

文章编号:1000-6893(2008)06-1554-09

三维组件布局建模与优化设计

张卫红¹, 高瑜¹, 方亮¹, 陈裕泽²

(1. 西北工业大学 现代设计与集成制造教育部重点实验室, 陕西 西安 710072)

(2. 中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

Three-dimensional Component Layout Modeling and Optimization Design

Zhang Weihong¹, Gao Yu¹, Fang Liang¹, Chen Yuze²

(1. The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(2. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

摘要: 从工程应用背景出发,在研究现有组件布局问题的基础上,将 Sphere-trees 概念引入三维装填布局优化设计问题。采用有限球族进行非规则任意形状三维组件外形轮廓的统一描述,而非直接采用组件的实际外形轮廓进行装填布局设计,建立了任意形状组件装填优化设计干涉检查的系统性计算方法。通过几个典型算例,验证了该方法与序列二次规划法相结合解决有限空间内组件布局优化问题的适用性。

关键词: 优化设计;三维组件布局;有限球族近似;非规则任意形状;包络球

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A

Abstract: Based on engineering application requirements and the state of the art of component layout design, a new layout modeling method is proposed in this article by introducing the "sphere-trees" concept into 3D component layout design problems. This method employs the approximation concept of the finite-sphere method (FSM) rather than the real configuration of the components to provide a unified description of irregular configurations of any 3D component in the packing design. Such an approximation transforms the original problem into a basic packing problem of components with sphere shapes. This makes it possible to carry out the interference computing between components of arbitrary configurations in a systematic way. Some typical numerical examples are considered. The proposed layout modeling method is shown to be suitable when it is applied together with the sequential quadratic programming (SQP) optimization algorithm to solve the design problems under consideration.

Key words: optimization design; 3D component layout; finite-sphere method; irregular shape; envelope sphere

装填布局问题^[1]就是指把一些具有已知形状的待布物,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,此类简单布局问题,称为不带性能约束的布局设计问题。工程实践中存在着大量复杂布局设计问题,如卫星、导弹舱体等多体布局结构系统,还需要考虑各种性能约束,如结构刚度、稳定性、不平衡性、惯性、振动、温度场、电磁场等,称为带性能约束的布局设计问题。

布局问题属于 NP 完全问题^[2],求解布局问题,目前主要有以下几种算法:数学规划法、启发式算法、图论法、模拟退火法、遗传算法、粒子群算

法、人工智能、神经网络和人机结合等^[3]。大量研究人员把精力放在它的寻优算法上,对于布局模型的研究却为数不多。张旭等^[4-5]构造了二、三维带有性能约束的装填布局优化模型,但是布局物体往往局限于单一矩形、长方体等简单几何形体,装填空间也仅限于比较简单的形状。对于复杂工程结构系统布局设计问题,组件与装填空间几何形状的复杂性和任意性涉及到大量非线性约束和大量不可形式化的约束,因此,对于任意形体的表达和形体间的干涉检验一直是此类问题中的难点。对于任意组件间的干涉判断,目前国内外已有许多方法,通过逐步分解实体模型,将模型划分为层次结构,将复杂几何体之间的干涉判断转化为简单几何体的干涉计算。Quinlan^[6]提出了分层球族树近似模型来计算非凸物体之间的距离以判断两者是否干涉。Meagher^[7],Samet^[8]与戴佐

收稿日期:2007-10-12; 修订日期:2008-03-03

基金项目:国家自然科学基金(10676028);航空科学基金(2006ZA53006);陕西省科技计划项目(2006K05-G25);西安应用材料创新基金(XA-AM-200705)

通讯作者:张卫红 E-mail: zhangwh@nwpu.edu.cn

等^[9]利用八叉树数据结构表示任意形状的三维实体和三维布局空间。戴佐等^[10-11]给出了干涉检验的八叉树方法。Cagan 等^[12]提出了一种改进的八叉树方法及相应的碰撞检测算法求解三维装填优化问题。Cameron^[13]提出了基于 S-界值的树方法。Grignon 等^[14]用改进的遗传算法研究了考虑平衡性约束的三维装填问题。近期,Aladahalli 等^[15]用一种基于目标函数的模式搜索算法(OPS)研究了带转动惯量性能约束的三维布局问题。

O'Sullivan^[16]和 Palmer^[17]用分级包络球族近似模型提出了一种应用于动画仿真系统中的满足用户感知的碰撞与反应算法。本文采用 O'Sullivan 和 Palmer 等提出的 Sphere-trees 近似概念,将其引入到装填布局优化领域,即使用不同半径的球来近似几何体以进行优化过程中不同实体间的动态性干涉检验。针对卫星、火箭设备布局特点和运行稳定性需求,以带转动惯量约束的三维空间装填布局为研究对象,用有限球族对非规则任意形状组件外形与装填区域轮廓进行统一描述,与 Sphere-trees 方法不同的是,有限球族方法(FSM)没有采用树的概念,不需要在迭代过程中将包络球细分,而是进一步将不同组件的包络球球心之间的距离转化成约束函数,以此推导灵敏度,用基于梯度的确定性优化算法进行求解。从而建立了一个系统化、具有可操作性的装填分析和设计模式。

1 数学模型

1.1 有限球族近似方法

复杂工程系统装填布局问题的目的是在满足无干涉约束、边界约束以及其他性能约束的情况下找到组件在装填空间中的最佳位置,需要进行组件与组件之间、组件与装填区域边界之间的干涉检查,这是组件布局寻优问题的主要困难。

众所周知,球是一个凸轮廓封闭形状,空间中任意形状的物体均可用一个球所包络,而球形组件的装填布局问题是最基本的问题,组件之间、组件与装填区域边界的干涉与否可以分别通过判断球心之间的距离、球心位置与半径大小来确定。因此,可以将任意形状组件的装填布局问题转化为球形组件装填这一基本问题。但是,用单个球形包络曲面近似,尤其对于凹形物体,会导致真实外形轮廓的严重失真与放大。为了解决这一问题,将每个被装填组件的外轮廓分片用一定数量、

不同大小的包络球球面替代,如图 1 所示。将不规则组件划分成若干小立方体,直到满足指定的精度,再利用球体包络各个小立方体,从而近似整个组件。对于具有复杂几何外形的组件,可将其划分成若干立方体及其他形状的凸多面体。因此,从几何角度上讲,有限包络球族近似方法为解决三维空间中组件的装填布局优化设计提供了通用有效的分析模型。

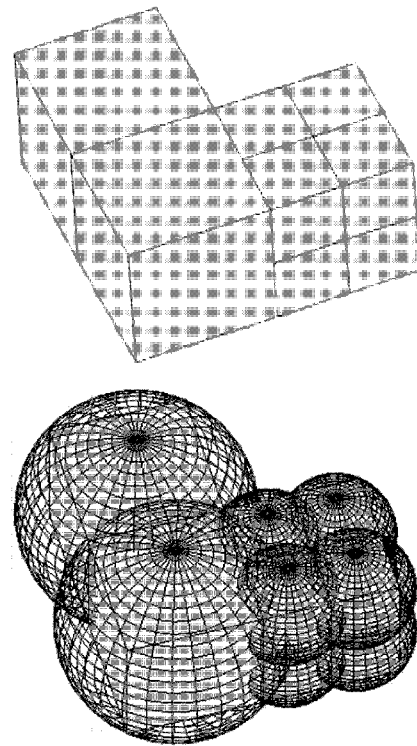


图 1 有限包络球族近似组件

Fig. 1 FSM approximation of components

同样,对于非规则凸装填区域的边界,可以分片用球面近似。图 2(a)和 2(b)为凸装填区域边界的模拟近似, $L_k (k \in I_t = \{1, 2, 3, \dots, t\}, t$ 为边界分片数目)表示实际边界曲面,用半径为 $R_k (k \in I_t)$ 的球 $S_k (k \in I_t)$ 的球面的一部分对应近似实际边界 L_k ,从而把组件与边界间的关系转化为球与球的关系。而图 2(a)和 2(b)所示为两种不同的边界近似方法。图 2(a)所表示的模拟近似方法得到的近似装填区域为所有球 S_k 围起来的有界封闭区域 F_D ,图 2(b)所表示的模拟近似方法得到的近似装填区域为所有球在空间中相交的区域 F_D 。显然 R_k 越大,就越逼近实际边界,近似精度就越高。但是对于凹形装填区域,如图 2(c)和 2(d)所示的 L 型区域,若采用同样的两种球面近似方法,则会导致相当大一部分可行区域变为不可行区域。所以对于如图 3 所示的凹装填区域,

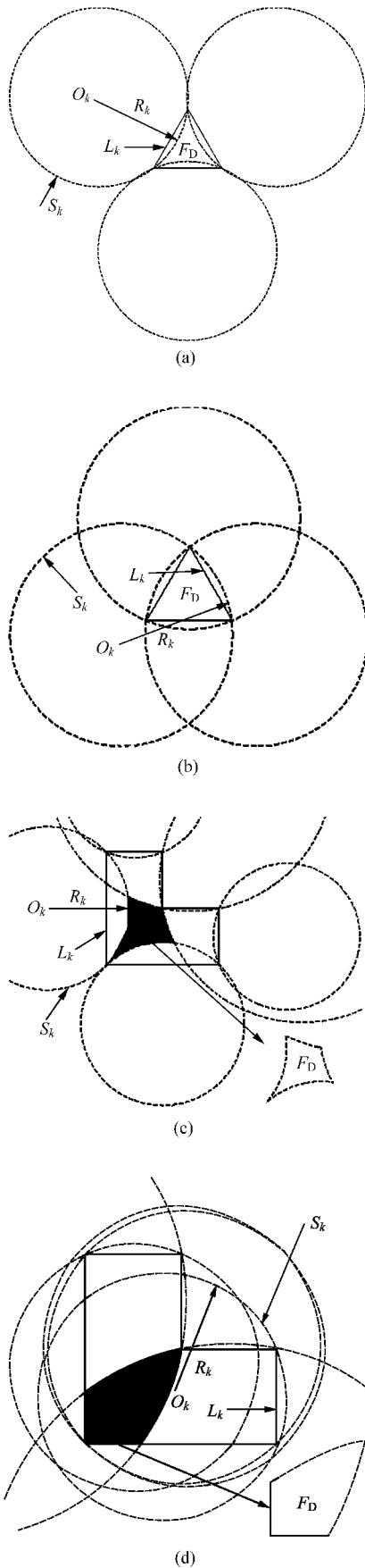


图 2 装填区域边界的有限球族近似
Fig. 2 FSM approximation of boundaries

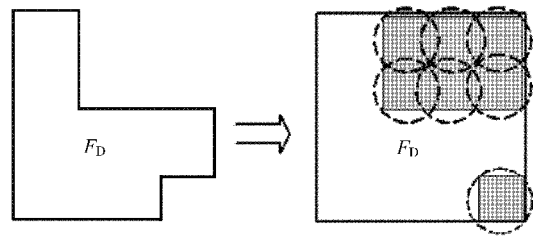


图 3 装填区域凹边界的近似
Fig. 3 Approximated concave boundaries

解决办法是将其填补成凸装填区域, 寻优时将填补部分视为位置不变的固定组件, 这些固定组件同样用包络球族近似, 通过添加其他待装填组件与固定组件之间的非干涉约束, 保证组件始终处于凹形设计区域内。

1.2 组件布局设计模型的建立

考虑在装填容器中放置 n 个组件, $p_i (i \in I_n = \{1, 2, \dots, n\})$ 表示第 i 个组件在空间中占有的区域, 根据 1.1 节提出的近似方法, 假设 $F_i (i \in I_n)$ 为实际组件 p_i 的近似球族模型在空间中占有的区域。若 F_i 由 $m_i (i \in I_n, j \in I_{m_i} = \{1, 2, \dots, m_i\})$ 为近似第 i 个组件 p_i 的第 j 个包络球。 o_{ij}, r_{ij} 分别为 s_{ij} 的球心与半径, 在所建立的坐标系下, c_{ij} 为 o_{ij} 的坐标。并进一步称 $s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ij}, \dots, s_{im_i}$ 为同一族包络球, 即近似组件 p_i 的第 i 族包络球, 并有 $F_i = \bigcup_{j=1}^{m_i} s_{ij}$, 如图 4 所示。

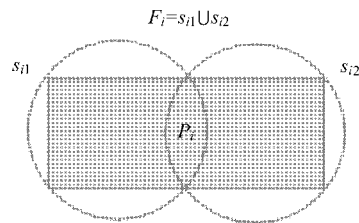


图 4 组件的有限球族近似示意图
Fig. 4 Illustration of approximated components

(1) 设计变量

由于同一组件对应的包络球是一个有机关联的整体, 在寻优过程中该组件的同一族包络球不能独立相对移动, 只能保持整体刚性移动(平动、转动)。因此在寻优过程中的同一时刻, 对于同一族包络球, 球心位置矢量绕 x 轴、 y 轴和 z 轴旋转的角度是相同的, 分别记为 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i (i \in I_n, \text{且 } 0 \leq \alpha_i, \beta_i, \gamma_i \leq 2\pi)$ 。所以, 对组件 p_i , 取包络球 s_{i1} 的

球心坐标 $c_{i1} = [x_{i1} \ y_{i1} \ z_{i1}]^T$ 以及 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为布局优化设计变量,同族包络球的位置可由它们计算得出。

(2) 约束

设 $q_i = [c_{i1}^T \ \alpha_i \ \beta_i \ \gamma_i]^T \in \mathbf{R}^6, Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n] \in \mathbf{R}^{6n}$, 则称 Q 为一布局方案。对于给定的布局方案 Q , 它的各种约束为

① 相容性约束: $\bigcup_{i=1}^n F_i \subset F_D$

对于非规则凸装填区域的边界,不妨设有 t 个球 S_k 的球面近似边界。 O_k, R_k 分别为 S_k 的球心与半径, C_k 为 O_k 的坐标。

若用图 2(a)方法近似边界,则把相容性约束转化成组件近似模型 F_i 与球 S_k 之间的不干涉约束,即:对 $\forall s_{ij}$, 有 $\|\overrightarrow{o_{ij}O_k}\| \geq r_{ij} + R_k$ 。其中: $\|\overrightarrow{o_{ij}O_k}\|$ 为 o_{ij} 与 O_k 之间的距离,如图 5(a)所示。

若用图 2(b)方法近似边界,则有

$$\bigcup_{i=1}^n F_i \subset F_D \Leftrightarrow \bigcup_{i=1}^n (\bigcup_{j=1}^{m_i} s_{ij}) \subset \bigcap_{k=1}^t S_k$$

即:对 $\forall s_{ij}$, 有 $\bigcap_{k=1}^t (\|\overrightarrow{o_{ij}O_k}\| \leq R_k - r_{ij})$, 如图 5(b)所示。

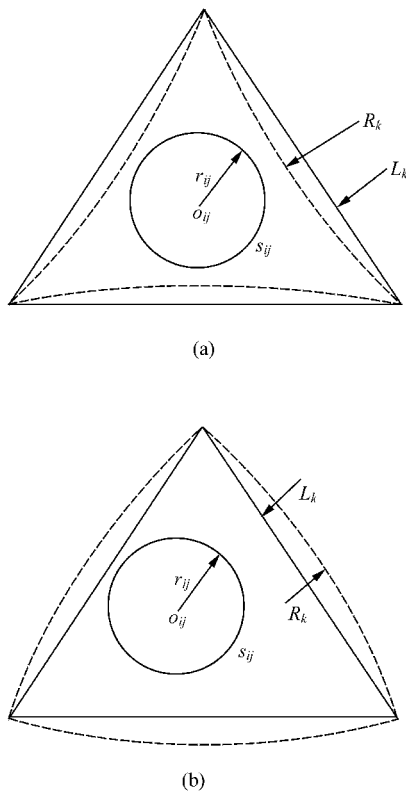


图 5 相容性约束示意图

Fig. 5 Constraints between boundary and components

② 组件不干涉约束

对 $\forall s_{ip}, s_{jk} (i \neq j, i, j \in I_n, p \in I_{m_i}, k \in I_{m_j})$, 有 $\|\overrightarrow{o_{ip}o_{jk}}\| \geq r_{ip} + r_{jk}$, 如图 6 所示。

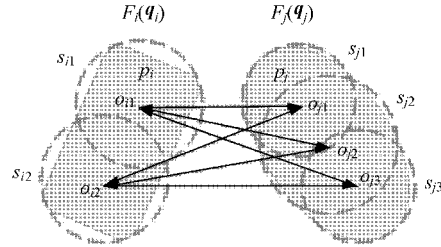


图 6 不干涉约束示意图

Fig. 6 Illustration of non-overlapping constraints

(3) 目标函数

① 最小系统转动惯量设计

假设各个组件质量均匀,寻找各组件的位置,使各组件相对于装填区域内定轴(记为 S 轴)的转动惯量之和尽可能地小。

设 $M_i(q_i)$ 为第 i 个组件在布局方案 q_i 下相对于 S 轴的转动惯量,则目标函数表达式为

$$M(Q) = \sum_{i=1}^n M_i(q_i)$$

包络球只用于寻优过程的干涉判断,在计算组件绕 S 轴的转动惯量时, $M_i(q_i) = \int r^2 dm$, 其中: r 为第 i 个实际组件的质元 dm 到转轴 S 的垂直距离。

② 最小装填空间设计

装填区域的体积 $V(Q)$ 最小化。

(4) 优化数学模型

用图 2(a)方法近似边界时,限制变量在某一范围内变化,就可以防止组件与近似边界的球不干涉,却不在装填区域内的情况发生。如对于两种边界近似方法,均可限制 c_{i1} 在装填区域的外接长方体区域 Γ 内变化。

① 模型 I: 在相容性与不干涉约束下求 $M(Q)$ 最小的装填布局优化问题为

$$\text{Find } Q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n] \in \mathbf{R}^{6n}$$

$$\min M(Q) = \sum_{i=1}^n M_i(q_i)$$

$$\text{s. t. } \|\overrightarrow{o_{ij}O_k}\| \geq r_{ij} + R_k, \text{ 或}$$

$$\bigcap_{k=1}^t (\|\overrightarrow{o_{ij}O_k}\| \leq R_k - r_{ij})$$

对 $\forall s_{ij}, S_k$, 有

$$\|\overrightarrow{o_{ip}o_{jk}}\| \geq r_{ip} + r_{jk}$$

对 $\forall s_{ip}, s_{jk}$, 有
 $c_{i1} \in \mathbf{F}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i \in [0, 2\pi]$ (1)

② 模型 II: 在相容性与不干涉约束下求 $V(Q)$ 最小的装填布局优化问题为

Find $Q = [q_1, q_2, \dots, q_n] \in \mathbf{R}^{6n}$
 min $V(Q)$
 s. t. $\| \vec{o_{ij}O_k} \| \geq r_{ij} + R_k$, 或
 $\bigcup_{k=1}^t (\| \vec{o_{ij}O_k} \| \leq R_k - r_{ij})$
 对 $\forall s_{ij}, S_k$, 有
 $\| \vec{o_{ip}O_{jk}} \| \geq r_{ip} + r_{jk}$
 对 $\forall s_{ip}, s_{jk}$, 有
 $c_{i1} \in \mathbf{F}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i \in [0, 2\pi]$ (2)

2 初始布局

在模型建立好以后, 采用序列二次规划 (SQP) 算法求解。文献[18]及数值计算经验均表明, 求解布局问题时, 布局的效率与初始布局密切相关。如果初始布局不当, 不同组件的包络球之间沿球心连线的干涉量过大, 则对下一步的布局寻优十分不利, 结果往往很不理想, 所以应尽量建立可行的初始布局方案。本文在寻优过程中引入松弛设计变量, 对组件几何无干涉约束进行松弛, 将代表各个组件的图元之间的距离拉大, 从而求得满足所有几何非干涉约束条件的可行解作为组件初始布局方案。

在已知组件形状参数的情况下, 进行布局优化时, 初始布局通常随机给出, 这样就无法保证布局优化的寻优效率。如图 7(a) 所示, 有 10 个待布组件: A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, 其中组件 A, B, C, D, E 分别用 1, 3, 3, 12, 20 个包络球近似, 而组件 F 与 A, G 与 B, H 与 C, I 与 D, J 与 E 形状一致, 且初始位置重合。如此随机给出的布局模式有组件位置重合的情况, 会影响之后的布局寻优, 因此引入松弛设计变量 $\gamma (\gamma \geq 0)$, 使

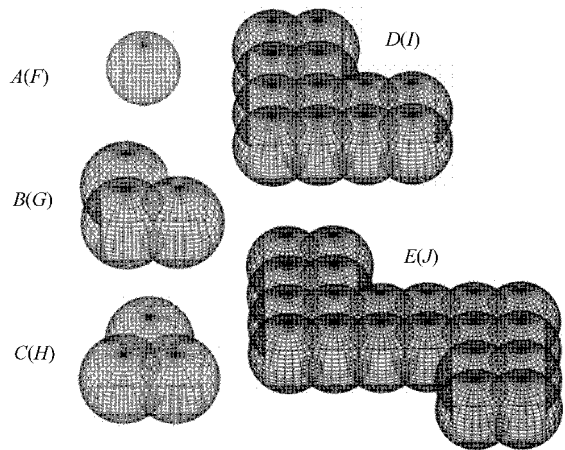
对 $\forall s_{ip}, s_{jk}$, 有 $\| \vec{o_{ip}O_{jk}} \| \geq r_{ip} + r_{jk} + \gamma$ (3)

同时最大化 γ , 从而将组件间的距离拉大, 使它们不再发生干涉, 形成一个可行的初始布局模式。对应的初始布局设计模型为

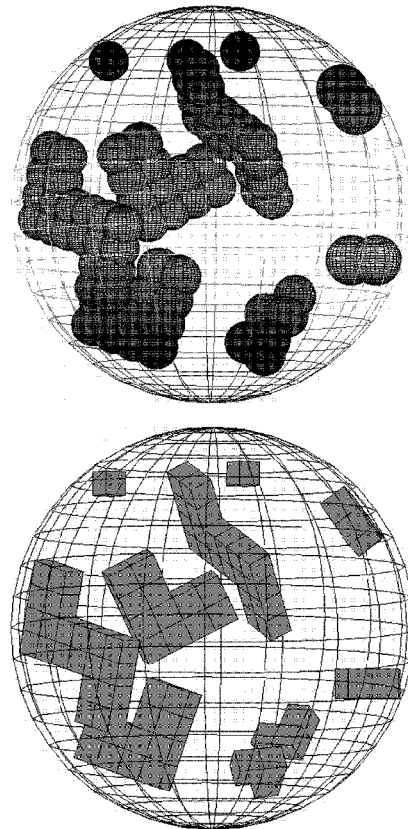
Find $\gamma, Q = [q_1, q_2, \dots, q_n] \in \mathbf{R}^{6n}$
 min $-\gamma$
 s. t. $\| \vec{o_{ij}O_k} \| \geq r_{ij} + R_k$, 或
 $\bigcup_{k=1}^t (\| \vec{o_{ij}O_k} \| \leq R_k - r_{ij})$

对 $\forall s_{ij}, S_k$, 有
 $\| \vec{o_{ip}O_{jk}} \| \geq r_{ip} + r_{jk} + \gamma$
 对 $\forall s_{ip}, s_{jk}$, 有
 $c_{i1} \in \mathbf{F}, \alpha_i, \beta_i, \gamma_i \in [0, 2\pi]$ (4)

图 7(b) 为在球形填充区域内, 不干涉约束为式(3)的情况下, 最小化 $-\gamma$ 的结果示意图。



(a) 10个待布组件



(b) 组件的初始布局模式

图 7 初始布局

Fig. 7 Original layout

无论实际装填区域的形状如何, 都可以先引入松弛设计变量得到一个高效的初始布局, 然后继续进行布局寻优。

3 算 例

3.1 最小装填空间设计

如图 8 所示,列举了 2 个形状相同的 L 形组件在长方体装填容器中的布局问题,算例用 SQP 算法实现。

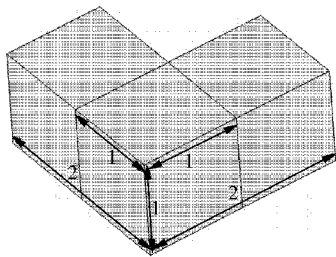


图 8 L 形组件
Fig. 8 L shape components

假设算例最原始的布局模式为 2 个 L 形组件重叠、位置完全相同,近似同一个 L 形组件的 3 个包络球的半径为 $r_{i1}=r_{i2}=r_{i3}=0.866 0, i \in \{1, 2\}$,所以图 9 也可以看做原始布局模式。长方体容器形心坐标为 $\mathbf{o} = [6.000 0 \quad 6.000 0 \quad 3.700 0]^T$,长、宽、高分别为:4.000 0, 4.000 0, 6.400 0。引入松弛设计变量得到图 10(a)分散的初始布局模式,用时 2.953 0 s。以最小化装填区域体积为目标,经过 4 步迭代,用时 18.000 1 s,得到如图 10(b)所示布局结果,长方体装填区域优化前的体积 V 为 102.400 0,优化后减小至 25.426 2。优化过程的总时间为 2.953 0 s + 18.000 1 s = 20.953 1 s。图 10(c)为目标函数的迭代曲线。

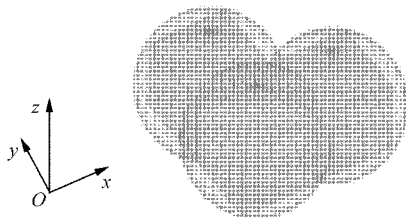
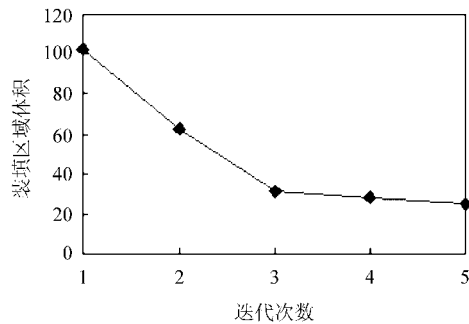
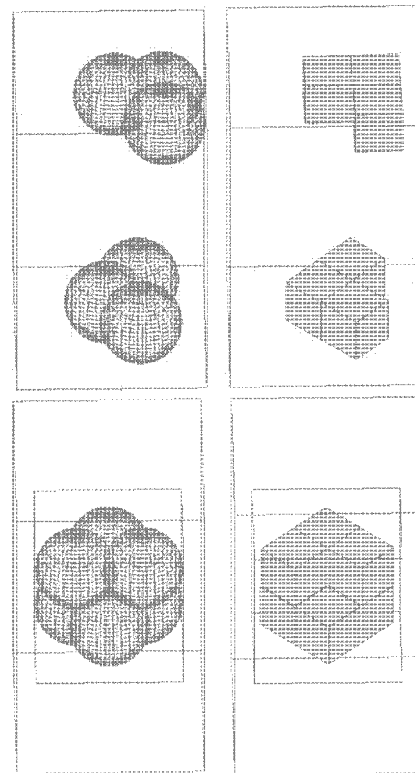


图 9 L 形组件的有限球族近似
Fig. 9 FSM approximation of L shape components

3.2 最小系统转动惯量设计

工程实践中,卫星等航天器要避免动不平衡,保持空间姿态的稳定,就要求卫星舱内的组件的系统转动惯量尽可能地小。



(c) 目标函数迭代曲线

图 10 最小装填空间布局设计示意图

Fig. 10 Optimal configuration with minimal volume of packing space

如图 11 所示,列举了 4 个不同形状的组件在圆柱体装填容器中的布局问题,算例用 SQP 算法实现。假设组件质量分布均匀,密度为一常数,则 $M_i(\mathbf{q}_i) = \int r^2 dm$ 可简化为 $M_i(\mathbf{q}_i) = \int r^2 dv$ 。图 12 为图 11 中 4 个待布组件的有限球族近似,所有包络球的半径均为 0.866 0。

圆柱体容器形心坐标为 $\mathbf{o} = [6.000 0 \quad 6.000 0 \quad 3.700 0]^T$,圆柱体底面半径 r 为 2.130 0,高度 h 为 14.140 0。设 S 为过圆柱体容器形心且平行于 Z 轴的轴线。引入松弛设计变量得到图 13(a)分散的初始布局模式,用时 52.767 0 s。所有组件相对于 S 轴的转动惯量之和为 $M = 17.564 7$ 。以最小化所有组件相对于 S 轴的转动惯量之和

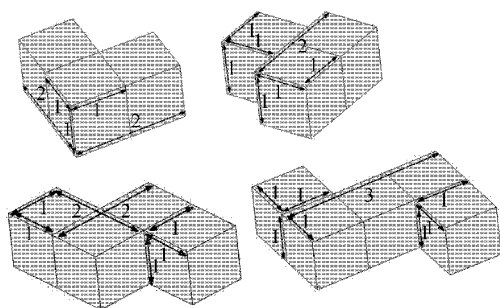


图 11 待布组件

Fig. 11 Dimensions of components

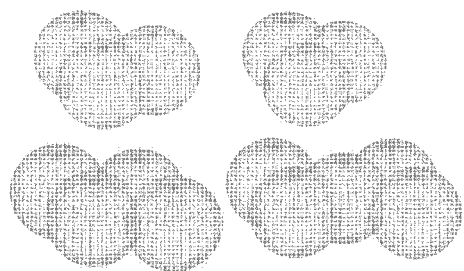
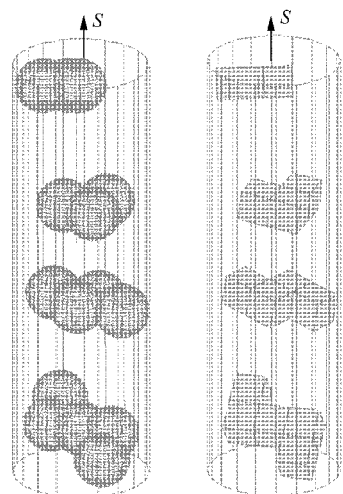
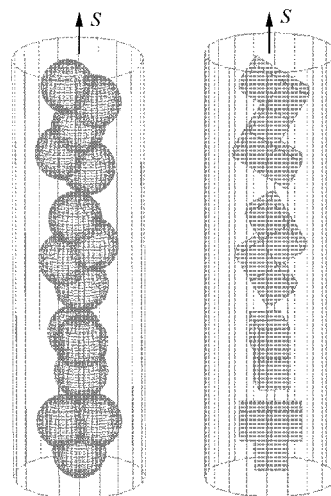
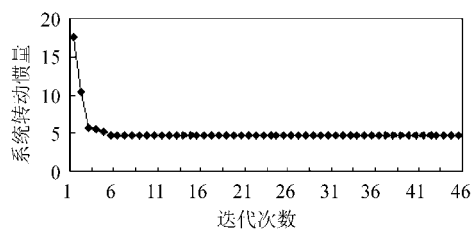


图 12 组件的有限球族近似

Fig. 12 FSM approximation of components

为目标,经过 54 步迭代,用时 196.200 0 s,得到图 13(b)所示的布局结果,优化目标总转动惯量为 $M=4.812 5$ 。优化过程的总时间为 $52.767 0 \text{ s} + 196.200 0 \text{ s} = 248.967 0 \text{ s}$ 。图 13(c)为目标函数的迭代曲线。

如果将图 12 中被单个包络球近似的立方体细化成 8 个小立方体,再用球包络,则得到如图 14 所示组件的有限球族近似情况。包络球的半径均为 0.433 0。

(a) 初始布局, $M=17.564 7$ (b) 布局结果, $M=4.812 5$ 

(c) 目标函数迭代曲线

图 13 最小系统转动惯量装填布局示意图

Fig. 13 Optimal configuration with minimal moment of inertia

装填区域为与上例位置和形状完全相同的圆柱形装填区域。引入松弛设计变量得到图 15(a)分散的初始布局模式,用时 348.953 0 s。所有组件相对于 S 轴的转动惯量之和为 $M = 30.400 3$ 。以最小化所有组件相对于 S 轴的转动惯量之和为目标,经过 84 步迭代,用时 529.077 0 s,得到图 15(b)所示的布局结果,优化目标总转动惯量 $M = 4.062 6$ 。优化过程的总时间为 $348.953 0 \text{ s} + 529.077 0 \text{ s} = 878.030 0 \text{ s}$ 。图 15(c)为目标函数的迭代曲线。可见划分的包络球数目较多时,尽管增加了计算时间,计算结果却较好。

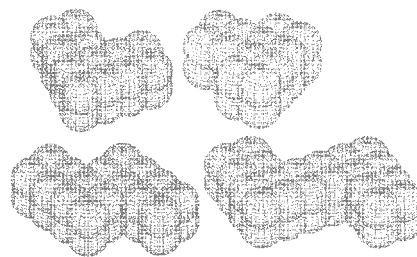


图 14 组件的有限球族近似

Fig. 14 FSM approximation of components

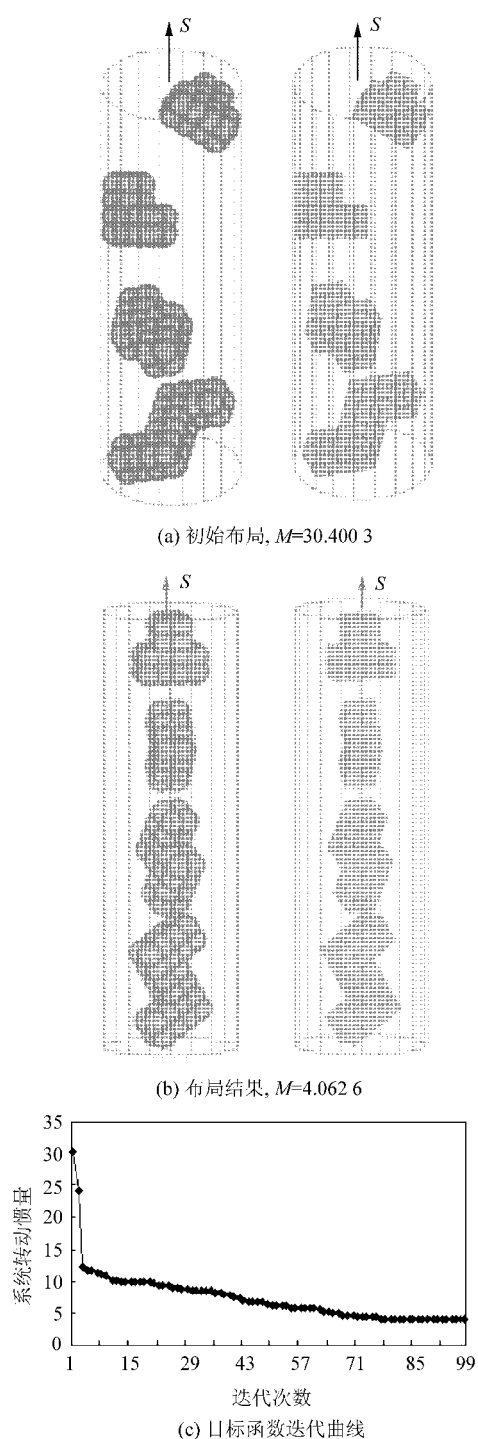


图 15 最小系统转动惯量装填布局示意图

Fig. 15 Optimal configuration with minimal moment of inertia

4 结束语

装填布局设计问题属于应用背景很强的优化问题,是研究复杂系统设计的一个重要部分。本文在 Sphere-trees 方法的基础上,将包络球的概念引入到三维装填布局优化设计问题,建立了有限球族近似组件及装填容器的三维布局优化模

型,并给出几个典型算例对这种装填分析和设计模式进行了验证。这种分析方法为建立通用的数学模型、判断组件干涉并解决更为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质、紧凑优化设计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):2-14.
- [2] Garey M R, Johnson D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness [M]. San Francisco: Freeman W H and Company, 1979.
- [3] 钱志勤, 滕弘飞. 复杂布局设计问题的算法[J]. 中国机械工程, 2002, 13(8):696-699.
Qian Zhiqin, Teng Hongfei. Algorithm of complex layout design problems [J]. China Mechanical Engineering, 2002,13(8):696-699. (in Chinese)
- [4] 张旭, 冯恩民. 具有性能约束布局问题的优化算法及收敛性[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(5):766-771.
Zhang Xu, Feng Enmin. Algorithm of layout optimization problem with performance constraints and its convergence[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005,45(5):766-771. (in Chinese)
- [5] 张旭, 冯恩民. 卫星舱三维布局优化模型及判断不干涉性算法[J]. 运筹与管理, 2004,13(3):15-19.
Zhang Xu, Feng Enmin. Three-dimensional layout optimization model about the artificial satellite module and the algorithm for non-overlap constraints[J]. Operations Research and Management Science, 2004,13(3):15-19. (in Chinese)
- [6] Quinlan S. Efficient distance computation between non-convex objects[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: IEEE, 1994:3324-3329.
- [7] Meagher D. Geometric modeling using octree encoding [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1982,19(2):129-147.
- [8] Samet H. Spatial data structures: quadtree, octree and other hierarchical methods[M]. USA: Addison Wesley, 1989.
- [9] 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)
- [10] 戴佐, 查建中, 倪仲力. 三维布局中八叉树节点的快速分解算法[J]. 软件学报, 1995, 6(11):679-685.
Dai Zuo, Cha Jianzhong, Ni Zhongli. A fast decomposition algorithm of octree node in 3D-packing[J]. Journal of Software, 1995, 6(11):679-685. (in Chinese)
- [11] 戴佐, 查建中, 袁俊良. 三维实体布局中干涉检验的八叉树方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1995, 7(4):

- 257-262.
Dai Zuo, Cha Jianzhong, Yuan Junliang. An octree method for interference detection between solids in 3D-packing [J]. *Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics*, 1995, 7(4): 257-262. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] Cameron S. Approximation hierarchies and S-bounds [C]//Jaroslaw R. *Proceedings of Symposium on Solid modeling Foundations and CAD/CAM Applications*. New York: ACM Press, 1991: 129-137.
- [14] Grignon P M, Fadel G M. A GA based configuration design optimization method[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2004, 126(1): 6-15.
- [15] Aladahalli C, Cagan J, Shimada K. Objective function effect based pattern search-theoretical framework inspired by 3D component layout[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2007, 129(3): 243-254.
- [16] O'Sullivan C, Dingliana J. Real-time collision detection and response using sphere-trees[C]//Zara J. *Proceedings of the Spring Conference in Computer Graphics*. 1999: 83-92.
- [17] Palmer I J, Grimsdale R L. Collision detection for animation using sphere-trees[J]. *Computer Graphics Forum*, 1995, 14(2): 105-116.
- [18] 滕弘飞, 孙守林, 葛文海, 等. 转动圆桌平衡摆盘——带平衡性能约束的 Packing 问题[J]. *中国科学: A 辑*, 1994, 24 (7): 754-760.
Teng Hongfei, Sun Shoulin, Ge Wenhai, et al. A packing problem with balance constrain for turning circle table balance[J]. *Science in China: Series A*, 1994, 24 (7): 754-760. (in Chinese)

作者简介:

张卫红(1964—) 男, 博士, 教授, 博士生导师, 国家第二批“长江计划”特聘教授。主要研究方向: 多学科、多目标优化设计, 材料与结构一体化优化设计及加工仿真。

Tel: 029-88495774

E-mail: zhangwh@nwpu.edu.cn

高瑜(1982—) 女, 硕士研究生。主要研究方向: 三维组件装填布局优化设计。

E-mail: yugao320@gmail.com

(责任编辑: 徐晓)