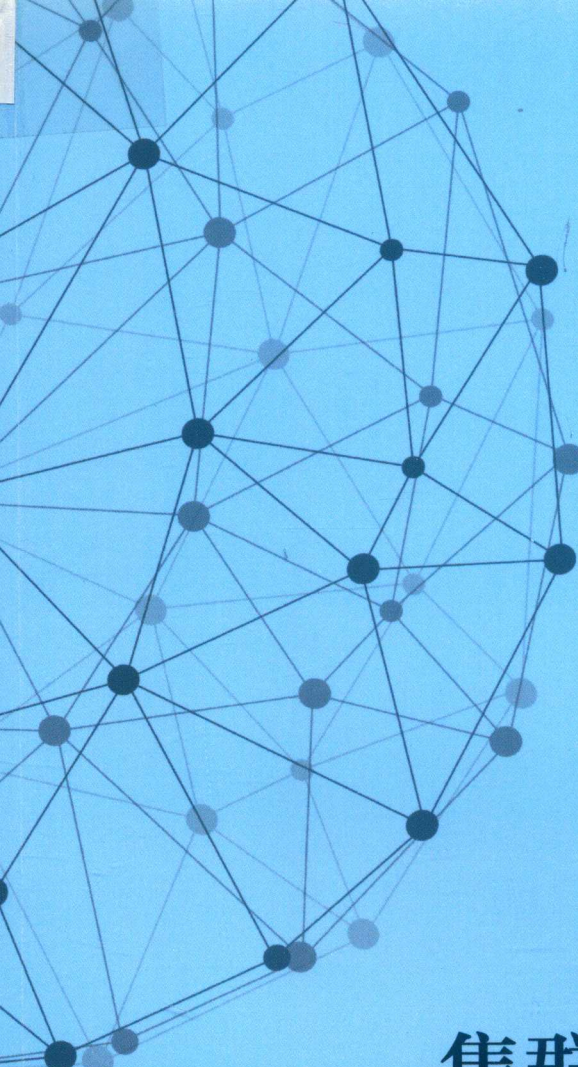


集群智能及其应用

Swarm Intelligence and Its Application

申 海 著



科学出版社

集群智能及其应用

申 海 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者在人工智能领域集群智能研究方向十多年研究成果的系统总结,在总结目前国内外该研究方向发展现状的基础上,介绍集群智能算法的改进、应用研究及新研究方向。改进方面包括:基于最优方向引导的菌群算法和基于生物生命周期的群搜索算法,以及基于单目标和多目标等Benchmark 优化问题的测试研究。应用研究方面包括:子群协作群搜索算法及机械结构优化设计问题的应用研究、两阶段遗传算法及车辆路径问题的应用研究,以及自主进化算法及频谱决策和频谱分配问题的应用研究。最后着重介绍集群智能的新研究方向——集群动力学优化算法。

本书可作为计算智能、集群智能等相关领域的研究者和开发者的参考用书,也可作为研究人工智能、复杂系统智能控制的学者和控制科学与工程专业的研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

集群智能及其应用/申海著. —北京:科学出版社, 2019.6
ISBN 978-7-03-054249-6

I. ①集… II. ①申… III. ①智能控制 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 211466 号

责任编辑:杨慎欣 常友丽 / 责任校对:王 瑞

责任印制:张欣秀 / 封面设计:无极书装

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年6月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:307 000

定价:99.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

集群智能源于自然界中生物系统存在的集群行为。在自然界中,生物群体中的每个个体都遵守一定的行为准则,当它们按照一定的准则相互作用时就会表现出复杂生物行为。有些昆虫/动物为了觅食、迁徙或繁殖等需要而临时或长期集结成群活动、生活,如蚁群、蜂群、鱼群、鸟群等。虽然这些群中个体行为简单、能力非常有限,但当它们协同工作时,却能够涌现出非常复杂的集体智能特征,例如表现出协调一致的运动行为、协作抵御外部威胁、协作采集食物、共同建造结构复杂而巧妙的巢穴等。生物集群涌现出来的这种复杂集群行为能力往往远超个体能力的简单叠加,人们将群体动物在一定的自组织机制上产生的这些复杂集体行为称为集群智能 (swarm intelligence, SI)。

集群智能是指具有简单智能的个体通过相互协作和组织表现出群体智能行为的特性,具有天然的分布式和自组织特征。它在没有集中控制且不提供全局模型的前提下表现出了明显的智能行为。现实世界的复杂自适应系统由大量简单的、具有自身目的与主动性的、积极的主体组成,通过主体之间、主体与环境的相互作用,表现出宏观系统中的分化、涌现等种种复杂的演化过程。群居性生物系统具有强大的觅食、打扫巢穴等功能正是群体协作的结果。因此,单个简单个体如何通过相互连接、信息交流与沟通、组织和自组织产生群体的智能行为是非常值得研究的课题。

集群智能的研究是理解生物和自然复杂性的一个途径,同时它对复杂系统智能控制的研究具有重要指导意义。借鉴生物系统涌现的智慧,把集群智能的无中心分布式控制策略用于大规模自治系统,可使系统具备无集中式控制、可直接和间接通信、个体自治、良好鲁棒性、自组织性和开放性等特点。另外,在系统规模较大的情况下,集群系统的分布式协作系统在效率和鲁棒性方面通常要比传统的集中式控制更具优势,可使系统全局行为对局部欺骗现象以及局部失效和个体故障等现象不敏感,这是传统控制所不具备的重要特性。因此,基于集群智能原理的复杂系统控制方法在工程上有重要应用价值。

集群智能作为一个新兴领域,自 20 世纪 80 年代出现以来,引起了多个学科领域研究人员的关注,现已成为人工智能学科的热点和前沿领域。随着大规模国民建设的发展,各种大型工程问题随之出现,这也需要应用新的研究成果解决新的工程问题。集群智能现已成为解决大规模复杂系统智能控制问题的颠覆性技

术。因此，本书的出版对国家建设具有重大的推动意义。本书是作者十多年来独有研究成果的总结，部分研究成果属国内外首创，学术意义重大。

本书共分为四个部分，在总结目前国内外集群智能研究方向发展现状的基础上，介绍集群智能算法的改进、应用研究及集群动力学优化算法这一新研究方向。

第一部分：首先介绍优化方法及其分类，传统优化方法的不足以及集群智能优化算法的特点、研究和应用现状及展望。目前集群智能的研究内容涵盖了自然生态系统各个层次，本部分在总结目前所有集群智能算法基础上，详细介绍主要集群智能算法的基本原理和实现步骤。

第二部分：介绍两个算法的原理：基于最优方向引导的菌群算法和生物生命周期群搜索算法，以及这两个算法基于无约束单目标、有约束单目标和多目标等 Benchmark 优化问题的测试研究。

第三部分：介绍集群智能算法在工程、管理和电子信息领域的应用研究。包括子群协作群搜索算法及机械结构优化设计问题的应用研究、两阶段遗传算法及车辆路径问题的应用研究，以及自主进化算法及认知无线电中频谱决策和频谱分配问题的应用研究。

第四部分：本部分继续深化集群智能优化决策方法的研究。重点介绍基于生物集群行为的动力学驱动机制和集群动力学模型、复杂生物系统的智能感知单元建模方法，以及两个集群动力学优化方法——种群规模自适应优化算法和基于觅食动力学的群智能优化算法。

本书获得国家自然科学基金青年科学基金（项目编号：61502318）和辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划（项目编号：LJQ2015104）资助，在此向国家自然科学基金委员会和辽宁省教育厅表示衷心的感谢！本书内容主要来源于作者读博士以来从事的相关工作，在此向作者的导师朱云龙研究员表示感谢。另外，书中的一些内容也引用和借鉴了本领域前辈学者的研究成果，在此向他们表示感谢。

鉴于作者水平及认识的局限性，书中不妥之处在所难免，欢迎各同行批评指正，相互交流。

申 海

2018年8月

目 录

前言

第一部分 集群智能优化算法概述

第 1 章 优化算法研究概述	3
1.1 最优化问题	3
1.2 最优化方法	3
1.2.1 确定性算法	5
1.2.2 随机性算法	5
1.2.3 集群智能优化算法	6
1.3 各类优化方法特点	7
1.3.1 传统优化方法特点	7
1.3.2 集群智能优化算法特点及优点	8
1.4 集群智能优化算法的研究、应用现状及展望	10
1.4.1 算法改进研究	10
1.4.2 算法应用现状	12
1.4.3 算法研究展望	13
参考文献	14
第 2 章 集群智能优化算法	16
2.1 进化计算	16
2.1.1 遗传算法	16
2.1.2 差分进化算法	18
2.1.3 文化算法	20
2.1.4 遗传编程	22
2.1.5 进化策略	22
2.2 集群智能	23
2.2.1 粒子群优化算法	24
2.2.2 蚁群优化算法	26
2.2.3 菌群优化算法	27

2.2.4	人工蜂群算法	30
2.2.5	萤火虫算法	33
2.2.6	人工鱼群算法	35
2.3	其他算法	36
2.3.1	神经网络	36
2.3.2	人工免疫系统	37
2.3.3	DNA 计算	38
2.3.4	膜计算	39
2.3.5	自组织迁移算法	39
2.4	集群智能算法集合	40
	参考文献	43

第二部分 算法改进研究

第 3 章	基于最优方向引导的菌群算法	47
3.1	细菌觅食优化算法	47
3.1.1	算法研究现状	47
3.1.2	算法应用现状	48
3.2	基于方向引导的菌群算法	49
3.2.1	群体觅食理论	49
3.2.2	细菌的群感应机制	50
3.2.3	基于方向引导的群感应机制	50
3.2.4	基于最优方向引导算法实现步骤	52
3.3	实验研究及讨论	53
3.3.1	单目标无约束测试函数	53
3.3.2	实验研究及讨论	58
	参考文献	61
第 4 章	生命周期群搜索算法	63
4.1	算法生物学基础	63
4.1.1	生命周期理论	63
4.1.2	混沌理论	67
4.2	基于生物生命周期群搜索算法	68
4.2.1	算法描述	68

4.2.2	算法实现步骤	71
4.2.3	个体运动轨迹分析	71
4.3	约束优化问题	75
4.3.1	定义及说明	75
4.3.2	约束优化问题难点	76
4.3.3	单目标约束标准测试函数	76
4.4	约束优化问题实验研究及讨论	80
4.4.1	参数设置	80
4.4.2	算法离线性能分析	81
4.4.3	算法在线性能分析	84
4.5	多目标优化问题	85
4.5.1	多目标优化问题描述	85
4.5.2	多目标无约束测试函数	86
4.5.3	评价方法	87
4.6	求解多目标问题的生命周期群搜索算法	88
4.6.1	多目标优化问题的主求解算法	88
4.6.2	基于非支配排序的生命周期群搜索算法	89
4.6.3	实验研究及讨论	91
	参考文献	93

第三部分 算法应用研究

第5章	机械结构优化设计研究	97
5.1	机械约束优化	97
5.1.1	Himmelblau's 函数	97
5.1.2	压力容器	97
5.1.3	压缩弹簧	98
5.1.4	焊接悬臂梁	99
5.2	标准群搜索算法	100
5.2.1	信息分享	100
5.2.2	视觉扫描	100
5.2.3	算法描述及实现步骤	101
5.3	子群协作群搜索算法	102
5.3.1	协作进化论	102

5.3.2 约束优化处理方法	103
5.3.3 子群协作群搜索算法原理	104
5.4 实验研究及讨论	106
参考文献	110
第6章 车辆路径问题应用研究	112
6.1 车辆路径问题	112
6.1.1 车辆路径问题介绍	112
6.1.2 问题复杂性	113
6.1.3 带容量约束的车辆路径问题数学模型	114
6.1.4 带时间窗车辆路径问题描述	115
6.2 求解 CVRP 的两阶段遗传算法	115
6.2.1 算法描述	115
6.2.2 算法实现步骤	119
6.2.3 算法时间复杂度分析	119
6.2.4 实验研究及讨论：小规模测试实例	120
6.2.5 实验研究及讨论：中等规模及较大规模测试实例	123
6.3 求解 VRPTW 的生命周期群搜索算法	125
6.3.1 算法实现步骤	125
6.3.2 实验研究及讨论	126
参考文献	129
第7章 认知无线电应用研究	130
7.1 认知无线电	130
7.2 认知引擎	132
7.2.1 认知引擎介绍	132
7.2.2 认知引擎 AICE	134
7.3 集群智能在认知无线电中的应用	136
7.3.1 频谱感知	136
7.3.2 频谱分配	137
7.3.3 频谱决策	138
7.4 优化问题 1：频谱分配	139
7.4.1 频谱分配模型	139
7.4.2 图论着色模型	139
7.4.3 频谱分配最优效益函数	141

7.5 优化问题 2: 频谱决策	141
7.5.1 最小化误码率函数	142
7.5.2 最小化能耗函数	143
7.5.3 最大化数据速率函数	143
7.5.4 最大化频谱利用率函数	144
7.5.5 最小化频谱干扰函数	144
7.5.6 多目标处理方法	145
7.6 自主进化计算	146
7.7 实验研究及讨论	146
7.7.1 频谱决策问题	146
7.7.2 频谱分配问题	150
参考文献	152

第四部分 集群动力学优化算法

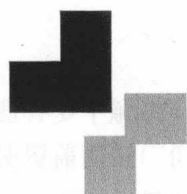
第 8 章 集群动力学模型	157
8.1 系统动力学	157
8.1.1 系统动力学原理	157
8.1.2 系统动力学模型	157
8.1.3 系统动力学建模步骤	158
8.2 种群动力学模型	159
8.2.1 单种群动力学模型	159
8.2.2 多种群动力学模型	160
8.3 动物集群行为动力学模型	162
8.3.1 Boid 模型	162
8.3.2 Vicsek 模型	164
8.4 复杂网络动力学	165
8.4.1 随机网络	165
8.4.2 小世界网络	166
8.4.3 无标度网络	166
8.4.4 布尔网络	167
8.5 “引力/斥力”模型	168
8.5.1 A/R 方法	169
8.5.2 拟态物理学方法	170
8.5.3 外部作用力	176

8.6 集群行为仿真模型及平台	177
8.6.1 仿真平台简介	178
8.6.2 Swarm 平台	179
8.6.3 元胞自动机	182
8.7 数学方程建模方法	185
8.7.1 拉格朗日法	185
8.7.2 欧拉法	185
参考文献	188
第9章 复杂生物系统建模	190
9.1 复杂-生物-控制	190
9.1.1 复杂适应系统	190
9.1.2 复杂生物系统	191
9.1.3 复杂系统与控制论	192
9.1.4 维纳控制论	193
9.1.5 智能感知单元	194
9.2 感知模型建模方法	195
9.3 感知范围	197
9.3.1 全局感知范围	197
9.3.2 有限感知范围	197
9.3.3 正太分布有限感知模型	199
9.4 集群动力学优化算法设计方法	200
参考文献	202
第10章 集群动力学优化算法举例	203
10.1 种群规模自适应优化算法	203
10.1.1 种群自适应增加/删除个体数目方法	203
10.1.2 外部环境影响	205
10.1.3 种群规模自适应粒子群优化算法描述	206
10.1.4 实验研究及讨论	206
10.2 基于生物觅食动力学的群智能优化算法	209
10.2.1 生物觅食动力学模型	209
10.2.2 生物觅食动力学优化算法原理	210
10.2.3 实验研究及讨论	211
参考文献	216

附录	217
附录 1 遗传算法源码	217
附录 2 差分进化算法源码	219
附录 3 文化算法源码	221
附录 4 粒子群优化算法源码	224
附录 5 蚁群优化算法源码	225
附录 6 菌群算法源码	228

第一部分

集群智能优化算法概述



工程技术与科学研究中的最优化求解问题十分普遍。在求解过程中，人们创造了许多优秀实用的算法。集群智能是一种新兴的优化技术，已成为越来越多研究者关注的焦点。集群智能是基于生物界中的自然现象或过程而提出的启发式计算模式，通过模拟社会性昆虫的各种群体行为，利用群体中个体之间的信息交互和合作实现寻优。这种计算模式具有通用、稳健、简单、高效以及便于并行处理等特点，被认为是对计算理论具有重大影响的关键理论。作为前沿性研究领域，集群智能已被成功应用于计算机、控制、先进设计和制造等多个领域，并在解决传统方法难以解决的各类复杂优化问题方面展现出良好的性能和应用前景。本部分综述集群智能算法的特点、研究和应用现状及展望，以及主要集群智能算法基本原理。

第 1 章 优化算法研究概述

1.1 最优化问题

在人们的日常生活以及工程应用领域,经常会出现一个问题有多个解决方案的情况,例如,某学校的课程表安排问题、电力部门如何布线使覆盖面最广但损耗最低问题、一个商人要在若干个城市旅行时确定一条最短的旅行线路问题等。总而言之,在满足一定约束条件下,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,这就是最优化问题。最优化问题形式如公式 (1.1) ^[1]所示:

$$(p) \begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } x \in \Omega \end{cases} \quad (1.1)$$

式中, $\Omega \in R^n$ 是可行集; f 是定义在 Ω 上的目标函数。如果存在 $x^* \in \Omega$, 使得 $\forall x \in \Omega, f(x^*) \leq f(x)$, 称 x^* 为优化问题式 (1.1) 的全局最优解, $f^* = f(x^*)$ 为全局最优值。

最优化问题是一个应用十分广泛的研究课题,长期以来,人们对最优化问题进行了大量的研究与探索,提出了许多优化方法。随着科学技术的不断发展,优化问题也变得异常复杂。由于传统的优化方法大多数是针对某些特定问题的,对搜索空间的要求比较严格,求解问题的依赖性较高,有的还需要被优化问题的导数信息等,因此,传统的优化方法虽已获得广泛的应用,但在面对一些复杂优化问题时却无能为力。因此,需要研究和探索新的优化思想和优化方法。

1.2 最优化方法

最优化方法是指解决最优化问题的方法,即求解问题最优解的规则方法或搜索过程。从古至今,国内外研究者提出了许许多多的最优化问题求解方法,实际应用也日益广泛。根据不同的分类标准,对最优化方法可以有不同的划分。根据算法中是否存在随机因素,最优化方法可分成两类,即确定性算法与随机性算法^[2],如图 1.1 所示。

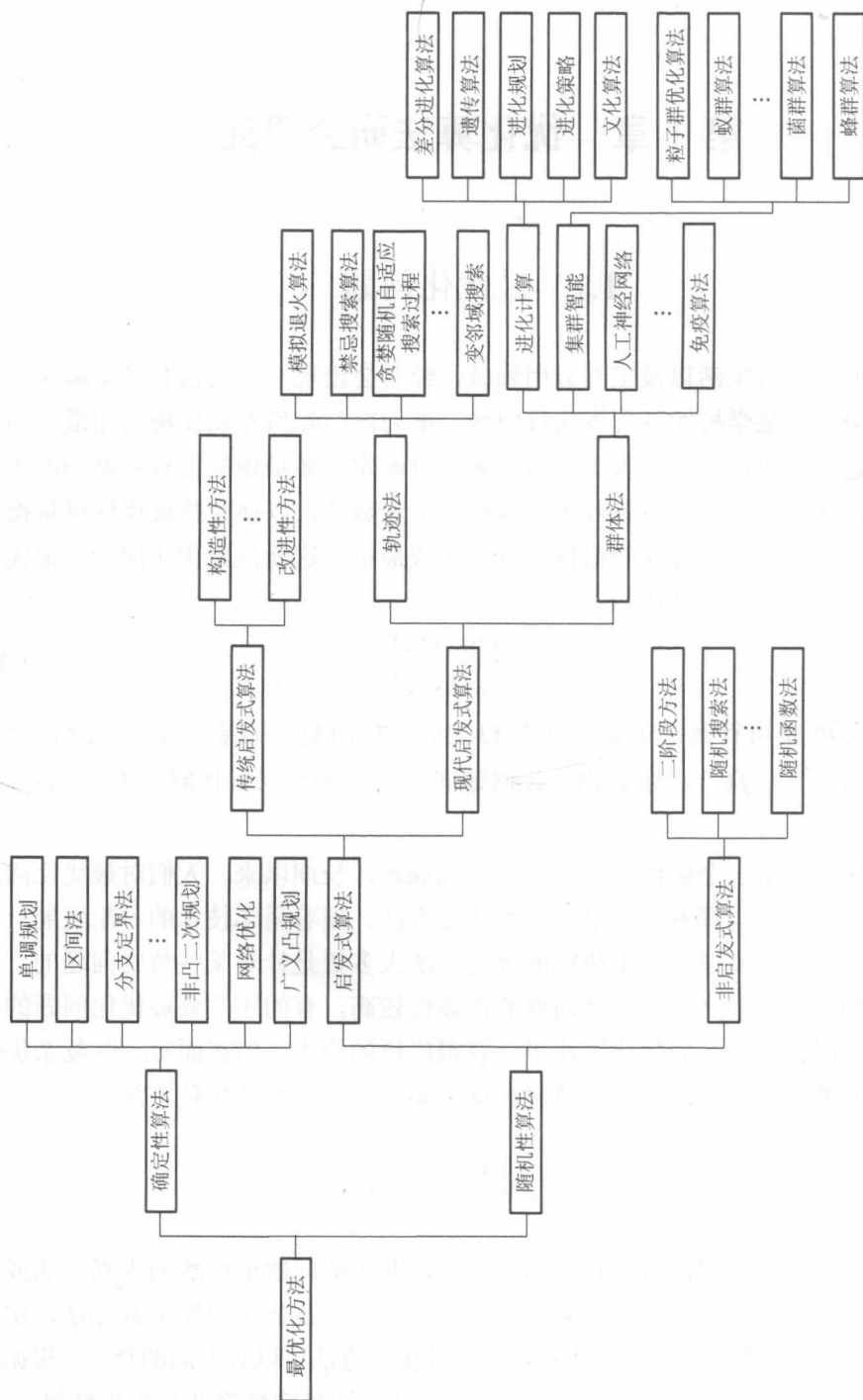


图 1.1 最优化方法分类

1.2.1 确定性算法

在对问题的求解过程中, 每个步骤的解都是一个确定值, 即给定一个特定的输入, 总是会产生相同的输出, 这类算法称为确定性算法。在 20 世纪 50 年代以前产生的优化算法基本都属于此类。部分确定性算法是针对某一类函数而设计的, 如单调规划^[3,4]、区间法^[5,6]、割平面法^[7]、分支定界法^[8]、填充函数法^[9]、积分水平集法^[10]、隧道法^[11]等。也有一些算法是从问题本身的角度着手, 针对特定的问题而设计的, 如非凸二次规划、广义凸规划、网络优化、Lipschitz 函数和 DC 规划^[12]等问题都有相应的优化算法^[13]。因此, 目前还没有一种广泛适用的确定性算法。

用确定性算法对实际问题寻找全局最优解是非常困难的。首先, 虽然算法计算速度快, 但随着问题的规模增大, 极小点数目增加, 算法容易陷入局部极小, 难以找到全局最优解。其次, 此类算法较多地利用了函数的性质, 对于那些性质较好的函数如凸函数、一维有理函数、L-连续函数、多项式函数等很有效, 但对复杂问题却难以求解。

1.2.2 随机性算法

随机性算法是指在对问题的求解过程中, 每个步骤所产生的解具有随机性, 而且各个解产生的概率也是未知的。按照算法中是否包含启发规则, 随机性算法分为启发式算法和非启发式算法。启发式算法是指一个基于直观或经验构造的算法, 在可接受的花费(指计算时间、占用空间)下给出待解决优化问题的可行解^[14,15]。启发式算法又可分为传统启发式算法和现代启发式算法。非启发式算法包括二阶段方法、随机搜索法^[16]和随机函数法^[17,18]等。

1. 传统启发式算法

传统启发式算法包括构造性方法和改进性方法等。针对某一特定问题而设计的方法称为构造性方法, 如 A* 方法^[19]就是针对静态网络中求解最短路径的方法。这类算法通常是一些简单的启发式策略, 大多数情况下生成解的质量较差, 因此目前常用于构造其他优化算法的初始解。

2. 现代启发式算法

现代启发式算法又称为元启发式算法或智能优化算法, 它是人类通过对自然