

• 特约稿 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201800370

基于加加速度的地震模拟振动台控制技术

李小军^{1,2}, 李芳芳^{1*}, 纪金豹¹, 王巨科¹

(1.北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124; 2.中国地震局 地球物理研究所, 北京 100081)

摘 要:地震模拟振动台试验是工程结构地震反应模拟和抗震性能观测的直接有效的手段,但由于电液伺服地震模拟振动台系统具有复杂的非线性,当伺服阀 90° 相移频率与系统油柱共振频率比较接近时,伺服阀特性对振动台系统特性有较大影响,严重影响系统的有效频带范围。现有的电液伺服地震模拟振动台系统的有效频带多为 $0.4\sim 50$ Hz, 不足以满足大比例缩尺结构抗震试验的需求。为减小现有电液伺服地震模拟振动台系统的伺服阀特性对系统性能的影响和拓宽振动台系统的有效频带,在三参量控制的基础上,将加加速度反馈信号和加加速度前馈信号引入控制环节,形成一种基于加加速度的地震模拟振动台多参量控制算法。对所提出的控制算法的控制效果进行了理论推导和系统仿真分析,揭示了加加速度反馈可降低系统油柱共振频率并减小伺服阀特性对振动台系统性能的影响,而加加速度前馈使得系统的有效频带由三参量控制下的 $0.35\sim 54$ Hz拓宽至 $0.35\sim 64$ Hz,表明所提出的基于加加速度的地震模拟振动台多参量控制算法明显改善了地震模拟振动台的控制性能。

关键词:地震模拟试验; 振动台; 三参量控制; 加加速度; 有效频带

中图分类号: TU317.2

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2018)03-0064-09

A New Control Technology of Shaking Table Based On the Jerk

LI Xiaojun^{1,2}, LI Fangfang^{1*}, JI Jinbao¹, WANG Juke¹

(1. Beijing Key Lab. of Earthquake Eng. and Structural Retrofit, Beijing Univ. of Technol., Beijing 100124, China;

2. Inst. of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Shaking table test is a direct and effective means of seismic response simulation and seismic performance observation of engineering structures, but because the electro-hydraulic servo shaking table system is complex nonlinear system, the performance of shaking table system is apparently affected by the servo valve when the 90° phase-shift frequency of the servo valve is near to the oil-column resonance frequency of shaking table system, so that the effective frequency band of shaking table system is severely affected. The effective frequency band of existing electro-hydraulic servo shaking table is generally from 0.4 Hz to 50 Hz, which is not enough to satisfy the demand of the seismic test of large reduced scale structure. In order to decrease the adverse effect of the servo valve of existing electro-hydraulic servo shaking table system on the system performance, and to broaden the effective frequency band of existing shaking table system, a new control algorithm was proposed by introducing the jerk feedback and jerk feed-forward into the controlling unit on the basis of the three-variable control algorithm. The control effect of the proposed control algorithm was deduced theoretically and analyzed by the system simulation. It was revealed that the oil-column resonance frequency was reduced by the jerk feedback so that the influence of servo valve characteristics on the system performance was decreased, and the effective frequency band of shaking table system was widened from $0.35\sim 54$ Hz for the three-variable control algorithm to $0.35\sim 64$ Hz for the jerk feed-forward control algorithm, and it was proved that the control performance of the shaking table system was obviously improved by the proposed control algorithm.

Key words: seismic simulation test; shaking table; three-variable control; jerk; effective frequency band

收稿日期: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278013; 51738001)

作者简介: 李小军(1965—), 男, 研究员。研究方向: 地震动特性分析与模拟; 结构地震反应分析。E-mail: beerli@vip.sina.com

* 通信联系人 E-mail: fangfangbjut@126.com

网络出版时间: 2018-05-05 17:11:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180505.1711.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

地震模拟振动台可以很好地再现各种地震动,是实验室中研究结构地震响应最直接、最有效的工具^[1-4]。早在1890年日本就开始利用机械装置模拟地震动^[5-6],20世纪60年代末,液压伺服控制技术开始应用于地震模拟振动台^[7]。此后伴随着液压、电子、自动化、传感器、信号处理、控制技术等科技的发展,地震模拟振动台实现了从模拟控制到数字控制、从位移PID控制到加速度反馈控制的转变,其后位移、速度和加速度三参量控制成为振动台控制的基础算法^[1,3]。位移PID控制有3个变量,具有实用性强、鲁棒性强等优点,但是对电液伺服地震模拟振动台这种复杂非线性系统而言,控制效果并不理想,波形失真度较大^[8]。黄浩华等^[1,9]在位移控制的基础上采用速度反馈和加速度反馈,改善了电液伺服地震模拟振动台的系统特性。黄浩华^[1]、邱法维^[10]等分析了压差反馈对地震模拟振动台系统频宽及稳定性的影响,指出压差反馈可以增加系统的阻尼,提高系统的稳定性,同时可以拓宽系统的频带。Stehman等^[11]提出一种加速度和力反馈复合控制算法,该控制算法中没有位移反馈,利用力反馈闭环解决液压缸作动器偏移的问题。Sunder等^[12]将Phelan等^[12-13]提出的伪微分反馈控制(PDF)用于结构试验,该算法在不考虑P控制的基础上用反馈信号的微分代替误差的微分(D环节),Ammanagi等^[14]将PDF控制应用于地震模拟振动台系统控制中。此外,韩俊伟^[15]、王燕华^[16-17]等、邱法维^[18]、Dimirovski^[19]、Tagawa^[20]、Xu^[21-22]、栾强利^[23-24]等国内外学者对三参量控制算法进行了深入研究,研究结果表明:速度反馈可以有效扩展系统的频宽;加速度反馈可以有效增加系统的阻尼比,降低系统在共振频率点的响应;位移反馈调节系统的整体增益;三参量前馈控制能够消减系统闭环传递函数中距离虚轴较近的极点,可以进一步扩展系统频宽。到目前为止国内外大多数电液伺服地震模拟振动台多采用三参量控制^[20,25]。此外,为提高振动台台面加速度控制波形复现精度,国内学者在三参量控制的基础上进行了一系列改进的三参量控制的研究,包括王旭永^[26]将速度正反馈用于电液位置伺服系统中,对速度正反馈对系统性能的影响进行了理论和仿真分析;崔伟清^[27]、王胜凯等^[28]在三参量控制的基础上提出了一种基于速度正反馈的三参量控制算法,该算法降低了系统油柱的共振频率,减小伺服阀特性的影响;沈刚^[29]在三参量控制的基础上提出了一种改进的三参量控制器,该控制器采用三状态反馈系统的位置闭环的逆传递函数代替三状态前馈部分,减小了3个前馈参数的在线调节过程。利用三参量控制及改进的三参量控制对电液伺服控制

地震模拟振动台系统的动态特性进行了校正。

然而对于用于结构抗震试验的中小型振动台而言,由于结构模型的大比例缩尺导致地震动时间压缩,所需的振动台系统频带提高。目前大多数已建成的中小型振动台频带多为0.4~50 Hz,无法满足大比例缩尺结构抗震试验的需求。此外,伺服阀特性^[30-31]特别是伺服阀90°相移频率与系统的油柱共振频率比较接近时,振动台系统特性受伺服阀特性影响较大,系统频带无法满足使用要求。为降低现有电液伺服地震模拟振动台系统的油柱共振频率,减小伺服阀动力特性对振动台系统性能的影响,进一步拓宽现有振动台系统的使用频带,作者在三参量控制的基础上,将加加速度引入控制环节,形成一种基于加加速度的地震模拟振动台多参量控制算法,并从理论推导及系统仿真两方面探讨该算法的控制效果和对振动台系统性能的改善。

1 地震模拟振动台三参量控制

电液伺服地震模拟振动台系统主要由液压系统、激振系统、台面及支承导向系统和控制系统组成,其中控制系统是影响其综合性能的关键因素。现有电液伺服地震模拟振动台的基本控制方式为三参量控制,主要由三参量前馈控制和三参量反馈控制组成。其控制原理图如图1所示。

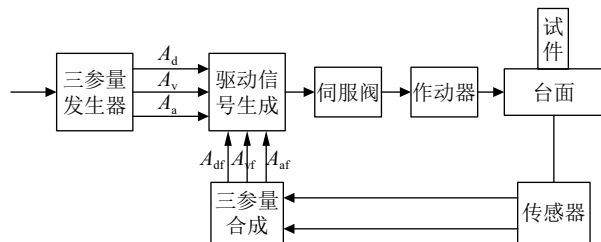


图1 地震模拟振动台三参量控制原理图

Fig.1 Schematic diagram of three-variable control

1.1 三参量反馈控制

根据液压系统3连续方程^[1,32]可得系统的开环传递函数方块图如图2所示。

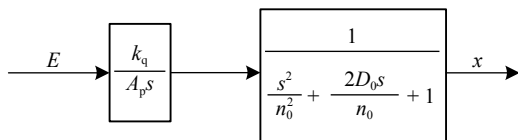


图2 系统开环传递函数

Fig.2 System open-loop transfer function

系统的开环传递函数为:

$$\frac{x}{E} = \frac{k_q}{A_p s} \frac{1}{\frac{s^2}{n_0^2} + \frac{2D_0 s}{n_0} + 1} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} n_0^2 = \frac{4\beta A_p^2}{MV}, \\ \frac{2D_0}{n_0} = \frac{M(K_c + C_c)}{A_p^2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 为活塞位移; E 为滑阀阀芯位移; k_q 为滑阀在稳态工作点附近的流量增益; A_p 为活塞有效承压面积; s 为拉普拉斯变化因子; M 为负载质量; V 为控制腔体积; β 为油液弹性模量; C_c 为泄漏系数; K_c 为滑阀在稳态动作点附近的流量压力系数; n_0 为液压系统的油柱共振频率; D_0 为阻尼比。

三参量反馈控制是将位移反馈、速度反馈、加速度反馈同时引入液压伺服系统的开环传递函数中, 其系统的传递函数的方块图如图3所示。可以推导得到具有三参量反馈的系统传递函数为:

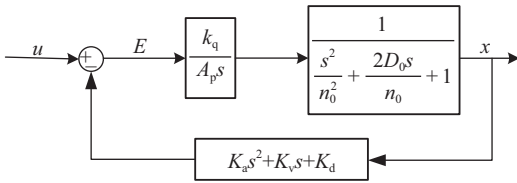


图 3 三参量反馈的系统传递函数方块图

Fig. 3 System transfer function block diagram based on three-variable feedback

$$\frac{x}{u} = \frac{1}{K_d} \frac{1}{G_c G_b} \quad (3)$$

其中,

$$\begin{cases} G_c = \frac{s^2}{n_c^2} + \frac{2D_c s}{n_c} + 1, \\ G_b = \frac{s}{n_b} + 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} n^2 = n_c^2 \left(1 + \frac{2D_c n_b}{n_c} \right), \\ D = \frac{n_b + 2D_c n_c}{2n_c \sqrt{1 + 2D_c \frac{n_b}{n_c}}}, \\ K_d = \frac{A_p n_c^2 n_b}{k_q n_0^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中, u 为驱动信号; K_a 为加速度反馈系数; K_v 为速度反馈系数; K_d 为位移反馈系数; n 为三参量反馈下系统的固有频率; D 为三参量反馈下系统的阻尼比; n_c 为二阶环节的转折频率; n_b 为一阶环节的转折频率; D_c 为二阶环节的阻尼比。三参量反馈控制中, 速度反馈 K_v 可以调节系统的固有频率, 加速度反馈 K_a 可以调节系统的阻尼比来改善系统的稳定性。

1.2 三参量前馈控制

在位移控制下地震模拟振动台的系统频带不足, 为实现加速度控制, 在信号输入中引入三参量前

馈控制。三参量发生器的原理为: 由输入的加速度信号1次积分生成速度信号, 将得到的速度信号进行积分得到位移信号, 如图4所示。实际上是对加速度信号进行频率调制, 根据三参量发生器的整体传递函数调整频率, 得到位移、速度、加速度信号。

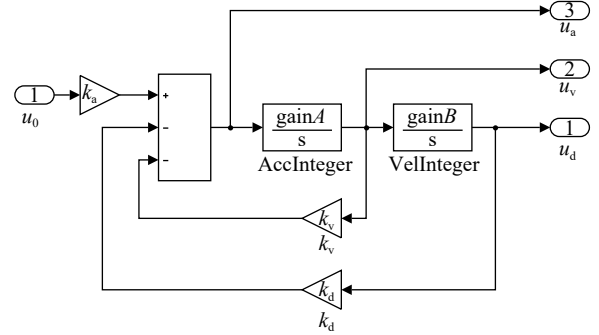


图 4 三参量发生装置

Fig. 4 Three-variable generator

可以得到加速度、速度和位移控制信号之间的关系:

$$\begin{cases} u_a = k_a u_0 - k_v u_v - k_d u_d, \\ u_v = \frac{\text{gainA}}{s} u_a, \\ u_d = \frac{\text{gainA} \cdot \text{gainB}}{s^2} u_a \end{cases} \quad (6)$$

式中, gainA 、 gainB 为积分增益; u_0 为加速度输入信号; u_a 为加速度控制信号; u_v 为速度控制信号; u_d 为位移控制信号; k_a 为多参量发生器中的加速度增益; k_d 为多参量发生器中的位移反馈系数; k_v 为多参量发生器中的速度反馈系数。

三参量发生装置输出的位移、速度、加速度3个信号合成为驱动信号 u :

$$u = A_a u_a + A_v u_v + A_d u_d \quad (7)$$

式中, A_a 为加速度输入增益; A_v 为速度输入增益; A_d 为位移输入增益。

当输入信号为加速度, 即加速度控制信号为:

$$u_a = k_a \frac{1}{1 + k_v \cdot \text{gainA} \frac{1}{s} + k_d \cdot \text{gainA} \cdot \text{gainB} \frac{1}{s^2}} u_0 \quad (8)$$

时, 由式(7)得到:

$$u = \frac{A_d \cdot \text{gainA} \cdot \text{gainB}}{s^2} G_{c0} G_{w0} u_0 \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} G_{c0} = \frac{s^2}{n_{c0}^2} + \frac{2D_{c0} s}{n_{c0}} + 1, \\ n_{c0}^2 = \frac{A_d}{A_a} \text{gainA} \cdot \text{gainB}, \\ \frac{2D_{c0}}{n_{c0}} = \frac{A_v}{A_d} \text{gainB} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} G_w = \frac{1}{\frac{n_w^2}{s^2} + \frac{2D_w n_w}{s} + 1}, \\ n_w^2 = k_d \cdot \text{gainA} \cdot \text{gainB}, \\ 2D_w n_w = k_v \cdot \text{gainA} \end{cases} \quad (11)$$

将三参量发生装置的合成控制信号引入三参量反馈控制系统中,加速度控制模式下,系统的传递函数为:

$$\frac{s^2 x}{u_0} = \frac{A_d \cdot \text{gainA} \cdot \text{gainB}}{K_d} \frac{G_{c0} G_w}{G_c G_b} \quad (12)$$

其对应的系统频响特性如图5所示。

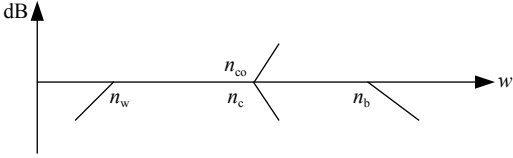


图5 三参量控制下系统幅频特性

Fig. 5 System amplitude-frequency characteristic based on three-variable control

2 基于加加速度反馈的振动台多参量控制

加加速度又名急动度或力变率。1928年, Melchior 定义急动度(jerk, 也可译作“加加速度”)为“加速度的时间变化率”[33-34]。1978年, Schot对急动度进行了介绍[35], 1981年黄沛天提出了力变率公式[36]。随着科学技术的发展, 加加速度在全球定位系统GPS跟踪定位、高速机械加工的自动控制、高动态运动飞行器的跟踪测量、高速列车和电梯舒适度的测量、通信设备的抗震性能检测等方面得以应用[37-39]。在地震工程学中, 加加速度的相关研究主要在地面运动的基本特性描述和结构主动控制方面[39-40]。本文提出在三参量反馈中引入加加速度反馈, 形成基于加加速度反馈的多参量反馈控制, 以改善对地震模拟振动台系统控制性能。

2.1 加加速度反馈单独作用下的系统分析

在电液伺服系统开环传递函数中引入加加速度反馈, 其系统方块图如图6所示。

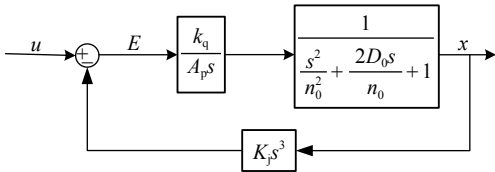


图6 加加速度反馈下的系统传递函数方块图

Fig. 6 Transfer function block diagram based on jerk feedback system

图6所示的系统对应的传递函数为:

$$\frac{x}{u} = \frac{k_q}{A_p} \frac{1}{\left(\frac{1}{n_j^2} s^2 + \frac{2D_j}{n_j} s + 1 \right) s} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} \frac{1}{n_j^2} = \frac{1}{n_0^2} + \frac{k_q K_j}{A_p}, \\ \frac{2D_j}{n_j} = \frac{2D_0}{n_0} \end{cases} \quad (14)$$

式中, K_j 为加加速度反馈增益, n_j 为加加速度反馈控制的系统油柱共振频率, D_j 为加加速度反馈控制的系统阻尼比。

由式(14)可得到:

1) 当加加速度反馈为负反馈时, $K_j > 0$, $n_j < n_0$, $D_j < D_0$, 也就是降低了系统的油柱共振频率和系统的阻尼比;

2) 当加加速度为正反馈时, $K_j < 0$, $n_j > n_0$, $D_j > D_0$, 也就是提高了系统的油柱共振频率和系统的阻尼比。

2.2 多参量反馈控制的系统分析

在三参量反馈控制的基础上引入加加速度反馈, 其对应的系统方块图如图7所示。

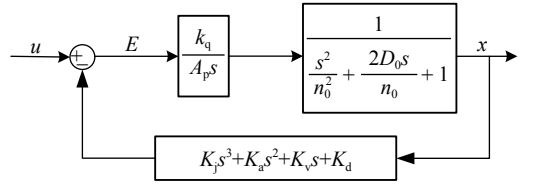


图7 多参量反馈控制系统传递函数方块图

Fig. 7 Transfer function block diagram based on multivariable feedback control

图6所示的系统对应的传递函数为:

$$\frac{x}{u} = \frac{k_q}{A_p} \frac{1}{\frac{s^3}{n_0^2} + \frac{2D_0 s^2}{n_0} + s + \frac{k_q}{A_p} (K_j s^3 + K_a s^2 + K_v s + K_d)} \quad (15)$$

式(15)可改写为:

$$\frac{x}{u} = \frac{1}{K_d} \frac{1}{\frac{A_p + k_q K_v}{k_q K_d} \left(\frac{s^2}{n^2} + \frac{2D_s}{n} + 1 \right) s + 1} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \frac{1}{n^2} = \frac{\left(1 + \frac{k_q K_j n_0^2}{A_p} \right)}{1 + \frac{k_q K_v}{A_p}} \frac{1}{n_0^2}, \\ \frac{2D}{n} = \frac{1}{1 + \frac{k_q K_v}{A_p}} \left(\frac{2D_0}{n_0} + \frac{k_q K_a}{A_p} \right) \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可得到:

1) 当 $K_v = K_j n_0^2$ 时, $n = n_0$, 速度反馈和加加速度反馈的引入对系统的油柱共振频率没有影响;

表1 地震模拟振动台系统的性能指标

Tab.1 Performance parameters of electro-hydraulic servo shaking table

名称	技术参数
台面尺寸/(m×m)	3×3
台面质量/kg	6 000
最大负载/kg	10 000
频率范围/Hz	0.4~50
传感器的固有频率/Hz	150
传感器的阻尼比	0.7
活塞有效承压面积 A_p/m^2	0.011
油液弹性模量 $\beta/(N \cdot m^{-2})$	7×10^8
控制腔体积 V/m^3	2.662×10^{-3}
伺服阀流量压力系数 $K_c/(m^5 \cdot N^{-1} \cdot s^{-1})$	2.5×10^{-11}

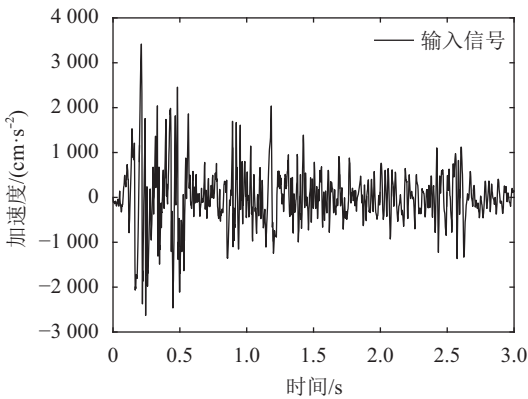


图10 输入地震动信号

Fig. 10 Earthquake motion input

4.1 基于加加速度反馈的多参量控制系统仿真分析

目前,中小型振动台的频带要求一般在0~50 Hz左右。为满足振动台的使用频率的要求,伺服阀90°相移点的频率应大于2倍的使用最高频率^[1]。以Moog伺服阀D661为例,其对应的阀特性如图11所示,即伺服阀流量为10%时,对应的90°相移点的频率为80 Hz;流量为25%时,对应的90°相移点的频率为60 Hz;流量为90%时,对应的90°相移点的频率仅不足40 Hz。考虑伺服阀为二阶振荡环节,则有:

$$k_q = G_q k_{q0} \tag{26}$$

其中,

$$G_q = \frac{1}{\frac{s^2}{n_q^2} + \frac{2D_qs}{n_q} + 1} \tag{27}$$

式中, k_{q0} 为不考虑伺服阀二阶特性的滑阀流量增益; n_q 为伺服阀的二阶系统固有频率; D_q 为伺服阀的二阶系统阻尼比。

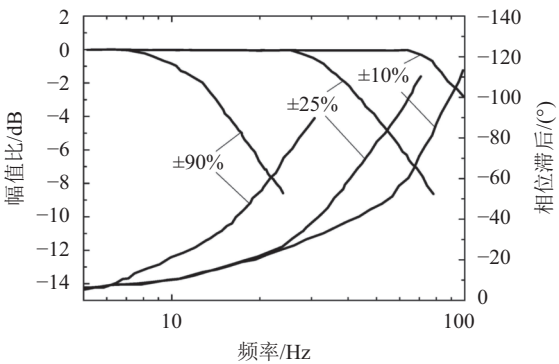


图11 伺服阀频率响应

Fig. 11 Frequency response of servo valve

电液伺服地震模拟振动台在三参量控制下,不同伺服阀频宽对系统性能的影响如图12所示。由图12可得到:当伺服阀90°相移频率与系统油柱共振频率越来越接近时,系统特性受伺服阀特性的影响越来越严重,同时伺服阀特性引起的共振峰无法通过改变三参量控制中的控制增益来降低,系统频宽较窄。

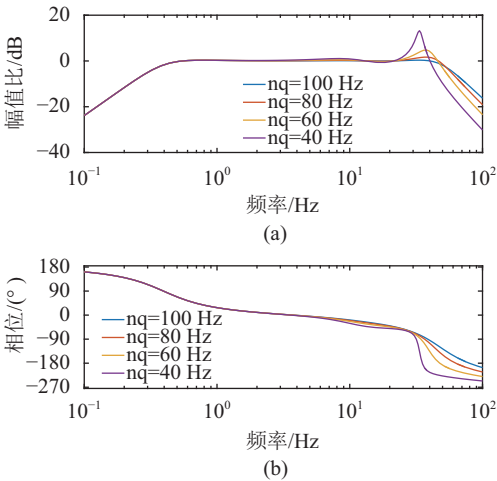


图12 不同伺服阀频宽对应的系统Bode图

Fig. 12 Bode diagram based on varying frequency of servo valve

在三参量控制中,引入加加速度反馈,形成多参量反馈控制。以伺服阀90°相移频率为40 Hz为例,对3 m×3 m的地震模拟振动台进行系统分析,得到系统的频响特性曲线如图13所示。由图13可得到:三参量控制下,伺服阀90°相移频率为40 Hz的系统使用频带为0.35~23.51 Hz,由于伺服阀90°相移频率与系统油柱共振频率比较接近,系统特性受伺服阀特性影响产生共振峰,导致系统频带变窄;加加速度反馈参与的多参量控制下,伺服阀90°相移频率为40 Hz的系统使用频带为0.35~45.82 Hz。显然,由于多参量控制中的加加速度反馈降低了系统的油柱共振频率,消减了伺服阀特性对振动台系统性能的影响,从而达到了拓宽系统使用频带的目的。

采用10倍缩尺后的El-Centro NS强震动记录为输入信号进行仿真分析。三参量控制下加速度傅里叶幅值谱如图14所示,而基于加加速度反馈的多参量控制下,同时在反馈信号中引入随机噪声,得到的加速度傅里叶幅值谱如图15所示。由图14可知:在三参量反馈控制下,由于伺服阀特性的影响,在20~40 Hz频率范围内,加速度傅里叶幅值谱与期望值不吻合。由图15可知:在多参量反馈控制下,由于加加速度降低了系统的油柱共振频率,减小了伺服阀特性对系统性能的影响,在20~40 Hz频率范围内,加速度傅里叶幅值谱与期望值吻合得较好。

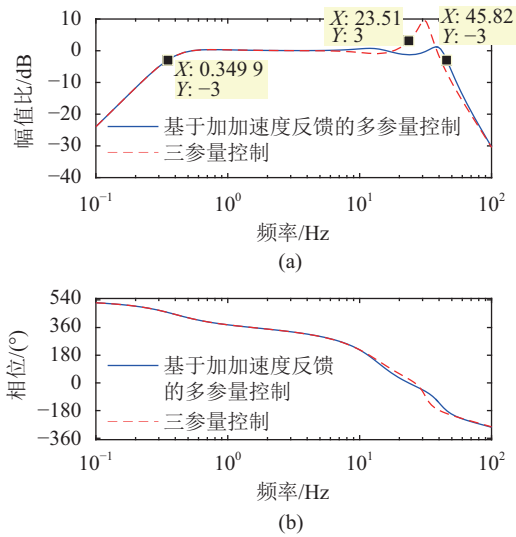


图 13 不同控制算法下振动台系统Bode图

Fig. 13 Bode diagram based on different control algorithms

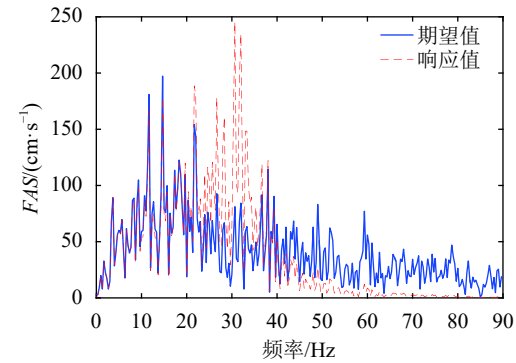


图 14 三参量控制下加速度傅里叶幅值谱

Fig. 14 Acceleration Fourier amplitude spectrum based on three-variable control

4.2 基于加加速度前馈的多参量控制系统仿真分析

本文以El-Centro NS强震动记录10倍缩尺后的时程为输入信号,对3 m×3 m的地震模拟振动台进行仿真分析。三参量控制、加加速度前馈参与的多参量控制下,系统Bode图如图16所示,加速度傅里叶幅值谱如图17所示,将图17中50~60 Hz频段加速度傅里叶

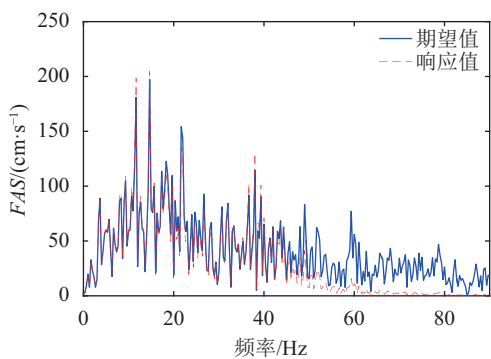


图 15 多参量控制下加速度傅里叶幅值谱

Fig. 15 The acceleration Fourier amplitude spectrum based on multi-variable control

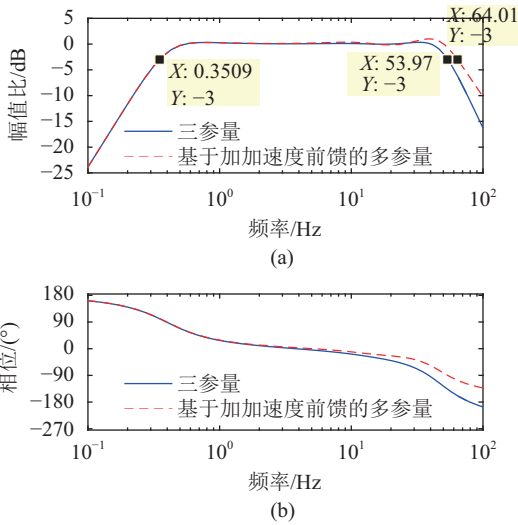


图 16 不同控制算法下振动台系统Bode图

Fig. 16 Bode diagram based on different control algorithms

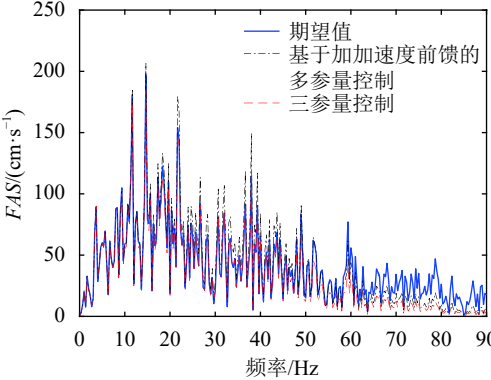


图 17 加速度傅里叶幅值谱

Fig. 17 Acceleration Fourier amplitude spectrum

幅值谱放大显示如图18所示。由图16可知:三参量控制下,系统的使用频带为0.35~54 Hz;加加速度前馈的多参量控制下,系统的使用频带为0.35~64 Hz。图16所示的结果表明,由于加加速度前馈的引入,拓宽了系统的使用频带。由图18可知:在50~60 Hz频

段,相比三参量控制而言,加加速度前馈参与的多参量控制下台面加速度谱与期望值吻合较好,也就是加加速度前馈的引入拓宽了系统频带。由图16和17的结果还可以看到,在10 Hz附近频段,与原三参量控制系统的控制结果相比,加加速度前馈系统控制结果略微偏大。

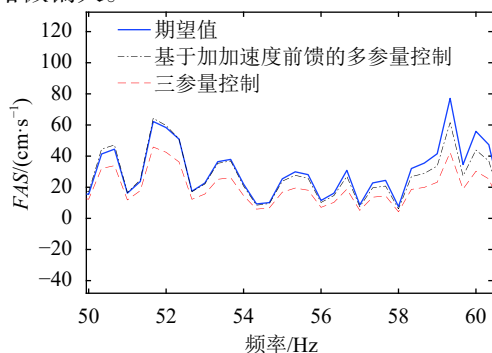


图18 50~60 Hz加速度傅立叶幅值谱

Fig. 18 Acceleration Fourier amplitude spectrum from 50 Hz to 60 Hz

5 结 论

在地震模拟振动台三参量控制算法的基础上,提出了一种基于加加速度的地震模拟振动台多参量控制算法。该算法将加加速度前馈引入控制三参量前馈环节,将加加速度反馈引入三参量反馈环节。以某3 m×3 m的电液伺服地震模拟振动台系统为研究对象,对引入加加速度的多参量控制下的地震模拟振动台系统进行理论分析和仿真分析。研究表明,加加速度的引入改善了地震模拟振动台的控制性能,具体表现为加加速度反馈降低了系统油柱共振频率,减小了伺服阀特性对系统性能的影响,而加加速度前馈的引入拓宽了系统使用频带,相对三参量控制下的系统,其使用频带由0.35~54 Hz拓宽至0.35~64 Hz。

参考文献:

- [1] 黄浩华.地震模拟振动台的设计与应用技术[M].北京:地震出版社,2008.
- [2] Tang Zhenyun, Li Zhenbao, Ji Jinbao, et al. Development in shaking table control system[J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(6): 162-169. [唐贞云, 李振宝, 纪金豹, 等.地震模拟振动台控制系统的发展[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(6): 162-169.]
- [3] Ji Jinbao, Li Fangfang, Li Zhenbao, et al. Research an advances on the control technology of the multiple shaking table array system[J]. *Structural Engineers*, 2012, 28(6): 96-101. [纪金豹, 李芳芳, 李振宝, 等.地震模拟振动台台阵控制技术的发展[J]. *结构工程师*, 2012, 28(6): 96-101.]
- [4] Gao Chunhua, Ji Jinbao, Yan Weiming, et al. Developments of shaking table technology in China[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47(8): 9-19. [高春华, 纪金豹, 闫维

- 明,等.地震模拟振动台技术在中国的发展[J]. *土木工程学报*, 2014, 47(8): 9-19.]
- [5] Severn R T. The contribution of shaking tables to early developments in earthquake engineering[M]. Netherlands Springer: 2010: 17, 383. DOI: 10.1007/978-90-481-9544-2_16
- [6] Severn R T. The development of shaking tables-A historical note[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(2): 195-213.
- [7] Huang Haohua. The application of electro-hydraulic servo system in earthquake engineering research[J]. *Measurement Control Technology*, 1996, 15(4): 32-34. [黄浩华. 电液伺服系统在地震工程研究中的应用[J]. *测控技术*, 1996, 15(4): 32-34.]
- [8] Wan Kai, Wang Ping, Zhu Dong-yun. Present situation and the development in electro-hydraulic vibration control system[J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2012, 19(4): 1-5. [万凯, 王萍, 朱冬云. 电液振动台控制系统的现状与发展[J]. *仪器仪表用户*, 2012, 19(4): 1-5.]
- [9] Huang Haohua, Xu Wende. Improving system characteristic of electro-hydraulic servo shaking table based on the displacement control[J]. *Chinese Hydraulics Pneumatics*, 1981(1): 5-8. [黄浩华, 徐文德. 位移控制电液伺服系统特性的改善方法[J]. *液压与气动*, 1981(1): 5-8.]
- [10] Qiu Fawei. Theoretic study of the electronic-hydraulic servo analogue control system for earthquake simulation shaking table[J]. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, 1989(3): 100-111. [邱法维. 电液伺服地震模拟振动台模拟控制系统理论分析[J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1989(3): 100-111.]
- [11] Stehman M, Nakata N. A new approach for acceleration tracking of shake tables using combined acceleration and force feedback control[C]. *Structure Congress*, New York, 2013. DOI: 10.1061/9780784412848.172
- [12] Sunder R, Venkatesh C S. Microprocessor-based controller for actuators in structural testing[R]. *Waston D C National Aeronautical Laboratory*, 1992.
- [13] Phelan. Automatic control systems[M]. New York: Cornell University Press, 1977: 150-171.
- [14] Ammanagi S, Poornima V, Sera A, et al. Development of a Digitally-controlled Three-axis Earthquake Shake Table[J]. *Currentence*, 2006, 91(2): 190-203.
- [15] Han Junwei, Yu Mingli, Zhao Hui. Study of three state controller of seismic simulating shaking table[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1999, 31(3): 21-28. [韩俊伟, 于丽明, 赵慧. 地震模拟振动台三状态控制的研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1999, 31(3): 21-28.]
- [16] Wang Yanhua, Cheng Wenrang. Motion control performance analysis of shaking table[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(2): 99-102, 106. [王燕华, 程文攘. 地震模拟振动台运动控制性能分析[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(2): 99-102, 106.]
- [17] Wang Yanhua, Cheng Wenrang. Study of the accuracy of the shaking table[J]. *Industrial Construction*, 2010(s1): 326-328. [王燕华, 程文攘. 基于地震模拟振动台系统的试验精度研究[J]. *工业建筑*, 2010(s1): 326-328.]
- [18] Qiu Fawei, Sha Fengqiang, Wang Gang, et al. Shaking table control technology and software research[J]. *Chinese Hydraulics Pneumatics*, 2011(6): 98-101. [邱法维, 沙锋强, 王刚, 等. 地震模拟振动台控制技术 & 软件研究[J]. *液压与气动*, 2011(6): 98-101.]
- [19] Dimirovski G M, Mamucevski D J, Jurukovski D V, et al. A two-level computer control of biaxial shaking table using three variable local controllers[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1987, 20(5): 45-50.
- [20] Tagawa Y, Kajiura K. Controller development for the E-

- defense shaking table[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I Journal of Systems & Control Engineering*, 2007, 221(2): 171–181.
- [21] Yang X, Hongxing H, Junwei H. Three state controller design of shaking table in active structural control system[C]. 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou: 200888.
 - [22] Xu Y, Hua H, Han J. Modeling and controller design of a shaking table in an active structural control system[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2008, 22(8): 1917–1923.
 - [23] Luan Qianli, Chen Yu, Chen Zhangwei, et al. Aseismic tests of NEBS GR-63-CORE and its control strategy[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015(4): 19–24. [栾强利, 陈宇, 陈章位, 等. NEBSGR-63-CORE抗震试验及其控制策略研究[J]. *振动与冲击*, 2015(4): 19–24.]
 - [24] Luan Qianli, Chen Zhangwei, Xu Jinrong, et al. Three-variable control technique for a seismic analog shaking table[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(8): 54–60. [栾强利, 陈章位, 徐进荣, 等. 地震模拟振动台三参量控制技术研究[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(8): 54–60.]
 - [25] Shortreed J S, Seible F, Benzon G. Simulation issues with a real-time, full-scale seismic testing system[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2002, 6(sup001): 185–201.
 - [26] Wang Xuyong. Study of the electro-hydraulic position servo system based on velocity positive feedback[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 1995(5): 266–270. [王旭永. 电液位置伺服系统速度正反馈校正的分析研究[J]. *机床与液压*, 1995(5): 266–270.]
 - [27] Cui Weiqing, Wang Shengkai, Ren Wen. An improved three-parameter control of earthquake shaking table[J]. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2012(11): 144–146. [崔伟清, 王胜凯, 任雯. 一种改进的地震模拟振动台三参量控制技术[J]. *液压与气动*, 2012(11): 144–146.]
 - [28] Wang Shengkai, Ren Wen, Huang Haikuo. Application of the speed positive feedback on simulated earthquake vibration table[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2012(4): 12–14. [王胜凯, 任雯, 黄海阔. 速度正反馈在地震模拟振动台中的应用[J]. *现代制造技术与装备*, 2012(4): 12–14.]
 - [29] Shen Gang. Research on time waveform replication control strategy of 3 degree-freedom electro-hydraulic shaking table[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. [沈刚. 三自由度电液振动台时域波形复现控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.]
 - [30] Tang Zhenyun, Li Zhenbao, Ji Jinbao, et al. Effect of servo value on shaking table control performance and auto-tuning of control parameters[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2010(1): 20–26. [唐贞云, 李振宝, 纪金豹, 等. 伺服阀对地震模拟振动台控制性能影响及控制参数自整定[J]. *震灾防御技术*, 2010(1): 20–26.]
 - [31] Li Zhenbao, Tang Zhenyun, Huang Haohua, et al. Performance improvement of servo valve and its application in shaking table[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2010(9): 194–198. [李振宝, 唐贞云, 黄浩华, 等. 伺服阀性能改善及其在地震模拟振动台中的应用[J]. *武汉理工大学学报*, 2010(9): 194–198.]
 - [32] 易孟林, 曹树平, 刘银水. 电液控制技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
 - [33] Huang Peitian, Xu Xuexiang. The jerk and the new thinking on philosophy of science[J]. *Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science)*, 2008, 32(5): 514–517. [黄沛天, 徐学翔. 急动度与科学哲学新思考[J]. *江西师范大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(5): 514–517.]
 - [34] Xu Jiqing, Li Zhenliang, Yang Chengyu. The structural dynamic response analysis of jerkiness degrees[C]. CCCM. Guiyang: 2014: 1–6. [徐绩青, 李正良, 杨成渝. 结构动力响应中急动度的分析: 2014年中国计算力学大会[C]. 贵阳: 2014: 1–6.]
 - [35] Schot S H. Jerk: The time rate of change of acceleration[J]. *American Journal of Physics*, 1978, 46(11): 1090–1094.
 - [36] Huang Peitian. A new concept of the mechanical movement-Jerk[J]. *Physics*, 1981(7): 394–397. [黄沛天. 一个描写机械运动的新概念——急动度[J]. *物理*, 1981(7): 394–397.]
 - [37] Xueshan Y, Xiaozhai Q, George C L, et al. Jerk and Jerk Sensor[C]. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: 2008.
 - [38] Yang Xueshan, Qi Xiaozhai, George C. Sensor for measuring the derivative of acceleration component[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(12): 143–147. [杨学山, 齐霄斋, 李兆治, 等. 基于测量加速度微量分量的传感器[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(12): 143–147.]
 - [39] He Hao-xiang, Yan Wei-ming, Chen Yan-jiang. Study of concept and characteristics of seismic jerk response spectra[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(11): 124–129. [何浩祥, 闫维明, 陈彦江. 地震动加加速度反应谱的概念及特性研究[J]. *工程力学*, 2011, 28(11): 124–129.]
 - [40] Tong M, Wang G, Lee G C. Time derivative of earthquake acceleration[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2005, 4(1): 1–16.



李小军, 男, 1965年10月生, 教授, 博士生导师, 中国科学技术协会全国委员会委员, 中国地震学会常务理事、秘书长, 国际生命线与基础设施学会常务理事。1984年在湖南大学获工学学士, 1993年在中国地震局工程力学研究所获工学博士, 1993年至1995年中国地震局地球物理研究所进行博士后研究。1996年获得国家“中青年有突出贡献专家”称号, 2011年获长江学者特聘教授, 2013年获国家创新人才推进计划重点领域创新团队负责人, 2016年入选国家“万人计划”科技创新领军人才。主要从事地震波传播、地震动特性分析与模拟及核电结构地震反应等方面的研究工作。承担了1个国家重点研发计划项目、2个国家自然科学基金重点项目、1个973项目课题和1个科技支撑课题等研究工作。

(编辑 黄小川)

引用格式: Li Xiaojun, Li Fangfang, Ji Jinbao, et al. A new control technology of shaking table based on the jerk[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(3): 64–72. [李小军, 李芳芳, 纪金豹, 等. 基于加加速度的地震模拟振动台控制技术[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(3): 64–72.]