

分散、递阶蚁群算法及其在相变序列图像分割中的应用

冯祖仁^{1,2}, 李进^{1,3}, 冯远静⁴

(1. 西安交通大学系统工程研究所, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;
3. 西安建筑科技大学土木工程学院, 710055, 西安; 4. 浙江工业大学信息工程学院, 310032, 杭州)

摘要: 提出了一种分散、递阶蚁群算法, 它将多个分散的蚁群并行求解各自对应的子问题, 形成一个执行层, 而递阶协调层利用执行层反馈的信息协调执行层的优化过程, 从而得到递阶求解问题的整体最优解. 该算法已应用于相变热图序列图像模糊相变线的提取问题, 即运用区域划分方法先将序列图像的分割转化为关联型多子图搜索问题, 再利用分散、递阶蚁群算法进行求解, 结果表明该算法能很好地利用相变线的运动信息成功地解决热相变序列图像分割问题. 与蚁群算法独立搜索比较, 分散、递阶蚁群算法能更有效地实现多子图之间的关联.

关键词: 蚁群算法; 分散递阶; 序列图像分割; 相变热图

中图分类号: TP278 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)02-0136-05

Decentralized and Hierarchical Ant Colony Optimization and Its Application to Phase Change Image Sequences Segmentation

Feng Zuren^{1,2}, Li Jin^{1,3}, Feng Yuanjing⁴

(1. Systems Engineering Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 4. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: A class of decentralized and hierarchical ant colony optimization is presented, in which the sub-problem is solved by multiple decentralized ant colonies side by side to form an execute level. The optimization process of the execute level is coordinated in the hierarchical coordination level with the feedback information from the execute level to obtain the general optimal solution of the hierarchical solving problem. The algorithm is applied to the extraction problem of fuzzy phase change lines of phase change thermograph sequences, where the sequences image segment is transformed into search problems of associated multiple sub-images by region partition method, then solved by decentralized and hierarchical ant colony algorithm. The simulation results show that the moving information of phase change lines can be utilized well to solve the segment problem of phase change thermograph by the proposed algorithm. Compared with the single ant colony algorithm, it can more effectively solve the correlation problem among multiple subgraphs.

Keywords: ant colony optimization; hierarchical and decentralized; image sequences segmentation; phase change thermograph

1996年, Dorigo等人提出了一种新的群体智能算法^[1], 之后又以此为基础逐步完善成蚁群算法(ACO)^[2]. 近年来, 蚁群算法开始引起图像处理研究者的注意, 已将蚁群算法应用于图像匹配问题、马尔科夫随机场模型(MRF)^[3-4]、flow shop^[4-5]、图像分割^[6-7]等, 而对于大规模复杂优化问题, 蚁群算法却存在时间和空间复杂性过大等缺点, 甚至导致问题难以求解. 在经典大系统理论中, “分而治之”是研究和求解大规模复杂问题的有效方法, 称之为分散、递阶方法.

对于序列图像分割问题, 分割对象的运动特性必然使相近帧图像相互关联, 因此序列图像分割问题是变量维数很高且相互关联的复杂优化问题. 本文将重点研究序列图像分割问题的分散、递阶蚁群优化方法, 并用其解决相变热图技术中序列图像模糊相变线的提取问题^[6].

1 面向关联型多搜索问题的分散、递阶蚁群算法

1.1 关联型多搜索问题定义

对于大规模问题, 整体求解是极其困难的, 而这类问题在结构上往往是可分的. 假设整个系统由 N 个子系统组成, Ω 是变量空间, R 是实数集, 每个子系统的目标函数为 $J_i: \Omega_i \rightarrow R, \Omega_i (1 \leq i \leq N)$ 是子系统的变量空间, 则总体目标函数为

$$J: \Omega \rightarrow R, \quad \Omega = \bigcup_{i=1}^N \Omega_i \quad (1)$$

它是由各个子系统的子目标以及子系统之间的关联目标组成. 若约束函数为 $\phi_i, \phi_c: \Omega \rightarrow R$, 则原关联问题可等价为优化问题, 即

$$\begin{aligned} \min_x J(x) &= \sum_{i=1}^N J_i(x_i) + J_c(x) \\ \text{s. t. } \phi_i(x_i) &\leq 0, \quad 1 \leq i \leq N \\ \phi_c(x) &\leq 0, \quad x \in \Omega \end{aligned} \quad (2)$$

而这种优化问题又可转化为迭代式关联型多搜索问题, 即

$$\min_x J_i(x_i) + \bar{J}_c(\hat{x})$$

$$\text{s. t. } \phi_i(x_i) \leq 0, \quad \bar{\phi}_c(\hat{x}) \leq 0, \quad x_i \in \Omega_i \quad (3)$$

式中: $\hat{x} = (\hat{x}_1, \dots, \hat{x}_i, \dots, \hat{x}_N)$, $\hat{x}_j (j \neq i)$ 是第 j 个子问题上一次优化的结果; $\bar{J}_c(\hat{x})$ 、 $\bar{\phi}_c(\hat{x})$ 均为协调层修正函数.

1.2 分散、递阶蚁群算法

在经典大系统理论中, 分散、递阶方法能有效地利用问题的特点, 在避免“维数灾难”的同时, 通过迭代过程实现关联平衡. 具体算法模型如图1所示.

2 相变序列图像分割算法

2.1 问题描述

相变热图试验^[7]是风洞试验中普遍采用的一种测热技术, 其关键是能准确提取相变热图的相变线.

由于存在干扰以及随机噪声, 所以采用常规的方法处理图像不能够得到令人满意的效果(见图2). 为此本文提出, 基于区域划分将序列图像分割问题转换为关联型多搜索问题, 并采用分散、递阶蚁群算法实现相变线的精确提取.

2.2 区域划分

为了利用序列间的关联性, 可将每个分割对象划分为 M 个子区域, 图3表示某一相变图像的区域划分结果. 取子区域个数 $M=9$, 则区域的划分方法如下: ①分离待处理部分; ②将待处理部分平均分为 M 份; ③每帧由几个域组成.

2.3 区域空间转换

对每一个子区域 Ψ_{ij} , 以纵轴为方向, 取其上的所有像素灰度值相加, 并除以像素数目, 计算公式为

$$C(j, k) = \frac{1}{n_k} \sum_{s=y_k}^{y_k+n_k} \Psi_{ij}(k, s) \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N, \quad j = 1, \dots, M$$

式中: n_k 为子序列图像以 k 为横坐标的像素数;

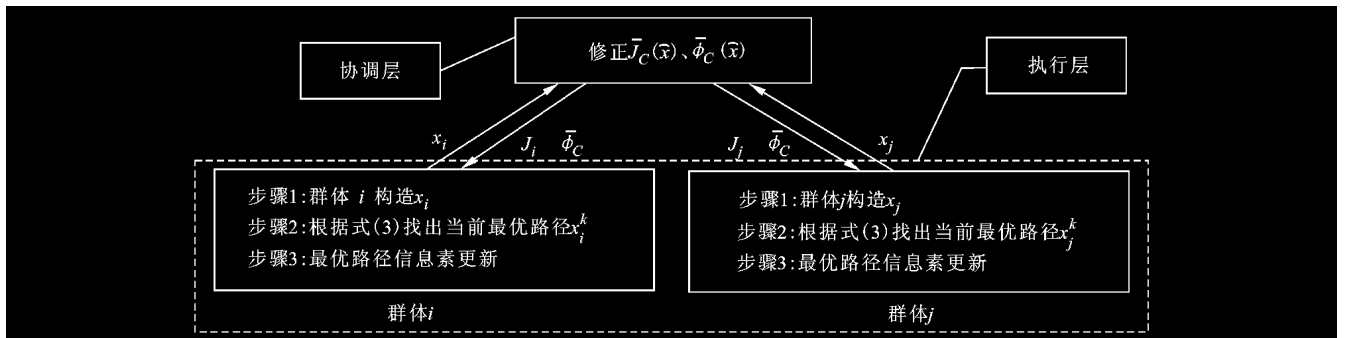
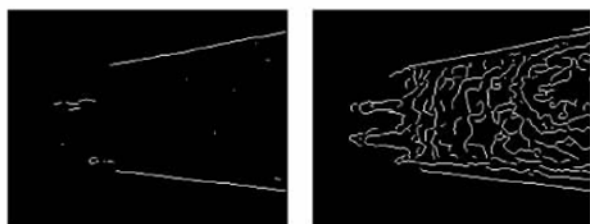


图1 面向关联型多搜索问题的分散、递阶蚁群算法模型



(a)Sobel 算子 (b)Canny 算子

图2 第237帧常规方法的图像处理结果

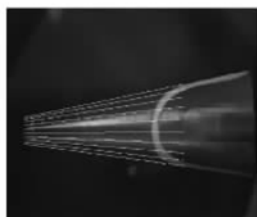


图3 相变图像区域划分结果

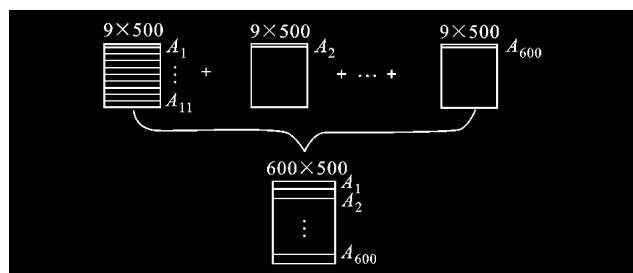
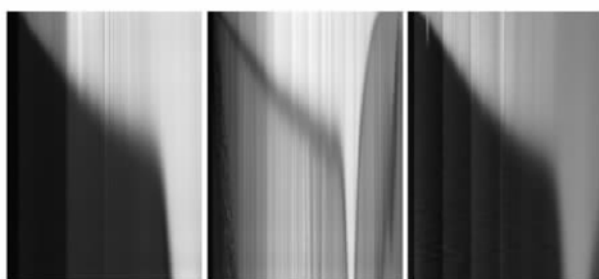


图4 空间转换示例

$\Psi_{ij}(k, s)$ 表示第 i 幅图像中第 j 个区域坐标 (k, s) 上的灰度值; y_k 为子序列图像以 k 为横坐标的最小纵坐标; $k=1, 2, \dots, H$ 为图像域的长度. 通过如上的处理, 每一幅原始相变图像将转变为一个 $M \times H$ 的灰度矩阵, 而整个图像序列可转化为 N 个 $M \times H$ 的灰度矩阵. 图4表示 $M=9, N=600, H=500$ 的图像序列转换示意图, 图5是转换结果. 这样, 就将原始相变图像序列转化为 M 幅转换图像的分割问题, 而将转换了的图像称为子图像.

包括图像归一化处理等的子图像预处理方法均为图像处理的常规方法, 所以这里不再赘述.



(a)第1幅 (b)第4幅 (c)第9幅

图5 图4的转换结果

2.4 基于主动轮廓模型的蚁群图像分割算法

基于主动轮廓模型的蚁群图像分割算法是本文前期工作提出的^[6], 该算法在蚁群算法的启发式信息中引入了主动轮廓模型的能量函数, 从而构建了一类适合求解主动轮廓模型的蚁群算法, 为获取精确的图像轮廓提供了新的途径. 算法包括以下内容.

(1) 确定搜索空间. 为了确定蚁群算法的搜索空间, 必须为进行了归一化处理后的图像确定一条初始分割线, 具体步骤如下.

步骤1: 从左至右以列为单位作像素灰度值变化曲线, 确定灰度值的上边缘与下边缘, 分别记做 $\max()$ 、 $\min()$.

步骤2: 对于每一列 $\max()$ 与 $\min()$, 都有

$$\text{mean}() = \lambda \max() + (1 - \lambda) \min() \quad (5)$$

式中: λ 为待定系数.

步骤3: 对于像素值变化曲线来说, 处于中段点的像素值与其纵坐标一一对应, 而对于每一列的 $\text{mean}()$, 都可以找到一个点与它对应, 直至每一列的点均被确定为止, 这样就得到了一条初始分割线. 以初始分割线为中心画出带宽为 δ 的分割带, 称为搜索空间 Ψ (见图6). 由图6可以看出, 分割线在后一系列的坐标值大于等于前一列的坐标值, 设当前点的坐标值为 x_i^k , 则下一点的可行域为 $\theta = \{x_{i+1}^k | j \leq k \leq j + \delta, k \in \Psi\}$, 而 δ 为给定搜索区域, 搜索示意如图7所示.

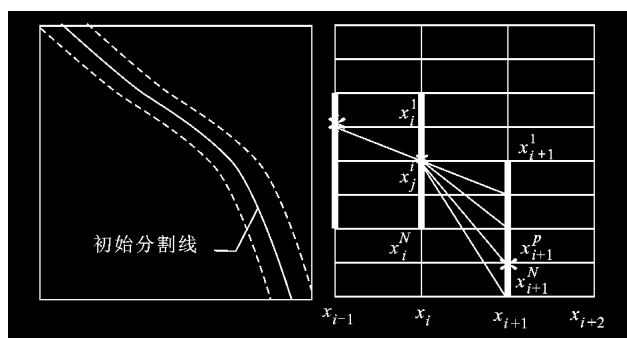


图6 搜索空间的确定 图7 搜索示意图

(2) 确定目标函数. 采用主动轮廓模型对子图像进行分割, 其能量函数 E_{snake} 的离散形式为^[6]

$$E_{\text{snake}} = \sum_1^n \{ \mu [|x_i - x_{i-1}| + |y_i - y_{i-1}|] + \nu [|x_{i-1} - 2x_i + x_{i+1}| + |y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}|] + wf(\nabla I) \} \quad (6)$$

式中: x_i, y_i 为当前分割线的坐标值; $f(\nabla I)$ 为图像中的边缘能量, ∇I 表示图像灰度 I 的一阶差分; μ, ν, w 均为给定系数.

(3)算法的构造和描述. 算法的目标就是寻找 Ψ 空间的一条路径 t^* , 使得能量函数 E_{snake} 最小. 算法的求解过程为: A 只人工蚁在 Ψ 空间中进行搜索, 从任意点 x_i^j 出发, 在信息素的诱导下以条件概率 $P(\cdot | \cdot)$ 选择下一个点 x_{i+1}^j , 即

$$P(x_{i+1}^j \in x_{i+1} | x_i^j \in x_i, \tau) = \begin{cases} \frac{\tau(i, x_i^j, x_{i+1}^j)^\alpha \eta(x_{i+1}^j)^\beta}{\sum_{l \in x_{i+1}} \tau(i, x_i^j, x_{i+1}^l)^\alpha \eta(x_{i+1}^l)^\beta} & l \in x_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i=1, 2, \dots, H$; α, β 是参数; τ 是信息素场, $\tau(i, x_i^j, k)$ 表示在 (i, x_i^j, k) 上的激素; $\eta(x_{i+1}^j)$ 为启发信息, 定义为

$$\eta(x_{i+1}^j) = 1/[f(\nabla D)_{x_{i+1}^j}] \quad (8)$$

依次类推, A 只人工蚁完成一个循环后, 可根据式(6)定义的能量函数来评价每只蚂蚁的路径 t_{ai} , t_{ai} 中 $a=1, 2, \dots, A, i=1, 2, \dots, M$, 再按式(6)更新信息素 τ_{ijk} 中与最优路径对应的信息. 接着, 在当前信息素场的基础上重新选择, 直到能量不再下降为止, 其结果就是 Ω 空间的能量最小路径. 算法流程见图 8. 信息素场的更新式为

$$\forall (i, j, k) : \tau_{ijk} \leftarrow (1 - \rho) \tau_{ijk}$$

$$\text{If } E_{\text{snake}}(t_{ai}) > E_{\text{snake}}(\hat{t}_{ai}) \text{ then } t_{ai} \leftarrow \hat{t}_{ai}$$

$$\forall (i, j, k) \in \hat{t}_{ijk} \leftarrow \tau_{ijk} + \rho g(\hat{t}) \quad (9)$$

式中: $0 < \rho < 1$ 为信息素的挥发系数. $g(t)$ 是路径 t 的函数, 且满足 $E_{\text{snake}}(t) < E_{\text{snake}}(\hat{t}) \Rightarrow g(t) \geq g(\hat{t})$.

2.5 关联型图像序列分割算法

子区域之间的分离点具有位置相关性, 由于图

```

步骤1: 读入图片数据, 确定搜索空间  $\Psi$ .
步骤2: 初始化  $t_{ai}$ , 信息素初值  $\tau_0 \geq 0$  等.
步骤3: 循环求解
while (循环次数小于最大次数或目标函数值仍下降) do;
for  $1 \rightarrow A$  只蚂蚁 do;
for  $1 \rightarrow M$  维搜索空间 do;
    根据当前位置确定下一位置的可行域  $\theta$ .
    根据式(7)确定的概率, 决定蚂蚁的下一个位置.
end
根据式(6)计算每个蚂蚁走过的路径的能量函数值.
选择值最小的能量函数, 决定当前最优的路径  $t_{ai}^*$ .
根据最优路径, 按式(9)更新对应的信息素场.
end
步骤4: 得到的最优路径就是边缘点在每一维搜索空间的位置.
end

```

图 8 蚁群图像分割算法

像分离带中含有许多噪声, 所以需要通过协调搜索、适当修正性能指标来体现这种相关性. 因此, 图像序列分割可以看作如式(3)所示的关联型多搜索问题.

可采用总体平均方法来修正子图像分割的性能指标, 基本思想是: 在迭代 $k-1$ 步后, 获取每个群体当前最优分割相变线 $x_i^{k-1}, i=1, \dots, N$, 再求其平均

值 $\text{Ave}(k-1) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^{k-1}$. 迭代 k 步后, 群体 1 的性

能指标可修正为 $E_1(x_{1j}^k) + \gamma(x_{1j}^k - \text{Ave}(k-1))$, 其中 $E_1(x_{1j}^k)$ 为群体 1 的主动轮廓能量, γ 为给定系数, 其他群体依此类推. 这样, 可以通过修改性能来影响信息素的更新. 具体的关联协同搜索算法如图 9 所示.

2.6 分割合成

在得到子图像的分割线以后, 就可以将其返回到原图像序列中. 相变图像序列分割结果如图 10 所示.

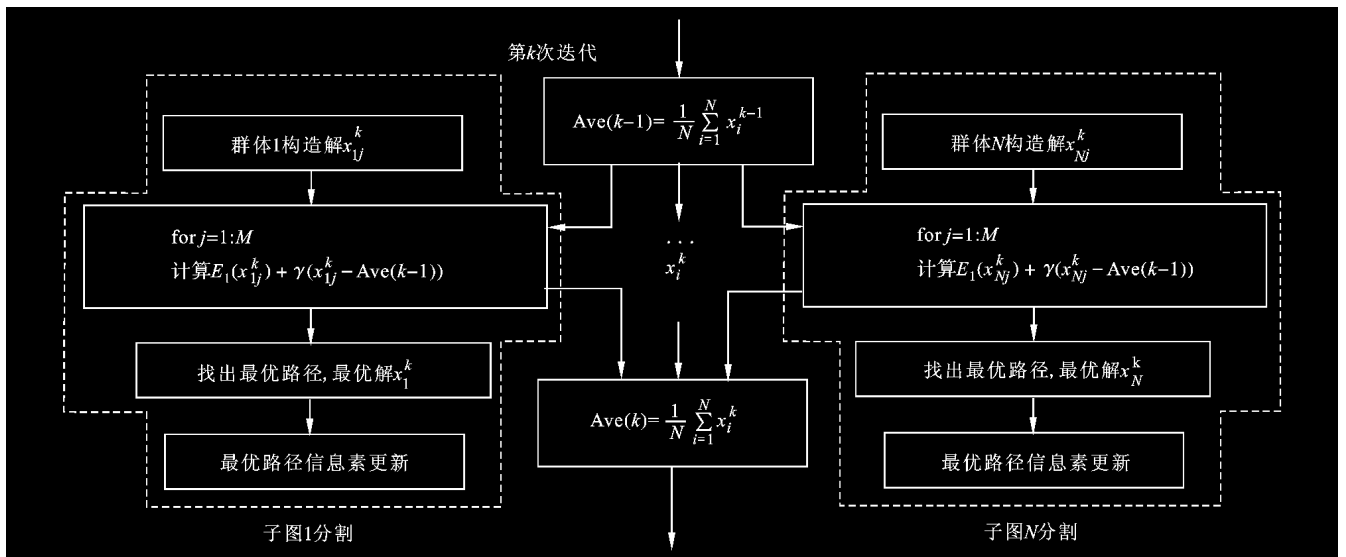


图 9 图像序列分割群体协同搜索算法

利用上述关联协调搜索算法对相变子图像进行分割,子图像分割能量函数的变化曲线见图 11,图像分割结果见图 12,各群体在协同关联搜索和独立搜索情况下的子图像最终分割线与其均值之差的平方和曲线比较见图 13.从图 13 中可以看出,关联搜索算法的均差平方和比独立搜索要小,这说明群体协同关联搜索算法的性能更好.

3 结束语

本文针对模糊边缘图像序列分割问题,提出了一种群体协同分割算法.根据图像序列运动边界的运动规律,将图像序列分割问题转化为关联型多搜索问题.借助相变热图图像序列相变线提取的研究实例,给出了具体的关联型多搜索问题的转化方法以及具体的群体协同策略.试验结果表明,该算法能很好地完成相变线的提取,同时也验证了本文的群体协同策略的有效性.



(a)第 100 帧 (b)第 150 帧 (c)第 180 帧

图 10 相变图像序列分割结果

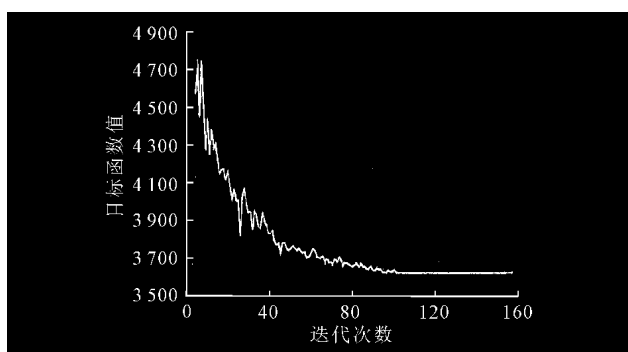


图 11 优化过程能量函数的变化曲线

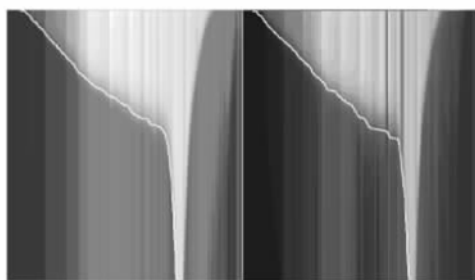


图 12 部分子图像分割结果

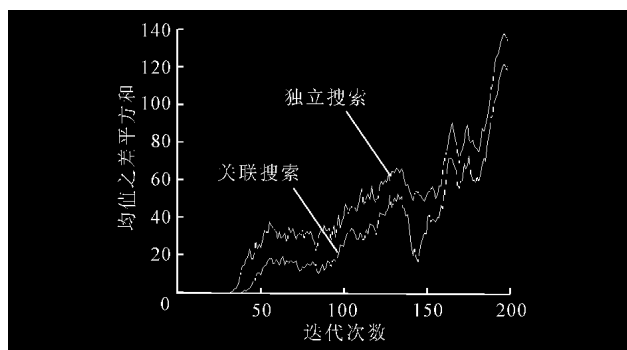


图 13 2 种算法下图像提取结果均值之差平方和比较

参考文献:

- [1] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system optimization by a colony of cooperating agents [J]. IEEE Transactions on System, Man, Cybernetics: Part B, 1996, 26(1):29-41.
- [2] Meshoul S, Batouche M. Ant colony system with extremal dynamics for point matching and pose estimation[C]//Proceedings of 16th International Conference on Pattern Recognition. Los Alamitos, USA: IEEE Computer Society, 2002:823-826.
- [3] Ouadfel S, Batouche M. Ant colony system with local search for Markov random field image segmentation [C]//Proceedings 2003 International Conference on Image Processing. Piscataway, USA: IEEE, 2003: 133-136.
- [4] Feng Yuanjing, Feng Zuren. Ant colony system hybridized with simulated annealing for flow-shop scheduling problems [J]. WSEAS Transaction on Business and Economics, 2004, 1(1):133-138.
- [5] 冯远静, 冯祖仁, 彭勤科. 智能混合优化策略及其在流水作业调度中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38 (8):779-782.
Feng Yuanjing, Feng Zuren, Peng Qinke. Intelligent hybrid optimization strategy and its application to flow-shop scheduling [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38 (8):779-782.
- [6] 冯远静. 群体协同蚁群算法及其在图像分割中的应用[D]. 西安:西安交通大学电子与信息工程学院, 2005.
- [7] 唐巧琪, 黄国川. 相变热图试验技术研究与应用[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17(1):15-17.
Tang Qiaoqi, Huang Guochuan. The research and application of phase change thermography technique[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2003, 17(1):15-17.

(编辑 苗凌)