

# 环形天线结构的振动主动控制\*

翟兴辉<sup>1,2</sup>, 肖刚<sup>3</sup>, 罗亚军<sup>1</sup>, 谢石林<sup>1</sup>, 徐明龙<sup>1</sup>, 张希农<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室 西安, 710049)

(2. 上海航天控制技术研究所 上海, 201109) (3. 中国空间技术研究院 北京, 100089)

**摘要** 环形天线是一种大型、柔性、低阻尼、低模态频率的空间结构,它在太空中受到外界干扰后振动响应较大。针对此问题,提出了一种采用音圈电机-凯夫拉纤维的振动主动控制新方式,根据环形天线的结构特点及音圈电机的动力学特性建立了含作动器的振动主动控制系统模型,并结合比例-微分(proportion-differentiation,简称 PD)控制、模糊控制、模糊 PD 杂交控制算法分别研究了环形天线结构的前 2 阶振动控制性能。研究表明,采用音圈电机-凯夫拉纤维的振动主动控制新方式可以显著抑制环形天线前 2 阶的大幅值振动响应,模糊控制的效果明显优于 PD 控制,且模糊 PD 杂交控制算法进一步提高了天线平衡位置处的振动控制精度。

**关键词** 环形天线; 振动主动控制; 音圈电机; PD 控制; 模糊控制; 杂交控制

**中图分类号** TH113.1

## 引言

大型环形天线在太空中展开后,天线整体成为一个大型、柔性、低阻尼及低模态频率的空间结构<sup>[1]</sup>。由于卫星在轨运行过程中会受到诸多外部环境及卫星内部调姿变轨的激励等影响,使天线整体结构产生大振幅的低频振动,影响天线对地面的指向精度,因此天线的振动控制已成为卫星工程中一个亟待解决的问题。关于空间结构的振动控制国内外有很多研究,文献[2-3]通过增加结构的阻尼耗散系统振动能量来抑制空间结构的振动响应,该方式采用结构的被动控制技术,具有良好的鲁棒性和稳定性,设计思路简单,易于实现,但主要针对的是高频响应的控制。半主动控制也受到了不少学者的推崇<sup>[4-5]</sup>,通过将智能作动器和阻尼器结合到一起,这样可以调节结构的阻尼系数,增加了系统的可调节性,该方式鲁棒性能良好且控制算法简单。近年来,随着环形天线结构口径的不断增大,模态频率越来越低,其低阶模态频率接近于卫星调姿载荷的频率,这就有可能带来星线振动耦合问题,严重影响天线的成像精度,甚至会造成天线和星体振动耦合破坏。为了有效抑制天线的振动,文献[6-8]采用了结构振动主动控制技术,该方式具有更好的适应性。随着智能材料及控制技术的发展,在 20 世纪 80 年代美

国 NASA 提出了结构控制一体化的自适应桁架概念。不少学者将智能作动器嵌入到空间结构中组成结构控制一体化的智能桁架<sup>[8-9]</sup>,提高了结构的自适应性和振动控制精度。由于压电作动器<sup>[10-11]</sup>具有输出力大、响应快等优点,因此在空间智能桁架结构的振动主动控制中得到了广泛而深入地研究。

笔者认为随着环形天线结构尺寸的不断增大,天线的振动呈现出低频大幅值的特点,而压电智能作动器由于输出位移较小,磁致伸缩类作动器对于低频振动控制效果较差,形状记忆合金作动器响应速度慢,此类作动器在这种大柔性空间桁架结构的低频大振幅的振动控制中效果将受到限制。此外,音圈电机<sup>[12]</sup>的输出力和位移较大,响应快速,因此提出了“音圈电机-凯夫拉纤维”的主动控制新方式。通过刚度较大的凯夫拉纤维连接音圈电机和天线结构,从而将音圈电机的驱动力传递到天线上达到抑制结构振动的目的。针对结构的前 2 阶模态振动开展了基于 PD 控制和模糊控制<sup>[13-15]</sup>等算法的振动主动控制性能分析研究。

## 1 环形天线结构振动控制系统的动力学建模

### 1.1 环形天线的建模

为了控制仿真分析的方便,基于有限元的基本

\* 国家自然科学基金资助项目(11872290,U1430129)  
收稿日期:2017-03-23;修回日期:2017-05-27

理论建立了环形天线的有限元模型<sup>[16]</sup>, 共计 59 个节点和 124 个单元。天线有限元模型如图 1 所示。

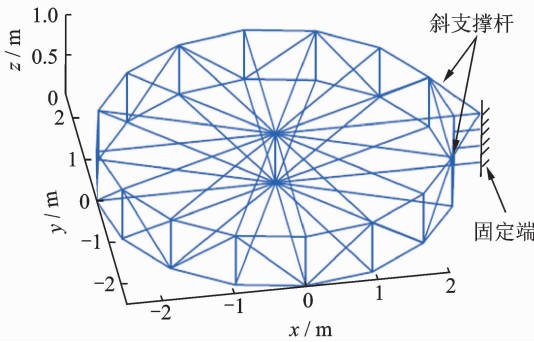


图 1 环形天线的有限元模型

Fig. 1 The finite element model of loop antenna

天线分为上下两个环面, 天线环面直径为 5 m, 每个环面由 16 根连接杆构成, 天线中心有 16 根辐条与天线环面连接, 斜支撑杆连接着固定端和天线环面部分, 同时考虑到各个杆件结构的连接附件对环形天线结构整体模态的影响, 在动力学建模时在梁单元连接的节点处增加集中质量单元来抵消连接附件质量对天线整体模态的影响, 最后根据有限元理论的矩阵装配规则得到天线的无阻尼动力学方程

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0 \quad (1)$$

关于阻尼的影响笔者选用的是瑞利阻尼, 由于空间阻尼较小, 根据经验值暂取阻尼比为 0.5%, 这样就计算出系统的阻尼矩阵为

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (2)$$

通过以上分析得到了含外界激励的环形天线结构动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{P}_1\mathbf{f}(t) \quad (3)$$

其中:  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$  分别为环形天线结构的质量阵、阻尼阵及刚度阵;  $\mathbf{P}_1$  为外激励的位置矩阵;  $\mathbf{f}(t)$  为外激励向量。

### 1.2 作动器的位置布置

根据天线实际结构的特性, 对环形天线的固定端处的 4 个节点施加 6 个方向的固定约束, 然后根据环形天线的动力学方程, 便可对其进行动力学计算与分析。由动力学方程可以得到式(4)所示的特征方程, 这样即可求出系统的特征值(模态频率)和特征向量(主振型)

$$(\mathbf{K} - \omega^2\mathbf{M})\boldsymbol{\varphi} = 0 \quad (4)$$

图 2 所示的振型图分别为天线前 2 阶模态振型图, 由图可见环形天线的第 1 阶振动是在  $xOy$  平面内绕着固定端的转动, 称之为“摇头”模态, 频率为 0.32 Hz。环形天线的第 2 阶振型是天线在  $yOz$  平

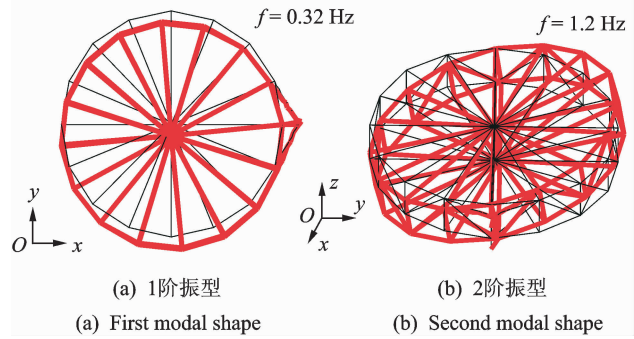


图 2 环形天线的振型图

Fig. 2 Modal shape of loop antenna

面内绕着  $x$  轴的转动, 称之为“晃脑”模态, 频率为 1.2 Hz。

由第 1 阶的振型图可知, 环形天线的第 1 阶振动是天线的环面部分绕着固定端的运动, 因此采用 2 个音圈电机, 将其分别安装在环形天线的直杆上, 并通过凯夫拉纤维与两边的斜支撑杆相连, 这样就使得一根绳索松弛时, 另一根绳索仍处于张紧状态, 以提供振动控制效果, 如图 3(a) 所示。当天线沿着  $y$  轴的负方向向下运动时, 驱动音圈电机 B 输出拉力作用在天线结构上从而阻止天线环面向下运动; 反之, 则驱动音圈电机 A。这样便可使音圈电机的作动力作用在桁架结构的  $xOy$  平面内, 从而有效抑制结构的第 1 阶振动。在振动控制性能分析时, 对天线自由端施加外界激励, 1 号节点在  $y$  方向的位移响应作为振动控制性能分析时的评价对象。

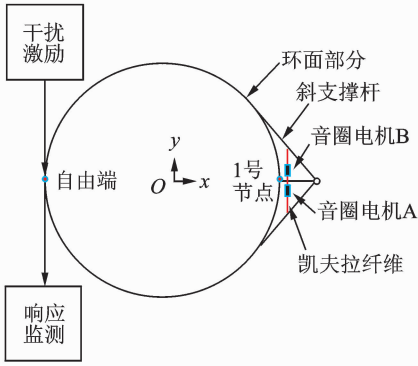
由第 2 阶的振型图可知, 环形天线的第 2 阶模态振动是天线的环面部分绕着  $x$  轴在  $yOz$  平面内的转动, 因此仍采用 2 个作动器, 将音圈电机安装在环形天线的固定端附近, 并通过凯夫拉纤维连接在斜支撑杆与环面交接处, 如图 3(b) 所示。当 5 号节点沿着  $z$  轴负方向向下运动时, 此时驱动音圈电机 A, 对天线环面施加一个拉力从而阻止天线的振动; 反之, 当 5 号节点沿着  $z$  轴正方向运动时, 驱动音圈电机 B, 这样便可有效地抑制天线的第 2 阶模态振动。在振动主动控制性能分析时, 在 2 号节点  $z$  方向施加干扰激励, 5 号节点  $z$  方向的位移响应作为振动控制性能分析时的评价对象。

### 1.3 作动器的动力学建模

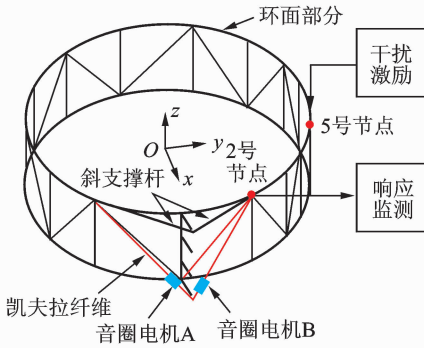
音圈电机的工作原理是依据电磁理论中的安培力原理, 即通电导线在磁场中会产生力。所产生的力大小与线圈的长度、导线中的电流以及磁场强度成正比, 具体表达式为

$$F_i = BIL \quad (5)$$

式(5)中各分量分别为



(a) 1阶振动作动器位置  
(a) 1<sup>th</sup> actuator position



(b) 2阶振动作动器位置  
(b) 2<sup>th</sup> actuator position

图3 作动器布局

Fig. 3 The position of actuator

$$L = 2\pi rn \quad (6)$$

$$B = \sqrt{\frac{\mu B_i H_i V_m}{V_b}} \quad (7)$$

其中: $L$ 为线圈的总长度; $r$ 为线圈的半径; $n$ 为线圈的匝数; $B$ 为音圈点击内的磁场强度; $B_i H_i$ 为永磁体的磁能积; $V_m$ 为永磁体与导磁体环形间隙体积。

考虑一般性,为了实施有效控制,采用了 $n$ 个相同工作参数的音圈电机作动器。图4所示为音圈电机-凯夫拉纤维作动器的动力学模型,其中: $m_e$ 、 $c_e$ 、 $k_e$ 分别为音圈电机的质量、阻尼和刚度; $k_f$ 为凯夫拉纤维的刚度; $y_i$ 为第 $i$ 个音圈电机作动器惯性体的位移; $F_i$ 为第 $i$ 个音圈电机输出的作动力; $x_{i1}$ 和 $x_{i2}$ 为第 $i$ 个作动器两端所连接节点的位移。根据该模型可以给出第 $i$ 个作动器的动力学方程为

$$m_e \ddot{y}_i - c_e \dot{y}_i - (k_e + k_f) y_i + c_e \dot{x}_{i1} + k_e x_{i1} + k_f x_{i2} = F_i \quad (8)$$

其中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

#### 1.4 系统控制方程的建立

天线部分的动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{P}_1 \mathbf{f}(t) \quad (9)$$

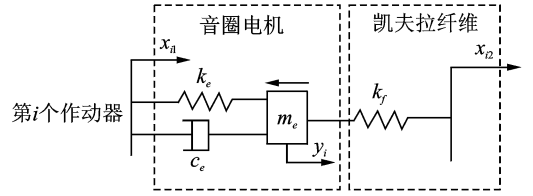


图4 作动器动力学模型

Fig. 4 Dynamic model of actuator

将式(8)和式(9)联立,重新安排可得如下形式的环形天线振动控制方程

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{y}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_e & \mathbf{C}_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{y}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K} & \mathbf{0} \\ \mathbf{K}_e & \mathbf{K}_a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \end{Bmatrix} = \mathbf{P}_1 \mathbf{f}(t) + \mathbf{P}_2 \mathbf{F}_a \quad (10)$$

其中: $\mathbf{M}_a$ 、 $\mathbf{C}_a$ 、 $\mathbf{K}_a$ 为与 $n$ 个作动器对应的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\mathbf{C}_e$ 和 $\mathbf{K}_e$ 为作动器引入的耦合阻尼矩阵和耦合刚度矩阵; $\mathbf{F}$ 为环形天线所受的外力向量; $\mathbf{F}_a$ 为音圈电机的驱动力向量, $\mathbf{F}_a = [F_1, F_2, \dots, F_n]^T$ ,其大小与反馈信号相关; $\mathbf{P}_1$ 为环形天线所受外力向量的位置矩阵; $\mathbf{P}_2$ 为音圈电机驱动力的位置矩阵。

## 2 天线的第1阶模态振动主动控制

在选择控制算法时,首先选择了传统的PD控制算法。式(11)所示为PD控制的基本原理,选择1号节点的位移作为反馈信号,一路经过比例放大,这路信号可以改变系统的刚度矩阵;另一路信号经过微分控制器并放大,输出信号可以改变系统的阻尼矩阵。这样通过增大结构的阻尼和刚度来抑制天线振动

$$I(t) = K_p x_1(t) + K_d \frac{dx_1(t)}{dt} \quad (11)$$

由于空间结构一般较为复杂,尤其对于像环形天线这一类的大型柔性结构,难以建立其精确的动力学模型,并且其动力学特性复杂,因此模糊控制<sup>[14-16]</sup>很适合应用于环形天线的振动主动控制中。设计模糊控制器时使用 Mamdani 型控制器<sup>[17]</sup>。在设计模糊控制器的过程中,确定模糊控制器的结构、建立模糊规则并选定近似推理算法是两个核心工作,与之配套的是设计模糊化模块、选择模糊子集的隶属函数、设计清晰化模块并选择清晰化方法。模糊规则的确定需要有专家知识,最终得到了如图5所示的输入输出关系曲面。

#### 2.1 正弦激励下的振动控制

由于结构的有限元模型的节点个数为59,不便求出系统的每个自由度的响应。笔者采用了振型截

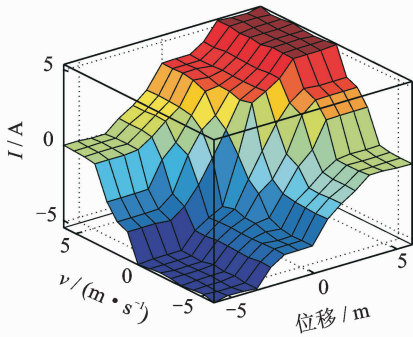


图 5 模糊控制器输入输出关系曲面

Fig. 5 Relation surface of fuzzy controller

断法,保留了系统的前 6 阶振型来近似求解系统的响应。仿真分析时在环形天线的自由端处施加了大小为 0.1 N、方向沿着 y 方向、频率为第 1 阶模态频率的正弦干扰激励,待系统振幅稳定后打开控制器驱动音圈电机来控制天线的振动。由图 6 所示的 PD 控制效果可以看出,基于音圈电机的 PD 控制可以有效地抑制天线第 1 阶的摇头模态,在正弦激励下系统未控制时的稳定幅值为 0.11 m,PD 控制下的稳定幅值为 0.03 m,幅值衰减了 73%。

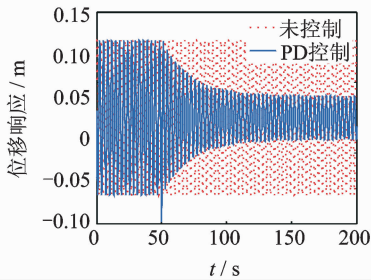


图 6 正弦激励下的 PD 控制效果

Fig. 6 Control effect of PD control under sine excitation

图 7 所示的位移响应曲线为模糊控制下的控制效果,环形天线自由端的稳定幅值为 0.02 m,相比未控制的情形,幅值衰减了 82%。

综上所述,音圈电机可以有效抑制环形天线在

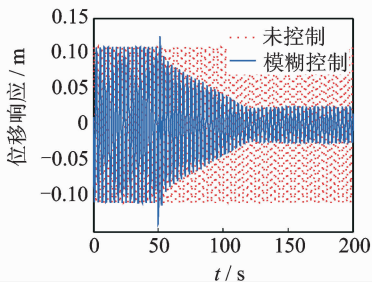


图 7 正弦激励下的 1 阶模态振动模糊控制

Fig. 7 Fuzzy control under fuzzy control of 1<sup>st</sup> modal vibration

正弦激励下的位移响应,幅值衰减可以达到 70% 以上,且使用的模糊控制算法的控制效果优于传统的 PD 控制算法,有效提高了天线的稳定性。

## 2.2 脉冲激励下的振动控制

环形天线在轨环境中主要是受星体调姿激励的作用,该激励主要表现为瞬态激励。对于天线第 1 阶的振动控制,载荷仍然作用于天线的自由端,方向沿着 y 方向。仿真时的脉冲载荷的时长为 1 s,幅值为 2 N。图 8 和图 9 为 PD 控制的时域和频域效果图,在脉冲激励下,系统未控制时的最大幅值为 0.033 m。为了比较不同控制算法的控制效果,这里定义了系统未控制时最大幅值的 5% 作为位移响应幅值的控制目标,因此当位移响应幅值不超过 1.65 mm 时所对应的时间点作为自由衰减时间。由图 8 可以知道,未控制时系统的自由衰减时间为 252 s;在 PD 控制情形下当系统达到控制目标的幅值水平时所需要的时间为 68 s,缩短了 73% 的衰减时间。从频谱图来看,在天线共振频率处,天线自由端的位移响应频谱相比未控制时下降了 80% 左右,控制效果良好。

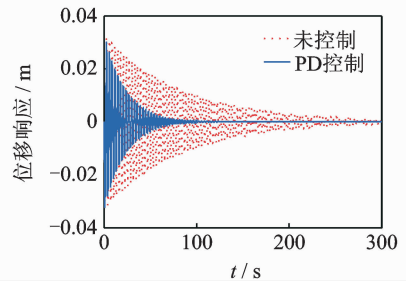


图 8 脉冲激励下的 PD 控制效果

Fig. 8 Control effect of PD control under impulse excitation

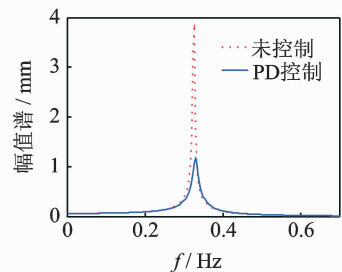


图 9 PD 控制的频谱图

Fig. 9 Spectrum of PD control

由前面的正弦激励下的振动控制性能分析可以知道,与传统的 PD 控制算法相比,模糊控制等智能控制算法表现出更好的控制性能。但是模糊控制的稳态精度较差,难以达到较高的控制精度,尤其是在平衡点附近<sup>[17]</sup>。从图 10 可以看出,在 60 s 以后模糊控制下的天线自由端的振幅已经超过了 PD 控



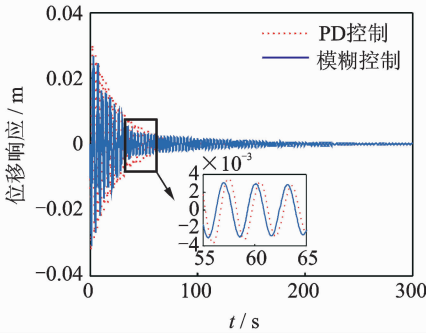


图 10 脉冲激励下的模糊控制效果

Fig. 10 Control effect of fuzzy control under impulse excitation

制,这是由于模糊控制在系统平衡位置附近没有控制信号输出,在 40 s 左右模糊控制器输出的控制信号已经为零,如图 11 所示。

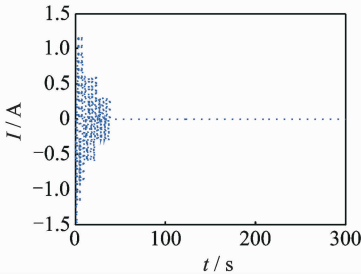


图 11 模糊控制器输出电流

Fig. 11 The output current of fuzzy controller

在卫星工程中,由于卫星距离地面很远,即使天线产生微振动也将严重影响天线的成像精度。为了克服这些缺陷,将基本的模糊控制器和其他控制器相结合,充分发挥各个控制器的优点以达到最优的控制效果,最终设计了基于 PD 和 Fuzzy 控制器的复合控制器,即模糊 PD 控制器(F-PD 控制),如图 12 所示。

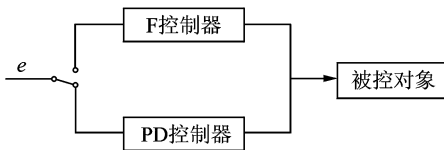


图 12 模糊 PD 复合控制器

Fig. 12 The composite controller of fuzzy and PD controller

在输入误差信号  $e$  之后,设置一个带阈值的模式(每种控制方式称为一种模式)转换器,根据阈值与  $e$  的比较结果确定模式:当  $e$  大于阈值时,让信号传输到 F 控制器,以获得良好的振动控制性能;当  $e$  小于阈值时,则让信号传输到 PD 控制器,以获得良好的稳态控制性能。在响应水平高时 PD 控制器的控制

效果不如模糊控制器,为了获得良好的控制效果,仅在响应水平较低时切换到 PD 控制器。为了使控制信号能够在两个控制器之间平滑切换,设计了如图 13 所示的幅值观测器。该观测器的基本原理是通过结构反馈点的速度零点来寻找每个周期内的振动响应的幅值,然后根据模糊控制器输出零信号时的振动幅值来设置幅值切换阈值。当结构的位移响应幅值小于设定的阈值时,复合控制器能够从模糊控制器平滑地切换到 PD 控制器,从而提高控制系统的稳定性。

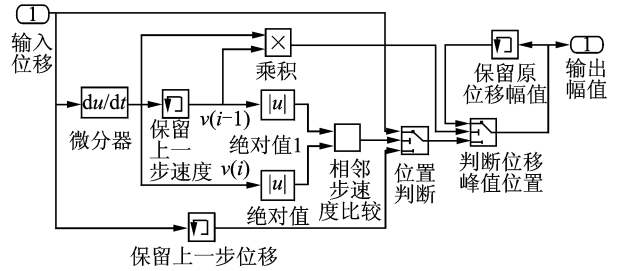


图 13 幅值观测器

Fig. 13 Amplitude observer

由图 14 所示的位移响应曲线可以知道,在模糊控制下系统达到控制目标的幅值需要的时间为 52 s,缩短了 84% 的衰减时间。在 60 s 附近模糊 PD 控制时的振动幅值远远小于 PD 控制时的幅值。由图 15 的幅值谱也可以看出模糊 PD 杂交控制的

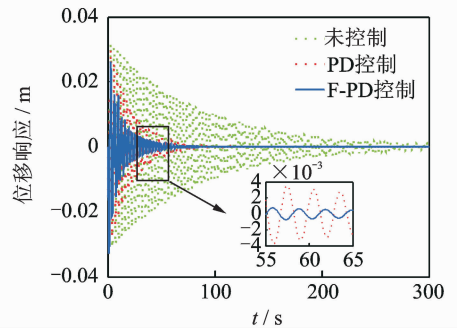


图 14 脉冲激励下的 F-PD 控制效果

Fig. 14 Control effect of F-PD control under impulse excitation

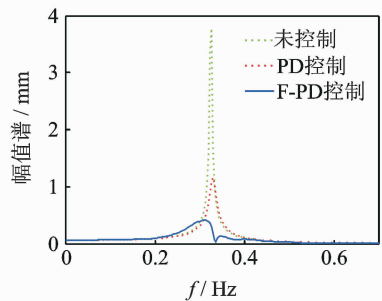


图 15 F-PD 控制的频谱图

Fig. 15 Spectrum of F-PD control

频域响应相比 PD 控制下降了 55% 以上,这样可以进一步提高天线对地面的指向稳定性。

### 3 天线的第 2 阶模态振动主动控制

#### 3.1 正弦激励下的振动控制

根据天线的第 2 阶振型,仿真时在环形天线的 5 号节点处施加了大小为 0.1 N、方向沿着  $z$  方向、频率为第 2 阶模态频率的正弦干扰激励,待系统振幅稳定后打开控制器驱动音圈电机来控制天线的振动。

由图 16 所示的 PD 控制仿真的结果可以看出,基于音圈电机的 PD 控制可以有效地抑制天线第 1 阶的摇头模态。在正弦激励下系统未控制时的稳定幅值为 17 mm,PD 控制下的稳定幅值为 8.8 mm,幅值衰减了 48%。

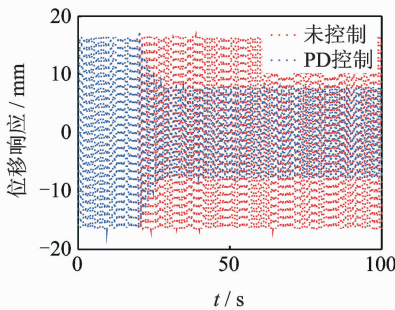


图 16 正弦激励下的 PD 控制效果

Fig. 16 Control effect of PD control under sine excitation

图 17 所示的是模糊控制下的控制效果,从位移响应曲线看,在模糊控制下环形天线自由端的稳定幅值为 4.9 mm,比未控制情形的幅值衰减了 71%,相比 PD 控制显著提高了天线的指向稳定度。

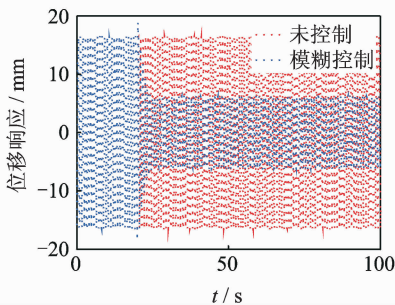


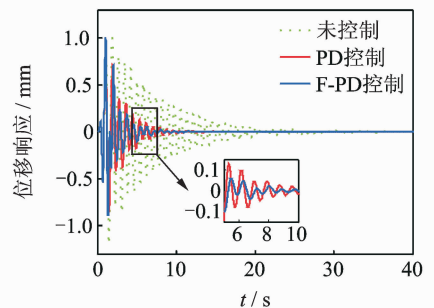
图 17 正弦激励下的 2 阶模态振动模糊控制

Fig. 17 Fuzzy control under sine excitation of 2<sup>nd</sup> modal vibration

#### 3.2 脉冲激励下的振动控制仿真

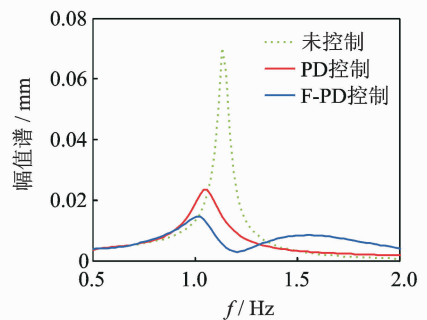
仿真时在环形天线的 5 号节点处沿着  $z$  方向施

加了一个时长为 1 s、幅值为 1 N 的半正弦脉冲干扰激励。图 18 所示为脉冲激励下的振动控制效果图,由图(a)可知,未控制时系统的自由衰减时间为 21 s,在 PD 控制情形下当系统达到控制目标的幅值水平时所需要的时间为 7 s,缩短了 66% 的衰减时间。而在模糊 PD 控制下系统达到控制目标的幅值时所需要的时间为 5 s,缩短了 76% 的衰减时间。在 6 s 附近模糊 PD 杂交控制时的振动幅值小于 PD 控制时的幅值,提高了天线平衡位置的稳定性。由图(b)的频域响应来看,PD 控制共振频率处的峰值下降了 70% 左右,模糊 PD 杂交控制的频域响应相比 PD 控制峰值下降了 20%,进一步提高了天线的指向精度。



(a) F-PD控制效果

(a) Control effect of F-PD control



(b) F-PD控制的频谱图

(b) Spectrum of F-PD control

图 18 脉冲激励下的控制效果

Fig. 18 Control effect under impulse excitation

## 4 结 论

1) 根据环形天线的结构特征采用空间梁单元,基于有限元理论建立了环形天线的动力学模型,完成了结构的模态分析。由于环形天线的前 2 阶模态振动频率低,均在天线的调姿频率附近,卫星工作时可能会引起天线的共振。为此,提出了音圈作动器-凯夫拉纤维的振动主动控制新方式,并根据环形天线的前 2 阶模态振型分别完成作动器布置位置。

2) 建立了环形天线的振动主动控制系统模型,

采用 PD 控制和模糊控制策略,分别完成了环形天线的前 2 阶模态振动控制仿真研究。针对模糊控制在平衡位置附近的效果较差这一缺陷,设计了模糊 PD 杂交控制算法,在幅值大于阈值之前让模糊控制器工作,当幅值小于阈值时再切换到 PD 控制器,充分发挥了 PD 和模糊控制器的各自优点,有效解决了模糊控制的盲区问题,为提高控制末端天线振动控制效果提供了可行的策略。

3) 所选择的音圈电机作动器可以有效地抑制环形天线结构的前 2 阶模态振动,对于第 1 阶振动在稳定激励下幅值可以衰减 70% 以上,在瞬态激励下系统的衰减时间可以缩短 70% 以上。本研究所设计的模糊 PD 杂交控制算法显著提高了平衡位置的振动控制精度,对于环形天线第 2 阶的模态振动也取得了良好的控制效果。基于音圈电机-凯夫拉纤维的振动主动控制新方式为卫星的大位移振动控制提供了一个新思路。

#### 参 考 文 献

- [1] 马兴瑞,王本利,苟兴宇. 航天器动力学——若干动力学问题进展应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 23-41.
- [2] 李东旭,刘望,蒋建平. 空间桁架结构采用黏弹性阻尼的振动控制技术[J]. 噪声与振动控制, 2011, 31(4):46-50.  
Li Dongxu, Liu Wang, Jiang Jianping. Passive vibration control of space truss structure with viscoelastic dampers[J]. Noise and Vibration Control, 2011, 31(4): 46-50. (in Chinese)
- [3] Onoda J, Sano T, Minesugi K. Passive damping of truss vibration using preloaded joint backlash[J]. Aiaa Journal, 2012, 33(7):1335-1341.
- [4] Park Y M, Kim K J. Semi-active vibration control of space truss structures by friction damper for maximization of modal damping ratio[J]. Journal of Sound & Vibration, 2013, 332(20):4817-4828.
- [5] 展猛,王社良,朱熹育,等. 空间桁架模型压电摩擦阻尼器半主动优化控制[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8):50-56.  
Zhan Meng, Wang Sheliang, Zhu Xiyu, et al. Semi-active optimization control of space truss model with piezoelectric friction damper[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(8):50-56.
- [6] Kikushima Y, Saigo M, Segawa T, et al. Active modal control of a truss structure considering displacement constraint [C] // International Symposium on Smart Structures and Materials. [S. l.]: International Society for Optics and Photonics, 2002: 401-408.
- [7] Sharma A, Kumar R, Vaish R, et al. Active vibration control of space antenna reflector over wide temperature range[J]. Composite Structures, 2015, 128:291-304.
- [8] Luo Yajun, Xu Minglong, Yan Bo, et al. PD control for vibration attenuation in Hoop truss structure based on a novel piezoelectric bending actuator[J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 339: 11-24.
- [9] 曾光,李东旭. 空间智能桁架模糊振动控制研究[J]. 航天控制, 2007, 25(1): 85-90.  
Zeng Guang, Li Dongxu. Fuzzy vibration control of space intelligent truss[J]. Aerospace Control, 2007, 25(1): 85-90. (in Chinese)
- [10] Song G, Vlattas J, Johnson S E, et al. Truss active vibration control of a space truss using PZT stack actuator[J]. American Society of Mechanical Engineers, 1999, 59:263-271.
- [11] Xu B, Jiang J S, Ou J P. Integrated optimization of structural topology and control for piezoelectric smart trusses using genetic algorithm[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 307: 393-427.
- [12] Howe D. Magnetic actuators[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2000, 81(1/3):268-274.
- [13] Nguyen S D, Nguyen Q H, Choi S B. Hybrid clustering based fuzzy structure for vibration control - part 1: a novel algorithm for building neuro-fuzzy system [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2015 (S 50/51):510-525.
- [14] Gu Haichang, Song Gangbing, Malki H. Chattering-free fuzzy adaptive robust sliding-mode vibration control of a smart flexible beam[J]. Smart Materials & Structures, 2008, 17(3):035007.
- [15] 梁森,王常松,韦利明,等. 智能微位移主动隔振模糊 PID 控制系统[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(1): 42-47.  
Liang Sen, Wang Changsong, Wei Liming, et al. Research for the smart micro-displacement active vibration isolation system based on fuzzy-PID control algorithm[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(1): 42-47. (in Chinese)
- [16] 徐荣桥. 结构分析的有限元法与 MATLAB 程序设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 18-43.
- [17] 石辛民,郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 63-72.



**第一作者简介:**翟兴辉,男,1990年11月生,硕士生。主要研究方向为结构动力学与控制。  
E-mail: 799242622@qq.com

**通信作者简介:**谢石林,男,1971年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为智能材料与结构振动控制、动态载荷识别、结构损伤检测及复杂非线性系统建模等。  
E-mail: slxie@mail.xjtu.edu.cn





