

基于人工势场环境模型的布局定位设计优化方法

张 泓, 李爱平, 刘雪梅

(同济大学 现代制造技术研究所, 上海 201804)

摘要: 为了获得布局性能最优的设计方案, 提出以人工势场方法为基础的布局定位模型表示方法. 通过建立不同影响因素下的引力势场和斥力势场以及总势场叠加模型, 把布局定位问题转化为在人工势场中搜索势能极值位置问题. 采用栅格模型对布局空间的环境信息进行描述, 得到布局环境状态数字势场模型. 提出一种基于改进连续蚁群算法的布局定位算法, 进行布局定位方案求解. 通过对几种算法求得的布局设计方案对比分析, 验证了所提出的人工布局势场模型构建以及优化算法的有效性.

关键词: 布局定位设计; 连续蚁群算法; 人工布局势场; 栅格模型

中图分类号: TP 391

文献标识码: A

Layout Positioning Design Optimization Method Based on Artificial Potential Field Environmental Modeling

ZHANG Hong, LI Aiping, LIU Xuemei

(Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To obtain optimal performance layout design scheme, the layout positioning model representation method based on artificial potential field was proposed. And by creating the model of the attraction potential field, the repulsion potential fields and the total potential superposition field under different influence factors, the layout positioning design problem was transformed into searching for potential extreme position in artificial potential field. Then the digital potential field of the layout environment state model was obtained by using grid model to describe the layout space environment information. The layout positioning algorithm model based on improved continuous ant colony algorithm was presented to obtain layout positioning scheme. The comparison results of

layout design scheme solved in several algorithms reveal the effectiveness of the proposed artificial layout potential field model and optimization algorithm.

Key words: layout positioning design; continuous ant colony algorithm; artificial layout potential field; grids model

布局设计问题(packing problem)^[1]是给定一个布局空间和若干待布局物体, 将待布物满足必要的约束合理地摆放在空间中, 并达到某种最优指标. 布局问题是工业生产中常见的问题, 在货物运输、机械设计、大规模集成电路设计等领域有着广泛的应用. 该问题至今尚无有效的求解方法, 而现实中大量的实际问题又需要在较短的时间内给出可行解, 众多学者对此类问题进行了不断的研究.

文献[2]提出一种使用“左下策略”的快速、高效的多边形物体布局算法, 它采用占角优先策略并允许当前多边形布局物体与之前装填好的布局物体嵌套在一起搜索最优布局方案. 文献[3]通过引入一种几何模型把三维布局问题转化为有限枚举方案的选择, 从而提出一种高效的全局优化算法. 文献[4]借鉴中国古代谚语“金角银边草肚皮”的思路, 提出一种最大穴度优先的启发式算法. 通过对算例的求解, 在合理的时间内取得了优秀的测试结果. 文献[5]采用占角优先策略作为定位规则, 每次将布局块定于当前布局空间的左后部, 来完成不同大小的三维矩形物体的布局方案的确定, 并得出集装箱的利用率随原始布局长方体的体积和与集装箱体积的比值的变化趋势. 布局定位策略作为布局设计问题里的一个重要内容, 对布局设计方案的成败起着重要的作用. 本文提出基于人工势

收稿日期: 2009-12-07

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2008AA04Z113); 上海市“十五”重大科技攻关项目(071111005)

第一作者: 张 泓(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为机械设计智能优化. E-mail: zhanghong7921@gmail.com

通讯作者: 李爱平(1951—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为可重组制造. E-mail: limuzi@tongji.edu.cn

场的布局定位模型,采用栅格法的布局环境状态建模,运用连续蚁群优化算法进行求解得到良好的布局结果.

1 人工势场布局定位模型

Khatib 等首先提出一种虚拟方法——人工势场法^[6],并成功应用于移动机器人的路径规划,此方法是迄今为止应用最广泛的移动机器人路径规划方法之一.其基本思想是将移动机器人在环境中的运动视为一种在虚拟的人工受力场的运动.为了求解在布局优化设计过程中的布局物体最优位置,本文提出一种人工势场布局定位模型.定位优化求解的目的是使当前布局物体 i 能够由起始节点位置 P_{begin} 出发,由布局设计中心发出的吸引力吸引,安全躲避 m 个已布局物体的位置,最终到达使布局设计性能达到最优的目标节点位置 P_{end} .

建立如图 1 所示的人工布局势场模型,可以有效地对布局定位问题进行求解.人工势场由两部分组成:目标点在全局范围产生引力势场;障碍物在其周围产生斥力势场.布局空间里的设计中心位置(如图 1 中心的“吸引力场源”所示)产生吸引力势场,使未确定布局位置的布局物体受到吸引力作用,已确定布局位置的布局物体在自身一定范围内产生排斥力,如图 1 中的 A、B 两个已布局物体所示.当前布局物体 i 所在位置向量设为 $\mathbf{p}(\mathbf{p}=[x, y]^T)$,它在布局

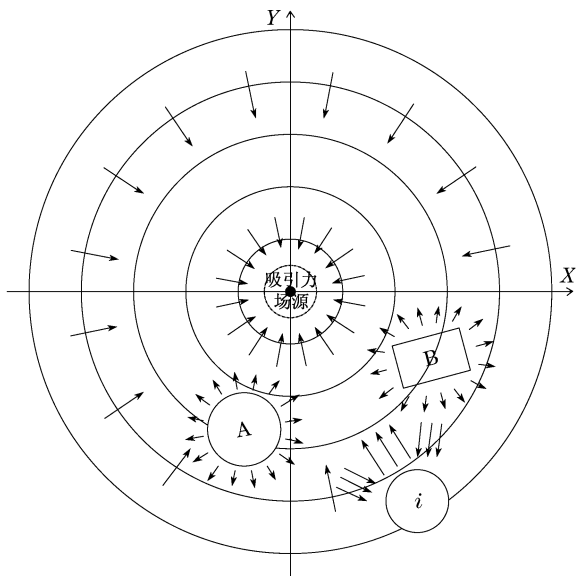


图 1 人工布局势场图

Fig.1 Layout schematic diagram based on artificial potential field

空间中任意位置的移动方向由当前位置起始,指向已布局物体产生的排斥力场和布局设计中心产生的吸引力场共同合成的总场强的方向.

根据场强叠加原理,布局物体在整个布局空间内所受的势场总场强定义如公式(1)所示.

$$\mathbf{D}_p = \sum_{i=1}^m \mathbf{D}_{\text{att}(i)}(\mathbf{p}) + \sum_{i=1}^n \mathbf{D}_{\text{rep}(i)}(\mathbf{p}) \quad (1)$$

式中: \mathbf{p} 为布局空间中的某一位置; \mathbf{D}_p 为位置 \mathbf{p} 处的势场总场强; $\mathbf{D}_{\text{att}(i)}(\mathbf{p})$ 为布局中心产生的吸引力场场强; $\sum_{i=1}^m \mathbf{D}_{\text{rep}(i)}(\mathbf{p})$ 为 m 个已布局物体生成的排斥力场场强.

吸引力势场函数如公式(2)所示

$$U_{\text{att}}(\mathbf{p}) = \frac{1}{2} k_{\text{att}} \varphi^2(\mathbf{p}, \mathbf{p}_g) \quad (2)$$

式中: k_{att} 是正比例吸引力增益系数; \mathbf{p}, \mathbf{p}_g 分别代表当前布局物体和定位目标位置在布局空间中的位置; $\varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_g) = \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_g\|$ 表示当前布局物体与目标位置之间的距离.相应的吸引力 \mathbf{F}_{att} 是吸引力势场函数的负梯度.当前布局物体所受到的吸引力如公式(3)所示.

$$\mathbf{F}_{\text{att}}(\mathbf{p}) = -\nabla U_{\text{att}}(\mathbf{p}) = -k_{\text{att}} \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_g\| \quad (3)$$

相应的排斥力势场函数如公式(4)所示.

$$\mathbf{U}_{\text{rep}}(\mathbf{p}) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{\varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)} - \frac{1}{\varphi_i} \right)^2 & \text{if } \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i) \leq \varphi_i \\ 0 & \text{if } \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i) > \varphi_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_{rep} 是正比例排斥力增益系数; $\varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)$ 表示空间点与已布局物体 i 的距离; φ_i 为第 i 个已布局物体的排斥力影响距离;这时当前布局物体所受到已布局物体 i 的排斥力 $\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{p})$ 如公式(5)所示.

$$\mathbf{F}_{\text{rep}}(\mathbf{p}) = \begin{cases} k_{\text{rep}} \left(\frac{1}{\varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)} - \frac{1}{\varphi_i} \right) \frac{\nabla \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)}{\varphi^2(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i)} & \text{if } \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i) \leq \varphi_i \\ 0 & \text{if } \varphi(\mathbf{p}, \mathbf{p}_i) > \varphi_i \end{cases} \quad (5)$$

当前布局物体所受到的合力如公式(6)所示,势能的叠加如公式(7)所示.

$$\mathbf{F}_t(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^m \mathbf{F}_{\text{att}(i)}(\mathbf{p}) + \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{\text{rep}(i)}(\mathbf{p}) \quad (6)$$

$$U_t(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_j U_{\text{att}(i)}(\mathbf{p}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_j U_{\text{rep}(i)}(\mathbf{p}) \quad (7)$$

式中: $U_t(\mathbf{p})$ 为总势能; a_j 和 b_j 分别为引力势能和斥力势能调整参数. 布局物体在势场中的受力图如图2所示, 在布局设计中心位置构造吸引力势场源 $D_{att(i)}(\mathbf{p})$ 和在障碍物周围构造排斥力势场 $D_{rep(i)}(\mathbf{p})$, 吸引力场发出的吸引力 F_{att} 吸引当前布局物体朝向布局设计中心方向运动, 排斥力场发出的排斥力 $F_{rep(i)}$ 阻止当前布局物体朝向已布局物体方向运动, 在这两种势场力共同作用下当前布局物体沿着合力 F_t 方向运动, 最终到达目标位置.

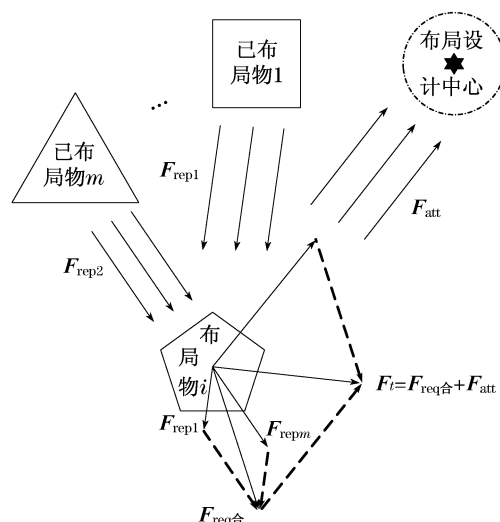


图2 布局物体在势场中的受力图

Fig.2 Layout objects force diagram in artificial potential field

2 基于栅格法的布局环境状态建模

为实现在无绝对坐标的条件下布局空间内布局状态的完全建模, 本文采用栅格建模的方法, 将布局状态空间分成若干个相同单元, 每个单元由基点信息进行识别.

设 LS(layout scope) 为布局物体在三维布局空间里的装填可行区域, 其中分布着 p 个已布局物体, 还有 q 个待布局物体要布置在其中. 在 LS 里建立笛卡尔坐标系, 布局空间几何中心为坐标原点, 以横向为 X 轴, 纵向为 Y 轴, 则有 LS 在 X, Y 方向的最大值分别为 x_{max} 和 y_{max} . 设布局物体在当前位置 (x_0, y_0) 时能自由移动的活动范围为 $\{(x, y) | x^2 + y^2 = r^2\}$, 以 s 为步长将 X, Y 分别进行划分, 由此可以生成一系列栅格, 每行的栅格单元数 $n_x = x_{max}/s$, 每列的栅格单元数 $n_y = y_{max}/s$. 一般设置 LS 可以为任意简单的几何形状, 在本文的布局设计问题中设

置为圆形. 每个栅格的几何中心就是该栅格单元的基点. 若栅格中心被已布局物体占据, 定义该栅格中的基点为“虚基点”, 否则, 为“实基点”. 其中已布局物体在布局空间中占据一个或多个栅格单元的位置, 当不满一个栅格时, 按基点信息进行识别. 当布局精度要求比较高时, 可以通过细化栅格来控制布局物体建模的精确程度. 每个栅格单元都有对应的坐标和序号, 而且坐标与序号也一一对应, 如图3给出了栅格单元坐标与序号之间关系的示意图. 定义左上角第一个栅格单元 g_1 的坐标为 $(1, 1)$, 序号为 c_1 , 第二个栅格单元 g_2 的坐标为 $(2, 1)$, 序号为 c_2 , 第 $(n_x + 1)$ 个栅格单元 g_{n_x+1} 的坐标为 $(1, 2)$, 序号为 c_{n_x+1} , 其余依次类推. 根据上述定义, g_i 的坐标 (x_i, y_i) 与序号 c_i 构成相互映射关系, 可以用公式(8)~(10)来表示.

$$c_i = x_i + n_x(y_i - 1) \quad (8)$$

$$x_i = \text{mod}(s_i/n_x) \quad (9)$$

$$y_i = \text{floor}(s_i/n_x) + 1 \quad (10)$$

式中: $\text{mod}(x)$ 为求余数运算函数; $\text{floor}(x)$ 为取整舍余运算函数.

基于栅格法的布局状态建模如图3所示, 其中 A, B, C, D 为已布局物体, R 为当前布局物体, 运动方向被离散化后, 它可以沿着栅格模型向 8 个方向移动, 坐标 $(1, 1)$ 位置给出栅格单元的基点信息, 此处为“虚基点”, 坐标 $(6, 4)$ 位置为“实基点”, 可以通过二维链表来记录布局环境当前状态.

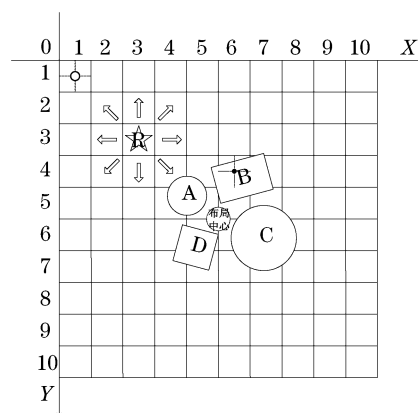


图3 基于栅格法的布局状态建模图

Fig.3 Layout state modelling diagram based on grid method

在人工势场法中, 已布局物体形成势能高点, 而目标点被设置成势能最低点. 能量场是数量场, 是标量, 只有大小, 没有方向, 但是能量和力之间存在一定的对应关系, 能量场中的任意一点, 都存在一个与该

点相对应的力,力是能量的负梯度,即: $\mathbf{F} = -\nabla E$,在梯度的方向上,方向导数取最大值,力的方向即为梯度方向,当前布局物体正是沿着合力指向的方向移动,最终行至相应的谷点(极值位置).图4是在布局空间中有5个已布局物体的布局环境状态数字势场表示图,其中 X, Y 坐标表示布局空间位置,单位为厘米; Z 坐标表示相应位置的势能值,单位为焦.图中引力势场产生的势能呈近似圆锥曲面形状递减,已布局物体产生的斥力势场生成势能凸起,阻止当前布局物体到达该位置.

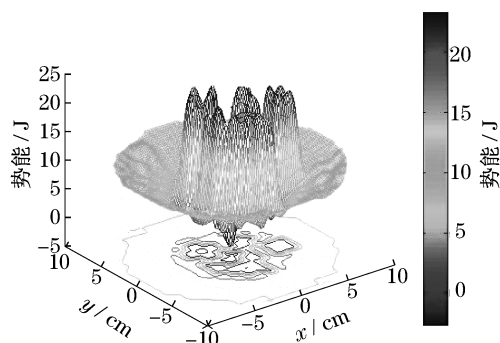


图4 布局环境状态势场图

Fig.4 Potential field maps of layout environment state

3 基于改进连续蚁群算法的布局定位问题求解方法

为了求解布局定位问题,提出一种建立在人工布局势场模型基础之上的连续蚁群算法的搜索方法来寻求最优解.蚁群算法(ant colony algorithm)是一种基于种群的启发式并行智能的进化算法,其实质是一种在解空间中搜索与状态最匹配的自适应方法^[7].本文结合在连续空间内的函数寻优问题求解,对蚁群算法进行改进后求解布局定位问题.带约束条件的函数优化问题的一般形式如式(11)所示.

$$\begin{aligned} \max Z &= f(X) \\ \text{s. t. } g_i(X) &\leq 0, i = 1, 2, \dots, m \\ X &\in [a, b] \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,设计变量 x_i 的定义域为 $[a_i, b_i]$, $a = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $b = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$; $f(X)$ 是目标函数; n 为变量的维数.

算法的搜索过程主要分两阶段:第一阶段是将给定个数的蚂蚁随机分布在设计变量定义域内划分好的子空间里进行一定范围的局部搜索,记录具有最好评价函数值的优秀蚂蚁,并进行信息素局部

更新;第二阶段是按转移概率移动各蚂蚁在不同子空间之间进行转移,并嵌入邻域搜索机制,寻找更好的解,然后按信息素更新规则进行全局更新.通过不断地重复上述过程,使算法能找到问题的最优解.

把所有蚂蚁在解空间内按一定方式做初始分布.先将函数 $f(X)$ 的解空间按一定的规则划分成子空间,当其为二维子空间时,设 $x = \{x_1, x_2\}$,其定义域分别为 $[a_1, b_1]$ 和 $[a_2, b_2]$,定义域均匀地划分为 $M \times N$ 个子空间 S_{ij} ($i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$),子区域的区间长度分别为: $E_{1A} = (b_1 - a_1)/M$, $E_{2A} = (b_2 - a_2)/N$.子空间 S_{ij} 的左右边界分别为 x_{1iL}, x_{2jL} 和 x_{1iR}, x_{2jR} ,其中 $x_{1iL} = a_1 + (i - 1)E_{1A}$, $x_{2jL} = a_2 + (j - 1)E_{2A}$, $x_{1iR} = a_1 + iE_{1A}$, $x_{2jR} = a_2 + jE_{2A}$,然后将所有蚂蚁按公式(12)随机分散在子空间 S_{ij} 内,在每一个子空间的中部至少要放置一个蚂蚁,此时的子空间即为该蚂蚁的初始空间.

$$x(i, k) = a(i) + \frac{b(i) - a(i)}{n} (i - 1 + \text{rand}) \quad (12)$$

式中:rand是 $[0, 1]$ 之间的随机数.对于每只蚂蚁个体 k ,在 t 时刻由节点 i 转移到节点 j 的状态转移概率 $p_{ij}^k(t)$ 可由公式(13)表示.

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [Z_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \phi} [\tau_{is}(t)]^\alpha [Z_{is}(t)]^\beta} & \text{if } j \in \phi \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\tau_{ij}(t)$ 为 i 和 j 之间的信息素强度; α 为信息素启发式因子,表示轨迹的相对重要性; $Z_{ij}(t)$ 为启发函数,定义其评价函数值为相应的目标函数值 Z_i ,并记 $Z_{ij} = Z_i - Z_j, \forall i, j \in X$; β 为期望启发式因子,表示能见度的相对重要性.

在局部搜索过程,每只蚂蚁 k 在自己的子空间内进行随机搜索,如果新的位置的函数值 $f(x_{i+1})$ 比原来目标函数值 $f(x_i)$ 大,则取新位置,否则保留原状态,其表达式如公式(14)所示.如果目标函数在子空间内函数值连续且单调,则可以很快得到该子空间的极值.

$$x_i = \begin{cases} x_{i+1} & f(x_{i+1}) > f(x_i) \\ x_i & \text{其他} \end{cases} \quad (14)$$

其中信息素的全局更新模型和局部更新模型采用基本蚁群模型.连续蚁群算法实现的流程如图5所示.

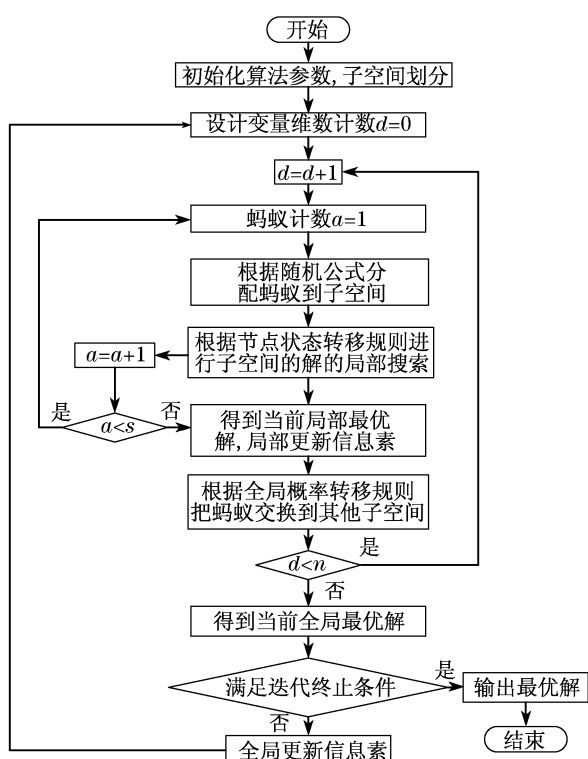


图5 连续蚁群算法求解布局定位流程图

Fig.5 Flowchart for solving the layout position based on continuous ant colony algorithm

4 算法测试及性能分析

求式(18)的最大值,其自变量取值范围为 $x, y \in [-1, 1]$, 有4个全局最大值2.118, 对称分布于 $(0.64, 0.64), (-0.64, -0.64), (0.64, -0.64), (-0.64, 0.64)$. 由于该函数存在大量局部极大值, 尤其是在中间区域有一取值与全局最大值很接近的局部极大值(2.077)凸台, 使得求解全局最优值难度

表2 4种算法求解布局设计的结果

Tab.2 Results of four algorithms in layout design

算法	布局性能指标					
	空间利用率 $F_r(X)/$ mm	转动惯量 $J(Z)/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	平衡度 $\theta(X)/$ rad	干涉量 $\Delta V/$ mm^3	静稳定性 $\delta_z/$ mm	计算时间 $t/$ s
PGA	499.923	259.274	-3.398×10^{-2}	0	4.843	3 070.3
PHAIA	494.494	253.210	-2.706×10^{-2}	0	3.645	2 864.5
VIAIA	473.558	253.028	2.564×10^{-2}	0	6.728×10^{-1}	1 987.0
ICACA	468.753	250.175	2.398×10^{-2}	0	4.951×10^{-1}	1 295.9

从表2可以看出,从各布局方案的空间利用率、转动惯量、平衡度、干涉量、静稳定性以及计算时间等各项指标对比可知,本文得到的布局方案的性能指标与其他结果相比有所提高.由于本文的算法使

较大.

$$f(x, y) = - \left[1 + x \sin(4\pi x) - y \sin(4\pi y + \pi) + \frac{\sin(6\sqrt{x^2 + y^2})}{6\sqrt{x^2 + y^2} + 10^{-15}} \right] \quad (18)$$

运用改进连续蚁群算法(ICACA)求解多峰函数的计算结果如表1所示.从表中结果可以看出,本文算法在求解多峰类型的函数时可以得到的最优目标值,获得实际最优值的比例也比较高.

表1 多峰函数的计算结果

Tab.1 Computed results of multimodal function

运算步数	得到的最优目标值	最优目标函数平均值	实际最优值	获得实际最优值的比例/%	平均值相对误差/%
200	2.118	2.105	2.118	82.5	2.7

5 算例分析

本文以多目标蚁群算法作为整体的布局优化设计求解框架,在进行单步搜索的过程中,使用本文所提出的改进连续蚁群算法求解.引用文献[8]中的算例,来验证本文所提出方法的有效性.其设计要求在布局空间内完成51个布局物体的方案设计,其中包括20个长方体和31个圆柱体,属于中等异构型算例.引用文献中所采用的并行遗传算法(PGA)、并行混合蚂蚁免疫算法(PHAIA)和可视化交互式蚂蚁免疫算法(VIAIA)进行布局优化求解.本文计算是在Pentium(R)4、主频3.0 GHz,内存1 GB计算机上运行50次取平均值,4种算法求解布局设计的对比结果如表2所示.

用了目标更明确的单步定位求解,使全局遍历的过程简化,加速了结果的收敛过程,使得计算时间优势显著发挥,明显低于其他算法用时,特别是在求解大规模复杂布局问题时可以得到良好的应用.表3给

出该算例求解得到的具体优化布局设计方案。

表 3 优化布局设计方案

Tab.3 Optimized layout design scheme

序号	布局物体的位置和方向				序号	布局物体的位置和方向				序号	布局物体的位置和方向			
	x/mm	y/mm	z/mm	α/rad		x/mm	y/mm	z/mm	α/rad		x/mm	y/mm	z/mm	α/rad
1	-5.9	333.8	620.0	-1.553	18	202.7	329.8	965.0	1.020	35	-311.7	-55.7	1 110.0	
2	82.8	-227.7	620.0	-1.222	19	0	-100.0	380.0		36	0	75.0	570.0	
3	330.2	-25.3	620.0	-0.076	20	0	100.0	380.0		37	285.0	100.0	400.0	
4	-208.5	-251.1	1 160.0	0.878	21	-198.8	-122.2	380.0		38	-309.3	-17.4	620.0	
5	267.4	-247.9	1 160.0	-0.748	22	157.9	150.3	640.0		39	0	-50.0	620.0	
6	-206.5	-267.5	620.0	0.913	23	-118.1	351.1	920.0		40	-88.1	125.8	1 160.0	
7	223.9	-189.2	915.0	-0.702	24	-141.7	-14.3	1 150.0		41	242.4	275.4	1 160.0	
8	-176.0	-264.7	915.0	0.984	25	29.1	-187.1	1 150.0		42	-111.8	0	400.0	
9	0	141.0	915.0	0	26	173.2	-200.0	410.0		43	132.4	-10.2	965.0	
10	-153.3	-21.2	645.0	0.137	27	173.2	0	410.0		44	0	60.0	1 135.0	
11	-189.0	-18.0	915.0	0.095	28	300.8	137.3	1 150.0		45	0	-45.0	1 140.0	
12	-242.7	187.1	915.0	-0.657	29	0	-100.0	940.0		46	302.3	163.7	600.0	
13	228.2	105.2	940.0	0.432	30	0	-300.0	400.0		47	154.3	-16.0	1 160.0 -103.0	
14	5.8	289.9	400.0	1.551	31	-193.2	-372.6	400.0		48	98.6	200.9	1 160.0 115.1	
15	114.5	-14.0	595.0	-0.122	32	-291.5	131.6	620.0		49	-198.8	122.2	410.0	
16	-122.8	152.1	595.0	0.892	33	-72.3	277.1	1 110.0		50	173.2	200.0	410.0	
17	-263.5	187.9	1 135.0	-0.619	34	340.5	-33.2	1 110.0		51	-386.7	39.8	940.0	

6 结论

从空间离散化、状态离散化等角度研究基于人工势场布局定位模型,模型主要考虑布局设计中心、已布局物体对当前布局物体的影响.采用人工势场机制,构建了不同影响因素的引力势场和斥力势场定义形式以及总势场叠加的形式,采用栅格模型对布局空间的环境信息进行描述,然后使用改进连续蚁群算法进行布局定位求解.算例结果验证了模型和算法的有效性.该模型能够将基于全局的宏观层面上的布局设计决策和基于邻域的微观层面上的单步决策有机地结合在一起,在不同设计要求下灵活运用.所提出的人工势场布局模型以及改进连续蚁群算法为解决复杂的布局寻优问题提供了一种新的方法,对工程设计决策等方面的工作具有重要的参考价值.

参考文献:

- [1] Dowsland K A, Dowsland W B. Packing problems [J]. European Journal of Operational Research, 1992, 56(1): 2.
- [2] Dowsland K A, Vaid S, Dowsland W B. An algorithm for polygon placement using a bottom-left strategy [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 141(2): 371.
- [3] Loris Faina. A global optimization algorithm for the three-dimensional packing problem [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 126(2): 340.
- [4] 何琨, 黄文奇. 求解三维矩形布局的最大穴度算法[J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(3): 92.
HE Kun, HUANG Wenqi. Maximum caving degree algorithm for three-dimensional rectangular packing [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2008, 36(3): 92.
- [5] 何大勇, 鄂明成, 查建中, 等. 基于空间分解的集装箱布局启发式算法及布局空间利用率规律[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(5): 367.
HE Dayong, E Mingcheng, ZHA Jianzhong. A heuristic approach to container loading problem based on space decomposition and a rule for usage rate of packing space [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2000, 12(5): 367.
- [6] Ge S S, Cui Y J. New potential functions for mobile robot path planning [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(5): 615.
- [7] 忻斌健, 汪镭, 吴启迪. 蚁群算法的研究现状和应用及蚂蚁智能体的硬件实现 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2002, 30(1): 82.
XIN Binjian, WANG Lei, WU Qidi. Research and applications of ant colony system algorithm and its hardware realization [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002, 30(1): 82.
- [8] SUN Zhiguo, TENG Hongfei. Solution approach to complex layout problem [C] // Proceedings of the 5th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing. Dalian: Dalian Univ Technol Press, 2002: 507 - 514.