

含正反馈振动主动控制系统的混合自适应控制

高志远¹, 朱晓锦^{1†}, 张合生², 李培江¹

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 对于存在结构正反馈的振动主动控制系统, 传统的基于有限冲击响应的自适应前馈控制器设计方法难以同时保证控制系统稳定与良好的控制性能. 本文在分析正反馈对前馈控制系统影响的基础上, 基于无限冲击响应控制器设计模式, 提出一种结合前馈自适应控制器和反馈自适应控制器的混合自适应振动主动控制方法. 其中前馈自适应控制器采用参考传感器采集到的扰动相关信号作为参考信号, 反馈自适应控制器通过构建扰动的估计量作为参考信号, 控制器参数更新采用Landau参数递推算法. 以一典型的具有固有正反馈性质的机械振动系统为控制对象, 给出了该混合自适应控制算法的详细推导过程以及稳定性和收敛性分析过程, 得到了算法稳定与收敛的严格正实条件以及相应放松严格正实条件的要求. 在此基础上, 通过构建实时振动主动控制实验平台, 针对多种振动扰动开展对比实验分析. 相关实验结果验证了本文提出的混合自适应振动主动控制方法的可行性和有效性.

关键词: 振动主动控制; 自适应控制; 混合控制; 前馈控制; 反馈控制; 结构正反馈

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Hybrid adaptive control method for active vibration control system with positive feedback

GAO Zhi-yuan¹, ZHU Xiao-jin^{1†}, ZHANG He-sheng², LI Pei-jiang¹

(1. School of Mechatronic Engineering & Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: The traditional finite impulse response (FIR) feedforward controller design method cannot guarantee the stability and desired control performances for active vibration control systems with structural positive feedback. To tackle the controller design problem, we put forward a novel infinite impulse response (IIR) hybrid adaptive vibration control algorithm by inserting an adaptive feedback controller into an adaptive feedforward controller. The reference signal of the feedforward controller is obtained from the reference sensor, while the reference signal of the feedback controller is constructed by using the estimates of the disturbance; control parameters are updated by employing Landau recursive algorithm. Taking a mechanical system with positive feedback as the controlled plant, the deducing process of this algorithm is illustrated in details. The stability and convergence are analyzed; the strictly positive real condition is derived along with the relaxation requirements. A real time control experimental platform is constructed; comparison experiments are done for several different vibration disturbances. The experiment results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: active vibration control; adaptive control; hybrid control; feedforward control; feedback control; structural positive feedback

1 引言(Introduction)

当前, 振动主动控制在挠性结构振动控制、建筑振动控制、车辆振动控制等领域得到了广泛关注与研究^[1]. 相关的控制方法研究近乎涉及了所有控制理论分支, 涵括诸如PID控制、独立模态空间控制、极点配置控制、最优控制、鲁棒控制、滑模变结构控制、自适应控制、智能控制等^[2-11].

目前面向工程振动领域的两个最重要的研究方向是: 鲁棒控制和自适应控制. 例如: Zhang和Palacios-Quinonero等分别给出了两种静态输出反馈 H_∞ 设计方案^[12-13], Li等给出了一种模型参考自适应控制器设计方案^[14], 但以上方法均未考虑结构本身存在的固有正反馈现象, 在很多时候会导致控制器失效, 严重时甚至导致整个受控结构发生结构性损害.

收稿日期: 2014-11-12; 录用日期: 2015-04-10.

[†]通信作者. E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn; Tel.: +86 21-56331186.

国家自然科学基金项目(90716027, 51175319), 上海市教育委员会科研创新重点项目(13ZZ075)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (90716027, 51175319) and Key Program of Shanghai Municipal Education Commission (13ZZ075).

针对存在固有正反馈的振动主动控制系统, Alma等给出了一种 H_∞ 降阶控制器设计方案^[15], Landau、Airimitoaie等给出了几种前馈或结合固定反馈控制器的自适应控制器设计方案^[16-20], 但以上研究工作仅限于前馈自适应的范畴. 为进一步改善相关方法的控制性能, 并解决混合自适应控制器的设计与分析问题, 本文提出一种混合自适应控制算法. 给出了算法的详细推导与稳定性, 收敛性分析过程, 得到了算法稳定与收敛的严格正实条件以及相应放松严格正式条件的要求. 为验证相关方法的可行性和有效性, 构建了振动主动控制实时实验平台, 针对3种典型的振动扰动情况, 开展实时控制实验, 验证本文提出方法的有效性. 为对比本文提出方法的优越性, 针对宽带白噪声振动扰动, 分别采用Alma给出的 H_∞ 控制器, Landau, Airimitoie, Krstajic等给出的若干自适应控制器以及本研究提出的混合自适应控制器, 开展实时控制实验.

2 具有固有正反馈性质的机械振动系统(Mechanical vibration system with inherent positive feedback)

在多数振动主动控制系统中, 传感器与抑振作动器之间均存在一种固有的结构振动正反馈现象. 即当根据传感器采集到的信息, 进行振动抑制时, 作动器给出的作动力会对传感器所采集到的信号产生正反馈, 进而对振动控制造成消极影响. 图1给出了一种典型的具有固有正反馈性质的机械结构. 图中下部的扰动作动器和上部的消振作动器均为惯性作动器, 残差传感器与参考传感器为加速度传感器. 称扰动作动器与参考传感器之间的传递函数为参考信号滤波通道, 参考传感器与残差传感器之间的传递函数为主通道, 而消振作动器与残差传感器的传递函数称为次级通道, 对于整个振动控制系统起到消极作用的消振传感器对于参考传感器的传递函数称为次级通道.

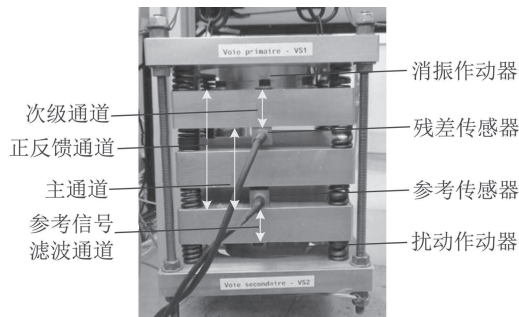


图1 具有固有正反馈性质的机械振动系统

Fig. 1 Mechanical vibration system with inherent positive feedback

次级通道模型可以表示为

$$S(z^{-1}) = \frac{B_S(z^{-1})}{A_S(z^{-1})}. \quad (1)$$

类似的正反馈通道的模型可以表示为

$$F(z^{-1}) = \frac{B_F(z^{-1})}{A_F(z^{-1})}. \quad (2)$$

主通道模型可以表示为

$$P(z^{-1}) = \frac{B_P(z^{-1})}{A_P(z^{-1})}. \quad (3)$$

输入滤波通道模型可以表示为

$$W(z^{-1}) = \frac{B_W(z^{-1})}{A_W(z^{-1})}. \quad (4)$$

3 混合自适应振动主动控制方法(Hybrid adaptive vibration control method)

针对无主通道模型的未知扰动, 本文给出的混合自适应振动控制算法的原理图如图2所示. 其中: $x(t)$ 为外扰 $r(t)$ 经过参考信号滤波通道 $W(z^{-1})$, 实际作用到主通道的扰动. $d(t)$ 为扰动对受控系统造成的振动响应, $e(t)$ 为施加控制后, 受控系统振动受到抑制后的振动响应. 如果控制系统未对受控系统施加控制作用, 则 $e(t) = d(t)$. $u_1(t)$ 为振动主动控制系统的参考传感器采集到的参考信号, 在不存在振动正反馈的系统中 $u_1(t) = x(t)$. $C_1(z^{-1})$ 为前馈自适应控制器, $C_2(z^{-1})$ 为反馈自适应控制器, $u_1(t)$ 和 $y_1(t)$ 分别为前馈自适应控制器 $C_1(z^{-1})$ 的输入和输出, $u_2(t)$ 和 $y_2(t)$ 分别为反馈自适应控制器 $C_2(z^{-1})$ 的输入和输出. $y(t)$ 为前馈控制器施加到作动器的控制信号, $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$. $y_s^\circ(t)$ 为控制作用对结构造成的相应振动响应, 结构的残余振动响应 $e(t) = d(t) + y_s^\circ(t)$.

最优前馈滤波器表示为

$$\tilde{C}_1(z^{-1}) = \frac{\tilde{B}_{C1}(z^{-1})}{\tilde{A}_{C1}(z^{-1})}. \quad (5)$$

最优反馈滤波器表示为

$$\tilde{C}_2(z^{-1}) = \frac{\tilde{B}_{C2}(z^{-1})}{\tilde{A}_{C2}(z^{-1})}. \quad (6)$$

在参数自适应阶段, 前馈滤波器表示为

$$C_1(z^{-1}, t) = \frac{B_{C1}(z^{-1}, t)}{A_{C1}(z^{-1}, t)}. \quad (7)$$

为描述方便, 将其缩写为

$$C_1(z^{-1}) = \frac{B_{C1}(z^{-1})}{A_{C1}(z^{-1})}. \quad (8)$$

类似地, 反馈滤波器表示为

$$C_2(z^{-1}) = \frac{B_{C2}(z^{-1})}{A_{C2}(z^{-1})}. \quad (9)$$

控制器的控制信号为

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t). \quad (10)$$

定义自适应控制器 $C_1(z^{-1})$ 的先验预测误差为

$$v_1^0(t+1) = -d(t+1) - y^0(t+1). \quad (11)$$

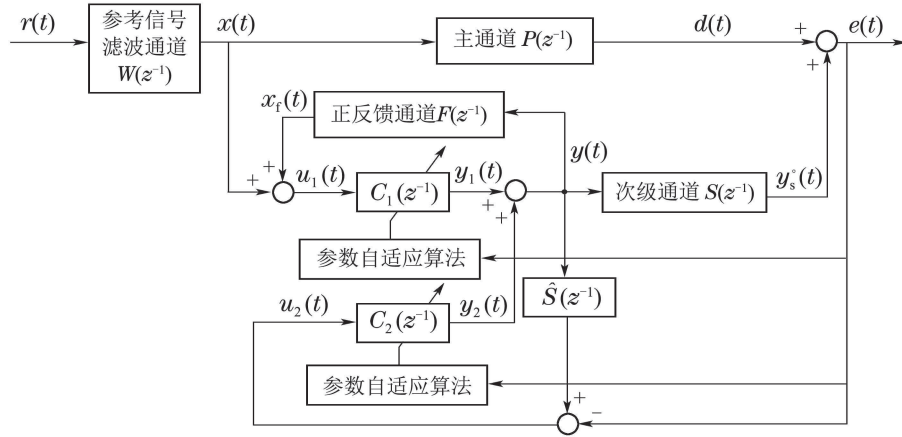


图2 混合自适应振动主动控制系统框图

Fig. 2 Schematic diagram of hybrid adaptive vibration control system

定义自适应控制器 $C_2(z^{-1})$ 的先验预测误差为

$$v_2^0(t+1) = -d(t+1) - y^0(t+1). \quad (12)$$

假设对于次级通道的辨识基本准确, 前馈自适应控制器 $C_1(z^{-1})$ 的后验自适应误差为

$$v_1(t+1) = \frac{A_F(z^{-1})S(z^{-1})}{\mathcal{L}P_{f1}(z^{-1})} [\tilde{\theta}_1 - \theta_1(t+1)]^T \phi_{f1}(t), \quad (13)$$

$$\mathcal{L} = A_F(z^{-1})\tilde{A}_{C1}(z^{-1}) - B_F(z^{-1})\tilde{B}_{C1}(z^{-1}).$$

反馈自适应控制器 $C_2(z^{-1})$ 的后验自适应误差为

$$v_2(t+1) = \frac{S(z^{-1})}{P_{f2}(z^{-1})} [\tilde{\theta}_2 - \theta_2(t+1)]^T \phi_{f2}(t), \quad (14)$$

其中:

$$\phi_1^T t = [-y_1(t), \dots, -y_1(t - n_{AC1} + 1), u_1(t+1), \dots, u_1(t - n_{BC1} + 1)], \quad (15)$$

$$\phi_2^T t = [-y_2(t), \dots, -y_2(t - n_{AC2} + 1), u_2(t+1), \dots, u_2(t - n_{BC2} + 1)], \quad (16)$$

$$\theta_1^T t = [a_1^{C1}(t), \dots, a_{n_{AC1}}^{C1}(t), b_0^{C1}(t), \dots, b_{n_{BC1}}^{C1}(t)], \quad (17)$$

$$\theta_2^T t = [a_1^{C2}(t), \dots, a_{n_{AC2}}^{C2}(t), b_0^{C2}(t), \dots, b_{n_{BC2}}^{C2}(t)], \quad (18)$$

其中: $-y_1(t), \dots, -y_1(t - n_{AC1} + 1), -y_2(t), \dots, -y_2(t - n_{AC2} + 1)$ 分别为基于 $\theta_1(t+1)$ 和 $\theta_2(t+1)$ 的输出:

$$y_1(t+1) = y_1(t+1|\theta_1(t+1)) = \theta_1^T(t+1)\phi_1(t), \quad (19)$$

$$y_2(t+1) = y_2(t+1|\theta_2(t+1)) = \theta_2^T(t+1)\phi_2(t), \quad (20)$$

$v_1(t+1)$ 和 $v_2(t+1)$ 具有文献[21]的后验自适应误差的标准形式, 由此对应的前馈自适应控制器和反馈自适应控制器可以采用如下的Landau参数递推算法进行参数更新:

$$\theta_1(t+1) = \theta_1(t) + F_1(t)\psi_1(t)v_1(t+1), \quad (21)$$

$$v_1(t+1) = \frac{v_1^0(t+1)}{1 + \psi_1^T F_1(t) + \psi_1(t)}, \quad (22)$$

$$F_1(t+1) = \frac{1}{\lambda_{11}(t)} \left[F_1(t) - \frac{F_1(t)\psi_1^T(t)F_1(t)}{\lambda_{11}(t) + \psi_1^T F_1(t)\psi_1(t)} \right], \quad (23)$$

$$\psi_1(t) = \phi_{f1}(t) = P_{f1}(z^{-1})\phi_1(t), \quad (24)$$

$$\theta_2(t+1) = \theta_2(t) + F_2(t)\psi_2(t)v_2(t+1), \quad (25)$$

$$v_2(t+1) = \frac{v_2^0(t+1)}{1 + \psi_2^T F_2(t) + \psi_2(t)}, \quad (26)$$

$$F_2(t+1) = \frac{1}{\lambda_{21}(t)} \left[F_2(t) - \frac{F_2(t)\psi_2^T(t)F_2(t)}{\lambda_{21}(t) + \psi_2^T F_2(t)\psi_2(t)} \right], \quad (27)$$

$$\psi_2(t) = \phi_{f2}(t) = P_{f2}(z^{-1})\phi_2(t), \quad (28)$$

其中的 $P_{f1}(z^{-1})$ 和 $P_{f2}(z^{-1})$ 为预滤波器, 这里:

$$P_{f1}(z^{-1}) = \frac{\tilde{A}_F}{\tilde{A}_F \tilde{A}_{C1} - \tilde{B}_F \tilde{B}_{C1}} \tilde{S}, \quad (29)$$

$$P_{f2}(z^{-1}) = \tilde{S}. \quad (30)$$

4 稳定性与收敛性分析(Stability and convergence analysis)

4.1 确定环境下的稳定性分析(Stability analysis in deterministic environment)

对于可以忽略传感器的测量噪声对测控系统造成影响的确环境, 有下述定理:

定理 1 对于下述形式的参数自适应算法:

$$\tilde{\theta}(t+1) = \tilde{\theta}(t) + F(t)\phi(t)\epsilon(t+1), \quad (31)$$

$$\epsilon(t+1) = \frac{\epsilon^0(t+1)}{1 + \phi^T(t)F(t)\phi(t)}, \quad (32)$$

$$F(t+1) = \frac{1}{\lambda_1(t)} \left[F(t) - \frac{F(t)\phi(t)\phi^T(t)F(t)}{\lambda_1(t)/\lambda_2(t) + \phi^T(t)F(t)\phi(t)} \right]. \quad (33)$$

如果后验自适应误差满足如下形式:

$$\epsilon(t+1) = H(z^{-1})[\theta - \tilde{\theta}(t+1)]^T \phi(t). \quad (34)$$

根据等效反馈和等效前馈的输入输出性质, 如果

$$H'(z^{-1}) = H(z^{-1}) - \frac{\lambda_2}{2}, \quad \max[\lambda_2(t)] \leq \lambda_2 < 2 \quad (35)$$

严格正实, 可以得到

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{t=0}^N \epsilon^2(t+1) < C(\epsilon(0), \tilde{\theta}(0)), \quad 0 < C < \infty, \quad (36)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \epsilon(t+1) = 0, \quad (37)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\theta - \tilde{\theta}(t)]^T \phi(t) = 0, \quad (38)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{\theta}(t+1) - \tilde{\theta}(t)]^T F(t)^{-1} [\tilde{\theta}(t+1) - \tilde{\theta}(t)] = 0, \quad (39)$$

$$[\tilde{\theta}(t+1) - \tilde{\theta}(t)]^T F(t)^{-1} [\tilde{\theta}(t+1) - \tilde{\theta}(t)] < M_1 < \infty. \quad (40)$$

如果式(35)输出严格无源, 可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [1 + \phi^T(t)F(t)\phi(t)]\epsilon^2(t+1) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{[\epsilon^0(t+1)]^2}{1 + \phi^T(t)F(t)\phi(t)} = 0. \quad (41)$$

如果 $\forall t \geq 0$, 有

$$F(t)^{-1} \geq \alpha F(0)^{-1}, \quad F(0) > 0, \quad \alpha > 0, \quad (42)$$

那么

$$\lim_{t \rightarrow \infty} F(t)\phi(t)\epsilon(t+1) = \lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{\theta}(t+1) - \tilde{\theta}(t)] = 0, \quad (43)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\tilde{\theta}(t+k) - \tilde{\theta}(t)\| = 0, \quad k < \infty, \quad (44)$$

$$\|\tilde{\theta}(t)\| \leq M_2 < \infty. \quad (45)$$

该定理的证明请参见文献[23].

如果

$$H'_1(z^{-1}) = H_1(z^{-1}) - \frac{\lambda_{12}}{2}, \quad \max[\lambda_{12}(t)] \leq \lambda_{12} < 2, \quad (46)$$

$$H'_2(z^{-1}) = H_2(z^{-1}) - \frac{\lambda_{22}}{2}, \quad \max[\lambda_{22}(t)] \leq \lambda_{22} < 2. \quad (47)$$

严格正实, 由定理1可得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_1(t+1) = 0, \quad (48)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{[v_1^0(t+1)]^2}{1 + \psi_1^T(t)F_1(t)\psi_1(t)} = 0, \quad (49)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_2(t+1) = 0, \quad (50)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{[v_2^0(t+1)]^2}{1 + \psi_2^T(t)F_2(t)\psi_2(t)} = 0. \quad (51)$$

由反证法可以得到: $v_1^0(t+1), \|\psi_1(t)\|, v_2^0(t+1), \|\psi_2(t)\|$ 有界.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_1^0(t+1) = 0, \quad (52)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v_2^0(t+1) = 0. \quad (53)$$

如果 $S(z^{-1}), F(z^{-1})$ 的估计大致与真实值相等, 可以得到, 对于所有频率的振动扰动,

$$\left| \left(\frac{A_F A_S A_{C2} S}{\mathcal{M}} \cdot \frac{\hat{A}_F \hat{A}_S A_{C2} \hat{S}}{\mathcal{N}} \right) - 1 \right|, \quad (54)$$

$$\mathcal{M} = A_F A_{C1} [A_S A_{C2} - B_S B_{C2}] + B_F B_{C1} A_{C2} A_S,$$

$$\mathcal{N} = \hat{A}_F A_{C1} [\hat{A}_S A_{C2} - \hat{B}_S B_{C2}] + \hat{B}_F B_{C1} A_{C2} \hat{A}_S$$

总是成立. 即良好的系统辨识能够完全放松上述严格正实条件. 对于系统辨识(次级通道模型, 正反馈通道模型)较为精确的所有控制系统, 这里给出的方法在确定环境下总是稳定的.

4.2 随机环境的收敛性分析(Convergence analysis in stochastic environment)

对于不能忽略传感器的测量噪声对测控系统造成影响, 使用 $\omega(t+1)$ 表示测量噪声, 则

$$v_1(t+1) = H_1(z^{-1})[\tilde{\theta}_1 - \theta_1(t+1)]^T \psi(t) + \omega(t+1), \quad (55)$$

$$v_2(t+1) = H_2(z^{-1})[\tilde{\theta}_2 - \theta_2(t+1)]^T \psi(t) + \omega(t+1). \quad (56)$$

此时, 即使 $\theta_1(t+1) = \tilde{\theta}_1, \theta_2(t+1) = \tilde{\theta}_2$, 自适应误差也不会为零.

定理 2 对于下述形式的参数自适应算法:

$$\theta(t+1) = \theta(t) + F(t)\psi(t)v(t+1), \quad (57)$$

$$F(t+1)^{-1} = F(t)^{-1} + \lambda_2(t)\psi(t)\psi^T(t), \quad (58)$$

$$0 \leq \lambda < 2, \quad F(0) > 0.$$

假设对于 $\theta(t) = \theta$ 可以定义稳态过程 $\psi(t, \theta)$ 和 $v(t+1, \theta)$, 参数自适应算法得到的 $\theta(t)$ 属于能够定义稳态过程 $\psi(t, \theta)$ 和 $v(t+1, \theta)$ 的 D_s 域内, 假设

$$E\{\psi(t, \theta), \omega(t+1, \theta)\} = 0. \quad (59)$$

定义收敛域 D_c 为

$$D_c : \{\theta : [\tilde{\theta} - \theta]^T \psi(t, \theta)\} = 0. \quad (60)$$

如果

$$H'(z^{-1}) = H(z^{-1}) - \frac{\lambda_2}{2}, \quad \max[\lambda_2(t)] \leq \lambda_2 < 2 \quad (61)$$

是严格正实传递函数, 则有

$$P\{\lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) \in D_c\} = 1. \quad (62)$$

该定理的证明参见文献[23]. 由定理2知, 假设对于 $\theta_1(t) = \theta_1$ 可以定义稳态过程 $\psi_1(t, \theta_1)$ 和 $v_1(t+1, \theta_1)$, 参数自适应算法得到的 $\theta_1(t)$ 属于能定义稳态过程 $\psi_1(t, \theta_1)$ 和 $v_1(t+1, \theta_1)$ 的 D_{s1} 域内, 假设

$$E\{\psi_1(t, \theta_1), \omega(t+1, \theta_1)\} = 0. \quad (63)$$

假设对于 $\theta_2(t) = \theta_2$ 可以定义稳态过程 $\psi_2(t, \theta_2)$ 和 $v_2(t+1, \theta_2)$, 参数自适应算法得到的 $\theta_2(t)$ 属于能定义稳态过程 $\psi_2(t, \theta_2)$ 和 $v_2(t+1, \theta_2)$ 的 D_{s2} 域内, 假设

$$E\{\psi_2(t, \theta_2), \omega(t+1, \theta_2)\} = 0. \quad (64)$$

定义收敛域 D_{c1}, D_{c2} 为

$$D_{c1} : \{\theta_1 : [\tilde{\theta}_1 - \theta_1]^T \psi_1(t, \theta_1)\} = 0, \quad (65)$$

$$D_{c2} : \{\theta_2 : [\tilde{\theta}_2 - \theta_2]^T \psi_2(t, \theta_2)\} = 0, \quad (66)$$

如果

$$H'_1(z^{-1}) = H_1(z^{-1}) - \frac{\lambda_{12}}{2}, \quad \max[\lambda_{12}(t)] \leq \lambda_{12} < 2 \quad (67)$$

是严格正实传递函数, 并且

$$H'_2(z^{-1}) = H_2(z^{-1}) - \frac{\lambda_{22}}{2}, \quad \max[\lambda_{22}(t)] \leq \lambda_{22} < 2 \quad (68)$$

是严格正实传递函数, 则有

$$P\{\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_1(t) \in D_{c1}\} = 1, \quad (69)$$

$$P\{\lim_{t \rightarrow \infty} \theta_2(t) \in D_{c2}\} = 1. \quad (70)$$

即随机环境下的算法收敛条件为 $H'_1(z^{-1}), H'_2(z^{-1})$ 为严格正实传递函数. 与确定环境下类似, 良好的系统辨识能够完全放松上述严格正实条件, 即对于能够有较为精确模型的控制系统而言, 本研究所提出的算法在测量噪声较大的情况下也总是收敛的.

5 实验平台构建与实时振动控制实验验证 (Experimental platform construction and real time vibration control verification)

为验证各种控制算法, 以图1所示的具有固有正反馈的机械系统结构为实验对象, 搭建了如图3所示的以xPC主机-目标机为核心的实时控制系统. 采

用NI的PCI-1200板卡作为控制系统输入输出的核心板卡, 系统采样频率为1000 Hz. PCI-1200的AD端采集经过电荷放大器调理的加速度传感器信号, 而采用控制器计算的输出则通过PCI-1200的DA端输出到功率放大器, 从而加载到抑制作动器抑制系统振动. 自适应控制器的阶数等于20, 采用可变遗忘因子的Landau参数递推算法, $\lambda_1(0) = 0.99$, $\lambda_0 = 0.99$, 自适应增益矩阵的初值为10. 所有的对比实验的控制器阶数均为20, 且当控制为自适应控制器时采用相同的初值设定.

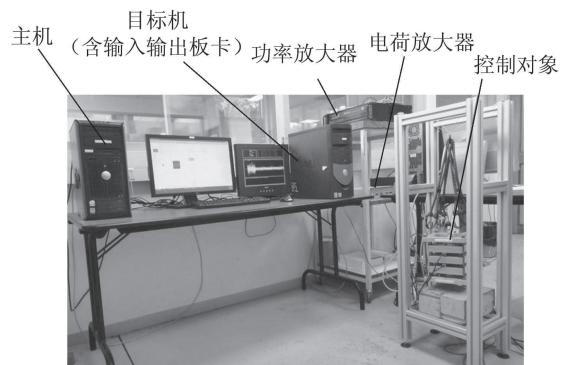


图3 振动主动控制实时实验系统照片

Fig. 3 Photo of real time active vibration control system

抑振实验中扰动作动器的扰动输入, 分别采用单频窄带扰动, 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(白噪声)作为输入信号. 对于单频窄带, 控制效果的控制时间历程和控制前后的功率谱分别如图4-5所示. 50 s之前为未施加控制的机械系统振动响应, 在50 s处施加控制后, 50 s到250 s为施加控制后的机械系统振动响应. 对于双频窄带信号, 控制效果的控制时间历程和控制前后的功率谱分别如图6和图7所示. 可以看到对于单频与双频窄带扰动, 本文给出的算法控制效果均十分理想.

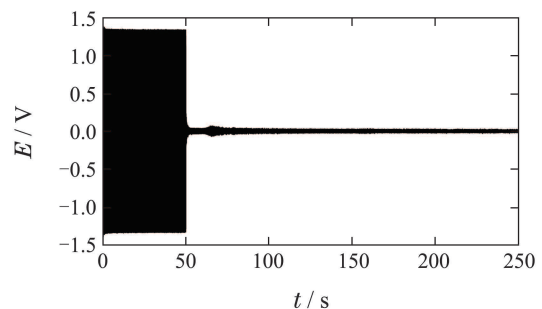


图4 单频窄带振动抑制效果

Fig. 4 Vibration control performance for a sinusoidal disturbance

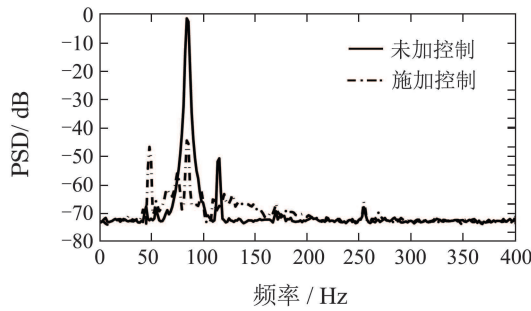


图 5 单频窄带振动控制前后功率谱对比
Fig. 5 PSD with control and without control for a sinusoidal disturbance

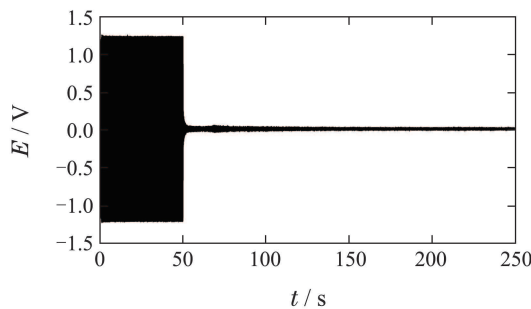


图 6 双频窄带振动抑制效果
Fig. 6 Vibration control performance for a narrow band disturbance with two sinusoidal components

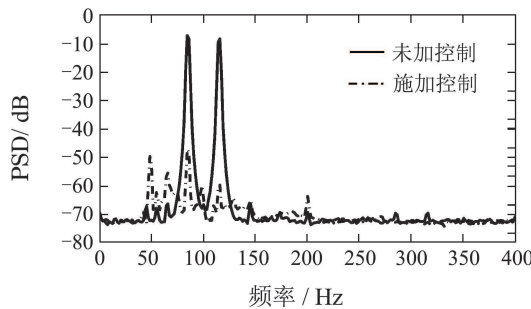


图 7 双频窄带振动控制前后功率谱对比
Fig. 7 PSD with control and without control for a narrow band disturbance with two sinusoidal components

对于宽带白噪声信号, 控制效果的控制时间历程和控制前后的功率谱分别如图8-9所示. 同样, 本文给出的控制方法能够有效抑制宽带白噪声振动.

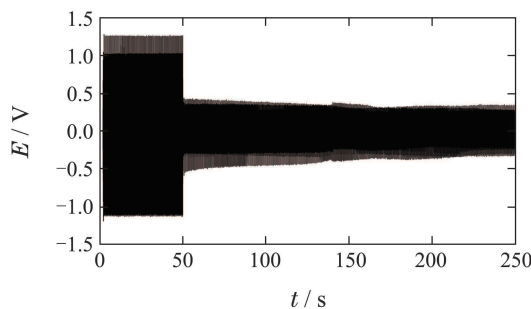


图 8 宽带白噪声振动抑制效果
Fig. 8 Vibration control performance for white noise disturbance

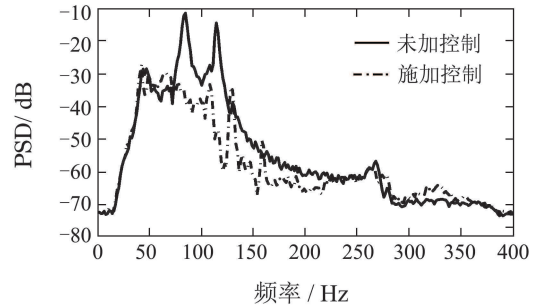


图 9 宽带白噪声振动控制前后功率谱对比
Fig. 9 PSD with control and without control for white noise disturbance

为量化对比本文提出的控制算法和文献中已有的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:

$$S_A = 20 \log_{10} \frac{\sum_{i=1}^N |d(i)|^2}{\sum_{i=1}^N |e(i)|^2}, \quad (71)$$

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_A 的单位为 dB, 如果原有扰动得到衰减, 则 S_A 的符号为负, S_A 越小意味着主动控制后原有扰动的相对衰减程度越大, 控制效果越好. 为更好的说明各算法的差异, 采用白噪声振动扰动(伪二维随机序列), 本文提出的算法的控制效果为: -23.94 dB, 在相同的实验条件与控制结构情况下, 与目前部分已公开发表算法针对同一实验平台的控制效果对比如表 1 所示.

表 1 不同控制方法的控制效果对比

Table 1 Control performance comparison for different control methods

算法	控制效果/dB
Filtered-U LMS算法 ^[22]	-15.53
MFXLMS算法 ^[23]	-15.62
文献[16]中的前馈自适应方法	-16.23
文献[17]中的自适应前馈+固定反馈方法	-20.53
文献[15]中的 H_∞ 方法	-12.37
文献[18-19]中的YK with H_∞ 方法	-16.76
文献[18-19]中的YK with PP方法	-15.56
文献[18-19]中的IIR自适应方法	-16.89
文献[20]中加滤波的IIR自适应方法	-20.62
本文给出的方法	-23.94

需要说明的是表 1 中的 Filtered-U LMS 算法长时间运行会发散, 短时间内的控制效果尽管优于其他的某些方法, 但其并无法直接应用于实际的振动控制工程中. 文献[15]中的 H_∞ 方法是目前少数考虑振动系统固有正反馈的鲁棒控制方法, 但其综合控制效果在表 1 的各种算法中最差. 改进型的自适应滤波算法如 MFXLMS 在实际控制过程中的稳定性较好, 但目前尚没有相关的完整的收敛性分析证明.

6 结论(Conclusions)

针对存在固有正反馈的机械振动系统的振动控制问题,提出了一种混合自适应振动主动控制方法,开展了理论分析与实验验证.算法稳定性与收敛性分析表明,对于系统辨识较为精确的振动控制系统,本文给出的方法在测量噪声可以忽略的条件下,总是稳定的;在不可忽略测量噪声的随机环境下,总是收敛的.相关实验结果验证了本文提出方法的有效性,能够有效抑制工程中常见的几种振动扰动.对比Landau等提出的若干鲁棒和自适应控制器,在同等实验条件下,本文给出的混合自适应控制器具有更好的控制效果,验证了本文提出方法的优越性.

致谢(Acknowledgement)

本文研究工作得到上海大学机电工程与自动化学院以及法国国家科学研究中心图像语音及自动化实验室的支持和帮助,在此致以诚挚的感谢.由衷感谢法国国家科学研究中心Ioan Doré Landau教授, John Martinez教授, Luc Dugard教授, 法国国家信息与自动化研究院Tudor Bogdan Airimitoiaie研究员, 法国洛林大学Marouane Alma副教授, 对本研究工作提供的支持和帮助.

参考文献(References):

- [1] KORKMAZ S. A review of active structural control: challenges for engineering informatics [J]. *Computers & Structures*, 2011, 89(23): 2113 – 2132.
- [2] GAUR S. Vibration control of bus suspension system using PI and PID controller [J]. *International Journal of Advances in Engineering Sciences*, 2013, 3(3): 94 – 99.
- [3] 李生权, 李娟, 莫岳平, 等. 压电加筋壁板结构的多模态自抗扰振动控制 [J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1573 – 232. (LI Shengquan, LI Juan, MO Yueping, et al. Piezoelectric multi-mode vibration control of stiffened plate using active disturbance rejection method [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1573 – 232.)
- [4] OUYANG H, RICHIEDEI D, TREVISANI A. Pole assignment for control of flexible link mechanisms [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2013, 332(12): 2884 – 2899.
- [5] WANG Y, DYKE S. Modal-based LQG for smart base isolation system design in seismic response control [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(5): 753 – 768.
- [6] RITTENSCHÖBER T, SCHLACHER K. Observer-based self sensing actuation of piezoelectric structures for robust vibration control [J]. *Automatica*, 2012, 48(6): 1123 – 1131.
- [7] LI T, MA Y. Robust vibration control of flexible tensegrity structure via μ synthesis [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(2): 173 – 186.
- [8] GUO B Z, JIN F F. The active disturbance rejection and sliding mode control approach to the stabilization of the Euler – Bernoulli beam equation with boundary input disturbance [J]. *Automatica*, 2013, 49(9): 2911 – 2918.
- [9] HE W, GE S S, ZHANG S. Adaptive boundary control of a flexible marine installation system [J]. *Automatica*, 2011, 47(12): 2728 – 2734.
- [10] CHEN C W, CHEN P C, CHIANG W L. Modified intelligent genetic algorithm-based adaptive neural network control for uncertain structural systems [J]. *Journal of Vibration and Control*, 2013, 19(9): 1333 – 1347.
- [11] 郑凯, 陈杰, 杨义勇. 压电自适应桁架结构智能振动控制 [J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(7): 943 – 947. (ZHENG Kai, CHEN Jie, YANG Yiyong. Intelligent vibration control of adaptive piezoelectric truss structure [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(7): 943 – 947.)
- [12] ZHANG H, WANG R, WANG J, et al. Robust finite frequency H_∞ static-output-feedback control with application to vibration active control of structural systems [J]. *Mechatronics*, 2014, 24(4): 354 – 366.
- [13] PALACIOS-QUINONERO F, RUBIO-MASSEGU J, ROSSELL J M, et al. Feasibility issues in static output-feedback controller design with application to structural vibration control [J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(1): 139 – 155.
- [14] LI T, MA Y. Robust vibration control of flexible tensegrity structure via μ synthesis [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(2): 173 – 186.
- [15] ALMA M, MARTINEZ J J, LANDAU I D, et al. Design and tuning of reduced order h-infinity feedforward compensators for active vibration control [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(2): 554 – 561.
- [16] LANDAU I D, ALMA M, AIRIMITOIAIE T B. Adaptive feedforward compensation algorithms for active vibration control with mechanical coupling [J]. *Automatica*, 2011, 47(10): 2185 – 2196.
- [17] ALMA M, LANDAU I D, AIRIMITOIAIE T B. Adaptive feedforward compensation algorithms for avc systems in the presence of a feedback controller [J]. *Automatica*, 2012, 48(5): 982 – 985.
- [18] LANDAU I D, AIRIMITOIAIE T B, ALMA M. A Youla-Kucera parameterized adaptive feedforward compensator for active vibration control with mechanical coupling [J]. *Automatica*, 2012, 48(9): 2152 – 2158.
- [19] LANDAU I D, AIRIMITOIAIE T B, ALMA M. IIR Youla – Kucera parameterized adaptive feedforward compensators for active vibration control with mechanical coupling [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(3): 765 – 779.
- [20] AIRIMITOIAIE T B, LANDAU I D. Improving adaptive feedforward vibration compensation by using ‘Integral+ Proportional’ adaptation [J]. *Automatica*, 2013, 49(5): 1501 – 1505.
- [21] LANDAU I D, LOZANO R, M'SAAD M, et al. *Adaptive Control: Algorithms, Analysis and Applications* [M]. Berlin: Springer, 2011.
- [22] FRAANJE R, VERHAEGEN M, DOELMAN N. Convergence analysis of the filtered- u LMS algorithm for active noise control in case perfect cancellation is not possible [J]. *Signal Processing*, 2003, 83(6): 1239 – 1254.
- [23] KRSTAJIC B, ZECEVIC Z, USKOKOVIC Z. Increasing convergence speed of FxLMS algorithm in white noise environment [J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2013, 67(10): 848 – 853.

作者简介:

高志远 (1986–), 男, 博士, 讲师, 目前研究方向为振动主动控制、自适应控制, E-mail: gaozhiyuan86@shu.edu.cn;

朱晓锦 (1965–), 男, 博士, 教授, 目前研究方向为先进测控与信息处理、智能结构主动监控, E-mail: mgzhuxj@shu.edu.cn;

张合生 (1981–), 男, 高级工程师, 目前研究方向为振动主动监控、嵌入式控制系统, E-mail: 8103250412@sina.com;

李培江 (1972–), 男, 副教授, 目前研究方向为自适应控制、嵌入式控制系统, E-mail: lpj669@163.com.