SCIENTIA SINICA Informationis





# 变负载柔性悬臂梁的多模型混合自适应振动主动 控制

# 高志远,朱晓锦\*,张合生,苗中华

上海大学机电工程与自动化学院,上海 200444

\* 通信作者. E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn

收稿日期: 2019-07-26; 修回日期: 2019-10-08; 接受日期: 2019-11-19; 网络出版日期: 2020-04-21

国家自然科学基金 (批准号: 51575328, 61503232) 资助项目

**摘要** 面向末端具有可变负载的压电柔性悬臂梁振动主动控制,本文提出了一种基于改进多模型切换性能指标函数的多模型混合自适应振动主动控制方法.通过引入包含次级通道与结构正反馈通道的预滤波器,消除了抑振作动器与参考传感器之间的结构振动正反馈对振动主动控制的负面影响.通过构建以压电智能柔性悬臂梁为受控对象的 MATLAB xPC 实时验证平台,针对单频扰动、双频窄带扰动以及宽带扰动,开展了实时实验对比验证.相关实验结果表明:本文所提出的多模型混合自适应振动主动控制方法是可行的,能够显著改善负载变化情况下的振动抑制效果,且收敛速度较快.

关键词 多模型自适应控制, 切换控制, 振动主动控制, 压电悬臂梁, 可变负载, 实时控制

## 1 引言

当前,考虑柔性机械臂外界干扰和变负载情况下的模型不确定性,在实现柔性机械臂运动控制的 同时,有效抑制柔性机械臂弹性振动,已经成为机器人技术和控制工程领域的一个重要研究方向和研 究热点<sup>[1,2]</sup>.其中,压电材料的频响范围宽、响应速度快、动态特性好,加工方便、质量轻,便于分布式 布置,可以很方便地嵌入到柔性机械臂的各个位置,能够克服其他作动器没有支撑点、无法施加控制 力矩的缺陷,特别适合大范围运动的柔性构件与柔性机械臂系统的振动主动控制问题<sup>[3]</sup>.

目前,国内外学者<sup>[4~8]</sup>在基于压电材料的结构振动主动控制这一领域的理论和实践研究方面取 得了诸多有益成果. Cao 等<sup>[9]</sup> 采用标准粒子群优化算法,以时间乘绝对误差积准则为适应度函数,整 定 PID 控制器的控制参数,对双连杆压电柔性机械臂振动控制进行了仿真与实验研究. Zhang 等<sup>[10]</sup> 针对受未知扰动和建模误差影响的压电柔性机械臂系统,提出了一种 H<sub>∞</sub> 优化的抗扰控制算法并将 其应用于压电柔性机械臂的振动抑制仿真. Lou 等<sup>[11]</sup> 研究了压电柔性臂系统的实验辨识和基于极点

 引用格式: 高志远,朱晓锦,张合生,等. 变负载柔性悬臂梁的多模型混合自适应振动主动控制. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 734-742, doi: 10.1360/SSI-2019-0160
 Gao Z Y, Zhu X J, Zhang H S, et al. Multiple model hybrid adaptive vibration control for flexible cantilever beam with varying load (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 734-742, doi: 10.1360/SSI-2019-0160

ⓒ 2020《中国科学》杂志社

配置法的振动主动控制问题. Rong 等<sup>[12]</sup> 对比研究了 PD 和 LQR 控制方法对柔性机械臂振动主动抑制的控制效果,提出了一种 LQR-PD 联合控制策略,结合搭建的双连杆柔性机械臂地面模拟平台进行 了模拟实验.

以滤波 x 最小均方算法 (filtered x least mean square, FxLMS) 为代表的自适应滤波控制算法因其 易于实现、控制收敛速率高等特点在结构振动控制中获得广泛应用.但当 FxLMS 算法应用于负载变 化的柔性机械臂振动主动控制时,次级通道模型的变化会显著影响控制效果,甚至导致控制器发散.为 消除次级通道模型变化带来的不利影响,文献 [13] 提出了一种基于辅助随机噪声的在线次级通道建模 方法,文献 [14] 提出了一种基于梯度下降的次级通道在线建模方法.考虑到在次级通道线辨识过程中 引入的辨识激励信号会给主动控制带来负面影响,以及辨识过程的自适应算法会显著增加控制算法的 运算复杂度,近年来一些学者提出了多种基于多模型自适应控制的解决方案.例如文献 [15] 提出了一 种基于多模型逆控制的控制策略并与经典的 PD 控制器做了对比分析.文献 [16] 给出了基于 FxLMS 算法的多模型自适应控制算法,针对次级通道处在不同状态建立次级通道模型集,覆盖次级通道的不 确定性.文献 [17] 提出了一种基于多模型切换的方法,并进行了实验验证,表明了采用多模型控制策 略的优越性.但以上方法均未考虑结构振动过程中的正反馈,在实际应用中可能会导致控制器失效, 甚至发生严重的结构性损害.

本文首先介绍了文献 [17] 所提出的多模型切换前馈自适应控制算法,随后给出了无需辨识激励信号,基于重构扰动信号与误差信号的改进型切换指标的多模型切换策略.并通过引入包含次级通道与结构正反馈通道的预滤波器,构建了一种能够消除结构振动正反馈影响的新型混合自适应振动主动控制方法.在此基础上,以压电纤维作动器与压电纤维传感器构建智能柔性悬臂梁受控对象,开展实时控制实验验证.

# 2 传统多模型切换振动控制算法

目前的多模型切换自适应振动控制策略,主要根据文献 [17,18] 提出的多模型切换控制系统架构, 应用较多的控制方法是采用 FxLMS 算法及其各种改进型自适应滤波控制方法. 图 1 为模型集包含 3 个固定次级通道模型的多模型切换前馈振动控制算法结构图. 其中, *S*<sub>1</sub>(*z*<sup>-1</sup>), *S*<sub>2</sub>(*z*<sup>-1</sup>), *S*<sub>3</sub>(*z*<sup>-1</sup>) 为通 过离线辨识得到的次级通道模型. *m*(*t*) 是用来驱动多模型估计器运行的外加输入,通常可以是白噪声 或者多个单频信号构成的窄带信号. 多模型切换振动控制算法一般流程如下所述.

(1) 通过离线辨识构建含有 m 个次级通道模型的模型集;

(2) 针对每个次级通道模型, 计算模型切换性能指标 J<sub>i</sub>(t);

(3) 选择模型切换性能指标 J<sub>i</sub>(t) 最小的次级通道模型代入振动主动控制算法.

第*i*个模型的输出为

$$y_i(t) = S_i(z^{-1})m(t).$$
 (1)

第 i 个模型的误差为

$$\varepsilon_i(t) = e(t) + y_i(t). \tag{2}$$

可以得到

$$\varepsilon_i(t) = d(t) + (S_i(z^{-1}) - S(z^{-1}))m(t) - S(z^{-1})u(t).$$
(3)

735



#### 图 1 多模型切换前馈振动控制算法框图



文献 [17,18] 中提出的切换指标为

$$J_{i}(t) = \int_{t_{0}}^{t} \|e_{i}(\tau)\|^{2} \mathrm{d}\tau.$$
(4)

## 3 新型多模型切换控制策略

采用图 1 所示的多模型切换控制策略,由于有额外的辨识激励信号,很难实现较好的控制效果.为进一步改进图 1 所示控制算法的控制性能,本文通过重构虚拟参考信号与虚拟误差信号构建了一种无需外加激励信号的多模型切换策略,具体如图 2 所示.其中, *e<sub>ri</sub>(t)*为通过信号重构得到的虚拟重构误差信号,*d<sub>ri</sub>(t)*为通过信号重构得到的虚拟重构扰动信号.基于重构得到的虚拟重构误差信号与虚拟重构扰动信号,考虑模型时变特性,可以由式 (4) 推导得到:

$$J_{i}(t) = \frac{\alpha \|e_{ri}(t)\|^{2} + \beta \int_{t_{0}}^{t} e^{-\lambda(t-\tau)} \|e_{ri}(\tau)\|^{2} d\tau}{\alpha \|d_{ri}(t)\|^{2} + \beta \int_{t_{0}}^{t} e^{-\lambda(t-\tau)} \|d_{ri}(\tau)\|^{2} d\tau},$$
(5)

其中  $\alpha$  和  $\beta$  分别为瞬时测量和长期准确性加权因子,  $\lambda$  为遗传因子. 对于有界的  $e_i(t)$ ,  $\lambda$  能够保证性能指标函数有界. 如果选择较大的  $\alpha/\beta$  和  $\lambda$ , 对于突变的参数的响应时间会更快, 但会产生过多的误切换导致控制效果变差. 如果选择较小的  $\alpha/\beta$  和  $\lambda$ , 能够产生较好的稳态辨识准确度, 减少错误切换的次数, 但对于系统模型参数变化的响应会变慢.

# 4 混合自适应振动控制方法

在振动主动控制过程中, 消振作动器施加的控制作用会对参考传感器的信号输出产生消极影响, 由此产生的结构振动正反馈可能会导致控制器发散, 对振动主动控制造成严重负面影响. 为消除结构





振动正反馈带来的负面影响, 文献 [19] 给出了一种前馈自适应振动主动控制方法, 但针对单频和窄带 振动时, 文献 [19] 收敛速度会变慢.为改善文献 [19] 提出的单纯前馈自适应控制算法的收敛性能与控 制效果, 本文提出了一种如图 3 所示的基于混合自适应控制算法的振动主动控制方法, 用于替换图 2 中的控制器. 图 3 中的 x(t) 和 y(t) 与图 2 中的一一对应, 分别为参考传感器的输出和控制器的输出. 其中  $F(z^{-1})$  为正反馈通道,  $S(z^{-1})$  为次级通道,  $P(z^{-1})$  为主通道.

具体的参数自适应算法 (PAA) 更新过程为

$$\theta_1(t+1) = \theta_1(t) + F_1(t)\psi_1(t)\nu_1(t+1), \tag{6}$$

$$\nu_1(t+1) = \frac{\nu_1^{\circ}(t+1)}{1 + \psi_1^{\mathrm{T}}(t)F_1(t)\psi_1(t)},\tag{7}$$

$$F_1(t+1) = \frac{1}{\lambda_{11}(t)} \left[ F_1(t) - \frac{F_1(t)\psi_1(t)\psi_1^{\mathrm{T}}(t)F_1(t)}{\frac{\lambda_{11}(t)}{\lambda_{12}(t)} + \psi_1^{\mathrm{T}}(t)F_1(t)\psi_1(t)} \right],$$
(8)

$$\psi_1(t) = \phi_{f_1}(t) = P_{f_1}(z^{-1})\phi_1(t), \tag{9}$$

$$\theta_2(t+1) = \theta_2(t) + F_2(t)\psi_2(t)\nu_2(t+1), \tag{10}$$

$$\nu_2(t+1) = \frac{\nu_2^{\circ}(t+1)}{1 + \psi_2^{\mathrm{T}}(t)F_2(t)\psi_2(t)},\tag{11}$$

737



图 3 混合自适应振动控制算法框图

Figure 3 Diagram for hybrid adaptive vibration control algorithm

$$F_{2}(t+1) = \frac{1}{\lambda_{21}(t)} \left[ F_{2}(t) - \frac{F_{2}(t)\psi_{2}(t)\psi_{2}^{\mathrm{T}}(t)F_{2}(t)}{\frac{\lambda_{21}(t)}{\lambda_{22}(t)} + \psi_{2}^{\mathrm{T}}(t)F_{2}(t)\psi_{2}(t)} \right],$$
(12)

$$\psi_2(t) = \phi_{f_2}(t) = P_{f_2}(z^{-1})\phi_2(t), \tag{13}$$

其中 0 <  $\lambda_{11}(t) \leq 1$ , 0  $\leq \lambda_{12}(t) < 2$ ,  $F_1(0) > 0$ , 0 <  $\lambda_{21}(t) \leq 1$ , 0  $\leq \lambda_{22}(t) < 2$ ,  $F_2(0) > 0$ ,  $P_{f1}(z^{-1}) = P_{f2}(z^{-1}) = \frac{\hat{A}_F \hat{A}_S \hat{A}_{C2}}{\hat{A}_F A_{C1}[\hat{A}_S \hat{A}_{C2} - \hat{B}_S \hat{B}_{C2}] + \hat{B}_F B_{C1} \hat{A}_{C2} \hat{A}_S} \hat{S}$ .  $\hat{S}$  为次级通道  $S(z^{-1})$  的估计模型,  $\hat{A}_F$  和  $\hat{B}_F$  为正反馈通道  $F(z^{-1})$  模型分母和分子多项式的估计,可以由离线或者在线辨识得到.  $\hat{A}_C$  和  $\hat{B}_C$ 为最优前馈滤波器的估计,可以采用当前的自适应滤波器分母  $A_C(z^{-1})$  和分子  $B_C(z^{-1})$  代替.

# 5 实时控制实验结果

#### 5.1 实验平台构建

本文以柔性悬臂梁模拟柔性机械臂, 悬臂梁的长度为 500 mm, 宽度为 35 mm, 厚度为 1 mm, 材料为不锈钢材质, 具体的材料特性为: 弹性模量 190 GPa, 密度 8 g/cm<sup>3</sup>, 泊松比 0.29, 总质量 140 g. 选用 d31 效应致动器作为压电作动器, 型号为 M-5628-P2 (致动长度为 56 mm, 致动宽度为 28 mm, 整体长度为 66 mm, 整体宽度为 31 mm, 静电容量为 113.06 nF, 最大位移为 -45 µm, 推力为 -205 N), 选用 d31 效应传感器作为压电传感器, 型号为 M-0714-P2 (传感长度为 7 mm, 传感宽度为 14 mm, 整体长度为 16 mm, 整体宽度为 16 mm, 静电容量为 7.89 nF). 基于模态控制力/力矩最大化 的原则, 将 2 对压电纤维作动器、传感器铺设在悬臂梁前几个低阶模态应变最大的区域, 完成 4 片压



图 4 (网络版彩图) 实时控制实验平台照片 Figure 4 (Color online) Photo for real-time control experiment platform

作动器与 2 片压电传感器的粘接焊线工作,使用 3 M 的 DP460 环氧树脂胶,胶粘后在 50°C ~ 60°C, 固定压住 2 个小时.将 2 个压电传感器焊接线采用 M5 接口接到 2 台电荷放大器,将 4 个压电作动器 焊接线采用 LEMO 接口接到 4 个压电功率放大器通道,使用插入研华工控机中的 NI PCI6289 板卡作 为 AD/DA 板卡,完成智能柔性机械臂振动主动控制实时实验测控平台的构建,使用 MATLAB xPC 平台完成了算法验证实时控制环境的构建.基于 MATLAB xPC 平台的实时实验验证平台实物照片如 图 4 所示.

# 5.2 窄带扰动控制结果

抑振实验中扰动作动器的扰动输入,分别采用单频扰动、双频窄带扰动以及宽带扰动作为输入信号.其中单频窄带信号选取结构的二阶固有频率、双频窄带扰动选取结构的二阶和三阶固有频率叠加,宽带信号采用伪二维随机序列作为输入信号.当然选取任意频率的单频扰动或者双频扰动作为扰动输入也是可行的,只是在实验中激起振动的幅度较低.下面介绍针对窄带扰动的某次实验情况,实验总时长为130 s,在 50 s 之前,负载为0,50 ~ 90 s 之间负载为14 g,90 s 之后的负载为68 g.无振动抑制的误差传感器输出如图5 所示,采用本研究提出的多模型混合自适应振动主动控制的振动抑制效果如图6 所示.

#### 5.3 振动控制效果对比

为量化对比各种控制算法的控制效果,定义如下振动抑制效果评价指标:

$$S_{A} = 20\log_{10} \frac{\sum_{i=1}^{N} |e(i)|^{2}}{\sum_{i=1}^{N} |d(i)|^{2}},$$
(14)

其中 *d*(*i*) 为振动主动控制前的残差传感器输出, *e*(*i*) 为振动主动控制后的残差传感器输出. *S<sub>A</sub>* 的单 位为 dB. 针对不同的控制策略与不同激励情况,可以得到振动抑制效果评价指标如表 1 所示. 其中 MMC 表示图 1 所示的多模型切换振动主动控制方案, Proposed MMC 表示图 2 所示的新型多模型切换结构的振动控制算法.

# 6 结论

本文面向负载不确定工况的高精密柔性机械臂系统振动控制,以末端具有可变负载的压电智能



图 5 未施加控制的窄带振动响应



#### 图 6 施加控制的窄带振动响应

 $\label{eq:Figure 6} {\bf Figure 6} \quad {\rm Vibration\ response\ for\ narrowband\ disturbance} \\ {\rm with\ control} \\$ 

表 1 振动抑制效果 Table 1 Vibration suppression performance

Control algorithm	Suppression performance (dB)
MMC for single frequency disturbance	-41.34
Proposed MMC for single frequency disturbance	-52.21
MMC for narrowband disturbance	-24.93
Proposed MMC for narrowband disturbance	-40.87
MMC for broadband disturbance	-20.27
Proposed MMC for broadband disturbance	-33.78

柔性悬臂梁作为具体研究对象,提出了一种新型的多模型混合自适应振动主动控制方法.构建开发了 MATLAB xPC 实时控制实验系统,分别针对单频扰动、双频窄带扰动以及宽带扰动进行了振动抑制 实验.相关实验结果表明:本文所提出的多模型混合自适应振动主动控制方法能够显著改善负载变化 情况下的振动抑制效果,且收敛速度较快.本文提出的多模型切换结构适用于目前已经提出的各种基 于模型的振动主动控制方法,引入包含次级通道与结构正反馈通道的预滤波器的振动主动控制器设计 方案,适用于有结构振动正反馈影响的振动主动控制应用.

# 参考文献

- 1 Rahimi H N, Nazemizadeh M. Dynamic analysis and intelligent control techniques for flexible manipulators: a review. Adv Robot, 2014, 28: 63–76
- 2 Jing Z, Xu Q, Huang J. A review on kinematic analysis and dynamic stable control of space flexible manipulators. Aerosp Syst, 2019, 2: 1–14
- 3 Kiang C T, Spowage A, Yoong C K. Review of control and sensor system of flexible manipulator. J Intell Robot Syst, 2015, 77: 187–213
- 4 Moradi A, Shirazi K H, Keshavarz M, et al. Smart piezoelectric patch in non-linear beam: design, vibration control and optimal location. Trans Inst Meas Control, 2014, 36: 131–144
- 5 Qureshi E M, Shen X, Chen J J. Vibration control laws via shunted piezoelectric transducers: a review. Int J Aeronaut

Space Sci, 2014, 15: 1–19

- 6 He X Y, He W, Qin H, et al. Boundary vibration control for a flexible Timoshenko robotic manipulator. IET Control Theory Appl, 2018, 12: 875–882
- 7 Bian Y, Gao Z, Lv X, et al. Theoretical and experimental study on vibration control of flexible manipulator based on internal resonance. J Vib Control, 2018, 24: 3321–3337
- 8 Kerboua M, Megnounif A, Benguediab M, et al. Vibration control beam using piezoelectric-based smart materials. Composite Struct, 2015, 123: 430–442
- 9 Cao Q S, Hong Y Y, Zhou J H, et al. Vibration control of flexible manipulator based on self-tuning PID controller by PSO. J Vib Meas Diagnosis, 2014, 34: 1045–1049 [曹青松, 洪芸芸, 周继惠, 等. 基于 PSO 自整定 PID 控制器的柔 性臂振动控制. 振动、测试与诊断, 2014, 34: 1045–1049]
- 10 Zhang X Y, Wang R X, Wang Z X, et al. Vibration suppression of piezoelectric integrated flexible manipulators using H<sub>∞</sub> optimized disturbance rejection control. J Northwestern Polytechnical Univ, 2017, 35: 661–668 [张晓宇, 王润孝, 王战玺, 等. 基于 H<sub>∞</sub> 优化抗扰控制的柔性机械臂振动抑制. 西北工业大学学报, 2017, 35: 661–668]
- 11 Lou J Q, Liao J J, Li G P, et al. Experimental identification and vibration suppression of a piezoelectric flexible manipulator using an optimal poles-assignment method. J Vibration Shock, 2017, 36: 18–25 [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. 振动与冲击, 2017, 36: 18–25]
- 12 Rong J L, Xiang Y, Xin P F, et al. Vibration control and experiment research of two-link flexible manipulator considering flexibility of the joint. J Astronaut, 2017, 38: 1024–1031 [荣吉利, 项阳, 辛鹏飞, 等. 考虑关节柔性的双 连杆机械臂振动控制及实验研究. 宇航学报, 2017, 38: 1024–1031]
- 13 Pu Y, Zhou H, Meng Z. Multi-channel adaptive active vibration control of piezoelectric smart plate with online secondary path modelling using PZT patches. Mech Syst Signal Process, 2019, 120: 166–179
- 14 Zhang L, Chen W S, Cui T Y, et al. An online secondary path modeling algorithm based on gradient descent for active noise control. Noise Vibration Control, 2018, 38: 15–19 [张丽, 陈卫松, 崔婷玉, 等. 一种基于梯度下降的次级 通道在线建模有源噪声控制算法. 噪声与振动控制, 2018, 38: 15–19]
- 15 Zhao Z, Qiu Z, Zhang X, et al. Vibration control of a pneumatic driven piezoelectric flexible manipulator using self-organizing map based multiple models. Mech Syst Signal Process, 2016, 70–71: 345–372
- 16 Zhao J, Xu J, Li X D, et al. An adaptive active noise control algorithm using multiple models. J Vib Eng, 2007, 20: 549–555 [赵剑, 徐健, 李晓东, 等. 基于多模型的自适应有源噪声控制算法研究. 振动工程学报, 2007, 20: 549–555]
- 17 Huang Q, Chen S, Huang M, et al. Adaptive active noise suppression using multiple model switching strategy. Shock Vib, 2017, 2017: 7289076
- 18 Nam H D, Elliott S J. Adaptive active attenuation of noise using multiple model approaches. Mech Syst Signal Process, 1995, 9: 555–567
- 19 Alma M, Landau I D, Airimitoaie T B. Adaptive feedforward compensation algorithms for AVC systems in the presence of a feedback controller. Automatica, 2012, 48: 982–985

# Multiple model hybrid adaptive vibration control for flexible cantilever beam with varying load

Zhiyuan GAO, Xiaojin ZHU<sup>\*</sup>, Hesheng ZHANG & Zhonghua MIAO

School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China \* Corresponding author. E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn

**Abstract** To solve the vibration suppression problem for a piezoelectric flexible cantilever beam with varying load, this study proposes a new type of multiple model hybrid adaptive vibration control method with a new multiple model switching cost index function. It employs a pre-filter consisting of secondary path and positive feedback path model to eliminate the positive feedback between the secondary actuator and reference sensor. By constructing a piezoelectric flexible cantilever beam as the controlled plant, we constructed a real-time control verification experiment platform based on a real-time MATLAB xPC target. We did a real-time control experiment comparison for vibration suppression of single-frequency, narrowband, and broadband disturbances. Experimental results show that the proposed multiple model hybrid adaptive vibration control algorithm is feasible and has good vibration suppression performance with rapid convergence speed.

**Keywords** multiple model adaptive control, switching control, active vibration control, piezoelectric cantilever beam, varying load, real-time control



Zhiyuan GAO is an associate professor in the School of Mechatronic Engineering & Automation at Shanghai University. His research interests include active noise and vibration control, adaptive control, robust control, and real-time control system.



Xiaojin ZHU is a professor and Ph.D. supervisor in the School of Mechatronic Engineering & Automation. His research interests include smart structures, active vibration control, testing technology and signal processing, computer measurement, and control technology.