振动离心复合环境下结构响应试验研究

李春枝,牛宝良,黎启胜

(中国工程物理研究院总体工程研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:目的研究振动离心试验系统复合功能下的振动台体、吊篮连接装置、离心机机臂端头及机 臂中部的结构振动响应特性及传递规律。方法 根据复合振动激振系统在不同工况下,测量离心 机机臂、连接装置等部位的加速度响应,以振动台体为基准,计算被测部位相对于台体的振动加速 度传递比。结果 在振动离心复合功能运行时,振动响应沿台体、吊篮连接装置、机臂端头到机臂 中部逐级衰减,机臂中部处振动响应最小,响应传递比呈衰减规律;振动复合试验中机臂沿径向传 递比为2.3%、沿切向传递比为2.6%;在正弦拍波试验中,机臂沿垂向传递比为2.3%,沿切向传递比 为3.1%,传递比随拍波频率增大而变化;地震波试验中机臂沿垂向传递比为9.4%,切向传递比为 2.9%。结论 通过试验分析得到振动离心复合下离心机结构连接装置、机臂等位置的振动响应和 传递规律,结果可为大型复杂离心机结构设计及模型修改等提供数据支持。

关键词:振动离心复合;结构响应;激振系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.014

中图分类号: TJ05; V416 文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2015)05-0083-05

Vibration Response of Centrifuge Facility in a Combined Vibration and Centrifuge Environment

LI Chun-zhi, *NIU Bao-liang*, *LI Qi-sheng* (Institute of System Engineering, CAEP, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: Objective To study vibration response and its transmissibility through the fixture of shaking table, the connection device of the hanging basket, and the head and the middle part of the centrifuge arm under the shaker working condition in a combined vibration and centrifuge environment. **Methods** According to the vibration system under different conditions, the acceleration reaction of the centrifuge arm and the connection device was measured to calculate the vibration acceleration transmissibility based on the shaking table. **Results** In the combined vibration and centrifuge environment, the experiment results showed that the vibration response decreased gradually through the shaking table, the connection device of the hanging basket, the head of the arm to the middle part of the arm and the vibration response was the minimum at the middle part of the arm, indicating a decreasing pattern of the response transmissibility. The vertical transmissibility was 9.4%, while the tangential transmissibility was 2.9% in the seismic test

收稿日期: 2015-07-22;修订日期: 2015-08-17

Received: 2015-07-22; Revised: 2015-08-17

作者简介:李春枝(1972—),女,绵阳人,高级工程师,主要从事环境试验结构振动、冲击、噪声等环境适应性测试技术研究。

Biography: LI Chun-zhi(1972—), Female, from Mianyang, Senior engineer, Research focus: environmental adaptability, vibration& shock and noise measurement.

of the centrifuge structure. The tangential transmissibility was 3.1%, while the vertical transmissibility was 2.3% in the sine wave test of the centrifuge structure, and the transmissibility increased with the increase of beat frequency. The radial transmissibility was 2.3%, while the tangential transmissibility was 2.6% in the combined vibration test. **Conclusion** The vibration analysis provides a data reference for large and complex system design of centrifuge and model modification through this experiment in which the vibration response and the transmission pattern of the connection device and the centrifuge arm in a combined vibration and centrifuge environment were obtained. **KEY WORDS**: combination of centrifuge and vibration; structural respond; vibration system

环境振动试验和离心加速度试验一般分时独立 进行,在实际工程中,振动和离心力通常是复合在一 起的。由于大部分产品的工作环境是振动和线加速 度同时作用的复合动态环境,在这种情况下采用分时 独立的试验手段无法预测复合环境下设备的可靠性, 因此利用振动离心复合环境试验可预测在单一环境 中不能估计的潜在故障"。近年来振动离心复合试验 系统的研制得到快速发展,其中一大部分研究方向是 采用振动离心土工复合方法来研究岩土工程,即在高 速旋转中增加模拟模型重力的设计,以获得期望模型 同等重力,达到试验研究模拟地震目的^[2-8]。在研制大 型振动离心复合系统中的振动激振系统设计安装非 常关键,一般振动激振系统设计顺臂或垂臂安装在离 心机机臂上,目前较常见的安装方式是采用吊篮装置 连接底板安装振动激振试验系统[9-11]。由于激振系统 和离心机结构连接处的刚度、阻尼不同,在高速旋转离 心场下,机臂和振动台体连接装置间容易产生振动耦 合,若离心机臂扰度和转角太大,会影响到离心振动复 合功能的实现,可能会限制复合系统的某些能力。美 国圣地亚实验室曾通过采用多种激振方式对不同质量 的试件开展试验研究,以此获得振动离心试验系统的 设计能力及试验结果,同时研究了在离心力场下对采 用压电式激振系统方式的复合工作能力及其局限性问 题^[12]。目前有文献报道约20多台大型离心机配备了 振动台等动力试验设备[13-14],由于理论不易真实地计 算出当振动激振系统工作时对离心机机臂等结构产 生耦合响应的具体数值,而且有关试验数据的相关文 献国内外报道较少。因此针对振动离心复合环境下 对复合设备不同部位开展了比较详细的试验研究,获 得了振动台体、离心机臂、连接装置等不同部位的响 应试验数据和传递规律,为复杂系统设计及模型修改 提供了分析依据。

1 复合振动试验系统

振动试验系统的三维示意如图1所示,通过离心 机吊篮装置将振动试验系统底座、控制系统、动力油 源系统、动作系统安装为复合振动激振系统^[15]。采用 垂臂安装方式,台体激振方向为图1中z向所示,复合 环境下的离心机和振动连接装置会产生不同的耦合 响应,若响应过大可能会使机臂产生垂向振动,进而 影响连接装置的振动特性^[15]。文中针对离心振动复 合机臂、连接装置振动响应特性及传递规律开展了 试验研究。



图 1 振动试验系统三维图 Fig.1 The 3D schematic of hydraulic vibration system

2 试验仪器设备

试验设备包括离心-振动试验系统和测量系统, 测量系统由振动加速度传感器、信号放大器以及数据 采集仪组成。试验目的是研究在不同离心加速度下 结构自身的振动响应大小以及在振动复合环境下从 台体到吊篮连接装置、机臂端头和机臂中部等的传递 特性。为研究在不同离心加速度g值下实现振动复合 功能,开展的试验项目包括随机复合振动、正弦拍波、 地震波试验等。试验测试方向定义:沿径向(离心方 向)为x向,沿离心机机臂切线方向为y向,垂直于地 基的方向为z向。测点位置如图2所示,包括振动台 体、吊篮连接装置、机臂端头、机臂中部位置。

3 试验结果与分析

3.1 振动复合试验及响应传递比

结合离心-振动复合工作状态及测试目的分别在



图 2 测点位置 Fig.2 Measurement points

台体表面、吊篮连接装置、离心机机臂端头、离心机机 臂中部部位各安装一只加速度传感器,测量切向(y)、 径向(x)和垂直基座(z)三个方向的响应。表1列出了 随机振动复合条件下被测部位的响应大小以及沿台 体到机臂的传递比。从表1可以看出,振动响应沿台 体、吊篮连接装置、机臂端头到机臂中部逐级变小,在 机臂中部处振动响应最小,响应沿连接装置到机臂方 向逐渐衰减;台体加速度响应最大,沿径向为17.7g,切 向为7.41g,垂向为0.71g;机臂中部响应最小,径向为 0.09g,切向和垂向分别为0.19g和0.21g。表1数据说 明了离心机机臂的径向振动响应小于挡机臂切向和 垂向的响应,机臂切向响应小于其垂向的振动,说明 复合功能下振动导致的机臂摆振情况存在,但量级 小,基本不会对复合试验系统带来影响。

表1 振动复合试验数据

Table 1 Data of the compound vibration test

| 测点位置 | 测量方向 | 加速度响应/g |
|---------|---------------|---------|
| | <i>x</i> (径向) | 0.09 |
| 离心机机臂中部 | y(切向) | 0.19 |
| | z(垂向) | 0.21 |
| 离心机机臂端头 | <i>x</i> (径向) | 0.42 |
| | y(切向) | 0.49 |
| | z(垂向) | 0.29 |
| 吊篮连接装置 | <i>x</i> (径向) | 1.01 |
| | y(切向) | 0.59 |
| | z(垂向) | 0.31 |
| 振动台体 | <i>x</i> (径向) | 17.70 |
| | y(切向) | 7.41 |
| | z(垂向) | 0.71 |

通过计算复合振动响应传递比,以分析在复合 功能作用下离心机结构不同部位的振动特性传递规 律,表2列出了振动复合试验数据及其与振动台体表 面的径向、切向传递比。从表2可以看出,在离心-振 动复合功能运行时,分别沿径向、切向的响应从台 体、吊篮连接装置、机臂端头到中部的传递比呈逐级 衰减规律。

表2 振动复合试验传递比

Table 2 The transmissibility in the compound vibration test

| 被测部位/响应基准 | 径向传递比 | 切向传递比 |
|------------|-------|-------|
| 吊篮连接装置/台体 | 5.7% | 7.9% |
| 离心机机臂端头/台体 | 2.3% | 6.6% |
| 离心机机臂中部/台体 | 0.5% | 2.6% |

3.2 正弦波试验数据及加速度传递比

通过开展振动离心复合试验的正弦拍波试验,包括20,80 Hz两个典型正弦波试验。表3中给出了拍波试验数据及其计算的加速度传递比,可以看出,20 Hz 正弦波试验中,机臂沿垂向的最大加速度响应为 0.25g,沿切向加速度响应为0.34g;吊篮装置沿垂向响 应为2.5g,沿径向响应为1.4g。在80 Hz拍波试验中, 机臂沿垂向的加速度响应为0.19g,沿切向响应为 0.64g;吊篮装置沿垂向响应为5.5g,沿径向响应为 3.2g。正弦拍波试验中,吊篮沿垂向传递比为25%,沿 径向传递比为14.5%,沿切向传递比为14.5%。离心机 结构沿垂向传递比为2.3%,沿切向传递比为3.1%。从 试验数据看,传递比随正弦拍波频率增加而变化。

表3 正弦拍波试验数据及传递比

Table 3 Data and the transmissibility in the sine wave test

| 测试 | 测量 | 最大加速 | 度响应/g | 传递 | 比/% |
|------------|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 部位 | 方向 | 80 Hz | 20 Hz | 80 Hz | 20 Hz |
| 离心机 | y(切向) | 0.64 | 0.34 | 2.9 | 3.1 |
| 机臂中部 | z(垂向) | 0.19 | 0.25 | 0.9 | 2.3 |
| 吊篮连 接装置 | <i>x</i> (径向) | 3.2 | 1.4 | 14.5 | 12.7 |
| | y(切向) | 2.6 | 1.6 | 11.8 | 14.5 |
| | z(垂向) | 5.5 | 2.5 | 25 | 22.7 |
| 控制点 | 实际响应最大值 | 22 | 11 | — | _ |

3.3 冲击地震波数据及响应传递比

根据试验研究目的开展了2次典型冲击地震波试验,控制加速度实测分别为19g和18.2g。表4给出了地震波试验中所得到的离心机机臂和吊篮装置的加

速度响应及传递比结果,从总体上说,响应从吊篮到 机臂是呈衰减规律。其中,吊篮装置沿径向的最大加 速度为2.1g,沿垂向最大加速度为4.1g,沿切向最大加 速度为1.85g;而机臂结构沿垂向最大加速度为0.24g, 沿切向最大加速度为0.52g。吊篮连接装置沿垂向最 大响应传递比为21.5%传递比,径向最大响应传递比 为11.1%;机臂沿垂向最大响应传递比为9.4%,切向 传递比为2.9%。

表4 地震波试验数据及传递比

Table 4 Data and the transmissibility in the seismic test

| 测试 | 测量 | 最大加速度响应/g | | 传递比/% | |
|------------|---------------|-----------|------|-------|------|
| 部位 | 方向 | 1# | 2# | 1# | 2# |
| 离心机 | y(切向) | 0.46 | 0.52 | 2.4 | 2.9 |
| 机臂中部 | <i>z</i> (垂向) | 0.24 | 1.7 | 1.3 | 9.4 |
| 吊篮连 接装置 | <i>x</i> (径向) | 2.1 | 1.9 | 11.1 | 10.6 |
| | y(切向) | 1.85 | 1.6 | 9.7 | 8.9 |
| | <i>z</i> (垂向) | 4.1 | 3.5 | 21.5 | 19.4 |
| 控制点 | 实际响应最大值 | 19 | 18.2 | | _ |

试验结果表明,在振动离心复合功能运行时,振 动响应沿台体、吊篮连接装置、机臂端头到机臂中部 逐级衰减,机臂中部处振动响应最小,响应传递比呈 逐级衰减规律。振动复合试验机臂沿径向传递比为 2.3%,沿切向传递比为2.6%。离心机机臂的径向振 动响应小于沿机臂切向和垂向的响应,机臂切向响 应小于其垂向的振动。这说明复合功能下振动导致 的机臂摆振情况存在,但量级小,基本不会对复合试 验系统带来影响。根据正弦拍波试验结果,机臂沿 垂向传递比为2.3%,沿切向传递比为3.1%,而机臂响 应的传递比随拍波频率增大而逐渐变化。这说明随 着振动复合试验加载量级和加载的频率增大,会对 机臂振动响应产生影响,所以复合功能试验时要注 意量级和试验条件加载等问题。地震波试验机臂沿 垂向传递比为9.4%,切向传递比为2.9%。可以分析 得出,在离心振动复合功能加载时所产生的沿机臂 切向扭矩较小,因此它对离心复合系统运行不会造 成一定的安全风险。

4 结论

对离心-振动复合试验系统工作状态下的振动台体、吊篮连接装置、离心机机臂端头及机臂中部的结构振动响应情况及传递规律开展了复合振动、正弦拍

波及冲击复合试验研究。根据激振系统在不同工况 下,测量台体、吊篮连接装置、离心机机臂端头及中部 等加速度并计算其振动传递比。试验结果亦表明振 动响应沿台体、吊篮连接装置、机臂端头到机臂中部 逐级减小,响应传递比呈逐级衰减规律,为今后开展 类似复杂系统设计及模型修改提供数据支持,具有一 定的参考价值。

参考文献:

- 宫晓春,朱曦全,胡彦平.离心振动复合环境试验系统的动 力学建模[J].强度与环境,2013,40(3):15—16.
 GONG Xiao-chun, ZHU Xi-quan, HU Yan-ping. Dynamical Modeling of Centrifuge Force-vibration Compound Environment Experiment System[J]. Journal of Structure & Environment,2013,40(3):15—16.
- [2] 侯瑜京. 土工离心机振动台及其试验技术[J]. 中国水利水 电科学研究院学报,2006,4(1):15—17.
 HOU Yu-jing. Shaking Table and Its Experiment Technology of Geotechnical Centrifuge[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(1): 15—17.

WANG Yong-zhi, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. The Overall Design Method of the 40g-t Horizontal One-way Centrifugal Vibration Table[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(6):11-17.

- [4] CRAIG W H. Edouard Phillips and the Idea of Centrifuge Modeling[J]. Geotechnique, 1989(39):679-700.
- [5] 邢建营,邢义川,梁建辉. 土工离心模型试验研究的进展与 思考[J].水利与建筑工程学报,2005,3(1):27—31.
 XING Jian-ying, XING Yi-chuan, LIANG Jian-hui. Progress and Thought about the Research of Geotechnical Centrifuge [J]. Journal of Water Conservancy and Construction Engineering,2005,3(1):27—31.

[6] 周健,刘宁. 离心模型试验技术应用的新进展[J]. 上海地质,2002(1):52—56.
ZHOU Jian, LIU Ning. New Progress in Application of Centrifugal Model Technology[J]. Shanghai Geology, 2002(1): 52—56.

- [7] BRUCE L, DRISS I M. Design of a Large Earthquake Simulator at UC Davis[C]// Centrifuge 94.Balkema: Rotterdam, 1994:169-175.
- [8] 于玉贞,陈正发. 土工离心机振动台系统的发展研究[J]. 水利水电技术,2005,36(5):19—21.
 YU Yu-zhen, CHEN Zheng-fa. A Review on Development of

Shaking Table System for Geotechnical Centrifuge[J]. Water Presource and Hydroppower Engineering, 2005, 36(5):19–21.

- [9] 牛宝良,王珏. 离心机上的垂直振动台时域建模与仿真[J]. 长江科学院院报,2012(4):75—76.
 NIU Bao-liang, WANG Jue. Time Domain Modeling and Simulation with Vertical Vibration Hydraulic Shaker on Centrifuge
 [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012(4):75—76.
- [10] 王珏,牛宝良,胡绍全. 离心场中二维地震模拟振动台建模 与仿真[J]. 机床与液压,2008(10):144—145.
 WANG Jue, NIU Bao-liang, HU Shao-quan. The Modeling and Simulation of a 2D Earthquake Simulation Shaker in Cengtrifuge[J]. Journal of Machine Tool and Hydraulics, 2008 (10):144—145.
- [11] 濮家骝.土工离心模型试验及其应用的发展趋势[J].岩土 工程学报,1996,18(5):92—94
 PU Jia-liu. The Development of Geotechnical Centrifuge Model Test and Its Application[J]. Chinese Journal of Geo-

Model Test and Its Application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(5):92-94.

- [12] RODGERS J D, CERICOLA F, DOGGETT J W, et al. Vibrafuge: Combined Vibration and Centrifuge Testing[C]// Shock and Vibration Symposium.VA: Virginia Beach, 1989.
- [13] 孙锐,袁晓铭,王永志. NEES系统中振动离心机最新进展
 及国内振动离心机发展设想[J]. 世界地震工程,2010(1):
 31—39.

SUN Rui, YUAN Xiao-ming, WANG Yong-zhi. The Latest Developments in the Vibration Centrifuge and the Development of the Domestic NEES System[J]. World Earthquake Engineering, 2010 (1):31-39.

- [14] ZHANG Xiang-wu. Earthquake Simulation in Geotechnical Engineering[C]// The 9th Academic Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Beijing, 2003: 228– 233.
- [15] 严侠,牛宝良,米晓兵. 液压振动台试验系统中的控制系统 集成设计[J]. 装备环境工程,2008,5(6):274—275.
 YAN Xia, NIU Bao-liang, MI Xiao-bing. Integrated Design of Control System of Hydraulic Vibration Table[J]. Equipment Environment Engineering,2008,5(6):274—275.

(上接第10页)

[43] 国家自然科学基金委. 国家自然科学基金委一十二五发展 规划[Z]. 2011.

Natural Science Foundation of China. Natural Science Foundation of China-the 12th Five-year Plan[Z]. 2011.

- [44] 白冰,周健. 土工离心模型试验技术的一些进展[J]. 大坝观测与土工测试,2001,25(1):36—39.
 BAI Bing, ZHOU Jian. Some advances in Geotechnical Centrifuge model test technology[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests,2001,25(1):36—39.
- [45] 林明. 国内土工离心机及专用试验装置研制的新进展[J]. 长江科学院报,2012,29(4):80—84.
 LIN Ming. Progress of Geotechnical Centrifuge and Specialized Test Device in China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2012,29(4):80—84.
- [46] 陈岩. 精密离心机误差分析与补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,2006.
 CHEN Yan. Study on Error Analysis and Methods of Compen-

sating for the Precision Centrifuge[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.

[47] 卢永刚,黎启胜,张映梅,等.高精度精密离心机的发展及 关键技术分析[C]//中国工程物理研究院机械工程2011年 学术年会论文集.绵阳:中国工程物理研究院机械工程学 会,2011,144—147.

LU Yong-gang, LI Qi-Sheng, ZHANG Yin-mei, et al. Development and Key-technology Analysis of High Precision Centrifuge[C]// The 2011 Academic Conference Corpus of Mechanical Engineering of China Academy of Engineering Physics. Mianyang: Mechanical Engineering Society of China Academy of Engineering Physics, 2011, 144—147.

[48] 王珏,宋琼,牛宝良. 高动态离心机系统建模与仿真[J]. 装备环境工程,2010,7(6):285—291.
WANG Jue, SONG Qiong, NIU Bao-liang. Modeling and Simulation of High Dynamic Centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering,2010,7(6):285—291.