



水力式升船机不同平衡重底部 形式三维流固耦合分析*

胡亚安¹, 全强², 李中华¹

(1. 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029;
2. 水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古呼和浩特 010020)

摘要: 平衡重底部水流是否平顺稳定将直接改变其受力状态, 从而对升船机的运行稳定性造成影响。因此, 优选合理的平衡重底部体型是改善升船机运行质量的一条有效途径。在非恒定流作用下, 建立3种不同平衡重底部形式的三维流固耦合数学模型, 对平衡重上升过程波动特性进行数值模拟。计算结果表明, 平衡重底部体型优化后, 平衡重上升初期, 竖井内水流对平衡重底部的冲击作用明显改善, 所受横向力几乎为零, 而且间隙之间流速均匀分配, 有效地解决了平衡重波动问题。

关键词: 水力式升船机; 平衡重; 三维流固耦合; 数学模型

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)07-0027-04

3D coupling mathematical model of different balance weight's body form at the bottom of hydro-floating ship lift

HU Ya-an¹, QUAN Qiang², LI Zhong-hua¹

(1. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China;
2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, MWR, Hohhot 010020, China)

Abstract: The force state of balance weight is directly changed when the water flow is unstable, which is affecting the stability of the ship's operation. Therefore, it is an effective way to improve the quality of ship lift operation by choosing a reasonable balance weight's body form at the bottom. In this paper, the 3D coupling fluid-structure-coupled mathematical model of the different balance weight's body form at the bottom is designed and built, which can dynamically simulate the hydrodynamic response when balance weight is lifted up and down under the action of unsteady flow. The results show that the effect of the flow on the bottom of the balance weight is improved, the horizontal force is almost disappeared, the flow velocity between the gaps is evenly distributed, and the balance weight wave problem is resolved.

Keywords: hydro-floating ship lift; balance; 3D coupling fluid-structure-coupled; mathematical model

水力式升船机的原理就是通过向竖井内充泄水, 增大或减小平衡重所受的浮力来驱动平衡重运动, 进而带动承船厢下降或上升, 升船机在运行过程中竖井水位不断变化(即 $\frac{dH}{dt} \neq 0$), 平衡重

的淹没深度也随之变化, 所以平衡重的上升过程随着竖井水位的波动也将产生波动, 而平衡重通过钢丝绳与船厢连接在一起, 所以会影响船厢的平稳运行^[1-3]。故竖井水流-平衡重之间的耦合作用产生的平衡重的波动问题是升船机运行过程中

收稿日期: 2017-04-28

*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402002, 2016YFC0402006); 国家自然科学基金(51479123)

作者简介: 胡亚安(1965—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为通航建筑物水力学。

能否平稳运行的关键所在^[4-5]。

竖井水流与平衡重之间的流固耦合作用与机翼-空气之间^[6]、流体-管道之间^[7]、液体晃动对液舱稳定性的影响^[8]、大型贮液管在地震激励作用下产生破坏等常见的流固耦合有相似之处^[9]，不同的是水力式升船机竖井水流与平衡重间的耦合作用既是提供船厢升降的动力又是引起船厢运行速度波动的根源。消除了竖井水流与平衡重间的耦合作用船厢也就失去了升降的动力，因此既需要利用这种耦合作用又要对这种耦合作用进行控制。

由于大型计算机和计算流体力学软件日益成熟，流体运动部分可以“如实来做”，不必做任何线性化假定，所以对物体外形，周围的水流速度无任何限制。这样开发的算法可以广泛用于流体与固体有相互作用的场合，如弹壳分离、副油箱抛投等难题。

1 计算方法

流体部分采用非定常的雷诺应力方程，对于其中的雷诺应力项采用 $k-\epsilon$ 湍流模式，即在原来的方程组上再添加一个湍流黏性的输运方程。时间和空间方向上均采用一阶格式，空间方向为迎风格式，时间方向上隐式求解。这样相对于显式格式而言，时间步长可以稍大一些。

由于竖井内水流对平衡重的浮力是水力式升船机的提升动力源，所以计算的流体部分采用 Fluent 完成，结构部分是将结构运动方程通过 UDF（用户定义函数）插入到 Fluent 中，通过动网格实现平衡重在水流浮力作用下的运动。

结构运动方程：设对应于广义坐标的广义干扰力用 $Q(t)$ 表示，则拉格朗日方程：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial \zeta}{\partial q_j} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_j} = Q_j \quad (1)$$

式中： q_j 为广义坐标； Q_j 为对应于广义坐标的广义力； ζ 为拉格朗日函数； Φ 为耗散函数； \dot{q}_j 为广义坐标的广义速度。

由式(1)得结构运动微分方程：

$$a\ddot{q} + b\dot{q} + cq = Q(t) \quad (2)$$

式中： a 为当量惯性系数； b 为当量阻力系数； c 为弹性系数； q 为弹性恢复力； \dot{q} 为阻尼力； \ddot{q} 为惯性力。

式(2)写成标准形式：

$$\ddot{q} + 2n\dot{q} + k^2q = \frac{1}{a}Q(t) \quad (3)$$

式中： k 为刚度。

为了实现水流作用与平衡重流固耦合作用，将 Fluent 计算的对浮筒的作用力，作为平衡重运动的驱动力插入到运动方程中，从而水流浮力制约浮筒运动，通过运动方程计算出平衡重加速度、速度及位移。

2 计算工况

三维流固耦合数学模型，主要研究不同平衡重底部形式对竖井内水流流场分布及平衡重波动特性影响，分析并提出合适的平衡重底部形式。三维数学模型计算工况见表 1。

表 1 三维数学模型计算工况

数学模型	工况	底部形式	初始淹没深度/m	间隙比 A_1/A_0
三维	不同平衡重底部形式	平底	0.392	0.061
		锥体(90°, 120°)	0.392	0.061

3 不同平衡重底部形式运行特性

平底船吃水浅，这类船在海上风浪中航行，船首底部易遭受砰击并引起船体高频振动，对船舶的安全稳定不利^[11]；船的横断面为 V 形时吃水深，稳定性高，抗御风浪能力十分强。所以考虑将平衡重底部改为锥底形式，一方面可以减缓加速阶段水流对平衡重底部的冲击作用；另一方面，可以使水流均匀平顺地进入间隙之间。但是，锥体顶角不宜过小，锥底形式分别选取圆锥顶角 90° 和 120° 进行对比分析，如图 1 所示。

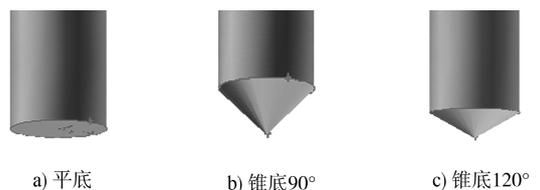


图 1 不同平衡重底部形式

3.1 不同体型平衡重横向受力特性

平衡重上升过程所受横向力的大小是衡量升船机能否稳定运行的重要指标, 运用三维流固耦合数学模型计算整个上升过程所受横向力。

由平底形式平衡重所受横向力过程线(图 2)可知, 平衡重上升初期, X 向和 Y 向所受横向力均较大, 主要是因为竖井开始充水时, 平衡重底部距离进水口很近, 主流直接冲击平衡重底部, 而且由于两侧漩涡过大(由上一节分析得出)对平衡重底部扰动作用增强。随着平衡重的不断上升, 所受横向力逐渐减小。

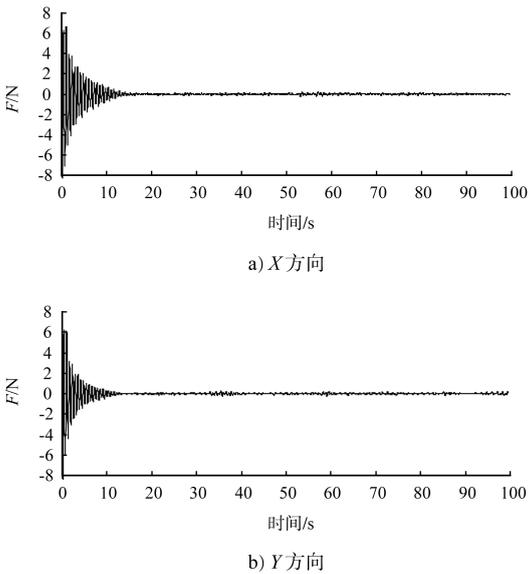


图 2 平底形式平衡重所受横向力

锥底 120°时平衡重所受横向力过程线如图 3 所示, 与平底时相比, 开始阶段平衡重所受横向力几乎为零, 说明形式修改后, 水流对底部的冲击作用明显减弱。所以, 平衡重底部形式采用锥底可以减小初始阶段平衡重所受横向力, 有利于平衡重平稳上升。锥底 90°时平衡重所受横向力与 120°时结果相近。

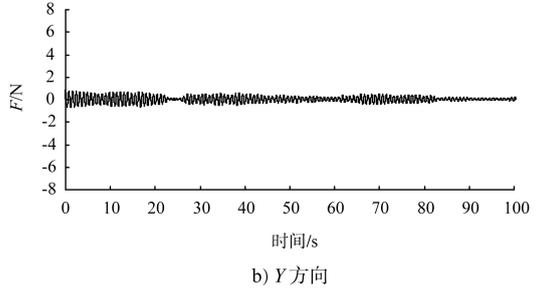
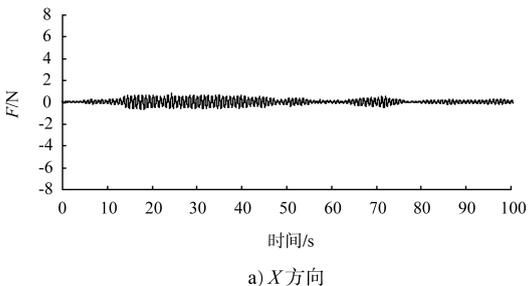


图 3 锥底 120°时平衡重所受横向力

3.2 不同形式平衡重加速度变化特性

由平衡重稳定运行阶段加速度波动特性(图 4)可知, 平衡重底部为平底时加速度波动幅值约 $1.8 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$, 波动周期 1.4 s; 锥底 90°时加速度波动幅值约 $5.42 \times 10^{-4} \text{ m/s}^2$, 波动周期 1.5 s; 而采用锥底 120°时加速度波动幅度几乎为 0, 有利于平衡重在平稳运行阶段快速稳定上升; 如图 5 所示, 结合平衡重横向受力分析可以得出: 锥底 120°时, 加速阶段平衡重受力特性及平稳运行阶段加速度波动特性均显示了该形式的优越性。

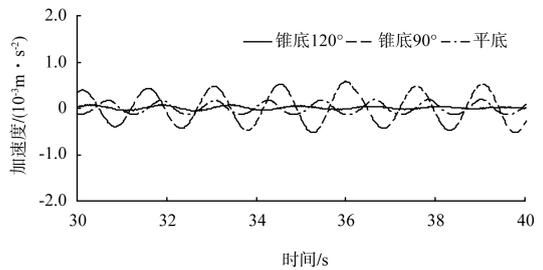


图 4 平稳运行阶段加速度对比

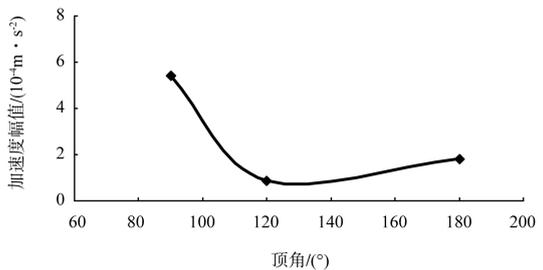


图 5 不同顶角下加速度幅值

4 结论

1) 为了实现水流作用与平衡重流固耦合作用, 将 Fluent 计算的对浮筒的作用力, 作为平衡重运动的驱动力插入到运动方程中, 从而水流浮力制约浮筒运动, 通过动网格实现平衡重在水流

浮力作用下的运动,计算出平衡重加速度、速度及位移。结果表明该数学模型具有较好的精确性和稳定性。

2) 通过三维流固耦合数学模型对平衡重底部形式进行优化,计算结果表明,平衡重底部形式优化后(锥底顶角 120°),平衡重上升初期,竖井内水流对平衡重底部的冲击作用明显改善,所受横向力几乎为零,而且间隙之间流速均匀分配,有效解决了水力式升船机运行过程中平衡重的波动问题。

参考文献:

- [1] 须清华,张瑞凯.通航建筑物应用基础研究[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [2] 中国水利水电科学研究院.景洪水电站水力式升船机整体模型试验研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,2006.
- [3] 胡亚安,宣国祥,李中华.云南澜沧江景水电站水力

式升船机关键技术研究[R].南京:南京水利科学研究所,2008.

- [4] 华东水利学院,南京工学院.三峡水利枢纽半水力式升船机研究报告[R].南京:华东水利学院,1959.
- [5] 郑大迪,史振寰.水力浮动式转矩平衡重升船机简介[J].水利水运工程学报,2001(S1):155-160.
- [6] GOODWIN S A, BYUN C, FARHANGNIA M. Aeroelastic computations using parallel computing systems [J]. Aerospace sciences meeting & exhibit, 1999, 13: 201-231.
- [7] 赵研.应用 FLUENT 对管路细部流场的数值模拟[D].大连:大连理工大学,2004.
- [8] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free surface fluid flow [J]. Journal of compute physics, 1981, 39: 201-225.
- [9] 王晖,陈刚,张伟.储液容器三维流固耦合模态分析[J].特种结构,2007,24(2):52-54.
- [10] 黄震球,张文海.减小平底体砰击的试验研究[J].华中工学院学报,1985,14(5):725-730.