

Study on State Control Parameter Configuration of Seismic Simulating Shaking Table

Shuncheng Fan¹, Weiqing Cui^{1,2}, Shijie Li¹

¹ School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300130

² Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, 071003

Email: weiqing_cui@163.com

Abstract: This paper analyzed the current problems of the electro-hydraulic Servo shaking table, and adopted three parameters control method to improve the control method of shaking table, effectively improved the performance of shaking table by rationally configuring the state control parameters.

Keywords: Shaking Table; Hydraulic Servo System; Three-Parameter Control; Parameter Configuration

地震模拟振动台状态控制参数配置的研究

范顺成¹, 崔伟清^{2,1}, 李世杰¹

¹ 河北工业大学机械工程学院, 天津, 中国, 300130

² 华北电力大学机械工程系, 保定, 中国, 071003

Email: weiqing_cui@163.com

摘要: 本文分析了电液位置伺服振动台的现存问题, 采用三参量控制技术改进了该振动台的控制方式, 研究了状态控制参数的合理配置方法, 有效地改善了振动台的性能。

关键词: 振动台; 液压伺服系统; 三参量控制; 参数配置

1 引言

我国是一个多地震的国家, 历史上发生的多次强震, 给国民经济和人民的生命财产造成了巨大损失。因此, 模拟地震环境进行结构、设备抗震研究工作, 具有重要的意义。

大型液压地震模拟振动台是进行抗震试验的重要实验设备, 具有低频性能好、推力大、位移大等优点。它能否真实地再现地震环境, 是否具有有良好的动态响应特性, 与其执行机构精度、液压元件的特性、控制方式以及各状态参数配置是否合理等有着直接的关系。

本文研究对象是信息产业部通信设备抗震研究所的液压地震模拟振动台, 台面尺寸为 2×1.5 米, 满负载为 2000 千克, 可以在水平或垂直方向上单向激振, 控制方式为电液位置伺服系统, 主要用于通信设备的抗震检测和研究。本文采用三参量控制技术, 改进了该振动台的控制方式, 研究了状态控制参数的合理配置方法, 对振动台系统特性进行了校正和补偿, 有效地改善了系统频响特性, 减小了波形失真。

2 三参量控制系统

2.1 原振动台系统特性分析

在建立原振动台系统的数学模型时, 对实际系统作适当简化。由于电液伺服阀、传感器的动态特性在低频时, 对系统特性的影响可以忽略, 因此将电液伺服阀、传感器简化为比例环节。此外, 还作了如下假设:

- 振动台在水平或垂直激振时, 其他方向的振动分量可以忽略;
- 负载为惯性负载, 与振动台的连接为刚性连接;
- 忽略油缸的泄漏及摩擦影响;

该系统为电液位置伺服系统, 系统框图见图 1。

系统的闭环传递函数为:

$$W(s) = \frac{1}{k_f} \cdot \frac{1}{\left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi_n s}{\omega_n} + 1\right) \cdot \frac{s}{K_v} + 1} \quad (1)$$

式中: K_v — 开环速度增益(1/s); ω_n — 液压固有频率 (rad/s); ξ_n — 系统阻尼比。

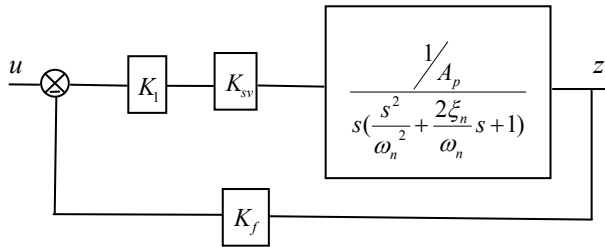


Figure 1. The system block diagram
图 1 系统方框图

$$\begin{cases} K_v = K_f \cdot K_1 \cdot K_{sv} / A_p \\ \omega_n = \sqrt{\frac{4\beta_e \cdot A_p^2}{V_t \cdot M}} \\ \xi_n = K_c \cdot M \cdot \omega_n / 2A_p^2 \end{cases} \quad (2)$$

系统参数符号的物理意义如下：

- K_{sv} —伺服阀流量增益($\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{mA}$)
- K_1 — 伺服放大器增益(mA/V)
- A_p — 液压缸活塞面积(cm^2)
- V_t — 液压缸及伺服阀到缸的管路总容积(cm^3)
- β_e —油液弹性模量(N/cm^2)
- K_c — 伺服阀压力流量系数($\text{cm}^5/\text{N}\cdot\text{s}$)
- M —台面及负载质量(kg)
- K_f — 位移传感器增益(V/cm)

对上述系统的分析如下：

(1) 由式 (2) 看出，当负载 M 发生变化时，随着负载质量的增加，系统的液压固有频率 ω_n 越低。

(2) 由劳斯霍尔维茨判据可得出系统稳定条件为：

$$K_v < 2\xi_n \cdot \omega_n \quad (3)$$

由于 ω_n 的值在试验时的负载确定后即定为定值，由劳斯霍尔维茨判据可见，提高系统阻尼比 ξ_n 是系统保持稳定的关键指标。一般在工程上取 $\xi_n=0.1\sim 0.2$ ，系统阻尼比较低，不利于衰减系统油柱共振，也是振动台再现波形失真的原因之一。

(3) 由于实录的地震波信号多为加速度波形，因此系统增加加速度控制方式，对抗震试验很有必要。

2.2 三参量反馈及其状态控制参数

为改善振动台的动态特性，其控制系统多采用三参量控制技术。即：由位移、速度、加速度三参量构成的三参量输入、三参量反馈系统。振动台输入控制信号经输入装置送入三参量发生器，变换成比例于加

速度、速度、位移的三个信号，与反馈信号进行比较，送入伺服放大器、阀控器，从而驱动振动台动作。

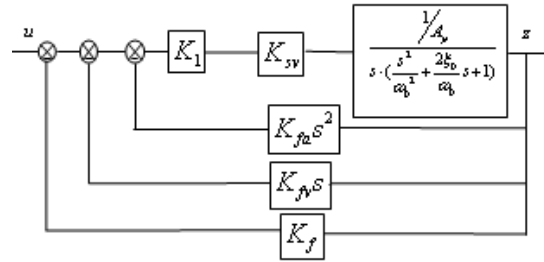


Figure 2. Three parameters feedback system block diagram
图 2 三参量反馈系统方框图

K_{fa} —加速度反馈增益 ($\text{V}/\text{cm}/\text{s}^2$)

K_{fv} —速度反馈增益 ($\text{V}/\text{cm}/\text{s}$)

系统的闭环传递函数为：

$$W(s) = \frac{1}{K_f} \cdot \frac{1}{\frac{1}{K_v} \cdot s \left(\frac{s^2}{\omega_0^2} + \frac{2\xi_0}{\omega_0} s + 1 \right) + 1} \quad (4)$$

$$\begin{cases} K_v = \frac{K_0 \cdot K_f}{1 + K_0 \cdot K_{fv}} \\ \omega_0 = \omega_n \cdot \sqrt{1 + K_0 \cdot K_{fv}} \\ \xi_0 = \frac{\xi_n + K_0 \cdot K_{fa} / 2\omega_n}{\sqrt{1 + K_0 \cdot K_{fv}}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中， } K_0 = K_1 \cdot K_{sv} / A_p \quad (6)$$

由式 (5) 可以看出，加速度反馈可以提高系统的阻尼比；速度反馈可以提高系统的固有频率。

为方便起见，系统的闭环传递函数写为如下形式：

$$W(s) = \frac{1}{K_f} \cdot \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_b} + 1 \right) \left(\frac{s^2}{\omega_c^2} + \frac{2\xi_c}{\omega_c} s + 1 \right)} \quad (7)$$

$$\begin{cases} K_v = \frac{\omega_b \cdot \omega_c}{\omega_c + 2\xi_c \cdot \xi_b} \\ \omega_0 = \sqrt{\omega_c (\omega_c + 2\xi_c \cdot \omega_b)} \\ \frac{2\xi_0}{\omega_0} = \frac{\omega_b + 2\xi_c \cdot \omega_c}{\omega_c (\omega_c + 2\xi_c \cdot \omega_b)} \end{cases} \quad (8)$$

通过以上分析，选取的反馈增益 K_{fa} 、 K_{fv} 、 K_f 不同，可以得到不同的开环增益、固有频率和阻尼比。

因此，如何通过合理配置反馈增益，以得到理想的系统动特性并消除负载的影响，是一个重要的环节。

在实际调试时如果采用试凑法，很难做到状态控制参数配置合理。不仅工作繁琐，不易得到理想效果，而且参数选择不合理的话易造成振动台自激，损坏设备。

本文针对这个问题，采用逆推法求解状态控制参数。即：在满足系统稳定性条件的前提下，设定期望的数学模型，系统特性参数 ω_b 、 ω_c 、 ξ_c 设定后，即可以确定出此时系统应达到的固有频率 ω_0 、阻尼比 ξ_0 及开环增益 K_v ，它们的值可以通过调节反馈增益 K_{fa} 、 K_{fv} 、 K_f 来获取。

确定伺服放大器增益 K_1 ，可以推出相应的 K_{fa} 、 K_{fv} 、 K_f 。

$$\begin{cases} K_{fa} = \frac{2A_p(\xi_0\omega_0 - \xi_n\omega_n)}{K_1 \cdot K_{sv} \cdot \omega_n^2} \\ K_{fv} = \frac{A_p(\omega_0^2 / \omega_n^2 - 1)}{K_1 \cdot K_{sv}} \\ K_f = \frac{A_p \cdot K_v \cdot \omega_0^2 / \omega_n^2}{K_1 \cdot K_{sv}} \end{cases} \quad (9)$$

考虑到我们在建立振动台系统的数学模型时，对实际系统作了适当简化，忽略了非线性因素的影响，因此在实际调试时，可在式 (9) 给出的参数基础上，进行适当微调。

同时，式 (9) 给出了状态参数 K_{fa} 、 K_{fv} 、 K_f 与液压固有频率 ω_n 之间的关系式。由式 (2) 可知，液压固有频率 ω_n 与负载 M 一一对应，由此给出了 K_{fa} 、 K_{fv} 、 K_f 与负载 M 间的关系式。当负载变化时，依式 (2)、(9) 调节上述参数，可有效消除负载变化对振动台特性的影响。

2.3 三参量输入及其状态控制参数

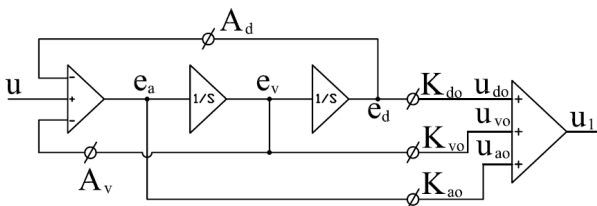


Figure 3. Three parameters input unit diagram

图 3 三参量输入单元方框图

当输入信号为加速度时，可推出：

$$U_1 = \frac{1}{1 + \frac{2\xi_1\omega_1}{s} + \frac{\omega_1^2}{s^2}} \quad (10)$$

$$\left(\frac{s^2}{\omega_{c0}^2} + \frac{2\xi_{c0}}{\omega_{c0}}s + 1\right) \cdot \frac{K_{d0}}{s^2} U$$

$$\begin{cases} \omega_1^2 = A_d \\ 2\xi_1\omega_1 = A_v \\ \omega_{c0}^2 = K_{d0} / K_{a0} \\ 2\xi_{c0} / \omega_{c0} = K_{v0} / K_{d0} \end{cases} \quad (11)$$

此时，整个系统的传递函数为：

$$W(s) = \frac{K_{d0}}{K_f} \cdot \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_b} + 1\right)\left(\frac{s^2}{\omega_c^2} + \frac{2\xi_c}{\omega_c}s + 1\right)} \quad (12)$$

$$\frac{\frac{s^2}{\omega_{c0}^2} + \frac{2\xi_{c0}}{\omega_{c0}}s + 1}{\left(1 + \frac{2\xi_1\omega_1}{s} + \frac{\omega_1^2}{s^2}\right)}$$

二阶 K_{d0} 的值。另外，设定 ω_1 、 ξ_1 后， A_v 、 A_d 的值即可由式 (11) 得出。

3 系统调试

系统调试时主要步骤如下：

- (1) 按开机顺序，依次启动 UPS 电源、电控柜和液压源，升压至额定工作压力。
- (2) 输入低频正弦波信号，使振动台运动直至油温上升到 40℃ 左右。连接测试系统。
- (3) 三参量输入单元加速度增益、速度增益设定为零，加速度反馈增益、速度反馈增益设定为零。
- (4) 系统频响特性曲线上可见油柱共振峰，调节加速度负反馈，增加系统阻尼比，削平共振峰。
- (5) 调节三参量输入单元加速度增益、速度增益，以及加速度反馈增益、速度反馈增益，直至获得预期的工作带宽。
- (6) 依次输入不同频率的正弦波，测试振动台在各频率点的响应波形失真度。通过增加阻尼比，抑制响应波形的谐波分量。

由图 4 可以看出，系统频带 < 40Hz 范围内幅频特

性在 $\pm 3\text{dB}$ 内，能够较好地满足抗震试验要求。

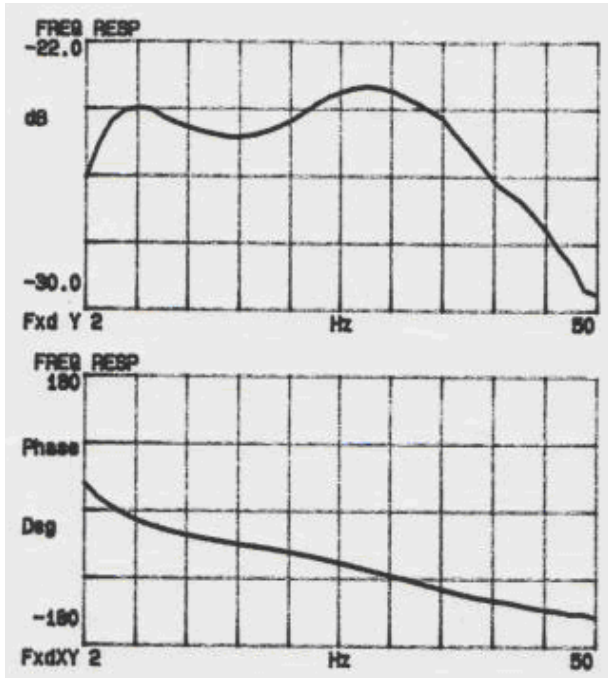


Figure 4 frequency response curve in horizontal direction
图4 振动台水平向频响特性测试曲线

4 结束语

三参量控制技术可以有效改善电液位置伺服控制的地震模拟振动台的动态响应特性，而合理配置状态控制参数是其中的关键环节。测试结果表明，本文提出的参数配置方法是可行的。

References (参考文献)

- [1] Huang Haohua. Design and application of shaking table[M]. Beijing: the Seismological Press, 2008.57 -76.
- [2] Fang Zhong, Determination of main parameters and technico-economic analysis for large scale earthquake simulator [J]. *World information on earthquake engineering*, 2001, 17(4): 135-138.
- [3] Tang Zhenyun, Li Zhenbao, Ji Jinbao, Yan Weiming, The development of shaking table control system[J], *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(6):162—168.