

大型浮体闸水工模型试验方法

傅宗甫,严忠民,吕家才

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 根据浮体闸水动力要素的相似要求,详细分析水工模型试验所遵循的相似准则和设计试验方法,提出了双模型试验方法。基于工程安全和减小误差的原则,得出如下结论:浮体闸水力模型应按重力相似准则设计,以保证模型水流处于紊流阻力平方区,并且使模型浮体闸各部分质量分布与原型相似;结构振动模型在线应变比尺接近 1 的情况下可以独立地选取长度、弹性模量和密度比尺。简单介绍了模型浮体闸控制量测试装置设计及测力传感器的布置方式。

关键词 大型浮体闸;水动力要素;水工模型试验

中图分类号:TV32⁺1;TV663⁺.5 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2007)05-0006-04

Method for hydraulic model test of large-scale floating sluice//FU Zong-fu, YAN Zhong-min, LÜ Jia-cai(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : According to the similarity requirement of hydrodynamic measurement factors of floating sluice, the similarity criterion for hydraulic model tests and the test design method were analyzed in detail and a double model test method was proposed. Some conclusions based on the design principles to ensure the engineering safety and to decrease the error were derived as follows: the hydraulic model for floating sluice should be designed according to the gravity similarity criterion, so that the model flow could be kept in the turbulence quadratic resistance region, and the mass distribution in each part of floating sluice model is similar to that of the prototype; under the condition that the linear strain scale is close to 1, the scales of length, elastic modulus, and density could be selected independently. Moreover, the design method for control and measurement devices for floating sluice model and the pattern for sensor arrangement were also briefly introduced.

Key words : large-scale floating sluice; hydrodynamic measurement factor; hydraulic model test

由于科学技术和设计理论的限制,现有的许多水利工程在对国民经济发挥巨大作用的同时,也对河道水体水情、水生生物、水体水质等产生了较大的负面影响^[1]。虽然在重要河道上兴建大坝时为鱼类的洄游布置了鱼道等过鱼建筑物,但据统计能起到有效过鱼的鱼道只占所建鱼道总数的 5% 左右。据报道,我国淡水鱼重要产区之一的淮河,昔日碧波荡漾、鱼虾竞游,而今却难觅鱼的踪迹。实践证明,通过对已建闸坝运行方式进行调整,适当改建闸坝以扩展其生态功能,对新建闸坝根据建筑物的运行特点采用生态友好型的新型闸坝,可以更好地发挥水利设施的效益,将水利设施的副作用降到最低点。因此开展对新型水工建筑物的研究,做到技术先进、经济合理、运行安全,是非常必要的。

大型浮体闸是在传统浮箱式闸门的基础上改进而成的新型水工控制建筑物,它突破了传统浮箱门只能在静水中或流速很小的水流中使用的限制,具

有生态型及景观型双重功能,是一座可以浮动的旋转启闭式水闸。水闸平时停靠在岸边的门库内,处于不阻水状态,可以全河道通航。需要关闸时,旋转至关闭位置,然后向浮体闸底部的浮箱(水舱)充水,使其下沉到位,利用浮体闸上部可自由开启的卧倒式平面钢闸门(简称卧倒门)调节上游水位或控制过闸流量,开闸过程与关闸的顺序相反^[2]。图 1 为浮体闸结构示意图。

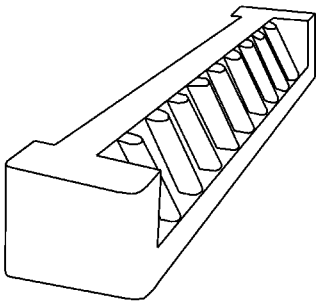


图 1 浮体闸结构示意图

作者简介:傅宗甫(1966—),男,浙江青田人,副研究员,博士研究生,从事工程水力学研究。E-mail: zffu@hhu.edu.cn

浮体闸整个运行过程需经过旋转定位、充水下沉、卧倒门启闭、排水上浮 4 个阶段,运行条件相当复杂,需要在设计阶段确定浮体闸旋转定位过程中的牵引力、反向控制力,沉浮过程中的稳定性以及卧倒门泄流时的水流及振动特性。浮体闸的应用目前还不广泛,没有成熟的设计标准,仅通过理论分析还难以解决其在运行过程中的水力特性,需要借助专门的水工模型试验。由于浮体闸涉及的水动力特性较多,模型试验不宜按照常规水工模型试验方法进行,本文根据浮体闸水动力要素的相似要求,对水工模型试验所遵循的相似准则和设计试验方法进行分析,提出了双模型试验方法,得出基于工程安全和减小误差的原则。此外,笔者对模型浮体闸控制量测试装置进行了设计,介绍了测力传感器的布置方式。

1 浮体闸水工模型试验的水动力要素

浮体闸整个运行过程中需经过牵引定位、充水下沉、卧倒门启闭、排水上浮 4 个阶段,与一般单一的水工模型试验有很大的不同,主要表现在运行控制过程复杂,量测精度要求高,量测内容繁多。定位过程需对浮体闸的阻力(牵引力)特性、摇摆情况、浮体闸周围河道的流速场以及浮体闸对岸墙的撞击力进行观测;充水下沉及排水上浮阶段主要观测浮体闸的浮性、稳定性(倾斜情况)、压强、岸墙摩阻力、浮箱底部水流剪切力以及底板受到的撞击力;卧倒门启闭过程中泄流能力、卧倒门受到的脉动压强以及振动特性为主要观测要素。

2 浮体闸水工模型试验相似性分析

2.1 牵引定位过程

浮体闸在牵引定位过程中主要受水流阻力、惯性阻力以及浮体闸与岸墙之间撞击力的作用。因此,牵引过程需保持阻力及撞击力相似。

要使水流阻力在模型与原型两个液流间形成相似关系,应使它们的边界条件(包括几何形状)和阻力受力状况相似^[3]。为此根据浮体闸在定位过程中所受水流阻力的类别,对水流阻力进行量纲分析。通过分析认为,浮体闸的水流阻力主要与浮体闸的长度 L 、水流速度 u (相对于浮体闸)、水的密度 ρ 、水的运动黏性系数 ν 以及重力加速度 g 有关,将水流阻力 R 写成上述各参数的函数关系为

$$R = f(L, u, \rho, \nu, g) \quad (1)$$

一般可以将式(1)表达成指数函数形式,即

$$R = K L^a u^b \rho^c \nu^d g^e \quad (2)$$

式中: a, b, c, d, e 为待定的指数。将式(2)两边写

成有量纲的形式,根据量纲和谐原理得到 a, b, c, d, e 的关系式并回代到式(2)后有

$$R = K \rho u^2 L^2 \left(\frac{V}{\sqrt{gL}} \right)^{-\frac{5}{2}} \left(\frac{VL}{\nu} \right)^{-d} \quad (3)$$

式中: $\frac{V}{\sqrt{gL}} = Fr$, 即佛劳德数; $\frac{VL}{\nu} = Re$, 即雷诺数,考虑到式(3)中 L^2 与面积 S 的量纲相同,引入无量纲

阻力系数 $C_D = \frac{R}{\frac{1}{2} \rho u^2 S}$, 可以将式(3)改写为

$$C_D = f(Fr, Re) \quad (4)$$

从式(4)可以看出,水流阻力系数主要跟佛劳得数和雷诺数有关,因此要保证水流阻力相似,模型需同时满足重力相似和阻力相似准则,即模型与原型的佛劳得数和雷诺数分别相等。

要使绕轴的浮体闸满足惯性阻力相似,即要求转动惯量相似。由于浮体闸的体型结构复杂,转动惯量的计算非常复杂^[4],模型中可以通过保证浮体闸各部分的质量分布相似以保证转动惯量相似,而不去直接计算浮体闸的转动惯量。

当模型浮体闸与岸墙的材料分别与原型一致时,浮体闸与岸墙之间的撞击力可以用无量纲形式表示为^[5]

$$\frac{F_z}{EL^2} = f\left(\frac{v}{\sqrt{E/\rho}}, \theta\right) \quad (5)$$

式中: F_z 为浮体闸对岸墙的撞击力; E 为浮体闸的弹性模量; v 为浮体闸对岸墙的撞击速度; ρ 为浮体闸的质量密度; θ 为浮体闸与岸墙的撞击角度。

式(5)表明,要使原型、模型左端相等,则要求模型浮体闸的撞击速度与原型的相等。

2.2 沉浮过程

沉浮过程中,需对浮体闸的浮性、稳定性(倾斜情况)、对底板的撞击力及压强、摩阻力、剪切力等进行观测与控制。浮体闸的浮性通常可以用浮体闸的排水体积与吃水深度来表示,因此模型浮体闸与原型必须保证外形尺寸相似^[6];稳定性的影响因素则更加复杂,根据文献资料^[2],它除了与浮体闸的质量、重心高度、内部及外部几何形状有关外,还与动水压力、水流剪切力、下游门槽摩阻力有关。因此,沉浮过程中模型浮体闸需与原型保持重力相似、重心高度相似、内部水舱形状相似、外部几何形状相似、阻力相似、摩阻力相似。此外,根据 2.1 节的分析,还要使模型浮体闸在撞击底板前的速度与原型相等。

2.3 卧倒门启闭

卧倒门启闭运行过程中,主要需要对泄流能力、

脉动压强以及闸门的振动情况进行观测,泄流能力主要受卧倒门几何形状及重力的影响,因此只要保持重力相似;文献[7]的研究表明,脉动压强的幅值比尺符合重力相似准则,而频率比尺不受模型缩尺的影响。卧倒门泄流时引起的振动则要求模型浮体闸与原型保持空间条件相似、物理条件相似、边界条件相似及运动相似^[8]。空间条件相似主要是指几何相似及应变相似,即

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_\theta = 1 \tag{6}$$

式中: α_ε 、 α_θ 分别为线应变比尺及角应变比尺。

物理条件相似,是指浮体闸的弹性模量、剪切模量、泊松比、密度等保持相似,满足

$$\alpha_\varepsilon = \alpha_\gamma \alpha_E^{-1} \tag{7}$$

$$\alpha_t = \alpha_\rho^{0.5} \alpha_E^{-0.5} \tag{8}$$

式中: α_L 、 α_E 、 α_t 、 α_ρ 分别为几何比尺、弹性模量比尺、时间比尺和密度比尺。

边界条件相似指浮体闸表面受到的外力、约束条件和初始条件相似;运动条件相似包括浮体闸结构的运动状态及产生运动的条件相似。

3 模型设计

根据上述分析,牵引过程要保证水流阻力相似,浮体闸模型需同时满足重力相似和阻力相似准则,即模型与原型的佛劳德数和雷诺数分别相等。在水力学模型试验中,要同时满足佛劳德数和雷诺数相等通常是做不到的。文献[9]的研究表明,对于给定体型的浮体闸,兴波阻力系数仅仅是佛劳德数的函数,黏压阻力系数在紊流状态下随雷诺数的变化不大。摩擦阻力在层流状态下与 $u^{-0.5}$ 成正比,在紊流状态下与 $u^{-0.14}$ 成正比,也就是说,摩擦阻力系数不管在层流还是紊流状态下均随着雷诺数的增大而减小,但是在紊流状态下更接近常数,原型浮体闸摩擦阻力比模型中按重力相似准则换算得到的摩擦阻力小。因此从兼顾工程安全及误差尽可能小两方面来考虑,浮体闸模型应按重力相似准则进行设计,同时使模型水流处于紊流阻力平方区,即模型的几何比尺不能太小。另外,为了满足惯性阻力相似,模型设计制作中通过保证浮体闸各部分的质量分布相似以保证转动惯量相似。浮体闸与岸墙之间撞击力的相似条件,可以通过控制模型浮体闸的撞击速度与原型相等,并且模型浮体闸与原型采用相同的材料来实现。

沉浮过程要求模型浮体闸与原型保持重力相似、重心高度相似、内部水舱形状相似、外部几何形状相似,还要使模型浮体闸在撞击底板前的速度与原型相等。浮体闸卧倒门启闭过程中的振动相似要

求模型浮体闸的弹性模量、剪切模量、泊松比、密度等与原型相似。模型浮体闸的材料不能与原型相同,否则要采用1:1的模型,因此需采用其他材料另外制作一个结构模型,用于满足浮体闸的振动相似。浮体闸结构模型主要用于量测卧倒门的自振频率,根据脉动压强主频带与自振频率一致或相近来判断是否会引起卧倒门的破坏性振动。由于浮体闸结构模型是在线弹性范围内测定其动力特性,可以将水力学模型与结构模型分别进行试验,因此结构模型可以不受上述空间条件相似和边界条件相似的限制,卧倒门结构振动模型可以独立地选择3个相似比尺 α_L 、 α_E 和 α_ρ (长度比尺、弹性模量比尺和密度比尺)。为了减少试验误差,仍然需要使线应变比尺 α_ε 尽量接近于1,而且使用弹性模量较低的材料。

4 模型控制量测装置设计

4.1 浮体闸沉浮控制设备

浮体闸的沉浮稳定性试验是浮体闸模型试验的重要内容之一,在沉浮试验中,不但要对浮体闸的倾斜特性进行观测,还要观测其沉浮过程中的浮性。因此沉浮控制设备显得尤为重要。由于一般浮体闸的闸浮箱都是分舱的,试验过程需要使浮体闸浮箱内各舱的抽排水量保持相等。图2为一模型浮体闸沉浮控制设备平面布置,图中供水箱(自带溢流装置)安置在高于浮体闸浮箱约2.5m的位置,以自流方式向浮箱各舱充水(充水过程中由浮子流量计对流量进行监测);排水过程则由真空泵、水气分离器、真空度表、阀门等组成的系统进行控制,试验中通过控制水气分离器上部的真空度来达到控制排水流量的目的。

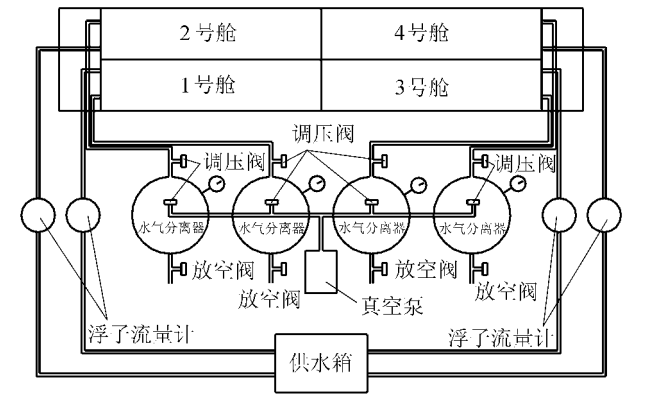


图2 浮体闸沉浮控制设备平面布置示意图

4.2 模型牵引定位控制设备

模型浮体闸牵引定位过程中要量测不同牵引速度时浮体闸的牵引力变化过程,因此需要对模型浮体闸的牵引速度进行控制,一般可以有两种控制方式:软连接控制(采用电机加钢丝绳牵引方式)和硬

连接控制方式。根据浮体闸牵引试验发现,浮体闸按恒定速度关门过程中,牵引力会从正值变为负值,因此宜采用硬连接控制方式(见图3)。本文设计的模型浮体闸牵引控制装置主要由环形轨道、拉压传感器、遥控变速牵引车组成,可以很方便地控制模型浮体闸的牵引速度,并通过拉压传感器记录牵引过程中浮体闸牵引力的变化过程。

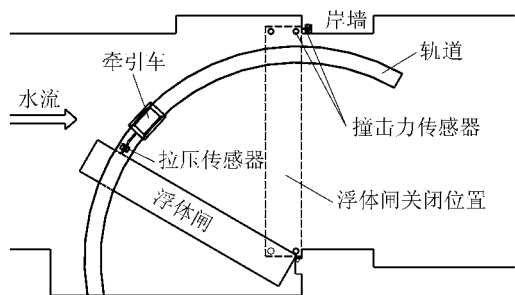


图3 浮体闸牵引定位控制试验装置布置

4.3 模型主要量测仪器布置

浮体闸模型试验量测内容较多,这里主要介绍牵引力、撞击力传感器的布置(见图3)。用于牵引力测试的拉压传感器直接与牵引车刚性连接,小车牵引过程中浮体闸的牵引力可直接由拉压传感器测出。在左侧岸墙上安装一撞击力传感器,用于测量浮体闸自由转动端在关门过程中对岸墙的冲击力。测量浮体闸沉浮过程对底板撞击力的传感器需安装在浮体闸关闭位置4个角对应的河道上,而且对应的4个角都要安装,因为根据试验观测,虽然在浮体闸下沉过程中对各舱的充水流量均进行了较精确的控制,但是由于水流脉动的影响,其4个角往往不是同时下沉到底并撞击底板。此外,安装4个传感器还可以测到浮体闸对底板的最大撞击力。

4.4 浮体闸结构振动模型激振控制

结构振动模型通常采用两种设备激振,即激振器和振动台。激振器激振一般只用来测定结构的动力特性,如果需研究在地震作用下的破坏机理、弹塑性性状和有效的抗振措施,则需要采用振动台作为激振设备。

5 结 论

a. 浮体闸运行控制过程复杂,量测精度要求高,量测内容繁多。

b. 浮体闸水工模型试验应采用双模型试验方法。浮体闸水力学模型应按重力相似准则设计,保证模型水流处于紊流阻力平方区,并且使模型浮体闸各部分质量分布与原型相似,结构振动模型在线应变接近1时,可以根据制模方便独立地选取长度比尺、弹性模量比尺和密度比尺。

c. 模型浮体闸的牵引定位过程应采用硬连接控制方式。

d. 由于浮体闸下沉时4个角往往不是同时下沉到底而撞击底板,因此,测量底板撞击力时需要安装4个撞击力传感器,以便捕捉到浮体闸对底板的最大撞击力。

e. 浮体闸结构模型的激振可根据研究内容选择激振器或振动台。

参考文献:

- [1] 索丽生. 闸坝与生态[J]. 中国水利, 2005(16): 5-7.
- [2] 傅宗甫, 严忠民. 新型浮体闸的稳定性分析[J]. 水利学报, 2005(8): 1014-1018.
- [3] 华东水利学院. 水力学: 下册[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 472-488.
- [4] 郭吉坦. 复杂形体转动惯量计算方法的研究[J]. 大连铁道学院学报, 2005(1): 1-7.
- [5] 林建筑, 郑振飞, 卓卫东. 泉州后渚大桥船撞力试验研究[J]. 中国公路学报, 2005(2): 1014-1018.
- [6] 蔡岭梅, 王兴权, 杨万柏. 船舶静力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995: 38-40.
- [7] 黄涛. 水流压力脉动的特性及模型相似律[J]. 水利学报, 1995(1): 51-57.
- [8] 左东启. 模型试验的理论与方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984: 292-331.
- [9] 邵世明, 赵连恩, 朱念昌. 船舶阻力[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 3-102.

(收稿日期: 2006-09-26 编辑: 高建群)

· 简讯 ·

河海大学获5项江苏省优秀软科学成果奖

河海大学5个项目获“第二届江苏省优秀软科学成果奖”。获奖项目分别是: 郑垂勇教授主持完成的“南水北调工程江苏段管理体制研究”获得一等奖; 王慧敏教授主持完成的“江苏资源—环境—经济发展诊断预警及对策研究”获得二等奖; 赵敏副研究员主持完成的“基于水权理论的南水北调工程确定理论与方法研究”获得二等奖; 姚纬明教授主持完成的“江苏省研究生教育质量调研”获得三等奖; 魏长升副教授参与完成的“新会计准则在企业管理实践中的应用”获得三等奖。

“第二届江苏省优秀软科学成果奖”共评出75个获奖项目, 其中一等奖6项、二等奖18项、三等奖51项。

(本刊编辑部供稿)