

doi: 10.7690/bgzd.2019.12.014

基于特征模型的主被动一体化隔振平台控制分析

孙介涛, 沈少萍

(厦门大学航空航天学院, 福建 厦门 361101)

摘要: 在各类飞行器飞行的过程中, 飞行器载荷会受到不同频段的外扰影响, 出现拍照模糊不清楚等问题, 建立主被动一体化隔振平台模型, 阐述使用特征模型思想对该平台主动隔振系统进行控制, 抑制台面振动。选取超磁致伸缩作动器作为主动控制元件, 建立主被动一体化隔振平台模型; 根据力跟踪的平台模型设计了基于位移跟踪的平台模型; 建立位移跟踪隔振平台的特征模型, 并将特征模型估计所得的状态变量和黄金分割控制、逻辑微分控制相结合, 对隔振平台的主动隔振控制系统进行控制; 通过 Simulink 仿真验证了控制器的有效性, 并与传统的 PID 控制结果进行对比, 证明了该控制器的优越性。

关键词: 主被动隔振; 特征模型; 超磁致伸缩作动器; 黄金比例分割控制; 逻辑微分控制

中图分类号: TP202 **文献标志码:** A

Control Analysis of Active and Passive Integrated Vibration Isolation Platform Based on Characteristic Model

Sun Jietao, Shen Shaoping

(School of Aerospace, Xiamen University, Xiamen 361101, China)

Abstract: During the flight process, the aircraft load is affected by external disturbances in different frequency bands, resulting in problems such as unclear picture of the load. In this paper, a passive-integrated vibration isolation platform model is established for this problem, and how to use the characteristic model idea to control the active vibration isolation system of the platform to suppress the vibration of the table. Firstly, the giant magnetostrictive actuator is selected as the active control component to establish the active-passive integrated vibration isolation platform model. Then the platform model based on displacement tracking is designed according to the platform model of force tracking. Then the characteristic model of displacement tracking vibration isolation platform is established. And the estimated state variables and the characteristic segment based golden section control and logical differential control are combined to control the active vibration isolation control system of the vibration isolation platform. Finally, the effectiveness of the controller designed in this paper is verified by Simulink simulation, and compared with the traditional PID control results, the superiority of the controller is proved.

Keywords: active and passive vibration isolation; characteristic model; giant magnetostrictive actuator; golden proportional division control; logical differential control

0 引言

随着浮空飞行器在对地观测、侦察预警、交通管理、灾难监控和地球勘探等方面的应用价值越来越高, 环境及设备的干扰对飞行器载荷拍照成像质量问题愈发受到关注^[1-4]。例如飞艇光学探测系统由高分辨率数码相机和隔振平台组成, 主要用于对远距离目标进行拍摄, 与理想的拍摄情况(近距离, 不受空气因素影响, 相机和拍摄目标保持相对静止)相比, 置于飞艇平台的相机在对远距离目标进行拍摄时, 成像过程易受飞艇运动因素、大气环境因素(比如风的影响)及飞艇动力系统高频振动的影响, 导致图像模糊和变形, 分辨率下降。主动隔振(active vibration isolation, AVI)^[5-6]技术在被动隔振理论的

基础上, 加入可控制的隔振单元。在闭环控制形式中引入负反馈调节, 使得主动隔振作动器与干扰力相抵消, 达到保护作用。如何有效提高主动隔振作动器的控制效果成为相关研究人员正待解决的问题。随着传感器技术的发展, 使测量微小位移技术得以实现。目前, 关于主被动隔振平台的研究主要集中在对系统控制方法的改进上, 例如 PID 控制^[7]、最优控制等, 但上述方法在工程领域存在参数无法随外部干扰变化而自动调节的问题。

笔者首先改进传统力跟随控制模型的建模方法, 建立以位移跟踪控制的主被动隔振平台传递函数模型, 并使用 PID 控制策略对 2 种模型进行对比, 证明了该模型的优越性。随后结合特征模型^[8-17]方

收稿日期: 2019-10-11; 修回日期: 2019-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(61603320; 61333008; 61733017; 61273199)

作者简介: 孙介涛(1993—), 男, 河北人, 硕士, 从事航空航天飞行器载荷平台应用研究。E-mail: 695564689@qq.com。

法,设计了黄金分割控制和逻辑微分控制的控制器,对作动器输出位移进行控制。最后在数学仿真中将笔者提出方法与传统的 PID 控制器相比较,证明了该方法在不同扰动下的优越性。

1 特征模型理论

特征模型根据对象动力学特征、环境特征和控制性能要求相结合进行建模,与传统的动力学建模最大的区别就是结合控制性能要求进行建模。特征建模主要抓住控制量与要求输出量之间的关系,由特征参量与特征变量组成特征模型。与间接自适应方法相比,基于特征模型的自适应方法待辨识的参数更少,控制器算法更简单。

产生特征模型一般有 2 种方法:1) 根据实际物理对象直接进行特征建模过程;2) 从对象的原动力学方程进行推导特征模型过程。笔者采用第 2 种建模过程,建立主被动一体化隔振平台特征模型并设计控制器。

2 主被动一体化隔振模型

磁致伸缩材料是一种新型的功能材料,响应速度快、能量密度大、应变值大,非常适用于作为主动隔振作动器。将主被动一体化隔振系统简化为如图 1 所示的二自由度线性模型系统。其中,平台上层为主动隔振单元, f_d 为干扰力, k_M 、 c_M 分别为磁致伸缩作动器外部的刚度和阻尼;平台下层为被动隔振单元, k_2 、 c_2 分别为下层被动隔振元件(一般由

弹簧和橡胶垫组成)的刚度和阻尼; x_1 、 x_2 、 x_a 分别表示上层隔振对象和下层质量体(主要是作动器)位移以及作动器的输出位移。

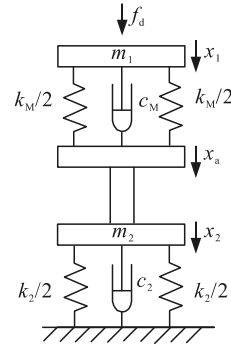


图 1 主被动联合隔振结构

此时,当外界干扰力 f_d 作用到平台上时,设作动器产生的力为 f_a , 有如下关系:

$$f_a = k_M(x_1 - x_2 - x_a) + c_M(\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}_a) \quad (1)$$

当 f_a 传递到被动隔振部分时,被动隔振元件开始受力:

$$f_a = m_2\ddot{x}_2 + c_2\dot{x}_2 + k_2x_2 \quad (2)$$

上层平台的动力学公式为

$$m_1\ddot{x}_1 = f_d - f_a \quad (3)$$

对式(1)–(3)进行拉普拉斯变换:

$$F_a = (c_M s + k_M)(X_1 - X_2 - X_a) \quad (4)$$

$$F_a = (m_2 s^2 + c_2 s + k_2)X_2 \quad (5)$$

$$m_1 s^2 X_1 = F_d - F_a \quad (6)$$

联立式(4)–(6)得上层平台位移 X_1 为:

$$X_1 = \frac{F_d((c_M s + k_M) + (m_2 s^2 + c_2 s + k_2)) + (m_2 s^2 + c_2 s + k_2)(c_M s + k_M)X_a}{m_1 s^2((c_M s + k_M) + (m_2 s^2 + c_2 s + k_2)) + (m_2 s^2 + c_2 s + k_2)(c_M s + k_M)} \quad (7)$$

下层平台位移 X_2 为

$$X_2 = \frac{F_d(c_M s + k_M) - m_1 s^2(c_M s + k_M)X_a}{m_1 s^2((c_M s + k_M) + (m_2 s^2 + c_2 s + k_2)) + (m_2 s^2 + c_2 s + k_2)(c_M s + k_M)} \quad (8)$$

则传到地基的力 f_{rd} 在频域内可表示为:

$$F_{rd} = (c_2 s + k_2)X_2 \quad (9)$$

由式(4)–(9)已经建立起在主被动一体化隔振平台中力的传递函数。经分析发现,该方法是假设作动器可以快速输出足够大的力并对其进行控制,但实际工程中发现,力控制模型会导致平台上下层之间发生耦合现象,无法准确估计出该平台的理论隔振能力,所以设计出基于位移的隔振平台系统。

2.1 基于力的主被动隔振平台模型

基于力控制的双层隔振控制框图如图 2 所示。

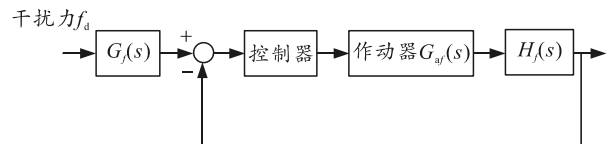


图 2 基于力控制的双层隔振控制框图

当干扰力 f_d 单独作用到整个隔振系统时, f_{rd} 为干扰力经过隔振系统传递到地基的力, f_{ra} 为磁致伸缩作动器产生的力传递到地基的力, 所以其差值即为实际传递到地基的力。

首先考虑当 f_d 作为单独的自变量影响系统的输出, 即作动器不产生输出位移时, 干扰力 f_d 经过整

个隔振平台传递到地基的力如式(9)所示, 由此推导出力的频域传递函数

$$G_f(s) = \frac{F_{rd}}{F_d} = \frac{(c_2s + k_2)(c_Ms + k_M)}{m_1s^2((c_Ms + k_M) + (m_2s^2 + c_2s + k_2)) + (m_2s^2 + c_2s + k_2)(c_Ms + k_M)} \quad (10)$$

同理, 当干扰力不作为扰动源时, 磁致伸缩作动器作为唯一单独自变量影响系统输出时, 由式(5)、(9)可知, 其输出力 f_a 与传递到地基的力 f_{ra} 频域传递函数

$$H_f(s) = \frac{F_{ra}}{F_a} = \frac{c_2s + k_2}{m_2s^2 + c_2s + k_2} \quad (11)$$

作动器的传递函数 $G_{af}(s)$ 由文献[18-19]得到力与电流比值:

$$G_{af}(s) = \frac{F(s)}{I(s)} = \frac{d_{33}NA_M}{s^H L_M} \frac{d_{33}NA_M}{(s^H L_M)^2[(M_c s^2 + cs + k) + \frac{A_M}{s^H L_M}]} \quad (12)$$

$$G_p(s) = \frac{X_1}{F_d} = \frac{(c_Ms + k_M) + (m_2s^2 + c_2s + k_2)}{m_1s^2((c_Ms + k_M) + (m_2s^2 + c_2s + k_2)) + (m_2s^2 + c_2s + k_2)(c_Ms + k_M)} \quad (13)$$

由式(9)可知, 下层平台位移 x_2 对地基力 f_r 的传递函数为:

$$H_p(s) = \frac{F_r}{X_2} = c_2s + k_2 \quad (14)$$

为了计算机仿真方便, 此处取:

$$H_p(s) = \frac{c_2s + k_2}{0.1s + 1} \quad (15)$$

由文献[18-19], 作动器传递函数

$$G_{av}(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{d_{33}k_M NL_M a}{2(R_2 - R_1)(M_2 S^2 + CS + K)} \quad (16)$$

3 基于特征模型主动隔振器控制律设计

3.1 磁致伸缩作动器的特征建模

在实现位置跟踪或保持控制时, 任一 n 阶线性定常对象 $G(s)$, 在满足采样定理条件下, 可以用一个 2 阶时变差分方程来描述其特征模型, 即可对式(16)进行特征建模得:

$$y(k) = f_1(k)y(k-1) + f_2(k)y(k-2) + g_0(k)u(k) \quad (17)$$

其中: $y(k)$ 是磁致伸缩作动器的输出位移; $u(k)$ 是控制率生成的电流控制量; $f_1(k)$ 、 $f_2(k)$ 、 $g_0(k)$ 为待识别参数。

特征模型建立的同时就决定了需要辨识参数, 根据特征模型原理, 将估计参数的初值设置为

2.2 基于位移的主被动隔振平台模型

基于位移控制的主被动一体化隔振模型控制框图如图 3 所示。

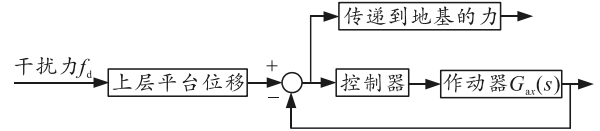


图 3 基于位移跟踪的双层隔振控制框图

当干扰力 f_d 开始作用, m_1 首先产生位移 x_1 , 作动器受 m_1 向下作用力产生位移 x_2 。此时作动器输出位移 x_a 跟踪 x_1 , 在真实情况下产生误差又可由 x_2 来补偿。

由式(7)可知, 在干扰力 f_d 单独作用下, 上层平台位移 x_1 和干扰力 f_d 的传递函数

$f_1(0)=2, f_2(0)=-1, g_0(0)=0$ 。由此, 可以将磁致伸缩作动器特征模型式(17)写成:

$$y(k) = f_1(k)y(k-1) + f_2(k)y(k-2) + g_0(k)u(k-1) = \phi^T(k)\theta(k) \quad (18)$$

其中: $\phi^T(k) = [y(k-1) y(k-2) u(k-1)]$; $\theta(k) = [f_1(k) f_2(k) g_0(k)]^T$ 。

在线参数辨识采用带有遗忘因子的递推最小二乘法, 选取遗忘因子 $\lambda=0.97$:

$$\left. \begin{aligned} K(k) &= \frac{P(k-1)\phi(k-1)}{\lambda + \phi^T(k-1)P(k-1)\phi(k-1)} \\ \hat{\theta}(k) &= \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \phi^T(k-1)\hat{\theta}(k-1)] \\ P(k) &= \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\phi^T(k)]P(k-1) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

3.2 控制器设计

3.2.1 黄金分割自适应控制器

针对式(17)二阶线性系统式, 将黄金分割比与最小方差相结合, 则黄金分割系数 $l_1=0.382, l_2=0.618$; 控制器参数估计值为 $\hat{f}_1(k), \hat{f}_2(k), \hat{g}_0(k)$ 。输出误差为 $e(k) = y(k) - y_r(k)$, $y_r(k)$ 为期望输出, λ 为唯一正常数, 笔者选取 $\lambda = 0.0012$ 。则有黄金分割控制器:

$$u_l(k) = -\frac{1}{\hat{g}_0 + \lambda} [l_1 \hat{f}_1(k)e(k) + l_2 \hat{f}_2(k)e(k-1)] \quad (20)$$

3.2.2 逻辑微分自适应控制

设计逻辑微分控制器如下式：

$$u_d = k_d(k)[y(k) - y(k-1)] \quad (21)$$

其中， $k_d = \sqrt{\sum |e(k-i)|}$ ，在过渡过程阶段，快速达到阻尼给定值且阻尼不会过大；而在稳态时，微幅振荡需要加大阻尼，而 k_d 可随误差 $e(k)$ 的减小而自动变大，微分作用随之会增大。

最后控制总量为

$$u(k) = u_l(k) + u_d(k) \quad (22)$$

整个基于位移模型控制的闭环控制的仿真控制系统仿真结构如图 4 所示。

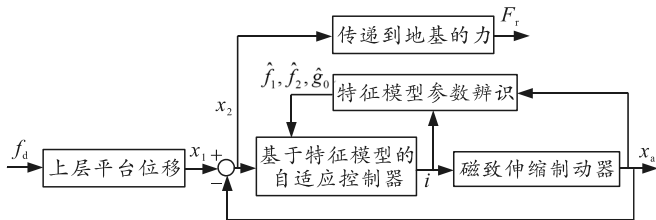


图 4 基于特征模型控制器的主被动一体化隔振平台的受控系统

4 数学仿真研究

在 Simulink 仿真环境下，选取适当参数对 2 种模型进行仿真，相关参数如表 1 所示。

表 1 隔振平台参数

名称	数值
隔振对象 m_1/kg	250
下层刚体质量 m_2/kg	15
被动隔振元件刚度 $k_2/(\text{N/m})$	1.26×10^5
磁致伸缩作动器刚度 $k_M/(\text{N/m})$	8.47×10^7
被动隔振元件阻尼 $c_3/(\text{N}\cdot\text{S/m})$	1 505
磁致伸缩作动器阻尼 $c_3/(\text{N}\cdot\text{S/m})$	9.3×10^3

4.1 2 种模型仿真分析

首先对力以及位移 2 种不同的平台模型进行仿真分析。选取传统 PID 控制策略对 2 种模型平台传递到地基的力进行分析。力传递模型中，选取 $k_p = 0.1, k_i = 0.11, k_d = 0$ 。位移模型中，选取 $k_p = 7.9 \times 10^4, k_i = 5.9 \times 10^6, k_d = 2$ 。

当输入干扰力为 $f_d = 100 \cos(10 \times 2\pi t)$ 时，仿真结果如图 5、图 6 所示。

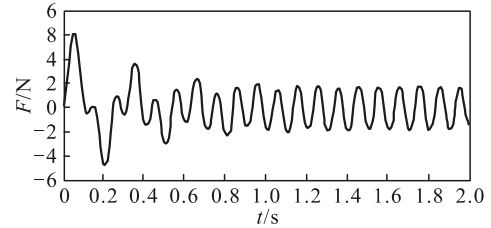


图 5 力模型 PID 控制仿真结果

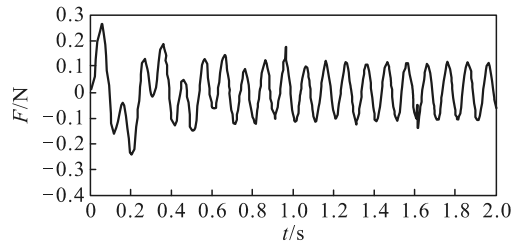


图 6 位移跟踪模型 PID 控制仿真结果

从图 5 和图 6 可以看出：对于同频率、同幅值的干扰力，采用不同的模型隔振效果会有显著不同，力模型传递到地基的力为 $\pm 2 \text{ N}$ 之间，而位移跟踪模型传递到地基的力为 $\pm 0.1 \text{ N}$ 之间，位移跟踪模型的控制效果明显优于力模型控制效果。

4.2 基于特征模型的位移隔振平台模型分析

在 Simulink 数学仿真环境下，根据图 3 搭建实验平台仿真模型如图 7 所示。

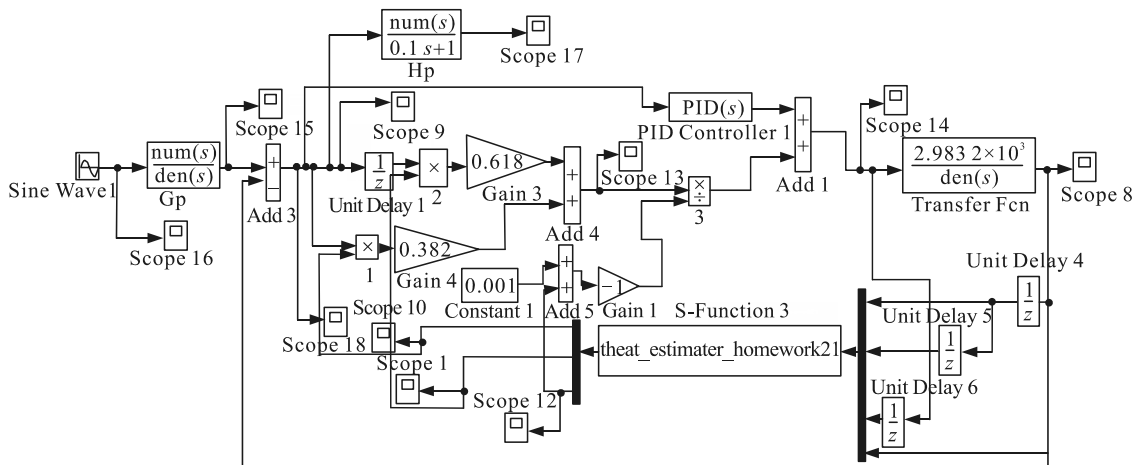


图 7 simulink 搭建模型

图 7 中, S-Function2 为逻辑微分模块, S-Function3 为参数辨识模块, $G_p(s)$ 、 $H_p(s)$ 、 $G_{ax}(s)$ 分别由表 1 参数代入相应方程求得传递函数。 $1/Z$ 表示延迟环节。

其中, 特征模型 $\hat{f}_1(k)$ 、 $\hat{f}_2(k)$ 、 $\hat{g}_0(k)$ 参数辨识过程如图 8—10 所示。

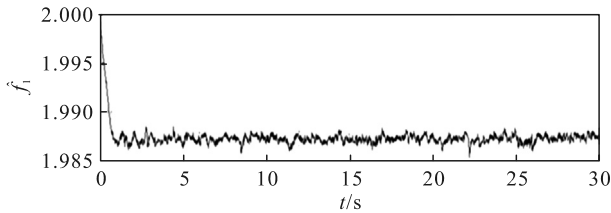


图 8 \hat{f}_1 辨识曲线

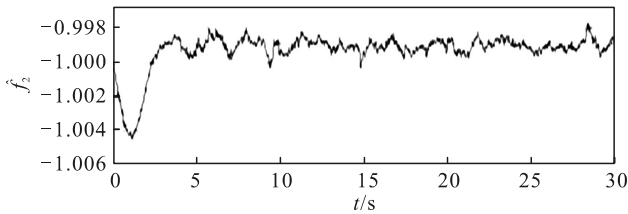


图 9 \hat{f}_2 辨识曲线

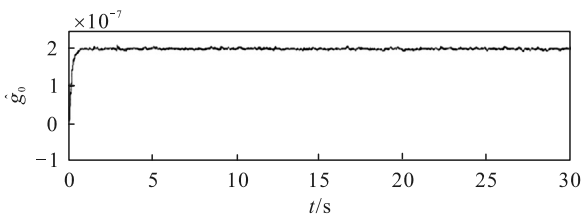


图 10 \hat{g}_0 辨识曲线

基于表 1 的参数, 选取基于位移控制的主被动一体化隔振平台, 在干扰力 $f_d = 100\cos(10 \times 2\pi t)$ 时, 较传统 PID 控制方式和笔者所设计的控制方法的控制效果。

由图 10、11 可以看出, 当唯一干扰力作用时, 基于特征模型的控制中, 系统稳定后模型传递到地基的力为 $\pm 0.018 \text{ N}$, 上层平台的实际位移保持在 $\pm 0.6 \times 10^{-6} \text{ m}$; 由图 12、13 可知, 在传统 PID 控制中, 系统稳定后模型传递到地基的力为 $\pm 0.12 \text{ N}$, 上层平台的实际位移保持在 $\pm 4 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

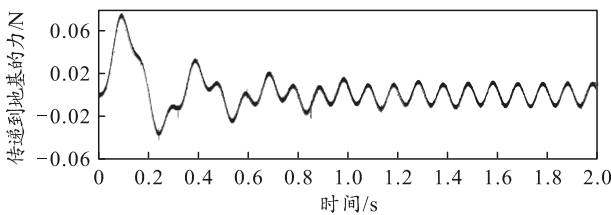


图 11 基于特征模型控制传递到地基的力

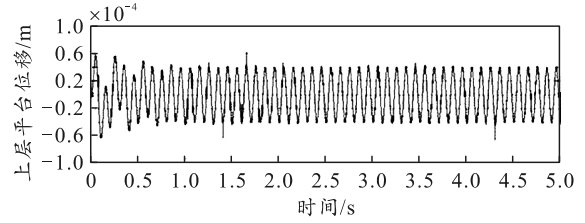


图 12 基于特征模型控制上层平台位移

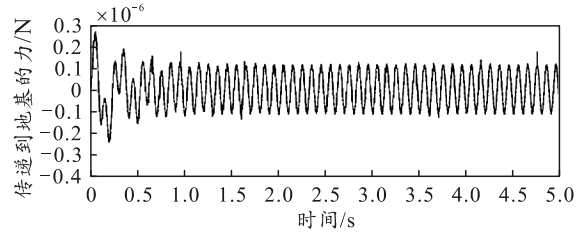


图 13 基于 PID 控制传递到地基的力

当干扰力由正弦信号输入改为随机信号输入时 (方差 100, 抽样时间 0.002, 起始值为 0, 平均值为 0), 上层平台产生位移如图 14—16 所示。

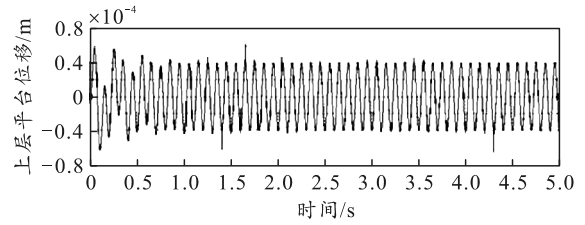


图 14 基于 PID 控制上层平台位移

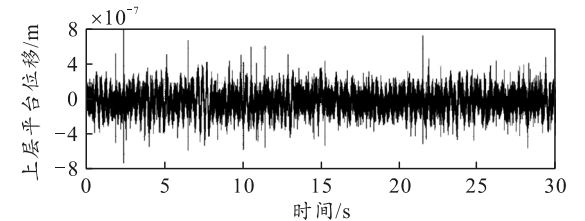


图 15 基于特征模型控制上层平台位移

对于传统 PID 控制, 当随机干扰力作用于隔振平台时, 上层平台实际位移如图 16 所示, 为 $\pm 2 \times 10^{-6} \text{ m}$, 而笔者所设计的基于特征模型控制方法, 上层平台的实际位移如图 15 所示, 为 $\pm 3 \times 10^{-7} \text{ m}$, 控制性能明显优于传统 PID 控制。以上 2 组数学仿真结果表明了基于位移跟踪模型的主被动一体化隔振平台和特征模型控制的有效性和优越性。

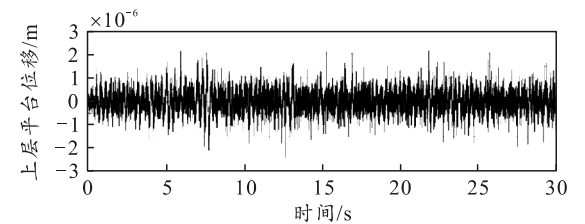


图 16 基于传统 PID 控制上层平台位移

5 结束语

笔者研究了主被动一体化隔振平台, 针对目前通用的力控制模型, 将位移跟踪模型与特征建模控制方法相结合, 分析设计了基于位移跟踪控制的模型, 并进行仿真验证。数学仿真结果表明: 该控制器对于干扰力有明显的抑制作用, 并能有效地减小上层平台位移, 证明了黄金分割控制以及逻辑微分控制的优越性, 为进一步研究载荷隔振平台在实际航空飞行器中的应用打下了基础。

参考文献:

- [1] 张磊, 付永领, 刘永光, 等. 主动隔振技术及其应用与发展[J]. 机床与液压, 2005(2): 9-12.
 - [2] KARNOPP D. Active and Semi-Active Vibration Isolation[J]. Current Advances in Mechanical Design Production VI, 1995, 117(B): 409-423.
 - [3] 郑钢铁. 空间飞行器隔振与振动抑制研究进展[C]//全国振动理论及应用学术会议, 2007.
 - [4] 卢兵仔, 罗均, 唐文, 等. 超小型无人旋翼飞行器减振增稳云台的设计[J]. 机械制造, 2007, 45(7): 24-26.
 - [5] 肖斌. 柴油机双层隔振台架主动隔振技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
 - [6] KIM S M, ELLIOTT S J, BRENNAN M J. Decentralized control for multichannel active vibration isolation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(1): 93-100.
 - [7] 吴宏鑫, 沈少萍. PID 控制的应用与理论依据[J]. 控制工程, 2003, 10(1): 39-44.
 - [8] WANG L J, MENG B. Characteristic model-based control of robotic manipulators with dynamic uncertainties[J]. Sci China Inf Sci, 2017, 60(7): 079201.
 - [9] 吴宏鑫, 解永春, 李智斌, 等. 基于对象特征模型描述的智能控制[J]. 自动化学报, 1999, 25(1): 9-17.
 - [10] QIU Z, ZHANG X, WU H, et al. Optimal placement and active vibration control for piezoelectric smart flexible cantilever plate[J]. Journal of Sound Vibration, 2007, 301(3): 521-543.
 - [11] 吴宏鑫, 王迎春, 邢琰. 基于智能特征模型的智能控制及应用[J]. 中国科学(技术科学), 2002, 32(6): 805-816.
 - [12] 孟斌, 吴宏鑫. 黄金分割控制的收敛性和稳定性研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2128-2132.
 - [13] 史敬灼, 尤冬梅. 超声波电机黄金分割自适应转速控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 59-65.
 - [14] LI H, LIU H, GAO H, et al. Reliable Fuzzy Control for Active Suspension Systems With Actuator Delay and Fault[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 20(2): 342-357.
 - [15] 吴宏鑫. 全系数自适应控制理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 121-146.
 - [16] 王晓磊, 吴宏鑫. 挠性航天器振动抑制的自适应方法及实验研究[J]. 宇航学报, 2005, 26(3): 275-281.
 - [17] WU H, HU J, XIE Y. Characteristic Model-Based All-Coefficient Adaptive Control Method and Its Applications[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C, 2007, 37(2): 213-221.
 - [18] 张旭辉, 刘永光, 付永领. 磁致伸缩作动器结构优化设计[J]. 压电与声光, 2009, 31(3): 377-380.
 - [19] 张磊, 付永领, 刘永光, 等. 磁致伸缩作动器的建模与控制研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(5): 42-45.
- *****
- (上接第 57 页)
- [2] DOBRE O A, ABDI A, BAR-NESS Y, et al. Survey of auto-matic modulation classification techniques: classical approaches and new yrends[J]. IET Communications, 2007, 1(2): 137-156.
 - [3] 范玲. Link-11 数据链信号的识别方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
 - [4] 李国鑫. Link16 数据链信号的识别算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
 - [5] 甘新泰, 程伟, 杨瑞娟, 等. 基于支持向量机分类器的数据链信号调制方式识别[J]. 空军预警学院学报, 2015, 29(1): 38-42.
 - [6] 刘国栋, 许静. 基于 SVM 方法的神经网络呼吸音识别算法[J]. 通信学报, 2014, 35(10): 218-222.
 - [7] Choosing Multiple Parameters for Support Vector Machines[J]. Olivier Chapelle, Vladimir Vapnik, Olivier Bousquet, Sayan Mukherjee. Machine Learning, 2002, 46(1): 131-159.
 - [8] 连可, 陈世杰, 周建明, 等. 基于遗传算法的 SVM 多分类决策树优化算法研究[J]. 控制与决策, 2009, 24(1): 7-12.
 - [9] 王健峰, 张磊, 陈国兴, 等. 基于改进的网格搜索法的 SVM 参数优化[J]. 应用科技, 2012, 39(3): 28-31.
 - [10] 刘红军. 美军公用数据链发展概述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(6): 608-612.
 - [11] 周子栋, 陈自力, 高喜俊, 等. 无人机数据链常面临的干扰类型的自动识别[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(11): 3780-3782.