

SMA 机敏结构交替驱动恒流源及其振动控制*

姜恩宇, 朱晓锦, 邵勇, 高志远, 孙伟

(上海大学机电工程与自动化学院 上海, 200072)

摘要 研究了形状记忆合金(shape memory alloy,简称SMA)机敏结构的振动主动控制,为克服SMA的热滞效应,提高SMA的动态响应速度,提出一种交替驱动SMA驱动组元的控制方案,设计与开发一种多路宽量程SMA交替驱动恒流源。在简要介绍研究背景与设计思路的基础上,以控制器PIC18F4620单片机和高电压大功率功率放大器OPA549为核心,详细阐述恒流源系统构成与核心部件、系统软硬件设计思路、功能指标和开发过程。通过构建实验模型结构和实验平台,进行了基于交替驱动SMA机敏柔性结构振动主动控制实验。实验结果表明,该驱动恒流源具有稳定恒流控制效果,结合SMA机敏结构交替驱动方案实现结构振动主动控制效果良好,并适用于其他需要多路大电流恒流源的科研场合。

关键词 交替驱动; 恒流源; 形状记忆合金; 机敏结构; 振动控制

中图分类号 TB535; TP13

引言

由机敏材料构成的智能器件(如阻尼器、驱动器)构造简单,调节驱动容易,耗能小,反应迅速,在结构振动主动控制中有广阔的应用前景。当前,智能结构研究中广泛采用了SMA、压电材料和磁致伸缩材料等机敏材料作为驱动组元^[1-3]。其中,SMA以其特有的形状记忆、超弹性、大变形、高耗能以及良好的耐腐蚀与耐疲劳性能等独特优势^[4-5],被认为是结构控制中最有前途的驱动材料之一。

基于SMA的弹性模量随温度变化而改变的特性,可以实现对结构振动的主动控制^[6-8]。当前研究的基本思路是将SMA机敏致动材料复合到结构中去,通过针对SMA驱动组元的电流驱动和致热形变,以改变复合结构的材料力学特性和刚度,从而实现结构振动主动控制^[9-11]。SMA驱动方式和驱动源特性的优劣程度很大程度上决定了振动控制的可行性和效率。

笔者以SMA机敏结构振动主动控制为研究背景,提出一种多路宽量程SMA驱动恒流源设计方案,其技术特性不仅要求具有分布多路驱动功能和大电流恒流稳定的特点,同时采用数字化控制方式,具有良好的智能管理功能,进而能够实现针对SMA

驱动组元的交替驱动控制策略。电路构成上采用Microchip公司PIC18F4620为核心MCU,以TI公司OPA549芯片作为功放芯片,结合软件开发和功能设计,完全实现了多路多机恒流交替驱动能力,具有使用方便和可靠稳定的特点,从而为SMA机敏结构振动主动控制研究提供了重要的实验手段和组成单元。在此基础上,通过构建实验模型结构和实验平台,基于交替驱动SMA组元策略进行了结构振动主动控制实验,取得了良好的控制效果。

1 多路交替驱动恒流源设计方案

1.1 系统硬件设计

多路SMA驱动恒流源设计,不仅要考虑恒定大电流稳定输出问题,而且必须考虑放大器的最大转换速率、放大器的输出功率和各项参数,因此功放芯片参数的合理选择至关重要。根据上述技术要求,本系统设计方案如下:采用Microchip公司的PIC18F4620单片机、D/A转换芯片TLC5615和基准电压芯片LM385-2.5组成数模转换电路,放大器OP07组成放大和跟随电路,TI公司功率放大器OPA549芯片和高精度采样电阻组成恒流源电路,同时以TOPWAY公司320*240的LM2088EFW-C液晶屏组成人机接口电路、

* 国家自然科学基金资助项目(90716027,51175319);上海市教委“机械电子工程”创新团队资助项目;上海大学“十一五”211建设和上海市电站自动化技术重点实验室资助项目
收稿日期:2012-07-31;修改稿收到日期:2012-09-06

485 通信接口电路以及过热和过流保护电路及装置。图1为本系统设计原理框图。

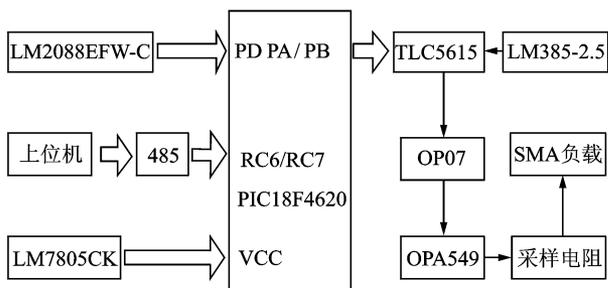


图1 恒流源系统设计原理框图

1.1.1 PIC18f4620 单片机

MCU 系统是整个硬件系统的核心,是实现系统各项功能的控制器。本方案采用微芯公司 PIC18F4620 微处理器,构成恒流控制回路的运算控制单元。它采用16位的RISC 指令系统、哈佛总线结构、两级流水线取指等技术,具有 64 kB 快闪存内存、4 kB 的 RAM、片内看门狗、内部EEPROM 等丰富的片内资源,抗干扰性能好,功耗低,速度快,另外还包括单片机系统必须的振荡和复位电路。设计方案实现 4 路电流恒流输出,采用单片机的 PB3~PB7 端口通过 20 针插排和 D/A 的片选端 CS 相连,实现多路电流输出的选择。

1.1.2 D/A 转换电路

采用美国德州仪器(TI)公司的 TLC5615 高精度 10 位单通道数字/模拟转换芯片,它采用 SPI 数据串行输入、逻辑控制、并行处理、电压输出方式,单电源供电。采用标准的 SPI 串行数据输入方式,输入时钟频率可达 1.21 MHz,最低有效位稳定至 0.5LSB,时间仅为 12.5 μs,满足 SAP,MCU 和 FP-GA 等系统的快速性要求。单片机与 D/A 转换电路的连接如图 2 所示。

1.1.3 信号调理电路和 V/I 转换电路

经过 D/A 转换的电压信号,连接到放大器

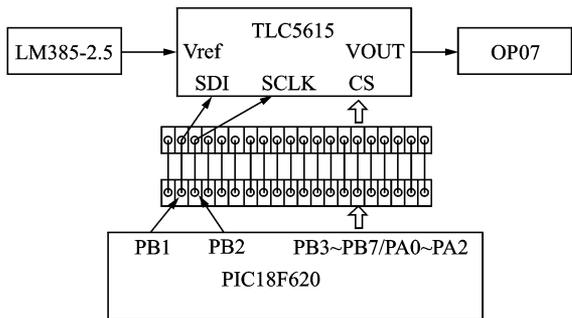


图2 单片机与D/A 转换电路

OP07 的正向端,经跟随放大电路后输入 V/I 转换电路中 OPA549 的 4 脚。根据 V/I 转换电路中采用的高精度采样电阻的阻值大小,设定跟随与放大电路的放大倍数。

OPA549 是美国 TI 推出的高电压大电流运算放大器,典型电流值是 8 A,最大可以达到 10 A。还可以提供一个准确的、用户可以选择的电流极值,允许电流极值在 0~10 A 的范围变化,并且这个极限值可以用一个电阻控制或用 DAC 数控。运放本身具有过热过流保护、转化速率可达 9 V/μs、单位增益稳定以及功率频带宽等特点。其信号调理和 V/I 转换电路连接如图 3 所示,其中: $R_1 = 30 \text{ k}\Omega$; $R_2 = R_3 = 50 \text{ k}\Omega$; $R_4 = 2 \text{ k}\Omega$; $R_5 = R_6 = R_9 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_7 = 1.5 \text{ k}\Omega$; $C_1 = 1\ 000 \text{ pF}$ 。

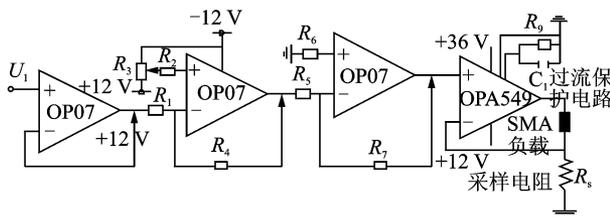


图3 信号调理及 V/I 转换电路

其电路工作原理如下:首先,通过 MCU 控制 D/A 转换芯片 TLC5615 给定电压 U_1 ,经过第 1 级运放 OP07 所组成跟随电路和第 2 级运放 OP07 反向调零电路后,输入第 3 级运放 OP07 构成的比例放大电路;然后,输入到 OPA549 的同向端,此时 OPA549 的同向端得给定电压为

$$U_+ = \frac{R_7}{R_5} U_1 \tag{1}$$

由采样电阻 R_s 的一端与 OPA549 的反向端相连构成了一个电流负反馈回路,此时

$$U_- = IR_s \tag{2}$$

因为

$$U_+ = U_- \tag{3}$$

所以

$$\frac{R_7}{R_5} U_1 = IR_s \tag{4}$$

驱动 SMA 的输出电流与流过采样电阻的电流始终是相等的,所以只要 MCU 给定 U_1 ,那么驱动 SMA 的电流与流过采样电阻的电流就为

$$I = \frac{R_7}{R_5} \frac{U_1}{R_s} \tag{5}$$

采样电阻串联在负载回路内,通过采样电阻检测负载电流的变化,并把电流信号转换成电压信号

反馈到OPA549的反向端;因此,采样电阻的稳定性将直接影响到恒流源的性能。因为电流比较大,所以采样电阻还应有足够大的功率,否则也会影响恒流源的性能甚至烧坏。综合以上各因素,在实际电路中选用了大功率锰铜材料制成的精密电阻,其温度系数达到 $(-3\sim 20)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,本方案中采样电阻加上导线电阻,经电桥测量的电阻值为 $36.7\text{ m}\Omega$ 。

1.1.4 人机接口界面

界面包括液晶显示输出和键盘输入两部分。选用 320×240 的TOPWAY图形点阵式液晶LM320240,可以满足文字、波形、图片等数据信息的显示要求。键盘检测芯片选用ZLG7289B,不仅具有非常方便的SPI通信接口,还具备较宽的供电电压范围,很适合 $5\text{V}/3.3\text{V}$ 测控单元的开发需要。本方案的各项电流参数数据通过液晶显示,触摸电阻屏可作为人机接口的输入部分,通过测量按下触摸屏的 x,y 坐标来判断用户的输入选择。

1.1.5 与DSP及PC机通信的485通信

为实现DSP或PC机对本系统的多路控制,采用485通信方式,以便于实现多机通信。其通信结构如图4所示。

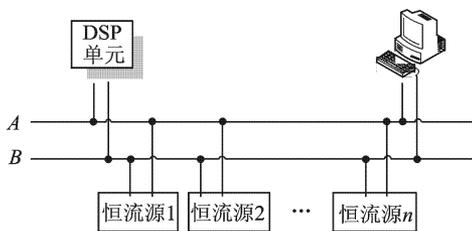


图4 DSP, PC机和多个恒流源的485通信结构图

由于SMA散热较慢,所以在实际应用中需多路恒流源用来交替驱动多路SMA驱动单元。这样当一路SMA驱动单元冷却时,PIC18F4620可以控制其他SMA驱动单元致动,并通过SPI总线控制TLC5615,因此1片PIC18F4620可以控制4路恒流源驱动输出单元。

1.2 系统软件设计

软件设计采用模块化编程方式,主要包括主程序、数据接收发送中断程序、定时器中断处理程序、数据处理程序、上位机控制程序。将相应的功能设计成相对独立的子程序,最后由主程序实现调用。

1.2.1 系统主程序设计

完成所有外围器件的初始化,设置外部中断和定时器中断,用于控制信息的发送。数据发送接收中

断服务程序负责接收发送数据,并把数据放到相应的数据区,判断数据是否需要立即处理。电流的开通和关断对实时性要求比较高,故采用定时器中断的方式进行处理。首先,微处理器PIC18F4620在程序开始时对SPI控制器模块进行初始化,确定SPI总线的传输速率;然后,确定恒流源单元所对应地址。微处理器PIC18F4620通过I/O口对恒流源单元进行选择,再通过SPI接口和定时器对D/A转换的电流大小和通电时间进行控制,通过电流串联负反馈在负载端就有相应大小的恒定电流按照一定的时间输出。其主程序和数据接收发送中断程序流程如图5所示。

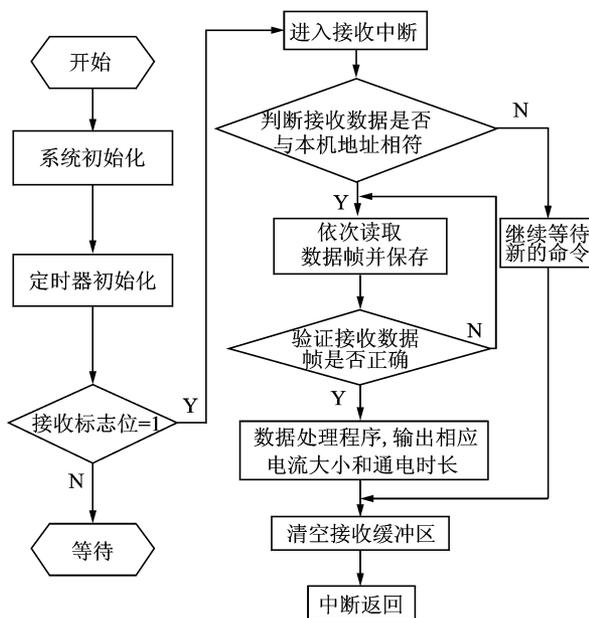


图5 主程序、数据接收和发送中断程序流程图

1.2.2 数据处理程序和D/A转换程序

微处理器PIC18F4620接收到上位机发送的正确数据后,进入数据处理程序和D/A转换程序。首先,在数据处理中先接收通道号,打开通道;然后,接收电流大小数据,调用D/A转换子程序;最后,接收通电时长,这时调用定时器中断开始计时,时间到时关闭选中通道。其程序流程图如图6所示。

为了实现交替驱动SMA驱动单元,要对恒流源装置的各路电流大小、通电时间以及延迟时间进行设置,上位机控制软件采用VC6.0编译平台实现,具体控制界面如图7所示。

当计算出某一恒流源的电流大小、开始时间、持续时间后,通过上位机控制程序设定控制策略,发出帧格式命令给相应地址的恒流源装置。由于总线上有一定数量的恒流源装置,对应地址的恒流源装置

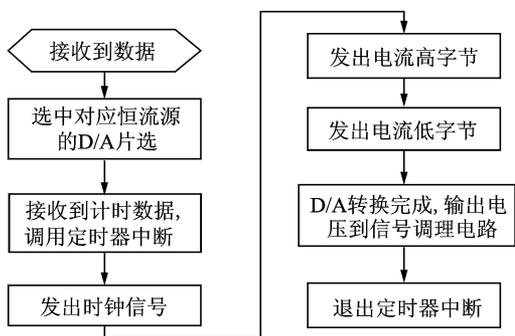


图6 数据处理和D/A转换程序流程图

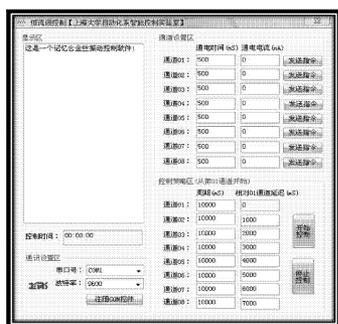


图7 上位机控制程序界面

单程 NI-TI 形状记忆合金丝 SMA, 首先, 进行热冷循环实验, 使其力学行为达到稳定, 并可单程反复使用; 然后, 截取长度为 794 mm 的形状记忆合金丝进行预应变, 形变为 5%, 拉伸后记忆合金丝长度为 803 mm, 并测得单根预拉伸 SMA 丝电阻为 3.163 Ω。在基体材料板上共布置 16 根预拉伸 SMA 丝, 两端分别用接头螺丝进行固定并接出驱动导线端, 同时采用固化胶将 SMA 丝与基体板进行粘贴, 形成一种 SMA 驱动机敏柔板结构。在此基础上, 将所设计制作的 SMA 驱动机敏柔板结构安装在模拟飞行器框架实验模型上, 以构成机敏蒙皮结构, 粘贴 4 个 PZT 压电片作为结构振动检测传感器, 尺寸为 20 mm×6 mm×0.4 mm。实验模型如图 9 所示。



图9 模拟SMA机敏蒙皮结构的实验模型结构

收到后, 对数据进行解析, 输出相应时间、大小的电流。在本方案中为了实现 DSP 或 PC 机对多机多路恒流源的控制, 采用 485 的通信方式, 以便于实现多机通信。通讯波特率为 19 200 bit/s, 构建协议格式主要由同步位、从机地址位、命令字 (区分不同功能)、数据域 (根据命令字不同而不同) 和校验 (累加和校验) 5 部分组成。

2 实验平台与验证

2.1 实验模型结构

采用 SMA 机敏复合结构模拟飞行器蒙皮, 基材选择环氧树脂板, 主要参数为: 弹性模量 $E_s = 22 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.3$, 密度 $\rho = 2\ 100 \text{ kg/m}^3$, 厚度为 2 mm, 具体尺寸如图 8 所示。取直径为 0.5 mm 的

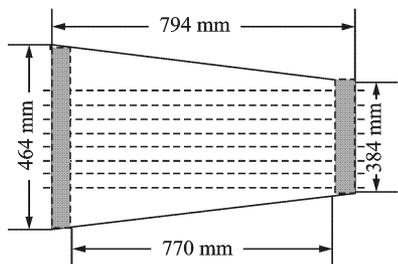


图8 SMA 蒙皮结构形态与尺寸

2.2 实验平台构建

实验平台主要由固定支撑架构、实验模型对象、高性能计算机、BK 振动分析仪、信号发生器、示波器、功率放大器、多路驱动恒流源等组成, 同时设计开发了相关测控软件环境, 具体构成方式如图 10 所示。

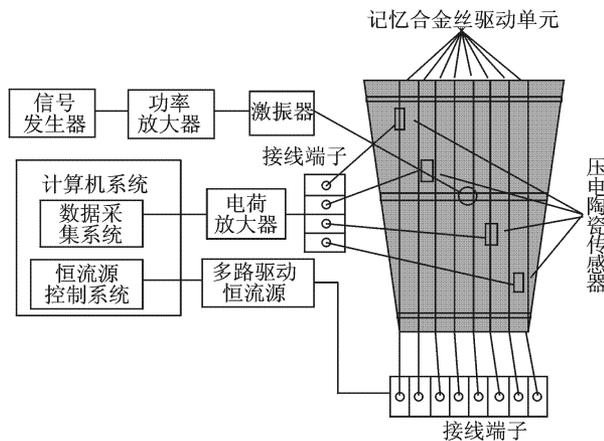


图10 实验平台组成方式示意图

采用信号发生器并经宽频压电驱动功率放大器产生激振信号, 施加于模型结构使之持续振动, 4 路传感 PZT 感知结构振动信号, 实验平台构建如图 11 所示。

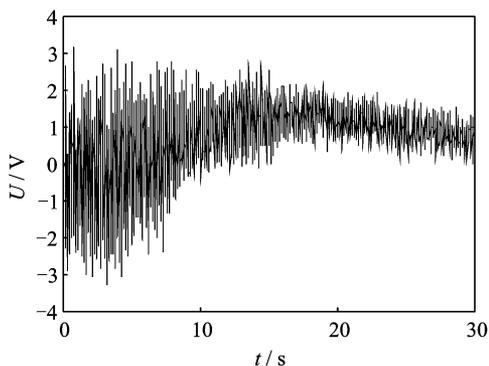


图11 实验平台与环境构成图

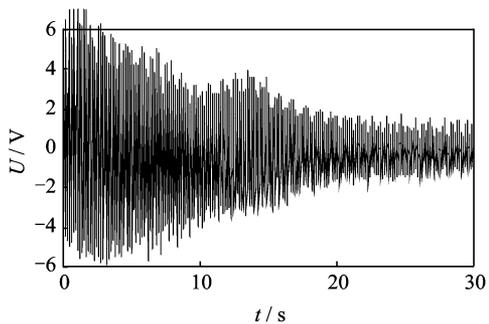
3 振动主动控制实验

经过扫频实验,得出实验对象的1阶固有频率为 $f=18.70\text{ Hz}$,为有效激励结构振动。施加 $f=18.70\text{ Hz}$ 的激励信号于功率放大器,并通过激振器激励模型结构进入持续振动状态。基于实验平台和测控软件启动SMA交替驱动控制,同时驱动4路SMA驱动单元,施加激励电流为 4 A ,激励时间为 0.5 s ,并在16根SMA驱动单元间进行交替循环驱动,总激励时间为 30 s 。经4路压电传感器采集结构振动响应时域信号,获得结构控制效果如图12所示。

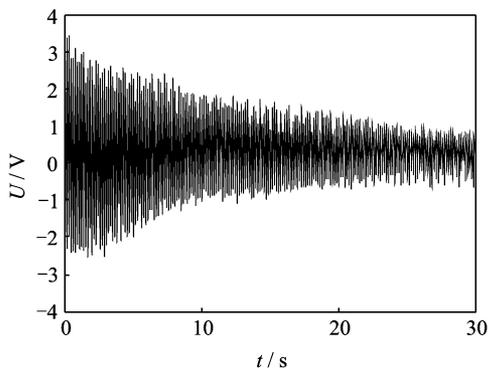
由图12可见,在驱动SMA进入振动控制状态后,持续的结构强迫振动响应在经过 3 s 之后开始受到主动抑制,并在 8 s 之后抑制到一个较低的水平。实验过程中也发现,施加控制后由于结构动力学特



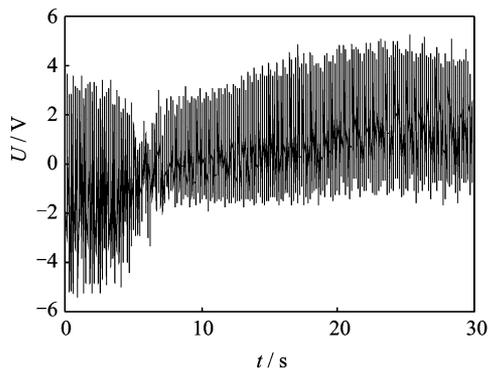
(a) 通道1振动控制时间历程



(b) 通道2振动控制时间历程



(c) 通道3振动控制时间历程



(d) 通道4振动控制时间历程

图12 实验模型各通道振动控制时间历程

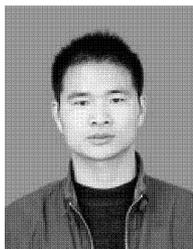
性发生一定的改变,个别传感器所布位置已偏离最优结构振动检测点,导致结构振动控制效果反应不明显,如图12(d)所示。结构整体振动响应大幅降低表明,基于SMA交替驱动的机敏结构振动主动控制是有效的。

4 结束语

笔者针对SMA驱动机敏结构振动主动控制研究,采用了一种SMA交替激励驱动控制方式,并据此设计与开发了一种多路宽量程SMA交替驱动恒流源,在此基础上构建了实验模型结构进行振动主动控制验证。由于模型结构基板上埋入多组SMA驱动单元,每次仅驱动其中的一部分,同时交替循环进行SMA驱动单元的激励,可在一定程度上克服SMA的热滞效应,提高了SMA机敏结构振动主动控制的效果。研究过程也发现,SMA驱动材料性能存在不稳定性,材料正逆相变特性与响应速度也存在较大的差别;因此,机敏驱动材料特性仍是制约工程应用的一个关键环节。

参 考 文 献

- [1] Dhanalakshmi K, Umapathy M. Active vibration control of SMA actuated structures using fast output sampling based sliding mode control[J]. Instrumentation Science and Technology, 2008, 36: 180-193.
- [2] 钱振东, 沈建华, 黄卫, 等. 采用压电陶瓷元件进行智能板振动控制[J]. 振动、测试与诊断, 2000, 20(3): 196-226.
Qian Zhendong, Shen Jianhua, Huang Wei, et al. Vibration control of smart plate using piezoelectric ceramic units[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2000, 20(3): 196-226. (in Chinese)
- [3] 王福吉, 贾振元, 刘巍, 等. 复合薄膜磁致伸缩系数求解及悬臂梁结构优化[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1832-1837.
Wang Fuji, Jia Zhenyuan, Liu Wei, et al. Calculation of magnetostrictive coefficient of composite thin film and structure optimization of cantilever [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1832-1837. (in Chinese)
- [4] Shuzhi S G, Keng P T, Ivan E V, et al. Tracking and vibration control of flexible robots using shape memory alloys [J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2006, 11(6): 690-698.
- [5] 朱晓锦, 陆美玉, 赵晓瑜, 等. 光纤机敏结构振动形态感知及其SMA 致动控制[J]. 振动、测试与诊断, 2008, 28(4): 327-410.
Zhu Xiaojin, Lu Meiyu, Zhao Xiaoyu, et al. Vibration shape perception and SMA actuating control of fiber optic smart structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2008, 28(4): 327-410. (in Chinese)
- [6] Kaori Y, Yoshihiro. Development and experimental consideration of SMA/CFRP actuator for vibration control [J]. Sensors and Actuators, 2005 122: 99-107.
- [7] Sohn J W, Han Y M, Choi S B, et al. Vibration and position tracking control of a flexible beam using SMA wire actuators [J]. Journal of Vibration and Control, 2009, 15(2): 263-281.
- [8] 王晓宏, 张博明, 杜善义, 等. 形状记忆合金驱动主动变形波纹板结构的有限元分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 287-291.
Wang Xiaohong, Zhang Boming, Du Shangyi, et al. Finite element analysis of corrugated sheets structure deforming initiatively with shape memory alloy actuators [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 287-291. (in Chinese)
- [9] Melin S, Fatih M K, Yavuz Y. Smart structures and their applications on active vibration control: studies in the department of aerospace engineering, METU [J]. Journal of Electroceramics, 2008, 20: 167-174.
- [10] 王军, 酆正能, 叶宁. 形状记忆合金智能结构的主动振动抑制研究[J]. 航空学报, 2002, 23(5): 427-430.
Wang Jun, Li Zhengneng, Ye Ning. Research on active vibration suppression of smart structure embedded with shape memory alloy [J]. Acta Aeronautica Sinica, 2002, 23(5): 427-430. (in Chinese)
- [11] He Yongyong, Satoko O, Chu Fulei, et al. Vibration control of a rotor-bearing system using shape memory alloy: theory [J]. Smart Mater & Struct, 2007, 16: 114-121.



第一作者简介:姜恩宇,男,1981年5月生,博士研究生。主要研究方向为控制理论与控制工程、测控技术及仪器等。曾发表《小波包分析和支持向量机用于直肠感知功能重建》(《应用科学学报》2012年第30卷第5期)等论文。
E-mail: Enyu.1981@163.com

通信作者简介:朱晓锦,男,1965年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为先进测控与信息处理、智能结构主动监控等。
E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn