

TM7
X68

遗传算法 及其在电力系统中的应用

熊信银 吴耀武

华中科技大学出版社



A0964536

图书在版编目(CIP)数据

遗传算法及其在电力系统中的应用/熊信银 吴耀武
武汉:华中科技大学出版社, 2002年1月
ISBN 7-5609-2591-X

I. 遗…

II. ①熊… ②吴…

III. 遗传算法-应用-研究生-教材

IV. TM7

遗传算法及其在电力系统中的应用

熊信银 吴耀武

责任编辑:黄以铭
责任校对:章 红

封面设计:刘 卉
责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

经 销:新华书店湖北发行所

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:850×1168 1/32 印张:7.75 插页:2

字数:177 000

版次:2002年1月第1版 印次:2002年1月第1次印刷

印数:1—1 200

ISBN 7-5609-2591-X/TM·89

定价:13.50元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前 言

遗传算法(Genetic Algorithm,简称GA)是一种模拟生物界自然选择和自然遗传机理的高度并行、随机搜索和自适应寻优方法。

遗传算法有3个显著特点:

①从多个初始点开始,沿多条线路搜索,能以比较大的概率找到所优化问题的全局最优解;

②鲁棒性能好,对目标函数要求较少,既不要求可微,又不要求连续;

③可方便地用于处理传统优化方法难以解决的离散且复杂的非线性问题。

由于遗传算法具有上述特点,因而它已广泛应用于解决各种问题,例如,规划设计,组合优化,经济运行,自适应控制,模式识别,人工智能,分子生物学,故障诊断以及计算机技术等领域,并取得了可喜的效果。随着遗传算法基本原理、方法和应用技巧的深入研究和发 展,其应用范围将愈来愈广泛。

本书共分5章。第一章遗传算法基本原理;第二章电源规划;第三章输电网络规划;第四章电力系统无功优化;第五章电力市场。

本书在编写过程中得到了华中科技大学电气与电子工程学院诸多老师的关心和帮助以及同仁们的大力支持,在此,作者一并表示衷心的感谢。

限于作者的学识水平,书中的不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2001年9月

写在“研究生用书”出版 10 周年

在今天，面对科技的迅速发展，知识经济已见端倪，国际竞争也日趋激烈，显然，国家之间的竞争是国家综合实力的竞争，国家综合实力的竞争关键是经济实力的竞争，而经济实力的竞争关键又在于科技（特别是高科技）的竞争，科技（特别是高科技）的竞争归根结底是人才（特别是高层次人才）的竞争，而人才（特别是高层次人才）的竞争基础又在于教育。“百年大计，教育为本；国家兴亡，人才为基。”十六个字、四句话，确是极其深刻的论断。目前，国际形势清楚表明：我们国家的强大与民族的繁荣，主要立足于自己，以“自力更生”为主；把希望寄托于他人，只是一种不切实际的幻想。这里，我们决不是要再搞“闭关锁国”，搞“自我封闭”，因为那是没有出路的；我们强调的是要“自信，自尊，自立，自强”，要以“自力更生”为主，走自己发展的道路。

显然，知识经济最关键的是人才，是高层次人才的培养，而作为高层次人才培养的研究生教育就在一个国家的方方面面的工作中，占有十分重要的战略地位。可以说，没有研究生教育，就没有威伟雄壮的科技局面，就没有国家的强大实力，就没有国家在国际上的位置，就会挨打，就会受压，就会被淘汰，还说什么知识经济与国家强大？！

“工欲善其事，必先利其器。”教学用书是教学的重要

基本工具与条件。这是所有从事教育的专家所熟知的事实。所以,正如许多专家所知,也正是原来的《“研究生用书”总序》中所指出,研究生教材建设是保证与提高研究生教学质量的重要环节,是一项具有战略性的基本建设。没有研究生的质量,就没有研究生教育的一切。

我校从 1978 年招收研究生以来,即着力从事于研究生教材与教学用书的建设。积十多年建设与实践的经验,我校从 1989 年起,正式分批出版“研究生用书”。第一任研究生院院长陈珽教授就为之写了《“研究生用书”总序》,表达了我校编写这套用书的指导思想与具体要求,“要力求‘研究生用书’具备科学性、系统性、先进性”。后三任研究生院院长,也就是各任校长黄树槐教授、我本人和周济教授完全赞同这一指导思想与具体要求,从多方面对这套用书加以关心与支持。

我是十分支持出版“研究生用书”的。早在 1988 年我在为列入这套书中的第一本,即《机械工程测试·信息·信号分析》写“代序”时就提出:“一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。”但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在“这一特定方面”,他也可以选择一本有关的书作为了解与学习这方面专业知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣在“这一特定方面”,他更应选择一本有关的书作为主要学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书。这就是我赞成为研究生编写系列教学用书的原因。

目前,这套书自第一本于 1990 年问世以来,已经度

过了10个春秋,出版了8批共49种,初步形成规模,逐渐为更多读者所认可。在已出版的书中,有15种分获国家级、部省级图书奖,有16种一再重印,久销不衰。采用此套书的一些兄弟院校教师纷纷来信,赞誉此书为研究生培养与学科建设做出了贡献,解决了他们的“燃眉之急”。我们感谢这些赞誉与鼓励,并将这些作为对我们的鞭策与鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”

现在,正是江南春天,“最是一年春好处”。华工园内,红梅怒放,迎春盛开,柳枝油绿,梧叶含苞,松柏青翠,樟桂换新,如同我们的国家正在迅猛发展、欣欣向荣一样,一派盎然生机。尽管春天还有乍寒时候,我们国家在前进中还有种种困难与险阻,来自国内与来自国外的阻挠与干扰,有的还很严峻;但是,潮流是不可阻挡的,春意会越来越浓,国家发展会越来越好。我们教师所编的、所著的、所编著的这套教学用书,也会在解决前进中的种种问题中继续发展。然而,我们十分明白,这套书尽管包含了我们教师的辛勤的长期的教学与科研工作的劳动结晶,作为教学用书百花园中的一丛鲜花正在怒放,然而总会有这种或那种的不妥、错误与不足,我衷心希望在这美好的春日,广大的专家与读者,不吝拨冗相助,对这套教学用书提出批评建议,予以指教启迪,为这丛鲜花除害灭病,抗风防寒,以进一步提高质量,提高水平,更上一层楼,我们不胜感激。我们深知,“一个篱笆三个桩”,没有专家的指导与支持,没有读者的关心与帮助,也就没有这套教学用书的今天。我衷心祝愿在我们学校第三次大发展的今天,在百年之交与千年之交的时候,这套教学用书会以更

雄健的步伐,走向更美好的未来。

诗云:“嚶其鸣矣,求其友声。”这是我们的心声。

中国科学院院士
华中理工大学学术委员会主任

杨叔子

于华工园内

1999年5月15日

目 录

第一章 遗传算法基本原理

第一节 绪论	(1)
一、生物进化与遗传算法	(1)
二、遗传算法的发展及特点	(3)
三、遗传算法中的基本概念和术语	(5)
第二节 遗传算法基本操作	(6)
一、选择操作	(6)
二、交叉操作	(11)
三、变异操作	(13)
第三节 遗传算法基本定理	(16)
第四节 遗传算法解题过程	(27)
一、准备工作	(27)
二、从目标函数到适应度函数	(28)
三、遗传算法解题步骤	(29)
四、简单算例	(31)

第二章 电源规划

第一节 概述	(36)
第二节 考虑能源分区平衡的电源规划模型	(40)
一、若干问题及其处理	(41)
二、电源规划数学模型	(49)

三、优化方法及求解过程·····	(59)
第三节 基于遗传算法的电源规划模型·····	(68)
一、基于遗传算法的电源规划模型·····	(69)
二、模型的原理框图及求解步骤·····	(72)

第三章 输电网络规划

第一节 基础知识·····	(78)
一、概述·····	(78)
二、直流潮流模型·····	(80)
三、输电系统的可靠性分析·····	(83)
四、输电网络线性潮流估计·····	(102)
第二节 基于 Benders 分解技术的输电网络规划·····	(108)
一、数学模型·····	(109)
二、求解方法·····	(111)
第三节 基于遗传算法的输电网络规划模型·····	(121)
一、概述·····	(121)
二、数学模型·····	(123)
三、遗传算法实现与求解过程·····	(125)

第四章 电力系统无功优化

第一节 概述·····	(134)
一、电力系统无功优化的目的和意义·····	(134)
二、电力系统无功优化基本数学模型·····	(138)
三、无功优化方法综述·····	(142)
第二节 基于 Box 算法的无功优化配置数学模型·····	(168)
一、电力系统无功优化配置数学模型·····	(168)
二、求解方法——Box 算法·····	(171)

三、无功优化配置数学模型求解过程及改进	(176)
第三节 遗传算法在无功优化规划中的应用	(178)
一、无功优化规划模型描述	(178)
二、无功补偿优化数学模型	(186)
三、事故检验数学模型	(188)
四、模型求解——遗传算法及改进	(191)

第五章 电力市场

第一节 概述	(197)
一、基本概念	(197)
二、国外电力市场发展简况	(200)
三、国内电力市场现状及发展	(203)
第二节 电力市场的技术支持系统	(207)
一、基本要求	(208)
二、技术支持系统	(209)
三、支持电力市场的自动化系统和通信手段	(211)
第三节 电价——电力市场的支点	(215)
一、电价理论	(215)
二、电价计算方法	(218)
第四节 遗传算法在电力市场竞价机制中的应用	(222)
一、投标竞价数学模型	(222)
二、用遗传算法寻优	(226)
参考文献	(231)

第一章 遗传算法基本原理

第一节 绪 论

一、生物进化与遗传算法

遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 是一种建立在自然选择原理和自然遗传机制上的迭代式自适应概率性搜索方法。它模拟自然界中生物进化的发展规律, 在人工系统中实现特定目标的优化。目前, 遗传算法发展迅速, 已被广泛应用于解决各种问题, 例如, 系统优化、机器学习、工程控制、模式识别、人工智能、故障诊断以及计算机技术等领域, 取得了良好的效果。随着遗传算法的基本原理、方法及其应用技巧的深入研究, 其应用范围也越来越广泛。早在 1859 年, 英国生物学家达尔文 (C. R. Darwin) 发表了《物种起源》专著, 提出了以自然选择为基础的生物进化论学说。根据达尔文的进化论, 生物进化发展主要有 3 个原因, 就是遗传、变异和选择。

遗传是指子代和父代相似。遗传是生物进化的基础。遗传性是一切生物所共有的特性, 正是这种遗传性, 使得生物能够把它的

特性、性状遗传给后代, 在后代中保持相似性。

变异是指子代和父代有某些不相似的特性, 即子代永远不会和父代完全一样。变异是生物个体之间相互区别的基础。变异为生物的进化和发展创造了条件。

选择是指保留和淘汰的意思。选择决定生物进化的方向。选择分为人工选择和自然选择。人工选择是指在人为条件下, 把对人有利的生物个体保留下来, 对人不利的生物个体淘汰掉。自然选择是指生物在自然界的生存环境中, 适者生存, 不适者被淘汰掉。巨大的自然界力以及生物的竞争等都是选择的力量。世界上所有的形形色色的生物, 都是在自然选择的影响下, 在悠久的岁月中形成的。

因此, 生物就是在遗传、变异和选择 3 种因素的作用下, 不断地向前发展。遗传巩固和发展选择的结果, 变异为选择提供依据, 选择是通过遗传和变异发挥作用, 并控制变异和遗传的方向, 使变异和遗传朝着适应生存环境的方向发展, 这样, 生物就会从简单到复杂, 从低级到高级不断地向前进化和发展。

生物的各项生命活动都有它的物质基础, 生物的遗传和变异也不例外。遗传物质的主要载体是染色体。染色体主要是由脱氧核糖核酸 DNA 和蛋白质构成。其中 DNA 在染色体里含量稳定, 结构也相对稳定, 能够自我复制和产生可遗传的变异, 因此, 它是主要的遗传物质。而生物的性状遗传, 主要是通过染色体上的基因遗传给后代的。基因是控制生物性状的遗传物质的功能和结构的基本单位, 又称遗传因子。

生物的变异是由遗传物质引起的变异, 有 3 种可能性: 基因重组、基因突变和染色体变异。基因重组是指控制不同性状的基因的重新组合。基因突变是指基因内部的化学变化。每种生物的染色体无论结构或数目都是相对稳定的, 但在自然条件或人为条件的

作用下,染色体的结构和数目都可以发生变化,不过,染色体数目的改变是染色体变异的一个主要方面。

根据达尔文以自然选择为基础的生物进化论学说,生物的变异一般是不定向的,而自然选择是定向的,只有能适应生存环境的变异类型才能生存下来,繁殖后代,而那些与生存环境不相适应的变异类型就会被淘汰。

由于生物进化论揭示了生物自然选择的进化发展规律,人们从中受到了启迪,生物进化论的自然选择过程蕴含着一种搜索和优化的先进思想,将这种思想用于科学研究和工程技术领域而发展起来的方法,称为遗传算法,这种算法为解决许多传统的优化方法难以解决的优化问题提供了崭新的途径。

二、遗传算法的发展及特点

遗传算法最早是由美国密执安(Michigan)大学 J. H. Holland 教授在 1975 年发表的论文“自然和人工系统的适配”中提出的,文中叙述了以二进制数字串为基础的基因模式理论及基本定理,为遗传算法奠定了坚实的理论基础。同年,在该校的一篇博士论文中,将遗传算法用于解决优化问题。随后,遗传算法的研究吸引了大量的研究者和探索者,去研究如何描述待实现系统的行为,以及如何用于求解问题,其中,以 D. E. Goldberg 的贡献最为突出,他不仅建立和完善了整个遗传算法系统,而且成功地将其用到搜索、优化及机器学习等领域,为遗传算法的应用开辟了广阔的天地。经过几十年的努力,遗传算法现已成为一种成熟的具有极高鲁棒性和广泛适用的优化方法。

J. H. Holland 创建的遗传算法是一种搜索方法。它使用二进制编码,即用一定长度的 0、1 二进制数字串表示某个变量。对于多

个变量的优化问题,就将各个变量的二进制数字串组合在一起形成一个码链,或称为染色体。数字串中的每一个二进制位码,称作基因码,或简称基因。每个数字串表示一个个体,代表优化问题的一个解。由若干个数字串组成的集合,称为群体,这个群体就代表优化问题解的集合。

遗传算法的基本思路是,利用上述的数字串,模拟由遗传算子作用这些数字串构成的群体的进化过程。遗传算法求解过程类似于生物进化,通过作用于染色体上的基因,寻找好的染色体来求解优化问题。遗传算法通过选择操作,有组织地、随机地交换信息来重新组合那些适应性好的个体,使适合于生存条件的优良个体有较多的繁殖后代的机会,让优良特性得以遗传,体现自然界中适者生存、劣者淘汰的规律,在每一代中,利用上一代个体结构中适应性好的基因来生成新的个体,偶尔,也要在某些个体结构中尝试用新的基因去替代原有的基因来生成新的个体。

遗传算法是一种随机算法,但它不是简单的随机移动,它能够有效地利用已有个体的信息来搜索那些有希望改进优化问题解的个体。

在搜索过程中,遗传算法需要的仅是对所产生的每个染色体进行评价,并基于适应度函数值来选择染色体,使适应性好的染色体有更多的生存和繁殖机会,从而使整个群体不断优化并最终找到问题的全局最优解。

遗传算法利用简单的编码技术和自然选择原理来表现复杂的现象,用于解决非常困难的优化问题。也就是说,遗传算法运用二进制数字串组成的人工染色体,使遗传操作简单易行;应用自然选择原理,消除问题解中不适应因素;各种遗传算子综合作用,充分利用了问题原有解中已存在的信息,从而加快了搜索进化过程。

遗传算法与传统的优化方法相比,具有下述特点:

① 遗传算法处理的是待求问题变量的编码,而不是变量的本身,也就是说遗传操作是在给定群体中的每个个体数字串上进行的。

② 遗传算法使用概率规则而不是确定性规则指导搜索,只要一个适应度函数值,而不必要求其他辅助信息,诸如连续性、导数存在和单峰等,因而具有极好的鲁棒性和广泛的适应性。

③ 遗传算法通过控制群体中 N 个数字串,能处理各代中大量的模式,在每一代中被处理的模式数目大概是 N^3 ,这一切都是在群体中并行进行的,也就是说,遗传算法同时搜索解空间中许多个点而不是一个点,因而能够快速全局收敛。遗传算法这种隐含的并行性是它区别于其他优化方法最主要的因素。

④ 遗传算法像撒网一样,在变量空间中进行寻优,由 N 个数字串组成的群体在遗传因子的作用下,同时对空间中不同的区域进行充分搜索,从而构成一个不断优化的群体序列。遗传算法是通过保持在解空间不同区域中各个点的搜索,而不是盲目地穷举或瞎碰,故相对其他优化方法而言,遗传算法能以很大的概率找到优化问题的全局最优解。

三、遗传算法中的基本概念和术语

遗传算法中使用的基本概念和术语如下:

染色体——遗传物质的主要载体,指多个基因的集合。

基因——控制生物性状的遗传物质的功能和结构的基本单元,又称遗传因子。

基因型——它是性状染色体的内部表现,或者说,由遗传因子组合的模式,称为基因型。

表现型——它是由染色体决定性状的外部表现,或者说,根据

遗传因子形成的个体,称为表现型。

个体——指染色体带有特征的实体称为个体。

群体——染色体带有特征的个体的集合,称为群体,该集合内的个体数目称为群体规模。

适应度函数——各个个体自适应环境的程度函数,称为适应值函数或适应度函数。

选择——用某种方法从群体中选取若干个体的操作称为选择。

交叉——把两个染色体重新组合的操作称为交叉,又称杂交。

变异——让遗传因子以一定的概率变化的操作称为变异。

编码——从表现型到基因型的映射称为编码。

解码(释码)——从基因型到表现型的映射称为解码。

第二节 遗传算法基本操作

遗传算法作为模拟生物进化论的一种工程模型,它的主要价值不仅在于能够对优化问题给出一种有效的计算方法,而且遗传算法的结构中包含了大自然所赋予的一种哲理,在科学思想方法上给予人们以深刻的启迪。

在遗传算法中主要的遗传操作包括选择、交叉和变异 3 个基本算子,下面分别叙述它们的作用和特点。

一、选择操作

选择是遗传算法的关键,它模拟了生物进化过程中自然选择规律。

选择是由某种方法从群体 $A(t)$ 中选取 N 个个体放入交配池,交配池是用于繁殖后代的双亲个体源。

选择的根据是每个个体对应的优化问题目标函数转换成的适应度函数值的大小,适应度函数值大的被选中的机会就多,即越适合于生存环境的优良个体将有越多的繁殖后代的机会,从而使得优良特性得以遗传,体现了自然界中适者生存的道理。

选择的作用效果能提高群体的平均适应度函数值,因为通过选择操作,低适应度函数值个体趋向于被淘汰,而高适应度函数值个体趋向于被复制,所以,在选择操作中群体的这些改进具有代表性,但这是以损失群体的多样性为代价的。

虽然选择操作能提高群体的平均适应度函数值,但它并没有产生新的个体,当然群体中最好个体的适应度函数值也不会改进。

选择的方法根据不同的优化问题有多种方案,这里介绍 4 种典型的选择方法。

1. 适应度函数值比例法

适应度函数值比例法,又称转轮法,这种方法是利用比例于各个个体适应度函数值的概率来决定其后代的遗传可能性。若某个个体,被选取的选择概率 P_{si} 表示为

$$P_{si} = f_i / \sum_{j=1}^N f_j, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

式中, f_i 为个体 i 的适应度函数值, N 为群体中的个体数目。

表 1-1, 给出了 4 个个体, 每个个体对应的适应度函数值及用适应度函数值比例法表示的选择概率(以下简称为选择率)。当选择率确定后, 用随机变量试验, 产生 $0 \sim 1$ 区间内的随机数。由那个随机变量值决定哪个个体被选取, 于是选择率大的个体就能多次被选中并参加交配, 它的遗传因子就会在群体中扩大。