

文章编号:1000-6893(2010)09-1769-07

随机振动响应下的组件结构布局优化设计

吕奇峰, 张卫红, 张桥, 朱继宏

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

Layout Design Optimization of Component Structure with Random Vibration Response

Lu Qifeng, Zhang Weihong, Zhang Qiao, Zhu Jihong

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacturing,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 从工程应用需求出发,研究了随机振动载荷作用下的组件结构布局优化问题。提出采用有限包络圆族描述组件外形轮廓的近似方法,有效解决了设计过程中预防组件干涉的问题;建立了随机振动响应分析有限元模型,并对模型进行了实验验证与结果分析。在此基础上,以随机振动载荷下特定点自由度响应均方根(RMS)值之和最小为目标函数建立了组件布局通用优化设计模型,研究了单一组件与4组件问题的布局优化问题,并分别采用梯度优化算法和遗传算法进行优化求解比较研究。结果表明,所提出的设计方法能够有效地实现随机振动响应下的组件结构布局优化设计,两种优化算法均能显著降低结构关键部位的动力学响应。

关键词: 组件; 随机振动; 布局优化; 动力学响应; 功率谱密度

中图分类号: V214.3⁺3; TP391.7 **文献标识码:** A

Abstract: This article is focused on the component layout design optimization under random excitations to fulfill the requirements of engineering applications. In order to solve problems related to the overlapping of components during the design process, finite circle approximations are proposed to describe the exterior contour of each component. Furthermore, a finite element model is established to predict the responses under random excitations. The model and the numerical results are validated experimentally. Based on this, a general optimization model is established by defining the objective function as the minimization of the sum of the root mean square (RMS) response measured on the degrees of freedom (DOFs) of specific points of the components. Layout optimization problems with one component and four components are studied. The gradient optimization algorithm and genetic algorithm are used to solve both problems. The results show that the proposed method can deal efficiently with the layout design optimization of component structures with random vibration responses. Both optimization algorithms can reduce significantly dynamic responses at key locations of the component structure.

Key words: components; random vibration; layout optimization; dynamic response; power spectral density

几何装填布局优化设计^[1]是指把一些具有已知形状的物体按一定的要求合理地放置在有限布局空间容器中,属于不带性能约束的几何装填紧凑性问题,国内外学者目前对这方面研究较多。然而,工程实践中存在着大量复杂的带性能约束的组件结构布局优化问题,如卫星、导弹舱体等多体布局结构系统,需要考虑振动、结构刚度、稳定性、不平衡性、惯性、温度场、电磁场等各种性能约束^[2-3],目前这方面的研究成果较少。

在组件不干涉约束判断研究方面, S. Quinlan^[4]提出了分层球族树近似模型来判断两者是否干涉; D. Meagher^[5]、H. Samet^[6]及戴佐等^[7]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; 张桥等^[8]采用有限包络圆族法近似组件外形,将组件间不干涉约束转化为圆与圆之间圆心距的简单约束,大大简化了布局问题中不干涉和不重叠约束表达形式; 张卫红等^[2]从工程应用背景出发,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,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; J. Cagan等^[9]采用改进的八叉树法计算布局问题中组件间干涉量。

收稿日期: 2009-09-28; 修订日期: 2010-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(10925212); 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金(10676028); 高等学校学科创新引智计划项目(B07050)

通讯作者: 张卫红 E-mail: zhangwh@nwpu.edu.cn

在带性能约束方面, P. M. Grignon 等^[3]使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; C. Aladahalli 等^[10]采用基于目标函数的模式搜索算法 (Objective Function Effect Based Pattern Search, OPS) 研究了带转动惯量性能约束的三维布局问题; J. H. Zhu 等^[11]实现了在惯性载荷作用下同时进行组件布局 and 支撑结构拓扑优化; 孙明^[12]和张旭等^[13-14]构造了二维和三维带有静力学性能约束的装填布局优化模型; H. F. Teng 等^[15]研究了带动平衡约束的返回式卫星舱的三维布局装填问题, 提出了模拟卫星实验过程的拟实验启发式算法; 张刚等^[16-17]改进了实数编码遗传算法, 较好地解决了带性能约束的三维布局设计问题。

早期的结构设计一般只考虑静强度问题, 而工程实际中的许多结构出现事故大多与动强度有关, 例如约占 40%^[18]的飞机事故由振动引起, 并且这些振动一般都是随机振动, 所以有必要从随机振动角度对结构进行优化设计。W. H. Tong 等^[19]提出宽带随机激励环境下的动力学设计方法, 以结构上某些点自由度的响应均方根 (RMS) 值不超过指定值作为约束, 建立白噪声激励下均方响应约束准则表达式; 王东升等^[20]建立了随机激励作用下结构多点响应优化的数学模型, 实现了满足随机振动响应要求的三维支架结构的尺寸优化; J. H. Rong 等^[21]尝试了将渐进优化 (Evolutionary Structural Optimization, ESO) 方法应用于白噪声激励下的结构拓扑优化设计。

本文着重研究以随机振动响应为性能约束的组件布局优化, 该问题目前还未见相关研究报道。为此, 建立了在随机加速度载荷作用下以某些特定点自由度的响应 RMS 值之和最小为目标的优化模型, 并分别使用梯度优化算法和遗传算法优化组件的位置。

1 有限元模型的建立与实验验证

如图 1 所示, 以安装板上组件的布局为研究对象, 组件固定于安装板上, 安装板与振动台通过 8 个螺栓连接, A_1 和 A_2 为控制点, A_3 和 A_4 为测量点。控制点位置接近螺栓, 所测结果作为输入参考值, 比照标准谱来保证所加激励的正确性, A_3 点作为数据参考点, 对比结果可反映有限元模型模拟近似程度, A_4 点是目标点。其有限元模型如图 2 所示。振动台轴向加载的加速度随机激励对应的功率谱密度 (Power Spectral Density,

PSD) 如图 3 所示, 其标准功率谱密度如图 4 所示, 可见实验加载的功率谱密度和标准功率谱密度吻合较好, 实验结果如表 1 所示。利用图 2 所示的 1:1 有限元模型模拟振动实验, 对有限元模型中 8 个螺栓点的位置进行位移约束并施加如图 4 所示的轴向随机激励, 得到表 2 中的响应数据。

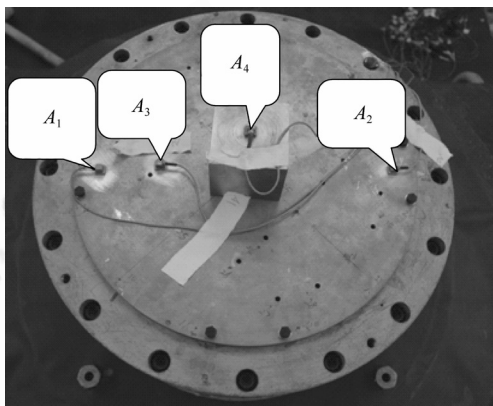


图 1 实验状态

Fig. 1 Experimental test set-up

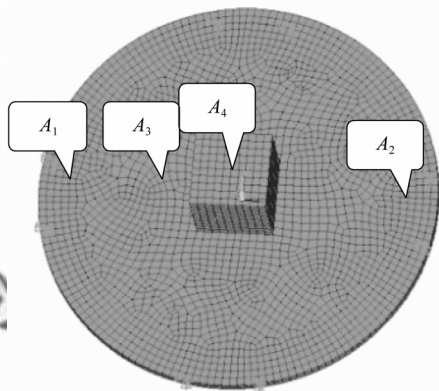


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

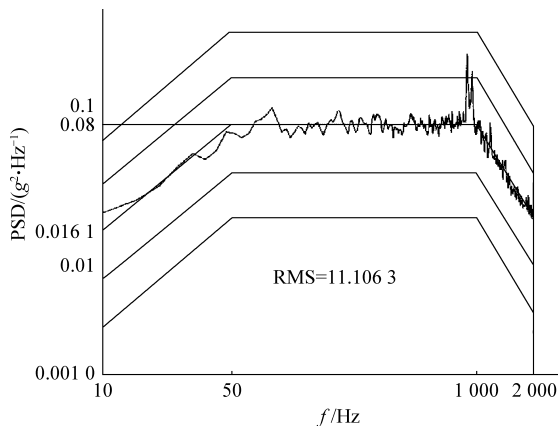


图 3 实验加载功率谱密度

Fig. 3 PSD of experimental load

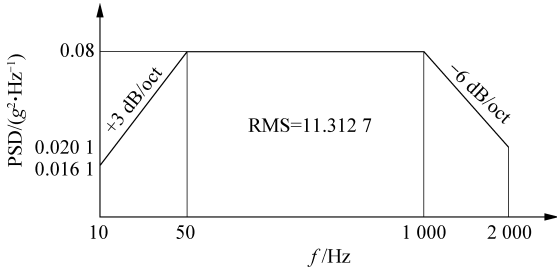


图 4 有限元分析所加载的标准功率谱密度
Fig. 4 PSD of finite element analysis

表 1 振动实验特性及响应数据

Table 1 Results of vibration test characteristics and responses

测点号	一阶共振频率/ Hz	一阶共振峰值/ (g² · Hz⁻¹)	加速度均方根/g
A ₃	227.5	36.03	29.350
A ₄	227.5	161.96	42.370

表 2 有限元模型响应数据

Table 2 Numerical results of finite element model responses

测点号	一阶共振频率/ Hz	一阶共振峰值/ (g² · Hz⁻¹)	加速度均方根/g
A ₃	227.1	38.23	28.010
A ₄	227.1	178.70	42.089

对比结果可知:一阶共振频率相差 0.18%, A₃ 点一阶共振峰值相差 5.75%, 加速度均方根相差 4.78%; A₄ 点一阶共振峰值相差 9.37%, 加速度均方根相差 0.62%。有限元分析数据和实验结果吻合较好,说明有限元模型能比较准确地反映真实实验结果。

2 随机振动的数学模型

随机振动的动力学方程可表示为

$$\ddot{MX} + \dot{CX} + KX = f(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 及 K 分别为 $n \times n$ 阶的质量矩阵、阻尼矩阵与刚度矩阵, n 为结构的自由度数; X 、 \dot{X} 和 \ddot{X} 分别为节点的位移、速度与加速度矢量; $f(t)$ 为系统激励。当激励为加速度激励 $\ddot{Y}(t)$, 且其功率谱密度为 $S_{\ddot{Y}}(\omega)$ 时, 运动方程可表示为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = ME\ddot{Y}(t) \quad (2)$$

式中: E 为加速度指示向量。首先对系统进行固有模态求解, 令 $C=0$, $f(t)=0$, 可得系统的自由运动方程为

$$M\ddot{X} + KX = 0 \quad (3)$$

系统的特征方程为

$$K - \omega^2 M = 0 \quad (4)$$

取系统的前 n 阶固有频率 ω_i 与振型 x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ 。由于 $m_i = x_i^T M x_i$, $k_i = x_i^T K x_i$, 且有 $\omega_i^2 = k_i/m_i$, 故可将振型 x_i 乘以一个常数乘子得到质量归一化振型 ϕ_i 。则经典阻尼下式(2)可离散为

$$\ddot{u}_i + 2\omega_i \xi_i \dot{u}_i + \omega_i^2 u_i = \gamma_i \ddot{Y}(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: ξ_i 为系统第 i 阶模态的阻尼比; γ_i 为第 i 阶振型参与系数

$$\gamma_i = \phi_i^T M E \quad (6)$$

$X(t)$ 和 u_i 的关系为

$$X(t) = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_n] \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} = \Phi u \quad (7)$$

$$\Phi u(t) = \sum_{i=1}^n u_i \phi_i \quad (7)$$

式(5)在时间域内的解为

$$u_i = \gamma_i \int_{-\infty}^{+\infty} h_i(\tau) \ddot{Y}(t - \tau) d\tau \quad (8)$$

式中: $h_i(\tau)$ 为系统的第 i 阶脉冲响应函数。将式(8)代入式(7)可得

$$X(t) = \sum_{i=1}^n \gamma_i \phi_i \int_{-\infty}^{+\infty} h_i(\tau) \ddot{Y}(t - \tau) d\tau \quad (9)$$

则 $X(t)$ 的自相关函数矩阵为

$$\begin{aligned} R_{XX}(\tau) &= E[X(\tau)X^T(t + \tau)] = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_i \gamma_j \phi_i \phi_j^T \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E[\ddot{Y}(t - \tau_1) \ddot{Y}(t - \tau_2 + \tau)] \cdot \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_i \gamma_j \phi_i \phi_j^T \cdot \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{\ddot{Y}}(\tau + \tau_1 - \tau_2) h(\tau_1) h(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \end{aligned} \quad (10)$$

据维纳-辛钦(Winner-Khinchin)关系, 输出功率谱密度函数是输出自相关函数的傅里叶变换, 通过交换积分次序并引入变量代换 $\theta = t + \tau_1 - \tau_2$, 可得输出功率谱密度函数为

$$\begin{aligned} S_{XX}(\omega) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_i \gamma_j \phi_i \phi_j^T \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h_i(\tau_1) e^{i\omega\tau_1} \cdot \\ &= h_j(\tau_2) e^{-i\omega\tau_2} \left(\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R_{\ddot{Y}}(\theta) e^{-i\omega\theta} d\theta \right) d\tau_1 d\tau_2 \end{aligned} \quad (11)$$

考虑到输入功率谱密度函数 $S_{\ddot{Y}}$ 是输入自相关函数 $R_{\ddot{Y}}$ 的傅里叶变换, 频率传递函数 $H_i(\omega)$

是脉冲响应函数 $h_i(t)$ 的傅里叶变换, 可得

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}(\omega) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_i \gamma_j \boldsymbol{\phi}_i \boldsymbol{\phi}_j^T \bar{H}_i(\omega) H_j(\omega) \mathbf{S}_{\dot{Y}}(\omega) \quad (12)$$

式(12)计算量很大, 工程上一般使用简化近似方法, 即将式(12)中的交叉项忽略掉, 响应功率谱密度简化为

$$\mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}(\omega) = \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 \boldsymbol{\phi}_i \boldsymbol{\phi}_i^T |H_i(\omega)|^2 \mathbf{S}_{\dot{Y}}(\omega) \quad (13)$$

均方响应为

$$\sigma_{\mathbf{X}}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{S}_{\mathbf{X}\mathbf{X}}(\omega) d\omega = \sum_{i=1}^n \gamma_i^2 \boldsymbol{\phi}_i \boldsymbol{\phi}_i^T \int_{-\infty}^{+\infty} |H_i(\omega)|^2 \mathbf{S}_{\dot{Y}}(\omega) d\omega \quad (14)$$

3 优化模型

如图5所示, 本文研究的组件布局设计以组件位置参数作为设计变量, 所有组件上表面中心点的轴向响应 RMS 值之和最小为目标函数, 组件之间不发生干涉且在容器内为约束条件建立优化模型。

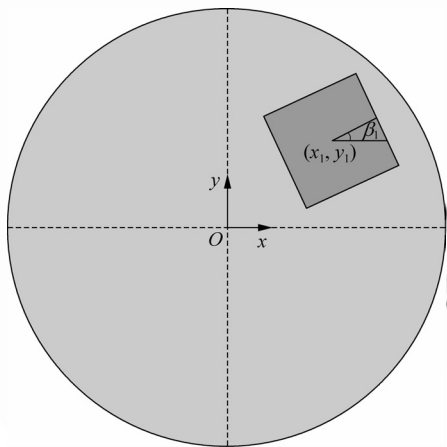


图5 组件坐标示意图

Fig. 5 Illustration of component coordinates

本文使用有限包络圆族^[8]方法来表达约束条件, 将每个组件在圆盘上的投影区域用若干个大小不同的包络圆族近似代替, 如图6所示。于是圆盘与组件的包容关系转化为组件上包络圆与圆盘的包含关系, 即 $|O_{ij}S| - R_{ij} > 0$, $|O_{ij}S|$ 为包络圆圆心到安装板边缘的距离, R_{ij} 为包络圆 O_{ij} 的半径; 组件与组件的不干涉关系转化为不同组件包络圆间的相离关系, 即 $|O_{ij}O_{kl}| > R_{ij} + R_{kl}$, 其

中 $i \neq k$ 。则优化模型为

$$\begin{aligned} & \text{find } \{x_1, x_2, \dots, x_m, y_1, y_2, \dots, y_m, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\} \\ & \text{min } \sigma = \sum_{i=1}^m \sigma_{X_i} \\ & \text{s. t. } |O_{ij}S| - R_{ij} > 0 \\ & \quad \sqrt{(x_{ij} - x_{kl})^2 + (y_{ij} - y_{kl})^2} - (R_{ij} + R_{kl}) > 0 \end{aligned} \quad (15)$$

式中: i 和 k 为组件编号; j 和 l 为组件上包络圆的编号; (x_i, y_i) 为第 i 个组件与安装板接触面中心的坐标; β_i 为第 i 个组件的方向; m 为组件数量; σ_{X_i} 为第 i 个组件上表面中心点轴向的响应 RMS 值。存在的两个几何约束条件旨在保证组件位于圆板上, 同时组件之间不发生干涉约束。

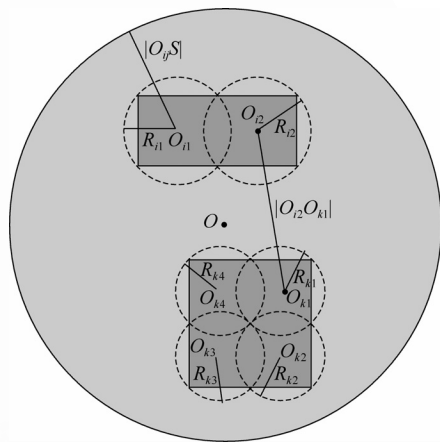


图6 装填与不干涉约束示意图

Fig. 6 Illustration of packing and non-overlapping constraints

目前, 寻优算法主要有两种: ①基于灵敏度分析数学规划法; ②智能型搜索算法, 如遗传算法。

(1) 利用灵敏度寻求最优解的速度快, 但是需要建立目标函数与设计变量之间的近似数学表达式。然而, 随机响应关于组件位置的函数表达式难以建立。所以本文采用差分法求解目标函数灵敏度。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial q_i} \approx \frac{\Delta \sigma}{\Delta q_i} \quad (16)$$

式中: q_i 为第 i 个设计变量; Δq_i 为 q_i 的改变量, 一般取 q_i 的 1%~5%; $\Delta \sigma$ 为设计变量的改变引起的目标函数的改变量。

(2) 使用遗传算法避免了求解目标函数灵敏度的问题, 但是需要消耗大量的机时用于函数值的计算迭代。

图7给出了本文寻优的流程。

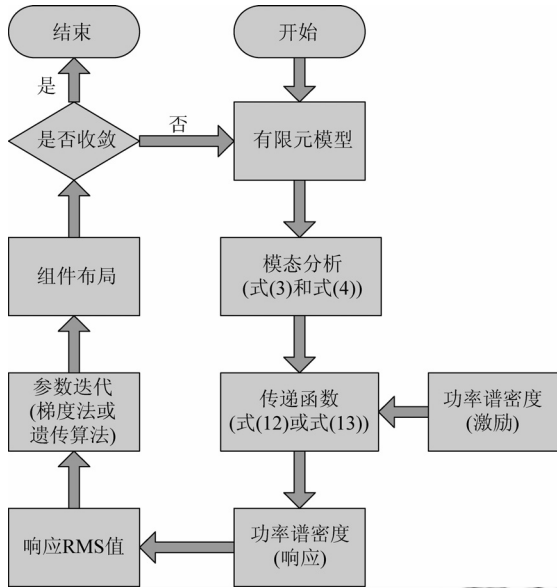


图 7 布局优化流程图

Fig. 7 Flowchart of layout design optimization process

4 算例

假设安装板的半径为 181 mm,厚度为 9.5 mm,材料为硬铝,弹性模量 $E=7.0 \times 10^{10}$ Pa,泊松比 $\nu=0.33$,密度 $\rho=2.7$ g/mm³。组件分为以下两种情况考虑。

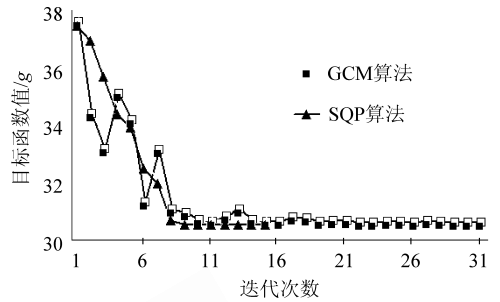
4.1 单组件布局优化

本例以单个组件的中心点(如图 2 中 A_1 点)的轴向响应 RMS 值最小为目标函数,组件长、宽、高均为 70 mm,材料为 45 号钢,弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11}$ Pa,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho=7.8$ g/mm³。分别使用全局收敛(GCM)算法、序列二次规划(SQP)算法^[22]以及遗传算法优化组件的位置,所得结果如表 3 所示。其中,使用 GCM 和 SQP 算法时组件的初始位置为: $x=60$ mm, $y=60$ mm, $\beta=45^\circ$, A_1 点对应的轴向响应 RMS 为 37.597 5g,其收敛曲线如图 8(a)所示。使用遗传算法的收敛曲线如图 8(b)所示。3 种方法获得的优化结果基本一致,目标函数值在 30.65g 左右,比初始位置

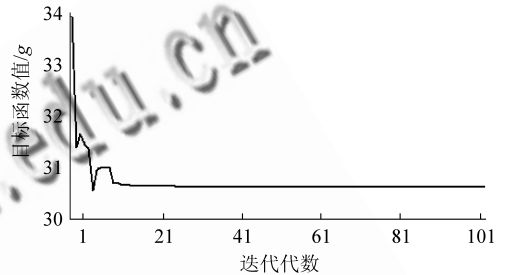
表 3 单组件优化结果

Table 3 Optimal results of individual component

优化算法	优化后组件位置(x, y, β) / (mm, mm, (°))	目标函数/g
GCM 算法	(65.99, 103.19, 88.68)	30.636 3
SQP 算法	(67.15, 102.45, 44.17)	30.673 9
遗传算法	(35.97, 117.19, 22.79)	30.617 5



(a) GCM和SQP算法优化结果



(b) 遗传算法优化结果

图 8 单组件收敛曲线

Fig. 8 Convergence curve of single component problem

的响应减小约 18%。但由于 GCM 算法是基于非单调的凸近似^[23],造成目标函数曲线出现跳动。

4.2 4 组件布局优化

本例以 4 个组件中心点的轴向响应 RMS 值之和最小为目标函数。组件 1:长、宽、高均为 70 mm 的立方体;组件 2:长为 80 mm、宽为 40 mm、高为 60 mm 的长方体;组件 3:尺寸同组件 2;组件 4:长、宽、高均为 40 mm 的立方体。组件材料为 45 号钢,弹性模量 $E=2.1 \times 10^{11}$ Pa,泊松比 $\nu=0.3$,密度 $\rho=7.8$ g/mm³。分别使用 GCM 算法和遗传算法优化组件位置。使用 GCM 算法时,组件的初始位置以及目标函数初始值如表 4 所示,求解得到最优结果为 105.211g(如表 5 所示),比初始值减小约 22%;遗传算法优化结果为 90.41g,比 GCM 算法的优化结果小 14%,且组件位置完全不同。GCM 算法和遗传算法的收敛曲线分别如图 9(a)和图 9(b)所示。事实上,组件布局问题理论上讲是一个数学规划难问题(NP-hard Problem)^[24],存在局部解。不同的算法以及不同的初始参数设置可能获得不同的局部解。在此,采用遗传算法虽然比依靠灵敏度分析的梯度算法获得了更好的解,但遗传算法计算时间较长,且存在早熟现象,也不能保证得到全局最优解。

表4 4个组件优化的初始解

Table 4 Initial solution of 4-component problem

优化算法	组件号	组件初始位置(x, y, β) / (mm, mm, $^{\circ}$)	目标函数/g
GCM 算法	1	(-90, 60, 45)	135.031
	2	(40, 40, 30)	
	3	(-90, -90, 10)	
	4	(-10, -90, 80)	

表5 4个组件优化结果

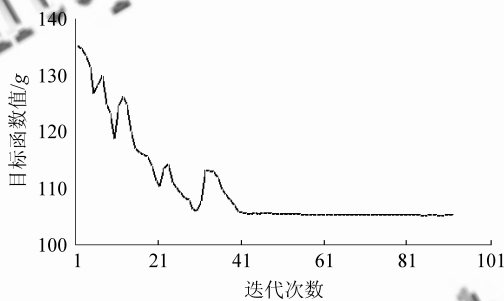
Table 5 Optimal results of 4-component problem

优化算法	组件号	优化后组件位置(x, y, β) / (mm, mm, $^{\circ}$)	目标函数/g
GCM 算法	1	(-38.65, 123.08, 165.35)	105.211
	2	(22.36, 98.19, 76.26)	
	3	(-119.41, -40.21, -153.24)	
	4	(-49.83, -132.97, 10.55)	
遗传算法	1	(75.21, 112.79, 123.12)	90.41
	2	(63.08, -101.38, 144.36)	
	3	(-98.59, 55.16, 111.95)	
	4	(139.86, -3.394, 25.46)	

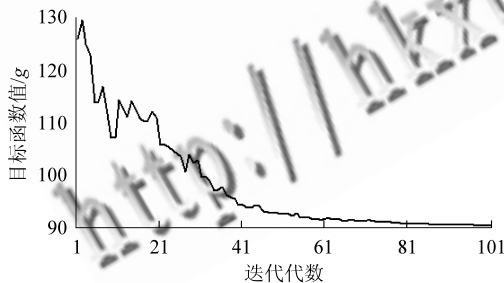
键部位的振动响应。当组件数目较少时,采用梯度算法能更快地获得优化结果;当组件数目较多时,采用遗传算法能够得到更优的布局结果。

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] 张卫红, 高瑜, 方亮, 等. 三维组件布局建模与优化设计[J]. 航空学报, 2008, 29(6): 1554-1662. Zhang Weihong, Gao Yu, Fang Liang, et al. Three-dimensional component layout modeling and optimization design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(6): 1554-1662. (in Chinese)
- [3] Grignon P M, Fadel G M. A GA based configuration design optimization method[J]. Journal of Mechanical Design, 2004, 126(1): 6-15.
- [4] 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.
- [5] Meagher D. Geometric modeling using octree encoding[J]. Computer Graphics and Image Processing, 1982, 19(2): 129-147.
- [6] Samet H. Spatial data structures: quadtree, octree and other hierarchical methods[M]. Upper Saddle River, NJ, USA: Addison Wesley, 1989.
- [7] 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)
- [8] 张桥, 张卫红. 有限包络圆族的快速生成方法及其在二维布局优化中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21(5): 617-625. Zhang Qiao, Zhang Weihong. Efficient construction algorithms of finite circles and their applications to 2D layout optimization[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2009, 21(5): 617-625. (in Chinese)
- [9] Cagan J, Degentesh D, Yin S. A simulate annealing-based algorithm using hierarchical models for general three-dimensional component layout[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(10): 781-790.
- [10] 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.
- [11] Zhu J H, Zhang W H, Beckers P. Integrated layout design of multi-component system[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2009, 78(6):



(a) GCM算法优化结果



(b) 遗传算法优化结果

图9 4组件收敛曲线

Fig. 9 Convergence curve of 4-component problem

5 结束语

提出了基于随机振动响应分析的组件结构布局优化设计方法,建立了优化设计模型。通过实验测试有效验证了有限元模型计算结果,同时,结合两个算例,说明优化结果能够显著降低结构关

- 631-651.
- [12] 孙明, 刘飞, 孙德宝, 等. 旋转卫星舱内长方体群的布局[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(34): 92-97.
Sun Min, Liu Fei, Sun Debao, et al. Layout optimization of cube group in rotation module[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(34): 92-97. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] Teng H F, Sun S L, Liu D Q, et al. Layout optimization for the objects located with in a rotating vessel; a three-dimensional packing problem[J]. Computers & Operations Research, 2001, 28(6): 521-535.
- [16] 张刚, 殷国富, 邓克文, 等. 改进的实数编码遗传算法在产品布局设计中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(10): 1451-1455.
Zhang Gang, Yin Guofu, Deng Kewen, et al. Modified real-coded genetic algorithm and its application to layout design[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(10): 1451-1455. (in Chinese)
- [17] 张刚, 殷国富, 邓克文, 等. 解空间编码遗传算法在三维布局中的应用[J]. 中国机械工程, 2006, 17(1): 79-83.
Zhang Gang, Yin Guofu, Deng Kewen, et al. Genetic algorithm based on solution-vector coding and its application to three-dimensional layout design[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(1): 79-83. (in Chinese)
- [18] 顾松年, 徐斌, 荣见华, 等. 结构动力学设计优化方法的新进展[J]. 机械强度, 2005, 27(2): 156-162.
Gu Songnian, Xu Bin, Rong Jianhua, et al. Recent progresses on structural dynamic design methods[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(2): 156-162. (in Chinese)
- [19] Tong W H, Jiang J S, Liu G R. Dynamic design of structures under random excitation[J]. Computational Mechanics, 1998, 22(5): 388-394.
- [20] 王东升, 陈颖, 周桐. 支架结构随机振动响应优化研究[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(1): 38-56.
Wang Dongsheng, Chen Ying, Zhou Tong. The optimization of random vibration response for bracket structures [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(1): 38-56. (in Chinese)
- [21] Rong J H, Xie Y M, Yang X Y, et al. Topology optimization of structures under dynamic response constraints [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(2): 177-189.
- [22] Remouchamps A, Radovic Y. Boss-quattro documents. [M]. SAMTECH, 2005.
- [23] Bruyneel M, Duysinx P, Fleury C. A family of MMA approximations for structural optimization [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2002, 24(4): 263-276.
- [24] de Bont F M J, Aarts E H L, Meehan P, et al. Placement of shapeable blocks [J]. Philips Journal of Research, 1988, 43: 1-22.

作者简介:

吕奇峰(1983—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 组件布局优化。

Tel: 029-88493232-418

E-mail: qflv1983@163.com

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

(编辑: 徐晓)