

Study on Iteration Reproduction Control of Single-Axis Electro-Hydraulic Angular Vibration Table

Lipeng Yuan^{1,2*}, Liming Yuan³, Haijin Li⁴

¹School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin

²Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Cornell University, Ithaca, USA

³Capital Aerospace Machinery Company, Beijing

⁴Heilongjiang Agriculture Engineering Vocational College, Harbin

Email: *hitylp@126.com

Received: Nov. 2nd, 2012; revised: Nov. 12th, 2012; accepted: Nov. 22nd, 2012

Abstract: Hydraulic angular vibration table is a kind of complex and non-linear system. Applying traditional controller to the angular vibration system, it is difficult to make the control performance to a high level. Aiming at the demand of high frequency response for the random vibration system, this paper built up the mathematical model of hydraulic motor controlled by valves, and according to the principle of pole assignment, this paper designed the three variables controller for the electro-hydraulic servo angular vibration table, which can extend the system bandwidth. This paper proposes the random vibration composite iteration control algorithm based on the frequency response estimator using self-adapting filter. The control precision of the different frequency response estimators was analyzed. Comparing simulation with experiment, the results show that three variables controller is favorable to improve system's frequency response and the frequency response estimator using self-adapting filter is accurate for random vibration replication control.

Keywords: Three Variables Controller; Frequency Response Estimator; Random Vibration Iteration Control Algorithm

单轴电液角振动台的迭代复现控制研究

袁立鹏^{1,2*}, 袁立铭³, 李海金⁴

¹哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨

²康奈尔大学机械与航空航天工程学院, 伊萨卡, 美国

³首都航天机械公司, 北京

⁴黑龙江农业工程职业学院, 哈尔滨

Email: *hitylp@126.com

收稿日期: 2012年11月2日; 修回日期: 2012年11月12日; 录用日期: 2012年11月22日

摘要: 液压角振动台是十分复杂的非线性系统, 应用传统的控制系统设计方法很难满足其控制要求。针对随机振动要求振动试验系统具有高频响性能的特点, 建立了阀控马达系统的数学模型, 根据极点配置原理设计了有效拓展系统频宽的三状态控制器。提出基于自适应滤波器频响函数辨识方法进行复合迭代控制, 并研究了不同阀控马达频响函数估计方法对随机复现振动控制精度的影响效果。将仿真结果与实验数据进行对比分析, 验证了三状态控制策略拓展系统频宽的有效性和自适应滤波器频响函数估计的准确性。

关键词: 三状态控制; 频响函数估计; 随机复现振动算法

1. 引言

振动台是实验室内模拟真实的振动环境的重要

*通讯作者。

实验设备, 其中电液伺服角振动台作为一种独特的环境模拟设备在导弹、火箭、卫星等国防领域有着重要的作用。从动力学的角度分析可知, 电液伺服角振动

台是一个模型复杂的非线性、存在耦合、变负载、变参数的多变量系统^[1]。应用传统的控制系统设计方法，很难满足其控制要求。国内近年来对液压角振动台的控制策略进行了理论分析^[2]，得出一些指导性的结果，但控制效果仍较难满足实际要求。角振动台的工作模式要求系统真实的模拟实际的振动环境，只对电液伺服阀控马达角振动台进行正弦振动控制已经无法满足要求，应用三状态控制策略扩展系统频宽，进行随机振动控制研究在角振动工程技术领域显得尤为重要。与国内相比，国外对液压角振动台的研究较为深入^[3]。从国外的先进经验可以看出，基于自适应滤波频响函数辨识的迭代控制算法、具有鲁棒性的三状态控制策略是解决角振动台控制品质的有效途径。

针对电液伺服角振动台伺服性能的需求，建立阀控马达完整的数学模型，应用三状态控制策略扩展系统频宽，提出基于自适应滤波器频响函数辨识方法进行复合迭代控制，通过仿真与实验对比，验证此复合迭代控制方法对电液伺服角振动台随机振动信号实时控制的有效性。

2. 阀控马达系统数学模型建立及控制策略

2.1. 角振动台阀控马达驱动系统建模

伺服马达与各框架的连接视为刚性连接，由阀控马达动力机构三个基本方程可得从伺服阀阀芯位移 $X_v(s)$ 到伺服马达摆角位移 $\theta(s)$ 的传递函数为：

$$\theta(s) = \frac{\frac{K_q}{D_m} X_v(s) - \frac{K_{ce}}{D_m^2} \left(1 + \frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s \right) T_L(s)}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2 \frac{\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (1)$$

式中 ω_h ——无阻尼液压固有频率(rad/s); ξ_h ——液压阻尼比, 无量纲。

当不考虑外负载力矩时，可得阀控马达液压力机构从伺服放大器电压 $U(s)$ 到伺服马达摆角位移 $\theta(s)$ 的开环传递函数为：

$$\frac{\theta(s)}{U_i(s)} = \frac{\frac{K_a K_{sv}}{D_m}}{s \left(\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\xi_{sv}}{\omega_{sv}} s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (2)$$

以现有单轴液压角振动台为例，马达动力机构的液压固有频率为 $\omega_h = 120 \text{ rad/s}$ ，阻尼比 $\xi_h = 0.2$ ，弧度排量 $D_m = 6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{rad}$ ，负载惯量

$J = 5.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ；阀的固有频率 $\omega_{sv} = 358 \text{ rad/s}$ ，阻尼比 $\xi_{sv} = 0.6$ ，流量增益 $K_{sv} = 0.0315 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{A})$ ，伺服放大器的开环增益 $K_a = 0.004 \text{ A/V}$ 。

根据以上参数可得实际系统开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{2.1}{s \left(\frac{s^2}{120^2} + \frac{2 \times 0.2}{120} s + 1 \right) \left(\frac{s^2}{358^2} + \frac{2 \times 0.6}{358} s + 1 \right)} \quad (3)$$

2.2. 三状态控制策略研究

振动系统一般要求高频响^[4]，由以上分析可知现有角振动台实验系统液压固有频率只有 19 Hz 左右，而且液压力机构的阻尼比很小，系统稳定裕量低。这样的系统要想使频宽达到实验要求的 40 Hz，必须对系统进行补偿。基于现代控制领域的极点配置理论基础，本文采用基于自适应滤波原理的频响函数估计的三状态控制策略。电液伺服角振动台的控制原理如图 1 所示。

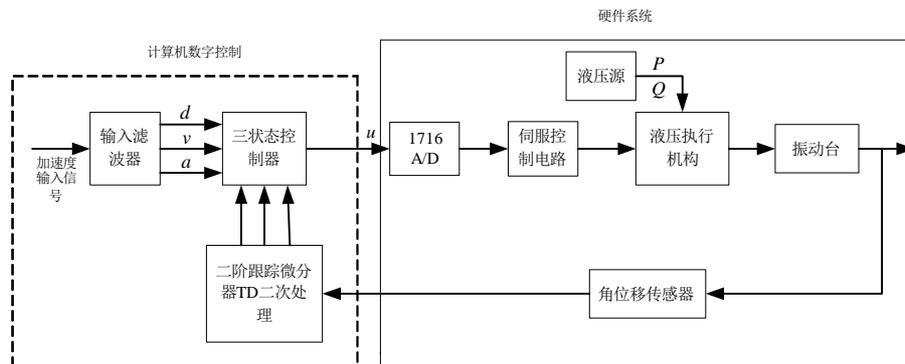


Figure 1. Block diagram of three variable controller of electro-hydraulic servo vibration table
图 1. 电液伺服振动台的三状态控制原理图

用三状态顺馈方法对消系统闭环传函中距离虚轴较近的极点, 扩展系统的频宽, 同时用三状态反馈方法来改善系统的稳定性, 提高系统的阻尼比, 即实现了电液伺服角振动台的三状态控制。将原理图简化和建模处理后, 得到角振动系统三状态控制方块图如图 2 所示。

根据极点配置原理设计三状态控制器, 反馈控制中, 通过调整前置放大器的增益和位移、速度、加速度的反馈系数可以使系统接近所谓的“三阶最佳”形式。三状态顺馈控制的作用是三状态反馈调节后, 对消闭环传函中离虚轴较近的极点, 达到扩展系统频宽的目的。设计公式为:

$$K_{df} = \frac{\omega_r \omega_{nc}^2}{\omega_h^2 K_v}, \quad K_{vf} = K_{df} \left(\frac{2\xi_{nc}}{\omega_{nc}} + \frac{1}{\omega_r} \right) - \frac{1}{K_v}$$

$$K_{df} = K_{df} \left(\frac{2\xi_{nc}}{\omega_r \omega_{nc}} + \frac{1}{\omega_{nc}^2} \right) - \frac{2\xi_h}{K_v \omega_h}, \quad K_{dr} = K_{df},$$

$$K_{vr} = K_{dr} \frac{2\xi_{nc}}{\omega_{nc}}, \quad K_{ar} = K_{dr} / \omega_{nc}^2。$$

3. 振动系统频响函数估计方法研究

在随机振动控制中, 仅依靠伺服控制系统是无法达到振动控制所要求的精度的。为了提高振动控制精度, 需要对振动系统进行振动控制。振动控制的基本原理是基于被控系统的频响函数计算系统阻抗, 然后依据系统阻抗对驱动信号进行修正, 使得信号的输出满足控制精度要求。因此频响函数估计是振动控制的基础, 其估计结果直接关系振动控制的精度。

3.1. H_1 频响函数估计

H_1 估计法所用的模型是假设输入信号测量端不存在噪声 ($\varepsilon_d(t) = 0$), 且输出测量噪声 $\varepsilon_c(t)$ 与输入信

号 $d(t)$ 互不相关, H_1 频响函数估计法的计算公式为:

$$H_1(f) = G_{cd}(f)G_{dd}(f)^{-1} \quad (4)$$

式中: $H_1(f)$ —— H_1 估计法频响函数估计结果;
 $G_{cd}(f)$ —— 输入信号与输出信号的互功率谱均值;
 $G_{dd}(f)$ —— 输入信号的自功率谱均值。 $H_1(f)$ 与系统真实频响函数 $H(f)$ 的关系为

$$H_1(f) = H(f) / \left(1 + G_{\varepsilon_d \varepsilon_d} / G_{uu} \right) \quad (5)$$

式中: G_{uu} —— 真实输入的自功率谱均值; $G_{\varepsilon_d \varepsilon_d}$ —— 输入噪声的自功率谱均值。

传统的频响函数估计方法 H_1 法, 原理简单, 易于理解, 在实际的工程应用比较多, 传统的振动控制系统也大多采用 H_1 法进行频响函数估计。 H_1 估计法假设系统在输入端没有噪声, 而实际系统在输入端是有噪声的, 这就使得频响函数 H_1 法的估计结果存在误差。

3.2. 基于自适应滤波原理的频响函数估计

所谓自适应滤波, 就是利用前一时刻已获得的滤波器参数结果, 自动的在线调节当前时刻的滤波器参数, 以适应信号和噪声未知的或随时间变化的统计特性, 从而实现最优滤波。自适应滤波器由两个部分组成, 一部分是数字滤波器, 用来完成希望的信号处理, 另一部分是自适应算法, 用来调节滤波器权系数。

自适应滤波依靠递归算法进行其运算, 这样使得它可以在有关信号特征的完整知识不能得到的情况下完成滤波运算。在平稳环境下, 该算法经成功迭代后收敛于某种统计意义上的最优维纳解; 在非平稳环境下, 该算法能提供一种跟踪能力, 跟随系统的参数变化。如图 3 所示是维纳滤波器的输入输出关系。

$s(n)$ 表示信号的真值, $v(n)$ 表示噪声。其中 $y(n)$

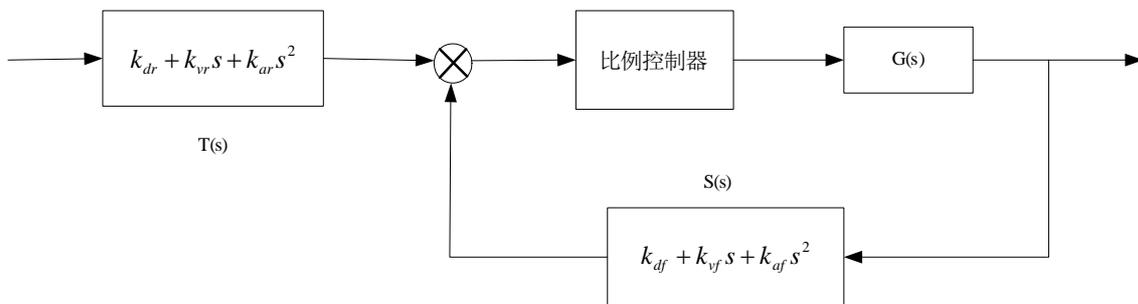


Figure 2. Block diagram of there variable control system
 图 2. 角振动系统三状态控制方块图

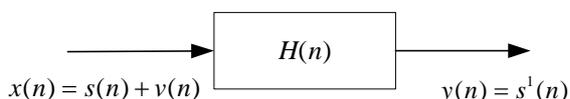


Figure 3. Input and output of Wiener filter
图 3. 纳滤波器的输入输出关系

表示 $s(n)$ 的估计值, $s^1(n)$ 与 $s(n)$ 的均方误差 $E[e^2(n)]$ 最小, 即

$$E[e^2(n)] = E[(s - s^1)^2] = \min$$

利用横向结构的FIR滤波器实现自适应滤波器是最常见的一种方法, 也称为线性组合器, 它利用正规直接形式实现全零点传输函数, 而不是采用反馈环节。对于这种结构, 输出信号 $y(n)$ 是滤波器系数的线性组合, 它产生具有唯一最优解的二次均方误差数, FIR数字滤波器的标准形式公式为:

$$H(z) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{M-1}z^{1-M} = \sum_{i=0}^{M-1} b_i z^{-i} \quad (6)$$

LMS算法是使滤波器的输出信号与期望输出信号之间的均方误差 $E[e^2(n)]$ 最小。最小二乘(LS, Least-square)算法旨在使期望信号与模型滤波器输出之差的平方和达到最小。

由于主输入端不可避免地存在干扰噪声, 自适应滤波算法将产生参数失调噪声。干扰噪声 $v(n)$ 越大, 则引起的失调噪声就越大。减小步长因子 u 可减小自适应滤波算法的稳态失调噪声, 提高算法的收敛精度。然而步长因子 u 的减小将降低算法的收敛速度和跟踪速度。步长大于算法收敛所要求的最小步长时, 算法就无法收敛。变步长自适应滤波算法的步长调整原则是在初始收敛阶段或未知系统参数发生变化时, 步长应比较大, 以便有较快的收敛速度和对时变系统的跟踪速度, 而在算法收敛后, 不管主输入端干扰信号有多大, 都应保持很小的调整步长以达到很小的稳态失调噪声^[5]。

根据步长调整原则和上述分析, 采用 sigmoid 函数变步长 LMS 自适应滤波算法, 该算法中步长是 $e(n)$ 的 sigmoid 函数, 算法公式为:

$$\mu(n) = \beta(1 - \exp(-\alpha|e(n)|))$$

$$e(n) = d(n) - \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}(n)$$

$$\mu(n) = \beta(1 - \exp(-\alpha|e(n)|))$$

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + 2\mu(n)e(n)\mathbf{x}(n) \quad (7)$$

基于自适应滤波器的频响函数辨识方法具有自适应滤波的特点。自适应滤波器的参数根据前一时刻的输入输出进行实时调整, 以适应信号和噪声的未知的或随时间变化统计特性, 以达到最优滤波效果。因此基于自适应滤波器的频响函数辨识方法是一种能够随系统频率特性变化而实时调整的系统频率特性估计方法, 并且不需要关注信号噪声的统计特性。

3.3. 仿真分析

角振动系统频响函数估计的仿真分析是在建立系统的 Simulink 模型基础上进行的。图 4 为分别采用 H_1 法和自适应滤波方法对该模型的频响函数辨识结果。图 5 为对该不变模型分别采用三帧不同随机信号的自适应滤波方法频响函数辨识结果。

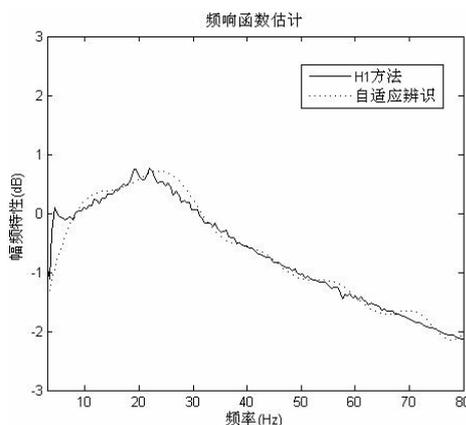


Figure 4. Results of H_1 estimator and estimator using self-adapting filter
图 4. H_1 和自适应辨识结果

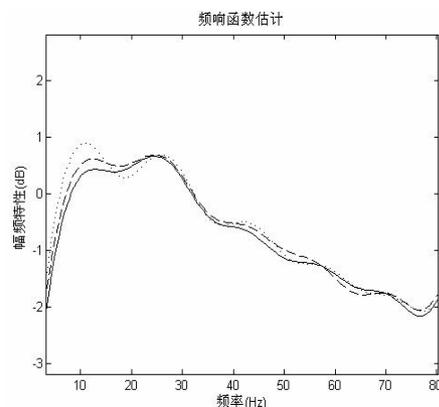


Figure 5. Results of self-adapting estimator after 3 iteration compensation
图 5. 三次自适应辨识结果

由 4 图可知自适应滤波方法频响函数辨识结果精度明显高于 H_1 法, 同时变化更加平缓。鉴于 H_1 方法是一种在工程领域应用较多的比较传统、稳定的频响函数估计方法的考虑, 可知基于自适应滤波器理论的系统频响函数辨识方法具有可行性。由图 5 可知, 用三帧不同的随机信号对同一系统的三次基于自适应滤波原理的频响函数辨识结果基本一致, 验证了该辨识方法的稳定性, 即辨识算法的参数不会随着输入信号的不同而变化, 对同一不变系统的辨识结果具有唯一性。

4. 随机复现控制算法研究

要模拟一种振动形式, 将时域信号或者功率谱对应的时域信号直接输入到振动台系统, 响应信号或响应信号的功率谱与期望的振动往往会有很大偏差。产生偏差的原因主要有两个方面: 一是系统频宽的限制, 二是系统非线性的影响。

为了提高控制精度, 准确地复现期望的振动, 还需要通过振动控制对驱动信号进行迭代补偿, 减小响应信号(功率谱密度)与期望信号的偏差, 形成一种真正意义上的振动闭环控制。因此振动台控制系统包括两部分: 振动控制系统和伺服控制系统。二者关系如图 6 所示。

随机振动复现迭代控制算法的原理如图 7 所示。利用系统阻抗和参考谱与响应谱的偏差, 对驱动谱进行修正, 使得系统的响应能够高精度地复现出随机振动所要求的形式(功率谱或波形)。

从图中可以看出, 随机振动复现迭代控制算法可以分为以下六个步骤:

- 1) 估计被测系统的频响函数。
- 2) 基于频响函数估计值计算系统阻抗。
- 3) 测量系统在给定激励下的响应信号, 估计响应信号的功率谱(幅值谱)。
- 4) 将参考谱与响应谱作差, 计算误差谱。

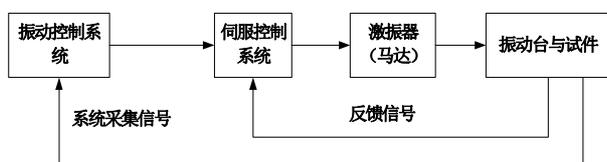


Figure 6. Structure of vibration test control system
图 6. 随机振动复现控制算法的原理图

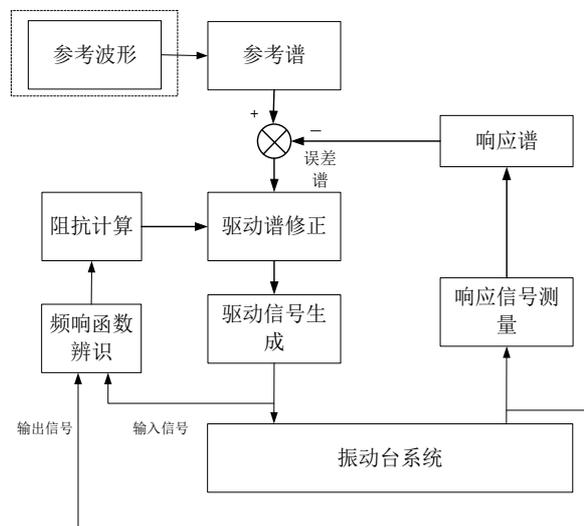


Figure 7. Principle figure of random vibration replication iteration algorithm

图 7. 随机振动复现迭代控制算法原理图

5) 利用系统阻抗及误差谱对驱动谱进行修正。

将修正后的驱动谱进行频域到时域的转换, 需要依次经频域随机化、时域随机化过程转换为时域驱动信号(为显示清晰, 图中没有对这两个过程进行细化), 驱动平台运动。

5. 实验曲线

5.1. 频响函数辨识实验

复现振动实验共迭代了 4 次, 每一次的频响函数辨识均采用了 H_1 法和基于自适应滤波器的辨识方法。由于每次振动的初始条件不一样, 同时实际系统是一个慢时变系统。因此 4 次频响函数辨识结果会有差别。4 次的系统频响函数辨识结果如图 8 所示。

5.2. 功率谱复现控制迭代实验

功率谱复现控制迭代实验共进行了 2 组, 每一组迭代了 4 次。第一组的迭代实验中, 功率谱修正的频响函数辨识结果是基于 H_1 方法。第二组的迭代实验中, 功率谱修正的频响函数辨识结果是基于自适应滤波器的频响函数辨识方法。迭代结果如图 9 所示。

由两组迭代实验结果可知, 基于自适应滤波器的频响函数辨识功率谱复现控制振动实验经过四次迭代后可以良好跟踪理想功率谱密度(包括功率谱的上升段、平直段、下降段), 其功率谱复现控制效果及精

单轴电液角振动台的迭代复现控制研究

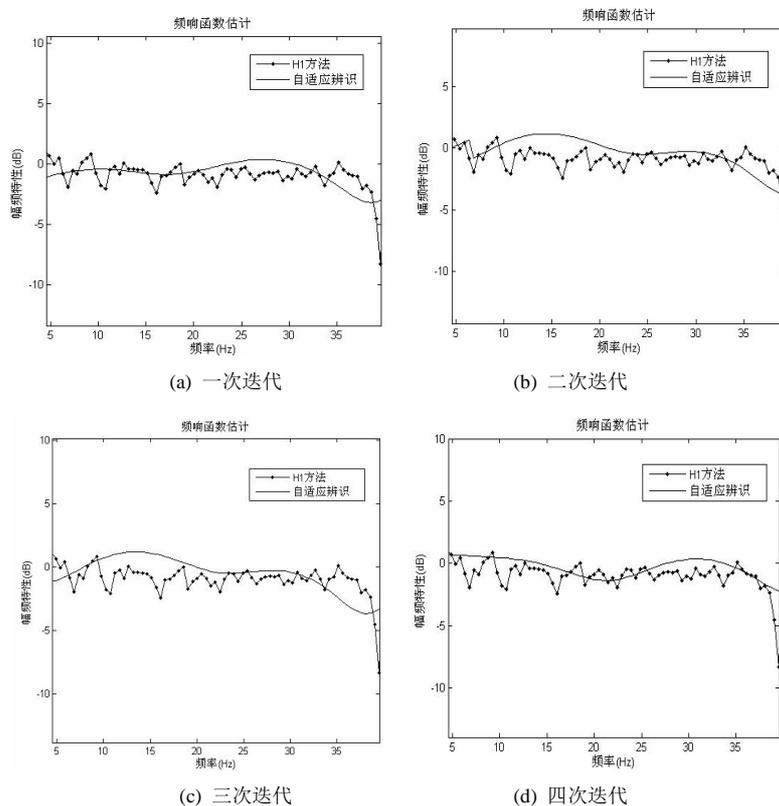


Figure 8. Results of FRF estimated after 4 iteration compensation
 图 8. 四次的系统频响函数辨识结果

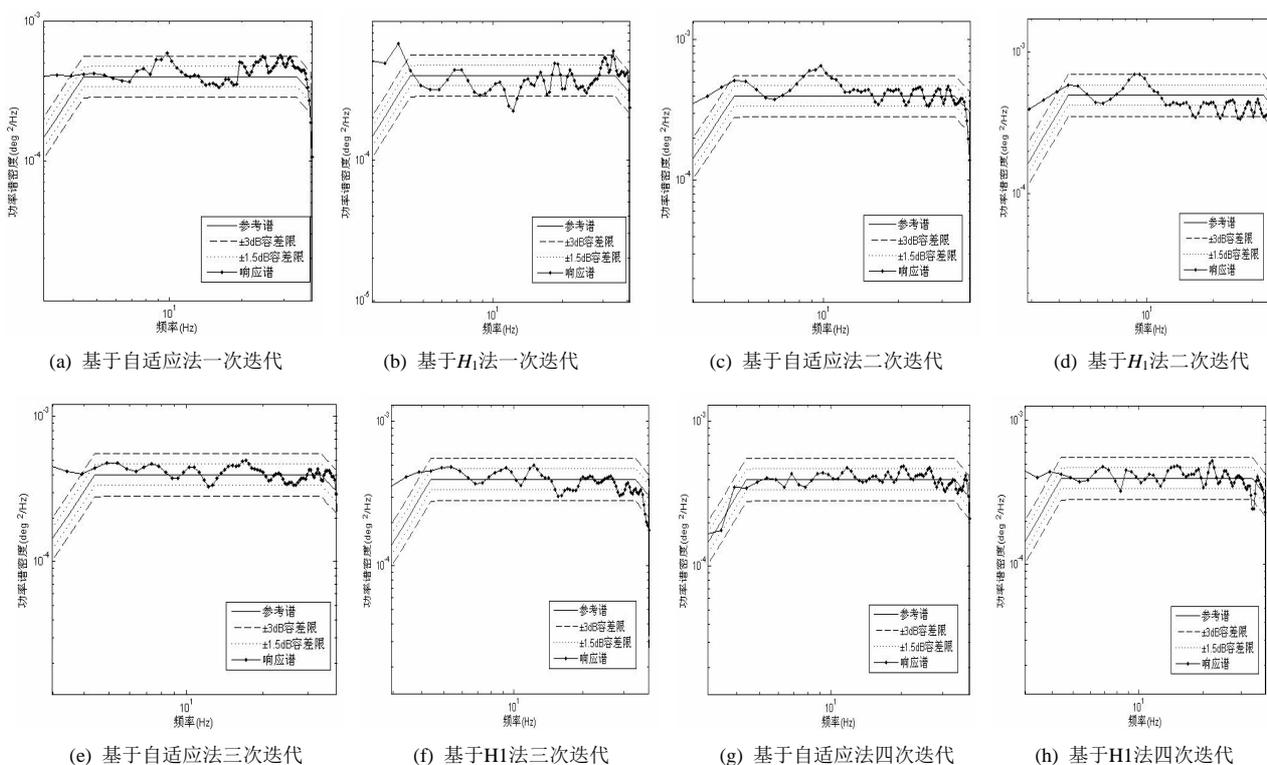


Figure 9. Experimental results of PSD replication after iteration compensation
 图 9. 功率谱复现迭代实验结果

度明显好于 H_1 法频响函数估计的控制算法。

6. 结论

针对电液伺服角振动台伺服性能的需求, 研究了改善振动系统频率特性的伺服控制策略。在建立阀控马达的数学模型基础上, 应用三状态控制器扩展系统频宽, 提出基于自适应滤波器频响函数辨识方法进行随机振动复现迭代控制, 并比较分析了不同频响函数辨识方法对振动试验精度影响情况, 通过仿真与实验对比, 验证此复合迭代控制方法对电液伺服角振动台随机振动信号实时控制的有效性。

参考文献 (References)

- [1] B. Peeters, J. Debillé. MIMO random vibration control algorithm and simulations. Proceedings of the 72nd Shock and Vibration Symposium, San Destin, 2001: 116-122.
- [2] M. Tanka, Y. Kaneda. A fast projection algorithm for adaptive filtering. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science, 1995, E78-A(10): 60-68.
- [3] R. Pintelon, J. Schoukens. Measurement of frequency response functions in the presence of correlated input/output errors. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, 2001: 618-626.
- [4] 关广丰, 从大成, 韩俊伟, 李洪人. 6 自由度随机振动控制算法[J]. 机械工程学报, 2008, 9: 56-60.
- [5] 倪镜根, 李锋. 一种新的变步长最小均方自适应滤波算法[J]. 信息和电子工程, 2008, 20(3): 10-16.