

## · 航道及通航建筑物 ·



# 构皮滩钢丝绳卷扬下水式升船机 受力特性观测分析

谢庭强<sup>1,2</sup>, 王 新<sup>1</sup>, 黄金根<sup>3</sup>, 陈小虎<sup>4</sup>

(1. 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;  
2. 河海大学, 江苏南京 210024; 3. 杭州国电机械设计研究院有限公司, 浙江杭州 310030;  
4. 长江勘测规划设计研究有限公司, 湖北武汉 430010)

**摘要:** 构皮滩第 1、3 级升船机是目前世界上建成的最大的钢丝绳卷扬下水式垂直升船机。通过原型观测分析升船机出入水运行受力特性, 验证升船机各项创新设计。结果表明, 船厢按设计速度出入水运行平稳收敛, 溢流孔风速、附加水动力荷载、船厢应力与变形、卷筒扭矩与应力等参数均在预期和安全范围内稳定变化, 船厢排气孔布置、底铺板楔形体等设计取得良好效果; 在设计运行速度内, 船厢出入水速度对升船机受力特性影响不大, 出入水速度尚有一定优化空间。

**关键词:** 钢丝绳卷扬式升船机; 船厢下水; 受力特性; 原型观测

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0084-07

## Observation of mechanical characteristics of wire rope hoist ship lift with chamber entering water in Gouptan

XIE Tingqiang<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, HUANG Jingren<sup>3</sup>, CHEN Xiaohu<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Navigation Structures Technology, Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;  
2. Hohai University, Nanjing 210024, China;  
3. Hangzhou State Power Machinery Research & Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China;  
4. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Ship lifts of first step and third step in Gouptan are the largest wire rope hoist vertical ship lifts with chamber entering water built in the world at present. This paper investigates the mechanical characteristics in the processes of chamber getting in and out water by prototype observation, and verifies some innovation designs of the ship lift. The results indicate that the ship lift runs smoothly and stably when the chamber gets in and out of water with design speed. The parameters, such as wind speed of the overflow holes, hydraulic load on the chamber, chamber stress and deformation, rolling drum torque and stress, stably change within the expected and safety range. Good results are achieved in the design of the blow holes and the wedge shape of bottom plate of the chamber. Within the design operation speed, the getting in and out of water speeds of the chamber have little impact on the mechanical characteristics of the ship lift, and there is still some room to optimize the chamber running speed.

**Keywords:** wire rope hoist ship lift; chamber entering water; mechanical characteristics; prototype observation

近年来, 我国现代化大型升船机发展迅速, 先后建成多座享誉世界的升船机工程, 包括规模

最大的三峡升船机、我国原创的景洪水力式升船机、首座连续 3 级构皮滩升船机等, 其中仅构皮

收稿日期: 2022-07-06

作者简介: 谢庭强 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工水力学。

通讯作者: 王新 (1983—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为水工水力学。E-mail: xwang@nhri.cn

滩升船机就创造了7项世界之最。多座世界级大型升船机的建成使我国的升船机技术水平达到了国际领先或先进地位。为适应上游高达40 m的水位变幅和下游非恒定流水位波动, 构皮滩第1、3级升船机采用了钢丝绳卷扬船厢下水式, 将我国特有的钢丝绳卷扬下水式升船机从250吨级提高到了500吨级, 攻克了一系列关键技术难题, 实现了升船机领域的重要技术创新。构皮滩升船机于2021年完成调试进入了试通航运行, 本文基于现场试验观测, 分析钢丝绳卷扬下水式升船机出入水受力特性, 不仅为升船机自身的运行管理提供依据, 也可为未来沙沱二线1 000吨级钢丝绳卷扬下水式升船机设计与研究提供参考。

## 1 下水式升船机关键问题与研究进展

### 1.1 关键技术难题

下水式升船机为船厢进入船厢池水中、直接开启船厢门与引航道快速对接的一种升船机形式, 具有流程简单、对接与解除灵活、无需布置下闸首等突出优点, 能够较好地适应我国高坝上下游水位大变幅、大变率的升船机运行条件, 保障升船机的对接安全和运行效率。从实际应用情况看, 下水式升船机船厢对接、船舶出厢共耗时3~4 min, 远少于一般不下水式升船机对接所需的15 min左右, 应对下游水位变化的优势明显。当然, 下水式升船机也存在一系列关键技术难题, 主要体现在以下方面:

1) 主提升设备布置。船厢入水对接过程受浮力作用, 船厢侧的拉力会大幅减小, 以构皮滩第1、3级升船机为例, 升船机空中运行时船厢侧拉力约33 MN, 入水后船厢侧拉力仅约8 MN, 前后拉力变化约25 MN, 合理布置主提升电机、减速器、提升卷筒, 尤其是设计合适的大型减速器以满足船厢出入水过程荷载的巨大变化, 是关键难题之一。

2) 船厢受力安全与稳定。船厢出入水过程中, 荷载的大幅变化会引起船厢的变形和应力,

同时船厢底部需要排气和补气, 船厢结构入水拍击水面、出水与水体脱离会产生一定的拍击力和吸附力作用于船厢, 保障船厢出入水受力安全和稳定是关键难题之一。

3) 船厢出入水运行。针对船厢出入水荷载大变幅、流固耦合作用等关键技术问题, 保障船厢出入水运行安全, 合理确定船厢出入水运行速度和分阶段变速运行方式也至关重要。

### 1.2 研究进展

岩滩水电站250吨级垂直升船机是我国第1座船厢下水式卷扬提升式升船机, 其设计、制造、安装及现场调试在国内外均属首次。陆景孝<sup>[1]</sup>探讨下水与不下水两种形式升船机主要特点, 提出选型原则; 马仁超等<sup>[2]</sup>对水力式升船机关键设计技术进行论述, 包括船厢出入水设计原则; 胡亚安等<sup>[3]</sup>总结我国大型升船机研究进展, 包括下水式升船机的研究应用情况; 在乌江构皮滩下水式升船机研究阶段, 南京水利科学研究院曾建立1:10升船机整体物理模型及1:20船厢出入水概化物理模型, 对下水式升船机船厢结构体形进行试验研究, 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<sup>[4]</sup>, 以及船池形式对船厢出入水过程的水动力荷载特性的影响<sup>[5]</sup>; 郭乙良<sup>[6]</sup>系统地研究垂直升船机出水过程中下吸力的变化特性, 分析多种因素对船厢出水过程中厢体底部下吸力特性的影响; 程璐等<sup>[7]</sup>采用流体体积VOF模型、 $k-\varepsilon$ (紊动能-耗散率)湍流模型及动网格技术, 对下水式升船机船厢入水过程的水动力学特性进行三维数值模拟。在下水式升船机应用方面, 卫增福等<sup>[8]</sup>总结岩滩升船机现场调试过程中的若干关键问题; 王新等<sup>[9]</sup>系统介绍景洪水力式升船机船厢出入水过程受力特性; 李学义等<sup>[10]</sup>通过实船试验研究, 提出景洪水力式升船机下水式船厢入水对接安全控制标准。从已有的研究看, 岩滩250吨级钢丝绳卷扬下水式升船机相关的研究观测资料很少, 景洪500吨级水力式升船

机船厢出入水与钢丝绳卷扬式升船机在运行受力特性方面存在一定差异。因此,结合构皮滩第1、3级升船机,开展500吨级钢丝绳卷扬下水式升船机受力特性观测分析具有重要意义。

## 2 构皮滩下水式升船机

### 2.1 主提升机

主提升机包括8套卷扬提升机构、2套安全制动系统、1套机械同步轴系统等。8套卷扬提升机构间通过机械同步轴连接,形成封闭的同步轴系统,每套卷扬提升机构由1台315 kW交流变频电动机、1台减速器、2套卷筒组、2套安全制动器、1套工作制动器等设备组成。卷筒轴与减速器低速轴通过联轴器连接,卷筒名义直径4.6 m。每个卷筒上各绕有7根直径72 mm的钢丝绳,其中4根提升绳的一端缠绕并通过压板固定在卷筒上,另一端通过钢丝绳调节组件、液压均衡油缸与船厢连接;另3根转矩平衡绳在卷筒上反向缠绕,与提升绳共用工作绳槽,一端通过压板固定在卷筒上,

另一端通过钢丝绳调节组件与平衡重块相连。平衡重总质量2 300 t,分成16组,布置在船厢室两侧的16个平衡重井内。主提升机最大提升力18 MN(船厢出入水时),额定提升力12 MN(船厢在空气中),船厢在空气中的正常提升速度为8 m/min,出入水时正常提升速度为0.8 m/min。

### 2.2 承船厢

承船厢为钢质槽型结构,有效水域尺寸为59.0 m×11.7 m×2.5 m(长×宽×水深),外形尺寸为71.0 m×16.0 m×6.3 m(长×宽×厢头高),船厢结构、设备加厢内水体总质量约3 300 t。船厢两端各设一扇卧倒式工作闸门,船厢门内侧分别设有1套防撞装置。在船厢两侧对称布置4套对接锁定装置及4套船厢导向装置,在船厢中部设有2套对接顶紧结构。

根据前期试验研究成果,为降低船厢底部出入水附加水动力荷载,在船厢底部梁格腹板、船厢两侧铺板顶部均布置通气孔,同时,船厢底铺板采用楔形体,与水平方向夹角3°,见图1。

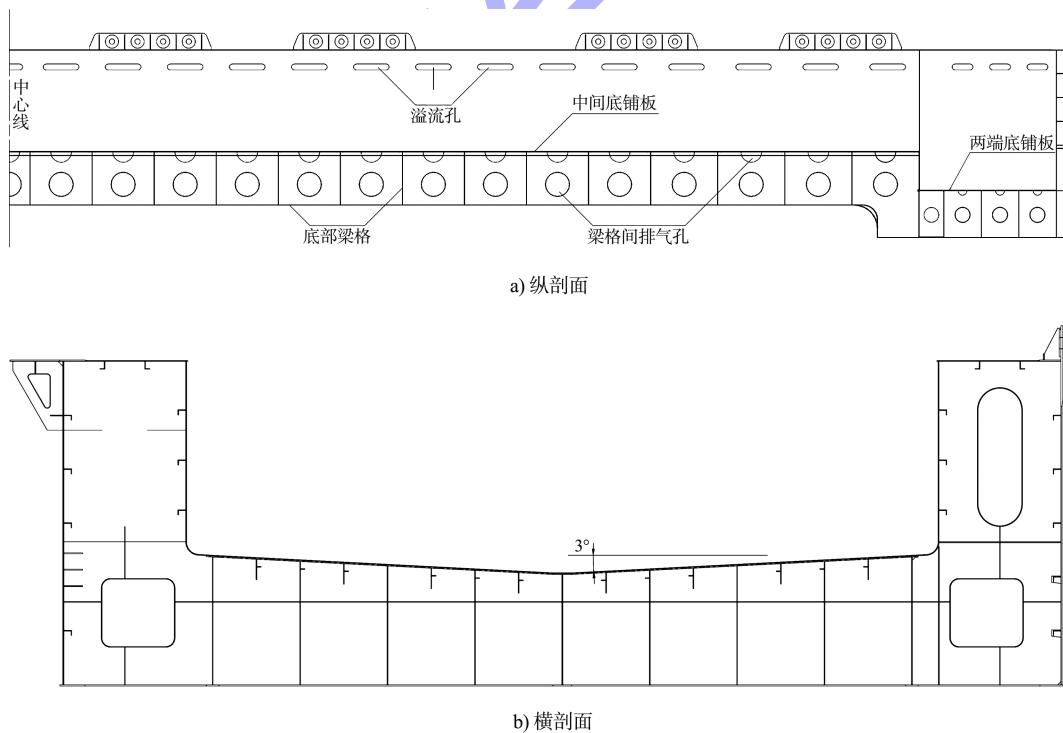


图1 船厢结构

### 3 船厢出入水受力特性

#### 3.1 船厢补排气及水动力荷载

##### 3.1.1 测点布置

在船厢中部一侧连续 4 个溢流孔布置 4 个风速测点, 即  $A_1 \sim A_4$ , 观测船厢出入水过程补气、

排气情况; 船厢中间铺板、两端铺板、主横梁和主纵梁翼缘的下表面布置了 5 个压力测点, 即  $P_1 \sim P_5$ , 观测船厢出入水过程中底部附加水动力荷载特性, 主要包括入水时的拍击力和出水时的吸附力。测点布置见图 2。

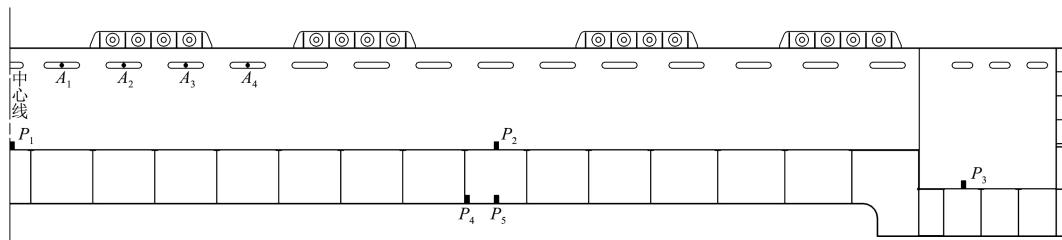


图 2 风速及压力测点布置

##### 3.1.2 船厢补排气效果

从现场船厢出入水运行来看, 船厢运行稳定, 底部排气补气顺畅, 无排气噪声、振动等现象。船厢以空气中 4 m/min、水中 0.8 m/min 的速度出入水过程溢流孔的风速过程线见图 3。可以看出, 船厢在水中运行时排气孔的风速变化过程稳定清晰, 在船厢底部梁格出入水阶段, 船厢底部排气、补气量较大, 溢流孔风速稳定在 0.7~0.9 m/s; 在船厢铺板入水后或铺板出水前, 船厢排出气体量相对较小, 溢流孔风速基本稳定在 0.2 m/s 左右; 在船厢出水过程中最大风速冲高到约 1.6 m/s, 主要因为船厢底部梁格尚未离开水面, 船厢已加速上行, 风速增大 1 倍, 但未出现通气噪声。船厢铺板溢流孔、外部通气孔总面积约  $16.82 \text{ m}^2$ , 溢流孔面积占比近 90%, 按船厢的出入水运行速度计算通气孔的理论风速, 与实测值吻合很好。可见, 设计出入水运行速度下, 实测溢流孔风速较小, 船厢通气孔布置总体合理, 尤其溢流孔设计, 不仅可以自动溢流出船厢内多余的水体, 还发挥了很好的排气、补气作用。

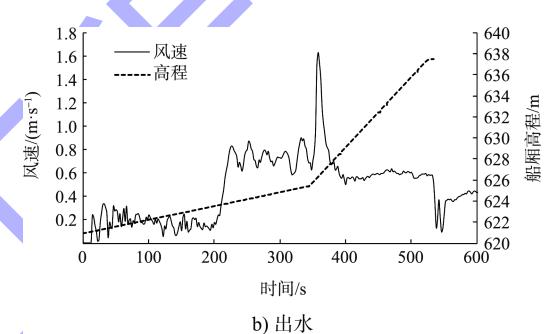
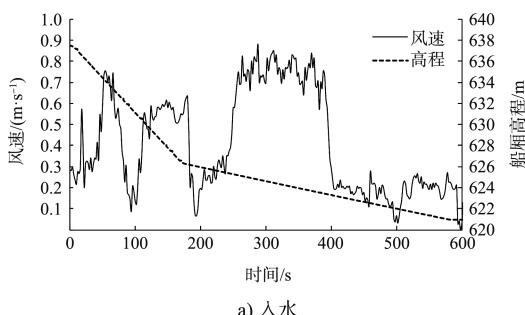
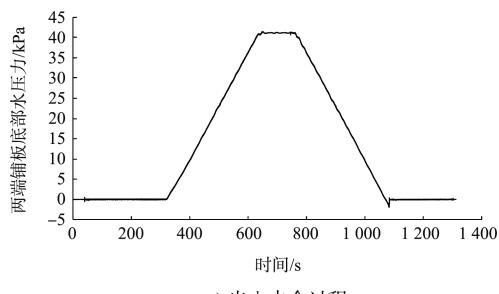


图 3 船厢出入水溢流孔风速

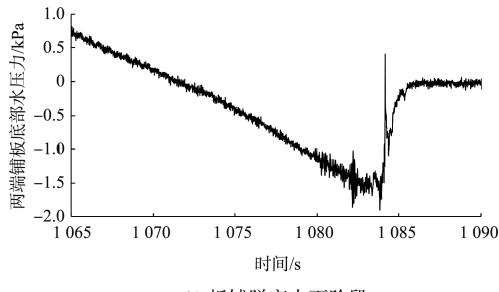
##### 3.1.3 附加水动力荷载

现场观测发现, 在设计速度 0.8 m/min 出入水条件下, 除了两端铺板在出水时刻出现一定吸附力外, 各测点入水、出水均无附加水动力荷载。船厢入水、出水过程两端铺板底部水动力荷载见图 4。由于船厢两端铺板为面积相对较大的平板, 不像中间铺板带有 3° 的倾角, 在平板与水面脱离时产生了近 -2 kPa 的负压, 即约 200 kN 的吸附力作用在船厢上, 约为船厢出入水荷载总变幅的 0.8%; 在与水面脱离时, 在负压的作用下, 周围水体向船厢底部流动, 对底铺板形成了短暂的冲击, 如图 4 中的压力脉冲, 总体上看, 冲击力较小, 对船厢运行无影响, 该现象与模型试验中的现象一致。从附加水动力荷载可知, 船厢两端底铺板体形尚有一定的优化空间。





a) 出入水全过程



b) 板铺脱离水面阶段

图 4 船厢两端铺板底水压力

### 3.2 船厢受力变形

#### 3.2.1 船厢应力

在船厢一侧顶部对称布置 5 个应力测点, 如图 5 所示, 观测船厢在出入水过程中的应力变化规律。船厢按设计速度出入水过程船厢应力变化过程线见图 6。可以看出, 船厢入水和出水过程应力变化相反, 全行程运行后, 各测点应力回到初始状态, 船厢出入水运行稳定收敛; 船厢入水过程, 船厢应力总体减小, 出水反之; 在船厢出入水过程中船厢两端应力变化基本一致, 约 10 MPa, 中间 3 个测点应力变化基本一致, 约 30 MPa。可见, 船厢出入水过程应力变化并不大, 应力变化规律及数值大小与景洪升船机总体一致。

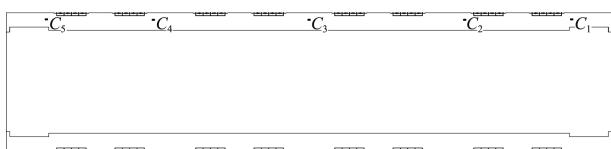


图 5 船厢应力测点

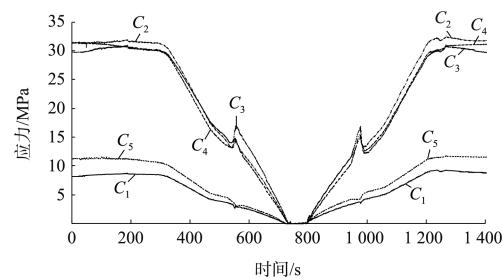


图 6 船厢应力变化过程线

#### 3.2.2 船厢变形

船厢入水过程所受浮力不断增大, 船厢侧拉力逐渐减小, 相当于从船厢带水 2.5 m 逐渐变到空厢状态, 船厢发生较大变形, 从纵向弯曲上拱恢复到基本水平状态, 船厢出水过程反之。出入水过程船厢纵向变形量见图 7, 船厢出入水变形量大小一致、方向相反, 纵向挠度变化约 28 mm, 船厢出入水过程变形特性符合一般规律, 挠度变化值与计算分析值基本一致。

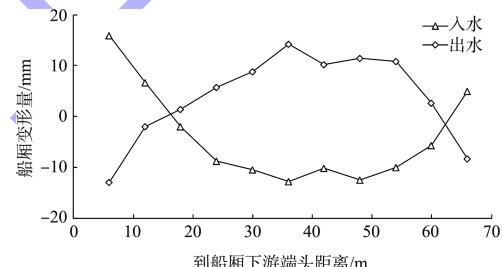


图 7 船厢变形量

### 3.3 卷筒受力

在卷筒的轴头、卷筒轴中部布置扭矩测点 ( $T_a$  和  $T_b$ ), 在卷筒轴和卷筒内壁中部布置应力测点 ( $S_a$ 、 $S_b$  和  $S_r$ ), 测量提升卷筒的受力特性, 各测点位置见图 8。

钢丝绳卷扬下水式升船机为部分平衡, 在空气中运行时, 船厢侧重力大于平衡重侧, 在完全入水后, 平衡重侧重力大于船厢侧拉力, 正反方向的不平衡荷载均由电机克服。构皮滩升船机船厢出入水过程中不平衡荷载变化较大, 电机出力历经变向。船厢按设计速度出入水, 卷筒轴头和轴中扭矩变化过程见图 9, 卷筒轴和卷筒内壁应力

变化过程见图 10, 因观测只能获得扭矩与应力的变化值, 故船厢在空中开始下降前对扭矩和应力清零。可以看出, 卷筒扭矩和应力在全行程运行后又回到初始状态, 卷筒受力变化稳定收敛。出入水过程中, 卷筒轴头扭矩变化显著, 最大变化约  $3200 \text{ kN}\cdot\text{m}$ , 卷筒轴与卷筒共同承担总的扭矩变化, 其中卷筒轴扭矩最大变化约  $500 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ; 卷筒轴中部相对(相隔  $180^\circ$ )2个测点应力变化对称, 大小接近, 表明卷筒轴主要表现为弯曲应力, 基本没有轴向应力, 空中最大弯曲应力约  $60 \text{ MPa}$ , 船厢入水后应力变幅明显减小; 卷筒应力总体较小, 运行全过程在  $\pm 15 \text{ MPa}$  范围内变化。卷筒受力与设计值吻合较好, 应力均在安全容许范围内。

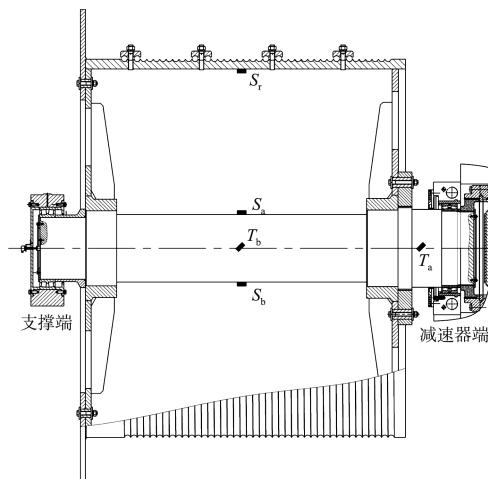


图 8 卷筒测点布置

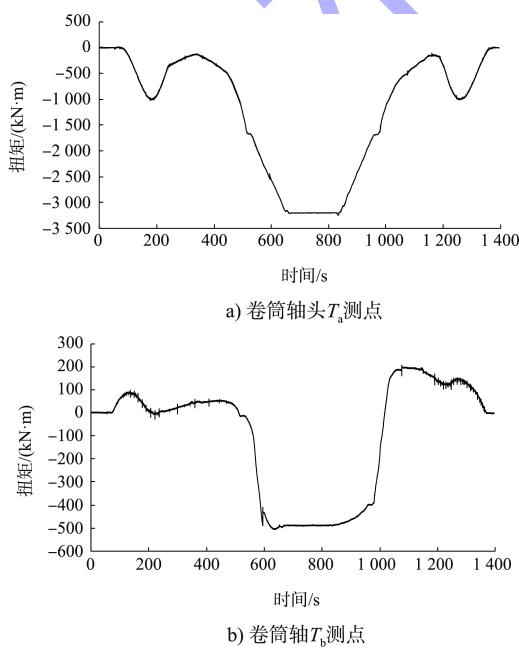
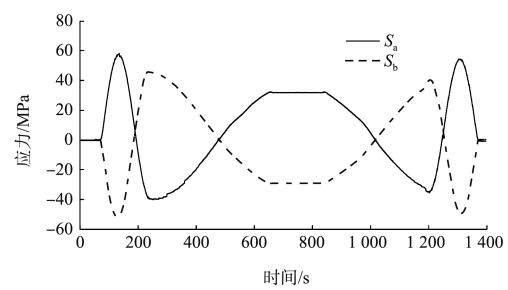
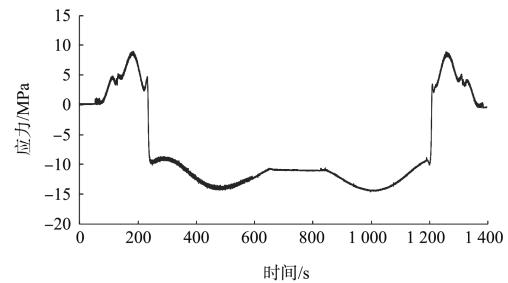


图 9 卷筒扭矩

a) 卷筒轴中部  $S_a$ 、 $S_b$  测点b) 卷筒内壁  $S_r$  测点

#### 4 运行速度影响

##### 4.1 补排气风速

为考察船厢出入水运行速度的影响, 以不超过设计运行速度为原则, 在设计速度  $0.8 \text{ m/min}$  的基础上, 开展  $0.6$  和  $0.4 \text{ m/min}$  速度出入水工况试验。

在 3 个不同出入水运行速度下, 主要阶段溢流孔风速见图 11。可以看出, 入水排气和出水补气风速与出入水速度呈线性关系, 出入水速度越快, 溢流孔的风速越大, 从实测数据看, 出水补气风速略小于入水排气。总体上看, 设计出入水速度下, 补排气风速较小。

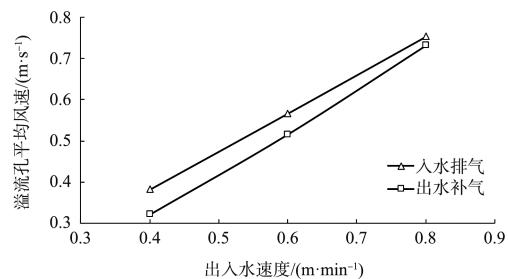


图 11 溢流孔风速与出入水速度关系

##### 4.2 附加水动力荷载

不同出水速度工况下, 船厢两端铺板底部水动力荷载过程线对比见图 12。可以看出, 不同速度下, 铺板底部均存在一定负压, 随着出水速度

的降低, 底部最小时均压力有所增大, 短暂的冲击荷载有所减弱, 总体上看, 出入水速度影响不大。

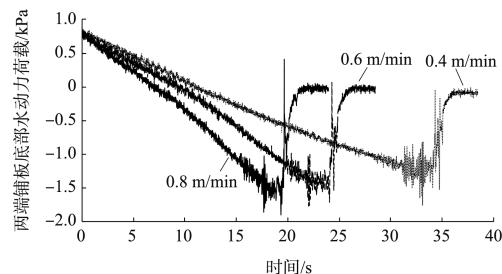


图 12 不同出水速度工况水动力荷载

#### 4.3 结构应力

不同速度出入水船厢各测点的应力变化见表 1。可以看出, 在设计及以下出入水速度条件下, 船厢应力受出入水速度影响微小, 卷筒应力类似, 不再赘述。

表 1 船厢应力变化

出入水速度/ (m·min <sup>-1</sup> )	应力/MPa				
	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
0.4	9.76	31.71	30.38	30.78	11.47
0.6	9.32	32.77	30.99	31.37	11.83
0.8	9.76	32.88	31.13	31.64	12.25

### 5 结论

1) 本文通过原型观测掌握了目前世界上最大的钢丝绳卷扬下水式升船机——构皮滩第 1 级升船机的运行受力特性, 在船厢出入水过程各项参数变化平稳收敛, 船厢排气孔布置、底铺板 3°楔形体等设计取得了良好的效果。

2) 在 0.8 m/min 设计出入水速度下, 实测船厢溢流孔主要补排气阶段平均风速约 0.8 m/s, 与理

论值吻合较好, 仅在船厢两端铺板出水时底部产生近 -2 kPa 的负压; 船厢应力变幅约 30 MPa, 挠度变化约 28 mm; 卷筒轴头扭矩变化达 3 200 kN·m, 与荷载变化和电机出力吻合较好, 卷筒轴主要受到弯曲应力, 最大约 60 MPa。

3) 在设计出入水运行速度内, 船厢出入水速度对各项参数影响不大, 出入水速度尚有一定的优化空间。

### 参考文献:

- [1] 陆景孝. 钢丝绳卷扬平衡重式垂直升船机若干设计问题探讨[J]. 红水河, 1999, 18(4): 13-14, 30.
- [2] 马仁超, 李自冲, 曹以南, 等. 水力式升船机的特点及关键技术[J]. 水运工程, 2017(12): 38-41.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 郭乙良. 大型升船机承船厢离水下吸力变化规律及指标的特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 李学义, 胡亚安, 王新, 等. 景洪水力式升船机下游对接过程实船试验研究[J]. 水运工程, 2017(7): 17-21.

(本文编辑 王璁)

(上接第 38 页)

- [9] 刘晓亮, 许栋, 黄雄合, 等. 墩柱绕流水动力特性实验和大涡模拟研究[J]. 港工技术, 2017, 54(6): 20-23.
- [10] 邱远喜, 肖海珠, 李华云, 等. 援马尔代夫中马友谊大桥深水基础设计[J]. 桥梁建设, 2018, 48(6): 93-98.
- [11] 周华兴, 孙玉萍. 墩柱受水流作用时阻力系数的试验

- [9] 刘晓亮, 许栋, 黄雄合, 等. 墩柱绕流水动力特性实验和大涡模拟研究[J]. 港工技术, 1986(1): 14-19, 39.
- [12] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

(本文编辑 王传瑜)