文章编号:1001-5078(2022)03-0368-07

·激光应用技术 ·

基于动态宇宙算法的磁光成像增强研究

刘艳涛 (永城职业学院,河南永城 476600)

摘 要:为了提高磁光成像增强的效果,提出动态宇宙算法。首先建立宇宙空间模型,宇宙连 接距离随着层的变化而动态改变;接着宇宙间信息交流、位置更新涉及到不同层、相同层;然后 基于灰度因子对磁光成像对比度提高,通过灰度积分投影定位获得磁畴位置,总变差模型对磁 畴纹理去除;最后给出了算法流程。实验仿真显示交变电压越大产生的磁感应强度越强,漏磁 的磁光成像效果就越好;激励线圈旋转与焊接处垂直时,漏磁的磁感应强度达到极值;本文算 法能够减少增强过程中磁畴的影响,增强图像较清晰,评价指标较优。

关键词:动态宇宙;层;磁畴;磁光成像

中图分类号: TP391 文献标识码: A DOI: 10.3969/j. issn. 1001-5078.2022.03.010

Magneto optic image enhancement based on dynamic universe algorithm

LIU Yan-tao

(Yongcheng Vocational College, Yongcheng 476600, China)

Abstract: In order to improve the enhancement effect of magneto optic image, a dynamic universe algorithm is proposed. Firstly, the space model is established, universe connection distance was changed dynamically with the change of layer. Secondly, the information exchange and location are updated between the universe involve different layers and the same layer. Thirdly, the contrast of magneto optic image is improved based on gray factor, the magnetic domain position is obtained by gray integral projection, and the magnetic domain texture is removed based on total variation model. Finally, the algorithm process is given. The experimental simulation shows that the more alternating voltage is great, the more magnetic induction intensity is strong, and the magneto optic image effect of magnetic flux leakage is good. The excitation coil rotate is perpendicular to the welding joint, the magnetic induction intensity of magnetic flux leak-age have extreme value. Dynamic universe algorithm can reduce the influence of magnetic domain of pixels in the enhancement process, the enhanced image is clearer and the evaluation index is better than other algorithms. **Keywords**; dynamic universe; layer; magnetic domain; magneto optic image

1 引 言

磁光成像是一种无损探测技术,能够检测出材 料内部存在的缺陷^[1],但是磁光成像受噪声的影 响,如材料内部磁畴现象产生的斑点,或者光成像过 程受到外界干扰,导致成像识别性较差,因此对磁光

成像增强有利于对缺陷的识别。

目前磁光成像增强方法主要有:多向磁场激励 下磁光成像检测^[2],能明显检测出多角度的焊接缺陷,且能有效避免曲线裂纹在焊接缺陷检测中的漏 检现象。对比度增强算法(Contrast Enhancement,

作者简介:刘艳涛(1984 -),男,讲师,研究方向为电气自动控制化。E-mail:yzlyt08@qq.com 收稿日期:2021-09-15;修订日期:2021-10-12

基金项目:共青团河南省省委专项调研课题(No. QSNYJ2017277)资助。

CE),通过小波变换和拉普拉斯金字塔模型对图像 分解获得磁光图像的细节信息^[3]。多尺度增强 (Multiscale Enhancement,ME)算法通过图像多尺度 分解,结合高斯平滑滤波与减影算法提取图像细节 信息^[4]。自动噪声阈值 Gabor 滤波(Gabor Filtering with Automatic Noise Thresholding,GFANT)能够对磁 光图像噪声进行消除^[5],在小细节和缺陷区域的保 留方面都有很大的改进。局部图像增强方法(Local Image Enhancement,LIE),在磁光图像增强时考虑 了对比度^[6],增强后的图像质量明显提高。尺度变 量随机共振方法(Scale Variable Stochastic Resonance,SVSR),通过遗传优化算法优化尺度变量,随 机共振使弱像素信号增强^[7],提高了磁光图像的可 见度。

以上研究没有考虑到铁磁材料产生的磁畴现 象,或者按图像纹理规则性进行处理,但是磁光成像 时磁畴扩张的无向性导致形成的图像纹理具有随机 性,因此磁光成像增强需要消除磁畴形成图像纹理 的影响,本文提出动态宇宙算法(Dynamic Universe Algorithm,DUA)对磁光成像增强,宇宙的连接距离 随着层的变化而动态改变,提高宇宙进化效率,相同 层、不同层宇宙信息度、位置的变化采用不同方法; 基于灰度因子对磁光成像对比度调整,动态宇宙寻 优获得总变差模型最佳参数值,实验仿真比较分析 了本文算法的有效性。

2 磁光成像增强

2.1 磁光成像效应

铁磁性材料在通有交流电的线圈中产生磁力 线,并且在缺陷附近出现的漏磁引起磁场的垂直分 量变化。磁光成像条件是需要激光光源经过偏振器 生成线性偏振光。当线性偏振光通过铁磁性材料 时,基于法拉第磁光效应,受到漏磁场的作用,偏振 角度发生旋转^[8],其角度θ与磁感应强度B、光穿越 介质的有效长度L关系为:

$$\theta = VBL \tag{1}$$

式中,V为费尔德常数。

偏振光被磁光传感器采集,基于马吕斯定律,漏 磁场与光强 I₀ 建立变化关系:

 $I_0 = E^2 \cos^2(\phi) \tag{2}$

式中, E 为入射线偏振光振幅; φ 为检偏器与磁光

传感器方向夹角。

偏振光在缺陷处 N 极和 S 极产生旋转方向相反、角度相同的光强 I_N、I_S,分别为:

$$\begin{cases} I_{\rm N} = E^2 \cos^2(\theta - \phi) \\ I_{\rm S} = E^2 \cos^2(\theta + \phi) \end{cases}$$
(3)

由于 $I_{s} < I_{0} < I_{N}$,因此在缺陷处 N 极产生的成像较亮,N 极产生的成像较暗,同时 N 极、S 极的磁场 线互不交叉,因此磁光成像的亮度由明到暗变化。

磁光成像主要受斑状噪声影响,其中斑状噪声一 部分来自入射光源和磁光薄膜所含杂质影响,可通过 精密仪器避免干扰;一部分来自铁磁材料自身特有的 磁畴现象,外磁场使得磁畴沿着磁场的方向发生旋转 移动,并且外加磁场越大磁畴越易旋转移动,干扰越 大,磁畴现象在磁光成像上表现为运动多变性且具有 不定向性,显示为多个无规则的纹理区域。

2.2 磁畴现象消除

2.2.1 基于灰度因子的磁光成像对比度调整

为了便于区分磁光成像时产生的磁畴,通过灰 度因子提高磁光成像的明暗对比度和边缘细节:

$$H' = \frac{255}{1 + \eta^{-\left(\frac{20H}{255} - 10\right)}} \tag{4}$$

式中, *H* 为输入图像灰度; *H*′ 为输出图像灰度; η 为 调节因子。

灰度因子能将图像中的像素点分布于直方图的 两极,提高了磁光成像明暗度以及清晰度,便于分 割。为了均衡分布范围以及图像明暗对比度,本文 选择 η =2。

2.2.2 磁畴区域信息

磁光成像明暗对比度提高便于分析磁畴区域, 通过灰度积分投影定位算法获得磁畴区域,磁畴区域 域(x,y)与方向位置信息的约束条件为:

$$\begin{cases} x_{i} : \sum_{j=1}^{N} g(i,j) & \cup y_{i} = 0 \\ x_{k} : \sum_{j=1}^{N} g(k,j) & \cup y_{k} = 0 \\ y_{j} : \sum_{j=1}^{N} g(i,j) & \cup x_{j} = 0 \\ y_{k} : \sum_{j=1}^{N} g(k,j) & \cup x_{k} = 0 \end{cases}$$
(5)

式中, x_i , x_k 为最大灰度累积值所在的行; $\sum_{j=1}^{N} g(k, j)$ 为垂直方向最大灰度累积值; y_j , y_k 为最大灰度 累积值所在的列; $\sum_{j=1}^{N} g(i,j)$ 为水平方向最大灰度 累积值。

2.2.3 基于总变差模型的磁畴纹理去除

対
总 变 差 方 法 优 化 为最 小 化^[9-10], 其模型为:
argmin
$$\sum_{p} (S_p - I_p)^2 + \phi_1 \left(\frac{S_x(p)}{L_x(p) + \varepsilon} + \frac{D_y(p)}{L_y(p) + \varepsilon} \right)$$

 $S_x(p) = \sum_{q \in R(p)} G_{p,q} | (\partial_x S)_q |$
 $D_y(p) = \sum_{q \in R(p)} G_{p,q} | (\partial_y S)_q |$
 $L_x(p) = |\sum_{q \in R(p)} G_{p,q} (\partial_x S)_q |$
 $L_y(p) = |\sum_{q \in R(p)} G_{p,q} (\partial_y S)_q |$
 $G_{p,q} = e\left(-\frac{(x_p - x_q \hat{x} + \zeta \cdot y_p - y_q \hat{x})}{2\phi_2^2} \right)$
(6)

式中, $(S_p - I_p)^2$ 为保真项; S 为输出磁光图像; I 为 输入磁光图像; p 为像素点的索引号; D(p) 为窗口 总变差; L(p) 为窗口固有变差; ε 为防止为零的微 小量; $\phi_1 > 0$ 控制磁畴边缘的平滑程; $G_{p,q}$ 为高斯核 函数; R(p) 是以 p 为中心的矩形区域; ∂_x , ∂_y 为2 个 方向的偏微分; ϕ_2 为高斯核函数窗口因子。

3 宇宙算法模型

3.1 宇宙空间结构

在宇宙空间结构中^[11],提出层与连接距离的 概念,宇宙中心称为宇宙核心,离宇宙核心连接距 离相同的宇宙具有相同的宇宙层。离宇宙核心不 同连接距离的宇宙层,其宇宙层也可能具有相同 的宇宙数量。宇宙空间结构层数越多,越有利于 宇宙进化;宇宙空间的宇宙数量越多,也越有利于 宇宙进化。相同层上宇宙信息进化互享优势大于 非相同层上宇宙信息进化互享,每个层的宇宙对 离该层的连接距离的宇宙的影响力一样。层与连 接距离均是虚拟性存在,随着不同的宇宙层而改 变,即不同的层上的宇宙也会形成一个宇宙小核 心,并且与周围的宇宙再次形成不同的层,但是各 个层上所形成的宇宙小核心其影响力远远小于宇 宙中心的核心影响。

3.2 宇宙间信息交流

宇宙群中的宇宙构成的每个层在整个宇宙进化

中的优势由宇宙自身所含的信息量所决定,每个层 中的宇宙可与自身层中的宇宙进行信息交流,也可 以与不同层中的信息交流,通过信息交流^[12],宇宙 个体的进化能力得到提升。

相同层宇宙进行信息交流,交流宇宙被选择概 率 $p(x_{\lambda,t,R})$ 通过轮赌法实现:

$$p(x_{\lambda,t,R}) = \frac{f(x_{\lambda,t,R})}{\sum_{t=1}^{N} f(x_{\lambda,t,R})}$$
(7)

式中, $x_{\lambda,\iota,R}$ 表示连接距离R、第 λ 层上的第t 个宇宙; N 为该层宇宙群的规模; $f(x_{\lambda,\iota,R})$ 为 $x_{\lambda,\iota,R}$ 的适应度。

为了保持相同层宇宙的多样性, *p*(*x*_{λ,*ι*,*R*})在 (0.3,0.8)值域范围内的宇宙才进行信息交流,在 (0.3,0.8)值域范围之外的宇宙,只能被动接收其 他宇宙的信息。相同层第*i*个宇宙*l*时刻的信息交 流度 *q* 为:

$$\begin{cases} q_i = I_i^l \times \frac{\text{rand}}{\sum_{j=1}^n h_{ij}} \\ I_i^l = I_i^0 \times e^{\gamma \times r_i} \end{cases}$$
(8)

式中, h_{ij} 为相同层宇宙 i 到第j 个宇宙的间距;随机 因子 rand \in [0,1] 服从均匀分布, I_i^0 为宇宙交流信 息初始时的信息度,单位为 TB; $\gamma \in$ [-1,1] 为宇 宙i的信息吸收系数, $\gamma = -1$,宇宙i 只能接收信 息, $\gamma = 1$,宇宙i 只能发送信息; $r_i \in$ [0,1] 为宇宙 i的膨胀系数。

不同层之间的宇宙进行信息交流时,需要通过 比较不同层的信息度之和,设 λ 、 λ' 层的信息度之 和 fit λ 和 fit λ' , Δ fit = fit_{λ} - fit_{$\lambda}', 若 \Delta$ fit > 0,则信 息由 λ 层向 λ' 层进行信息流入; Δ fit < 0,则信息 由 λ' 层向 λ 层进行进行信息流入;不同层之间的宇 宙的信息交流率v:</sub>

$$v = \frac{\Delta \text{fit}}{\max(\text{fit}_{\lambda}, \text{fit}_{\lambda}')}$$
(9)

信息流入层的第*j*个宇宙*l*′时刻的信息交流度 *q_j*为:

$$q_{j} = (1 + v) \times I_{j}^{l'-1}$$
(10)

式中, $I_j^{l'-1}$ 为(l' - 1)时刻宇宙 j 的信息度。

通过不同层、相同层之间的宇宙信息交流,加快 了宇宙的进化,使得不同层、相同层都能够获得最优 宇宙的信息。

3.3 宇宙运动过程

在宇宙算法中,不同层的宇宙固定在各自的层 上^[13],宇宙发送信息、接收信息本质上属于自身的 静态运动,无法移动到其他层进行更新;同时随着宇 宙进化的增加,搜索性能逐渐减小,宇宙解的多样性 会降低,导致算法后期会陷入相同层局域解,为增加 算法跳出局域解,本文对宇宙空间进行移动,使得宇 宙空间位置运动更新,可以跳跃到不同的层,从而引 起信息更新,宇宙动态过程涉及到不同层、相同层的 宇宙位置更新。宇宙能够动态移动到其他层或者自 身层其他位置,其移动条件为:

$$\frac{q_j}{\sum\limits_{i=1}^{Q} q_i} > 0.75 \tag{11}$$

式中, Q 为宇宙所在层的宇宙总数。

将该层内可移动宇宙标记为自由宇宙,即可向 其他层或者自身层其他位置自由移动。这样经过自 由宇宙多次移动后,将获得一个新的宇宙空间,且所 有的宇宙都在不同的层中进行搜索,并最终收敛。

3.3.1 不同层宇宙位置更新

由于不同层宇宙离宇宙核心的连接距离不同, 受宇宙核心的吸引力也不同,连接距离越远吸引力 越小,这样宇宙也越容易移动,不同层宇宙上的宇宙 可以移动到其他层或者自身层上的其他位置。不同 层的宇宙位置更新如下:

 $x_{new} = r_{0,n} \times \sqrt{v_{0,r,n}} \times rand_1$ (12)

 式中, $r_{0,n}$ 为第 n 个宇宙到宇宙核心的距离; $v_{0,r,n}$ 为

 第 n 个宇宙离宇宙核心距离 r 时的宇宙运行速度,

 随机数 $rand_1 \in [0,1]$ 服从均匀分布。

3.3.2 相同层宇宙位置更新

由于相同层宇宙离宇宙核心的连接距离相同, 受宇宙核心的吸引力相同,因此决定宇宙能否移动 的条件是宇宙自身的信息度,信息度越大,则宇宙也 越容易移动,相同层宇宙上的宇宙只能移动到自身 层的其他位置。相同层的宇宙位置更新如下:

$$x_{new} = \gamma_{l,n} \times \sqrt{v_{l,n} \times rand_2}$$
 (13)
式中, $\gamma_{l,n}$ 为第 l 层的第 n 个宇宙的信息度, $v_{l,n}$ 为第
 l 层的第 n 个宇宙运行速度,随机数 $rand_2 \in$ [0,1]服从均匀分布。

3.4 宇宙适应度函数选择

 ϕ_1 , ϕ_2 是影响磁光图像分离出理想图像的关

键参数。 ϕ_1 过小则总变差项完全没有起到惩罚作 用,过大则无法消除磁畴纹理; ϕ_2 决定了选择磁畴 纹理的大小。为了平衡磁光图像逼真度和降噪,估 算磁光图像中噪声的标准差 $\hat{\sigma}$,宇宙个体在 $\left[\frac{\hat{\sigma}}{10},10\hat{\sigma}\right]$ 范围内搜索 $\phi_1 \ \phi_2$ 值。宇宙个体的适应 度选择为总变差最小化函数,宇宙个体寻优当获得 $\phi_1 \ \phi_2$ 最佳组合时,此时磁光图像增强最好。如果 相邻两次总变差最小化差值小于 0.015,则认为算 法收敛,此时获得的组合值为求得的最优值。

算法流程:

①输入图像,宇宙群初始化,确定宇宙半径、宇 宙群层数以及层中的宇宙群;

②宇宙间信息交流;

③宇宙动态更新,确定宇宙优化结果;

④若算法达到终止寻优次数或者满足收敛条 件,进行步骤⑤,否则进行步骤②;

⑤输出磁光图像增强结果。

4 实验仿真

磁光成像时光源为氦氖激光器,波长为 632.8 nm, 功率为 3 m W,激励线圈为 U 型,激励源的电压为 12 V、16 V、20 V,电流大小为 0.5 A,频率为 50 Hz,霍 尔探头探测磁强,特斯拉计高精度可达 0.01 mT。计 算机配置 CPU 为 AMD 锐龙 5,主频 4.0G Hz,内存 DDR4 主频 3200/16 GB,为验证动态宇宙算法对磁光 成像增强的视觉效果,涉及对比算法有 CE、ME、 GFANT、LIE、SVSR、DUA。

4.1 激励电压及磁场方向对增强效果的影响

激励线圈分别接通 12 V、16 V、20 V 的交变电 压,霍尔探头垂直于焊接处,获得焊接处磁感应强度 变化曲线如图 1 所示。



Fig. 1 Variation curve of magnetic induction intensity at welding joint

从图 1 可以看出,各种交变电压产生的漏磁最 大值在距离焊接处两侧 0.85 mm 处,不同的交变电 压产生不同的磁感应强度,交变电压越大产生的磁 感应强度越强,焊接处测得的漏磁也就越大,因此漏 磁的磁光成像效果就越好。

使用 20 V 的交变电压,旋转激励线圈,旋转角 度范围为 0°~180°,固定霍尔探头垂直于距离焊接 处 0.85 mm,此时焊接处漏磁如图 2 所示。



从图2可以看出,旋转激励线圈时,霍尔探头获 9磁感应强度曲线逐渐变大,当激励线圈旋转与

得的磁感应强度曲线逐渐变大,当激励线圈旋转与 焊接处垂直时,漏磁的磁感应强度达到极值,此时获 得漏磁的磁光成像效果越好。

4.2 不同算法增强效果分析

在获得磁光成像时,使用 20 V 的交变电压,交 变励磁的磁场方向与铁磁材料垂直,以便获得最佳 漏磁场,此时磁光图像的对比度相对较高。不同算 法对含磁畴的磁光图像增强效果如图 3 所示。



从图 3 的对比实验结果可以看出,DUA 算法 对磁光成像增强视觉效果清晰,DUA 算法对不同 层、相同层宇宙间信息交流采用了不同的方法,从 而使得不同层、相同层都能够获得最优宇宙的信 息;不同层、相同层宇宙位置更新考虑到了全局、 局部的宇宙信息,以此来减少像素点在增强过程 中磁畴的影响。其他算法对磁畴区域无法消除, 影响图像的视觉效果。

4.3 均方误差及结构相似度指标评价

各种算法增强图像质量评价通过均方误差及结构相似度实现。均方误差(Mean Square Error, MSE):

$$MSE(I,J) = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} ||I(i,j) - J(i,j)||^{2} (14)$$

式中, *I* 为原始图像; *J* 为增强后图像; *n*, *m* 为图像尺寸。 结构相似度(Structural similarity, SS):

$$SS(I,J) = \frac{(2\mu_I\mu_J + C_1)(2\sigma_{IJ} + C_2)}{(\mu_I^2 + \mu_J^2 + C_1)(\sigma_I^2 + \sigma_J^2 + C_2)}$$
(15)

式中, μ_{I} , μ_{J} , σ_{I} , σ_{J} 为原始图像、增强后图像所对 应的均值与方差大小; C_{1} 和 C_{2} 为常数值; σ_{IJ} 表示 原始图像、增强后图像之间的协方差。SS \in [0,1], 值越大,增强前后的结构相似度越高,算法的结构保 持性能越好。

从图 4 可以看出,本文算法对含磁畴的磁光图 像增强后的 MSE 平均值最小,SSIM 平均值最大,含 磁畴的磁光图像 1 增强后本文算法的 MSE 平均值 为 5.236,SS 平均值为 0.644;含磁畴的磁光图像 2 增强后本文算法的 MSE 平均值为 4.154,SS 平均值 为 0.749;因此本文算法评价指标较好。





图 4 均方误差及结构相似度指标评价

Fig. 4 Evaluation of mean square error and structural similarity index

5 结 论

(1)不同的交变电压产生不同的磁感应强度, 交变电压越大产生的磁感应强度越强,获得的漏磁 也就越大,因此磁光成像效果就越好

(2)交变磁场方向越与缺陷方向垂直,此时缺 陷处产生的漏磁场越佳,获得的磁光成像越清晰,对 比度相对较高。

(3)动态宇宙算法建立不同层、相同层宇宙间 信息交流方式,不同层、相同层宇宙位置更新考虑到 了全局、局部的宇宙信息,能够减少像素点在增强过 程中磁畴的影响,增强图像较清晰。

参考文献:

- [1] Ji Yukun, Gao Xiangdong, Zhang Nanfeng, et al. Status and prospect of magneto-optical image sensing non-destructive testing technology [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020, 37(8):941-945. (in Chinese)
 季玉坤,高向东,张南峰,等. 磁光成像传感无损检测 技术现状与展望[J]. 机电工程, 2020, 37(8): 941-945.
- [2] Wang Congyi, Gao Xiangdong, Ma Nvjie, et al. Magnetooptical imaging detection of laser welding defects under multi-directional magnetic field excitation [J]. Laser Technology, 2020, 44(5):592 - 599. (in Chinese) 王聪毅,高向东,马女杰,等.激光焊接缺陷多向磁场 激励下磁光成像检测[J].激光技术, 2020, 44(5): 592 - 599.
- [3] Dippel S, Stahl M, Wiemker R, et al. Multiscale contrast enhancement for radiographies: laplacian pyramid versus fast wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, 21(4):343-353.
- [4] Zhang Xiaofeng, Zhou Weilu, Yang Huimin. A multi-scale contrast enhancement method for dr image of nuclear power weld[J]. Journal of Nanchang Hangkong University: Natural Sciences, 2020, 34(4):73 76. (in Chinese) 张晓峰,周炜璐,杨会敏. 核电焊缝 DR 图像多尺度对比度增强方法[J]. 南昌航空大学学报:自然科学版, 2020, 34(4):73 76.
- [5] Yahaghi E, Movafeghi A. Contrast enhancement of industrial radiography images by gabor filtering with automatic noise thresholding[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2019, 55(1):73-79.
- [6] Zhang L, Zhang Y J, Dai B C, et al. Welding defect detection based on local image enhancement [J]. Iet Image Processing, 2019, 13(13):2647 - 2658.
- [7] Mu W L, Liu G J, Wang X B, et al. Research on stochastic resonance enhancement of X-ray images based on a genetic algorithm [J]. Non-destructive testing and condition monitoring, 2016, 58 (5):246 - 250.
- [8] Li Yanfeng, Gao Xiangdong, JI Yu kun, et al. Detection

and classification of welding defects by magneto-optical imaging under alternating/rotating magnetic field[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28 (5): 1046 – 1054. (in Chinese)

李彦峰,高向东,季玉坤,等.交变/旋转磁场下焊接缺 陷磁光成像检测与分类[J].光学 精密工程,2020,28 (5):1046-1054.

- [9] Li X, Yan Q, Xia Y, et al. Structure extraction from texture via relative total variation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6):439-445.
- [10] Aujol J F, Gilboa G, Chan T F, et al. Structure-texture image decomposition-modeling, algorithms, and paramaeter selection[J]. International Journal of Computer Vision, 2006,67(1):111-136.
- [11] Jing Keke. Tomato surface defect segmentation based on multi-chain spheroidal structure universe algorithm [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology,2020,18(5):125-130. (in Chinese)

荆科科.基于多链球型结构宇宙算法的番茄表面缺陷 分割[J].太赫兹科学与电子信息学报,2020,18(5): 125-130.

[12] Hu Hui, Zhang Fengli. Coverage of farmland wireless sensor network based on universe algorithm [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3):138 – 143. (in Chinese)
胡辉,张凤莉. 基于宇宙算法的农田无线传感器网络 覆盖研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3):

138 - 143.

[13] Yu Jun, Shang Yalei. Intelligent monitoring anomaly detection of Internet of things based on universe algorithm
[J]. Journal of Hebei North University: Natural Science Edition, 2018, 143(3):27-31. (in Chinese)
于军,尚亚蕾. 基于宇宙算法的物联网智能监控异常 检测研究[J]. 河北北方学院学报:自然科学版, 2018, 143(3):27-31.