

压电柔性机械臂系统辨识与振动主动控制*

康建云, 毕果, 苏史博

(厦门大学航空航天学院 厦门, 361005)

摘要 以 Euler-Bernoulli 悬臂梁为实验模型,研究了压电柔性机械臂系统的模型建立和振动主动控制的问题。首先,针对柔性构件在建模过程中的复杂性和非线性等特点,采用实验辨识的方法建立了由压电致动器输入到压电传感桥路的输出之间的传递函数模型;其次,对于压电柔性机械臂的弹性振动问题,基于线性二次型最优控制理论,针对加权矩阵难以解析的关键问题,将遗传算法应用于控制器的设计中,对加权矩阵进行优化设计;然后,在理论研究的基础上搭建硬件实验平台,编写了软件测控程序,并开展压电柔性机械臂振动控制的实验研究;最后,对柔性臂在自由衰减和持续激励的情况下分别进行振动主动控制实验。实验结果表明,柔性臂在 2 种激励下的振动均得到了有效抑制。

关键词 柔性机械臂; 系统辨识; 遗传算法; 振动控制

中图分类号 TH113.1; TP24; TB535

引言

由于具有效率高、能耗低、载荷比大以及构建设计紧凑等优点,以空间站吊装用机械臂、大型柔性天线、空间太阳能帆板为代表的柔性构件在在航空航天领域得到了广泛应用^[1]。但是,柔性结构体由于其固有的低刚度和低阻尼特性,在操作过程中受到不规则的外扰动力很容易产生幅度较大且不易衰减的弹性振动,影响了操作过程中的定位精度和操作效率,无法满足实际操作需要。随着智能柔性臂的发展,响应速度、定位精度以及重载等关键问题日益突出,因此必须对柔性机械臂进行必要的振动控制。

压电类材料作为一种能够将电能与机械能互相转换的材料,具有结构紧凑、响应时间快和能量转换效率高等特性,为柔性结构的振动主动控制提供了新的思路。学者们对基于压电柔性机械臂的振动主动控制进行了广泛研究^[2-3]。Pereira 等^[4]使用积分谐振控制方法对柔性机械臂进行振动抑制,在控制器中加入 2 个嵌套反馈回路,实现了精确的终点定位和有效的振动抑制。Etxebarria 等^[5]将最优控制和滑膜控制用于机器人柔性臂的鲁棒控制方案,实现了闭环跟踪性能。Resta 等^[6]针对多关节柔性机械臂在大位移运动过程中的非线性振动问题,采用

独立模态控制法进行振动控制实验,结果表明,在不影响机械臂运动和材料强度的情况下,振动控制使系统的阻尼比增加了 15%。Zeng 等^[7]基于变结构模型参考自适应控制理论,设计了一种利用输出反馈控制轨道柔性航天器的新型控制器,数值仿真结果表明,该控制器对于未知参数、干扰和未建模动态的非线性系统具有良好的瞬态特性和鲁棒性。Rew 等^[8]提出了一种对频率变化的结构进行多模态振动控制的自适应正位置反馈算法,以压电智能柔性臂为实验对象进行算法验证,取得了良好的效果。娄军强等^[9]从系统模型辨识的角度出发,针对压电柔性臂的建模问题,采用 ARMAX 作为参数模型进行系统辨识,使用线性二次型调节器(linear quadratic regular, 简称 LQR)优化算法对压电柔性机械臂进行了振动控制。张顺琦等^[10]通过有限元法建立了压电悬臂梁动力学模型,设计了模糊逻辑控制器对悬臂梁进行振动主动控制,通过加入 LQR 算法和比例积分微分(proportional integral differential, 简称 PID)算法进行对比,验证了模糊控制的有效性。朱晓锦等^[11]将滤波 U-最小均方算法用于压电柔性结构的振动主动控制,并实验验证了该算法的可行性和有效性。邱志成等^[12]针对压电柔性臂的振动问

* 国家自然科学基金资助项目(51805459)

收稿日期:2019-06-27;修回日期:2019-11-11

题,采用正位置反馈(positive position feedback,简称 PPF)和比例微分(proportional differential,简称 PD)控制算法进行振动控制实验,控制效果较为明显。

笔者针对压电柔性机械臂的弹性振动问题,首先,通过实验辨识的方法建立了系统的动力学模型;其次,基于控制理论和优化算法,引入线性二次型最优控制,并将最优控制与遗传算法结合,针对加权矩阵难以解析的关键问题,将遗传算法应用于控制器的设计中,实施了加权矩阵的优化设计;最后,搭建了以工控机为核心的压电智能柔性结构振动主动控制系统的硬件实验平台,编写了基于 LabVIEW 的系统软件测控程序,并开展了对压电柔性臂持续激励和自由衰减下的振动控制实验研究。

1 系统描述

本研究涉及的压电柔性臂系统结构图如图 1 所示,测控系统实物图如图 2 所示。本实验用到的传感器为压电纤维复合材料(型号为 MFC-0714);电荷放大器型号为 YE5835;数据采集卡型号为 NI-USB-6002;压电驱动电源型号为芯明天-E01。

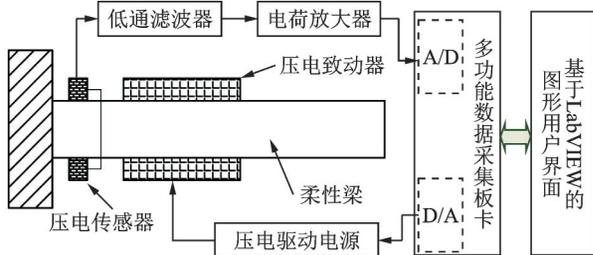


图 1 压电柔性臂系统结构图
Fig.1 Block diagram of the flexible manipulator system



图 2 压电柔性臂测控系统实物图
Fig.2 Experimental setup of the flexible manipulator system

2 系统辨识建模

2.1 理论模型

柔性臂和压电致动器的基本参数如表 1 所示。选用欧拉-伯努利悬臂梁作为受控结构,其传递函数的表达式为

$$G(s) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{k_i}{s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (1)$$

其中: k_i 为开环传递函数的增益; ξ_i 为*i*阶阻尼比; ω_i 为*i*阶振动角频率。

表 1 柔性臂和压电致动器的基本参数

参数	柔性梁	压电致动器
材料	弹簧钢(65Mn)	MFC-2814
长×宽×高/mm	450.0×30.0×1.0	28.0×14.0×0.3
弹性模量/GPa	198.6	30.3
密度/(kg·m ⁻³)	7 810	5 440
$d_{31}/(C \cdot N^{-1})$	—	-170×10^{-12}

由于不能得到柔性梁系统的所有阶模态,且悬臂梁振动在前几阶振动模态中占主导作用,所以引入模态截断技术,只保留前几阶模态。通过重新构造系统的零点分布^[13],得到系统模型为

$$G(s) = \sum_{i=1}^n \frac{k_i(s - a_i)(s - b_i)}{s^2 + 2\xi_i\omega_i s + \omega_i^2} \quad (2)$$

其中: a_i, b_i 为第*i*阶模态的零点。

2.2 实验辨识

选用正弦扫频信号作为输入信号,可以较为充分地激发压电柔性臂的各阶模态,以防止某一低阶模态被遗漏。扫频信号的频率范围为 0~5 Hz,幅值为±5 V,系统在扫频激励下的应变输出电压信号如图 3 所示。

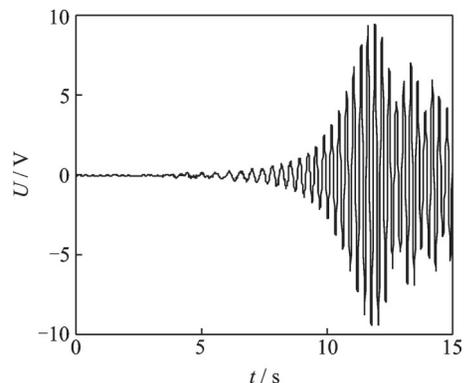


图 3 扫频激励下的输出电压信号
Fig.3 Sweep excitation output signal

借助 Matlab 系统辨识工具箱,使用零极点重新分布的系统模型,对输入输出实验数据进行辨识^[14],辨识模型的实验结果比较如图4所示。

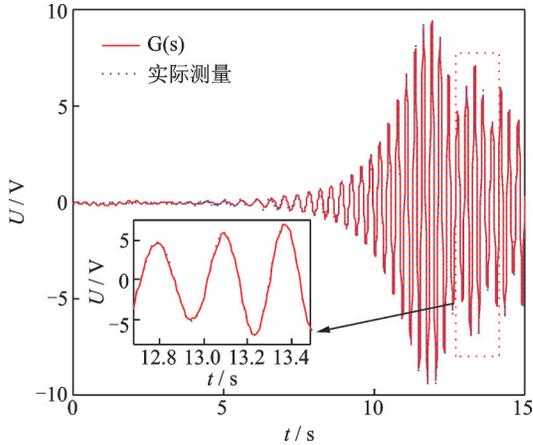


图4 辨识模型的实验结果比较

Fig.4 Comparison of experimental results of identification model

辨识得到的系统传递函数为

$$G(s) = \frac{-0.0753s^2 - 0.1316s - 5.760}{s^2 + 0.376s + 513.8} \quad (3)$$

为了定量对比辨识结果和实际输出的匹配程度,引入模型吻合度指标

$$J = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (y_i(t) - \bar{y}_i(t))^2}{\sum_{i=1}^M y_i^2(t)}} \quad (4)$$

其中: $y_i(t)$ 为第*i*个采样时刻的实际输出; $\bar{y}_i(t)$ 为辨识模型在第*i*个采样时刻的理论输出;吻合度指标*J*越接近1,表示辨识模型和实际模型的匹配度越高。

由于实验辨识得到的系统传递函数输出结果与实际结构响应的匹配度为95.22%,故可以用该模型进行后续控制算法的设计。

3 控制算法设计

为了便于反馈控制器的设计,将系统模型转换为状态空间表达式^[15],从能观的角度构造系统状态方程

$$\begin{cases} \dot{X}(k+1) = AX(k) + Bu(k) \\ y(k) = CX(k) + Du(k) \end{cases} \quad (5)$$

其中: A 、 B 和 C 分别为系统的状态矩阵、控制矩阵和

输出矩阵;系统输入 $u(k)$ 为施加在压电致动器上的控制电压;系统输出 $y(k)$ 为压电传感器的检测电压。

假设状态反馈控制器为

$$u(k) = -Kx(k) \quad (6)$$

其中: K 为状态反馈增益矩阵,使得闭环系统能够满足期望的性能。

将式(6)代入系统状态方程,得到

$$X(k+1) = (A - BK)X(k) = A_c X(k) \quad (7)$$

对于式(5)的开环系统,开环传递函数的极点为系统矩阵 A 的特征值。当变成式(7)的闭环形式,状态矩阵变成了 $(A - BK)$,因此通过配置反馈矩阵 K 可以使闭环系统的极点达到期望的状态。

3.1 线性二次最优控制 LQR

为了便于最优极点的选择和状态反馈矩阵的计算,引入LQR来设计最优控制器。对于完全能控且能观的系统,定义其二次性能泛函为

$$J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{\infty} (x^T(k)Qx(k) + u^T(k)Ru(k)) \quad (8)$$

其中:半正定矩阵 Q 为状态变量的加权矩阵;正定矩阵 R 为输入变量的加权矩阵。

最优控制的目的是寻找最优输入 $u(k)$,使得系统线性二次型性能泛函达到最小。

为了便于计算,取

$$K = R^{-1}BP \quad (9)$$

其中: P 满足Riccati方程

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (10)$$

3.2 加权系数矩阵 Q 和 R 的选取

从线性二次型最优控制的控制原理可以发现,控制器的控制效果是否优良,关键在于设置合适的加权矩阵。如何确定矩阵参数目前还没有特定的数值解决方案,只能根据经验法或试凑法获得具体矩阵中的数值。遗传算法可以在指定的阈值内进行智能搜索并不断优化,将其在线性二次型调节器设计中使用,实现对加权矩阵的优化设计,以便于缩短控制器的设计时间和增强控制器的控制性能。遗传算法优化设计LQR控制器示意图如图5所示。

从线性二次型性能指标可以看出,系统的振动能量越小,表明柔性臂的控制效果越好;控制能量越

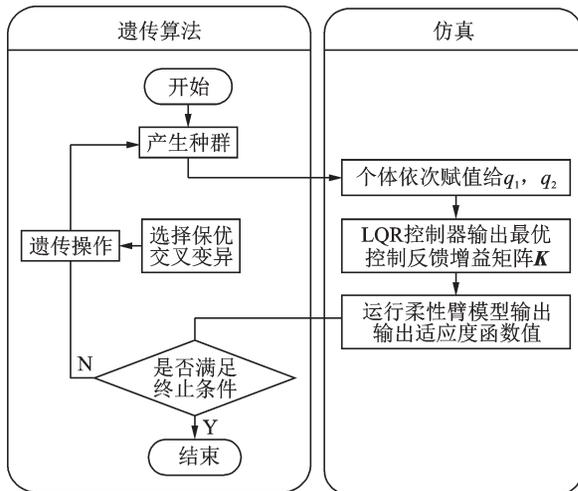


图 5 遗传算法优化设计 LQR 控制器示意图

Fig.5 Optimum design of LQR controller by genetic algorithms

小,则表明输出的控制量越小。因此,优化的目标函数可以表示为

$$FA = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (11)$$

对于加权矩阵 Q, R , 设定其值为 $Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix}$,

$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 其中: Q 为对角阵, 取值大小反应了不同的控制效果; $q_1=0.78$; $q_2=0.004$; R 为单位对角阵。

3.3 加权系数优化结果

遗传算法寻优过程中参数设置如表 2 所示。

表 2 遗传算法参数设置

Fig.2 Parameter setting of genetic algorithms

种群大小	染色体长度	交叉概率	变异概率
100	20	0.9	0.001

图 6 为平均适应度的遗传进化过程, 显示了基于遗传算法的 LQR 参数的最优值搜索过程。可以看出, 当进化代数进行到第 50 代以后, 种群个体之间的平均距离明显变小, 进化结果收敛到了最优值。对最优的染色体串进行解码, 可得到最佳的 Q, R 矩阵, 进而得到最优控制的增益反馈矩阵 K 。

4 实验验证

为了验证优化参数后 LQR 控制器具有良好的

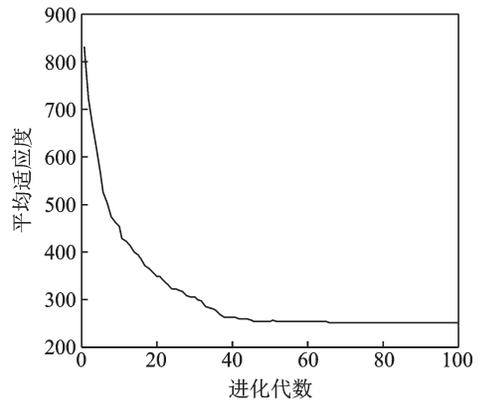


图 6 平均适应度的遗传进化过程

Fig.6 Evolution process of the mean fitness

性能, 针对压电柔性臂的振动主动控制设计了模糊逻辑控制器。其基本工作原理是: 将测量得到的状态输入量通过模糊化的方式转化成可以用语言描述的模糊量, 通过制定模糊规则, 模糊推理转化成为模糊输出值, 再通过清晰化接口将模糊输出值转化为能够用来进行实际控制的精确值。

图 7 为控制前后应变输出电压信号, 给出了在 10 s 停止施加激励后, 利用所设计的控制器对柔性臂振动进行抑制响应实验曲线。可以看出: 分别施加线性二次型最优控制和模糊控制 6 s 后, 柔性臂的振动幅度分别下降到 ± 0.05 V 和 ± 0.1 V; 而如果不施加控制, 在 6 s 的时候柔性臂的振动为 ± 1.3 V。

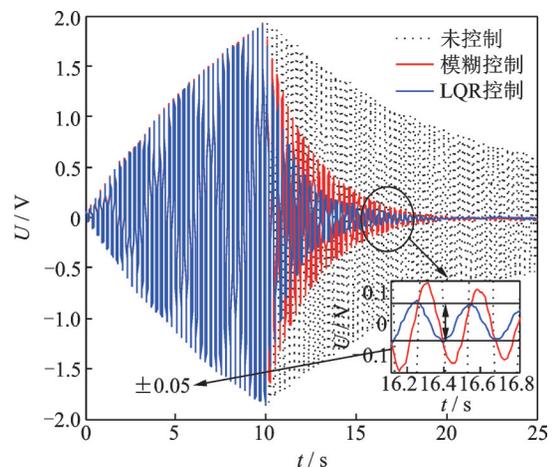


图 7 控制前后应变输出电压信号

Fig.7 Experimental result of sensor output with control

图 8 为控制前后对应输出的频域曲线。可以看出, 施加线性二次型最优控制和模糊控制后, 在一阶振动频率处柔性臂的振动得到了很好抑制, 大大降低了柔性臂振动的衰减时间, 且线性二次型最优控制相较于模糊控制具有较好的控制效果。

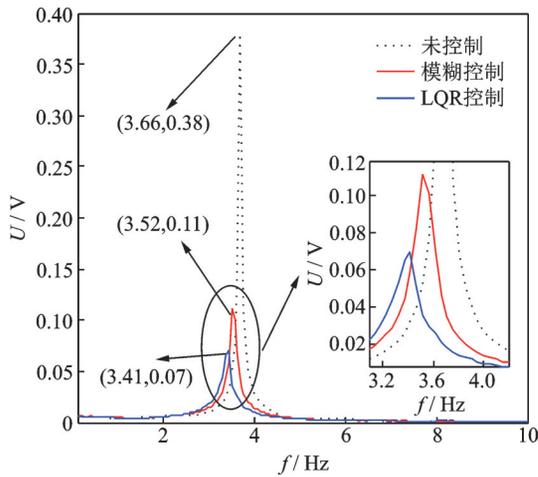


图 8 控制前后对应输出的频域曲线

Fig.8 Experimental result of sensor output with control in frequency domain

柔性臂在受持续正弦激励的作用下,利用所设计的控制器对柔性臂的振动进行抑制响应实验。图 9 为控制前后应变输出电压信号曲线。

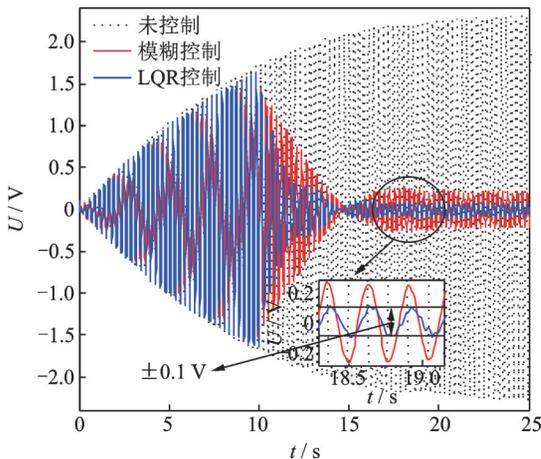


图 9 控制前后应变输出电压信号

Fig.9 Experimental result of sensor output with control

由时域曲线可知,柔性臂的振幅逐渐增大,并做幅值为 ± 2.5 V的等幅振动,在 10 s时分别施加线性二次型最优控制和模糊控制后,柔性臂的振动幅度下降到 ± 0.1 V和 ± 0.2 V。图 10 为控制前后对应输出的频域曲线。可以看出,在一阶模态频率处柔性臂的振幅得到了较好抑制,且线性二次型最优控制相较于模糊控制具有较好的控制效果。

5 结论

1) 从系统辨识的角度研究了压电柔性臂的建模问题,采用实验辨识方法对压电柔性臂系统的传

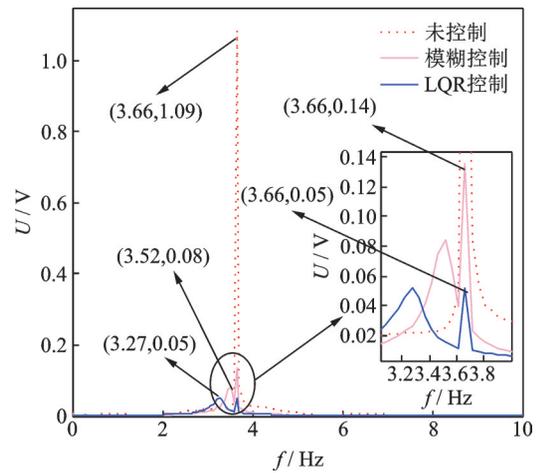


图 10 控制前后对应输出的频域曲线

Fig.10 Experimental result of sensor output with control in frequency domain

递函数进行辨识。为了定量对比辨识的结果和实际输出的匹配程度,引入了模型匹配度指标函数。结果表明,辨识得到的系统传递函数输出结果与实际结构响应的匹配度为 95.22%。

2) 基于控制理论和优化算法,引入线性二次型最优控制,将最优控制与遗传算法结合,针对加权矩阵难以解析的关键问题,将遗传算法应用于控制器的设计中,实施了加权矩阵的优化设计。为了对比优化参数下控制器的有效性,设计了模糊逻辑控制器。

3) 开展了压电柔性臂在自由衰减和持续激励情况下的振动主动控制实验研究。实验结果表明,2种控制算法对柔性臂的振动均有较好的抑制效果,且基于遗传算法的线性二次型最优控制效果更好。该方法可应用于其他柔性构件,对于柔性构件的系统辨识和振动抑制提供了一些借鉴和尝试。

参 考 文 献

- [1] 董瑶海. 航天器微振动[M]. 北京:中国宇航出版社, 2015:54-55.
- [2] SUTCLIFFE S G C, EATWELL G P, HUTCHINS S M. Active control of vibration[M]//Active Control of Vibration. [S. l.]: Academic Press, 1996: 1209-1221.
- [3] CLARK R L, SAUNDERS W R, GIBBS G P, et al. Adaptive structures: dynamics and control[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2001, 109(2): 443-444.
- [4] PEREIRA E, APHALE S S, FELIU V, et al. Integral resonant control for vibration damping and

- precise tip-positioning of a single-link flexible manipulator [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(2): 232-240.
- [5] ETXEBARRIA V, SANZ A, LIZARRAGA I. Real-time experimental control of a flexible robotic manipulator using a composite approach [C] //IEEE International Conference on Control Applications. [S. l.]: IEEE, 2004: 955-960.
- [6] RESTA F, RIPAMONTI F, CAZZULANI G, et al. Independent modal control for nonlinear flexible structures: an experimental test rig [J]. Journal of Sound & Vibration, 2010, 329(8): 961-972.
- [7] ZENG Y, ARAUJO A D, SINGH S N. Output feedback variable structure adaptive control of a flexible spacecraft[J]. Acta Astronautica, 1999, 44(1): 11-22.
- [8] REW K H, HAN J H, LEE I. Multi-modal vibration control using adaptive positive position feedback [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2002, 13(1): 82-42.
- [9] 娄军强,周优鹏,廖江江,等. 压电柔性臂的ARMAX模型辨识降阶及最优极点移动控制[J]. 振动工程学报, 2018, 31(1): 132-139.
LOU Junqiang, ZHOU Youpeng, LIAO Jiangjiang, et al. Armax model identification and vibration suppression of a piezoelectric flexible manipulator using optimal pole shifting control [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(1): 132-139. (in Chinese)
- [10] 张顺琦,于喜红,王战玺,等. 压电智能悬臂梁模糊振动抑制研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(1):110-117.
ZHANG Shunqi, YU Xihong, WANG Zhanxi, et al. Study on the fuzzy vibration suppression of a piezoelectric intelligent cantilever beam [J]. Journal of Vibration Engineering, 2017, 30(1): 110-117. (in Chinese)
- [11] 朱晓锦,黄全振,高志远,等. 多通道FULMS自适应前馈振动控制算法分析与验证[J]. 振动与冲击, 2011, 30(4): 198-204.
ZHU Xiaojin, HUANG Quanzhen, GAO Zhiyuan, et al. Analysis and verification of multi-channel FULMS algorithm for adaptive feed forward active vibration control [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(4): 198-204. (in Chinese)
- [12] 邱志成,谢存禧,张洪华,等. 压电柔性机械臂的主动振动控制研究[J]. 机器人, 2004, 26(1): 45-48.
QIU Zhicheng, XIE Cunxi, ZHANG Honghua, et al. Active vibration control for flexible piezoelectric manipulator [J]. Robot, 2004, 26(1): 45-48. (in Chinese)
- [13] 娄军强,廖江江,李国平,等. 压电柔性机械臂的实验辨识及最优极点配置抑振控制[J]. 振动与冲击, 2017, 36(16): 18-25.
LOU Junqiang, LIAO Jiangjiang, LI Guoping, et al. Experimental identification and vibration suppression of a piezoelectric flexible manipulator using an optimal poles-assignment method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(16): 18-25. (in Chinese)
- [14] 庞中华,崔红. 系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2013:11-15.
- [15] 刘豹,唐万生. 现代控制理论[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 2006:9-22.



第一作者简介:康建云,男,1993年8月生,硕士。主要研究方向为结构振动主动控制。曾发表《压电柔性臂的传感器/致动器优化配置与振动主动控制》(《厦门大学学报(自然版)》2019年第58卷第3期)等论文。

E-mail:602263260@qq.com

通信作者简介:毕果,女,1978年2月生,博士、副教授。主要研究方向为精密加工过程监测等。

E-mail:guobi@xmu.edu.cn