

ZHENGTI FENBU
YOUHUA SUANFA
YANJIU JI YINGYONG

整体分布优化算法 研究及应用



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

整体分布优化算法研究及应用

余炳辉 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容简介

本书首先对具有代表性的智能优化算法进行了全面回顾和总结,以往对智能算法研究主要集中在采取措施提高算法性能或将算法应用在自己的研究领域上,比较而言,对算法本身的研究则严重不足,尤其对优化机理研究进展缓慢,针对这种情况,本书以粒子群优化为例,通过系统试验的方法来探究其优化机理。依据实验研究的结论,从全新的角度,提出一种新的智能优化算法——整体分布优化算法,并通过试验的方法获得整体分布优化算法的最佳参数组合、最佳分布形式、最佳迭代策略,确定算法的最终形式,并与遗传算法和粒子群优化算法比较,证明其有效性。同时,将整体分布优化算法应用于水火电力系统短期发电计划,进一步验证整体分布优化算法的有效性。最后总结了整体分布优化算法优缺点,并指出其将来的研究方向。

图书在版编目(CIP)数据

整体分布优化算法研究及应用 / 余炳辉著. — 成都:
西南交通大学出版社, 2012.12
ISBN 978-7-5643-2122-2

I. ①整… II. ①余… III. ①最优化算法 - 研究
IV. ①0242.23

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 307062 号

整体分布优化算法研究及应用

余炳辉 著

*

责任编辑 黄淑文

特邀编辑 黄庆斌

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031)

发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 148 mm × 210 mm 印张: 6.5

字数: 181 千字

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-2122-2

定价: 20.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

在对自然中群居的昆虫，鱼类，鸟类的长期观察中发现，这些种群中个体的行为是简单的，能力是有限的，但当它们一起协同工作时，整体上却呈现出非常复杂的行为特征，具有高度的智能型，能够巧妙地解决一些如觅食，御敌等非常艰巨的任务，并且能获得当时条件下的最佳效果。

从二十世纪中期以来，科学家从自然现象中吸取灵感，提出了很多模仿自然中优化思想的优化算法，其中比较著名有遗传算法，模拟退火算法，粒子群优化算法，蚁群算法等，算法性能越来越好，实现手段越来越简单，而应用范围也不断扩大。特别是从二十世纪末到本世纪初，一个智能优化算法的分支群体智能优化算法发展逐渐达到壮大，新的算法不断提出：如人工鱼群算法，蜂群算法，猫群算法，混合蛙跳算法，细菌觅食算法等。这些算法的主要思想都是模仿群体生物中的个体简单行为，而使整体的种群具有较高的优化能力，这些算法的形式多样，都取得了较好的效果，而且在实际的工程问题中得到了广泛的应用，在最近二十年得到了很好的发展。但是与群体智能优化算法在工程应用中取得巨大成功形成鲜明对比的是对其优化机理的研究却始终处于停滞状态。对于一些基本问题：如个体的简单行为是如何演变为整个群体的优化功能的，个体的行为对整体群体的影响是怎样的，整体的优化功能是如何产生的，这些问题都没有得到令人信服的答案。

本书尝试用系统实验的方法以粒子群优化算法为例，从对每个个体行为产生的影响开始，到整个群体在每个个体行为下分布

形式的变化规律为止，对个体对整体的影响及在算法迭代中整体的变化规律做一次彻底的实验分析，以探究粒子群优化算法的优化机理。根据实验结果，对粒子群优化算法中迭代公式中每一项的作用都得到了清晰的解释，而且对于整个群体表现出来的优化作用给出客观的定性分析，并且得到了一些有用的结论。在此基础上，根据实验结果，直接从整个群体的角度出发，提出了一种新的智能优化算法：整体分布优化算法。在算法提出来的基础上，用实验的方法确定了该算法的基本结构，进行了参数优化，得到了该算法用于函数优化时的最终形式。之后用一个水火电力系统的短期调度问题进一步验证了算法的有效性。最后总结了整体分布优化算法的优缺点，并指出了今后研究发展的方向。

本书的主要特点是数据详实，图表丰富，保证了研究内容的真实性 and 可靠性；还有一个特点是在书中展示了一个新的智能优化算法的思想是如何产生的，以及一个新的算法从提出到完善，直到应用的整个过程，对于以后从事这方面研究的人员具有很好的借鉴作用。

在本书的写作过程中得到了洛阳理工学院张伟教授，李龙星教授，杜志强副教授的大力支持，在此表示深深的谢意；而在与王金文，张旦闻，方世杰，吴锐，谢光海，王磊，杨春荣等老师的交流中得到了很多有用的灵感与思想为本书增色不少，在此表示感谢；我的妻子楚海燕女士在本书的写作期间，主动承担了繁重的家务，在此表示感谢，道一声老婆辛苦了。

本人水平有限，书中缺点与不妥在所难免，欢迎广大读者予以指正，本人的电子邮箱：yubinghui0379@tom.com，读者有什么问题，可以通过此邮箱与作者取得联系。

作 者

2012 年 11 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 模拟退火算法	2
1.2 遗传算法	7
1.3 群体智能优化算法	12
1.4 智能优化算法的总结	42
1.5 本书的内容安排	43
第 2 章 粒子群优化算法试验研究	46
2.1 粒子群优化算法试验研究方案设计	46
2.2 静态试验	50
2.3 粒子群优化算法静态特性的探索	62
2.4 动态特性试验	66
2.5 动态特性试验总结	81
2.6 整个优化过程的描述	83
第 3 章 整体分布优化算法提出与改进	85
3.1 新智能优化算法的探索	85
3.2 整体分布优化算法的改进	98
第 4 章 整体分布优化算法的实现及性能比较	129
4.1 整体分布优化算法的最终形式	129
4.2 整体分布优化算法的具体实现	131
4.3 整体分布优化算法与遗传算法、粒子群优化算法的 性能比较	140

第 5 章	整体分布优化算法在水火电力系统 短期调度中的应用	149
5.1	水电系统短期经济运行的传统优化算法评述	150
5.2	水电系统短期经济运行的现代优化算法评述	152
5.3	水火电力系统的数学模型	160
5.4	求解方法	162
5.5	仿真计算	165
第 6 章	整体分布优化算法的总结与展望	171
6.1	总 结	171
6.2	展 望	173
附录	求解函数优化问题的整体分布优化算法源程序	175
参考文献		184

第 1 章 绪 论

在现实生活和工程领域中，通常有多套可行方案可供预选，而在不增加成本的情况下，如何找到一个可以进一步提高生产效率，产生更多效益的方案已经成为应用数学的一门专门学科，这就是优化技术。优化技术是以数学为基础，用于求解各种工程问题的应用技术。它已在诸多工程领域得到广泛推广和应用，如系统工程，函数优化，生产调度，组合优化，航空航天，交通运输等，而现在更是已经渗入到社会、政治、金融、科学、经济、工程技术各个领域，由于其能产生巨大的经济和社会效益，因此日益受到重视。相信随着计算机技术的发展，优化技术应用领域还在不断地扩大。

在对优化问题的初始研究中，通常是建立所研究优化问题的数学模型，然后利用所建数学模型的相关数学性质进行求解，同时提出了很多基于数学基础的优化技术，如共轭梯度法、最速下降法、拉格朗日乘子法、可行方向法等。然而，通过对实际工程问题的求解发现，实际的优化问题往往具有强非线性、复杂的约束条件、强随机性、甚至无法建模的特点，使得工程问题无法得到满意的答案。

随着计算机技术的发展和跨学科技术的融合，从 20 世纪中期开始，科学家开始挣脱传统经典算法的束缚，从生物进化，思维方法，觅食行为等自然现象中得到启发，按照某种规则或思想，构造最优方案的搜索方法或过程，其性能优越，这种新的优化技

术被称为智能优化算法。由于智能优化具有算法并行高效的优化性能，鲁棒性、通用性强，不需要建立具体的数学模型等特点，已广泛应用于解决计算机科学，运输问题，优化调度，组合优化，工程优化设计等实际问题。

经过半个多世纪的发展，智能优化算法已经发展成了种类繁多，形式多样，表现各异的一类算法，而且新的算法层出不穷，它们主要可以分为三大类：

(1) 通过模仿某种自然现象或者某种现象性质设计出来的优化算法。如模拟退火，混沌优化算法，神经网络优化算法等。

(2) 模仿生物进化过程中的行为设计的优化算法。如遗传算法，进化规划，进化策略等。

(3) 模仿生物群中个体的行为，而使整个种群具有优化能力，被称为群体智能优化算法。这类优化算法最近发展迅速，新的算法也不断涌现，主要有：粒子群优化算法，蚁群算法等。

下面将对智能优化算法进行整体的回顾，对典型的算法进行详细的介绍，并且从中总结出智能优化算法的发展趋势，在此基础上给出本书的研究思路和内容安排。

1.1 模拟退火算法

退火是将材料加热后再经特定速率冷却，目的是增大晶粒的体积，并且减少晶格中的缺陷。材料中的原子会停留在使内能有局部最小值的原来位置，加热使能量变大，原子会离开原来位置，而随机在其他位置中移动。退火冷却时速度较慢，使得原子有较多可能可以找到内能比原先更低的位置。整个过程可以分为加温过程、等温过程、冷却过程三个阶段。在这三个过程中，金属原子的状态分别如图 1.1 (a)、(b)、(c) 所示。

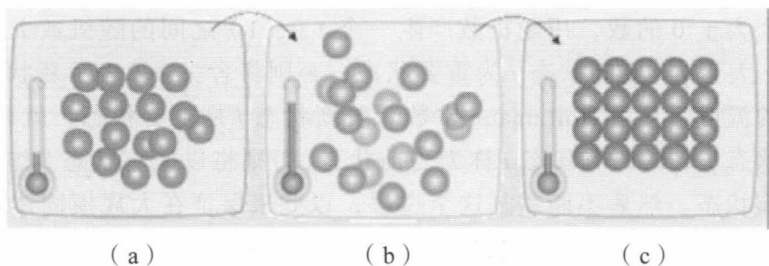


图 1.1 金属原子在不同阶段中的运动状态

由图 1.1 可以看出，在高温条件下，原子的能量较高，可以自由运动和重新排列。在低温条件下，粒子能量较低。如果从高温开始，非常缓慢地降温（这个过程称为退火），粒子就可以在每个温度下达到热平衡。当系统完全被冷却时，最终形成处于低能状态的晶体。

固体在恒定温度下达到热平衡的过程可以用 MonteCarlo 算法方法加以模拟，虽然该方法简单，但必须大量采样才能得到比较精确的结果，因而计算量很大。鉴于物理系统倾向于能量较低的状态，而热运动又妨碍它准确落到最低态的现象，采样时着重选取那些有重要贡献的状态则可较快达到较好的结果。因此，Metropolis 等在 1953 年提出了重要的采样法，即以概率接受新状态。

这个过程可以更加详细的描述如下：假定给定以粒子相对位置为表征的初始状态 i ，位置当前状态为固态，则物质在该状态下的能量表示为 $E(i)$ 。然后用扰动装置随机选择一个粒子并使该粒子的位置随机发生微小的扰动，以此来得到一个状态 j ，新状态 j 的能量可表示为 $E(j)$ 。如果 $E(j) < E(i)$ ，则新状态 j 即可以作为重要状态；反之，考虑导热运动对能量的影响，要根据固体所处该状态的概率来决定新状态是否作为重要状态，概率的计算公式为： $r = \exp\left(\frac{E(i) - E(j)}{kT}\right)$ ，其中 r 表示该状态的概率，

是个大于 0 的数，用随机数产生一个 $(0, 1)$ 之间的随机数 P ，若 r 大于 p ，则新状态 j 为重要状态，否则将舍去。 T 表示新状态下的温度。 K 为 Boltzmann 常数。若新状态 j 是重要状态，就以新状态 j 取代原有状态 i 称为当前状态，否则将以原有状态 i 作为当前状态。然后不断重复这个过程，以此来保证在大规模固体状态变换后，系统仍处于能量较低的平衡状态。

由 r 的计算公式可知，在高温状态下，可接受与当前状态能量差别较大的新状态作为重要状态，而在较低温度下只能接受与当前状态差别能量较小的新状态作为重要状态。这与实际生活中不同温度下热运动的影响完全一致。在温度趋近于 0 时，就不能接受任何 $E(j) > E(i)$ 的新状态了。

如果将优化中最小值类比为金属能量的最低状态，将最优解的坐标类比为金属离子的位置，那么优化中的搜索过程就可以类比为金属的退火过程，模拟退火就可以直接应用于优化算法的设计，其类比的对应见表 1.1。

表 1.1 模拟退火算法与物理退火过程的对应关系

模拟退火	物理退火
解	粒子状态
最优解	能量最低态
设定初温	熔解过程
采样过程	等温过程
控制参数的下降	冷却
目标函数	能量

模拟退火算法的整个流程描述如下：

(1) 初始化：初始温度 T (充分大)，初始解状态 S (是算法迭代的起点)，每个 T 值的迭代次数 L 。

(2) 对 $k = 1, \dots, L$ 做第 (3) 至第 6 步。

(3) 产生新解 S' 。

(4) 计算增量 $\Delta t' = C(S') - C(S)$ ，其中 $C(S)$ 为评价函数。

(5) 若 $\Delta t' < 0$ ，则接受 S' 作为新的当前解，否则以概率 $\exp(-\Delta t'/T)$ 接受 S' 作为新的当前解。

(6) 如果满足终止条件，则输出当前解作为最优解，结束程序。终止条件通常取为连续若干个新解都没有被接受时终止算法。

(7) T 逐渐减少，且 $T \rightarrow 0$ ，然后转第 (2) 步。

从上述的步骤可以看出，模拟退火算法实际上就是将金属退火的过程转变为优化算法中的最优解的搜索过程，原理简单，实现容易，但效果却很好，理论上已经证明模拟退火算法是一种以概率 1 收敛于全局最优解的全局优化算法。

(1) 初始温度的控制。

初始温度控制直接影响模拟退火算法的全局收敛性。初始温度高，算法易搜索到全局最优解，但计算速度慢，时间长；反之，速度快，时间短，但易收敛于局部最优解。在工程实践中，初始温度的选择一般要根据大量实验结果分析来确定，实际应用中，一般取初始温度的一个估计值为 $T_0 = k\delta$ ，其中， k 为足够大的正数， δ 的取值可按 $\delta = \max\{f(i) | i \in V\} - \min\{f(j) | j \in V\}$ 简单估计。

(2) 温度下降方法的控制。

温度控制是模拟退火算法中很难处理的问题。在邻域探索过程中，当解的质量变差概率呈 Boltzmann 分布时，理论证明温度下降控制可用公式 $T(K) = K / \ln(1+k)$ 来收敛于全局最优解，其中， K 为正的常数，即降温次数。在邻域探索过程中，当解的质量变差概率呈 Cauchy 分布时，理论证明，温度下降控制可用公式 $T(K) = K / (1+k)$ 来收敛于全局最优解。实际应用中，分二种方式控制温度下降：

① 每一步温度以相同比率下降，即 $T_{k+1} = aT_k$ ，其中， $k \geq 0$ ， $0 < a < 1$ ， a 为降温系数。

② 每一步温度以相同长度下降, 即 $T_k = T_0(T - k)T$, 其中, T_0 为初始温度, T 为温度下降的总次数。

(3) 每一温度迭代长度的控制。

模拟退火算法的全局搜索性与每一温度的迭代长度密切相关。一般地, 同一温度下的充分搜索是必要的, 但需以计算时间增加为代价。实际应用中常根据问题的特点设置合理的迭代长度, 常用两种方法:

① 固定的迭代步数, 即在每一温度都设置相同的迭代步数, 步数的选取通常采用与邻域大小直接相关的规则。

② 根据接近和拒绝概率控制迭代步数。高温时, 各状态被接受的概率基本相同, 且几乎所有状态都被接受, 可使同一温度的迭代步数尽量少些; 温度逐渐变低后, 越来越多的状态被拒绝, 则可相应增大迭代步数。因此, 可以采用给定一个迭代步数 S 和一个接受次数上限 R , 当某一温度的实际接受次数等于 R 时, 不再迭代使温度下降, 否则继续迭代到上限步数 S 。

(4) 终止准则。

模拟退火算法的终止准则, 实际应用中主要采用如下三种准则。

① 零度终止准则, 即给定一个比较小的正数 ε , 当温度 $T_k \leq \varepsilon$ 时, 算法终止, 表示达到最低温度。

② 循环总数终止准则, 即设定温度下降的总次数为 T , 当温度迭代次数达到 T 时, 算法终止。

③ 接受概率终止准则, 即模拟退火算法的基本思想是有效摆脱局部最优解。如果在温度较高时, 未能摆脱局部最优解, 则在温度较低时摆脱局部最优解的可能性更低。

因此可给定一个比较小的概率 P , 在一个温度和给定的迭代步数内, 除当前局部最优解外, 如果其他状态的接受概率都小于 P 时, 算法终止。

模拟退火算法的优点是计算过程简单, 通用, 鲁棒性强, 适

用于并行处理，可用于求解复杂的非线性优化问题；其缺点是收敛速度慢，执行时间长，算法性能与初始值有关及参数敏感等。其中最主要的问题是如果降温过程足够缓慢，多得到的解的性能会比较好，但与此相对的是收敛速度太慢；而如果降温过程过快，很可能得不到全局最优解，由此提出了很多措施加以解决：如设计高效的退火策略；避免状态的迂回搜索；采用并行搜索结构等。

模拟退火算法使随机产生一个解来设计优化算法成为可能，在此之前已经有学者提出随机产生优化解来解决一些无法给出显性数学表达式的优化问题，如旅行商问题的思路，该思路为首先产生一个初始解作为当前解，依照某种规则随机产生新解，若该解好于当前解，则该解作为当前解，若差于当前解，则保留当前解，一直迭代到满足终止条件为止，但该算法的一个缺陷是算法通常收敛于局部最优解。而模拟退火算法通过有条件地接受差解解决了这一难题，也为以后智能优化算法的设计提供了思路^[1]。

1.2 遗传算法

遗传算法的基本思想是基于 Darwin 进化论和 Mendel 的遗传学说的^[2-4]。

Darwin 进化论最重要的是适者生存原理。按照达尔文的进化论观点，在自然界中每一种生物从诞生开始就进入了漫长而美妙的进化过程，其进化过程是由低级、简单到高级过程。各种生物要继续生存，就必须进行长期而复杂的生存斗争。在斗争过程中，适应能力差的个体被淘汰，或者繁衍后代的机会越来越少，直至最终消亡；而适应能力强的个体继续存活概率大，并有较多的机会繁衍后代。达尔文把这种假设称为自然选择学说，主要由以下三个方面构成。

① 遗传。这是自然界中生物的最普遍特征，亲代把生物信息传递给子代，子代按照所得信息而发育，生长，分化，因而子代总是具有和亲代相同或相似的性状。正因为生物有了这种特征，物种才能稳定存在并持续发展。

② 变异。亲代和子代之间以及子代的不同个体之间总会有些不同，这种现象称为变异。变异是在进化过程中随机发生的，变异的选择和积累最终形成了生命的多样性。

③ 生存斗争和适者生存。繁殖过剩和生存斗争造成了自然选择。由于弱肉强食的自然法则一直存在，其结果是适者生存，不适者淘汰，具有适应性变异的那些个体被保留下来，而不具有适应性变异的那些个体被淘汰，一代代的生物通过生存环境的选择作用，物种变异定向地朝一个方向积累，于是外观性状逐渐与原先的祖先出现差异，从而演变为新物种。这种自然选择的过程是一个长期的，连续的，缓慢而美妙的过程。

Mendel 遗传学说最重要的是基因遗传原理。在此学说中，认为控制并决定生物遗传性状的染色体主要是由一种叫做脱氧核糖核酸（Deoxyribonucleic Acid, DNA）的物质所构成。基因就是 DNA 长链结构中占有一定位置的基本遗传单位。遗传信息是由基因（Gene）组成的，生物的各种性状由其相应的基因所控制。基因是遗传的基本单位。遗传以密码方式存在细胞中，并以基因形式包含在染色体内。每个基因有特殊的位置并控制某种特殊性质，因此每个基因产生的个体对环境具有某种适应性。细胞通过分裂具有自我复制的能力，在细胞分裂的过程中，其遗传基因也同时被复制到下一代，从而其性状也被下一代所继承。在生物进化过程中，基因通常会进行以下几种操作：

① 复制。生物的主要遗传方式是复制。遗传过程中，父代的遗传物质 DNA 被复制到子代。即细胞在分裂时，遗传物质 DNA 通过复制（Reproduction）而转移到新生的细胞中，新细胞就继承了旧细胞的基因。

② 交叉。有性生殖生物在繁殖下一代时，两个同源染色体之间通过交叉（Crossover）而重组，即在两个染色体的某一相同位置处 DNA 被切断，其前后两串分别交叉组合而形成两个新的染色体。

③ 变异。在进行细胞复制时，虽然概率很小，仅仅有可能产生某些复制差错，从而使 DNA 发生某种变异（Mutation），产生新的染色体。这些新的染色体表现出新的性状。如此这般，遗传基因或染色体在遗传的过程中由于各种各样的原因而发生变化。

基因突变和基因杂交可产生更适应于环境的后代。经过存优去劣的自然淘汰，适应性高的基因结构得以保存下来。进化是“群体在遗传组成上发生变化的过程”。

结合达尔文的进化论和 Mendel 的遗传学说可以综合出物种进化的大体过程：每个个体都有各自的基因决定了自己的性状，而个体通过有性或无性生殖将自己的遗传信息传递给下一代，宏观上表现为整个种群的性状大体一致，物种具有很强的稳定性，而生物上则是通过基因的复制和交叉实现的，与此同时基因在遗传过程中，还会有小概率的变异，宏观上表现为子代和亲代虽然性状上大体一致，但并不完全相同，而生物上则是通过基因的小概率突变实现的。而由于生存环境资源的限制和生殖过剩现象的存在，不是每个个体都具有平等的生存机会，在弱肉强食的生存法则作用下，具有强适应能力的个体有较大的机会生存下来，也就是产生强适应能力性状的基因具有较大的生存概率，反之具有弱适应能力的个体有较大的机会消亡，也就是产生较弱适应能力性状的基因具有较大的生存消亡。经过漫长的过程在世界上能够保留下来的物种都是由产生适应能力较强性状的基因构成的个体组成的。

遗传算法就是从模仿这一过程中提出来的，如果将优化算法中的目标对应成适应度，将基因对应成优化中的解，那么进化中

的自然选择过程就是解的寻优过程，自然就可以将模拟的进化直接应用于优化了。具体步骤可以概括如下：

(1) 创建一个随机的初始状态。设置进化代数计数器 $t = 0$ ，设置最大进化代数 T ，随机生成 M 个个体作为初始群体 $P(0)$ 。初始种群是从解中随机选择出来的，将这些解比喻为染色体或基因。

(2) 评估适应度：计算群体 $P(t)$ 中各个个体的适应度。对每一个解（染色体）指定一个适应度的值，根据问题求解的实际接近程度来指定（以便逼近求解问题的答案），如求函数的最大值，适应度即为函数值，可根据具体的优化问题确定优化值和适应度之间的对应关系。

(3) 选择（复制）运算：将选择算子作用于群体。选择的目的是把优化的个体直接遗传到下一代或通过配对交叉产生新的个体再遗传到下一代。选择操作是建立在群体中个体的适应度评估基础上的。通常的选择方法有轮盘赌和竞争法等。

(4) 交叉运算：将交叉算子作用于群体。所谓交叉是指把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的操作。遗传算法中起核心作用的就是交叉算子。将群体 $P(t)$ 内的各个个体随机搭配成对，对每一对个体，以某个概率（称为交叉概率）交换它们之间的部分染色体；

(5) 变异运算：将变异算子作用于群体。即是对群体中的个体串的某些基因座上的基因值作变动。对群体 $P(t)$ 中的每一个个体，以某一概率（称为变异概率）改变某一个或某一些基因座上的基因值为其他基因值。

群体 $P(t)$ 经过选择、交叉、变异运算之后得到下一代群体 $P(t+1)$ 。

(6) 终止条件判断： $t+1 \rightarrow t$ 若 $t < T$ ，返回步骤（2），继续优化，若 $t = T$ 则以进化过程中所得到的具有最大适应度个体作为最优解输出，终止计算。