

# 进化计算的过去、现在与未来\*

孙瑞祥 屈梁生

西安交通大学诊断与控制学研究所

**摘要** 本文对“进化计算”的历史、现状与展望进行了系统地综述。进化计算是 20 世纪 90 年代兴起的一门模拟生物进化与遗传规律的计算学科。目前已发展成为与人工神经网络、模糊逻辑相并列的智能计算支撑技术。进化计算最重要的应用是传统优化方法无法或难以解决的科学与工程中的复杂优化问题。与传统优化方法相比,进化计算的优势在于全局优化性、梯度信息不依赖性、简单易实施等。当前,进化计算主要由遗传算法、遗传编程、进化策略、进化编程、DNA 计算、分子计算等不同的分支组成。文中简介了它们的基本原理、异同点和适合应用的问题,以及目前存在的难题。对未来的重要研究方向也进行了展望。

**关键词** 进化计算 计算智能 遗传算法 遗传编程 进化策略 进化编程

## Evolutionary Computation: Past, Present and Future

SUN Rui-Xiang and QU Liang-Sheng

Institute of Diagnostics and Cybernetics (IDC), Xi'an Jiaotong University

**Abstract** This paper systematically reviews the history, the state-of-the-art, and the prospects of evolutionary computation(EC), a novel computing discipline rose in 1990's. Roughly speaking, EC is motivated from the principles of biological evolution and genetics. Now, it has been developed as one of the underpinning technologies for computational intelligence (CI), being the partnerships with artificial neural networks(ANN) and fuzzy logic(FL). From the viewpoint of application, EC is mainly applied to optimize the complicated industrial problems, which can not be tackled well with the traditional optimization methods. EC possesses many advantages over the conventional optimization techniques such as global optimization, independence of gradient, ease of implementation, and so on. Contemporarily, EC consists of the following avenues: genetic algorithms, genetic programming, evolution strategies, evolutionary programming, DNA computing, and molecular computing, etc. The rationales, similarities and differences, the application problems, and the puzzles of EC's avenues are formulated. At the end, the future promising research directions are prospected.

**Key words** Evolutionary Computation; Computational Intelligence; Genetic Algorithms; Genetic Programming; Evolution Strategies; Evolutionary Programming

### 1. 引言

“进化计算 (Evolutionary computation, 简称 EC)”这一术语是在二十世纪九十年代初被提出的。它是模拟生物进化过程中“优胜劣汰”的自然选择机制和遗传信息的传递规律的算法的总称,主要用来解决实际中的复杂优化问题。目前,进化计算主要有遗传算法 (Genetic algorithms, 简称 GA)、遗传编程 (Genetic

\* 本文节选自西安交通大学博士学位论文“进化计算与智能诊断”(孙瑞祥, 2000年4月), 并经修改与完善。

programming, 简称 GP)、进化策略 (Evolution strategies, 简称 ES) 和进化编程 (Evolutionary programming, 简称 EP) 等分支组成, 其它的诸如 DNA 计算和分子计算(Molecular computing), 也开始应用在实际问题中, 但还没有形成一个体系, 比较零散。进化计算学科的出现, 促进了它的不同分支之间的交流, 可以取长补短。上述四个主要分支是由不同的学者独立提出的, 在 1992 年之前, 基本上是独立发展, 没有交流。各个分支都有自己的优缺点, 研究它们的优越性, 并融合成新的进化算法, 可以促进进化计算更广泛的应用。目前, 进化计算已经在人工智能、知识发现、模式识别、图象处理、决策分析、产品工艺设计、生产调度、股市分析等仍然不断增加的领域中发挥出了显著的作用。

本文对进化计算这一新兴学科作一综述, 并对未来的研究方向进行展望。论文的主要内容为: 首先, 概述了第一个进化计算算法—遗传算法的产生与发展; 其次主要介绍了进化计算的国内外研究现状; 然后, 给出了进化计算与其他学科的关系, 各个分支的计算原理与实施技术; 最后是进化计算的研究展望。

## 2. 第一个进化计算算法—遗传算法的产生与发展

大自然是人类获得灵感的源泉。将生物界所提供的答案应用于工程问题的求解被实践证明是一个成功的有着辉煌前景的方法。进化的历史告诉我们, 生物的进化是一个漫长而复杂的过程, 在这个过程中, 生物从低级、简单的状态向高级、复杂的状态演变。现在, 人们已经认识到进化不仅仅是生命科学的范畴, 进化是一种优化的过程, 可以在计算机上模拟, 并应用到工程领域中<sup>[1]</sup>。早在二十世纪六十年代初, 美国 Michigan 大学的 J. H. Holland 教授就意识到了生物进化过程中蕴含着朴素的优化思想, 他借鉴了达尔文的生物进化论和孟德尔的遗传定律的基本思想, 并将其进行提取、简化与抽象, 提出了第一个进化计算算法—遗传算法。1975 年出版了他的专著《Adaptation in Natural and Artificial Systems》<sup>[2]</sup>, 标志着遗传算法的正式诞生。在这本专著中, 他称之为“Genetic Plans”, 详细阐述了遗传算法的基本思想和结构框架。“Genetic Algorithms”一词是首先出现在 J.D.Bagley 的博士论文中, 他研究了遗传算法在博弈论(六子棋)中的参数搜索, 这是遗传算法最早的应用<sup>[3]</sup>。

“遗传”与“算法”的结合体现了生物科学与计算机科学的相互渗透, 相互融合。它借鉴生物的进化思想, 通过计算机模拟物种繁殖过程中父代遗传基因的重新组合与“优胜劣汰”的自然选择机制联合作用, 用来解决科学与工程中的复杂问题。图 1 原理性地描述了自然进化与遗传算法之间的对应关系。

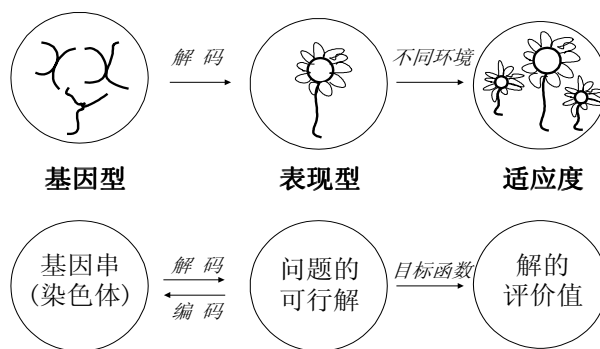


图 1. 自然进化与遗传算法的对应关系

遗传算法产生后, 在八十年代以前, 并没有引起人们的关注, 一方面是因为它本身还不成熟; 另一方面, 当时的计算机容量小, 计算速度慢, 也使得需要较大计算量的遗传算法难以实际应用。但 Holland 和他的学生一直在进行坚持不懈的努力, 进行了理论研究, 并开拓其应用领域<sup>[4]</sup>。直至现在, 仍被认为是遗传算法理论基础的模式定理 (Schema Theorem) 就是在这个阶段提出的, 它揭示了遗传算法的内部机理和解释了遗传算法的优化能力。

进入八十年代, 遗传算法迎来了兴盛发展时期, 无论是理论还是应用都成了研究热点。尤其是应用研究显得格外活跃, 给遗传算法注入了新的活力。研究工作主要在以下几个方面开展。

### (1). 遗传算法的基本理论

由于遗传算法是一种启发式的有向随机搜索算法，在进化过程中是否收敛到全局最优解成为其应用于实际问题是否成功的关键。然而，Holland 的模式定理并没有从理论上回答遗传算法的全局优化性，它只是研究了群体中部分特征模式的样本数目随进化代数的变化规律。近年来，关于遗传算法的全局收敛性证明，许多学者进行了理论上的研究，取得了一定的成果<sup>[5-11]</sup>。

除了收敛性的证明，遗传算法的控制参数选取也是一个极其重要的理论问题，因为控制参数直接影响着遗传算法的优化效率。但控制参数的选择与使用的遗传算子和具体应用问题密切相关。J.J.Grefenstette 利用离线性能 (Off-line Performance) 和在线性能 (On-line Performance) 评价控制参数的优化效率，研究了用遗传算法来优化控制参数<sup>[12,13]</sup>。

自适应的杂交率和变异率<sup>[14]</sup>、特殊问题（如组合优化问题）的遗传算子的研究<sup>[15-18]</sup>也是遗传算法基本理论的重要研究内容。

### (2). 生物进化思想的深层利用

虽然遗传算法已经在许多领域中获得了成功的应用，但目前仍存在几个悬而未决的问题。究其原因，主要是因为当前的遗传算法只是简单地模拟了生物的进化，对生物进化机理作了很大简化，而生物的进化是一个非常复杂的过程，单就目前生物学中对于遗传物质的载体—染色体 DNA 的研究，就足以令人感到遗传算法在利用生物进化的思想方面已经滞后。分子生物学告诉我们 DNA 的结构为由 4 种碱基配成的扭转阶梯螺旋，如图 2 所示。生物技术的发展已经使保留在化石中的 DNA 复活生命和历史、利用 DNA 分析技术进行刑事分析成为可能。而遗传算法的染色体的表示则简单得多，而且用来模拟生物有性繁殖的杂交算子也多是线性串的部分交换，如图 3 所示。所以，要提高遗传算法的性能，必须深入地研究生物的结构与进化规律，如近年发展起来的免疫系统模型和协同进化模型等。

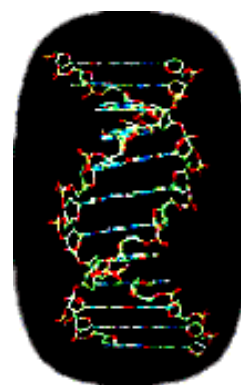


图 2 DNA 的双螺旋结构

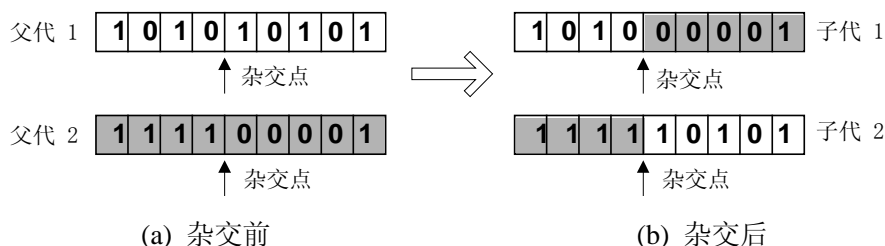


图 3 遗传算法的杂交算子

除了常用的二进制单点杂交与位变异算子，一些借鉴生物进化的新型遗传算子也已经应用在遗传算法中，如倒位 (Inversion)、显性 (Dominance)、二倍体 (Diploidy)、缺失 (Deletion) 等<sup>[19-23]</sup>，至于它们对提高遗传算法优化能力的作用大小仍然值得深入研究。

### (3). 遗传算法的并行处理

遗传算法具有内在并行性 (Inherent Parallelism) 和内含并行性 (Implicit Parallelism)。前者是指遗传算法的适应度评价是并行的，可以在并行机上进行，同时，可以采用多群体进化，群体之间可以进行通信。后者是指遗传算法虽然每代仅处理  $N$  个个体 ( $N$  为群体规模)，但却有效处理了  $O(N^3)$  个模式。关于遗传算法的并行处理研究多集中于前者<sup>[24]</sup>。

### (4). 遗传算法的广泛应用

遗传算法的应用是一个发展最为迅速的研究方向。目前已经在模式识别<sup>[25,26]</sup>、图象处理<sup>[27]</sup>、人工智能

[28,29]、经济管理<sup>[30]</sup>、机械工程<sup>[4,31]</sup>、电气工程<sup>[4]</sup>、通讯<sup>[32]</sup>、分子生物学<sup>[33]</sup>等举不胜举的领域中获得了较成功的应用。但如何将各专业的知识融入到遗传算法的算子中，目前仍在继续研究。

除了遗传算法 GA 外，遗传编程 GP、进化策略 ES、进化编程 EP 等也是模拟生物的进化计算算法。它们的产生与发展将在本文的第 5 部分详细介绍。在进化计算的这几个分支中，遗传算法的研究与应用最为广泛与深入。目前，进化计算已经和人工神经网络(Artificial Neural Networks,简称 ANN)，模糊逻辑(Fuzzy Logic,简称 FL)相结合，产生了一门新的综合性的计算技术学科—计算智能(Computational Intelligence,简称 CI)，这些学科之间的关系将在论文的第 4 部分介绍。

### 3. 进化计算的研究现状

进化计算的研究与应用，无论是研究队伍的规模，发表的论文数量还是网上的信息资源，发展速度都很快，已经得到了国际学术界的广泛认可。1994 年，IEEE 神经网络委员会主持召开了第一届进化计算国际会议，并成立了 IEEE 进化计算委员会，此会每 3 年与 IEEE 神经网络国际会议、IEEE 模糊系统国际会议在同一地点先后连续举行，共同称为 IEEE 计算智能 CI 国际会议，并分别出版并列的 IEEE Transactions on Evolutionary Computation, IEEE Transactions on Neural Networks 和 IEEE Transactions on Fuzzy Sets 学术期刊<sup>[4,34]</sup>。另外，进化计算的国际期刊 Evolutionary Computation 也于 1993 年诞生。以遗传算法为主的进化计算的研究内容也在其他学术期刊中出版了专辑<sup>[35-38]</sup>，同时在 Machine Learning; IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics; Complex Systems; Artificial Intelligence 等重要国际期刊上经常见到。由此可见进化计算的发展之快。

除了 IEEE 举行的进化计算国际会议以外，其实，早在 1985 年，就在美国的 Pittsburgh 召开了第一届遗传算法国际会议<sup>[39]</sup>，在会议期间，国际遗传算法学会(International Society of Genetic Algorithms)也宣告成立。自此，来自不同学科和工程应用领域的各国学者在遗传算法方面有了交流、探讨的国际论坛。国际遗传算法会议每两年召开一次<sup>[40-45]</sup>。此外，其他类型的各种会议，如以遗传编程、进化策略或进化编程为主题的研讨会也很频繁<sup>[46-50]</sup>。

Internet 技术的发展给进化计算的研究者带来了丰富的信息资源，使他们可以获取更广泛、快捷的交流以及极大地获取有关进化计算的科研资料，同时可以随时了解有关进化计算研究与应用的最新进展。美国海军后勤研究中心对进化计算的研究极为重视，于 1985 年首先在电子网络上建立了全球性的有关遗传算法的信息交流节点(GA-List-Request@aic.nrl.navy.mil)，不定期编辑出版电子遗传算法文摘(GA Digest)，交流有关遗传算法的最新信息(如有关研究和应用以及会议等方面的最新信息)。网络上与进化计算有关的信息实际上是一个有关进化计算的巨大资料库，为使研究人员更方便地利用这些资源，在交互网络上建立了几个比较大的节点，称为 ENCORE(Evolutionary Computation Repository Network)。通过这几个节点中的任一个，不仅可以了解到网络上主要的有关进化计算的信息，而且可以获取自由软件，交流科技报告等，如，可获得 1957 年到现在的的所有有关遗传算法的科技论文的目录，该目录中包括 2500 多篇文献<sup>[34]</sup>。

除了期刊、会议、电子信息库外，进化计算的软件也形成商业化产品。根据系统开发和设计目标的不同，可分为三类：面向应用的系统、面向算法的系统和工具包系统，如表 1 所示<sup>[21,51]</sup>。在面向应用的系统中，采用了许多创新性的策略，如 PC/Beagle 和 XpertRule GenAsys 等系统可用遗传算法生成知识域的新规则。

表 1 进化计算的软件产品及分类

面向应用的系统	面向算法的系统		工具包系统	
	专门算法	算法库	教学系统	通用系统
Evolver	Escapade	EM	GA Workbench	GAOT
Omega	GAGA	GAlib	ComputerAnts	Engeneer

PC/Beagle Generator XpertRule GenAsys	GAUCSD mGA Genesis Genitor	libGA PGApack OOGA	GAMusic SGA DOUGAL	GAME MicroGA Splicer Pagasus
--	-------------------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------------------

进化计算的研究内容十分广泛，国外的发展也瞬息万变。下面概述一下国外的研究现状，特别是美国、英国和德国等走在进化计算研究前列的国家的研究成果。

(1) 美国 Illinois 大学的 D.E.Goldberg 在他领导的 Illinois 遗传算法实验室 (Illinois Genetic Algorithms Laboratory, IlliGAL) 中对遗传算法的基本理论进行了广泛地研究，取得了一系列的成果<sup>[52-58]</sup>。早在 1989 年，他就出版了目前被认为是遗传算法最经典、最全面的教科书<sup>[19]</sup>。

(2) H.Kargupta 将 Shannon 的信息熵<sup>[59]</sup>引入遗传算法，研究了遗传算法群体的多样性，他借鉴了通信领域中的信息冗余性，研究了在不损失进化群体的多样性的情况下如何提高冗余性<sup>[60]</sup>。

(3) 关于遗传算法的控制参数的优化和优化效率的性能评估的研究也引起一些学者的重视，遗传算法的控制参数是指群体规模、杂交率、变异率以及其他一些遗传算法的参数。目前，还没有一种通用的方法，可以根据要解决的问题自动地设置高效的控制参数，只能根据经验和多次运行遗传算法的结果进行人工设置和修正。J.J.Grefenstette 利用遗传算法来优化遗传算法的控制参数 (MetaGA)，通过 K.A.DeJong 提出的优化效率的性能评价指标“在线性能”与“离线性能”<sup>[13]</sup>来构造适应度，获得了一些有益的结论<sup>[12]</sup>。

(4) Holland 的标准遗传算法并没有提供如何解决约束优化问题，在应用遗传算法解决工程中的复杂优化问题时，对于约束的处理是一个至关重要的问题。Michalewicz 对此作了坚持不懈地研究，提出了几种较有效的方法<sup>[16,61]</sup>。对于约束的处理，应用最多的方法是惩罚函数法<sup>[62,63]</sup>。

(5) 模式识别是机器智能与自动化的支撑技术，进化计算在模式识别中也发挥了它的优势，主要集中在特征提取上。从 N 个初始特征中选出 n (n<N) 个有效特征是一个典型的 NP 问题，进化计算可以在不搜索全部解空间的情况下，获得最佳的或接近最佳的有效特征集<sup>[64-68]</sup>。

(6) 进化计算的优势之一在于全局优化性，而其局部优化性却不足，因此，有的学者提出将进化计算与其他局部优化方法进行结合，实践证明局部优化性得到了提高<sup>[69,70]</sup>。

(7) 近年来，进化计算的专著也不断推出，极大地丰富和促进了进化计算的研究<sup>[71-79]</sup>。

由于进化计算与传统优化技术相比，具有许多优势，而且在人工智能中有着广阔诱人的应用前景，国内对进化计算自九十年代以来也开展了广泛地研究工作。特别是将进化计算应用在不同的领域中，取得了令人瞩目的成就，但与国外相比，国内对进化计算的理论基础研究还不够深入。

国内以武汉大学软件工程国家重点实验室为领先，在他们的并行计算研究室内，进化计算（他们称之为“演化计算”）成为一个重要的研究方向，目前已经出版了专著<sup>[21,23]</sup>，并有许多硕士、博士研究生围绕进化计算选题<sup>[80-83]</sup>。另外，中国科学技术大学的陈国良教授等出版了遗传算法的著作<sup>[20]</sup>。

最近三年来，西安交通大学以进化计算为主题的研究工作也逐渐活跃起来，几乎在每个一级学科中都有进化计算的研究者，主要集中在进化计算在各学科的工程应用<sup>[84-88]</sup>，在 BBS 上的人工智能版经常可以见到一些有关进化计算的讨论与交流。西安交通大学的诊断与控制学研究所自 1994 年就开始了对进化计算在故障监测与诊断中的应用研究<sup>[89-93]</sup>，目前，主要集中在诊断信息的智能处理和诊断知识的自动获取两个方向。

随着国内对进化计算认识的逐渐深入，进化计算的研究与应用必将取得更多的成果。

#### 4. 进化计算与其他学科的关系

进化计算与其他学科的关系如图 4 所示。下面首先从计算智能 CI 谈起。

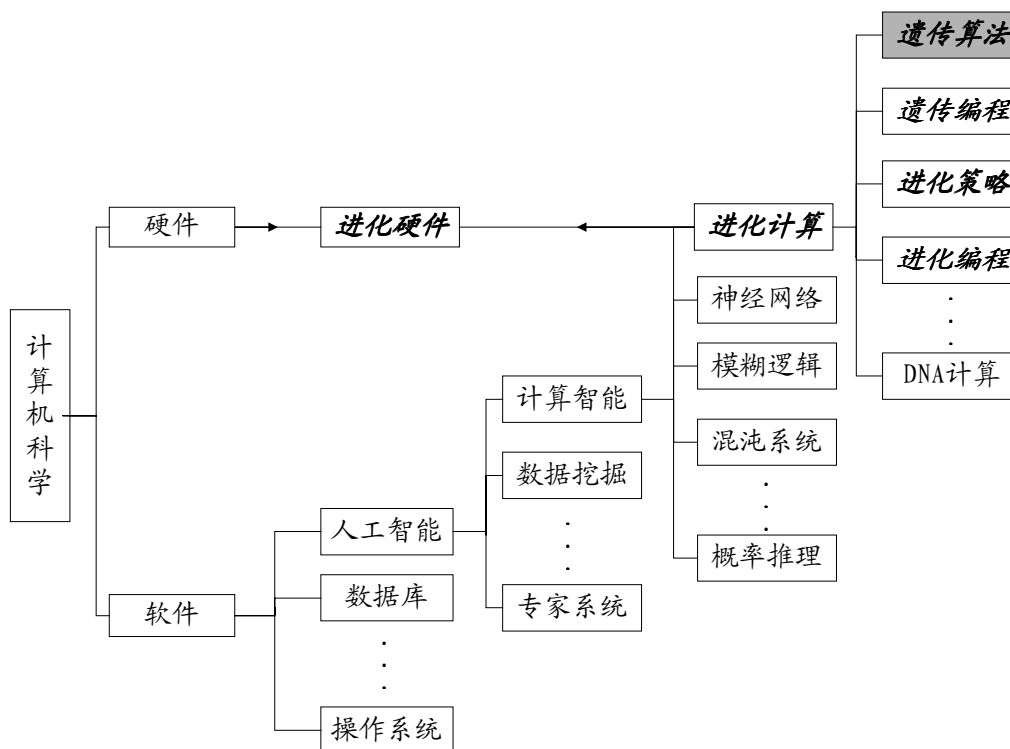


图 4 进化计算与其他学科的关系

### (1). 计算智能（软计算）

计算智能，也称为“软件算（Soft Computing，简称 SC）”，是当代人工智能的重要组成部分，它是九十年代初期在向传统的人工智能挑战过程中提出的研究模拟人类的思维或生物的自适应、自组织能力，以实现计算技术的智能性的一门新学科<sup>[94]</sup>。模糊逻辑的创始人 L.A.Zadeh 提出了“Soft Computing”的概念，并指出了其关键技术和应用领域。目前，计算智能的技术主要有进化计算、人工神经网络、模糊逻辑、混沌系统（Chaotic Systems）、概率推理（Probabilistic Reasoning，简称 PR）等<sup>[95,96]</sup>。计算智能的积极意义在于促进基于计算和基于物理符号相结合的各种智能理论、模型和方法的综合集成，以利于发展功能更强大，能解决更复杂系统的智能行为<sup>[97]</sup>。需要指出的是计算智能不是主要研究单项技术，而是研究如何将上述几种技术集成起来，优势互补，并应用来解决实际问题。当然，每种技术都是计算智能的支撑技术，由专门的领域研究者对计算智能提供有效的技术支持。计算智能的发展将极大地推动人工智能的进步。

### (2). 进化计算

进化计算是计算智能的关键技术之一，它具有模拟生物进化的强大的优化能力。“Evolutionary Computation”一词产生于九十年代初期，其目的是将模拟生物进化的不同分支的学者在思想上集中起来，促进它们共同发展<sup>[35]</sup>。在九十年代初期以前，不同分支间并没有交流，直至 1990 年，才在进化计算的一些国际会议上产生了相互之间的交流与切磋。现在，进化计算已经成为一门较独立的新的计算技术学科，它主要研究模拟生物的进化规律来解决实际工程中的复杂优化问题。以遗传算法为核心的进化计算会将二十一世纪的计算智能推向一个个崭新的应用领域。

### (3). 进化硬件

进化计算的发展已经超越了计算机软件的范畴，它已经和计算机硬件结合起来，近年来，已经出现了可进化的硬件（Evolvable Hardware，简称 EHW）<sup>[21,98,99]</sup>。它是一种可以象生物一样根据环境的变化而自适应改变自身的结构的硬件，实现将进化计算的思想 and 可编程集成电路技术二者的结合。传统的硬件的缺点

是非灵活性，一旦制造完成，就不可能再改变硬件的结构与功能。但许多现实的问题并非固定不变，而多是随时间或环境而变化，为了处理该问题，进化硬件应运而生。“萤火虫机 (Firefly Machine)”和“八细胞生物钟 (8-cell BioWatch)”就是两个最成功的例子，不过，进化硬件仍处于研究的“婴儿”时期<sup>[100]</sup>。

## 5 进化计算的四个主要分支

进化计算是受生物的进化机理启发，得益于计算机的高速计算能力，在计算机上实施的模拟生物进化算法的总称。它主要应用来解决科学与工程上的复杂优化决策分析问题，其中包括对生命现象的研究，如人工生命。进化计算的四个分支的共同点是群体进化、优胜劣汰、有向随机和梯度信息无依赖性等。不同点是进化算子的不同，选择方式的不同以及适合解决问题的类型不同等，下面结合它们的基本原理进行详细论述。

### (1). 遗传算法

根据编码方式的不同，遗传算法主要可分为二进制型、序列型和浮点型等三种，分别适用于不同类型的工程优化问题。在大多数情况下，不同的编码方式就对应于不同的遗传操作方式。下面以最典型、最简单的二进制型遗传算法为例，介绍一下遗传算法的实施过程与主要特点，以及其基本原理<sup>[2, 19-23]</sup>。

遗传算法启迪于达尔文的“优胜劣汰”的自然选择机制和孟德尔的遗传学说，因此，它在很多表述上直接借鉴了生物学中的术语，为了更好地理解这些术语，表 2 给出了生物学术语在遗传算法中的具体含义。遗传算法的计算流程如图 5 所示。从图 5 可以看出遗传算法实质上是一个迭代计算过程(虚线框内)，其实施的主要步骤包括编码、群体初始化、选择、遗传操作、评价和终止判定六步。

#### ① 编码

编码的主要任务是建立解空间与染色体空间点的一一对应关系。遗传算法通常在染色体空间中进行操作。在多数情况下，不同的编码方式决定了不同的遗传操作方式。对编码的一般原则性要求主要有完备性、健全性和非冗余性。完备性是指解空间中的所有点都能表示为染色体空间中的点；健全性是指染色体空间中的所有点都能表示为解空间中的点；非冗余性是指解空间到染色体空间的一一对应。

#### ② 群体初始化

与传统优化方法相比，遗传算法一个显著的特点是对群体操作，所以在进化的开始必须进行群体初始化，产生进化的起点群体。通常随机构造初始群体，当然也可以在初始群体中植入一些具有特殊“性状”的个体，以加速算法向全局最优解的收敛。

#### ③ 选择

遗传算法的选择操作与生物的自然选择机制相类似，它体现了“适者生存，不适者被淘汰”的生物进化机理。实现原则为“性状”优良的个体具有较多的机会被选进交配池产生后代，而“性状”低劣的个体则具有较少的机会被选择。这里的“性状”通过评价操作进行量化。最常用的选择方式是赌轮选择、联赛选择和排序选择。

#### ④ 遗传操作

遗传操作被视为遗传算法的核心。它直接影响和决定了遗传算法的优化能力，是生物进化机理在遗传算法中最主要的体现。目前，已有适用于各种不同类型问题的多种遗传操作算子。其中，杂交与变异是最常用的遗传操作，杂交体现了同一群体中不同个体之间的信息交换，而变异则能维系群体中信息的多样性。它们在优化中的主要作用是以不同的方式不断产生新的个体。

#### ⑤ 评价

评价是遗传算法的驱动力，是遗传算法体现有向搜索，区别于随机游荡的标志。它将同一群体中不同个体的优劣进行数值标量化，为选择操作提供客观依据。遗传算法评价准则的确定主要依赖于要求解的问题。

表 2 生物学术语在遗传算法中的含义

生物学	遗传算法
-----	------



染色体	字符串
基因	字符位
基因型	字符串结构
表现型	字符串含义
杂交	字符串片段的互换
变异	字符位的改变

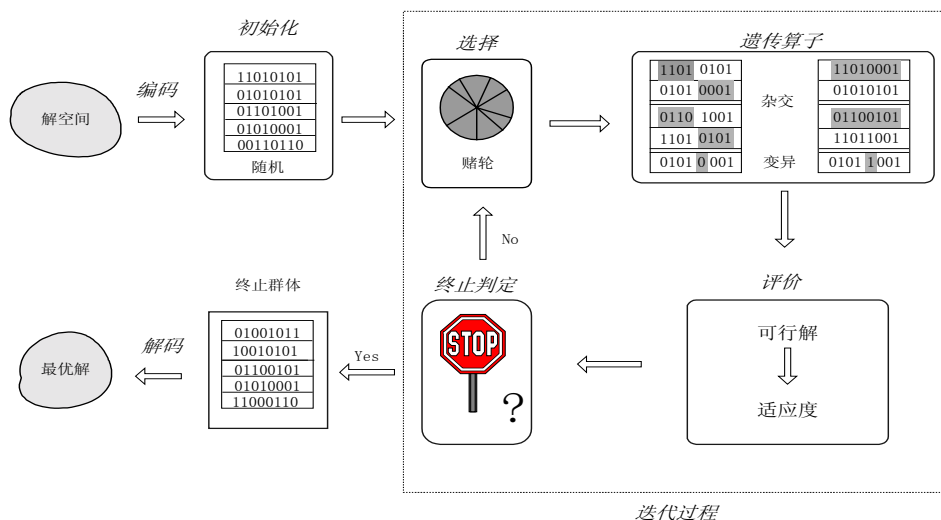


图 5 遗传算法的计算流程

### ⑥ 终止判定

如果说初始化是遗传算法的入口，终止判定则是它的出口。一般用事先给定的进化最大代数作终止判据，它的设定较大地依靠经验和运行结果。

与传统优化算法(主要包括共轭方向类算法和以牛顿法为主的下降方向类算法<sup>[101]</sup>)相比较，遗传算法的主要特点有以下四个方面：

① 群体搜索策略。传统优化算法采用点到点的搜索方式；而遗传算法则采用群体到群体的搜索方式，因而较易于达到全局最优。

② 搜索不依赖于目标函数的梯度信息，只需提供能够评价个体相对优劣的数量指标(适应度)即可。因此，遗传算法的适用面更广，尤其适合于处理复杂的非线性问题，包括目标函数为高维、不可导、不连续或带有噪声的优化问题；而传统优化方法对此无法或难以解决。

③ 进化过程具有有向随机性，这是遗传算法与穷举法的本质区别。同时，遗传算法的搜索结果具有非稳定性；与传统优化方法相比，优化效率相对较低。

④ 简单通用，鲁棒性强。

### (2). 遗传编程

在遗传算法的发展中，将线性编码改进为非线性编码，是近年来提出的一种新的思路。1992年 Stanford 大学的 J.R.Koza<sup>[102,103]</sup>首先提出了一种在编码方式上与常规遗传算法有着本质不同的仿生进化算法，它采用了层式编码结构，由于在遗传算法的基础上，改进了编码方法，他称之为“遗传编程”(Genetic Programming, 简称 GP)，同遗传算法一样，它们都属于新兴的进化计算学科；但相对于遗传算法，遗传编程更适合应用于层式结构的优化。

遗传编程 GP<sup>[102-107]</sup>是由遗传算法发展、延伸而来的，传统的遗传算法是用定长的线性字符串表达问题，而工程中许多复杂问题往往不能用简单的字符串表达所有的性质，因此有必要对传统的遗传算法进行改进。遗传编程就是在此背景下产生的，它与遗传算法最大的不同是以层次结构(“树”型)表达问题，而且其结构与大小都是动态自适应调整；因此，遗传编程更适于表达复杂的结构问题。遗传编程的任务就



是从由许多树型可行解组成的搜索空间中寻找出一个具有最佳适应度的“树”。遗传编程提供了一套寻找具有最好适应度的“树”的方法。目前，遗传编程的研究已经渗透到工程技术科学，生命科学及社会科学的各个领域。

图 6 是遗传编程的计算流程，图中 Gen 表示遗传代数，N 表示群体规模，i 表示个体计数器。从该图中可以看出，遗传编程与遗传算法的原理基本相同，但在以下三个方面的操作与遗传算法有所不同。

a. 编码

前文已经提到，遗传编程采用层式的编码形式。例如，遗传编程用于特征构造时，代表由简单特征组合而成的复合特征如图 7(b) 中的个体所示，(a) 是遗传算法的个体，从(a)，(b) 两图可看出二者编码的不同。图中， $OP_i (i = 1, 2, \dots, S)$  表示 S 个运算符（单目或双目）； $F_j (j = 1, 2, \dots, T)$  表示 T 个初始特征。遗传编程的个体就是通过运算符和初始特征的不同树形组合来表达。

b. 构造初始群体

遗传编程初始群体的构造比遗传算法复杂得多，主要是由于层式树形个体的构造比线性基因串的构造复杂。在构造初始群体以前，要做好以下两方面的工作：

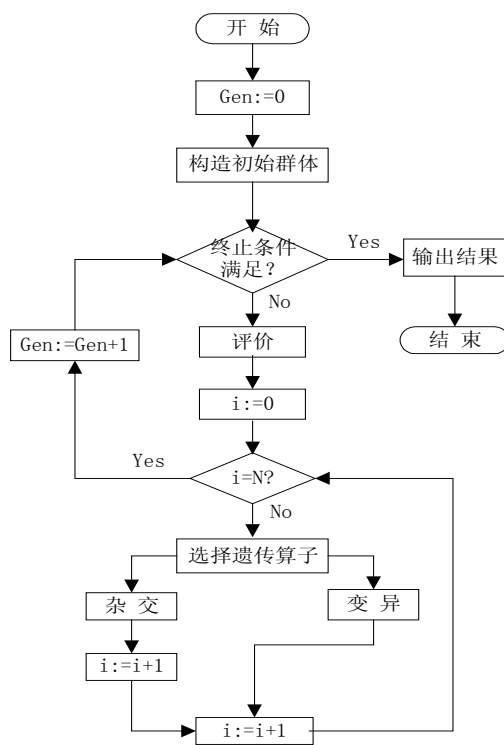
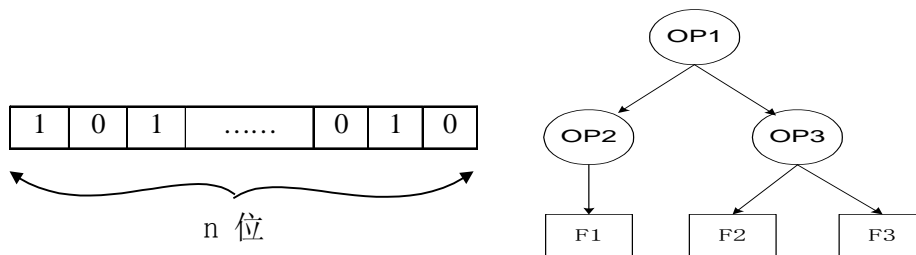


图 6 遗传编程的计算流程

1) 终止符集的构造

终止符是指如图 7 中所示的树形结构末端的叶子节点  $F_j (j = 1, 2, \dots, T)$ 。终止符集根据求解对象的不同而不同，通常由常量、变量、符号等组成。



(a) 遗传算法的个体

(b) 遗传编程的个体

图 7 遗传算法与遗传编程的编码结构

## 2) 运算符集的构造

运算符  $OP_i (i = 1, 2, \dots, S)$  代表了一个或多个终止符之间执行的操作。运算符集的构造也因具体问题而异。常见的运算符主要有：

算术运算符，如  $+$ ， $-$ ， $\times$ ， $\div$  等；

标准数学函数，如  $\sin$ ， $\cos$ ， $\exp$ ， $\log$  等；

布尔运算符，如  $\text{and}$ ， $\text{or}$ ， $\text{not}$  等；

条件运算符，如  $\text{if-then-else}$ ， $\text{case}$  等。

以上列举的都是计算机程序中经常使用的运算符。另外，也可以根据适用的问题自行设计面向对象的运算符。终止符与运算符皆称为遗传编程的元素。

有了以上两步准备，就可以进行初始群体的构造了。首先从运算符集中随机选择一个运算符，没有从终止符集选择是为了避免产生空的个体；然后根据运算符的目数，确定从该运算符引出的线数；其次，依次在每条线的终端，加入随机选出的元素；最后，重复上述过程，直至“生长”为满足要求的个体。实际上，终止符可看作是零目运算符。初始群体由  $N$  个以同样方式产生的个体组成 ( $N$  为预先确定的群体规模)。

## c. 遗传算子

编码方式决定了相应的遗传算子操作方式，因此，遗传编程的遗传算子比遗传算法也要复杂得多。下面，就最常用的杂交和变异算子作一对照。

### 1) 杂交

遗传算法的杂交算子如图 3 所示；遗传编程的杂交算子如图 8 所示。对比二者，可以发现遗传算法的杂交仅需要线性串的复制操作；而遗传编程的杂交操作则涉及到子树结构的拆合。对遗传算法，如果参与杂交操作的两个个体完全相同，则不会产生新个体；而对遗传编程，所产生的子代个体与父代一般是不相同的，除非两个个体的杂交点恰好也相同，但出现这种情况的概率极小，所以遗传编程的杂交施加了一个偏离同一化的反平衡作用，有利于维持群体的多样性。

### 2) 变异

图 9 是遗传算法的变异算子；图 10 是遗传编程的变异算子。遗传算法的变异采用位的置反操作；而遗传编程的变异方式有两种：运算符变异和终止符变异。为了保证变异后产生的新个体在语法上的合法性，必须首先判断变异点是运算符还是终止符，然后，根据判断结果，从相应的集合中随机选取一个元素代替原来的元素。如果是运算符，还要注意变异前后的“运算目数”相同。

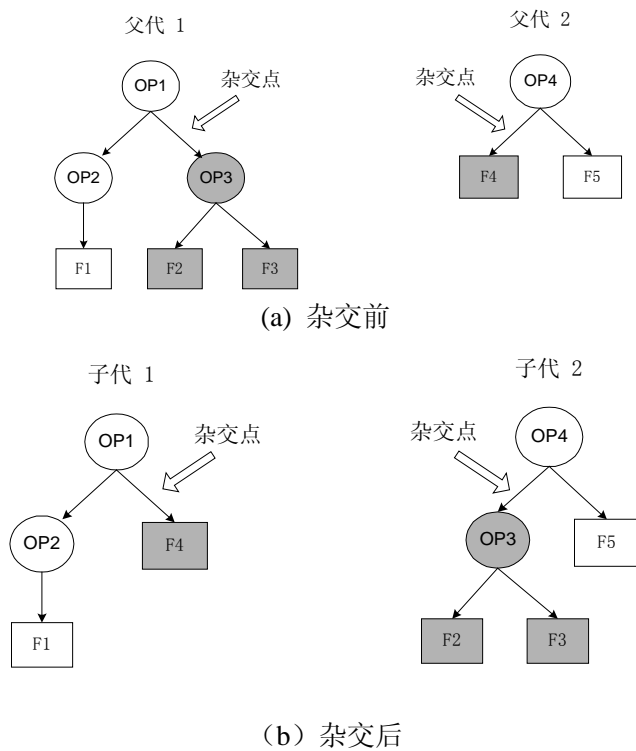


图 8 遗传编程的杂交算子

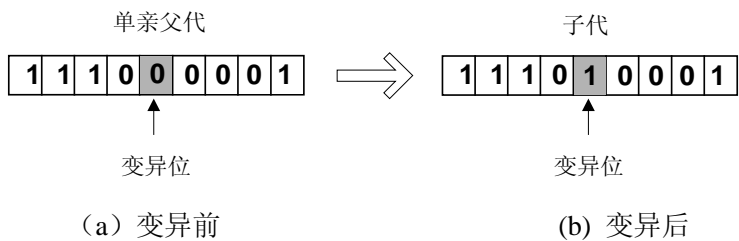
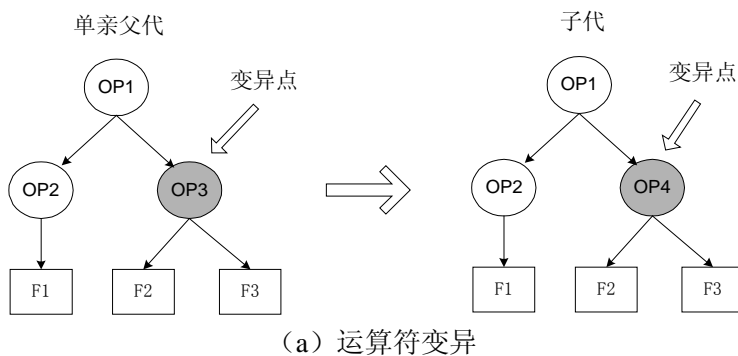
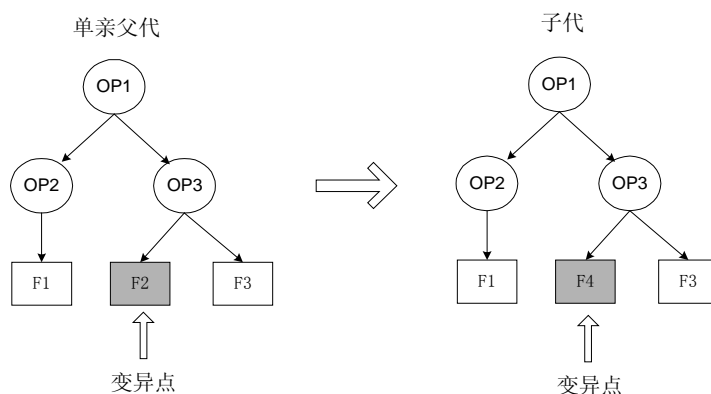


图 9 遗传算法的变异算子





(b) 终止符变异

图 10 遗传编程的变异算子

遗传编程的理论和应用虽然还只是刚刚起步，在如何优化数值和“回旋体”的避免方面<sup>[141]</sup>仍然需要继续的研究工作，但这并不能限制住遗传编程的广泛应用，特别是在模式识别中的特征构造和特征选择中，将大有用武之地。

### (3). 进化策略

进化策略 ES<sup>[1, 105, 108-111]</sup> 是于二十世纪六十年代由德国的 H.-P.Schwefel 和 I.Rechenberg 在研究流体动力学中的弯管形态优化过程中，共同开发出的一种适合于实数变量的、模拟生物进化的一种优化算法。其优化能力主要依靠变异算子的作用，后来受遗传算法的启迪，也引入了杂交算子，不过，杂交是进化策略的辅助算子。

设群体规模为  $N$ ，进化策略的个体表示为  $P_i(\mathbf{x}, \sigma)$   $i=1,2,\dots,N$ 。其中， $\mathbf{x}=\{x_1, x_2, \dots, x_M\}$  为群体中的一个候选实数解， $\sigma=\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M\}$  为候选解  $\mathbf{x}$  变异时的正实数参数，称为“策略参数”； $M$  为优化变量的个数，即优化空间的维数。Schwefel 引入了一种高斯变异算子，如果父代某个个体表示为  $P_k(\mathbf{x}, \sigma)$ ， $1 \leq k \leq N$ ，由该个体变异后的子代个体表示为  $P'_k(\mathbf{x}', \sigma')$ ，其中  $\mathbf{x}'=\{x'_1, x'_2, \dots, x'_M\}$ ， $\sigma'=\{\sigma'_1, \sigma'_2, \dots, \sigma'_M\}$ ，则变异过程为：

先按均值为 0，标准差为 1 的正态分布产生一个随机实数  $\alpha$ ；

然后按下面两式计算

$$\sigma'_j = \sigma_j \cdot \exp[\tau \cdot \alpha + \tau' \cdot \beta_j] \quad (j=1,2,\dots,M) \quad (1)$$

$$x'_j = x_j + \varepsilon_j \quad (j=1,2,\dots,M) \quad (2)$$

其中：

$\beta_j \sim NID(0,1)$  — 对循环变量  $j$ ，表示按均值为 0，标准差为 1 的高斯分布而产生的一个随机实数。  
即每个循环变量采用不同的随机数；

$\varepsilon_j \sim NID(0, \sigma'_j)$  — 表示按均值为 0，标准差为  $\sigma'_j$  的高斯分布而产生的一个随机数；

$\tau$  — 群体变异步长；

$\tau'$  — 个体变异步长。

从变异公式 (1) 和 (2) 可以看出，进化策略的变异主要是  $\sigma_j$  的带有随机性的调整， $\tau$  和  $\tau'$  是对调整起关键作用的两个参数，一般取：

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{2M}}; \tau' = \frac{1}{\sqrt{2\sqrt{M}}} \quad (3)$$

它们是固定不变的，所以，实质上，新的候选解是以原来候选解加上一个满足高斯分布的随机变量的一个样本值来变异的。

#### (4). 进化编程

进化编程 EP 也是在六十年代由美国的 L.J.Fogel 等<sup>[1,110,112-114]</sup>为求解预测问题而提出的一种有限状态机进化模型,在这个进化模型中,机器的状态基于均匀随机分布的规律来进行变异。90 年代, D.B.Fogel<sup>[113]</sup>又将其思想拓展到实数空间,使其能够用来求解实数空间中的优化问题,并在其变异中引入正态分布技术。它与进化策略有许多相似之处。个体的表示同进化策略,不同之处在于它不用杂交算子,变异与选择方式也与进化策略不同。变异方式为

$$\sigma_j' = \sqrt{\beta_j \cdot F(x) + \gamma_j} \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (4)$$

候选解的变异按(2)式进行。这里,  $F(x)$  为适应度函数,  $\beta_j$ ,  $\gamma_j$  为特定参数,一般取为 1 和 0。从(4)式可以看出,进化编程的  $\sigma_j$  是根据适应度函数的大小来调整的。

## 6 进化计算的研究展望

进化计算虽然在理论与应用方面都取得了令人瞩目的成就,但仍然存在许多理论和应用技术中的不足与缺陷,值得深入研究;同时,开辟进化计算应用的新领域也迫在眉睫。昔日的美好不能决定未来的辉煌,对未来的研究展望可以明确进化计算的研究方向。在生物技术与计算机科学高度发展的二十一世纪,进化计算将在以下几个关键问题上获得进展。

### (1). 遗传算法的早熟问题

遗传算法的早熟问题 (Premature Convergence) 是指进化过程收敛于非期望的局部极值或群体的最佳个体进化到问题的非最优解,进化过程就停止不前的现象。早熟问题严重影响了遗传算法的应用,目前,还没有一种通用的解决方法。早熟问题的困难在于用遗传算法求解一个复杂的实际优化问题,无法定量准确地判断在优化过程中何时出现早熟,因而,控制或消除它就比较困难。随着其他技术的发展,早熟问题也必将从遗传算法的遗留问题中销声匿迹。

### (2). 进化计算在人工智能中的应用

随着人们对工业系统智能性能要求的增长,人工智能的研究必将得到迅速的发展;而人工智能中存在着大量的复杂优化问题,单凭传统的优化技术,如梯度法,共轭方向法[101]等是无能为力的。作为新颖的智能优化技术,进化计算必将在未来的人工智能中起到核心的优化技术作用,如机器学习中的规则优化,分类器系统中知识的自动获取、筛选,进化计算与人工神经网络的融合,图象识别等。

### (3). 进化计算在人工生命研究中的应用

人工生命是研究用人工的方法模拟自然生命的特有行为,而基于进化计算的模型是研究人工生命的主要基础理论之一。这里,特有行为是指自组织行为、学习行为等。人工生命研究的意义在于,从科学的角度讲,通过对生命现象基本动力学的抽象,可以研究生命的起源,再现生命的原始进化过程,揭示生命遗传信息的存储与处理原理;从工程的角度讲,可以利用生命计算原理研究进化系统和自适应系统的构造,并应用在实际工程问题中。进化计算的进展必然也会促进人工生命的研究。

### (4). 进化计算与进化硬件

进化硬件的发展空间依然很大,需要硬件、软件和进化计算界的学者共同努力。

## 参考文献

- [1] D.B.Fogel: An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.5, No.1, 3-14,1994
- [2] J.H.Holland: Adaptation in Natural and Artificial Systems, MIT Press,1992
- [3] J.D.Bagley: The Behavior of Adaptive System which Employ Genetic and Correlation Algorithm, Ph.D.

- dissertation, Univeristy of Michigan, No.68-7556,1967
- [4] 陆金桂, 李 谦, 王 浩, 曹一家: 遗传算法原理及其工程应用, 中国矿业大学出版社, 1-4, 1997.12
- [5] G.Rudolph: Convergence Analysis of Canonical Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.5, No.1,96-101,1994
- [6] G.Rudolph: Convergence of Non-elitist Strategies. Proceedngs of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, New York,1994
- [7] A.E.Eiben, E.H.L.Aarts, and K.M.Van Hee: Global Convergence of Genetic Algorithms: A Markov Chain Analysis, in Parallel Problem Solving from Nature, H.-P. Schwefel and R.Manner, Eds. Springer,4-12,1991
- [8] R.Das, D.Whitley: The Only Challenging Problems are Deceptive: Global Search by Solving Order-1 Hyperplanes. Proceedings of International Conference on Genetic Algorithms,166-173,1991
- [9] A.Nix and M.D.Vose: Modeling Genetic Algorithms with Markov Chains, Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, Vol.5,1992
- [10] X.Qi and F.Palmieri: Theoretical Analysis of Canonical Genetic Algorithms with a Population Size in Continuous Space, Part I: Basic Properties of Selection and Mutation, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.5, No.1,102-119,1994
- [11] X.Qi and F.Palmieri: Theoretical Analysis of Canonical Genetic Algorithms with a Population Size in Continuous Space, Part II: Analysis of the Diversification Role of the Crossover, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.5, No.1, 120-129, 1994
- [12] J.J.Grefenstette: Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.16, No.1, 122-128, 1986
- [13] K.A.DeJong: Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, Ph.D. thesis, Dept. Computer and Communication Sciences, University of Michigan,1975
- [14] M.Srinivas and L.M.Patnaik: Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.24, No.4, 656-666, 1994
- [15] M.Gen and R. Cheng: Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley, 119-127, 1997
- [16] Z.Michalewicz: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Spinger, 209-237, 1996
- [17] E. Falkenauer: Genetic Algorithms and Grouping Problems, John Wiley, 1998
- [18] L.Qu and R.Sun: A Synergetic Approach to Genetic Algorithms for Solving Traveling Salesman Problem, Information Sciences, Vol.117, No.3-4, 267-283, 1999
- [19] D.E.Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989
- [20] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉, 王东生: 遗传算法及其应用, 人民邮电出版社, 1996.6
- [21] 潘正君, 康立山, 陈毓屏: 演化计算, 清华大学出版社, 广西科学技术出版社, 1998.7
- [22] 云庆夏, 黄光球, 王占权: 遗传算法和遗传规划, 冶金工业出版社, 1997.4
- [23] 刘 勇, 康立山, 陈毓屏: 非数值并行算法 (第二册: 遗传算法), 科学出版社, 1997.7
- [24] J.Stender: Parallel Genetic Algorithms: Theory and Application, IOS Press,1993
- [25] B.Raton: Genetic Algorithms for Pattern Recognition, CRC Press,1996
- [26] M.Shaunna, L.Tom and H. Abdulla: A Genetic Algorithm Environment for Star Pattern Recognition, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, Vol.6, 3-16,1998
- [27] H.Vafaie: Using Genetic Algorithms for Restructuring Feature-Based Representation Spaces, Ph.D. dissertation, George Mason University,1997
- [28] P.Mars, J.R.chen, and R.Nambiar: Learning Algorithms: Theory and Applications in Signal Processing, Control, and Communications, CRC Press,1996
- [29] 史忠植: 高级人工智能, 科学出版社, 249-270, 1998.1
- [30] J. Biethahn, and V. Nissen: Evolutionary Algorithms in Management Applications, Springer,1995
- [31] 师汉民, 陈吉红: 基因遗传算法的原理及在机械工程中的应用, 中国机械工程, Vol.3, No.3,27-30,1992

- [32] L.C.Jain, N.M.Martin: Fusion of Neural Networks, Fuzzy Sets, and Genetic Algorithms : Industrial Applications, CRC Press,1999
- [33] J.Stender,E.Hillebrand and J.Kingdom: Genetic Algorithms in Optimization, Simulation and Modelling, IOS Press,1994
- [34] 谢金星: 进化计算简要综述, 控制与决策, Vol.12, No.1, 1-7,1997
- [35] D.B.Fogel and L.J.Fogel eds.: Special Issue on Evolutionary Computation, IEEE Transactions on Neural Networks, Vol.5, No.1, 1-148, 1994
- [36] Z.Michalewicz ed.: Special Issue on Evolutionary Computation, Statistics and Computing, Vol.4,No.2,1994
- [37] S.J.Raff ed.: Special Issue on Genetic Algorithms, International Journal of Computers and Operations Research, Vol.22, No.1,1995
- [38] M.Gen, G.S.Wasserman, and A.E.Simth eds.: Special Issue on Genetic Algorithms and Industrial Engineering, International Journal of Computer & Industrial Engineering, Vol.30, No.4, 1996
- [39] J.J.Grefenstette ed. : Proceedings of the First International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, Hillsdale, NJ:Lawrence Erlbaum,1985
- [40] J.J.Grefenstette ed. : Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, Hillsdale,NJ: Lawrence Erlbaum,1987
- [41] J.D.Schaffer ed. : Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, San Mateo,CA: Morgan Kaufmann,1989
- [42] R.K.Belew, L.B.Booker eds. : Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, San Diego,CA: Morgan Kaufmann,1991
- [43] S.Forrest ed. : Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, San Mateo,CA: Morgan Kaufmann,1993
- [44] Eshelman ed. : Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, San Mateo,CA:Morgan Kaufmann,,1995
- [45] T.Back ed. : Proceedings of the Seventh International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications, San Mateo,CA:Morgan Kaufmann,1997
- [46] H.-P. Schwefel, R.Manner eds. : Parallel Problem Solving from Nature 1, Springer-Verlag,1990
- [47] R.Manner and B.Manderick eds. : Parallel Problems Solving from Nature 2, North Holland,1992
- [48] Davidor, Schwefel and Manner eds. : Parallel Problems Solving from Nature 3, Springer-Verlag,1994
- [49] H.-M.Ebeling, W.Voigt, I.Rechenberg, and H.P.Schwefel eds.: Parallel Problems Solving from Nature 4,Spinger-Verlag,1996
- [50] Proceedings of the First Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning(SEAL'96),Taejon,Korea, November, 1996
- [51] J.L.R.Filho and P.C.Treleven, C.Alippi: Genetic-Algorithm Programming Environments, Computer,Vol.27,No.6,28-43,1994
- [52] D.E.Goldberg: Computer-aided Gas Pipeline Operation Using Genetic Algorithms and Rule Learning, Doctoral dissertation, University of Michigan, 1983
- [53] D.E.Goldberg: Genetic Algorithms and Walsh Functions: Part I, a Gentle Introduction, Complex Systems, Vol.3, 129-152,1989
- [54] D.E.Goldberg: Genetic Algorithms and Walsh Functions: Part II, Deception and its Analysis, Complex Systems, Vol.3, 153-171,1989
- [55] D.E.Goldberg, K Milman and C.Tidd: Genetic Algorithms: A Bibliography, IlliGAL Technical Report 920008,1992
- [56] D.E.Goldberg:A Note on Boltzmann Tournament Selection for Genetic Algorithms and Population-oriented Simulated Annealing, Complex Systems, Vol.4,No.4, 445-460,1990



- [57] D.E.Goldberg,C.L.Bridges: An Analysis of a Reordering Operator on a GA-hard problem, Biological Cybernetics, Vol.62,397-405,1990
- [58] G.R.Harik, F.G.Lobo, and D.E.Goldberg: The Compact Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.3,No.4,287-297,1999
- [59] J.N.Kapur,H.K.Kesavan: Entropy Optimization Principles with Applications, Academic Press,1-150,1992
- [60] H.Kargupta: Information Transmission in Genetic Algorithm and Shannon's Second Theorem, IlliGAL Report: <http://gal4.ge.uiuc.edu/illigal.home.html>
- [61] Z.Michalewicz,D.Dasgupta, R.G.L.Riche and M.Schoenauer: Evolutionary Algorithms for Constrained Engineering Problems, Computers and Industrial Engineering, Vol.30,No.4,851-870,1996
- [62] A.Homaifar, X.Qi, and H.Lai: Constrained Optimization Via Genetic Algorithms, Simulation, Vol.62, No.4, 242-253, 1994
- [63] C.A.C.Coello: Use of a Self-Adaptive Penalty Approach for Engineering Optimization Problems, Computers in Industry,Vol.41,113-127,2000
- [64] W.Siedlecki and J.Sklansky: A Note on Genetic Algorithms for Large-Scale Feature Selection, Pattern Recognition Letters Vol.10,335-347,1989
- [65] H.Vafaie and K.DeJong: Feature Space Transformation Using Genetic Algorithms, IEEE Intelligent Systems, 57-65, March/April, 1998
- [66] J.Yang and V.Honavar: Feature Subset Selection Using a Genetic Algorithm, IEEE Intelligent Systems, 44-49, March/April, 1998
- [67] W.F.Punch etc.: Further Research on Feature Selection and Classification Using Genetic Algorithms, Proceedings of International Conference on Genetic Algorithm, Champaign III , 557-564, 1993
- [68] P.Chen, M.Nasu and T.Toyota: Self-reorganization of Symptom Parameters in Frequency Domain for Failure Diagnosis by Genetic Algorithms, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, Vol.6, 27-37, 1998
- [69] J.-M.Renders and S.P.Flasse: Hybrid Methods Using Genetic Algorithms for Global Optimization, IEEE Transactions on Systems,Man and Cybernetics,Vol.26,No.2,243-257,1996
- [70] J.A.Miller,W.D.Potter,R.V.Gandham,and C.N.Lapena: An Evaluation of Local Improvement Operators for Genetic Algorithms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol.23, No.5, 1340-1351,1993
- [71] B.Raton: Practical Handbook of Genetic Algorithms: New Frontiers, CRC Press,1997
- [72] B. Thomas: Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms,Oxford University Press, 1996
- [73] K.F.Man: Genetic Algorithms for Control and Signal Processing, Springer,1997
- [74] F.Herrera, J.Verdegay eds.: Genetic Algorithms and Soft Computing, Physica-Verlag,1996
- [75] Furuhashi, Takeshi eds.: Advances in Fuzzy Logic, Neural Networks, and Genetic Algorithms, Springer, 1995
- [76] Z.Michalewicz ed.: Evolutionary Algorithms in Engineering Applications, Spinger,1997
- [77] R.L.Haupt, S.E.Haupt: Practical Genetic Algorithms, Wiley,1997
- [78] Dawid, Herbert: Adaptive Learning by Genetic Algorithms: Analytical Results and Applications to Economic Models, Springer, 1996
- [79] B.P.Buckles,F.E.Petry: Genetic Algorithms, IEEE Computer Society Press,1992
- [80] 周红松: 演化算法理论及其在有序问题中的应用, 武汉大学硕士学位论文, 1995
- [81] 郭 涛: 模式演化算法及其在工作站群上的并行实现, 武汉大学硕士学位论文, 1996
- [82] 何 军: 人工生态计算模型的研究, 武汉大学博士学位论文, 1995
- [83] 潘正君: 基于演化计算的并行问题求解, 武汉大学博士学位论文, 1996
- [84] 高春华, 李人厚: 基于混合遗传算法训练方法的分类器参数设计, 西安交通大学学报, Vol.32,No.3,33-36,1998
- [85] 樊会元, 王尚锦, 席 光: 遗传算法引入进化方向算子的一个改进及应用, 西安交通大学学报,

- Vol.33,No.5,33-37,1999
- [86] 张 鄂, 黄锐明, 马作效: 解平面四杆机构约束优化问题的改进遗传算法, 西安交通大学学报, Vol.33,No.7,99-101,1999
- [87] 吴浩扬, 朱长纯, 常炳国等: 基于种群过早收敛程度定量分析的改进自适应遗传算法, 西安交通大学学报, Vol.33,No.11,27-30,1999
- [88] 蒋雄伟, 王振华, 谢恒昆: 基于遗传算法的神经网络在局部放电模式识别中的应用, 西安交通大学学报, Vol.33,No.12,1-4,1999
- [89] 裴树毅: 基于人工神经网络的预测理论及其应用, 西安交通大学博士学位论文, 1994
- [90] 樊可清: 基于回转振动信号的机械诊断技术研究, 西安交通大学博士学位论文, 1998
- [91] 史东锋: 大型回转机械的全息诊断技术研究, 西安交通大学博士学位论文, 1998
- [92] 邱 海: 动平衡中的信息原理, 西安交通大学博士学位论文, 1999
- [93] 王国华: 遗传算法及其在智能制造中的应用研究, 西安交通大学硕士学位论文, 21-32, 1998.6
- [94] D.B.Fogel,T.Fukuda,and L.Guan eds.: Special Issue on Computational Intelligence, Proceedings of the IEEE,Vol.87, No.9, 1415-1691, 1999
- [95] L.A.Zadeh: Fuzzy Logic, Neural Networks, and Soft Computing, Communications of the ACM, Vol.37, No.3, 77-84, 1994
- [96] B.Azvine, N. Azarmi and K.C.Tsui: An Introduction to Soft Computing - A Tool for Building Intelligence Systems, in Software Agents and Soft Computing: Towards Enhancing Machine Intelligence, Concepts and Applications, H.S.Nwana, N.Azarmi eds., 191-209,1997
- [97] 何振亚: 神经智能—认知科学中若干重大问题的研究, 4-6, 湖南科技出版社, 1997.1
- [98] X.Yao ed.: Following the Path of Evolvable Hardware, in Special Issue on Evolvable Hardware, Communications of ACM, Vol.42, No.4, 46-79,1999
- [99] D.Keymeulen, M.Iwata: Evolvable Hardware: A Robot Navigation System Test Bed, New Generation Computing,Vol.16, No.2, 97-122,1998
- [100] M. Sipper, D.Mange,and E.Sanchez: Quo Vadis Evolvable Hardware, in Special Issue on Evolvable Hardware, Communications of ACM, Vol.42, No.4, 50-56,1999
- [101] 张可村: 工程优化的算法与分析, 西安交通大学出版社, 249-261, 1988.1
- [102] J.R.Koza: Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection, MIT Press, 1992
- [103] J.R.Koza: Survey of Genetic Algorithms and Genetic Programming, <http://www-cs-faculty.stanford.edu/~koza/>
- [104] L.M.Howard and D.J.D'Angelo: The GA-P: A Genetic Algorithm and Genetic Programming Hybrid, IEEE Expert, 11-15, June, 1995
- [105] B.Soucek and the IRIS Group: Dynamic, Genetic, and Chaotic Programming: the Sixth Generation, A Wiley-Interscience Publication, 1992
- [106] K.E.Kinnear: Advances in Genetic Programming, MIT Press,1994
- [107] 康立山, 陈毓屏: 演化计算, 数值计算与计算机应用, No.3, 173-179,1995
- [108] H.-P.Schwefel: Numerical Optimization of Computer Models by Means of the Evolutionary Strategy, Interdisciplinary Systems Research, Vol.26, 1977
- [109] I.Rechenberg: Evolutionary Strategy: Optimization of Technical Systems According to the Principles of Biological Evolution, Frommann-Holzboog,1973
- [110] 周 明, 孙树栋: 遗传算法原理及应用, 国防工业出版社, 1999.6
- [111] 冯 春, 黄洪终: 一种新的优化搜索算法—进化策略, 机械科学与技术, Vol.16, No.3, 398-401, 1997
- [112] L.J.Fogel, A.J.Owens, and M.J.Walsh: Artificial Intelligence Through Simulated Evolution, John Wiley,1966
- [113] D.B.Fogel: Evolutionary Computation: Toward a New Philosophy of Machine Intelligence, IEEE Press,

1995

- [114] Z.米凯利维茨：演化程序—遗传算法和数据编码的结合 (Z.Michalewicz: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer Press), 周家驹等译, 科学出版社, 2000.1