

文章编号:1003-207(2012)04-0160-07

# 求解非线性二层规划问题的模拟植物生长算法

李 彤<sup>1,2</sup>, 陈畴镛<sup>1</sup>

- (1. 杭州电子科技大学管理学院, 浙江 杭州 310018;  
2. 先进设计与智能计算教育部重点实验室, 辽宁 大连 116622)

**摘 要:** 本文以植物向光性生长理论为启发式准则, 提出了一种求解非线性二层规划问题的智能优化算法。在该算法中, 将二层规划上层解空间和下层反应集分别作为植物的两个生长环境, 建立以生长规则为基础的植物系统演绎方式和以植物向光性理论为基础的概率生长模型, 两者结合所形成的优化模式, 实现了模拟植物从初始状态到完整形式的终态(没有新的树枝生长), 从而得到二层规划问题的解。该方法具有搜索精度较高, 求解稳定性较强的特点, 通过与国外学者在非线性二层规划实际测试问题的最优值进行精度比较, 表明模拟植物生长算法是有效可行的。

**关键词:** 模拟植物生长算法(PGSA); 二层规划; 非线性二层规划

**中图分类号:** O221 **文献标识码:** A

## 1 引言

二层规划是研究复杂系统层次结构的一种有效方法, 该方法主要是用来解决分散决策问题的。一个管理系统中, 若存在多个决策者, 他们各自有不同的目标, 而他们的目标达成又是互相关联的, 这就是分散决策系统。

二层规划问题是 1977 年由美国数学家 Candler 和 Norton 首先提出来的<sup>[1]</sup>, 其形式为

$$\begin{aligned} \min_x & F(x, y) \\ \text{s. t. } & g(x, y) \leq 0, \quad y \text{ 是下层问题的解} \\ \min_y & f(x, y) \\ \text{s. t. } & h(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

其中  $x \in R^{n_x}$  为上层规划问题决策变量,  $y \in R^{n_y}$  为下层规划问题的决策变量;  $F, f: R^{n_x+n_y} \rightarrow R$  分别称为上层规划问题和下层规划问题的目标函数;  $g: R^{n_x+n_y} \rightarrow R^{n_u}$  为上层规划问题约束条件,  $h: R^{n_x+n_y} \rightarrow R^{n_l}$  为下层规划问题约束条件。

二层规划主要具有如下特点: 系统分上下两级

管理, 各级决策者依次作出决策, 下级服从上级, 但下级有相当的自主权; 上下级决策者有各自不同的目标, 这些目标往往是互相矛盾的; 上下级决策者各自控制一部分决策变量, 以优化各自的目标; 上级决策者优先进行决策, 下级决策者优化自己目标而选择策略时, 不能违背上级决策; 上级的决策可能影响下级的策略集, 因而影响下级目标的达成, 但上级不能完全控制下级的决策, 在上级政策允许范围内下级有自主决策权; 下级的决策不但决定着自身目标的达成, 而且也影响上级目标的达成, 因此上级必须考虑到下级可能采取的策略对自己的不利影响。

对分散决策问题的研究已经有较长的历史, 20 世纪 20 年代出现的对策论所研究的问题具有分散决策的特征, 但一般各个决策者(局中人)没有上、下级之分, 而且他们的策略集是分离的。50 年代出现的 Stackelberg 对策, 其中的局中人是具有上下级之分的, 它可以看作特殊的二层规划。60 年代, Dantzig 和 Wolfe 提出了大规模线性规划的分解算法, 实际上是把它转变成为一个分散决策问题, 但其中有一个核心决策者, 其他决策者并没有自己独立的利益, 他们实现自己的目标只不过是为实现核心决策者的目标服务。70 年代发展起来的多目标规划通常是寻求多个不同目标的折衷解, 有些方法, 如目标分层排序法, 也可以用来处理分层决策问题, 但下级的决策是在保证优化上级的目标前提下作出的, 不影响上级目标的达成, 故可以逐级求解, 但二层规划正是强

收稿日期: 2011-07-23; 修订日期: 2012-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71171070, 71072161, 71173066); 浙江省自然科学基金资助项目(Y7100447), 教育部人文社会科学研究规划基金(12YJAZH063), 浙江省高校人文社科基地重大项目(RWSKZD04-2012ZB, RWSKZD04-2012ZB3)

作者简介: 李彤(1967-), 男(汉族), 哈尔滨市人, 杭州电子科技大学教授, 博士, 研究方向: 优化理论与技术。

调下级决策对上级目标的影响,因而一般是不能逐级求解的。

自20世纪70年代以来,人们在研究分散管理系统的优化决策问题中,碰到许多用传统方法不能解决的实际问题,如Fortung-Amat和Mecard的化肥价格研究、Candler和Townasley的水资源利用和政府政策研究、Bisschop等人的印度河流域模型、Ansdalingam的印度和孟加拉国恒河水资源冲突分析等,这些应用大大推动了管理科学和国民经济的发展,并逐渐形成了新的概念和方法。在这一阶段二层规划比较具有代表性的研究成果主要有,Cassidy研究的政府效力分析、Kyland的经济研究分析、Brocken等人研究的战略武器配置、Desitva研究的美国原油生产模型。目前二层规划问题尚缺乏有效算法,其主要原因在于二层规划的复杂性,Jeroslow首次证明二层规划是NP-难题,Hansen和Jaumard等人进一步证明了二层规划是强NP-难题<sup>[2]</sup>,此后Vicente和Savard等人证明了即使是求解二层规划的局部最优解也是一个NP-难题<sup>[3]</sup>。求解非线性二层规划的主要算法主要包括分枝定界法<sup>[4]</sup>、下降法<sup>[5]</sup>、信赖域方法<sup>[6]</sup>和罚函数方法<sup>[7]</sup>等,以上方法主要是针对某类特殊问题而设计特殊算法,所需计算量都很大,而且往往得到的是局部最优解。

本文作者尝试以模拟植物生长算法(plant growth simulation algorithm, PGSA)用于求解非线性二层规划问题,力求避免遗传算法、蚁群算法、粒子群算法等在求解时需要给出诸如惩罚系数、初始染色体群、交叉率、变异率、初始粒子群等直接影响计算速度和收敛性的参数,在大多数情况下,这些参数选择的本身就是一个难题。

## 2 模拟植物生长算法

植物可看作由大量枝、节组成的系统,其研究的重点是L-系统(L-systems),该系统是美国生物学家Lindenmayer在20世纪60年代末提出。L-系统将植物生长视为一系列事件的综合,在构型上其前驱(父)模块被后继(子)模块代替,替代规则被称为繁殖(productions),这些替代具有定型或定量的特点。生物学实验已经证明,决定植物细胞分裂和枝芽生长的生长素信息并非是预先一个个赋予给细胞的,而是细胞系统从其环境中接受到了它的位置信息,依据这种信息,植物表现出明显的向光性特点,即形态素浓度较高的生长点,将具有较大的优先

生长机会。

### 2.1 模拟植物生长算法的应用情况

模拟植物生长算法(PGSA)目前主要被国内外学者应用于多级规划、组合优化、整数规划等基础研究领域以及物流、核工业、电力、水利等应用研究领域,模拟植物生长算法的特点和主要发展过程如下:

2005年,本文第一作者李彤建立了PGSA的理论和算法体系<sup>[8-9]</sup>。PGSA的理论核心是建立以生长规则为基础的植物系统演绎方式和以植物向光性理论为基础的概率生长模型,两者结合所形成的优化模式,就是实现人工植物在优化问题解空间中从初始状态到完整形式的终态(没有新的树枝生长)的过程。

2006年,上海交通大学的王淳和程浩忠教授将PGSA用于解决Ward-Hale 6节点系统和IEEE 30节点系统的优化问题,结果表明PGSA的精度和运算速度优于遗传算法和协同进化算法<sup>[10]</sup>。

2007年,李彤等在科学出版社出版了介绍PGSA的学术专著,将PGSA与遗传算法、模拟退火算法、填充函数法等进行了比较研究<sup>[11]</sup>;王淳和程浩忠<sup>[12-13]</sup>将PGSA用于解决配电网重构优化问题,计算表明PGSA与遗传算法、Tabu搜索等算法相比,具有更高的精度和更加快速的全局寻优能力;将PGSA用于解决18节点网络系统,结果表明PGSA给出的最优网络是现有中外文献当中最好的方案,明显优于遗传算法和粒子群算法。

2008年,李彤和王众托院士利用PGSA解决物流设施选址问题,并与遗传算法求得的结果进行比较,PGSA的运算精度更高<sup>[14]</sup>;Rao和Narasimham应用PGSA解决规模分别为9、34和85三种典型类别的电容布局径向分布系统优化问题,所有结果均优于PSO(粒子群算法)<sup>[15]</sup>;罗伟强、于建涛和黄家栋采用植物顶点变速度生长特点来减少搜索时间,利用植物生长期前期纵向型生长特性减少搜索空间,通过对不同类型的非线性整数规划问题进行求解,表明了PGSA的有效性<sup>[16]</sup>;杨俊,艾欣,邵淮岭等利用PGSA进行了安全成本研究<sup>[17]</sup>;王淳,程浩忠,谭永香等以电力系统优化为应用背景,将PGSA与遗传算法、粒子群算法等进行了比较研究<sup>[18-20]</sup>。

2009年,PGSA开始逐步被国内外一些学者在各自的优化领域所应用,Guney, Durmus和Basbug将PGSA分别于MTACO、BA、BFA三种智能算法比较,PGSA均得到了更优的结果,且收敛性和计算速度明显优于其他算法<sup>[21]</sup>;Thiruvankadam等人利

用 PGSA 解决大规模电网能源优化问题<sup>[22]</sup>; Rama 等利用 PGSA 选择最优径向分布系统,在实际应用中实现了能源损失成本和系统折旧成本之和最小,且负荷效应增长可达 5 年<sup>[23]</sup>; Rao, Narasimham, Wang 等也分别利用 PGSA 解决了不同领域优化问题<sup>[24-26]</sup>。在国内,杨磊等将 PGSA 用于解决辐照装置上的钴源源棒的排列优化问题<sup>[27]</sup>;丁雪枫,马良利用 PGSA 解决易腐物品物流中心选址问题<sup>[28]</sup>;叶婧,汪芳宗利用 PGSA 解决配电网重构问题<sup>[29]</sup>;此外,赵颖,罗伟强<sup>[30]</sup>,张节潭<sup>[31]</sup>,王淳,万卫<sup>[32]</sup>,杨丽徙,王锴,武娜,焦彦军,于建涛等人均在优化领域运用 PGSA 进行了应用研究,取得了令人满意的效果。

2010 年至今,李彤和王众托院士从智能算法创新的角度总结了 PGSA 的提出和发展过程,并对国内外研究现状进行了总结<sup>[35]</sup>;李彤等人将 PGSA 用于解决斯坦纳最小树等问题<sup>[36-37]</sup>;辻隆男,大山力,橘口卓平等<sup>[38]</sup>以及 Sirjani, Mohamed 和 Shareef<sup>[39]</sup>对 PGSA 在配电网系统分布优化和大规模径向分布系统最优化方面进行了总结;杨磊、刘义保、龚学余、刘珂等人将 PGSA 用于解决大型辐照系统优化问题,结果表明 PGSA 比现有排源算法整体性能提高 30 倍以上<sup>[40]</sup>;陈立华,梅亚东将 PGSA 应用于二滩、锦屏、官地、桐子林水库群的优化调度问题,并与动态规划(DP)、动态规划逐次逼近法(DPSA)和逐步优化法(POA)进行了比较研究<sup>[41]</sup>;此外,于永哲,黄家栋<sup>[42]</sup>,唐海波,叶春明<sup>[43]</sup>,张新功<sup>[44]</sup>,丁雪枫,马良<sup>[45]</sup>,杨磊,刘珂,刘义保<sup>[46]</sup>,杨琴,周国华<sup>[47]</sup>,丁雪枫<sup>[48]</sup>也利用 PGSA 解决了配电网重构、MCCS 问题、车间调度等问题,并与遗传算法等智能算法进行了比较研究。

PGSA 提出至今经过了 6 年的时间,该算法 Cnune<sup>[21]</sup>在某些领域逐步体现出了一些特点和优势,Guney<sup>[21]</sup>认为:“As an optimization algorithm, the PGSA will most likely be an increasingly attractive alternative, in the electromagnetics and antennas community, to other optimization algorithms.”李彤等<sup>[10]</sup>对 PGSA 做过一个概括:“理论分析及算例结果表明,与遗传算法为代表的现代启发式算法相比,模拟植物生长算法具有以下优点:(1)模拟植物生长算法将目标函数和约束条件分开处理,且无需编码和解码,避免构造新的计算用目标函数,也不存在惩罚系数、交叉率、变异率选取等问题,解的稳定性好;(2)模拟植物生长算法具有一个

由形态素浓度决定的方向性和随机性平衡比较理想的搜索机制,能以较快的速度寻找到全局最优解。”

基于以上国内外学者运用 PGSA 解决不同领域优化问题并与遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、粒子群算法、Tabu 搜索等优化算法的比较研究,本文尝试将 PGSA 用于求解非线性二层规划问题。

## 2.2 非线性二层规划的模拟植物生长算法设计

对于非线性二层规划问题

$$\begin{aligned} & (\text{NLBP}) \min_x F(x, y) \\ & s. t. g(x, y) \leq 0, y \text{ 是下层问题的解} \\ & \min_y f(x, y) \\ & s. t. h(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

$\Omega = \{(x, y) \mid g(x, y) \leq 0, h(x, y) \leq 0\}$  为非线性二层规划问题的约束域,  $\Omega_x$  为上层决策变量解空间,  $M_x(S_i)$  为下层规划问题对应上层给定值  $S_i$  的反应集。

定义 1 设  $(H, \alpha)$  为植物生长点的当前状态。其中  $H$  为其位置的坐标,  $\alpha$  为生长点的指向,节的长度为  $d$ ,顶的角度增量为  $\delta$ 。“[”代表的含义是将当前信息记录下来,即将该节点(树枝的分叉点)的信息保存起来,先画第一个分枝;而“]”表示的含义是将“[”时刻记录的信息释放出来,当画完一个分枝后,利用“]”将上一个节点的信息(即上一分叉点的状态)取出,然后从该分叉点继续画第二个分枝。

定义 2  $F$  表示在当前方向上生长节长  $d$ , + 表示逆时针旋转一个角度  $\delta$ (规定逆时针方向为正), - 表示顺时针旋转一个角度  $\delta$ 。

模拟植物生长算法具体迭代步骤如下

Step1: 在上层决策变量解空间  $\Omega_x$  中选择  $k$  个初始植物生长点  $(S_1, S_2, \dots, S_k)$ ;

Step2: 在  $S_i$  的各自反应集中选择下层植物生长点  $T_j(S_i) \in M_x(S_i)$ , 连接  $S_i$  与  $T_j(S_i)$  形成树干,树干长度为  $F(S_i, T_j(S_i))$ ;

Step3: 计算  $(S_1, S_2, \dots, S_k)$  形态素浓度值:

$$P_i = \frac{F(S_i, T_j(S_i))}{\sum_{i=1}^k F(S_i, T_j(S_i))}$$

Step4:  $P_{i+1} \leftarrow P_{i+1} + P_i, P_i \leftarrow P_i / P_k$ ;

Step5: 如果  $P_i < \text{random}[0, 1] < P_{i+1}$ , 则  $H \leftarrow S_i$  (见图 1)

Step6: 树枝生长过程如下

上层变量初始状态:  $H$  旋转角度:  $\delta = 90^\circ$ ;

生长规则:  $F \rightarrow F[-F][+F] F$

树枝分枝后,新生长点为:  $S_i(1), S_i(2), \dots,$

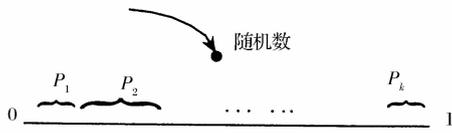


图 1 形态素浓度状态空间

$S_i(2n)$ , 其中  $n$  为上层规划决策变量维度。

Step7:  $S_i \leftarrow \min\{ F(S_i, T_j(S_i)), F(S_i(1), T_j(S_i)), F(S_i(2), T_j(S_i)), \dots, F(S_i(2n), T_j(S_i)) \}$ ;

Step8: 下层变量初始状态:  $L$

旋转角度:  $\delta = 90^\circ$

生长规则:  $F \rightarrow F[-F][+F] F$

新生长点为  $T_{j1}(S_i), T_{j2}(S_i), \dots, T_{j2m}(S_i)$ ,

其中  $m$  为下层规划决策变量维度。

Step9:  $T_j(S_i) \leftarrow \min\{ F(S_i, T_j(S_i)) + f(S_i, T_j(S_i)), F(S_i, T_{j1}(S_i)) + f(S_i, T_{j1}(S_i)), F(S_i, T_{j2}(S_i)) + f(S_i, T_{j2}(S_i)), \dots, F(S_i, T_{j2m}(S_i)) + f(S_i, T_{j2m}(S_i)) \}$ 。

Step10: 若连续  $m$  次迭代无新枝生长(或设定迭代次数, 如 50000 次迭代), 则植物生长结束, 否则返回 Step3。

以上 Step3-Step9 是上层植物生长点通过向光性概率机制选定后, 与其对应反应集中下层生长点所形成的植物树干  $S_i - T_j(S_i)$  在各自邻域中的一次生长过程。

### 3 计算实例

算法的可行性和有效性需要通过与其它方法进行比较才能得到验证, 我们与以下两个测试问题进行精度比较。

算例 1

求解以下非线性二层优化问题

$$\min (x^2 + y^2)$$

s. t.  $x \geq 0, y \geq 0, y$  是下层规划的解

$$\begin{aligned} &\min (-y) \\ &s. t. \begin{cases} 3x + y \leq 15 \\ x + y \leq 7 \\ x + 3y \leq 15 \end{cases} \end{aligned}$$

该问题来自于普林斯顿大学 Floudas<sup>[49]</sup> 收录的二层规划测试问题, 由 Tuy 和 Migdalas 求解结果如下:

$$\text{最优解: } x = 4.492188 \quad y = 1.523438$$

$$\text{最优值: } 22.500610$$

本文的计算结果表明, 该问题的以上最优解有很大问题, 我们利用模拟植物生长算法得到了一个全局最优解和 11 个局部最优解(见表 1)均远远优于 Tuy 等人得到的最优解。

算例 2 求解下列非线性二层优化问题

$$\min (x + y)$$

s. t.  $x - 3y - 6 \leq 0, y$  是下层规划的解

$$\min (y^2 + 5xy + x^2)$$

$$s. t. \quad 2x - y - 4 \leq 0$$

文献[50]利用 Fritz John 方法给出该问题的最终结果为:

$$\text{最优解: } x = 12/17 \quad y = -30/17$$

$$\text{最优值: } -18/17 \quad (-1.0588)$$

本文利用模拟植物生长算法得到了一个全局最优解和两个局部最优解, 见表 2。

本文中模拟植物生长算法用 Matlab 编程实现, 试验中计算机为 Celeron (R) CPU 3.06GHz, 1.00GB 内存, Windows XP。两个测试问题分别进行 15 次运算, 其中算例 1 平均计算时间为 16 秒, 算例 2 平均计算时间为 11 秒, 最好结果和最差结果误差均小于 0.0001%, 表现了 PGSA 突出的计算精度和稳定性。

### 4 结语

本文的创新性工作在于以植物向光性生长理论作为启发式准则用于求解非线性二层规划问题。由

表 1 模拟植物生长算法得到全局最优解和局部最优解

| 最优解序号   | 最优解    |        | 最优值    | 序号       | 最优解    |        | 最优值     |
|---------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|---------|
|         | $x$    | $y$    |        |          | $x$    | $y$    |         |
| 全局最优解   | 0.1069 | 1.4069 | 1.9908 | 局部最优解 6  | 1.6831 | 2.5831 | 9.5052  |
| 局部最优解 1 | 1.0492 | 1.3492 | 2.9212 | 局部最优解 7  | 0.7030 | 3.0030 | 9.5122  |
| 局部最优解 2 | 0.9070 | 2.2070 | 5.6935 | 局部最优解 8  | 2.5872 | 2.0872 | 11.0500 |
| 局部最优解 3 | 1.8572 | 1.7572 | 6.5369 | 局部最优解 9  | 1.4478 | 3.3478 | 13.3039 |
| 局部最优解 4 | 2.7353 | 1.2353 | 9.0078 | 局部最优解 10 | 0.4237 | 3.7237 | 14.0455 |
| 局部最优解 5 | 0.0000 | 3.0309 | 9.1864 | 局部最优解 11 | 2.3956 | 2.8956 | 14.1234 |

表 2 模拟植物生长算法得到例 2 全局最优解和局部最优解

| 最优解序号   | 最优解    |         | 最优值     |
|---------|--------|---------|---------|
|         | $x$    | $y$     |         |
| 全局最优解   | 0.5787 | -1.8071 | -1.2284 |
| 局部最优解 1 | 0.6108 | -1.7964 | -1.1856 |
| 局部最优解 2 | 0.6750 | -1.7750 | -1.1000 |

于模拟植物生长算法对初始点的选择要求宽松,同时没有遗传算法、蚁群算法等其他智能算法需要的若干人为设定的参数,因此解的稳定性好。通过对国内外学者提出的非线性二层规划问题的具体应用,不仅计算精度大幅度提高,而且显示出模拟植物生长算法具有全局寻优能力强、收敛速度快以及稳定性好的特点。

参考文献:

[1] Candler W, Norton R. Multilevel programming [R]. Technical Report 20, Word Bank Development Research Center, Washington, 1977.

[2] Hansen P, Jaumard B, Savard G. New branch-and-bound rules for linear bilevel programming [J]. SIAM Journal on Science and Statistical Computing, 1992, 13: 1194 - 1217.

[3] Vicente L, Savard G, Judice J. Descent approaches for quadratic bilevel programming [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1994, 81: 379 - 399.

[4] Bard J F. Practical bilevel optimization: algorithm and applications [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998.

[5] Dempe S. Foundation of bilevel programming [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 2002.

[6] Closon B, Marcotte P, Savard G. atrust-region method for nonlinear bilevel programming: algorithm and computational experience [J]. Computational Optimization and Applications, 2005, 30(3): 211 - 227.

[7] 吕一兵, 陈忠等. 非线性-线性二层规划问题的罚函数方法[J]. 系统科学与数学, 2009, 29(5): 630 - 636

[8] 李彤. 基于模拟植物生长的二级整数规划算法研究 [D]. 天津: 大学博士学位论文, 2005.

[9] 李彤等. 求解整数规划的一种仿生类全局优化算法—模拟植物生长算法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 76 - 85.

[10] 王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 37 - 41.

[11] 李彤, 宿伟玲. 单级与二级整数规划算法原理及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[12] 王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的配电网重构

[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 50 - 55

[13] 王淳. 模拟植物生长算法及其在输电网规划中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 24 - 28.

[14] 李彤, 王众托. 模拟植物生长算法在设施选址问题中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(12): 107 - 115

[15] Rao R S, Narasimham S. Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering, 2008, 1(2): 123 - 130.

[16] 罗伟强, 于建涛, 黄家栋. 一种求非线性整数规划最优解的仿生算法 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(7): 57 - 68

[17] 杨俊, 艾欣, 邵淮岭, 等. 基于模拟植物生长算法考虑安全成本的最优潮流 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 23(10): 35 - 40.

[18] 王淳, 程浩忠, 谭永香, 等. 发电机组检修计划的模拟植物生长算法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 105 - 110.

[19] Wang Chun, Cheng Haozhang, Hu Zechun, et al. Distribution system optimization planning based on plant growth simulation algorithm [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2008, 13(4): 462 - 467.

[20] Wang Chun, Cheng Haozhong. Reactive power optimization by plant growth simulation algorithm [J]. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008, (4): 771 - 774

[21] Guney K, Durmus A, Basbug S. A plant growth simulation algorithm for pattern nulling of linear antenna arrays by amplitude control [J]. Progress In Electromagnetics Research B, 2009, (17): 69 - 84

[22] Thiruvankadam S, Nirmalkumar A. Energy management of large distribution network with plant growth simulation algorithm and heuristic fuzzy [J]. International Journal on Electronic & Electrical Engineering, 2009, 1(1): 97 - 108.

[23] Rama P, Sivanaga Raju S. Optimal conductor selection in radial distribution system using plant growth simulation algorithm [J]. International Journal of Engineering Studies, 2009, 1(3): 229 - 240.

[24] Wang Chun, Cheng Haozhong. Transmission network optimal planning based on plant growth simulation algorithm [J]. European Transactions on Electrical Power, 2009, 19(2): 291 - 301.

[25] Rao R S, Narasimham S. A new heuristic approach for optimal network reconfiguration in distribution systems

- [J]. Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 2009, 5(1):15—21.
- [26] Thiruvenkadam S, Nirmalkumar A, Sakthivel A. Optimal reconfiguration algorithm for radial distribution system feasible under normal and abnormal conditions [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2009, 4(9):115—122.
- [27] 杨磊, 刘义保. 基于模拟植物生长算法的钴源源棒的排列优化[J]. 核技术, 2009, 32(12):915—921.
- [28] 丁雪枫, 马良. 基于模拟植物生长算法的易腐物品物流中心选址[J]. 系统工程, 2009, 27(2):96—101.
- [29] 叶婧, 汪芳宗. 基于改进模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 计算技术与自动化, 2009, 28(3):49—59.
- [30] 赵颖, 罗伟强. 基于改进模拟植物生长算法的输电网络扩展规划[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(5):6—10.
- [31] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16):1—7.
- [32] 王淳, 万卫, 程虹, 等. 多阶段输电网络最优规划的模拟植物生长算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(4):937—942.
- [33] 杨丽徙, 王锴. 应用改进模拟植物生长算法求解无功优化问题[J]. 高电压技术, 2009, 35(3):694—698.
- [34] 武娜, 焦彦军, 于建涛. 一种基于模拟植物生长算法的输电网故障诊断方法[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(3):5—9.
- [35] 李彤, 王众托. 模拟植物生长算法与知识创新的几点思考[J]. 管理科学学报, 2010, 13(3):87—96.
- [36] Li Tong, Su Weiling. Application of plant growth simulation algorithm on SMT problem[J]. ICIC Express Letters, 2010, 4(5):1945—1950.
- [37] Li Tong, Han Jianhu. Plant growth simulation algorithm for solving bilevel programming[J]. ICIC Express Letters, 2011, 5(6):1857—1861.
- [38] 辻隆男, 大山力, 橋口卓平, 等. 配電損失低減を目的とした将来型配電系統の自律分散型電圧分布制御方式[J]. 電気学会論文誌. 2010, 130(11):941—954.
- [39] Sirjani R, Mohamed A, Shareef H. Optimal capacitor placement in a radial distribution system using harmony search algorithm [J]. Journal of Applied Sciences, 2010, 10(23):2998—3006.
- [40] 杨磊, 刘义保, 龚学余, 等. 改进的模拟植物生长算法及其在大型辐照装置自动排源中的实用化[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(11):1403—1408.
- [41] 陈立华, 梅亚东. 模拟植物生长算法在水库群优化调度中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34(2):1—5.
- [42] 于永哲, 黄家栋. 基于改进模拟植物生长法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2):40—43.
- [43] 唐海波, 叶春明. 基于模拟植物生长算法的车间调度问题研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(11):1581—1585.
- [44] 唐海波, 叶春明, 张新功. 应用模拟植物生长算法求解置换流水车间调度问题[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(10):3670—3672.
- [45] 丁雪枫, 马良. 基于模拟植物生长算法的求解 MCCS 问题的研究[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(7):1405—1412.
- [46] 杨磊, 刘珂, 刘义保. 模拟植物生长算法在<sup>60</sup>Co源栅格排布中的应用. 核技术, 2011, 34(3):199—204.
- [47] 杨琴, 周国华. 改进模拟植物生长算法求解汽车维修车间瓶颈工序的多目标动态调度问题[J]. 系统管理学报, 2011, 20(5):595—599.
- [48] 丁雪枫, 马良, 尤建新, 等. 基于模拟植物生长算法虚拟企业盟友选择问题研究[J]. 管理学报, 2011, 8(2):278—283.
- [49] Floudas C, et al. Handbook of test problems for local and global optimization, Kluwer [Z]. <http://titan.princeton.edu/research.htm>.
- [50] 邵帅, 徐庆. 关于一类二层规划问题的一阶最优性条件研究[J]. 运筹与管理, 2009, 18(2):35—40.

## Plant Growth Simulation Algorithm for Solving Nonlinear Bilevel Programming

LI Tong<sup>1,2</sup>, CHEN Chou-yong<sup>1</sup>

(1. Management College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. Key Laboratory of Advanced Design and Intelligent Computing, Ministry of Education, Dalian 116622, China)

**Abstract:** Based on plant phototropism growth pattern as its heuristic criterion, an intelligence optimization algorithm for solving nonlinear bilevel programming is proposed herein. In this algorithm, the upper solution space and lower reaction set of bilevel programming are looked as two growth environments of plant. Then the plant system evolution style based on growth regulation and the probability growth model based on plant phototropism theory are established. The optimization model combined with above two realizes

the evolution of artificial plant from initial status to whole final status (that means no new branch growing), thus the optimal solution of bilevel programming can be found. This algorithm herein shows its high accuracy and strong astringency. Comparing with typical optimal solutions obtained from western scholars worked on actual test problems of nonlinear bilevel programming, plant growth simulation algorithm herein also shows its good effectiveness and feasibility.

**Key words:** plant growth simulation algorithm (PGSA); bilevel programming; nonlinear bilevel programming