

基于迭代学习的液压角振动台控制策略研究

袁立鹏^{1,2}, 崔淑梅², 靳 蒙¹

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院; 2. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

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。引入迭代学习控制算法的非线性控制策略,针对控制系统的稳定性以及迭代学习的收敛性,提出复合迭代学习控制算法,并从频域角度给出其收敛性条件。将仿真结果与实验数据进行对比分析,结果表明:系统压力 12 MPa 条件下,采用该方法角振动台内框具有 20 Hz(峰—峰值 0.4°)的正弦响应能力,且其相位滞后不超过 10°,幅值误差不大于 ±10%,验证了此控制策略的有效性。该复合迭代学习控制策略不仅拓宽了系统频带,而且改善了系统输出对期望信号输入的跟踪精度,为液压角振动台的高性能实时控制开辟了新途径。

关键词: 液压角振动台; 迭代学习; 非线性

中图分类号: TP273.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-1328(2010)03-0902-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.03.045

0 引言

电液伺服角振动台是为满足工业领域的特殊要求而发展起来的振动环境模拟试验设备,它可以在实验室环境下模拟飞机、导弹、飞船等元件及系统在实际工作条件下的动载荷。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,但控制效果仍难满足实际要求。角振动台的工作模式要求系统对周期性期望信号进行高精度跟踪,对于具有重复运动规律的系统,可以将上一运动周期得到的信息应用到下一周期的控制中,从而提高系统的鲁棒性、动态响应速度和精度。相比之下,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,基于迭代学习算法、具有鲁棒性的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,提出复合迭代非线性控制策略,并对其收敛性条件进行分析,通过仿真与实验对比,验证此控制方法对电液伺服角振动台周期性振动信号实时控制的有效性。

1 电液伺服角振动台

电液伺服角振动台分为立式和卧式两种布局型式,立式振动台的外框轴垂直于水平面,卧式振动台的外框轴平行于地平面。内框架结构多数为圆盘式,少数为 O 型。由于在内框架上安装被试件,而被试件前方必须有足够大的视场范围,因此,重力偏载常常是角振动台结构上所固有的特点。同时,由于有些飞行器是靠自旋转稳定的,再如巡航导弹在寻找大目标过程中,其偏航角度有可能接近 360°,甚至绕某一目标连续旋转,因此要求角振动台能够模拟飞行器在飞行过程中连续转动时的振动载荷,本文采用新型连续回转电液伺服马达作为驱动装置满足此要求^[4]。图 1 为实验室现有 985 工程资助的低频三轴液压角振动台照片。

由图可知此三轴角振动台为立式结构。立式结构主要有两个优点:一是前方和上方是敞开的,便于装卸和观察被试件;二是当转台实现方位和俯仰运动使框架处在不同位置时,框架自身重力引起的静态变形的差别不大,这一点对设计高精度转台是有利的。其主要缺点是外框架的动态刚度偏低。

2 迭代学习控制的基本原理

迭代学习控制的目标是要获得一个控制驱动信



图 1 低频三轴液压角振动台照片

Fig. 1 The photo of low frequency three-axis hydraulic angle vibration table

号,使系统输出精确地跟踪理想输出。设在第 k 次迭代中,时间为 $[0, T]$,系统的控制输入为 $u_k(t)$, T 为迭代周期,系统响应量测值为 $y_k(t)$ 。在第 k 次迭代结束后,根据期望信号 $y_d(t)$ 和第 k 次的实际检测值 $y_k(t)$ 可得第 k 次迭代误差:

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \quad (1)$$

依据误差 $e_k(t)$ 或误差变化率 $\dot{e}_k(t)$ 可得一个输入修正值 $\delta u_k(t)$, 其与 $u_k(t)$ 构成第 $k+1$ 次迭代控制输入 $u_{k+1}(t)$, 循环往复,便可构成迭代学习非线性控制策略,由于此控制方法将上一运动周期的信息应用到下一周期控制中,从而提高了系统的鲁棒性、动态响应速度和精度。其突出优点为:在系统运行过程中,可以在线、离线对未知信息进行学习,不断改善系统的性能;只要系统承受的未知干扰每一次均以同样的规律和方式出现,学习控制便能有效地削弱乃至消除其影响;迭代学习控制算法简单,不需要辨识系统参数,对于非线性、强耦合、难于建模的工业控制对象周期重复性轨迹控制问题具有独特的控制效果^[5]。

在传统的迭代学习控制研究中,一般假设^[6]:

- (1) 系统每次时间间隔是有限的固定时间间隔;
- (2) 系统的期望轨迹总是预先给定且已知;
- (3) 每次运行时,系统的初始条件相同;
- (4) 系统的动态结构在每次运行中保持不变;
- (5) 系统的每次运行输出可测量;
- (6) 存在唯一的理想输入使得系统的状态和输出满足期望轨迹。

然而在实际中,许多动态系统无法满足上述条

件,因此需要实时调整系统输入,使系统输出尽量逼近期望输出。

3 复合迭代学习控制器结构

此复合迭代学习控制器采用闭环 PD 型^[7-8] 迭代学习率,学习算法表述如下:

$$\begin{aligned}
 u_{k+1}(t) &= f(u_k(t), e_{k+1}(t)) \\
 &= u_k(t) + \alpha e_{k+1}(t) + \beta \dot{e}_{k+1}(t), \quad (2) \\
 kT \leq t &\leq (k+1)T, \quad k = 0, 1, 2, \dots
 \end{aligned}$$

式中: T 为学习周期; α, β 分别为比例、微分学习因子矩阵。

初始输入 $u_0(t)$ 应使闭环系统保持稳定,期望输出 $y_d(t)$, $t \in [0, T]$ 应满足周期为 T 的条件。

此复合迭代学习控制器的设计采用前向通道控制器加迭代学习控制器的复合迭代控制策略。前向通道控制器主要针对控制对象的稳定性以及带宽对系统进行校正;而迭代学习控制器则应保证系统对期望轨迹误差的收敛性。复合迭代学习控制器结构如图 2 所示。

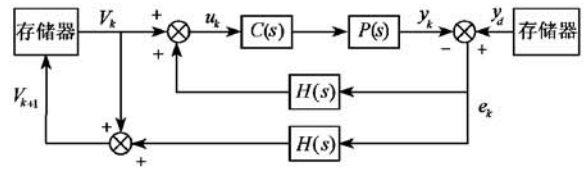


图 2 复合迭代学习控制器结构图

Fig. 2 The structural of the multi-iteration-learning-control

当迭代学习次数 k 趋向于正无穷时,如果 $e_k(t)$ 在 $[0, T]$ 上一致趋于零,则称迭代学习是收敛的。收敛性是迭代学习控制中最重要的影响因素之一。只有迭代学习是收敛的,迭代才有实际的意义。

对于如图 2 结构的复合迭代学习控制系统,假设被控对象、前向通道控制器和迭代学习率的传递函数分别为 $P(s)$, $C(s)$ 和 $H(s)$ 。

$$\text{令 } G(s) = C(s) \cdot P(s)$$

$$\text{有 } y_k(s) = u_k(s) \cdot G(s),$$

$$u_k(s) = v_k(s) + H(s) \cdot e_k(s)$$

$$u_{k+1}(s) = v_{k+1}(s) + H(s) \cdot e_{k+1}(s)$$

$$\text{又 } v_{k+1}(s) = u_k(s)$$

$$\text{所以 } u_{k+1}(s) = u_k(s) + H(s) \cdot e_{k+1}(s)$$

可知此迭代学习为闭环算法。由于闭环算法利用了系统的当前信息,所以具有很好的收敛性和鲁棒性,而且此闭环迭代学习控制只需要较少的迭代

次数即可实现对期望轨迹的无差跟踪,极大的提高了控制效果。同时:

$$\begin{aligned}
 e_k(s) &= y_d(s) - y_k(s) = y_d(s) - u_k(s) \cdot G(s) \\
 e_{k+1}(s) &= y_d(s) - y_{k+1}(s) = y_d(s) - u_{k+1}(s) \cdot G(s) \\
 &= y_d(s) - [u_k(s) + H(s) \cdot e_{k+1}(s)] \cdot G(s) \\
 e_{k+1}(s) - e_k(s) &= -[u_{k+1}(s) - u_k(s)] \cdot G(s) \\
 &= -H(s) \cdot e_{k+1}(s) \cdot G(s) \\
 e_{k+1}(s) &= \frac{e_k(s)}{1 + H(s) \cdot G(s)}
 \end{aligned}$$

故欲使迭代收敛需满足:

$$|1 + H(s) \cdot G(s)|_{s=j\omega} > 1 \quad (3)$$

且 $1 + H(s) \cdot G(s)$ 幅值越大收敛速度越快。

4 液压角振动台迭代学习控制器的设计

以现有三轴液压角振动台内框为例,马达动力机构的液压固有频率为 $\omega_h = 317 \text{ rad/s}$, 阻尼比 $\xi_h = 0.2$, 弧度排量 $D_m = 1.072 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{rad}$, 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 $K_a = 0.004 \text{ A/V}$ 。

则阀控马达液压动力机构从伺服放大器电压 $U(s)$ 到伺服马达摆动角位移 $\theta(s)$ 的开环传递函数:

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

将系统参数代入上式并做合理简化,得到系统开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.118}{2.2 \times 10^{-5} s^3 + 4.6 \times 10^{-3} s^2 + s}$$

液压系统本身具有一定的幅值裕度和相位裕度,但是由于系统的原始开环增益较低,因此响应速度很慢,跟踪性能较差。根据前面的分析采用复合迭代学习控制算法,先用前向通道控制器调节稳定性和带宽,再利用迭代学习提高控制精度。

前向通道控制器采用 PID 位置闭环和微分前馈控制。闭环系统传递函数为:

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{K_0 [G_c(s) + G_r(s)]}{\frac{s^3}{\omega^2} + \frac{2\xi s^2}{\omega} + s + G_c(s) K_0} \\
 &= \frac{s + 70}{2.2 \times 10^{-5} s^3 + 4.6 \times 10^{-3} s^2 + s + 70} \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中: $k_0 = \frac{K_a K_{sv}}{D_m}$; G_r 为一阶微分前馈控制器,取为

$\frac{1}{K_0} s$; G_c 为前向通道 PID 控制器,取为比例环节 $k_p = 600$ 。

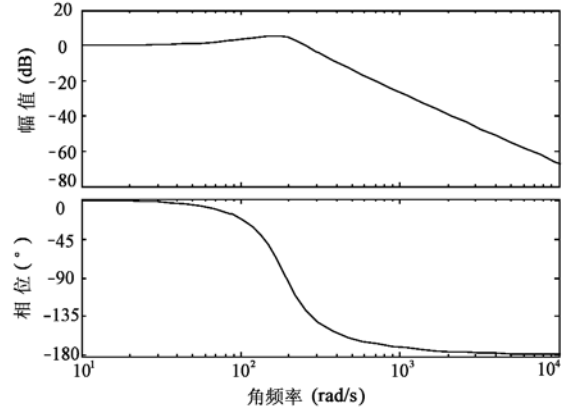


图 3 复合控制系统的闭环博德图

Fig. 3 The close Bode diagram of multi - controlling system

此反馈加前馈控制器的闭环博德图如图 3 所示。从图可知系统 -10° 频带达到了 12 Hz, -90° 频带达到了 30 Hz。

采用闭环 PD 型迭代学习律设计迭代学习控制器。通过大量仿真分析,取 PD 参数为: $K_p = 20.0$, $K_d = 0.1$ 。得其传递函数为:

$$H(s) = 20 + 0.1s \quad (5)$$

根据前面所得的收敛条件,将(4)和(5)分别代入(3),可得:

$$1 + H(s) \cdot G(s) = 1 + (20 + 0.1s) \cdot \left(\frac{s + 70}{2.2 \times 10^{-5} s^3 + 4.6 \times 10^{-3} s^2 + s + 70} \right) \quad (6)$$

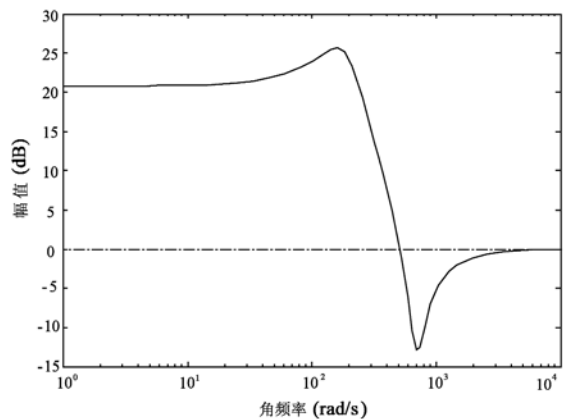


图 4 幅频特性曲线

Fig. 4 Bode magnitude plot

画出上式的幅频特性曲线如图 4 所示。可以看出,在角振动台的工作频率附近, $1 + H(s) \cdot G(s)$

的幅值大于 1, 因此迭代学习是收敛的。

图 5 所示为三轴电液伺服角振动台内框输入峰—峰值 2°、频率 30Hz 的正弦信号, 尚未迭代时的仿真曲线。曲线 1 为期望信号曲线, 曲线 2 为系统的实际输出曲线。

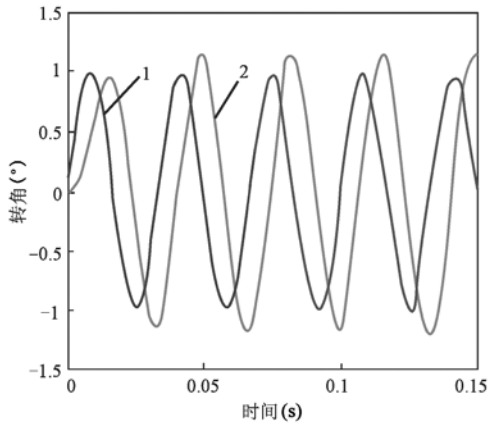


图 5 输入信号频率为 30 Hz, 尚未迭代时的仿真曲线
Fig. 5 The simulating test curve of system without multi-iteration learning control, when the frequency of input signal is 30Hz

由图 5 可知, 尚未迭代时, 实际输出严重滞后, 幅值误差超过 $\pm 10\%$ 。

图 6 所示为三轴电液伺服角振动台内框输入峰—峰值 2°、频率 30Hz 的正弦信号, 经迭代后的仿真曲线和误差曲线。图 a) 中曲线 1 为期望信号曲线, 曲线 2 为系统的实际输出曲线。

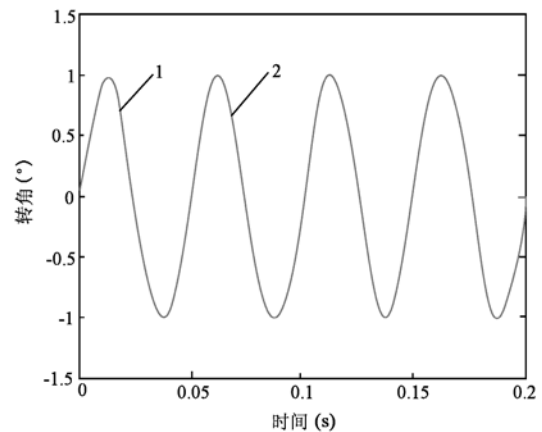
迭代 5 次后实际输出基本实现对期望信号的完全跟踪, 误差趋向于零。说明所设计的复合迭代学习控制器, 可以实现对高频率信号的良好跟踪。

5 振动试验

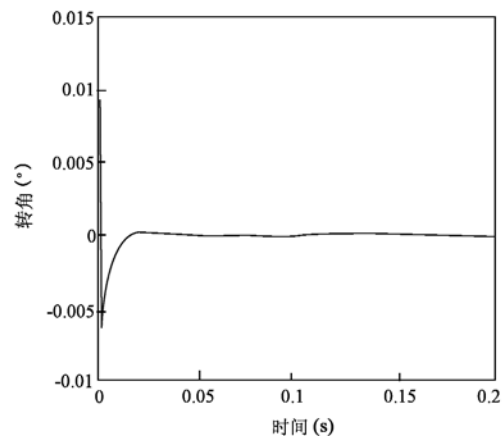
本研究室由 985 工程资助的电液伺服三轴液压角振动台内框参数如第 4 节所述。实验条件为: 系统压力 12 MPa, 油温 30~40℃, 负载惯量 10 kg·m²。

振动试验给定信号为确定性的正弦信号。图 7 中 a) 和 b) 为角振动台内框跟踪频率为 20Hz、幅值 0.2° 输入信号时的实验响应曲线。

其中图 a) 采用 PID 控制, 图 b) 采用本文复合迭代学习控制算法进行控制。图中曲线 1 表示给定的振动期望信号, 曲线 2 表示角振动台跟踪轨迹。由图可以看出, 采用复合迭代学习控制策略的控制效果要明显好于 PID 控制, 其具有良好的响应特性, 系统相位及幅值误差均有明显改善。很大程度上克服了系统动力耦



(a) 输入信号频率为 30Hz, 迭代 5 次时的仿真曲线



(b) 输入信号频率为 30Hz, 迭代 5 次时的误差曲线

图 6 系统频率响应仿真和误差曲线

Fig. 6 The simulating test curve and error curve of system frequency response

合及参数时变和未知力扰动带来的影响。同时说明在系统压力 12 MPa 条件下, 采用该方法角振动台内框具有 20 Hz(峰—峰值 0.4°) 的正弦响应能力, 且此时其相位滞后不超过 10°, 幅值误差不大于 $\pm 10\%$ 。

6 结论

针对电液伺服角振动台, 考虑控制系统的稳定性以及迭代学习的收敛性, 提出了复合迭代学习非线性控制策略, 并从频域角度给出了其收敛性条件。以现有三轴液压角振动台内框为例, 进行了迭代学习控制器的设计。仿真结果和实验研究均表明此复合迭代学习控制策略拓宽了系统带宽, 具有良好的响应特性, 系统相位及幅值误差均有明显改善, 很大程度上克服了系统动力耦合及参数时变和未知力扰动带来的影响, 为液压角振动台高性能实时控制开辟了新途径。

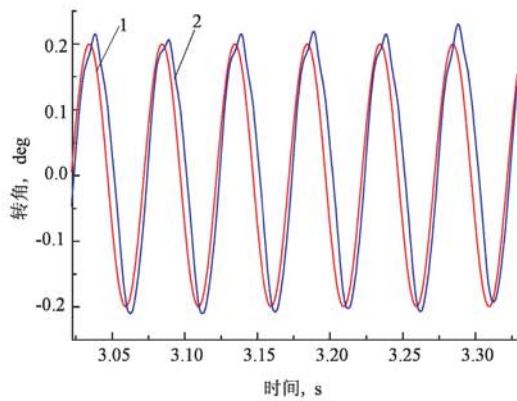
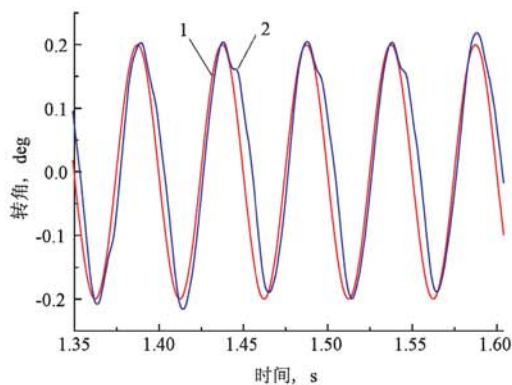
(a) 频率为 20Hz, 幅值为 0.2° , 尚未迭代(b) 频率为 20Hz, 幅值为 0.2° , 迭代 5 次

图 7 振动实验曲线

Fig. 7 The curves of vibration experiment

参考文献:

- [1] 杜永昌, 管迪华, 宋健. 汽车道路模拟算法研究[J]. 公路交通科技, 2001, 18(6): 10-13. [DU Yong-chang, GUAN Di-hua, SONG Jian. Research of vehicle road simulation algorithm[J]. Journal

of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(6): 10-13.]

- [2] 李敏霞, 杨泽群, 陈建秋. 电液伺服振动台的振动控制技术及应用[J]. 华南建设学院西院学报, 1996, 4(2): 15-21. [LI Min-xia, YANG Ze-qun, CHEN Jian-qiu. Vibration control of shaking table test system and its application[J]. Journal of South China Construction University, 1996, 4(2): 15-21.]
- [3] Moore K L, Dahich M, Bhattacharyya S P. Iterative learning control survey and new result[J]. Journal of Robot system, 1992, 9(5): 563-594.
- [4] 马建设, 李尚义, 怯军, 赵克定. 仿真转台用连续回转电液伺服马达低速摩擦特性研究[J]. 航空学报, 2000, 21(4): 361-363. [MA Jian-she, LI Shang-yi, KAI Jun, ZHAO Ke-ding. Research on low-speed frictional property of continuous rotary electro-hydraulic servomotor applied to simulator[J]. China Journal of Aeronautics, 2000, 21(4): 361-363.]
- [5] 吴继轩, 刘向东. 高频角振动测试转台的迭代学习控制[J]. 计算机仿真, 2005, 22(11): 307-310. [WU Ji-xuan, LIU Xiang-dong. High frequency angle-vibration table's iterative learning control[J]. Computer Simulation, 2005, 22(11): 307-310.]
- [6] 崔晓. 高频响电液伺服振动台的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学机械工程学院, 2004: 307-310. [CUI Xiao. Study on high frequency electro hydraulic servo vibration table[D]. Shenyang: School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, 2004: 307-310.]
- [7] Shi Z K. Iterative learning control for nonlinear discrete-time systems[J]. Control Theory & Applications, 2003, 15(3): 327-332.
- [8] Park K H, Bien Z, Huang D H. A study on the robustness of a PID-type iterative learning controller against initial state error[J]. International Journal of Systems Science, 2003, 30(1): 49-59.

作者简介: 袁立鹏(1976-), 男, 博士后, 讲师, 主要从事流体传动及控制、并联机构及角振动台等方面的研究。

通信地址: 哈尔滨市一匡街 2 号哈尔滨工业大学科学园 3040 信箱(150001)

电话: (0451)86402758

E-mail: hitylp@126.com

Research on Angular Vibration Hydraulic Table Adopting Iteration-learning-control

YUAN Li-peng, CUI Shu-mei, JIN Meng

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Angular vibration hydraulic table is a kind of complex and non-linear system. Applying traditional controller to the angular vibration system, it is difficult to increase the control accuracy to a high level. This paper applied a kind of non-linear control strategy which is iteration-learning-control to control angular vibration hydraulic table. Aiming at the stabilization of the control system and the convergence of the iteration-learning-control, a compound iteration-learning-control is adopted, and the convergence criterion is given from the view of frequency-domain. Comparison simulation with experiment, the results show that the inner frame of the angular vibration hydraulic table has the response capability of 20 Hz (0.4° peak to peak value), the lag of phase is no more than 10° and the error of value is less than $\pm 10\%$ under the pressure of 12 MPa. The results verify the effectiveness of the compound iteration-learning-control strategy, which can increase the bandwidth of the system and improve the precision of the system during tracking the expected input signal. The compound iterative-learning control also provides a new way in high performance real-time control of angle vibration hydraulic table.

Key words: Angle vibration hydraulic table; Iteration-learning-control; Nonlinear