

混合智能算法 研究及应用

Hunhe Zhineng Suanfa Yanjiu Ji Yingyong

胡桂武 陈建超 胡劲松◎著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

混合智能算法 研究及应用

Hunhe Zhineng Suanfa Yanjiu Ji Yingyong

胡桂武 陈建超 胡劲松◎著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

图书在版编目(CIP)数据

混合智能算法研究及应用/胡桂武,陈建超,胡劲松著. —广州:华南理工大学出版社,2018. 12

ISBN 978 - 7 - 5623 - 5869 - 5

I. ①混… II. ①胡… ②陈… ③胡… III. ①计算机算法 - 研究 IV. ①TP301. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 288275 号

混合智能算法研究及应用

胡桂武 陈建超 胡劲松 著

出 版 人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail: scutc13@scut.edu.cn

营销部电话: 020 - 87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 欧建岸

印 刷 者: 虎彩印艺股份有限公司

开 本: 787mm × 960mm 1/16 印张: 13.25 字数: 330 千

版 次: 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

目 录

理论篇

第一章 绪论	3
1.1 优化问题的应用背景	3
1.2 优化问题分类	4
1.3 传统优化方法	5
1.4 现代优化算法	6
1.5 现代优化算法的应用	11
第二章 遗传算法分析	15
2.1 进化算法	15
2.2 遗传算法基本原理	15
2.3 遗传算法的理论难点及进展	17
2.4 GA 目前的发展方向	21
2.5 遗传算法的缺点	21
2.6 分析遗传算法的新理论	22
第三章 双程模拟退火	24
3.1 模拟退火算法概述	24
3.2 普通模拟退火算法	25
3.3 改进的模拟退火算法	26
3.4 双程模拟退火算法	27
第四章 无约束直接搜索法	30
4.1 随机搜索法	30
4.2 坐标轮换法	31
4.3 模式搜索法	32
4.4 Rosenbrock 旋转坐标法	33
4.5 单纯形法	33
第五章 排雷策略	36
5.1 局部极值问题	36
5.2 克服局部极值的机制	36
5.3 排雷策略	38
第六章 极值元素算法	39
6.1 极值组合原理	39

6.2	遗传算法的误区	42
6.3	基于极值组合原理分析遗传算法缺陷	43
6.4	极值元素算法	44
6.5	仿真对比	46
6.6	算法分析	52
第七章	双极值组合优化	54
7.1	双极值组合原理	54
7.2	区域定位作用与双极值排雷策略	56
7.3	解决本质最难优化问题	57
7.4	对称效应	58
7.5	仿真	59

应用篇

第八章	局部连续控制面模糊算法	63
8.1	数字单片机与模糊控制	63
8.2	数字单片机使用的模糊控制算法的不足	63
8.3	局部连续法	63
8.4	仿真研究及与其他方法比较	66
8.5	时变修正因子局部连续二级模糊控制器	69
第九章	自寻优模糊控制器	73
9.1	模糊规则的生成和优化	73
9.2	基于双程模拟退火的局部连续查表型自寻优模糊控制器	74
9.3	基于双程模拟退火的时变修正因子模糊控制器	76
9.4	对复杂对象的控制	79
第十章	模糊 CMAC 神经网的优化	84
10.1	进化算法优化神经网络	84
10.2	Tabu 算法优化神经网络	85
10.3	模拟退火优化神经网络	86
10.4	基于双程模拟退火算法的 CMAC 自寻优调节器	88
10.5	仿真研究及对比	88
10.6	基于遗传算法和极值元素法的 CMAC 神经网络	89
第十一章	基于最小生成树的多序列比对算法	90
11.1	引言	90
11.2	最小生成树	90

11.3 基于最小生成树的多序列比对算法	93
第十二章 基于极值的多序列比对求精算法	100
12.1 引言	100
12.2 直接搜索法	100
12.3 极值域组合	105
12.4 极值遗传算法	106
12.5 基于极值思想的多序列比对求精算法	107
12.6 算法分析	113
第十三章 基于单亲遗传算法的多序列比对	114
13.1 引言	114
13.2 遗传算法与单亲遗传算法	114
13.3 基于单亲遗传算法的多序列比对	116
13.4 算法分析	121
第十四章 基于遗传算法与星比对的多序列比对混合算法	123
14.1 引言	123
14.2 混合遗传算法	123
14.3 星比对算法	124
14.4 基于遗传算法与星比对的多序列比对混合算法	124
第十五章 基于词序列频率有向网的中文组词挖掘	129
15.1 概述	129
15.2 基于词序列频率有向网的组词识别算法	130
15.3 文本中的组词修正	139
15.4 组词识别在概念知识库构建中的重要意义	141
第十六章 基于海量文本的文本中概念挖掘	142
16.1 概念、概念词和上下文三者之间的关系	142
16.2 文本中概念	143
16.3 相关工作	145
16.4 本章的研究范畴和内容安排	146
16.5 从文本中挖掘文本中概念的算法讨论	147
16.6 数据模型	151
16.7 基于上下文组合树的概念提取算法	152
16.8 基于上下文关联性的概念挖掘算法	157
16.9 实验和比较	159
第十七章 基于海量文本的概念词（概念）动词语义关系挖掘	162
17.1 概念的语义关系概述	162

17.2	概念词语义关系与概念语义关系的联系与区别	163
17.3	相关研究	164
17.4	从文本中获取概念词之间的动词语义关系	165
17.5	建立概念之间的语义关系	168
17.6	实验与总结	169
第十八章	基于句子模式的概念词（概念）语法语义关系挖掘	172
18.1	概述	172
18.2	句子模式	173
18.3	基于句式的概念词语法语义关系提取的基本原理	174
18.4	相关工作	175
18.5	句子模式的挖掘算法	176
18.6	基于句式的概念词语法语义关系挖掘	181
18.7	建立概念之间的语法语义关系	183
18.8	实验与分析	183
参考文献		186

理论篇

第一章 绪 论

优化是在给定的环境条件下获取最好结果的行为,在任何工程系统的设计、施工和维护中,工程师必须在各个阶段采取很多工艺和管理方面的决策,所有这些决策的最终目的无非是使完成某一任务所必须做出的努力最小,或是使其效益最大。因为所必须做出的努力或所希望的效益在任何实际情况下均可表示为一些决策变量的函数,故优化可定义为寻找给定函数取极大值或极小值的条件的过程。

从传统的观点来看,寻优法也称为数学规划方法,是运筹学的一部分。运筹学是数学的一个分支,涉及用科学的方法和手段进行决策及确定最好和最优解的数学。

从现代的观点来看,优化问题的解决依赖于计算机强大的计算能力,其关键在于算法,其实质就是一种搜索,因此它是人工智能的关键技术之一,属于计算机科学的范畴。该领域是人工智能研究的一个热点,比如,有大量的学者从事遗传算法方面的研究。

因为不存在一种可以有效地求解所有优化问题的优化方法,故为了求解不同类型的优化问题,人们发展了很多优化方法。

1.1 优化问题的应用背景

不论对基础研究还是应用研究,优化问题都是一个普遍的问题,有广泛的应用背景。Schwefel 说:^[1]“很少有一本现代科学杂志,不论是工程、经济、管理、数学、物理乃至社会科学杂志,其中没有‘优化’这个关键词。如果概括所有的专家的观点,问题的解决可概述为从许多可能的事件状态中选择一个较好的或最好的。”实际优化问题形式多种多样。

从广义的角度来说,优化可用来解决任何工程问题,为了说明优化应用的广泛性,下面列出优化在不同工程学科的一些传统的典型应用:

- (1) 飞行器和宇航结构设计中,要求重量极小;
- (2) 求空间运载工具的最优轨迹;
- (3) 土木工程结构设计中,要求成本最低;
- (4) 水力资源系统设计中,要求效益最好;
- (5) 结构的最优塑性设计;
- (6) 机械部件的优化设计,加工条件的选择,节约材料成本最小;
- (7) 电力设备、电网的优化设计中,最低损耗问题;
- (8) 销售员在一次旅行中访问不同城市的最短路程问题,即 TSP 问题;
- (9) 控制系统的最优化问题。

优化问题也是计算机应用和工程中的重要问题,随着 IT 业的飞速发展,最新的热门应用有布线方案、调度问题、自适应控制,游戏规则、认知模型、运输问题、优化控制、通信网络、计算机网络的规划和优化设计,路由器、交换机的路径选择、最短延时、网络虚通道路由选择和带宽分配^[2]、数据库查询优化^[3]等。

1.2 优化问题分类

优化问题可用以下不同的方法进行分类：

(1)按是否有约束分类。根据问题中有无约束，任何优化问题可分为有约束和无约束两种。

(2)按设计变量性质分类。第一类问题为寻找一组设计参数值，使在满足一定约束条件下，这些参数的某规定函数达到极小值。第二类问题的目的是寻找一组设计参数，在于规定的约束条件下使目标函数极小。动态优化问题属于第二类问题。

(3)按问题的物理结构分类。优化问题可分为最优控制问题和非最优控制问题。一个最优控制问题通常可用两类变量来描述，即控制变量(设计及变量)和状态变量。控制变量调节系统从一阶段到另一阶段的演变，而状态变量描述系统在任一阶段的性态。最优控制问题是包含若干个阶段的数学规划问题，当中每一阶段都是由前一阶段按确定方式演变来的。问题是要求一组控制或设计变量，在满足于对状态变量和控制变量有关的一定约束条件下，使总的目标函数在整个阶段为极小。

(4)按所包含方程式的特性分类。即根据目标函数和约束函数表达式的特性来分。按这种方法，问题可分为线性规划、非线性规划、几何规划和二次规划。从计算的观点来说，这种分类法很有用，因为研究出的很多方法仅对某一类问题能有效地求解。

①非线性规划问题。目标函数和约束函数中的任意一个函数是非线性的，称为非线性规划问题。这是一类最普遍的规划问题，且所有其他问题均可看作非线性规划问题的特殊情况。

②几何规划问题。几何规划问题是目标函数和约束函数可表示成正多项式的规划问题。

③二次规划问题。目标函数为二次，约束为线性的非线性规划问题称为二次规划问题。

④线性规划问题。目标函数和全部约束函数都是设计变量的线性函数。

(5)按设计变量容许取值来分类。根据设计变量容许的取值，优化问题可分为整数规划问题和实数规划问题。

①整数规划。如优化问题中几个或全部设计变量只能限于取整数(或离散值)，这种问题称为整数规划问题。

②实数规划。若所有设计变量可取任何实数，这种问题称为实数规划问题。

(6)按包含变量确定性的性质分类。根据所包含变量的确定性的性质，优化问题可分为确定性规划问题和随机规划问题。某几个或全部参数(设计变量和/或预先给定的参数)是概率性的(不确定的或随机的)优化问题称为随机规划问题。反之为确定性问题。

(7)按函数的可分离性分类。按目标函数和约束函数的可分离性，优化问题可分为分离规划问题和不可分离规划问题。

(8)按目标函数的个数分类。可分为单目标和多目标规划问题。

1.3 传统优化方法

1. 古典微分法

古典微分法可用于求具有几个变量的函数的无约束极大值和极小值，这些方法假设函数对设计变量是二阶可微，且导数连续。对于具有等式约束的问题，常用 Lagrange 乘子法，但一般说来这种方法导致一组非线性联立方程组，可能难于求解。

2. 一维极小化方法

主要有以下几种：无约束搜索法、穷举搜索法、两分搜索法、Fibonacci 法、黄金分割法、二次插值法、三次插值法、直接求根法。

该方法的基本原理是按以下步骤产生一系列改进的近似解去逼近最优解：

- ①从一个初始点开始；
- ②找一个合适的方向，方向为大致指向极小点的方向；
- ③求沿合适方向移动的合适步长；
- ④求得新的近似点；
- ⑤检验该点是否为最优点，若是，停止程序，否则继续执行以上步骤。

3. 非线性规划之无约束优化方法

主要有随机搜索法、坐标轮换法、模式搜索法、Rosenbrock 旋转坐标法、单纯形法、最速下降法、共轭梯度法、拟牛顿法、变尺度法。

4. 非线性规划之有约束优化方法

主要有复合形法、割平面法、可行方向法、罚函数法、内点罚函数法、外点罚函数法。

5. 动态规划法

动态规划法是一种非常适用于多级决策问题的数学工具，它是由 Richard Bellman 在 20 世纪 50 年代提出的。动态规划技术在应用时是将一个多级决策问题表示为或者说分解为一系列单级决策问题。因此一个 N 个变量的问题是被表示为一系列 N 个单变量问题，并顺序求解。在大多数情况下解这 N 个子问题比解原问题要容易些。

6. 整数规划法

当优化问题中的所有变量都只允许取整数值时，此问题称为全整数规划。当仅某些变量限于取整数值时，则此优化问题称为混合整数规划。当一优化问题的所有问题的所有设计变量只允许取 0 和 1 时，此优化问题称为 0-1 规划。

整数规划法主要有割平面法、分支界面法、Balas 法、一般罚函数法。

7. 随机规划

随机和概率规划用来处理几个或全部参数使用随机(或概率)变量而不是确定量来描述的优化问题,根据问题中所包含的方程式的特征(被随机变量表示的方程),随机优化问题可分为随机线性规划和随机非线性规划问题。求解任何随机规划问题所用的基本思想是把随机问题转换为确定性问题。因而所形成的确定性问题可用线性、几何、动态及非线性规划等熟悉的方法求解。

1.4 现代优化算法

在现代管理科学、计算机科学、大规模集成电路设计及电子工程等科技领域中存在着大量组合优化问题。尽管许多经典优化算法解决了一些问题,但是其中很多问题至今没有找到有效的多项式时间算法。业已证明,许多问题是 NP 完全问题,对其求解的算法时间复杂度是指数阶的。在问题规模增大时,往往由于计算时间的限制,而丧失可行性。因而必须寻求其快速近似算法。

许多实际优化问题的目标函数都是非凸的,存在许多局部最优点,如何有效地求出一般非凸函数的全局最优点,仍然是一个尚未解决的难题。特别是对于大规模优化问题,寻找有效的搜索方法具有重要的意义。寻求全局优化问题的解的方法基本上可以分为两类:确定性方法和随机方法。当目标函数满足特定的条件时,确定性方法给出的搜索策略能够保证求得全局最优点,但是该方法往往要求目标函数满足特定的条件(如连续可微性、Hessian 矩阵存在、目标函数为凸函数等),而实际问题的目标函数往往不满足这些条件,因而限制了其应用范围;随机方法在搜索策略中引入随机因素,对目标函数一般不需要有特定的限制,适用范围比确定方法要广,该方法不能保证一定能够求得全局最优解,只能保证在概率意义下能够求得全局最优解。由于随机搜索方法的这些优点,使得该方法在实际中获得了广泛的应用。为了克服传统优化方法的不足,许多智能计算方法如遗传算法(GA)^[4]、进化规划(EP)^[5]、进化策略(ES)^[6]、模拟退火(SA)^[7]、禁忌搜索(Tabu Search,简称 TS)^[8]等日益受到重视。

1.4.1 模拟退火

1982 年, Kirkpatrick 等将退火思想引入组合优化领域,他首先意识到固体退火过程与组合优化问题之间存在的类似性, Metropolis 等对固体在恒定温度下达到热平衡过程的模拟也给他以启迪:应该把 Metropolis 准则引入到优化过程中来,最终提出一种解大规模组合优化问题,特别是 NP 完全组合优化问题的有效近似算法——模拟退火算法^[7]。它源于对固体退火过程的模拟,综合了统计物理学和局部搜索方法的思想,采用 Metropolis 接受准则,并用一组称为冷却进度表的参数控制算法进程,使算法在多项式时间里给出一个近似最优解,比传统的局部搜索算法优越。算法的基本思想是从一给定解开始的,使用一产生器和接受准则,不断把目前结构的解转变为邻近结构的解,接受准则允许目标函数在有限范围内变坏,它由一控制参数 t 决定,其作用类似于物理过程中的温度 T ,对于控制参数 t 的每一取值,算法持续进行“产生新解——判断——接受或舍弃”的迭代过程,对应着

固体在某一恒定温度下趋于热平衡的过程。经过大量的解变换后,可以求得给定控制参数 t 值时组合优化问题的相对最优解。然后减小控制参数 t 的值,重复执行上述迭代过程。当控制参数逐渐减小并趋于零时,系统亦越来越趋于平衡状态,最后系统状态对应于组合优化问题的整体最优解。该过程也称冷却过程。由于固体退火必须“徐徐”降温,才能使固体在每一温度下都达到热平衡,最终趋于平衡状态,因此,控制参数的值必须缓慢衰减,才能确保模拟退火算法最终趋于组合优化问题的整体最优解。

1.4.2 Tabu 算法

Tabu 算法即搜索(Tabu Search, 简称 TS)、禁忌搜索,是一种亚启发式搜索技术^[9],它通过禁止邻域中的某些移动从而跳出局部最优点,防止循环(跳出后又返回)。或者说,在迭代进行过程中,邻域是可变的,目的是防止循环;同时“遗忘”又使得这些禁止是弱禁止,即在一定的时间之后这些禁止将失效。最终完成全局优化之目的。

我们知道,著名的模拟退火算法是模拟统计物理中晶体的降温过程完成全局优化,而 Tabu 搜索算法是一种完全不同的思路,它设法模拟人的思维过程,在这个意义上,TS 可看作是一种智能搜索技术。TS 技术是通过几个简单的基本要素(Ingredient)的组合构成的。这几个基本要素包括邻域、Tabu 表(List)及评价函数。在这里,邻域与一般的优化技术中的定义是一致的,不再赘述。Tabu 表是一个或数个数据序列,是对先前的数步搜索所做的记录,记录的方式是很多的,记录的长度也是可变的,选取的好坏直接影响算法的效率。而评价函数通常就是问题的目标函数或它的某种变换形式,用于对一个移动做出评价。由 Tabu 表和评价函数可以构造一种 Tabu 条件:不在 Tabu 表中,或者尽管在 Tabu 表中但评价函数改善。

TS 技术简言之就是在邻域中搜索评价函数的极小点,若该点满足 Tabu 条件则接受,否则拒绝,直至迭代终止。TS 算法的具体步骤可以参考文献^[10]。我们知道,SA 算法的两个主要特征是采用了随机策略和退火策略,而正是这两个策略导致 SA 算法运算量往往较大,消耗大量机时。TS 是确定性算法,也不需要退火,因此具有较快的收敛速度,同时由于 3 个基本要素的共同作用,算法能同样有效地跳出局部极小点,具有 SA 相当的全局优化能力。

目前,Tabu 算法已广泛应用于组合优化的作业安排问题(Jobshop)^[11],旅行、商问题^[12]、图着色问题^[13]、神经网络学习^[10]以及聚类分析等之中。

Tabu 搜索的核心是记录搜索过程的短期和长期履历,以此对搜索过程加以控制,增强搜索的广泛性和集中性。

下面是 Tabu 搜索的算法框架:

①初始化:生成一初始解 X , 令暂定最优解 $\text{TempBest} = X$, 迭代步数 $k = 1$, Tabu 表 $T = \Phi$ 。

②生成候选解集合:从 X 的邻域中找出一定数量的解作为候选解集合 $N(X)$ 。

③搜索: I. 若 $N(X) = \Phi$, 转②重新生成候选集;否则,从 $N(X)$ 中找出最优解 Y 。

II. 若 $Y \in T$, 并且 Y 不满足激活条件,令 $N(X) = N(X) - \{Y\}$, 转 I; 否则,令 $X = Y$ 。若 Y 好于 TempBest , $\text{TempBest} = Y$ 。

④修改 Tabu 表:若满足终止条件,输出 TempBest ; 否则,令 $T = T \cup \{X\}$ (Tabu 表是

有一定长度的先入先出表), 令 $k = k + 1$, 转②。

在实际应用中, Tabu 搜索中的禁止集合与激活条件可以灵活地实现, 可以把各种先验知识和搜索的履历、解的性质等以禁止集合或其他形式记录下来, 从而控制以后的搜索过程。

1.4.3 遗传算法

遗传算法, 有的作者译为基因算法^[14], 是一种模拟自然选择和遗传机制的寻优程序, 它是 20 世纪 60 年代中期美国密歇根大学 J. Holland 教授首先提出^[15]并随后主要由他和他的—批学生发展起来的。把计算机科学与进化论撮合到一起的最初尝试是在 20 世纪 50 年代末 60 年代初。但由于过分依赖突变而不是配对来产生新的基因, 所以收效甚微。Holland 的功绩在于开发一种既可描述交换也可描述突变的编码技术, 这是最早的遗传算法, 文献中现在把它称为简单遗传算法 (Simple GA, SGA)。

一般的遗传算法由 4 个部分组成: 编码机制、控制参数、适应度函数、遗传算子。

GA 最直接的应用或许就是多元函数的优化问题。如果函数表达式是清楚的, 又具有良好的分析性质, 自然用不着 GA。但若所讨论的函数受到严重的噪声干扰而呈现出非常不规则的形状, 同时所求的也不一定非是精密的最大(小)值, 则 GA 就可以找到它的应用。

近年来, GA 在商业应用方面取得一系列重要成果。或许这也是它受到学术界之外的企业界、政府部门以及更广泛的社会阶层普遍重视的原因。GA 的商业应用五花八门, 覆盖面甚广, Goldberg 在 Comm. ACM 上的一篇专论^[16]较为详细地介绍了美国近年来的一些成果。例如, 通用电器的计算机辅助设计系统 Engeneous, 这是一个混合系统 (hybrid system), 采用了 GA 以及其他传统的优化技术作为寻优手段。Engeneous 已成功地应用于汽轮机设计, 并改善了新的波音 777 发动机的性能。美国新墨西哥州州立大学心理学系开发了一个 Faceprint 系统, 可根据目击者的印象通过计算机生成嫌疑犯的面貌。计算机在屏幕上显示出 20 种面孔, 目击者按十分制给这些面孔评分。在此基础上, GA 按通常的选择、交换和突变算子生成新的面孔。Faceprint 的效果很好, 已申报专利。同一个州的一家企业——预测公司 (Prediction Company) 则首先开发了一组用于金融交易的时间序列预测和交易工具, 其中 GA 起了重要作用。据说, 这一系统实际运行效果很好, 可以达到最好的交易员的水平, 引起银行界的关注。GA 在军事上的应用也有报道: 如用于红外线图像目标判别的休斯遗传程序系统 (Hughes genetic programming system), 效果很好, 以至准备把它固化成硬件。

今后几年, 可以预期, 扩广更加多样的应用领域, 其中包括各种 GA 程序设计环境的开发, 仍将是 GA 发展的主流。事实上这也是 21 世纪高新技术迅速发展带有规律性的特点, 即面向应用。

1.4.4 进化策略

进化策略是由德国的 I. Rechenberg 和 H. P. Schwefel 建立的^[5]。进化策略假设不论基因发生何种变化, 产生的结果(性状)总遵循零均值、某一方差的高斯分布。它与遗传算法的主要区别是没有交叉算子, 全部依靠设计各种不同的变异算子来产生后代。目前采用多父

体产生多后代的方法。用 $(\mu + \lambda)$ 进化策略或 (μ, λ) 进化策略表示。前者指 μ 个父体产生 λ 个后代，然后这 $\mu + \lambda$ 个个体参与竞争，并选择最优的 λ 个个体遗传到下一代。后者表示仅 λ 个后代遗传到下一代， μ 个父体全部被替换。

进化策略是模拟自然界生物进化过程的计算模型，是一种全局优化搜索方法。进化策略按父本参与生存竞争与否，可分为“+”规则进化策略和“ $\cdot$ ”规则进化策略，分别以 $(\mu + \lambda) - ES$ 和 $(\mu, \lambda) - ES (\lambda \geq \mu \geq 1)$ 来表示。进化策略的简单形式描述如下。

```
begin;
Generation: = 0;
初始化: 设定父本个数 $\mu$ , 并初始化父本;
适应度计算: 用适应度函数计算每个父本的适应度;
while( 终止条件不满足) do
变异: 通过对父本加高斯变异产生 $\lambda$ 个子本;
适应度再计算: 计算 $\lambda$ 个子本的适应度;
选择: if( 采用 $(\mu + \lambda) - ES$ )
    then:  $\mu$ 个父本和 $\lambda$ 个子本共同竞争, 选择适应度高的 $\mu$ 个个体作为新的父本;
    else: 仅 $\lambda$ 个子本竞争, 选择适应度高的 $\mu$ 个个体作为新的父本;
Generation: = Generation + 1;
end;
```

如何实现在复杂而庞大的空间中搜索最优也是进化策略实际应用中的难题之一。文献^[17]将经典的进化策略进行改进，以降低搜索空间复杂度，提高搜索效率，并节省存储容量。改进从变异方式、个体选择和策略形式 3 个层次进行。

1. 变异方式: 单分量变异

单分量变异法: 从个体中随机取一个分量，对此分量加高斯随机数发生一次变异，并计算局部适应度。如果在个体的所有分量加高斯随机数发生变异，由于各分量之间的相互影响，对较优分量的继承性不好。当个体分量较多时，搜索时间过长。研究表明，局部搜索比全局搜索更为有效^[18]，通常局部搜索采用传统的优化方法，如梯度下降法等，但对于目标函数不可微的问题实现起来较为困难。文献^[17]提出的单分量变异从降低搜索空间的复杂度出发，搜索随机地对各分量进行。当个体的各分量之间是有规律相关时，选择与此分量相关性较强的若干分量，组成一个“局部个体”。单点变异后，与此分量对应的“局部个体”受到较大的影响，忽略对其他分量的影响，计算“局部个体”的适应度（称为局部适应度），并以局部适应度作为个体是否被保留的判断条件。局部适应度的计算，可以有效地降低计算时间。

2. 个体选择: 优胜劣汰规则

个体的选择采用“优胜劣汰”规则，即要求子本的适应度高于或等于父本。子本的适应度高于父本，使得每一步变异都朝适应度增大的方向进行，避免了重索，加快了收敛速度。而且，通常 $(\mu + \lambda) - ES$ 是父本和子本共同参与生存竞争，同时要保存 $(\mu + \lambda)$ 个个体，采用“优胜劣汰”选择规则，则子本与父本的比较逐个进行，不需要同时存储所有的个

体,易于在 PC 机上实现,这相当于一种变 λ 的 $(\mu + \lambda) - ES$ 。

3. 策略形式:组合进化策略

组合进化策略:搜索过程采用 $(\mu + \lambda) - ES$ 和 $(\mu, \lambda) - ES$ 相结合的策略形式。

比较而言, $(\mu + \lambda) - ES$ 较好地继承了父本的优良特性,收敛性好,但易于陷入局部最优; $(\mu, \lambda) - ES$ 易于跳出局部最优,但由于放弃了上一代的结果,所以收敛较慢。采取 $(\mu + \lambda) - ES$ 和 $(\mu, \lambda) - ES$ 相结合的策略,以 $(\mu + \lambda) - ES$ 快速逼近最优,当判断适应度函数陷入了局部最优时,则下一代采用 $(\mu, \lambda) - ES(\mu = \lambda)$,重新产生初始个体,以此来跳出局部最小,这类似于自然界的毁灭性“大灾难”,然后继续 $(\mu + \lambda) - ES$ 进化。

在理论上,经过无穷多次搜索,进化策略可以找到全局最优解。而在实际应用中,当搜索空间过于庞大时,无法穷举所有局部最优,只能在若干个局部最优解中选择最佳者作为满意解。组合进化策略就是基于这种思想,在若干次“大灾难”之后,选择适应度最佳的一个个体作为满意解。

1.4.5 进化规划

进化规划^[6]是 Fogel L. J. 在 20 世纪 60 年代中期创建的,它利用有限自动机的原理产生后代。其基本算法与进化策略相似,也仅有变异算子。值得一提的是进化策略和进化规划均直接采用浮点数而不是二进制编码。虽然上述方法在一些实现细节上有所不同,但概念上接近一致。进化算法在运用诸如基因突变、基因重组、基因选择等进化算子的基础上,建立了一种与生物进化相似的非常通用和有力的搜索寻优及学习方法。

进化规划用于函数优化问题一般包括如下步骤:

- ①初始化:在搜索空间中随机产生 N 个可行解构成的初始种群(N 为种群规模);
- ②变异过程:采用高斯变异算子,把个体 X 的每个分量作一随机扰动(均值为 0,方差为 σ 的高斯随机变量),产生新的个体 $X' = X + N(0, \sigma)$;
- ③选择过程:根据目标函数,确定父代和子代对应个体的性能优劣,把性能较好的个体保留下来,作为新一代的个体;
- ④终止条件判定:判定中止条件是否满足,如果满足,则结束,否则,重复以上过程。

标准进化规划算法仅给出了用进化规划算法求解优化问题的一般过程。在进化过程中,结合搜索过程中所积累的知识,将有助于改善解的性能。

遗传算法、进化规划和进化策略这三类进化算法都是基于对自然进化的模拟,思想来源于达尔文“适者生存”的理论,其区别在于产生下一代群体的规则不同,但下一代群体的产生又都是仅依赖于其父代。

1.4.6 神经网络

神经网络是由大量处理单元组成的非线性、自适应、自组织系统,它是在现代神经科学研究成果的基础上提出的,试图模拟神经网络加工、记忆信息的方式,设计一种新的机器,使之具有人脑风格的信息处理能力。

20 世纪 80 年代, Hopfield 提出一个连续时间神经网络模型(简称 HNN 模型),它是高