

# 基于特征模型的挠性结构自适应振动控制

邱志成<sup>1</sup>, 吴宏鑫<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 机械工程学院, 广东 广州 510641; 2. 中国空间技术研究院 北京控制工程研究所, 北京 100080)

**摘要:** 航天器是一种由中心刚体和挠性附件组成的刚柔耦合复杂系统, 由于系统调姿或外部扰动作用时将引起振动, 尤其是在平衡位置的小幅度振动对姿态稳定性和指向控制精度严重影响, 并且难以控制. 为了解决该问题, 采用基于特征模型的金分割自适应控制方法, 并引入逻辑微分阻尼项进行振动主动控制. 建立了刚柔耦合结构实验平台, 进行了包括位置设定点及转动振动主动控制的算法实验比较, 结果表明, 采用的基于特征模型的方法得到了比较理想的振动抑制效果, 尤其是对低频小幅度振动的抑制, 在相同条件下, 与传统控制方法相比, 大大减少了振动抑制的时间. 实验研究表明采用的算法快速抑制振动的有效性.

**关键词:** 挠性结构; 振动主动控制; 特征模型; 自适应控制

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2007)05-0036-06

## Adaptive control for vibration of flexible structures based on the characteristic model

QIU Zhi-cheng<sup>1</sup>, WU Hong-xin<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Beijing Institute of Control Engineering, Chinese Academy of Space Technology, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Spacecraft are kinds of coupled systems made up of rigid bodies and flexible appendages. Vibration is unavoidably induced by attitude control or external excitations. Low amplitude vibration near the equilibrium point is especially difficult to suppress, and this is harmful to stability and attitude control accuracy. To solve this problem, a golden section adaptive control method based on the characteristic model was adopted, in which a differential damping term was introduced to suppress vibration. An experimental setup was designed and manufactured to verify this approach. The effectiveness of active vibration controllers at suppressing unwanted vibration due to environmental excitation was investigated, especially undesirable oscillations caused by motor torque during hub slewing. Experimental results show that this algorithm not only increases the effectiveness of vibration damping but also damps low amplitude vibrations near the equilibrium point faster than traditional control schemes, proving that this control scheme improves control of vibration.

**Keywords:** flexible structures; active vibration control; characteristic model; adaptive control

航天器大型挠性附件如大型天线、太阳帆板等, 它们的振动将影响稳定性和指向控制精度<sup>[1]</sup>, 尤其是需要精确地控制其位置和指向. 空间机器人及航天器挠性附件的展开机构中一般采用谐波齿轮减速器, 它具有柔性关节特性, 将带来谐振等现象<sup>[2]</sup>. 因

此, 对挠性的动力学建模和振动控制研究具有特别重要的理论和应用意义. 诸多研究者对挠性结构建模和控制进行了研究<sup>[1-6]</sup>, 柔性机械臂的期望的端部调节性能为<sup>[4]</sup> 关节角位移运动收敛到最终的位置, 并且弹性振动被有效的抑制. 研究工作主要有直接应变反馈控制方法<sup>[3]</sup>, 将关节 PD 控制与非线性应变反馈相结合提出了基于能量的鲁棒控制方法及其自适应控制方法<sup>[4]</sup>, 采用压电驱动器正位反馈控

收稿日期: 2007-02-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60404020); 国家自然科学基金空天飞行器重大研究计划资助项目(90505014); 广东省自然科学基金资助项目(05006499).

制 (PPF) 的控制方法<sup>[5]</sup>, 输入成形控制方法<sup>[6]</sup>等. 但针对快速振动抑制和高精度的指向控制问题时, 理论和实际应用上还需深入研究. 经典 PD 控制在平衡位置的小幅度振动对系统控制精度具有严重影响, 并且难以控制<sup>[7]</sup>. 由于实际系统存在参数不确定性和外部扰动, 以及高频未建模动态等, 很难精确建模, 这给控制带来困难. 挠性结构的建模和控制方法之一为模态分析方法, 一般的模型阶次很高, 典型的处理办法是模态截断, 但存在观测与控制溢出、外扰频率与内部未建模频率共振等问题, 此外, 按模态分析方法建模还存在低频模态密集所遇到的控制问题. 为解决复杂挠性高阶系统的建模和控制问题, 文献<sup>[8]</sup>提出了特征建模的思想, 用二阶时变的差分方程建立系统的模型, 并把控制和建模结合起来考虑, 为参数未知的高阶对象进行低阶控制的自适应控制器设计提供了理论依据, 为工程设计带来了极大的方便. 本文针对带有柔性关节的挠性梁刚柔耦合复杂结构, 将压电片的应变信号作为传感信号对挠性结构的弹性振动进行主动控制研究, 采用基于特征模型的黄金分割自适应控制方法, 并结合逻辑微分控制律, 克服了 PD 控制律难以控制小幅值振动的缺点, 建立了基于压电传感器的交流伺服电机驱动谐波齿轮的挠性梁实验平台, 进行了位置设定及挠性梁转动产生振动进行主动控制实验研究, 通过与 PD 控制算法的实验结果比较, 验证了基于特征模型控制方法的有效性, 在旋转运动及停止过程中弹性振动被快速地抑制.

### 1 系统简介及数学模型

带有柔性关节 (谐波齿轮) 转动的挠性梁示意图如图 1 所示, 交流伺服电机通过谐波齿轮传动减速器后驱动压电挠性梁, 梁的根部与谐波齿轮输出轴轮毂固定连接. 加速度传感器安装在挠性梁的末端, 采用压电片与加速度传感器检测挠性梁及柔性关节振动, 交流伺服电机作为驱动器. 动力学建模时考虑关节柔性、梁的挠性及中心刚体转动. 挠性梁采用 Euler-Bernoulli 模型.

轮毂在  $Ox$  方向距离为  $x$  点测量梁的弹性变形  $w(x, t)$ , 采用模态展开弯曲弹性位移可以表示为

$$w(x, t) = \sum_{j=1}^m \phi_j(x) q_j(t) = (x) q, \quad j = 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中:  $q_j$  和  $\phi_j$  分别为广义挠性坐标和模态函数,  $m$  为模态阶数,  $(x)$ 、 $q$  为模态函数及广义坐标的矢量.

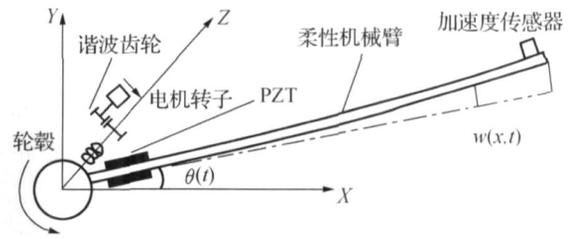


图 1 实验装置的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the setup

带有柔性关节, 中心刚体转动的挠性结构的动态空间表达形式如下

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = Q. \quad (2)$$

式中:  $x$ 、 $M$ 、 $C$ 、 $K$  和  $Q$  分别为状态矢量、质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和广义力矢量, 状态矢量为

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ R \\ \dot{R} \end{bmatrix}^T, \quad R^{(2m+4) \times 1}$$

式中:  $\theta(t)$  为电机转子的角位移,  $R(t)$  为谐波齿轮输出轮毂的角位移.

当激励梁弯曲振动时, 由于应变使得压电传感器产生的电荷  $q_i(t)$  可以表达为<sup>[8]</sup>

$$q_i(t) = -e_{31i} b_{si} \int_{x_{1i}}^{x_{2i}} r_i \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} dx, \quad i = 1, 2, \dots, N_s. \quad (3)$$

式中:  $e_{31i}$  为第  $i$  片压电传感器的压电应力常量,  $b_{si}$  为压电片宽度,  $x_{1i}$  和  $x_{2i}$  为第  $i$  片压电传感器在粘贴在梁的两端位置坐标,  $r_i$  为梁的中性层到压电片中性层的距离,  $N_s$  为压电传感器的数目. 第  $i$  片压电传感器产生的电流  $I_i(t)$  可表达为  $I_i(t) = \dot{q}_i(t)$ .

### 2 主动振动控制器

本文旨在利用交流伺服电机作为挠性梁旋转运动和振动抑制的驱动器, 利用压电应变片作为传感器来进行振动主动控制.

#### 2.1 基于应变反馈的 PD 控制器

电机的关节角度控制采用 PD 控制, 电机码盘作为传感器, 控制律为

$$\ddot{\theta} = K_p(\theta_d - \theta) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}). \quad (4)$$

式中:  $K_p > 0$ ,  $K_v > 0$  是电机端位置控制的比例和微分增益,  $\theta_d$  和  $\dot{\theta}_d$  分别为电机端期望和实际的角位移.

当挠性梁的振动也采用 PD 控制器, 电机码盘和压电片作为传感器, 电机驱动控制器可表达为

$$\ddot{\theta} = K_p(\theta_d - \theta) + K_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}) + K_{p1} q_i + K_{v1} \dot{I}_i. \quad (5)$$

式中:  $K_{p1} > 0$  和  $K_{v1} > 0$  为梁的振动控制的比例和

微分增益,  $q_i$  和  $I_i$  分别为压电传感器的输出的电荷和电流,如式(3)所示.

### 2.2 基于特征建模的自适应控制

所谓特征建模,就是根据对象动力学特征和控制性能要求相结合进行建模,而不是仅以对象精确的动力学分析来建模.特征模型与高阶系统的降阶模型不同,它是把高阶模型的有关信息都压缩到几个特征参量之中,并不丢失信息,一般情况下,用慢时变差分方程描述系统的特征模型,根据系统的输入输出通过参数估计算法估计出时变差分方程的参数.基于特征模型的黄金分割自适应控制方法的特点是模型形式比原对象动力学方程简单,辩识的参数个数少,该方法能够通过在线辨识调整参数来适应转动惯量,工程实现容易、方便.

文献[8]给出特征建模定理:对于任一线性定常  $n$  阶对象  $G(s)$ ,在满足采样定理且连续系统离散化后保持原系统能控及控制精度要求,当要实现位置保持或位置跟踪控制时,其特征模型可用一个二阶时变差分方程形式来描述:

$$y(k+1) = f_1(k)y(k) + f_2(k)y(k-1) + g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1). \quad (6)$$

当对象  $G(s)$  稳定时:

1) 当无积分项和无重根项时,  $f_i(k)$  的范围可事先确定,按最大范围取值:  $f_1(k) \in (1, 2]$ ;  $f_2(k) \in [-1, 0]$ ;  $g_0(k)$ 、 $g_1(k)$  的最大值范围:  $g_0(k)$ 、 $g_1(k) \ll 1$ .

2) 与动态过程中同样的输入条件下,特征模型输出与实际对象输出等价,稳态情况下输出相等.

3) 当静态增益  $D = 1$  时,在稳态情况下特征模型方程(1)的各系数之和等于 1,即

$$f_1(k) + f_2(k) + g_0(k) + g_1(k) = 1. \quad (7)$$

4) 当对象为最小相位系统时,在工程上为了简便,只取一个  $g_0(k)$  项,即

$$y(k+1) = f_1(k)y(k) + f_2(k)y(k-1) + g_0(k)u(k). \quad (8)$$

由于挠性附件包含无穷阶的振动模态,用传统方法要经过模态截断,从而会带来观测和控制“溢出”问题,影响系统的控制性能.与高阶动力学模型相比,特征模型并没有进行模态截断,所有的模态信息都包含在时变参数  $f_1(k)$ 、 $f_2(k)$ 、 $g_0(k)$  中.

因为谐波传动齿轮柔性关节的扭转刚度远远大于挠性梁的刚度,当压电传感片配置在挠性梁的根部时,采用电机作为驱动器,系统的传感器和驱动器近似为同位配置,因此系统为最小相位系统.故可以用驱动器的输入和传感器的输出建立整个系统的特征模型为

$$y(k) = f_1(k)y(k-1) + f_2(k)y(k-2) + g_0(k)u(k-1) = \Phi^T(k-1) \begin{bmatrix} y(k-1) \\ y(k-2) \\ u(k-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:系统的输入输出状态向量和未知参数向量及参数的范围分别表达为

$$\Phi(k-1) = [y(k-1) \quad y(k-2) \quad u(k-1)]^T, \\ \theta(k) = [f_1(k) \quad f_2(k) \quad g_0(k)]^T.$$

共位配置的挠性结构是最小相位系统,并可以用式(9)所示的时变二阶离散系统来逼近,根据文献[4-5],式(9)中各参数必然满足如下参数范围<sup>[7]</sup>:

$$f_1(k) \in [1.433 \ 1, 1.997 \ 4], \\ f_2(k) \in [-1, -0.513 \ 4], \\ f_1(k) + f_2(k) \in [0.919 \ 6, 1.0].$$

未知参数估计采用具有遗忘因子的递推最小二乘法[8]:

$$\begin{cases} K(k) = \frac{P(k-1)\Phi(k-1)}{\Phi^T(k-1)P(k-1)\Phi(k-1)}, \\ \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \Phi^T(k-1)\hat{\theta}(k-1)], \\ P(k) = \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\Phi^T(k)]P(k-1). \end{cases} \quad (10)$$

自适应控制器设计包括 3 部分<sup>[9-11]</sup>:

#### 1) 维持/跟踪控制律

$$u_0(k) = \frac{1}{\hat{g}_0(k) + \hat{f}_2(k)y(k-1)} [y_r(k) + \hat{f}_1(k)y(k) - y_r(k)]. \quad (11)$$

式中:  $\hat{f}_i$ 、 $\hat{g}_i$  为参数估计值,  $y(k)$  为输出值,  $y_r(k)$  为期望输出, 为正常数.

#### 2) 黄金分割自适应控制律

$$u_0(k) = \frac{1}{\hat{g}_0(k) + \hat{f}_2(k)y(k-1)} [y_r(k) - \hat{f}_1(k)y(k) - y_r(k)]. \quad (12)$$

式中:  $\tilde{y}(k) = y(k) - y_r(k)$ ,  $L_1 = 0.382$ ,  $L_2 = 0.618$ , 进入稳态时,  $L_1 = 1$ ,  $L_2 = 1$ .

#### 3) 逻辑微分控制律

$$u_d(k) = k_d(y(k) - y(k-1)). \quad (13)$$

式中:  $k_d = c \sqrt{\sum_{i=1}^l |\tilde{y}(k-i)|}$ ,  $c$  为常数.

总的控制输入为

$$u(k) = u_0(k) + u_l(k) + u_d(k). \quad (14)$$

当主动振动控制采用 PPF 和 PD 复合控制器时,控制律可以表达为

$$= K_p(\ddot{a} - \ddot{a}_d) + K_v(\dot{a} - \dot{a}_d) + u(t). \quad (15)$$

对于位置设定点的振动控制,期望的角位移为  $\dot{a} = 0$ ,  $\ddot{a} = 0$ , 对外部扰动激励产生的振动进行控制;对于梁转动的振动控制,梁的期望的角速度  $\dot{a} = c$ ,  $c$  为某不等于零的常量,由于电机的转动转矩

的作用及惯性的原因,在运动过程中会产生振动,尤其是在启动和停止时,需要进行主动控制.

### 3 实验结果与比较

建立了带有柔性关节(谐波齿轮)的挠性梁实验平台,进行了振动主动控制的实验比较研究.图 2 为模拟中心刚体转动,通过谐波齿轮连接的系统实验平台的照片.其中柔性关节采用北京中技克美谐波传动公司生产的谐波齿轮减速器,其型号为 XB1-80,减速比为 1 100.谐波减速器的输出端连接压电智能挠性梁,该平台是集成加速度传感器、压电智能材料传感器以及交流伺服电机驱动谐波齿轮减速的刚柔耦合系统平台.

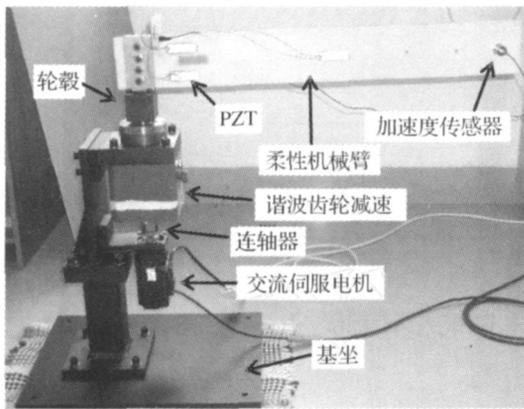


图 2 实验装置照片

Fig. 2 Photograph of the test bed

挠性梁为环氧树脂梁,其几何尺寸为:长度  $l = 0.65\text{ m}$ ,宽度  $b = 0.1\text{ m}$ ,厚度  $h = 1.78\text{ mm}$ .梁的力学特性中杨氏模量、泊松比和密度分别为  $E_b = 3.464 \times 10^{10}\text{ Pa}$ ,  $\nu_b = 0.33$ ,  $\rho_b = 1\ 840\text{ kg/m}^3$ .离散分布的压电片(PZT)传感器分别粘贴在梁的根部和中间,PZT的几何尺寸为  $50\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ .加速度传感器的质量为  $38\text{ g}$ .压电传感片的信号通过极低频电荷放大器(型号:YE5850)放大到幅值为  $-10\text{ V} \sim +10\text{ V}$  的电压信号.驱动器为安川(Yaskawa)交流伺服电机,功率  $400\text{ W}$ ,带有 13 线的增量式编码器.控制系统采用研华工控机(IPC),Pentium IV,CPU  $2.4\text{ GHz}$ .12-位 16 通道模/数(A/D)转换器和 12-位 12 通道数/模(D/A)转换控制卡分别是康拓 IPC5432 和研华 PCL-727,码盘解算卡采用研华 PCL-833.系统的采样时间为  $2\text{ ms}$ .

因为谐波齿轮传动比大,反向驱动能力很差,所以梁的旋转运动和振动认为是可解耦的.谐波齿轮减速器的扭转刚度很大,挠性梁很薄时,挠性梁近似为悬臂边界条件,系统低阶振动模式的频率主要依

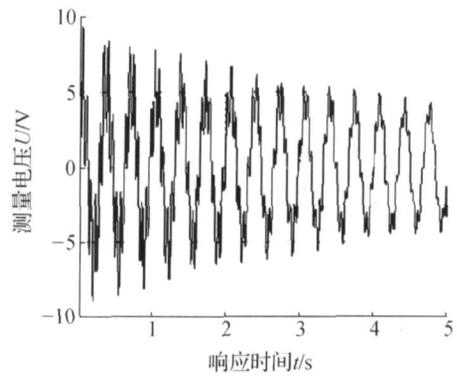


图 3 未控制前二阶模态振动曲线

Fig. 3 Time response without control for the first two modes

赖于挠性梁的参数.通过外部激励利用压电传感器测量挠性梁的残余振动.弯曲振动模态频率为  $f_1 = 2.30\text{ Hz}$ ,  $f_2 = 15.705\text{ Hz}$ .图 3 所示为取下末端集中质量的加速度传感器后,激励梁的前 2 阶振动模态,记录压电传感器的信号得到的实验结果.此时测量模态频率分别为:  $f_1 = 2.95\text{ Hz}$ ,  $f_2 = 18.51\text{ Hz}$ .

图 4 和图 5(a)所示分别为取下挠性梁末端的加速度传感器后,激励梁的前 2 阶振动模态,采用 PD 控制和基于特征模型的黄金分割自适应控制实验结果曲线.比较可知,PD 控制算法虽然使大幅值振动很快衰减到较小幅值,但在平衡位置的小幅值振动还要持续很长时间.基于特征模型黄金分割结合逻辑微分的自适应控制使大幅值和小幅值振动都很快的衰减.图 5(b)中 3 条曲线分别为特征模型中时变参数  $f_1(k)$ 、 $f_2(k)$ 、 $g_0(k)$  采用带有遗忘因子的最小二乘辨识参数实验曲线.实验结果中满足参数变化的范围时主动振动控制效果很好,充分验证了基于特征模型的自适应控制方法的有效性.

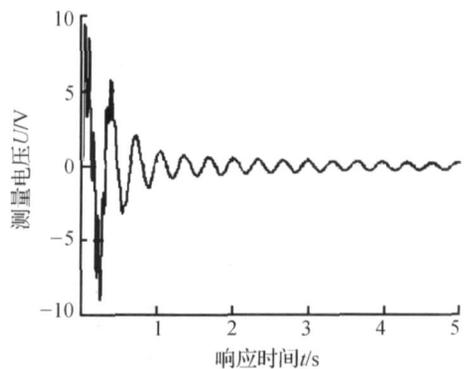
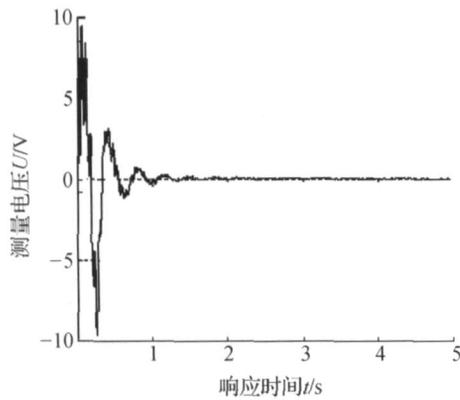
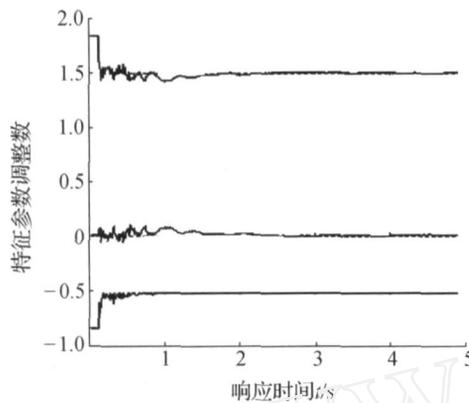


图 4 PD 控制前 2 阶模态振动曲线

Fig. 4 Time response under PD control for the first two modes



(a) 主动振动控制曲线



(b) 自适应控制参数曲线

图5 特征模型自适应控制振动结果曲线

Fig.5 Results of characteristic model based adaptive control

图6是将3种情况记录20s时间后经过快速傅里叶变换(FFT)后的幅频响应曲线。图中的点线、虚线和实线分别是未控制(UNC)、PD控制(PDC)和基于特征模型的自适应控制(Char)的幅频响应。从图6所示的幅频响应曲线可知,采用基于特征模型的自适应控制可以使前2阶振动模态的幅值大大地降低,显示出控制方法抑制振动的有效性。

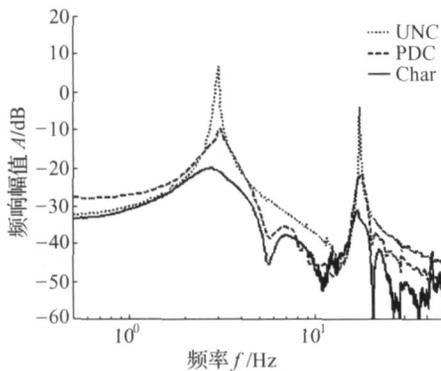


图6 前2阶模态振动曲线的频率响应

Fig.6 Frequency response for the first two modes

具有挑战性的问题是同时控制挠性结构的转动和振动。因为在转动控制过程中,尤其是在起动和停止阶段将会使挠性梁产生大幅值振动。当电机控制以  $73.25 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的恒速度转动时,速度采用梯形规划,在上升段以  $0.04 \text{ s}$  的时间电机端转速从  $0$  增加到  $73.25 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的恒转速,在下降段以  $0.04 \text{ s}$  的时间从  $73.25 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  的恒转速降低到  $0$  时,即在速度上升和下降段的角加速度分别为  $30.52 \text{ r} \cdot \text{s}^{-2}$  和  $-30.52 \text{ r} \cdot \text{s}^{-2}$ 。此时,在挠性梁的末端距离悬臂端  $l=0.61 \text{ m}$  处安装加速度传感器,由于电机力矩扰动及挠性梁惯量因素会产生振动,如图7所示,图中的2幅图分别为电机端的转动速度和由压电传感器测量的量的振动。这表明,如果仅仅控制关节的运动,不对振动进行主动控制,系统虽然稳定,但挠性梁将有大幅值的振动。

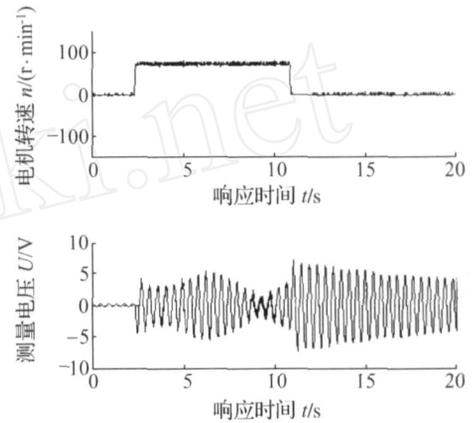


图7 转动过程的未施加主动控制振动响应

Fig.7 Vibration response without control when slewing

图8为同样情况下电机控制以梯形波规划的速度转动时,采用式(5)所示的主动PD控制律时挠性梁的主动振动控制实验曲线。可见,振动被抑制到较小的幅值。图9为同样情况下采用式(14)基于特征

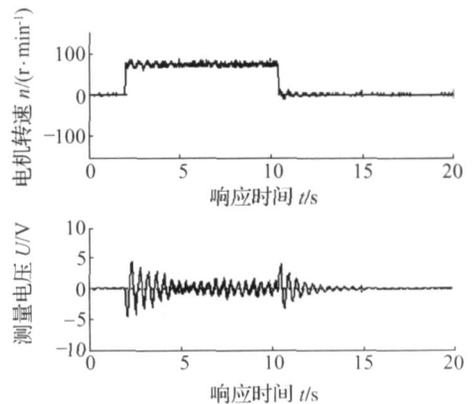


图8 转动过程采用PD算法的振动控制

Fig.8 Vibration response under PD control when slewing

模型的黄金分割结合逻辑微分的自适应控制时挠性梁的主动振动控制实验曲线.图 8 和图 9 的实验结果比较可知,当采用的基于特征模型的控制方法小幅值振动被快速地抑制,具有较好的快速性.

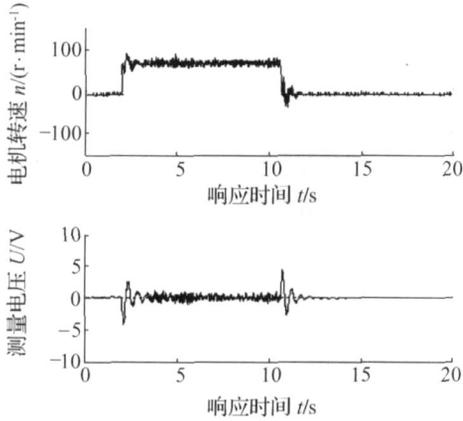


图 9 转动过程基于特征模型的自适应振动控制

Fig.9 Vibration response under characteristic model based adaptive control when slewing

#### 4 结束语

针对基于离散特征模型的挠性结构自适应控制问题,进行了位置设定点及挠性梁转动的主动振动控制算法的实验比较研究.结果表明特征模型与黄金分割自适应控制相结合使得算法简单,可调参数少,控制器的设计不依赖于挠性系统参数的先验值,因此该方法具有很好的鲁棒性.带有逻辑微分的黄金分割自适应控制方法控制器算法更简单,能对挠性结构的振动尤其是对平衡位置的小幅值挠性振动实现快速抑制,实验结果有力地表明了这种方法的优越性.

#### 参考文献:

[1]SUN Dong, MILLS J K, SHAN Jinjun, et al. A PZT actuator control of a single-link flexible manipulator based on linear velocity feedback and actuator placement [J]. Mechatronics, 2004, 14(2): 381 - 401.

[2]WILSON D S G, PARKER G G. Robust control design for flexible-link/flexible-joint robots[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. San Francisco, USA, 2000.

[3]LUO Z. Direct strain feedback control of flexible robot arms: new theoretical and experimental results[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 38(11): 1610 - 1622.

[4]GE S S, LEE T H, ZHU G. Improving regulation of a single-link flexible manipulator with strain feedback[J].

IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(1): 179 - 185.

[5]SONG G, SCHMIDT S P, AGRAWAL N. Experimental robustness study of positive position feedback control for active vibration suppression [J]. Journal of Guidance, 2002, 2(1): 179 - 182.

[6]PARK J, CHANG P H, PARK H S, et al. Design of learning input shaping technique for residual vibration suppression in an industrial robot [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(1): 55 - 65.

[7]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. WANG Xiaolei, WU Hongxin. Adaptive control scheme and experiment for vibration suppression of flexible spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(3): 275 - 281.

[8]吴宏鑫,刘一武. 特征建模与挠性结构的控制[J]. 中国科学, 2001, 31(2): 137 - 149. WU Hongxin, LIU Yiwu. Characteristic model and flexible structure control [J]. Science in China, 2001, 31(2): 137 - 149.

[9]雷拥军,吴宏鑫. 基于多变量特征模型的机械手自适应控制[J]. 宇航学报, 2005, 26(7): 410 - 414. LEI Yongjun, WU Hongxin. Manipulator adaptive control based on multi-variable characteristic model [J]. Journal of Astronautics, 2005, 26(7): 410 - 414.

[10]吴宏鑫,王颖,解永春. 非线性黄金分割自适应控制[J]. 宇航学报, 2002, 23(11): 19 - 26. WU Hongxin, WANG Ying, XIE Yongchun. Non-linear golden section adaptive control [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(11): 19 - 26.

[11]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.

#### 作者简介:



邱志成,男,1973年生,博士,副教授,主要研究方向为挠性结构的建模与控制、机器人学与机器人控制.发表论文 30 余篇,其中 SCI、EI 和 ISTP 收录 15 篇.

E-mail :zhchqiu @scut.edu.cn.



吴宏鑫,男,1939 年出生,研究员,博士生导师,中国科学院院士,主要研究方向为智能控制、自适应控制、航天器控制.曾获国家发明三等奖 1 项,部级科技进步一等奖 1 项、二等奖 4 项,全国优秀科技图书二等奖 1 项,获国家发明专利 2 项.发表论文 70 余篇,出版专著 1 部.