

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.040

弯扭耦合柔性构件系统的变结构控制研究*

吕永桂¹ 陈凯¹ 魏燕定²

(1. 杭州电子科技大学机械工程学院, 杭州 310018; 2. 浙江大学现代制造工程研究所, 杭州 310027)

【摘要】 对由柔性杆和柔性梁组成的两连杆柔性构件系统的弯扭耦合振动进行了研究,建立了此柔性系统的动力学方程。在柔性杆根部粘贴一只压电扭转致动器抑制柔性杆的扭转振动,在柔性梁根部粘贴一只压电弯曲致动器抑制柔性梁的弯曲振动。采用一种带有饱和环节及滤波器的滑模变结构控制策略,进行了实验研究。结果表明:施控后的系统是稳定的,弯扭的各阶模态均能得到有效抑制,柔性梁末端的振动位移能得到显著衰减。

关键词: 柔性构件 耦合振动 致动器 滑模变结构控制

中图分类号: O328; TH113.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0199-06

Variable Structure Control Coupled Bending-torsional Flexible Structure System

Lü Yonggui¹ Chen Kai¹ Wei Yanding²

(1. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

(2. Institute of Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract

A two-link flexible structure system consisting of a flexible bar and a flexible beam was proposed. The coupled bending-torsional vibration of the flexible structure system was investigated. The dynamic equation of the system was established. A piezoelectric torsional actuator was bonded onto the root of a flexible bar to suppress the torsional vibration of the flexible bar, and a piezoelectric bending actuator was bonded onto the root of the flexible beam to suppress the bending vibration of flexible beam. Experimental research was performed using a sliding mode variable structure control strategy with a saturation unit and a filter. The results show that the controlled system is stable, all the bending and torsional modes are effectively suppressed and the tip vibration of the flexible beam is dramatically attenuated.

Key words Flexible structure, Coupled vibration, Actuator, Sliding mode variable structure control

引言

目前,在工农业生产诸多机械结构中,常采用柔性杆、柔性梁、柔性板或其组合件作为组成构件。这类柔性结构因其刚度低、内阻小,易受到外界载荷的作用而产生振动。若不对其振动加以抑制,易使机械系统的运动轨迹失真,动态响应变差,工作效率变低,还使结构产生过早的疲劳破坏,从而影响结构的

使用寿命。为了抑制柔性构件的弹性振动,各国学者纷纷引入机敏材料。其中,压电材料占有较为重要的地位。压电材料以其响应快,频率范围宽,能传感和致动等特点,已成功地应用于传感器、致动器中^[1-2]。将压电材料嵌入或粘贴在柔性构件的本体上,施以控制电压,能有效抑制柔性构件的振动,这方面的研究已经取得了长足的进展^[3-4]。

目前对薄臂柔性梁采用基于压电应变常数 d_{31}

收稿日期: 2009-11-20 修回日期: 2010-02-09

* 国家自然科学基金资助项目(50875235)

作者简介: 吕永桂, 讲师, 博士, 主要从事振动主动控制研究, E-mail: lyonggui@sina.com

的压电弯曲致动器进行振动控制的研究成果非常多,且抑振效果显著。对构件之间的弯扭耦合研究则较少,从目前所能检索到的文献来看,对于弯扭耦合的研究多见于同一构件^[5-6]。

本文对一种由柔性杆和柔性梁组成的柔性构件系统的弯扭耦合振动进行研究,分别采用压电扭转致动器与压电弯曲致动器抑制柔性梁与柔性杆的弯曲振动与扭转振动。提出一种带饱和环节及滤波器的滑模变结构控制策略。进行实验研究,为复合柔性结构、多连杆柔性机械臂的振动主动控制提供有益的参考。

1 理论建模

考虑如图 1 所示的两连杆柔性构件系统。为了便于理论研究,作如下假设:各致动器与本体粘接完好,不考虑粘贴层对本体的影响;忽略重力对系统的影响,即对于柔性杆,只研究其扭转振动,对于柔性梁,只研究其在 xy 平面的弯曲振动。柔性构件系统在外界的某一激励下,扭杆末端会产生一个角位移 $\theta(l_g, t)$,柔性梁上 p 点处也会产生一个弯曲挠度 $w(x, t)$,由于柔性梁一端固连于柔性杆的末端,导致杆的扭转和梁的弯曲相互耦合作用,梁末端的输出位移是梁的多阶弯曲模态产生的挠度和杆的多阶扭转模态产生的位移的叠加。

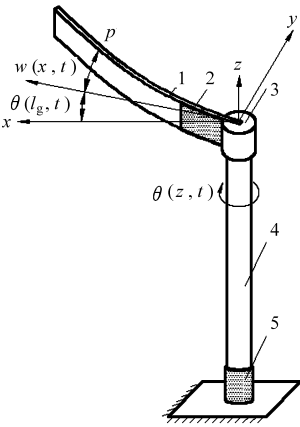


图 1 两连杆柔性构件系统简图

Fig. 1 Simplified configuration of the two-link flexible system

1. 柔性梁 2. 粘贴在柔性梁上的 n_1 个压电弯曲致动器
3. 柔性梁与柔性杆的连接块
4. 一端固定的柔性杆 5. 粘贴在柔性杆上的 n_2 个压电扭转致动器

根据拉格朗日方程及假设模态法,取柔性杆前 m 阶模态,取柔性梁前 n 阶模态,可得两连杆柔性构件系统的动力学方程为^[7]

$$M(q) \begin{bmatrix} \ddot{\eta} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} + C(\eta, q) \begin{bmatrix} \dot{\eta} \\ \dot{q} \end{bmatrix} + K(\eta, q) \begin{bmatrix} \eta \\ q \end{bmatrix} = u \quad (1)$$

其中

$$M(q) = \begin{bmatrix} m_{\eta\eta} & m_{\eta q} \\ m_{\eta q}^T & m_{qq} \end{bmatrix}$$

$$C(\eta, q) = \begin{bmatrix} \dot{q}^T m_{qq} q & \dot{\eta} q^T m_{qq} \\ -\dot{\eta}^T m_{\eta q} q & 0 \end{bmatrix}$$

$$K(\eta, q) = \begin{bmatrix} k_\eta & 0 \\ 0 & k_q \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n_1} cU_i(t) [\Phi^T(x_i + l_{pta}) - \Phi^T(x_i)] \\ \sum_{j=1}^{n_2} dU_j(t) [\Psi'^T(x_j + l_{pba}) - \Psi'^T(x_j)] \end{bmatrix}$$

$$\eta = [\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m]^T \quad q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T$$

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m] \quad \Psi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]$$

$$m_{\eta\eta} = \int_0^{l_b} \rho_b A_b x^2 \phi_i(l_g) \phi_j(l_g) dx +$$

$$\sum_{j=1}^{n_2} \int_0^{l_{pba}} \rho_{pba} A_{pba} x^2 \phi_i(l_g) \phi_j(l_g) dx +$$

$$\int_0^{l_g} \rho_g I_g \phi_i(z) \phi_j(z) dz +$$

$$\sum_{j=1}^{n_1} \int_0^{l_{pta}} \rho_{pta} I_{pta} \phi_i(z) \phi_j(z) dz +$$

$$q^T m_{qq} q + J_{end} \Phi(l_g) \Phi^T(l_g)$$

$$m_{\eta q} = \int_0^{l_b} \rho_b A_b x \varphi_i(x) \phi_j(l_g) dx +$$

$$\sum_{j=1}^{n_2} \int_0^{l_{pba}} \rho_{pba} A_{pba} x \varphi_i(x) \phi_j(l_g) dx$$

$$m_{qq} = \int_0^{l_b} \rho_b A_b \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx +$$

$$\sum_{j=1}^{n_2} \int_0^{l_{pba}} \rho_{pba} A_{pba} \varphi_i(x) \varphi_j(x) dx$$

$$k_q = \int_0^{l_b} \rho_b A_b \varphi_i''(x) \varphi_j''(x) dx +$$

$$\int_0^{l_{pba}} \rho_{pba} A_{pba} \varphi_i''(x) \varphi_j''(x) dx$$

$$k_\eta = \int_0^{l_g} G_g I_g \phi_i'(z) \phi_j'(z) dz +$$

$$\int_0^{l_{pta}} G_{pta} I_{pta} \phi_i'(z) \phi_j'(z) dz$$

式中 x_i, x_j ——各致动器在柔性杆及柔性梁上的粘贴位置

I_g, I_b ——柔性杆的转动惯性矩,柔性梁的惯性矩

ρ_g, ρ_b ——柔性杆及柔性梁的密度

l_g, l_b ——柔性杆及柔性梁的长度

l_{pta}, l_{pba} ——压电扭转致动器、压电剪切致动器的长度

A_b ——柔性梁的横截面积

J_{end} ——固连柔性梁与柔性杆的连接块对 z 轴的转动惯量

$\phi_j(z), \varphi_i(x)$ ——满足边界条件的试函数

$\eta_j(t), q_i(t)$ ——广义坐标

c ——扭转致动器单位电压所产生弯矩系数

d ——弯曲致动器单位电压所产生弯矩系数

$U_i(t)$ ——施加在第 i 个扭转致动器上电压

$U_j(t)$ ——施加在第 j 个致动器上的电压

此外, $m_{\eta\eta}$ 中的 $q^T m_{\eta\eta} q$ 项为时变量, 因而式(1)中的 $M(q)$ 为随时间变化的变量。同时, 从式(1)中的 $C(\eta, q)$ 项可以看出, $\eta_j(t)$ 与 $q_i(t)$ 是相互耦合的, 因而弯曲与扭转的模式是相互耦合的。

2 带有饱和环节及低通滤波器滑模控制器

针对式(1)所描述的时变、强耦合系统, 本文提出一种滑模变结构控制策略。滑模变结构控制是变结构控制的一种控制策略, 该控制特性可以迫使系统在一定特性下沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的上下运动, 即所谓的“滑动模态”或“滑模”运动。从理论上讲, 由于滑动模态可以按需要设计, 而且系统的滑模运动与控制对象的参数变化和系统的干扰无关, 因此滑模变结构控制系统的鲁棒性要比一般常规的连续系统强。然而滑模变结构控制在本质上的不连续开关性将会引起系统的“抖振”。抖振产生的主要原因有时间滞后开关、空间滞后开关、系统惯性的影响、离散系统本身造成的抖振等^[8], 为了消除或减弱抖振给系统带来的影响, 国内外学者提出了不少解决方案^[9]。

由于一阶惯性环节具有典型的低通特性, 可以作为滤波器来使用, 同时, 由于实验条件的限制, 控制电压不可能过大, 因而在此系统中增加了一饱和环节, 本文所提出的控制系统结构框图如图2所示。

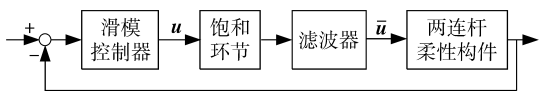


图2 带有饱和环节及滤波器的滑模变结构控制框图

Fig.2 Block diagram of the slide mode control combined with a saturation segment and a filter

式(1)可简写为

$$M(\bar{q})\ddot{\bar{q}} + C(\bar{q}, \dot{\bar{q}})\dot{\bar{q}} + G(\bar{q}) = \bar{u} \quad (2)$$

其中 $\bar{q} = [\eta \quad q^T]^T$ $M(\bar{q}) = M(q)$

$$C(\bar{q}, \dot{\bar{q}}) = C(\eta, q) \quad G(\bar{q}) = K(\eta, q) \quad \bar{u} = u$$

一阶惯性环节其传递函数为

$$Q(s) = \frac{\lambda_i}{s_i + \lambda_i} \quad (3)$$

其中 $\lambda_i > 0$ 。在理论推导中, 假设饱和环节是理想的, 无相位滞后, 只是施控电压幅值作了限制, 因而作系统稳定性分析时, 可暂不考虑饱和环节, 由图2可得

$$\dot{\bar{u}} + \Lambda \bar{u} = \Lambda u \quad (4)$$

其中 $\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_1+n_2})$ ($\lambda_i > 0$)

将式(4)代入式(2), 可得

$$M\ddot{\bar{q}} + \dot{M}\dot{\bar{q}} + C\dot{\bar{q}} + \dot{C}\bar{q} + \dot{G} + \Lambda M\ddot{\bar{q}} + \Lambda C\dot{\bar{q}} + \Lambda G = \Lambda u \quad (5)$$

设误差函数为

$$e = q_r - \bar{q} \quad (6)$$

控制目标是使得柔性杆与柔性梁的各阶模态加速度、速度、位移为零, 故在此设 $q_r = 0$ 。

设计滑模面函数为

$$s = \dot{e} + \Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e \quad (7)$$

其中 $\Lambda_i = \text{diag}(\lambda_{i1}, \lambda_{i2}, \dots, \lambda_{i(n_1+n_2)})$ ($\lambda_{ij} > 0; i = 1, 2; j = 1, 2, \dots, n_1 + n_2$)

定义 Lyapunov 函数为

$$v = \frac{1}{2} s^T M s \quad (8)$$

$$\dot{v} = \frac{1}{2} (\dot{s}^T M s + s^T \dot{M} s + s^T M \dot{s}) \quad (9)$$

由于 $M(q)$ 为正定对称阵, 有

$$\dot{s}^T M s = s^T \dot{M} s \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{v} &= s^T \dot{M} s + s^T C s = s^T (M\dot{s} + Cs) = \\ &= s^T [M(\ddot{\bar{q}} + \Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e) + C(\dot{e} + \Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e)] \end{aligned} \quad (11)$$

由式(4)可得

$$\begin{aligned} M\ddot{\bar{q}} &= \Lambda u - \dot{M}\dot{\bar{q}} - \Lambda M\ddot{\bar{q}} - C\dot{\bar{q}} - \dot{C}\bar{q} - \\ &= \Lambda u - (\dot{M} + \Lambda M)\ddot{\bar{q}} - \\ &= (\dot{C} + \Lambda C)\dot{\bar{q}} - (C + \Lambda C)\dot{\bar{q}} - (\dot{G} + \Lambda G) - C\ddot{\bar{q}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \dot{v} &= s^T [\Lambda u - (\dot{M} + \Lambda M)\ddot{\bar{q}} - (\dot{C} + \Lambda C)\dot{\bar{q}} - \\ &= (\dot{G} + \Lambda G) - C\ddot{\bar{q}} + M(\Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e) + C(\dot{e} + \\ &= \Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e)] = s^T [\Lambda u + M(\Lambda_1 \dot{e} + \\ &= \Lambda_2 e) + C(\Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e) - (\dot{M} + \Lambda M)\ddot{\bar{q}} - \\ &= (\dot{C} + \Lambda C)\dot{\bar{q}} - (\dot{G} + \Lambda G)] = s^T (\Lambda u + H) \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $H = M(\Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e) + C(\Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e) - (\dot{M} + \Lambda M)\ddot{\bar{q}} - (\dot{C} + \Lambda C)\dot{\bar{q}} - (\dot{G} + \Lambda G)$

H 可写为

$$H = \Gamma(t, q, \dot{q}, \ddot{q})\chi \quad (14)$$

式中 χ ——未知向量

存在已知向量 χ_0 , 使得

$$|\dot{\chi}_i| = |\chi_i - \chi_{0i}| \leq \xi_i \quad (15)$$

其中 $\xi_i > 0$ 且 $i = 1, 2, \dots, n_1 + n_2$ 。

$$\dot{v} = s^T (\Lambda u + \Gamma\chi) \quad (16)$$

设计滑模控制律为

$$u = -\Lambda^{-1} [\Gamma\chi_0 + (\bar{\Gamma}\xi) \text{sgn}(s) + \Theta \text{sgn}(s)] \quad (17)$$

其中 $\Gamma \chi_0 = H_0$, H_0 为精确对象的 H , $\bar{\Gamma}_{ij} = |\Gamma_{ij}|$, $\bar{\Gamma}_{ij} = |\Gamma_{ij}|$, $\Theta = \text{diag}(\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_{n_1+n_2})$, $\Theta_i > 0$, $i = 1, 2, \dots, n_1 + n_2$, $\text{sgn}(s) = [\text{sgn}(s_1) \quad \text{sgn}(s_2) \quad \dots \quad \text{sgn}(s_{n_1+n_2})]$ 。

$$\begin{aligned} \dot{v} &= s^T [\Gamma(\chi - \chi_0) - (\bar{\Gamma}\xi) \text{sgn}(s) - \Psi \text{sgn}(s)] = \\ &= s^T [\Gamma\tilde{\Phi} - (\bar{\Gamma}\xi) \text{sgn}(s) - \Theta \text{sgn}(s)] = \\ &= \sum_{i=1}^n \{s_i (\Gamma\tilde{\chi})_i - |s_i| (\bar{\Gamma}\xi)_i\} - s^T \Theta \text{sgn}(s) \leq \\ &= -s^T \Theta \text{sgn}(s) = -\sum_{i=1}^n \Theta_i |s_i| \leq 0 \quad (18) \end{aligned}$$

设 $\gamma = \bar{\Gamma}\xi + \Theta$, 则控制律可写为

$$u = -\Lambda^{-1} [\Gamma\chi_0 + \gamma \text{sgn}(s)] \quad (19)$$

3 实验

为了验证上述理论的正确性,进行了两连杆弯扭耦合柔性构件系统实验研究,实验框图如3所示。两连杆柔性杆实验系统主要由柔性杆系统(由柔性杆、一只压电扭转致动器、一对电阻应变片传感器组成)、柔性梁系统(由柔性梁、一只压电弯曲致动器、一对电阻应变片传感器组成)、动态应变仪、多功能数据采集卡、工控机、功率放大器以及激励电动机及其功率放大器等组成。在弯扭耦合振动主动控制实验中,使信号发生器产生一谐波信号,通过直流功率放大器放大后,驱动直流电动机,由于直流电动机与柔性杆相连,因而两连杆柔性系统受到了一激励力,并产生相应的振动,由于柔性杆与柔性梁是固连的,从而激励起柔性梁的弯曲振动,由柔性杆上的电阻应变片传感器获得柔性杆上的扭振信号,由柔性梁上的电阻应变片传感器获得柔性梁上的弯曲振动信号,两类信号经动态应变仪滤波放大后,由多功能数据采集卡同时采集,进行A/D转换后输入工控机(PC机),然后加入控制算法,经过控制算法处理的信号经D/A转换为电压信号输出,低通滤波后,经功率放大器系统放大,分别驱动压电扭转致动器、压电弯曲致动器产生相应的扭矩和弯矩,来抵消柔性杆的扭转振动和柔性梁的弯曲振动,从而达到弯扭耦合振动主动控制的目的,激光位移传感器用来测量在不同情况下柔性梁末端所产生的振动位移。

两连杆柔性构件系统的参数如下:柔性杆参数为:密度 $\rho_g = 7750 \text{ kg/m}^3$, 剪切模量 $G_g = 76.9 \text{ GPa}$, 长度 $l_g = 520 \text{ mm}$, 外径 $R_g = 9.5 \text{ mm}$, 内径 $r_g = 8.5 \text{ mm}$ 。柔性梁参数为:密度 $\rho_b = 7750 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E_b = 200 \text{ GPa}$, 长度 $l_b = 520 \text{ mm}$, 宽度 $t_b = 15 \text{ mm}$, 厚度 $h_b = 1 \text{ mm}$ 。压电扭转致动器(PZT-5A)参数:短路弹性柔顺系数 $s_{44}^E = 45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$,

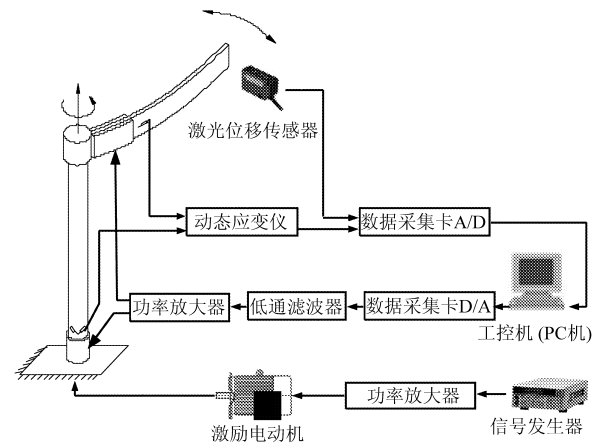


图3 两连杆弯扭耦合振动主动控制实验系统框图

Fig.3 Experimental system experimental block diagram of the two-link coupled bending-torsional vibration system

压电应变常数 $d_{15} = 700 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, 长度 $l_{pta} = 10 \text{ mm}$, 外径 $R_{pta} = 12.5 \text{ mm}$, 内径 $r_{pta} = 9.5 \text{ mm}$ 。压电弯曲致动器(PZT-5A)参数为:弹性模量 $E_{pba} = 57.77 \text{ GPa}$, 压电应变常数 $d_{31} = -210 \times 10^{-12} \text{ C/N}$, 宽度 $t_{pba} = 15 \text{ mm}$, 厚度 $h_{pba} = 1 \text{ mm}$ 。固连柔性梁与柔性杆的连接块对 z 轴的转动惯量 J_{end} 为 $0.032 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

柔性梁为悬臂梁,边界条件为固定-自由,其前三阶弯曲振动固有频率为:3.03、19.01、53.26 Hz。柔性杆末端连有连接块以及柔性梁,边界条件可等效为固定-末端等效质量,其前二阶扭转振动固有频率分别为9.15、2.947 Hz。考虑到高频模态分量对柔性梁末端输出位移贡献较小,同时又不致使实验系统过于复杂,故通过一只压电扭转致动器控制柔性杆的第一阶模态振动,通过一只压电弯曲致动器控制柔性梁的第一阶模态振动。将压电弯曲致动器粘贴在柔性梁的根部,压电扭转致动器粘贴在柔性杆的根部。控制系统参数中,取 $\Lambda = \text{diag}(400, 400)$ 、 $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \text{diag}(250, 5)$ 、 $\gamma = \text{diag}[0.1, 1]$ 、 $H = M(\Lambda_1 \ddot{e} + \Lambda_2 \dot{e}) + C(\Lambda_1 \dot{e} + \Lambda_2 e) - (\dot{M} + \Lambda M) \ddot{q} - (\dot{C} + \Lambda C) \dot{q} - (\dot{G} + \Lambda G)$ 。

实验时,采用与柔性杆第一阶扭转振动固有频率同频的谐波信号对两连杆柔性构件系统进行激励,由于柔性梁的加入,使得柔性杆的第一阶扭转振动的固有频率有所下降,实验所获得的固有频率为8.35 Hz。使信号发生器产生正弦信号 $f_d = 4.5 \sin(2\pi 8.35t)$, 经过功率放大器放大后,驱动直流电动机,对柔性杆实施持续12 s的激励。对柔性杆根部及柔性梁根部的电阻应变片传感器同时进行采样,经动态应变仪放大5000倍后,柔性杆根部传感器的输出电压如图4所示,柔性梁根部传感器的

输出电压如图5所示,柔性梁末端的位移如图6所示,采用带有饱和环节和低通滤波器的滑模变结构控制后,柔性杆根部传感器的输出电压如图7所示,柔性梁根部传感器的输出电压如图8所示,柔性梁末端的位移如图9所示。

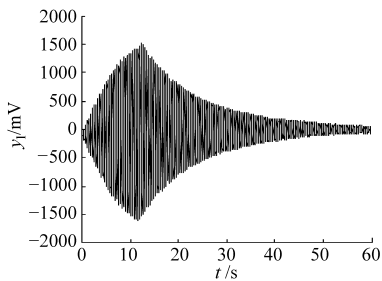


图4 控制前柔性杆根部传感器输出电压
Fig. 4 Output voltage of the sensor on the root of the flexible bar before control

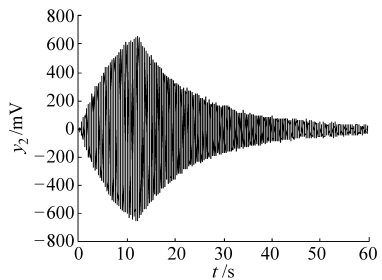


图5 控制前柔性梁根部传感器输出电压
Fig. 5 Output voltage of the sensor on the root of the flexible beam before control

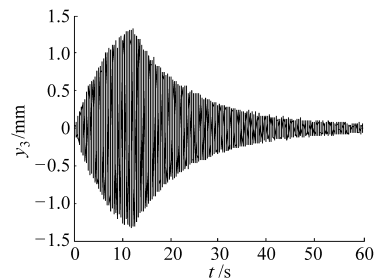


图6 控制前柔性梁末端位移
Fig. 6 Tip displacement of the beam before control

从上述实验结果可知,由于杆、梁的相互耦合作用,当实施与杆第一阶扭转振动固有频率同频的信号激励后,杆产生了扭转振动,梁也作了相应的弯曲振动。在未控制前,柔性梁末端位移经过48 s才衰减至最大位移的3%,而经过控制后,柔性梁末端位移经过18 s就衰减至最大位移的3%,这表明,本文所提出的带有饱和环节及滤波器的滑模变结构控制

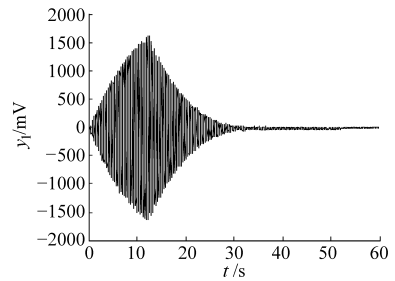


图7 控制后柔性杆根部传感器输出电压
Fig. 7 Output voltage of the sensor on the root of the flexible bar after control

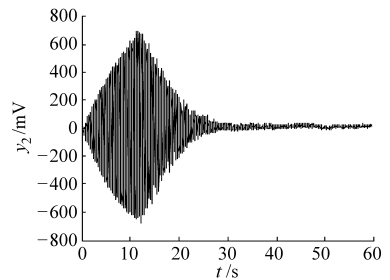


图8 控制后柔性梁根部传感器输出电压
Fig. 8 Output voltage of the sensor on the root of the flexible beam after control

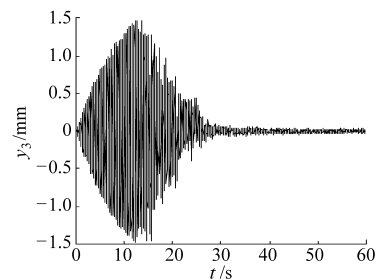


图9 控制后柔性梁末端位移
Fig. 9 Tip displacement of the beam after control

策略是有效的。

4 结束语

提出了一种由柔性杆和柔性梁组成的两连杆柔性构件系统,为了抑制此系统的弯扭耦合振动,提出一种带有饱和环节和低通滤波器的滑模变结构控制策略,并进行了实验研究,实验结果表明这种控制方法是有效的,受控后的系统是稳定的,弯扭的各阶模态振动均能得到有效抑制,柔性梁末端的位移振动也能得到显著衰减。本文所提出的两连杆柔性构件系统及其控制方法为诸如多连杆柔性机械臂、复合柔性结构的振动主动控制提供了有益的尝试。

参 考 文 献

- 1 Sung C C, Vasundara V V, Bao X Q, et al. Active torsional vibration control experiments using shear-type piezoceramic sensors and actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1994, 5(3): 436 ~ 442.
- 2 Glazounov A E, Wang S, Zhang Q M. Piezoelectric stepper motor with direct coupling mechanism to achieve high efficiency and precise control of motion[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2000, 47(4):

1 059 ~ 1 067.

- 3 Dong Sun, James K Mills, Jinjun Shan, et al. A PZT actuator control of a single-link flexible manipulator based on linear velocity feedback and actuator placement[J]. *Mechatronics*, 2004, 14(4) : 381 ~ 401.
- 4 陈定中,魏燕定,程耀东. 车厢壁面的振动控制[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(6):1 ~ 4.
Chen Dingzhong, Wei Yanding, Cheng Yaodong. Study on vibration control for the wall in a cab[J]. *Transactions for the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(6):1 ~ 4. (in Chinese)
- 5 唐友刚,潘永皓. 薄壁结构弯扭耦合振动分析[J]. *振动工程学报*,1993, 6(4):399 ~ 405.
Tang Yougang, Pan Yonghao. Analysis for bending-torsion-coupled vibration of a thin-walled structure [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 1993, 6(4):399 ~ 405. (in Chinese)
- 6 李俊,沈荣瀛,华宏星. 考虑翘曲影响的 Bernoulli-Euler 薄壁梁的弯扭耦合振动[J]. *机械强度*, 2003, 25(5): 486 ~ 489.
Li Jun, Shen Rongying, Hua Hongxing. Coupling bending-torsional vibration Bernoulli-Euler thin-walled beam including wrapping effect[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2003, 25(5) : 486 ~ 489. (in Chinese)
- 7 吕永桂. 基于压电致动器的柔性构件振动主动控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
Lü Yonggui. Study on active vibration control techniques for flexible structure using piezoelectric actuators [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- 8 Su W C, Drakunov S V, Ozguner U, et al. Sliding mode control with chattering reduction in sampled data systems [C] // *Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control*, 1993: 2 452 ~ 2 457.
- 9 Kachroo P, Tomizuka M. Chattering reduction and error convergence in the sliding-mode control of a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(7) : 1 063 ~ 1 068.

(上接第 158 页)

- 8 Tanaka Y, Gofuku A, Fujino Y. Development of a tactile sensing flexible actuator [C] // *Advanced Motion Control*, 1996. AMC' 96-MIE. , 1996, 2: 723 ~ 728.
- 9 Noritsugu Toshiro, Mitsuhiro Kubota, Sadaharu Yoshimatsu. Development of pneumatic rotary soft actuator made of silicone rubber[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2001, 13(1) : 17 ~ 22.
- 10 Schulz S, Pylatiuk C, Bretthauer G. A new ultralight anthropomorphic hand [C] // *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, 2001.
- 11 章军,须文波,范本隽. 板弹簧柔性手指关节弯曲的模型研究[J]. *机械设计与研究*,2005,21(2) :53 ~ 55.
Zhang Jun, Xu Wenbo, Fan Benjuan. Study on the bending model of pneumatic flexible finger joints of spring beam[J]. *Machine Design and Research*, 2005,21(2) :53 ~ 55. (in Chinese)
- 12 张立彬,杨庆华,鲍官军,等. 一种气动柔性驱动器: 中国, 200510049589.5 [P]. 2005-09-21.
- 13 Yang Qinghua, Zhang Libin, Bao Guanjun, et al. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA [C] // *2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2004,1: 385 ~ 389.
- 14 杨庆华,张立彬,阮健. 气动弯曲关节的特性研究[J]. *工程设计学报*, 2002, 9(3) : 159 ~ 161.
Yang Qinghua, Zhang Libin, Ruan Jian. Investigation to the characteristics of a pneumatic bending joint[J]. *Journal of Engineering Design*, 2002, 9(3) : 159 ~ 161. (in Chinese)
- 15 杨庆华,张立彬,鲍官军,等. 气动柔性弯曲关节的特性及其神经 PID 控制算法研究[J]. *农业工程学报*,2004, 20(4) : 88 ~ 91.
Yang Qinghua, Zhang Libin, Bao Guanjun, et al. Investigation of the characteristics of pneumatic flexible-bending joint and its neural PID controlling algorithm[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4) : 88 ~ 91. (in Chinese)
- 16 李秦川,胡挺,武传宇,等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. *农业机械学报*,2008,39(3):175 ~ 179.
Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008,39(3):175 ~ 179. (in Chinese)
- 17 刘继展,李萍萍,李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计[J]. *农业机械学报*,2008,39(3):109 ~ 112.
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008,39(3):109 ~ 112. (in Chinese)