

# 主动式动力反共振隔振系统控制策略研究与仿真\*

张 闻 张 方 姜金辉

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

**摘要:** 动力反共振隔振是一种非常有效的减隔振方法。它具有静态刚度大,适合低频隔振,隔振效率与主质量块无关,反共振点隔振效率高等突出优点。然而,当外激励频率偏离反共振频率时,被动式动力反共振隔振系统不能实时调节自身结构以适应外界环境的变化,从而导致隔振效率的降低。针对前人设计的动力反共振隔振装置,提出了一种基于爬山法的主动控制算法,能够根据外界环境的变化实时的调节装置的反共振频率,有效地拓宽了隔振装置的可用频带。在此理论基础上,基于LabVIEW平台对所提出的控制算法进行了仿真研究,仿真结果表明了该算法的有效性。

**关键词:** 动力反共振隔振;振动主动控制;智能结构;爬山法;LabVIEW 仿真

**中图分类号:** TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Control algorithm design and simulation for active DAVI system

Zhang Wen Zhang Fang Jiang Jinhui

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Dynamic anti-vibration isolators (DAVI) has been effectively used to remove undesirable oscillations from mechanical structures. The DAVI method has advantages such as large static stiffness, remarkable vibration isolation, and being efficiency in low-frequency vibration damping. However, when the frequency of the external excitation varies, traditional passive DAVI can't remain high efficiency all the time. Aimed at solving this problem, this passage proposed an active DAVI method based on the hill climbing algorithm, which tunes the system's anti-resonance frequency dynamically by moving a small mass according to the online-measured force transmissibility. The paper first introduces the tunable DAVI system and the control theory. Then, simulations are conducted using LabVIEW and the proposed theory is verified.

**Keywords:** active DAVI; hill climbing method; active vibration control; system simulation; smart structure

### 1 引言

随着工业的发展,振动现象愈发的引起人们的重视<sup>[1-2]</sup>。如今,如何有效的控制结构的振动响应已经成为一个重要的研究问题<sup>[3]</sup>。动力反共振隔振器(dynamic anti-vibration isolator, DAVI)是一种可以有效的减轻结构振动响应的装置。它巧妙的结合了隔振与吸振技术,具有静态刚度大、适合低频隔振、隔振效率高并且隔振效率与主质量块无关等优点。作为一种重要的隔振技术手段,近几十年国外对其进行了大量的研究<sup>[4-6]</sup>。

动力反共振隔振器在其反共振频率处具有很高的隔振效率,通常可以达到95%以上。然而,当外激励频率偏离预

先设计的反共振频率时,传统的被动式动力反共振隔振器的隔振效率将会大幅减小。为此,需要引入主动控制技术,根据外界环境动态的调节动力反共振隔振系统的反共振频率,以拓宽动力反共振隔振器的可用频率范围。

目前,国内外对动力反共振技术的研究主要集中在隔振器的机理、结构形式以及应用领域上。例如,文献[4]研究了两自由度系统的反共振模型,文献[5]提出了一种单质体反共振装置并研究了它在振动筛上的应用。这些研究的研究对象多为被动式动力反共振隔振器,隔振频带较窄。主动式动力反共振技术可以有效拓宽隔振器的使用频带,但是目前为止对主动式动力反共振隔振装置的研究却鲜有报道。

针对前人提出的可调节式动力反共振隔振装置,提出

收稿日期:2015-05

\* 基金项目:机械结构力学及控制国家重点实验室(南京航空航天大学)自主研究课题资助(0115K01)、直升机旋翼国防重点实验室基金、江苏高校优势学科建设工程基金

了一种基于爬山法的动力反共振主动控制算法,并仿真研究了该算法的减振效果。

## 2 隔振装置设计

文献[7]结合聚焦式隔振技术和动力反共振技术设计了一种直升机单向旋翼动力反共振隔振装置。其设计平面原理如图1所示,隔振器的 CATIA 三维模型如图2所示。整个隔振装置通过4根横杆上对称于D位置的4个基座连接至机身上。质量块A的振动经隔振系统传至4个基座处。4根横杆上小质量块m的位置可以用直线导轨实时调节。

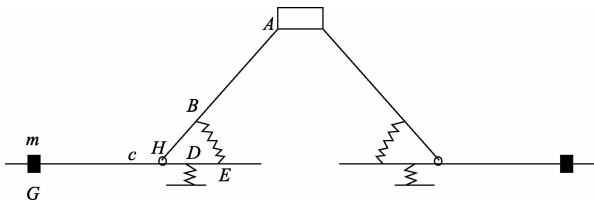


图1 隔振装置平面原理

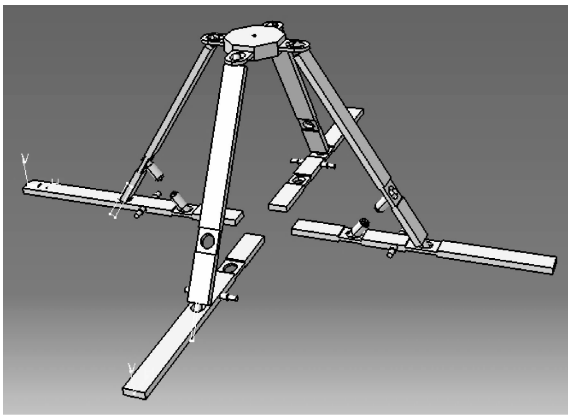


图2 隔振装置 CATIA 模型

当小质量块的位置改变时,系统的反共振频率也会随之改变。为了研究小质量块位于滑块上不同位置时隔振装置的隔振效率,建立隔振装置的有限元模型如图3所示。定义隔振装置的传递率为图1中4个基座的支反力之和与质量块A处所加激振力的比。

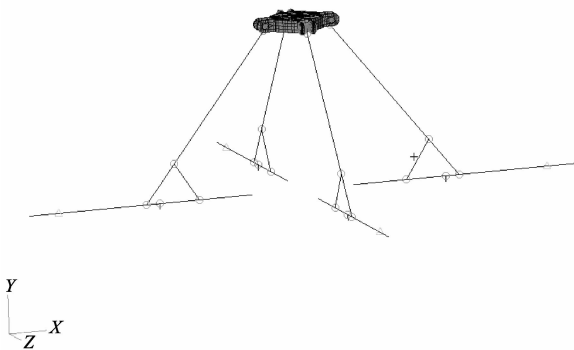


图3 隔振装置有限元模型

应用 NASTRAN 计算<sup>[8]</sup>得到的不同激振力频率下不同小质量块位置对应的隔振装置传递率如图4所示。由于结构对称性的需要,令4根横杆上的每个小质量块的位置始终关于中心轴对称。对应每个不同的激励频率,仿真计算得到的使整个隔振装置传递率最低的小质量块位置及该位置下隔振器的传递率如图5所示。

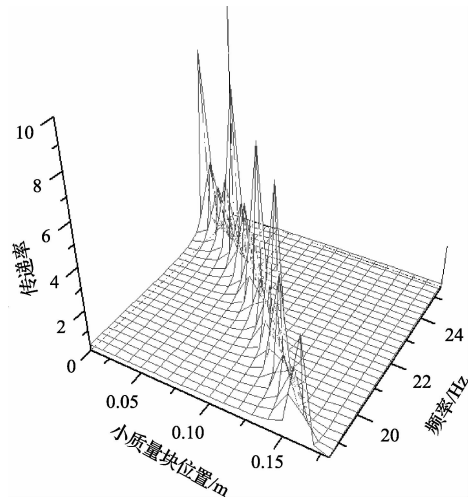


图4 不同环境下隔振装置的传递率

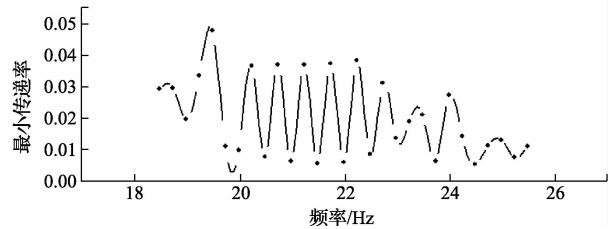
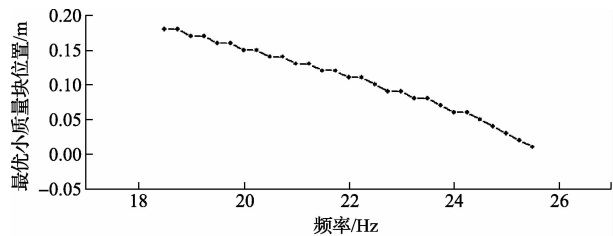


图5 不同频率下小质量块的最优位置及其对应的隔振装置传递率

由图5可以看出,经过精心的设计,DAVI 隔振装置的隔振效率可以达到95%以上。另外,如图4所示,如果小质量块的位置固定不变,当外激励的频率偏离预先设计的反共振频率时,系统的隔振效率会降低甚至引起共振。因此,在所设计的隔振装置中引入主动控制算法实时调节小质量块的位置,以保证整个系统的隔振效率始终维持在一个较低的水平是十分必要的。

### 3 基于爬山法的主动式 DAVI 控制算法

主动式动力反共振隔振器的工作原理如图 6 所示。外激励作用在隔振装置上引起系统的振动,然后传递至被隔振装置上。控制系统通过传感器同时测量激励源处和被隔振装置上的振动信号并传输至控制器。这里的振动信号可以是力信号、速度信号或加速度信号,需要根据实际情况中允许使用的传感器类型来确定。信号传输至控制器后,由控制器计算隔振装置的实时传递率,并根据主动控制算法计算小质量块的最优位置。然后控制器控制直流电机旋转,带动滚珠丝杠旋转将直线导轨上的小质量块移动至对应位置,由此改变系统的反共振频率。

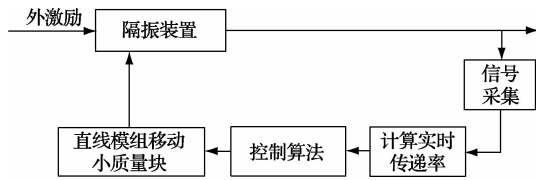


图 6 主动式 DAVI 控制原理

在主动式动力反共振隔振系统中,外激励以及隔振结构都是时变的,应用基于爬山法的振动主动控制算法,在不需要预先知道系统的精确模型的情况下,实时地在线寻找使得隔振效率最优的小质量块位置。

爬山法作为一种简单但是非常有效地寻找极值的方法已在工业中得到了广泛的应用<sup>[9-10]</sup>。它的基本思想是每次给小质量块的位置指定一个变化量,根据传递率的变化趋势决定小质量块位移的控制增量,使隔振系统运行在高隔振效率的状态。

外激励频率为 24.25 Hz 时不同小质量块位置对应的系统传递率

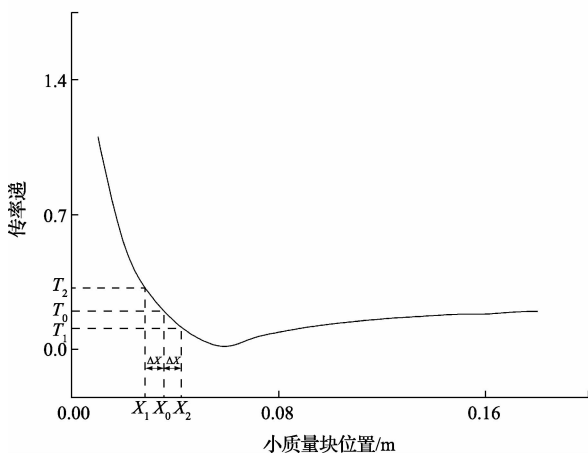


图 7 爬山法原理

如图 7 所示,以外激励频率为 24.25 Hz 时隔振系统对小质量块位置的变化曲线为例,每次控制时给小质量块的位移  $X$  一个增量  $\Delta X$ 。设小质量块的初始位置为  $X_0$ ,对应的隔振装置的传递率为  $T_0$ 。若小质量块位置改变

$\Delta X$  后移动至位置  $X_1$  处,传递率变化至  $T_1$ ,由于  $T_1 > T_0$ ,说明当前小质量块的移动方向会使传递率变大,则下一步控制输出时应改变小质量块的移动方向,反方向搜寻使得隔振效率最高的小质量块位置。另一方面,如果小质量块移动  $\Delta X$  后位置变为  $X_2$ ,传递率变化至  $T_2$ ,由于  $T_2 < T_0$ ,说明当前小质量块的移动方向可以使隔振装置的传递率减小,下一步控制时可以继续沿当前方向搜寻小质量块的最优位置。由于伺服直流电机的运转速度很快,加减速时间极短,可以高速精确地改变小质量块的位置,因此可以使用较小的移动步长  $\Delta X$  以及较小的控制间隔时间,当外激励频率变化时快速的改变小质量的位置,使系统始终运行在高隔振率的状态。

针对所提出的隔振系统,当小质量块定位至初始位置后,首先人工指定一个微小的初始位置变化量  $\Delta X_0$ ,以确定小质量块最优位置的搜索方向。然后,以较大的步长沿所选的方向定步长的移动小质量块,直至隔振系统的传递函数变化量  $\Delta T > 0$ ,此时小质量块已经经过了最优位置。接着改变移动方向以较小的步长移动小质量块以精确的搜寻最优位置,直到系统的隔振效率达到预定的要求,此后便可不再移动小质量块。当外激励频率改变,系统的隔振效率不再满足要求时,重复上述步骤即可。值得指出的是,为了避免系统进入共振区,针对动力反共振隔振装置共振区位于反共振点左侧的特点,当传递率超过一定数值时,即可快速将小质量块向右移动。控制算法的流程如图 8 所示。

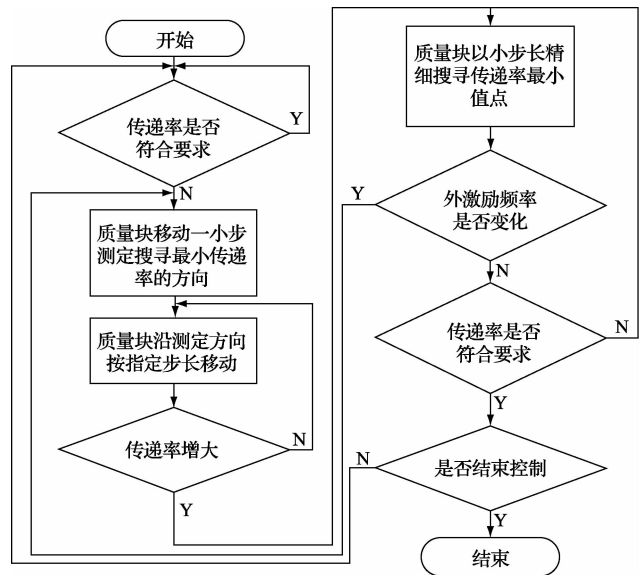


图 8 控制算法流程

### 4 基于 LabVIEW 的控制仿真算例

LabVIEW 是由美国 NI 公司研发的一个程序开发软件,它有着功能强大多样的程序模块及丰富齐全的配套接口硬件,是编写测试、控制程序的理想选择<sup>[11-12]</sup>。本节

于上文提出的控制策略,针对第2节中仿真算得的不同频率、不同小质量块位置下隔振装置的传递率,在 LabVIEW 平台上编写了控制仿真程序。

#### 4.1 仿真程序

考虑到所采用的电机的实际性能,选定控制的时间间

隔为 0.16 s,粗略搜索的步长为 0.02 m,精细搜索的步长为 0.01 m。小质量块的移动范围为 0.01~0.18 m。设定当系统传递率小于 0.04 时即停止移动小质量块。

应用 LabVIEW 编写的控制算法仿真程序如图 9 所示。

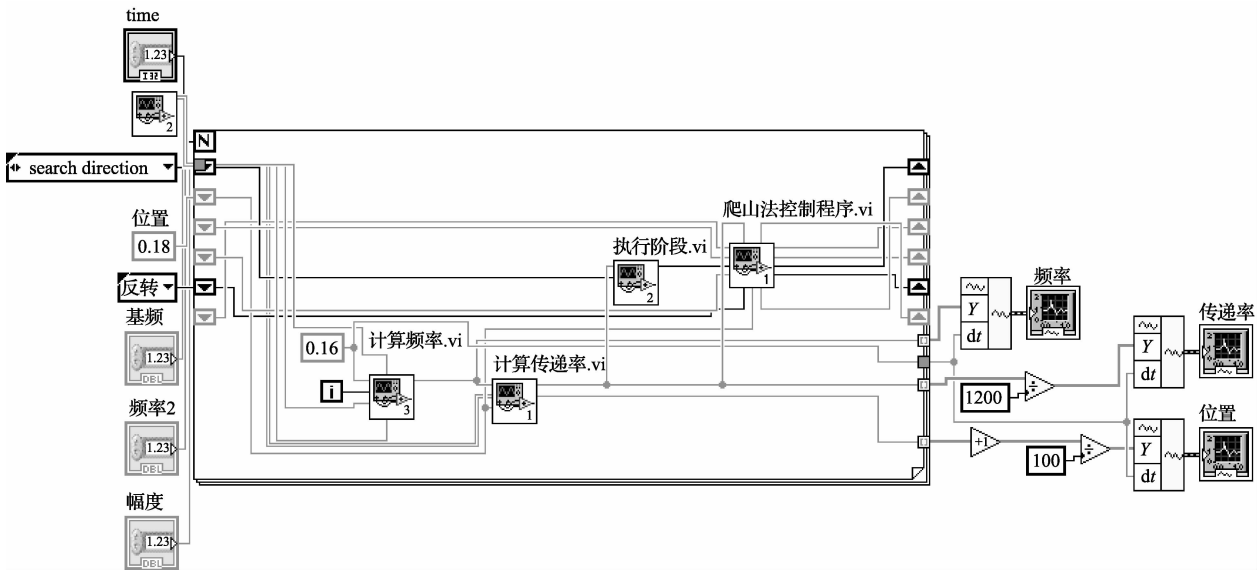


图 9 基于 LabVIEW 的控制算法仿真程序

#### 4.2 仿真与结果

假设每次小质量块的初始位置都位于 0.18 m 处。

首先验证外激励的频率固定不变时控制算法的控制效果。外激励的频率固定为 20 Hz。仿真结果如图 10 所示。可以看出,控制算法的收敛速度很快,0.4 s 内隔振装置的隔振效率已达 98.983%。并且,由于引入了停止搜索的传递率阈值,避免了系统在最优位置附近的振荡。

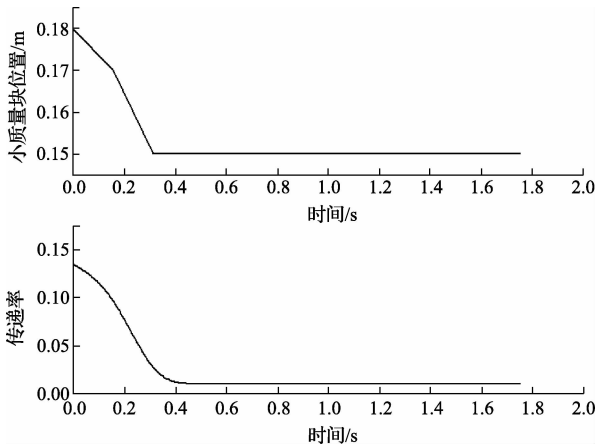


图 10 20 Hz 定频外激励下控制仿真结果

其次验证变频外激励下控制系统的控制效果。外激励的频率  $f$  (单位: Hz) 按如下规律变化:  $f = 20 +$

$2\sin(0.02\pi \cdot t)$ 。式中:  $t$  为时间,单位: s。仿真结果如图 11 所示。

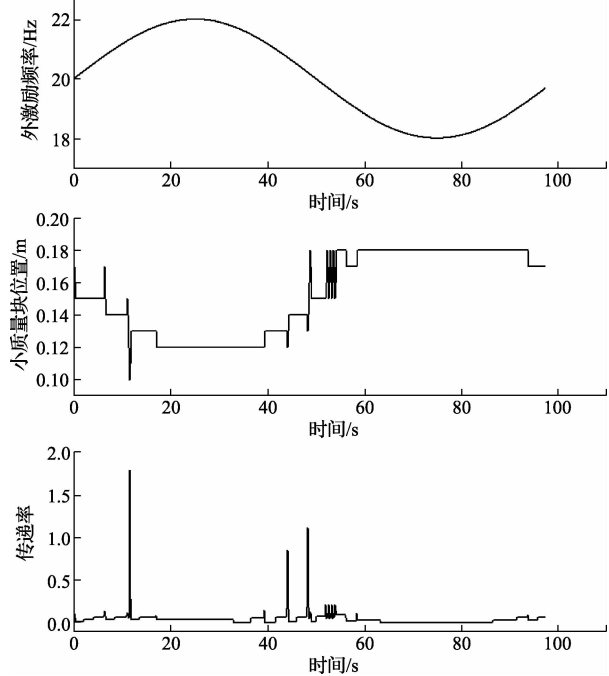


图 11 变频外激励下控制仿真结果

从图 11 可以看出,由于爬山法只能根据系统隔振率

的变化趋势调整小质量块的位置,而并不能预先知道小质量块的移动方向,因此会在控制效果中引入尖峰。但由于系统响应很快,峰值的持续时间很短,整个控制过程中,系统的隔振效率平均值为95%。由此可以看出,控制算法取得了很好的效果。

## 5 结论

研究了主动式动力反共振隔振系统的控制策略。在外激励频率时变的条件下,针对前人设计的直升机单向主旋翼动力反共振隔振装置,提出了基于爬山法的主动控制算法。通过在线监测隔振系统的隔振效率及其变化趋势,实施的调节隔振装置上小质量块的位置,保证了系统的隔振效率在较长的时间内可以维持在一个较高的水平。基于LabVIEW的控制算法仿真验证了算法的有效性。

### 参考文献

- [1] 李嘉全,程志峰. 用于主动减振的振动信号实时高精度检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(12): 1134-1140.
- [2] JIANG D, SHAN Y, WANG D, et al. Research on magnetic levitation absolute vibration measurement method in vehicles[J]. Instrumentation, 2014, 1(2): 38-49.
- [3] 周凌波,张方,姜金辉. FTF自适应主动控制算法的参数研究及应用[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(5): 44-47.
- [4] 龚善初. 反共振方法及其应用[J]. 曲阜师范大学学报:自然科学版, 2005, 31(2):73-76.
- [5] 刘劲涛,李小号,高洪波,等. 单质体反共振隔振振动机械的理论及应用[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2011, 32(5):724-727.
- [6] YILMAZ C, KIKUCHI N. Analysis and design of

passive band-stop filter-type vibration isolators for low-frequency applications[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 291(3): 1004-1028.

- [7] 宋楚晨,张方. 直升机单向主旋翼动力反共振隔振器设计与研究[J]. 振动工程学报, 2014, 27(增刊2):58-62.
- [8] 宋楚晨. 直升机主旋翼半主动 DAVI 隔振系统设计[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
- [9] 罗宇锋,刘勇,陈建磊. 模糊控制的爬山法在风电系统中的应用研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 378-381.
- [10] 张秋梅. 数码相机自动对焦算法的研究与实现[D]. 西安:西北工业大学, 2006.
- [11] 张鑫,李冬梅,黄元庆. 基于LabVIEW的阵列式传感器数据采集系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1399-1401.
- [12] 孟武胜,朱剑波,黄鸿,等. 基于LabVIEW数据采集系统的设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(11): 63-65.

### 作者简介

**张闻**, 1991年出生, 硕士研究生。主要研究方向为振动主动控制、虚拟仪器设计与实现。

E-mail: 575940861@qq.com

**张方**, 1962年出生, 博士, 教授。主要研究方向为复杂结构动载荷识别、机械结构动力学、噪声与振动控制、振动信号数据分析、振动测试虚拟仪器设计。

E-mail: zhangf@nuaa.edu.cn

**姜金辉**, 1981年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为振动测试与数据处理、动载荷识别、虚拟仪器设计与实现。

E-mail: jiangjinhui@nuaa.edu.cn