

移动双柔性梁系统的振动主动控制*

邱志成, 陈思文

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州, 510641)

摘要 以弹簧连接移动双柔性梁系统为实验对象,研究多柔体系统的振动特性和振动主动控制问题。针对移动双柔性梁系统存在建模的复杂性和耦合非线性等问题,基于系统的动态线性化数据模型,研究无模型自适应控制算法在多柔体振动主动控制领域的应用。设计并搭建移动双柔性梁实验平台,进行基于压电驱动器和伺服电机混合控制的双柔性梁振动抑制实验研究。实验结果表明,无模型自适应控制器可实现对振动的快速抑制。

关键词 双柔性梁系统;振动主动控制;无模型自适应控制;混合控制

中图分类号 TH113.1

引言

为了满足高速运行与高操作精度的要求,机械臂呈现出轻量化和柔性化的发展趋势,柔性机械臂成为当前研究热点^[1]。柔性机械臂是指连杆或关节具有一定柔性的机械臂^[2],相比于刚性机械臂,其能耗低、操作速度快且灵活性强,但也因自身低刚度和低阻尼的特性而不可避免地存在残余振动问题,影响末端执行器的定位精度。因此,柔性机械臂的振动主动控制显得尤为重要^[3]。

被控系统模型在振动主动控制器设计中占据重要地位。柔性结构常用的建模方法包括假设模态法和有限元法^[4]。Rosenzweig等^[5]基于假设模态法和哈密顿原理,建立末端弹性连接耦合多柔性梁系统的高阶近似模型,通过模态截断对其降阶,为模型预测控制器的设计提供基础。Wang等^[6]针对平面多柔性连杆机构,基于有限元法和拉格朗日方程建立其动力学模型,并设计自适应控制器实现对多连杆刚体运动和弹性振动的共同控制。

上述基于模型的控制方法均依赖于被控系统的数学模型,其控制效果与模型精度密切相关,同时受系统中不确定性的影响。对于多柔性臂构成的多柔体系统,控制器设计和模型建立的复杂性体现在欠驱动特性、不确定性、非线性和多输入多输出等方面^[7]。在建模方法上,假设模态法忽略系统的高阶模态会造成计算模型存在一定误差,且多柔体系统

的模态振型函数难以获取;有限元法则可能导致系统刚度矩阵的估计值过大,从而影响基于模型的控制算法的闭环稳定性^[8]。因此,考虑采用无模型控制算法实现对多柔体系统的振动主动控制。

常用的无模型控制算法在振动主动控制上得到广泛关注。Long等^[9]针对由伸缩关节和转动关节组成的混合结构柔性机械臂,利用基于标称模型的滑模控制器实现轨迹跟踪控制,利用基于 actor-critic 的强化学习控制器输出补偿力矩来抑制柔性臂的振动。He等^[10]针对外部扰动下的典型柔性结构振动问题,提出一种统一的迭代学习控制框架。无模型自适应控制作为数据驱动控制方法之一,以被控系统的等效动态线性化数据模型为基础实现控制器设计,不需要被控系统模型信息的参与^[11],目前在电力系统^[12]及发动机保护控制^[13]等方面已有诸多研究成果。卫晓娟等^[14]针对含间隙非光滑系统存在强非线性振动问题,提出了基于无模型自适应控制的混沌控制方法。王跃钢等^[15]设计了用于离心-振动实验系统中的振动控制系统的滑模/无模型自适应控制方法。因此,对于多柔体系统的振动主动控制问题,无模型自适应控制算法是可供探索的研究方向。

笔者针对多柔体系统的振动主动控制问题,设计弹簧连接移动双柔性梁实验平台,对其振动特性进行分析。针对双柔性梁系统存在动力学模型复杂和基于模型的控制算法难以实现等问题,研究无模型自适应控制算法的应用。搭建实验平台并编写软

* 国家自然科学基金资助项目(52175093, 51775190);广东省自然科学基金资助项目(2019A1515011901);广州市科技计划项目资助(202002030113);中央高校基本科研业务费资助项目(2018PY14)

收稿日期:2021-03-23;修回日期:2021-06-03

件测控程序,基于无模型自适应控制器进行压电驱动器和伺服电机复合驱动的振动主动控制实验研究,并与比例微分(proportional derivative,简称PD)控制实验结果进行比较,验证其有效性。

1 实验系统描述

弹簧连接移动双柔性梁系统简化模型如图1所示。双柔性梁根部与移动平台固定,末端通过弹簧连接,可在伺服电机的驱动下沿水平方向移动。

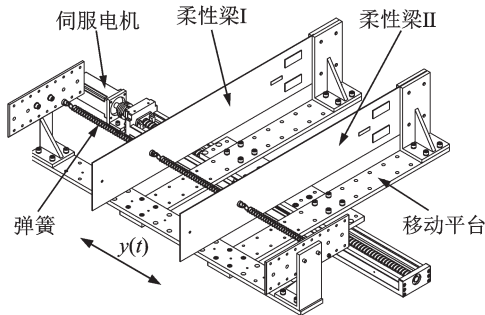


图1 弹簧连接移动双柔性梁系统简化模型

Fig.1 Simplified model of the spring connected translational double flexible beam system

令 $y(t)$ 为移动平台沿 $O-y$ 方向移动的距离,则柔性梁上任一点的总位移为

$$p_n(x, t) = y(t) + w_n(x, t) \quad (n = 1, 2) \quad (1)$$

其中: $n = 1, 2$ 分别为柔性梁 I 和柔性梁 II;

$w_n(x, t) = \sum_{j=1}^m \phi_{nj}(x) q_{nj}(t) = \Phi_n(x) q_n(t)$, 为柔性梁的横向弹性变形; ϕ_{nj} 和 q_{nj} 分别为柔性梁的第 j 个模态振型函数和相应的广义模态坐标; $\Phi_n(x)$ 和 $q_n(t)$ 分别为模态振型函数矢量和广义模态坐标矢量; m 为模态阶数。

系统的总动能^[16]为

$$T = \frac{1}{2} (I_r + I_c + I_{bs}) \dot{\theta}_r(t)^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^2 M_l \dot{p}_n(l, t)^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^2 \int_0^{L_b} \rho_b A_b \dot{p}_n(x, t)^2 dx + \frac{1}{2} M_s \dot{y}(t)^2 + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^{n_p} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} \rho_p A_p \dot{p}_n(x, t)^2 dx \quad (2)$$

其中: I_r, I_c 和 I_{bs} 分别为伺服电机转子、联轴器和丝杠的转动惯量; $\theta_r(t)$ 为伺服电机转子的角位移; M_s 为移动平台的质量; L_b 为柔性梁的总长度; ρ_b, A_b 和 ρ_p, A_p 分别为柔性梁和压电陶瓷片的质量密度和横截面积; n_p 为压电陶瓷片的数目; x_{i1} 和 x_{i2} 分别为柔性梁上第 i 片压电陶瓷片在 x 轴方向上的左右坐标; M_l 为柔性梁上用于连接弹簧的吊环螺钉的质量; l

为吊环螺钉与柔性梁根部的距离。

忽略剪切变形的影响,系统的总势能^[17]为

$$V = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^2 \int_0^{L_b} E_b I_b w_n''(x, t)^2 dx + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^{n_p} \int_{x_{i1}}^{x_{i2}} E_p I_p w_n''(x, t)^2 dx + \frac{k}{2} w_1(l, t)^2 + \frac{k}{2} [w_1(l, t) - w_2(l, t)]^2 + \frac{k}{2} w_2(l, t)^2 \quad (3)$$

其中: E_b, I_b 和 E_p, I_p 分别为柔性梁和压电陶瓷片的弹性模量和惯性矩; k 为弹簧刚度。

伺服电机和压电驱动器所做的功为

$$W = \sum_{n=1}^2 \sum_{i=1}^{n_p} c V_i^n(t) (\Phi_n'(x_{i2}) - \Phi_n'(x_{i1})) q_n + (\tau(t) - \tau_f(t)) \theta_r(t) \quad (4)$$

其中: $\tau(t)$ 和 $\tau_f(t)$ 分别为伺服电机端的控制输入力矩和等效摩擦力矩; c 为压电材料相关的常数; $V_i^n(t)$ 为柔性梁上第 i 片压电驱动器的控制电压。

弹簧连接移动双柔性梁系统的动力学方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = U \quad (5)$$

其中: x, M, C, K 和 U 分别为系统状态矢量、系统质量矩阵、系统阻尼矩阵、系统刚度矩阵和系统控制输入矢量。

基于 ANSYS 软件对双柔性梁系统进行模态分析,得到前 2 阶模态振型如图 2 所示。对于 1 阶模态,双柔性梁振动信号的幅值和相位相同,可在伺服电机的作用下快速抑制; 2 阶模态则相反,其对于伺服电机为不可控模态。此外,由于弹簧的存在,双柔性梁系统的前 2 阶模态表现出强耦合特性,增加了振动主动控制的复杂性。

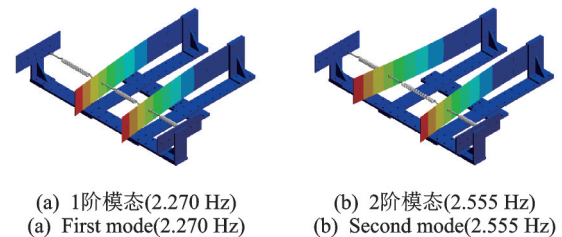


图2 双柔性梁系统前2阶模态振型

Fig.2 First two modes of the double flexible beam system

2 振动主动控制器设计

笔者采用无模型自适应控制算法(model free adaptive control,简称MFAC)设计控制器,基于动态线性化数据模型和控制输入准则获取双柔性梁系统的振动控制输入。

2.1 紧格式动态线性化方法

针对单一柔性梁的振动信号进行MFAC控制器设计,被控对象可描述为

$$y(k+1)=f(y(k), \dots, y(k-n_y), u(k), \dots, u(k-n_u)) \quad (6)$$

其中: $y(k) \in \mathbf{R}$ 和 $u(k) \in \mathbf{R}$ 分别为系统在 k 时刻的输出和输入; n_y 和 n_u 分别为系统输出和输入的阶数。

若被控对象满足如下假设^[18]:①除有限点外,非线性函数 $f(\cdot)$ 关于控制输入 $u(k)$ 的偏导数存在且连续;②除有限点外, $f(\cdot)$ 满足广义Lipschitz条件,即对任意 $k \geq 0$ 和 $|\Delta u(k)| \neq 0$,有 $|\Delta y(k+1)| \leq b|\Delta u(k)|$,其中, b 为大于0的常数,则可将其描述为紧格式动态线性化(compact form dynamic linearization, 简称CFDL)数据模型^[19]

$$\Delta y(k+1)=\phi(k)\Delta u(k) \quad (7)$$

其中: $\phi(k) \in \mathbf{R}$ 为对任意时刻 k 有界的时变参数,称作伪偏导数(pseudo partial derivative, 简称PPD)。

2.2 CFDL-MFAC控制算法

基于CFDL数据模型,对于离散时间柔性梁系统,考虑如下控制输入准则函数

$$J(u(k))=|y^*(k+1)-y(k+1)|^2+\lambda|u(k)|^2 \quad (8)$$

其中: $y^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的期望输出信号; $\lambda > 0$ 为权重因子,用于限制控制输入量,保证控制系统的稳定。

将式(7)代入式(8),求解 $\partial J(u(k))/\partial u(k)=0$,可得控制输入为

$$u(k)=\frac{|\phi(k)|^2}{\lambda+|\phi(k)|^2}u(k-1)+\frac{\rho\phi(k)}{\lambda+|\phi(k)|^2}(y^*(k+1)-y(k)) \quad (9)$$

其中: $\rho \in (0, 1]$ 为步长因子,用于调整收敛速度和收敛能力,增强算法的灵活性和一般性。

控制输入的实现需要已知PPD的值,而双柔性梁系统中存在非线性和外部扰动等因素影响,其精确值难以获知,故采用如式(10)所示的PPD估计准则函数在线估计 $\hat{\phi}(k)$ 以代替PPD真实值^[20]

$$J(\phi(k))=|y(k)-y(k-1)-\phi(k)\Delta u(k-1)|^2+\mu|\phi(k)-\hat{\phi}(k-1)|^2 \quad (10)$$

其中: $\mu > 0$ 为用于限制 $\hat{\phi}(k)$ 变化的权重因子。

式(10)对 $\phi(k)$ 求偏导,并令 $\partial J(\phi(k))/\partial \phi(k)=0$,可得PPD的估计算法为

$$\hat{\phi}(k)=\hat{\phi}(k-1)+\frac{\eta\Delta u(k-1)}{\mu+\Delta u(k-1)^2} \times (\Delta y(k)-\hat{\phi}(k-1)\Delta u(k-1)) \quad (11)$$

其中: $\eta \in (0, 1]$ 为步长因子。

此外,环境因素(如温度、负载等)的变化将导致系统参数的变化。为了增强PPD估计算法对时变参数的跟踪能力,并确保 $\hat{\phi}(k)$ 在合理的范围内,引入算法重置机制^[21]

$$\begin{aligned} & \text{if } |\hat{\phi}(k)| \leq \varepsilon \text{ or } |\Delta u(k-1)| \leq \varepsilon \\ & \text{or } \text{sign}(\hat{\phi}(k)) \neq \text{sign}(\hat{\phi}(1)) \\ & \text{then } \hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(1) \end{aligned} \quad (12)$$

其中: ε 为一个较小的正数; $\hat{\phi}(1)$ 为 $\hat{\phi}(k)$ 的初始值。

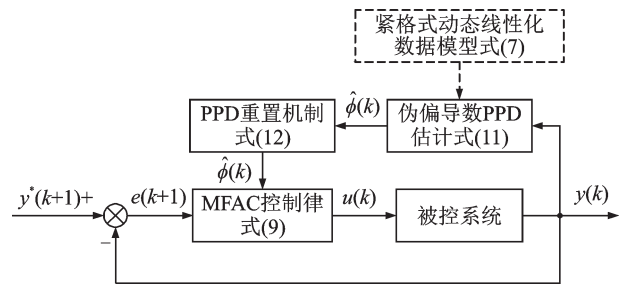


图3 CFDL-MFAC算法控制示意图

Fig.3 Schematic diagram of CFDL-MFAC algorithm

图3为CFDL-MFAC算法控制示意图。基于被控系统的实时数据和式(11),获取PPD的估计值 $\hat{\phi}(k)$,并依据式(12)判断 $\hat{\phi}(k)$ 值是否需要重置,将判断后的 $\hat{\phi}(k)$ 代替式(9)中的PPD真实值 $\phi(k)$,即可得到控制输入。

3 振动主动控制实验

3.1 实验装置

为了验证所采用控制算法的有效性,搭建如图4所示的实验平台。三菱交流伺服电机通过联轴器与THK滚珠丝杠连接,可驱动双柔性梁系统沿水平方向移动。伺服电机的功率和最大转速分别为400 W和3 kr/min,且内置编码器用于测量旋转角度和角速度,编码器分辨率设定为40 000 pulse/r(编码器输出的脉冲数/转)。滚珠丝杠型号为KR55,其导程和轨道长度分别为20 mm和980 mm,且带有2个长型螺母滑块,可与移动平台固定。

双柔性梁的材料为环氧树脂,其几何尺寸均为800 mm×150 mm×2 mm。离散分布的压电陶瓷

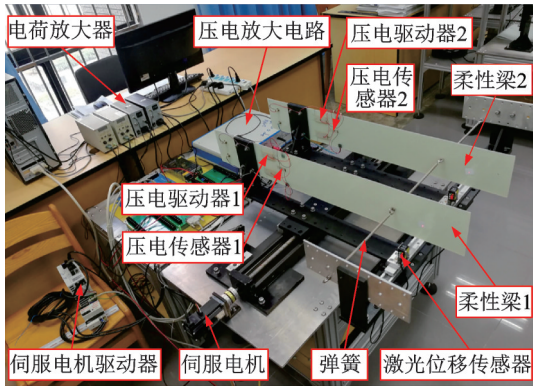


图 4 实验平台照片

Fig.4 Photograph of the experimental setup

片分别作为压电驱动器和压电传感器粘贴在柔性梁的根部,其几何尺寸分别为 $60\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 和 $40\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 。柔性梁和压电陶瓷片的材料参数如表 1 所示。

表 1 柔性梁和压电陶瓷片的材料参数

Tab.1 Material parameters of beam and PZT

参数	柔性梁	压电陶瓷片
密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 980	7 500
泊松比	0.33	0.36
弹性模量/GPa	27.2	56
压电应变常数/ $(\text{m} \cdot \text{V}^{-1})$	—	-275×10^{-12}

压电传感器检测柔性梁的振动信号经由电荷放大器(型号为 YE5850)放大为幅值在 $-10 \sim 10\text{ V}$ 之间的电压信号。具有 8 通道 A/D 转换模块和 4 通道 D/A 输出模块的固高运动控制卡(型号为 GTS-400-PV-PCI)作为数据采集卡和控制电压输出模块,用于双柔性梁振动信号的采集和控制信号的输出。压电放大电路(芯片型号为 PA240CX)将控制信号由 $-5 \sim 5\text{ V}$ 放大到 $-260 \sim 260\text{ V}$,并输出到压电驱动器。

3.2 实验结果及分析

保持伺服电机位置固定,激励单柔性梁使其产生弯曲振动,设定采样周期为 5 ms ,压电传感器测得双柔性梁前 30 s 的振动信号时域曲线如图 5 所示。经快速傅里叶变换得到振动信号频域曲线如图 6 所示。

由图 5 可知,由于弹簧连接作用,在只激励单柔性梁的情况下,双柔性梁的振动响应存在拍振现象,振动幅值存在周期性强弱变化,表现出强耦合特性。图 6 显示该双柔性梁系统存在密频特性,其前 2 阶模态频率分别为 $f_1 = 2.197\text{ Hz}$, $f_2 = 2.417\text{ Hz}$,分别对应 1 阶模态和 2 阶模态。由于高阶模态所占比重较少,本实验重点关注对系统前 2 阶模态的快速抑制。

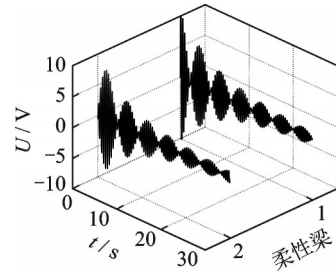


图 5 振动信号时域曲线

Fig.5 Vibration signal in time domain

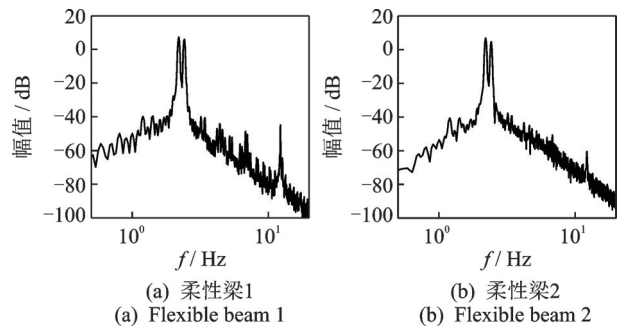


图 6 振动信号频域曲线

Fig.6 Vibration signal in frequency domain

激励单柔性梁时,采用双梁压电驱动器进行振动主动控制实验,其中,双梁的控制参数相同,且在自由振动响应 1 s 后加入主动控制。PD 控制参数取 $k_p = 0.6, k_d = 0.04$ 。PD 控制实验曲线如图 7 所示。

对于 CFDL-MFAC 振动控制,由于权重因子 λ 可影响控制电压输出量和超调量^[22],故取不同的 λ 值分别进行对比实验。为尽量使控制效果最佳,其他控制参数分别取 $\hat{\phi}(1) = 5, \mu = 3.2$,步长因子 $\rho = 1, \eta = 0.95$ 。图 8 为不同 λ 值的 CFDL-MFAC 实验曲线。

由图 7 可知,PD 控制算法在 15 s 左右抑制双柔性梁的振动。对比图 7,8 可知:当 λ 值为 5 时,CFDL-MFAC 的控制效果与 PD 类似;当 λ 减小为 2 时,输出的控制电压增大,在 10 s 左右即可抑制双柔性梁的振动。控制过程中 PPD 估计值随振动量的变化而调整,当柔性梁的振动信号停止时,其重置为初始值。

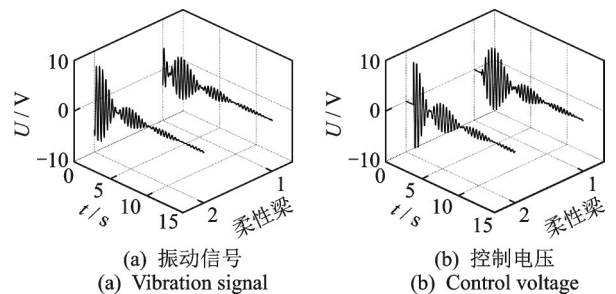


图 7 PD 控制实验曲线

Fig.7 Experimental curves of PD control

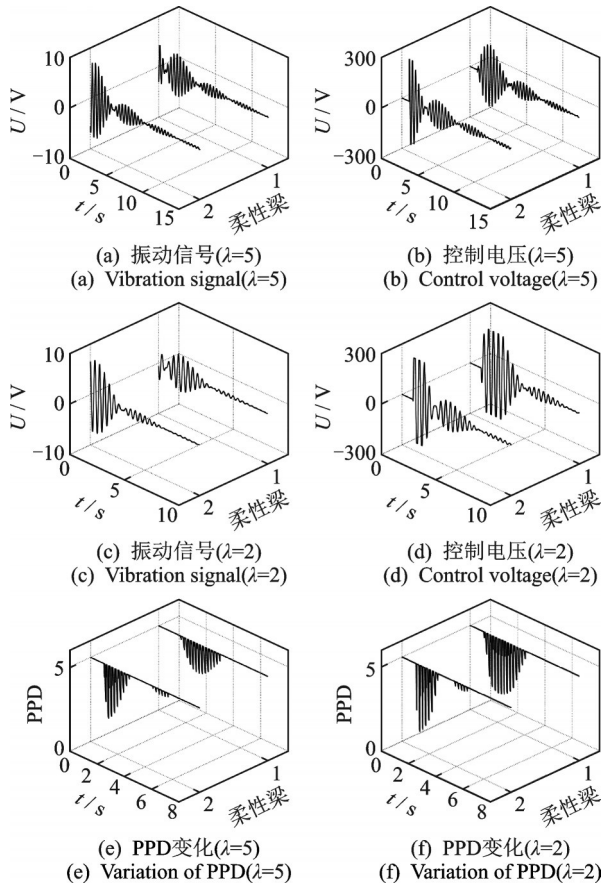


图8 不同λ值的CFDL-MFAC实验曲线
Fig.8 Experimental curves of CFDL-MFAC for different λ values

采用压电驱动器和伺服电机复合驱动进行振动主动控制实验。其中,伺服电机为速度控制方式,且位置设定点。对压电传感器测得的柔性梁振动信号由幅值组合的方式进行解耦,分解为1阶模态振动信号 $(y_1 + y_2)/2$ 和2阶模态振动信号 $(y_1 - y_2)/2$ 。伺服电机仅用于抑制系统的1阶模态振动,压电驱动器则抑制柔性梁的振动。电机和压电驱动器的PD振动控制参数分别为 $k_{p1} = 0.05, k_{d1} = 0.002$ 和 $k_{p2} = 1.5, k_{d2} = 0.1$ 。图9为PD混合控制实验曲线。

对于CFDL-MFAC算法,考虑λ值对控制效果的影响。电机端取λ值为200,为尽量使控制效果最佳,其他控制参数分别为 $\hat{\phi}(1) = 20, \mu = 3, \rho = 1, \eta = 0.95$ 。压电驱动器端的λ值取0.5,其余参数与前述相同。图10为CFDL-MFAC混合控制实验曲线。

由图9,10可知,在混合控制方案下,CFDL-MFAC的控制效果与PD类似,双柔性梁系统的1阶模态振动均在施加控制后1.5s左右被抑制,残余反相振动在6s左右被抑制,但CFDL-MFAC算法有PPD在线调节,可补偿系统参数变化和不确定性。

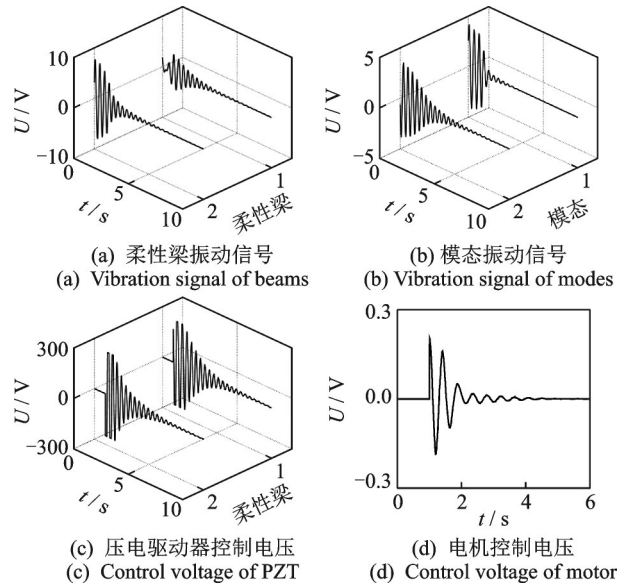


图9 PD混合控制实验曲线
Fig.9 Experimental curves of hybrid PD control

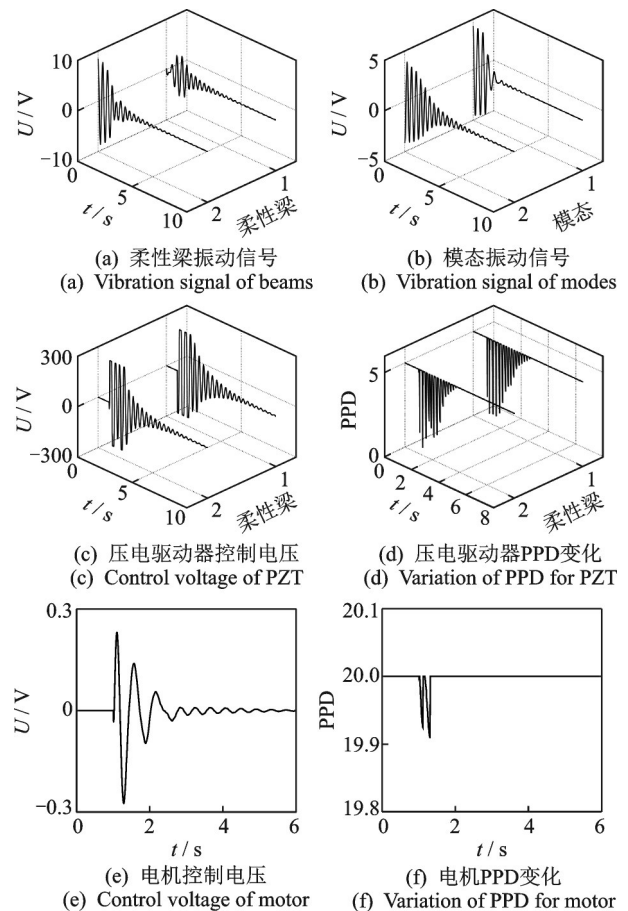


图10 CFDL-MFAC混合控制实验曲线
Fig.10 Experimental curves of hybrid CFDL-MFAC

4 结束语

以弹簧连接移动双柔性梁系统的振动主动控制为研究背景,分析了系统的刚柔耦合特性和密频特

性。在不参考模型信息的前提下,研究了CFDL-MFAC算法在双柔性梁系统振动主动控制中的应用,并搭建实验平台对其进行验证。提出了压电驱动器和伺服电机混合控制双柔性梁系统振动的实验方案,实验结果验证了控制方案和采用算法的可行性和有效性,为多柔体系统的振动主动控制提供了参考。

参 考 文 献

- [1] DWIVEDY S K, EBERHARD P. Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(7): 749-777.
- [2] SAYAHKARAJY M, MOHAMED Z, FAUDZI A A M. Review of modelling and control of flexible-link manipulators [J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2016, 230(8): 861-873.
- [3] 娄军强, 魏燕定, 杨依领, 等. 综合模态 H_2 范数下致动器/传感器的优化配置[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(1): 49-55.
LOU Junqiang, WEI Yanding, YANG Yiling, et al. Optimization of piezoelectric actuators/sensors placement using synthetic modal H_2 norm [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 31(1): 49-55. (in Chinese)
- [4] GAO H, HE W, SONG Y, et al. Modeling and neural network control of a flexible beam with unknown spatiotemporally varying disturbance using assumed mode method[J]. Neurocomputing, 2018, 314: 458-467.
- [5] ROSENZWEIG P, KATER A, MEURER T. Model predictive control of piezo-actuated structures using reduced order models [J]. Control Engineering Practice, 2018, 80: 83-93.
- [6] WANG J, PI Y, HU Y, et al. Adaptive simultaneous motion and vibration control for a multi flexible-link mechanism with uncertain general harmonic disturbance [J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 408: 60-72.
- [7] LOCHAN K, ROY B K, SUBUDHI B. A review on two-link flexible manipulators [J]. Annual Reviews in Control, 2016, 42: 346-367.
- [8] THEODORE R J, GHOSAL A. Comparison of the assumed modes and finite element models for flexible multilink manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 1995, 14(2): 91-111.
- [9] LONG T, LI E, HU Y, et al. A vibration control method for hybrid-structured flexible manipulator based on sliding mode control and reinforcement learning [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, 32(2): 841-852.
- [10] HE W, MENG T, HE X, et al. Unified iterative learning control for flexible structures with input constraints[J]. Automatica, 2018, 96: 326-336.
- [11] LIU S, HOU Z, ZHANG X, et al. Model-free adaptive control method for a class of unknown MIMO systems with measurement noise and application to quadrotor aircraft [J]. IET Control Theory & Applications, 2020, 14(15): 2084-2096.
- [12] LU C, ZHAO Y, MEN K, et al. Wide-area power system stabiliser based on model-free adaptive control [J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9(13): 1996-2007.
- [13] 管庭筠, 李秋红. 基于改进无模型自适应算法的涡扇发动机限制保护控制方法[J]. 推进技术, 2020, 41(10): 2348-2357.
GUAN Tingjun, LI QiuHong. Control method for limit protection of turbofan engine based on improved model free adaptive algorithm [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(10): 2348-2357. (in Chinese)
- [14] 卫晓娟, 李宁洲, 丁旺才. 一类非光滑系统的无模型自适应混沌控制[J]. 振动工程学报, 2018, 31(6): 996-1005.
WEI Xiaojuan, LI Ningzhou, DING Wangcai. Chaos control of a non-smooth system based on model-free adaptive control method [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(6): 996-1005. (in Chinese)
- [15] 王跃钢, 左朝阳, 郭志斌, 等. 滑模/无模型自适应控制方法及在离心-振动实验系统中的应用[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(2): 276-280.
WANG Yuegang, ZUO Zhaoyang, GUO Zhibin, et al. Application of slide mode/model-free method in centrifuge-vibration test system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(2): 276-280. (in Chinese)
- [16] QIU Z. Adaptive nonlinear vibration control of a cartesian flexible manipulator driven by a ballscrew mechanism [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 30: 248-266.
- [17] KATER A, MEURER T. Motion planning and tracking control for coupled flexible beam structures [J]. Control Engineering Practice, 2019, 84: 389-398.
- [18] HOU Z, CHI R, GAO H. An overview of dynamic-linearization-based data-driven control and applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 4076-4090.
- [19] HOU Z, ZHU Y. Controller-dynamic-linearization-based model free adaptive control for discrete-time nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 2301-2309.
- [20] 侯忠生, 金尚泰. 无模型自适应控制: 理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013: 55-56.
- [21] HOU Z, JIN S. A novel data-driven control approach for a class of discrete-time nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011, 19(6): 1549-1558.
- [22] LIAO Y, DU T, JIANG Q. Model-free adaptive control method with variable forgetting factor for unmanned surface vehicle control [J]. Applied Ocean Research, 2019, 93: 101945.



第一作者简介:邱志成,男,1973年10月生,教授、博士生导师。主要研究方向为柔性结构的振动主动控制、机器人控制。曾发表《双连杆柔性机械臂振动主动控制与实验》《振动、测试与诊断》2019年第39卷第3期等论文。

E-mail: zhchqiu@scut.edu.cn