

# 地震模拟振动台反馈控制系统的速度合成方法

纪金豹, 李振宝, 唐贞云, 倪志伟

(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)

**摘要:** 针对地震模拟振动台三参量反馈控制中的速度反馈环节, 提出一种具有对称形式的速度合成器, 该速度合成器只有 2 个设计参数, 易于实现数字化并且满足合成精度要求. 与现有模拟速度合成器相比, 设计和应用更为方便实用.

**关键词:** 地震模拟振动台; 速度合成; 反馈控制; 控制器

**中图分类号:** TB 534<sup>+</sup>.2; TU 317<sup>+</sup>.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0254-0037(2012)07-1032-04

## Velocity Synthesis Method for Shaking Table Control System

Ji Jin-bao, Li Zhen-bao, Tang Zhen-yun, Ni Zhi-wei

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** A velocity synthesis method with symmetrical mode was presented for the three parameter feedback control of a shaking table. The synthesizer has only two design parameters, and it is easy to digitize and meets the accuracy requirements. Compared with the existing analog velocity synthesizer, the design and application of the new velocity synthesizer is more convenient and practical.

**Key words:** shaking table; velocity synthesis; feedback control; controller

地震模拟振动台是地震工程研究中的重要试验设备之一, 广泛应用于结构动力特性测试、结构与设备抗震性能、结构抗震措施检验以及结构地震反应和破坏机理等研究领域<sup>[1-2]</sup>. 为了实现振动台较宽的频带范围, 且保证良好的系统稳定性, 振动台控制系统引入了三参量控制技术<sup>[3-5]</sup>, 控制反馈信号由加速度信号、速度信号和位移信号所组成, 其中位移信号和加速度信号直接由位移传感器和加速度传感器测得, 速度信号一般由加速度、位移信号合成得到, 从而实现位移、速度、加速度三参量反馈控制<sup>[6]</sup>. 随着数字化技术在地震模拟振动台控制领域的广泛应用, 实现速度合成环节数字化是振动台数字控制系统设计的重要组成部分. 本文借鉴速度合成器模拟电路的原理, 提出一种具有对称形式的速度合成方法, 由于在低通和高通滤波环节选用了相

同截止频率, 保证了所合成速度信号的幅值和相位的正确性, 同时该速度合成器只有 2 个设计参数, 设计和应用更为简便, 并且原理清晰, 易于实现数字化且满足合成精度的要求.

### 1 速度合成器设计

#### 1.1 速度合成环节的原理分析

地震模拟振动台所采用的三参量控制器具有如图 1 所示的构造, 其中速度合成环节可采用如图 2 所示的等效模拟电路来实现<sup>[7]</sup>, 其传递函数模型等效结构可表示为图 3. 位移信号  $e_D$  经过一个微分环节和反馈补偿环节, 加速度信号  $e_A$  经过一个积分环节和共同的反馈补偿环节, 该电路实现了对加速度信号的积分和位移信号的微分, 并且通过反馈环节实现了对合成信号的滤波, 从而克服了加速度积分

收稿日期: 2010-05-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90715010); 北京市自然科学基金资助项目(8093031).

作者简介: 纪金豹(1974—), 男, 高级实验师, 主要从事结构振动控制、结构试验技术方面的研究, E-mail: jinbao@bjut.edu.cn.

引起的零漂和位移微分引起的高频失真,因此在振动台模拟控制器中得到了广泛的应用<sup>[6]</sup>. 由于该电路要求合成速度信号的通频带与位移、加速度的通频带相一致,所需要确定的参数为 8 个,对应传递函数模型所涉及的参数有 4 个,其中  $k$  为加速度信号

归一化参数,  $b$  为位移信号归一化参数,  $a$  为微分环节的时间常数,  $c$  为反馈和滤波环节的传递函数系数. 由于图 3 由模拟电路直接等效而来,其反馈和滤波环节的作用并不单一,其参数的确定需要考虑整个系统的频带要求,分析和设计相对复杂.

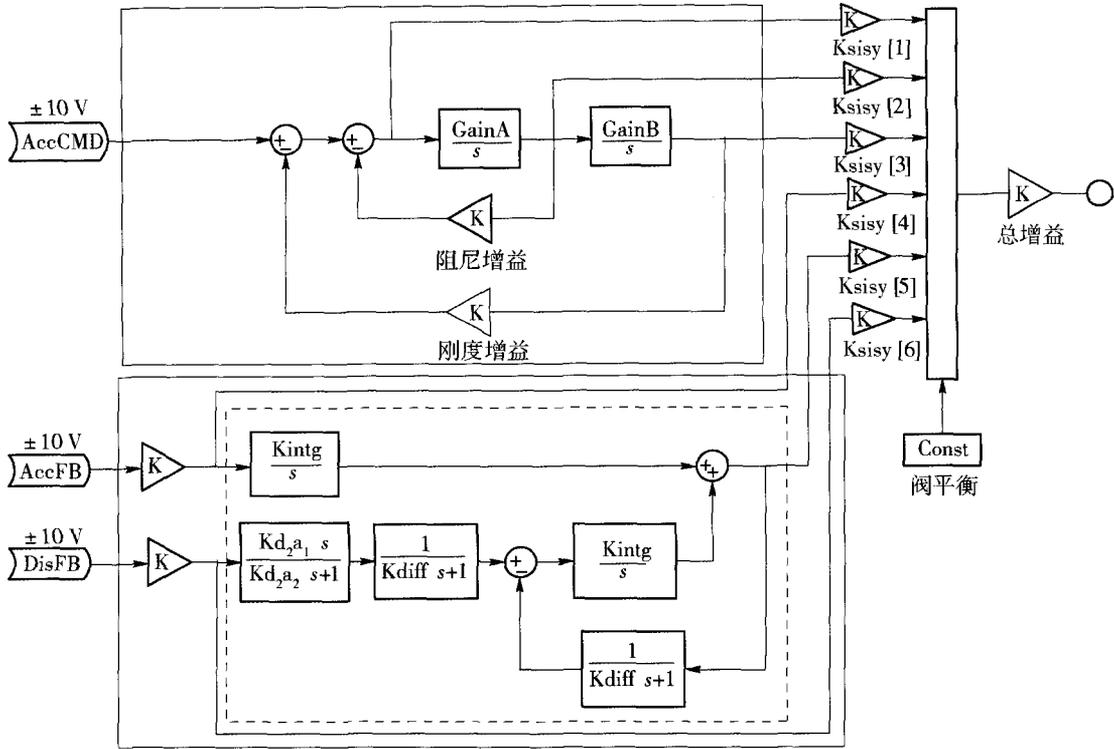


图 1 三参量控制器原理

Fig. 1 Schematic of three parameters controller

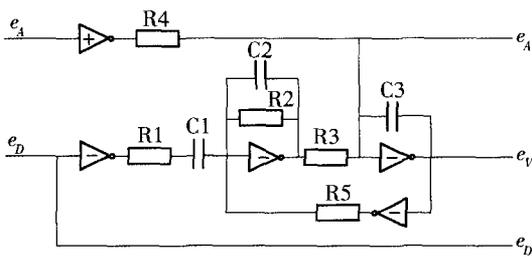


图 2 速度合成器模拟电路原理

Fig. 2 Analog circuit schematic of velocity synthesizer

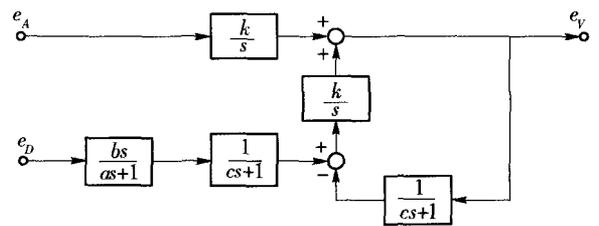


图 3 速度合成器等效结构

Fig. 3 Equivalent schematic diagram of velocity synthesizer

考虑位移信号和加速度信号的特性:对于位移信号而言,要得到速度信号必然要采用微分环节,而无论模拟还是数字微分器都会因信号求导问题带来高频失真,同时高频振动时位移信号相对很小,其精度无法满足控制的需要,由位移微分得到的速度分量的高频部分失真较严重,可以采用低通滤波予以处理. 对于加速度信号而言,由于积分环节会产生积分常数从而导致低频漂移失真,同时由于低频振

动时加速度量相对较小,由加速度信号积分得到的速度信号的低频部分失真较严重,因此对加速度积分得到的速度分量进行高通滤波以消除其在低频部分的失真. 因此,本文提出如图 4 所示的速度合成器,对加速度积分信号和位移微分信号进行独立滤波后叠加,以期实现简化系统设计、提高系统性能的目的.

### 1.2 速度合成环节的滤波器设计

如图 4 中所示,  $G_A$  为加速度信号的高通滤波环

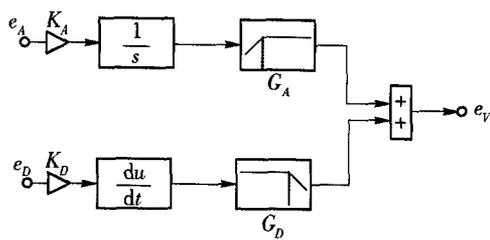


图4 本文提出的速度合成器等效结构图

Fig. 4 Equivalent schematic diagram of the velocity synthesizer presented in this paper

节,  $G_D$  为位移信号的低通滤波环节,  $K_A$  和  $K_D$  对应于图3中的  $k$  和  $b$ , 为对应加速度信号和位移信号的幅值归一化参数. 为补偿滤波环节引起的幅值衰减和相位延迟,  $G_A$  和  $G_D$  采用对称结构, 例如取  $G_A$  为一阶惯性高通滤波环节, 即<sup>[8]</sup>

$$G_A(s) = \frac{as}{as+1} \quad (1)$$

式中  $a$  为待定系数. 则取

$$G_D(s) = 1 - G_A(s) = \frac{1}{as+1} \quad (2)$$

为对应位移微分信号的低通滤波环节.

对于加速度积分信号  $sX_A$  和位移微分信号  $sX_D$ , 其合成速度信号为

$$sX = sX_A \frac{as}{as+1} + sX_D \frac{1}{as+1} \quad (3)$$

当  $sX_A = sX_D$  时, 有

$$sX = sX_A \left( \frac{as+1}{as+1} \right) = sX_D \left( \frac{as+1}{as+1} \right) = sX_A = sX_D \quad (4)$$

亦即所合成速度的幅值和相位不受滤波环节的影响.

若  $G_A$  选用二阶振荡高通滤波器, 即<sup>[8]</sup>

$$G_A(s) = \frac{\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta \frac{s}{\omega_n}}{\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta \frac{s}{\omega_n} + 1} \quad (5)$$

式中:  $\omega_n$  为二阶系统固有频率, 为待定系数;  $\zeta$  为阻尼比, 一般取  $\zeta = 0.667$ , 则

$$G_D(s) = 1 - G_A(s) = \frac{1}{\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta \frac{s}{\omega_n} + 1} \quad (6)$$

为对应二阶位移微分信号的低通滤波环节, 同样具有不改变信号的幅值和相位的特性.

### 1.3 速度合成环节的参数计算

考虑到设计的简易性, 可选用一阶惯性滤波方案, 此时高通滤波器和低通滤波器的待设计参数只有1个. 除此之外, 还需要确定位移微分器的构造和参数.

### 1) 位移微分器设计

取位移微分环节为

$$G = \frac{du}{dt} \doteq \frac{s}{Ts+1} \quad (7)$$

式中:  $T$  为微分环节的时间常数, 令  $s = j\omega$ , 则有

$$|G(\omega)| = \frac{\omega}{\sqrt{(T\omega)^2 + 1}} \quad (8)$$

取振动台最高使用频率的3倍作为微分器的高频截止频率, 亦即令截止频率  $f = \omega/(2\pi)$  处对应幅值衰减为 -3 dB, 从而解得

$$T = \sqrt{\frac{1}{\omega^2}} \quad (9)$$

例如取台面最高使用频率为  $f = 50$  Hz, 对应  $\omega = 50 \times 2\pi \times 3 = 300\pi$ , 则得到

$$T = \sqrt{\frac{1}{\omega^2}} = \sqrt{\frac{1}{(300\pi)^2}} \approx 0.001 \quad (10)$$

### 2) 滤波器参数设计

对于滤波环节, 其截止频率可由地震模拟振动台的功能曲线所确定<sup>[6]</sup>, 取  $G_D(s) = \frac{1}{as+1}$  作为研究对象, 有

$$|G_D(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(a\omega)^2 + 1}} \approx \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow a = \frac{1}{\omega} \quad (11)$$

例如当振动台最大加速度取  $A_{\max} = 20$  m/s<sup>2</sup>, 最大位移取  $D_{\max} = 0.08$  m, 以  $A_{\max}/2$  为峰值加速度和  $D_{\max}/2$  为峰值位移所对应的简谐波频率  $\omega = \sqrt{A_{\max}/D_{\max}}$  为滤波器环节的截止频率, 可以求得

$$a = \frac{1}{\omega} = \frac{1}{\sqrt{A_{\max}/D_{\max}}} = \frac{1}{\sqrt{20/0.08}} \approx 0.06 \quad (11)$$

对应截止频率  $f = \omega/(2\pi)$  约为 2.5 Hz, 亦即合成速度信号中频率低于 2.5 Hz 的分量主要由位移微分信号提供, 高于 2.5 Hz 的分量主要由加速度积分信号提供.

## 2 仿真分析

在 Simulink 中建立的速度合成器仿真模型如图5所示, 通过信号发生器得到 0.1 ~ 100 Hz 正弦波的理论位移、速度和加速度信号, 在加速度信号和位移信号中分别加入 5% 的随机噪声, 仿真结果表明, 采用上述速度合成器所生成的正弦速度信号在 0.1 ~ 100 Hz 频带内均与理论速度信号无论在幅值和相位上均吻合得很好, 满足地震模拟振动台反馈控制的需要.

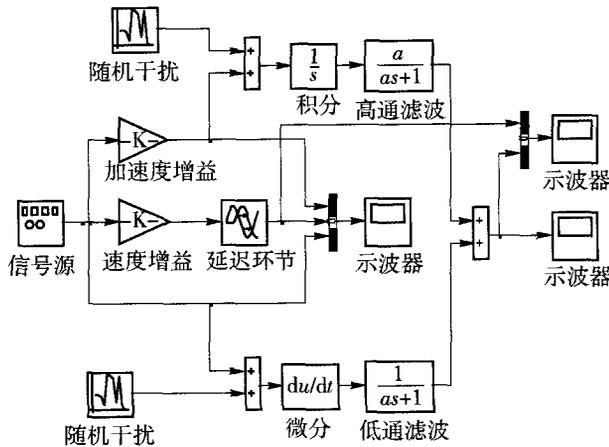


图 5 速度合成器 Simulink 仿真模型

Fig. 5 Simulink model of the velocity synthesizer

### 3 结论

1) 本文所提出的速度合成方法所采用的低通、高通滤波环节为对称结构,其物理意义明确,设计简便。

2) 相对于模拟电路速度合成器的结构形式,本文所提出的速度合成方法没有复杂的反馈环节,并且位移微分和加速度积分环节已经独立,可进行离散化以应用于数字控制系统。

3) 本文所提出的速度合成方法可应用于地震模拟振动台反馈控制以及智能型传感器的信号调理环节。

4) Simulink 仿真表明,本文所提出的速度合成器所生成的正弦速度信号在 0.1 ~ 100 Hz 频带内与理论速度信号无论在幅值和相位上均能很好稳合,满足地震模拟振动台反馈控制的需要。

**致谢:** 本文的研究工作得到了黄浩华研究员、闫维明研究员的大力支持,在此表示感谢!

### 参考文献:

[1] 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.

TANG Zhen-yun, LI Zhen-bao, JI Jin-bao, et al. Development in shaking table control system[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(6): 162-169. (in Chinese)

[2] HIRONAKA K, MIURA J, HORIGUCHI K, et al. Shaking-table control taking account of reaction force (two-degree-of freedom controller design of hydraulic shaking system focused on reaction force)[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: Part C, 2009, 75(759): 2909-2916.

[3] 韩俊伟, 于丽明, 赵慧, 等. 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(3): 21-23. HAN Jun-wei, YU Li-ming, ZHAO Hui, et al. Study of three state controller of seismic simulating shaking table [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1999(3): 21-23. (in Chinese)

[4] 关广丰, 熊伟, 王海涛, 等. 6 自由度液压振动台伺服控制策略[J]. 液压与气动, 2008(10): 29-32.

GUAN Guang-feng, XIONG Wei, WANG Hai-tao, et al. Servo control strategy of hydraulically driven 6-DOF vibration table[J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2008(10): 29-32. (in Chinese)

[5] 刘拓, 刘一江, 易伟建. 神经网络多参量地震模拟试验台控制算法[J]. 噪声与振动控制, 2010(5): 43-46.

LIU Tuo, LIU Yi-jiang, YI Wei-jian. Three variable control algorithm based on neural network for shaking table [J]. Noise and Vibration Control, 2010(5): 43-46. (in Chinese)

[6] 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: 57-77.

[7] 王绍荣, 黄浩华. 闭环式三参量测振仪: 中国, 200420018811.6[P]. 2005-05-11.

[8] 王新华, 刘金琨. 微分器设计与应用—信号滤波与求导[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 11-17.

(责任编辑 张 蕾)