

基于蜂群-杂草算法的农机行星传动优化设计

龚亚星¹,王联合国²

(1.甘肃农业大学工学院,甘肃兰州730070;2.甘肃农业大学信息科学技术学院,甘肃兰州730070)

摘要:将人工蜂群算法的寻优机制引入到入侵性杂草优化算法中,提出了一种混合蜂群杂草算法(BCIWO),将其应用于农业机械中星齿行星传动机构的优化设计。选取一个实例,将新算法与遗传算法(GA)及基本杂草算法(IWO)的实验结果进行对比,结果表明:①采用BCIWO算法所得的行星传动结构的设计体积为 $1.4725 \times 10^7 \text{ mm}^3$,小于GA与IWO所得;②BCIWO多次求解的波动较小,求解稳定性较高;③BCIWO的计算速度较快。从而推知,BCIWO在机械优化设计领域更具推广性。

关键词:农业机械;行星传动;优化设计;杂草算法;人工蜂群算法

中图分类号:S220.2 **文献标志码:**A

Optimal design of planet transmission mechanism in agricultural machinery based on bee colony and invasive weed optimization

GONG Ya-xing¹, WANG Lian-guo²

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Information Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: A hybrid algorithm of bee colony and invasive weed optimization (BCIWO) is proposed by introducing the optimization mechanism of the artificial bee colony (ABC) algorithm into the invasive weed optimization (IWO) algorithm and applied into the optimal design of star gear planet transmission mechanism in agricultural machinery. This new algorithm (BCIWO) is compared with GA and IWO. The results showed that: ① The minimal design volume ($1.4725 \times 10^7 \text{ mm}^3$) of the planet transmission mechanism is obtained by BCIWO, which is smaller than GA and IWO; ② The solution fluctuation of BCIWO is also smaller than other two algorithms, which illustrates it has a good stability; ③ The calculation speed of BCIWO is faster. So we can conclude that BCIWO is worth further promoting in mechanism design field.

Keywords: agricultural machinery; planet transmission mechanism; optimal design; invasive weed algorithm; artificial bee colony algorithm

行星齿轮传动是一种新型、高效的传动型式,具有体积小、重量轻、结构紧凑、传动比范围大、传动效率高、运动平稳、抗击冲击和振动的能力较强、适用面广等特点^[1-2],因而,被广泛应用于诸多农业机械中,如插秧机、收割机、拖拉机等。由于涉及到力学、几何学等学科原理的约束,传统的设计方法计算复杂、工作量大,且很难得出较优的设计参数组合。

智能优化算法是受自然界生物群体性行为的激发而设计出的一种新型优化方法,其独特的群体适应性调节的优化方式,以及在很多复杂优化问题中所表现出的较强的寻优能力,使其在农田灌溉^[3]、农业结构规划^[4-5]、农机优化设计^[6-8]等农业工程领

域的多个方面得到了广泛的应用。

入侵性杂草优化算法^[9](Invasive Weed Optimization Algorithm, IWO)是一种模拟杂草侵略性繁殖行为的智能优化算法,具有稳定性好、易于实现等特点。本文将人工蜂群算法^[10-11](Artificial Bee Colony Algorithm, ABC)中的采蜜蜂与跟随蜂寻优机制引入IWO算法,综合二者的优点,提出了一种混合蜂群杂草算法(Hybrid Algorithm of Bee Colony and Invasive Weed Optimization, BCIWO),将其应用于农业机械中行星传动机构的优化设计。实例计算结果表明,该算法在求解行星传动优化设计问题(下文简记为PTM问题)时,表现出了更好的寻优性能。

收稿日期:2014-03-31

基金项目:甘肃省教育信息化发展战略研究项目(2011-2)

作者简介:龚亚星(1990—),女,甘肃陇南人,硕士,主要从事农业电气化与自动化及计算智能方向研究。E-mail:yaxing918@126.com。

通信作者:王联合国(1968—),男,甘肃临夏人,教授,博士,主要从事计算智能及计算机网络方向研究。E-mail:wanglg@gsau.edu.cn。

1 算法描述

1.1 蜂群进化机制

ABC 算法主要通过蜜蜂的角色转换机制实现进化,主要经历如下 3 个阶段:①每个蜜源对应一只采蜜蜂,采蜜蜂在其邻域内开采适应度较优的新蜜源;②跟随蜂按照某种概率随机选择一只采蜜蜂进行跟随,在其蜜源邻域内搜索适应度较优的新蜜源;③当每个蜜源位置被开采的次数达到某个设定的阈值 $limit$ 仍没有被更新时,采蜜蜂转换成侦察蜂,随机搜索一个新蜜源,放弃旧蜜源。这 3 个阶段往复循环,直至达到算法终止条件。

1.2 IWO 的改进策略

标准 IWO 算法模拟杂草的繁殖生长行为,分为初始化、繁殖、空间分布以及竞争四个阶段。每一代的杂草个体经过竞争后,适应度较好者将被保留下来在下次迭代中进行扩散,本文将 ABC 算法中的采蜜蜂与跟随蜂机制引入 IWO,以进一步保持和增加优良个体,加快算法的收敛速度。

对于第 t 代的每个杂草个体 $W_i(t)$ 上放置一只采蜜蜂,使其在该个体邻域按(1)式搜索新的个体:

$$X_i^j = W_i^j + \varphi_i^j (W_i^j - W_k^j) \quad (1)$$

式中, $j \in \{1, 2, \dots, D\}$, 是 D 维解向量的某个分量, $k \in \{1, 2, \dots, P_{\text{now}}\}$, P_{now} 是当前杂草种群数量, $k \neq i$, k, j 均随机生成, φ_i^j 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数。若 X_i^j 的适应度比 W_i^j 的适应度好,则用其替代 W_i^j , 否则 W_i^j 保持不变。

随后,在当前最优个体上放置若干只跟随蜂,与 ABC 算法中每个蜜源只有一只跟随蜂工作的机制不同,这里,所有跟随蜂全都作用于最优个体,以使群体中更多有用信息都集中到最优个体。各跟随蜂随机选择一只采蜜蜂进行跟随,即利用采蜜蜂搜索更新后的某个个体信息,按(1)式搜索新的个体,此阶段 W_i 仅表示当前最优个体。同样地,保留新旧个体中适应度较好者。

区别于 IWO 中种子在 D 维空间扩散的方式,采蜜蜂与跟随蜂搜索只是在杂草个体的某个分量上进行变异,这样,采蜜蜂能起到保持优良个体的作用,而跟随蜂则起到综合优良种群中有用信息的作用,从而提高了算法的收敛速度和优化精度。

1.3 改进后算法的基本流程

BCIWO 算法的基本流程如下:

步骤 1: 初始化杂草种群, 确定初始种群规模 P_0 、最大种群规模 P_{max} 、杂草个体所能产生的最大种子数 s_{max} 和最小种子数 s_{min} 、标准差变化的初始值 δ_{max} 和终止值 δ_{min} 、算法的最大迭代次数 Gen_{max} 以

及非线性调和因子 n 等参数的值。

步骤 2: 计算当前种群中每个杂草个体的适应度值, 记录最小适应度值 f_{min} 、最大适应度值 f_{max} 及最优个体。

步骤 3: 判断是否达到 Gen_{max} , 若达到, 则终止迭代, 输出最优解, 否则, 进入下一步。

步骤 4: 按(2)式计算每个个体繁殖的种子数, 并按(3)式更新本次迭代的标准差。

$$sd_i = s_{\text{min}} + \frac{f_i - f_{\text{min}}}{f_{\text{max}} - f_{\text{min}}} (s_{\text{max}} - s_{\text{min}}) \quad (2)$$

$$\delta_i = \delta_{\text{min}} + \frac{(Gen_{\text{max}} - Gen)^n (\delta_{\text{max}} - \delta_{\text{min}})}{(Gen_{\text{max}})^n} \quad (3)$$

其中, f_i 表示第 i 个个体的适应度值, Gen 为当前迭代次数。

由于适应度值高的个体, 可能带有更多有用的信息, (2)式可以保证适应度越好的个体, 产生的种子越多。种子在其父代个体附近的 D 维空间以正态分布的方式进行扩散, (3)式表示随着迭代的进行, 正态分布的标准差逐渐减少。

算法允许一部分非可行解保留下来, 避免丢失非可行解中的有用信息。这样的处理使算法在进化前期注重全局平面的探索, 而在进化后期主要进行局部开采, 在一定程度上避免了早熟收敛。

步骤 5: 按 $N(0, \delta_i^2)$ 随机产生扩散值, 与父代个体叠加产生新的子个体, 将其加入当前种群, 直至所有父代个体的种子都扩散完毕;

步骤 6: 种群规模是否达到 P_{max} ? 若达到, 则执行步骤 7, 否则执行步骤 8;

杂草个体按其适应度值大小进行竞争, 适应度值高的前 P_{max} 个个体留下来继续进化, 而适应度值较低的个体则被淘汰。

步骤 7: 计算当前种群中每个杂草个体的适应度值, 将所有个体按适应度大小排序, 选择前 P_{max} 个个体, 舍弃剩余个体, 然后执行步骤 8。

步骤 8: 调用蜂群搜索机制。按照 2.2 节的方法, 依次调用采蜜蜂与跟随蜂进行搜索, 更新杂草种群。完成后, 转向步骤 2。

2 仿真实验

2.1 模型描述

农业机械中行星传动结构优化设计的目标是确定最佳的设计参数组合, 以使行星传动的体积最小, 从而降低成本, 使其在农机市场上更具竞争力。

一般而言, 星齿行星传动结构的优化设计主要涉及到针齿分布圆半径 r_p 、针齿半径 r_{tp} 、转臂轴承宽度 B 、内齿圈宽度 b_c 、及短幅系数 K_1 这几个参数, 传动结构的体积则按(4)式计算, 并且, 在设计行星

传动结构时,必须要满足以下几个条件(因篇幅限制,这里只给出各个约束条件的最终关系式,具体推导过程可参见文献[1,12])。

$$V = \pi \cdot (r_p + r_{rp} + 25)^2 \cdot B \quad (4)$$

1) 转臂轴承宽度不能小于内齿圈宽度,即 $B \geq b_c$ 。

2) 内齿圈齿廓不发生顶切和变尖,即 $r_{rp} < a_{\min} r_p$,其中, a_{\min} 为理论齿廓的最小曲率半径系数:

$$a_{\min} = \sqrt{\frac{27z_c(1 - K_1^2)}{(z_c + 3)}}, z_c \text{ 为内齿圈齿数。}$$

3) 要避免针齿相碰,并保证针齿与针齿壳的强度,即 $K_2 = \frac{r_p}{r_{rp}} \sin \frac{\pi}{z_p}, 1.5 \leq K_2 \leq 2.0$ 。其中, K_2 为针径系数, z_p 为针齿数。

4) 针齿的弯曲强度 δ_F 应满足: $\delta_F = \frac{12000 T_{c1} b_c}{r_p z_p r_{rp}^3} \leq \delta_{Fp}$,其中, T_{c1} 为内齿圈阻力矩, δ_{Fp} 为许用弯曲应力。

5) 内齿圈和针齿的齿面接触强度 $\delta_{H_{\max}}$ 应满足: $\delta_{H_{\max}} = 12000 \sqrt{\frac{T_{c1} Y_{H_{\max}}}{b_c r_p^2}} \leq \delta_{Hp}$,其中 $Y_{H_{\max}}$ 是齿面接触应力达最大值时针齿与内齿圈齿廓的啮合位置系数, δ_{Hp} 为许用接触应力。

综合以上分析,并将各设计参数 (r_p, r_{rp}, B, b_c, K_1) 转换为未知变量 $X(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$,可推导出行星传动优化设计问题的一般数学模型,如(5) 式所示。

$$\begin{aligned} \min \quad & f(X) = \pi \cdot (x_1 + x_2 + 25)^2 \cdot x_3 \\ \text{s.t.} \quad & x_4 - x_3 \leq 0 \\ & x_2 - x_1 \sqrt{\frac{27z_c(1 - K_1^2)}{(z_c + 3)}} < 0 \\ & x_1 \sin \frac{\pi}{z_p} - 2x_2 \leq 0 \\ & 12000 T_{c1} x_4 - z_p \delta_{Fp} x_1 x_2^3 \leq 0 \\ & 12000 \sqrt{\frac{T_{c1} Y_{H_{\max}}}{x_4}} - \delta_{Hp} x_1 \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 优化处理

2.2.1 问题编码 要将杂草算法应用于行星传动的优化设计,必须结合实际设计所需,将问题以适合于算法演化为准则进行编码,使之与算法的相关变量一一对应,如表 1 所示。

因此,在应用 IWO 对 PTM 问题求解时,每个杂草个体 $W_i(w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iD})$ 可作为第 i 种参数组合方案,其中 $w_{ij}(j = 1, 2, \dots, D)$ 则表示第 j 个需要优化的参数。由于 PTM 问题旨在寻求使得行星传动机构体积最小的参数组合,因而在杂草算法中,认为

适应度值越小的个体更为优秀。

表 1 PTM 问题与杂草繁衍方式的对应关系

Table 1 The corresponding relationship between PTM & IWO

PTM 问题 PTM	杂草繁衍方式 IWO
设计参数组合 Design parameter	杂草植株个体 Weed individual
参数对应体积 Volume	植株对环境的适应度 Fitness
参数优化速度 Optimization speed	个体繁衍速度 Reproduction speed
最佳参数组合 Best parameter	最优杂草个体 Best individual
最小体积 Minimum volume	最优适应度值 Best fitness value

2.2.2 约束处理 本文所采用的 PTM 模型有 5 个重要的约束。在算法进化过程中,对每个新生长的杂草个体都依次对各个约束条件进行判定,当个体不满足某个条件时,则采用罚函数 $f_p(x) = C \cdot f(x)$ 对其适应度值进行惩罚,其中 C 是一个较大的常数。

个体不满足的约束条件越多,则惩罚越严重,这就使得满足约束的个体在群体中具有较优的适应度,在经历多次繁衍后,不满足约束的个体最终被淘汰,而满足约束的个体则逐步占据整个种群,从而得到符合各个约束条件的解。

2.3 实例分析

文献[8]经在文献[12]的研究基础上,验证了遗传算法在进行行星传动机构优化设计的优越性,因此,本文选取与其相同的实例进行优化,并将本文算法与遗传算法的求解结果进行比较,以验证算法的求解性能。

2.3.1 算法寻优结果分析 在遗传算法的进化过程中,种群中的个体数目始终保持不变,杂草算法中的个体数目却在动态地变化,而在算法的对比实验中,不仅要尽可能使算法各自的优化结果最好,还要考虑到算法复杂度的可比性。据此,本文通过大量实验后,选定以下参数进行实验:对 IWO 和 BCIWO 算法,初始种群规模为 5,最大种群规模为 10,非线性调节指数为 3,最大、最小可生成种子分别为 5、1,正态分布标准差的初始、终止值分别为 20、1;对 GA 算法,种群规模为 30,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.01;三种算法的最大迭代次数统一设为 100。每个实验重复进行 10 次,记录其中的最优结果,具体数据如表 2 所示。

由表 2 可知,基于 IWO 与 BCIWO 而对该行星传动机构的优化设计所得的体积均要小于 GA。这说

明, IWO 和 BCIWO 取得了更好的优化效果。

2.3.2 算法优化性能分析 为了更清晰地说明 BCIWO 较之 IWO 和 GA 在求解 PTM 问题时的优越性, 本文将三种算法分别重复运行 50 次, 计算出每

次迭代所得的体积, 绘制了二者的平均收敛曲线(如图 1), 并记录每次实验求得的最小体积, 绘制了各算法多次求得的解的波动曲线(如图 2), 以观察算法求解的收敛性及稳定性。

表 2 三种算法优化结果的比较

Table 2 The comparison of optimal results by three algorithms

算法 Algorithm	针齿分布圆半径 r_p Pingear circle radius /mm	针齿半径 r_p Pin gear radius /mm	转臂轴承宽度 B Rotary arm bearing width/mm	内齿圈宽度 b_c Internal gear width /mm	短幅系数 K_1 Short amplitude coefficient	体积 Volume / 10^7 mm^3
GA	240.047	15.619	60.600	41.532	0.635	1.4997
IWO	240.048	14.578	60.024	35.024	0.723	1.4745
BCIWO	240.000	14.492	60.000	35.004	0.602	1.4725

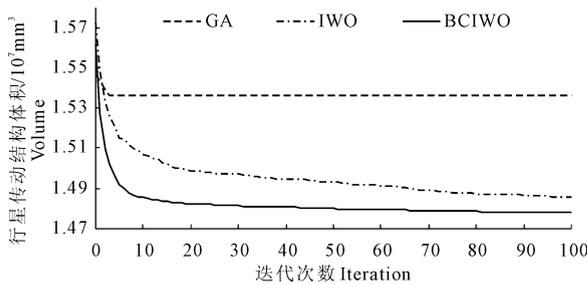


图 1 算法的平均收敛曲线

Fig. 1 Average convergent curves of algorithms

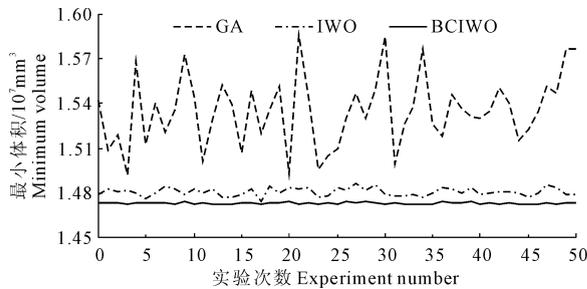


图 2 算法求解的波动曲线

Fig. 2 Fluctuant curves of algorithm solutions

由图 1 可得, BCIWO 较之 IWO 和 GA 总能以更快的速度收敛于更优秀的解。由图 2 可得, 在 50 次实验中, BCIWO 所得的体积的最差值、最优值均小于 IWO 和 GA 的优化结果。并且, BCIWO 的求解波动不大, 基本稳定, IWO 的解虽然总体上相对稳定, 但还是存在一定波动, 而 GA 的解的波动相对较大。

综合以上分析, BCIWO 在本文数据较为简单、数据范围较小的实例应用中, 已经表现出了比 GA 和 IWO 更强的收敛性与寻优能力, 从而推知, 在更为复杂的多变量优化设计的实际问题中, BCIWO 必然比其它两种算法具有更大的拓展空间和应用前景。

3 结语

本文结合 IWO 与 ABC 算法二者的优点, 提出了一种混合蜂群杂草算法, 该算法引用蜂群进化机制

对杂草种群中个体的某个分量进行变异, 以保持优良个体并集中优良种群的有用信息, 引导算法朝好的方向快速进化。将改进的算法应用到行星传动优化设计问题中, 实验结果表明: ① 改进后的算法所求解的设计体积最小; ② 改进后算法求解的稳定性较高; ③ 改进后算法求解的速度较快。

可见, 新算法在处理该类问题时取得了更好的优化效果, 但是, 由于本文旨在验证算法进行行星传动结构优化设计的可行性及优越性, 故所选实例较为简单, 问题所涉及的优化变量较少, 如何将算法应用到较为复杂的实际问题的求解是下一步研究的重点。

参考文献:

- [1] 胡来瑭. 行星传动设计与计算[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [2] 饶振刚. 行星传动机构设计[M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 1994.
- [3] 张兵, 袁寿其, 李红, 等. 基于遗传算法求解的冬小麦优化灌溉产量模型研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 12-15.
- [4] 王子龙, 付强, 姜秋香. 基于粒子群优化算法的土壤养分管理分区[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 80-84.
- [5] 王玉宝. 节水型农业种植结构优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [6] 作文松, 钟钟强, 卢博友, 等. 物料传送摇摆式输送机传动装置部件优化设计[J]. 农机化研究, 2006, (10): 122-124.
- [7] 王显仁, 李耀明, 徐立章. 基于神经网络和遗传算法的脱粒装置参数优化[J]. 机械设计与制造, 2008, (2): 72-74.
- [8] 尹海东. 基于遗传算法的农业机械中行星传动机构的优化设计[J]. 农机化研究, 2011, (3): 127-129.
- [9] Mehrabian A R, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization[J]. Ecological Informatics, 2006, 1(4): 355-366.
- [10] Karaboga D. An Idea Based On Honey Bee Swarm for Numerical Optimization[R]. Turkey: Erciyes University, 2005.
- [11] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459-471.
- [12] 韩敏, 高媛. 基于 Matlab 优化工具箱的星齿行星传动的优化设计[J]. 机械设计与制造, 2009, (9): 31-32.