信度介绍	175
9.4.2 基于式 (9.19) 的可信度预测	176
9.4.3 基于式 (9.20) 的可信度预测	178
9.4.4 预测个体的比例分析	180
9.4.5 基于适应值预测的随机机会约束规划求解	181
9.5 小结	183
参考文献	183
附录 A 微粒群算法及群体智能的图书与特刊	186
附录 B 典型测试函数	188
附录 C 标准微粒群算法的 Matlab 程序源代码	200

插图

图 1.1	智能计算分类	3
图 1.2	分离规则	13
图 1.3	对准规则	14
图 1.4	内聚规则	14
图 1.5	三维空间中的视觉扫描	18
图 1.6	拟态物理学优化算法	20
图 1.7	本书的篇章结构	21
图 3.1	300 维下 3 个 DPSO 算法的动态性能比较	61
图 3.2	300 维下 4 个算法的动态性能比较	62
图 4.1	内部饥饿函数曲线图	71
图 4.2	300 维下 FGPSO 与其他算法的动态性能比较	75
图 5.1	鱼群游动示意图	82
图 5.2	300 维下几个算法的动态性能比较	94
图 5.3	常见的邻域结构模型	96
图 5.4	Square 拓扑及展开图	96
图 5.5	复杂系统范例: 万维网	98
图 5.6	WS 小世界模型演化	98
图 5.7	NW 小世界模型演化	99
图 6.1	标准 PSO 算法的系统结构图	110
图 6.2	带控制器 PSO 算法的系统结构图	110
图 7.1	自组织微粒群算法模型	132
图 7.2	多样性参考输入对算法动态性能的影响	137
图 7.3	不同算法优化 F_{21} 函数的动态性能	137
图 7.4	旋转隔板上圆形待布物布局示意图	138
图 7.5	算法 SOPSO 布局结果示意图	141
图 8.1	KCPSO 算法的模型结构	147
图 9.1	智能优化算法与适应值函数说明图	163
图 9.2	适应值预测策略说明图	164
图 9.3	BP 神经网络结构示意图	166

插 表

表 3.1	不同数值算法的局部截断误差的阶	53
表 4.1	300 维算法性能比较	69
表 4.2	FGPSO 的加速度常数设置	73
表 4.3	$U_{10}(10^8)$ 设计表	74
表 4.4	10 次实验的结果	74
表 4.5	300 维算法性能比较	78
表 5.1	30 维算法性能比较	87
表 5.2	方程组 1 的性能比较	103
表 5.3	方程组 2 的性能比较	103
表 5.4	方程组 3 的性能比较	103
表 6.1	30 维算法性能比较	124
表 6.2	100 维算法性能比较	125
表 6.3	三种算法在误差为 0.01 的预测结果比较	127
表 7.1	40 个待布圆数据	140
表 7.2	算法在 40 个待布圆布局中的约束性能	141
表 8.1	三种算法在测试函数上的优化结果	160
表 9.1	随机期望值模型的 PSO 预测算法求解	174
表 9.2	随机机会约束规划的 PSO 算法求解	182
表 B.1	函数 Kowalik Function 的参数	191
表 B.2	Hartman Family 19	192
表 B.3	Hartman Family 20	193

第1章 绪 论

1.1 问题的提出

无论是在社会生产、经济活动,还是科学研究、工程应用等领域,都存在着各种各样的问题,其中许多复杂问题均包含或等价于特定的优化问题。因此,人们一直在不懈地探求着解决各种优化问题的有效优化技术。

优化技术是一种以数学为基础的古老课题。所谓最优化^[1],就是在众多方案中寻找最优方案,即在满足一定的约束条件下,寻找一组参数值,以使某些最优性度量得到满足,或者使系统的某些性能指标达到最大或最小。从经济意义上来说,最优化方法是在一定的人力、物力和财力资源条件下,如何使经济效益(如产值、利润)达到最大,或者在完成规定的生产或经济任务下,如何使投入的人力、物力和财力等资源最少。

最优化问题根据其中的变量、约束、目标、问题性质、时间因素和函数关系等不同情况,可分为多种类型:从变量个数上,可分为单变量与多变量问题;从变量性质上,可分为连续变量与离散变量问题;从约束情况上,可分为无约束优化问题与有约束优化问题;从极值个数上,可以分为单峰优化问题与多峰优化问题;从目标个数上,可分为单目标问题与多目标优化问题;从函数关系上,可分为线性优化问题与非线性优化问题;从问题性质上,可分为确定性优化问题、随机性优化问题与模糊性优化问题;从时间上,可分为静态优化问题与动态优化问题等。

常见的优化方法可分为确定性算法及随机算法。确定性算法一般是从一个给定的初始点开始,依据一定的方法寻找下一个解,使得目标函数得到改善,直至满足某种停止准则。

成熟的局部优化方法很多,如 Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shann(BFGS)方法、Davidon-Fletcher-Power(DFP)法、Newton-Raphson 法、共轭梯度法、Fletcher-Reeves 法、Polar-Ribiere 法等,还有专门为求解最小二乘问题而发展的 Levenberg-Marquardt(LM)算法。所有这些局部优化算法都对目标函数有一定的解析性质要求,如 Newton-Raphson 法要求目标函数连续可微,同时要求其一阶导数连续。

随着科学技术及工程应用的发展,研究人员提出了许多具有非线性、高维、不连续等特点的优化问题,但这些问题一般都难以用传统的确定性算法来解决。为了求解这些问题,学者们提出了随机优化思想,并设计出许多随机优化方法。而在这些算法中,智能计算^[2]作为一种创建计算智能系统的新颖方法,越来越引起人们的

关注;同时,随着各类智能算法在不同应用领域取得的成功应用,智能计算已成为当前研究的热点领域,形成了众多的发展方向^[3]。它通过借鉴仿生学思想,利用计算机模拟和再现生物的学习性、适应性等智能行为,并用于改造自然的工程实践。

智能计算方法拓展了传统计算模式。与传统数学方法相比,智能计算方法在进行问题求解时,其最大特点是不需要建立关于问题本身的精确(数学或逻辑)模型,一般也不依赖于知识表示(模糊逻辑推理除外),而是在信号或数据层直接对输入信息进行处理,非常适合于处理那些难以建立形式化模型、使用传统技术难以有效求解,甚至根本不能解决的问题。因此,智能计算方法为各种问题,尤其是复杂问题的求解提供了一种新颖的途径,显示出强大的生命力和广阔的发展前景。

1.2 智能计算概述

1.2.1 智能计算分类

根据模拟对象的不同,现有的计算智能可以分为两类:模拟物理化学规律所产生的计算智能算法和模拟生物界的智能行为所产生的计算智能算法,其中受自然界中的物理化学规律启发,一些学者提出了相应的计算智能算法,如模拟万有引力定律的中心力算法^[4]、模拟磁铁引力与斥力原理的类电磁机制算法^[5],以及模拟牛顿第二力学定律的拟态物理学全局优化算法^[6]等。而根据其模拟对象的数量不同,模拟生物界的智能行为所产生的计算智能算法又可分为基于生物种群模拟的方法和基于生物个体模拟的方法两类。基于种群模拟的方法是指模拟生物界群体的智能行为所产生的计算智能算法,基于个体模拟的方法是指模拟生物个体的智能行为所产生的计算智能算法。

基于种群模拟的计算智能包括进化计算^[7]、群体智能^[8]以及多 Agent 系统^[9]等,其中进化计算模拟了种群进化的方式,主要包括遗传算法^[10]、进化规划^[11]、进化策略等算法^[12]。而群体智能(包括蚁群算法^[13]、微粒群算法^[14]、人工蜜蜂算法^[15]、组织进化算法^[16]、搜索优化算法^[17]、视觉扫描优化算法^[18]、免疫计算^[19]等)以及多 Agent 系统则模拟了种群的协作模式。基于个体的模拟大致包括神经网络^[20]、支持向量机^[21]等,其中神经网络模拟人脑神经元的结构,支持向量机模拟人的模式识别能力(较为直观的模式如图 1.1 所示)。

上述各智能计算研究分支的产生过程均是相对独立的,并且不同程度上各自发展成为一个较宽广的研究领域,有着不同的计算模型与理论基础,可用来求解各种不同领域中的非线性复杂问题,尤其是现实世界中的各种工程优化问题。但是它们本质上具备共同的智能特征,因此,在发展过程中不可避免地会产生融合,从而形成混合智能计算模型。

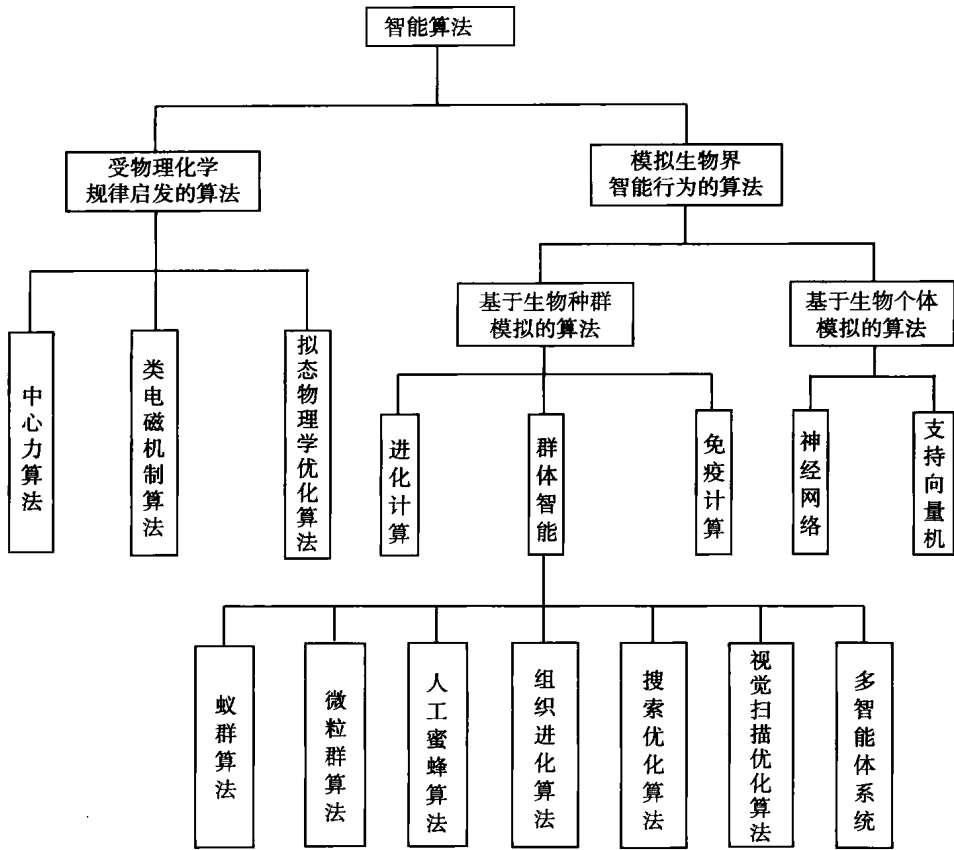


图 1.1 智能计算分类

1.2.2 智能计算原理

前已述及智能计算方法是借鉴和模拟生物结构和行为，乃至自然现象、过程及其原理的各种计算方法的总称。这里，借用了自然计算的有关概念，“自然”包括生物系统、生态系统和物质系统。智能计算方法在问题求解时具有下述两个显著特点：首先，智能计算方法主要不是采用数学计算的模式，而是借鉴和模拟自然现象、过程及其原理，利用的是生物智能、物质现象及其规律，并以数据处理、算法（计算模型）构造和参数控制为特征；其次，智能计算方法并不需要建立关于问题本身的精确（数学或逻辑）模型，而是利用计算过程中的启发式信息（如个体和群体的评价信息、计算进程的状态信息等）指导解的搜索，使之不断趋近最优解的区域，并逐步朝着最优解的方向靠近。因此，智能计算方法也属于启发式方法的范畴，乃是现代启发式方法，而以往基于数学计算的、包括动态规划法、分支定界法和 A* 算法等在内的启发式方法则是传统启发式方法。

智能计算方法的上述特点使其在问题求解方面与传统的数学方法相比具有以

下优越性：① 具有一般性、易于应用；② 求解速率快、易于获得满意的结果；③ 具有分布、并行的特点；④ 具有自组织、自适应和自学习的特性和能力；⑤ 具有灵活性和鲁棒性。

正因为如此，智能计算方法受到了世界各国学者和研究人员的普遍关注，得到了迅速发展，而且已经在包括复杂优化问题求解、智能控制、模式识别、网络安全、硬件设计、社会经济、生态环境等各个方面得到了应用，并取得了令人瞩目的成功。

智能计算方法是人工智能领域中的一个新的热点，它的兴起促进了人工智能的快速发展，充实了人工智能的研究内容。智能计算方法的蓬勃兴起具有重要而深远的意义，概括起来主要表现在以下两个方面：从宏观层面来说，智能计算方法为人工智能的发展开辟了一条新的道路。人们通过重新审视逐渐认识到自然界中普遍存在的各种生物系统、生态系统和物质系统蕴涵了巧夺天工的信息处理机制，智能行为不能用简单的数学模型来描述，人工智能“应该从生物学而不是物理学受到启示”。智能计算方法强调的是对生物结构和行为，乃至自然现象、过程及其原理的借鉴和模拟，它的出现开辟了人工智能领域的一个崭新分支——计算智能。另一方面，从操作层面上来说，智能计算方法为问题求解提供了一种不同于传统数学求解方法的途径，它采用新颖的计算求解模式，具有强大的问题求解能力，能够有效地处理和解决各种复杂问题，是问题求解的新范式。总的来讲，智能计算方法的研究旨在更加广泛、深入地挖掘和利用生物智能、物质现象及其规律，在改进和完善已有各种智能计算方法，从而促进它们广泛、深入发展的同时，继续探索 and 开发新的方法，使智能计算方法得到不断的丰富和发展。在智能计算方法的研究过程中，既要注意各种方法的纵向研究，包括原理基础（如仿生计算所依赖的仿生机理）、算法设计、理论分析和工程应用等方面的研究；也要加强各种方法的横向研究，即各种方法之间的对比和集成。因此，基于综合集成的观点建立和混合集成智能计算方法的开发，乃是智能计算方法的重要发展方向之一。

1.2.3 无免费午餐定理

Wolpert 和 Macready 于 1997 年在国际著名期刊 *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 上发表了题为 “No free lunch theorems for optimization” 的论文^[22]，提出并严格论证了所谓的无免费午餐定理，简称为 NFL 定理。这是一个有趣的研究成果，其结论令众多研究者感到意外，并在优化领域引发了一场持久争论。

NFL 定理可以简单地表述如下：对于所有可能的问题，任意给定两个算法 A ， A' ，如果 A 在某些问题上表现比 A' 好（差），那么 A 在其他问题上的表现就一定比 A' 差（好），也就是说，任意两个算法 A ， A' 对所有问题的平均表现度量

是一致的。

需要指出的是, NFL 定理是定义在有限搜索空间上的, 对于无限搜索空间并不能断言其结论一定成立。然而, 目前基于计算机仿真的各种优化算法都是在有限搜索空间进行的, 因此, NFL 定理适用于目前所有的优化算法。

既然所有的优化算法在所有可能的函数集上的平均性能都是等价的, 那么是否意味着将无法设计出比穷举搜索或完全随机搜索更好的算法? 是否研究优化算法所做的一切努力都是徒劳? 其实不然。NFL 定理的启示在于需要理性而客观地对待优化算法的研究: 当面对一个广泛且形式多样的函数类时, 不能期望寻找一个万能的优化算法; 对于所有函数类不存在万能的最佳算法, 但对于函数的子集, 该结论却未必成立。Christensen 和 Oppacher^[23] 曾提出了“可搜索函数”这一定义, 并对此类函数设计了一个通用算法, 证明了该算法在可搜索函数集上的性能优于随机搜索。

在现实世界中存在着大量问题, 这些现实问题是所有函数集的特殊子类, 人们认为它必定有解, 并需要找到它的解, 这正是研究的动机。基于以上分析, 可以得到优化算法研究的一些指导原则如下^[24]:

(1) 以算法为导向, 从算法到问题。对于每一个算法, 都有其适用和不适用的问题; 给定一个算法, 尽可能地通过理论分析, 给出其适用问题类的特征, 使其成为一个“指示性”算法。

(2) 以问题为导向, 从问题到算法。对于一个小的特定函数集, 或者一个特定的实际问题, 可以设计专门适用的算法去求解。

1.3 常见的智能计算算法

1.3.1 人工神经网络

早在 19 世纪末, 人类就发现大自然赋予自身的头脑具有许多绝妙之处。准确地说, 大脑是由大量的神经元经过复杂的相互联结而形成的一种高度复杂、具有并行处理非线性信息能力的系统。它使得人类能够快速地从外界环境中摄取大量信息, 并加以处理、储存, 及时地对环境的变化作出各种响应, 并不断向环境学习, 从而提高人类的适应能力。而这一切均依赖于大脑的物质基础——神经网络。

从那时起, 人类就梦想着能够从模仿人脑智能的角度出发, 去探寻新的信息表示、储存、处理方式, 从而构建一种全新的、接近人类智能的信息处理模型。1943 年, McCulloch 和 Pitts 根据心理学家 James 所描述的神经网络的基本原理^[25], 建立了第一个人工神经网络模型 (后被扩展为“认知模型”)^[26], 可用来解决简单的分类问题。

1969年, Minsky 和 Papert 在《认识论》(*Perceptions*)^[27]一书中指出, McCulloch 和 Pitts 所提出的认知模型无法解决经典的异或 (XOR-exclusive-or) 问题。这个结论曾一度使人工神经网络的研究陷入危机。实际上, 这一结论是极其片面的, 因为 Minsky 主要研究单隐含层的认知网络模型, 而简单的线性感知器功能又非常有限, 因而这一结论不应该对人工神经网络进行全面否定。

20 世纪 80 年代, Hopfield 和 Tank 将人工神经网络成功地应用于组合优化问题^[28], McClelland 和 Rumelhart 构造的多层反馈学习算法成功地解决了单隐含层认知网络的“异或问题”及其他的识别问题^[29], 这些突破重新掀起了人工神经网络的研究热潮。

具体来说, 人工神经网络是模拟人脑神经网络结构而形成的一种新型的智能信息处理系统, 系统由大量的神经元组成, 神经元之间经过复杂的联结从而构成信息网络。每一神经元均可视为一个单元处理器, 而整个系统则可以视为一种并行分布式处理器, 它可以通过学习获取知识并解决问题, 并且将知识分布储存在连接权中。因此, 人工神经网络具有较强的自适应性、学习能力和大规模并行计算能力, 能够近似实现实际工程中的各种非线性复杂系统, 可被视为“黑箱”的典范。目前人工神经网络已广泛应用于各种研究及实际工程领域中, 如函数拟合、数据分类、模式识别、信号处理、控制优化、预测建模、通信等领域。

1.3.2 模糊逻辑

现实世界中存在着诸多不确定性和不精确性问题, 如环境变化、干扰、信息的未知性和不完全性等。而人们在处理和表述这些不精确或不确定性问题时, 尽管其思维是粗略的, 语言是“暧昧”的, 却能够有效地对此类问题进行分析、推理和处理。也就是说, 人类思维本身就具有模糊推理的能力。随着计算科学和人工智能的发展, 人们逐渐意识到, 建立于精确数学、二值逻辑基础上的计算机, 并不能像人类那样灵活、准确地处理现实世界中各种不确定性和不精确性问题, 这势必成为人工智能实现的一大障碍; 要想借助计算机实现真正意义上的人工智能, 必须寻求有效的数学工具和技术方法, 让计算机具有模糊推理的能力, 以应对现实世界中普遍存在的不确定和不精确性问题。

为此, 控制论专家 Zadeh 于 1965 年在古典集合论的基础上提出了模糊集合 (fuzzy set) 这一概念^[30]。这种非精确定义的集合或类别在人的思考中起到重要作用, 反映了人脑思维的模糊性, 为描述人类不确定与不精确的思维逻辑及语言提供了数学工具。模糊技术以模糊逻辑为基础, 根据人类思维的模糊性, 对模糊信息进行量化, 并建立相应的模糊集隶属度函数, 从而实现由专家构造语言信息, 并将其转化为控制策略的一种仿人思维, 能够解决复杂而无法精确建模的控制问题, 具有很强的鲁棒性。模糊逻辑允许一个命题亦此亦彼, 存在着部分肯定和部分否定, 为