

基于保结构方法的航天器中微电子器件布局优化*

蒋睿嵩¹ 徐萌波² 胡伟鹏^{2†}

(1. 四川大学 空天科学与工程学院, 成都 610065) (2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 西安 710048)

摘要 航天器中的精密微电子器件布局影响着航天器局部振动特性,反过来,航天器的局部振动影响着精密微电子器件稳定性和精度.基于此,本文对航天器中微电子器件的布局进行了优化,以降低结构局部振动对微电子器件的影响.在每一步优化迭代过程中,微电子器件固定在一薄板上,薄板通过螺钉固接在航天器结构本体上,使用关注系统局部几何性质的保结构分析方法分析该薄板结构的局部振动特性.本文的优化方法和优化结果为航天器中精密微电子器件的布局设计提供参考.

关键词 保结构, 布局优化, 微电子器件, 广义多辛

中图分类号: O224

文献标志码: A

引言

航天器中的精密电子元器件容易受到航天器工作过程中的过大惯性力作用而影响其工作性能.特别是航天器的局部振动特性,如:共振等,甚至会造成特定位置的电子元器件失效,导致航天任务失败.因此,航天器中的电子元器件往往会被集中布局在航天器某一局部空间(如图1)^[1].

已有研究表明^[1,2],航天器中电子元器件的不同布局位置在一定程度上影响着航天器局部动力学特性,因此,航天器中的电子元器件布局优化问题是航天器设计的重要内容之一.

在布局优化方面,Liu等^[1]将电子元器件的布局优化简化为一个NP问题,为本文发展电子元器件保结构优化算法提供了重要借鉴.陶鸿飞和崔升^[3]通过对压电梁、板结构振动主动控制进行了分析,实现了压电执行器粘附于悬臂梁上的最佳布局.Jia等^[4]考虑土体与结构的相互作用,利用非连续布局优化(discontinuity layout optimization,简称DLO)方法实现了块状结构的稳定性分析.Nanayakkara等^[5]针对张拉结构拓扑优化问题,给出了一

种简单的布局优化数值方法.Ambrozkiwicz和Kriegesmann^[6]针对机械部件及关节设计问题,发展了能够同时实现结构拓扑和布局优化的数值方法.

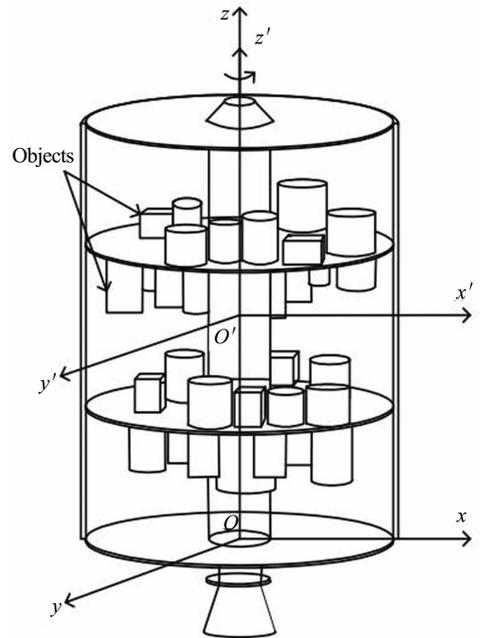


图1 航天器中电子元器件封装示意图
Fig. 1 Layout of electron components in spacecraft

2021-03-30 收到第1稿,2021-04-21 收到修改稿.

* 国家自然科学基金资助项目(U1830122,11972284,11672241),陕西省杰出青年科学基金资助项目(2019JC-29)

† 通信作者 E-mail:wphu@nwpu.edu.cn

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -D & 0 & 0 & -D & 0 \\ 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -D & 0 & 0 & -D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D & 0 & 0 \\ -D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

哈密顿函数为:

$$S(z) = -\rho(x, y)\varphi^2/2 - D(wq - \psi\kappa + pv) + D(\psi^2 + \kappa^2)/2 + u \sum_{\xi=1}^8 F_{\xi} \quad (6)$$

对圆形薄板面域 $\Gamma = \{(x, y) | x^2 + y^2 \leq R^2\}$ 采用空间步长 Δx 和 Δy 进行剖分,并对系统采用时间步长 Δt 进行 Preissmann 离散,消去中间变量,得到与 Preissmann 格式等价的保结构差分格式:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho(i, k)}{4\Delta t^2} (\delta_x^2 u_{i, k}^{j+2} + 4\delta_x^2 u_{i, k}^{j+1} + 6\delta_x^2 u_{i, k}^j + 4\delta_x^2 u_{i, k}^{j-1} + \\ & \delta_x^2 u_{i, k}^{j-2}) + \frac{c}{4\Delta t} (\delta_x u_{i, k}^{j+3} + 5\delta_x u_{i, k}^{j+2} + 10\delta_x u_{i, k}^{j+1} + \\ & 10\delta_x u_{i, k}^j + 5\delta_x u_{i, k}^{j-1} + \delta_x u_{i, k}^{j-2}) + \frac{D}{\Delta x^4} (\delta_x^4 u_{i+1, k}^j + \\ & 2\delta_x^4 u_{i, k}^j + \delta_x^4 u_{i-1, k}^j) + \frac{2D}{\Delta x^2 \Delta y^2} (\delta_x^2 \delta_y^2 u_{i+1/2, k+1/2}^j + \\ & 2\delta_x^2 \delta_y^2 u_{i, k}^j + \delta_x^2 \delta_y^2 u_{i-1/2, k-1/2}^j) + \frac{D}{\Delta y^4} (\delta_y^4 u_{i, k+1}^j + \\ & 2\delta_y^4 u_{i, k}^j + \delta_y^4 u_{i, k-1}^j) = \sum_{\xi=1}^8 (F_{\xi})_{i+1/2, k+1/2}^{j+1/2} \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $u_{i+1/2, k+1/2}^j = \frac{1}{4}(u_{i, k}^j + u_{i+1, k}^j + u_{i, k+1}^j + u_{i+1, k+1}^j)$, $\delta_x^2 u_{i, k}^j = u_{i, k}^{j+1} - 2u_{i, k}^j + u_{i, k}^{j-1}$, $\delta_x u_{i, k}^j = u_{i, k}^{j+1} - u_{i, k}^{j-1}$, $\delta_x^4 u_{i, k}^j = u_{i+2, k}^j - 4u_{i+1, k}^j + 6u_{i, k}^j - 4u_{i-1, k}^j + u_{i-2, k}^j$ 等.

差分格式中 $(F_{\xi})_{i+1/2, k+1/2}^{j+1/2}$ 依据下式确定:

$$(F_{\xi})_{i+1/2, k+1/2}^{j+1/2} = \begin{cases} \bar{F}_{\xi} & (j, i, k) \in \Xi \\ 0 & (j, i, k) \in \bar{\Xi} \end{cases} \quad (8)$$

其中,

$$\Xi = \{(j, i, k) | j\Delta t \leq t_{\xi} \leq (j+1)\Delta t, i\Delta x \leq x_{\xi} \leq (i+1)\Delta x, k\Delta y \leq y_{\xi} \leq (k+1)\Delta y\}$$

需要说明的是,公式中 $\rho(i, k)$ 的计算依据下式确定:

$$\rho(i, k) = \begin{cases} \rho_0 & \Omega \text{ 内无微电子器件} \\ \rho_0 + \frac{m_l}{\Delta x \Delta y} & \Omega \text{ 内有 1 个微电子器件} \end{cases} \quad (9)$$

其中, ρ_0 为未粘接微电子器件的柔性薄板的面密度, $m_l (l = 1, 2, \dots, n)$ 为柔性薄板区域 $\Omega = \{(i, k) | i\Delta x \leq x_l \leq (i+1)\Delta x, k\Delta y \leq y_l \leq (k+1)\Delta y\}$ 内微电子器件的质量, (x_l, y_l) 为第 l 个微电子器件在圆形薄板上的坐标值.值得注意的是,由于薄板面内网格尺寸较小,实际的微电子器件之间由于散热等要求,可以假定一个网格内至多能粘接一个微电子器件,这一假定将会具体体现在优化问题建模过程中.

3 微电子器件布局优化模型及数值算例

考虑 n 个微电子器件粘接在同时受 8 个冲击载荷作用的柔性薄板上的情形,以 n 个微电子器件粘结处薄板振动最大加速度的加权平均值最小为优化目标,建立如下微电子器件布局优化问题:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{l=1}^n w_l \max \{ \partial_n u(j\Delta t, x_l, y_l) \} \\ & \text{s. t. } (x_l - x_m)^2 + (y_l - y_m)^2 < \Delta x^2 + \Delta y^2 \\ & (l, m = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (10)$$

上式中, w_l 为第 l 个微电子器件的权重(描述该微电子器件对精度和稳定性要求), $\partial_n u(j\Delta t, x_l, y_l)$ 为第 l 个微电子器件粘结处薄板在 $j\Delta t$ 时刻的面外振动加速度,该加速度值由前述建立的保结构分析方法得到.

由于本文考虑的微电子器件质量较小,对薄板面外振动影响只存在于微电子器件粘结点附近的局部区域,因此,参考已有的优化理论及方法^[18, 19],本文采用的布局优化算法主要包括如下两个步骤:

① 采用保结构分析方法模拟未布置微电子器件柔性薄板面外振动,找到振动加速度较小的 n 个网格点作为 n 个微电子器件布置的初始位置(共

$n!$ 种情况),取其中 $\sum_{l=1}^n w_l \max\{\partial_u u(j\Delta t, x_l, y_l)\}$ 最小的情况确定为微电子器件布置的初始位置组合;

②将每个微电子器件粘结位置在其初始位置附近摄动,摄动范围设定为 $2(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{1/2}$ (该摄动范围是通过后续算例中试算得到),重新模拟薄板振动,计算微电子器件加速度最大值的加权平均值 $a^* = \sum_{l=1}^n w_l \max\{\partial_u u(j\Delta t, x_l, y_l)\}$,直至两步迭代得到的 a^* 相对误差小于 1×10^{-6} 时结束优化迭代过程,得到最终的微电子器件最优化布局位置,完成布局优化过程.

在数值算例中,系统的结构及材料参数假定为: $c = 0.05, R = 0.5\text{m}, E = 2.914 \times 10^9\text{Pa}, \nu_p = 0.37, h = 0.002\text{m}, \rho_0 = 1\text{kg/m}^2, \bar{F}_\zeta = 100\text{N}$. 网格剖分步长及时间步长分别取为: $\Delta x = \Delta y = 0.002\text{m}, \Delta t = 0.001\text{s}$.

假定每个微电子器件质量和权重都相等, $m_l = \frac{0.01}{n}\text{kg}, w_l = \frac{1}{n} (l = 1, 2, \dots, n)$, 则优化算法第①步中涉及到的 $n!$ 种布局组合情况退化成为一种情形. 考虑 $n = 2, 3, 4$ 三种较为简单的情况,对微电子器件布置位置进行优化.

图3给出了上述三种情况下,微电子器件布局优化过程中微电子器件加速度最大值的加权平均值 $a^* = \sum_{l=1}^n w_l \max\{\partial_u u(j\Delta t, x_l, y_l)\}$ 随着迭代次数 N 的演化过程(在优化程序中设定迭代次数为200而不以 a^* 相对误差为迭代终止条件).

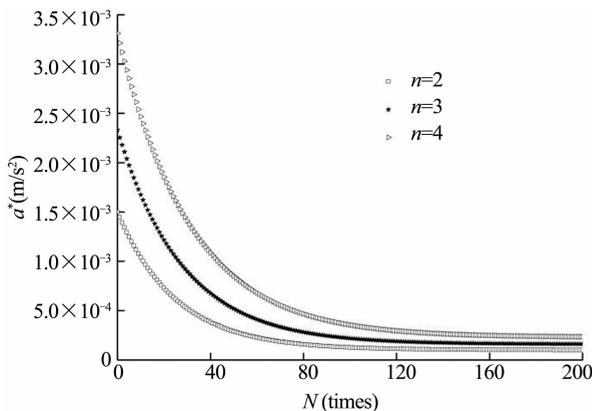


图3 微电子器件加速度最大值加权平均值演化过程
Fig.3 Evolution of the weighted average of the maximum accelerated speed of the microelectronic devices

从图3可以看出,微电子器件个数越少,布局

优化需要的迭代次数也越少.以 a^* 相对误差小于 1×10^{-6} 为迭代终止条件,当 $n = 2$ 时,需要的迭代次数为106;当 $n = 3$ 时,需要的迭代次数为138;当 $n = 4$ 时,需要的迭代次数为165,迭代终止时,各种情形下各微电子器件位置坐标见表1(注:由于结构的对称性,微电子器件布局优化结果并非唯一,表中只是给出了其中的一种优化结果).

表1 微电子器件布局优化结果
Table 1 Layout optimization results of the microelectronic devices

	x (m)	y (m)
$n = 2$	-0.250	0.000
	0.250	0.000
$n = 3$	-0.250	-0.006
	0.250	0.006
	0.372	0.082
$n = 4$	-0.250	0.000
	0.250	0.000
	0.372	0.084
	-0.372	-0.084

4 结论

微电子器件在航天器中的布局与航天器局部动力学行为息息相关,对微电子器件的布局进行优化,不仅有利于航天器局部减振,也有利于保证微电子器件的工作性能.本文正是基于以上背景,建立了粘结有若干个微电子器件的柔性薄板在冲击荷载序列作用下的振动方程,基于广义多辛理论,发展了该柔性薄板振动问题的保结构分析方法对该薄板振动问题进行模拟.基于模拟结果,以微电子器件加速度最大值的加权平均值最小为优化目标,对微电子器件的布局位置进行优化,得到了满足约束条件的布局优化结果,为航天器中的微电子器件的布局优化设计提供了新的途径.

需要说明的是,为方便后续的动力学分析和优化设计,本文在薄板振动问题的动力学建模过程中,忽略了薄板厚度、微电子器件尺寸等因素,在布局优化设计过程中,不区分微电子器件的质量差别和权重差别,并仅让微电子器件布置位置在初始位置附近的一个很小范围内摄动,这些简化虽然能够加快优化收敛速度,但是不能从理论上证明布局优化结果的全局最优性.

参 考 文 献

- 1 Liu J f, Hao L, Li G, et al. Multi-objective layout optimization of a satellite module using the Wang-Landau sampling method with local search. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2016, 17(6):527 ~ 542
- 2 Curty Cuco A P, de Sousa F L, Silva Neto A J. A multi-objective methodology for spacecraft equipment layouts. *Optimization and Engineering*, 2015, 16(1):165 ~ 181
- 3 陶鸿飞, 崔升. 压电智能结构的主动控制及压电执行器布局优化. *动力学与控制学报*, 2019, 17(3):234 ~ 243 (Tao H F, Cui S. Active control of piezoelectric structures and optimal placement of piezoelectric actuators. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(3):234 ~ 243 (in Chinese))
- 4 Jia C, Huang Q, Wang G. Stability analysis of blocky structure system using discontinuity layout optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2020, 121(24):5766 ~ 5783
- 5 Nanayakkara K I U, He L, Fairclough H E, et al. A simple layout optimization formulation for Load-carrying tensegrity structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 62(6):2935 ~ 2949
- 6 Ambrozkiwicz O, Kriegesmann B. Simultaneous topology and fastener layout optimization of assemblies considering joint failure. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2021, 122(1):294 ~ 319
- 7 Hu W P, Deng Z C, Han S M, et al. Generalized multi-symplectic integrators for a class of Hamiltonian nonlinear wave PDEs. *Journal of Computational Physics*, 2013, 235:394 ~ 406
- 8 Hu W P, Wang Z, Zhao Y P, et al. Symmetry breaking of infinite-dimensional dynamic system. *Applied Mathematics Letters*, 2020, 103:106207
- 9 Hu W P, Huai Y L, Xu M B, et al. Mechano-electrical flexible hub-beam model of ionic-type Solvent-Free nanofluids. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 159:107833
- 10 宋明哲, 邓子辰, 赵云平, 等. 含弱阻尼空间结构的耦合动力学保结构分析. *动力学与控制学报*, 2019, 17(5):419 ~ 424 (Song M Z, Deng Z C, Zhao Y P, et al. Coupling dynamic structure-persevering analysis of spatial structure with weak dampin. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(5):419 ~ 424 (in Chinese))
- 11 韩磊, 胡伟鹏. WBK 方程稳态解的保结构分析. *动力学与控制学报*, 2019, 17(4):313 ~ 317 (Han L, Hu W P. Structure-preserving analysis for steady-state solution of WBK equation. *Journal of Dynamics and Control*, 2019, 17(4):313 ~ 317 (in Chinese))
- 12 王新栋, 胡伟鹏, 邓子辰. 空间太阳能电站太阳能接收器二维展开过程的保结构分析. *动力学与控制学报*, 2015, 13(6):406 ~ 409 (Wang X D, Hu W P, Deng Z C. Structure-preserving analysis of 2D deploying process for solar power receiver of solar power satellite. *Journal of Dynamics and Control*, 2015, 13(6):406 ~ 409 (in Chinese))
- 13 Feng K. On difference schemes and symplectic geometry. *Proceeding of the 1984 Beijing Symposium on Differential Geometry and Differential Equations*, Beijing: Science Press, 1984, 42 ~ 58
- 14 Marsden J E, Ratiu T. *Introduction to mechanics and symmetry*. New York: Springer-Verlag, 1999
- 15 Bridges T J. Multi-symplectic structures and wave propagation. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1997, 121(1):147 ~ 190
- 16 Xu X J, Deng Z C, Meng J M, et al. Bending and vibration analysis of generalized gradient elastic plates. *Acta Mechanica*, 2014, 225(12):3463 ~ 3482
- 17 Hu W P, Zhang C Z, Deng Z C. Vibration and elastic wave propagation in spatial flexible damping panel attached to four special springs. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2020, 84:105199
- 18 富展展, 尹佑旺, 孙秀婷. 基于弹性关节的二维宽频隔振结构的设计及优化. *动力学与控制学报*, 2020, 18(2):29 ~ 34 (Fu Z Z, Yin Y W, Sun X T. Design and optimization of broadband vibration isolation structure with elastic joints. *Journal of Dynamics and Control*, 2020, 18(2):29 ~ 34 (in Chinese))
- 19 单宝来, 张琪昌, 张沛, 等. 洗车车用吸尘盘气动噪声的优化. *动力学与控制学报*, 2020, 18(6):90 ~ 100 (Shan B L, Zhang Q C, Zhang P, et al. Optimization of aerodynamic noise for cleaning sweeper's dust collector. *Journal of Dynamics and Control*, 2020, 18(6):90 ~ 100 (in Chinese))

LAYOUT OPTIMIZATION ON MICROELECTRONIC DEVICES IN SPACECRAFT BASED ON STRUCTURE-PRESERVING METHOD *

Jiang Ruisong¹ Xu Mengbo² Hu Weipeng^{2†}

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(2. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract The layout of precise microelectronic devices in spacecrafts affects local vibration characteristics of the spacecraft. The local vibration characteristics of the spacecraft affect stability and precision of the microelectronic devices. Thus, layout optimization of the microelectronic devices is performed to decrease the effects of local vibration of the spacecraft. In each optimization iteration process, the microelectronic devices are bonded in a flexible panel that fixed on the spacecraft by several bolts. The structure-preserving method, focusing on the local geometric properties of the system, is employed to investigate local vibration characteristics of the spacecraft in each optimization iteration step. The optimization method and associated results presented in this paper provide guidelines on layout optimization of precise microelectronic devices in spacecrafts.

Key words structure-preserving, layout optimization, microelectronic device, generalized multi-symplectic

Received 30 March 2021, Revised 21 April 2021.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (U1830122, 11972284, 11672241) and the Fund for Distinguished Young Scholars of Shaanxi Province (2019JC-29).

† Corresponding author E-mail: wphu@nwpu.edu.cn