

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.001

王新, 胡亚安, 李中华, 等. 大型升船机船厢出入水受力特性原型观测[J]. 水利水运工程学报, 2019(3): 1-8. (WANG Xin, HU Ya'an, LI Zhonghua, et al. Prototype monitoring of mechanical characteristics of large ship lift chamber filling and outletting of water[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(3): 1-8. (in Chinese))

大型升船机船厢出入水受力特性原型观测

王 新^{1,2}, 胡亚安^{1,2}, 李中华^{1,2}, 严秀俊^{1,2}

(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, 江苏 南京 210029; 2. 南京水利科学研究院 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 船厢出入水过程中复杂的流固耦合作用是下水式升船机关键技术问题。针对目前世界上最大的船厢下水式升船机——景洪水力式升船机船厢出入水过程中的力学问题,首次通过系统的原型观测,研究揭示船厢出入水过程中厢体的受力变形特性、船厢的倾斜量及同步轴扭矩的变化规律、船厢的振动响应与噪声及附加水动力荷载特性,并探讨了船厢出入水运行速度的影响。观测结果表明,船厢入水过程中由于船厢侧荷载发生显著变化,船厢发生最大弯曲变形约 2.7 cm,船厢纵倾增大不足 20 mm,最大扭矩变化 162 kN·m,船厢振动、噪声、吸附力均不大;不同速度出入水,各项参数变化规律一致,但随速度增大,各参数呈增大趋势;船厢出水后能够完全恢复到入水前状态,出入水过程稳定收敛,船厢出水启动瞬间和船厢底铺板脱离水面时刻是出入水过程的关键节点,各项参数变化迅速。观测结果不仅为景洪升船机安全运行提供依据,也为其他下水式升船机设计提供参考。

关 键 词: 下水式升船机; 船厢; 出入水; 受力特性; 原型观测

中图分类号: U642

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2019)03-0001-08

升船机是一种能够克服较大水头差、为船舶提供快捷过坝的通道,与船闸并列为两种主要通航建筑物型式,尤其适用于高坝通航。德国、比利时等欧洲国家大型升船机建设技术水平较高,我国大型升船机建设起步较晚,但近年来发展迅速,一批代表性的大型升船机陆续建成,并创造了多项世界之最^[1]。规模最大的长江三峡齿轮齿条爬升式升船机已于 2016 年 9 月试通航,最大提升质量 15 500 t,最大提升高度 113 m,船厢有效水域尺寸 120 m×18 m×3.5 m(长×宽×水深),可通过 3 000 t 级大型船舶^[2-3];单级提升高度最大的乌江构皮滩钢丝绳卷扬式升船机,最大提升高度 127 m,可通过 500 t 级船舶,目前正在安装调试;我国原创的景洪水力式升船机于 2016 年 8 月试通航,可通过 500 t 船舶,也是目前世界上已建最大的船厢下水式升船机。上述 3 座升船机是目前大型垂直升船机 3 种主要型式的代表。

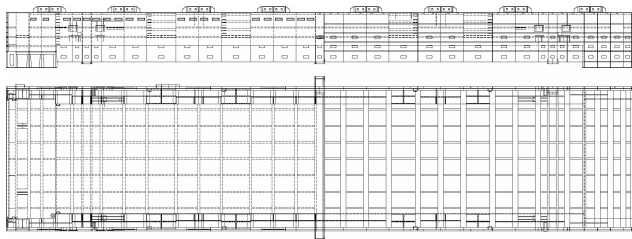
在升船机的运行流程中,空中升降运行较为简单,而船厢上下游对接相对复杂,这种复杂主要体现在两个方面^[4]。首先是在对接流程上,船厢运行到对接位后,进行船厢顶紧、夹紧、推出密封框、充间隙水、收防撞梁(绳)、开启船厢门和闸首工作门等一系列操作后才完成对接,在船舶完成进出船厢后,按相反的流程再解除对接;复杂性的另一方面表现在对接过程中水位的波动和变化,上游水库水位相对稳定,对对接影响相对较小,受到枢纽运行调度及我国山区河流水位陡涨陡落特点的共同影响,下游水位存在普遍性的变率快、变幅大的特点,对升船机下游对接影响显著。为确保升船机运行及船舶安全,在出现下游水位变化过快时只能快速解除对接,因此,简化下游对接流程十分必要,其中船厢采用下水式具有明显的优势,因为在下游对接和解除对接中只需启闭船厢门,远比重入水对接简单^[5-6]。

收稿日期: 2018-02-24

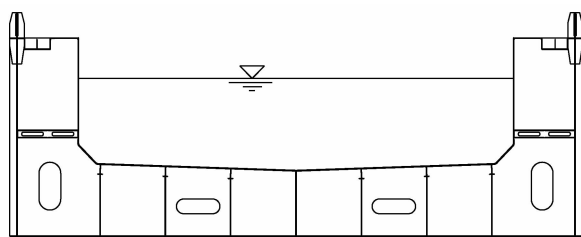
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402002,2016YFC0402007); 国家自然科学基金面上项目(51779151)

作者简介: 王 新(1983—),男,江苏宿迁人,教授级高级工程师,主要从事通航水力学研究。E-mail: xwang@nhri.cn

景洪水力式升船机是我国原创的一种全新型式升船机,也是目前建成的采用船厢下水式的最大的升船机(500 t 级),船厢外形尺寸为 $68.9 \text{ m} \times 15.8 \text{ m} \times 6.7 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),船厢内有效水域尺寸 $58.0 \text{ m} \times 12.0 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$,总提升质量 3 140 t,船厢内水体质量约 2 300 t^[7]。景洪水力式升船机通过向竖井充泄水驱动竖井内浮筒浮动带动船厢上下升降运行,浮筒侧和船厢侧通过 64 根钢丝绳(16 组,每组 4 根,对称布置于船厢两侧)相连,中间缠绕于布置在顶部平台的卷筒,16 个卷筒每侧 8 个对称布置,通过同步轴相连形成环形封闭的同步系统,船厢运行过程中产生的倾斜力矩主要由同步系统承担,船厢水平度和同步轴扭矩是关键控制指标。船厢结构布置及典型横剖面如图 1 所示,船厢内部 U 形铺板由多根横向主梁、纵向次梁、两侧纵向主梁支承,在两侧纵向主梁腹板上布置大量排气孔供船厢出入水过程中梁格内部排气和补气。船厢两端设有卧倒门门库,故两端水域比中间深且宽。



(a) 船厢结构



(b) 典型横剖面

图 1 船厢结构布置及典型横剖面

Fig. 1 Chamber structure design and typical cross section

在船厢出入水过程中,存在复杂的流固耦合效应^[8-9],船厢外侧受到的水体压力和浮力、自身的受力变形、机械同步系统的受力均不断变化,船厢底部梁格内大量气体不断排出引起的噪声、铺板出入水时刻的拍击力和下吸力,以及引起的船厢振动等均是影响升船机安全平稳运行的因素^[10]。然而对于船厢出入水过程中复杂的力学问题研究较少,仅有一些从机理层面的研究探讨。王敬鹏等^[11]通过比尺为 1: 20 的船厢出入水过程概化物理模型,对下水式升船机船厢铺板形式进行系统研究,探讨不同底缘形式的船厢对出入水过程船厢吸附力、拍击力的影响;程璐等^[12]采用 VOF 模型和 $k-\epsilon$ 湍流模型,结合动网格技术,建立三维数学模型,对下水式升船机船厢入水过程的水动力学特性进行模拟;王敬鹏等^[13]通过模型试验研究了船池型式对船厢出入水过程的水动力荷载特性的影响。另外,李炎等^[14]研究了升船机船厢出入水过程中间渠道的水动力特性。本文通过系统的原型观测,对景洪水力式升船机船厢出入水过程的力学问题进行研究,探讨出入水运行速度对受力特性的影响,不仅为景洪升船机安全平稳运行提供依据,也为后续下水式升船机设计提供参考。

1 出入水过程与原观概况

升船机船厢结构通常较为复杂,尤其受两端卧倒门门库影响,船厢截面并非完全相同,在出入水过程中,存在先后次序。景洪升船机船厢出入水过程主要几个节点见图 2,入水顺序依次为两端底缘、中间底缘、两端铺板、中间铺板,最后到船厢内外水位齐平时停止。船厢铺板底部的梁格为薄壁结构,体积较小,入水过程影响很小,真正的入水是从两端铺板入水开始,尤其中间铺板开始入水后,船池内大量水体被船厢挤压向外排出,船厢侧质量、结构受力、变形等变化显著,影响较大。出水过程相反,最先出水的是船厢中间铺板,然后是两端铺板,最后是底部梁格。

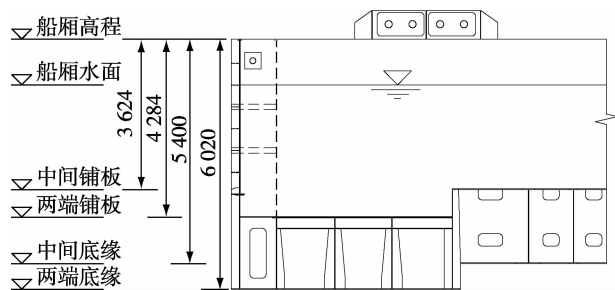


图 2 船厢出入水过程主要节点(单位:mm)

Fig. 2 Main stages for ship chamber filling and outleting of water(unit: mm)

景洪升船机的建成为下水式升船机出入水运行特性的研究提供了条件。现场在船厢一侧均匀布置了

10支波高仪,观测船厢内水面波动;通过布置在船厢四角的激光位移计观测船厢出入水过程的倾斜量;在左右两侧各8个卷筒间的7根同步轴上布置扭矩应变计,观测出入水过程同步轴扭矩的变化;在船厢的右侧主纵梁中间顶部布置振动加速度传感器,主要测量船厢水平横向振动,并在相同位置布置了声级计,测量出入水噪声强度;在船厢铺板底部外置压力传感器,观测船厢入水时的拍击力和出水时的下吸力。

船厢出入水过程原型观测在枢纽不泄洪、发电流量稳定的条件下进行,船池水面平稳,最大波动在10 cm内,且为短周期波动。试验时船厢内水深为标准的2.5 m,船池水面高程约537.30 m。为考察出入水速度的影响,原型观测进行了4个不同运行速度的船厢出入水试验,速度由慢到快,分别为0.6、1.2、1.8和2.4 cm/s。

2 船厢受力变形特性

在船厢入水过程中,船厢受到的浮力逐渐增大,意味着船厢侧的拉力逐渐减小,当船厢运行至对接位,内外水位齐平时,船厢内的水体重力完全被平衡,船厢侧拉力相当于空船厢时的重力,可见,船厢从空中的总重3 140 t,至完全入水对接后的800 t,船厢侧的荷载发生了显著变化,船厢的受力及变形状态同样发生较大变化。船厢出水过程相反,相当于从空船厢的重力逐渐增大至水深2.5 m的重力。

船厢作为尺度很大的金属结构,并非通常想象中的刚体,尤其在长度方向,表现出明显的柔性,在每侧8个吊点、32根钢丝绳均衡悬吊下,空船厢受自重作用变形很小,向船厢加入2.5 m深的水后(约2 300 t),在两端门库水体质量较大和吊点分布的共同影响下,船厢呈现出中间上拱、两端下倾的总体变形趋势。空船厢和带水两个状态,与出入水过程中的船厢处于水中对接位和空中运行的两个状态基本对应,因此,船厢出入水前后的变形量即为船厢从空厢到载水2.5 m时的变形。固定在船厢一侧的10支波高传感器,随船厢变形而移动,而船厢内水面始终是水平的,利用波高仪在船厢出入水前后的读数变化,可计算各点的船厢变形量。计算中对船厢整体纵倾、船厢变形引起的波高仪倾角(影响很小)进行修正,船厢带水后的纵向变形见图3。可以看出,测量结果符合一般规律,船厢两端下倾、中间上拱,最大相对变形量约2.67 cm(岩滩升船机船厢,长度48.5 m,水深1.9 m,中间相对于两端上拱约1.1 cm)。

船厢每次出入水均会发生这样的往复变形。在船厢两侧主纵梁上翼缘布置应变计,观测船厢入水过程中的应力变化(图4)。船厢两侧主纵梁上翼缘的应力变化过程基本一致,入水前应力清零,在入水过程中,应力逐渐减小,并伴有一定波动,左侧主梁应力初始阶段跳跃是受抗倾导向的受力影响,入水前后最大应力变化约27 MPa,即船厢从空厢到带水2.5 m主纵梁翼缘应力增大约27 MPa,船厢应力水平总体较低,入水过程应力波动峰峰值约2 MPa。

3 船厢纵倾与同步轴受力特性

船厢出入水过程中船厢侧质量和自身受力变形均发生显著变化,势必影响船厢的水平度和顶部同步系统的受力。景洪升船机运行中船厢纵倾容许值为60 mm、同步轴扭矩为190 kN·m,是升船机运行中的重要控制指标。船厢4次不同速度入水、出水过程船厢纵向倾斜量变化见图5。纵向倾斜量采用船厢下游端高程减上游端高程,纵倾为负值表示下游端低于上游端,船厢倾向下

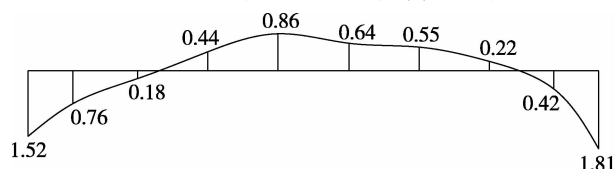


图3 船厢纵向变形(单位:cm)

Fig. 3 Longitudinal deformation of ship chamber (unit: cm)

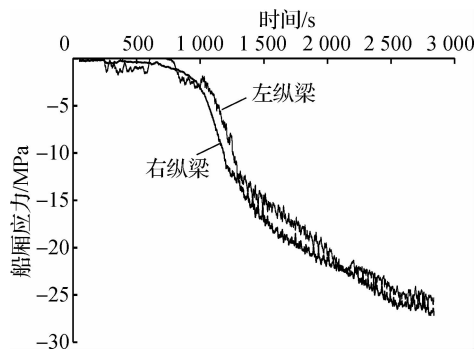


图4 船厢主纵梁上翼缘应力

Fig. 4 Stresses of main longitudinal beam flange of chamber

游,图中横坐标为船厢内水面高程(下同)。总体上看,4次不同速度出入水过程,船厢纵向倾斜量变化规律基本一致。船厢入水前纵倾约 -3 mm ,随船厢逐渐入水,纵倾逐渐增大,待到对接位后,纵倾稳定在 -20 mm 左右,船厢出水过程与入水相反,纵倾随船厢出水而逐渐减小,出水后船厢水平度恢复到入水前状态,升船机运行稳定收敛。在出入水过程中,船厢纵倾受船厢内外水体与厢体的相互作用,存在一定程度的波动,相对而言,随着出水速度的增大,纵倾波动有增大的趋势,但波动幅度较小,在 10 mm 内,船厢出入水过程平稳。

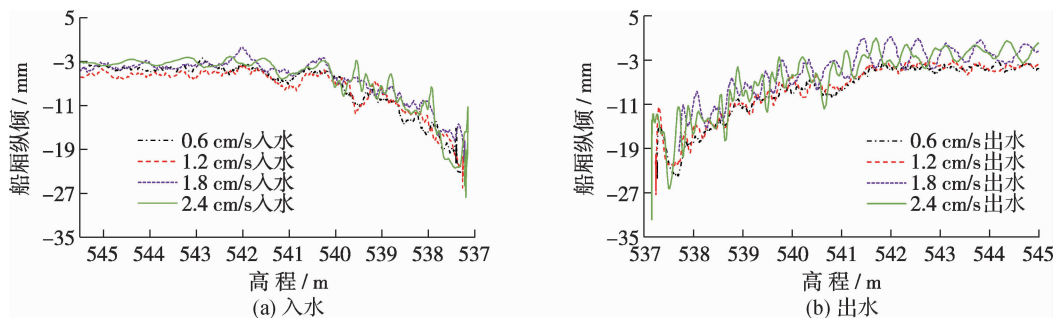


图5 不同速度出入水过程船厢纵倾

Fig. 5 Chamber longitudinal tilt with different running speeds

顶部16个卷筒之间的同步轴受力与船厢的变形和整体倾斜密切相关,同步轴能否抵抗船厢的纵向倾斜、将倾斜量限制在安全控制范围且自身扭矩不超标,是景洪升船机安全运行的关键技术问题。船厢纵倾与同步轴扭矩存在相互促进的耦合关系,船厢发生初始纵倾的诱因较多,如卷筒的制造误差、钢丝绳的走线误差、同步系统间隙、船厢水面风生波动等,均会造成船厢发生微小的倾斜。船厢发生纵倾后船厢内水体产生偏心荷载,即对船厢产生了倾斜力矩,同步轴受力产生抗倾力矩以平衡船厢的倾斜力矩,在同步轴受力增大的过程中,自身发生扭转变形会造成船厢倾斜端进一步下倾,倾斜力矩增大、同步轴扭矩增大。这种相互促进的正反馈机制,在同步系统抗扭刚度足够大时,很容易达到平衡状态而终止;若同步系统刚度不足,很容易迅速失稳,造成轴断船翻。景洪升船机同步轴的抗扭刚度设计安全系数较高,同时采用膜片联轴器消除同步系统的间隙,能够保证船厢的稳定和同步轴的受力安全。船厢倾斜与同步轴受力变形的示意图如图6所示,相邻卷筒间的同步轴扭矩 T_{si} 与卷筒的相对转差 δ_{ri} 及间隙 $\Delta\delta_i$ 的关系为:

$$\delta_{ri} = T_{si} \left(\frac{l_i}{GI_{pi}} + \frac{1}{K_c} \right) R + \Delta\delta_i \quad (1)$$

式中: G 为剪切模量; I_{pi} , l_i 为同步轴的极惯性矩和长度(卷筒抗扭刚度很大,可忽略); R 为卷筒半径; K_c 为同步轴两端膜片联轴器与轴头的综合抗扭刚度。根据原型实测同步轴扭矩变化及卷筒间的相对运动,可以判断同步系统的间隙分布情况。

前文已经获知,船厢出入水过程中,船厢发生了一定的纵向弯曲变形和整体的纵向倾斜,两个方面共同影响着同步系统的受力。现场通过测量卷筒的转动量,获得了船厢入水、出水前后卷筒间的相对转动。出水过程卷筒相对转动如图7所示,可以看出,船厢两端发生了相对向下的转动,与船厢出水后的“两端下倾、中间上拱”变形一致;上游端转动大于下游端,与船厢出水前后船厢纵倾“倾向上游”变化一致,两端转差约 10 mm ,再考虑中间钢丝绳的变形差,与船厢的纵倾变化总体吻合。图8为实测的船厢入水、出水前后同步轴扭矩值(同步轴下方)及变化值(同步轴上方)。同步轴扭矩的正负号按左手法则定义,左右

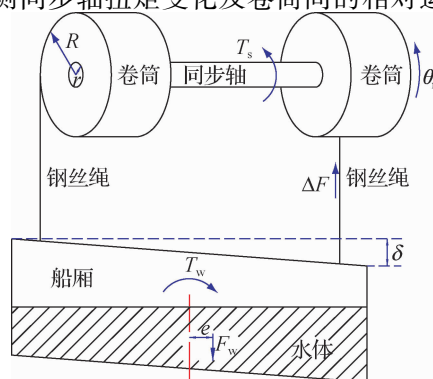


图6 船厢纵倾与同步轴扭转

Fig. 6 Relationship between chamber longitudinal slope and synchronizing shaft deformation

两侧同步轴扭矩变化规律基本一致,上下游两端同步轴扭矩较大,中间相对较小,上游端扭矩变化大于下游端,与卷筒的相对转动规律吻合很好,左右两侧同步轴、上下两端同步轴扭矩符号均相反,与船厢“两端下倾、中间上拱”变形引起的同步轴受力吻合。卷筒间的相对转动较好地反映了同步轴的受力变形,根据卷筒的相对转差和同步轴扭矩估算,同步系统的间隙很小,约1 mm左右,可视为同步系统结构性调整和测量误差。出入水过程中,最大扭矩变化量为162 kN·m,扭矩值均在控制指标内,船厢入水后扭矩值相对较大与船厢纵倾增大有关,入水前和出水后船厢相同位置时同步轴扭矩基本一致,可见同步系统受力恢复,升船机运行稳定收敛。

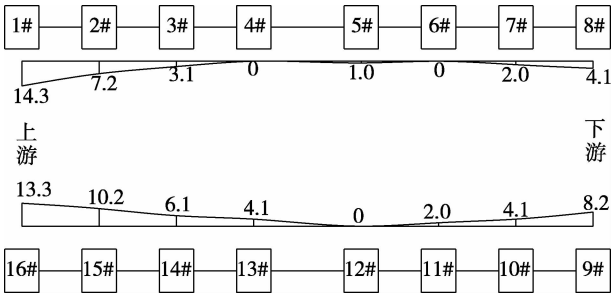


图7 卷筒相对转动(单位:mm)
Fig. 7 Rollers relative rotation (unit:mm)

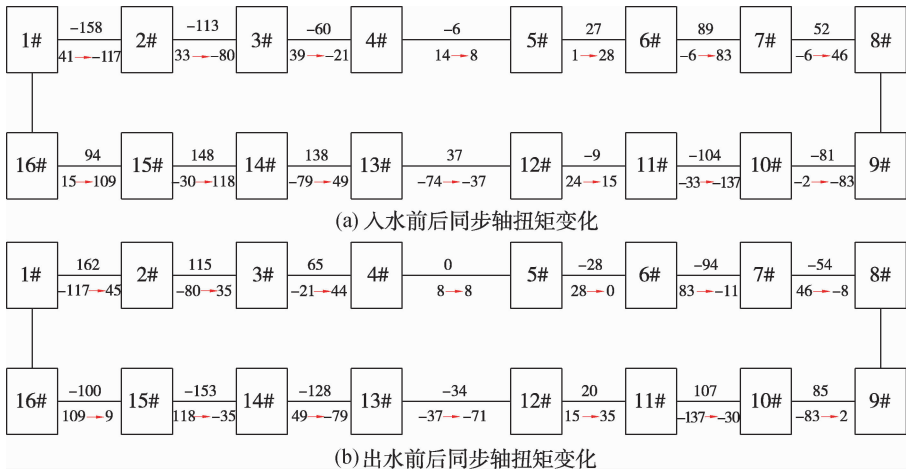


图8 船厢入水和出水前后扭矩值及变化量(单位:kN·m)
Fig. 8 Synchronizing shaft torque and variation (unit: kN·m)

以14#和15#卷筒间同步轴为例,4次不同速度出入水过程该同步轴扭矩变化过程见图9。不同速度出入水,同步轴扭矩变化过程总体一致,入水过程变化相对平缓,出水过程略微急促,尤其在船厢两端卧倒门门库出水阶段,扭矩变化迅速,因为此阶段是船厢变形的主要阶段。随船厢出入水速度增大,同步轴扭矩波动呈增大趋势,与船厢纵倾变化规律一致。船厢出水启动瞬间,同步轴扭矩波动相对较大,约70~80 kN·m,但不影响同步轴的受力安全。

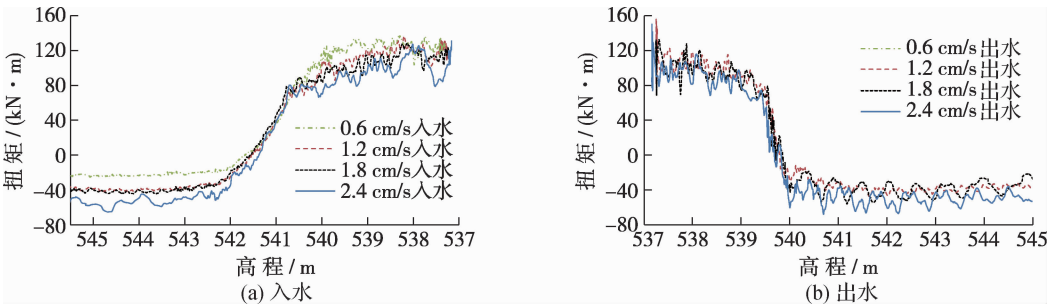


图9 不同出入水速度同步轴扭矩对比
Fig. 9 Comparisons of synchronizing shaft torques with different running speeds

4 船厢振动与噪声

船厢入水、出水过程中,存在厢体结构与水体的相互作用,同时厢底梁格需要排气和补气,从船厢的振动和出入水噪声可以判断船厢的平稳性和排气效果。以最快的 2.4 cm/s 为例,船厢入水、出水中间过程横向振动加速度见图 10。船厢入水过程,从船厢底部接触水面到运行至对接位整个过程均存在一定的振动,主要由船厢持续的排气引起,振动随船厢逐渐入水而缓慢减弱,变化平稳;出水过程中明显的振动仅出现在船厢底铺板脱离水面的过程,历时 10 余秒,主要受不稳定的下吸力影响,并伴随 2~3 声“唰、唰”的厢底铺板与船池水面的分离声。出入水过程中最大横向振动加速度幅值约 0.2 m/s^2 ,船厢振动较小。

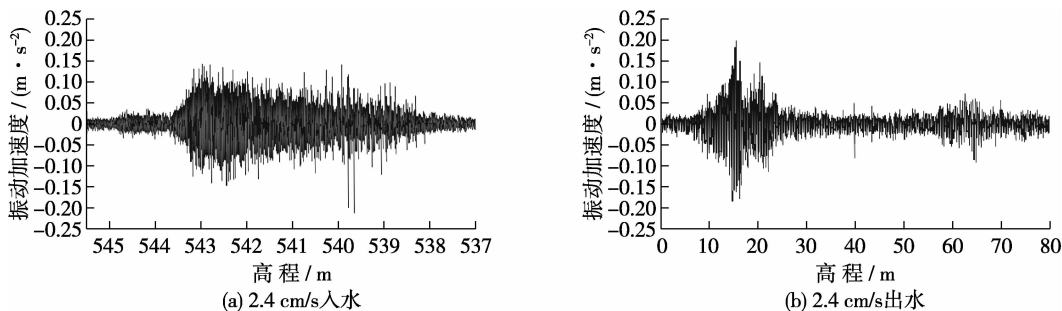


图 10 出入水过程船厢横向振动加速度

Fig. 10 Transverse acceleration time-history curves of ship chamber

4 次不同速度入水、出水过程噪声见图 11。可以看出,不同速度出入水过程,噪声变化规律基本一致,与船厢振动类似,入水过程噪声持续时间较长,变化平缓,最大噪声强度约 78 dB;出水过程噪声主要出现在船厢底铺板脱离水面时刻,最大噪声约 78 dB,其他时段噪声很小。船厢运行速度对噪声影响不大,说明船厢底部排气效果较好,排气孔布置合理。

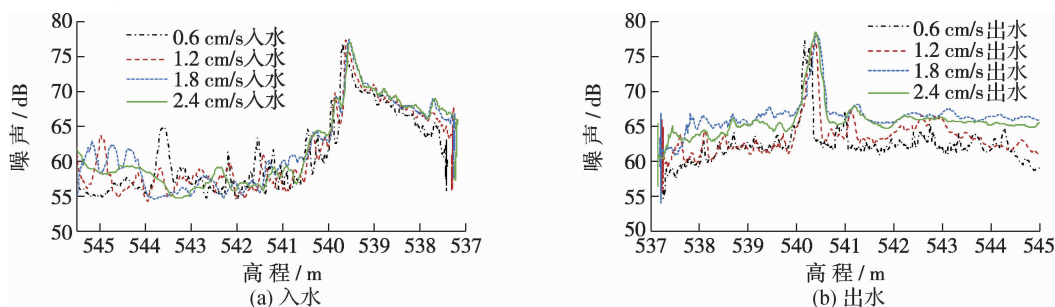


图 11 出入水过程噪声过程线

Fig. 11 Comparisons of noise hydrograph under different running speeds

5 船厢拍击力和下吸力

船厢铺板入水时刻水面的拍击力、出水时刻水面的下吸力是影响船厢平稳出入水的关键因素,从船厢出入水的振动、噪声等已有所反映。景洪升船机船厢采用带尖角的 U 型铺板,比平底铺板出入水较为有利。图 12 给出了船厢按 1.8 和 2.4 cm/s 速度入水和出水阶段作用于铺板的水动力荷载。可以看出,铺板入水时产生的拍击力为 2~3 cm 水柱,随速度增大拍击力略微增大,与入水后动水作用力相比,拍击力并不突出;船厢铺板出水过程,在铺板离水面约 5~6 cm 时发生明显波动,随出水速度加快波动增大,波动明显大于之前正常的动水作用,是该时刻船厢振动、噪声突然增大的原因,铺板出水时刻产生 2~3 cm 水柱的负压,即为

对铺板的下吸力。总体上看,船厢拍击力和下吸力均不大,下吸力的波动略为明显。综合上述参数,景洪升船机按 2.4 cm/s 速度出入水运行安全可靠,各项指标均在控制范围之内。

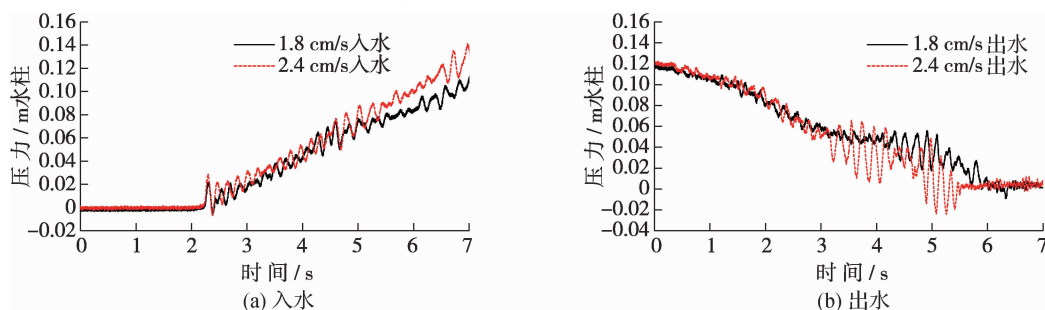


图 12 船厢入水和出水时刻铺板底面水压力

Fig. 12 Water pressure on bottom plate of ship chamber when falling and rising from water

6 结 语

本文通过下水式大型升船机船厢出入水运行过程的原型观测,实测了出入水过程中船厢的受力变形、船厢的倾斜量和同步轴扭矩、船厢的振动与噪声、附加水动力荷载等,揭示了景洪升船机船厢出入水运行的受力变形特性,并考察了出入水运行速度的影响,为其安全可靠运行提供依据。从景洪升船机船厢出入水过程可以看出,船厢入水过程各参数变化总体平缓,船厢排气效果影响不容忽视,船厢出水启动瞬间和船厢底铺板脱离水面时刻是出入水过程的关键节点,各项参数变化迅速,在制定升船机运行流程时,可考虑在出入水关键节点位置降速运行。

参 考 文 献:

- [1] 胡亚安,李中华,李云,等. 中国大型升船机研究进展[J]. 水运工程, 2016(12): 10-19. (HU Ya'an, LI Zhonghua, LI Yun. Research developments in the field of major ship lift in China[J]. Port and Waterway Engineering, 2016(12): 10-19. (in Chinese))
- [2] 钮新强,覃利明,于庆奎. 三峡工程齿轮齿条爬升式升船机设计[J]. 中国工程科学, 2011, 13(7): 96-103. (NIU Xinqiang, QIN Liming, YU Qingkui. The design of gear-rack climbing type ship-lift of Three Gorges Project[J]. Engineering Science, 2011, 13(7): 96-103. (in Chinese))
- [3] SHI D W, CHENG S X, ZHAO T Z, et al. Safety analysis for thread pair clearance of safety mechanism of Three Gorges Project ship lift[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2014, 19(6): 535-543.
- [4] LI K, MANNAN M A, XU M Q, et al. Electro-hydraulic proportional control of twin-cylinder hydraulic elevators[J]. Control Engineering Practice, 2001(9): 367-373.
- [5] 包纲鉴,陈锦珍. 卷扬垂直升船机水动力学一些问题的探讨[J]. 水利水运科学研究, 1998(4): 397-403. (BAO Gangjian, CHEN Jinzhen. Probe into hydrodynamics problems of hoisting vertical ship lift[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1998(4): 397-403. (in Chinese))
- [6] 卫增福,王怀茂. 岩滩升船机现场调试的若干问题[J]. 红水河, 1999, 18(4): 96-98. (WEI Zengfu, WANG Huaimao. Study on some problems in the adjustment of Yantan ship lift[J]. Hongshui River, 1999, 18(4): 96-98. (in Chinese))
- [7] 王新,胡亚安,黄群,等. 升船机船厢防撞装置工作特性原型观测[J]. 水运工程, 2016(12): 204-208. (WANG Xin, HU Ya'an, HUANG Qun, et al. Prototype observation on performance characteristics of anti-impact gear of ship lift chamber[J]. Port and Waterway Engineering, 2016(12): 204-208. (in Chinese))
- [8] WANG Xin, LUO Shaoze, HU Ya'an, et al. High-speed flow erosion on a new roller compacted concrete dam during construction [J]. Journal of Hydrodynamics, 2012, 24(1): 32-38.
- [9] WANG Xin, LUO Shaoze, LIU Guangsheng, et al. Abrasion test of flexible protective materials on hydraulic structures[J].

Water Science and Engineering, 2014, 7(1): 106-116.

- [10] WANG Xin, HU Ya'an, LUO Shaoze. Prototype observation and influencing factors of environmental vibration induced by flood discharge[J]. Water Science and Engineering, 2017, 10(1): 78-85.
- [11] 王敬鹏, 胡亚安, 李中华, 等. 下水式升船机船厢底缘形式研究[J]. 水运工程, 2016(12): 176-182. (WANG Jingpeng, HU Ya'an, LI Zhonghua, et al. Study on bottom type of chamber for submerge ship chamber ship lift[J]. Port and Waterway Engineering, 2016(12): 176-182. (in Chinese))
- [12] 程璐, 王本龙, 胡亚安, 等. 下水式升船机船厢入水过程三维数值模拟技术[J]. 水运工程, 2016(12): 169-175. (CHENG Lu, WANG Benlong, HU Ya'an. 3D numerical simulation technology on the water-entry process of navigation chamber for chamber-launching ship lift[J]. Port and Waterway Engineering, 2016(12): 169-175. (in Chinese))
- [13] 王敬鹏, 胡亚安, 李中华, 等. 船池形式对下水式升船机船厢出水过程水动力特性的影响[J]. 水运工程, 2017(9): 9-13. (WANG Jingpeng, HU Ya'an, LI Zhonghua, et al. Influence of chamber tank type on hydrodynamic characteristics of submerge ship chamber ship lift in process of ship chamber rising from water[J]. Port and Waterway Engineering, 2017(9): 9-13. (in Chinese))
- [14] 李炎, 刘红华, 迟杰, 等. 升船机船厢出入水中间渠道内水力特性试验[J]. 水道港口, 2007, 28(1): 38-43. (LI Yan, LIU Honghua, CHI Jie, et al. Study on hydraulic characteristics for ship lift chamber falling and rising from water in the intermediate channel[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(1): 38-43. (in Chinese))

Prototype monitoring of mechanical characteristics of large ship lift chamber filling and outleting of water

WANG Xin^{1,2}, HU Ya'an^{1,2}, LI Zhonghua^{1,2}, YAN Xiujun^{1,2}

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

Abstract: The complicate fluid-solid interactions exist in the process of filling and outleting of water for the chamber of launching-typed ship lift, which is a critical technological problem that needs related researches and engineering practice. In view of the mechanical problems of the filling and outleting of the water for the Jinghong hydraulic ship lift chamber, the systematical prototype monitoring is conducted for the first time to study the loading-deformation characteristics of the ship chamber, the changing rules of the levelness of the chamber and the synchronizing shaft torque, the vibration response and noise of the chamber, and the slamming force and absorption force on the chamber bottom plate. Meanwhile, the influences of the running speed of the chamber is investigated. The measured results show that the maximum bending deformation of the ship chamber is about 2.7 cm, the longitudinal inclination of the vessel is less than 20 mm, the maximum torque variation is about 162 kN · m, and the vibration, noise and absorption force of the vessel are not large because of the significant changes in the side load of the ship chamber. For the filling and outleting of the water at different speeds, the variation rules of all the parameters are basically consistent. But the fluctuation of the parameters increases with the increase of the chamber speed. After water filling into the ship chamber, the situation of the ship lift is completely recovered to the state before outleting the water, and the process of the filling and outleting of the water for the chamber is very stable and convergent. The flash start moment to filling the water and the moment of the bottom plate breaking away from the water are the key point in the process. The measured results not only provide a basis for the safe operation of the Jinghong ship lift, but also provide technical references for the design of other similar ship lifts.

Key words: chamber-launching ship lift; chamber; filling and outleting of water; force characteristics; prototype observation