

基于多目标改进蚁群算法的三维混合布局方案设计*

张泓 李爱平 刘雪梅

(同济大学现代制造技术研究所, 上海 200092)

【摘要】 针对三维混合布局优化设计求解问题,建立了以空间分割方法为基础的布局模型表示方法。对圆柱体布局物体和长方体布局物体,分别对应采用线性八叉树模型和栅格数据模型进行模型转换。提出了填充球组的布局模型表示方法,根据布局设计要求推导出布局优化的数学模型。通过构建有向布局序列把 TSP 问题转化为布局优化问题,使用适应度函数来处理布局求解过程中多目标优化问题,运用改进蚁群算法对其进行优化计算得到了 Pareto 最优解。通过对几种布局设计方案的对比分析,验证了布局建模方法和布局优化算法的有效性。

关键词: 布局设计 蚁群算法 适应度函数 填充球组

中图分类号: TP391; TP301.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0191-07

3-D Mixed-layout Conceptual Design Based on Multi-objective Improved Ant Colony Algorithm

Zhang Hong Li Aiping Liu Xuemei

(Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract

The layout model representation method based on space partition method was established to solve the 3-D mixed layout design. Linear octree and raster data model were used in conversion model for corresponding cylinders layout objects and cuboids layout objects respectively. The filled ball group was proposed for the layout model representation method, and on this foundation, the mathematical model of the layout optimization problem was obtained according to the layout design requirements. Then the TSP problem was transformed into the layout design problem by establishing directed layout sequence. Meanwhile, the fitness function was applied to deal with the multi-objective optimization in the course of the layout, and the improved ant colony algorithm was put into use to gain the Pareto optimum. At last, the effectiveness of the layout method for modeling and optimization algorithm was illustrated by the comparison of the layout design schemes.

Key words Layout design, Ant colony algorithm, Fitness function, Filled ball group

引言

产品的布局设计是产品概念设计阶段的一项重要工作。某些文献布局问题通常也被归类为装填问题、包装问题、结构配置问题、装箱问题、集装箱装运问题或空间布置问题^[1]。布局问题是应用背景较强的组合优化问题,例如板材排样、报纸版面布置、

停车场布局、服装裁剪下料、集装箱装箱、建筑布局等。即使是最简单的一维切段布局问题,也属于 NP 完全问题。装填布局问题就是指把一些具有已知形状的布局物体,按一定的要求(如不干涉,装填紧凑性等)合理地放置在有限空间布局容器中。

近年来,国内、外研究的布局问题多为二维问题,三维问题相对比较少,而所研究的问题多为不带

性能约束的布局问题,许多研究人员对此进行了大量的研究。

目前对具有性能约束的三维混合布局问题的研究相对还比较少,能有效解决布局问题的方法还很少见。原因是布局问题具有高度复杂性,该问题在数学上属于组合最优化和 NP 困难(NP-hard)或 NP 完全(NP-complete)问题,在工程上属于方案设计和复杂工程系统问题。面临主要困难是问题描述复杂,建模和求解困难;既要解决数学上组合爆炸问题,又要解决工程系统复杂性问题。本文根据三维布局问题的特点提出对应的模型表示方法和优化计算方法。

1 布局问题描述

带性能约束的三维布局问题是指将各种形状和大小的三维实体摆放在一个三维容器中,实体之间、实体和容器之间不干涉,满足某些性能约束且使某些目标最优。

布局设计数学模型主要包括:设计变量、目标函数和约束条件。每个布局物体的几何尺寸、质量、质心位置均已知,优化目标为求一个布局方案 $p = \{(x_i, y_i, z_i, \alpha_i | i = 1, 2, \dots, N)\}$ 和 $q = \{(x_j, y_j, z_j | j = 1, 2, \dots, M)\}$, p 代表长方体布局物体集合, q 代表圆柱体布局物体集合,其中: x, y, z 代表布局物体质心坐标,设布局物体为刚体,其质心与形心重合。所有物体可以在三坐标轴方向平动以及绕 Z 轴转动。 α_i 表示长方体布局物体位置的转角,用 X 轴正方向与长方体布局物体长边或其延长边夹角表示(逆时针方向为正),限定角 α_i 在 $(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 之间。在概念设计阶段布局设计的示意图如图 1 所示。

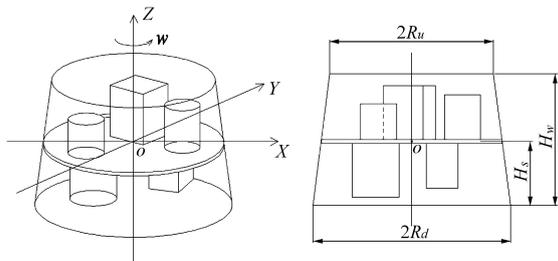


图 1 布局设计示意图

Fig. 1 Schematic diagram of layout design

2 基于空间分割方法的填充球组布局模型表示方法

目前对布局优化算法的研究取得了较多成果^[2],对布局模型表示方法的研究相对比较少,但布局模型表示方法的有效性又直接决定布局设计的

成败,因其目的主要是进行布局物体与布局物体之间、布局物体与布局空间边界之间的干涉检查,这是布局求解问题的主要困难之一。

文献[3]给出了一个三维实体的精确 CSG 模型转换到八叉树模型的综合算法,该算法能够满足三维实体自动化布局的需要。文献[4]提出了一种改进的八叉树方法及相应的碰撞检测算法,利用模拟退火算法求解了三维装填优化问题。文献[5]给出一种用于构造 Sphere-tree 的算法,通过求解得到了高符合程度的凸形和非凸形物体的近似表示模型。

目前有很多学者在研究单一圆柱体或单一长方体的布局问题方面都取得了很多成果,但在既包含圆柱体又包含长方体的混合布局方面的有效的布局方法不多,在此利用包围盒方法把概念设计阶段各布局物体简化为规则的长方体和圆柱体,采用线性八叉树方法和 3D 栅格方法分别构造圆柱体和长方体的离散布局模型,针对不同模型的特点给出不同的三维实体表示方法。

2.1 基于线性八叉树方法的圆柱体布局模型表示方法

八叉树方法是將指定的三维空间区域分成 8 个卦限(Octants),且在树上的每个非叶子节点处存储 8 个数据元素(体素)。每个元素称为体元,其对应的三维空间称为体素。在三维空间中,如果一个体素是空的,则该体元的类型用“Empty”表示;如果一个体素中的实体是同一种类型,就把它称为均质的,用“Full”表示;否则称为非均质的,用“Partial”表示。对于一个非均质的体素,必须把它再分成更小的 8 个卦限,节点相应的体元指向树中的下一层节点。每一整数组合序列 (I, J, K) 能唯一确定一个节点。图 2 以一个齿轮油泵为例给出利用 3 层的八叉树空间分割方法来表示三维模型的表示图,图 3 是图 2 对应的树状八叉树表示模型。

尽管采用了自适应空间分割,八叉树表示仍然

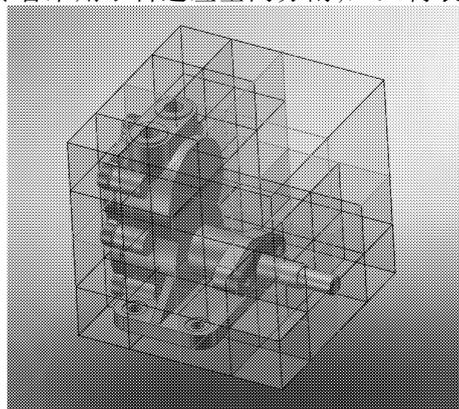


图 2 三维实体的八叉树表示图

Fig. 2 3-D entities in octree representing graph

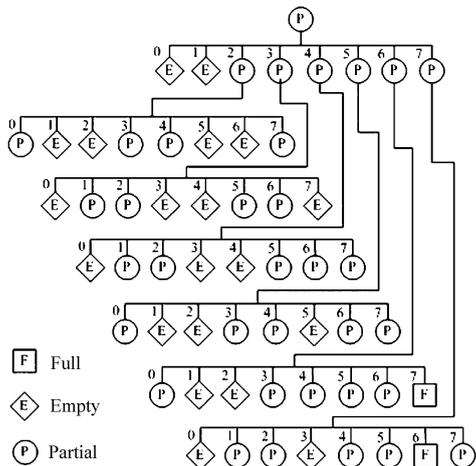


图 3 八叉树表示模型结构图

Fig. 3 Model structural graph in octree

需要较大的存储空间,在此构造线性八叉树的编码方案,以适应布局求解时的巨大计算量。其主要思想是采用数组来表示八叉树,因而把非线性的树状结构转化为线性结构的数组。给出八叉树某一节点坐标 (I, J, K) , 利用 $2^n \times 2^n \times 2^n$ 的空间矩阵可以求出这一节点的二进制编码, 表示为

$$\begin{cases} I = u_{n-1} \times 2^{n-1} + u_{n-2} \times 2^{n-2} + \dots + u_0 \times 2^0 \\ J = v_{n-1} \times 2^{n-1} + v_{n-2} \times 2^{n-2} + \dots + v_0 \times 2^0 \\ K = w_{n-1} \times 2^{n-1} + w_{n-2} \times 2^{n-2} + \dots + w_0 \times 2^0 \end{cases} \quad (1)$$

为求得线性八叉树的编码表示 $R = (f_{n-1}, f_{n-2}, \dots, f_{i+1}, f_i, f_{i-1}, \dots, f_0)$, 第 i 个编码位值可以由式(2)得到, 其中 $w_i, v_i, u_i \in (0, 1)$, 空间任一点在线性八叉树中的编码就是从线性八叉树根到叶子的路径值, 空间分辨率为 2^n 的线性八叉树上, 从根到任一叶子最大路径深度不超过 n , 即

$$f_i = 2^2 w_i + 2^1 v_i + 2^0 u_i \quad (i = 0, 1, \dots, n - 1) \quad (2)$$

三维实体模型的线性八叉树表示模型可以通过集合运算进行模型之间的合并和分解等运算, 以及通过相应的算法实现平移和旋转等动作, 但在运用启发式算法对三维布局问题的求解过程中这些性质很难被直接使用, 在此通过离散化方法把三维实体模型的线性八叉树表示模型转化为填充球组布局模型。布局物体之间、布局物体与布局空间边界的干涉判定可以分别通过判断球心之间的距离、球心位置与半径来确定。因此, 可以将任意形状布局物体的布局问题转化为填充球组布局这一基本问题。采用空间分割的方法将三维实体模型转化为相应的线性八叉树表示模型, 再利用填充球替代各个小立方体(图 4), 即用填充球组表示整个布局物体进行布局求解。由于同一布局物体对应的填充球组是一个有机的关联整体, 在布局

设计中只能保持该布局物体的整体刚性移动(即平动和转动), 也就是说定义该布局物体的所有填充球不能相互独立移动。因此, 填充球组模型表示方法为解决布局物体的布局优化设计在空间几何角度提供了通用、有效的设计模型。

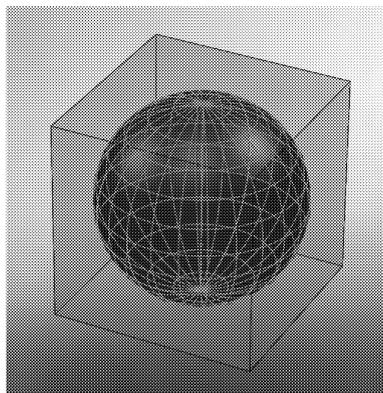


图 4 线性八叉树模型体元的填充球模型图

Fig. 4 Filling spheres model graph of linear octree model voxel

三维布局模型空间分割表示的划分精度与计算时间、存储空间是一对相互作用的矛盾, 要想得到一个几何精度比较高的填充球组模型就必须花费较长的计算时间和较大的存储空间, 通过计算求解发现当精度达到一定程度就对布局优化计算结果几乎没有影响, 在此给出填充球组模型的误差分析与控制方法, 定义的布局物体满足相对自身特征尺寸的相对误差

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\mu} = \frac{x - \mu}{\mu} \times 100\% \quad (3)$$

式中 ε ——每个布局物体满足相对自身特征尺寸的相对误差

δ ——绝对误差

x ——实际值 μ ——真值

布局物体外轮廓的分割精度越高, 填充球的数量就越多, 计算量也就越大。虽然高分割精度能得到一个很紧凑的布局, 但一个合适的分割精度得到的布局与高分割精度得到的布局拓扑形式是一样的。图 5 是 3 种由低到高精度等级下填充球组的模型表示图, 从图中可以发现随着分割精度的提高, 填充球组模型快速逼近真实的三维实体模型。按照分割精度要求仅限定布局物体的实际外轮廓特征尺寸, 确保得到有效填充球组模型并提高划分效率、减少填充球数量, 使得约束数量大大减少, 最终提高优化效率。采用上述误差定义的形式, 经测试发现 ε 通常取 $(0.01 \sim 0.05)$ 就可以满足一般的设计要求。

利用 Microsoft Visual C++ 7.0 进行三维布局模型的填充球组模型算法程序开发, 数据库系统采

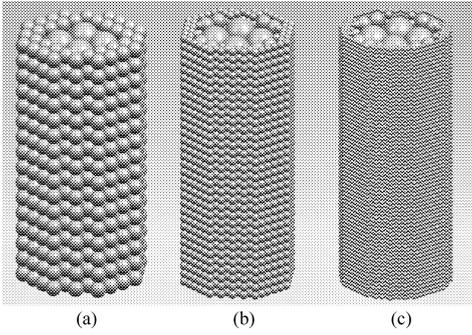


图5 圆柱体模型3种分割精度

Fig.5 Three separating accuracy of cylinder model

用 SQL Server 2005, 生成的圆柱体布局模型在 UG NX4 中直接自动生成(图6)。图6a是三维布局物体的包围盒模型,图6b是其对应的线性八叉树模型,图6c是对应的填充球组模型。

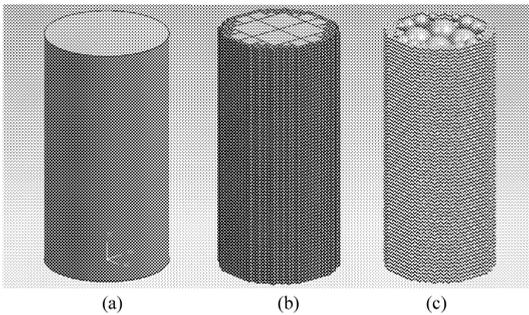


图6 圆柱体模型转换图

Fig.6 Cylinders model transition graph

2.2 基于栅格数据模型的长方体布局模型表示方法

由于长方体模型特征的特点和圆柱体有所不同,采用线性八叉树的模型空间分割方法也可以实现,但在此给出一种更为简单的模型空间分割方法——栅格数据模型,它可以将三维布局物体划分成规则的、体积相等的体元,栅格表达中,对空间实体的最小表达单位为一个单元或像素(Cell或Pixel),依行列构成的单元矩阵叫栅格(Grid),每个单元通过一定的数值表达方式(其元素值是0或1,0表示空,1表示对象占有)表示。由于这个结构存储数据没有任何压缩,存储空间浪费很大,计算速度也较慢,在此使用游程编码结构进行压缩编码,它的建立方法是:将栅格矩阵的数据序列 X_1, X_2, \dots, X_n , 映射为相应的二元组序列 $(A_i, P_i), i = 1, 2, \dots, k$, 且 $k \leq n$ 。其中, A 为属性值, P 为游程, k 为游程序号。对应的长方体模型转换图如图7所示。

通过模型转换后,布局设计要求中的不干涉约束: $\text{Int}F_i \cap \text{Int}F_j = \emptyset, (i \neq j)$, 可转换为求解两个布局物体的填充球组模型来解决,较多 $\|O_{m_i} O_{n_j}\| \geq r_{m_i} + r_{n_j}, O_{m_i} \setminus O_{n_j}$ 分别表示两个不同布局物体 m, n 的填充球组模型的任一球心坐标, r_{m_i}, r_{n_j} 分别表示对应

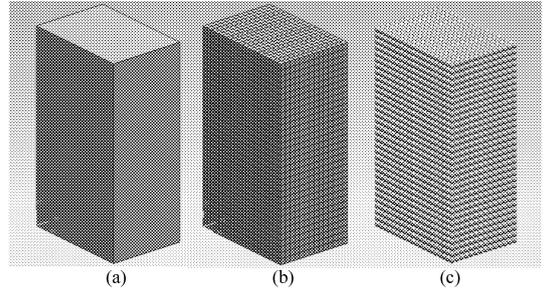


图7 长方体模型转换图

Fig.7 Cuboids model transition graph

球的半径。布局物体间的不干涉条件为

$$g_1(X) = r_{m_i} + r_{n_j} - \sqrt{(x_{m_i} - x_{n_j})^2 + (y_{m_i} - y_{n_j})^2 + (z_{m_i} - z_{n_j})^2} \leq 0 \quad (\forall i \in m, \forall j \in n) \quad (4)$$

式中 x, y, z ——填充球球心坐标

布局物体与圆柱形布局空间的不干涉条件为

$$g_2(X) = \begin{cases} \sqrt{x_i^2 + y_i^2} + r_i - R \leq 0 \\ z_i \pm r_i \leq H \end{cases} \quad (5)$$

式中 R, H ——圆柱形布局空间的半径、高度

静不平衡条件为

$$|X_m - \delta| = \left| \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - \delta \right| \leq 0 \quad (6)$$

$$|Y_m - \delta| = \left| \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - \delta \right| \leq 0 \quad (7)$$

$$|Z_m - \delta| = \left| \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i} - \delta \right| \leq 0 \quad (8)$$

式中 m_i ——第 i 个布局物体的质量

x_i, y_i, z_i ——第 i 个布局物体的质心坐标

δ ——静不平衡量的允许值

3 基于多目标蚁群算法的布局问题求解

蚁群算法(ant colony algorithm)是由意大利学者 Dorigo M 等,于20世纪90年代初期通过模拟自然界中蚂蚁集体寻径的行为而提出的一种基于种群的启发式仿生进化算法^[6]。蚁群算法最早用于解决著名的旅行商问题(traveling salesman problem,简称TSP),采用了分布式正反馈并行计算机制,易于与其他方法结合,并具有较强的鲁棒性。

将 m 个城市的 TSP 问题转化为 m 个布局物体的布局问题。决策的每一步,蚂蚁将选择一个布局物体,并求得其布局位置。当任一蚂蚁完成了 m 个

城市的遍历便得到了 m 个布局物体的一个布局方案,即一个有序数列 $S = \{P_0, P_1, \dots, P_m\}$,则布局优化问题可用有向图 8 表示。其中, P_i 表示每一步的决策选择, L_m 表示 m 个布局物体。

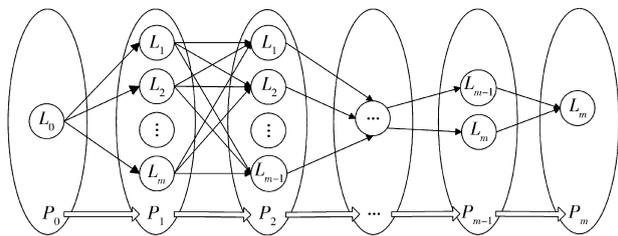


图 8 布局设计方案有向图

Fig. 8 Directed graph of layout scheme design

3.1 布局状态转移概率设置

对于任一蚂蚁来说,它选择下一个布局物体的可能性有多大,即布局状态转移概率的大小,主要是由各布局物体之间的信息素大小所决定的。布局物体之间留下的信息素量越大,蚂蚁就更有可能选择该布局物体进行布局。这里控制蚂蚁不会选择已经选择过的布局物体,并用禁忌表 tabu_k ($k = 1, 2, \dots, m$) 来记录蚂蚁 k 当前所选择过的布局物体的信息。在蚂蚁搜索布局物体的过程中,会根据各有向路径的信息素残余量和路径的启发信息来计算布局状态转移概率,这里用 $p_{ij}^k(t)$ 表示,即蚂蚁 k 在把布局物体 i 布置到布局空间后选择布局物体 j 进行布局的概率。

初始设置如下参数: $\tau_{ij}(t)$ 是 t 时刻装填序列上布局物体 i 与布局物体 j 之间的信息素残余量; $\eta_{ij}(t)$ 是布局物体 i 与布局物体 j 之间的期望启发函数,即优先装填的希望程度,在此用一个评价函数——可容度来定义,即

$$\eta_{ij}(t) = \frac{V_i}{V_j} \quad (9)$$

它主要表示在选择布局物体 j 装入后对当前布局状态影响的评价。 V_i 是布局物体 j 装填进入之前的布局空间圆柱形最小包络体积, V_j 是指把布局物体 j 装填进入布局空间之后的圆柱形最小包络体积。

蚂蚁 k 将选择 $[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta$ 值达到最大的布局物体,并以概率 q 选择最大可能的布局物体来装填,由此布局状态转移概率为

$$p_{iu}^k(t) = \begin{cases} \arg \max_{u \in \text{allowed}_k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}(t)]^\beta & (q \leq q_0) \\ p_{ij}^k(t) & (q > q_0) \end{cases} \quad (10)$$

其中, q 是在 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数, q_0 是一

个参数 ($0 \leq q \leq 1$), $p_{iu}^k(t)$ 为根据式 (11) 给出的概率分布所选出的一个随机变量。

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ik}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta} & (j \in \text{allowed}_k) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (11)$$

参数 q_0 决定了利用先验知识与探索新路径之间的相对重要性,当一只位于城市 r 的蚂蚁选择下一个将要装填到布局空间的布局物体 s 时,它选取一个随机数 $0 \leq q \leq 1$ 。如果 $q \leq q_0$,则根据先验知识(根据式(10))选择最好的决策方案,否则按式(11)概率选择转移布局物体。

3.2 信息素更新

为了进一步避免算法结果陷入局部最优解,本文在信息素更新环节采用了信息素局部更新与全局更新相结合的方式求解。

在布局序列构建的过程中,蚂蚁每选过一个布局物体,将调用式 (12) 进行该条边上的信息素更新。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \omega)\tau_{ij}(t) + \omega\tau_0 \quad (12)$$

其中, ω 是常数满足 $0 < \omega < 1$,在此取 0.1, τ_0 是信息素量的初始值,它可以由 $1/n$ 求得,其中 n 是布局物体的总数。信息素局部更新可以使其他蚂蚁再次选中当前走过的路径的概率减小,从而增加选择未选择过的方案的机会,使算法避免陷入停滞状态。

为了避免残留信息素过多引起残留信息淹没启发信息,在每只蚂蚁完成对所有 m 个布局物体的一次序列选择后,要对残留信息进行更新处理。其表达式为

$$\tau_{ij}(t+m) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (13)$$

其中, $\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t)$, $\tau_{ij}^k(t)$ 表示蚂蚁 k 在本次循环中在节点 i 和节点 j 之间的路径上留下的信息素,其计算方法可以根据式 (14) 而定。

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\Psi}{L_k} & ((i, j) \in S_{\text{best}}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (14)$$

式中 Ψ ——信息素强度(常数),它在一定程度上影响算法的收敛速度

L_k ——蚂蚁在本次循环中所走的路径的总长度(适应度值)

S_{best} ——所有蚂蚁本次全局遍历得的最优解

3.3 基于多目标求解的布局序列解优化

在求得的可行装填布局序列解中,需要设定相关的目标函数,求得最优解,见式 (15)。以布局设

计要求中的动不平衡性、空间利用率和最小布局空间尺寸来评价布局方案。

$$\min f(X) = \{f_1(X), f_2(X), f_3(X)\} \quad (15)$$

$$f_1(X) = J_Z = \sum_{i=1}^n m_i(x_i^2 + y_i^2) \quad (16)$$

式中 J_Z ——整个布局系统绕 Z 轴的转动惯量

x_i, y_i ——第 i 个布局物体的质心坐标

$$f_2(X) = \eta = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{v_i} \quad (17)$$

其中

$$v_i = \pi h r_{\max}^2$$

式中 η ——系统空间利用率

v_i ——第 i 个布局物体的体积

v_i ——整个圆柱形布局空间的体积

h ——圆柱形布局空间在 Z 轴方向上的长度

$$f_3(X) = \max(R_i) \quad (i=0, 1, \dots, n) \quad (18)$$

式中 R ——圆柱形布局空间的最大半径

上述的目标函数集合组成多目标优化问题,各目标之间往往相互冲突,因此多目标问题是使各个目标同时为最优,通常称为 Pareto 最优解。多目标优化问题数学模型为给定决策向量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, 得 $\min F(\mathbf{X}) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)\}^T$, s. t. $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ 。其中 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 表示决策问题的 n 个决策变量, $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ 是 n 个决策函数; X 表示所有可行方案组成的集合, 一般用一组等式或不等式约束条件来表示, 记多目标优化问题的可行域为 Φ 。决策系统提供的可行解集 $V = \{x_1, x_2, \dots, x_m\} \in \Phi$ 。 $x_i (i=1, 2, \dots, m)$ 为参考解, 它是各目标函数的最优解或最优解的邻近点^[7]。

在此引入 maximin 适应值函数^[8]来求解上述多目标优化问题。假设有 n 个目标值, m 只蚂蚁。首先每只蚂蚁与自身以外的所有蚂蚁进行比较, 比较项目就是 n 个目标值。在得到的 n 个差值间选取其中最小的一个, 如式(19)所示。然后, 在蚂蚁 i 与其他 $m-1$ 只蚂蚁的比较值中选取一个最大的作为该蚂蚁的 maximin 适应值, 如式(20)所示。如果适应值小于 0 (求最小值为例), 即说明该蚂蚁 i 与其他 $m-1$ 只蚂蚁的比较中, 均有某一目标值优于其他蚂蚁。对于这 m 只蚂蚁, 该蚂蚁可以认为是非劣最优解。这个性质使得 maximin 适应值函数成为一个求解多目标优化问题的有效的工具。

$$f_{\min} = \min_{i=1, 2, \dots, n} \{f_i(u) - f_i(v)\} \quad (19)$$

$$f_{\maximin} = \max_{j=1, 2, \dots, m; u \neq v} \{\min_{i=1, 2, \dots, n} \{f_i(u) - f_i(v)\}\} \quad (20)$$

综上所述, 本文所述的布局序列规划步骤如下:

① 选定随机初始布局物体, 并使蚂蚁按循环顺序分布在初始零件上。② 初始化蚁群算法参数: 蚂蚁数为 m , 循环次数 t , 信息素强度 t_0 (为常数), 信息素增量 $\Delta\tau_{ij}(t)$ 。③ 蚂蚁 $k=1$ 时, 建立禁忌表 $\text{tabu}_k (k=1, 2, \dots, m)$, 并记录蚂蚁 k 当前所选择过的布局物体的信息。④ 按照布局状态转移式(10)、(11)选择下一个布局零件, 并修改禁忌表。⑤ 当蚂蚁经过一次布局状态转移后, 按照式(12)对该路径上的信息素进行局部更新, 并令 $k=k+1$ 。⑥ 判断 k 是否大于等于蚂蚁总数 m , 若是则进入下一步, 否则回到步骤④。⑦ 判断此次迭代最优布局序列解是否优于之前的最优解, 从而得到当前最优解, 然后按照式(13)、(14)对信息素进行全局更新。⑧ 判断是否满足循环停止条件, 若满足条件, 则输出 m 只蚂蚁的最优布局序列, 否则回到步骤③。

4 算例分析

为验证本文给出方法的有效性, 引用文献[9]中的算例, 其设计要求是要在布局空间内完成 26 个布局物体的方案设计, 其中包括 16 个长方体和 10 个圆柱体布局物体。该文献采用遗传算法(GA)、粒子群算法(PSO)、基于子种群节点的金字塔模型粒子群算法(PPSO)和带启发式规则的协同进化粒子群算法(CEPSO_HR)等 6 种方法进行布局优化(见表 1“算法”栏)。本文计算是采用混合多目标蚁群算法(MO-ACO), 在 Pentium(R)4、主频 3.0 GHz, 内存 1 GB 计算机上执行, 每种算法分别随机计算 50 次, 7 种算法求解布局设计的对比结果如表 1 所示。

表 1 中的 7 种算法对比结果可以看出, 在优化结果的平均性能指标中, 引文的 6 种算法都无法使得干涉量达到最小值 0, 而本文由于采用了填充球组布局模型表示方法, 可以使布局方案的不干涉量达到最优; 由于本文的布局设计变量给出了布局物体的角度 ϕ 定位, 而且采用的优化算法(MO-ACO)在更广泛的范围内进行了高效的搜索, 使得布局方案的其他性能指标也有明显地提高。在表 2 中给出该算例求解得到的优化布局设计方案结果。

从表 2 中的结果可以看出, 本文采用的布局模型建模方法以及优化算法在混合布局求解中, 使得长方体布局物体的布局设计方案更加精确, 从而提高了布局方案的包络圆半径之和等性能指标。通过上述的算例对比分析表明, 本文给出的布局设计算法在求解布局优化问题时表现出了良好的计算性能, 得到了优秀的布局设计方案。

表 1 7 种算法求解布局设计的结果

Tab.1 Results of seven algorithms in layout design

算法	平均性能指标				最好性能指标			
	包络圆半径之和/mm	不平衡力 /N	不平衡力偶 /N·mm	干涉量 /mm	包络圆半径之和/mm	不平衡力 /N	不平衡力偶 /N·mm	干涉量 /mm
GA	2 798.27	10.57	2 582.14	1 717	2 751.03	0.13	3.02	0
PSO	2 792.46	14.88	7 043.24	178	2 665.73	0	0	0
CCGA	2 780.47	8.83	2 960.76	878	2 673.29	0.04	0.79	0
CEPSO	2 731.75	10.64	3 817.91	294	2 627.99	0	0	0
PPSO	2 692.09	2.24	2 327.92	28	2 559.96	0	0	0
CEPSO_HR	2 677.96	0.70	1 274.08	1	2 541.06	0	0	0
MO-ACO	2 589.49	0.39	1 219.31	0	2 483.35	0	0	0

表 2 优化布局设计方案

Tab.2 Optimized layout design scheme

序号	布置位置和方向				序号	布局位置和方向				序号	布局位置和方向			
	x/mm	y/mm	z/mm	φ/rad		x/mm	y/mm	z/mm	φ/rad		x/mm	y/mm	z/mm	φ/rad
1	-529.4	1 003.6	-250	1.085	10	0	146.0	160	0	19	947.5	-142.7	215	
2	805.1	45.2	-315	1.514	11	-982.2	-98.8	100	0.099	20	-772.5	-324.4	150	
3	0.1	336.0	-380	0.001	12	459.4	-271.1	105	-1.037	21	73.89	-796.1	170	
4	-372.9	868.8	165	-0.405	13	-446.0	-331.3	90	0.931	22	-712.2	571.7	50	
5	-752.2	41.0	-320	-1.516	14	-701.8	-879.6	-320		23	-539.3	-823.6	200 0.579	
6	390.0	97.3	180	1.326	15	470.3	902.1	-365		24	-663.0	554.0	150 -0.875	
7	-521.0	147.8	225	-1.294	16	129.1	520.4	170		25	0	-336.0	200 0	
8	559.4	-746.8	80	-0.642	17	625.3	-795.8	-350		26	0.3	-400.0	-200	
9	57.9	-1102.1	-280	-0.052	18	978.7	692.3	-250						

5 结束语

构造了以空间分割方法为基础的布局模型表示方法,将填充球组的方法引入到三维布局优化设计问题,建立了三维布局优化问题的数学模型,为布局优化计算提供了有力的帮助。在此基础上,构建了

多目标改进蚁群算法,采用适应度函数对多个布局性能指标进行处理,得到了优化布局设计方案。本文提出的这种分析方法为建立布局求解数学模型、避免布局物体之间发生干涉并解决复杂的布局寻优问题提供了一个新的思路,对工程结构系统的轻量化、紧凑优化设计具有参考价值。

参 考 文 献

- 1 Cagan J, Shimada K, Yin S. A survey of computational approaches to three-dimensional layout problems [J]. Computer-aided Design, 2002, 34(8): 597 ~ 611.
- 2 查建中,唐晓君,陆一平. 布局及布置设计问题求解自动化的理论与方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(8): 705 ~ 712.
Cha Jianzhong, Tang Xiaojun, Lu Yiping. Survey on packing problems [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2002, 14(8): 705 ~ 712. (in Chinese)
- 3 戴佐,袁俊良,查建中,等. 一种基于八叉树结构表达的三维实体布局启发式算法[J]. 软件学报, 1995, 6(10): 629 ~ 636.
Dai Zuo, Yuan Junliang, Cha Jianzhong, et al. An octree-based heuristic algorithm for three dimensional packing[J]. Journal of Software, 1995, 6(10): 629 ~ 636. (in Chinese)
- 4 Cagan J, Degentesh D, Yin S. A simulated annealing-based algorithm using hierarchical models for general three-dimensional component layout [J]. Computer-aided Design, 1998, 30(10): 781 ~ 790.

(2) 根据刀位对螺旋角的影响规律,不改变刀 削滚比对齿长曲率进行修正。
盘直径,数控铣齿机可通过实时地改变径向刀位、切

参 考 文 献

- 1 Litvin F L. Gear geometry and applied theory [M]. New Jersey: Prentice Hall, 1994.
- 2 王小椿,吴联银,李彬,等. 基于空间运动学的传统机床与 Free-form 型机床运动转换方法的研究[J]. 机械工程学报, 2001,37(4):93~98.
Wang Xiaochun, Wu Lianyin, Li Bin, et al. Study on kinematic transformation from traditional machine tool to Free-form ones based on spatial kinematics [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(4):93~98. (in Chinese)
- 3 吴训成,毛世民,吴序堂. 点啮合齿面主动设计研究[J]. 机械工程学报,2000,36(4):70~73.
Wu Xuncheng, Mao Shimin, Wu Xutang. Study on the function-oriented design of point-contact tooth surfaces [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000,36(4):70~73. (in Chinese)
- 4 吴训成,陈志恒,胡宁. 曲线齿锥齿轮点啮合齿面主动控制加工技术[J]. 机械工程学报,2005,41(10):97~101.
Wu Xuncheng, Chen Zhiheng, Hu Ning. Active control manufacturing technology for the point-contact tooth surfaces of spiral bevel and hypoid gears [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005,41(10):97~101. (in Chinese)
- 5 李敬财,王太勇,范胜波,等. 基于数字化制造的螺旋锥齿轮齿面误差修正[J]. 农业机械学报,2008,39(5):174~177.
Li Jingcai, Wang Taiyong, Fan Shengbo, et al. Error corrections of spiral bevel gear tooth surface based on digitized manufacturing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5):174~177. (in Chinese)
- 6 王志永,于水琴,曾韬. 机床误差对螺旋锥齿轮齿形的影响规律[J]. 农业机械学报,2009,40(6):199~202.
Wang Zhiyong, Yu Shuiqin, Zeng Tao. Effect of machine tool errors on the tooth form of spiral bevel gears [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6):199~202. (in Chinese)
- 7 Wang Peiyu, Fong Zhanghua. Mathematical model of face-milling spiral bevel gears by modified radial motion (MRM) method [J]. Mathematical and Computer Modeling, 2005, 41(11~12):1307~1323.
- 8 张华,邓效忠. 四轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变性价铣齿研究[J]. 中国机械工程,2007,18(14):1652~1655.
Zhang Hua, Deng Xiaozhong. Modified-roll method study on 4-axis CNC spiral bevel gear machine [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(14):1652~1655. (in Chinese)
- 9 张华,邓效忠. 二轴数控螺旋锥齿轮铣齿机变性价铣齿研究[J]. 农业机械学报,2007,38(8):137~140.
Zhang Hua, Deng Xiaozhong. Modified-roll method study about 2-axis CNC spiral bevel gear machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8):137~140. (in Chinese)
- 10 Litvin F L. Local synthesis and tooth contact analysis of face-milled spiral bevel gears, NASA CR 4342 [R]. Chicago: NASA Lewis Research Center, 1991.
- 11 方宗德,杨宏斌. 准双曲面齿轮传动的轮齿接触分析[J]. 汽车工程,1998,20(6):350~355.
Fang Zongde, Yang Hongbin. Tooth contact analysis of hypoid gear drives [J]. Automotive Engineering, 1998, 20(6):350~355. (in Chinese)

(上接第 197 页)

- 5 Bradshaw G, O'Sullivan C. Adaptive medial-axis approximation for sphere-tree construction [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(1):1~26.
- 6 Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1):53~66.
- 7 王义强,关雪松,陶俐言,等. 基于遗传算法的数字制造加工方案多目标优化[J]. 农业机械学报, 2008, 39(4):142~146.
Wang Yiqiang, Guan Xuesong, Tao Liyan, et al. Genetic algorithm-based multi-objective optimization for machining scheme selection [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4):142~146. (in Chinese)
- 8 Xiao N, Bennett D A, Armstrong M P. Using evolutionary algorithms to generate alternatives for multi-objective site-search problems [J]. Environment and Planning, 2002, 34(1):639~656
- 9 张宝. 粒子群算法及其在卫星舱布局中的应用研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.
Zhang Bao. Particle swarm optimization algorithm for satellite module layout optimization [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)