

水力式升船机平衡重系统单竖井模型 振动试验研究*

徐雪源^{1,2}, 胡亚安¹, 谢兴华¹, 李中华¹

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 盐城工学院, 江苏盐城 224051)

摘要: 水力式升船机是我国提出的具有自主知识产权、利用水能作为提升动力和安全保障措施的新型垂直升船机形式。针对该型升船机研究现状, 设计制作平衡重系统单竖井简化模型, 对其进行不同频率不同振幅正弦振动试验。结果表明: 低频产生的振动响应比高频明显, 且振幅越大振动响应越激烈; 当试验频率接近模型结构自振频时, 竖井与浮筒间隙水体晃动剧烈, 浮筒上下运动明显, 承船厢也随之上下晃动, 这对升船机的平衡安全运行具有不容忽视的影响, 需要进一步深入研究。

关键词: 水力浮动式升船机; 平衡重; 单竖井模型; 振动试验

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0164-05

Single shaft model experimental study on vibration of hydraulic floating ship lift balance weight system

XU Xue-yuan^{1,2}, HU Ya-an¹, XIE Xing-hua¹, LI Zhong-hua¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China;
2. Yanchen Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: The hydraulic floating ship lift is a new-type vertical ship lift using water as the ascending power and safety measures, which was put forward with independent intellectual property rights in China. In view of the current research on this type of ship lift, we design a simplified model of single shaft balance weight system to conduct the sine vibration test on different frequencies and amplitudes. Experimental results show that the response from the low-frequency vibration response is obvious than that from the high frequency, and the greater the amplitude, the more intense the vibration response is. When the test frequency approaches the the model's self-vibration frequency, water between the shaft and buoy water swing severely and the buoy moves up & down obviously, and the ship chamber also moves up and down with it. All the above movements will exert a significant influence on the balanced and safe operation of the ship lift, so an in-depth research is needed.

Keywords: hydro-floating ship lift; floating balance weight; single shaft model; vibration test

水力式升船机是我国提出的具有自主知识产权、不需要外加提升动力、利用水能作为提升动

力和安全保障措施的新型垂直升船机形式, 属于世界首创。该型升船机可适应较大的水位变幅及

收稿日期: 2016-09-19

*基金项目: 国家自然科学基金(51479123); 交通运输部科技项目(2014329746280)

作者简介: 徐雪源(1972—), 男, 博士生, 副教授, 从事通航建筑物抗震技术教学与研究。

较快的水位变率,在我国河流水流量及水位随季节变化大、河势狭窄的中西部地区有较广阔的应用前景。世界上第一台水力式升船机——景洪水电站升船机,于2008年开始建设,到2016年8月已通过试通航测试,即将正式投入通船运行^[1-5]。

1 基本原理和问题

1.1 基本原理

水力式升船机是由平衡重子系统、提升子系统、承船厢子系统、安全保障子系统和塔柱子系统等多外子系统相互耦合的复杂系统,其基本原理是将平衡重做成质量和体积合适的浮筒,浮筒质量大于船厢总质量,通过输水管道对竖井充泄水,调节浮筒的入水深度改变浮筒的浮力,再利用浮力变化在船厢重与浮筒重之间产生的差值驱动平衡重浮筒的升降,从而带动承船厢升降运行,船厢的运行速度由竖井中充、泄水的速度来控制。承船厢侧的荷载由平衡重平衡(图1),运行中,承船厢侧的荷载发生变化,当承船厢漏水等事故导致系统的平衡条件发生破坏时,能自动改变平衡重(浮筒)在竖井中的淹没水深度达到新平衡,使系统始处于全平衡状态,解决了船厢漏水等极端事故状态下升船机的安全问题,同时可方便实现与下游航道的入水对接。

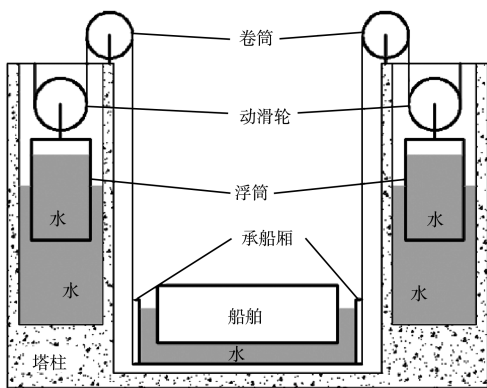


图1 平衡重系统

1.2 基本问题

与传统升船机相比,水力式升船机的船厢升降运行过程具有竖井—平衡重、船厢水面—船厢两个耦合作用面,两个耦合作用面间通过柔性的

钢丝绳连接,任何一个耦合作用面上的微小变化,都会通过钢丝绳传递到另一个耦合界面上,因此两个不同的流固耦合界面间还有相互的耦合影响,同时钢丝绳是一柔性的弹性物体,会增大两个耦合界面间的耦合作用,这使得水力浮动式升船机的流固耦合问题十分复杂。再考虑地震引起竖井内水体的晃荡对平衡重(浮筒)浮力作用的影响,浮筒内配重液体的晃荡对浮筒平衡重力的影响(图1)又进一步增加流固耦合的复杂程度。

目前对水力式升船机的地震响应研究还仅仅着眼于具体工程,多集中在塔柱结构本身的地震响应方面。对地震引起竖井、浮筒、承船厢内水体晃荡对平衡重系统影响的流固耦合机理及影响因子等方面还未进行深入研究。而此类问题对整个升船机的安全运行却具有重大的影响。本文立足于此,设计并制作单竖井简化振动模型装置,通过对其进行振动试验,得到该型升船机平衡重系统在振动作用下流固耦合影响机理及影响因子分析研究所需要的相关技术参数,为后续进一步深入开展水力浮动式升船机整体抗震技术研究提供方便并探索一条新思路。

2 单竖井模型的设计与制作

2.1 设计简化思路

因整个升船机系统的复杂性及多个流固耦合作用,在设计装置时没有考虑地震作用时塔柱结构自身的变形,把塔柱结构看成绝对刚性体,用刚性架替代塔柱结构。暂不考虑承船厢内水体晃荡以及厢内船舶运动的影响,将承船厢—水体—船舶系统看成一配重,进行不同频率、不同振幅的正弦驻留振动试验。

2.2 模型设计与制作

本实验研究涉及水力学及结构力学,且结构是个复杂的弹性连接体,包括竖井、平衡重、卷筒、钢丝绳和承船厢。除要满足原、模型几何相似外,还需满足原、模型弹性连接体的运动和动力相似。所建立的物理模型主要目的是研究因地面振动使竖井水产生晃荡,引起的平衡重晃动这

一核心问题，故局部物理模型以水力浮动式升船机单个竖井作为研究对象。

单竖井简化模型布置如图 2 所示。模型几何比尺 $\lambda_l = 1:50$ ，其他比尺按照佛氏数相等换算：时间比尺 $\lambda_t = \lambda_l^{0.5} = 7.07$ ；速度比尺 $\lambda_v = \lambda_l^{0.5} = 7.07$ ；加速度比尺 $\lambda_a = 1$ ；质量及力比尺 $\lambda_m = \lambda_p = \lambda_l^3 = 125\ 000$ ；钢丝绳刚性系数比尺 $\lambda_k = \lambda_l^2 = 2\ 500$ ；物理模型范围包括：竖井、平衡重(浮筒)、卷筒、钢丝绳及承船厢。

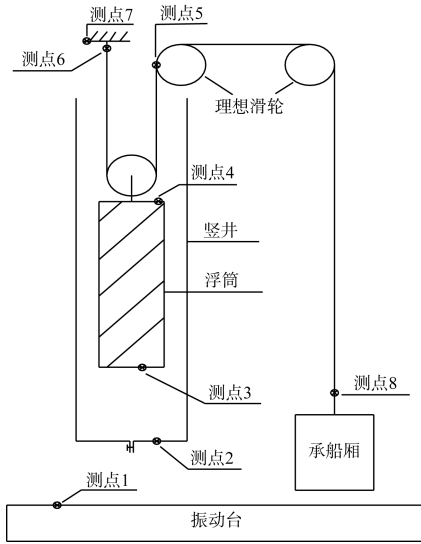


图 2 单竖井模型布置

2.3 量测仪器及测点布置

本文试验量测研究涉及竖井水位、竖井水对平衡重底的浮力、平衡重加速度、钢丝绳拉力等参数，试验中全部采用电测仪器量测，并配备了先进的数据采集系统。测量系统采用东方噪声与振动研究所研制的 INV306 智能数据信息采集记录。

测点布置见图 2。

- 1) 钢丝绳拉力通过在两端钢丝绳上各布置 2 个拉力传感器量(测点 6、8)测钢丝绳受力特性；
- 2) 竖井水位(测点 2)则采用小量程高精度的水压传感器；
- 3) 平衡重晃动(测点 5)量测采用加速度传感器；
- 4) 测点 1 布置加速度传感，监控输入振动参数；测点 7 布置加速度传感器，测定塔柱顶的振

动加速度；

5) 测点 4 布置杆式水位计，量测平衡重晃动时，配重液面的波动；

6) 测点 3 将水压传感器布置于平衡重底部，量测竖井水对平衡重的浮力。

3 振动试验及成果分析

3.1 单竖井振动试验工况

对单竖井模型进行不同频率、振幅正弦驻留振动试验，振动试验采用的工况为：

- 1) 竖井内水位位于高位，承船厢处于低位，平衡重为固体配重；
- 2) 试验输入控制频率分别为：6、10、15、20、22、23、24、25、30、35 Hz；
- 3) 试验输入控制振幅(加速度)分别为：0.3、0.5、0.8、1.0、1.5、2.0、3.0、5.0 m/s^2 。

3.2 不同控制频率、振幅对塔顶加速度的影响

控制频率对塔顶加加速度的影响见图 3，控制振幅对塔顶加加速度的影响见图 4。

分析图 3、4 可知：

- 1) 随着控制频率的增大，塔顶的加速度略微增大；在模型结构自振频率附近因受共振效应的影响，塔顶加速度增大的幅度明显放大。
- 2) 大振幅时模型结构的共振效应比小振幅剧烈得多。

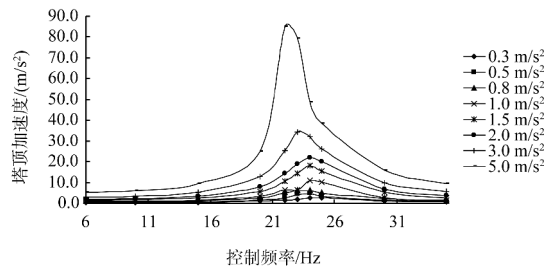


图 3 控制频率对塔顶加速度的影响

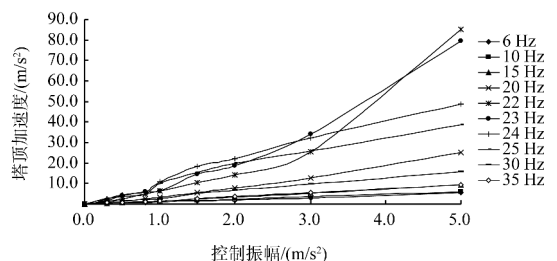


图 4 控制振幅对塔顶加速度的影响

3.3 不同控制频率、振幅对塔顶、承船厢钢丝绳拉力的影响

控制频率对塔顶钢丝绳拉力的影响见图 5, 控制振幅对塔顶塔顶钢丝绳拉力的影响见图 6, 控制频率对承船厢钢丝绳拉力的影响见图 7, 控制振幅对承船厢钢丝绳拉力的影响见图 8。

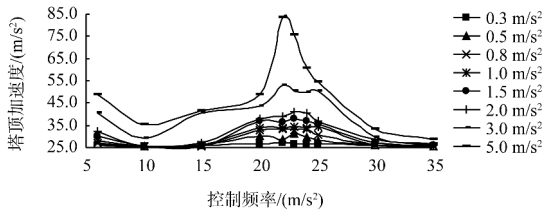


图 5 控制频率对塔顶钢丝绳的拉力

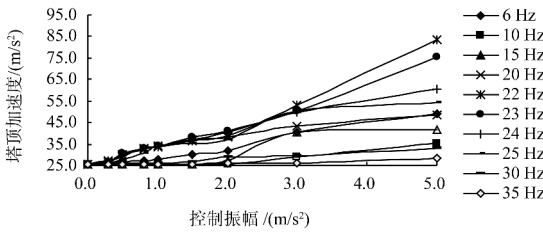


图 6 控制振幅对塔顶钢丝绳的拉力

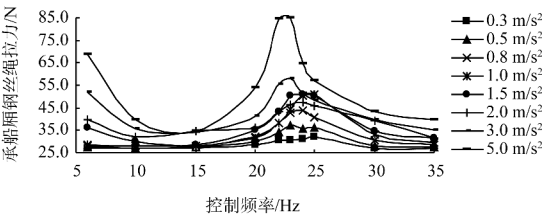


图 7 控制频率对承船厢钢丝绳拉力的影响

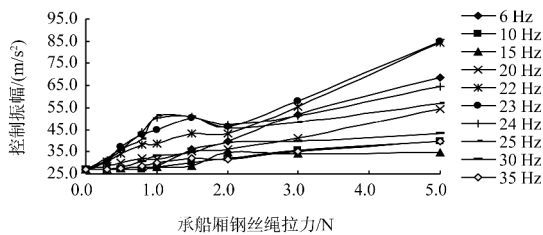


图 8 控制振幅对承船厢钢丝绳拉力的影响

分析图 5、6 可知:

1) 塔顶钢丝绳拉力增大的幅度随控制频率增大有减小的趋势。在模型结构自振频率附近因受共振效应的影响, 塔顶钢丝绳的拉力增大的幅度急剧放大。

2) 在振幅较小时塔顶钢丝绳拉力的增大不明显, 随着振幅提高, 钢丝绳拉力增大比较明显。

分析图 7、8 可知:

1) 承船厢钢丝绳拉力增大的幅度随控制频率变大有减小的趋势。在模型结构自振频率附近因有受共振效应的影响, 塔顶钢丝绳的拉力增大的幅度急剧放大。低频时, 承船厢的左右晃动比较明显, 钢丝绳拉力的增大较多。

2) 承船厢钢丝绳的拉力的增大幅度在大振幅时比小振幅时明显剧烈得多。

3.4 不同控制频率、振幅对竖井、浮筒底水压力水头高度的影响

控制频率对竖井底水压力水头高度的影响见图 9, 控制振幅对竖井底水压力水头高度的影响见图 10, 控制频率对浮筒底水压力水头高度的影响见图 11, 控制振幅对浮筒底水压力水头高度的影响见图 12。

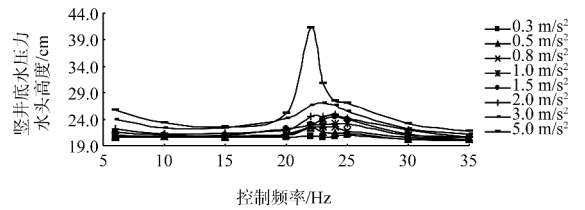


图 9 控制频率对竖井底水压力水头高度的影响

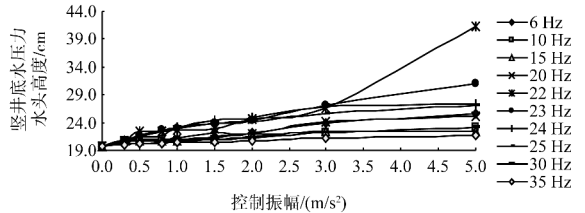


图 10 控制振幅对竖井底水压力水头高度的影响

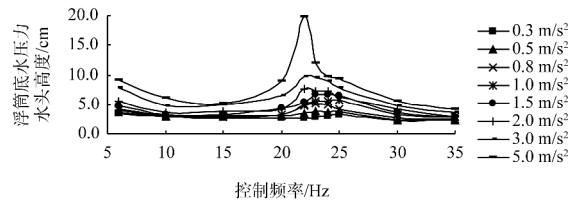


图 11 控制频率对浮筒底水压力水头高度的影响

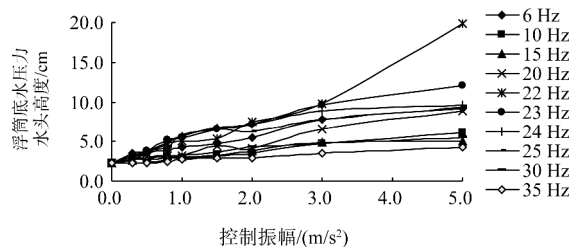


图 12 控制振幅对浮筒底水压力水头高度的影响

分析图9、10可知:

1) 竖井底水压力水头高度增大的幅度随控制频率变大有减弱的趋势。在模型结构自振频率附近因受共振效应的影响,竖井底水压力水头高度增大的幅度急剧放大。

2) 6 Hz时井底水压力水头高度比其他频率同振幅时的增大率大得多,说明低频率时对塔柱结构振动引起竖井内水体的晃荡比较大,需进一步深入研究。

3) 振幅越大,竖井底水压力水头高度增大的幅度越大。

分析图11、12可知:

1) 浮筒底水压力水头高度增大的幅度随控制频率变大有减弱的趋势。在模型结构自振频率附近因受共振效应的影响,浮筒底水压力水头高度增大的幅度急剧放大。

2) 低频率时,浮筒底水压力水头高度的增大幅度很小,在模型的自振频率附近,竖井与浮筒间隙的水体晃荡特别剧烈,浮筒上下晃动也比较明显,承船厢也随着浮筒一起上下晃动,浮筒底水压力水头高度增大幅度比竖井底水压力水头高度增大幅度大得多,说明是因塔柱顶产生较大振幅带动浮筒快速晃动,引起间隙水产生剧烈的晃荡。

4 结语

1) 随着控制频率的增大,塔顶的加速度略微增大。在模型结构自振频率附近因受共振效应的影响,塔顶加速度增大的幅度明显放大,大振幅时模型结构的共振效应比小振幅剧烈得多。

2) 随着控制频率的变大,平衡重系统的塔顶、承船厢钢丝绳拉力,竖井、浮筒底水压力水

头高度均有减弱的趋势。在模型结构自振频率附近因有受共振效应的影响,振动响应增大的幅度均急剧放大。

3) 6 Hz时井底水压力水头高度比其他频率同振幅时的增大率大得多,说明低频率时对塔柱结构振动引起竖井内水体的晃荡比较大。低频率时,浮筒底水压力水头高度的增大幅度很小,在模型的自振频率附近,竖井与浮筒间隙的水体晃荡特别剧烈,浮筒上下晃动也比较明显,承船厢也随着浮筒一起上下晃动,浮筒底水压力水头高度增大幅度比竖井底水压力水头高度增大幅度大得多,说明是因塔柱顶产生较大振幅带动浮筒快速晃动,引起间隙水产生剧烈的晃荡。

本文仅立足于单竖井内的水体晃动和平衡重(浮筒)内的配重液体晃动对竖井-水体-平衡重(浮筒)-钢丝绳-承船厢等提升子系统的流固耦合影响机理和影响因子的分析研究方面,还不能同时考虑承船厢内水体晃动的影响,更未涉及塔柱结构、同步轴等诸多方面,尚待深入研究。

参考文献:

- [1] 钮新强,宋维邦.船闸与升船机设计[M].北京:中国水利水电出版社,2007:268-371.
- [2] 胡亚安.水力浮动式升船机应用基础研究[D].南京:南京水利科学研究院,2011.
- [3] 胡亚安,李中华.乌江思林水电站垂直升船机1:10全整体模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院水工所,2010.
- [4] 李中华,胡亚安.水力浮动式升船机设计原理[J].水运工程,2010(7):116-120.
- [5] 全强.水力浮动式升船机竖井内平衡重波动机理研究[D].南京:南京水利科学研究院,2011.

(本文编辑 郭雪珍)