

野草算法及其研究进展

韩毅¹ 蔡建湖¹ 李延来² 周根贵¹

(浙江工业大学经贸管理学院 杭州 310023)¹

(东北大学流程工业综合自动化教育部重点实验室 沈阳 110004)²

摘要 野草算法(Invasive Weed Optimization, IWO)是近年来提出的一种简单、有效的基于种群的新颖数值优化算法,自其提出以来正逐渐受到国内外学术界和工程优化领域的关注。IWO算法的提出是受到具有侵略和殖民特性的野草的启发。由于野草在殖民化过程中体现出较强的鲁棒性、自适应性和随机性,因此IWO算法的执行框架尽量模仿野草的殖民化进程。详细阐述了IWO算法的基本原理和流程,总结了其在优化和工程技术领域中的最新研究进展。

关键词 野草算法,工程优化,殖民化,鲁棒性

中图分类号 TP29 **文献标识码** A

Invasive Weed Optimization and its Advances

HAN Yi¹ CAI Jian-hu¹ LI Yan-lai² ZHOU Gen-gui¹

(College of Business Administration, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)¹

(Key Laboratory of Integrated Automation of Process Industry of Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, China)²

Abstract Invasive Weed Optimization(IWO) is a recently proposed simple and effective population-based novel numerical optimization algorithm. It's receiving increasing focuses from academic and engineering optimization fields. IWO is inspired from the invasive and colonizing characteristics of weeds, which tries to imitate the robustness, adaptation and randomness embodied by weeds during the colonizing process. Here, the fundamental principles and framework of IWO were described in detail. Then, the advances of IWO in the current optimization and engineering fields were summed up.

Keywords Invasive weed optimization, Engineering optimization, Colonization, Robustness

1 引言

在当今社会中,优化技术是工程技术人员寻求现实复杂问题的有效解决方案的常用技术手段。研究现实生产生活中的问题,首先需要根据问题的特点,采用数学和运筹学的建模技术进行问题的模型化处理;之后根据问题特性,提出抽象化的数学模型;最后根据数学模型的目标函数的特点来选择解决问题的手段。如果目标函数和约束条件是线性的,可以采用运筹学中的精确解算法求解;如果目标函数或约束条件是非线性的,可以采用智能数值优化(Intelligent Optimization, IO)算法求解。因此,新颖有效的优化算法能够为问题的求解提供十分便利的条件和手段。近年来,在进化计算领域出现了一种新型的数值优化计算方法,称为野草或杂草(IWO)算法。IWO算法最早在2006年由Mehraban和Lucas为解决数值优化问题而提出^[1]。IWO算法自提出以来,一直受到学者们的关注与运用^[1-14]。

野草的占据领地和殖民化行为是按照如下方式进行

的^[1]:(1)人类在种植庄稼的过程中会在一些易受到野草侵袭的田地上遗留下一些未使用的资源,这给野草创造了生存的空间;(2)野草通过扩散的方式侵入这些空间,随后通过殖民化过程来逐渐侵占田地;(3)野草的生物多样性使得野草进化出许多不同的变种植物,这些植物具有掌控和探索这些生存空间的良好适应性,随着时间的推移,它们通过适者生存原则进行局部适应和种群改进;(4)随着农耕季节的进行,野草的这种特性在野草生命的最佳时期被广泛传播,它们借此在植物社区中使它们的适应性达到最大化。IWO是一种受野草启发而提出的、基于种群的数值优化计算方法,其执行过程是模拟野草的殖民化过程^[1]。作为一种全新的优化计算方法,IWO算法具有易于理解、易于编程实现的特点。

IWO算法具有柔性的框架,其中的各种机制都可用多种算法予以实现。目前IWO算法已经在许多领域得到了应用,譬如标准多维数值优化函数集和鲁棒控制器优化与调节问题^[1]、图像聚类问题^[12]、约束工程设计问题^[13]、多输入多输出(Multiple Inputs and Multiple Outputs, MIMO)系统天线

到稿日期:2010-04-06 返修日期:2010-10-19 本文受国家自然科学基金(70971017),浙江省自然科学基金(Y1100854),浙江省社科规划课题成果(10CGGL21YBQ),浙江省科技计划软科学研究项目(2009C35007)资助。

韩毅(1979—),男,博士,讲师,主要研究方向为生产批量计划与调度、智能优化算法等, E-mail: hanyi@zjut.edu.cn; 蔡建湖(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为供应链管理; 李延来(1971—),男,博士后,主要研究方向为质量管理; 周根贵(1958—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为物流工程及信息管理。

阵列设计问题^[5,8,10,11]、DNA 编码顺序计算问题^[3,14]、压电激励器的优化放置问题^[2,4]、推荐系统问题^[6]、分布数据合并过程进展预测问题^[7]以及电力市场动荡性研究问题^[9]。

IWO 算法是一种新兴的计算方法,本文以 IWO 算法的基本原理为线索,围绕其构架中的重要机制和参数、算法执行过程和应用领域等方面,对 IWO 算法的研究现状和研究成果进行了全面的综述,使学者们对 IWO 算法有更为广泛和深入的了解。

2 野草特性^[1]

2.1 野草繁殖

野草可以通过细胞以有性或无性方式繁殖。有性繁殖通过种子或孢子形式进行,种子形成后,通过动物、风及水等形式进行空间分散,直到可以找到适合生长的机会空间。在条件成熟时种子进行生长,通过与其他相邻植物进行相互作用而成长为植株,随后植株开花结籽。

2.2 选择性进化

在野草的殖民化过程中,相邻植株会由于生长年限、植株大小和相对距离而相互影响。因此,植物的出生、成长和繁殖会受到植株密度、种群和植物群的适应性的影响。在植物群落中,适应性的 3 个主要因素(繁殖、与竞争者进行生存斗争和躲避天敌)是相互矛盾的。适应性的提高可以使植物能够生存更长时间,而对于植物适应性的估计必须考虑以上 3 个因素。植物的自然进化选择方式有多种,其中有两种选择方式比较重要,分别是 r 选择和 K 选择。 r 选择是要从植物群中选择出能够长得快、繁殖快和消亡快的植物并让这些植物去占据不稳定的和不可预测的环境, K 选择是要从植物群中选择出能够长得慢、繁殖慢和消亡慢的具有很强的竞争性的植物去占据一个具有高竞争压力、资源有限、稳定的和可预测的环境。 r 选择对应于 IWO 算法的全局探索方式, K 选择对应于 IWO 算法的局部搜索方式。

3 野草算法^[1]

野草算法的执行过程要经历 4 个步骤:(1)初始化种群;(2)繁殖;(3)空间分布;(4)竞争性生存。

3.1 初始化种群

在这个步骤中,需要确定种群 P (种群是族群的一部分)和族群 Q 的大小 P_{size} 和 Q_{size} 、最大迭代次数 $iter_{max}$ 、问题维数 d 、最大和最小可生成种子数 S_{max} 和 S_{min} 、非线性指数 n 、区间步长初始值 σ_{init} 和最终值 σ_{final} 以及初始搜索空间 X ,并随机生成 P_{size} 个解。

3.2 繁殖

种群中的成员能够散播的种子数是根据该成员的适应值及族群所有个体的最低和最高适应值来决定的,图 1 描述了种子数的确定过程。在用优化算法求解问题的过程中,我们可能会直觉地认为可行解比不可行解具有更好的适应值,因此会放弃不可行解。然而,这种做法忽视了进化算法具有概率性,其产生的解是在不可行和可行之间不断转化的。在进化过程中,不可行解可能比可行解带有更多有用信息。在 IWO 算法中,繁殖过程按照自然界中的繁殖法则,给予不可行的个体生存和繁殖的机会,只是这种机会相对较少。

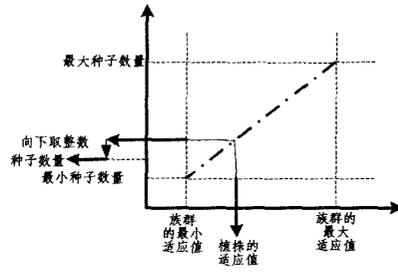


图 1 野草族群的种子数确定方法

3.3 空间分布

IWO 算法种群产生的种子被随机播撒在 d 维空间中,产生种子的方式是通过将某个解加上某个数值 D ,而该数值的变化区间步长的大小是由 σ 来决定的(也就是说 $D \in [-\sigma, \sigma]$)。如果用 σ_{init} , σ_{final} , σ_{cur} , $iter_{max}$, $iter$ 以及 n 分别表示最初的区间步长、最终的区间步长、当前的区间步长、最大迭代次数、当前迭代数以及非线性调节指数,则它们之间的关系为

$$\sigma_{cur} = \frac{(iter_{max} - iter)^n}{(iter_{max})^n} (\sigma_{init} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (1)$$

式(1)确保了在较远区域进行播种的概率在以非线性的方式逐渐降低,这样会使适应值好的个体聚集在一起而一些不适应的个体被清除,这恰好对应了野草进化过程中从 r 选择方式到 K 选择方式的过渡。

3.4 竞争性生存法则

如果一种植物没有后代,它将灭亡;如果一种植物不断产生后代,这一植物种类将占据整个世界。因此,有必要在植物族群中通过控制族群大小来保持各种植株类型间的竞争性。在进行了一定的迭代之后,植物族群会因快速的繁殖而达到它的最大允许数量。然而,我们希望适应性强的那些植株能够比适应性差的植株多。因此采用竞争性生存法则,其执行方式为:当族群中的野草数量达到最大值时,每个植株都按照 3.2 节和 3.3 节的方式进行繁殖和空间分布。随后,这些新产生的后代与族群中的植株按照适应值大小进行排序,排序后的植株按适应值从大到小选择出 Q_{size} 个植株,其余的植株被清除(也就是说从这以后,算法的种群大小就保持为 Q_{size} 个)。这种机制给予那些适应值低的个体繁殖的机会,如果它们的后代的适应值更好,这些后代就可以生存下来。这种先让植株进行快速的繁殖和生长来适应环境,之后再保留一些在相对稳定的环境下更具有竞争力的个体继续探索环境的方式,也可以认为是模拟了生物的 r 选择和 K 选择方式。

3.5 算法执行步骤

Step 1 种群初始化(包括参数的设置和初始解(植株)的生成和评价);

Step 2 对于每个解,根据图 1 确定允许的后代个数;

Step 3 根据式(1)的限定,在解的每一维上进行加减某个数值 D 的操作来产生新的解并评价这些新的解;

Step 4 如果现有解的数量小于 Q_{size} ,则执行 Step 2,否则转 Step 5;

Step 5 根据竞争性生存法则选取 Q_{size} 个适应值最好的解;

Step 6 如果 $iter < iter_{max}$,则转 Step 2,否则退出算法执行过程并输出最优解。

图 2^[10,11]显示了 IWO 算法的执行步骤逻辑关系。

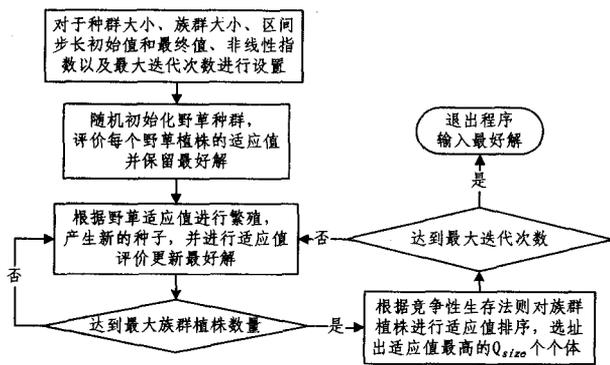


图2 IWO算法执行步骤

4 IWO算法的相关研究

目前, IWO算法已经广泛应用于许多自然科学与工程科学领域, 并显示出强大的优势和潜力。

4.1 多维数值优化函数集和鲁棒控制器优化与调节问题

2006年, Mehrabian和Lucas^[1]通过IWO算法求解3个标准多维数值优化函数集和1个鲁棒控制器优化与调节问题, 将各种算法参数组合进行了系统的测试。通过与遗传算法、元算法和粒子群算法、随机蛙跳算法及多个版本的模拟退火算法进行计算结果比较, 表明对于所有问题IWO算法都获得了令人满意的结果, IWO算法比其他算法的结果更好。对于参数选择方面的建议, 种群数 P 为10至20之间、非线性指数 n 为3、最大和最小可生成种子数为2和0。关于其余的参数如何选取问题, Mehrabian和Lucas^[1]没有直接给出答案。

4.2 图像聚类问题

2008年, 苏守宝等^[12]将IWO算法用于求解图像聚类问题。在该文中, 采用最小量差、最小簇内距离以及最大簇间距离作为目标, 通过构造除法的形式将多目标问题转化为单目标问题。采用IWO算法对图像数据集的簇中心进行精确定位, 动态确定图像聚类簇数的最优选择范围。通过几个基准测试图像, 将IWO算法测试结果与K-均值、FCM和粒子群优化算法的结果进行了比较, 表明IWO算法具有更稳定的图像聚类性能, IWO算法能够获得更好的图像聚类效果。

4.3 约束工程设计问题

2009年, 苏守宝等^[13]将IWO算法用于求解约束工程设计问题, 结合罚函数法将IWO算法应用于求解压力弹簧和焊接束优化问题。通过将IWO算法的求解结果与粒子群算法(PSO)、遗传算法(GA)和蚁群算法(ACO)的求解结果进行比较, 表明IWO算法获得了更优的结果, 体现了算法的全局寻优能力。通过实验与统计分析, 显示IWO算法求解问题时的部分最佳参数: n 为3、初始种群大小为20至30之间并且算法最大迭代次数是500。但是该文存在一点疑问, 在参数设定族群大小 Q_{size} 为10, 而初始种群大小为20。这与IWO算法的执行原理相违背, 因为只有当族群大小大于等于初始种群时, 种群中的解才有可能进行繁殖, 也就是说族群大小不可能小于初始种群大小。

4.4 MIMO系统天线阵列设计问题

MIMO天线系统是第四代移动通讯系统, 是能够满足大量数据传输的高速、高质量的传输系统。在很小的终端设备上采用MIMO技术会导致天线单元之间的高耦合性和空间信号干扰, 从而影响MIMO信道的传输能力。有效地设计

MIMO系统天线阵列, 可以有效减少接收信号的相互干扰。

2008年, Mallahzadeh等^[5]采用IWO算法求解了4个天线设置问题, 将求解的结果与PSO算法的结果进行了比较, 结果表明IWO算法的正确率和收敛速度都优于PSO算法。2009年, Mallahzadeh等^[11]采用IWO算法求解了2部件和4部件E型MIMO贴片天线阵列正交集安排问题, 旨在降低天线阵列的耦合性。结果表明, IWO算法能够有效地获取天线阵列的最优设计方案。2009年, Mallahzadeh等^[10]采用IWO算法求解了小型U型MIMO天线阵列设计问题。首先, IWO算法被用于求解单个U型MIMO天线设计问题; 在获得有用参数后, IWO算法被用于求解2部件和4部件贴片天线阵列设计问题。求解结果表明, IWO算法的设计方案能够有效降低天线间的耦合性, 提高了信号的信道带宽。2009年, Pal^[8]等人采用IWO算法求解了线性天线阵列设计问题。通过与遗传算法、粒子群算法、元算法(MA)和禁忌搜索算法(TS)的求解结果进行比较, 表明IWO算法的目标函数平均值和解标准差都好于其他算法的对应值。

4.5 DNA编码顺序计算问题

Zhang等^[3, 14]在2007年和2009年分别采用结合随机进化计算方法的IWO算法和基本IWO算法求解了DNA编码顺序优化问题。由于该问题是离散整数规划问题, 而IWO算法通常用来计算具有连续变量的数值优化问题, 因此IWO算法需要进行相应调整。算法的其他部分不用进行调整, 只是在空间分布阶段用式(2)来生成新的DNA编码位。

$$w_{new} = \text{Mod}(w_{old} + \sigma_{cur} \times \text{rand}(0, 1), 4) \quad (2)$$

式中, $\text{Mod}()$ 是取模函数, $\text{rand}(0, 1)$ 是计算机随机产生的0到1之间的随机数, w_{old} 和 w_{new} 是旧的DNA编码和新的DNA编码。

问题编码为字符串形式, 每一位上的字符可以取4个不同的值。通过与2个不同文献的计算结果进行比较, IWO算法体现出更加优越的性能。

4.6 压电激励器的优化放置问题

Mehrabian和Yousefi-Koma^[2, 4]分别于2007年和2009年在两个不同的杂志上发表了关于采用IWO算法解决飞机尾鳍上的压电激励器的优化放置问题。问题的解由二维变量表示, 代表平面上的一个点。从计算结果来看, IWO算法能够准确地定位激励器并且有效地削减了激励器的震动。

4.7 推荐系统问题

推荐系统可帮助客户从大量商品中找到他们感兴趣的物品。为了使客户能够得到更具个性化的推荐, 需要根据每个客户分配优先权。通过采用优化算法, 可以确定每个客户的最佳优先权。2007年, Rad和Lucas^[6]采用IWO算法求解了推荐系统最佳优先权分配问题。采用一个电影数据集, 将IWO算法的求解结果与遗传算法和粒子群算法的求解结果进行了比较, 结果表明IWO算法的结果更准确。

4.8 分布数据合并过程进展预测问题

2008年, Kostrzewa和Josinski^[7]采用IWO算法求解了分散数据合并过程进展预测问题, 并将求解结果与一个自适应进化算法的结果进行了比较。问题采用基因串表达形式, 每个基因由一个三元组 (S_i, S_j, W_k) 组成, 这里 S_i 和 S_j 表示要进行合并的两个数据, W_k 表示第 k 个工作站。从计算结果看, IWO算法的计算时间较长, 但最好解的质量优于自适应算法。

4.9 电力市场动荡性研究问题

电力市场是电力企业的重要输出源,它通过市场化运作给电力企业带来竞争压力。

2008年,Sahraei-Ardakani等^[9]采用IWO算法求解了电力市场动荡性问题,通过大量计算表明IWO算法能够在具有纳什均衡点的问题中求得纳什均衡解。

5 IWO算法的可扩展性探讨

由于IWO算法是一种数值优化算法,适合求解具有连续变量的函数优化问题。如果仅限于此的话,IWO算法的应用和推广将变得异常困难。如何扩展IWO算法,使其能够求解混合整数规划问题和带有二进制变量的函数优化问题,是非常值得考虑的重要方面。从算法的执行过程来看,其他部分都是框架性的,只有空间分布环节需要具体区分。对于编码中带有二进制字符串或二进制矩阵形式的问题,可以将 σ_{init} 和 σ_{final} 分别对应于允许进行变异操作的变量的个数,也就是说让算法的执行过程从多点变异方式转换到单点变异方式。对于整数规划问题,可以仍然按照处理实数变量的方式执行算法,只是在产生新的变量值时采用向上或向下取整的方式进行。通过这些改进方式,学者们可以将IWO算法用于更多研究领域的问题求解过程中。当然,更多的算法扩展方式还有待于学者们去探索和应用。

结束语 本文对野草算法的研究及进展进行了较全面的论述。在短短的几年内,IWO算法引起了国际学术界的广泛关注,成为国际优化计算领域的研究热点之一,也逐渐成为解决实际工程优化问题的热门工具。

IWO算法虽然已对多种优化问题取得了很好的求解效果,并在诸多应用研究领域取得了长足的发展,但远未达到成熟的阶段,还有很多问题值得深入地分析与探讨。比如,算法是否存在统一的参数? 如果不存在,如何针对不同问题合理设置参数组合?

与其他优化算法一样,关于IWO算法的理论研究尚显不足。理论工作者可以考虑算法收敛性、收敛速度、鲁棒性等方面的数学证明以及算法执行过程改进等方面。总体看来,IWO算法扩展了智能优化算法的领域,提供了求解优化问题的新思路,具有巨大的科研价值和应用潜力。

参考文献

[1] Mehrabian A R, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. Ecological Informatics,

2006,1(4):355-366

[2] Mehrabian A R, Yousefi-Koma A. A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures [J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(1): 12-23

[3] Zhang X, Wang Y, Cui G, et al. Application of a novel IWO to the design of encoding sequences for DNA computing [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2009, 57(11/12): 2001-2008

[4] Mehrabian A R, Yousefi-Koma A. Optimal positioning of piezoelectric actuators on a smart fin using bio-inspired algorithms [J]. Aerospace Science and Technology, 2007, 11(2/3): 174-182

[5] Mallahzadeh A R, Oraizi H, Davoodi-Rad Z. Application of the invasive weed optimization technique for antenna configurations [J]. Progress in Electromagnetic Research, 2008, PIER 79: 137-150

[6] Rad H S, Lucas C. A recommender system based on invasive weed optimization algorithm [C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation. Singapore, 2007: 4297-4304

[7] Kozrzewa D, Josinski H. The Comparison of an adapted evolutionary algorithm with the invasive weed optimization algorithm based on the problem of predetermining the progress of distributed data merging process [M]. Advances in Soft Computing, Berlin, Springer, 2009, 59: 505-514

[8] Pal S, Basak A, Das S, et al. Linear antenna array synthesis with invasive weed optimization algorithm [C]// International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition(SOCPAR). 2009: 161-166

[9] Sahraei-Ardakani M, Roshanaei M, Rahimi-Kian A, et al. Study of electricity market dynamics using invasive weed colonization optimization [C]// IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games. Perth, 2008: 276-282

[10] Mallahzadeh A R, Es'haghi S, Hassani H R. Compact U-array MIMO antenna designs using IWO algorithm [J]. International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering, 2009, 19(5): 568-576

[11] Mallahzadeh A R, Es'haghi S S, Alipour A. Design of an E-shaped MIMO antenna using IWO algorithm for wireless application at 5.8 GHz [J]. Progress In Electromagnetics Research, 2009, PIER 90: 187-203

[12] 苏守宝, 方杰, 汪继文, 等. 基于入侵性杂草克隆的图像聚类方法 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36(5): 95-105

[13] 苏守宝, 汪继文, 张玲, 等. 一种约束工程设计问题的入侵性杂草优化算法 [J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(8): 885-893

[14] Zhang X, Wang Y, Cui G, et al. SIWO: A hybrid algorithm combined with the conventional SCE and novel IWO [J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2007, 4(7/8): 1316-1323

(上接第4页)

[13] Kumar R, Yao D D, Bagchi A, et al. Fluid Modeling of Pollution Proliferation in P2P Networks [C]// Proceedings of SIGMETRICS/Performance'06. 2006: 335-346

[14] Shi C, Han D, Hu X, et al. A unified model of pollution in P2P networks [C]// Proc. of Parallel and Distributed Processing(IP-DPS). Apri 2008

[15] Kevin W, Sireer E G. Fighting Peer-to-Peer SPAM and Decoys with Object Reputation [A]// Proc. of the 2005 ACM SIGCOMM workshop on Economics of P2P systems [C]. Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2005

[16] Cristiano C, Vanessa S, Jussara A, et al. Fighting Pollution Dissemination in Peer-to-Peer Networks [A]// Proc. of the 2007 ACM symposium on Applied Computing [C]. Seoul, Korea,

2007

[17] Cristiano C, Jussara A. Reputation Systems for Fighting Pollution in Peer-to-Peer File Sharing Systems [A]// Proc. of the 7th IEEE International Conference on P2P Computing (P2P 2007) [C]. Galway, Ireland, 2007, 10

[18] Fabrici B, Cristiano C, Marisa V, et al. Impact of Peer Incentives on the Dissemination of Polluted Content [A]// Proc. of the 2006 ACM symposium on Applied Computing [C]. Dijon, France, 2006

[19] Hong R J. Fault-Tolerant Mechanism for Removing Polluted Files in Peer-to-Peer Networks [D]. National Cheng Kung University, 2007

[20] Wei D, Yang S B, Guo L T. Design and Simulation of P2P File Sharing Anti-pollution System [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(24): 5705-5709