

# 基于人机交互的混合算法在约束布局中的应用

曹娟 张颖淳 赵玲

(重庆交通大学信息科学与工程学院 重庆 400074)

**摘要** 复杂工程布局方案的设计是一个典型的属带性能约束的布局优化问题,难以求解。针对此类问题,提出了一种人机交互的混合式算法。该算法首先采取人工设计的布局策略,然后与人工蜂群优化算法相结合,构成人机交互的混合算法,这样可以充分发挥人和计算机各自的特长。实例测试和实验对比表明了该算法的可行性和有效性。

**关键词** 人机交互,复杂工程布局问题,方案设计,人工蜂群算法,混合算法

中图分类号 TP391 文献标识码 A

## Human-computer Hybrid Algorithm and its Application in Constrained Layout

CAO Juan ZHANG Ying-chun ZHAO Ling

(College of Information Science and Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract** Complex engineering layout design is a typical constrained layout optimization problem with behavioral constraints (inertia, balance, stability and vibration etc). It is difficult to solve. Aiming at these problems, the paper put forward a human-computer hybrid algorithm. The human-computer hybrid algorithm is constituted by combining the layout strategy of the artificial design with artificial bee colony optimization algorithm. And then human-computer interactive hybrid algorithm is formed to solve the practical engineer layout problems and the specialties of human and computer can be exerted to the utmost respectively. Example test and experimental contrast show that the proposed algorithm is feasible and effective.

**Keywords** Human-computer interaction, Complex engineering layout, Scheme design, Artificial bee colony algorithm, Hybrid algorithm

## 1 引言

复杂工程中有大量的布局设计问题急需解决,如车辆驾驶室人机界面的设计、公路上的优化设计、板材排样、集成电路布图设计、建筑行业中的房间布局等;而且布局设计方案的要求也越来越复杂<sup>[1,2]</sup>,例如车辆驾驶室人机界面的设计、工程中设备的布局、航天器中的物件布局、公路上的布局规划、机器人的布局方案。在这些布局设计中,仪器设备的放置一般都要求提高空间的利用率,仪器之间不能相互挤压干涉,仪器和布局界面也不能挤压,除此之外,还需要严格考虑到性能特性的约束,比如惯性、平衡性、稳定性、振动等约束,一般系统的静不平衡量不能超过允许值。由于其重大的应用价值,这种带约束的复杂布局问题越来越成为目前研究的热点问题。

布局优化问题属于 NP-Hard 问题,很难找到具有多项式复杂性的精确求解算法,约束布局问题难以用传统的数学优化方法求解。因而,近年来很多学者寻找不同的方法对这种约束布局问题进行研究,并取得很多成果。目前的研究主要采用启发式算法、演化算法或者混合算法求解,而且早期的工作集中在处理二维简化的圆形布局物。比如,一种新的并

行化的遗传算法和混合模拟退火算法被分别提出来用于求解约束布局问题<sup>[3,4]</sup>。Teng 等采用启发式算法和布局拓扑模式迭换的方法,对带性能约束的航天器布局设计进行了优化<sup>[5]</sup>。也有些学者直接利用各种演化算法在布局空间中进行搜索,但是当布局物增加时,由于供选择的布局形式急剧增多,直接利用算法搜索不仅搜索时间较长,在布局精度上也无法达到要求<sup>[6-9]</sup>。于是,弹性势能被首先引入,结合启发式策略对不带平衡约束的布局问题进行求解,得到的布局结果较好<sup>[10]</sup>。Huang 等采用启发式方法进行求解,由于这种方案针对性强,因而增加了设计的可行性和合理性<sup>[11]</sup>。结合实际应用,根据设计的最小物流费用规则对车间设备建立布局优化模型,然后通过遗传算法对该优化模型求解,这样很好地解决了车间设备虚拟布局问题<sup>[12]</sup>。此外,布局子问题的改进遗传算法也被应用于二维布局优化子问题,以寻找布局优化问题的全局最优解<sup>[13]</sup>。为了解决道路平面线形的优化设计,遗传算法也被用来自动搜索一个最优或较优解<sup>[14]</sup>。而组合式算法被用来解决对于出行者的路径选择方案的布局优化问题<sup>[15]</sup>。为了在约束优化问题中能搜索到全局最优解,一种混合粒子群求解算法被提出,其通过引入自适应惩罚函数,以及采用模拟退火算法寻找更优可行解<sup>[16]</sup>。然而,对于现实生活中的复

到稿日期:2012-09-21 返修日期:2012-12-20 本文受重庆市教委科学技术研究项目(KJ120413, KJ120422, KJ110423),重庆市自然科学基金(CSTC2011jjA70007, CST2011jjA30010)资助。

曹娟(1980-),女,硕士生,讲师,主要研究方向为机器视觉、计算机仿真、人工智能, E-mail: caojuan6666@gmail.com; 张颖淳(1967-),女,副教授,主要研究方向为数据挖掘及计算机基础教学。

杂工程布局问题,其求解越来越复杂,如果既能发挥人的特长,又能发挥计算机的特长,即把两者相结合就能够很有效地求解,而且所花费的时间也很短。

本文提出人机交互的混合人工蜂群算法用以求解复杂工程中的约束布局问题,采用基于人工设计的布局策略和人工蜂群算法结合求解。首先通过平移质心调整模型,使得静不平衡量为0,然后采用人工设计的布局策略对布局区域进行划分,用人工蜂群算法优化大小不同的矩形设备的放置顺序,构成人机交互的混合算法,使得该算法能充分有效地发挥人和计算机各自的特长,最后得到性能较好的布局结果。

## 2 布局优化问题的模型描述

设在承重板的界面上布局  $N$  个矩形设备  $E_k, k \in I = \{1, 2, \dots, N\}$ , 建立平面直角坐标系  $xOy$ 。设第  $k$  个设备  $E_k$  的形心为  $e_k = (e_{k1}, e_{k2})$ ,  $E_k$  的长边所在直线与  $x$  轴正向逆时针所成的角为  $\theta_k \in [0, \pi)$ , 图元的边长分别为  $a_{k1}$  与  $a_{k2}$ , 其中  $a_{k1} \geq a_{k2}$ 。这样,通过  $e_k, \theta_k$  和  $a_k = (a_{k1}, a_{k2})$ , 就可以唯一地确定设备  $E_k$  在坐标系  $xOy$  中的位置和大小。假设设备  $E_k$  的质量为  $m_k, k \in I, \sigma (> 0)$  为静不平衡量的允许值,在一个实际布局优化问题中,  $N, a_k, m_k, \sigma$  是已知量。所求布局方案是仪器设备的布局,要尽量趋向承重板的中心,而且要满足两个约束条件:1)各个设备相互不能挤压干涉;2)布局完成后承重板的整体静不平衡量要小于某最大容忍值,建立模型如下。

各设备  $E_k$  之间的不干涉条件为:

$$\text{int}(E_k) \cap \text{int}(E_m) = \emptyset, k \neq m \quad (1)$$

静不平条件为:

$$J(Y) = \left\| \bar{Y}_N \right\| = \left\| \frac{\sum_{k=1}^N m_k e_k}{\sum_{k=1}^N m_k} \right\| \leq \sigma, Y \in Q_N \quad (2)$$

布局优化的目标模型为:

$$\text{Min } g(B) \quad (3)$$

式中,设  $\text{int}(A)$  表示集合  $A$  的内部;  $g(B)$  为布局  $B$  下圆形界面的半径;  $Q_N$  为由  $N$  个待布矩形设备形心坐标  $e_k$  与角度  $\theta_k$  构成的解空间。

## 3 人机交互的混合算法

人工蜂群算法是以群体智能和自然界中蜂群的自组织模型为基础的一种智能仿生算法。在该算法中,每个食物源位置代表在优化问题中的可能解,其花蜜数量代表优化问题中解的质量,即适应度。在该算法中,引领蜂、跟随蜂和种群中解的个数是相同的,引领蜂搜索其对应的食物源,然后选择具有较高适应度的食物源,搜索完毕后,引领蜂就把得到的信息交互给跟随蜂,跟随蜂则通过这些信息根据概率的大小对食物源进行选择,接着跟随蜂也进行一次邻域搜索,并选择较好的解。人机交互是研究计算机、人以及它们之间互相影响的技术,而用户界面是人与计算机之间传递、交换信息的媒介和对话接口,是计算机系统的重要组成部分。计算机和人的优缺点经常相辅相成。人工目视选择可充分利用判读人员的知识,擅长提取空间的相关信息,但是会花费较多的时间,而且会有个人差异存在;计算机处理问题具有很强的运算能力和很高的运算速度,可以提取出物理量及指标,但没有人天生的思维能力、创造能力和认识事物的能力,更没有人能够不断在

经验中纠正错误的的能力。如果能够充分地运用它们各自的特长,将两方面有效地结合,将更有利于解决复杂工程布局问题。

本节提出人机交互的人工蜂群混合算法求解复杂工程矩形设备布局问题。本文不仅仅通过人工蜂群算法来进行优化,寻找最优布局顺序,而且在运算中,根据计算结果,人工不断设计方案规划布局区域,从而形成了人机交互的混合算法。具体的算法设计如下。

### 3.1 复杂布局设计的人工策略

由于矩形设备的边长和质量不一样,因此设备放置的顺序会影响最后的布局结果。本文所研究的复杂工程布局问题对承重板的半径和静不平衡量均有要求。考虑到该布局问题有下面的结构特征:面积较大的矩形设备装入后易产生较大的空洞;较大的空洞常常可以装入面积较小的矩形设备;先放置质量大的矩形设备比后放置它们距离系统的中心更近,也就是对承重板质心的影响更小,本文以

$$g(E_k) = \alpha a_{k1} + \beta a_{k2} + \gamma m_k \quad (4)$$

为排序函数,其中  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为矩形长边、短边及质量的权重。将所有设备根据  $g(E_k)$  的值非减排序。

对于给定的承重板半径  $R$ , 整个放置过程具体分为 4 个步骤:1)选取按式(4)非减排序后的第 1 个矩形,将其形心放置于坐标原点,并且长边平行于  $x$  轴,第一个矩形两短边所在的直线与承重板一起形成 I、II 两个区域。在此阶段,只考虑在 I、II 两区域布置矩形,如果能将全部待放置矩形放置完毕,则算法结束,输出成功放置,否则,转步骤 2)。2)如图 1 所示,在 III、IV 两个区域布置剩下的矩形,如果能将剩余待放置矩形全部放置完毕,则算法结束,输出成功放置,否则,转步骤 3)。3)如图 1 所示,整个包络圆除去第一个矩形以及 I、II、III、IV 4 个区域后剩下的构成余下的 V、VI、VII、VIII 4 个区域。在 V、VI、VII、VIII 4 个区域布置剩余待放置矩形,如果能将全部待放置矩形放置完毕,则算法结束,输出成功放置,否则,转步骤 4)。4)将剩下的矩形放置于 I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII 8 个区域的空档处,如果能将全部待放置矩形放置完毕,则算法结束,输出成功放置,否则,输出未成功放置。

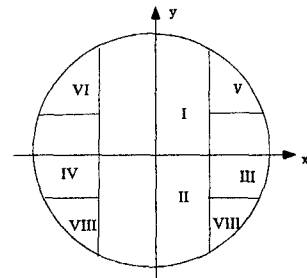


图 1 分步放置策略对应的区域

在各个步骤中,每次放置矩形时,先根据系统的临时质心动态地选择待放置区域,使得系统质心始终在系统中心附近。在步骤 1)中记下放置待布局的矩形设备前系统的临时坐标为  $(\bar{e}_1, \bar{e}_2)$ , 根据系统质心的纵坐标确定布局区域:若  $\bar{e}_2 > 0$ , 则选择将待放置矩形放置于 II, 使得系统质心向下偏移;如果  $\bar{e}_2 < 0$ , 则选择将待放置矩形放置于 I, 使得系统质心向上偏移;如果  $\bar{e}_2 = 0$ , 选择将待布局的矩形放置于 I 或者 II 的原则为:选择放置待布矩形之后系统临时包络半径较小的放入。类似地,步骤 2)根据系统临时质心的横坐标来确定放置区

域,只需将步骤1)中的 $\bar{e}_2$ 换成 $\bar{e}_1$ ,相应地将I换成III,II换成IV。步骤3)是根据系统临时质心所在的象限来确定放置区域,如系统的临时质心位于第三象限,则选择将待放置的矩形放置于V,使得系统质心向第一象限偏移。步骤4)是对剩余的空档做最后的填充,其在I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII中选择放置待布局的矩形之后承重板包围半径最小的区域放置。

对于选定的区域,结合该区域的形状,采用类似于BLF算法放置规则放置矩形设备。如果选择区域I为待放置的区域,则采用BLF算法的放置所选矩形,即将矩形尽量放置在区域I的bottom-left角上;类似地,若选择布局区域为II,则将矩形尽量放置在区域II的top-right角上面;在III中将所选矩形放入区域III的left-bottom的角上面;在IV中将所选矩形放入区域IV的right-top的角上面;在V中采用类似于BLF算法放置方式,将所选矩形放入区域V的bottom-left的角上面;在VI中将所选矩形放入区域VI的bottom-right的角上面;在VII中将所选矩形放入区域VII的top-right的角上面;在VIII中将所选矩形放入区域VIII的top-left的角上面。

也就是,本文通过对承重板进行适当分解,根据系统的质心偏移情况人工选择适当的区域,再在该区域采用上述定位方法放置矩形,从而在保证静平衡量的前提下可以得到较紧凑的布局。

### 3.2 人工策略和人工蜂群算法结合的混合算法

蜂群的智能模型包含4个基本要素:食物源、侦查蜂、引领蜂、跟随蜂;3种基本行为:搜索食物源、为食物源招募蜜蜂、放弃食物源。人工蜂群算法中,蜜蜂群由引领蜂、跟随蜂和侦查蜂3种角色的蜜蜂组成。算法初始时刻,一个食物源对应一个引领蜂,跟随蜂等待,引领蜂寻找食物源,它们对各自的食物源进行领域搜索,以适应度高的原则选取食物源,完成该搜索之后,带回相关的信息传递给跟随蜂,然后跟随蜂按照概率的大小选择自己的食物源。如果产生被引领蜂和跟随蜂丢弃的食物源,则和此食物源对应的那只引领蜂成为侦查蜂,由侦查蜂产生新解代替被丢弃的食物源。蜜蜂采蜜的过程也就是搜索最优解的过程。蜜蜂的基本行为是搜索食物源、评价食物源和放弃食物源。食物源的价值由适应值函数体现,适应值是算法的判决函数,直接决定优化的方向。整个系统的目标是求解适应值函数的最优解。

人工蜂群算法优化排序函数中设备短边及质量的权重 $\alpha, \beta, \gamma$ ,按照分阶段分区动态人工策略求解上述问题,所得包围圆半径的大小依赖于参数 $\alpha, \beta, \gamma$ 的选择,不同的 $\alpha, \beta, \gamma$ 得到的包围圆半径的大小不同。为了求得每个布局最佳的参数选择,这里采用人工蜂群算法对参数 $\alpha, \beta, \gamma$ 做优化。群体个数为 $L$ ,每个解(食物源的位置)表示为向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$ ,其中 $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}$ 分别表示 $\alpha, \beta, \gamma$ 的值。 $R(x_i)$ 为 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 取 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$ 得到的包围圆半径。算法步骤如下:

1)初始化每个解 $x_{ij}, i=1, 2, \dots, L, j=1, 2, 3$ 。

2)计算每个解的适应值 $f(x_i) = R(x_i)$ ,其中 $R(x_i)$ 为取 $(\alpha, \beta, \gamma)$ 为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$ 时按 $g(E_k)$ 的值非减排序选择矩形设备,并且结合3.1节的人工设计策略方法放置矩形设备,得到的承载板半径。

3)每个引领蜂产生新解 $v_{ij} = x_{ij} + \gamma_j(x_{ij} - x_{kj})$ ,其中 $k, j$ 随机选定, $\gamma_j$ 是 $[-1, 1]$ 上的随机数,这个步长可以适当地减

小。求每个 $v_i$ 的适应值 $f(v_i)$ 。

4)进行贪婪选择。如果 $f(x_i) > f(v_i)$ ,则 $x_i = v_i$ ,否则 $x_i$ 不变。

5)求每个 $x_i$ 的适应值 $f(x_i)$ ,用式(6)分别求概率。

$$p_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{k=1}^n f(x_k)} \quad (6)$$

6)跟随蜂根据概率 $p_i$ 重新选择食物源,并进行领域搜索产生新解 $v_i$ ,同步骤4),进行贪婪选择。计算每个 $x_i$ 的适应值 $f(x_i)$ ,记录到目前为止最好的解。假设 $s$ 小于循环次数 $H$ ,则重新运行步骤3)。

7)通过 $H$ 次循环后,观察是否有解被丢掉,如果有,侦查蜂按照式(7)生成新的解。

$$x_i = x_{\min} + \mu(x_{\max} - x_{\min}) \quad (7)$$

式中, $\max, \min$ 表示集合 $\{1, 2, \dots, n\}$ 中除去 $i$ 后的最大元素和最小元素, $\mu$ 为0和1之间的随机数。

8)如果 $\text{cycle} < \text{最大循环次数}$ ,则转步骤2)。

## 4 数值试验和仿真分析

本文采用3组矩形布局物,待布入矩形件个数分别为20、50、100,把本文提出的混合算法与其它两种元启发式算法:蚁群算法(ACO)、粒子群算法(PSO)的计算结果进行比较。该算例在CPU为Inter(R) Core(TM)2 Duo CPU E7200 @ 2.53GHz, 2.00GBDDR内存的微机上用C++语言实现,为了便于比较,计算时间均已折算到主频为166M的微机机上。

该次仿真实验中,萤火虫个数 $L=10$ ,包括3只引领蜂、4只侦察蜂和3只跟随蜂,迭代次数为100次。以计算时间、包围半径和空间利用率作为衡量算法性能的标准。表1为仿真试验的结果,图1、图2分别给出了ACO算法和本文算法在算例3中最好结果的布局图。

表1 各种算法性能比较

算例	算法	包围半径最大值	包围半径最小值	平均包围半径	时间(s)	空间利用率
1	PSO	30.217	23.182	27.058	87.65	0.576901
	ACO	35.712	31.928	32.596	138.00	0.340639
	本文算法	20.553	17.636	19.192	17.56	0.813562
2	PSO	225.378	179.520	196.312	352.71	0.325691
	ACO	280.722	265.728	272.282	451.72	0.031434
	本文算法	48.057	40.679	42.961	89.78	0.837962
3	PSO	396.372	297.126	353.226	623.12	0.562982
	ACO	610.723	585.722	598.967	1265.43	0.073976
	本文算法	115.235	82.569	95.361	256.16	0.879681

从表1中3个算例可以看出,若仅仅采用元启发式算法求解这种布局问题,当矩形设备的规模不是很大的时候,例如算例1,得到的问题的空间利用率最高达到0.576901,而当矩形件规模增大时,算例2、3得到问题空间利用率便十分低下了,最高仅为0.562982(算例3, PSO算法)。这两种算法不仅空间浪费严重,而且搜索时间长。而采用本文算法在时间和空间利用率上求解效果有了明显的提高。3个算例结果中最低的空间利用率为0.813562(算例1, 本文算法),最高为0.879681(算例3, 本文算法)。从算例1到算例3的空间利用率对比来看,问题规模越大,本文算法的空间利用率越好,例如算例1较少布局物的最高空间利用率为0.813558,而算例3这

(下转第265页)

go, Illinois, USA, 1979:498-507

[2] Pham T Q, van Vliet L J. Separable bilateral filtering for fast video preprocessing[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo. 2005

[3] Weiss B. Fast median and bilateral filtering[J]. ACM Transactions on Graphics, 2006, 25(3):519-526

[4] Durand F, Dorsey J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3):257-266

[5] Pairs S, Durand F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(1):24-52

[6] Fattal R, Agrawala M, Rusinkiewicz S. Multiscale shape and detail enhancement from multi-light image collections[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3):51

[7] 李凡, 刘上乾, 秦翰林. 自适应双边滤波红外弱小目标检测方法[J]. 光子学报, 2010, 39(6)

[8] Fleishman S, Drori I, Cohen-Or D. Bilateral mesh denoising[C]//

Proc. ACM SIGGRAPH. San Diego, CA, July 2003:950-953

[9] Jones T R, Durand F, Desbrun M. Non-iterative feature-preserving mesh smoothing[C]//Proc ACM SIGGRAPH. San Diego, CA, July 2003:943-949

[10] Xiao J, Cheng H, Sawhney H, et al. Bilateral filtering-based optical flow estimation with occlusion detection[C]//Proc. European Conference on Computer Vision. Vol. 1, Graz, Austria, May 2006:211-224

[11] Zhang M, Gunturk B K. Multiresolution bilateral filtering for image denoising[J]. IEEE Trans. Image Processing, 2008, 17(12):2324-2333

[12] Zhang M, Gunturk B K. Compression artifact reduction with adaptive bilateral filtering[C]//Proc. SPIE Electronic Imaging. vol. 7257, San Jose, CA, 72571A, 2009

[13] Yang Q X, Tan K H, Ahuja N. Real-time O(1) bilateral filtering[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D C, IEEE Computer Society Press, 2009:557-564

(上接第 228 页)

样布局物较多的空间利用率为 0.879681。

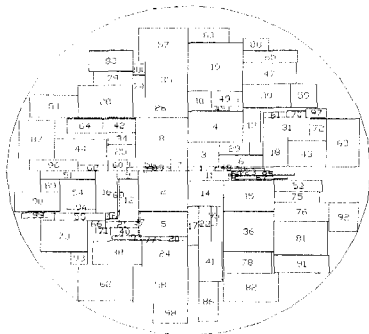


图 1 ACO 算法在算例 3 中的最好布局

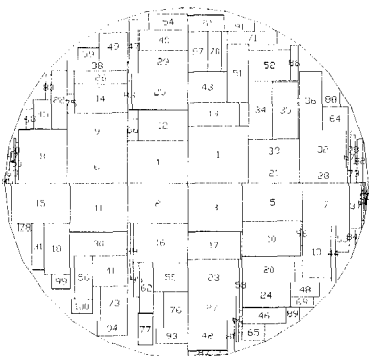


图 2 本文算法在算例 3 中的最好布局

**结束语** 本文针对复杂工程布局问题,提出了一种人机交互的混合算法,通过对算例进行数值计算和分析比较,验证了本文提出的算法是可行和有效的。本文提出的人机交互的混合算法充分发挥了人机各自的特长,相对现有的仅仅用元启发式算法求解此类工程布局的问题,从计算时间到解的质量都有明显的优势,而且较稳定。而且,本文为如何求解复杂工程布局问题和如何实现人机合作的问题都提供了一种很有效的方法或途径,为带平衡约束的不规则设备的布局求解提供了一种新的方法,该方法可以推广到任意不规则设备的布局问题中。针对任意结构的复杂工程布局问题,是我们下一步的工作。

## 参 考 文 献

[1] 杨敏,王刚,刘璟,等.用双目标加权遗传算法解决网络磁盘阵列系统下校验散布布局优化问题的研究[J]. 计算机科学, 2005, 32(5):73-75

[2] 韩国栋,肖庆辉,张帆.可重构系统中硬件任务布局布线算法研究[J]. 计算机科学, 2011, 38(11):291-295

[3] Gehring H, Bortfeldt A. A parallel genetic algorithm for solving the container loading problem[J]. International Transactions in Operational Research, 2002, 9(4):497-511

[4] 张德富,彭煜,朱文兴,等.求解三维装箱问题的混合模拟退火算法[J]. 计算机学报, 2009, 32(11):352-357

[5] Teng H F, Sun S L, Liu D Q, et al. Layout optimization for the objects located within a rotating vessel—a three dimensional packing problem with behavioral constraints[J]. Computers & Operations Research, 2001, 28(6):521-535

[6] 钱志勤,滕弘飞,孙治国.人机交互的遗传算法及其在约束布局优化中的应用[J]. 计算机学报, 2001, 24(5):553-559

[7] 于洋,查建中,唐晓君.基于学习的遗传算法及其在布局中的应用[J]. 计算机学报, 2001, 24(12):1242-1249

[8] 李宁,刘飞,孙德宝.基于带变异算子粒子群优化算法的约束布局优化研究[J]. 计算机学报, 2004, 27(7):897-903

[9] 刘建,黄文奇.利用改进的微分进化算法求解带平衡约束的圆形 packing 问题[J]. 信息与控制, 2006, 35(1):103-107

[10] 寇艳红,张其善,李先亮.车载 GPS/DR 组合导航系统的数据融合算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(3):264-268

[11] Huang W Q, Chen M. Note on: An improved algorithm for the packing of unequal circles within a larger containing circle[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 50(3):338-344

[12] 陈希,王宁生.基于遗传算法的车间设备虚拟布局优化技术研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2004, 34(5):627-631

[13] 曾明华,冯恩民.基于改进遗传算法的布局优化子问题[J]. 运筹与管理, 2005, 14(1):13-18

[14] 涂鹏,王星华,蒋红斐.基于遗传算法的道路平面线形优化设计[J]. 华东公路, 2007(1):10-12

[15] 许项东,程琳.城市道路单行系统布局优化的双层规划模型和混合算法[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(10):180-187

[16] 裴胜玉,周永权,罗淇方.求解约束优化问题的混合粒子群算法[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(4):5-8