

## 基于杂草算法的超磁致伸缩作动器耦合模型识别\*

杨理华<sup>1</sup>, 吴海平<sup>1</sup>, 刘树勇<sup>2</sup>, 李海峰<sup>1</sup>

(1. 海军潜艇学院 动力系, 山东 青岛 266199; 2. 海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**考虑磁滞损耗、动态应力等因素的超磁致伸缩作动器磁滞模型可有效揭示电-磁-机-热多场耦合效应,但准确识别其非线性模型往往存在较大困难。智能杂草算法具有激烈的竞争机制和较强的搜索能力,可用于解决作动器多目标物理参数辨识问题。传统算法的种子数量以线性方式产生且分布方差与适应度缺乏联系,极大地影响了算法收敛速度和模型识别精度。为此,提出一种非线性繁殖和分布的混合改进杂草算法,并将其应用于超磁致伸缩作动器模型识别。实验表明:改进算法具有较强的噪声抑制能力,能精确辨识含有噪声扰动的作动器磁滞非线性模型物理参数;模型预测值和实验数据误差较小,所识别参数可使磁滞非线性模型较为全面地描述作动器多场耦合机理和动态特性。

**关键词:**超磁致伸缩作动器;磁滞非线性;模型识别;改进杂草算法

中图分类号:O328 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2018)05-088-09

## Coupling model identification of giant magnetostrictive actuator using invasive weed algorithm

YANG Lihua<sup>1</sup>, WU Haiping<sup>1</sup>, LIU Shuyong<sup>2</sup>, LI Haifeng<sup>1</sup>

(1. Power Control Department, Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China;

2. College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The hysteresis model of giant magnetostrictive actuator, considering the hysteresis loss and dynamic stress, can comprehensively reveal the electric, magnetic, mechanical and thermal multi-field coupling effect. It is often, however, difficult to accurately identify the nonlinear model by the experiment. The intelligent IWO (invasive weed optimization) with a fierce competition mechanism and strong search ability is very suitable for solving the problem of multi-objective physical parameters identification. Nevertheless, the number of seeds is linearly generated in traditional IWO and the distribution variance is lack of adaptability as well, which greatly affects the algorithm convergence speed and model recognition accuracy. Therefore, an improved algorithm with nonlinear propagation and distribution was proposed and applied to the model parameters identification of giant magnetostrictive actuator. The experiment exhibits that the improved algorithm has stronger noise suppression ability, which can accurately identify the physical parameters of the hysteresis nonlinear model with noise signal, and the errors between model predictions and experimental data are much smaller, thus the identified parameters can make the hysteresis nonlinear model comprehensively describe the actuator multi-field coupling mechanism and dynamic characteristics.

**Key words:** giant magnetostrictive actuator; hysteresis nonlinearity; model identification; improved invasive weed optimization

超磁致伸缩作动器(Giant Magnetostrictive Actuator, GMA)具有响应快、驱动力大、工作频带宽等优点,在精密定位、振动控制等领域有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。受超磁致伸缩材料(Giant Magnetostrictive Materials, GMM)影响,GMA具有磁滞、温变等复杂电-磁-机-热耦合效应,表征这些物理场的参数与微观磁化过程紧密相关,动态磁场、输出力及位移均呈现较强磁滞非线性。若描述GMA的模型参数不够精确,就可能导

理论计算和实验结果相差甚远。因此,精确建模及物理模型参数识别研究是其工程应用的首要条件。

GMA线性模型<sup>[1]</sup>相对简单,但仅适合描述作动器低频特性。Preisach模型<sup>[4]</sup>用唯象理论来模拟磁滞现象,仅可得到输入输出关系,不能反映多场耦合本质特性。基于Helmholtz-Gibbs理论和统计特性的Free-Energy模型<sup>[5]</sup>,在恒温且不考虑涡流损耗时能描述磁化强度、应变与磁场强度间磁

\* 收稿日期:2017-07-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509253, 51579242);上海交通大学海洋工程国家重点实验室研究基金资助项目(1714)

作者简介:杨理华(1985—),男,陕西汉中,人,讲师,博士, E-mail: dreamfly4@163.com

滞特性,但仅适用于低频条件。基于铁磁磁畴和畴壁理论的 Jiles-Atherton (JA) 模型<sup>[6]</sup>用微分方程来描述非线性磁滞现象,能清晰地反映内部多场转换机理,但所含物理参数较多,对其精确建模和参数辨识仍有一定难度。对此,贾振元等<sup>[7]</sup>根据 Jiles 磁滞模型、磁机效应及能量守恒理论,提出最小二乘参数辨识法对超磁致伸缩执行器进行识别研究,低频条件下该方法可得到较为准确的参数,但线性算法参数识别能力相对有限。Calkins 等<sup>[8]</sup>基于序列二次规划和最小二乘算法,分别辨识 JA 模型参数和饱和磁滞伸缩,但由于分步识别导致测量和计算存在较大差异。Almeida 等<sup>[9]</sup>基于模拟退火算法开展 JA 模型参数辨识研究,但并未考虑多场耦合因素。徐彭有、曹淑英<sup>[10-11]</sup>等还用分层遗传算法 (Genetic Algorithm, GA)、信赖域算法开展模型识别研究,但仅低频时能可靠地描述作动器实验特性。目前,针对宽频段内超磁致伸缩作动器多场耦合建模及其参数辨识问题仍匮乏行之有效的方法。智能优化算法的发展为解决该问题提供了研究思路。

杂草算法 (Invasive Weed Optimization, IWO) 由 Mehrabian 等<sup>[12]</sup>于 2006 年为解决数值优化问题而提出,作为一种高效群体智能算法,其以良好的全局和局部搜索能力、稳健的鲁棒性而备受关注,已解决诸多工程优化问题<sup>[13-15]</sup>。Mehrabian 和 Yousefi-Koma<sup>[16-17]</sup>采用杂草算法优化飞机尾鳍上压电激振装置结构,有效衰减了激振装置振动。Sedighy 等<sup>[18]</sup>用杂草算法解决八木天线结构问题,优化后的天线在相同频段内具有较低驻波比和较高增益。Karimkashi 等<sup>[19]</sup>用粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 和杂草算法开展阵列式天线优化分析,结果表明后者具有更快的收敛速度、更小的终值误差且稳定性能更好。此外,Zhao 等<sup>[20]</sup>还用 GA、PSO 及 IWO 开展汽车三维姿态估计,结果也表明 IWO 算法更加适合于处理高维函数优化问题。上述应用说明杂草算法具有良好的寻优能力,但目前尚未出现该智能算法在模型参数识别方面的应用。为此,本文将杂草算法为基础,对其辨识过程进行改进并应用于超磁致伸缩作动器磁滞非线性模型识别,以期模型精确控制和工程应用提供可靠的物理参数。

## 1 GMA 磁滞耦合模型

### 1.1 GMA 位移模型

超磁致伸缩作动器包括:1—顶端盖螺钉;2—输出顶杆;3—顶端盖;4—预紧弹簧;5—外套;6—

驱动线圈;7—偏置线圈;8—GMM 棒;9—预紧螺钉;10—底端盖螺钉;11—底端盖等部件,其中输出顶杆、预紧弹簧、GMM 棒均为同步运动,因此作动器等效为单自由度数学模型,其结构和原理分别如图 1 和图 2 所示。

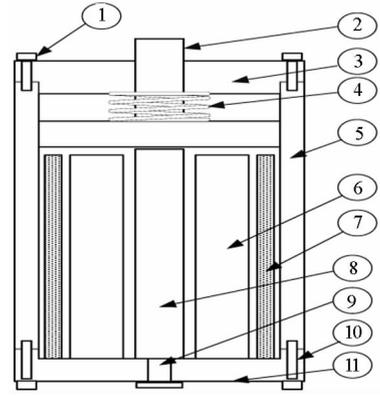


图 1 作动器结构图

Fig. 1 GMA structure diagram

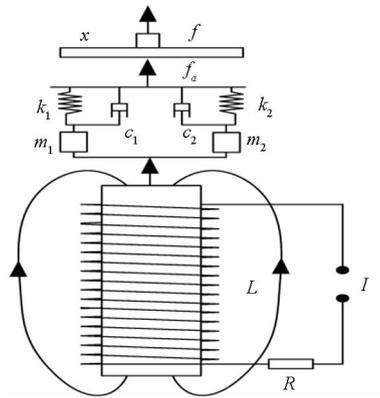


图 2 作动器原理图

Fig. 2 GMA schematic diagram

基于压磁和磁畴理论<sup>[21-22]</sup>,JA 模型可用偏微分方程及动力学方程来描述 GMA 内部磁化过程及宏观运动位移,具体如式 (1) ~ (7) 所示:

$$\begin{aligned} H_e &= H + \alpha M + H_\sigma \\ &= H_d + H_b + \alpha M + H_\sigma \\ &= nI + H_b + \alpha M + \frac{3\sigma}{2\mu_0} \left( \frac{d\lambda}{dM} \right)_\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

$$M_{an} = M_s [\coth(H_e/a) + a/H_e] \quad (2)$$

$$\frac{dM_{irr}}{dH} = \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \alpha(M_{an} - M_{irr})} \quad (3)$$

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (4)$$

$$M = M_{irr} + M_{rev} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{3}{2} \frac{\lambda_s}{M_s^2} M^2 \quad (6)$$

$$x_{(s)} = \frac{1}{(m_1 + m_2)s^2 + (c_1 + c_2)s + (k_1 + k_2)} \frac{A}{S^H} \lambda \quad (7)$$

其中,  $H_e$ 、 $H$ 、 $H_d$ 、 $H_b$  及  $H_\sigma$  分别为有效、外加、驱动、偏置及应力磁场强度,  $n$  为单位尺寸线圈匝数,  $I$  为电流,  $M_{an}$ 、 $M_{irr}$ 、 $M_{rev}$ 、 $M_s$  及  $M$  为无磁滞、不可逆、可逆、饱和及总磁化强度,  $\sigma$  为动态应力,  $\tilde{\alpha} = \alpha + (9\lambda_s \sigma) / (2\mu_0 M_s^2)$  为综合磁畴系数,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\alpha$  为磁矩作用参数,  $c$ 、 $k$  为可逆和不可逆损耗系数,  $\lambda_s$ 、 $\lambda$  为饱和及常规磁致伸缩系数,  $\delta$  为符号函数 ( $dH > 0$  时  $\delta \equiv +1$ , 反之  $\delta \equiv -1$ ),  $a$  为无磁滞磁化系数,  $L$ 、 $\rho$ 、 $A$ 、 $C$ 、 $S^H$ 、 $m_1 = \rho LA/3$ 、 $k_1 = A/(S^H L)$ 、 $c_1 = CA/L$  为 GMM 棒长度、密度、截面积、阻尼、轴向柔顺系数、等效质量、等效刚度及等效阻尼,  $m_2$ 、 $k_2$ 、 $c_2$  为顶杆和承载物等效质量、刚度及阻尼,  $s$  为拉氏算子,  $x_{(s)}$  为用拉氏算子表示的作动器位移。

## 1.2 耦合磁化强度模型

当驱动频率较低时, 可忽略涡流、磁滞、动态应力等因素, 式(1)~(7)即可描述作动器非线性特性。但在振动领域应用时, 就需结合多场耦合条件, 建立超磁致伸缩作动器宽频磁滞非线性耦合模型。在忽略涡流温变情况下, GMM 磁化强度  $M$  可由驱动磁场  $H$  及动态应力  $\sigma$  表示:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial M}{\partial H} \frac{dH}{dt} + \frac{\partial M}{\partial \sigma} \frac{d\sigma}{dt} \quad (8)$$

式中, 磁化强度变化率  $dM/dt$  由微分磁化率  $\partial M/\partial H$ 、磁场强度变化率  $dH/dt$ 、磁化强度应力变化率  $\partial M/\partial \sigma$  及应力变化率  $d\sigma/dt$  组成, 其中  $dH/dt$  和  $d\sigma/dt$  容易计算。因此, 式(8)求解关键就是获得  $\partial M/\partial H$  和  $\partial M/\partial \sigma$ 。由式(2)~(5)可知,  $\partial M/\partial H$  可表示为:

$$\frac{\partial M}{\partial H} = (1-c) \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \tilde{\alpha}(M_{an} - M_{irr})} + c \frac{\partial M_{an}}{\partial H} \quad (9)$$

根据磁机耦合理论<sup>[23-24]</sup>, 磁化强度应力变化率  $\partial M/\partial \sigma$  可表示为:

$$\frac{\partial M}{\partial \sigma} = \frac{S^H \sigma}{\xi} (M_{an} - M) + c \frac{\partial M_{an}}{\partial \sigma} \quad (10)$$

式中,  $\xi$  为单位体积能量耦合参数, 需由试验识别获得。由式(8)~(10)可得总磁化强度  $M$  为:

$$\frac{dM}{dt} = \left[ (1-c) \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k - \tilde{\alpha}(M_{an} - M_{irr})} + c \frac{\partial M_{an}}{\partial H} \right] \frac{dH}{dt} + \left[ \frac{S^H \sigma}{\xi} (M_{an} - M) + c \frac{\partial M_{an}}{\partial \sigma} \right] \frac{d\sigma}{dt} \quad (11)$$

最后, 根据式(6)、式(7)可计算磁致伸缩应变  $\lambda$  和顶杆输出位移  $x$ 。因考虑耦合因素, 若能由实验准确识别出  $\tilde{\alpha}$ 、 $c$ 、 $a$ 、 $M_s$ 、 $\lambda_s$ 、 $k$ 、 $\xi$  这 7 个参数, 则可由式(1)~(11) 在宽频段内较为准确地揭示作动器磁滞耦合动态特性。

## 2 模型识别

### 2.1 模型识别原理

作动器磁滞非线性耦合模型识别原理如图 3 所示, 该模型需要通过实验确定  $\tilde{\alpha}$ 、 $c$ 、 $a$ 、 $M_s$ 、 $\lambda_s$ 、 $k$ 、 $\xi$  共 7 个参数, 令待识别参数  $\theta$  为:

$$\theta = [\tilde{\alpha} \quad c \quad a \quad M_s \quad \lambda_s \quad k \quad \xi]^T \quad (12)$$

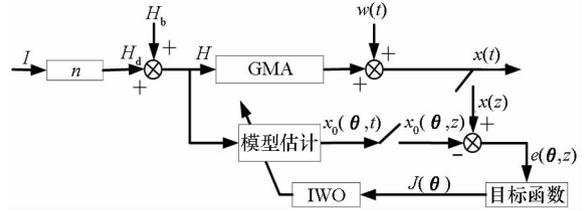


图3 模型识别原理

Fig. 3 Model identification principle

由实验获取模型参数, 实际就是识别算法寻找适应度最小值的过程, 设适应度函数  $J(\theta)$  为:

$$J(\theta) = \frac{1}{Q} \sum_{z=1}^Q e^2(\theta, z) = \frac{1}{Q} \sum_{z=1}^Q [x(z) - x_0(\theta, z)]^2 \quad (13)$$

其中,  $Q$ 、 $z$  为取样次数和时刻,  $x(z)$ 、 $x_0(\theta, z)$  为噪声位移和模型预测值,  $e(\theta, z)$  为差值,  $w(t)$  为测量噪声,  $\min_r \leq \theta_r \leq \max_r$ ,  $r = 1, 2, \dots, 7$ ,  $\min_r$ 、 $\max_r$  分别为第  $r$  个参数  $\theta_r$  取值极限, 对于给定  $\theta$  值可得适应度  $F_{\text{value}} = J(\theta)$ 。根据 GMM 棒材料特性确定参数  $\theta$  取值范围, 算法在该范围内随机获取可行解并计算预测值  $x_0(\theta, z)$ , 与  $x(z)$  相减计算  $e(\theta, z)$  后, 再由适应度函数实时更新参数  $\theta$ , 当使适应度  $F_{\text{value}}$  达到  $F_{\text{min}}$  时, 所对应  $\theta$  值即为最优识别参数。

### 2.2 杂草算法

杂草算法启发于杂草繁殖这一生物现象, 在工程中已有诸多应用。该算法在杂草繁殖过程中引入自然竞争机制, 使适应性强的杂草能繁殖出更多种子, 获得更大存活概率。因此, 通过该算法进行模型识别就是要找到适应性强 ( $J(\theta)$  最小) 的杂草 (待辨识参数  $\theta$ ), 主要包括以下四部分。

#### 2.2.1 种群初始化

确定杂草种群初始值和最终值  $P_{\text{init}}$ 、 $P_{\text{max}}$ , 最大迭代次数  $iter_{\text{max}}$ , 杂草最大和最小可生成种子数  $S_{\text{max}}$ 、 $S_{\text{min}}$ , 非线性调节指数  $n'$ , 种子散布初始及最终步长  $\sigma_{\text{initial}}$ 、 $\sigma_{\text{final}}$ , 当前种群最大和最小适应值  $F_{\text{max}}$ 、 $F_{\text{min}}$ , 每个杂草个体变量维数  $D$ , 初始搜索空间  $X$  并随机产生  $P_{\text{init}}$  个初始解。

### 2.2.2 种群繁殖

图4为种子数量确定过程,根据式(13)计算适应度值,适应度值高的杂草可繁殖出更多种子,反之则仅繁殖较少种子。采用优胜劣汰竞争机制可使适应性强的杂草最终生存下来。

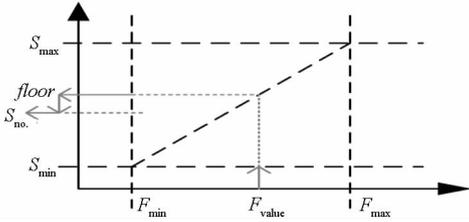


图4 杂草种子数确定方法

Fig.4 Determination method of weed seeds number

根据每个杂草适应度  $F_{value}$  计算所得向下取整就可得繁殖种子数  $S_{no.}$ , 杂草可根据种群最大、最小适应度值确定产生种子数量, 如式(14)所示:

$$S_{no.} = \left( \frac{F_{value} - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \right) \times (S_{min} - S_{max}) + S_{max} \quad (14)$$

### 2.2.3 空间分布

杂草所繁殖种子被随机分散到  $D$  维空间内, 新种子变量值由父辈杂草变量加上数值  $S_i (i=1, 2, 3, \dots, D)$ , 该值在  $D$  维空间服从零均值、标准方差  $\sigma_{cur}$  正态分布,  $\sigma_{cur}$  值随迭代次数增加而减小。假设当前某个杂草变量值为  $\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_D]^T$ ,  $\mathbf{S} = [S_1, S_2, S_3, \dots, S_D]^T$ , 则产生种子变量值为:

$$\mathbf{X}_{new} = [X_1 + S_1, X_2 + S_2, X_3 + S_3, \dots, X_D + S_D]^T \quad (15)$$

标准方差  $\sigma_{cur}$  计算如下:

$$\sigma_{cur} = \frac{(iter_{max} - iter)^{n'}}{(iter_{max})^n} (\sigma_{initial} - \sigma_{final}) + \sigma_{final} \quad (16)$$

式中,  $iter$  为迭代次数。式(16)可使偏远区域种子繁殖的机会以非线性方式衰减, 也能使适应性强的个体不断聚集, 反之则逐渐被淘汰。

### 2.2.4 竞争性生存

种群中个体都按上述方式进行繁殖和生长, 当杂草数量达到最大时, 新繁殖种子与其余个体一起按适应度进行排序, 并从中选取  $P_{max}$  个适应能力较强的个体, 其余均被淘汰。这种竞争机制提供了适应性较差个体繁殖的机会, 若其产生后代适应性更好, 则这些后代就可存活下去。

### 2.3 改进杂草算法

杂草算法种群个体按第2.2.1~2.2.4小节所述方式进行繁殖和生长, 式(14)中所述种子数量由线性方式产生, 这与实际存在差异<sup>[20,25-26]</sup>。Yahyatabar等<sup>[25]</sup>提出一种二次方程非线性种群繁殖方法, 对种子数量  $S_{no.}$  进行改进, 如式(17)所示:

$$S_{no.} = \left[ \frac{F_{value} - F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \times (S_{min} - S_{max}) \right]^2 + S_{max} \quad (17)$$

此外, 在杂草空间分布时标准方差  $\sigma_{cur}$  随  $iter$  增加而减小, 且每次迭代中空间分布杂草均具有相同  $\sigma_{cur}$  值, 故式(16)与种子适应能力之间缺乏联系, 这将降低算法全局寻优能力。为此, Zaharis等<sup>[26]</sup>提出一种自适应杂草算法(Adaptive Invasive Weed Optimization, AIWO)用于解决天线阵列结构优化问题, 如式(18)所示:

$$\sigma_{cur} = \frac{\sigma_{initial} - \sigma_{final}}{F_{max} - F_{min}} \times F_{value} + \frac{\sigma_{final} F_{max} - \sigma_{initial} F_{min}}{F_{max} - F_{min}} \quad (18)$$

在AIWO中, 每个杂草都有独立个体特性, 这取决于其适应性而与  $iter$  没有关系。当杂草  $F_{value}$  接近  $F_{min}$  时, 全局寻优能力将显著降低而只需局部微调空间位置。当  $F_{value}$  接近  $F_{max}$  时, 杂草将具有较强的全局寻优能力以获取最优空间分布。这一改进可使杂草种群在迭代过程中保持优良的全局和局部寻优能力, 但该算法中  $\sigma_{cur}$  与  $F_{value}$  仍为线性相关。为此, 本文提出一种非线性相关方法, 可使相同  $F_{value}$  条件下获得较小标准方差  $\sigma_{cur}$ , 具体改进如图5及式(19)~(22)所示。

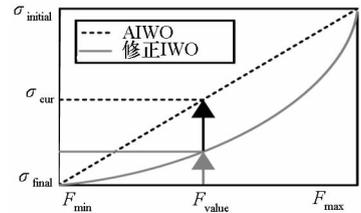


图5 标准方差改进

Fig.5 Improvement of the standard variance

$$\sigma_{cur} = B_1 F_{value}^2 + B_2 F_{value} + B_3 \quad (19)$$

$$B_1 = \frac{\sigma_{initial} - \sigma_{final}}{(F_{max} - F_{min})^2} \quad (20)$$

$$B_2 = \frac{\sigma_{initial} - \sigma_{final}}{F_{max} - F_{min}} - B_1 (F_{max} + F_{min}) \quad (21)$$

$$B_3 = \frac{\sigma_{final} F_{max} - \sigma_{initial} F_{min}}{F_{max} - F_{min}} + B_1 F_{max} F_{min} \quad (22)$$

由图 5 种子空间分布方差可知:对于给定  $F_{value}$ , 式(19)比式(18)可获得更小的标准方差  $\sigma_{cur}$ 。适应度从  $F_{min}$  至  $F_{value}$  过程中,两种方式所得  $\sigma_{cur}$  差值迅速变大至极值 ( $F_{value} = (F_{max} + F_{min})/2$ ), 之后又迅速衰减直至最大值  $F_{max}$ 。通过这种方式,上述改进既保持了式(18)自适应空间分布寻优功能,又以较小方差使更多杂草具有全局寻优能力,相比于线性分布具有更强的适应能力。为此,本文同时结合式(17)和式(19)对种群繁殖、空间分布两个过程进行改进,提出混合杂草算法 (Hybrid Invasive Weed Optimization, HIWO), 并将其应用于超磁致伸缩作动器多场耦合模型多目标参数识别,以期获得较为精确的物理参数。

### 2.4 混合杂草算法识别步骤

由混合杂草算法对超磁致伸缩作动器耦合模型进行识别的基本步骤如下:

**步骤 1:** 初始化种群,确定参数  $\theta$  范围,导入实验数据,设置参数和生成与评价初始解。

**步骤 2:** 对于每个解,由式(14)和式(17)确定不同算法所产生种子数量  $S_{no}$ 。

**步骤 3:** 由式(15)、式(16)及式(19)计算杂草及改进算法新产生解,并对这些解做出评价。

**步骤 4:** 如果现有种群数量小于  $P_{max}$ ,则执行步骤 2,否则执行步骤 5。

**步骤 5:** 根据优胜劣汰的生物竞争法则,选取  $P_{max}$  个适应性强个体,并对其进行排序。

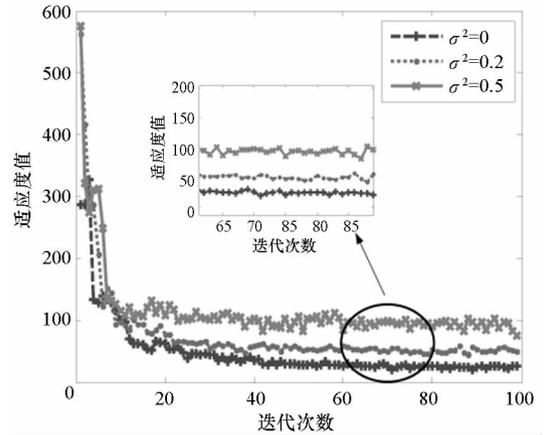
**步骤 6:** 记录迭代次数  $iter$ ,若满足适应度  $J(\theta)$  最小值要求或  $iter$  等于  $iter_{max}$  则停止,退出算法并保存最优识别参数  $\theta$ ,否则执行步骤 2。

### 3 实验研究

实验装置由 GMA、Labview 软件、美国国家仪器 NI 系统、电流互感器、功率放大器、位移传感器等组成。其中 NI 系统用于采集、处理及存储电流、位移等数据,位移传感器用于测量位移。

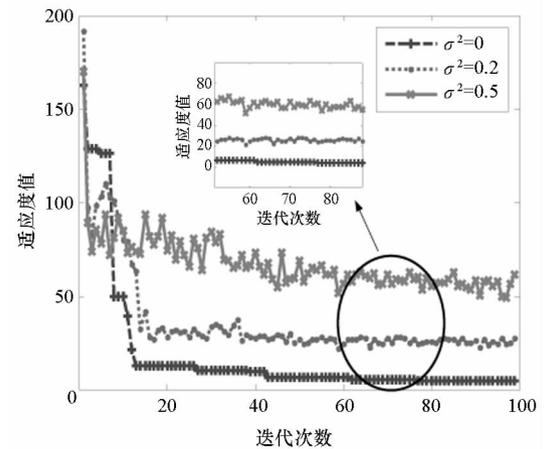
根据已设计作动器,相关参数为: $n = 1200$ 、 $H_b = 12 \text{ kA/m}$ 、 $S^H = 1.3 \times 10^{-11}$ 、 $C = 3000 \text{ kNs/m}$ 、 $\rho = 9250 \text{ kg/m}^3$ 、 $L = 8.6 \times 10^{-4} \text{ m}$ 、 $A = 78.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 、 $m_2 = 0.0306 \text{ kg}$ 、 $k_2 = 5.3 \times 10^4 \text{ N/m}$ 、 $c_2 = 2.0 \times 10^3 \text{ Ns/m}$ 。  $P_{max} = 20$ ,  $P_{init} = 10$ ,  $D = 7$ ,  $iter_{max} = 100$ ,  $n' = 3$ ,  $\sigma_{initial} = [0.0039, 0.036, 450, 30000, 0.0003, 300, 1200]$ ,  $\sigma_{final} = [0.0001, 0.0001, 1, 1, 0.0001, 1, 1]$ ,  $S_{max} = 5$ ,  $S_{min} = 0$ ,  $\max J(\theta) = F_{max} = 800$ ,  $\min J(\theta) = F_{min} = 0.1$ 。根据材料特性,确定  $\tilde{\alpha}$ 、 $c$ 、 $a$ 、 $M_s$ 、 $\lambda_s$ 、 $k$ 、 $\xi$  范围为  $[0.001, 0.015]$ 、 $[0.1 \text{ A/m}$ ,

$0.22 \text{ A/m}]$ 、 $[5000 \text{ A/m}, 8000 \text{ A/m}]$ 、 $[700000 \text{ A/m}$ ,  $850000 \text{ A/m}]$ 、 $[0.001, 0.003]$ 、 $[3000 \text{ A/m}$ ,  $5000 \text{ A/m}]$ 、 $[5000, 9000]$ , 电流  $I = 5 \sin(60\pi t) \text{ A}$ ,  $w(t)$  为零均值、方差  $\sigma^2$  噪声,识别过程中分别加入  $\sigma^2$  为 0、0.2、0.5 测量扰动,两种算法适应度值变化如图 6 所示。



(a) 改进前(IWO)

(a) Unmodified fitness (IWO)



(b) 改进后(HIWO)

(b) Modified fitness (HIWO)

图 6 适应度函数进化过程

Fig. 6 Evolutionary process of fitness function

由图 6 可知:两种算法在无噪声扰动时收敛速度相对较快,随着测量噪声增加,收敛速度逐渐降低,收敛终值也相对增加。IWO 在不同噪声时  $J(\theta)$  约为 25、50、100, HIWO 的约为 5、22、60,说明改进算法能有效提高模型识别精度。HIWO 算法在无扰动时收敛相对较快,而加入噪声后初始阶段收敛慢且波动较大,之后迅速趋于稳定,这说明改进算法抑噪性和鲁棒性更好,且具有较强的全局和局部寻优能力。为进一步验证改进算法识别精度及稳定性,进行 NO1、NO2、NO3 三次重复辨识,结果如表 1 所示。

表1 不同噪声下重复识别结果

Tab.1 Repeated identification results in different noise

辨识参数	$\tilde{\alpha}$	$c/(A/m)$	$a/(A/m)$	$M_s/(A/m)$
辨识范围	(1E-3, 15E-3)	(0.1, 0.22)	(5E+3, 8E+3)	(7E+5, 8.5E+5)
$\sigma^2 = 0$				
NO1	0.012 6	0.170 7	6917	729 306
NO2	0.016 3	0.166 1	6038	729 307
NO3	0.015 0	0.173 0	6445	752 649
$\sigma^2 = 0.2$				
NO1	0.010 4	0.211 7	7430	707 045
NO2	0.010 0	0.205 9	7286	728 888
NO3	0.013 5	0.183 5	7894	736 417
$\sigma^2 = 0.5$				
NO1	0.008 1	0.214 5	7531	767 763
NO2	0.010 9	0.207 4	7544	820 347
NO3	0.010 1	0.216 0	7915	805 876

辨识参数	$\lambda_s$	$k/(A/m)$	$\xi$
辨识范围	(1E-3, 3E-3)	(3E+3, 5E+3)	(5E+3, 9E+3)
$\sigma^2 = 0$			
NO1	0.001 0	3617	6428
NO2	0.001 0	4055	6298
NO3	0.001 5	4120	6110
$\sigma^2 = 0.2$			
NO1	0.001 0	3732	6750
NO2	0.001 3	3532	6621
NO3	0.001 7	3607	6438
$\sigma^2 = 0.5$			
NO1	0.002 0	3491	6920
NO2	0.001 9	4106	7112
NO3	0.002 4	3830	7387

由表1可知,  $\tilde{\alpha}$ 、 $c$ 、 $a$ 、 $M_s$ 、 $\lambda_s$ 、 $k$ 、 $\xi$  在不同测量干扰下多次识别结果吻合度较高,  $\sigma^2 = 0$  时数据重复性最好, 而  $\sigma^2 = 0.2$  和  $\sigma^2 = 0.5$  时识别效果相对较弱。其中,  $\sigma^2 = 0.2$  时 NO1 待辨识参数收敛曲线如图 7 ~ 13 所示, 在测量噪声扰动下 HIWO 仍能准确辨识多场耦合磁滞非线性模型, 大约经过 80 次迭代后趋于稳定。

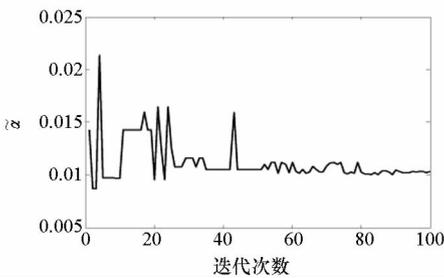


图7  $\tilde{\alpha}$  收敛曲线

Fig.7  $\tilde{\alpha}$  convergence curve

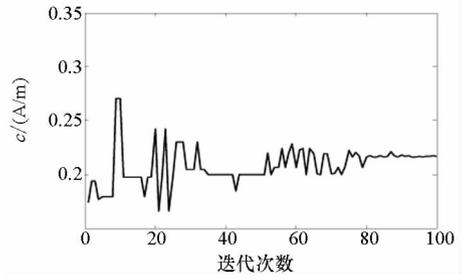


图8  $c$  收敛曲线

Fig.8  $c$  convergence curve

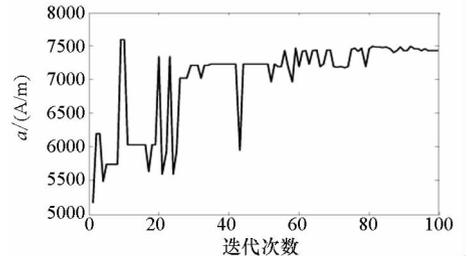


图9  $a$  收敛曲线

Fig.9  $a$  convergence curve

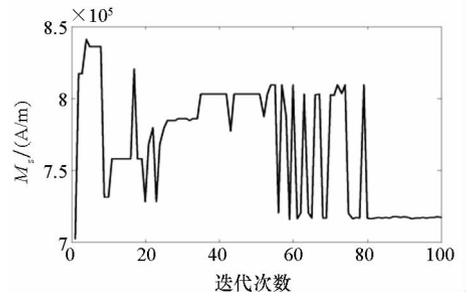


图10  $M_s$  收敛曲线

Fig.10  $M_s$  convergence curve

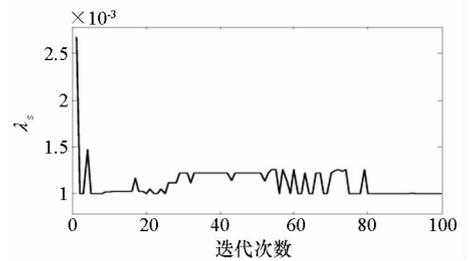


图11  $\lambda_s$  收敛曲线

Fig.11  $\lambda_s$  convergence curve

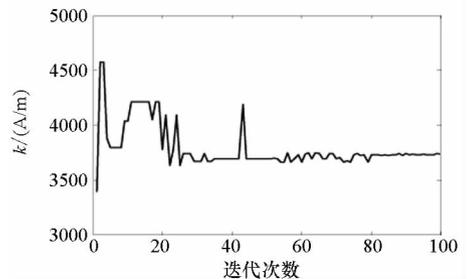


图12  $k$  收敛曲线

Fig.12  $k$  convergence curve

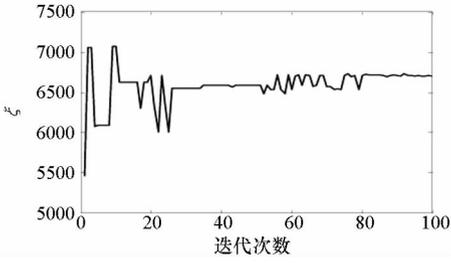


图 13  $\xi$  收敛曲线

Fig. 13  $\xi$  convergence curve

以 NO1 所辨识结果为模型参数,不同噪声下样本值和预测值如图 14 所示。在无测量噪声时,样本数据与预测误差较小,最大仅为  $0.5 \mu\text{m}$ 。随着噪声增加,识别精度有所下降,在  $\sigma^2$  为 0.2、0.5 时最大误差为  $1.5 \mu\text{m}$ 、 $2.4 \mu\text{m}$ 。在一定噪声扰动范围内,HIWO 算法可精确识别非线性耦合模型参数。为进一步验证辨识参数普遍性,在变驱动频率及偏置磁场条件下,以  $\sigma^2 = 0.2$  时识别结果均值为模型参数,开展预测和实验研究。取  $H_b = 12 \text{ kA/m}$ , 电流为  $5 \text{ A}$ , 频率为  $5 \text{ Hz}$ 、 $50 \text{ Hz}$ 、 $150 \text{ Hz}$ ; 取频率  $5 \text{ Hz}$ 、 $H_b$  分别降为  $6 \text{ kA/m}$ 、 $1 \text{ kA/m}$ 、 $0 \text{ kA/m}$  时,结果分别如图 15 ~ 17、图 18 ~ 20 所示。

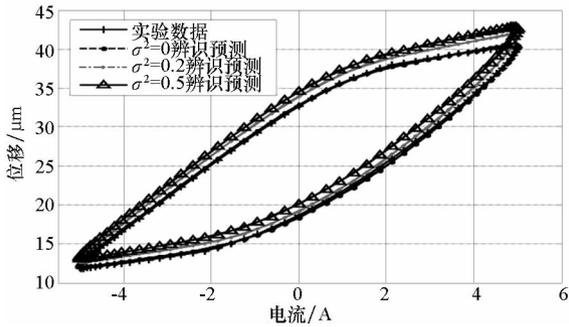


图 14 预测与测量结果比较

Fig. 14 Comparison of prediction and measurement results

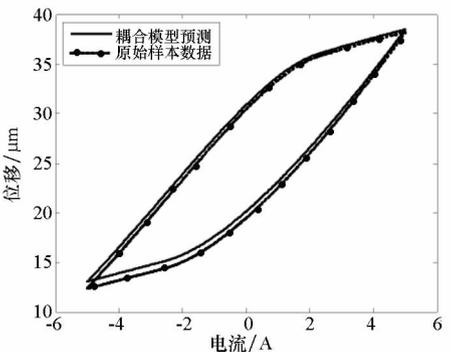


图 15 频率为 5 Hz

Fig. 15 Frequency is 5 Hz

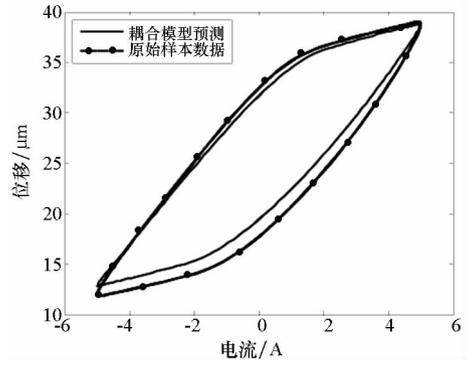


图 16 频率为 50 Hz

Fig. 16 Frequency is 50 Hz

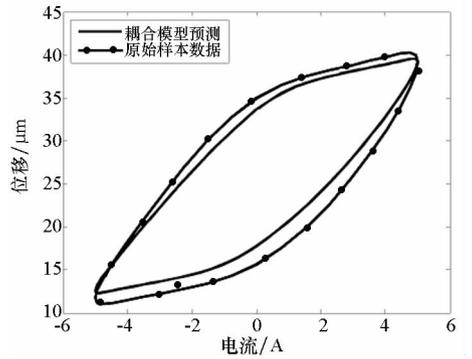


图 17 频率为 150 Hz

Fig. 17 Frequency is 150 Hz

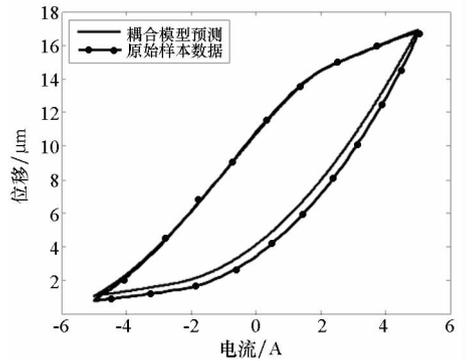


图 18  $H_b = 6 \text{ kA/m}$

Fig. 18  $H_b$  is 6 kA/m

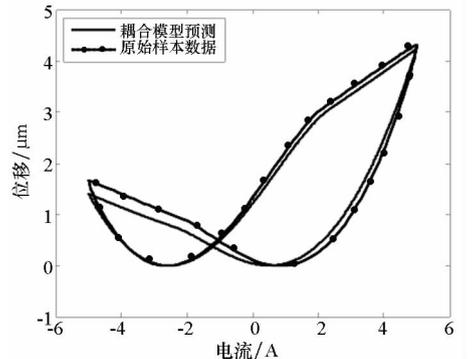
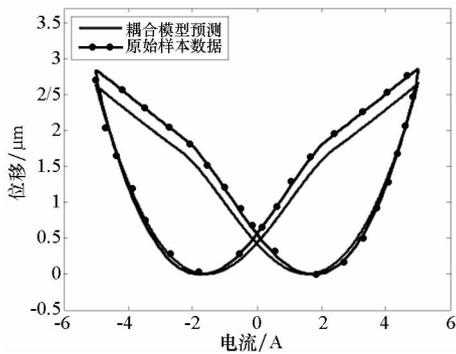


图 19  $H_b = 1 \text{ kA/m}$

Fig. 19  $H_b$  is 1 kA/m

图 20  $H_b = 0$  kA/mFig. 20  $H_b$  is 0 kA/m

由图 15 ~ 17 可知:在电流频率改变时,样本数据和预测值误差较小,非线性耦合模型能以较高精度预测 GMA 输出位移。在图 18 ~ 20 中,当偏置磁场减小时,作动器位移幅值明显减小,并缓慢呈现较强的“倍频”特征。当偏置磁场完全为零时,预测值和样本值均呈现非线性“蝴蝶状”,但辨识参数仍可以较小误差预报 GMA 位移。这说明偏置磁场、驱动磁场分别对作动器静态和动态特性有较大影响。在短期忽略温变因素时,本文所识别耦合模型能在宽频段内较为准确地描述超磁致伸缩作动器动静特性。

## 4 结论

针对含有磁滞损耗、动态应力等因素的多场耦合磁滞非线性模型多物理参数难以有效识别的问题,引入智能杂草算法并对其种群繁殖、空间分布过程进行非线性改进,提出一种混合杂草算法并将其应用于超磁致伸缩作动器参数辨识研究。结果表明:所提非线性改进方法可使 IWO 算法具有更好的寻优能力、收敛速度、识别精度、稳定性;测量噪声对 IWO 及 HIWO 算法识别精度有影响,但在一定范围内两者均具有较好抗噪能力,而后者可使实验与预测值一致性较高,说明改进算法参数识别效果更好;在忽略温变因素时,本文所识别参数可使磁滞耦合非线性模型准确地揭示作动器电-磁-机内在转化机理,能在较宽频段内反映作动器静态和动态特性。此外,智能杂草及其改进算法具有优良的非线性多目标识别能力,在结构优化、模型识别、参数辨识等方面具有重要的工程应用价值。

## 参考文献 (References)

[1] Valadkhan S, Morris K, Khajepour A. Review and comparison of hysteresis models for magnetostrictive materials[J]. *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 2009, 20(2):

131 - 142.

[2] Hiller M W, Bryant M D, Umegak I J. Attenuation and transformation of vibration through active control of magnetostrictive terfenol[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1989, 134(3): 507 - 519.

[3] 崔旭, 何忠波, 李冬伟, 等. 超磁致伸缩致动器建模研究综述[J]. *兵器材料科学与工程*, 2011, 34(4): 90 - 94. CUI Xu, HE Zhongbo, LI Dongwei, et al. Research review of modeling for giant magnetostrictive actuator [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2011, 34(4): 90 - 94. (in Chinese)

[4] Tan X B, Baras J S. Modeling and control of hysteresis in magnetostrictive actuators [J]. *Automatica*, 2004, 40(9): 1469 - 1480.

[5] Smith R C, Dapino M J, Seelecke S. Free energy model for hysteresis in magnetostrictive transducers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(1): 458 - 466.

[6] Jiles D C, Tholke J B, Devine M K. Numerical determination of hysteresis parameters for the modeling of magnetic properties using the theory of ferromagnetic hysteresis [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1992, 28(1): 27 - 35.

[7] 贾振元, 王晓煜, 王福吉. 超磁致伸缩执行器的动力学参数及磁滞模型参数的辨识方法[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(10): 9 - 13. JIA Zhenyuan, WANG Xiaoyu, WANG Fuji. Identification method of giant magnetostrictive transducer's dynamic parameters and magnetic parameters[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(10): 9 - 13. (in Chinese)

[8] Calkins F T, Smith R C, Flatau A B. Energy based hysteresis model for magnetostrictive transducers [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, 36(2): 429 - 439.

[9] Almeida I A, Deepcu S, Limaam N, et al. Modeling a magnetostrictive transducer using genetic algorithm [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2001, 226/227/228/229/230: 1262 - 1264.

[10] 徐彭有, 杨斌堂, 孟光, 等. 天文望远镜镜子超磁致伸缩驱动器驱动模型及参数识别[J]. *天文研究与技术*, 2010, 7(2): 150 - 157. XU Pengyou, YANG Bintang, MENG Guang, et al. Modeling and parameter identification for giant magnetostrictive actuators applied in driving segmented mirrors [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(2): 150 - 157. (in Chinese)

[11] Zheng J J, Cao S Y, Wang H L, et al. Hybrid genetic algorithms for parameter identification of a hysteresis model of magnetostrictive actuators [J]. *Neurocomputing*, 2007, 70(4/5/6): 749 - 761.

[12] Mehrabian A R, Lucas C A. Novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. *Ecological Informatics*, 2006, 1(4): 355 - 366.

[13] Foudazi A, Mallahzadeh A R. Pattern synthesis for multi-feed reflector antennas using invasive weed optimization [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2012, 6(14): 1583 - 1589.

[14] Dastranj A, Abiri H, Mallahzadeh A. Design of a broadband cosecant squared pattern reflector antenna using IWO algorithm [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(7): 3895 - 3900.

[15] Gebrehiwet G L, Gebremichael T T, Mohammed I M. A novel

- elliptical-cylindrical antenna array for radar applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(5): 1681 – 1688.
- [16] Mehrabian A R, Yousefi-Koma A A. Novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on a smart structures [J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(1): 12 – 23.
- [17] Mehrabian A R, Yousefi-Koma A 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.
- [18] Sedighy S H, Mallahzadeh A R, Soleimani M, et al. Optimization of printed yagi antenna using invasive weed optimization [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2010, 9: 1275 – 1278.
- [19] Karimkashi S, Kishk A A. Invasive weed optimization and its features in electromagnetics [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(4): 1269 – 1278.
- [20] Zhao X M, Yang L, Hui F, et al. Three-dimensional vehicle attitude estimation using modified invasive weed optimized particle filter [J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(7): 1143 – 1154.
- [21] 舒亮, 陈定方, 卢全国, 等. 超磁致伸缩致动器中的时滞建模与 Smith 控制策略 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(10): 3017 – 3021.
- SHU Liang, CHEN Dingfang, LU Quanguo, et al. Modeling of time-delay in giant magnetostrictive actuator and smith strategy [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(10): 3017 – 3021. (in Chinese)
- [22] 王博文, 曹淑瑛, 黄美文. 磁致伸缩材料与器件 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- WANG Bowen, CAO Shuying, HUANG Meiwen. Magnetostrictive materials and devices [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [23] Jiles D C. Theory of the magnetomechanical effect [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8): 1537 – 1546.
- [24] 翁玲, 王博文, 孙英, 等. 磁场和应力作用下的超磁致伸缩换能器的动态模型 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(12): 17 – 22.
- WENG Ling, WANG Bowen, SUN Ying, et al. Dynamic model of giant magnetostrictive transducer under magnetic field and stress [J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2008, 23(12): 17 – 22. (in Chinese)
- [25] Yahyatabar A, Najafi A A. A quadratic reproduction based invasive weed optimization algorithm to minimize periodic preventive maintenance cost for series-parallel systems [J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 110: 436 – 461.
- [26] Zaharis Z D, Skeberis C, Xenos T D. Improved antenna array adaptive beamforming with low side lobe level using a novel adaptive invasive weed optimization method [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012, 124: 137 – 150.