

一种基于禁忌搜索的电容层析成像图像重建算法

于金平, 陈德运, 王莉莉

(哈尔滨理工大学 测控技术与仪器黑龙江省高校重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对电容层析成像 ECT (electrical capacitance tomography) 系统中存在的“软场”效应和病态性问题, 在分析电容层析成像原理和成像算法的基础上, 提出一种基于禁忌搜索的电容层析成像图像重建算法. 该方法将禁忌算法引用到 ECT 图像重建中, 通过构造目标函数, 设定邻域和禁忌表约束图像重建, 以藐视准则和特设准则为条件将图像重建问题转换为寻找全局最优解问题, 利用终止准则跳出禁忌搜索. 通过 MATLAB 软件仿真, 实验结果表明, 得到的重建图像更接近原型, 误差要比 LBP 算法小, 图像质量更保真, 为 ECT 图像重建提供一个新的方向.

关键词: 电容层析成像; 图像重建; 禁忌搜索; 藐视规则

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.01.011

中图分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2016)01-0051-06

A Novel Image Reconstruction Algorithm Based on Improved Taboo Search for Electrical Capacitance Tomography

YU Jin-ping, CHEN De-yun, WANG Li-li

(Higher Educational Key Laboratory for Measuring and Control Technology and Instrumentations of Heilongjiang Province, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: For the ‘soft field’ effect and ill-posed problems in ECT system, we presented a capacitance tomography image reconstruction algorithm based on tabu search on the basis of analyzing the principle of capacitance tomography and imaging algorithm. The method was applying tabu search algorithm to image reconstruction by constructing the objective function and setting neighborhood and tabu table to restrain image reconstruction. Then by using aspiration criterion and ad hoc criteria, converted the image reconstruction problem into a problem of finding the global optimal solution, and jumped out of the tabu search according to the termination criterion. Through MATLAB simulation experiments, verified the reconstructed images obtained by this algorithm was more similar to the prototype and had smaller error than LBP algorithm. Therefore, this algorithm could obtain images with higher fidelity, which provided a new direction for ECT image reconstruction.

Keywords: electrical capacitance tomography; image reconstruction algorithm; taboo search; flout the rules

收稿日期: 2015-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(60572153, 60972127); 高等学校博士学科点专项科研基金(200802140001); 黑龙江省自然科学基金(QC2012C059); 哈尔滨市科技创新人才研究专项资金(2014RFXXJ022); 黑龙江省教育厅计划项目(11541040, 12511097)。

作者简介: 于金平(1988—), 女, 硕士研究生;

陈德运(1962—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, E-mail: chendeyun@hrbust.edu.cn;

王莉莉(1980—), 女, 博士研究生。

0 引言

近年来,电容层析成像系统这门技术发展的极为迅速,成功解决了在多相流检测中普遍存在的问题^[1-2]. 该技术有巨大的发展潜力和广阔的工业应用前景,特别在航空航天、工业制造、石油出产,电力,化学工业,安检等各种国民经济行业中都得到了广泛的应用^[3]. 因其具有非侵入性,结构简单,价格低廉,响应速度快等优势,成为 ECT 发展的研究热点和主流趋势^[4-5].

迄今为止应用在 ECT 重建图像的算法主要有遗传算法^[6-8]、Landweber 迭代法^[9-10]、线性反投影算法(LBP)、共轭梯度算法(CG)、基于多项式加速算法、改进的 Gauss-Newton 法、信赖域全局搜索算法^[11-12]和小波融合算法等. 线性反投影算法优势在于成像速度快,算法简单,多应用在迭代算法的初值选取,但成像质量较差. 共轭梯度法(CG)适合简单流型,因为他的系数矩阵是对称正定的,它具有成像时间短,收敛速度快的优势,然而对复杂流型效果并不明显. Landweber 迭代法的信息搜索方向是以最速下降法为基础,无法一定得到最优方向,由于迭代步数的不断增加,所以可能会出现“半收敛”的现象. 遗传算法的初始值是利用流型数据,在范围内搜索最优解,重建断层图像^[13-15]并保证较高的精度. 小波融合算法利用融合规则分别处理分解后的高频系数和低频系数,然后小波逆变换得到处理后的图像,出现信息丢失情况^[16-17]. 模式识别^[18]是 ECT 的神经网络算法的本质,训练样本的完备和神经网络结构的合理构造决定于 ECT 的神经网络算法. 在实际的应用中,网络结构的确定存在一定的困难^[19],造成这种困难的原因是多相流获取完备训练样本比较困难,中流型变化多样,复杂,随机等.

为了有效提高成像质量和改善图像的稳定性,特在本文引出基于禁忌搜索的电容层析成像图像重建算法. 通过仿真实验和设定禁忌算法参数,成像效果非常良好,实验证明该算法是有效.

1 电容层析成像基本原理

电容层析成像技术一般有正问题和反问题两种形式,正问题就是已知传感器内部介质分布测得的电容值;反问题恰恰是它的逆运算,就是将得到的数据通过图像重建显示出来,了解介质的分布情况. 因

此,电容层析成像系统研究明显被划分为三部分,第一部分是传感器优化问题,传感器的尺寸选择和参数测量都对正问题都起到至关重要的作用;第二部分是担当中间桥梁作用的数据采集系统问题,它对测量电路要求具有较强的抗干扰能力和动态范围. 最后一部分就是 ECT 系统中反问题的体现,图像重建部分,图像重建算法的选择关系到图像的质量和速度,所以这部分一直是研究学者致力于研究的课题. 电容层析成像技术系统的构成如图 1 所示:

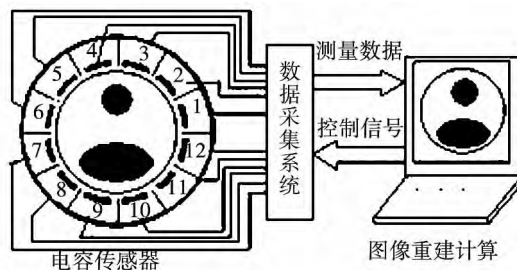


图1 电容层析成像系统的构成

一般情况一个 N 电极的 ECT 系统,在一个采样周期能获得 M 个独立电容.

$$M = N(N-1)/2 \quad (1)$$

以典型的 12 电极 ECT 系统为例,起点选作某个极板,依次为 12 个极板排号. 采取单电极激励方式,激励电极先选为 1 号时,检测电极依次为 2-12 号,测量电极板对 1-2, 1-3, ..., 1-12 间的电容,其中闲置的电极接地. 然后激励电极选为 2 号,检测电极依次为 2-12 号,测量电极板对 2-3, 2-4, ..., 2-12 电极. 按此方法,到激励电极选为 11 号, 12 号电极检测为止. 这样,66 个独立测量值会在 12 电极 ECT 系统一个采样周期得到.

为了减小测量数据间的误差和理论分析数据,数据分析及实验采用归一化的电容,本文采用并联模型对电容进行归一化,公式如下:

$$C = \frac{C_m - C_l}{C_h - C_l} \quad (2)$$

式中: C_h 和 C_l 的电容值分别代表传感器内放置高、低介电质,亦即系统标定的高、低界限值, C_m 的电容值为实际测量的.

2 禁忌搜索算法

禁忌搜索 TS (taboo search) 是一种全局性邻域搜索算法,是人工智能领域中广泛应用的一种算法. 它的出现在函数全局最优化取得了重要成就,它应

用的范围很广泛, 电路设计, 机器学习、生产调度和组合方法都取得了很大成功. 它的思想就是对人类记忆功能的一种模拟.

禁忌搜索涉及到许多概念, 目前应用较多的是, 编码方式(encode)、紧急长度(taboo length)、禁忌表(taboo list)、藐视准则、候选解(candidate)、选择策略(selection strategy)、适值函数、领域(neighborhood)、移动(moving)等概念.

编码就是利用一些数学形式将实际问题中的应用在算法操作中, 在算法结束后, 还需要用解码回到现实中的实际问题, 编码方式有两种, 分别为带分隔符的顺序编码和自然数编码. 适值函数的出现完全是出于提高算法的效率, 便与搜索, 简化算法而设计的.

针对算法的性能, 已经做了很多的改进, 目前应用较多的是任务搜索算法、主动禁忌搜索算法和空间分解算法. 任务搜索算法就是将一整个任务分解成很多个字任务, 对每一个任务都是以禁忌搜索算法求解, 不同的禁忌搜索设置不同参数, 包括初始解、邻域设定、选择策略、和渴望水平等; 还有一种改进性能是主动禁忌搜索算法, 它是一种反馈机制, 适合求解离散优化问题的启发式算法, 类似于神经网络的后发式. 空间分解策略就是将搜索空间的原问题分解为多个子问题分别进行求解, 从而实现并行化; 还有一种邻域分解策略也属于空间, 这种是对邻域分得的子集进行评价, 从而实现最佳邻域解的并行化, 这个要求比较高. 空间分解策略和任务分解策略同属于并行分解算法.

本文将禁忌算法思想引用到 ECT 图像重建上. 为了实现全局最优化, 保证有效的搜索, 需要通过禁忌准则、藐视准则、特设准则和终止准则对全局进行控制. 首先考虑最优化问题, 通过线性反投影算法得到初始可行解, 定义可行解 x 的邻域移动集 $S(x)$, 然后从邻域移动中挑选一个能改进当前解 x 的移动 $S(x)$, 再从新解开始, 重复搜索. 在循环中, 需要构造禁忌表, 记忆搜索过程中的移动数据. 它的出现可以有效地解决陷入局部最优解和无效循环的问题. 当迭代过程中, 最优解无法终止并且数据也无更新的时候, 终止准则将会强迫算法终止, 跳出循环过程.

2.1 目标函数

对于采用禁忌搜索进行图像重建, 通过构造目标函数把其转换成优化问题:

$$\min e^* = \|SG^* - C\|^2 \quad (3)$$

式中: e^* 是目标函数(成像误差函数); S 是管道的敏感场分布矩阵; G^* 是图像的初始解(线性反投影

算法求得). 约束条件就是判定流型, 本文通过 LBP 线性反投影算法得到初始值.

LBP 线性反投影算法, 它是在成像领域中应用最早、成像速度最快、结构最简单、但成像的质量效果较差的算法. 算法应用测得的电容值和敏感场矩阵的映射关系求出物场的分布情况. 对于 ECT 成像技术, 假设被检测介质的变化对灵敏场的影响可以忽略, 设介电常数 $\varepsilon_A < \varepsilon_B$ (A 、 B 为成像的介质), 电极数是 n , 那么重建后图像的第 k 个像素的灰度矩阵 $g(k)$ 可以表示如下:

$$g(k) = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{C_{ij}^m - C_{ij}^e}{C_{ij}^f - C_{ij}^e} S_{ij}(k)}{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n S_{ij}(k)} \quad (4)$$

这里 C_{ij}^f 和 C_{ij}^e 为电容值(分别为充满 A 介质和 B 介质); C_{ij}^m 的电容值代表第 k 个单元充满 B 介质其他单元都是 A 介质; $S_{ij}(k)$ 为灵敏度(像素 k 对电极 $i-j$ 间). 在这里为了减少 LBP 算法成像后边界模糊的现象, 又假设灵敏度分布不受介质分布的影响, 需要对生成的灰度矩阵进行滤波处理, 设灰度值为 $0 \sim 255$, 有下式成立:

$$g_i(k) = \begin{cases} 0, & g(k) < \eta \\ 255, & g(k) \geq \eta \end{cases} \quad (5)$$

式中, 门限值 η ($0 \leq \eta \leq 1$) 分别表示为:

$$\eta = (1 - 0.5a) \xi \quad (6)$$

$$a = \text{avg}(|\lambda_{ij}| \{ \lambda_{ij} = 1 \text{ if } |\lambda_{ij}| > 1 \}) \quad (7)$$

$$\xi = \text{avg}(g(k)), \{ \text{for } g(k) > 0 \} \quad (8)$$

其中, avg 为平均算子. 在实验过程中, 象素的灰度与阈值 η 确定下来后, 就是一个固定的值. 通过实验发现, 重建图像的质量会随着每次选择同类型的不同测试样本而有较大的差异. 针对这种情况, 在实际的应用过程中, 在其它条件都相同的情况下, 会采取根据每个样本的象素用不同的灰度阈值 η 来限定这种方法来提高图像重建的质量.

流型主要包括实心流、空管、核心流、层流、滴流、环形流.

2.2 邻域的设定和终止准则

邻域的设定是禁忌算法的关键. 邻域的实现从一个已知解求得另一个解的过程. 这个过程可以归纳为: 首先会有一个初始解, 它是判定流型的关键, 根据初始解的不同, 限定不同的邻域值. 根据设定可以在一定范围内进行邻域搜索, 搜索范围可以是球形区域或环形区域等等. 如果找到比当前解更优秀的解集可以直接替换, 继续迭代查找, 在图像误差达

到一定范围或者图像足够清晰跳出循环,则当前解就是最优解.由此可知,邻域的设定至关重要,如果设置不当,算法将无法得到预期的标准.

综合全局寻优考虑,本文将邻域的设定分为两种,

1) 根据不同流型设定不同的参数.它是一部分单元,即搜索的范围,例 $0.6 > x > 0.5$ 、某些三角形区域、球型区域或环形区域等.

2) 确定单元值为 1 的单元.生成初始解后,其中管道内部剖分的单元都已确定,外布邻域首先向成像内的范围确定的部分为搜索空间,之后在空间内部每个单元进行变化.

禁忌搜索需要满足终止结束条件,即终止准则.终止条件是由两部分限定:

- 1) 成效效果,在满足一定误差范围内,可终止程序;
- 2) 实时性效果,达到预期的迭代步数即可终止程序.

输出当前解图像时,理论上是严格收敛的,但实际中却不能,因为禁忌长度不可能实现空间的完全遍历.因此实际设计算法时,常常采用近似的收敛准则.

2.3 禁忌表的设计和藐视准则

在禁忌算法中,随着特定目标函数的变化移动,容易陷入局部最优解,禁忌表的设定可有效地解决了这个问题. TS 搜索中采用这种灵活的“记忆”方法,对搜索中优化过程进行记录和选择,来指导下一步的搜索方向.这样设定不但有效防止陷入局部最优解,而且可以大大的节省算法的时间.禁忌对象指放入禁忌表的元素,禁忌的目的是防止迂回搜索,禁止非最优解的干扰,从而可提高搜索的效率.所以了解目标的状态,可以防止最优解被漏掉并且提高搜索的速度.藐视准则是对优良解的保护,激励优良解的局部搜索,进而实现全局优化.图 2 给出了禁忌算法的流程图.

3 禁忌算法在 ECT 图像重建的应用

禁忌搜索的整体结构与爬山算法相似,都是不完全迭代的搜索(iterative search)算法.主要区别在于禁忌搜索算法的邻域设定多样化,即使遇到局部最优也能跳出.特赦准则可以将遗漏的解进行特赦.禁忌表可避免局部最优解的重复搜索.应用 LBP 线性投影算法对管道的介质分布解出 G^* 作为初始解与并计算其目标函数 $e^* = e(G^*)$ 的值.令 $G = G^*$,

设禁忌表 $\text{TabuList} = \Phi, Y = \Phi$ 中.

下面给出了禁忌搜索算法流程图:

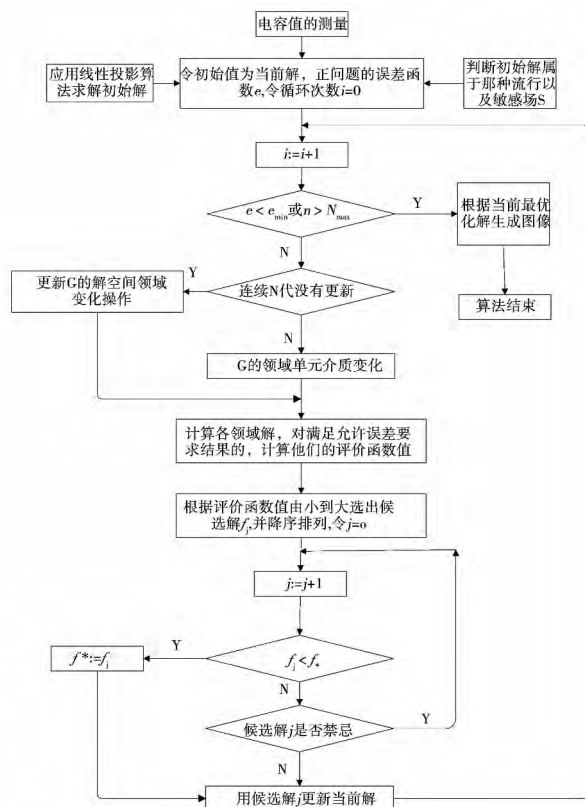


图2 禁忌算法的流程图

开始执行循环:

Switch 通过线性反投影算法,判断出最接近的流型

Case 进入与初始解相对应的流型中

While 判断是否满足终止条件

do

1) 不同流型生成初始解 G 的邻域 $N_1(G)$.

2) 生成候选解集:

加入到候选解集合 $\text{OpenList}(G)$ 中的解是在 G 的邻域 $N_1(G)$ 中找出的具有代表性的.

3) 在每个邻域 $N_1(G)$ 中进行设定邻域 $N_2(G)$.

4) 在邻域 $N_2(G)$ 中进行搜索:

While $\text{OpenList}(G) \neq \Phi$ and 最优解 Y 为满足要求(即 Y 为 Φ)

do

从候选解集合 $\text{OpenList}(G)$ 选出最优解 G^* , 即 $G^* \in \text{OpenList}(G)$ 且该值使 $e(G^*)$ 最小.

if $G^* \in \text{TabuList}$

then

令 $\text{OpenList}(G) = \text{OpenList}(G) - \{G^*\}; Y = \Phi;$

```
Else
ife(  $G^*$  ) <  $e^*$ 
then  $e^* = e( G^* ) , G = G^*$ 
endif
endif
endwhile
```

5) 对潜力解处理

```
If 如果找到最优解  $G^*$  then
把  $G$  插入到 TabuList 中,令  $G = G^*$  ( 特设准则)
endif
endwhile
endswitch
```

最后根据最优解 G 生成重建图像.

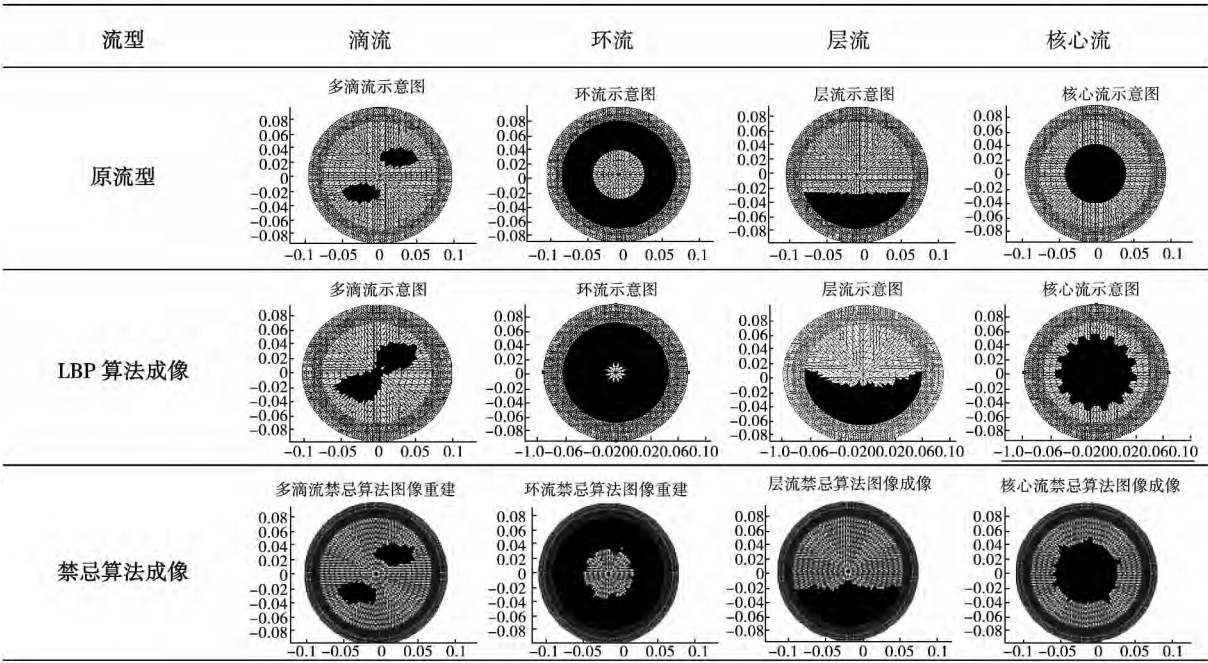
该算法的最后运行结果为: G 是重建图像的数据值、当前的最优解. e^* 是图像重建的误差值(目标函数值). 找到最优解或者是循环到达一定次数都是上面算法外层循环的结束条件.

4 实验结果

本文采用 LBP 线性反投影和禁忌搜索算法分别对滴流、环流、层流和核心流四种流型进行图像重建. 禁忌搜索算法的思想首先利用 LBP 线性反投影算法得到图像初始值,依据这个初始值判断出流型,然后根据不同的流型设定不同的邻域,在寻找最优解过程中,避免陷入局部最优解,通过禁忌表的设定,特设准则和藐视准则来约束搜索结果,最后通过终止准则跳出禁忌搜索. 实验结果通过 MATLAB 软件仿真,结果如表 1 所示.

从图 1 中可以看出禁忌搜索算法的成像质量要远远高于 LBP 线性反投影算法,特别是滴流和核心流. 表 1 中图像误差结果显示,禁忌搜索算法成像误差相对较小,更接近原型,图像有很大改善.

表 1 禁忌算法图像生成



5 结 论

本文将禁忌算法引入 ECT 系统的图像重建,利用线性反投影算法 LBP 得到初始值判定重建图像流型,对不同的流型设置不同的流域,禁忌表的引用可有效解决陷入局部最优解的问题,也减少了算法重建时间,藐视准则采用可防止较优解被屏蔽,对算法

表 2 图像误差 %

原型	LBP 算法	禁忌搜索算法
滴流	45. 28	26. 33
环状流	84. 92	44. 64
层状流	56. 42	36. 61
核心流	73. 60	37. 66

跳出局部最优起到重要作用. 仿真实验结果表明, 与 LBP 算法相比, 该算法具有成像精度高, 误差相对较小, 图像更接近原型, 为 ECT 图像重建的研究提供了一个新方法.

参考文献:

- [1] 赵玉磊, 郭宝龙, 闫允一. 电容层析成像技术的研究进展与分析 [J]. 仪器仪表学报, 2012(8): 1909 – 1920.
- [2] 宗德才, 王康康. 一种混合局部搜索算法的嵌套分区算法 [J]. 计算机应用研究, 2015(3): 752 – 758.
- [3] 陈万喜. 基于电容数字转换技术的 ECT 系统研究 [J]. 吉林: 东北电力大学, 2014.
- [4] 陈德运, 高明, 宋蕾, 等. 一种新型的三维 ECT 传感器及三维图像重建方法 [J]. 仪器仪表学报, 2014(5): 961 – 968.
- [5] 黎金玲, 陈燕, 王德运, 等. 带服务优先级车辆路径问题的扫描禁忌搜索算法 [J]. 数学的实践与认识, 2014(9): 169 – 180.
- [6] 姚静, 方彦军, 陈广. 遗传和禁忌搜索混合算法在机组负荷分配中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2010(26): 95 – 100.
- [7] 李明阳, 柏鹏, 彭卫东, 等. 基于遗传 – 禁忌混合算法的低相关区序列集搜索方法 [J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2015(1): 55 – 59, 71.
- [8] XIAO Liqing, WANG Huaxiang, XU Xiaojun. Improved Newton-Raphson Algorithm for Electrical Resistance Tomography Image Reconstruction [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(8): 91 – 97.
- [9] 肖理庆, 王化祥, 徐晓菊. 改进 Landweber 电阻层析成像图像重建算法 [J]. 计算机应用研究, 2012(8): 3157 – 3159.
- [10] YAO Jianyong, JIAO Zongxia, SHANG Yaoxing, et al. Adaptive Nonlinear Optimal Compensation Control for Electro-hydraulic Load Simulator [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010(6): 720 – 733.
- [11] 王莉莉, 陈宇, 陈德运, 等. 基于改进信赖域的电容层析成像图像重建算法 [J]. 仪器仪表学报, 2010(5): 1076 – 1081.
- [12] ZHU Kewu, RAO Madhusudana, WANG Chi-Hwa, et al. Electrical Capacitance Tomography Measurements on Vertical and Inclined Pneumatic Conveying of Granular Solids [J]. Chemical Engineering Science, 2003, 58(18): 4225 – 4245.
- [13] JAWORSKI A J, DYAKOWSKI T. Application of Electrical Capacitance Tomography for Measurement of Gas-solids Flow Characteristics in a Pneumatic Conveying System [J]. Meas. Sci. Technol., 2001, 12(8): 1109 – 1119.
- [14] 刘蓓蓓, 江铭炎, 张振月. 基于禁忌搜索的人工蜂群算法及其应用 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(7): 2005 – 2008.
- [15] 李佳, 刘天琪, 李兴源, 等. 改进粒子群 – 禁忌搜索算法在多目标无功优化中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2014, 08: 71 – 77.
- [16] 吴仰玉, 纪峰, 常霞, 等. 图像融合研究新进展 [J]. 科技创新导报, 2013(1): 49 – 52 + 54.
- [17] 郭志恒, 律德才, 邵富群. 基于差分灵敏度模型的电容层析成像图像重建方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(23): 75 – 77.
- [18] 何山, 朱健梅. 基于 BP 神经网络的个体出行模式识别研究 [J]. 公路工程, 2014, 39(5): 304 – 306.
- [19] 孙广彬, 王宏. 机器人液压驱动器神经网络自适应最优控制 [J]. 华中科技大学学报, 2015, 43(1): 7 – 11.

(编辑: 关 毅)