

演化程序

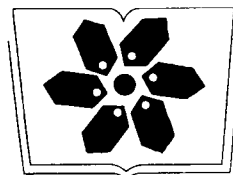
——遗传算法和数据编码的结合

〔美〕Z. 米凯利维茨 著

科学出版社

TP301.6
M66

454131



中国科学院科学出版基金资助出版

演化程序

——遗传算法和数据编码的结合

〔美〕Z. 米凯利维茨

著

周家驹 何险峰 译

查金荣 周家驹 校



00454161

科学出版社

2000

JS189/11

内 容 简 介

本书分三个部分共 16 章分别介绍了: 1.遗传算法的概念、数学原理及方法步骤; 2.遗传算法和数据编码联系起来所构成的演化程序; 3.演化程序面向一些实际应用。

本书语言生动, 结构合理, 较少使用专业性术语和深涩词汇, 适合面临优化问题的研究生、程序员、设计师、工程师及科研工作人员参考。

Originally published in English under the title:

“Genetic Algorithms+Data Structures= Evolution Programs” by

Zbigniew Michalewicz.

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1992,1994,1996.

All right reserved.

本书中文简体版由科学出版社和德国施普林格国际出版公司联合出版。未经出版者书面许可, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

演化程序——遗传算法和数据编码的结合/(美)米凯利维茨

(Michalewicz, Z.) 著;

周家驹, 何险峰译.-北京, 科学出版社, 2000

书名原文: Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs

ISBN 7-03-007065-8

I. 演… II. ①米… ②周… ③何… III. ①电子计算机-遗传算法
②电子计算机-编码 IV. TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 31650 号

图字: 01-98-2072 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

新蕾印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

2000 年 1 月第 一 版

开本: 787 × 1092 1/16

2000 年 1 月第一次印刷

印张: 18 1/2

印数: 1—1 800

字数: 410 000

定价: 37.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈北燕〉)

译者序

遗传算法和模拟退火、神经网络一起被称为三种非经典的数值优化算法。这些算法克服了传统算法的一些缺点，对一些复杂系统的优化有着明显的优势，其应用领域十分广阔，从分子模型化计算到发动机设计，几乎无所不在。神经网络在前几年比较热，但现在已明显降温，因为只用一个反传算法，从中很难更深入地开发思想和信息。而遗传算法（演化程序之一）相对而言则存在着广阔的可开发的天地。

我们是在 1996 进行遗传算法研究中发现英文版的，该书内容翔实，所表达的观点常有强烈的启发性，给我们印象颇深。在消化本书的同时，我们也正在进行一些自己的遗传算法研究，发现书中的一些观点和我们的思路及（有限的）开发经验很符合，如变群体规模、多种遗传算子的使用等。这促使我们想让此书以中文版形式与更多的读者见面。我们很快与该书作者——美国北卡罗来纳大学的 Z. 米凯利维茨教授和施普林格出版社取得了联系，并与作者交换了各自的看法和对演化程序的展望。1997 年 11 月，我们在北京接待了米凯利维茨博士，相处数日，充分交流，很受启发，获益良多，更增强了我们将此书中文版奉献给读者的愿望。

我们希望此书也能给读者以有益的启发，能将这类算法应用于读者的研究当中，也希望读者能对此类算法进行开发，提出自己的思想、见解，并付诸研究实践，这对我们来说是最欣慰不过的事了。

该书的翻译过程其实是一个学习的过程，译者学识有限，难免有错误和不妥之处，恳请读者不吝指出、赐教，亦或是进行讨论和交流，这是我们由衷的希望。

最后，我们要感激许志宏先生在与科学出版社进行联络当中给予的帮助。在工作当中，本室谢桂蓉副研究员、唐武成工程师、常裕斌同学和空间研究院 CAD 室周雯的帮助使本书得以顺利出版，在审校过程中，本所查金荣研究员付出了大量的辛勤劳动，在此一并致谢。

中国科学院 计算机化学开放实验室
周家驹 何险峰 1999 年 1 月于北京

译者通讯处：北京，三五三信箱，中国科学院化工冶金所 100080

E-Mail: jjzhou@ns.icm.ac.cn, xfhe@ns.icm.ac.cn

中 译 本 序

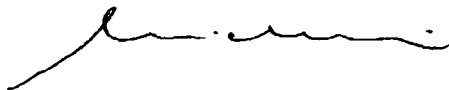
本书的第一版写于 7 年前的 1991 年秋季。那时，演化计算这一领域的多数研究都集中于遗传算法，其中一个群体中的个体是用定长的二进制串表达，算子（对应于个体的“遗传”组成的变化）是点杂交和翻动位的变异。本书最初的版本想要表达的思想是：一个演化算法成功的实现（在本书称为“演化程序”）需要其他与问题有关的知识。因此群体中的个体可以用适合于待处理问题的任何数据编码结构表达，算子可以并入其他启发式方法。评价函数不必返回度量群体中个体的标度值，而是可以返回其他有利于配对选择、表明个体是可行或不可行等等的信息。

今天，这一领域的多数研究者开发的都是针对各种各样有难度优化问题的杂化演化系统。复杂的数据编码结构，针对不同的表达建议的各种类型的算子并不少见。还有一些加入了其他启发式方法（如局部搜索、模拟退火）作为附加的算子以增强演化算法的性能。看起来经典的演化算法的分支（遗传算法、演化策略、演化规划、遗传规划）现在正在合并到一起来，因为各种思想的杂交和交叉培养，使将演化系统分级成上述传统类别中的某一类越来越难。

我很高兴在这一特殊时期看到本书的中文版及越来越多的研究者正积极地参与到演化计算的某些研究中。我于 1997 年秋天去了中国，那里研究项目的数量和质量，都给我深刻的印象。我希望这本中译本能更进一步增强中国的研究者在演化算法这一领域的视野。

我非常感激中国科学院化工冶金研究所计算机化学开放实验室的周家驹教授和他的学生何险峰为翻译本书所付出的努力。

Zbigniew Michalewicz



1998 年 7 月

第一版序

在过去 30 年中，人们对模拟自然过程的算法有着越来越浓厚的兴趣。巨大的并行计算机的出现使这些算法具有更实用的价值。这类算法中最知名的有演化规划、遗传算法、演化策略、模拟退火、分类系统和神经网络。最近（1990 年 10 月 1~3 日），德国的多特蒙德大学举办了第一届用借助自然的并行方法解决问题的论坛会(The First Workshop on Parallel Problem Solving from Nature)^[351]。

本书将讨论这些算法中的一个子类：基于进化规律的算法，即适者生存。在这类算法中，由代表潜在解的个体组成的群体经历了一系列的一元变异和多元杂交变换。这些个体为生存而努力：其选择方案在选择下一代时是趋向于较适个体的。经过若干代以后，程序收敛，这时的最好个体就很有希望代表最优解。

在这类基于进化规律的算法中有许多不同的种类。为勾勒出它们之间的相似性，我们使用了一个通用的词“演化程序”(Evolution Programs)。演化程序可以被看成是对遗传算法的概括。经典的遗传算法运作于定长的二进制串，而演化程序不必是这种情况。同时，在演化程序过程中并入了各种“遗传”算子，而经典的遗传算法只使用二进制杂交和变异。

遗传算法的起源可以追溯到 50 年代初，其间几个生物学家用计算机来模拟生物系统^[154]。到 60 年代后期和 70 年代的早期，由密歇根大学的 John Holland 指导完成的工作才导致了今天的遗传算法。现在，人们对遗传算法的兴趣日益升温——最近召开的第四届遗传算法国际会议（San Diego, 1991 年 6 月 13~16 日）吸引了大约 300 位参加者。

本书将讨论本人从 1989 年初（在新西兰惠灵顿的维多利亚大学工作时）到 1991 年后期三年的研究结果（自 1989 年 7 月以后，我的工作地点是美国北卡罗来纳大学夏洛特分校）。在此期间，我实算了各种对遗传算法的改进，包括对个体表达使用的不同数据编码和各种对它们进行运算的“遗传”算子。缘于我在约束起很主要作用的数据库方面的背景^[256, 260]，多数演化程序的开发都是针对约束问题的。

本书表达的演化程序的思想很早以前就已酝酿^[224, 277]，并随后得到一系列实算的支持。尽管一般来说演化程序缺乏强有力的理论背景，实算结果却是令人鼓舞的：它们常常比经典的遗传算法和其他针对特定类问题的知名算法执行得更好。

其他一些研究者在他们不同的研究阶段所进行的实算都是“演化规划”技术极好的例子，本书将讨论其中的部分内容。第 8 章给出了演化策略的概述，这种技术是由德国的 I. Rechenberg 和 H.-P. Schwefel^[319, 348]为解决参数优化问题而开发的。许多研究者研究了次序问题的演化系统性质，包括众所周知的“货郎担问题”（第 10 章）。

在第 11 章，我们给出了处理包括图、调度和分区问题的各种系统。第 12 章描述了由 C. Janikow^[200]开发的基于属性空间的归纳学习的演化程序。在结论部分，我们简要地讨论了由 J. Koza^[228]开发的产生 LISP 代码以解决问题的演化程序，并给出了新的编程环

境思想。

本书的组织如下。引言提供了对本书的主要思想和动机的一般性讨论。因为演化程序是基于遗传算法的原理，本书的第一部分将概述这一主题。第 1~3 章将解释遗传算法的定义、步骤以及原理。第一部分的第 4 章给出遗传算法的一些典型专题：常用的选择方法、比例等。

在第二部分，我们将解释一种数据编码：直到最近它才被遗传算法界广泛接受的浮点表达向量^[78]。我们的讨论只针对数值优化。第 5 章给出二进制和浮点表达的一些实算结果，第 6 章讨论对局部微调的相应的新“遗传”算子。第 7 章给出处理约束问题的两个演化程序：处理线性约束优化函数的 GENOCOP 系统和处理优化控制问题的 GAFOC^①系统。各种测试例子都进行了考虑；演化程序的结果和商品化系统进行了比较。第 8 章，这一部分的最后一章，概述了演化策略，并描述了一些其他方法。

第三部分是对最近建立起来的、应用于各种难题的演化程序的综述。并进一步给出了对基于次序的演化程序、带有矩阵和图染色体结构的演化程序的实算。同时还讨论了应用于机器学习的演化程序，并将它和其他方法进行了比较。

本书的题目再次强调了由 N. Wirth 在他 15 年前的书《算法+数据结构=程序》（Algorithms + Data Structures = Programs^[406]，科学出版社翻译出版）中使用的著名的表达方式^②。这两本书有着共同的思想。为建立一个成功的程序（特别是一个演化程序），要使用适当的数据结构（演化程序里的数据结构，即数据编码相当于染色体表达式）及适当的算法（对应于用来转变一个或者多个个体染色体的“遗传”算子）。

本书是针对广泛的读者的：研究生、程序员、研究者、工程师、设计师——所有面临优化问题挑战的人。特别是，本书对运筹学(Operations Research)很有帮助，因为许多问题是出于这一领域的兴趣而考虑的，如货郎担、调度、运输问题(traveling salesman, scheduling, transportation)。有大学入门数学水平和基本的编程概念的知识就足以理解所有的内容。

致 谢

这里十分感谢一些人和机构对本书的帮助。这些感谢要给予那些本书出版过程的不同阶段的合作者，他们是（按字母顺序）：Paul Elia, Lindsay Groves, Matthew Hobbs, Cezary Janikow, Andrzej Jankowski, Mohammed Kazemi, Jacek Krawczyk, Zbigniew Ras, Joseph chell, David Seniw, Don Shoff, Jim Stevens, Tony Vignaux 和 George Windholz。

还要感谢所有参加我在 1990 年秋季在 UNC-Charlotte 讲授的“遗传算法”课程的研究生及我的学生，他们完成了对遗传算法修正的各种论文：Jason Foodman, Jay Livingston, Jeffrey B. Rayfield, David Seniw, Jim Stevens, Charles Strickland, Swarnalatha Swaminathan 和 Keith Wharton。Jim Stevens 提供了有关兔子和狐狸的短故事（第 1 章）。

还要感谢来自美国北卡罗来纳州立大学的 Abdollah Homaifar, 来自 Loyola University

① 该系统在本书的第三版中没有讨论。

② 译者注：本书的英文名为：Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs。

(New Orleans)的 Kenneth Messa 和几位 UNC-Charlotte 的同事: Mike Allen, Rick Lejk, Zbigniew Ras, Harold Reiter, Joe Schell 和 Barry Wilkinson, 他们对本书的一些部分给出了评论。

还要感谢 Doug Gullett, Jerry Holt 和 Dwayne McNeil (Computing Services, UNC-Charlotte) 帮助我恢复偶然被删除的章节。同时要感谢 Jan Thomas (Academic Computing Services, UNC-Charlotte)的所有帮助。

我还要进一步感谢 Springer-Verlag 人工智能系列丛书 (Artificial Intelligence Series) 的编辑: Leonard Bolc, Donald Loveland 和 Hans Wossner 对出版此书的构想, 以及他们在整个过程中给予我的帮助。特别要感谢 Springer-Verlag 的英语编辑 J. Andrew Ross 对本书风格的宝贵帮助。

我要感谢 North Carolina Supercomputing Center (1990~1991)给予我的一系列帮助, 它允许我运行本文所描述的数百个实验。

本书引用了许多其他出版物的段落, 及一些我自己的已发表的文章。因此, 我将感谢所有这些出版物允许我使用这些材料。这包括下面的出版公司和个人: Pitman Publishing Company; Birkhauser Verlag AG; John Wiley and Sons, Ltd; Complex Systems Publications, Inc.; Addison-Wesley Publishing Company; Kluwer Academic Publishers; Chapman and Hall Ltd, Scientific, Technical and Medical Publishers; Prentice Hall; IEEE; Association for Computing Machinery; Morgan Kaufmann Publishers, Inc.; David Goldberg, Fred Glover, John Grefenstette, Abdollah Homaifar 和 John Koza。

最后, 我要感谢我的家庭在 1991 年漫长的夏季对我的耐心支持。

Zbigniew Michalewicz

1992 年 1 月于夏洛特

第二版序

演化计算领域已到达某种成熟阶段。几个精心安排的国际会议吸引了上百位参加者，如“国际遗传算法会议”^[167,171,344,32,129] (International Conferences on Genetic Algorithms——ICGA)，“借助自然的并行解决问题会议”^[351,251] (Parallel Problem Solving from Nature——PPSN)，“进化编程年会”^[351,251] (Annual Conferences on Evolutionary Programming——EP)；新的年会也即将开始 (IEEE 演化计算国际会议^[275,276]——IEEE International Conferences on Evolutionary Computation)。同时，全世界有几十个有关的论坛会、特别的交流会议和地方会议。一本新的杂志(《演化计算》——Evolutionary Computation) (MIT Press)^[87]，是完全致力于演化计算技术的；许多杂志组织了有关演化计算的特刊，如参考文献[118]、[26]。许多优秀的入门文章^[28,29,320,397,119]和技术报告提供了这一领域众多完整的参考资料^[161, 336, 297]。由德国多特蒙德大学的 Jorg Heitkotter 编制的 The Hitch-Hiker's Guide to Evolutionary Computation 也可从因特网上的 comp.ai.genetic 得到。

这种趋势促使我准备了本书的第二版，即本书的增强版。和第一版相同，本书的内容主要是由我近几年出版的文章组成。因此，本书代表演化计算领域的个人观点，而不是对这一领域所有活动的周全的综述。所以，本书并不是一本真正的教科书：虽然许多大学使用第一版作为“演化计算”课程的教材。为帮助未来富有潜力的学生，我在本书中加入了一些其他内容：一个带有简单遗传代码的附录、对这一领域其他发展的简要参考、一个索引等。同时没有在章节的结尾提供任何练习题。理由是：演化计算仍然还很年轻，还有许多工作要做——这在本书中将会很容易看到，它仍然在提出更多的问题而提供较少的答案。本书的意图是用简单的术语讨论演化计算这一领域，并用许多有趣的测试例子来讨论它们的简单性和优雅性。对给定问题写一个演化程序应该是一段愉快的经历，本书将对此提供指导。

同时利用这个机会校正了第一版中的一些错误。但仍然保留原始的组织：除了引言和结论，仍然是十二章，但一些章做了一定程度的扩展。第 4 章加入了三个新的节：收缩映射遗传算法、变群体规模遗传算法和对背包问题的约束处理技术。第 5 章加入了一些有关灰码 (Gray) 的信息。第 7 章用一个 GENOCOP 系统的实现进行了扩展。这包括第一手的对实算和结果的描述，对带有非线性约束的优化问题的实算描述 (GENOCOP II)。第 8 章增加了简要的关于多峰和多目标优化。第 11 章加入了有关在移动式机器人环境里的路径安排的内容。结论部分用最近的实算结果进行了扩展，并确认了一个推理，即与问题有关的知识能从时间和精度上增强一个算法的执行，但同时限制其应用性。这一章还包括一些有关文化算法 (cultural algorithms) 的信息。这一版有一个第一版中没有的索引和一个附录，其中给出了一个简单的遗传算法源代码。这个用 C 写成的代码对这一领域的初学者可能是有用的；为清楚起见，代码的效率不是很高。整个书也有一些其他微小变化：删除、加入或者修正了一些段落。还增加了一百多篇参考文献。

和第一版一样，这里很高兴地感谢近两年里和我共事的合作者；这些合作的许多结果都包含在本书中。他们是 Jaroslaw Arabas, Naguib Attia, Hoi-Shan Lin, Thomas Logan, Jan Mulawka, Swarnalatha Swaminathan, Andrzej Szalas 和 Jing Xiao。很感谢 Denis Cormier，他为本书的附录写了简单的遗传算法源代码。我很高兴所有花时间使我能在本书中分享他们思想的人们；他们促成了新版本大部分的改进。同时，我将感谢 UNC-Charlotte 和 North Carolina State University 所有参加 1992 年秋季电教课程的研究生们，他们使用了本书的第一版作为他们的教材，这对我是一段愉快和有意义的经历。

Zbigniew Michalewicz

夏洛特

1994 年 3 月

第三版序

在世界计算智能会议 (World Congress on Computational Intelligence, Orlando, 27 June ~ 2 July 1994) 期间, Ken De Jong, 一位权威的发言人和《演化计算》(Evolutionary Computation) 现任的主编, 说在这些天的会议上, 大多数演化技术的实现都是用非二进制表达。看起来演化方法 (或是演化算法、演化程序等) 的主要思想已被这一领域的大多数研究者广泛接受。因此, 多数演化技术的应用是处理一个由许多个体组成的群体, 其中每个个体表示问题的一个潜在解。选择过程引入了一种趋向性: 较好的个体有更多的机会生存繁殖。同时, 一个特殊的个体表达和一套改变它们的遗传代码的算子都与问题有关。因此, 通过表达和特殊算子的方法并入与问题有关的特殊知识可能在较大程度上增强演化系统的执行效果, 这种说法确实是无可争议的。另外, 成功地实现了许多这样的杂化系统^[89]。

“...简单遗传算法的应用推广已远远超出我们最初的理论和理解, 并产生了重新研究和扩展它们的需要”

我相信, 这对于演化计算领域的研究者来说, 是一个最具挑战性的任务。最近的研究结果通过提供一些理论基础支持了这些实算的(experimental)发展, 见 Nick Radcliffe 在形式分析(formal analysis)和相应的重组方面的工作^[315~317]。然而, 对演化技术解决优化问题的各种影响因素却有必要做更进一步的研究。不管对演化技术的理解如何变换, 本书的这一版本在安排上保持不变; 例如, 引言部分基本没有任何改变 (有关遗传算法向更复杂、更与问题相关的系统转变过程的讨论)。本书仍由三部分组成, 它们分别讨论了演化计算领域最知名的技术: 遗传算法、数值优化以及演化程序的各种应用。本版本对先前的版本做了一些改变。除了出现在许多章节 (包括附录 A) 里的小变化、更正及修改外, 主要的改变有:

- 缘于数值域里约束优化的一些新进展, 第 7 章完全进行了重写;
- 第 11 章做了较大的修改, 并增加了一些新进展;
- 新的第 13 章讨论了原始的演化规划技术和新的遗传规划方法;
- 第 14 章加入了第二版结论部分的材料;
- 第 15 章给出了对演化方法中启发式方法和约束处理技术的综述;
- 结论部分进行了重写, 以讨论当前演化技术研究的方向; 正是这种变化, 本章开始部分的引证也有所改变;
- 附录 B 和附录 C 包括几个可能用在演化技术实算上的测试函数 (分别代表无约束和约束);
- 附录 D 讨论了几个可能的设计; 如果本书用作有关面向工程的教科书, 这一部分

可能是很有用的。

我希望这些改变能更进一步增强本书的通用性。

像第一版和第二版一样，我很高兴能在这里感谢过去两年里和我共事的几个合作者的帮助，这种合作的许多结果都包括在本书中。未在先前版本中列出的新的合作者包括（按字母顺序）：Tom Cassen, Michael Cavaretta, Dipankar Dasgupta, Susan Esquivel, Raul Gallard, Sridhar Isukapalli, Rodolphe Le Riche, Li-Tine Li, Hoi-Shan Lin, Rafic Makki, Maciej Michalewicz, Mohammed Moinuddin, Subbu Muddappa, Girish Nazhiyath, Robert Reynolds, Marc Schoenauer 及 Kalpathi Subramanian。很感谢 Sita Raghavan，他改进了附录 A 中的遗传算法源代码；也很感谢 Girish Nazhiyath，他开发了处理非线性约束的 GENOCOP III 系统的新版本（在第 7 章中有详细描述）。我要感谢所有花时间与我分享此书的人，他们促成了新版本的许多改动。特别是，我要表达对和我一起进行《演化计算手册》(Handbook of Evolutionary Computation)^[17]编辑工作的 Thomas Back 和 David Fogel 的感激之情，以及我对 Springer-Verlag 的执行编辑 Hans Wossner 在本书的出版工作中给予我的帮助。还要感谢美国国家自然科学基金(National Science Foundation)的资助 (IRI-9322400)，它帮助我对此版本进行了准备，得益于这种支持，我能够将许多结果写进本书中（第 7 章的修正和新的第 15 章）。很感激美国国家科学自然基金的计划主任 Larry Reeker 的帮助。还要感激所有参与我 1994/1995 年期间课程的 UNC-Charlotte, Universidad Nacional de San Luis 和 Linkoping University 的研究生；我很喜欢几乎每一个提议，而且发现它们很有价值。

Zbigniew Michalewicz

夏洛特

1995 年 10 月

目 录

引言	1
第一部分 遗传算法	
第 1 章 遗传算法的主要特征	11
1.1 简单函数的优化	14
1.1.1 表达	15
1.1.2 初始群体	16
1.1.3 评价函数	16
1.1.4 遗传算子	16
1.1.5 参数	17
1.1.6 实算结果	17
1.2 囚犯困境	17
1.2.1 策略表达	18
1.2.2 遗传算法的轮廓	18
1.2.3 实算结果	18
1.3 货郎担问题	19
1.4 爬山法、模拟退火法和遗传算法	20
1.5 结论	23
第 2 章 遗传算法的运行步骤	24
第 3 章 遗传算法的理论基础	34
第 4 章 遗传算法的典型专题	43
4.1 取样机制	43
4.2 函数特征	48
4.3 收缩映射遗传算法	50
4.4 变群体规模的遗传算法	54
4.5 遗传算法、约束及背包问题	59
4.5.1 0/1 背包问题及测试数据	60
4.5.2 算法的描述	61
4.5.3 实算与结果	63
4.6 其他思想	66
第二部分 数值优化	
第 5 章 二进制编码和浮点编码	73
5.1 测试例子	74

5.2 两种执行	75
5.2.1 二进制执行	75
5.2.2 浮点执行	75
5.3 实算	76
5.3.1 随机变异和杂交	76
5.3.2 非均匀变异	77
5.3.3 其他算子	78
5.4 执行时间	79
5.5 结论	79
第 6 章 局部微调	80
6.1 测试例子	80
6.1.1 线性二次方问题	81
6.1.2 收获问题	81
6.1.3 推车问题	82
6.2 数值优化的演化程序	82
6.2.1 浮点表达	82
6.2.2 特殊算子	83
6.3 实算和结果	84
6.4 演化程序与其他方法	85
6.4.1 线性二次方问题	85
6.4.2 收获问题	86
6.4.3 推车问题	86
6.4.4 非均匀变异的优越性	87
6.5 结论	88
第 7 章 处理约束技巧	90
7.1 一个演化程序: GENOCOP 系统	90
7.1.1 一个例子	93
7.1.2 算子	94
7.1.3 测试 GENOCOP	97
7.2 非线性优化: GENOCOP II	100
7.3 其他技术	105
7.3.1 五个测试实例	107
7.3.2 实算	110
7.4 其他可能性	112
7.5 GENOCOP III	114
第 8 章 演化策略和其他方法	118
8.1 演化策略的进展	118
8.2 演化策略和遗传算法的比较	121

8.3 多峰和多目标函数优化	124
8.3.1 多峰优化	124
8.3.2 多目标优化	126
8.4 其他演化程序	128
第三部分 演化程序	
第 9 章 运输问题	135
9.1 线性运输问题	135
9.1.1 经典遗传算法	136
9.1.2 引入与问题有关的知识	138
9.1.3 作为表达结构的矩阵	141
9.1.4 结论	145
9.2 非线性运输问题	146
9.2.1 表达	146
9.2.2 初始化	146
9.2.3 评价	146
9.2.4 算子	146
9.2.5 参数	147
9.2.6 测试	147
9.2.7 实算和结果	150
9.2.8 结论	155
第 10 章 货郎担问题	156
第 11 章 基于各种离散问题的演化程序	177
11.1 日程表	177
11.2 时间表问题	182
11.3 分割对象或图	183
11.4 在移动式机器人环境里的路径安排	187
11.5 评述	193
第 12 章 机器学习	197
12.1 Michigan 法	199
12.2 Pitt 法	202
12.3 一个演化程序: GIL 系统	203
12.3.1 数据编码	203
12.3.2 遗传算子	204
12.4 比较	207
12.5 REGAL	207
第 13 章 演化规划和遗传规划	209
13.1 演化规划	209
13.2 遗传规划	210

第 14 章 演化程序的等级	213
第 15 章 演化程序和启发式方法	227
15.1 技术和启发式规则概述	228
15.2 可行解和不可行解	230
15.3 评价个体的启发式方法	232
第 16 章 结论	242
附录 A 一个简单实用的遗传算法 C 代码	249
附录 B 测试函数	257
附录 C 用于约束优化的测试函数	261
附录 D 演化计算方法课程安排	265
参考文献	269

引 言

近 30 年来,人们对借助进化和遗传规律来解决问题的系统产生了越来越浓厚的兴趣:这样的系统维持潜在解的群体,运行一些基于个体适应值的“遗传”算子的选择过程。演化策略(Evolution Strategies)属于其中之一,它是模拟自然进化规律解决参数优化问题的一类算法^[319,348]。Fogel 的演化规划(Evolutionary Programming)是一类通过小的有限状态机空间进行搜索的技术^[126]。Glover 的分散搜索(Scatter Search)技术是维持一参考点的群体,并通过加权线性组合来产生后代^[142]。另一类基于进化的系统就是 Holland 的遗传算法(Genetic Algorithms —— GAs)系统^[188]。1990 年, Koza 建议了一个演化系统——遗传规划(Genetic Programming)来搜索解决特定问题的最适计算机程序^[231]。

本文使用一个公共的术语:演化程序(Evolution Programs —— EP)来表示所有借助进化思想的系统(包括上述的系统)。演化程序的结构如图 0.1 所示:

```
procedure evolution program
begin
     $t \leftarrow 0$ 
    initialize  $P(t)$ 
    evaluate  $P(t)$ 
    while ( not termination-condition) do
        begin
             $t \leftarrow t+1$ 
            select  $P(t)$  from  $P(t-1)$ 
            alter  $f(t)$ 
            evaluate  $P(t)$ 
        end
    end
end
```

图 0.1 演化程序的结构

演化程序是一种概率算法,它维持由许多个体组成的一个群体。在第 t 代, $P(t) = \{x_1^t, \dots, x_n^t\}$ 。每个个体表达问题的一个潜在解,任何演化程序是以一些可能很复杂的数据编码 S 来实现的。对每个解 x_i^t 进行评价以给出对其“适应值”的度量。然后,通过选择较适个体的步骤(选择步骤)构成一个新群体(第 $t+1$ 次迭代),一些新群体的成员通过“遗传”算子的转换构成新的解(变换步骤)。其中的一元变异型转换 m_i 通过单个个体 ($m_i: S \rightarrow S$) 较小的变换产生新个体,高阶杂交型转换 c_j 通过组合两个或多个个体 ($c_j: S \times \dots \times S \rightarrow S$) 的片断产生新个体。经过若干代后程序收敛。此时寄希望的是最好个体表达一个近似最优的合理解。