doi:10.11887/j.cn.201404001 http://journal.nudt.edu.cn

航天器隔振器多目标优化方法*

罗 军[1,2],唐国金[1]
(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073;
2. 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

摘 要:由于存在各种高频内部扰动,高精度航天器通常需要进行隔振设计,而被动隔振装置被广泛采用。在被动隔振装置设计中,抑制共振响应峰和隔离中高频振动存在很强的冲突性,需要进行多目标优化设计。建立了隔振系统的动力学模型,提出了以传递函数共振峰幅值和中高频衰减为目标函数的多目标优化模型;提出了基于分解的多目标进化算法对单级和两级隔振装置进行多目标优化的设计方法;对某空间隔振装置进行了数值仿真,结果验证了本文算法的有效性。

关键词:航天器;被动隔振;多目标优化
中图分类号:V414 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)04-0001-04

Multiobjective optimization design of isolator for spacecraft

LUO Jun[1,2], *TANG Guojin*[1]
(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. Beijing Institute of Aerospace System Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: It is common to use passive isolator to protect the payload from the platform noise in space applications. The design of a passive isolator involves a trade-off between the resonant peak reduction and the high frequency attenuation. Firstly, the equation of motion and transfer function model for single-stage and two-stage connector model was derived, and then the multiobjective optimization model, in which the objective functions are the resonant peak reduction and the high frequency attenuation, was proposed,. Secondly, the multiobjective optimization design method for the design of the passive isolator was proposed, using the multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition (MOEA/D). The simulation result shows that the proposed method is effective for the design process of the passive isolator, and can provide multiple candidate solutions for the designer.

Key words: spacecraft; passive vibration isolation; multiobjective optimization

随着对各类观测遥感卫星分辨率要求的提高,通常需要对星上活动部件(如动量轮)和柔性结构产生的振动与科学载荷进行隔离[1]。另外为了保证卫星在发射阶段的动力学环境,需要在火箭与卫星之间安装隔振装置[2]。因此,隔振装置在空间系统设计中具有广泛应用前景。

隔振装置主要有被动、半主动和主动隔振三种。从目前技术发展来看,半主动和主动隔振处于研制或试验阶段,而被动隔振已在航天器上得到了成功应用,如 Hubble 望远镜使用被动隔振装置隔离反作用轮扰动[3]。被动隔振的不足处是在衰减共振峰值与衰减高频段幅值之间存在矛盾:高阻尼能够有效地衰减共振峰幅值,但是高频隔振效果较差;反之,低阻尼可获得良好的高频隔振效果,而对衰减共振峰值效果较差。在被动隔振系统设计时,需要对上述矛盾进行权衡;然而在传统的设计中,并没有对其进行深入的多目标优化设计[4-6]。周勋等[7]对整星隔振的技术原理进行了分析,从抑制共振响应峰和隔离中高频振动两方面提出了整星隔振器刚度和阻尼设计的若干准则。

需要同时优化多个相互矛盾的目标的问题称为多目标优化问题,多目标优化问题的"最优"是定义在多个性能目标上的最优,其最优解不是一个,而是一组。目前有很多求解多目标的优化算法,如非劣排序遗传算法(NSGA,NSGA2)、强度 Pareto 遗传算法(SPEA,SPEA2)、Pareto 存档进化算法(PAES)等;也有许多有效的进化策略,如精英保留机制、外部存档等[8]。这些算法的核心目的是在尽量小的计算量的情况下,寻求较均匀的

* **收稿日期**:2014-01-01
基金项目:国家部委基金资助项目
作者简介:罗军(1971—),男,四川达州人,研究员,在职博士生,E-mail:wangruigfkd@sina.com

Pareto 近似解。

本文以单个被动隔振单元为研究对象，采用基于分解的多目标优化算法（Multi-Objective Evolutionary Algorithm Decomposition，MOEA/D）对其进行设计分析。首先建立了单自由度被动隔振的动力学模型，分析了抑制共振响应峰和隔离中高频振动的冲突性。然后介绍了基于分解的多目标算法。最后对某隔振装置进行了多目标优化设计。本文旨在为工程中被动隔振系统提供一种新的设计思路。

1　被动隔振系统动力学模型

为了降低卫星振动源（如高速运动的动量轮不平衡产生的扰动）对观测精度的影响，通常需要隔振设备将振动源与载荷隔离开来。

考虑如图 1 所示单级被动隔振装置，该装置由弹簧和阻尼器组成，其动力学方程如下

$$\begin{cases} m_0\ddot{x}_0 + c(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k(x_0 - x_1) = F_d \\ m_1\ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_0) + k(x_1 - x_0) = 0 \end{cases} \tag{1}$$

其中 m_0、m_1 分别为振动结构与敏感设备的质量，x_0、x_1 分别是其位移，k、c 分别是隔振装置的刚度和阻尼系数，F_d 是作用在支撑体上的扰动力。该系统的绝对位移传递率为

$$\mu_x = \left|\frac{x_1}{x_0}\right| = \sqrt{\frac{\left[1 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \tag{2}$$

其中 $\omega_n = \sqrt{k(m_0 + m_1)/(m_0 m_1)}$ 为固有角频率，ω 为扰动频率，$\xi = c/c_{cr}$ 为阻尼比，$c_{cr} = 2\sqrt{km_0m_1/(m_0 + m_1)}$ 为临界阻尼系数。不同阻尼单自由度隔振系统的绝对传递率如图 2 和图 3 所示。

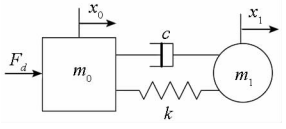


图 1　单级被动隔振装置

Fig. 1　Single stage passive isolator

从图 2 可以看出，在低频处（扰动频率与系统固有频率之比小于$\sqrt{2}$），系统在低频起放大作用，随着阻尼系数的增加，共振峰减小；在高频处（扰动频率与系统固有频率之比大于$\sqrt{2}$），系统对扰动起衰减作用，随着阻尼系数的增加，衰减作用减小。因此被动隔振系统的设计需要在共振峰幅值和中高频衰减之间进行折中。在工程设计中，对这类需要折中的优化问题，一般是转化为单个目标进行优化，而多目标优化可以为工程设计提供多个可供选择的解。

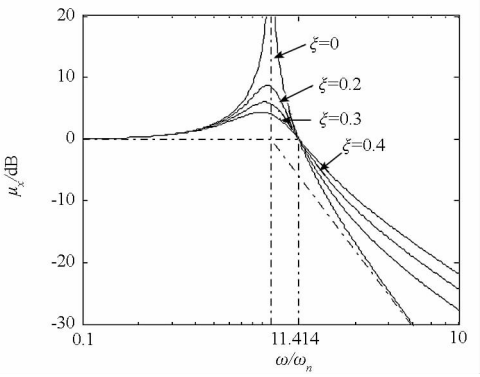


图 2　单自由度隔振系统的绝对传递率

Fig. 2　Absolute transmissibility for single stage passive isolator

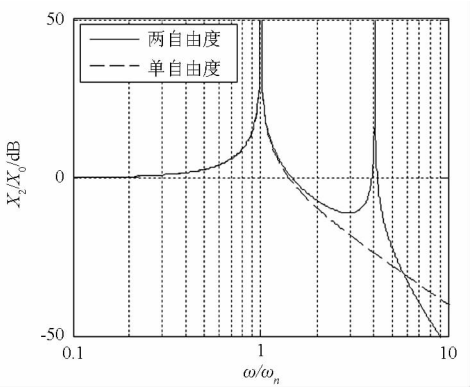


图 3　绝对传递率的对比

Fig. 3　Absolute transmissibility for single and two stage passive isolator

根据以上分析，可以将抑制共振响应峰和隔离中高频振动转化为如下目标函数

$$\begin{cases} f_1 = G(\omega_n) \\ f_2 = \sum_{k=1}^{n} \alpha_k G(\omega_k) \end{cases} \tag{3}$$

其中第一项目标函数为共振峰幅值，第二项目标函数为高频扰动频率处的衰减幅度，ω_k $(k = 1, 2, \cdots, n)$ 为高频扰动频率。

在工程实际中，双层隔振装置在高频区的隔振效果要显著优于简单隔振装置，三质量块两自由度系统在各种隔振系统中具有非常重要的作用。两自由度被动隔振系统物理模型如图 4 所示，其动力学建模过程与单自由度系统类似，这里不再赘述。

其绝对传递率为

$$G = \frac{c_1c_2s^2 + (c_1k_2 + c_2k_1)s + k_1k_2}{m_1m_2s^4 + (c_1m_2 + c_2m_1 + c_2m_2)s^3 + (c_1c_2 + k_1m_2 + k_2m_1 + k_2m_2)s^2 + (c_1k_2 + c_2k_1)s + k_1k_2} \tag{4}$$

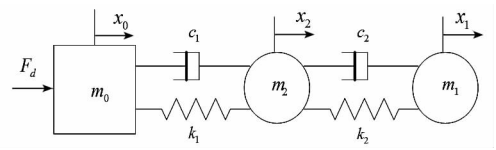


图 4　两级被动隔振装置

Fig. 4　Two stage passive isolator

考虑到阻尼不可能太大,这里对阻尼的取值范围做出约束。

$$c_{i\min} \leqslant c_i \leqslant c_{i\max},\ i = 1,\ 2 \tag{5}$$

2　基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)

多个子目标在给定区域上的最优化问题就是多目标优化问题(MOP)。一般 MOP 由 n 个决策变量参数、k 个目标函数和 m 个约束条件组成[9]。其数学表达式如下

$$\begin{cases} \min \quad \boldsymbol{y} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = (f_1(\boldsymbol{x}), f_2(\boldsymbol{x}), \cdots, f_k(\boldsymbol{x})) \\ \text{sub} \quad \boldsymbol{e}(\boldsymbol{x}) = (e_1(\boldsymbol{x}), e_2(\boldsymbol{x}), \cdots, e_m(\boldsymbol{x})) \leqslant 0 \end{cases} \tag{6}$$

这里 $\boldsymbol{x} = (x_1, x_2, \cdots, x_n) \in X$,表示决策向量;$\boldsymbol{y} = (y_1, y_2, \cdots, y_n) \in Y$,表示目标向量,$X$ 表示决策向量 $\boldsymbol{x}$ 形成的决策向量空间,Y 表示目标向量 $\boldsymbol{y}$ 形成的目标空间,约束条件 $e(x) \leqslant 0$ 确定决策向量的可行取值范围。

多目标问题中各目标之间通过决策变量相互制约,对其中一个目标性能的优化必须以其他目标作为代价。与单目标优化问题的本质区别是,多目标问题的解方案不是唯一的,而是存在一个所谓的 Pareto 最优解或非劣解。本文采用基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)进行多目标优化设计。MOEA/D 算法将多目标优化问题明确分解成 N 个标量形式的单目标优化子问题,然后在进化过程同时求解这些子问题。因为两个相邻子问题的优化解应该非常相似,所以在 MOEA/D 算法中每个子问题可使用其相邻子问题的优化信息,进而可以提高优化效率,减少计算量。下面简要介绍 MOEA/D 算法的大体思路[10]。

若使用 Tchebycheff 分解方法,则可将原始多目标优化问题分解成 N 个标量优化问题,令 $\lambda^1, \cdots, \lambda^N$ 为均匀分布的一组权重矢量,z^* 为参考点,则第 j 个子问题的目标函数为

$$g^{te}(x \mid \lambda^j, z^*) = \max_{1 \leqslant i \leqslant m} \{\lambda_i^j \mid f_i(x) - z_i^* \mid\} \tag{7}$$

因为 g^{te} 关于 λ 连续,所以当 λ^i 和 λ^j 彼此接近时,则 $g^{te}(x \mid \lambda^i, z^*)$ 的优化解应该接近 $g^{te}(x \mid \lambda^j, z^*)$ 的优化解,于是与 λ^i 接近的关于 g^{te} 的任何信息都对优化 $g^{te}(x \mid \lambda^i, z^*)$ 有帮助。在 MOEA/D 中,根据权重矢量 λ^i 的距离来定义其相邻子问题,进而相邻问题的优化信息可以共享。

3　仿真分析

被动隔振系统多目标优化的数学模型如下:

(1)目标函数:见式(3);

(2)决策变量:阻尼系数 c;

(3)约束条件:见式(5)。

3.1　单自由度被动隔振系统多目标优化

单自由度被动隔振系统多目标优化中参数设置如下:$m_1 = 16\text{kg}$,$k = 5000\text{N/m}$,$c_{\min} = 50\text{N} \cdot \text{s/m}$,$c_{\max} = 1000\text{N} \cdot \text{s/m}$,假设扰动频率为 $\omega_d = 100\text{rad/s}$。多目标优化结果如图 5 所示。从图中可以看出,目标空间中对高频扰动衰减得越多,则抑制共振响应峰越差,反之亦然。对单自由度被动隔振系统设计,抑制共振响应峰和隔离中高频振动存在很强的冲突性。

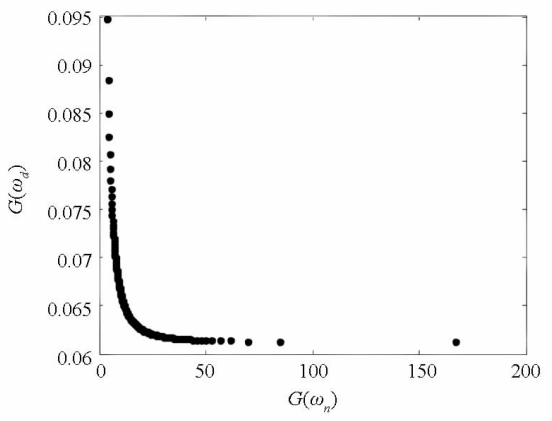


图 5　单自由度被动隔振系统 Pareto 前沿

Fig. 5　PF of single stage passive isolator

在一般情况下,被动隔振系统的刚度太小会导致系统频率较低,与结构耦合;而刚度太大,对扰动的衰减作用减小,刚度的调节范围较小。因此这里仅将阻尼作为决策变量。对单自由度被动隔振系统来说,阻尼只有一个,即使不用多目标优化,也比较容易对抑制共振响应峰和隔离中高频振动进行折中。

3.2　两自由度被动隔振系统多目标优化

两自由度被动隔振系统多目标优化中参数设置如下:$m_1 = 15\text{kg}$,$m_2 = 16\text{kg}$,$k_1 = 10000\text{N/m}$,$k_2 = 5000\text{N/m}$,$c_{1\min} = 50\text{N} \cdot \text{s/m}$,$c_{1\max} = 1000\text{N} \cdot \text{s/m}$,$c_{2\min} = 300\text{N} \cdot \text{s/m}$,$c_{2\max} = 500\text{N} \cdot \text{s/m}$,假设扰动频率为 $\omega_d = 628\text{rad/s}$。多目标优化的近似 Pareto 前沿(PF)如图 6 所示,近似 Pareto 集(PS)如图 7 所示,从优化结果可以看出决策空间为分段连续的

曲线。

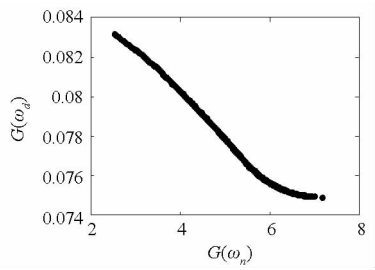


图6　两自由度被动隔振系统 Pareto 前沿

Fig. 6　PF of two stage passive isolator

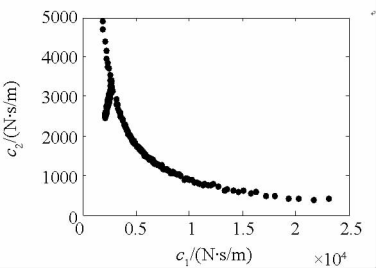


图7　两自由度被动隔振系统 Pareto 集

Fig. 7　PS of two stage passive isolator

4　结论

在被动隔振系统设计中,抑制共振响应峰和隔离中高频振动存在很强的冲突性。本文建立了隔振系统的动力学模型,提出了以阻尼系数为决策变量、传递函数共振峰幅值和中高频衰减为目标函数的多目标优化模型,采用基于分解的多目标进化算法对单自由度和两自由度隔振系统进行了优化。仿真分析表明本文算法的有效性,该方法可应用于航天器被动隔振系统的分析设计之中。

参考文献(References)

[1]　冯振兴. “有效载荷”减震技术的最新动向[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(5): 306 – 308.
FENG Zhenxing. The recent development of vibration isolation of payloads[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(5): 306 – 308. (in Chinese)

[2]　刘天雄, 林益明, 王明宇,等. 航天器振动控制技术进展[J]. 宇航学报, 2008, 29(1): 1 – 12.
LIU Tianxiong, LIN Yiming, WANG Mingyu, et al. Review of the spacecraft vibration control technology[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(1): 1 – 12. (in Chinese)

[3]　Hasha M D. Passive isolation/damping system for the Hubble space telescope reaction wheels[R]. California, 1987.

[4]　Belvin W K, Sparks D W, Horta L G, et al. On the isolation of science payloads from spacecraft vibrations[C]. New Orleans, LA: AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 1995.

[5]　Flint E, Evert M E, Anderson E, et al. Active/passive counter-force vibration control and isolation systems[C]. Big Sky, Montana: IEEE 2000 Aerospace Conference, 2000.

[6]　Pendergast K J, Schauwecker C J. Use of a passive reaction wheel jitter isolation system to meet the advanced X-ray astrophysics facility imaging performance requirements[R]. 1998.

[7]　周勋, 王皓, 高剑,等. 整星隔振技术的原理分析[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1752 – 1755.
ZHOU Shao, WANG Hao, GAO Jian, et al. Analysis for the principle of whole-spacecraft vibration isolation[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1752 – 1755. (in Chinese)

[8]　黄敏, 陈国龙, 郭文忠. 基于表现型共享的多目标粒子群算法研究[J]. 福州大学学报, 2007,35(3): 365 – 368.
HUANG Min, CHEN Guolong, GUO Wenzhong. Multi-objective particle swarm optimization research based on phenotype sharing[J]. Journal of Fuzhou University, 2007,35(3): 365 – 368. (in Chinese)

[9]　崔逊学. 多目标进化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
CUI Xunxue. Multiobjective evolutionary algorithms and their applications[M]. National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)

[10]　Zhang Q, Li H. MOEA/D: a multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2007, 11: 712 – 731.