

# 简易单自由度振动台设计

田志昌<sup>1</sup>,张安康<sup>2</sup>,郝润霞<sup>1</sup>

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010;2. 中铁十九局集团第二工程有限公司,辽宁 辽阳 111000)

**摘要** 目的 提出简易单自由度振动台的具体设计方案和结构动力学方面的两类设计方案,解决地震试验模拟设备较为匮乏问题。**方法** 采用电力机械式的运动形式,设计一款沿水平方向随机振动的振动平台,试验时通过把等效参数转化的模型固定于台面,运用拉线位移计、拉线速度计、拉线加速度计记录相关数据,高清摄像机记录每个时间段内振动时的振幅。**结果** 检测建筑结构模型的薄弱环节,获得优化设计方案;运用动力学进行推导分析,得出相应的结构振动反应;动位移与相同静力情况下位移的比值,确定该结构的反应比。**结论** 简易单自由度振动台造价低廉、结构可靠,可以满足水平广义单自由度柔性结构体系和刚性结构体系的地震模拟试验。

**关键词** 地震试验模拟平台;电力机械式;随机振动;单自由度;地震模拟

中图分类号 TU317

文献标志码 A

## Design of Shaking Table with Simple Single Degree of Freedom

TIAN Zhichang<sup>1</sup>, ZHANG Ankang<sup>2</sup>, HAO Runxia<sup>1</sup>

(1. School of civil engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010; 2. China Railway 19th Bureau Group Second Engineering Co. Ltd., Liaoyang, China, 111000)

**Abstract:** The specific design scheme of shaking table with simple single degree of freedom and two kinds of design schemes in structural dynamics are proposed to solve the problem of lack of seismic test simulation equipment. A vibration platform that randomly vibrates in the horizontal direction was designed by using the electromechanical motion form. When testing, the model transformed by the equivalent parameters on the table surface of the vibration platform, the relevant data is recorded by the pull line displacement meter, the pull speed meter and the pull line accelerometer. According to the HD camera, the amplitude of the vibration during each time period is recorded. The weak link of the building structure model is detected, and the optimized design scheme is obtained. The structural vibration response is obtained by kinetic derivation analysis. The reaction ratio of the structure is obtained by the ratio of the dynamic displacement to the displacement obtained with the same static force. The simple single degree of freedom vibrating table is low in cost

收稿日期:2018-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51268042)

作者简介:田志昌(1961—),男,教授,主要从事地震试验模拟平台设计方面研究。

and reliable in structure, and can meet the seismic simulation test of horizontal generalized single degree of freedom flexible structural system and rigid structural system.

**Key words:** Seismic test simulation platform; electric mechanical type; random vibration; single degree of freedom; seismic simulation

我国处于太平洋地震带和地中海喜马拉雅地震带上,地震活动频繁,主要以浅源地震为主,地震对于房屋、建筑往往会造成极大地破坏<sup>[1]</sup>. 振动台作为模拟振动环境的标准设备,应用范围涉及航空航天、电子、汽车、土木建筑等诸多领域<sup>[2-7]</sup>,振动台主要应用国防力学环境模拟、抗震环境模拟、汽车振动模拟<sup>[8]</sup>. 振动台的作业方式一般有电动作业方式、液压作业方式、机械作业方式<sup>[9-12]</sup>. 在 1997 年之前,我国振动台的振动形式大多数集中在单自由度运动上,多自由度振动台处于起步阶段<sup>[13-16]</sup>. 在此之后,多自由度振动台纷纷出现在我国国家重点实验室、航空航天实验室. 机械作业方式是 3 种作业方式中较好的,主要激励能源采用电力,作业方式采用机械作业. 电力机械式振动台一般包括单自由度、两自由度、多自由度振动方式,随着自由度个数的增加,设计精度会成几何倍数增加<sup>[17]</sup>. 目前,包头市地区尚未引进振动试验模拟设备,无法对于地震环境进行模拟,房

屋动力抗震设计较为匮乏. 而房屋结构经过动力试验的检验,进行优化设计后更能保证人们对房屋建筑的安全性能. 为了满足在包头地区能够在房屋结构动力抗震设计方面的普遍要求,笔者设计一款简易版单自由度振动试验模拟平台,用以检测建筑结构模型的薄弱环节,获得优化设计方案.

# 1 简易单自由度振动台整体设计

## 1.1 振动台面的设计

振动台是一个振动环境试验模拟的一个标准设备,它的性能直接决定了试验成败的关键. 对建筑结构在实际地震环境模拟时,一般采用等效刚度、等效质量、等效阻尼、等效方向、等效参数类型的转换,进行地震模拟分析<sup>[18]</sup>. 在房屋建筑设计中,一般都采用长条型的建筑设计,因此振动台面的长宽设计为 6 m×4 m(见图 1). 台面的设计同时考虑了台面共振及刚度问题.



图 1 单自由度振动台基础平面图

Fig. 1 Base plan of shaking table with single degree of freedom

## 1.2 基础样式的设计

笔者根据长条型房屋建筑结构的特点,在满足长宽比、高宽比的条件下,对于振动台基础也采用长方型设计,长宽高为 10 m×

4.4 m×2.6 m. 按照最不利的设计方式,在长方形的较长方向进行往复振动,振动台面行走方式采用滚轮设计. 基础设置工字型钢轨,锚固于基础上,实现振动平台通过在导轨

上滚动往复行走. 振动台面需要清洗,在基础底部设置一个导排水坑进行排水. 由于在振动环境下试验对于基础的强烈扰动,基础墙壁的厚度采用 50 cm 钢筋混凝土结构.

1.3 整体设计

简单易自由度振动台主要研究结构地震反应、结构振动控制,运动方式为受迫振动. 通过开环控制,在往复运动振动,采用具体测量设备进行反馈. 机械设备运行流程为振动电机→调频器→液力耦合器→减速机→变径曲柄. 振动频率的大小可以调节. 通过不同的曲柄孔径,改变不同的行程,从多角度进行地震试验环境模拟. 一般在地震模拟中,主要考虑水平方向的振动,所以在振动方式上,采用水平方向进行振动.

激振力的大小影响振动台的加速度峰值,自然环境激励下结构的振动加速度不超过  $10^{-3} g$ . 包头地区强地震时,加速度幅值一般不超过 2 g. 例如汶川 8.0 级地震中,距离震中约 21 km 的卧龙台获得了最大加速度峰值为 0.976 g 的强震记录<sup>[19]</sup>. 在地震来临时,结构的振动频率一般在 1 ~ 10 Hz 内进行振动. 所以在振动台运动频率控制在低频 1 ~ 10 Hz 内,振动台面加速度的设计至少 1 g 的加速度. 建筑结构进行模拟试验时,都是按照等效模型设计,设计后的模型往往刚度较大,不容易引起破坏. 因此,振动台面的加速度峰值设计为 2 g,进行疲劳破坏模拟或变频破坏

模拟.

往复运动的激振力需要综合振动台面质量、夹具的质量、试验构件的质量、设计加速度峰值因素,选定 300 kN 激振力进行激振力的设计. 在地震振动时,一般都有一个相对较大的行程,考虑到低频运动时信号与噪声的比例,选择振动台面左右行程峰值各为 100 mm,共为 200 mm,低频为 1 ~ 10 Hz<sup>[20]</sup>. 地震来临时,地面所承受的激励,导致建筑物构筑物进行运动时,往往是低阻尼运动. 在振动台台面行走方式设计时,采用滚轮设计来减小振动系统的阻尼大小. 试验时通过涂抹润滑剂或镁粉调整阻尼的减小或增大,来模拟单一变量对于振动试验的影响. 对于行走轨道,采用性能优良的工字型钢进行设计,为满足振动台面往复行走的需要,材料选用 Q345 标号的钢材,单自由度振动台平面布置如图 2 所示,剖面图如图 3 所示.

单自由度振动台可以划分为标准振动台和测量部分. 测量部分包括对于施加荷载大小和方向、位移和加速度的测量. 在沿长度方向两侧各设置一个刚度较大的塔架进行固定. 对于塔架的材料,选用比刚度、比强度较大的铝合金材料塔架设计,设计高度为 8 m. 试验时将拉线位移计、拉线速度计、拉线加速度计分别固定于振动台面和模型结构、刚性塔架上. 删除测量失真较大的数据,找出结构各层之间的侧向层间位移.

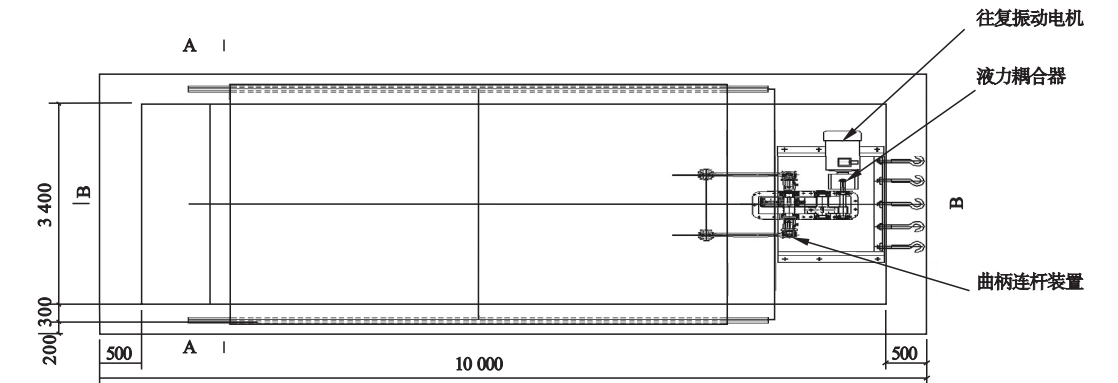


图2 单自由度振动台平面布置图

Fig.2 Floor plan of shaking table with single degree of freedom

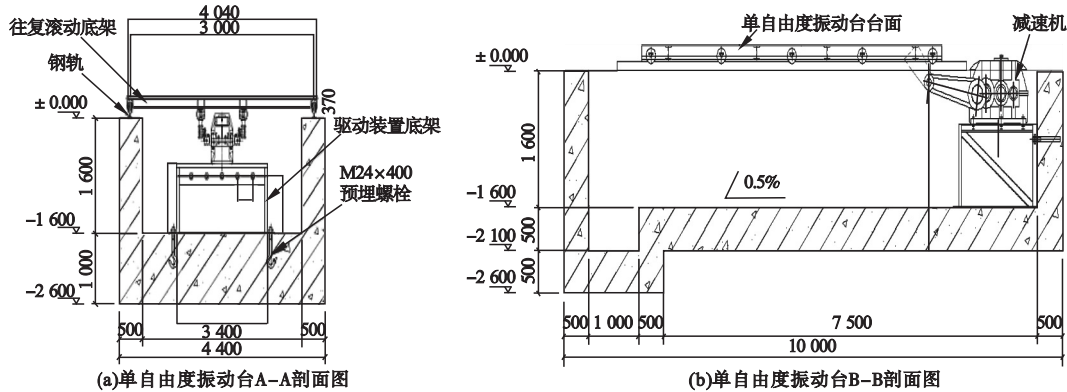


图3 单自由度振动台剖面图

Fig. 3 Profile of shaking table with single degree of freedom

2 动力试验的设计

结构的振动按其振动形式可以分为随机振动和非随机振动. 非随机荷载包括周期性荷载和非周期性荷载<sup>[21-22]</sup>. 周期性荷载像正弦变化荷载、余弦变化荷载,称为简谐变化荷载,也就是动力学中常见的简谐波. 非周期荷载像三角形式荷载、半正弦间隔形式的荷载、半余弦间隔形式的荷载属于另一类周期性荷载. 非周期性荷载有短时间内的冲击荷载和长时间持续的一般形式荷载,常见形式有冲击波和爆炸,如半正弦脉冲、矩形脉冲、三角形脉冲,一般持续时间较短. 在进行动力模拟时,可以借助短期脉冲的位移反应谱进行求解往往比较方便. 地震则是长时间持续的一般荷载,是一种独特的随机荷载类型. 在结构振动试验中,会用周期性荷载来测基本参数.

对于结构来讲,在承受外部激励时,基本的物理特性有:体系的质量、弹性特性、能量耗散机理. 任一荷载的振动形式,结构的反应主要结构的位移. 其简单运动的结构动力学方程表达式为

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p(t). \tag{1}$$

式中: $p(t)$ 为激励荷载; $m\ddot{v}(t)$ 为惯性力; $c\dot{v}(t)$ 为阻尼力; $kv(t)$ 为弹性力; $m$ 为质量; $\ddot{v}(t)$ 有关时间的加速度函数; $c$ 为阻尼常数; $\dot{v}(t)$ 为有关时间的速度函数; $k$ 为弹簧刚度; $v(t)$ 为有关时间的位移函数.

在简单振动试验设计中,一般假设梁为刚性、柱子无重,通过简单的动力试验,可以测量梁在振动中的有效重量、振动频率、阻尼特性、 $n$ 周后运动位移的振幅. 其中,结构试验的代表性谐振荷载形式为正弦波,其运动方程为

$$m\ddot{v}(t) + c\dot{v}(t) + kv(t) = p_o \sin \omega t. \tag{2}$$

式中: $p_o$ 为谐振荷载; $\omega$ 为圆频率; $\sin \omega t$ 为谐振荷载的形式.

根据式(1)、式(2)得到结构在正弦谐振荷载下的位移反应、结构的最大弹性恢复力. 简单运动体系通常是黏滞阻尼体系,振动系统在进行振动试验模拟时,会有一定的能量损失,造成自振时能量衰减的特性,这是动力学中的黏滞阻尼特性. 一般而言,黏滞阻尼体系仅仅能用于简单的运动形式,只针对于受谐振荷载的作用,对于结构承受地面激励而言就不稳态.

在简单振动试验中,一般动力荷载通常可以采用叠加法进行计算,运用 Simpson 法则进行求解. 当需要频率确定相关参数,并进行 Fourier 级数变换时,采用频域分析法往往更为精确. 如果把荷载和反应的历程分成一系列的时间间隔,每步反应都是独立的,相当于非线性分析. 单自由度冲击荷载形式的振动反应比一般包括两个阶段:第1阶段为荷载作用期间内的受迫振动;第2阶段则是随后发生的自由振动<sup>[23]</sup>. 用 L'hospital 法则,来





式中: $E$ 为杨氏弹性模量; $a_1$ 为阻尼常数.

依据欧拉-伯努力平截面假设,可得:

$M(x,t)=EI(x)[v''(x,t)+a_1\dot{v}(x,t)].$  (9)

式中: $EI(x)$ 为有关竖向位移 $x$ 抗弯刚度函数.

最终,外力和内力做虚功表达式为

$$\partial W_E = [-\ddot{Z}(t) \int_0^L m(x)\psi(x)^2 dx - \ddot{v}_g(t) \int_0^L m(x)\psi(x) dx] \partial Z.$$
 (10)

$$\partial W_I = [Z(t) \int_0^L EI(x)\psi''(x)^2 dx + a_1 \dot{Z}(t) \int_0^L EI(x)\psi''(x) dx] \partial Z.$$
 (11)

广义运动方程:

$m^* \ddot{Z}(t) + c^* \dot{Z}(t) + k^* Z(t) = p_{\text{eff}}^*(t).$  (12)

广义质量 $m^*$ 为

$m^* = \int_0^L m(x)\psi(x)^2 dx.$  (13)

广义阻尼 $c^*$ 为

$c^* = a_1 \int_0^L EI(x)\psi''(x)^2 dx.$  (14)

广义弯曲刚度 $k^*$ 为

$k^* = \int_0^L EI(x)\psi''(x)^2 dx.$  (15)

广义等效刚度 $p_{\text{eff}}^*$ 为

$p_{\text{eff}}^*(x) = -\ddot{v}_g(t) \int_0^L m(x)\psi(x) dx.$  (16)

广义角频率 $\omega^*$ 为

$\omega^* = \sqrt{\frac{k^*}{m^*}}.$  (17)

广义周期 $T^*$ 为

$T^* = \frac{2\pi}{\omega^*} = \text{广义周期}.$  (18)

在刚性试验设计中,笔者选取结构5层某厂房为试验模型,用筒简单自由度振动台进行设计.假设厂房的大梁为刚性,柱子为无重弹性(见图6、图7).

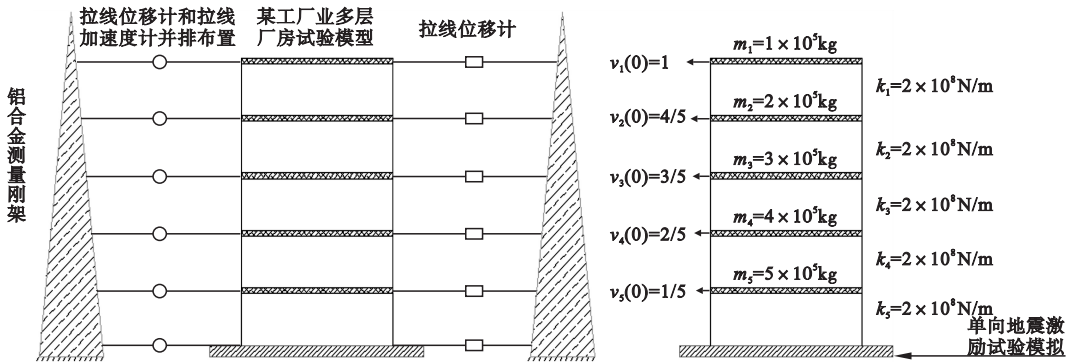


图6 水平单自由度刚性厂房试验设计

Fig. 6 Project of rigid plant test with horizontal single-degree-of-freedom

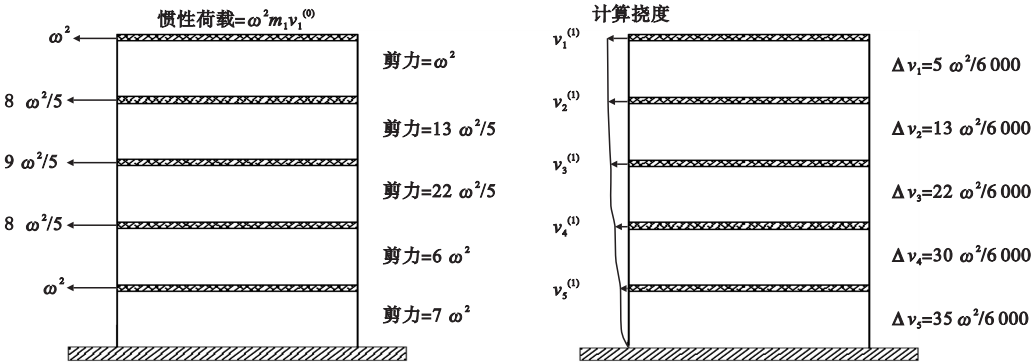


图7 刚性厂房激励后的状态

Fig. 7 Status of the rigid building after excitation

从实际出发设计单自由度刚性厂房的试验样式,具体运动方程解法按照著名瑞利氏第三种解法进行求解.首先令:

$$Z_0^{(0)} = \psi_1^{(0)} = 1. \quad (19)$$

$$\text{然后得: } \psi_2^{(0)} = \frac{4}{5}; \psi_3^{(0)} = \frac{3}{5}; \psi_4^{(0)} = \frac{2}{5};$$

$$\psi_5^{(0)} = \frac{1}{5}.$$

$$v_5^{(1)} = \Delta v_5 = \frac{35}{6\,000} \omega^2 = 0.005\,83 \omega^2 =$$

$$(0.333 \omega^2) \bar{Z}_0^{(1)}$$

$$v_4^{(1)} = \Delta v_5 + \Delta v_4 = \frac{65}{6\,000} \omega^2 = 0.0108\,3 \omega^2 =$$

$$(0.619 \omega^2) \bar{Z}_0^{(1)};$$

$$v_3^{(1)} = \Delta v_5 + \Delta v_4 + \Delta v_3 = \frac{87}{6\,000} \omega^2 =$$

$$0.0145 \omega^2 = (0.828 \omega^2) \bar{Z}_0^{(1)};$$

$$v_2^{(1)} = \Delta v_5 + \Delta v_4 + \Delta v_3 + \Delta v_2 = \frac{100}{6\,000} \omega^2 =$$

$$0.016\,66 \omega^2 = (0.952 \omega^2) \bar{Z}_0^{(1)};$$

$$v_1^{(1)} = \Delta v_5 + \Delta v_4 + \Delta v_3 + \Delta v_2 + \Delta v_1 =$$

$$\frac{105}{6\,000} \omega^2 = 0.017\,5 \omega^2 = \omega^2 \bar{Z}_0^{(1)};$$

$$\text{可得: } \bar{Z}_0^{(1)} = 0.017\,5; \psi_5^{(1)} = 0.333\,\omega^2;$$

$$\psi_4^{(1)} = 0.619\,\omega^2; \psi_3^{(1)} = 0.828\,\omega^2; \psi_2^{(1)} =$$

$$0.952\,\omega^2; \psi_1^{(1)} = \omega^2.$$

新形状  $v_i^{(1)}$  最大动能:

$$T_{\max}^{(1)} = \frac{\omega^2}{2} (\bar{Z}_0^{(1)})^2 \sum m_i (\psi_i^{(1)})^2 =$$

$$\frac{\omega^2}{2} (0.017\,5)^2 \sum m_i (\psi_i^{(1)})^2. \quad (20)$$

新形状  $v_i^{(1)}$  最大势能:

$$V_{\max}^{(1)} = \frac{1}{2} \sum p_i^{(0)} v_i^{(1)} =$$

$$\frac{\omega^2}{2} \bar{Z}_0^{(1)} Z_0^{(0)} \sum m_i \psi_i^{(0)} \psi_i^{(1)}. \quad (21)$$

令新形状的最大动能等于最大势能:

$$T_{\max}^{(1)} = V_{\max}^{(1)} \quad (22)$$

根据式(20)、式(21)、(22)得  $\omega^2$ .

简易单自由度振动台可以比较方便地进行建筑物或构筑物相关试验的模拟.在进行

行试验时,通过把等效参数转化的模型固定于台面,运用拉线位移计、拉线速度计、拉线加速度计可以清晰记录相关数据,同时根据高清摄像机可以清晰记录每个时间段内振动时的振幅大小,进行结构运动分析,可以得出结构的反应.通过与相同静力情况下的位移相比较,来得出该结构的反应比.对于单自由度作用下结构阻尼比、频率比、传导比等参数也一样可以测量.

### 3 结 论

(1)设计一款沿水平方向随机振动的振动平台,并检测建筑结构模型的薄弱环节,获得优化设计方案;运用动力学进行推导分析,得出相应的结构振动反应;通过与相同静力情况下的位移相比较,来得出该结构的反应比.

(2)提出简易单自由度振动台的具体设计方案和结构动力学方面的具体案例设计样式,振动平台解决包头地区动力试验模拟设备较为匮乏问题.简易单自由度振动台造价低廉、结构可靠,可以满足水平广义单自由度柔性结构体系和刚性结构体系的地震模拟试验.

### 参考文献

- [1] 高良.两轴离心机振动台激振系统设计与伺服控制策略的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
(GAO Liang. Excitation system design and servo control strategy study of two axis centrifuge shaker[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [2] CHASE J, GEOFFRE Y, HUDSONNICO-LASH, et al. Nonlinear shake table identification and control for near-field earthquake testing[J]. Journal of earthquake engineering, 2005, 9(4): 461-482.
- [3] 骆涵秀. 液压振动台的发展趋势[J]. 试验机与材料试验, 1985, 5(6): 1-7.  
(LUO Hanxiu. The development trend of hydraulic vibration table[J]. Testing machine and materials testing, 1985, 5(6): 1-7.)
- [4] 胡志强. 液压振动台应用前景的探讨[J]. 测控技术, 1993, 12(5): 2-5.  
(HU Zhiqiang. Explore used prospect for hydroshaker[J]. Measurement & control tech-

- nology, 1993, 12(5): 2-5.)
- [5] NAKAGAWA S, KUNO M, NAITO Y, et al. Forced vibration tests and simulation analyses of a nuclear reactor building[J]. Nuclear engineering and design, 1998, 179(2): 145-156.
  - [6] GOGÉ D. Automatic updating of large aircraft models using experimental data from ground vibration testing[J]. Aerospace science & technology, 2003, 7(1): 33-45.
  - [7] WOO SEONG-WOO, O'NEAL DENNIS L, PECHT M. Reliability design of residential sized refrigerators subjected to repetitive random vibration loads during rail transport[J]. Engineering failure analysis, 2011, 18(5): 1322-1332.
  - [8] 韩俊伟, 张连朋. 多自由度振动台的发展与控制技术[J]. 液压与气动, 2014(1): 1-6.  
(HAN Junwei, ZHANG Lianpeng. The development and control technology of multi-dof-shaker[J]. Chinese hydraulic & pneumatics, 2014(1): 1-6.)
  - [9] 黄泽星. 轴向推力式机械振动台的设计及模拟仿真[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
(HUANG Zexing. The structural design and simulation of an axial thrust type mechanical vibration table[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.)
  - [10] BENZONI G. Challenges of new generation seismic testing facilities[J]. Experimental techniques, 2001, 25(2): 20-23.
  - [11] 吴三灵. 实用振动试验技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1993.  
(WU Sanling. Practical vibration testing technology[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1993.)
  - [12] 胡志强, 法庆衍, 洪宝林, 等. 随机振动试验应用技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 1996.  
(HU Zhiqiang, FA Qingyan, HONG Baolin, et al. Application technology of random vibration test[M]. Beijing: China Metrology Press, 1996.)
  - [13] PAUL C. Earthquakes and engineers: an international history[J]. Earthquake spectra, 2013, 29(2): 669-673.
  - [14] MARCOS A, UNDERWOOD. Digital signal synthesizer: 4782324[P]. 1988-11-01.
  - [15] MARCOS A, UNDERWOOD. Calibration method and programmable phase-gain amplifier: 4937535[P]. 1990-06-26.
  - [16] UNDERWOOD M A. Adaptive control method for multiexciter sine tests: 5299459[P]. 1994-04-05.
  - [17] 许毅. 20T 卧式电液振动台设计及实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.  
(XU Yi. Design and experimental research of 20t electro-hydraulic shaking table[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011.)
  - [18] 成大先, 王德夫, 姬奎生, 等. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.  
(CHENG Daxian, WANG Defu, JI Kuisheng, et al. Mechanical design handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.)
  - [19] 匙庆磊, 杨立志, 高峰, 等. 一种小型低频标准振动台的设计[J]. 地震工程与工程振动, 2014(12): 256-263.  
(SHI Qinglei, YANG Lizhi, GAO Feng, et al. The design of a low frequency calibration shaking table[J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2014(12): 256-263.)
  - [20] 王春宇. 超低频标准振动台相关设计理论及运动控制技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
(WANG Chunyu. Research on related design theory and motion control technology for ultralow-frequency standard vibrators[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.)
  - [21] R·克拉夫, 彭津, 王光远. 结构动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.  
(KRAFT R, PENG Jin, WANG Guangyuan. Structural Dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.)
  - [22] R·克拉夫, 彭津. 结构动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
(KRAFT R, PENG Jin. Structural Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2013.)
  - [23] 刘贞良. 泥石流冲击荷载作用下钢筋混凝土拦挡坝动力响应分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.  
(LIU Zhenliang. Debris flow under the shock load of reinforced concrete Landangdam dynamic response analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.)
  - [24] 李忠杰. 并联三自由度振动台优化设计与动态特性研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.  
(LI Zhongjie. Optimization design and dynamic characteristics of 3-DOF parallel shaking table[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)