

文章编号:1006-1355(2017)02-0197-06

基于音圈作动器的大型柔性结构振动主动控制

安增勇¹, 吴成松²

(1. 庆安集团有限公司, 西安 710077; 2. 上海微小卫星工程中心, 上海 201203)

摘要:大型环形柔性结构作为卫星天线的典型结构,由于其显著增大的天线口径有效提高了通信精确度,而使重量仅微小增加,已经成为大口径卫星天线的主流结构。同时它具有固有频率极低、阻尼弱、刚度小等缺点,低频、长时间的模态响应很容易被激起。因此,大型环形柔性结构的振动控制变得尤为重要。针对大型环形柔性结构振动问题,提出一种基于激光位移传感器、音圈作动器和PD-fuzzy控制算法的振动主动控制方法。其中,激光位移传感器能够测量的最小位移为0.01 mm,音圈作动器输出位移和力,基于激光位移传感器的反馈信号运用PD-fuzzy控制算法控制音圈作动器。建立大型环形柔性结构的有限元模型并分析其特性,同时构建试验验证系统。结果表明,该振动主动控制方法性能良好,能够控制大型环形柔性结构的超低频振动,而不会产生附加刚度。

关键词:振动与波;振动主动控制;大型环形柔性结构;PD-fuzzy控制;音圈作动器

中图分类号:O327

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2017.02.040

Active Vibration Control for a Large Annular Flexible Structure Based on Voice Coil Actuators

AN Zeng-yong¹, WU Cheng-song²

(1. Qing An Group Co. Ltd., Xi'an 710077, China;

2. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201203, China)

Abstract: Large annular flexible structures (LAFS) are typical antenna structures for satellites. Since these structures can significantly enlarge antenna's aperture and effectively improve the communication accuracy with minimum additive mass, they have become the mainstream of large aperture antenna structures. However, they have some disadvantages, such as low natural frequencies, low damping ratio and low stiffness so that they always suffer from low frequency and longtime modal responses. Therefore, the vibration control of LAFS is very important. This study proposes a novel active vibration control method based on a laser displacement sensor unit, a voice coil actuator and a PD-fuzzy control algorithm. The measurable minimum displacement of the laser displacement sensor unit can reach 0.01 mm. The voice coil actuator generates the displacement and driving force. Based on the feedback signal from the laser displacement sensor unit, the PD-fuzzy control algorithm is used to control the voice coil actuator. A FEM model of the LAFS is established, and its characteristics are analyzed. Meanwhile, an experimental system is set up. The results demonstrate that the novel active vibration control method has a good performance. This active vibration control method can control vibration at ultralow frequencies without additional stiffness.

Key words: vibration and wave; active vibration control; large annular flexible structure; PD-fuzzy control; voice coil actuator

大型环形柔性结构具有显著提高天线口径和有效加强通信准确性而重量增加微小等优点,已被广泛应用于航天器天线领域,并成为大口径天线的主流结构^[1]。然而该结构同时具有一些特殊的力学特

性,比如固有频率极低、刚度小、阻尼弱。在外太空条件下极易受到外部或航天器自身变轨的影响而激起大幅度、长时间的振动,该振动一旦被激起将很难自行衰减,对航天器既定功能的实现和所搭载的负载造成严重影响,甚至导致航天器所预定的任务失败^[2-3]。因此大型环形柔性结构振动控制的研究尤为重要。

近年来,由于压电作动器技术的发展和其自身

收稿日期:2016-08-22

作者简介:安增勇(1981—),男,陕西省蓝田县人,博士,主要研究方向为结构振动控制。

E-mail:anzengyong@stu.xjtu.edu.cn

所具有的独特优势,比如输出精度高、输出力大、响应速度快、易于控制、结构紧凑、耗能小等^[4-7],基于压电作动器的大型柔性结构振动主动控制研究已取得了较大发展^[8-10]。围绕大型柔性结构振动控制,学者们完成了一系列的典型研究。罗亚军等通过有限元方法发展了大型柔性结构的模型建立技术^[11]。李东旭等采用压电作动器和加速度传感器完成了大型空间桁架结构振动主动控制研究^[12]。罗亚军等采用双压电堆作动器研究了环形桁架结构振动主动控制^[13]。严天宏采用接受率理论完成了空间结构振动控制研究^[14]。然而压电作动器同时也具有输出位移小的缺点。

音圈作动器具有输出位移大、输出精度高、响应速度快、直线驱动效率高、结构紧凑等特性^[15-18],另外安增勇等研制了具有断电锁止功能的磁-压电杂交的音圈作动器^[19],为大型柔性结构振动主动控制提供了新的可选方案。大型环形柔性结构是一个复杂的系统,其固有频率极低,鉴于王存堂等通过PD-fuzzy算法研究柔性结构振动主动控制并获得了良好的效果^[20],文中将音圈作动器和PD-fuzzy控制用于大型环形柔性结构超低频振动主动控制研究。

本研究针对大型环形柔性结构提出一种基于音圈作动器、激光位移传感器非接触测量和PD-fuzzy控制算法的振动主动控制方法。音圈作动器输出直线位移和力,激光位移传感器能够测量的最小位移为0.01 mm,基于激光位移传感器反馈的振动幅值PD-fuzzy控制算法控制音圈作动器输出位移和力,实现大型环形柔性结构振动主动控制。建立试验验证系统,试验结果表明:该方法对于大型环形柔性结构超低频振动抑制效果明显、可靠且无附加刚度。

1 大型环形柔性结构振动主动控制方法

1.1 大型环形柔性结构有限元模型

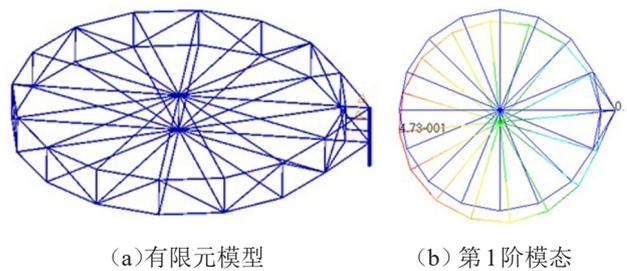
大型环形柔性结构是一个复杂的系统,具体结构参数如表1所示。

难以从理论上获得其固有频率和模态。为此通过Abaqus有限元软件建立其有限元模型如图1(a)所示。在有限元模型中,单元类型为杆单元,节点和单元为刚性连接,边界为固定约束。经计算第1阶固有频率为0.332 Hz,与之对应的模态为摇头模态如图1(b)所示。

由于其第1阶固有频率极低,与之对应的摇头模态极易被激起。故对第1阶固有频率所对应的摇头模态采用大型柔性结构振动主动控制方法。

表1 大型环形柔性结构参数

参数	数值
直径/m	5.0
高度/m	0.6
边数	16.0
斜支撑杆之间夹角/(°)	120.0
杆的内径/m	0.008
杆的外径/m	0.01
直杆长度/m	0.317



(a)有限元模型 (b)第1阶模态

图1 大型环形柔性结构有限元模型

1.2 振动主动控制策略

针对大型环形柔性结构第1阶摇头模态制定振动主动控制策略如图2所示。

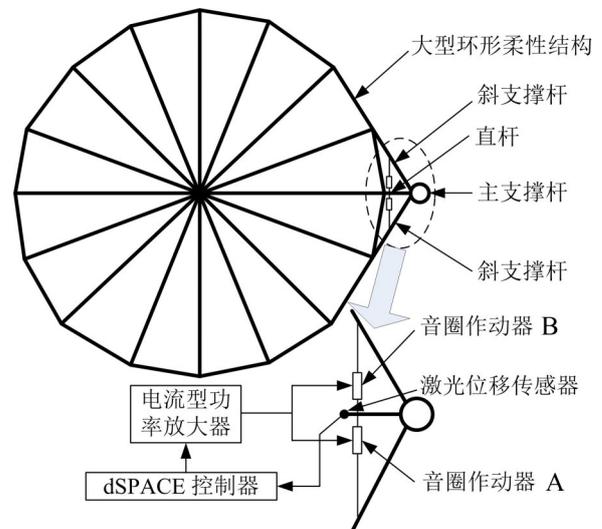


图2 振动主动控制策略原理

音圈作动器A和B的定子对称安装在两根斜支撑杆之间的直杆两侧,两个线圈通过凯夫拉纤维与两根斜支撑杆分别连接,激光位移传感器的测点布置在竖杆的侧面,如图3所示。

当大型环形柔性结构发生1阶摇头模态振动,向音圈作动器A一侧摆动时,dSPACE控制器基于激光位移传感器测量的竖杆幅值,对电流型功率放大器输出电压控制信号,电流型功率放大器将电压控制信号放大并转换为电流信号,驱动音圈作动器A,音圈作动器A通过凯夫拉纤维对斜支撑杆输出



(1) 音圈作动器 A (2) 音圈作动器 B (3) 直杆 (4) 斜支撑杆 A (5) 斜支撑杆 B (6) 主支撑杆 (7) 竖杆 (8) 激光位移传感器

图3 激光位移传感器与音圈作动器布置图

拉力,同时音圈作动器B不工作。相应地,当大型环形柔性结构发生1阶摇头模态振动,向音圈作动器B一侧摆动时,dSPACE控制器基于激光位移传感器测量的竖杆幅值,对电流型功率放大器输出电压控制信号,电流型功率放大器将电压控制信号放大并转换为电流信号,驱动音圈作动器B,音圈作动器B通过凯夫拉纤维对斜支撑杆输出拉力,同时音圈作动器A不工作。以此控制策略实现对大型环形柔性结构1阶摇头模态振动的抑制。

2 作动器

音圈作动器如图4所示,该音圈作动器由定子和动子组成,而定子又由导磁体、环形永磁体和中空铁芯组成,动子仅由线圈构成。当给作动器通驱动电流时,线圈产生磁场,与永磁体产生磁场相作用,音圈作动器输出作动力。具体参数如表2所示。

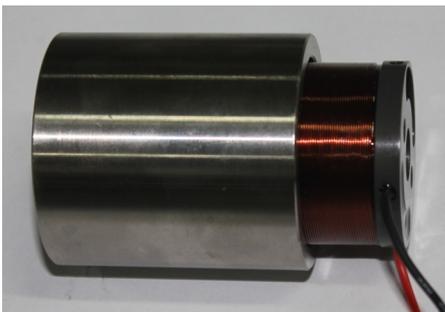


图4 音圈作动器实物

表2 音圈作动器参数

参数	数值
最大输入电流/A	4.0
最大输出力/N	70.0
最大输出位移/m	0.015
直径/m	0.045
长度/m	0.054
重量/g	525.0

3 PD-fuzzy控制算法设计

在比例控制中,输入的误差信号与输出的控制信号成比例关系,比例控制器能够按比例响应系统偏差、加速调节和减小误差。在微分控制中,输入的误差信号变化率与输出的控制信号成比例关系,微分控制器能够响应输入误差信号的变化率、预测系统偏差的变化趋势。而比例微分控制结合了比例控制和微分控制二者优势,既能加速调节减小误差又能预测偏差的变化趋势。比例微分控制算法可描述为

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

式中 K_p 和 K_d 分别为比例增益系数与微分增益系数。 $u(t)$ 为比例微分控制算法输出, $e(t)$ 为比例微分控制算法输入。

在模糊控制^[21]中,对误差 e 、误差变化率 ec 、控制量 u 的模糊集及其论域有如下定义,误差 e 、误差变化率 ec 和控制量 u 的模糊集均为: {PB(正大)、PM(正中)、PS(正小)、Z(零)、NS(负小)、NM(负中)、NB(负大)}, 误差 e 、误差变化率 ec 和控制量 u 的论域为: $\{-6, 6\}$ 。模糊集选区分为7个区域,主要是为了提高稳态精度,其变量的隶属函数如图5所示。

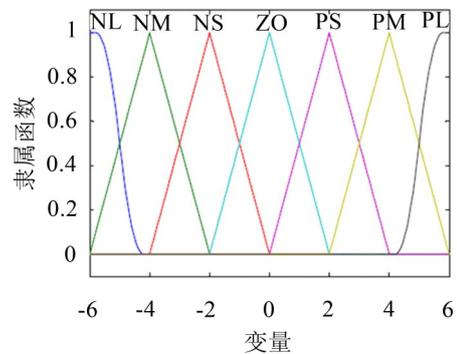


图5 变量的隶属函数

由于控制采用IF-THEN的推理形式,模糊规则如表3所示。得到模糊推理输入输出关系曲面如图6所示。

表3 模糊控制规则

u	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NB	NS	NS	ZO	PS	PS
ec	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

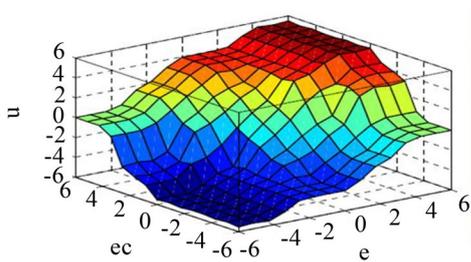


图6 模糊推理输出曲面

PD-fuzzy控制结合了比例微分控制和模糊控制的优势。在PD-fuzzy控制算法中,模糊控制算法根据激光位移传感器反馈的幅值信号在线自动优化了比例微分算法的比例增益系数 K_p 和微分增益系数 K_d ,实施大型环形柔性结构振动主动控制,而输出的控制信号由PD控制算法输出,PD-fuzzy控制算法原理框图如图7所示。

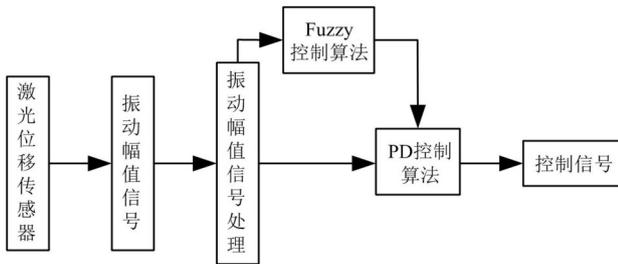


图7 PD-fuzzy控制算法原理框图

PD-fuzzy控制算法通过在计算机上采用 Matlab 中的 Simulink 编程实现,dSPACE 系统通过调用运行在 Simulink 中的 PD-fuzzy 控制算法程序代码,并经 dSPACE 控制器输出 PD-fuzzy 控制信号,实现 PD-fuzzy 控制。

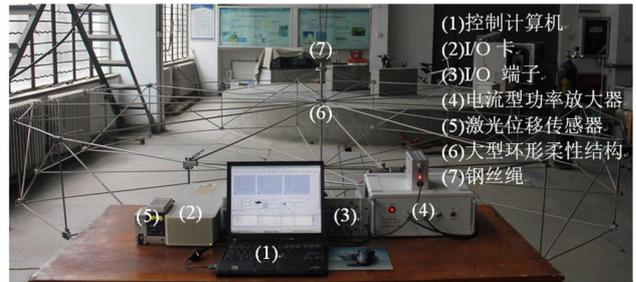
4 试验验证

4.1 验证系统建立

图8所示为部分试验验证系统。如图3所示,音

圈作动器 A 和 B 的定子对称安装在距主支撑杆根部 0.265 m 处的直杆两侧,相应的线圈通过凯夫拉纤维分别与两根斜支撑杆连接并保持成直线状,激光位移传感器测点位于竖杆的端面上。

图8、图3所示为整个试验验证系统,该系统由 dSPACE 控制器、电流型功率放大器、音圈作动器 A 和 B、大型环形柔性结构、激光位移传感器组成。



(1)控制计算机 (2)I/O卡 (3)I/O端子 (4)电流型功率放大器 (5)激光位移传感器 (6)大型环形柔性结构 (7)钢丝绳

图8 试验验证系统

dSPACE 控制器连接电流型功率放大器、音圈作动器 A 和 B、激光位移传感器,为整个振动主动控制核心,其型号为 DS1103。而 dSPACE 控制器由控制计算机、I/O 卡、I/O 端子组成,控制计算机依据反馈的位移幅值发出控制信号控制整个试验验证系统,I/O 卡转换来自计算机的控制信号和 I/O 端子的传感器反馈信号,I/O 端子连接计算机的控制信号和激光位移传感器的反馈信号。电流型功率放大器放大并转换来自 dSPACE 控制器的电压控制信号,输出电流驱动信号,驱动音圈作动器 A 和 B,使其为大型环形柔性结构振动控制输出拉力。激光位移传感器测量大型环形柔性结构竖杆振动的位移幅值,其型号为 LK-G80,精度为 0.01 mm。

基于振动主动控制策略,dSPACE 控制器以通道 C5 作为音圈作动器 A 输出电压控制信号,同时 dSPACE 控制器以通道 C6 作为音圈作动器 B 输出 0 V 电压控制信号;相应地,dSPACE 控制器以通道 C6 作为音圈作动器 B 输出电压控制信号,同时 dSPACE 控制器以通道 C5 作为音圈作动器 A 输出 0 V 电压控制信号;由于音圈作动器为抑制大型环形柔性结构振动需输出拉力,dSPACE 控制器输出正的电压控制信号。反馈的位移幅值信号经通道 C17 输入 dSPACE 控制器。具体控制程序原理框图如图9所示。

在控制程序中,当振动幅值达到 3 mm 时,程序工作,控制器输出控制信号。

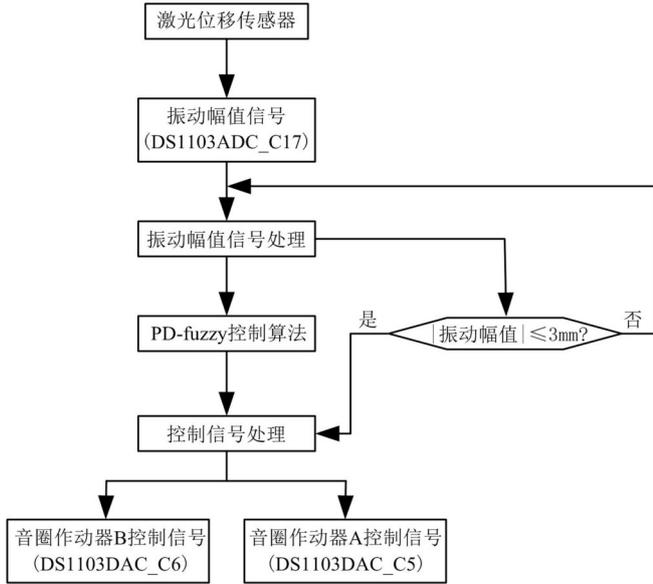


图9 控制程序原理框图

4.2 结果与分析

采用0.8 mm 钢丝绳悬挂大型环形柔性结构消除重力影响,以此模拟其在太空失重状态,悬挂保持大型环形结构处于水平状态。对其施加位移激励,使之处于1阶摇头模态振动状态,该结构发生1阶摇头模态自由衰减如图10所示。

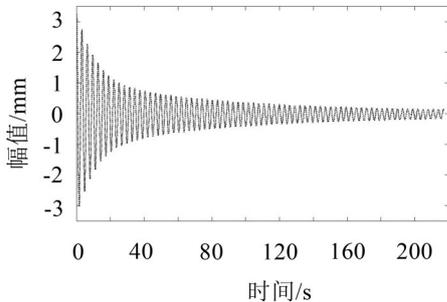


图10 自由衰减曲线

当自由衰减幅值达到3 mm时,PD-fuzzy控制算法开始工作,dSPACE控制器依据激光位移传感器反馈的位移幅值信号向电流型功率放大器输出电压控制信号,电流型功率放大器将电压控制信号放大并转化为电流信号,驱动音圈作动器A或B,作动器输出拉力抑制处于1阶摇头模态的大型环形柔性结构振动。采取PD-fuzzy控制与未采取控制对应的振动幅值响应如图11所示。

为使控制效果对比明显,在图11中设置5%控制效果线,其值为0.15 mm。控制效果对比结果如表4所示。

当控制偏差急剧变化时,比例微分控制能够在最短时间内加速调节。模糊控制设计简单,应用方便,既包含了比例微分控制规律又优于比例微分控

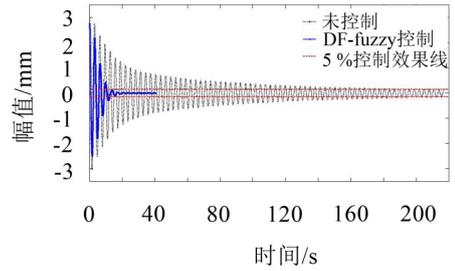


图11 采用PD-fuzzy控制时的控制效果

表4 控制结果

算法	衰减时间/s	衰减时间百分比
未控制	216.00	0.00 %
PD-fuzzy算法	13.00	93.98 %

制,并且更智能。PD-fuzzy结合了上述两种控制的优势。在PD-fuzzy中,模糊控制为比例微分控制优化比例增益系数和微分增益系数,弥补了比例微分控制的不足,即比例微分控制依赖于数学模型和增益系数调节。在文中,对于大型环形柔性结构1阶摇头模态采取PD-fuzzy控制的衰减时间为13 s,与未采取控制相比,衰减时间缩短了93.98%。该试验验证结果表明:基于音圈作动器和激光位移传感器的控制策略对大型环形柔性结构1阶摇头模态振动抑制效果明显,应用获得成功;由于作动器线圈与斜支撑杆之间采用凯夫拉纤维连接,同时采用激光位移传感器进行非接触测量,所以该控制策略对大型环形柔性结构无附加刚度。

5 结语

针对大型环形柔性结构超低频振动,提出了一种基于音圈作动器和激光位移传感器的振动主动控制方法,并在1阶摇头模态衰减振动上进行了试验验证。

该振动主动控制方法主要由激光位移传感器、两个音圈作动器和PD-fuzzy控制算法组成。激光位移传感器能够测量的最小位移为0.01 mm,音圈作动器输出位移和力,基于激光位移传感器反馈的位移幅值PD-fuzzy控制算法控制音圈作动器。建立大型环形柔性结构有限元模型,介绍振动主动控制策略。另外,围绕大型环形柔性结构超低频振动,设计了基于PD-fuzzy控制算法的控制器。最终,基于音圈作动器和激光位移传感器的振动主动控制方法能够控制大型环形柔性结构超低频振动,并且无附加刚度。

将该振动主动控制方法应用于大型环形柔性结构1阶摇头模态振动控制。为1阶摇头模态振动控制设计试验验证系统。PD-fuzzy控制算法运行,采用PD-fuzzy控制时的衰减时间为13 s,与自由衰减相比,衰减时间缩短了93.98%。结果表明,大型环形柔性结构一阶摇头模态振动控制取得成功,基于音圈作动器和激光位移传感器的振动主动控制方法对于大型环形柔性结构振动抑制具有明显作用。

参考文献:

- [1] KOPSAFTOPOULOS F P, FASSOIS S D. Vibration based health monitoring for a lightweight truss structure: Experimental assessment of several statistical time series methods[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2010, 24: 1977-1997.
- [2] SONG G, VLATTAS J, JOHNSON S E, et al. Active vibration control of a space truss using a lead zirconate titanate stack actuator[C]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2001, 215: 355-361.
- [3] SHEN Z, H U G. Thermally induced vibrations of solar panel and their coupling with satellite[J]. **International Journal of Applied Mechanics**, 2013, 5: 1350031.
- [4] MRAD RB, ABHARI A, ZU J. A control methodology for an inchworm piezomotor[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2003, 17: 457-471.
- [5] ZHANG Z, XU M, FENG B, et al. Research for a new actuator with variable step and large displacement[J]. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, 2010, 33: 597-604.
- [6] SPANNER K. Survey of the various operating principles of ultrasonic piezomotors[C]. Proceedings of the Int. Conference Actuator, 2006.
- [7] PARK J, KELLER S, CARMAN G, et al. Development of a compact displacement accumulation actuator device for both large force displacement[J]. **Sensors and Actuators A**, 2001, 90: 191-200.
- [8] PREUMONT A, MARNEFFE BDE, DERAEMAERKER A, et al. The damping of a truss structure with a piezoelectric transducer[J]. **Computers and Structures**, 2008, 86(3): 227-239.
- [9] XU B, JIANG JS, OU JP. Integrated optimization of structural topology and control for piezoelectric smart trusses using genetic algorithm[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2007, 307: 393-427.
- [10] GAO W. Stochastically optimal active control of a smart truss structure under stationary random excitation[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2006, 290: 1256-1268.
- [11] LUO Y, XU M, ZHANG X. Nonlinear self-defined truss element based on the plane truss structure with flexible connector[J]. **Communication in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, 2010, 15: 3156-3169.
- [12] LI D, LIU W, JIANG J, et al. Placement optimization of actuator and sensor and decentralized adaptive fuzzy vibration control for large space intelligent truss structure [J]. **Science China Technological Sciences**, 2011, 54: 853-861.
- [13] LUO Y, XU M, YAN B, 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.
- [14] YAN T, ZHENG G, HUANG W. Passive vibration control of space structure by receptance theory[J]. **Applied Mathematics and Mechanics** (English Edition), 2000, 21 (4): 471-478.
- [15] KIM H, KIM H, AHN D, et al. Design of a new type of spherical voice coil actuator[J]. **Sensors and Actuators A**, 2013, 203: 181-188.
- [16] HOWE D. Magnetic actuators[J]. **Sensors and Actuators A**, 2000, 81: 268-274.
- [17] ONER Y. A permanent magnet spherical rotor design and three dimensional static magnetic analysis[J]. **Sensors and Actuators A**, 2007, 137: 200-208.
- [18] CHEN W, ZHANG L, YAN L, et al. Design and control of a three degree-of-freedom permanent magnet spherical actuator[J]. **Sensors and Actuators A**, 2012, 180: 75-86.
- [19] AN Z, XU M, FENG B, et al. Novel hybrid piezo-electromagnetic actuator for micro-indentation loading [J]. **Smart Materials and Structures**, 2014, 23: 125025.
- [20] 王存堂,唐建中,万维汉,等. 柔性结构的模糊主动振动控制研究[J]. **振动工程学报**, 1998, 11(3): 265-272.
- [21] BEHN C, LOEPELMANN P. Adaptive versus fuzzy control of uncertain mechanical systems[J]. **International Journal of Applied Mechanics**, 2012, 4: 1250019.